

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

مهدی گل محمدی^{۱*}، غلامرضا جودکی^۲

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 $200,000 km^2$)، 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 0.25° 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 38.17 تا 56.4 میلی‌متر و R^2 آن‌ها بین 0.49 تا 0.54 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 1° به 0.25° 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 پیش‌بینی آب و هوا دارند [۱ و ۲].

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 ($ATWS$) 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 شده است. همچنین با استفاده از داده‌های حاصل از مدل‌های هیدرولوژی، می‌توان تغییرات آب‌های زیرزمینی را از مشاهدات گریس به دست 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 $km^2 ۲۰۰,۰۰۰$)، 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 $km^2 ۱۰۰$ تا $km^2 ۱۰۰۰$ ، یعنی خیلی کوچکتر از قدرت تفکیک مکانی گریس تغییر می‌کنند [۵].

بنابراین لازم است تا با به‌کارگیری یکسری روش‌ها تحت عنوان ریزمقیاس‌نمایی^۳، 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 0.25° 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 ریزمقیاس‌نمایی 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 $km^2 ۱۶$ 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

³ Downscaling

¹ Terrestrial Water Storage

² Gravity Recovery and Climate Experiment

شده است. همچنین این محدوده در حوضه آبریز اصلی فلات مرکزی و در حوضه آبریز فرعی دریاچه نمک می باشد.

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 چاه های مشاهده ای با اندازه گیری های دقیق و پوشش زمانی مناسب با بازه زمانی مطالعه باشد [۱].

اما موضوعی که اهمیت مطالعه در این منطقه را بیشتر می کند، اول برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی است که منجر به ممنوعه شدن همه دشت های این منطقه شده است. دوم پدیده فرونشست می باشد 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 می باشد و همچنین وضعیت منطقه از نظر ارتفاعی نمایش داده شده است، بیشتر مساحت این محدوده را زمین های هموار و دشت تشکیل می دهد. در شکل (۱-ب)، نیز منطقه مورد مطالعه به همراه آبخوان ها، رودها و چاه های مشاهده ای مشخص شده است. مطابق شکل در این محدوده تعداد شش حلقه چاه مشاهده ای برای ارزیابی نتایج انتخاب شدند.

۳- داده ها

در این مطالعه داده های ورودی (پیش بینی کننده ها) در فرایند ریزمقیاس نمایی عبارت اند از: تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از گریس، بارش، تبخیر و تعرق، رواناب، تغییرات آب های سطحی، رطوبت خاک، آب معادل برف و برگاب. در نهایت تغییرات ذخایر آب زمینی با مقیاس 0.25° به عنوان خروجی (پیش بینی شونده) فرایند ریزمقیاس نمایی حاصل می شود.

ویسکانسین آمریکا انجام داده اند، به ریزمقیاس نمایی تغییرات سطح آب های زیرزمینی ($AGWL^1$) با استفاده از مشاهدات گریس و مجموعه ای از داده های هیدرولوژی با به کارگیری روش یادگیری ماشین^۲ پرداختند. در این مطالعه از داده هایی مانند تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی حاصل از گریس، پوشش گیاهی، بارش، رطوبت خاک و داده های تغییرات سطح آب چاه های مشاهده ای استفاده شد. در نهایت تعدادی از چاه ها برای اعتبارسنجی استفاده شدند که با نتایج حاصل از مدل سازی مطابقت خوبی داشتند [۲].

هدف از این مطالعه علاوه بر ریزمقیاس نمایی تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی حاصل از گریس، ریزمقیاس-نمایی تغییرات ماهانه سطح آب های زیرزمینی، با برداشتن تأثیر مجموعه ای از پارامترهای هیدرولوژی از روی تغییرات ذخایر آب زمینی می باشد. همچنین همه داده های مورد استفاده برای ریزمقیاس نمایی از مشاهدات ماهواره ای و مدل های جهانی هیدرولوژی به دست می آیند. این مزیت این امکان را می دهد در مناطقی که داده های زمینی کافی و مناسب وجود ندارد، بتوان از این روش ریزمقیاس نمایی استفاده کرد؛ در صورتی که سایر روش های ریزمقیاس نمایی نیازمند اطلاعات زمینی در منطقه هستند.

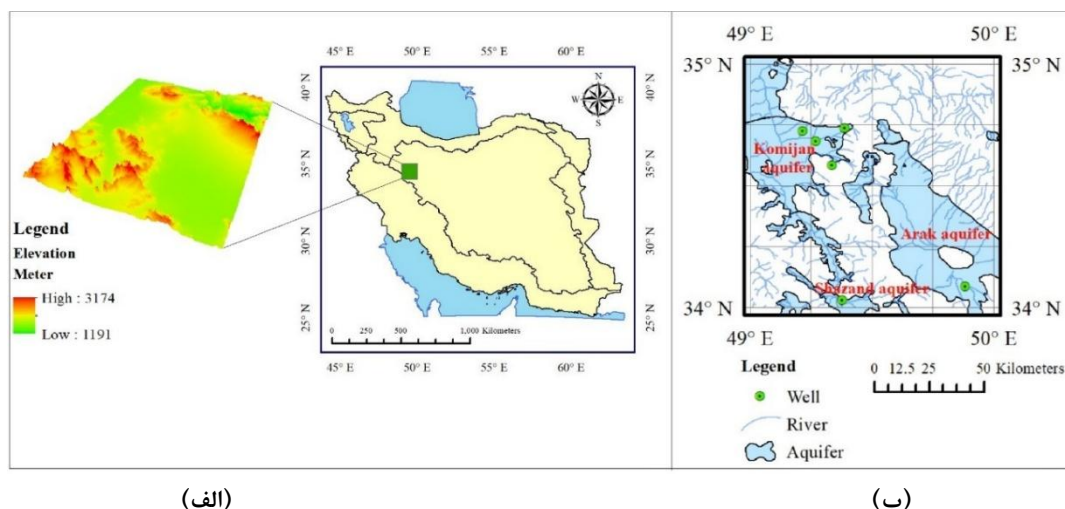
در این مطالعه با استفاده از روش ریزمقیاس نمایی آماری بر مبنای ایجاد روابط رگرسیونی و تبدیل داده های 1° حاصل از گریس به ابعاد پیکسل 0.25° ، یک مدل طراحی شده است. در نهایت از داده های چاه های مشاهده ای برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه مطابق شکل (۱)، با وسعت $1^\circ \times 1^\circ$ از 49° تا 50° درجه طول شرقی و از 34° تا 35° درجه عرض شمالی می باشد، که بیشتر مساحت آن در استان مرکزی و قسمت کوچکی از آن در استان همدان واقع

⁴ GroundWater Level Changes

⁵ Machine Learning



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه

بارش استوایی ($TRMM^2$) و الگوریتم تخمین بارش $TRMM-3B43$ با قدرت تفکیک مکانی 0.25° 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 500 متر از وبسایت^۵ مربوطه به دست آمد و بعد از پردازش در نرم-افزار محیط برای آشکارسازی تصاویر ($ENVI^6$) به ابعاد پیکسل 0.25° 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 ($GLDAS/NOAH^8$)، با قدرت تفکیک مکانی 0.25° دریافت شدند. همچنین داده‌های ماهانه

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 500 کیلومتری از سطح زمین با فاصله 220 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 به خوبی 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 داده-های ماهانه سطح سه مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه تگزاس امریکا به دست آمدند^۱.

۳-۲- بارش

در این مطالعه از داده بارش ماهانه ماهواره سنجش

^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

^۷ Plant canopy water

^۸ Global Land Data Assimilation System

^۱ <http://grace.jpl.nasa.gov>

اطلاعات می باشد. این اطلاعات از وبسایت شرکت مدیریت منابع آب ایران (<http://wrs.wrm.ir>) دریافت شده است.

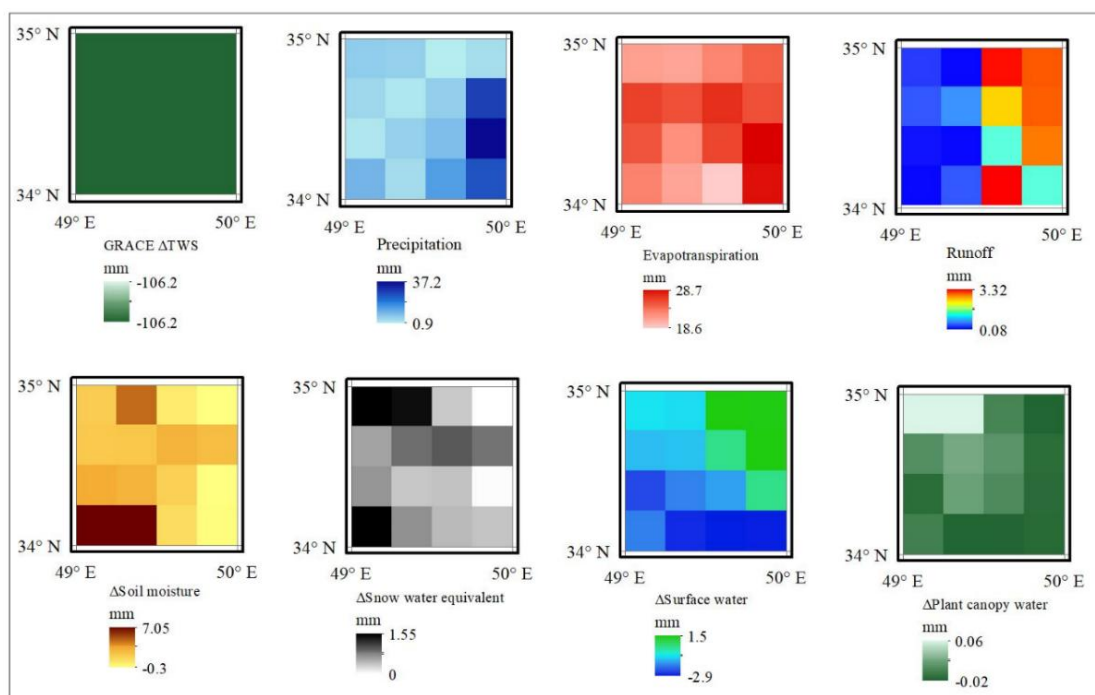
متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه، مراحل پردازش هر کدام و جزئیات آن ها بطور خلاصه در جدول (۱) آورده شده است.

شکل (۲) مجموعه داده های مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد که مربوط به ماه ژانویه ۲۰۱۵ (از آخر دسامبر ۲۰۱۴ تا آخر ژانویه ۲۰۱۵) می باشد.

کل رواناب و رواناب سطحی از مدل جهانی هیدرولوژی *FLDAS/NOAH*، با ابعاد شبکه بندی 0.1° دریافت و به ابعاد 0.25° تبدیل شدند. مجموعه این داده ها از وبسایت مربوطه (<https://disc.gsfc.nasa.gov>) قابل دریافت می باشند.

۳-۵- سطح آب های زیرزمینی

برای اطلاع از نحوه رفتار سطح آب های زیرزمینی از داده ماهانه شش حلقه چاه موجود در محدوده مطالعاتی استفاده شد. دلیل انتخاب این چاه ها پوشش زمانی مناسب با بازه زمانی مطالعه و معتبر بودن



شکل ۲: این نقشه ها داده های مورد استفاده در این مطالعه را در ماه ژانویه ۲۰۱۵ نشان می دهد. همه داده ها به ابعاد 0.25° تبدیل شده اند و تنها داده تغییرات ذخایر آب زمینی ابعاد $1^\circ \times 1^\circ$ دارد.

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

واحد	پردازش‌ها	متغیر
تغییرات ماهانه ذخایر آب زمینی بر حسب [mm]	دانلود داده‌ها از نسخه ۶ مرکز تحقیقات فضایی دانشگاه تگزاس با قدرت تفکیک $[1^\circ \times 1^\circ]$	تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از داده‌های گریس
بارش ماهیانه بر حسب [mm]	به $[mm/hour]$ تبدیل از واحد $[mm/month]$ واحد با قدرت تفکیک $[0.25^\circ \times 0.25^\circ]$	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 $[500m \times 500m]$ به قدرت تفکیک $[0.25^\circ \times 0.25^\circ]$	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 $[0.1^\circ \times 0.1^\circ]$ به قدرت تفکیک $[0.25^\circ \times 0.25^\circ]$	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 $[0.1^\circ \times 0.1^\circ]$ به قدرت تفکیک $[0.25^\circ \times 0.25^\circ]$	آب سطحی حاصل از مدل هیدرولوژی FLDAS/NOAH
رطوبت ماهیانه خاک بر حسب [mm]	دانلود داده‌ها با قدرت تفکیک $[0.25^\circ \times 0.25^\circ]$	رطوبت خاک حاصل از مدل هیدرولوژی GLDAS/NOAH
برگاب ماهیانه بر حسب [mm]	دانلود داده‌ها با قدرت تفکیک $[0.25^\circ \times 0.25^\circ]$	برگاب حاصل از مدل هیدرولوژی GLDAS/NOAH
آب معادل برف ماهیانه بر حسب [mm]	دانلود داده‌ها با قدرت تفکیک $[0.25^\circ \times 0.25^\circ]$	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 $[0.25^\circ \times 0.25^\circ]$	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

مناطق خاص برقرار هستند [۱۰ و ۱۱].

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

^۱ Precipitation

۶. تخمین $\Delta TWS^{0.25^\circ}$ از روی $\Delta S^{0.25^\circ}$

۷. تصحیح مقادیر $\Delta TWS^{0.25^\circ}$ با اضافه کردن مقادیر باقیمانده های به دست آمده از مرحله (۵) (این مرحله برای ریزمقیاس نمایی 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 داده های ورودی را توانسته به خوبی بازتولید کند. مقدار آن از صفر تا یک تغییر می کند، مقادیر نزدیک به یک نشانگر خطای واریانس کمتر می باشند و معمولاً مقادیر بالاتر از ۰/۵ قابل قبول هستند [۱۳].

سری های زمانی ΔS به دست 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. ماه هایی که داده تغییرات ذخایر آب زمینی حاصل از گریس وجود نداشت با روش درونیایی توسط مقادیر ماه های دیگر کامل شد.

البته برای ایجاد رابطه مناسب بین سری های 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 می شود. این فاصله زمانی نشان دهنده 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 زمین های پست تر آغاز می شود و به تدریج حجم آب رواناب ها، رطوبت خاک و در نهایت آب های زیرزمینی افزایش می یابد. این بدین معنی است که مدت زمانی طول می کشد تا آب حاصل از بارش به توده ی جرم آبی برسد که تغییرات آن برای گریس قابل اندازه گیری باشد [۱۴]. در مطالعات دیگر نیز این تأخیر وجود دارد و مدت زمان آن با توجه به منطقه مورد مطالعه متفاوت است.

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

$$\Delta S_i = P_i - ET_i - R_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

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

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 می توان قدرت تفکیک مکانی مشاهدات گریس را بهبود بخشید. بر مبنای این فرض، در این تحقیق از روش رگرسیون بعنوان یکی از روش های ریزمقیاس نمایی آماری، برای مدل سازی استفاده می شود [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- میانگین گیری مکانی از داده های تبخیر و تعرق به-دست آمده از سنجنده مودیس (شبکه ای از نقاط با فواصل ۵۰۰ متر) و رواناب حاصل از مدل جهانی هیدرولوژی $FLDAS/NOAH$ (شبکه ای از نقاط با فواصل ۰/۱°) و تبدیل آن ها به شبکه ای با ابعاد ۰/۲۵°.

۲- محاسبه ΔS برای شبکه ای با ابعاد ۰/۲۵° (با استفاده از رابطه ۱) و محاسبه ΔS^1 با میانگین گیری مکانی از $\Delta S^{0.25^\circ}$

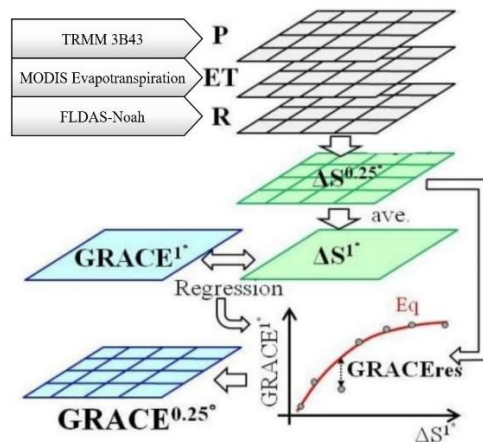
۳. ایجاد یک رابطه رگرسیونی تجربی بین ΔS^1 و ΔTWS^1 برای بازه زمانی مناسب، رابطه ای که بالاترین ضریب تعیین (R^2) را داشته باشد، انتخاب می شود.

۴. تخمین ماهانه ΔTWS^1 از ΔS^1 با استفاده از معادله رگرسیونی به دست آمده در مرحله (۳).

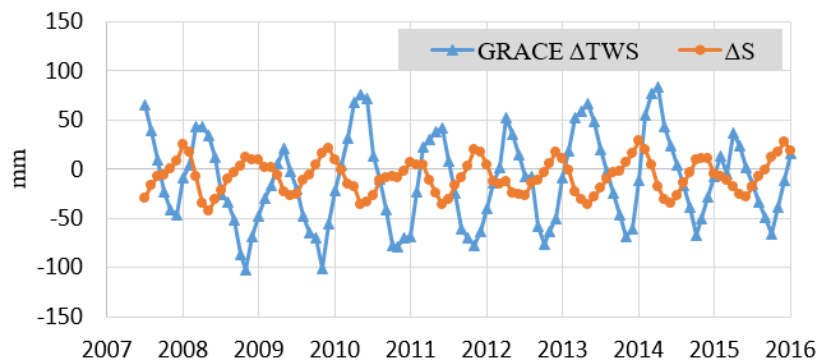
۵. محاسبه مقادیر باقیمانده بین ΔTWS^1 محاسباتی حاصل از ΔS^1 و ΔTWS^1 مشاهداتی.

^۱ Evapotranspiration

^۲ Runoff



شکل ۳: فرایند ریزمقیاس‌نمایی آماری [۱]

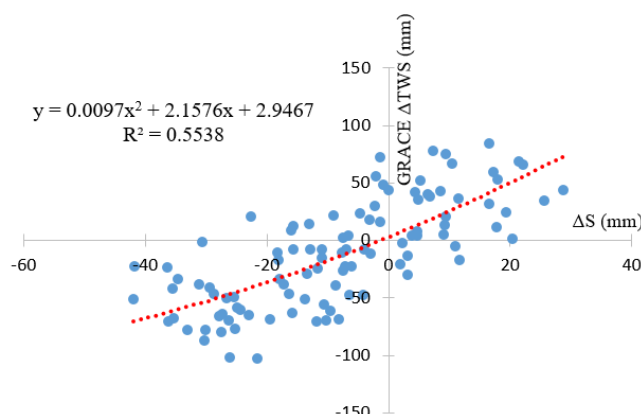


شکل ۴: سری زمانی تغییرات ذخایر آب زمینی ماهانه حاصل از گریس و ΔS برای منطقه مورد مطالعه طی دوره ژوئن ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۱۵ (در این نمودار محور افقی بیانگر زمان بر حسب سال و محور قائم بیانگر تغییرات ذخایر آب زمینی بر حسب میلیمتر است).

بعد از اعمال این تأخیر زمانی، رابطه رگرسیون تجربی مطابق شکل (۵) ایجاد می‌شود. بهترین رابطه، یک چندجمله‌ای درجه دو (رابطه (۲)) با ضریب $R^2 = 0.55$ می‌باشد. رابطه (۲)

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 می‌یابد.

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



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).

شبکه‌ای با ابعاد 0.25° درجه (ΔTWS°) 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.

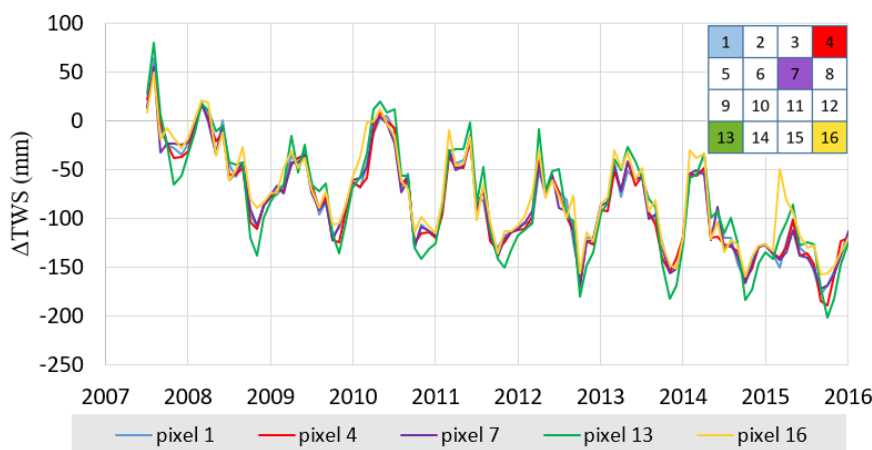
۵- نتایج و اعتبارسنجی

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 1° درجه (ΔTWS°) به



شکل ۶: سری‌های زمانی ریزمقیاس شده تغییرات ذخایر آب زمینی با مقیاس 0.25° ، 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.

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° و $\Delta TWS^{\circ/25}$ 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 اندازه‌گیری شده 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 $\Delta TWS^{\circ/25}$ با تغییرات سطح آب چاه‌ها، بیشتر از R^2 بین ΔTWS° و تغییرات سطح آب چاه‌ها باشد، نشان دهنده این است که روش ریزمقیاس‌نمایی مؤثر

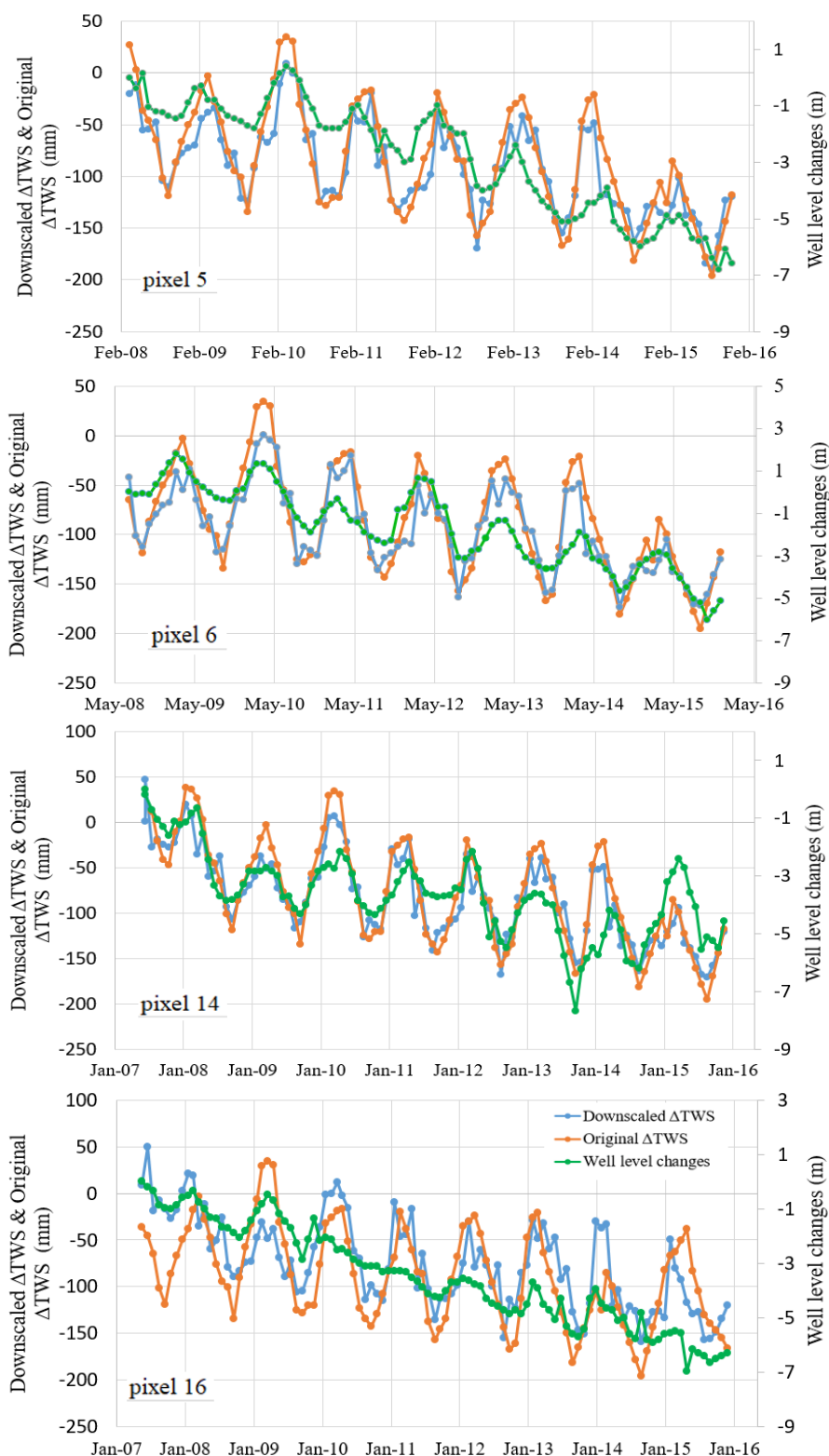
است و می‌تواند قدرت تفکیک مکانی ΔTWS حاصل از گریس را بهبود ببخشد [۱].

نمودارهای شکل (۷) نشان‌دهنده سری‌های زمانی ΔTWS° و $\Delta TWS^{\circ/25}$ 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 $\Delta TWS^{\circ/25}$ و تغییرات ذخایر آب زمینی اصلی ΔTWS° 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

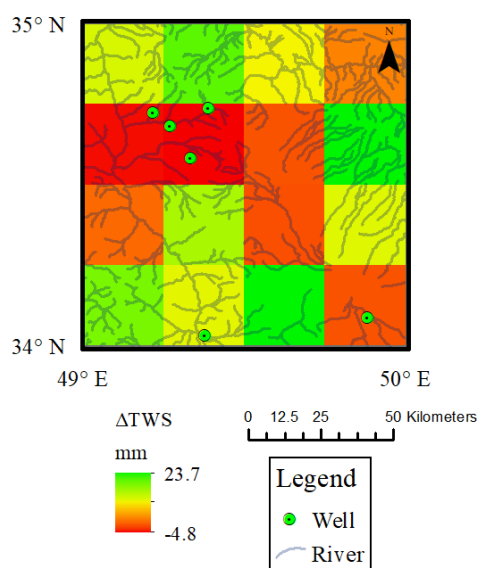
R^2	مابین تغییرات سطح آب چاه‌ها و تغییرات ذخایر آب زمینی اصلی	مابین تغییرات سطح آب چاه‌ها و تغییرات ذخایر آب زمینی ریزمقیاس شده
پیکسل ۵	۰/۴۳	۰/۵۳
پیکسل ۶	۰/۵۰	۰/۵۷
پیکسل ۱۴	۰/۵۶	۰/۵۷
پیکسل ۱۶	۰/۳۳	۰/۵۳



شکل ۷: مقایسه بین تغییرات سطح آب چاه‌ها (محور سمت راست) با $\Delta TWS^{۰/۲۵}$ ریزمقیاس شده و $\Delta TWS^۰$ اصلی حاصل از گریس (محور سمت چپ). در این نمودار محور افقی زمان بر حسب ماه می باشد.

دیگر منفی است. تغییرات مثبت یعنی ذخایر آب زمینی نسبت به ماه قبلی افزایش یافته و تغییرات منفی یعنی ذخایر آب زمینی نسبت به ماه قبلی کاهش یافته است.

شکل (۸)، ΔTWS ریزمقیاس شده را در ماه می ۲۰۱۰ برای ۱۶ پیکسل نشان می‌دهد. قبل از ریزمقیاس-نمایی برای این منطقه تنها یک مقدار کلی منفی وجود داشت، اما بعد از ریزمقیاس‌نمایی مشاهده می‌شود در بعضی پیکسل‌ها تغییرات مثبت و در بعضی



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

معادل برف، ΔSM تغییرات رطوبت خاک، ΔSW تغییرات آب‌های سطحی و ΔCW تغییرات برگاب می‌باشند. شکل (۹) تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی را برای پیکسل‌های شماره ۱، ۴، ۷، ۱۳ و ۱۶ نشان می‌دهد.

شکل (۱۰) روند تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی ریزمقیاس شده را از ژوئن ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۱۵ برای شانزده پیکسل نشان می‌دهد. قبل از ریزمقیاس‌نمایی، برای این منطقه تنها یک مقدار روند کلی وجود داشت، اما بعد از ریزمقیاس‌نمایی به جای یک مقدار، ۱۶ مقدار تغییرات را با جزئیات بیشتر نشان می‌دهند.

۵-۳- ریزمقیاس‌نمایی تغییرات سطح آب‌های

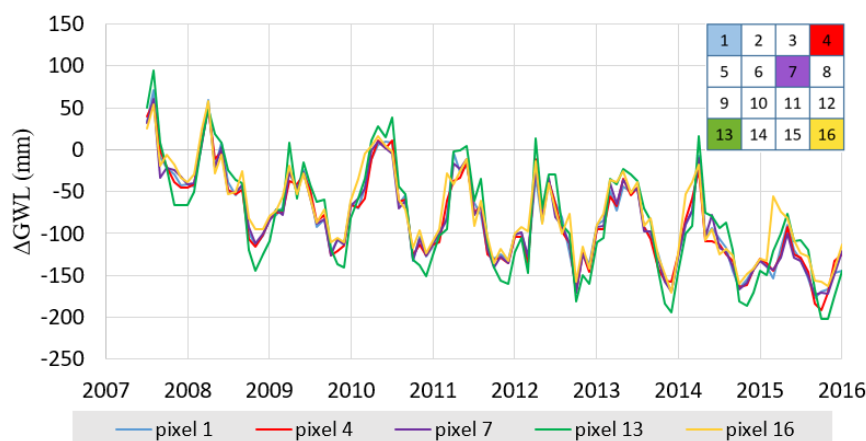
زیرزمینی (ΔGWL) حاصل از $GARCE$

TWS شامل همه آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی، رطوبت خاک، آب معادل برف و آب موجود در پوشش گیاهان می‌باشد. طبق رابطه (۳) با حذف یکسری پارامترهای هیدرولوژی از روی تغییرات ذخایر آب زمینی می‌توان به تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی (ΔGWL) رسید [۱۶ و ۱۷].

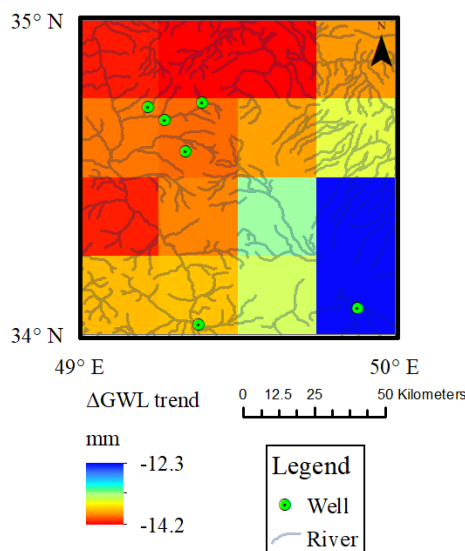
رابطه (۳)

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

در رابطه (۳)، ΔGWL تغییرات آب‌های زیرزمینی، ΔTWS تغییرات ذخایر آب زمینی، ΔSWE تغییرات آب



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



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

این ترتیب مشخص می شود که در کدام یک از پیکسل ها روند با سطح اطمینان بالا وجود دارد. بدین منظور برای سطح اطمینان ۰٫۹۵ درصد، می توان مقدار p را برای یک رگرسیون دو متغیره به کمک توزیع t - $student$'s و رابطه (۴) محاسبه کرد [۱۸].

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

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

۴-۵- اعتبارسنجی نتایج تغییرات سطح آب های

زیرزمینی ریزمقیاس شده

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

۴-۵-۱- شاخص آماری p value

برای اطمینان از وجود روند در تغییرات سطح آب های زیرزمینی حاصل از گریس که در شکل (۱۰) وجود دارد، از شاخص آماری p value استفاده می کنیم، به

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 [۱۶ و ۱۸].

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

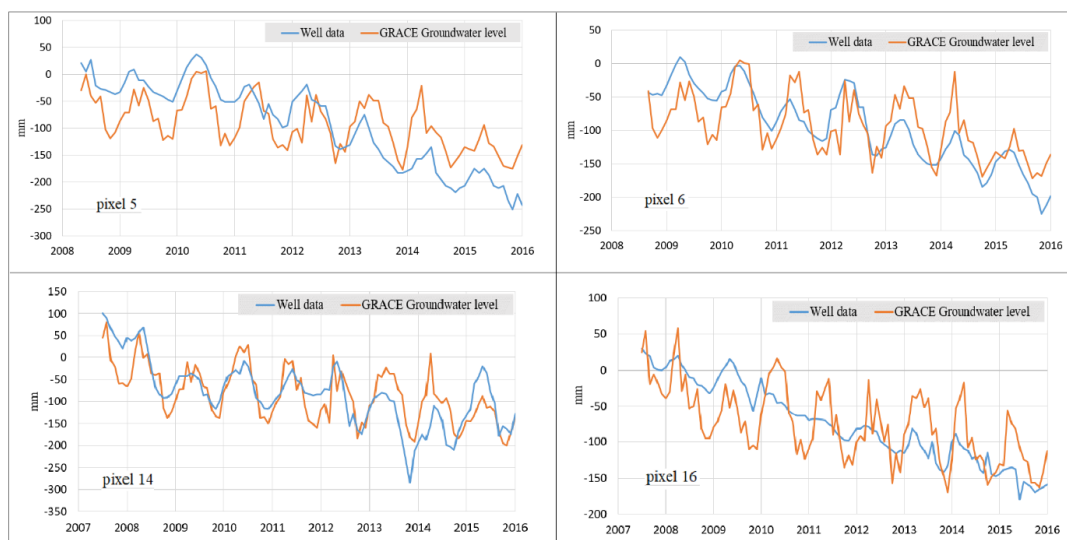
۱	$2,55 \times 10^{-14}$	۹	$7,88 \times 10^{-13}$
۲	$9,86 \times 10^{-13}$	۱۰	$5,40 \times 10^{-12}$
۳	$1,14 \times 10^{-13}$	۱۱	$2,87 \times 10^{-13}$
۴	$6,06 \times 10^{-14}$	۱۲	$3,73 \times 10^{-11}$
۵	$4,52 \times 10^{-14}$	۱۳	$2,79 \times 10^{-9}$
۶	$1,11 \times 10^{-14}$	۱۴	$4,14 \times 10^{-10}$
۷	$4,81 \times 10^{-14}$	۱۵	$6,67 \times 10^{-12}$
۸	$1,26 \times 10^{-11}$	۱۶	$2,35 \times 10^{-12}$

۵-۴-۲- استفاده از چاه‌های مشاهده‌ای

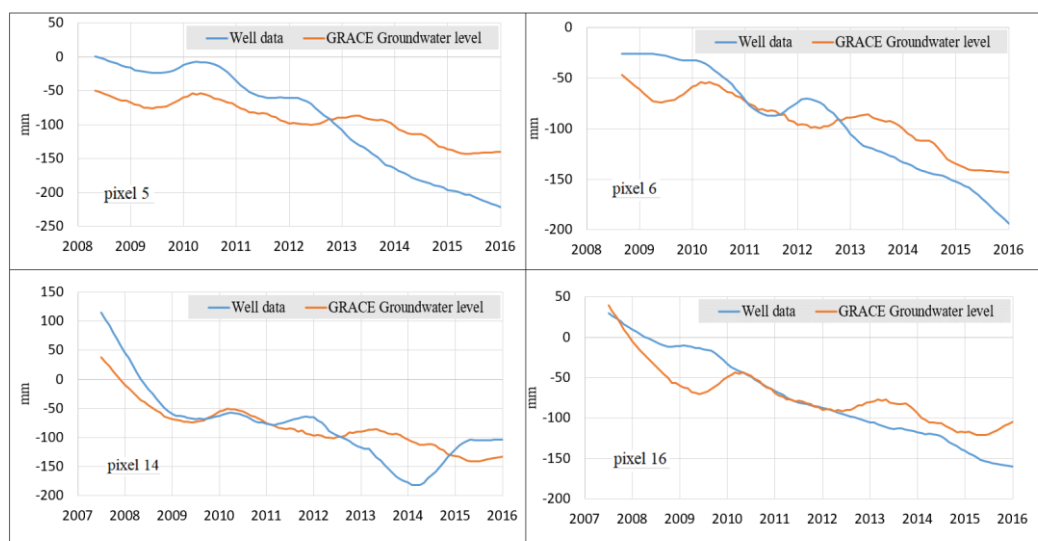
جهت ارزیابی نتایج تغییرات سطح آبهای زیرزمینی ریزمقیاس شده، از داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای استفاده کردیم. به این منظور برای مقایسه دقیق‌تر داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای، آن‌ها را در ضریب متوسط ذخیره (S_y) ضرب کردیم. این ضریب یک پارامتر هیدرولوژی بوده و برای هر آبخوان متفاوت است [۱۷]. این ضریب برای آبخوان‌هایی 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، کميجان 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.

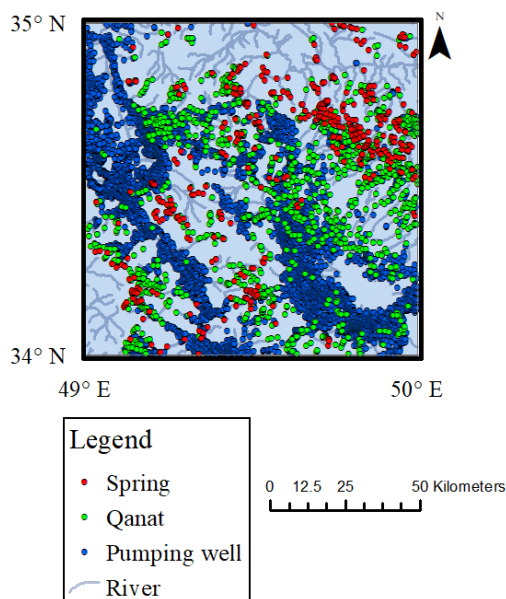
¹ Specific yield



شکل ۱۱: مقایسه تغییرات سطح آب های زیرزمینی حاصل از گریس با داده های تغییرات سطح آب چاه ها (محور افقی بیانگر زمان بر حسب سال و محور قائم سطح آب زیرزمینی بر حسب میلیمتر است.)



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



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

پیش‌بینی بهتری نسبت به مقدار شبیه‌سازی شده می‌باشند، که نشان‌دهنده عملکرد غیرقابل قبول است. میانگین خطای مطلق (MAE^3): 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^4): 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 شبیه‌سازی شده و داده‌های اندازه‌گیری شده را توصیف می‌کند. دامنه تغییرات آن از -۱ تا +۱ است، اگر $r=0$ باشد هیچ رابطه

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 [۱۹ و ۱۳]:

- خطای جذر میانگین مربعات ($RMSE^1$): این شاخص به دلیل اینکه دارای واحد است تفسیر بهتری از داده‌های شبیه‌سازی شده ارائه می‌کند. در ایده آل‌ترین حالت هنگامی که مقدار آن صفر شود یعنی خطای مدل صفر است.

- ضریب کارایی مدل نش ساتکلیف NSE^2 : 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 $NSE=1$ 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،

³ Mean Absolute Error

⁴ Mean Error

¹ Root Mean Square Error

² Nash-Sutcliffe Error

جدول (۴) شاخص های آماری محاسبه شده مربوط به پیکسل های ۵، ۶، ۱۴ و ۱۶ را نشان می دهد.

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: شاخص های آماری محاسبه شده بین داده های تغییرات سطح آب چاه ها و تغییرات سطح آب های 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	$۹/۵ \times 10^{-۵}$	۰/۷۴	۰/۵۴
۱۴	۵۰/۷۲	۰/۵۱	۴۰/۹۴	$۹/۱ \times 10^{-۵}$	۰/۷۲	۰/۵۳
۱۶	۴۱/۷۸	۰/۴۴	۳۵/۱۴	$۴/۵ \times 10^{-۶}$	۰/۷۰	۰/۴۹

۵۶/۴ میلی متر و R^2 آن ها بین ۰/۴۹ تا ۰/۵۴ بود. نتایج نشان داد خروجی های ریزمقیاس شده با مشاهدات چاه ها متناسب هستند، لذا این روش می تواند به طور مؤثری قدرت تفکیک مکانی مشاهدات گریس را از 1° به 0.25° بهبود بخشد.

از مزایای این روش این است که می توان توانایی پایش تغییرات ماهانه TWS و آب های زیرزمینی را به ویژه در مناطقی که با کمبود اطلاعات مواجه اند، افزایش داد. به علاوه اینکه همه داده های مورد استفاده برای ریزمقیاس نمایی از مشاهدات ماهواره ای و مدل های جهانی هیدرولوژی به دست می آیند. این مورد یک مزیت نسبت به سایر روش های ریزمقیاس نمایی می باشد، که نیاز به اطلاعات بیشتری در منطقه دارند.

همه نتایج و نمودارها روند کاهشی در سطح آب های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه را نشان داد. این مورد به دلیل استفاده بی رویه از منابع آب زیرزمینی می باشد. با توجه به تعداد زیاد چاه های پمپاژ و وجود پدیده ی فرونشست در این محدوده، لزوم مدیریت و برنامه ریزی برای منابع آب زیرزمینی بیش از پیش احساس می شود. بطور کلی ریزمقیاس نمایی جزئیات و اطلاعات بیشتری از تغییرات آب های زیرزمینی در اختیار ما می گذارد.

مقادیر RMSE و MAE به دست آمده بیانگر وجود عدم قطعیت در مدل سازی انجام شده می باشد. این عدم قطعیت ناشی از فرضیات به کار برده شده در این مدل سازی، نحوه اندازه گیری داده ها، مدل های جهانی هیدرولوژی استفاده شده و عوامل دیگر می باشد که در هر مرحله به فرایند ریزمقیاس نمایی اضافه شده است. در مجموع می توان با این نتایج، مدل سازی انجام شده و فرایند ریزمقیاس نمایی را قابل قبول ارزیابی کرد.

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

هدف اصلی این مطالعه امکان سنجی ریزمقیاس نمایی تغییرات ماهانه سطح آب های زیرزمینی حاصل از گریس و اعتبارسنجی نتایج حاصل از آن بود. روش ریزمقیاس نمایی مورد استفاده در این مطالعه، روش آماری و بازه زمانی از ژوئن ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۱۵ در نظر گرفته شد. پس از ریزمقیاس نمایی، سری های زمانی و نقشه هایی از تغییرات سطح آب های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه به دست آمد که با جزئیات بیشتری میزان تغییرات را نشان می داد. در نهایت به کمک چاه های مشاهده ای نتایج حاصل از مدل سازی انجام شده اعتبارسنجی شدند. بدین منظور از شاخص های آماری استفاده شد که RMSE محاسبه شده بین ۳۸/۱۷ تا

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 می‌شود، سهم تاثیر فعالیت‌های انسانی بر آبخوان‌ها را از تغییرات طبیعی تفکیک کرد.

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

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.*

- [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.



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- Assistant 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 km²), 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 R² 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.