



Groundwater Storage Change Estimation in the Sefidrud River Basin and Zanjan Aquifer via Integration of GRACE Satellite Data and Local Hydrological Model Components

Tahereh Gohari¹ | Mostafa Naderi²

1. PhD student, Geophysics, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran.

2. Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran.

✉Corresponding Author: m.naderi@iasbs.ac.ir

Submit Date
01 August 2026

Revise Date
03 September 2026

Accept Date
27 September 2026

Keywords:

Groundwater Storage,
GRACE Mascon,
Downscaling; SWAT Model,
Net Groundwater Recharge,
Sefidrud River Basin, Zanjan
Aquifer.

Extended abstract Introduction

Assessing groundwater storage changes is a key component of water resources management. The launch of GRACE satellites in 2002 (Tapley et al., 2004) and the development of Mascon products brought a major advance in monitoring total water storage changes regionally; however, each GRACE cell covers an area of several hundred to several thousand square kilometers, limiting its direct use at the aquifer scale. To address this, downscaling methods have been developed, including that of Fakourian et al. (2025), based on linear regression and the mass balance principle, which showed suitable performance in data-limited regions. The Sefidrud River Basin has not yet been examined using an integrated GRACE Mascon–SWAT approach. In this study, by integrating GRACE total water storage with SWAT water balance components, a relationship between storage changes and net recharge was developed at the cell scale and applied for downscaling to the Zanjan aquifer, validated using data from 66 piezometric wells. The novelty includes adapting the method to Sefidrud's data structure, its first integrated GRACE–SWAT application in this basin, and independent validation in the Zanjan aquifer.

Cite this article: Gohari, T., & Naderi, M. (2027). Groundwater storage change estimation in the Sefidrud River Basin and Zanjan Aquifer via integration of GRACE satellite data and local hydrological model components. *Journal of Aquifer and Qanat*, 7 (2), 67- 90. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2026.11810.1154>.



Copyright: © 2027 by the authors. Licensed by the Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Materials and Methods

This study downscaled GRACE-derived groundwater storage changes to grid-cell and Zanjan aquifer scales within the Sefidrud Basin, in four stages. (1) Data preparation: Monthly GRACE Mascon data (0.5° resolution, 42 cells) were overlaid on the basin. SWAT outputs (runoff, soil moisture, recharge) were area-weighted to the GRACE cell scale using subbasin cell overlap. Annual aquifer withdrawal data (2002–2016) and the spatial distribution of well withdrawals (reference year 2009) were used to allocate withdrawals per cell. Net recharge (recharge minus withdrawal) was computed and cumulated; actual monthly total water storage changes were derived from GRACE anomalies by removing soil moisture and runoff, then cumulated. (2) Basin-scale linear equation: cumulative net recharge was regressed against cumulative GRACE storage changes, and annual error was calculated. (3) Residual-area linear equation: assuming similar water-balance behavior between the aquifer-free area and the whole basin, the basin-scale coefficients were applied to this residual area. (4) Final downscaling: using the fitted coefficients from both scales, cumulative groundwater storage changes for each cell or the Zanjan aquifer were calculated as (Eq. 1):

$$\Delta \widehat{GWS}_D = \left[\left(\frac{n_g - n_R}{n_g} \right) \times [\Delta \widehat{GWS}_g - d_g] \right] [d_g - d_R] \quad (1)$$

where n and d are the slope and intercept of the basin-scale (g) and residual-area (R) fits. This was applied for two purposes: (a) downscaling to the 0.5° cell scale, to validate the method; and (b) downscaling to the Zanjan aquifer scale, for comparison with piezometric well data.

Results and Discussion

Evaluation of the downscaling method at the GRACE cell scale showed that the estimated cumulative groundwater storage changes closely matched the reference GRACE values in most cells across the study area, with coefficients of determination exceeding 0.95 in the majority of cells and exceeding 0.99 in some. In a limited number of cells (six), model performance was weaker, with coefficients of determination ranging from -0.991 to 0.068 , some of which were negative. This reduced performance was attributed to hydrogeological heterogeneity, the asymmetric distribution of SWAT subbasins within cells, a constant spatial withdrawal pattern assumed throughout the study period, and insufficient data in boundary cells. Nevertheless, approximately 76% of the cells (32 of 42) exhibited coefficients of determination greater than 0.95. Analysis of the temporal trend also showed that the estimated time series aligned well with the actual trend in most cells, and the method reconstructed the onset of decline, the direction of change, and the long-term declining trend of groundwater storage with acceptable accuracy. At the Zanjan aquifer scale, comparison of the estimated cumulative time series with actual values derived from 66 piezometric wells over the 2002–2016 period showed that both series exhibited a similar declining trend, with a coefficient of determination of 0.846, indicating that approximately 85% of the cumulative groundwater storage variation was reproduced by the model. The estimated trend slope (-55.31 million cubic meters per year) was slightly steeper than the actual slope (-42.47 million cubic meters per year), indicating that the model somewhat overestimated the severity of the decline; the largest discrepancies occurred during periods of intense storage depletion. Nonetheless, the overall agreement between the two trends confirms that the downscaling method employed is capable of effectively transferring GRACE-derived information to the aquifer scale.

Conclusion

The downscaling method employed in this study, based on GRACE data and the SWAT model, demonstrates a high capability for reconstructing groundwater storage changes from the regional to the local scale. The performance evaluation of the model at both the GRACE cell and aquifer scales showed that the coefficient of determination exceeded 0.95 in most grid cells, while at the aquifer scale, a coefficient of determination of 0.846 was obtained, indicating the model's suitable capability in reconstructing the time series of groundwater storage changes. Although discrepancies between the estimated and reference values were observed in some cells, particularly during periods of severe groundwater decline, these discrepancies were mainly attributed to local factors such as heterogeneity in hydrogeological properties, changes in withdrawal patterns, differences in aquifer recharge, and the limited spatial resolution of GRACE data and the local SWAT model. Despite these limitations, the model was able to reconstruct the long-term declining trend of groundwater storage with acceptable accuracy and effectively transfer satellite-derived information to the local scale. Therefore, the method used in this study can serve as a reliable approach for monitoring groundwater storage changes particularly in basins and aquifers facing a shortage of observational data and can be applied in groundwater resources management and planning.



برآورد تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود و آبخوان زنجان با تلفیق داده‌های گریس و مؤلفه‌های مدل هیدرولوژیکی محلی

طاهره گوهری^۱ | مصطفی نادری^۲

۱. دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، ایران.

✉ نویسنده مسئول: m.naderi@iasbs.ac.ir

چکیده

حوضه آبریز سفیدرود، یکی از حوضه‌های وسیع شمال غرب ایران، به‌عنوان منطقه مطالعاتی این پژوهش انتخاب شد. داده‌های ماهواره‌ای GRACE امکان برآورد تغییرات ذخیره کل آب را در مقیاس منطقه‌ای فراهم می‌کنند؛ با این حال، تفکیک مکانی نسبتاً پایین این داده‌ها، استفاده مستقیم از آن‌ها را در مقیاس آبخوان با محدودیت مواجه می‌سازد. در این پژوهش، داده‌های ماهانه GRACE Mascon با شبکه خروجی $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ درجه در حوضه آبریز سفیدرود استفاده شد. پس از محاسبه تغییرات ماهانه و تشکیل سری زمانی تجمعی، این داده‌ها با مؤلفه‌های بیلان آب حاصل از مدل واسنجی‌شده SWAT، شامل تغذیه آب زیرزمینی، رواناب و رطوبت خاک، تلفیق شدند. ابتدا برای هر سلول GRACE رابطه‌ای بین تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی و تغذیه خالص تجمعی توسعه یافت. سپس تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مناطق فاقد آبخوان برآورد و در نهایت تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان زنجان ریزمقیاس‌سازی شد. نتایج نشان داد که روش ریزمقیاس‌نمایی مورد استفاده که مبتنی بر رگرسیون خطی می‌باشد، توانایی مناسبی در بازسازی تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس سلول GRACE و آبخوان دارد. در ۳۲ سلول از مجموع ۴۲ سلول، ضریب تعیین بیش از ۰/۹۵ به دست آمد. اعتبارسنجی مستقل در آبخوان زنجان با استفاده از داده‌های ۶۶ حلقه چاه پیزومتر، ضریب تعیین ۰/۸۴۶ را بین مقادیر ریزمقیاس‌شده و مقادیر مرجع نشان داد. این نتیجه بیانگر توانایی مناسب روش در انتقال اطلاعات GRACE به مقیاس آبخوان است. در مجموع، روش مطالعه، با تکیه بر روابط خطی حاصل از موازنه منابع آب، می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پایش تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، به‌ویژه در حوضه‌ها و آبخوان‌های دارای محدودیت داده‌های مشاهداتی، مورد استفاده قرار گیرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۵

کلیدواژه‌ها:

ذخیره آب زیرزمینی، GRACE، ریزمقیاس‌سازی، Mascon، تغذیه خالص آب، مدل SWAT، حوضه آبریز سفیدرود، آبخوان زنجان.

مقدمه

آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شیرین جهان است و نقش اساسی در تأمین نیازهای شرب، کشاورزی، صنعت و حفظ جریان پایه رودخانه‌ها ایفا می‌کند. طی دو دهه اخیر، رشد جمعیت، توسعه فعالیت‌های کشاورزی، افزایش تقاضای آب و تداوم خشکسالی‌های اقلیمی، فشار فزاینده‌ای بر منابع آب زیرزمینی جهان وارد کرده است. تحلیل مشاهدات ماهواره‌ای GRACE^۱ طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ نشان می‌دهد که بسیاری از آبخوان‌های بزرگ جهان، از جمله آبخوان‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، روند کاهشی معناداری در ذخیره آب داشته‌اند که عمدتاً ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و تغییرپذیری اقلیمی است (Rodel et al., 2018). در ایران نیز به دلیل شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها طی چند دهه گذشته موجب افت شدید سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌ها شده و مدیریت پایدار این منابع را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشور تبدیل کرده است. ازجمله مطالعه‌ای که بر دشت مشهد در سال ۲۰۲۴ انجام شد افت معنادار پارامترهای کمی آب زیرزمینی را با استفاده از شبکه چاه‌های مشاهده‌ای و روش‌های درون‌یابی مکانی تأیید کرده‌اند (Hoseini, et al., 2024). ارزیابی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، یکی از مؤلفه‌های کلیدی در مدیریت منابع آب است. روش‌های متداول این ارزیابی عمدتاً بر پایه اندازه‌گیری‌های میدانی، شامل شبکه چاه‌های پیژومتری و محاسبات بیلان آب زیرزمینی استوار هستند. اگرچه این روش‌ها اطلاعات نسبتاً دقیقی در مقیاس محلی ارائه می‌کنند، محدودیت در پوشش مکانی، هزینه بالای اندازه‌گیری، ناپیوستگی زمانی داده‌ها و نبود شبکه‌های پایش متراکم، کاربرد آن‌ها را در بسیاری از

حوضه‌های آبریز، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، محدود کرده است.

پرتاب ماهواره‌های گریس در سال ۲۰۰۲، تحول چشمگیری در پایش تغییرات ذخیره کل آب^۲ در مقیاس منطقه‌ای ایجاد کرد (Tapley et al., 2004). مأموریت ماهواره گریس و ادامه آن^۳، با اندازه‌گیری پیوسته تغییرات میدان گرانشی زمین، یک سری زمانی بلندمدت، پایدار و قابل‌اعتماد از تغییرات ذخیره آب خشکی فراهم کرده‌اند (Landerer et al., 2020) و طی بیش از دو دهه گذشته به‌طور گسترده برای ارزیابی تغییرات منابع آب زیرزمینی، بررسی خشکسالی و پایش فرونشست زمین در مناطق مختلف جهان به کار گرفته شده‌اند (Tapley et al., 2019; Long et al., 2015).

در سال‌های اخیر، توسعه محصولات^۴ Mascon گام مهمی در بهبود دقت مکانی داده‌های گریس محسوب می‌شود. برخلاف محصولات مبتنی بر ضرایب هارمونیک کروی، محصولات Mascon با استفاده از بلوک‌های جرمی منظم و اعمال قیود فیزیکی، اثر نشت سیگنال را کاهش داده و نیاز به فیلترگذاری اضافی پس از پردازش را حذف می‌کنند (Save et al., 2016). مقایسه این محصولات با داده‌های هارمونیک کروی نیز نشان داده است که محصولات Mascon توانایی بهتری در بازسازی تغییرات ذخیره آب در مقیاس حوضه‌های متوسط و نسبتاً کوچک دارند (Scalon et al., 2016). با وجود این مزایا، هر سلول گریس همچنان مساحتی در حد چند صد تا چند هزار کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد، در حالی که بسیاری از آبخوان‌ها ابعادی بسیار کوچک‌تر و رفتار هیدروژئولوژیکی متفاوتی دارند. این اختلاف مقیاس موجب می‌شود استفاده مستقیم از داده‌های گریس برای برآورد تغییرات ذخیره

^۲Terrestrial Water Storage (TWS)

^۳GRACE Follow-On

^۴ Mass Concentration (Mascon)

^۱Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

سالانه در ذخیره آب زیرزمینی که منجر به افت متوسط سالانه در سطح ایستابی شده است، حاصل، برداشت بی رویه می‌باشد (Fakourian, et al., 2023).

حوضه آبریز سفیدرود یکی از بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین حوضه‌های هیدرولوژیکی ایران است. مطالعات پیشین در این حوضه عمدتاً بر مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی و اثر تغییرات کاربری اراضی متمرکز بوده‌اند؛ برای نمونه، Ghaffari و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل SWAT^۳ اثر تغییرات کاربری اراضی را بر مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی حوضه زنگان‌رود (زیرحوضه‌ای از حوضه سفیدرود) بررسی کردند و ضمن تأیید قابلیت مناسب مدل SWAT برای شبیه‌سازی بیلان آب در این منطقه، نشان دادند که کاهش اراضی مرتعی به افزایش رواناب سطحی و کاهش تغذیه آب زیرزمینی می‌انجامد. با این حال، تا زمان نگارش این مقاله و بر اساس مطالعات پیشین، هیچ مطالعه منتشرشده‌ای چارچوب تلفیقی GRACE Mascon و مدل هیدرولوژیکی SWAT را برای برآورد تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس آبخوان در حوضه آبریز سفیدرود یا آبخوان زنگان به کار نگرفته است. افزون بر این، ساختار داده‌های برداشت آب زیرزمینی موجود در حوضه سفیدرود که در آن اطلاعات برداشت سالانه در مقیاس آبخوان برای کل دوره مطالعه در دسترس است، اما توزیع مکانی برداشت تنها برای یک سال مرجع (۲۰۰۹) موجود است با ساختار داده‌ای به کاررفته در چارچوب Fakourian و همکاران (۲۰۲۵) متفاوت است.

بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی یک روش ریزمقیاس‌سازی داده‌های GRACE Mascon به منظور برآورد تغییرات سالانه ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس آبخوان در حوضه آبریز سفیدرود است. در این

آب زیرزمینی در مقیاس آبخوان با عدم قطعیت قابل توجهی همراه باشد.

به منظور غلبه بر این محدودیت، روش‌های متعددی برای ریزمقیاس‌سازی^۱ داده‌های گریس توسعه یافته است که عموماً در سه گروه اصلی شامل روش‌های آماری، روش‌های مبتنی بر مدل‌های هیدرولوژیکی و روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین قرار می‌گیرند. مرور نظام‌مند مطالعات اخیر نشان می‌دهد که روش‌های یادگیری ماشین (مانند جنگل تصادفی و شبکه‌های عصبی) اگرچه در برخی مناطق عملکرد مناسبی داشته‌اند، اما معمولاً به حجم زیادی از داده‌های آموزشی و متغیرهای کمکی نیاز دارند و قابلیت تعمیم آن‌ها در حوضه‌های با محدودیت داده هنوز به طور کامل ارزیابی نشده است (Nourani, et al., 2024). در مقابل، روش‌های مبتنی بر مدل‌های هیدرولوژیکی محلی و اصل بقای جرم، با اتکای کمتر به داده‌های آموزشی گسترده^۲، امکان انتقال اطلاعات گریس به مقیاس آبخوان را با حفظ سازگاری فیزیکی فراهم می‌کنند. در این راستا، Fakourian و همکاران (۲۰۲۵) روشی مبتنی بر رگرسیون خطی و اصل موازنه جرم برای ریزمقیاس‌سازی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی از مقیاس داده‌های گریس به مقیاس آبخوان ارائه دادند و کاربرد این روش را در آبخوان‌های آبرفتی استان فارس ایران نشان دادند؛ نتایج آن‌ها حاکی از کارایی مناسب این روش در مناطق با محدودیت داده‌های مشاهداتی بود. مطالعات متعددی در ایران با هدف برآورد و پایش تغییرات کمی آب زیرزمینی در مقیاس دشت و آبخوان انجام شده است. در سال (۲۰۲۳) با استفاده از روش بیلان آبخوان و تحلیل نوسانات تراز پیزومتری در آبخوان آبرفتی آسپاس واقع در شمال استان فارس، به این نتیجه رسیدند که علت کاهش

^۱Downscaling

^۲Training Data

^۳ The Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

پژوهش، با تلفیق تغییرات ذخیره کل آب حاصل از محصولات GRACE Mascon و مؤلفه‌های بیلان آب شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولوژیکی SWAT، ابتدا رابطه بین تغییرات ذخیره آب و تغذیه خالص آب زیرزمینی در مقیاس سلول‌های گریس توسعه داده شد. سپس این روابط برای برآورد تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در محدوده‌های فاقد آبخوان به کار گرفته شد و در ادامه، با بهره‌گیری از اطلاعات برداشت سالانه آب زیرزمینی آبخوان‌ها، فرایند ریزمقیاس‌سازی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی تا مقیاس آبخوان انجام شد. در نهایت، عملکرد روش به کار رفته، با مقایسه نتایج برآورد شده و مقادیر مرجع تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در سطح سلول‌ها و همچنین با استفاده از داده‌های مستقل ۶۶ حلقه چاه پیژومتری آبخوان زنجان مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۱). نوآوری‌های این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین، به‌ویژه چارچوب Fakourian و همکاران (۲۰۲۵)، عبارت است از: (الف) ارزیابی روش ریزمقیاس‌سازی برای سازگاری با ساختار داده‌ای متفاوت حوضه سفیدرود، منطقه‌ای با خصوصیات اقلیمی و شرایط هیدروژئولوژی متفاوت؛ (ب) نخستین کاربرد این روش به صورت تلفیقی از SWAT-GRACE Mascon در حوضه آبریز سفیدرود؛ و (پ) اعتبارسنجی مستقل نتایج در مقیاس آبخوان با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای ۶۶ حلقه چاه پیژومتری در آبخوان زنجان.

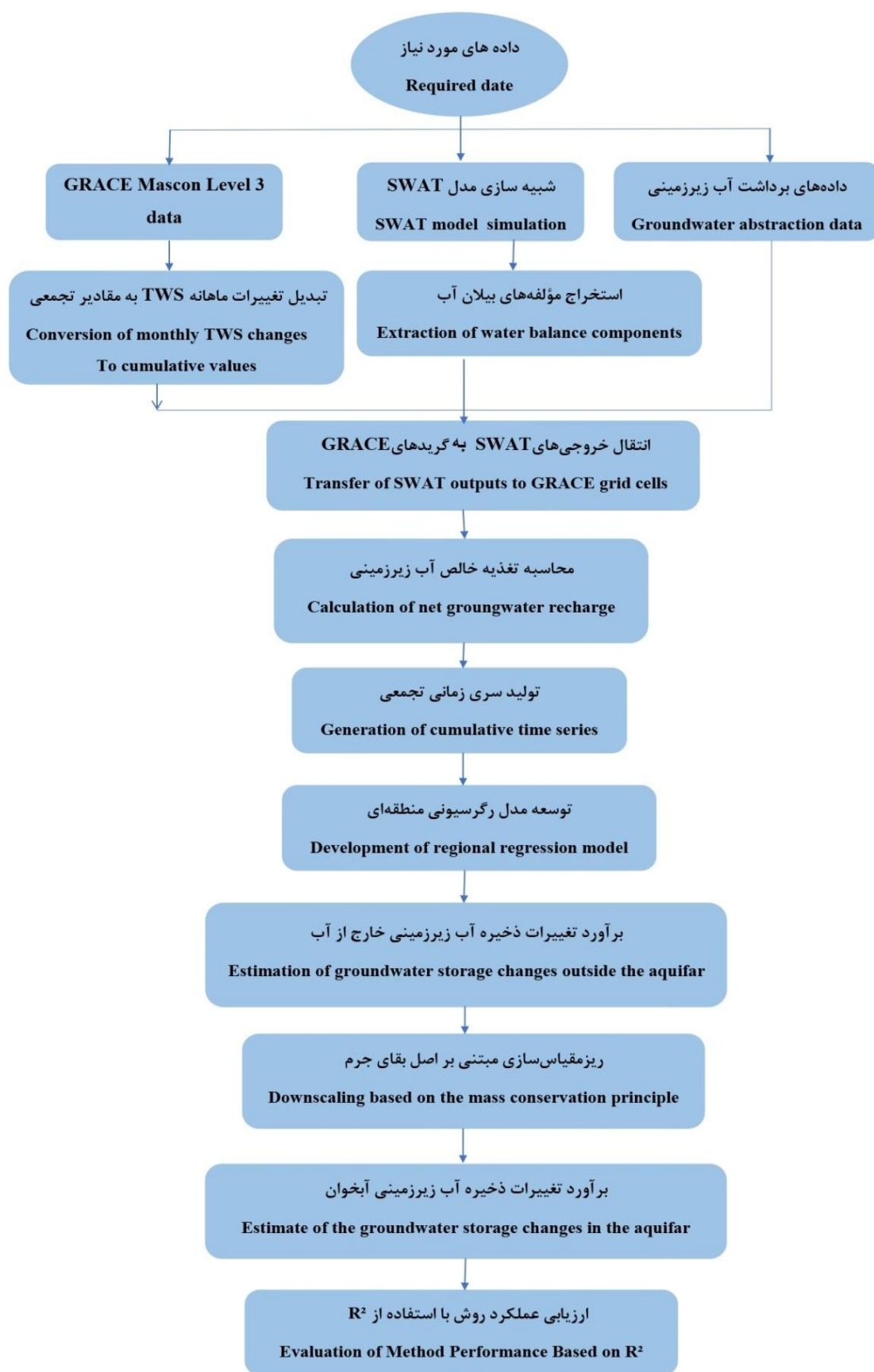
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سفیدرود با مساحتی حدود ۵۸۴۵۳ کیلومتر مربع، در شمال غربی ایران (شکل ۲) قرار دارد. منابع آب زیرزمینی این حوضه عمدتاً برای تأمین آب کشاورزی و نیاز آب شهری و صنعتی برداشت می‌شوند. داده‌های

مربوط به برداشت آب زیرزمینی برای سال ۲۰۰۹ توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران در دسترس قرار گرفت. آبخوان زنجان، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آبخوان‌های آبرفتی حوضه سفیدرود، در بخش میانی حوضه زنجان‌رود قرار دارد و نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی، شرب و صنعت محدوده زنجان ایفا می‌کند. این آبخوان طی دو دهه اخیر تحت تأثیر افزایش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، کاهش تغذیه طبیعی و تداوم دوره‌های خشکسالی، با افت مستمر سطح آب زیرزمینی و کاهش ذخیره آب مواجه بوده است.

انتخاب آبخوان زنجان برای اعتبارسنجی مستقل نتایج، به دلیل برخورداری از شبکه نسبتاً متراکم چاه‌های پیژومتری (۶۶ حلقه چاه) و در دسترس بودن داده‌های مشاهده‌ای پیوسته طی دوره مطالعه (۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶) صورت گرفت، و اهمیت آن در تأمین آب کشاورزی، شرب و صنعت در محدوده زنجان، همراه با افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی و کاهش ذخیره آب طی دو دهه گذشته است.

داده‌های ماهانه مربوط به گریس با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه برای منطقه مورد مطالعه (کل حوضه آبریز سفیدرود) شامل ۴۲ سلول می‌باشد که در شکل (۲) به ترتیب شماره گذاری شده‌اند همانطور که مشخص است بعضی از سلول‌ها کاملاً در داخل حوضه آبریز و برخی دیگر به صورت جزئی منطقه را پوشش داده‌اند. از طرفی در شکل (۲) ۶۹ پیژومتر در دشت زنجان مشاهده می‌شود که ۶۶ پیژومتر در آبخوان آبرفتی زنجان واقع شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، ۶۶ حلقه چاه پیژومتری در بخش‌های مختلف این آبخوان استقرار یافته‌اند که از پوشش مکانی نسبتاً مناسبی برخوردار هستند. داده‌های این چاه‌ها برای محاسبه تغییرات واقعی ذخیره آب زیرزمینی و استخراج سری زمانی مرجع مورد استفاده قرار گرفت.

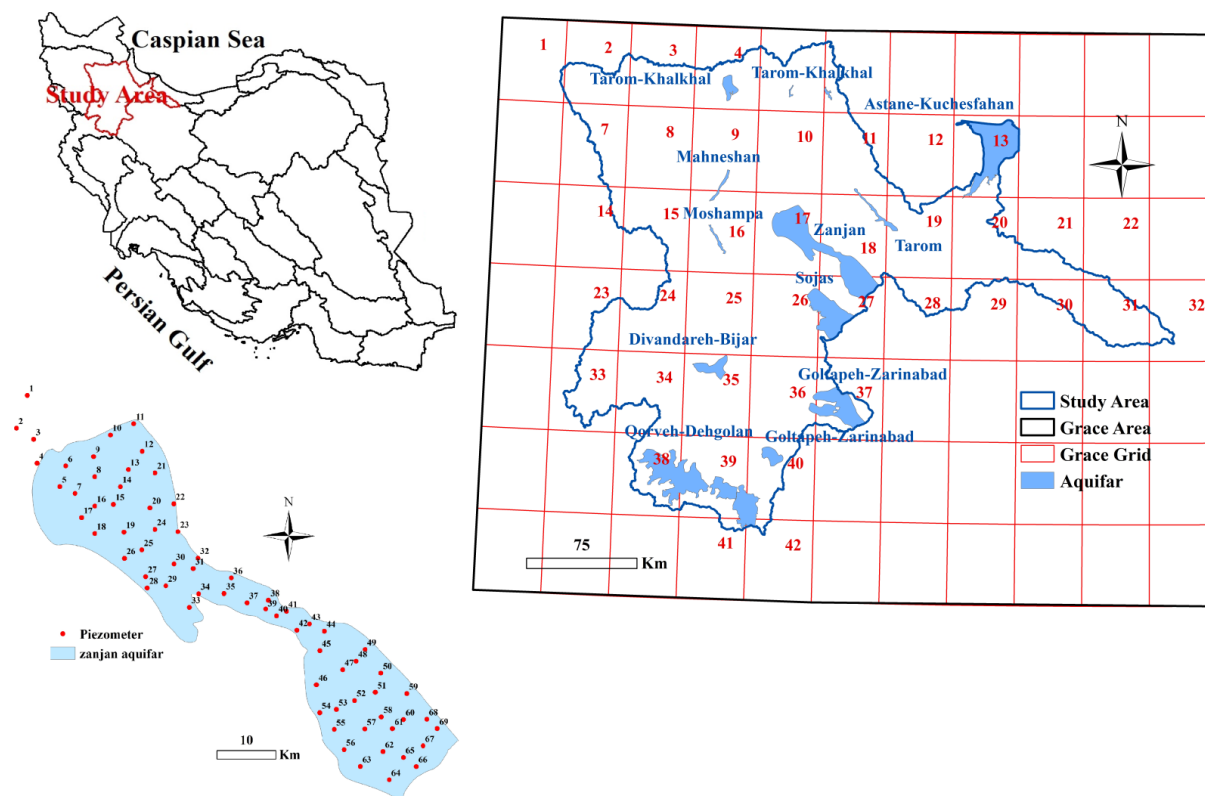


شکل ۱. روند کلی مطالعه

Fig 1 . Flowchart of the research methodology

از این آبخوان می‌تواند مبنای مناسبی برای ارزیابی توانایی روش مطالعه در بازسازی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس محلی باشد.

توزیع مکانی مناسب چاه‌های پیزومتری موجب شده است که تغییرات سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف آبخوان با دقت قابل قبولی ثبت شود؛ از این رو، نتایج حاصل



شکل ۲. منطقه مطالعاتی و موقعیت آبخوان‌های منطقه و سلول‌های گریس و موقعیت پیزومترهای دشت زنجان
Fig 2. Location of the study area, aquifers, GRACE cells, and piezometers in the Zanzan Plain

زیرسطحی مانند آب سطحی، رطوبت خاک و آب زیرزمینی می‌باشند (Chen, et al., 2016).

ب) مدل هیدرولوژی SWAT

مدل SWAT یک مدل هیدرولوژی محلی برای ارزیابی مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه‌های آبریز می‌باشد. حوضه آبریز سفیدرود با استفاده از نقشه توپوگرافی و داده‌های در دسترس ایستگاه‌های هیدرومتری و سدهای انتخابی توسط مدل SWAT به ۱۵ زیرحوضه تقسیم شده سپس به صورت ماهانه در بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۵ واسنجی و اعتبارسنجی شده است. کارایی مدل از طریق شاخص‌های استاندارد برازش، شامل

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل سه نوع داده می‌باشد:

الف) داده‌های ماهانه گریس

تغییرات ذخیره کل آب^۱ برآوردهایی هستند از مدل ماهانه میدان گرانش گریس که تحت عنوان داده‌های سطح ۲۳ در سایت مرکز تحقیقات آلمان^۳ در دسترس بوده و در این مطالعه از این داده‌ها استفاده شده است. ناهنجاری‌های ذخیره کل آب شامل مؤلفه‌های ذخیره سطحی و

^۱ Terrestrial Water Storage (TWS)

^۲ GravIS GFZ RL06 Level-3

^۳ GeoForschungsZentrum(GFZ)

ثابت است و مجموع آن برابر با برداشت فصل تابستان است.

مراحل اجرای روش مطالعه

برای ارزیابی تغییرات ذخیره منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی مفاهیمی مانند ریزمقیاس‌نمایی، داده‌های مرجع و داده‌های واقعی تعریف می‌شود. ریزمقیاس‌نمایی، بهبود تفکیک مکانی داده‌های مبتنی بر گریس (داده‌های مرجع) از حوضه آبریز به آبخوان را ریزمقیاس‌نمایی می‌گویند. داده‌های مرجع، به داده‌های اولیه (تغییرات ذخیره آب زیرزمینی) مبتنی بر گریس گفته می‌شود که با تفکیک مکانی و زمانی مشخص وجود دارند به عنوان مثال در این مطالعه داده‌ها ماهانه با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه می‌باشند و داده‌های واقعی، داده‌های (تغییرات ذخیره آب زیرزمینی) هستند که مستقل از گریس محاسبه می‌شوند که در منابع آب زیرزمینی با استفاده از سطح آب زیرزمینی محاسبه می‌شوند. هدف این پژوهش ریزمقیاس‌سازی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی گریس و برآورد این تغییرات در مقیاس سلول‌های منطبق شده بر حوضه آبریز سفیدرود و در مقیاس آبخوان زنجان می‌باشد؛ بنابراین روش مطالعه شامل چهار مرحله اصلی می‌باشد.

• آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز

الف) داده‌های ماهانه گریس (تغییرات ذخیره آب‌های زیرزمینی)

ابتدا تغییرات کل ذخیره آب از مرکز پرواز فضایی گودارد ناسا^۳ (NASA GSFC) نسخه v2.0، استخراج شد (Loomis et al., 2019). این محصول، تغییرات ماهانه کل ذخیره آب را به صورت ناهنجاری نسبت به یک دوره

ضریب تعیین^۱ (R^2) و نش - ساتکلیف^۲ (NSE) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی عملکرد مدل طی دوره واسنجی (۱۹۹۷-۲۰۱۰) حاکی از دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان ماهانه رودخانه در مقیاس زیرحوضه می‌باشد مقدار ضریب تعیین (R^2) همچنین، شاخص کارایی نش - ساتکلیف در اکثر زیرحوضه‌ها فراتر از ۰/۷ گزارش شد مقایسه دبی‌های میانگین سالانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در هر زیرحوضه طی این دوره نشان داد که مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی جریان رودخانه دارد. نتایج اعتبارسنجی مدل در بازه زمانی ۲۰۱۱-۲۰۱۷ مقدار ضریب تعیین (R^2) و شاخص کارایی نش - ساتکلیف نیز در اکثر ایستگاه‌های بیش از ۰/۶ برآورد شد مؤلفه‌های بیلان آب (رواناب، رطوبت خاک، تغذیه آب زیرزمینی) از مدل واسنجی شده در حوضه سفیدرود به دست آمدند که قبلاً ارائه شده است (Gohari & Naderi, 2025).

ج) داده‌های برداشت

در این پژوهش از دو مجموعه داده برداشت که توسط سازمان مدیریت منابع آب ایران (IWRM, 2009; 2016) ارائه شده است، استفاده شد:

داده‌های برداشت سالانه از هر آبخوان حوضه سفیدرود در طی دوره مطالعاتی (۲۰۱۶-۲۰۲۰). داده‌های برداشت سالانه برای هر سال آبی (از مهر تا شهریور) در نظر گرفته شده است.

داده‌های برداشت ماهانه از آب زیرزمینی حوضه سفیدرود در سال ۲۰۰۹. داده‌های برداشت از آب زیرزمینی به صورت فصلی ارائه شده است که مقادیر ماهانه هر فصل ثابت در نظر گرفته شده است، برای نمونه، برای فصل تابستان فرض شده است که مقدار برداشت در هر سه ماه

³ NASA GSFC GRACE Mascon Solution, RL06 v2.0. <https://earth.gsfc.nasa.gov/geo/data/grace-mascons>

¹ Coefficient of determination

² Nash-Sutcliffe Efficiency

مساحت کل زیرحوضه i ، X_i مقدار متغیر هیدرولوژیکی در زیرحوضه i ، X_j مقدار همان متغیر در سلول j است.

(ج) داده‌های برداشت

یکی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آب زیرزمینی، برداشت از آبخوان‌ها است. در این پژوهش، اطلاعات برداشت آب زیرزمینی از دو مجموعه داده مستقل استفاده شد که هر یک نقش متفاوتی در فرایند محاسبات داشتند. مجموعه نخست شامل حجم برداشت سالانه آب زیرزمینی از هر آبخوان در محدوده مطالعاتی طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ بود. این داده‌ها مبنای محاسبه مؤلفه خروجی بیلان آب زیرزمینی بوده و در تمامی سال‌های دوره مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند. مجموعه دوم شامل اطلاعات مکانی برداشت سالانه چاه‌های بهره‌برداری در کل حوضه سفیدرود بود که تنها برای سال ۲۰۰۹ در دسترس قرار داشت. اطلاعات مکانی هر چاه (طول و عرض جغرافیایی) موجب می‌شود تا بتوان مکان چاه‌ها را در هر حوضه آبریز رسم نمود؛ بنابراین تغییرات مکانی برداشت در سلول‌های مختلف گریس هم قابل بررسی می‌باشد. برای هر سلول گریس، ضریب سهم برداشت (C_j) بر اساس نسبت برداشت چاه‌های واقع در آن سلول به کل برداشت ثبت‌شده در سال ۲۰۰۹ محاسبه شد سپس برداشت سالانه کل آبخوان‌های داخل حوضه در سال t بر اساس این ضرایب بین سلول‌های متناظر توزیع شد:

$$Q_{j,t} = C_j \times Q_{A,t} = \frac{Q_{j,2009}}{\sum_{j=1}^N Q_{j,2009}} \times Q_{A,t} \quad (2)$$

که در آن C_j ضریب توزیع فضایی برداشت برای سلول j ، $Q_{j,2009}$ برداشت ثبت‌شده در سلول j در سال ۲۰۰۹، N تعداد کل سلول‌های منطقه مطالعاتی آن $Q_{A,t}$ برداشت سالانه کل آبخوان‌ها در سال t ، $Q_{j,t}$ برداشت متناظر در سلول j است.

مرجع ارائه می‌کند داده‌ها به‌صورت شبکه‌ای با فاصله مکانی 0.5×0.5 درجه ارائه می‌شوند و به دلیل استفاده از روش Mascon، نسبت به محصولات مبتنی بر ضرایب کروی از دقت مکانی بالاتری برخوردار است (Save et al., 2016). داده‌های گریس در قالب سلول‌های 0.5 درجه در محیط GIS^۱ بر روی حوضه آبریز سفیدرود ایجاد شد، به‌گونه‌ای که مرکز هر سلول Mascon بر مرکز سلول متناظر منطبق شد. در مجموع، ۴۲ سلول کل محدوده مطالعاتی را پوشش دادند.

(ب) مؤلفه‌های خروجی مدل SWAT

مؤلفه‌های خروجی مدل SWAT، شامل رواناب، رطوبت خاک، تغذیه آب زیرزمینی است. استفاده از مؤلفه‌های مدل هیدرولوژی محلی سبب می‌شود ویژگی‌های هیدرولوژیکی منطقه با عدم قطعیت کمتری در بیلان آب در نظر گرفته شود. با استفاده از عملیات همپوشانی^۲، محل تقاطع زیرحوضه‌های SWAT و سلول‌های گریس تعیین شد. از آنجا که هر سلول ممکن است شامل بخشی از یک زیرحوضه یا چندین زیرحوضه باشد، باید سهم هر زیرحوضه در هر سلول مشخص شود. برای این منظور، ضریب وزنی هر زیرحوضه بر اساس نسبت مساحت همپوشانی آن با سلول مربوطه تعیین سپس مقدار هر مؤلفه هیدرولوژیکی در سلول‌های GRACE از رابطه زیر محاسبه شد:

$$X_j = \sum_{i=1}^m W_{i,j} X_i = \sum_{i=1}^m \frac{A_{i,j}}{A_i} X_i \quad (1)$$

که در آن: $W_{i,j}$ ضریب وزنی زیرحوضه i در سلول j ، $A_{i,j}$ مساحت همپوشانی زیرحوضه i با سلول j ، A_i

^۱ Geographic Information System

^۲ Overlay

واقعی ماهانه ذخیره آب زیرزمینی از رابطه ۵ محاسبه می‌شود (Fakourian et al., 2025).

$$\Delta GWS_{i,j} = \Delta TWS_{i,j} - (\Delta SW_{i,j} + \Delta Q_{i,j}) \quad (5)$$

در این رابطه: $\Delta GWS_{i,j}$: تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، $\Delta TWS_{i,j}$: تغییرات کل ذخیره آب، $\Delta SW_{i,j}$: تغییرات رطوبت خاک و $\Delta Q_{i,j}$: تغییرات رواناب برای ماه j از سال i بر حسب میلی‌متر.

تغییرات ماهانه کل ذخیره آب، نشان می‌دهند ذخیره آب در آن ماه، چقدر بیشتر یا کمتر از میانگین بلندمدت بوده است، نه این که مقدار واقعی ذخیره چقدر است. به همین دلیل، مقادیر اولیه این داده‌ها به‌تنهایی نشان‌دهنده تغییرات واقعی ذخیره آب در هر ماه نیستند و نمی‌توان آن‌ها را مستقیماً در معادلات بیلان آب زیرزمینی به کار برد. برای به‌دست‌آوردن تغییرات واقعی ماهانه کل ذخیره آب، اختلاف بین ناهنجاری دو ماه پی‌درپی محاسبه شد. این اختلاف نشان می‌دهد ذخیره آب از یک ماه به ماه بعد چقدر افزایش یا کاهش یافته است. برای بررسی روند تغییرات کل ذخیره آب در طول کل دوره مطالعه، این تغییرات ماهانه به‌صورت تجمعی با یکدیگر جمع شدند؛ یعنی مقدار تغییرات هر ماه به مجموع تغییرات ماه‌های قبل اضافه شد. تشکیل سری زمانی تجمعی تغییرات ذخیره آب، امکان مقایسه روند بلندمدت تغییرات ذخیره را با سری‌های زمانی تجمعی حاصل از موازنه آب فراهم می‌کند و اثر نوسانات کوتاه‌مدت ماهانه را در تحلیل روند بلندمدت کاهش می‌دهد. همچنین، این روش کمک می‌کند روند بلندمدت تغییرات ذخیره آب در مقیاس منطقه‌ای، به جای نوسانات کوتاه‌مدت و پراکنده ماهانه، به خوبی دیده شود (Fakourian et al., 2025). تغییرات واقعی ذخیره آب زیرزمینی در سال i برابر است با مجموع تغییرات واقعی ماهانه ذخیره آب زیرزمینی (رابطه ۶).

(د) محاسبه تغذیه خالص آب زیرزمینی^۱

پس از برآورد مؤلفه‌های مدل SWAT در مقیاس سلول‌های گریس و توزیع مکانی برداشت سالانه آب زیرزمینی در هر سلول، تغذیه خالص سالانه آب زیرزمینی محاسبه شد. تغذیه خالص آب زیرزمینی معرف اختلاف بین مؤلفه ورودی به آب زیرزمینی که همان تغذیه آب زیرزمینی تخمین زده شده توسط مدل SWAT و مؤلفه خروجی که همان برداشت سالانه از آب زیرزمینی در مقیاس سلول گریس می‌باشد (رابطه ۳):

$$NetR_{j,t} = R_{j,t} - Q_{j,t} \quad (3)$$

که در آن $NetR_{j,t}$: تغذیه خالص آب زیرزمینی در شبکه j و سال t و $R_{j,t}$: تغذیه آب زیرزمینی، $Q_{j,t}$: برداشت از آب زیرزمینی در همان شبکه بر حسب میلیون متر مکعب. از آن جا که ماهیت تغییرات ذخیره آب زیرزمینی تجمعی می‌باشد تغذیه خالص هم تجمعی حساب می‌شود تا هر دو تغییر سازگار باشند (رابطه ۴):

$$\overline{NetR}_n = \sum_{t=1}^n NetR_t \quad (4)$$

$\overline{NetR}_n$: معرف تغذیه خالص تجمعی از ابتدای دوره تا سال مورد نظر است.

مقادیر تجمعی، روند بلندمدت بیلان آب زیرزمینی را نشان می‌دهند و امکان برقراری رابطه خطی با تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی را فراهم می‌کنند.

(و) محاسبه ذخیره آب زیرزمینی^۲

داده‌های ماهانه GRACE Mascon تغییرات کل ذخیره آب را نه به صورت مقدار مطلق، بلکه به صورت ناهنجاری نسبت به میانگین یک دوره مرجع ارائه می‌کنند. تغییرات

¹ Net Groundwater Recharge

² Ground Water Storage (GWS)

خطای برآورد برای هر سال از اختلاف بین مقادیر واقعی گریس و مقادیر حاصل از رابطه رگرسیونی (رابطه ۵) محاسبه شد.

$$\Delta GWS_{Grace,t} - \widehat{\Delta GWS}_{Grace,t} = Error_t \quad (8)$$

در این مرحله یک معادله خطی برای روند زمانی تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی واقعی برازش شد.

$$\Delta GWS_{Grace} = n_G \overline{NetR} + d_G \quad (9)$$

• توسعه معادله خطی در مقیاس منطقه باقیمانده^۱
منطقه باقیمانده یا بدون آبخوان حاصل اختلاف مساحت حوضه آبریز با محدوده ریزمقیاس‌نمایی (سلول گریس یا آبخوان) می‌باشد به عنوان مثال محدوده باقیمانده برای آبخوان زنجان برابر با مساحت حوضه آبریز منهای مساحت آبخوان زنجان است.

در منطقه باقی‌مانده ابتدا سری تجمعی تغذیه خالص با استفاده از داده‌های برداشت و تغذیه آب زیرزمینی محاسبه شد، سپس تغییرات ذخیره آب زیرزمینی برآوردشده از داده‌های گریس با استفاده از معادلات منطقه کل حوضه برای منطقه باقی‌مانده محاسبه شده است؛ بنابراین اکنون برای منطقه باقی‌مانده نیز تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی محاسبه شده است و می‌توان یک معادله خطی به سری زمانی آن خوردند (برازش) کرد مشخصات این خط (عرض از مبدأ و شیب) در مرحله بعدی برای ریزمقیاس‌نمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\Delta GWS_{Residual} = a \overline{NetR}_{Residual} + b + Error_G \quad (10)$$

به دلیل این‌که محدوده خارج از آبخوان (یا شبکه مورد نظر) بخش عمده‌ای از سطح منطقه تحت پوشش گریس را

$$\Delta GWS_i = \sum_{j=1}^{12} \Delta GWS_{i,j} \quad (6)$$

این سری زمانی تجمعی در نهایت به عنوان متغیر مرجع در توسعه روابط ریزمقیاس‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.

• توسعه معادله خطی در مقیاس حوضه آبریز

در این مرحله دو معادله خطی در مقیاس حوضه آبریز برآورد می‌شود:

الف) توسعه معادله خطی بین تغذیه خالص آب زیرزمینی و داده‌های گریس و محاسبه خطا

ب) توسعه معادله خطی برای سری زمانی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی

تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای با تغذیه خالص تجمعی آب زیرزمینی رابطه‌ای خطی دارد (Fakourian et al., 2025): بنابراین، نخست رابطه بین این دو متغیر در محدوده حوضه آبریز توسعه داده شد. Fakourian و همکاران با استفاده از معادله بیلان ثابت کردند که برای ریزمقیاس‌نمایی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی مبتنی بر گریس روابط باید خطی باشند همچنین در مطالعه خود نشان دادند که هر گونه نبود داده مربوط به تغذیه آب زیرزمینی مانند آب برگشتی شرب، کشاورزی و نفوذ از رودخانه که در مدل‌های محلی ممکن است در نظر گرفته نشده باشد خود را به صورت خطا در معادله نشان می‌دهند؛ بنابراین خطاهای حاصل از معادلات به کار گرفته شده نیز در روند ریزمقیاس‌نمایی دخالت داده و اثر موارد ذکر شده به صورت غیر مستقیم در فرایند ریزمقیاس‌نمایی در نظر گرفته شده است.

$$\widehat{\Delta GWS}_{Grace} = a \overline{NetR} + b \quad (7)$$

در این رابطه: $\widehat{\Delta GWS}_{Grace}$ معرف تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی برآورد شده، a شیب رابطه و b عرض از مبدأ است.

¹ Residual

حوضه آبریز باشد و سپس این داده، برای ریزمقیاس‌نمایی با اهداف زیر استفاده شده است که شامل: الف) ریزمقیاس‌نمایی داده‌های گریس از مقیاس حوضه آبریز به مقیاس ۰/۵ درجه (داده‌های موجود گریس)، و ب) ریزمقیاس‌نمایی داده‌های گریس از مقیاس حوضه آبریز به مقیاس آبخوان می‌باشد. لازم به ذکر است اگرچه داده‌های گریس با تفکیک مکانی ۰/۵ وجود دارد اما هدف اول در واقع میزان اعتبار و کاربرد روش ریزمقیاس‌نمایی در این مطالعه را بررسی می‌کند که در آن داده‌های ریزمقیاس شده با داده‌های گریس مقایسه می‌شود. در هدف دوم داده‌های ریزمقیاس شده با داده‌های تغییرات ذخیره واقعی در آبخوان که توسط تغییرات سطح آب محاسبه شده است، مقایسه می‌گردد.

نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد روش ریزمقیاس‌سازی در مقیاس سلول گریس

به منظور ارزیابی روش ریزمقیاس‌سازی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، مقادیر تجمعی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی برآوردشده با مقادیر مرجع محاسبه‌شده برای هر یک از ۴۲ سلول محدوده مطالعاتی مقایسه شد. شکل (۳) نمودارهای همبستگی بین مقادیر ریزمقیاس‌شده و مقادیر مرجع را به همراه ضریب تعیین (R^2) برای تمامی سلول‌های منطقه نشان می‌دهد. این نمودارها میزان انطباق نتایج ریزمقیاس‌شده با مقادیر مرجع و عملکرد مدل در بازسازی تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی را در مقیاس سلول ارزیابی می‌کنند.

ضریب تعیین (R^2) در این ۴۲ سلول در دامنه‌ای از ۰/۹۹۱- (کمترین مقدار) تا ۰/۹۹۸ (بیشترین مقدار) قرار دارد، با میانه‌ی ۰/۹۷۲ و میانگین ۰/۷۲۷. فاصله‌ی بین میانگین و میانه ناشی از وجود چند سلول با ضریب تعیین منفی است. بررسی توزیع مقادیر ضریب تعیین در چهار

تشکیل می‌دهد؛ بنابراین رفتار بیلان آبی این محدوده به رفتار کلی مقیاس حوضه آبریز بسیار نزدیک است مؤلفه خطا و شیب و عرض از مبدأ همان مقادیر محاسبه شده در مقیاس حوضه آبریز می‌باشند (Fakourian et al., 2025). در این مرحله نیز ابتدا تغذیه خالص تجمعی محاسبه و سپس با استفاده از رابطه توسعه‌یافته در مقیاس گریس، تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی برآورد شد.

• ریزمقیاس کردن تغییرات ذخیره آب زیرزمینی برای هر سلول گریس و آبخوان زنجان

با استفاده از رابطه (۱۱) تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی برای مقیاس آبخوان یا هر سلول گریس را می‌توان مستقیماً با استفاده از تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس گریس محاسبه کرد. به عبارت دیگر داده‌های گریس برای هر سلول گریس و در محدوده آبخوان زنجان ریزمقیاس شدند (Fakourian et al., 2025).

$$\Delta \widehat{GWS}_D = \left[\left(\frac{n_g - n_R}{n_g} \right) \times [\Delta \widehat{GWS}_g - d_g] \right] [d_g - d_R] \quad (11)$$

در این رابطه، $\Delta \widehat{GWS}_D$: تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی ریزمقیاس شده برای آبخوان (یا سلول گریس)، n, d : به ترتیب عرض از مبدأ و شیب برازش خطی سالانه تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس گریس (حوضه آبریز) (g) و باقیمانده (بدون آبخوان) (سلول مورد نظر) (R) می‌باشد.

این مراحل مربوط به ریزمقیاس کردن داده‌های گریس برای دو هدف مشخص، استفاده شده است. اگرچه داده‌های گریس در داخل حوضه آبریز به صورت سلول های $0/5 \times 0/5$ موجود است؛ اما جهت بررسی و عملکرد روش ریزمقیاس‌نمایی به کار گرفته شده، در ابتدا فرض شده است، تفکیک مکانی داده‌های گریس در مقیاس

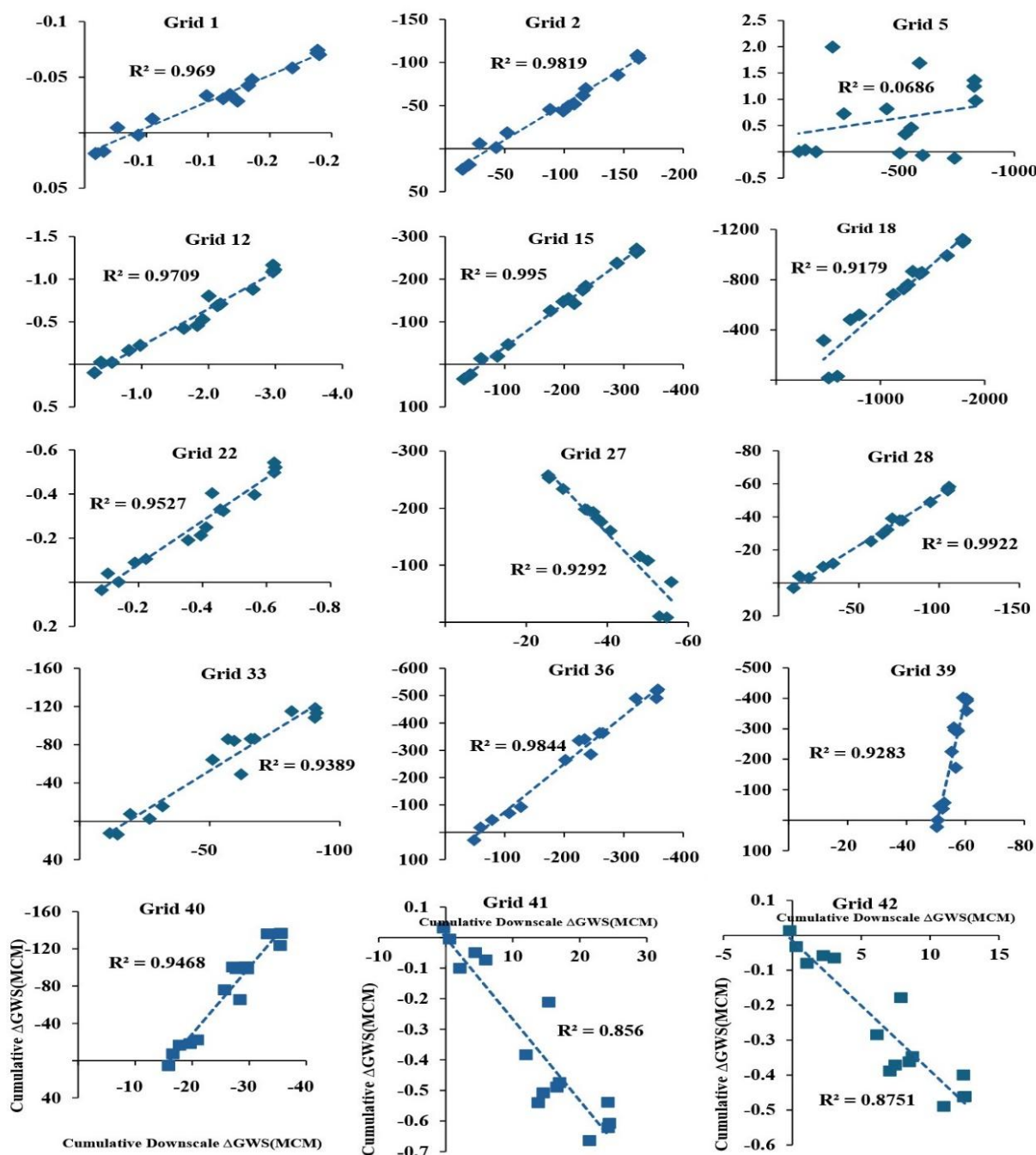
دامنه‌ی سیگنال واقعی تغییرات ذخیره نسبت به نوفه‌ی داده‌های گریس در این سلول‌ها می‌شود.

تفاوت عملکرد مدل در سلول‌های مختلف را می‌توان به چند عامل نسبت داد. یکی از مهم‌ترین عوامل، تفاوت ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی در سطح منطقه است. تغییر در ضخامت آبرفت، و هدایت هیدرولیکی باعث می‌شود آبخوان در نقاط مختلف واکنش یکسانی به تغذیه و برداشت آب نداشته باشد. علاوه بر این، نحوه قرارگیری زیرحوضه‌های مدل SWAT در داخل سلول‌ها نیز یکسان نیست. در برخی سلول‌ها تنها بخشی از یک زیرحوضه قرار دارد، در حالی که برخی دیگر شامل چند زیرحوضه با سهم‌های متفاوت هستند. این موضوع می‌تواند دقت برآورد مؤلفه‌های هیدروژئولوژیکی و در نتیجه عملکرد مدل را تحت تأثیر قرار دهد. عامل دیگری که می‌تواند در ایجاد این اختلاف نقش داشته باشد، نحوه توزیع برداشت از منابع آب زیرزمینی است. اگرچه اطلاعات مربوط به توزیع مکانی برداشت سالانه برای هر آبخوان طی کل دوره مطالعه در دسترس بوده است، اما اطلاعات مربوط به توزیع مکانی چاه‌های بهره‌برداری تنها برای یک سال موجود بود. از این رو، فرض شد که الگوی مکانی برداشت از آب‌های زیرزمینی در طول دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ ثابت بوده و مقادیر برداشت سالانه بر اساس همین الگوی مکانی بین شبکه‌ها توزیع شده‌اند. در نتیجه، در نواحی‌ای که محل چاه‌ها یا سهم نسبی برداشت آن‌ها در طول زمان دچار تغییر شده است، بخشی از اختلاف بین مقادیر برآوردشده و مقادیر مرجع را می‌توان به این فرض نسبت داد. داده‌های گریس شرایط واقعی را نشان می‌دهند در حالی که برای سلول‌هایی که در مرز قرار گرفته‌اند داده‌های برداشت و تغذیه آب زیرزمینی برای خارج از محدوده در دسترس نبوده؛ بنابراین در معادلات اعمال نشده است که می‌تواند دلیلی برای ضعیف‌بودن ضریب همبستگی (r) باشد. از سوی دیگر، در مدل محلی SWAT، اگر داده‌های

بازه نشان می‌دهد که در ۸ سلول (۱۹/۰۵ درصد) مقدار R^2 بیشتر از ۰/۹۹، در ۲۴ سلول (۵۷/۱۴ درصد) بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۹، در ۴ سلول (۹/۵۲ درصد) بین ۰/۹ تا ۰/۹۵ و در ۶ سلول (۱۴/۲۹ درصد) کمتر از ۰/۹ بوده است (جدول ۱). به عبارت دیگر، در مجموع ۳۲ سلول از ۴۲ سلول (۷۶/۱۹ درصد) ضریب تعیین بیش از ۰/۹۵ به دست آمده که نشان‌دهنده توانایی مناسب روش ریزمقیاس‌نمایی در بازسازی تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس سلول است. بیشترین مقادیر ضریب تعیین (R^2 بیش از ۰/۹۹) در گریدهای ۸، ۹، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۲۵، ۲۶ و ۲۸ به دست آمد (شکل ۳). این نتایج نشان می‌دهد که مقادیر برآوردشده توسط مدل با داده‌های مرجع گریس تطابق بسیار خوبی دارند و مدل علاوه بر بازسازی روند تغییرات، توانسته است میزان تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی را نیز به خوبی برآورد کند. در مقابل، در ۶ سلول (گریدهای ۵، ۲۷، ۳۷، ۳۸، ۴۱ و ۴۲) ضریب تعیین کمتر از ۰/۹ به دست آمد. کمترین مقدار مربوط به گرید ۳۷ (۰/۹۹۱-) است. سایر مقادیر این گروه عبارت‌اند از: گرید ۵ (۰/۰۶۸-)، گرید ۲۷ (۰/۹۲۹-)، گرید ۳۸ (۰/۹۱۰-)، گرید ۴۱ (۰/۸۵۶-) و گرید ۴۲ (۰/۸۷۵-). مقادیر منفی ضریب تعیین در این سلول‌ها نشان می‌دهد که در این گریدها رابطه‌ی خطی معناداری بین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و تغذیه خالص برقرار نبوده است. این عملکرد ضعیف می‌تواند ناشی از ناهمگنی هیدروژئولوژیکی و تغییرات الگوی برداشت آب زیرزمینی باشد. علاوه بر این، در سلول‌هایی که تنها بخش محدودی از مساحت آن‌ها توسط حوضه‌ی مطالعاتی پوشش داده می‌شود، تغذیه‌ی خالص برآوردشده توسط SWAT تنها معرف همان بخش محدود است و با دامنه تغییرات کل سلول که توسط گریس سنجیده می‌شود، همخوانی ندارد؛ همین موضوع باعث تفاوت در تغذیه‌ی برآوردشده و کوچک‌شدن

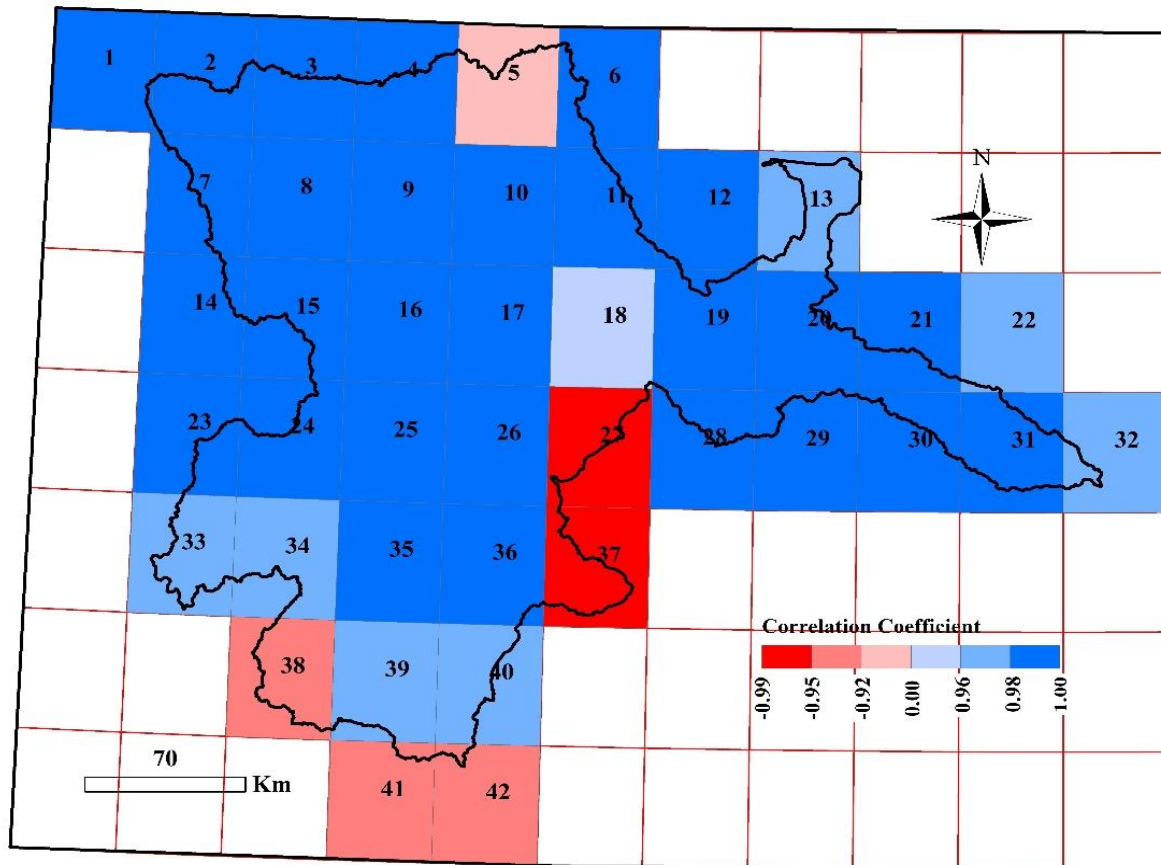
منطقه مطالعه دارای ضریب همبستگی (r) بزرگ‌تر از ۰/۹۵ هستند (شکل ۴). این نتیجه نشان می‌دهد که روش به کار رفته توانسته است اطلاعات حاصل از داده‌های ماهواره‌ای گریس را با استفاده از مؤلفه‌های هیدرولوژیکی مدل SWAT با موفقیت به مقیاس محلی منتقل کند.

موجود مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری و سدها کامل‌تر بود، تعداد زیرحوضه‌های منطقه مطالعاتی افزایش می‌یافت و تغییرات مکانی تغذیه آب زیرزمینی با دقت بیشتری برآورد می‌شد. با وجود این محدودیت‌ها، عملکرد کلی مدل رضایت‌بخش است به‌طوری که بیشتر سلول‌ها



شکل ۳. مقایسه تغییرات تجمعی سالانه واقعی و ریزمقیاس‌شده ذخیره آب زیرزمینی (ΔGWS) سلول‌های گریس

Fig 3. Comparison of actual and downscaled cumulative annual groundwater storage changes (ΔGWS) across GRACE cells.



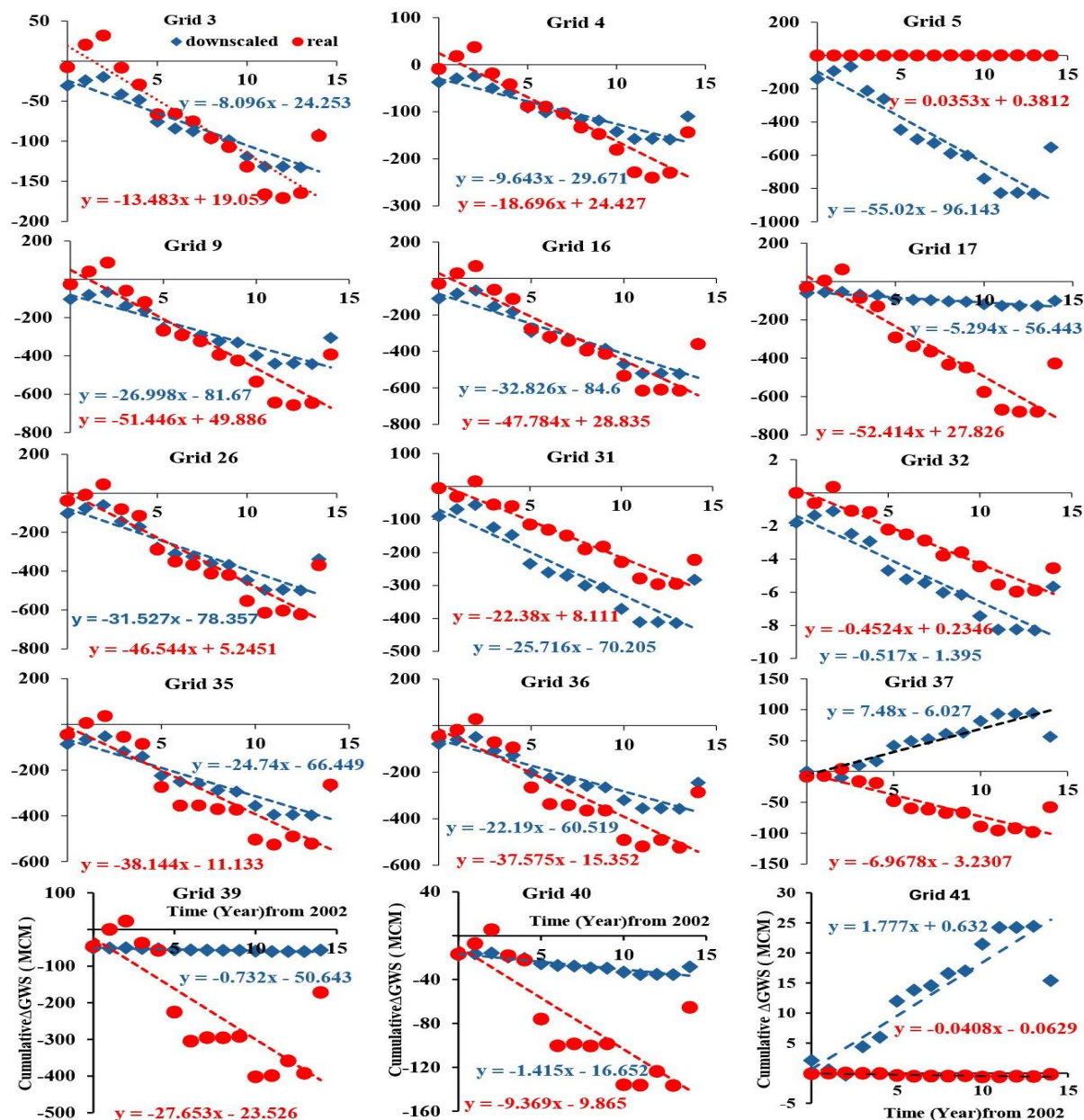
شکل ۴. توزیع مکانی ضریب همبستگی (r) در سلول‌های گریس منطقه مطالعاتی
Fig 4. Spatial distribution of the correlation coefficient (r) across GRACE cells in the study area.

ارزیابی روند زمانی تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی در سلول‌های منتخب

شکل ۵ سری زمانی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی ریزمقیاس شده و تغییرات ذخیره آب زیرزمینی واقعی (گریس) را برای تعدادی از سلول‌های منطقه نشان می‌دهد. این سلول‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که علاوه بر نمایش عملکرد مطلوب مدل، نمونه‌هایی از سلول‌ها با عملکرد ضعیف نیز در تحلیل لحاظ شوند.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که در بخش عمده‌ای از شبکه‌ها، روند زمانی تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی حاصل از مدل، انطباق مناسبی با روند داده‌های واقعی دارد. در گریدهای ۳، ۴، ۹، ۱۷، ۲۷، ۳۲، ۳۷ و ۳۸ هر دو سری زمانی روند نزولی مشابهی را طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ نشان می‌دهند و شیب خطوط روند در داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی از نظر علامت و مرتبه بزرگی به یکدیگر نزدیک است. این موضوع بیانگر آن است که روش به کار رفته علاوه بر بازتولید مقادیر تجمعی، قادر به بازسازی روند زمانی افت ذخیره آب زیرزمینی نیز بوده است.

در این سلول‌ها اگرچه در برخی سال‌ها اختلاف‌هایی بین مقادیر واقعی و برآورد شده مشاهده می‌شود، اما رفتار کلی سری زمانی، شامل زمان شروع افت، جهت تغییرات و روند بلندمدت کاهش ذخیره آب زیرزمینی، با دقت مناسبی بازسازی شده است. این ویژگی نشان می‌دهد روابط توسعه‌یافته میان تغییرات ذخیره آب مبتنی بر گریس و مؤلفه‌های بیلان آب، به‌خوبی توانسته‌اند روند زمانی اصلی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی را در مقیاس محلی بازسازی کنند.



شکل ۵. تغییرات تجمعی سالانه ذخیره آب زیرزمینی (ΔGWS) حالت واقعی و ریزمقیاس شده

Fig 5. Cumulative annual groundwater storage changes (ΔGWS) under actual and downscaled conditions.

مدل توانسته است رفتار زمانی سلول‌ها را به درستی برآورد کند.

ارزیابی عملکرد روش ریزمقیاس‌سازی در مقیاس آبخوان (زنجان)

با توجه به این‌که برای هر سلول و یا هر محدوده مورد نظر که نتایج گریس باید ریزمقیاس گردد، نیاز به انجام مراحل ذکر شده در بخش روش مطالعه دارد، برای نمونه معادلات

از سوی دیگر، مقایسه شیب خطوط روند بیانگر آن است که در برخی گریدها مانند گریدهای ۹ و ۱۶، شیب روند واقعی اندکی بیشتر از شیب مقادیر ریزمقیاس شده است؛ موضوعی که نشان می‌دهد مدل تا حدودی شدت افت ذخیره آب زیرزمینی را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. با این وجود، هم‌جهتی روندها بیانگر آن است که

خورند (برازش) شده در هر مرحله برای آبخوان زنجان ارائه می‌شود (شکل ۶).

مرحله اول، توسعه معادلات خطی برای مجموع آبخوان‌ها، نشان می‌دهد که شیب معادله $0/017$ و عرض از مبدأ $157/32$ است (۶-الف). مرحله دوم که بررسی سری سالانه تغییرات آب زیرزمینی در کل حوضه آبریز است (۶-ب)، نشان می‌دهد که سالانه حدود 875 میلیون متر مکعب از ذخیره آب‌های زیرزمینی کم می‌شود. در ادامه لازم است تا تغییرات ذخیره منابع آب زیرزمینی برای منطقه باقی‌مانده (مجموع آب‌خوان‌ها منهای آبخوان زنجان) برآورد گردد (۶-پ) که نشان می‌دهد سالانه حدود 68 میلیون متر مکعب از ذخایر آب زیرزمینی منطقه باقی‌مانده کم می‌شود. برای بررسی توانایی روش استفاده شده در بازسازی روند بلندمدت تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، سری زمانی تجمعی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی حاصل از مدل ریزمقیاس‌سازی با مقادیر واقعی آبخوان زنجان طی دوره 2002 تا 2016 مقایسه شد (شکل ۶).

به منظور بررسی دقت روش کاربردی، مقادیر تجمعی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی حاصل از روش ریزمقیاس‌سازی با مقادیر واقعی استخراج‌شده از داده‌های پیرومتری مقایسه شد شکل ۶-ث نتایج نشان می‌دهد که بین دو مجموعه داده رابطه خطی قابل قبولی برقرار است و ضریب تعیین (R^2) برابر با $0/8462$ به دست آمد. این مقدار بیانگر آن است که حدود 85 درصد از تغییرات تجمعی ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان زنجان توسط مدل ریزمقیاس‌نمایی بازتولید شده است. کاهش نسبی دقت را می‌توان به عواملی نظیر ناهمگنی هیدروژئولوژیکی آبخوان، تغییرات مکانی برداشت آب زیرزمینی، تفاوت ویژگی‌های هیدرولیکی سازندهای آبرفتی نسبت داد. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف زمانی رخ داده است که کاهش ذخیره آب زیرزمینی بسیار شدید بوده است.

این موضوع نشان می‌دهد که در دوره‌هایی که برداشت از آبخوان زیاد است یا سطح آب زیرزمینی افت قابل توجهی دارد، عوامل محلی نقش پررنگ‌تری پیدا می‌کنند و اثر آن‌ها در داده‌های گریس کمتر دیده می‌شود. با این وجود، تمرکز نقاط پیرامون خط رگرسیون نشان می‌دهد که روش مطالعه توانسته است رفتار کلی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی را با دقت مناسبی بازسازی کند. این نتایج نشان می‌دهد که در روش ریزمقیاس‌نمایی به کار رفته، قابلیت انتقال داده‌های گریس به مقیاس آبخوان را نیز دارد و می‌تواند در مناطقی که داده‌های مشاهداتی محدود است، به عنوان ابزاری مناسب برای برآورد تغییرات ذخیره آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

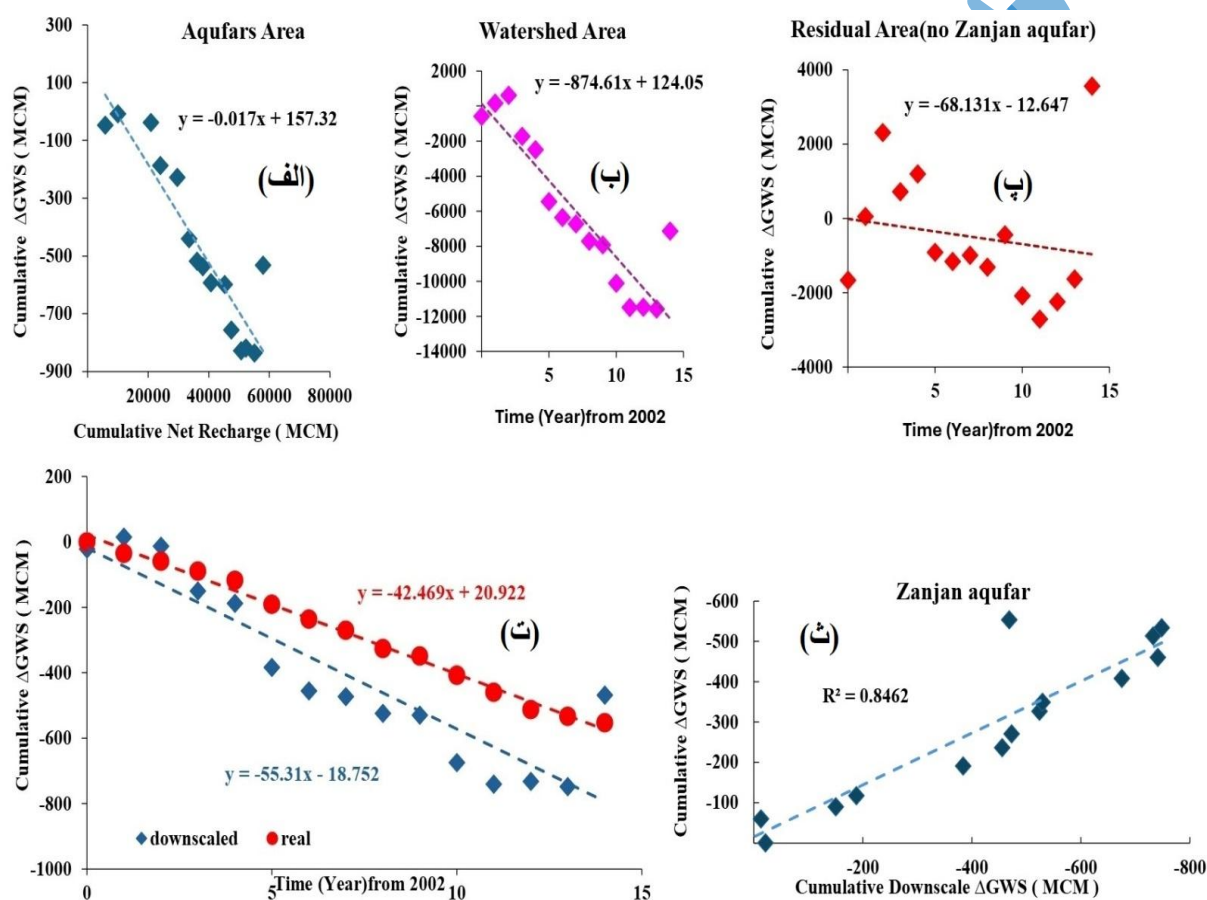
به منظور ارزیابی عملکرد روش به کار رفته در بازسازی تغییرات بلندمدت ذخیره آب زیرزمینی، سری زمانی تجمعی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی (Cumulative ΔGWS) برآوردشده توسط مدل ریزمقیاس‌سازی با مقادیر واقعی آبخوان زنجان در دوره 2002 تا 2016 مقایسه شد (شکل ۶-ت). همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، هر دو سری زمانی روندی کاهشی دارند که نشان‌دهنده کاهش تدریجی ذخیره آب زیرزمینی در طول دوره مطالعه است. شباهت روند دو سری زمانی بیانگر آن است که مدل ریزمقیاس‌سازی، با استفاده از داده‌های GRACE Mascon و مؤلفه‌های هیدرولوژیکی مدل SWAT، توانسته است رفتار بلندمدت آبخوان را با دقت قابل قبولی بازسازی کند. با این حال، شیب روند در دو سری زمانی کاملاً یکسان نیست. شیب تغییرات در داده‌های برآوردشده توسط مدل برابر با $55/31$ - میلیون مترمکعب در سال و در داده‌های واقعی برابر با $42/47$ - میلیون مترمکعب در سال است. این اختلاف نشان می‌دهد که مدل، میزان کاهش ذخیره آب زیرزمینی را اندکی بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. با وجود این اختلاف، تطابق مناسب روند کلی دو سری زمانی نشان می‌دهد که مدل توانسته است جهت و

شدت کلی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی را به خوبی بازسازی کند؛ بنابراین، این روش می‌تواند ابزار مناسبی برای پایش بلندمدت منابع آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطقی که داده‌های مشاهداتی کافی در دسترس نیست، باشد.

جدول ۱. آمار توصیفی و توزیع فراوانی ضریب تعیین (R^2) سلول‌های گریس ($n=42$) منطقه مطالعاتی

Table 1. Characteristics of the coefficient of determination of GRACE cells in the study area

min	max	median	mean	Number of cells				Percentage of cells			
				$R^2 > 0.99$	$0.95 < R^2 \leq 0.99$	$0.9 < R^2 \leq 0.95$	$R^2 < 0.9$	$R^2 > 0.99$	$0.95 < R^2 \leq 0.99$	$0.9 < R^2 \leq 0.95$	$R^2 < 0.9$
-0.99	0.99	0.97	0.72	8	24	4	6	19.04	57.14	9.52	14.28



شکل ۶. (الف) نمودار خطی تغییرات تجمعی سالانه واقعی ذخیره آب زیرزمینی با تغذیه خالص آب زیرزمینی در محدوده آبخوان‌ها، (ب) تغییرات سالانه ذخیره آب زیرزمینی در محدوده حوضه آبریز، (پ) تغییرات سالانه ذخیره آب زیرزمینی در محدوده باقی‌مانده آبخوان‌ها، (ت) مقایسه تغییرات تجمعی سالانه واقعی و ریزمقیاس‌شده ذخیره آب زیرزمینی (ΔGWS) و (ث) ضریب تعیین (R^2) بین مقادیر واقعی و ریزمقیاس‌شده برای آبخوان زنجان از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶

Fig 6. (a) Line plot of cumulative annual actual groundwater storage changes versus net groundwater recharge within the aquifers, (b) annual groundwater storage changes within the entire river basin, (c) annual groundwater storage changes in the remaining (non-aquifer) area of the basin, (d) comparison of cumulative annual actual and downscaled groundwater storage changes (ΔGWS), and (e) coefficient of determination (R^2) between actual and downscaled values for the Zanzan aquifer from 2002 to 2016.

کنون روش مطالعه در مقیاس سلول بررسی نشده است. هدف از روش مطالعه حاضر (کاربرد روش در مقیاس

داده‌های گریس (تغییرات ذخیره آب زیرزمینی) در مقیاس هر سلول به ابعاد 5×5 درجه وجود دارند و تا

فرایند واسنجی و ریزمقیاس‌نمایی نداشته بعد از ریزمقیاس‌نمایی در سطح آبخوان لازم است تا داده‌ها تغییرات ذخیره آب زیرزمینی مبتنی بر گریس که ریزمقیاس شده‌اند با داده‌های واقعی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی مقایسه گردد لذا از داده‌های پیژومتر فقط برای محاسبه تغییرات واقعی ذخیره آب زیرزمینی استفاده شده است.

$$\Delta GWS = A \times S \times \Delta h \quad (12)$$

که در آن ΔGWS تغییرات سالانه ذخیره آب زیرزمینی (متر مکعب)، A مساحت آبخوان (متر مربع)، S ضریب آبدهی ویژه (بدون بعد) و Δh تغییرات سطح آب زیرزمینی (متر) در طول یک سال است.

لازم به ذکر است آبخوان زنجان از نوع آبخوان آزاد می‌باشد و بر اساس گزارش‌های بیلان آب منطقه‌ای زنجان ۰/۰۴ در نظر گرفته شده است. در گزارش مذکور بیلان برای یک دوره طولانی مدت ارائه شده است و عدد ۰/۰۴ به صورت متوسط برای کل آبخوان ارائه شده است. با توجه به بررسی پیشینه تحقیق، تاکنون مطالعه‌ای با ترکیب اختصاصی ریزمقیاس‌سازی داده‌های گریس و مدل هیدرولوژیکی SWAT در حوضه آبریز سفیدرود گزارش نشده است؛ از این‌رو، مقایسه نتایج پژوهش حاضر با ادبیات موجود در قالب تطبیق با مطالعاتی انجام می‌شود که در سایر حوضه‌های آبریز جهان از ترکیب مشابه داده‌های گریس و مدل هیدرولوژیکی SWAT بهره گرفته‌اند. برای نمونه ARSHAD و همکاران در سال ۲۰۲۲ با به‌کارگیری روش رگرسیون وزنی مختلط (MGWR) برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های گریس و ترکیب آن با خروجی‌های مدل SWAT در حوضه آبریز سند پاکستان، ضریب تعیینی بین ۰/۷۵ تا ۰/۹۵ در بیشتر سلول‌های شبکه و ضریب تعیین ۰/۶۷ تا ۰/۸۱ را در اعتبارسنجی مستقل با ۱۴۸۹ چاه مشاهداتی گزارش

سلول) بررسی قابلیت ریزمقیاس‌نمایی می‌باشد. لازم به ذکر است که داده‌های گریس از قبل در این مقیاس وجود دارند؛ بنابراین این قسمت از بررسی و کاربرد روش تنها عملکرد و توانایی روش مطالعه را در ریزمقیاس‌نمایی بررسی می‌کند و نتایج آن به معنای مقایسه داده‌های ریزمقیاس‌نمایی شده با داده‌های مستقل نمی‌باشد؛ زیرا داده‌های ریزمقیاس شده با داده‌های گریس مقایسه شده‌اند؛ اما در ادامه مطالعه و پس از اطمینان از عملکرد خوب روش در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های گریس در مقیاس سلول، روش برای ریزمقیاس‌نمایی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس آبخوان برآورده شده است. در بررسی آبخوان زنجان داده‌های ریزمقیاس شده تغییرات ذخیره آب زیرزمینی با داده‌های مستقل مقایسه شده‌اند؛ زیرا تغییرات واقعی ذخیره آب زیرزمینی با استفاده از تغییرات سطح آب آبخوان زنجان (رابطه ۱۲) که در پیژومترها اندازه‌گیری شده، مقایسه گردیده است. تغییرات سطح آب در ۶۶ حلقه چاه به صورت ماهانه از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ موجود بوده است. برای محاسبه سطح آب در آبخوان زنجان ابتدا به روش پلی‌گون‌بندی تایسن^۱ سطح موثر هر پیژومتر را محاسبه کرده سپس برای هر ماه از دوره مطالعاتی سطح آب برای آبخوان به صورت میانگین وزنی محاسبه شده است که وزن هر پیژومتر سطح موثر آن در شبکه بندی تایسن در نظر گرفته شده است. سپس تغییرات سالانه آب در هر پیژومتر به دست آمده، سپس برای هر سال، سطح آب معرف آبخوان برای هر سال از متوسط‌گیری داده‌های سالانه در هر سال در ۶۶ پیژومتر به دست آمده است (برای هر سال متوسط همه پیژومترها گرفته شده که معرف سطح آب برای آبخوان در سال مورد نظر شده است) از داده‌های پیژومتر برای محاسبه تغییرات واقعی ذخیره آب استفاده شده و هیچ‌گونه استفاده‌ای در

¹ Thiessen Polygon Method

در آبخوان‌های کم‌داده مانند زنجان همواره در دسترس نیست.

در مجموع، قرارگیری نتایج پژوهش حاضر (ضریب تعیین بالای ۰/۹۵ در مقیاس سلول و ۰/۸۴۶ در مقیاس آبخوان) در سقف بالای دقت گزارش‌شده توسط مطالعات بین‌المللی ذکر شده که در حوضه‌های آبریز با مقیاس، اقلیم و روش‌شناسی متفاوت اجرا شده‌اند، اعتبار روش‌شناختی رویکرد به‌کاررفته در حوضه سفیدرود را تأیید می‌کند. قابل ذکر است مطالعه حاضر، عملکرد روش به کار گرفته در این مطالعه را بررسی و مورد ارزیابی قرار داده است.

نتیجه‌گیری

روش ریزمقیاس‌سازی به کار گرفته شده در این مطالعه که مبتنی بر بر داده‌های گریس و مدل SWAT بوده است توانایی بالایی در بازسازی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی از مقیاس منطقه‌ای به مقیاس محلی دارد. ارزیابی عملکرد مدل در مقیاس سلول گریس و آبخوان نشان داد که در بیشتر سلول‌ها ضریب تعیین (R^2) بیش از ۰/۹۵ بوده و در مقیاس آبخوان نیز مقدار ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۸۴۶ به دست آمد که بیانگر توانایی مناسب مدل در بازسازی سری زمانی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی است. اگرچه در برخی سلول‌ها و در دوره‌های افت شدید آب زیرزمینی اختلاف‌هایی بین مقادیر برآوردی و مقادیر مرجع مشاهده شد، این اختلاف‌ها عمدتاً ناشی از عوامل محلی مانند ناهمگنی ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی، تغییرات الگوی برداشت، تفاوت در تغذیه آبخوان و محدودیت قدرت تفکیک مکانی داده‌های گریس و مدل محلی SWAT است. با وجود این محدودیت‌ها، مدل توانست روند بلندمدت کاهش ذخیره آب زیرزمینی را با دقت قابل قبول بازسازی کند و اطلاعات ماهواره‌ای را به‌طور مؤثر به مقیاس محلی منتقل نماید؛ بنابراین، روش

کردند. ضریب تعیین بالای ۰/۹۵ به‌دست‌آمده در مقیاس سلول گریس در پژوهش حاضر در سقف این بازه قرار می‌گیرد و ضریب تعیین آبخوان زنجان (۰/۸۴۶) نیز از بازه اعتبارسنجی مستقل این مطالعه فراتر می‌رود؛ Touseef و همکاران در سال ۲۰۲۳ داده‌های تبخیر - تعرق برآورد شده از گریس را با مدل SWAT در حوضه هونگشویی چین تلفیق کردند تا شبیه‌سازی جریان رودخانه را بهبود بخشند. اعتبارسنجی تبخیر - تعرق گریس در برابر داده‌های مشاهداتی در شش پهنه مطالعاتی ضریب تعیینی در بازه ۰/۷۵ تا ۰/۹۴ نشان داد. Xie و همکاران در سال ۲۰۱۲ مدل SWAT را در مقیاس بسیار وسیع (حدود ۲۱ میلیون کیلومتر مربع، کل آفریقا) در چارچوب واسنجی چندمعیاره با داده‌های گریس و دبی رودخانه تطبیق دادند. نتایج آن‌ها برای ده زیرمنطقه قاره‌ای، ضریب نش - ساتکلیف را در بازسازی تغییرات ذخیره کل آب در دامنه‌ای بسیار گسترده، از ۰/۹۱ در غرب آفریقا و زامبزی تا مقادیر پایین و حتی منفی در حوضه کنگو (۰/۱۹)، گزارش کردند. روند کاهشی ذخیره آب زیرزمینی برآوردشده در آبخوان زنجان با نتایج Khedri و Saberinasr (۲۰۲۴) در آبخوان عجب‌شیر هم‌خوانی دارد. آنان نیز با بررسی هیدروگراف معرف و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان، کاهش سطح آب زیرزمینی و کاهش حجم ذخیره قابل‌استفاده را گزارش کردند. این هم‌خوانی نشان می‌دهد که در هر دو منطقه، تداوم برداشت از منابع آب زیرزمینی، افزایش نیاز آبی و کاهش تغذیه طبیعی می‌تواند در تشدید روند افت ذخیره آبخوان نقش داشته باشد. قابل ذکر است Khoshnevisan و همکاران (۲۰۲۵) به مقایسه چند الگوریتم یادگیری ماشین برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در دشت شاهرود پرداخته‌اند؛ چنین رویکردهایی هرچند دقت قابل قبولی دارند، اما برخلاف روش به‌کاررفته در پژوهش حاضر، به حجم زیادی داده آموزشی تاریخی نیاز دارند که

Iranian Water Resources Management Company (IWRM) (2016) data center <http://wrbs.wrm.ir>. Cited 20 January 2025

Iranian Water Resources Management Company (IWRM) (2009) data center <http://wrbs.wrm.ir>. Cited 20 January 2025

Khedri, A., & Saberinasr, A. (2024). Investigating the ajabshir aquifer characteristics and estimation of maximum well deepening. *Journal of Aquifer and Qanat*, 4(2), 161-186. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2024.7377.1067> [In Persian]

Khoshnevisan, S., Emamgholizadeh, S., Asli Charandabi, M., & Khakzad, S. F. (2025). Comparative Evaluation of Machine Learning Algorithms for Groundwater Level Modeling and Prediction: A Case Study of the Shahrood Plain. *Journal of Aquifer and Qanat*, 6(2), 77-96. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.10441.1132> [In Persian]

Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., et al. (2020). Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL088306. <https://doi.org/10.1029/2020GL088306>

Long, D., Scanlon, B. R., Longuevergne, L., Sun, A. Y., Fernando, D. N., & Save, H. (2015). GRACE satellite monitoring of large-scale subsidence caused by groundwater withdrawal in China. *Geophysical Research Letters*, 42(17), 7550–7557. <https://doi.org/10.1002/2015GL065073>

Loomis, B. D., Luthcke, S. B., & Sabaka, T. J. (2019). Regularization and error characterization of GRACE mascons: BD Loomis et al. *Journal of geodesy*, 93(9), 1381-1398. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01252-y>

Nourani, V., Jabbarian Paknezhad, N., Ng, A., Wen, Z., Dabrowska, D., & Üzelaltınbulat, S. (2024). Application of machine learning methods for GRACE data based groundwater modeling, a systematic review. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101113. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101113>

Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M.-H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557, 651–659. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>

Save, H., Bettadpur, S., & Tapley, B. D. (2016). High-resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 7547–7569. <https://doi.org/10.1002/2016JB013007>

Scanlon, B. R., Zhang, Z., Save, H., Wiese, D. N., Landerer, F. W., Long, D., Longuevergne, L., & *Resources Research*, 52(12), 9412–9429. <https://doi.org/10.1002/2016WR019494>

مطالعه می‌تواند به عنوان روشی قابل اعتماد برای پیش تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، به‌ویژه در حوضه‌ها و آبخوان‌هایی که با کمبود داده‌های مشاهداتی مواجه هستند، در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

Arshad, A., Mirchi, A., Samimi, M., & Ahmad, B. (2022). Combining downscaled-GRACE data with SWAT to improve the estimation of groundwater storage and depletion variations in the Irrigated Indus Basin (IIB). *Science of the Total Environment*, 838, 156044. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156044>.

Chen, J., Famiglietti, J. S., Scanlon, B. R., & Rodell, M. (2016). Groundwater storage changes: present status from GRACE observations. *Surveys in Geophysics*, 37(2), 397-417. <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9332-4>

Fakourian, M.H., Naderi, M. & Joudaki, G.R. (2023). Assessment of groundwater budget in Aspas alluvial aquifer of Fars Province. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 4 (1), 51-68. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2023.6004.1051> [In Persian]

Fakourian, M. H., Naderi, M., & Joodaki, G. (2025). Downscaling GRACE-scale groundwater storage variations to aquifer scales: A linear regression approach based on the water balance concept. *Hydrogeology Journal*, 33, 465–492. <https://doi.org/10.1007/s10040-025-02879-2>

Ghaffari, G., Ghodousi, J., Ahmadi, H., & Keesstra, s. (2010). SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran. *Hydrological Processes*, 24(7), 892–903. <https://doi.org/10.1002/hyp.7530>

Gohari, T., Naderi, M. (2025). Evaluation of surface and groundwater resources management in the Sefidrud Watershed under land use change. *Journal of Aquifer and Qanat*. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2025.10135.1128> [In Persian]

Hoseini, S. Z., Shahidi, A., & Hanafi, H. (2024). Investigating Spatial and Temporal Changes of Quantitative Parameters of Underground Water Resources Using Inverse Distance Weighting Interpolation Method (Case Study: Mashhad Plain). *Journal of Aquifer and Qanat*, 4(2), 103-114. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2024.7330.1064> [In Persian]

<https://earth.gsfc.nasa.gov/geo/data/grace-mascons>
Chen, J. (2016). Global evaluation of new GRACE mascon products for hydrologic applications. *Water*

Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., & Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31, L09607.

<https://doi.org/10.1029/2004GL019920>

Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., Sasgen, I., Famiglietti, J. S., Landerer, F. W., Chambers, D. P., et al. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 9, 358–369.

<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>

Touseef, M., Chen, L., Chen, H., Gabriel, H. F., Yang, W., & Mubeen, A. (2023). Enhancing streamflow modeling by integrating GRACE data and shared Socio-Economic pathways (SSPs) with SWAT in Hongshui river basin, China. *Remote Sensing*, 15(10), 2642.

<https://doi.org/10.3390/rs15102642>

Xie, H., Longuevergne, L., Ringler, C., & Scanlon, B. R. (2012). Calibration and evaluation of a semi-distributed watershed model of Sub-Saharan Africa using GRACE data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3083–3099.

<http://dx.doi.org/10.5194/hess-16-3083-2012>

فصل پنجم از انتشار