نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هشتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۹

Vol.8, No.3, Autumn 2020

۱۰۱ -۸۳

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]

[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

ریزمقیاس‌نمایی آماری سطح آب‌های زیرزمینی حاصل از داده‌های ماهواره ثقل سنجی *GRACE*

مهدی گل محمدی[1*]، غلامرضا جودکی[2]

۱- کارشناس ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه زنجان

۲- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه زنجان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰

چکیده

با تداوم تهدید تغییرات آب و هوایی، افزایش جمعیت و در پی آن افزایش تقاضای آب باعث شده تا نیاز به داده‌های هیدرولوژی با قدرت تفکیک مکانی بالا و پوشش زمانی کافی بیش از پیش احساس شود. لذا در اختیار داشتن داده‌هایی مانند تغییرات ذخایر آب زمینی و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی با قدرت تفکیک مکانی بالا به برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری بهتر و مؤثرتر برای مدیریت منابع آبی کمک شایانی می‌کند. از زمان شروع مأموریت ماهواره‌های ثقل‌سنجی *GRACE*، امکان ارزیابی منابع آبی، به‌ویژه تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در مقیاس جهانی فراهم شده است. علی‌رغم وجود پوشش وسیع مکانی، به دلیل داشتن قدرت تفکیک مکانی پایین و ابعاد پیکسل بزرگ (در حدود $۲۰۰،۰۰۰ km^2$)، استفاده از داده‌های *GRACE* برای مقیاس‌های محلی و کوچکتر، امکان‌پذیر نیست؛ از این رو هدف این پژوهش، امکان‌سنجی ریزمقیاس‌نمایی داده‌های *GRACE* به مقیاسی کوچک و محلی می‌باشد. در این مطالعه، از روش تجربی رگرسیونی بر پایه روابط بین مشاهدات *GRACE* و دیگر داده‌های هیدرولوژی استفاده شده است و داده‌هایی از تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی با ابعاد شبکه $۰/۲۵^\circ$ ایجاد شدند. در نهایت، از داده‌های سطح آب‌های زیرزمینی حاصل از چاه‌های مشاهده‌ای برای اعتبارسنجی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی ریزمقیاس شده استفاده شد، که *RMSE* آن‌ها بین ۳۸/۱۷ تا ۵۶/۴ میلی‌متر و R^2 آن‌ها بین ۰/۴۹ تا ۰/۵۴ بدست آمدند. نتایج نشان داد فرایند ریزمقیاس‌نمایی قابل قبول بوده و مدل‌سازی انجام شده کارایی لازم را دارد. لذا این روش می‌تواند بطور موثری قدرت تفکیک مکانی مشاهدات *GRACE* را از ۱° به $۰/۲۵^\circ$ بهبود بخشد.

کلید واژه‌ها : *GRACE*، ریزمقیاس‌نمایی آماری، تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی، مدیریت منابع آبی.

* نویسنده مکاتبه کننده: زنجان، کیلومتر ۴ جاده زنجان-میانه، دانشگاه زنجان، دانشکده عمران و نقشه‌برداری.

تلفن: ۳۳۰۵۲۲۲۴

Email: m_golmohamadi@znu.ac.ir

۱- مقدمه

با تداوم تهدید تغییرات آب و هوایی، افزایش جمعیت و در پی آن افزایش تقاضای آب، نیاز به داده‌های هیدرولوژی با قدرت تفکیک مکانی بالا و پوشش زمانی کافی بیش از پیش احساس می‌شود. این داده‌ها اهمیت فوق‌العاده‌ای جهت پیش‌بینی روند تغییرات ذخایر آب، دسترسی به منابع آبی و مدیریت آن، ارزیابی خشکسالی، تجزیه و تحلیل خطر و حتی پیش بینی آب و هوا دارند[۱و۲].

آب‌های زیرزمینی اهمیت ویژه‌ای در بین ذخایر آب زمینی (TWS[1]) دارند و منبع اصلی تأمین آب کشاورزی و شرب در بسیاری از نقاط جهان هستند. آبخوان‌های شیرین در نواحی خشک و نیمه‌خشک به طور فزاینده‌ای تحت تأثیر رشد جمعیت و شرایط آب و هوایی قرار گرفته‌اند. سرعت تخلیه آب‌های زیرزمینی طی دو دهه گذشته بیش از دو برابر شده است که مهم‌ترین دلیل آن افزایش تقاضای آب بوده است[۳].

برای ارزیابی تغییرات ذخایر آب زمینی (ΔTWS) به ویژه پایش تغییرات آب‌های زیرزمینی، به‌طور سنتی از چاه‌های مشاهده‌ای استفاده می‌شود. اگرچه این چاه‌ها اطلاعاتی با دقت بالا ارائه می‌دهند، اما با محدودیت‌های اقتصادی و عدم پوشش مکانی مناسب همراه هستند. با آغاز مأموریت ماهواره‌های گریس ($GRACE$[2]) در سال ۲۰۰۲، امکان ارزیابی تغییرات ذخایر آب زمینی در مقیاس جهانی فراهم شده‌است. همچنین با استفاده از داده‌های حاصل از مدل‌های هیدرولوژی، می‌توان تغییرات آب‌های زیرزمینی را از مشاهدات گریس به‌دست آورد[۳].

با وجود پوشش وسیع مکانی، استفاده از داده‌های گریس برای مقیاس‌های کوچکتر و محلی به دلیل داشتن قدرت تفکیک مکانی پایین و ابعاد پیکسل بزرگ (در حدود $۲۰۰،۰۰۰\ km^2$)، محدود شده است[۴]. این در حالی است که بسیاری از آبخوان‌ها که نقش مهمی در چرخه هیدرولوژی و تأمین نیازهای انسان دارند، در وسعت $۱۰۰\ km^2$ تا $۱۰۰۰\ km^2$، یعنی خیلی کوچکتر از قدرت تفکیک مکانی گریس تغییر می‌کنند[۵].

بنابراین لازم است تا با به‌کارگیری یکسری روش‌ها تحت عنوان ریزمقیاس‌نمایی[3]، قدرت تفکیک مکانی گریس را بهبود ببخشیم. در این زمینه محققان تلاش کرده‌اند که با تکنیک‌هایی مانند ترکیب داده‌ها و استفاده از روش‌های تجربی، اطلاعات گریس را به مقیاس محلی تبدیل کنند[۲].

شاوی نینگ و همکاران (۲۰۱۴)، در مطالعه‌ای با هدف بررسی امکان ریزمقیاس‌نمایی تغییرات ذخایر آب زمینی ماهانه حاصل از گریس، در منطقه‌ای از چین از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری بهره گرفتند و با استفاده از داده‌هایی مانند تبخیر و تعرق، بارش و رواناب به ابعاد شبکه‌بندی $۰٫۲۵^\circ$ رسیدند. در نهایت از داده‌های تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی حاصل از چاه‌های مشاهده‌ای برای اعتبارسنجی این کار استفاده شد. نتایج، مطابقت تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از مدل ریزمقیاس نمایی و مشاهدات چاه‌ها را نشان داد[۱].

میرو و فامیگلیتی (۲۰۱۸)، در مطالعه‌ای با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی، تغییرات ماهانه ذخیره آب‌های زیرزمینی حاصل از گریس را برای بخشی از منطقه‌ی کالیفرنیا ریزمقیاس کردند و به قدرت تفکیک مکانی در حدود $۱۶\ km^2$ دست یافتند. داده‌های گریس، چاه‌های مشاهده‌ای و مجموعه‌ای از متغیرهای هیدرولوژی موجود (بارش، دما، مدل رقومی ارتفاعی و نوع خاک) در این مطالعه به کار گرفته شدند. در نهایت نقشه‌هایی در مقیاس محلی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ برابر بهتر از ابعاد اصلی تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از گریس بدست آمد[۴].

در مطالعه‌ای که سیوم و همکاران (۲۰۱۹)، در ایالت

[1] *Terrestrial Water Storage*
[2] *Gravity Recovery and Climate Experiment*
[3] *Downscaling*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

ویسکانسین آمریکا انجام داده‌اند، به ریزمقیاس‌نمایی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی (ΔGWL[1]) با استفاده از مشاهدات گریس و مجموعه‌ای از داده‌های هیدرولوژی با به کارگیری روش یادگیری ماشین[2] پرداختند. در این مطالعه از داده‌هایی مانند تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی حاصل از گریس، پوشش گیاهی، بارش، رطوبت خاک و داده‌های تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای استفاده شد. در نهایت تعدادی از چاه‌ها برای اعتبارسنجی استفاده شدند که با نتایج حاصل از مدل‌سازی مطابقت خوبی داشتند *[۲]*.

هدف از این مطالعه علاوه بر ریزمقیاس‌نمایی تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی حاصل از گریس، ریزمقیاس-نمایی تغییرات ماهانه سطح آبهای زیرزمینی ، با برداشتن تأثیر مجموعه‌ای از پارامترهای هیدرولوژی از روی تغییرات ذخایر آب زمینی می‌باشد. همچنین همه داده‌های مورد استفاده برای ریزمقیاس‌نمایی از مشاهدات ماهواره‌ای و مدل‌های جهانی هیدرولوژی به-دست می‌آیند. این مزیت این امکان را می‌دهد در مناطقی که داده‌های زمینی کافی و مناسب وجود ندارد، بتوان از این روش ریزمقیاس نمایی استفاده کرد؛ در صورتی که سایر روش‌های ریزمقیاس‌نمایی نیازمند اطلاعات زمینی در منطقه هستند.

در این مطالعه با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری بر مبنای ایجاد روابط رگرسیونی و تبدیل داده-های 1° حاصل از گریس به ابعاد پیکسل 0.25°، یک مدل طراحی شده است. در نهایت از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه مطابق شکل (۱)، با وسعت $1^\circ \times 1^\circ$ از ۴۹ تا ۵۰ درجه طول شرقی و از ۳۴ تا ۳۵ درجه عرض شمالی می‌باشد، که بیشتر مساحت آن در استان مرکزی و قسمت کوچکی از آن در استان همدان واقع شده است. همچنین این محدوده در حوضه‌ی آبریز اصلی فلات مرکزی و در حوضه‌ی آبریز فرعی دریاچه نمک می‌باشد.

برای انتخاب منطقه مورد مطالعه مناسب باید دو نکته رعایت شود:

۱) میزان بارش در منطقه در تغییرات ذخایر آب زمینی نقش مؤثری داشته باشد. یعنی مناطقی با عرض جغرافیایی بالا برای این روش مناسب نیستند، زیرا تأثیر بارش در تغییرات ذخایر آب زمینی کمتر می-شود.

۲) این محدوده $1^\circ \times 1^\circ$، باید دارای چاه‌های مشاهده‌ای با اندازه‌گیری‌های دقیق و پوشش زمانی مناسب با بازه زمانی مطالعه باشد *[۱]*.

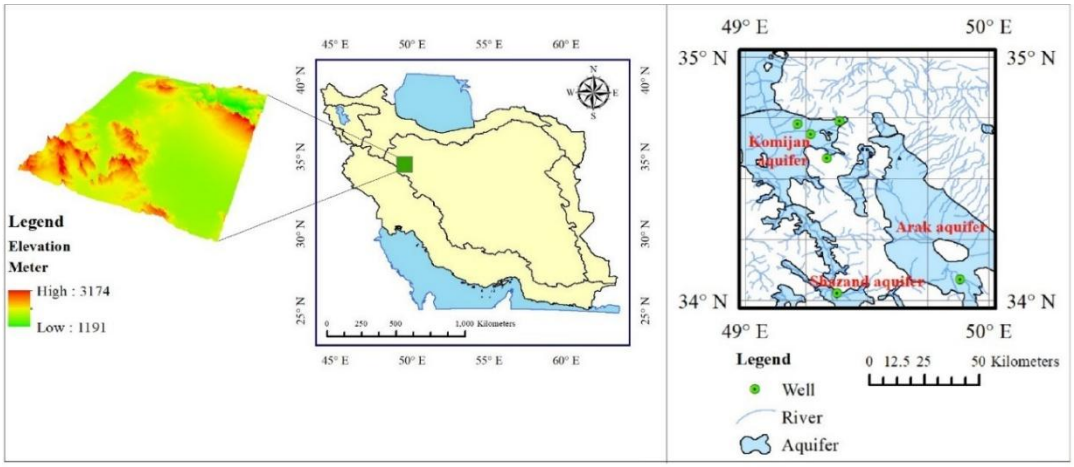
اما موضوعی که اهمیت مطالعه در این منطقه را بیشتر می‌کند، اول برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است که منجر به ممنوعه شدن همه دشت‌های این منطقه شده است. دوم پدیده فرونشست می‌باشد که به-عنوان یک چالش جدی در این محدوده بطور گسترده رخ داده است *[۶]*. در شکل (۱-الف)، محدوده مطالعاتی به رنگ سبز روی نقشه ایران قابل مشاهده می‌باشد و همچنین وضعیت منطقه از نظر ارتفاعی نمایش داده شده است، بیشتر مساحت این محدوده را زمین‌های هموار و دشت تشکیل می‌دهد. در شکل (۱-ب)، نیز منطقه مورد مطالعه به همراه آبخوان‌ها، رودها و چاه-های مشاهده‌ای مشخص شده است. مطابق شکل در این محدوده تعداد شش حلقه چاه مشاهده‌ای برای ارزیابی نتایج انتخاب شدند.

۳- داده‌ها

در این مطالعه داده‌های ورودی (پیش‌بینی کننده‌ها) در فرایند ریزمقیاس‌نمایی عبارت اند از: تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از گریس، بارش، تبخیر و تعرق، رواناب، تغییرات آب‌های سطحی، رطوبت خاک، آب معادل برف و برگاب. در نهایت تغییرات ذخایر آب زمینی با مقیاس 0.25° به عنوان خروجی (پیش‌بینی شونده) فرایند ریزمقیاس‌نمایی حاصل می‌شود.

[4] *GroundWater Level Changes*
[5] *Machine Learning*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]



(الف) (ب)

شکل ۱: منطقه مورد مطالعه

۳-۱- تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی

مأموریت گریس ، یک مأموریت ماهواره‌ای است که از دو ماهواره مشابه و مجزا از هم تشکیل شده است. این دو ماهواره در ارتفاع حدود ۵۰۰ کیلومتری از سطح زمین با فاصله ۲۲۰ کیلومتر از هم حرکت می‌کنند[۷]. با تغییر میدان ثقل محلی که ماهواره‌ها از آن عبور می‌کنند، فاصله بین آن‌ها تغییر کرده و با آنالیز این تغییرات فاصله، می‌توان طول موج‌های بلند و متوسط میدان ثقل و همچنین تغییرات زمانی آن را اندازه‌گیری نمود. بنابراین گریس می‌تواند تغییرات جرم در لایه سطحی زمین در مقیاس‌های بزرگ را به‌خوبی تخمین بزند[۸]. پس از حذف اثرات جوی و اقیانوسی، سیگنال باقیمانده در یک مقیاس زمانی ماهانه در زمین عمدتاً مربوط به تغییرات ذخایر آب زمینی است[۹]. تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از گریس، از نسخه ششم داده‌های ماهانه سطح سه مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه تگزاس امریکا به‌دست آمدند[۱].

۳-۲- بارش

در این مطالعه از داده بارش ماهانه ماهواره سنجش بارش استوایی(*TRMM*[۲]) و الگوریتم تخمین بارش *TRMM-3B43*با قدرت تفکیک مکانی ۰٫۲۵° استفاده شده است. این اطلاعات از وب‌سایت مربوطه[۳] قابل دریافت می‌باشند.

۳-۳- تبخیر و تعرق

داده تبخیر و تعرق هشت روزه سنجنده مودیس[۴] (*MOD16*) با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر از وب سایت[۵] مربوطه به‌دست آمد و بعد از پردازش در نرم‌افزارمحیط برای آشکارسازی تصاویر(*ENVI*[۶]) به ابعاد پیکسل ۰٫۲۵° و قدرت تفکیک زمانی ماهانه تبدیل شد.

۳-۴- داده‌های حاصل از مدل‌های هیدرولوژی

داده‌های ماهانه رطوبت خاک، آب معادل برف و برگاب[۷] از مدل جهانی هیدرولوژی سیستم جهانی پردازش دادههای زمینی(*GLDAS/NOAH*[۸])، با قدرت تفکیک مکانی ۰٫۲۵° دریافت شدند. همچنین داده‌های ماهانه

[1] *http://grace.jpl.nasa.gov*

[۲] *The Tropical Rainfall Measuring Mission*

[۳] *https://pmm.nasa.gov*

[۴] *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

[۵] *https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov*

[۶] *Environment for Visualizing Images*

[7] *Plant canopy water*

[۸] *Global Land Data Assimilation System*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

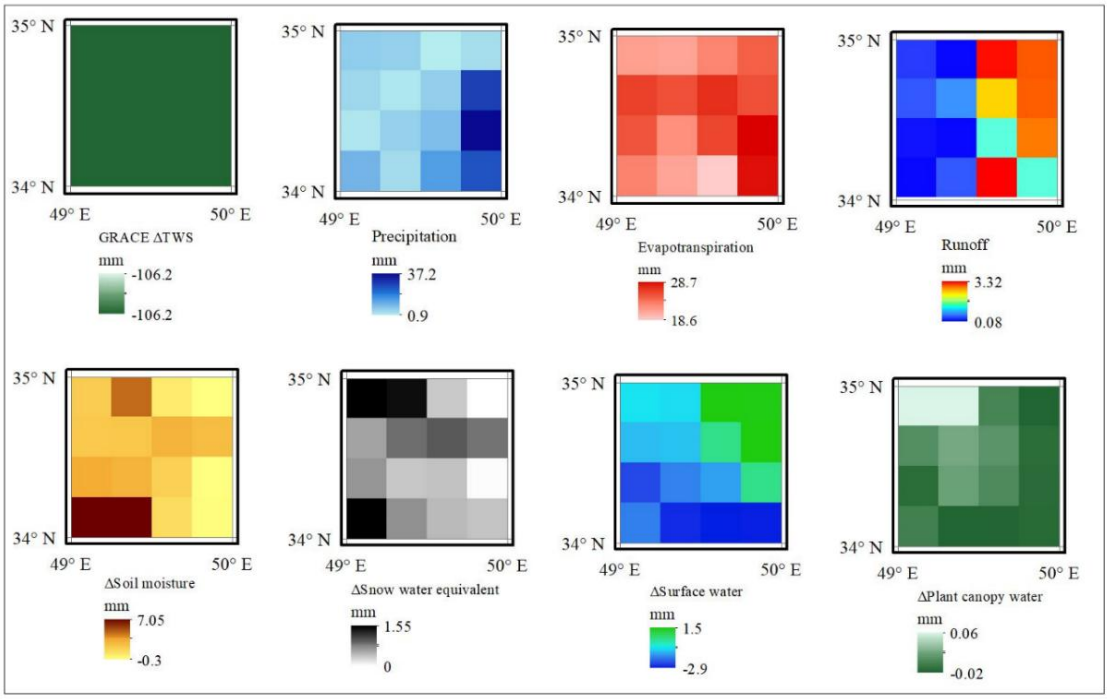
کل رواناب و رواناب سطحی از مدل جهانی هیدرولوژی *FLDAS/NOAH*، با ابعاد شبکه‌بندی ۰٫۱° دریافت و به ابعاد ۰٫۲۵° تبدیل شدند. مجموعه این داده‌ها از وب-سایت مربوطه (*https://disc.gsfc.nasa.gov*) قابل دریافت می‌باشند.

۳-۵- سطح آب‌های زیرزمینی

برای اطلاع از نحوه رفتار سطح آب‌های زیرزمینی از داده ماهانه شش حلقه چاه موجود در محدوده مطالعاتی استفاده شد. دلیل انتخاب این چاه‌ها پوشش زمانی مناسب با بازه زمانی مطالعه و معتبر بودن اطلاعات می‌باشد. این اطلاعات از وب‌سایت شرکت مدیریت منابع آب ایران (*http://wrs.wrm.ir*) دریافت شده است.

متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه، مراحل پردازش هر کدام و جزئیات آن‌ها بطور خلاصه در جدول (۱) آورده شده است.

شکل(۲) مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد که مربوط به ماه ژانویه ۲۰۱۵ (از آخر دسامبر ۲۰۱۴ تا آخر ژانویه ۲۰۱۵) می‌باشد.



شکل ۲: این نقشه‌ها داده‌های مورد استفاده در این مطالعه را در ماه ژانویه ۲۰۱۵ نشان می‌دهد. همه داده‌ها به ابعاد ۰٫۲۵° تبدیل شده‌اند و تنها داده تغییرات ذخایر آب زمینی ابعاد ۱°×۱° دارد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

جدول ۱: خلاصه‌ای از متغیرها، منابع و پردازش‌های مورد استفاده در فرایند ریزمقیاس‌نمایی

واحد	پردازش‌ها	متغیر
تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی برحسب *[mm]*	دانلود داده ها از نسخه ۶ مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه تگزاس با قدرت تفکیک *[1°×1°]*	تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از داده های گریس
بارش ماهیانه بر حسب *[mm]*	به *[mm/hour]* تبدیل از واحد *[mm/month]* واحد با قدرت تفکیک *[0.25°×0.25°]*	بارش حاصل از مشاهدات ماهواره سنجش بارش استوایی
تبخیر و تعرق ماهیانه بر حسب *[mm]*	تبدیل از واحد *[kg.m^{-2}/8day]* به واحد *[mm/month]* و قدرت تفکیک *[500m×500m]* به قدرت تفکیک *[0.25°×0.25°]*	تبخیر و تعرق حاصل از مشاهدات سنجنده مودیس با قدرت تفکیک *500m*
رواناب ماهیانه بر حسب *[mm]*	تبدیل از واحد *[kg.m^{-2}/s]* به واحد *[mm/month]* و قدرت تفکیک *[0.1°×0.1°]* به قدرت تفکیک *[0.25°×0.25°]*	رواناب حاصل از مدل هیدرولوژی *FLDAS/NOAH*
آب سطحی ماهیانه بر حسب *[mm]*	تبدیل از واحد *[kg.m^{-2}/s]* به واحد *[mm/month]* و قدرت تفکیک *[0.1°×0.1°]* به قدرت تفکیک *[0.25°×0.25°]*	آب سطحی حاصل از مدل هیدرولوژی *FLDAS/NOAH*
رطوبت ماهیانه خاک بر جسب *[mm]*	دانلود داده ها با قدرت تفکیک *[0.25°×0.25°]*	رطوبت خاک حاصل از مدل هیدرولوژی *GLDAS/NOAH*
برگاب ماهیانه بر حسب *[mm]*	دانلود داده ها با قدرت تفکیک *[0.25°×0.25°]*	برگاب حاصل از مدل هیدرولوژی *GLDAS/NOAH*
آب معادل برف ماهیانه بر حسب *[mm]*	دانلود داده ها با قدرت تفکیک *[0.25°×0.25°]*	آب معادل برف حاصل از مدل هیدرولوژی *GLDAS/NOAH*
تغییرات ماهیانه آب زیرزمینی بر حسب *[mm]*	تبدیل واحد از *[m]* به *[mm]* با قدرت تفکیک *[0.25°×0.25°]*	تغییرات سطح چاه

۴- روش ریزمقیاس‌نمایی و مدل‌سازی

بطور کلی، ریزمقیاس‌نمایی را می‌توان تقسیم‌بندی فضایی اطلاعات با یک تغییر از مقیاس بزرگ یا مقیاس متوسط به مقیاس مناسب‌تر و دقیق‌تر دانست. فرایند ریزمقیاس‌نمایی شامل فرضیاتی است که برای شرایط و مناطقی خاص برقرار هستند[۱۰و۱۱].

تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی را می‌توان با پارامترهای هیدرولوژی بارش (P[1])، تبخیر و تعرق

[1] *Precipitation*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

(ET[1]) و رواناب (R[2]) با استفاده از رابطه (۱) به صورت زیر به‌دست آورد[۱۲]:

رابطه(۱) $$\Delta S_i = P_i - ET_i - R_i$$

که در آن ΔS کل تغییرات ذخایر آب زمینی (شامل تغییرات در ذخیره آب سطحی، رطوبت خاک و آب زیرزمینی) در ماه i ام می‌باشد. همه متغیرها دارای واحدی از طول و میانگین ماهانه می‌باشند.

فرض اصلی این مطالعه این است که تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از گریس و ΔS حاصل از رابطه (۱) ارتباط نزدیکی با هم دارند. بر این اساس می‌توان قدرت تفکیک مکانی مشاهدات گریس را بهبود بخشید. بر مبنای این فرض، در این تحقیق از روش رگرسیون بعنوان یکی از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری، برای مدل‌سازی استفاده می‌شود[۱].

۴-۱- روش رگرسیون

مراحل روش رگرسیونی به کار برده شده که در شکل(۳) به طور خلاصه آورده شده به صورت زیر است:

۱- میانگین‌گیری مکانی از داده‌های تبخیر و تعرق به‌دست آمده از سنجنده مودیس (شبکه‌ای از نقاط با فواصل ۵۰۰ متر) و رواناب حاصل از مدل جهانی هیدرولوژی *FLDAS/NOAH* (شبکه‌ای از نقاط با فواصل $^{\circ}$۰/۱) و تبدیل آن‌ها به شبکه‌ای با ابعاد $^{\circ}$۰/۲۵.

۲- محاسبه ΔS برای شبکه‌ای با ابعاد $^{\circ}$۰/۲۵ (با استفاده از رابطه ۱) و محاسبه $\Delta S^{\circ/۱}$ با میانگین‌گیری مکانی از $\Delta S^{\circ/۲۵}$

۳. ایجاد یک رابطه رگرسیونی تجربی بین $\Delta S^{\circ/۱}$ و $\Delta TWS^{\circ/۱}$ برای بازه زمانی مناسب، رابطه‌ای که بالاترین ضریب تعیین (R^2) را داشته باشد، انتخاب می‌شود.

۴. تخمین ماهانه $\Delta TWS^{\circ/۱}$ از $\Delta S^{\circ/۱}$ با استفاده از معادله رگرسیونی به‌دست آمده در مرحله (۳).

۵. محاسبه مقادیر باقیمانده بین $\Delta TWS^{\circ/۱}$ محاسباتی حاصل از $\Delta S^{\circ/۱}$ و $\Delta TWS^{\circ/۱}$ مشاهداتی.

۶. تخمین $\Delta TWS^{\circ/۲۵}$ از روی $\Delta S^{\circ/۲۵}$

۷. تصحیح مقادیر $\Delta TWS^{\circ/۲۵}$ با اضافه کردن مقادیر باقیمانده‌های به‌دست آمده از مرحله (۵) (این مرحله برای ریزمقیاس‌نمایی نهایی ضروری است.)

به این دلیل در مرحله ۳ از ضریب تعیین (R^2) استفاده شده است که این ضریب بیانگر این است که مدل چند درصد از داده‌های ورودی را توانسته به خوبی بازتولید کند. مقدار آن از صفر تا یک تغییر می‌کند، مقادیر نزدیک به یک نشانگر خطای واریانس کمتر می‌باشند و معمولاً مقادیر بالاتر از ۰/۵ قابل قبول هستند[۱۳].

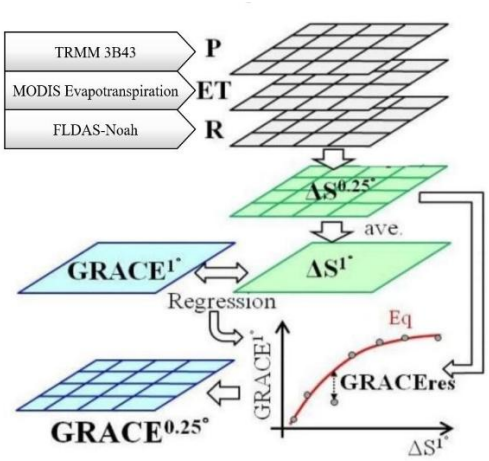
سری‌های زمانی ΔS به‌دست آمده از رابطه (۱) و تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از گریس از ژوئن ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۱۵، معادل ۱۰۳ ماه در شکل(۴) نشان داده شده است. ماه‌هایی که داده تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از گریس وجود نداشت با روش درونیابی توسط مقادیر ماه‌های دیگر کامل شد.

البته برای ایجاد رابطه مناسب بین سری‌های زمانی تغییرات ذخایر آب زمینی و ΔS روند خطی سری زمانی تغییرات ذخایر آب زمینی حذف شده است. در شکل (۴) اختلاف زمانی چهار ماهه بین دو نمودار دیده می‌شود. این فاصله زمانی نشان‌دهنده آن است که تغییرات جرم با چهار ماه تأخیر همراه است. علت تأخیر این است که با شروع بارش در مناطق کوهستانی، حرکت آب حاصل از آن عمدتاً در جهت شیب به سمت زمین‌های پست‌تر آغاز می‌شود و به تدریج حجم آب رواناب‌ها، رطوبت خاک و در نهایت آب‌های زیرزمینی افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که مدت زمانی طول می‌کشد تا آب حاصل از بارش به توده‌ی جرم آبی برسد که تغییرات آن برای گریس قابل اندازه‌گیری باشد[۱۴]. در مطالعات دیگر نیز این تأخیر وجود دارد و مدت زمان آن با توجه به منطقه مورد مطالعه متفاوت است.

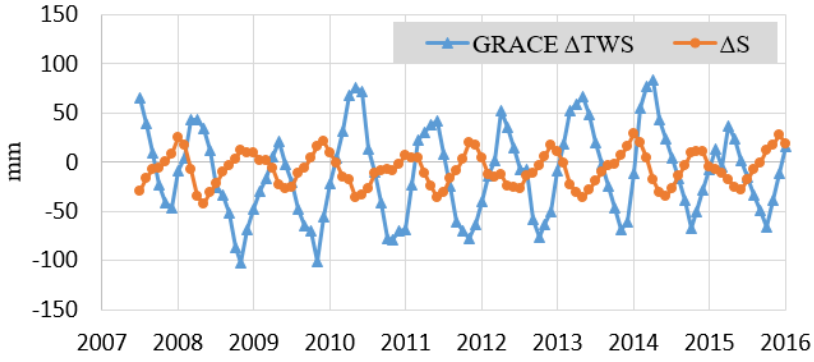
[1] *Evapotranspiration*

[2] *Runoff*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]



شکل ۳: فرایند ریزمقیاس‌نمایی آماری *[۱]*



شکل ۴: سری زمانی تغییرات ذخایر آب زمینی ماهانه حاصل از گریس و ΔS برای منطقه مورد مطالعه طی دوره ژوئن ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۱۵ (در این نمودار محور افقی بیانگر زمان بر حسب سال و محور قائم بیانگر تغییرات ذخایر آب زمینی بر حسب میلیمتر است).

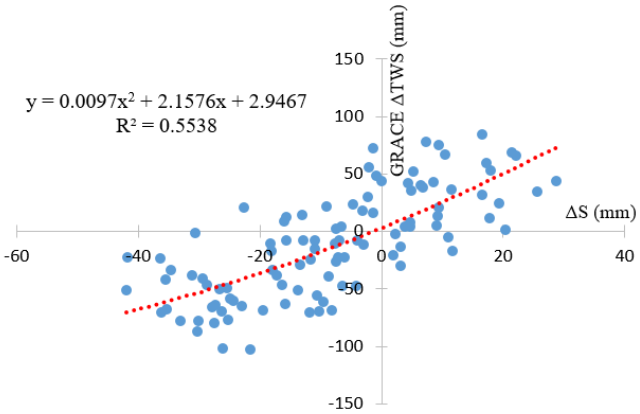
بعد از اعمال این تأخیر زمانی، رابطه رگرسیون تجربی مطابق شکل (۵) ایجاد می‌شود. بهترین رابطه، یک چندجمله‌ای درجه دو (رابطه (۲)) با ضریب R^2=۰/۵۵ می‌باشد.

رابطه(۲)

$$\Delta TWS_{i+4} = 0.0097\Delta S_i^2 + 2.1576\Delta S_i + 2.9467$$

اندیس i نشان‌دهنده ماه و اندیس $i+4$ نشان می‌دهد که تأثیر کل تغییرات جرم در ماه جاری، چهار ماه بعد اندازه‌گیری خواهد شد. نقص مدل‌سازی ناشی از فرایند برازش با اضافه کردن مقادیر باقیمانده‌ها که در مرحله(۷) روش رگرسیون توضیح داده شد، بهبود میابد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]



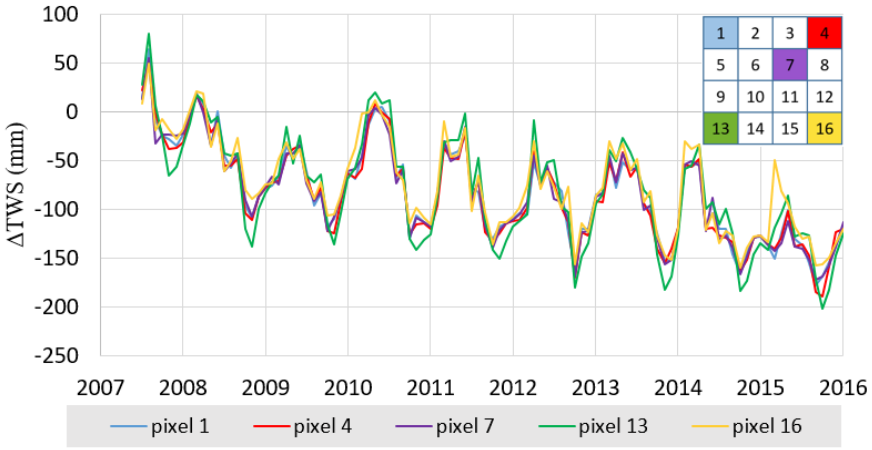
شکل ۵: تابع رگرسیون ماهانه بین ΔTWS° و ΔS° (در این نمودار محور افقی بیانگر کل تغییرات ذخایر آب زمینی بر حسب میلیمتر و محور قائم بیانگر تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی حاصل از داده های گریس بر حسب میلیمتر است).

۵- نتایج و اعتبارسنجی

در این قسمت نتایج پژوهش و اعتبار سنجی آنها با استفاده از داده های چاههای مشاهداتی ارائه می شود.

۵-۱- تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی (ΔTWS) ریزمقیاس شده

بر اساس روش شرح داده شده، تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی از یک شبکه با ابعاد ۱ درجه ($\Delta TWS^{1^{\circ}}$) به شبکه‌ای با ابعاد ۰٫۲۵ درجه ($\Delta TWS^{0.25^{\circ}}$) ریزمقیاس شد. بدین ترتیب، ۱۶ پیکسل کوچک به جای یک پیکسل بزرگ تغییرات ذخایر آب زمینی را با جزئیات بیشتر نشان می‌دهد. در شکل (۶)، سری زمانی پنج پیکسل به شماره‌های ۱، ۴، ۷، ۱۳ و ۱۶ برای نمونه نشان داده شده است.



شکل ۶: سری‌های زمانی ریزمقیاس شده تغییرات ذخایر آب زمینی با مقیاس ۰٫۲۵°، سری زمانی مربوط به هر پیکسل با رنگ متناظر آن نشان داده شده است. در این نمودار محور افقی بیانگر زمان بر حسب سال و محور قائم بیانگر تغییرات ذخایر آب زمینی بر حسب میلیمتر است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

۵-۲- اعتبارسنجی نتایج تغییرات ذخایر آب زمینی ریزمقیاس شده

در مطالعات قبلی، بسیاری از محققان از تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای، برای اعتبارسنجی تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از گریس استفاده کرده‌اند[۱۵]. به این منظور بعد از فرایند ریزمقیاس‌نمایی، سری‌های زمانی ΔTWS^{1° و $\Delta TWS^{0/25^\circ}$ را با داده‌های چاه‌هایی که در شکل (۱) به آن اشاره شد، اعتبارسنجی می‌کنیم. با توجه به اینکه ضریب آماری R^2 بیانگر سهم واریانس داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مدل ایجادشده می‌باشد و کارایی مدل در به‌کارگیری داده‌های ورودی را نشان می‌دهد، از این ضریب برای بیان کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌کنیم. به این ترتیب که اگر R^2 بین $\Delta TWS^{0/25^\circ}$ با تغییرات سطح آب چاه‌ها، بیشتر از R^2 بین ΔTWS^{1° و تغییرات سطح آب چاه‌ها باشد، نشان دهنده این است که روش ریزمقیاس‌نمایی مؤثر است و می‌تواند قدرت تفکیک مکانی ΔTWS حاصل از گریس را بهبود ببخشد[۱].

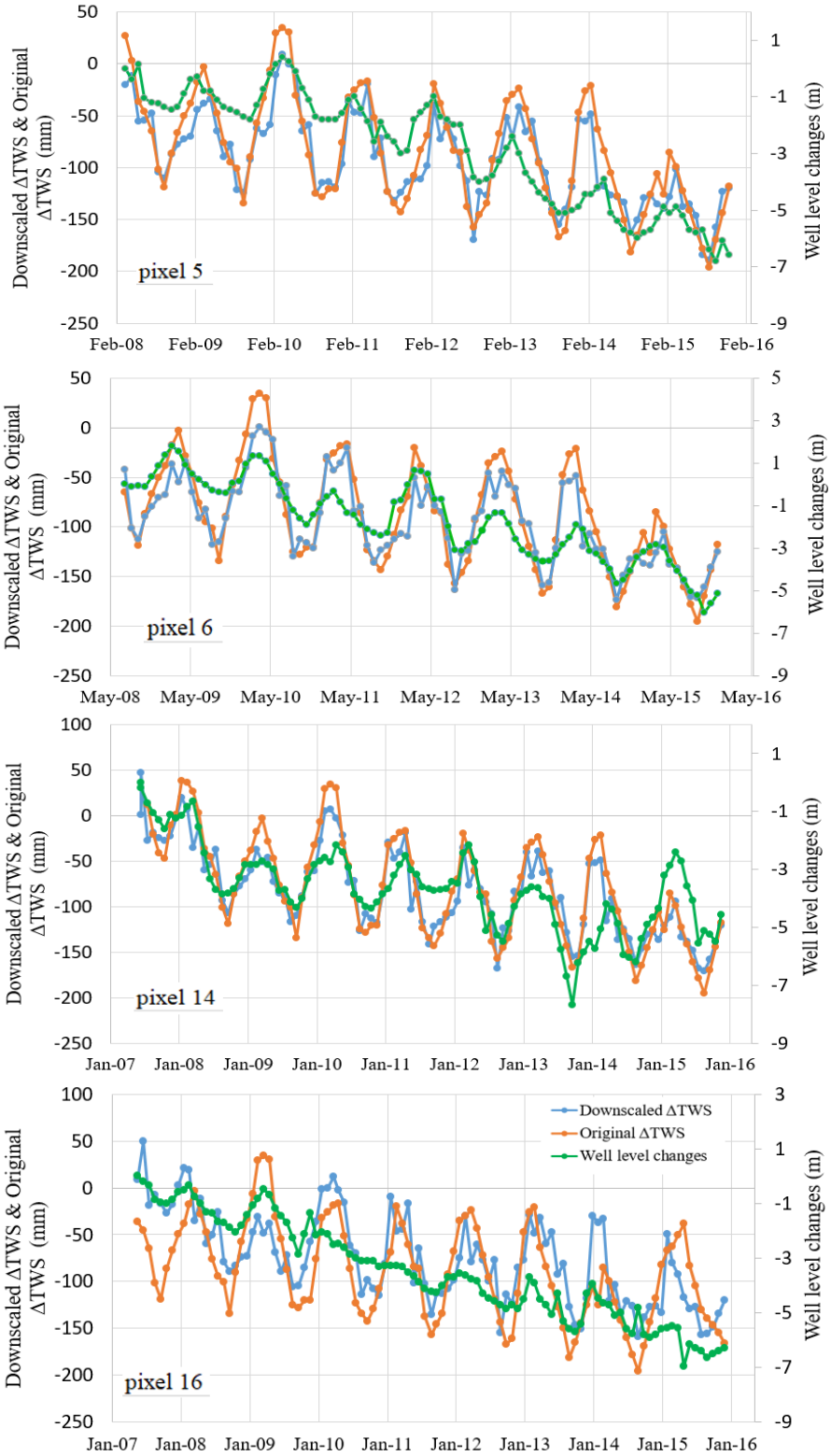
نمودارهای شکل (۷) نشان‌دهنده سری‌های زمانی ΔTWS^{1° و $\Delta TWS^{0/25^\circ}$ و تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای در پیکسل‌های ۵، ۶، ۱۴ و ۱۶ می‌باشند. البته در پیکسل ۶ از میانگین تغییرات سطح آب سه حلقه چاه که پوشش زمانی مناسبی داشتند، استفاده شده است. بیشترین و کمترین مقادیر تغییرات ذخایر آب زمینی به ترتیب در فصول بارانی و خشک سال دیده می‌شود.

R^2 محاسبه شده بین سری زمانی تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای و سری‌های زمانی تغییرات ذخایر آب زمینی ریزمقیاس شده $\Delta TWS^{0/25^\circ}$ و تغییرات ذخایر آب زمینی اصلی ΔTWS^{1° در جدول (۲) آورده شده است. در هر چهار پیکسل مورد بررسی، داده‌های ریزمقیاس شده، R^2 بیشتری را نشان می‌دهند.

جدول ۲: R^2 بین سری زمانی تغییرات سطح آب چاه‌ها و سری زمانی‌های تغییرات ذخایر آب زمینی ریزمقیاس شده و تغییرات ذخایر آب زمینی اصلی

مابین تغییرات سطح آب چاهها و تغییرات ذخایر آب زمینی ریز مقیاس شده	مابین تغییرات سطح آب چاهها و تغییرات ذخایر آب زمینی اصلی	R^2
۰/۵۳	۰/۴۳	پیکسل ۵
۰/۵۷	۰/۵۰	پیکسل ۶
۰/۵۷	۰/۵۶	پیکسل ۱۴
۰/۵۳	۰/۳۳	پیکسل ۱۶

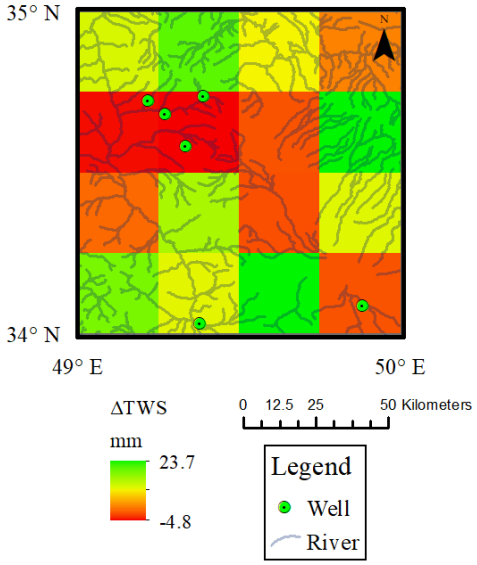
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]



شکل ۷: مقایسه بین تغییرات سطح آب چاه‌ها (محور سمت راست) با $\Delta TWS^{/۲۵^{\circ}}$ ریزمقیاس شده و ΔTWS° اصلی حاصل از گریس (محور سمت چپ). در این نمودار محور افقی زمان بر حسب ماه می باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

شکل (۸)، ΔTWS ریزمقیاس شده را در ماه مـی ۲۰۱۰ برای ۱۶ پیکسل نشان مـی‌دهـد. قبـل از ریزمقیـاس-نمایی برای این منطقه تنهـا یـک مقـدار کلـی منفـی وجود داشت، اما بعد از ریزمقیاس‌نمایی مشـاهده مـی-شود در بعضی پیکسل‌ها تغییـرات مثبـت و در بعضـی دیگر منفی اسـت. تغییـرات مثبـت یعنـی ذخـایر آب زمینی نسبت به مـاه قبلـی افـزایش یافتـه و تغییـرات منفی یعنی ذخـایر آب زمینـی نسـبت بـه مـاه قبلـی کاهش یافته است.



شکل ۸: تغییرات ذخایر آب زمینی ریزمقیاس شده در ماه می ۲۰۱۰

۵-۳- ریزمقیاس‌نمایی تغییرات سـطح آب‌هـای زیرزمینی *(ΔGWL)* حاصل از *GARCE*

TWS شامل همه آب‌های زیرزمینی، آب‌هـای سـطحی، رطوبت خاک، آب معادل برف و آب موجـود در پوشـش گیاهان می‌باشـد. طبـق رابطـه (۳) بـا حـذف یکسـری پارامترهـای هیـدرولوژی از روی تغییـرات ذخـایر آب زمینی می‌توان به تغییرات سـطح آب‌هـای زیرزمینـی *(ΔGWL)* رسید [۱۶و۱۷].

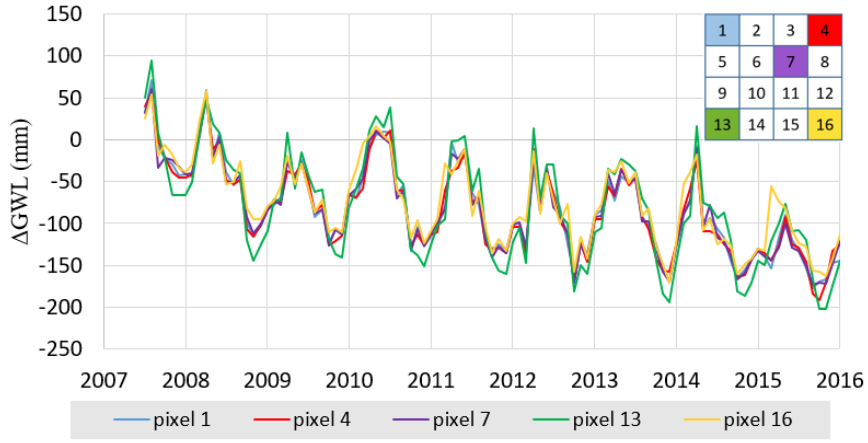
رابطه(۳)

$$\Delta GWL = \Delta TWS - \Delta SWE - \Delta SM - \Delta SW - \Delta CW$$

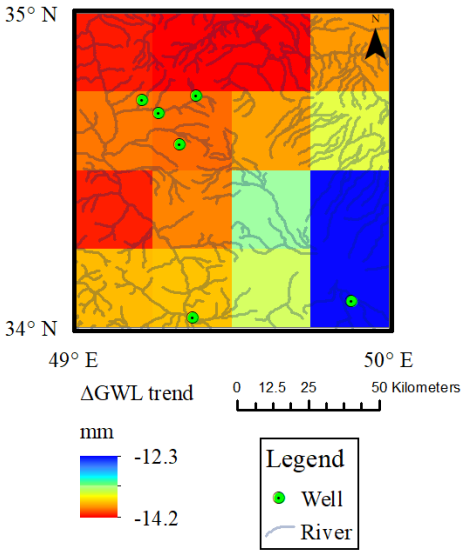
در رابطـه (۳)، ΔGWL تغییـرات آب‌هـای زیرزمینـی، ΔTWS تغییرات ذخایر آب زمینی، ΔSWE تغییرات آب معـادل بـرف، ΔSM تغییـرات رطوبـت خـاک، ΔSW تغییرات آب‌های سطحی و ΔCW تغییرات برگـاب مـی باشند. شکل (۹) تغییرات سـطح آب‌هـای زیرزمینـی را بـرای پیکسـل‌هـای شـماره۱، ۴، ۷، ۱۳ و ۱۶ نشـان میدهد.

شـکل (۱۰) رونـد تغییـرات سـطح آبهـای زیرزمینـی ریزمقیاس شده را از ژوئن ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۱۵ برای شانزده پیکسل نشان می‌دهد. قبل از ریزمقیـاس‌نمـایی، برای این منطقه تنها یک مقدار روند کلی وجود داشت، اما بعد از ریزمقیاس‌نمایی به جای یک مقدار، ۱۶ مقدار تغییـرات را بـا جزئیـات بیشـتر نشـان مـی‌دهنـد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]



شکل ۹: سری‌های زمانی ریزمقیاس شده مربوط به تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی با مقیاس °۰٫۲۵، سری زمانی مربوط به هر پیکسل با رنگ متناظر آن نشان داده شده است.



شکل ۱۰: روند تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی ریزمقیاس شده برای منطقه مورد مطالعه طی دوره ژوئن ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۱۵

۵-۴- اعتبارسنجی نتایج تغییرات سطح آبهای زیرزمینی ریزمقیاس شده

در این قسمت به اعتبارسنجی نتایج تغییرات سطح آبهای زیرزمینی ریزمقیاس شده پرداخته می شود.

۵-۴-۱- شاخص آماری *p value*

برای اطمینان از وجود روند در تغییرات سطح آبهای زیرزمینی حاصل از گریس که در شکل (۱۰) وجود دارد، از شاخص آماری *p value* استفاده می‌کنیم، به این ترتیب مشخص می‌شود که در کدام یک از پیکسل-ها روند با سطح اطمینان بالا وجود دارد. بدین منظور برای سطح اطمینان ۰٫۹۵ درصد، می‌توان مقدار p را برای یک رگرسیون دو متغیره به کمک توزیع *t-student's* و رابطه (۴) محاسبه کرد[۱۸].

$$t = \frac{\sqrt{R^2.(n-2)}}{1-R^2} \quad \text{رابطه(۴)}$$

در این رابطه توزیع *t-student's* با *n-2* درجه آزادی، R ضریب همبستگی بین سری زمانی داده‌ها و تابع خطی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

برازش شده و n تعداد ماه‌ها بیان می‌شود. در این آزمون دو فرض وجود دارد:

(۱) فرض صفر: هیچ روندی وجود ندارد.

(۲) فرض جایگزین: روند وجود دارد.

هنگامی که مقدار p کمتر از ۰/۰۵ باشد، فرض صفر رد می‌شود، یعنی روند وجود دارد[۱۶و۱۸].

جدول (۳) مقادیر p را برای هر کدام از شبکه‌های ریزمقیاس شده نشان می‌دهد. همه مقادیر از ۰/۰۵ کوچکتر هستند، یعنی با اطمینان ۰/۹۵ درصد می‌توان روندی را که شکل (۱۰) نشان می‌دهد، پذیرفت.

جدول ۳: نتایج مقدار p محاسبه شده برای ۱۶ پیکسل

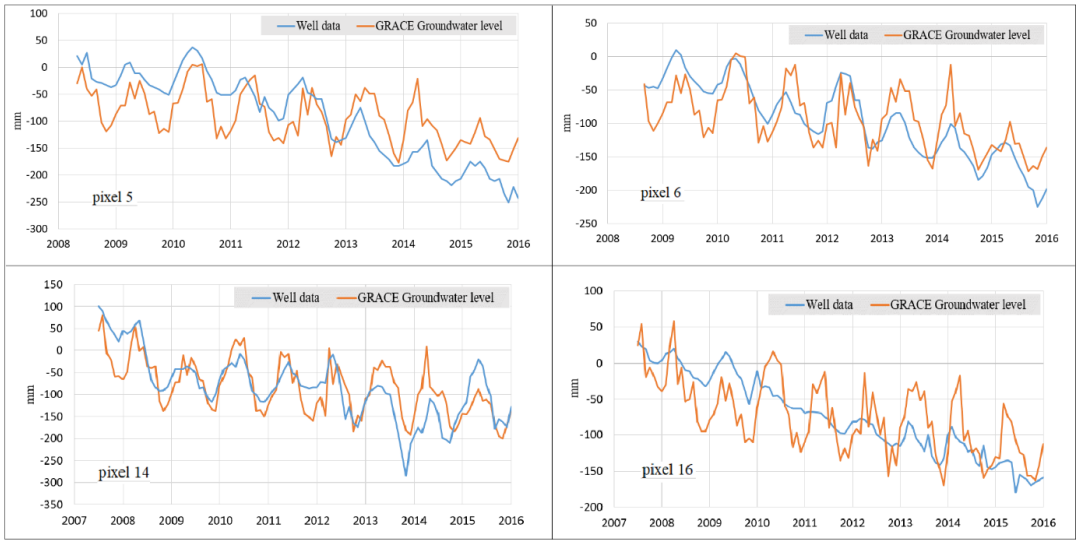
۱	$۲/۵۵\times۱۰^{-۱۴}$	۹	$۷/۸۸\times۱۰^{-۱۳}$
۲	$۹/۸۶\times۱۰^{-۱۳}$	۱۰	$۵/۴۰\times۱۰^{-۱۲}$
۳	$۱/۱۴\times۱۰^{-۱۳}$	۱۱	$۲/۸۷\times۱۰^{-۱۳}$
۴	$۶/۰۶\times۱۰^{-۱۴}$	۱۲	$۳/۷۳\times۱۰^{-۱۱}$
۵	$۴/۵۲\times۱۰^{-۱۴}$	۱۳	$۲/۷۹\times۱۰^{-۹}$
۶	$۱/۱۱\times۱۰^{-۱۴}$	۱۴	$۴/۱۴\times۱۰^{-۱۰}$
۷	$۴/۸۱\times۱۰^{-۱۴}$	۱۵	$۶/۶۷\times۱۰^{-۱۲}$
۸	$۱/۲۶\times۱۰^{-۱۱}$	۱۶	$۲/۳۵\times۱۰^{-۱۲}$

۵-۴-۲- استفاده از چاه‌های مشاهده‌ای

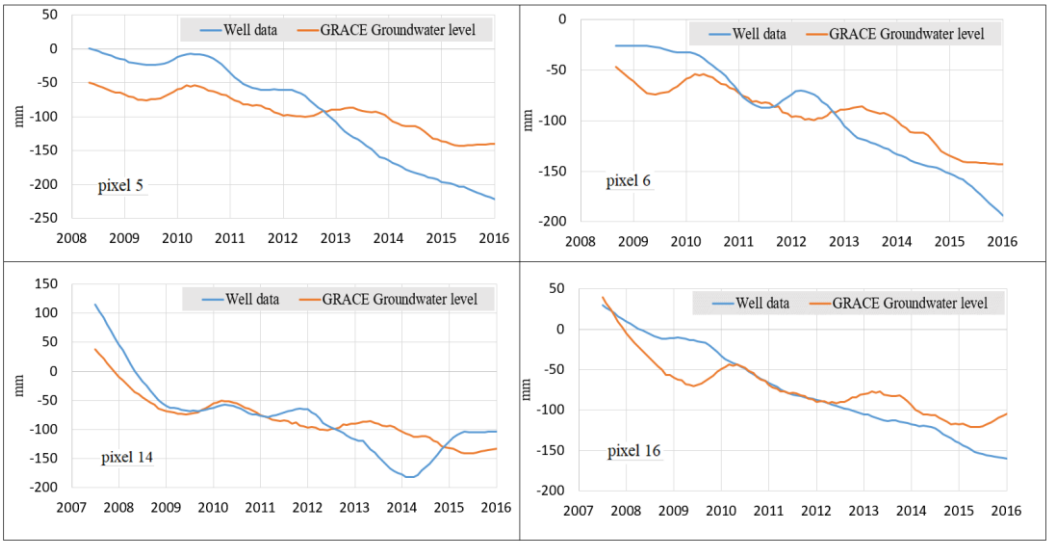
جهت ارزیابی نتایج تغییرات سطح آبهای زیرزمینی ریزمقیاس شده، از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای استفاده کردیم. به این منظور برای مقایسه دقیق‌تر داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای، آن‌ها را در ضریب متوسط ذخیره (S_y[1]) ضرب کردیم. این ضریب یک پارامتر هیدرولوژی بوده و برای هر آبخوان متفاوت است[۱۷]. این ضریب برای آبخوان‌هایی که در محدوده مطالعاتی ما هستند و در شکل (۱) نشان داده شده‌اند، از شرکت مدیریت منابع آب ایران گرفته شده است. ضرایب آبخوان‌های اراک، کمیجان و شازند به ترتیب برابر ۰/۰۳، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ می‌باشد. نمودارهای شکل (۱۱)، سری زمانی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی حاصل از چاه‌ها بعد از اعمال این ضرایب و تغییرات سطح آبهای زیرزمینی ریزمقیاس شده حاصل از گریس را برای پیکسل‌های مذکور، نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارهای شکل (۱۱) دیده می‌شود تغییرات سطح آبهای زیرزمینی حاصل از گریس با تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای همبستگی خیلی خوبی دارد. همچنین تغییرات فصلی که به دلیل تغییرات بارندگی در فصول مختلف سال، آبیاری و پمپاژ ایجاد می‌شوند، به وضوح در این نمودارها قابل مشاهده است.همچنین تغییرات بلندمدت برای نتایج ریزمقیاس شده حاصل از گریس و تغییرات سطح آب چاه‌ها در شکل(۱۲) آورده شده است. نکته قابل توجه وجود روند خطی نزولی در همه نمودارها می‌باشد که بیانگر کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه است. شکل (۱۳) نقشه چاه‌های پمپاژ قانونی، قنات‌ها و چشمه‌های موجود در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد که تعداد آن‌ها به ترتیب ۷۳۹۹، ۱۱۹۵ و ۴۸۲ می‌باشد. این آمار از شرکت مدیریت منابع آب کشور گرفته شده است. وجود این تعداد چاه موجب تخلیه حجم زیادی از منابع آب زیرزمینی در منطقه شده است.

[1] *Specific yield*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

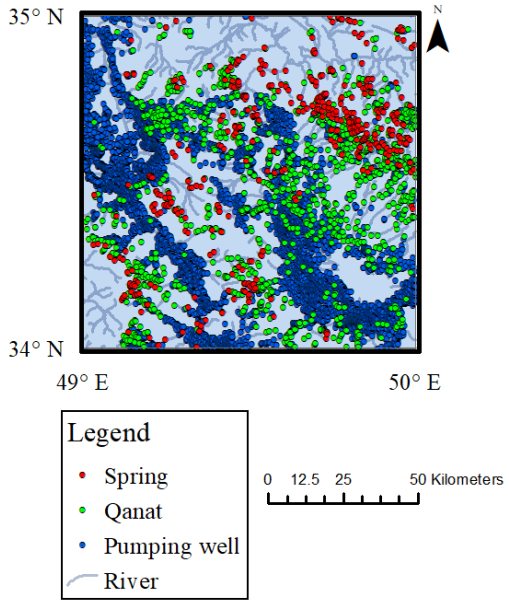


شکل ۱۱: مقایسه تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی حاصل از گریس با داده‌های تغییرات سطح آب چاه‌ها (محور افقی بیانگر زمان بر حسب سال و محور قائم سطح آب زیرزمینی بر حسب میلیمتر است.)



شکل ۱۲: مقایسه تغییرات بلندمدت سطح آب‌های زیرزمینی حاصل از گریس با داده‌های تغییرات بلند مدت سطح آب چاه‌ها (محور افقی بیانگر زمان بر حسب سال و محور قائم سطح آب زیرزمینی بر حسب میلیمتر است.)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]



شکل ۱۳: نقشه پراکندگی چاه‌های پمپاژ، قنات‌ها و چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

همان طور که از نمودارهای شکل‌های (۱۱) و (۱۲) پیداست همبستگی خوبی بین داده‌های چاه‌ها با نتایج حاصل از مدل‌سازی دیده می‌شود. برای بیان دقیق‌تر این ارتباط از شاخص‌های آماری زیر استفاده می‌کنیم[۱۳و۱۹]:

- خطای جذر میانگین مربعات (*RMSE*[۱]): این شاخص به دلیل اینکه دارای واحد است تفسیر بهتری از داده‌های شبیه‌سازی‌شده ارائه می‌کند. در ایده آل ترین حالت هنگامی که مقدار آن صفر شود یعنی خطای مدل صفر است.

- ضریب کارایی مدل نش ساتکلیف[۲] (*NSE*): این شاخص آماری اندازه نسبی واریانس باقیمانده (نویز) را نسبت به واریانس داده‌های اندازه‌گیری تعیین می‌کند. *NSE* از منفی بی‌نهایت تا ۱+ تغییر می‌کند و *NSE* =۱ یعنی مدل کامل بهینه است و مقادیر بین صفر و یک کارایی قابل قبول مدل را نشان می‌دهد و مقادیر کوچکتر از صفر نشان می‌دهند که میانگین مشاهدات، پیش‌بینی بهتری نسبت به مقدار شبیه‌سازی‌شده می‌باشند، که نشان‌دهنده عملکرد غیرقابل قبول است.

- میانگین خطای مطلق (*MAE*[۳]): این شاخص آماری نیز معیاری برای اندازه‌گیری عملکرد مدل می‌باشد و از آنجایی که دارای واحد است، امکان تفسیر عددی از نتایج مدل‌سازی را فراهم می‌کند. هرچه مقدار *MAE* به صفر نزدیکتر باشد کارایی بهتر مدل را نشان می‌دهد. *MAE* وزن یکسان به همه داده‌ها می‌دهد و برای مشاهداتی که داده‌های پرت زیادی دارند کارایی مدل را بهتر توصیف می‌کند.

- خطای متوسط (*ME*[۴]): معیاری آماری است که برای بیان کارایی مدل جهت خطاها را در نظر می‌گیرد. *ME* نیز دارای واحد می‌باشد.

- ضریب همبستگی (*R*): شاخصی است که میزان همبستگی و رابطه خطی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و داده‌های اندازه‌گیری‌شده را توصیف می‌کند. دامنه تغییرات آن از ۱- تا ۱+ است، اگر $r = 0$ باشد هیچ رابطه

[۱] *Root Mean Square Error*
[۲] *Nash-Sutcliff Error*
[۳] *Mean Absolute Error*
[۴] *Mean Error*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

خطی وجود ندارد و اگر $r=+1$ و $r=-1$ باشد، نشاندهنده یک رابطه خطی کامل مثبت یا منفی است.
- و ضریب تعیین (R^2) که به آن اشاره شد.

جدول (۴) شاخص‌های آماری محاسبه شده مربوط به پیکسل‌های ۵، ۶، ۱۴ و ۱۶ را نشان می‌دهد.

جدول ۴: شاخص‌های آماری محاسبه شده بین داده‌های تغییرات سطح آب چاه‌ها و تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی ریزمقیاس شده حاصل از *GRACE*

پیکسل	*RMSE (mm)*	*NSE*	*MAE (mm)*	*ME (mm)*	*R*	R^2
۵	۵۶٫۴	۰٫۴۹	۴۹٫۹۰	۰٫۰۰۶	۰٫۷۱	۰٫۵۰
۶	۳۸٫۱۷	۰٫۶۰	۳۱٫۹۵	$۹٫۵\times۱۰^{-۵}$	۰٫۷۴	۰٫۵۴
۱۴	۵۰٫۷۲	۰٫۵۱	۴۰٫۹۴	$۹٫۱\times۱۰^{-۵}$	۰٫۷۲	۰٫۵۳
۱۶	۴۱٫۷۸	۰٫۴۴	۳۵٫۱۴	$۴٫۵\times۱۰^{-۶}$	۰٫۷۰	۰٫۴۹

مقادیر *RMSE* و *MAE* به‌دست آمده بیانگر وجود عدم قطعیت در مدل‌سازی انجام‌شده می‌باشد. این عدم قطعیت ناشی از فرضیات به کار برده‌شده در این مدل-سازی، نحوه اندازه‌گیری داده‌ها، مدل‌های جهانی هیدرولوژی استفاده شده و عوامل دیگر می‌باشد که در هر مرحله به فرایند ریزمقیاس‌نمایی اضافه شده است. در مجموع می‌توان با این نتایج، مدل‌سازی انجام‌شده و فرایند ریزمقیاس‌نمایی را قابل قبول ارزیابی کرد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

هدف اصلی این مطالعه امکان‌سنجی ریزمقیاس‌نمایی تغییرات ماهانه سطح آب‌های زیرزمینی حاصل از گریس و اعتبارسنجی نتایج حاصل از آن بود. روش ریزمقیاس‌نمایی مورد استفاده در این مطالعه، روش آماری و بازه زمانی از ژوئن ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۱۵ در نظر گرفته شد. پس از ریزمقیاس‌نمایی، سری‌های زمانی و نقشه‌هایی از تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد که با جزئیات بیشتری میزان تغییرات را نشان می‌داد. در نهایت به کمک چاه-های مشاهده‌ای نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام‌شده اعتبارسنجی شدند. بدین منظور از شاخص‌های آماری استفاده شد که *RMSE* محاسبه‌شده بین ۳۸٫۱۷ تا ۵۶٫۴ میلی‌متر و R^2 آن‌ها بین ۰٫۴۹ تا ۰٫۵۴ بود. نتایج نشان داد خروجی‌های ریزمقیاس‌شده با مشاهدات چاه-ها متناسب هستند، لذا این روش می‌تواند به‌طور مؤثری قدرت تفکیک مکانی مشاهدات گریس را از 1° به 0.25° بهبود بخشد.

از مزایای این روش این است که می‌توان توانایی پایش تغییرات ماهانه *TWS* و آب‌های زیرزمینی را به‌ویژه در مناطقی که با کمبود اطلاعات مواجه‌اند، افزایش داد. به علاوه اینکه همه داده‌های مورد استفاده برای ریزمقیاس‌نمایی از مشاهدات ماهواره‌ای و مدل‌های جهانی هیدرولوژی به‌دست می‌آیند. این مورد یک مزیت نسبت به سایر روش‌های ریزمقیاس‌نمایی می-باشد، که نیاز به اطلاعات بیشتری در منطقه دارند.

همه نتایج و نمودارها روند کاهشی در سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه را نشان داد. این مورد به دلیل استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی می‌باشد. با توجه به تعداد زیاد چاه‌های پمپاژ و وجود پدیده‌ی فرونشست در این محدوده، لزوم مدیریت و برنامه‌ریزی برای منابع آب‌زیرزمینی بیش از پیش احساس می‌شود. بطور کلی ریزمقیاس‌نمایی جزئیات و اطلاعات بیشتری از تغییرات آب‌های زیرزمینی در اختیار ما می‌گذارد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

این باعث می‌شود که اطلاعات از سطح کشوری و استانی به اطلاعاتی در مقیاس محلی و در سطح شهرستان تبدیل شوند. بنابراین مناطق بحرانی و همچنین مناطقی که دارای بیشترین تغییرات هستند، به‌طور دقیق‌تر شناسایی می‌شوند. در نتیجه فرایندهایی مانند مدیریت منابع آبی، برنامه‌ریزی و نظارت بر خشکسالی می‌تواند بطور موثرتری صورت بگیرد.

برای نتیجه‌گیری بهتر پیشنهاد می‌شود از اطلاعات یکسری از چاه‌های مشاهده‌ای که مشاهدات دقیق و پوشش زمانی مناسب دارند به عنوان پیش‌بینی کننده در فرایند ریزمقیاس‌نمایی استفاده شود و تنها تعدادی از چاه‌ها برای اعتبارسنجی نتایج در نظر گرفته شود. همچنین پیشنهاد می‌گردد با محاسبه حجم آبی که توسط چاه‌های پمپاژ از منابع آب زیرزمینی تخلیه می شود، سهم تاثیر فعالیت‌های انسانی بر آبخوان‌ها را از تغییرات طبیعی تفکیک کرد.

مراجع

[1] *Ning, S., Ishidaira, H., & Wang, J. "Statistical downscaling of GRACE-derived terrestrial water storage using satellite and GLDAS products." Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. Vol.70, No.4, PP. 133-138, 2014.*

[2] *Seyoum, W. M., Kwon, D., & Milewski, A. M. "Downscaling GRACE TWSA Data into High-Resolution Groundwater Level Anomaly Using Machine Learning-Based Models in a Glacial Aquifer System." Remote Sensing. Vol.11, No.7, PP. 824, 2019.*

[3] *Sun, A. Y. "Predicting groundwater level changes using GRACE data." Water Resources Research. Vol.49, No.9, PP. 5900-5912, 2013.*

[4] *Miro, M., & Famiglietti, J. "Downscaling GRACE remote sensing datasets to high-resolution groundwater storage change maps of California's Central Valley." Remote Sensing. Vol.10, Np.1, PP.143, 2018.*

[5] *Alley, W. M., & Konikow, L. F. "Bringing GRACE down to earth." Groundwater. Vol.53, No.6, PP. 826-829, 2015.*

[6] *Rajabi, A. M., & Ghorbani, E. "Land subsidence due to groundwater withdrawal in Arak plain, Markazi province, Iran." Arabian Journal of Geosciences. Vol.9, No.20, PP.738, 2016.*

[7] *Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., & Reigber, C. "The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results." Geophysical Research Letters. Vol.31, No.9, 2004.*

[8] *Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. "Physical geodesy." Springer Science & Business Media, 2006.*

[9] *Landerer, F. W., & Swenson, S. C. "Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. Water resources research." Vol.48, No.4, 2012.*

[10] *Yirdaw-Zeleke, S. "Implications of GRACE Satellite Gravity Measurements for Diverse Hydrological Applications." Doctoral dissertation, University of Manitoba, 2010.*

[11] *Jia, S. F., Zhu, W., Lu, A. F., & Yan, T. "A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam basin of China." Remote Sensing of Environment. Vol.115, No.12, PP. 3069-3079, 2011.*

[12] *Ghandhari, A., & Moghaddam, S. M. R. A. "Water balance principles: A review of studies on five watersheds in Iran." Journal of Environmental Science and Technology. Vol.4, No.5, PP. 465-479, 2011.*

[13] *Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations." Transactions of the ASABE. Vol.50, No.3, PP. 885-900, 2007.*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

[14] Ahmed, M., Sultan, M., Wahr, J., Yan, E., Milewski, A., Sauck, W., Becker, R. & Welton, B. "Integration of GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) data with traditional data sets for a better understanding of the time-dependent water partitioning in African watersheds." Geology. Vol.39, No.5, PP.479-482, 2011.

[15] Scanlon, B.R., Longuevergne, L. & Long, D. "Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA." Water Resources Research. Vol.48, No.4, 2012.

[16] Joodaki, G., J. Wahr, & S. Swenson. "Estimating the human contribution to groundwater depletion in the Middle East, from GRACE data, land surface models, and well observations." Water Resources Research. Vol.50, No.3, PP.2679–2692, 2014.

[17] Frappart, F., & Ramillien, G. "Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review." Remote Sensing. Vol.10, No.6, PP.829, 2018.

[18] Bryhn, A. C., & Dimberg, P. H. "An operational definition of a statistically meaningful trend." PLoS One. Vol.6, No.4, PP.e19241, 2011.

[19] Chai, T. and Draxler, R.R. "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)–Arguments against avoiding RMSE in the literature." Geoscientific model development, Vol.7, No.3, PP.1247-1250, 2014.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.8 No.3, Autumn 2020

Research Paper

Statistical downscaling of GRACE gravity satellite-derived groundwater level data

Mehdi Golmohammadi [1]*, Gholamreza Joodaki [2]

1- Ms.c Graduate of Geodesy, Faculty of Civil Engineering and Surveying, University of Zanjan
2- Assisstant professor at Geodesy, Faculty of Civil Engineering and Surveying, University of Zanjan

Abstract

The continuing threat of climate change, population growth and as a result increasing water demand have forced us to need hydrological data with high spatial resolution and proper time coverage more than before. Therefore, having the data such as terrestrial water storage changes and groundwater level changes with high resolution spatial helps us to plan and make decisions for water resource management more efficiently. Since the beginning of the GRACE mission, the evaluation of water resources, especially the groundwater level changes has been provided at the global scale. Despite the area wide coverage, due to the low spatial resolution and large pixel size (~200,000 km^2), it is not possible to use the GRACE data for local and smaller scales. Therefore, the purpose of this research is the feasibility of downscaling GRACE data to small and local scale. In this study, we used an empirical regression method based on the relationship between GRACE observation and other hydrological data and created the data of the groundwater level changes of 0.25 degree. Finally, we used the groundwater level changes data, derived from monitoring wells to validate downscaled groundwater level changes, where RMSE value from 38.17 mm to 56.4 mm, and R^2 from 0.49 to 0.54 were obtained. The results show that the process of downscaling is acceptable and the implemented modeling is effective. Therefore, this method can improve GRACE data resolution from 1° to 0.25°, effectively.

Key words: *GRACE, Statistical downscaling, Groundwater level changes, Water resource management.*

Correspondence Address *: Faculty of Engineering, University of zanjan, Zanjan, Iran.*
Tel*: +98 24 33052224.*
Email*: m_golmohamadi@znu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.3.6.0]
[DOI: 10.52547/jgit.8.3.83]