

برآورد تغذیه آب زیرزمینی در فلات مرکزی ایران با استفاده از داده‌های GRACE، ERA5

چکیده

آب‌های زیرزمینی اصلی‌ترین منبع تأمین آب در فلات مرکزی ایران هستند، اما برداشت‌های بی‌رویه و تغذیه طبیعی محدود، این منابع را با بحران مواجه ساخته است. در این پژوهش، تغذیه سالانه آب زیرزمینی در فلات مرکزی ایران با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای GRACE (برای تغییرات ذخیره آب زمینی)، داده‌های بازتحلیل ERA5-Land (برای بارش و تبخیر-تعرق واقعی) و مشاهدات زمینی برای دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۸ برآورد شد. نتایج نشان داد میانگین تغذیه سالانه در بخش عمده فلات مرکزی بین صفر تا ۴ میلی‌متر است، در حالی که در دامنه‌های البرز و زاگرس تا ۱۳۴ میلی‌متر در سال می‌رسد. صحت‌سنجی با داده‌های ایستگاهی (ضریب همبستگی ۰٫۸۱) و پیزومتری دشت قزوین، قابلیت بالای داده‌های ماهواره‌ای را تأیید کرد. تداوم برداشت‌های کنونی، ناپایداری شدید منابع آب زیرزمینی را تشدید خواهد کرد.

واژگان کلیدی: تغذیه آب زیرزمینی، GRACE، ERA5، مدیریت منابع آب، فلات مرکزی ایران

Assessment of Groundwater Recharge in the Central Plateau of Iran Based on GRACE and ERA5-Land Datasets

Abstract

Groundwater is the primary water source in Iran's Central Plateau; however, excessive abstraction and limited natural recharge have led to a severe water crisis. In this study, annual groundwater recharge was estimated by integrating GRACE satellite data (for terrestrial water storage changes), ERA5-Land reanalysis data (for precipitation and actual evapotranspiration), and ground-based observations over the period 2004–2018. Results showed that mean annual recharge across most of the Central Plateau ranges from 0 to 4 mm, while reaching up to 134 mm yr⁻¹ along the Alborz and Zagros foothills. Validation against synoptic station data (correlation coefficient = 0.81) and piezometric observations from Qazvin Plain confirmed the high reliability of satellite-based datasets. Continuation of current abstraction rates will exacerbate the severe unsustainability of groundwater resources in the region.

Keywords: Groundwater recharge, GRACE, ERA5, Central Plateau of Iran, Water resources management

مقدمه

سیستم‌های آب زیرزمینی مخزن غالب و منبع استراتژیک ذخیره آب شیرین سیاره را تشکیل می‌دهند (Foster, et al., 2013). این مخازن از نقطه نظر زمان تغذیه و عمق مخزن بین مناطق خشک و مرطوب متفاوت است. در مناطق مرطوب، با توجه به میزان و دوام بارندگی، عملیات تغذیه سفره‌های زیرزمینی در طول سال اتفاق می‌افتد. عمده سفره‌های آب‌های زیرزمینی سطحی بوده و از نقطه نظر برداشت و پتانسیل تغذیه از شرایط نسبتاً پایدار برخوردار می‌باشند. در مناطق خشک میزان تغذیه با توجه به میزان بارندگی و فصول خشک به کندی اتفاق می‌افتد و اکثر آبخوان‌ها در درون لایه‌های عمیق تر زمین بوجود آمده‌اند و ذخیره آبی آنها حتی نتیجه نفوذ دهه‌ها، صدها یا هزاران سال پیش اتفاق افتاده است (Baalousha, et al., 2018). مطالعات ایزوتوپی نشان می‌دهد عمر عمده این آبخوان‌ها به بیشتر از ۵۰۰۰ سال می‌رسد که در سال‌های مرطوب در این مناطق شکل گرفته‌اند، لذا استفاده از عنوان منابع آبی تجدیدپذیر در مقایسه با آبخوان‌های مناطق مرطوب، قابل مناقشه و شک و تردید است حتی می‌توان این منابع را آب‌های فسیلی نامید (Taylor, et al. 2012). در حال حاضر، عمده تحقیقات در زمینه توسعه پایدار آب‌های زیرزمینی بر شناسایی و پیش‌بینی پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی متمرکز است (Adiat et al. 2012; Jhariya et al. 2016; Machiwal et al. 2015; Mandal et al. 2016; Sallwey et al. 2019; Singh et al. 2018). مطالعات متعدد نشان داده است که تخمین میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی بستگی به متد و روش مطالعه دارد (Walker, et al., 2019). میزان تغذیه تحت تأثیر متغیرهایی همچون بارش، تبخیر-تعرق، ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و شرایط اقلیمی منطقه قرار دارد (Segobaetso et al., 2022). در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای (مانند^۱ GRACE) و بازتحلیل‌های جوی (نظیر ERA5) در کنار داده‌های ایستگاهی، امکان پایش دقیق‌تر و جامع‌تر این فرآیند را فراهم ساخته است (Amazirh et al., 2024). از آنجا که ایستگاه‌های هواشناسی پراکندگی مکانی محدودی دارند و پوشش کامل منطقه را تضمین نمی‌کنند، ترکیب داده‌های بازتحلیل جوی و ماهواره‌ای با داده‌های مشاهداتی (ایستگاهی و میان‌یابی کریجینگ) می‌تواند تصویری کامل‌تر از وضعیت تغذیه آب زیرزمینی را ارائه دهد. امروزه امکان پایش تغییرات ذخیره کل آب زمینی (TWS) در مقیاس منطقه‌ای و جهانی با پیشرفت ماهواره‌های GRACE و GRACE-FO فراهم شده است. این داده‌ها همراه با مدل‌های بازتحلیل جوی مانند ERA5-Land، ابزار قدرتمندی برای برآورد تغذیه آب زیرزمینی در مناطق کم‌داده فراهم کرده‌اند (Tapley et al., 2019; Mousavimehr & Kavianpour, 2025). استفاده از این روش‌ها در مناطق خشک نشان داده است که تغذیه آبخوان‌ها اغلب رفتار آستانه‌ای و غیرخطی دارد. به این معنا که تنها بارش‌های شدید یا رویدادهای متمرکز، نفوذ عمقی قابل‌توجهی ایجاد می‌کنند. (Jasechko & Taylor, 2024).

در پژوهشی Scanlon و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که مدل‌های جهانی هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی روندهای بلندمدت تغییرات ذخیره آب زمینی دقت کافی ندارند و معمولاً شدت افزایش یا کاهش ذخیره آب، به‌ویژه آب زیرزمینی، را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. در حالی که داده‌های ماهواره‌ای GRACE این تغییرات را به‌طور قابل‌اعتمادتری نشان می‌دهند.

مطالعه Wu و همکاران (۲۰۱۹) بر تعیین نرخ تغذیه آب‌های زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای با بهره‌گیری همزمان از داده‌های ماهواره‌ای GRACE (برای تغییرات ذخیره آب کل زمین) و داده‌های مدل GLDAS (برای برآورد مؤلفه‌های سطحی مانند تبخیر و تعرق) تمرکز دارد. این رویکرد ترکیبی به محققان امکان می‌دهد تا سهم دقیق‌تر عوامل مختلف در تجدیدپذیری منابع آب زیرزمینی را شناسایی کرده و درک جامع‌تری از دینامیک آب در مقیاس بزرگ به دست آورند. در تکمیل این رویکرد، شناخت فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی نیز ضروری است؛ به عنوان مثال، در آبخوان دشت ایرانشهر، مطالعات نشان داده است که تکامل هیدروژئوشیمیایی تحت تأثیر انحلال کانی‌های تبخیری و تبادل یونی رخ می‌دهد و همراه با کاهش سطح آب زیرزمینی، منجر به افزایش شوری و تغییر تیپ آب می‌گردد (Jahanshahi et al., 2023).

مطالعات متعددی از جمله پژوهش Voss و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از داده‌های GRACE، کاهش چشمگیر ذخایر آب زیرزمینی را در خاورمیانه و حوضه‌های فرامرزی منطقه، از جمله ایران، ترکیه و عراق، گزارش کرده‌اند. نتایج این تحقیقات نشان داد که در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ میلادی، بیش از ۱۴۴ کیلومتر مکعب از آب ذخیره‌شده در آبخوان‌های منطقه کاهش یافته که بخش عمده‌ی آن ناشی از برداشت‌های بی‌رویه در بخش کشاورزی بوده است. این یافته‌ها، توجه محققان را به استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای به‌عنوان ابزار مکمل داده‌های زمینی جلب کرده است.

^۱ Gravity Recovery and Climate Experiment

پژوهش‌های دیگر نیز با ترکیب داده‌های GRACE و مدل‌های بازتحلیل جوی مانند ERA-Interim، MERRA و ERA5-Land، تلاش کرده‌اند تا تفکیک مؤلفه‌های بیلان آبی شامل بارش، تبخیر-تعرق و تغییرات آب زیرزمینی را ممکن سازند (Rodell et al., 2018; Save et al., 2016).

در تحقیقات انجام شده در فلات‌های خشک جهان، مانند استرالیا، خاورمیانه و شمال آفریقا، و همچنین اروپا ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و زمینی نشان می‌دهد که بارش و ویژگی‌های خاک بیشترین تأثیر را در کنترل میزان تغذیه دارند و مناطق مرکزی و کم‌بارش به دلیل محدودیت نفوذ خاک، تقریباً تغذیه قابل توجهی ندارند (Richey et al., 2015; Coelho et al., 2017; Xanke et al., 2022). همچنین، تحلیل‌های فضایی نشان داده است که دشت‌های مرکزی اغلب بارش‌های دریافتی را پیش از نفوذ کامل از دست می‌دهند و تنها بخش محدودی از آب وارد ذخایر زیرزمینی می‌شود (Singh et al., 2020).

در ایران و خاورمیانه، مطالعات مشابه محدود هستند. تحقیقات پیشین عمدتاً مبتنی بر داده‌های ایستگاهی یا مدل‌های هیدرولوژیکی محلی بوده‌اند و کمتر پژوهشی با تلفیق GRACE، ERA5 و داده‌های زمینی اقدام به برآورد کمی تغذیه کرده است (Azimi et al., 2023). در همین زمینه، ارزیابی تغذیه آبخوان دشت گرمسار با روش‌های کلاسیک نوسانات سطح ایستابی و پیسکوپو نشان داده است که این روش‌ها با وجود دقت محلی، قابلیت تعمیم به مقیاس منطقه‌ای را ندارند (Fijani et al., 2023).

در پژوهشی با هدف پایش خشکسالی آب زیرزمینی در ایران، Shakeri و همکاران (۲۰۲۵) از داده‌های GRACE و مدل‌های یادگیری ماشین برای ارزیابی این پدیده استفاده کردند. نتایج این تحقیق، با تأکید بر قابلیت اطمینان داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های یادگیری ماشین در پایش خشکسالی آب زیرزمینی، می‌تواند به سیاست‌گذاران در ارتقاء مدیریت منابع آب زیرزمینی یاری رساند. در حوضه‌های مختلف مانند دشت قزوین نیز به منظور بررسی روند کاهش آب زیرزمینی با رویکرد سنجش از دور صورت گرفته است (آزاده‌رنجبر و همکاران، ۱۴۰۴). همچنین، در سطح منطقه‌ای نیز پژوهش‌هایی نظیر کار نبوی و همکاران (۱۳۹۹) بر روند افت آب زیرزمینی در ایران تمرکز کرده‌اند. فلات مرکزی ایران یکی از پهنه‌های خشک و نیمه‌خشک کشور است که بیشترین فشار بر منابع آب زیرزمینی را تجربه می‌کند. محدودیت بارش، تبخیر بالا و برداشت‌های بی‌رویه سبب شده است که سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های این منطقه با افت شدیدی مواجه شود (Siyad and Mohamed, 2025). در چنین شرایطی، شناخت همزمان سه مؤلفه (۱) هندسه آبخوان و تغییرات حجم اشباع و غیراشباع، (۲) فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی حاکم، و (۳) تغذیه طبیعی آبخوان، برای مدیریت پایدار منابع آب حیاتی است (Mohammadzade et al., 2025; Jahanshahi et al., 2025). شکاف پژوهشی که در بالا ارائه شد نشان می‌دهد که یک مطالعه جامع با رویکرد ماهواره‌ای و بازتحلیل جوی می‌تواند به درک بهتر فرآیندهای کنترل‌کننده تغذیه در فلات مرکزی ایران کمک کند. با توجه به اهمیت حیاتی تغذیه آبخوان‌ها در پایداری منابع آب زیرزمینی و محدودیت داده‌های مشاهداتی، بهره‌گیری از داده‌های ترکیبی GRACE و ERA5-Land چارچوبی کارآمد برای برآورد تغذیه در مقیاس‌های وسیع فراهم می‌آورد. در این پژوهش، سعی شده است تا با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و مدل‌های بازتحلیل ERA5-Land، میزان تغذیه سالانه آب زیرزمینی در فلات مرکزی ایران در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۸ برآورد شود و از طریق مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و پیزومتری، دقت نتایج ارزیابی گردد. نتایج این مطالعه می‌تواند در بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی و تدوین سیاست‌های سازگار با شرایط اقلیمی خشک ایران نقش مؤثری ایفا کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

فلات مرکزی ایران یکی از شاخص‌ترین پهنه‌های خشک و نیمه‌خشک جنوب غرب آسیا است که حدود یک سوم مساحت کشور را دربر می‌گیرد. این منطقه از شمال به رشته‌کوه البرز، از غرب به زاگرس، از شرق به کویر لوت و از جنوب به ارتفاعات کرمان محدود می‌شود (Berberian, 1982). ساختار توپوگرافی فلات، که عمدتاً شامل دشت‌های پست و پهنه‌های فرسایشی میان‌بریده است، نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی بارش، تبخیر-تعرق و رفتار آبخوان‌های منطقه دارد. ارتفاع این فلات بین حدود ۷۰۰ تا بیش از ۲۵۰۰ متر متغیر است و این تنوع ارتفاعی، به‌ویژه در حاشیه‌های البرز و زاگرس، سبب ایجاد شیب‌های بارشی و گرادیان‌های اقلیمی چشمگیر شده است.

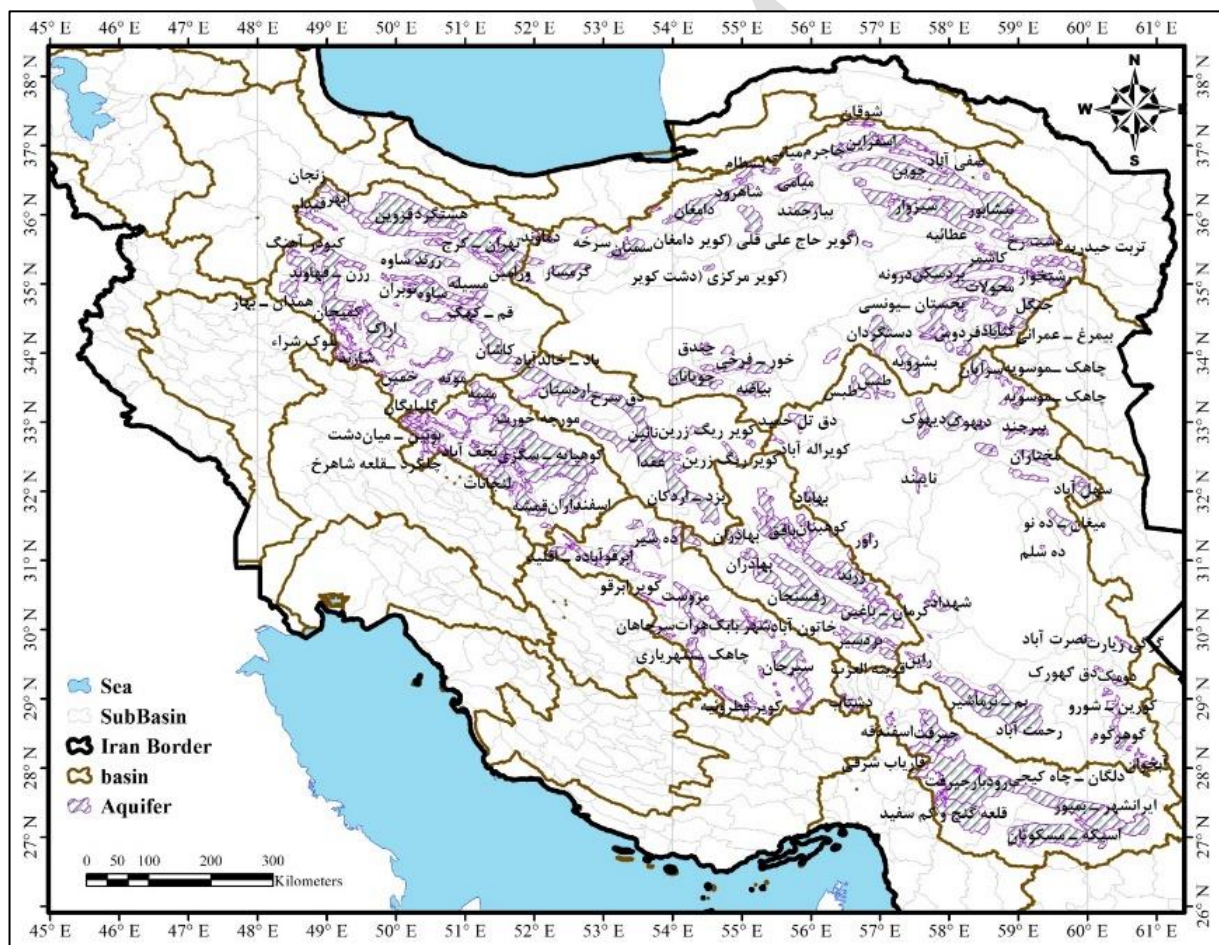
از نظر اقلیمی، این پهنه یکی از خشک‌ترین مناطق ایران با میانگین بارش سالانه حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر محسوب می‌شود، در حالی که تبخیر-تعرق بالقوه در بسیاری از نقاط آن بیش از ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌متر در سال است. این شرایط سبب شده است که فلات مرکزی از نظر تعادل آبی دچار کسری مزمن باشد و آبخوان‌های آن در دهه‌های اخیر روند افت قابل توجهی را تجربه کنند (Madani, 2014; Saleh).

و توزیع مکانی آن به شدت ناهمگن است؛ به طوری که دامنه‌های بادگیر البرز و زاگرس نسبت به دشت‌های مرکزی بارش بسیار بیشتری دریافت می‌کنند.

از نظر زمین‌شناسی، منطقه مورد مطالعه از نهشته‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌ای نسبتاً جوان در حاشیه کوهستان‌ها تا رسوبات ریزدانه تبخیری و کویری در بخش‌های مرکزی تشکیل شده است. این تنوع رسوبی و زمین‌ساختی سبب شکل‌گیری مجموعه‌ای از آبخوان‌های نیمه‌محصور و آزاد شده است. در پهنه‌های مرکزی، وجود خاک‌های بیابانی (Aridisols) و جوان (Entisols) با بافت متوسط تا ریز، نفوذپذیری مؤثر را محدود کرده و یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش تغذیه طبیعی محسوب می‌شود.

از منظر هیدرولوژیکی، فلات مرکزی فاقد جریان‌های سطحی دائمی است و رودخانه‌های موجود عمدتاً فصلی و وابسته به بارش‌های ناگهانی یا ذوب برف ارتفاعات هستند. با این حال، همین جریان‌های فصلی و سیلابی، در برخی مناطق نقش مهمی در تغذیه موضعی آبخوان‌ها ایفا می‌کنند. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که بیشترین تغذیه طبیعی در این منطقه در بخش‌های حاشیه‌ای البرز و زاگرس و مخروط‌افکنه‌های بزرگ اتفاق می‌افتد، در حالی که دشت‌های پست‌تر مرکزی تقریباً فاقد تغذیه مؤثر هستند (Noori et al., 2023).

از نظر جمعیتی و مصرف آب، فلات مرکزی میزبان مجموعه‌ای از شهرهای بزرگ و متوسط مانند، تهران، کرج، قم، یزد، اصفهان، کاشان، سمنان و کرمان است و بخش قابل توجهی از آب مورد نیاز این شهرها از آبخوان‌های در حال افت تأمین می‌شود. همین وابستگی بالا به منابع آب زیرزمینی، اهمیت مطالعه الگوی تغذیه و عوامل کنترل‌کننده آن را دوچندان می‌کند. در این پژوهش، کل فلات مرکزی شامل استان‌های تهران، البرز، قم، سمنان، اصفهان، یزد، کرمان، اراک و بخش‌هایی از فارس و خراسان جنوبی، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه و مرز حوضه آبریز

منابع داده

برای برآورد میزان تغذیه آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و داده‌های مدل جهانی ERA5-Land استفاده شد. داده‌های GRACE ضخامت کل آب ذخیره شده در زمین (TWS) را نشان می‌دهند و بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۸ به دلیل پوشش کامل داده‌ها در این بازه مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های اولیه بر حسب سانتی‌متر بودند که در پردازش به میلی‌متر تبدیل شدند تا مقیاس آن‌ها با داده‌های بارش و تبخیر هماهنگ شود. داده‌های ERA5-Land شامل مجموع بارش و تبخیر ماهانه بود که واحد اولیه آن متر بود و مشابه داده‌های GRACE به میلی‌متر تبدیل گردید و سپس برای محاسبه مجموع بارش و تبخیر سالانه استفاده شدند. بارش سالانه و تبخیر-تعرق واقعی (AET) از محصول ERA5-Land (با تفکیک مکانی ۰/۱ درجه) استخراج شد. داده‌ها به میلی‌متر در سال تبدیل و میانگین سالانه آنها محاسبه گردید. این داده‌ها برای محاسبه بیلان آب و تحلیل مکانی مورد استفاده قرار گرفتند. برای صحت‌سنجی بارش، داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مطالعه جمع‌آوری شد. همچنین برای مقایسه تغییرات آب زیرزمینی، داده‌های پیرومتری دشت قزوین مورد استفاده قرار گرفت. نقشه انواع خاک (عمدتاً خاک‌های بیابانی یا Aridisols و خاک‌های جوان یا Entisols) از پایگاه جهانی خاک استخراج شد. این اطلاعات برای تعیین ضریب ذخیره ویژه (Sy) و تحلیل خصوصیات نفوذپذیری خاک استفاده شد.

روش کار و محاسبات

- برای محاسبه تغییرات سالانه ذخیره کل آب (TWS)، میانگین سالانه داده‌ها برای هر سال محاسبه شد. اختلاف بین میانگین دو سال متوالی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta TWS = TWS_{year+1} - TWS_{year} \quad (1)$$

این روش امکان هم‌ترازی داده‌ها با بارش و تبخیر سالانه و حذف اثر تأخیر زمانی را فراهم می‌کند. با فرض ضریب ذخیره ویژه آبخوان برابر با ۰/۲ (Sy = 0.2) و استفاده از رابطه زیر، تغییرات آب زیرزمینی برآورد شده است:

$$\Delta GWS = Sy \times \Delta TWS \quad (2)$$

مقدار Sy بر اساس ماهیت خاک‌های منطقه و مطالعات پیشین در مناطق خشک انتخاب شد و تغذیه سالانه آب زیرزمینی با استفاده از معادله بیلان آبی زیر محاسبه گردید:

$$R = P - AET + \Delta GWS \quad (3)$$

که در آن:

R تغذیه سالانه (میلی‌متر)

P بارش سالانه (میلی‌متر)

AET تبخیر-تعرق واقعی سالانه (میلی‌متر)

ΔGWS تغییرات سالانه ذخیره آب زیرزمینی

برای جلوگیری از نتایج غیرواقعی، مقادیر منفی R صفر در نظر گرفته شد.

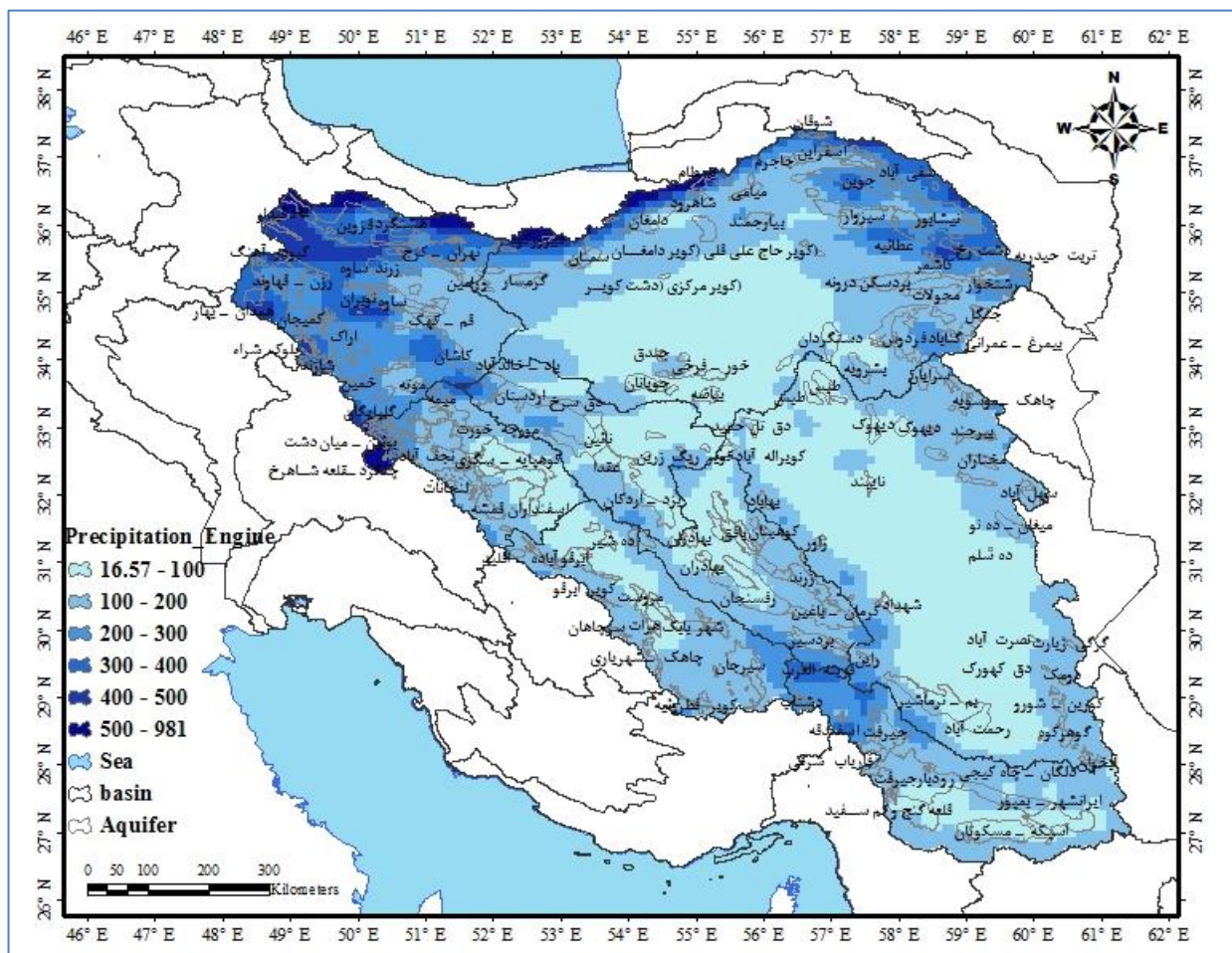
تمام مراحل محاسبه بارش، AET، TWS، GWS و تغذیه سالانه در محیط Google Earth Engine انجام شده است. نتایج شامل نقشه‌های سالانه، میانگین دوره‌ای و سری زمانی استخراج و سپس برای تحلیل فضایی به محیط GIS منتقل شدند. تحلیل مکانی همبستگی در GIS برای بررسی ارتباط مکانی بین بارش، تبخیر و تغذیه آبخوان از طریق ۱- هم‌مقیاس‌سازی لایه‌ها، ۲- تبدیل رسترها به داده‌های نقطه‌ای، ۳- الحاق لایه‌ها بر اساس مختصات مکانی و ۴- محاسبه ضریب همبستگی وزنی جغرافیایی (GWI) برای تحلیل الگوی وابستگی مکانی، انجام گردید.

جهت صحت‌سنجی نتایج، داده‌های بارش ERA5 با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک مقایسه شده است. همچنین تغییرات GWS با روند تراز آب زیرزمینی دشت قزوین مقایسه گردیده است.

نتایج و بحث

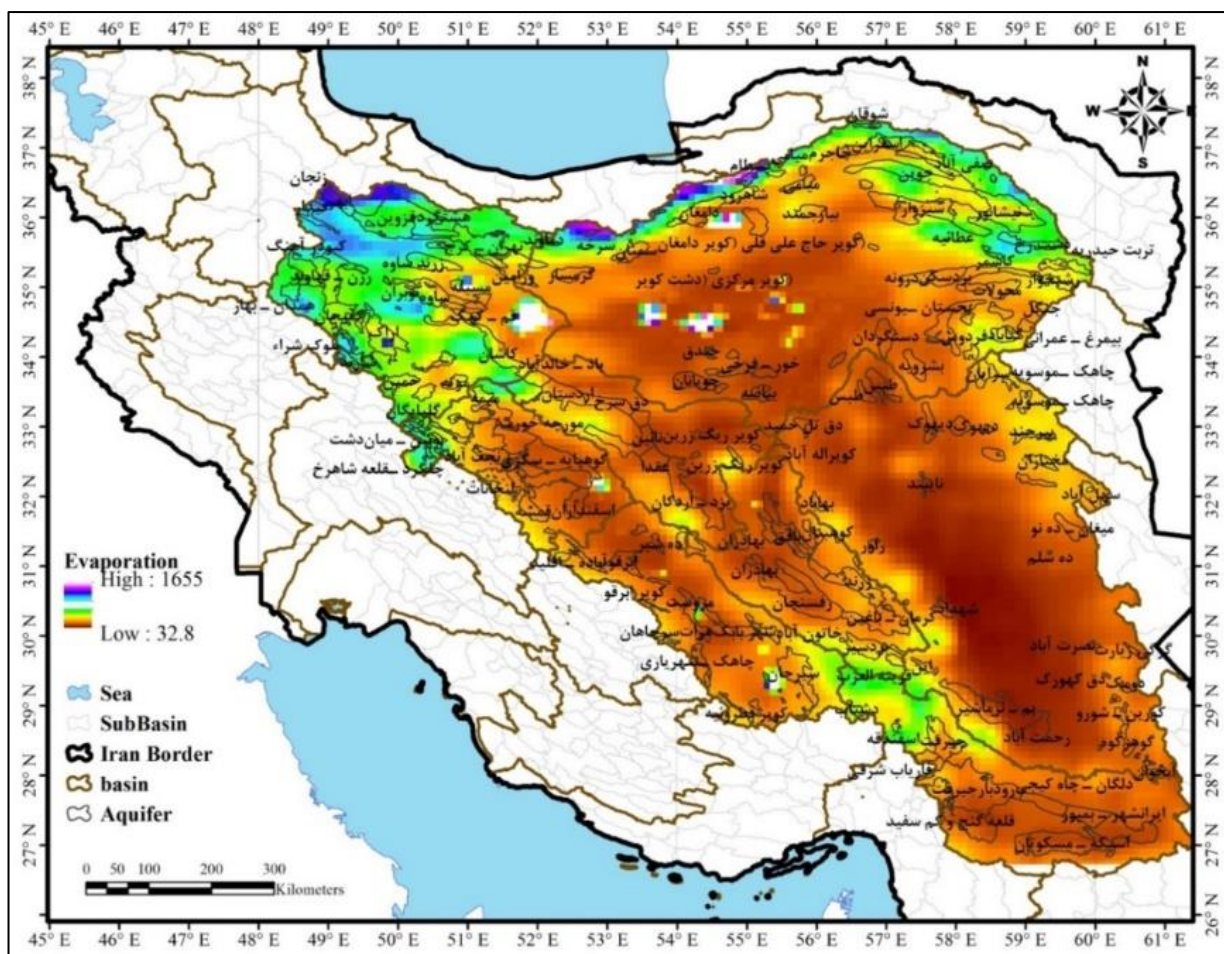
پراگندگی مکانی داده‌ها

نقشه بارش سالانه (شکل ۲) نشان می‌دهد که فلات مرکزی ایران دارای یک گرادیان مکانی بسیار شدید از نظر بارندگی است. کمترین مقادیر بارش، کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال، در دشت‌های مرکزی و شرقی مشاهده می‌شود؛ در حالی که دامنه‌های البرز و زاگرس بیش از ۴۰۰ میلی‌متر بارش دریافت می‌کنند. این اختلاف گسترده نخستین عامل ایجاد ناهمگنی در الگوی تغذیه آب زیرزمینی است؛ زیرا مقدار و شدت بارش تعیین می‌کند که آیا آب ورودی حتی می‌تواند از لایه سطحی خاک عبور کند یا خیر. در نواحی خشک مرکزی، رطوبت اولیه خاک معمولاً هرگز به حد اشباع نمی‌رسد و بنابراین امکان نفوذ عمقی مؤثر تقریباً وجود ندارد. این الگوی بارشی پایه مفهومی سایر نتایج این پژوهش را تشکیل می‌دهد.



شکل ۲ - توزیع مکانی بارش سالانه در فلات مرکزی ایران

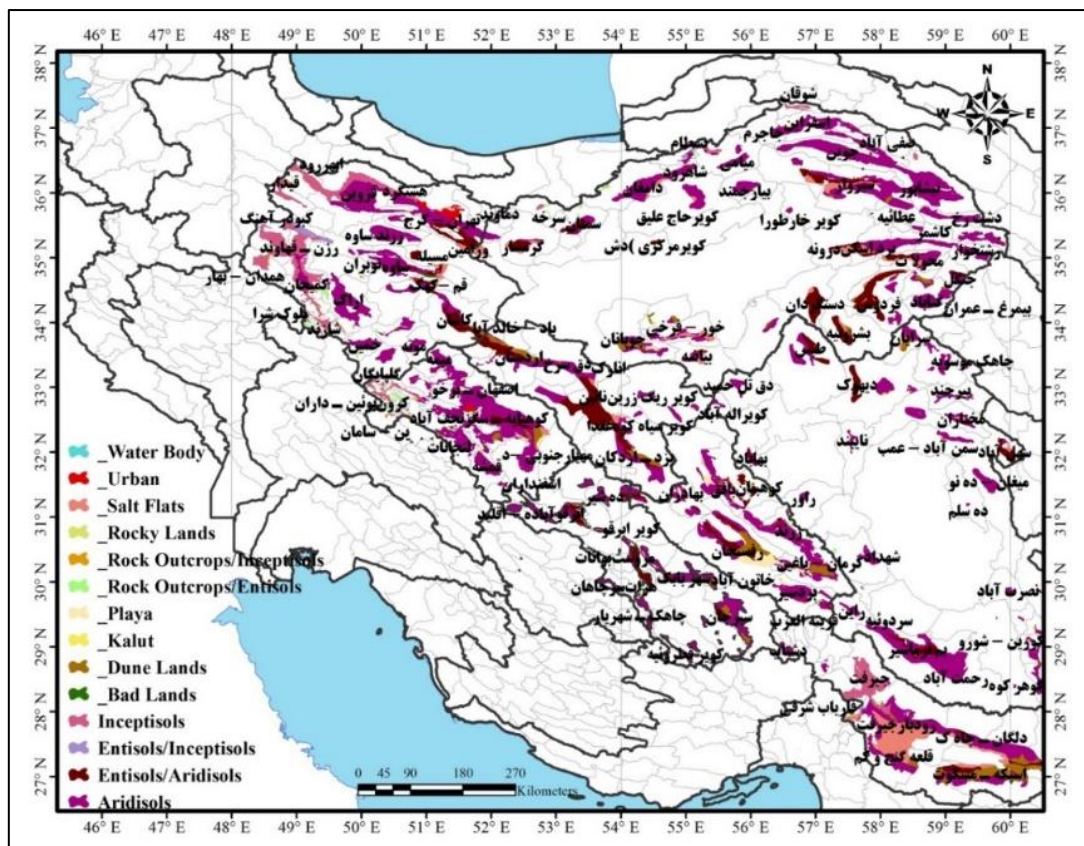
الگوی تبخیر-تعرق واقعی (AET) در منطقه مطالعه (شکل ۳) مکمل همین روند است و نقش محدودیت رطوبتی را در کنترل فرایندهای هیدرولوژیکی فلات مرکزی برجسته می‌سازد. مقدار AET در محدوده ۳۲ تا ۱۶۵۵ میلی‌متر در سال تغییر می‌کند و به‌طور مستقیم تابع رطوبت قابل دسترس و وضعیت پوشش گیاهی است. در نواحی مرکزی با وجود دمای بالا و تبخیر بالقوه زیاد، کمبود رطوبت باعث می‌شود AET در مقادیر بسیار پایین باقی بماند. در مقابل، نواحی پیرامونی که بارش کافی و پوشش گیاهی فعال‌تری دارند، AET بالاتری را تجربه می‌کنند (مقادیر متوسط تا بالای AET بیش از ۵۰۰ میلی‌متر و تا حدود ۱۶۵۵ میلی‌متر بیشتر در حاشیه‌های کوهستانی فلات مرکزی دیده می‌شود). این الگو نشان می‌دهد که حتی در مناطق پربارش‌تر نیز تنها بخشی از بارش می‌تواند از تلفات سطحی و تبخیر عبور کرده و به لایه‌های عمقی‌تر نفوذ کند؛ بنابراین بارش زیاد به‌تنهایی تضمین‌کننده تغذیه بالا نیست و ویژگی‌های خاک و رطوبت زمینه‌ای نیز نقش اساسی دارند.



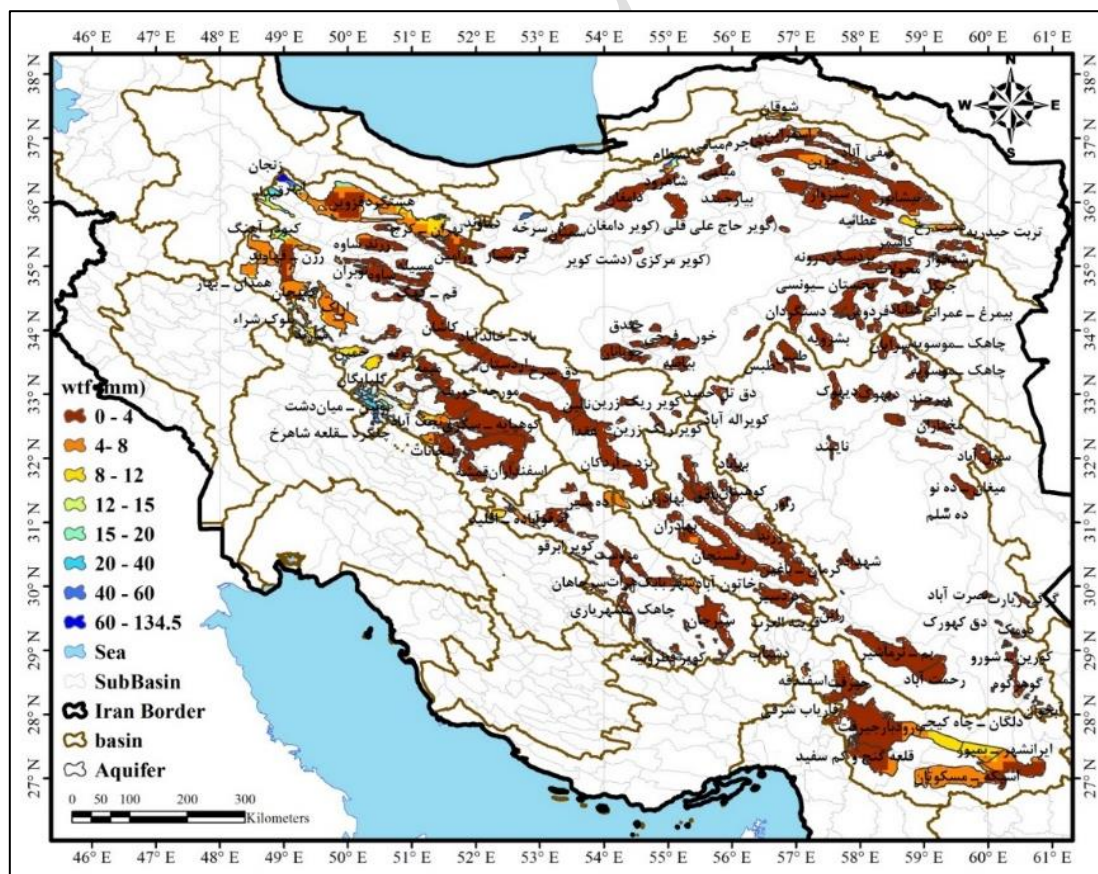
شکل ۳ - تبخیر-تعرق واقعی سالانه (AET) در فلات مرکزی ایران

بررسی نقشه خاک (شکل ۴) نشان می‌دهد که غالب خاک‌های منطقه شامل خاک‌های بیابانی (Aridisols) و خاک‌های جوان (Entisols) با بافت نسبتاً فشرده و نفوذپذیری محدود هستند. این نوع خاک‌ها ظرفیت نگهداشت رطوبت پایینی دارند و بخش قابل توجهی از بارش‌های کوچک پیش از رسیدن به عمق مؤثر تبخیر شده یا به رواناب کم عمق تبدیل می‌شود. انتخاب مقدار ضریب ذخیره ویژه ۰/۲ در این پژوهش با توجه به ویژگی‌های فیزیکی این خاک‌ها و رفتار هیدرولوژیکی منطقه کاملاً توجیه‌پذیر است. ترکیب سه عامل بارش، AET و خاک چارچوب مکانی لازم برای تفسیر نتایج تغذیه را فراهم می‌کند.

نقشه میانگین تغذیه آب زیرزمینی در بازه سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۰۳ (شکل ۵) بازتابی روشن از تعامل همین سه عامل فوق‌الذکر است. در پهنه‌های مرکزی، تغذیه سالانه در بازه صفر تا حدود ۴ میلی‌متر قرار دارد که با توجه به بارش اندک، AET محدود شده به دلیل کمبود رطوبت، و نفوذپذیری پایین خاک کاملاً قابل انتظار است. در مقابل، نواحی شمالی و غربی (به‌ویژه دامنه‌های البرز و زاگرس) مقادیر بیشتری از تغذیه (تا حدود ۱۳۴ میلی‌متر در سال) نشان می‌دهند؛ زیرا بارش بالاتر، پوشش گیاهی فعال‌تر و نفوذپذیری مناسب‌تر شرایط را برای عبور آب از لایه‌های سطحی فراهم کرده است. این نتایج نشان می‌دهد که تغذیه آب زیرزمینی در ایران نه تنها بسیار کم است، بلکه به شدت در پهنه‌های محدودی متمرکز شده و دشت‌های مرکزی عملاً سهم ناچیزی در تغذیه طبیعی دارند.



شکل ۴ - نقشه انواع خاک در فلات مرکزی ایران



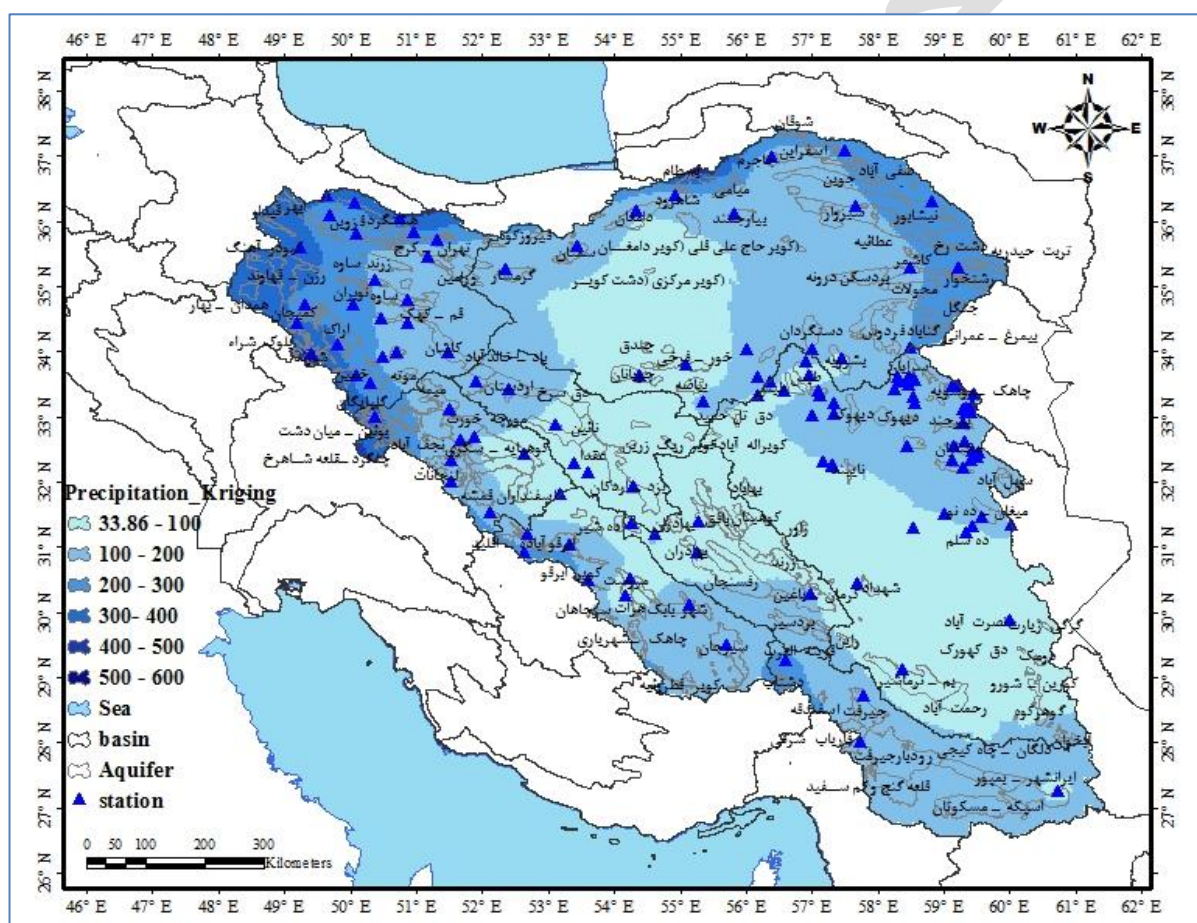
شکل ۵- میانگین تغذیه آب زیرزمینی آبخوان های فلات مرکزی ایران (۲۰۰۳-۲۰۱۷)

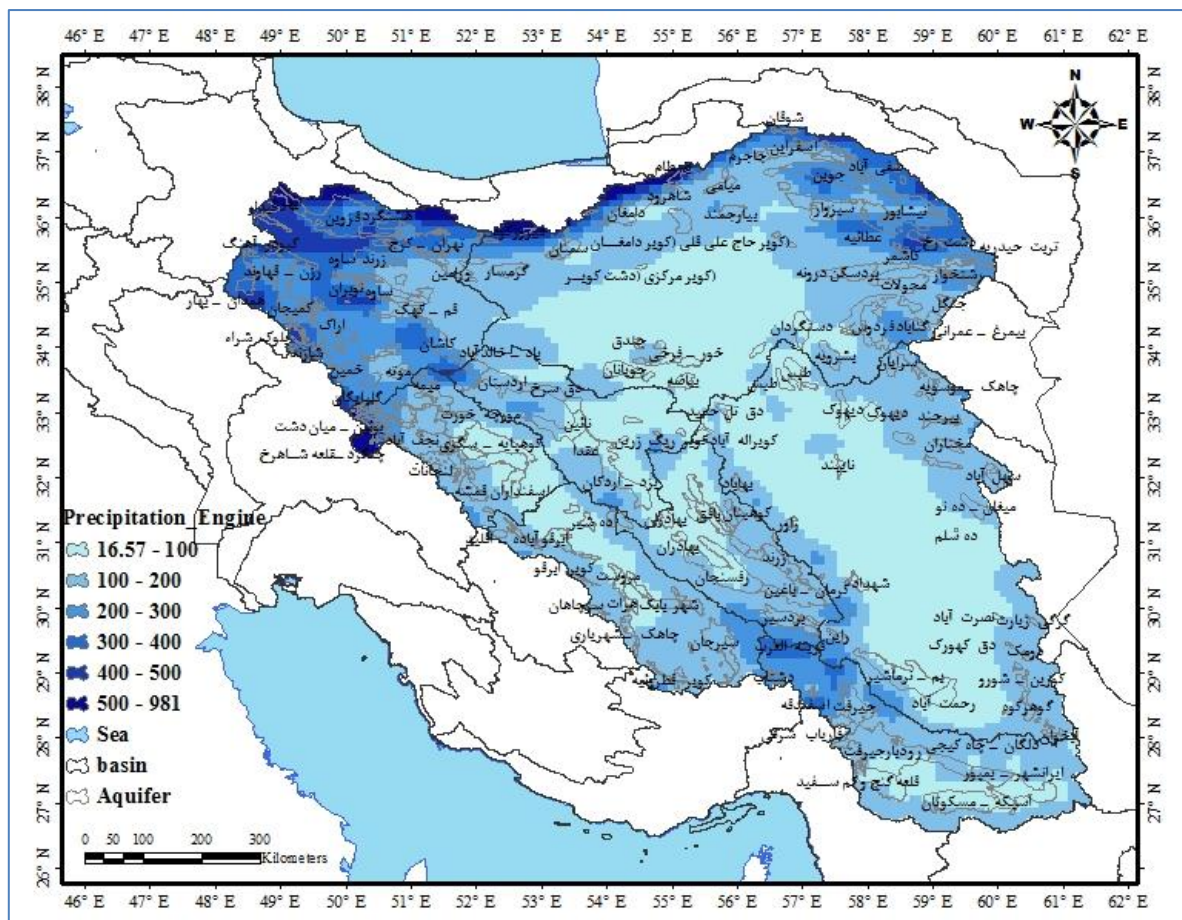
صحت سنجی

برای اعتبارسنجی داده‌های ورودی، داده‌های بارش ERA5 با داده‌های ایستگاهی (مشاهداتی) براساس ماتریس همبستگی مقایسه شد (جدول ۱ و شکل ۶). ضریب همبستگی ۰/۸۰۶ نشان می‌دهد که ERA5 توانایی قابل‌قبولی در بازنمایی الگوی زمانی-مکانی بارش دارد؛ موضوعی که در مناطق فاقد شبکه کافی ایستگاهی اهمیت ویژه‌ای دارد. با این وجود اختلاف‌های جزئی مشاهده‌شده عمدتاً ناشی از محدودیت‌های مقیاس فضایی داده‌های بازتحلیل و پراکندگی مکانی ایستگاه‌های هواشناسی می‌باشد.

جدول ۱ - ماتریس همبستگی بین بارش ایستگاهی و بارش ERA5 در فلات مرکزی ایران

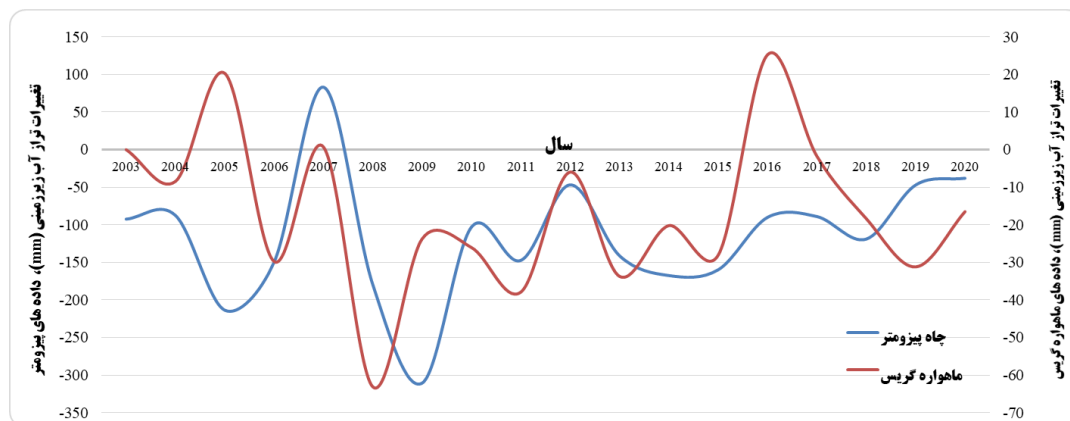
Variables	ERA5 بارش
1	0.806
	بارش ایستگاهی





شکل ۶ - مقایسه مکانی بارش سالانه در فلات مرکزی ایران بر اساس داده‌های ایستگاهی و بازتحلیل ERA5

به منظور ارزیابی دقت و قابلیت اعتماد داده‌های ماهواره‌ای GRACE در برآورد تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، مقایسه‌ای بین روند تغییرات به‌دست‌آمده از این داده‌ها و مشاهدات زمینی تراز آبخوان دشت قزوین انجام شد. مقایسه تغییرات آب زیرزمینی GRACE با داده‌های پیرومتری دشت قزوین (شکل ۷) نشان داد که روند دو مجموعه داده بسیار مشابه است. این همخوانی (علیرغم تفکیک مکانی نسبتاً پایین) GRACE بیانگر آن است که این داده‌ها برای پایش بلندمدت تغییرات آبخوان در مقیاس منطقه‌ای قابل اعتماد هستند. کاهش مداوم سطح ایستابی که ناشی از برداشت‌های بی‌رویه و کاهش بارندگی سالانه است، در داده‌های GRACE نیز به خوبی ثبت شده است. تحلیل همبستگی بین داده‌های زمینی و ماهواره‌ای نشان‌دهنده همخوانی قابل قبول بین تغییرات مشاهده‌شده در سطح ایستابی و تغییرات محاسبه‌شده از GRACE بود. این انطباق روندها بیانگر توانایی داده‌های GRACE در ردیابی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس حوضه‌ای و دشت‌های وسیع همچون دشت قزوین است. با این حال، مقادیر مطلق تغییرات در برخی سال‌ها اختلافاتی با داده‌های میدانی داشتند که می‌تواند ناشی از محدودیت تفکیک مکانی داده‌های GRACE (۳۰۰ کیلومتر) و تأثیر سایر مؤلفه‌های ذخیره آب (مانند رطوبت خاک و برف) باشد.



شکل ۷- مقایسه روند تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی دشت قزوین حاصل از مشاهدات زمینی و ماهواره گریس

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف برآورد کمی و تحلیل مکانی-زمانی تغذیه آب زیرزمینی در فلات مرکزی ایران، با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای GRACE، بازتحلیل جوی ERA5-Land و مشاهدات زمینی انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که تغذیه آب زیرزمینی در این پهنه خشک و نیمه‌خشک به شدت محدود و ناهمگن است و تحت تأثیر هم‌زمان کمبود بارش، تبخیر-تعرق بالا و خاک‌های کم‌عمق و کم‌نفوذ قرار دارد. تحلیل‌های مکانی بارش، AET و خاک نشان می‌دهد که بخش عمده بارش سالانه پیش از رسیدن به اعماق آبخوان صرف تبخیر و جبران رطوبت اولیه خاک می‌شود و در نتیجه میزان تغذیه طبیعی سالانه در بسیاری از دشت‌ها ناچیز است. همچنین مقایسه داده‌های GRACE و ERA5 با اطلاعات زمینی نشان داد که این داده‌ها برای پایش روندهای بلندمدت تغییرات ذخیره آبخوان‌های منطقه قابل اعتماد هستند. هرچند محدودیت تفکیک مکانی GRACE موجب بروز اختلاف‌هایی در مقادیر مطلق می‌شود، اما روندهای کلی افت یا بازیابی آب زیرزمینی به‌طور قابل اعتمادی ثبت می‌گردند.

مقایسه الگوی تغذیه برآورده شده در این پژوهش با نتایج منتشر شده در سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله ایالت مینه‌سوتا^۲ نیز نشان داد که دامنه مقادیر و الگوی مکانی تغذیه از نظر مرتبه بزرگی با یک مطالعه مستقل سازگار است (Delin et al., 2007). در هر دو منطقه، تغذیه تنها در نواحی با بارش بالا و پوشش گیاهی متراکم قابل توجه بوده و در مناطق کم‌بارش، مقدار آن بسیار محدود گزارش شده است. برای مثال، در شمال غرب مینه‌سوتا با بارش سالانه ۵۰-۶۵ سانتی‌متر، تغذیه تنها ۰-۵ سانتی‌متر در سال بوده و در شرق این ایالت، با وجود بارش بیش از ۷۵ سانتی‌متر، تغذیه بیش از ۱۵ سانتی‌متر در سال گزارش شده است. این تطابق رفتاری میان دو منطقه نشان می‌دهد که مدل این پژوهش قادر است الگوی واقعی و قابل تعمیم تغذیه آب زیرزمینی را بازنمایی کند.

در مجموع، یافته‌های این تحقیق تأکید می‌کند که تداوم برداشت‌های کنونی از آبخوان‌های فلات مرکزی، با توجه به محدودیت شدید تغذیه طبیعی، منجر به تشدید افت ذخایر آب زیرزمینی و افزایش ناپایداری منابع آب خواهد شد. از این رو، بازنگری اساسی در سیاست‌های مدیریت منابع آب، حرکت به سوی کاهش برداشت، افزایش بهره‌وری مصرف آب، و تمرکز بر راهکارهایی نظیر تغذیه مصنوعی هدفمند در پهنه‌های مستعد، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. افزون بر این، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل جوی می‌توانند به‌عنوان ابزار مکمل و قابل اتکا، نقش مهمی در پایش بلندمدت و تصمیم‌سازی علمی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک ایران ایفا کنند.

² Minnesota, USA

- [1] K. A. N. Adiat, M. N. M. Nawawi, and K. Abdullah, "Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool - a case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources," *J. Hydrol.*, vol. 440, pp. 75–89, 2012. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.03.028.
- [2] A. Amazirh et al., "Remote Sensing-Based Multiscale Analysis of Total and Groundwater Storage Dynamics over Semi-Arid North African Basins," *Remote Sens.*, vol. 16, no. 19, p. 3698, 2024. doi: 10.3390/rs16193698.
- [3] S. Azadeh Ranjbar, M. Kholghi, and A. Abdeh Kolahchi, "Assessment and Validation of GRACE Satellite Data with Groundwater Resources Index (GRI) at Qazvin Aquifer Plain," *Iranian J. Soil Water Res.*, vol. 56, no. 4, pp. 1103–1117, 2025. doi: 10.22059/ijswr.2025.383301.669806. (In Persian).
- [4] H. Baalousha et al., "Groundwater recharge estimation and its spatial distribution in arid regions using GIS: a case study from Qatar karst aquifer," *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 4, pp. 1319–1329, 2018. doi: 10.1007/s40808-018-0503-4.
- [5] M. Berberian, "The structural evolution of the Iranian Plate," *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 93, no. 6, pp. 545–567, 1982.
- [6] V. H. R. Coelho et al., "Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data," *J. Hydrol.*, vol. 548, pp. 1–15, 2017. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.054.
- [7] G. N. Delin, R. W. Healy, D. L. Lorenz, and J. R. Nimmo, "Comparison of local-to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA," *J. Hydrol.*, vol. 334, no. 1-2, pp. 231–249, 2007.
- [8] E. Fijani, S. Meysami, and M. Mozaffari, "Evaluation of potential and groundwater recharge values of Garmsar plain aquifer using water table fluctuation and Piscopo methods," *J. Ferdowsi Civil Eng.*, vol. 36, no. 1, pp. 1–18, 2023. doi: 10.22067/jfcei.2022.77818.1169.
- [9] S. Foster et al., "Groundwater — a global focus on the 'local resource'," *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, vol. 5, pp. 685–695, 2013. doi: 10.1016/j.cosust.2013.10.010.
- [10] S. Jasechko, H. Seybold, D. Perrone et al., "Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally," *Nature*, vol. 625, pp. 715–721, 2024. doi: 10.1038/s41586-023-06879-8.
- [11] R. Jahanshahi, M. Navardi, N. Asadi, and M. R. Mirbalouchzahi, "Hydrogeochemical Evolution in Aquifer of Iranshahr Plain," *J. Ferdowsi Civil Eng.*, vol. 37, no. 4, pp. 35–48, 2025. doi: 10.22067/jfcei.2024.89496.1318.
- [12] D. C. Jhariya, T. Kumar, M. Gobinath, P. Diwan, and N. Kishore, "Assessment of groundwater potential zone using remote sensing, GIS and multi criteria decision analysis techniques," *J. Geol. Soc. India*, vol. 88, no. 4, pp. 481–492, 2016. doi: 10.1007/s12594-016-0511-9.
- [13] K. A. N. Adiat, M. N. M. Nawawi, and K. Abdullah, "Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool - a case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources," *J. Hydrol.*, vol. 440, pp. 75–89, 2012. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.03.028.
- [14] D. C. Jhariya, T. Kumar, M. Gobinath, P. Diwan, and N. Kishore, "Assessment of groundwater potential zone using remote sensing, GIS and multi criteria decision analysis techniques," *J. Geol. Soc. India*, vol. 88, no. 4, pp. 481–492, 2016. doi: 10.1007/s12594-016-0511-9.
- [15] D. Machiwal, N. Rangi, and A. Sharma, "Integrated knowledge- and data-driven approaches for groundwater potential zoning using GIS and multi-criteria decision making techniques on hardrock terrain of Ahar catchment, Rajasthan, India," *Environ. Earth Sci.*, vol. 73, no. 4, pp. 1871–1892, 2015. doi: 10.1007/s12665-014-3544-7.
- [16] K. Madani, "Water management in Iran: what is causing the looming crisis?," *J. Environ. Stud. Sci.*, vol. 4, pp. 315–328, 2014. doi: 10.1007/s13412-014-0182-z.
- [17] U. Mandal et al., "Delineation of groundwater potential zones of coastal groundwater basin using multi-criteria decision making technique," *Water Resour. Manage.*, vol. 30, no. 12, pp. 4293–4310, 2016. doi: 10.1007/s11269-016-1421-8.
- [18] S. M. Mousavimehr and M. R. Kavianpour, "A non-stationary downscaling and gap-filling approach for GRACE/GRACE-FO data under climatic and anthropogenic influences," *Appl. Water Sci.*, vol. 15, p. 91, 2025. doi: 10.1007/s13201-025-02427-z.

- [19] S. N. Nabavi, A. Alizadeh, and A. Faridhosseini, "Evaluation of groundwater resources using GRACE Satellite Gravimetric Data (Case study: Khorasan Razavi)," *Iranian J. Irrig. Drain.*, vol. 14, no. 3, pp. 855–866, 2020. (In Persian).
- [20] H. Mohammadzadeh, R. Shahriari, N. Hafezi Moghaddas, and A. Ghazi, "Evaluation of The Geometry and Investigating of Changes in Saturated and Unsaturated Volumes of Mashhad - Chenaran Aquifer," *J. Ferdowsi Civil Eng.*, vol. 37, no. 4, pp. 1–18, 2025. doi: 10.22067/jfcei.2024.87150.1287.
- [21] R. Noori et al., "Decline in Iran's groundwater recharge," *Nat. Commun.*, vol. 14, p. 6674, 2023. doi: 10.1038/s41467-023-42411-2.
- [22] M. Rodell et al., "Emerging trends in global freshwater availability," *Nature*, vol. 557, no. 7707, pp. 651–659, 2018.
- [23] A. S. Richey et al., "Quantifying renewable groundwater stress with GRACE," *Water Resour. Res.*, vol. 51, no. 7, pp. 5217–5238, 2015.
- [24] I. Saleh, S. Zandifar, and M. Khazaei, "Study of Groundwater Table Variations and Drought Monitoring Using GRI Index in Shiraz Plain (Maharloo-Bakhtegan Watershed)," *jwss*, vol. 29, no. 2, pp. 1–13, 2025. (In Persian).
- [25] J. Sallwey, J. P. B. Valverde, F. V. Lopez, R. Junghanns, and C. Stefan, "Suitability maps for managed aquifer recharge: a review of multi-criteria decision analysis studies," *Environ. Rev.*, vol. 27, no. 2, pp. 138–150, 2019. doi: 10.1139/er-2018-0069.
- [26] H. Save, S. Bettadpur, and B. D. Tapley, "High-resolution CSR GRACE RL05 mascons," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 121, no. 10, pp. 7547–7569, 2016.
- [27] B. R. Scanlon et al., "Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 115, no. 6, pp. E1080–E1089, 2018.
- [28] T. K. Segobaetso et al., "Groundwater recharge using the chloride mass balance method in the Kanye area, in southeast Botswana," *J. Afr. Earth Sci.*, vol. 193, p. 104534, 2022. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2022.104534.
- [29] M. S. Shakeri et al., "Assessing groundwater drought in Iran using GRACE data and machine learning," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 14671, 2025.
- [30] L. K. Singh, M. K. Jha, and V. M. Chowdary, "Assessing the accuracy of GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis approaches for mapping groundwater potential," *Ecol. Indic.*, vol. 91, pp. 24–37, 2018. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.03.070.
- [31] A. Singh and A. Raju, "Application of Grace Satellite Data for Assessment of Groundwater Resources in Central Ganga Alluvial Plain, Northern India," in *Environmental Concerns and Sustainable Development*, V. Shukla and N. Kumar, Eds. Singapore: Springer, 2020. doi: 10.1007/978-981-13-5889-0_7.
- [32] S. A. Siyad and Z. H. Mohamed, "A systematic literature review on groundwater recharge dynamics under climate variability, land use change and sea level rise," *Discov. Sustain.*, vol. 6, p. 1331, 2025. doi: 10.1007/s43621-025-02232-3.
- [33] S. M. Soleimanpour, S. Zandifar, O. Rahmati, and M. Motamednia, "Evaluation of periodic changes in groundwater level in Bahadoran watershed Yazd Province," *Water Soil Manage. Modell.*, vol. 5, no. 1, pp. 29–44, 2025. doi: 10.22098/mmws.2024.14395.1404. (In Persian).
- [34] R. G. Taylor et al., "Ground water and climate change," *Nat. Clim. Change*, 2012. doi: 10.1038/nclimate1744.
- [35] B. D. Tapley, M. M. Watkins, F. Flechtner et al., "Contributions of GRACE to understanding climate change," *Nat. Clim. Change*, vol. 9, pp. 358–369, 2019. doi: 10.1038/s41558-019-0456-2.
- [36] K. A. Voss, J. S. Famiglietti, M. Lo, C. De Linage, M. Rodell, and S. C. Swenson, "Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management," *Water Resour. Res.*, vol. 49, no. 2, pp. 904–914, 2013.
- [37] D. Walker et al., "Insights from a Multi-Method Recharge Estimation Comparison Study," *Groundwater*, vol. 57, no. 2, pp. 245–258, 2019. doi: 10.1111/gwat.12801.
- [38] Q. Wu, B. Si, H. He, and P. Wu, "Determining Regional-Scale Groundwater Recharge with GRACE and GLDAS," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 2, p. 154, 2019.
- [39] J. Xanke and T. Liesch, "Quantification and possible causes of declining groundwater resources in the Euro-Mediterranean region from 2003 to 2020," *Hydrogeol. J.*, vol. 30, pp. 379–400, 2022. doi: 10.1007/s10040-021-02448-3.

[40] E. Yousefi Mobarhan, K. Saber Chenari, and S. Zandifar, "Analysis of changes in time of drought on Groundwater resources of Garveh-Dehgolan plain using GRI and SPI," *Hydrogeology*, vol. 9, no. 2, pp. 1–14, 2025. doi: 10.22034/hydro.2025.64659.1323. (In Persian)

واژه‌نامه (Glossary)

مخفف	واژه انگلیسی	واژه فارسی
-	Groundwater Recharge	• تغذیه آب زیرزمینی
TWS	Total Water Storage	• ذخیره کل آب زمینی
GWS	Groundwater Storage	• ذخیره آب زیرزمینی
AET	Actual Evapotranspiration	• تبخیر-تعرق واقعی
Sy	Specific Yield	• ضریب ذخیره ویژه
RS	Remote Sensing	• سنجش از دور
-	Atmospheric Reanalysis	• بازتحلیل جوی
-	Water Balance	• بیلان آب
-	Aquifer	• آبخوان
-	Plain	• دشت
-	Piezometric	• پیزومتری
-	Synoptic	• سینوپتیک