

ارزیابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ثقل سنجی ماهواره‌ای GRACE (مطالعه موردی: خراسان رضوی)

سید نوید نبوی^۱، امین علیزاده^{۲*}، علیرضا فرید حسینی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۱۱

چکیده

تعیین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک موضوعی حیاتی به‌منظور مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب زیرزمینی هست. ماهواره GRACE با بهره‌گیری از تغییرات میدان گرانش زمین، تغییرات ذخیره آب را با قدرت تفکیک مکانی ۱ درجه تولید می‌نماید. در این پژوهش سعی شد تا در دو پیکسل یک درجه مربعی از استان خراسان رضوی که شامل کل مساحت و یا بخش‌هایی از ۶ آبخوان می‌باشند، با استفاده از داده‌های چهار مرکز پردازش اطلاعات ماهواره GRACE به نام‌های CENS، CSR، GFZ و JPL، تغییرات سطح آب زیرزمینی ماهانه در بازه زمانی اوت ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۶ مورد ارزیابی قرار گیرد. بهره‌گیری از مقادیر موجودیت آب زمین (TWS) تولیدشده از داده‌های ماهواره GRACE، به همراه داده‌های رطوبت خاک، آب معادل برف و آب ذخیره‌شده در تاج پوشش گیاهان مستخرج از مدل GLDAS، که با قدرت تفکیک مکانی ۱ درجه و به‌صورت ماهانه ارائه می‌گردند، تخمین تغییرات سطح آب زیرزمینی ماهانه را منتج می‌شوند. همچنین یک برآورد تغییرات ماهانه سطح آب زیرزمینی مدل GLDAS و در قدرت تفکیک ۰/۲۵ درجه به‌منظور مقایسه با نتایج داده‌های ماهواره GRACE اخذ شد. داده‌های مشاهداتی که حاوی تغییرات سطح آب زیرزمینی ماهانه از چاه‌های پیرومتری منطقه مطالعاتی می‌باشند، جهت اعتبارسنجی نتایج مورد استفاده قرار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهند که داده‌های GRACE(CENS) با $RMSE = ۱۴/۳۱۵$ و $MAE = ۱۲/۶۴۵$ در واحد سانتی‌متر ضعیف‌ترین تخمین تغییرات سطح آب زیرزمینی را ارائه داده‌اند. در حالی که داده‌های GRACE(JPL)، با $RMSE = ۵/۷۰۸$ و $MAE = ۵/۰۳۸$ سانتی‌متر بهترین برآورد را نشان می‌دهند. لازم به بیان است که داده‌های مدل GLDAS با قدرت تفکیک ۰/۲۵ درجه که $RMSE$ آن $۲/۳۵۰$ سانتی‌متر و MAE برابر $۱/۸۲۶$ سانتی‌متر است، تخمین مناسب‌تری را نسبت به تمام انواع داده‌های GRACE ارائه نمودند. همچنین داده‌های GRACE(CSR) با ارائه یک‌روند $۰/۰۸۹$ - سانتی‌متر در ماه، مطلوب‌ترین پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، موجودیت آب زمین، ماهواره GRACE، مدل GLDAS

مقدمه

سنتی و پرهزینه سابق رو به گسترش است (فرجی و همکاران، ۱۳۹۶). به‌عبارت‌دیگر، سنجش‌ازدور ماهواره‌ای می‌تواند تکمیل‌کننده شبکه‌های پایش و مطالعات مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی باشد و خلأهای زمانی و مکانی داده‌ها را پوشش دهد (Miro et al., 2018). یکی از شاخه‌هایی که می‌تواند در مطالعه منابع آب تأثیرگذار باشد، میدان ثقل زمین و مطالعه تغییرات آن است. آنچنان که بدیهی است، توزیع جرم، چه در اعماق و چه در پوسته زمین، میدان ثقل آن را ایجاد می‌نماید (اشرف زاده افشار و همکاران، ۱۳۹۵). ماهواره‌های ثقل سنج، قابلیت ارزیابی تغییرات میدان ثقل زمین به‌صورت ماهیانه و در ابعاد چند صد کیلومتر را دارند. در مناطقی که جابجایی لایه‌های زمین در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت ماهانه قابل چشم‌پوشی است، قابل درک خواهد بود که تغییرات موجودیت آب در آن منطقه، تنها عامل تغییرات جرم و در نتیجه تغییر در ثقل زمین لحاظ گردد.

مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح منابع آب زیرزمینی در یک استان به میزان آگاهی از روند تغییرات مکانی و زمانی این منابع با ارزش وابسته است. بنابراین، ضرورت دستیابی به شبکه‌ای از داده‌های منابع آب زیرزمینی در مناطق بزرگ‌مقیاس انکارناپذیر است. از آنجاکه نصب و نگهداری تجهیزات مشاهداتی بسیار پرهزینه است، بنابراین استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور به‌عنوان جایگزینی مناسب برای تکنیک‌های

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(Email: alizadeh@um.ac.ir) * - نویسنده مسئول:

کالیفرنیا مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که آب زیرزمینی یک نرخ کاهش سالانه حدود ۲۰/۴ میلی متر ارتفاع معادل آب را تجربه نموده است که تقریباً معادل دو- سوم کل هدر رفت آب در حوضه آبریز است (Famiglietti et al., 2011). مویو و همکاران با بهره‌گیری از مدل GLDAS و معادله بیلان آب میزان ذخیره آب زیرزمینی را در شمال چین در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ تخمین زدند. آن‌ها همچنین با استفاده از داده‌های GRACE تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه ذخیره آب زیرزمینی را سنجش کردند. مقایسه این سری داده‌ها $R^2 = 0/65$ در مقیاس ماهانه، $R^2 = 0/76$ در مقیاس فصلی و $R^2 = 0/84$ در تغییرات سالانه را نشان دادند (Moiwo et al., 2012). فرخ نیا و مرید (۱۳۹۳) با بهره‌گیری از داده‌های GRACE و مدل GLDAS مؤلفه‌های بیلان آب و تغییرات ذخیره آب زیرزمینی را در حوضه آبریز دریاچه ارومیه استخراج نمودند. مقایسه مقادیر برآورد شده تغییرات بیلان کل آب در حوضه توسط GRACE و تغییرات مشاهداتی حجم آب دریاچه یک‌روند یکسان را نشان داد. همچنین در برآورد تغییرات آب زیرزمینی حوضه مشخص شد که عملکرد GRACE در تخمین این تغییرات مناسب بوده است. به طوری که یک‌روند یکسان و نزدیک به هم بین داده‌های مشاهداتی و تخمین داده‌های ماهواره‌ای GRACE دیده شد. فرجی و همکاران (۱۳۹۶) باهدف ارزیابی منابع آب زیرزمینی استان قزوین، از داده‌های ماهواره‌ای GRACE بهره گرفت و به جهت اعتبارسنجی این داده‌ها از مدل سطح زمین GLDAS و داده‌های مشاهداتی چاه‌ها در منطقه استفاده نمود. نتایج نشان داد ماهواره GRACE برآورد خوبی از روند تغییرات ذخیره آب و همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی در اختیار قرار می‌دهد. نتایج تحلیل آماری نشان‌دهنده $RMSE = 5/54$ و $MAE = 4/16$ در واحد سانتی‌متر در مقیاس فصلی بین داده‌های تغییرات سطح آب زیرزمینی به دست‌آمده از ماهواره GRACE و چاه‌های مشاهداتی در دشت قزوین و همچنین $RMSE = 5/46$ و $MAE = 4/32$ در ماه بین داده‌های تغییرات ذخیره آب به دست‌آمده از مدل GLDAS و ماهواره GRACE است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

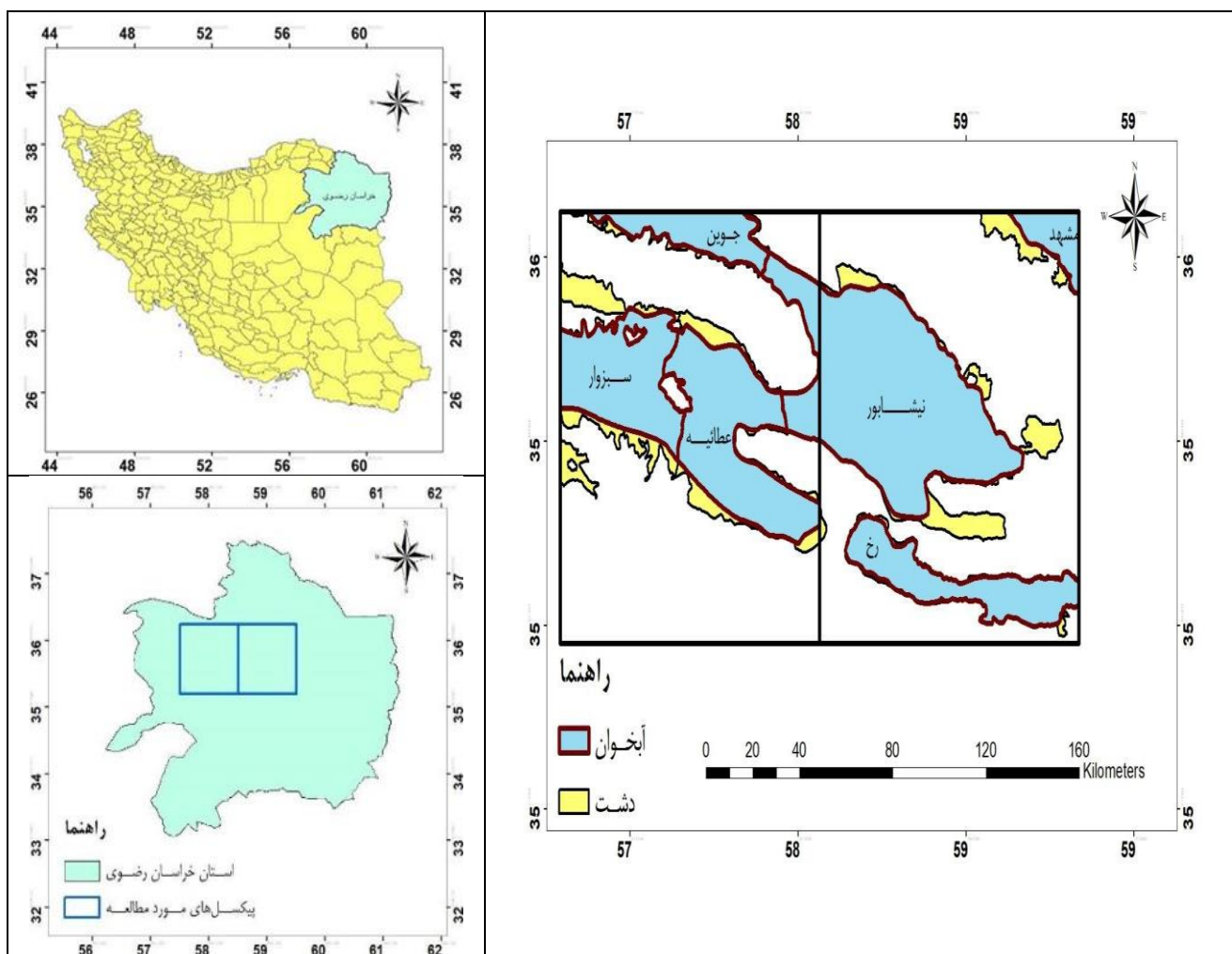
در پژوهش حاضر وضعیت آب‌های زیرزمینی در دو پیکسل به مساحت دو درجه مربع از $57/5$ درجه تا $59/5$ طول جغرافیایی و از $35/5$ تا $36/5$ عرض جغرافیایی در استان خراسان رضوی شامل ۶ آبخوان مطابق شکل ۱ مورد مطالعه قرار گرفت. به‌طور کلی استان خراسان رضوی با توجه به گستردگی، از لحاظ وسعت و تنوع از جنبه‌های ویژگی‌های محیطی نیز دارای تنوع اقلیمی است. شمال استان با توجه به عرض جغرافیایی بالا دارای اقلیم سرد و مرطوب و

در سال‌های اخیر داده‌های ماهواره‌ای به دست‌آمده از پروژه بازیابی گرانس و آزمایش اقلیمی^۱ (GRACE) که یک ماهواره ثقل سنج است و همچنین شبیه‌سازی انجام‌شده در قالب سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی^۲ (GLDAS) امکانات مناسبی را برای برآورد موجودی آب زمینی^۳ (TWS)، تغییرات آن و همچنین تغییرات آب زیرزمینی در ابعاد مکانی گسترده ایجاد نموده‌اند. اطلاعات به دست‌آمده از پروژه‌های GRACE و GLDAS تاکنون در مطالعات هیدرولوژیکی متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. نکته قابل توجه در اغلب آن‌ها، استفاده توأم از نتایج این دو پروژه است، به نحوی که می‌توان گفت داده‌های به دست‌آمده از این دو پروژه را می‌توان به‌عنوان مکمل یکدیگر در تحلیل‌های پیشرفته هیدرولوژیکی در مقیاس‌های مکانی بزرگ به کار گرفت (فرخ نیا و مرید، ۱۳۹۳). مطالعات متعددی در مورد سنجش تغییرات منابع آب زیرزمینی در نقاط مختلف دنیا با داده‌های ثقل سنجی ماهواره‌ای GRACE صورت پذیرفته است. همچنین به‌عنوان یکی از کاربردهای شاخص داده‌های GRACE می‌توان به پایش تغییرات TWS به‌ویژه در مقیاس‌های نسبتاً بزرگ اشاره نمود. رودل و فامیلیتی نشان دادند که استفاده از داده‌های GRACE برای بررسی تغییرات آب زیرزمینی در آبخوان High Plains در مرکز آمریکا مناسب بوده است (Rodell and Famiglietti., 2002). یه و همکاران بیان نمودند که تخمین آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های GRACE با داده‌های مشاهداتی در Illinois آمریکا توافق زیادی دارند. اگرچه آن‌ها خاطر نشان کردند که در مقایسه ماهانه نتایج ناشی از داده‌های GRACE و داده‌های مشاهداتی تفاوت‌های معناداری دیده می‌شود. این در حالی است که به‌طور کلی در دوره‌های فصلی با توجه به ۳۶ داده مشاهداتی یک ضریب همبستگی ۰/۸۳ بین نتایج و داده‌های مشاهداتی وجود داشت (Yeh et al., 2002). لبلانس و همکاران یک مطالعه در مورد خشک‌سالی چندساله حوضه آبریز Murray-Darling صورت دادند که نتایج یک کاهش در منابع آب منطقه را آشکار نمود. آن‌ها دریافتند که یک همبستگی بالا بین تغییرات آب زیرزمینی مشاهداتی و برآوردهای TWS منتج از داده‌های ماهواره‌ای GRACE وجود دارد (Leblanc et al., 2009). لانگورن و همکاران طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ داده‌های دو مرکز پردازش CSR و GRGS ماهواره‌ای GRACE را در آبخوان High Plains ارزیابی نمودند. با مقایسه تغییرات ذخیره آب مستخرج از مدل GLDAS، ماهواره GRACE و داده‌های چاه‌های پیژومتری، نتایج برتری GRACE را نسبت به مدل GLDAS نشان می‌دهد (Longuevergne et al., 2010). فامیلیتی و همکاران داده‌های GRACE را در Central Valley

- 1- Gravity Recovery and Climate Experiment
- 2- Global Land Data Assimilation System
- 3- Terrestrial Water Storage

سبزوار در اقلیم نیمه خشک گرم واقع هستند. در این محدوده متوسط دمای ۱۶ درجه سلسیوس و متوسط بارش سالانه ۲۲۳ میلی‌متر است. متوسط دمای سالانه ۱۵ درجه سلسیوس و متوسط بارش سالانه ۲۶۳ میلی‌متر و دیگر عوامل مؤثر اقلیمی سبب شده است که اقلیم معتدل و نیمه خشک بر دشت مشهد حاکم باشد (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۰).

جنوب آن از اقلیم گرم و خشک، برخوردار است. در واقع، در مناطقی مانند رخ نواحی منطبق بر ارتفاعات و توده‌های کوهستانی قرار دارند که از آن به اقلیم معتدل کوهستانی یاد می‌شود. در این اقلیم متوسط دمای سالانه ۱۲ درجه سلسیوس و میزان متوسط بارش سالانه این ناحیه ۳۰۸ میلی‌متر است. دشت نیشابور و عطائیه در ناحیه اقلیمی نیمه خشک سرد قرار دارد که متوسط دمای سالانه ۱۵ درجه سلسیوس و متوسط بارش سالانه ۲۵۶ میلی‌متر را دارا است. جوین و



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

اخذ داده‌ها

در این پژوهش برای ارزیابی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی حاصل شده از ماهواره GRACE و مقایسه با داده‌های مشاهداتی، از داده‌های RL06 monthly solutions (filtered with DDK5) ماهواره GRACE (ارتفاع آب معادل (EWH)) که در واقع معادل TWS است در ابعاد $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ، از اوت ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۶، از چهار

مرکز پردازش داده‌های CENS, CSR, GFZ و JPL از سایت (<https://grace.jpl.nasa.gov>) اخذ شد. همچنین داده‌های رطوبت خاک^۲ تا عمق ۲۰۰ سانتی‌متر ($\frac{Kg}{m^2}$)، آب معادل برف^۳ ($\frac{Kg}{m^2}$) و آب ذخیره شده در تاج پوشش گیاهان^۴ ($\frac{Kg}{m^2}$) را از مدل GLDAS در دوره

- 2 - Soil moisture
- 3 - Snow water equivalent
- 4 - Canopy storage

- 1- Equivalent Water Height

et al., 2012). به عنوان نمونه در شکل ۲، میانگین روزانه ذخیره آب زیرزمینی (میلی متر)، برگرفته از مدل GLDAS در دو پیکسل مذکور دیده می شود.

داده های مشاهداتی

به جهت اعتبارسنجی و مقایسه میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی مستخرج از داده های ماهواره GRACE و مدل GLDAS با داده های مشاهداتی، اطلاعات تراز آب زیرزمینی ماهانه شش آبخوان در منطقه مطالعاتی، در بازه زمانی اوت ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۶، از دفتر مطالعات پایه منابع آب اخذ گردید و میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی ماهانه که ابتدا در مقیاس مساحت آبخوان بودند، برای یک درجه مربع محاسبه شد. بدین منظور از اعمال میانگین گیری وزنی بر اساس وسعت هر آبخوان نسبت به مساحت یک درجه مربع استفاده گردید. بدین ترتیب مقیاس $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ برای تمام داده ها رعایت گردید. لازم به ذکر است که تبدیل مقیاس همه داده ها و تغییرات ارتفاعی آب در آن ها به یک درجه مربع، سبب خواهد شد تا بزرگی مقدار آن ها به مراتب کمتر از میزان آن ها در محدوده ی مساحت یک آبخوان باشد. به طور مثال، افت سطح آب زیرزمینی که در آبخوان های استان ممکن است به طور متوسط حدود یک متر در سال باشد، در گزارش نتایج این پژوهش که در مقیاس یک درجه مربع ارائه شده است، تنها چند سانتی متر مشاهده گردد و این مطلب باید در ارزیابی نتایج مدنظر باشد.

میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی

تغییرات جرم زمین (TMC)

به طور کلی قابلیت ماهواره گریس در اندازه گیری تغییرات جرم زمین^۱ در سطح و زیر سطح آن است (Seo et al., 2006). مطابق شکل ۳، تغییرات جرم زمین ناشی از تغییرات ذخیره آب^۲ و تغییرات غیر هیدرولوژیکی جرم زمین^۳ است (Jiang et al., 2014). ذخیره آب زمین (TWS) متشکل از رطوبت سطح خاک (Soil moisture)، آب سطحی (Surface water)، آب زیرزمینی (Groundwater)، آب معادل برف و یخ (Snow/ice) و آب ذخیره شده در تاج پوشش گیاهان (Canopy storage) است (Kumar et al., 2016). همچنین تغییرات غیر هیدرولوژیکی جرم زمین می تواند ناشی از پدیده PGR (Post-Glacial Rebound) یا بازگشت آرام پوسته زمین به حالت پیش از یخبندان وجود دارد که جابه جایی عمودی پوسته زمین را در مناطق مختلف دنیا از جمله خطوط ساحلی ایجاد می کند و یا به سبب جابه جایی لایه های زمین ناشی از زمین لرزه های بزرگ (با قدرت

زمانی مذکور برای محدوده جغرافیایی موردنظر با قدرت تفکیک $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ و همچنین میانگین روزانه ذخیره آب زیرزمینی (میلی متر) که در شکل ۲ نمایش داده شده است، از سایت (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov>) دریافت شد. به منظور اعتبارسنجی و مقایسه میزان تغییرات آب زیرزمینی مستخرج از داده های ماهواره GRACE با داده های مشاهداتی، اطلاعات تراز آب زیرزمینی ماهانه آبخوان های واقع در منطقه مطالعاتی استفاده شد.

ماهواره GRACE

پروژه Gravity Recovery And Climate Experiment یا به اختصار GRACE، یکی از مأموریت های ماهواره ای که به منظور تعیین تغییر میدان گرانش زمین طراحی شده است. این پروژه توسط NASA آمریکا و DLR آلمان در تاریخ ۱۷ مارس ۲۰۰۲ از ایستگاه پلستیک روسیه صورت گرفت (شیخی و زمزم، ۱۳۹۵). این ماهواره دو قلو، تغییرات میزان آب را در سطح زمین به صورت غیرمستقیم و با تخمین تغییرات میدان ثقل زمین اندازه گیری می نماید. داده های این ماهواره که به صورت ماهانه وجود دارند، با حرکت دو ماهواره که در امتداد یکدیگر حرکت می نمایند، به دست می آیند (Vishwakarma et al., 2018). در واقع، تغییرات فاصله بین این دو ماهواره که در فاصله ۲۲۰ کیلومتری از هم و در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری از سطح زمین در حال حرکت هستند، نشان دهنده تغییرات ثقل زمین و به عبارتی دیگر تغییرات موجودیت آب زمین (TWS) در منطقه عبوری است (Bhanja et al., 2016). هنگامی که مقدار ثقل زمین در زیر ماهواره جلو افزایش می یابد، سرعت حرکت آن نسبت به ماهواره عقب تر افزایش می یابد و در نتیجه فاصله بین آن ها بیشتر می شود. تغییرات فاصله مذکور توسط سیستم فاصله یابی مایکروویو (K-Band) طی یک روند محاسباتی پیچیده به تغییرات زمانی و مکانی ثقل زمین و در نتیجه به تغییرات TWS تبدیل می گردد (Zaki et al., 2018).

مدل GLDAS

سیستم تحلیل و شبیه سازی زمین در پوشش جهانی یا همان GLDAS، یک کار مشترک بین دانشمندان ناسا، GSFC، NOAA و NCEP است (Meizhao et al., 2018). GLDAS سیستم مدل سازی جهانی سطح آب زمین است که از داده های مشاهده ای ماهواره ای و همچنین تحقیقات هیدرولوژیکی برای شبیه سازی پیشرفته آب و هوا استفاده می کند. این مدل یک مدل عددی است که داده های سطح آب معادل را با قدرت تفکیک زمانی و مکانی یک ماه و یک درجه تأمین می کند. از آنجایی که مدل های هیدرولوژی مانند GLDAS فقط در مناطق خشکی مقدار دارند، لذا در این پژوهش در بررسی تغییرات سطح آب های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت (Jin

1- Terrestrial mass changes

2- Water storage changes

3- Non-hydrological Mass changes

soil moisture از مدل GLDAS حاصل گردد، می‌توان تغییرات ماهانه سطح آب زیر زمینی را محاسبه نمود. لازم به توضیح است که با توجه به عدم وجود پهناهای آبی قابل توجه مانند دریاچه و مخزن سد بزرگ از متغیر surface water در منطقه موردنظر، صرف‌نظر شده است. بنابراین رابطه (۲) به شکل رابطه (۳) در زیر تغییر خواهد نمود.

$$\Delta \text{Ground water} = \Delta \text{TWS} - (\Delta \text{Soil moisture} + \Delta \text{Snow(Ice)} + \Delta \text{Canopy storage}) \quad (3)$$

شاخص‌های تحلیل آماری

شاخص‌های کمی که به منظور ارزیابی نتایج استفاده شده‌اند عبارت‌اند از: ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) که به صورت روابط (۴) و (۵) تعریف می‌شوند:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - G_i)^2 / n} \quad (4)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |G_i - O_i| \quad (5)$$

که در روابط فوق، O و G به ترتیب مقادیر مشاهده شده و تولید شده و n تعداد داده‌ها است. هر چه مقدار RMSE کمتر باشد، داده‌های تولید شده توسط مدل به داده‌های واقعی نزدیک است. RMSE، حساسیت زیادی به وجود مقادیر حدی در سری داده‌ها نشان می‌دهد زیرا به صورت توان دو اختلاف بیان می‌شود. MAE، میانگین خطای مطلق هر مدل را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد. این شاخص نیز اگر برابر صفر و یا نزدیک به صفر باشد، نشان‌دهنده این است که روش استفاده شده دقت زیادی دارد و بافاصله یافتن از صفر، دقت روش مدنظر کاهش می‌یابد (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۵).

نتایج و بحث

در این بخش نتایج در غالب عناوین زیر ارائه می‌گردد

۱- مقایسه مقادیر TWS برگرفته از داده‌های GRACE شامل مراکز پردازش CENS، CSR، GFZ و JPL با TWS مدل GLDAS.

۲- تغییرات ماهانه متغیرهای هیدرولوژیکی استخراج شده از مدل GLDAS.

بیشتر از ۸ ریشتر) رخ دهد (Steffen et al., 2009). با توجه به بازه‌های زمانی کوتاه ماهانه که ارزیابی‌ها و محاسبات این پژوهش در آن صورت گرفته، می‌توان تغییرات غیر هیدرولوژیکی جرم زمین را ناچیز تلقی نمود و تمام تغییرات جرم زمین را ناشی از تغییرات ذخیره آب زمین دانست.

موجودی آب زمین (TWS)

موجودی آب زمینی که از آن با عنوان ذخیره آب زمین (water storage) نیز یاد می‌شود، شامل مجموع آب‌هایی است که در سطح و زیر سطح زمین موجود است (Landerer et al., 2012). رابطه زیر اجزا هیدرولوژیکی TWS را روشن می‌سازد.

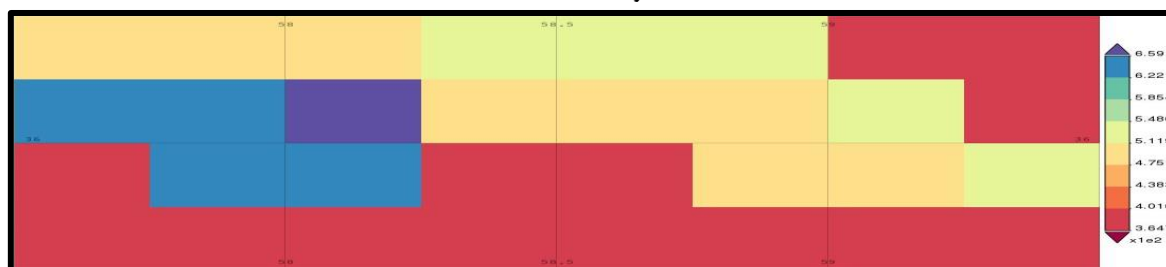
$$\text{TWS} = \text{Soil moisture} + \text{Surface water} + \text{Ground water} + \text{Snow/Ice} + \text{Canopy storage} \quad (1)$$

تعیین تغییرات آب زیرزمینی

طبق معادله بیلان شماره (۱) اگر تغییرات TWS در یک بازه زمانی مشخص موجود باشد، با کسر تغییرات در ذخیره آب معادل برف(یخ)، آب سطحی، رطوبت سطح خاک و آب موجود در تاج پوشش گیاهان از آن در بازه زمانی مذکور می‌توان به تغییرات آب زیرزمینی دست یافت. رابطه (۲) به چگونگی اندازه‌گیری تغییرات آب زیرزمینی اشاره دارد.

$$\Delta \text{Ground water} = \Delta \text{TWS} - (\Delta \text{Soil moisture} + \Delta \text{Surface water} + \Delta \text{Snow(Ice)} + \Delta \text{Canopy storage}) \quad (2)$$

معادله فوق نشان می‌دهد که اگر تغییرات TWS و دیگر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی سمت راست رابطه در یک بازه زمانی (ماهانه) موجود باشد، امکان برآورد تغییرات آب زیرزمینی وجود خواهد داشت. همان‌طور که قبلاً بیان شد، پروژه (GRACE) و همچنین شبیه‌سازی در قالب سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی (GLDAS) امکانات مناسبی را برای برآورد و سنجش موجودی آب زمینی (TWS) و اجزای تشکیل‌دهنده آن به صورت منفرد در ابعاد مکانی وسیع را ایجاد نموده است. در رابطه (۲)، اگر میزان تغییرات ماهانه TWS از داده‌های ماهواره GRACE استخراج گردد و تغییرات ماهانه canopy storage, snow(ice), surface water و



شکل ۲- میانگین روزانه ذخیره آب زیرزمینی (میلی‌متر)، مستخرج از مدل GLDAS، در بازه زمانی اوت ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۶ در دو پیکسل مطالعاتی با قدرت تفکیک ۰/۲۵ درجه

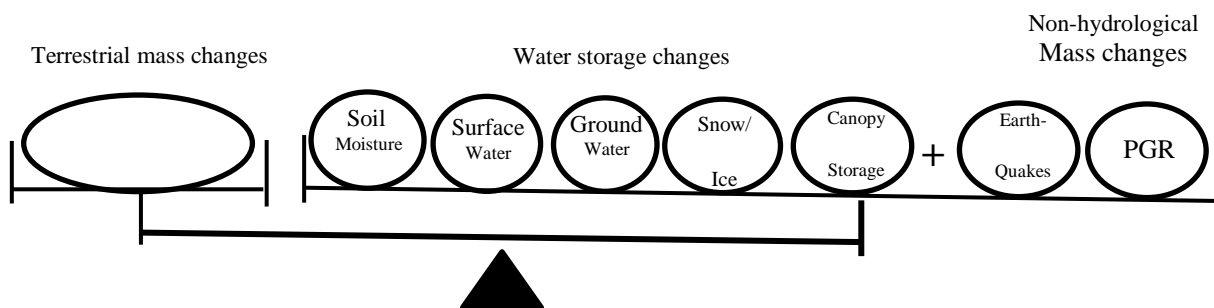
است. از آنجایی که داده‌های GRACE مراکز پردازش JPL و CSR برای پیکسل با طول جغرافیایی ۵۷/۵ تا ۵۸/۵ و داده‌های GRACE مراکز پردازش CENS و GFZ در پیکسل با طول ۵۸/۵ تا ۵۹/۵ مورد استفاده بوده است، دو شکل زیر به طور جداگانه مقایسه TWS داده‌های مراکز مختلف پردازش GRACE را با TWS حاصل از مدل GLDAS نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که تغییرات ارتفاع آب معادل (TWS) در شکل‌های زیر در مساحتی معادل یک درجه مربع ارائه شده است و در بررسی دامنه و بزرگی اعداد مربوط به این تغییرات این نکته حائز اهمیت است.

۳- مقایسه تغییرات آب زیر زمینی با استفاده از داده‌های GRACE و GLDAS.

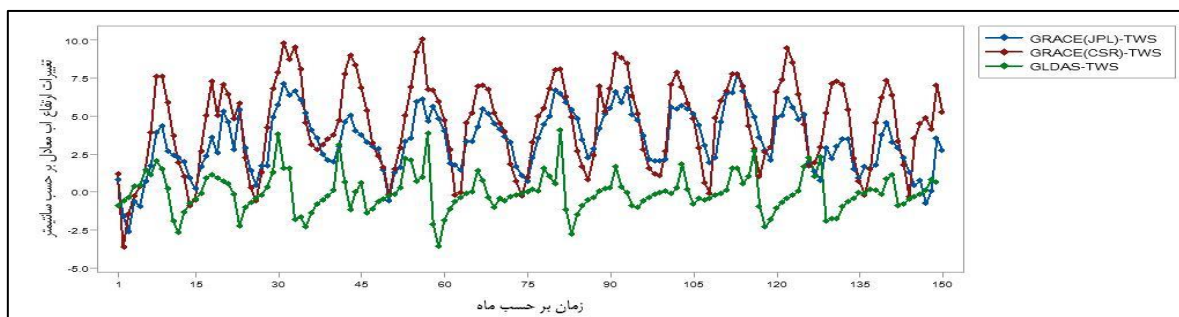
۴- مقایسه تغییرات آب زیر زمینی با استفاده از داده‌های GRACE، GLDAS و داده‌های مشاهداتی.

۱- مقایسه مقادیر TWS برگرفته از داده‌های GRACE شامل مراکز پردازش CSR، GFZ، JPL و TWS مدل GLDAS

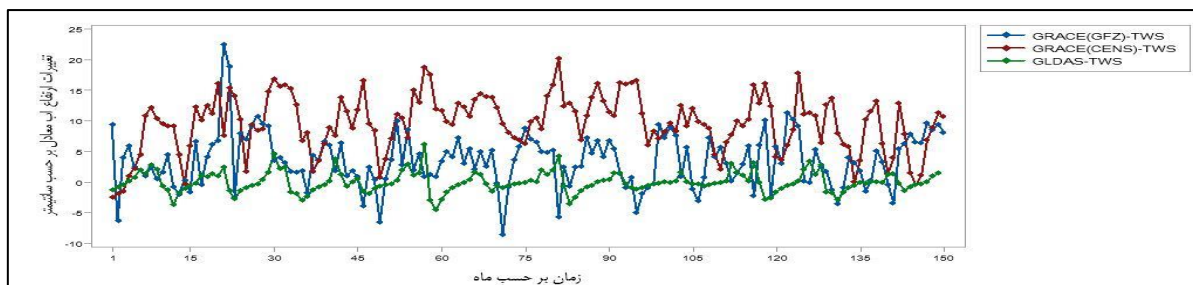
در این بخش و با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان بیان نمود که به طور کلی مقادیر TWS یا همان EWH به جز در چند ماه دارای یک برآورد بیشتر در داده‌های GRACE نسبت به مدل GLDAS



شکل ۳- اجزای پدید آورنده جرم زمین



شکل ۴- مقایسه مقادیر TWS یا EWH داده‌های مراکز پردازش JPL، CSR و GLDAS در پیکسل به طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵

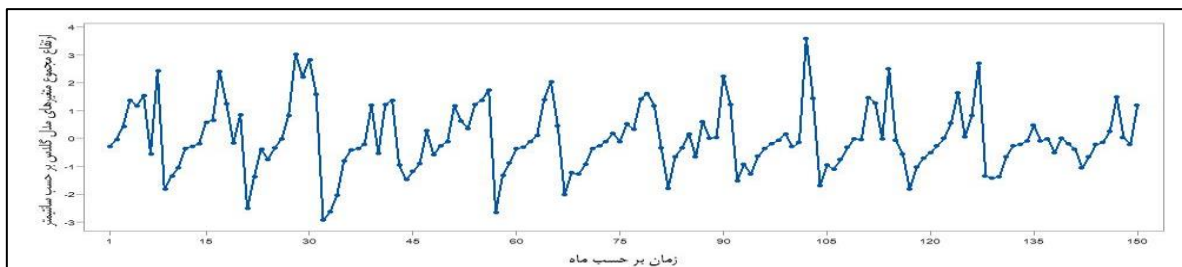


شکل ۵- مقایسه مقادیر TWS یا EWH داده‌های مراکز پردازش GFZ و CENS و GLDAS در پیکسل به طول جغرافیایی ۵۸/۵ الی ۵۹/۵

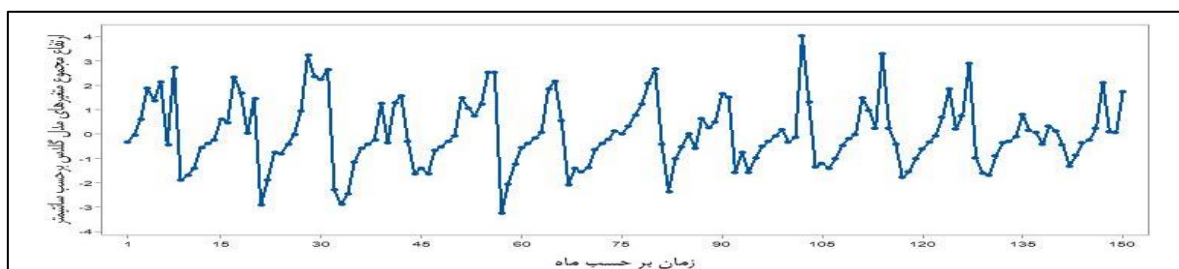
۲- تغییرات ماهانه متغیرهای برگرفته از مدل GLDAS

آب ذخیره‌شده در تاج پوشش گیاهان که از مدل GLDAS قابل حصول است، ضروری است. شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات سه متغیر مذکور را به صورت مجموع آن‌ها نشان می‌دهد.

آن‌چنان‌که بیان شد برای سنجش تغییرات ماهانه سطح آب زیرزمینی، تعیین تغییرات سه متغیر رطوبت خاک، آب معادل برف و



شکل ۶- تغییرات ماهانه مجموع سه متغیر رطوبت خاک، آب معادل برف و آب ذخیره‌شده در تاج پوشش گیاهان برگرفته از مدل GLDAS در پیکسل به طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵



شکل ۷- تغییرات ماهانه مجموع سه متغیر رطوبت خاک، آب معادل برف و آب ذخیره‌شده در تاج پوشش گیاهان برگرفته از مدل GLDAS در پیکسل به طول جغرافیایی ۵۸/۵ الی ۵۹/۵

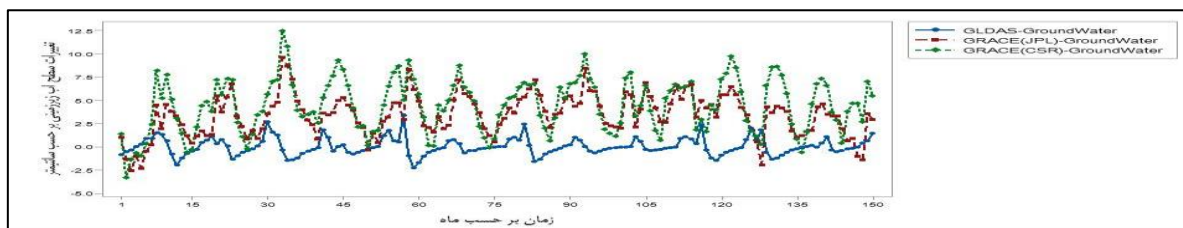
این همخوانی در داده‌های GRACE(CENS) و GRACE(GFZ) مورد استفاده در پیکسل با طول جغرافیایی ۵۸/۵ الی ۵۹/۵ کمتر است. نکته مهم آنکه تغییرات سطح آب زیرزمینی در شکل‌های زیر در مساحتی معادل یک درجه مربع ارائه شده است و در بررسی دامنه و بزرگی اعداد مربوط به این تغییرات باید مد نظر باشد. به عبارت دیگر، تغییرات مذکور در شکل‌های زیر که در مقیاس یک درجه مربع نمایش داده شده است، به مراتب کوچک‌تر از میزان آن‌ها در مقیاس آبخوان مشاهده خواهند شد.

۴- مقایسه تغییرات آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های GRACE، GLDAS و داده‌های مشاهداتی

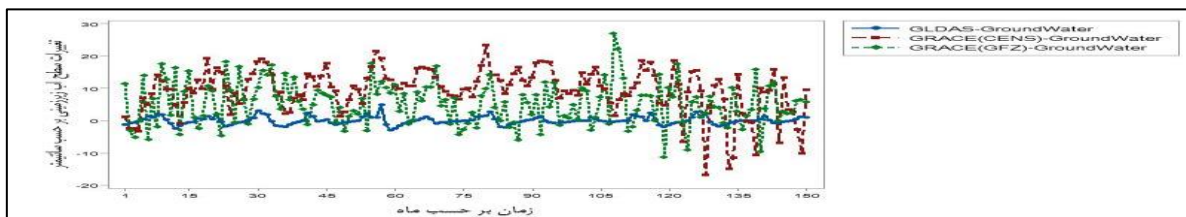
در این قسمت به منظور اعتبارسنجی نتایج پژوهش، تغییرات سطح آب زیرزمینی داده‌های مراکز مختلف ماهواره GRACE و مدل GLDAS را به طور جداگانه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ برای پیکسل به طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵ و همچنین در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ برای پیکسل به طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵ با داده‌های مشاهداتی (چاه‌های پیزومتر) مقایسه شد.

۳- مقایسه تغییرات آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های GRACE و GLDAS

پس از کسر مجموع مقادیر سه متغیر رطوبت خاک، آب معادل برف و آب ذخیره‌شده در تاج پوشش گیاهان استخراج‌شده از مدل GLDAS که در شکل‌های ۶ و ۷ قابل مشاهده است از مقادیر TWS در شکل‌های ۴ و ۵، می‌توان در دو پیکسل مطالعاتی سری زمانی تغییرات سطح آب زیرزمینی را برای داده‌های مراکز پردازش GRACE و مدل GLDAS محاسبه نمود که نتیجه این عمل در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. به طور کلی می‌توان بیان نمود که داده‌های مراکز مختلف GRACE، برآوردی بیشتر از مدل GLDAS برای تخمین تغییرات سطح آب زیرزمینی دارند. همچنین داده‌های GRACE نوسانات بیشتری در تغییرات ماهانه سطح آب زیرزمینی نسبت به مدل GLDAS که تغییرات مذکور نسبتاً یکنواخت‌تر است، نشان می‌دهند. مطابق آنچه در شکل‌های زیر دیده می‌شود، تخمین تغییرات سطح آب زیرزمینی در داده‌هایی GRACE(JPL) و GRACE(CSR) که در پیکسل با طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵ بکار رفته است، همخوانی مناسبی نسبت به یکدیگر دارند. در حالی که



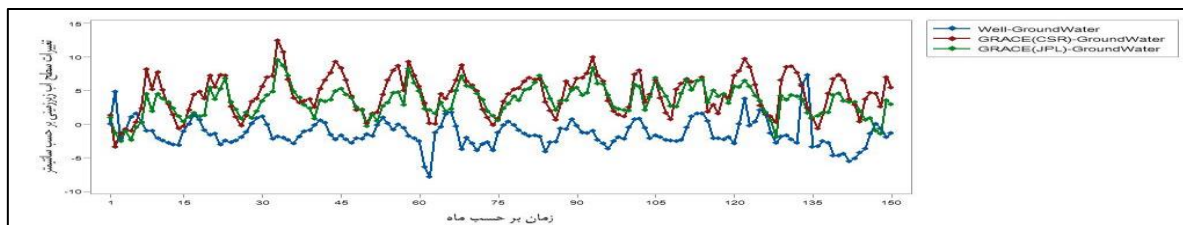
شکل ۸- مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های JPL و CSR و GLDAS در پیکسل به طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵



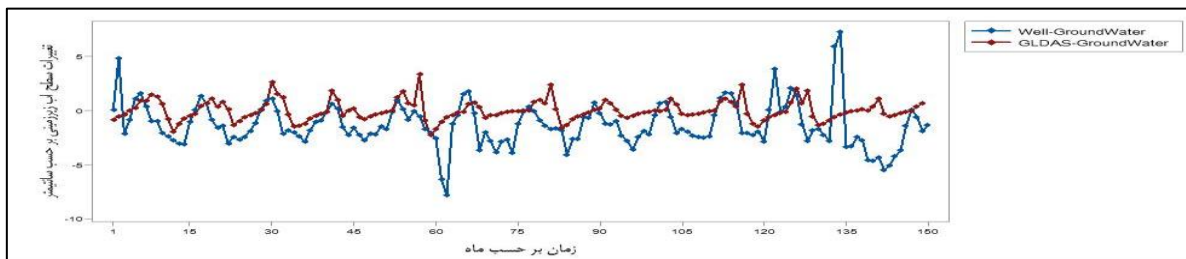
شکل ۹- مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های CENS و GFZ و GLDAS در پیکسل به طول جغرافیایی ۵۸/۵ الی ۵۹/۵

گرفته توسط تمام داده‌های مراکز گوناگون پردازش GRACE بیش از مقادیر حاصل شده از داده‌های چاه‌های پیژومتری مشاهداتی است. البته این برآورد بیشتر در داده‌های GRACE(GFZ) کمتر دیده می‌شود. این موضوع در اشکال ۱۰ تا ۱۳ و همچنین در جداول ۱ و ۲ که شاخص‌های آماری را نمایش می‌دهند، مشهود است. لازم به ذکر است که مقادیر تخمین زده شده توسط مدل GLDAS برآورد مناسب‌تری نسبت به داده‌های GRACE در مقایسه با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهند.

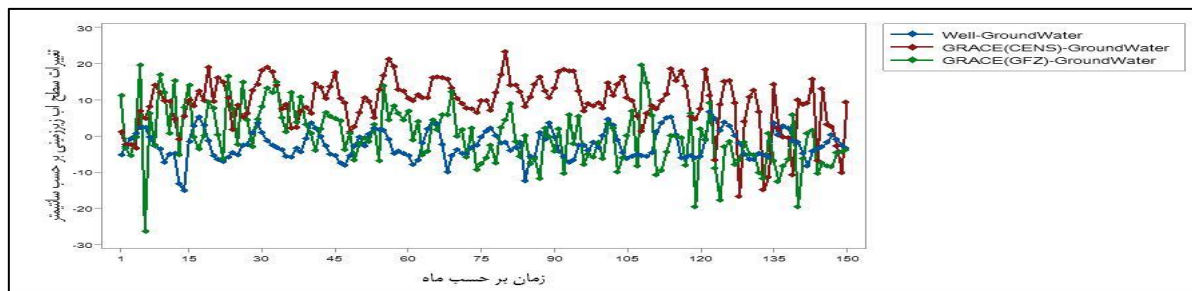
جداول ۱ و ۲ نیز شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) را به جهت مقایسه تخمین‌های تغییرات سطح آب زیرزمینی صورت گرفته توسط داده‌های GRACE و مدل GLDAS نسبت به داده‌های مشاهداتی (چاه‌های پیژومتری) را برای هر کدام از دو پیکسل ارائه می‌نمایند. همچنین به منظور آگاهی از روند تغییرات ماهانه سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی مورد مطالعه جداول ۳ و ۴ تهیه گردیدند. نتایج نشان می‌دهند، به جز در چند ماه در اکثر دوره مطالعاتی، تخمین صورت



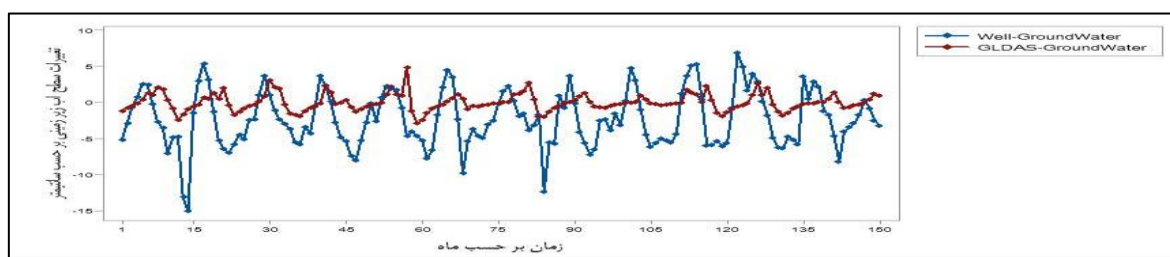
شکل ۱۰- مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های JPL و CSR و داده‌های مشاهداتی (چاه‌ها) در پیکسل به طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های مشاهداتی (چاه‌ها) و GLDAS در پیکسل به طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵



شکل ۱۲- مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های CENS و GFZ و داده‌های مشاهداتی (چاه‌ها) در بیکسل به طول جغرافیایی ۵۸/۵ الی ۵۹/۵



شکل ۱۳- مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های مشاهداتی (چاه‌ها) و GLDAS در بیکسل به طول جغرافیایی ۵۸/۵ الی ۵۹/۵

قزوین با $RMSE = 5/54$ و $MAE = 4/16$ نزدیک است. برآوردها توسط داده‌های مراکز پردازش GRACE(CSR) و GRACE(GFZ) را به ترتیب می‌توان در جایگاه دوم و سوم صحت تخمین‌ها در بین چهار مرکز پردازش داده GRACE دانست. البته بهترین تخمین را می‌توان متعلق به مدل GLDAS به‌ویژه در بیکسل با طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵ که $RMSE$ آن $2/350$ سانتی‌متر و MAE برابر $1/826$ سانتی‌متر است، لحاظ کرد.

مقادیر شاخص‌های آماری در جداول زیر نشان می‌دهند که از بین داده‌های مراکز مختلف پردازش GRACE، داده‌های GRACE(CENS) با $RMSE = 14/315$ و $MAE = 12/645$ ضعیف‌ترین تخمین تغییرات سطح آب زیرزمینی را ارائه داده است. درحالی‌که داده‌های GRACE(JPL) با $RMSE = 5/708$ و $MAE = 5/038$ بهترین نتایج را نشان می‌دهند. نتایج این شاخص‌ها با پژوهش صورت گرفته توسط فرجی و همکاران (۱۳۹۶) در دشت

جدول ۱- شاخص‌های آماری مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی داده‌های GRACE و GLDAS با تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه‌های

پیزومتری مشاهداتی در بیکسل به طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵

متغیرهای مورد مقایسه	RMSE(cm)	MAE(cm)
GRACE(CSR)-GW / Well-GW	۶/۷۴۱	۶/۰۰۹
GRACE(JPL)-GW / Well-GW	۵/۷۰۸	۵/۰۳۸
GLDAS-GW / Well-GW	۲/۳۵۰	۱/۸۲۶

جدول ۲- شاخص‌های آماری مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی داده‌های GRACE و GLDAS با تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه‌های

پیزومتری مشاهداتی در بیکسل به طول جغرافیایی ۵۸/۵ الی ۵۹/۵

متغیرهای مورد مقایسه	RMSE(cm)	MAE(cm)
GRACE(GFZ)-GW / Well-GW	۹/۶۸۴	۷/۵۸۶
GRACE(CENS)-GW / Well-GW	۱۴/۳۱۵	۱۲/۶۴۵
GLDAS-GW / Well-GW	۴/۶۰۰	۳/۸۲۶

زیرزمینی را در پیکسل با طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵ نشان می‌دهند. درحالی‌که داده‌های مشاهداتی چاه‌های پیزومتری یک کاهش ۰/۰۱۰ - سانتی‌متر در هرماه را در این پیکسل گزارش می‌دهند. لازم به توضیح است که در داده‌های مدل GLDAS امکان سنجش و گزارش روند ماهانه مذکور وجود نداشت.

در ادامه، جداول ۳ و ۴ روند تغییرات ماهانه هر پیکسل مطالعاتی که در ابعاد یک درجه مربع می‌باشند را برحسب سانتی‌متر در ماه‌نشان می‌دهند. اطلاعات موجود در جداول روشن می‌سازند که داده‌های GRACE(CSR) با ارائه یک‌روند ۰/۰۸۹ - سانتی‌متر در ماه به ازای مساحت یک درجه مربع، بهترین پیش‌بینی تغییرات ماهانه سطح آب

جدول ۳- روند ماهانه تغییرات سطح ایستابی در پیکسل به طول جغرافیایی ۵۷/۵ الی ۵۸/۵

متغیر	روند ماهانه (cm/month)
GRACE(CSR)-GroundWater	- ۰/۰۸۹
GRACE(JPL)-GroundWater	- ۰/۰۶۸
Well-GroundWater	- ۰/۰۱۰

جدول ۴- روند ماهانه تغییرات سطح ایستابی در پیکسل به طول جغرافیایی ۵۸/۵ الی ۵۹/۵

متغیر	روند ماهانه (cm/month)
GRACE(GFZ)-GroundWater	- ۰/۰۶۴
GRACE(CENS)-GroundWater	- ۰/۱۰۸
Well-GroundWater	- ۰/۰۲۱

نتیجه‌گیری

مقایسه سری زمانی تغییرات سطح آب زیرزمینی توسط داده‌های مراکز مختلف پردازش GRACE نشان می‌دهد که داده‌های GRACE(JPL) با داشتن کمترین مقادیر شاخص‌های خطا در مقایسه با داده‌های مشاهداتی تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیزومتری، بهترین تخمین را نتیجه می‌دهند. این در حالی است که داده‌های GRACE(CENS) ضعیف‌ترین تخمین تغییرات سطح آب زیرزمینی را ارائه داده‌اند. لازم به توضیح است که نتایج، برتری برآوردهای مدل GLDAS را نسبت به تمام انواع داده‌های ماهواره‌ای GRACE در اندازه‌گیری تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی موردنظر گزارش نمودند و به‌عبارت‌دیگر شاخص‌های آماری در این مدل کمترین خطا را نسبت به داده‌های مشاهداتی نشان دادند. همچنین داده‌های GRACE(CSR) در تعیین روند تغییرات ماهانه سطح آب زیرزمینی مناسب‌ترین سنجش را داشتند. به‌طورکلی می‌توان گفت داده‌های GRACE یک بیش برآورد نسبت به داده‌های مشاهداتی داشته‌اند. در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان‌دهنده قابلیت مطلوب داده‌های ماهواره GRACE در تخمین سریع و ارزان تغییرات سطح آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطقی که فقدان داده مانعی بر مسیر مطالعات و مدیریت منابع آب زیرزمینی است، می‌باشند. مسلماً انجام فعالیت‌ها و مطالعات بیشتر در توسعه ماهواره‌های ثقل سنج مانند GRACE می‌تواند میزان خطاها را کاهش داده و نویدبخش یک ابزار کارآمد در مطالعات منابع آبی باشد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات اساتید ارجمندم که من را در انجام این پژوهش یاری نمودند، تشکر می‌نمایم.

منابع

- اسماعیلی، ر.، منتظری، م.، اسمعیل‌نژاد، م.، و صابر حقیقت، ا. ۱۳۹۰. پهنه‌بندی اقلیمی خراسان رضوی با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره. نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی. ۲: ۵۶-۴۳.
- اشرف زاده افشار، ع.، جودکی، غ.، و شریفی، م. ۱۳۹۵. ارزیابی منابع آب‌های زیرزمینی ایران با استفاده از داده‌های ماهواره ثقل سنجی GRACE. نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری. ۵: ۸۴-۷۳.
- خلیلی، ن.، داوری، ک.، علیزاده، ا.، انصاری، ح.، رضایی پزند، ح.، کافی، م.، و قهرمان، ب. ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد دو مدل LARS-WG و ClimGen در تولید سری‌های زمانی بارش و درجه حرارت در ایستگاه تحقیقات دیم سیسب، خراسان شمالی. نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳۰: ۳۳۳-۳۲۲.
- شیخی، م. و زمزم، د. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات سالیانه آب‌های زیرزمینی در ایران به کمک مشاهدات ماهواره ثقل سنجی گریس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته عمران گرایش ژئودزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت.
- فرجی، ز.، کاویانی، ع.، و اشرف زاده افشار، ع. ۱۳۹۶. ارزیابی داده‌های

- Lv, M., Lu, H., Yang, K., Xu, Z., Lv, M. and Huang, X. 2018. Assessment of Runoff Components Simulated by GLDAS against UNH-GRDC Dataset at Global and Hemispheric Scales. *Water*. 10.8.969
- Miro, M.E. and Famiglietti, J.S. 2018. Downscaling GRACE remote sensing datasets to high-resolution groundwater storage change maps of California's Central Valley. *Remote Sensing*. 10.1.143
- Moiwo, J.P., Tao, F. and Lu, W. 2013. Analysis of satellite-based and in situ hydro-climatic data depicts water storage depletion in North China Region. *Hydrological Processes*. 27.7:1011-1020
- Rodell, M. and Famiglietti, J.S. 2002. The potential for satellite-based monitoring of groundwater storage changes using GRACE: the High Plains aquifer, Central US. *Journal of Hydrology*. 263.1-4:245-256
- Seo, K.W., Wilson, C.R., Famiglietti, J.S., Chen, J.L. and Rodell, M. 2006. Terrestrial water mass load changes from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research*. 42.5. W05417
- Steffen, H., Müller, J. and Denker, H. 2009. Analysis of mass variations in northern glacial rebound areas from GRACE data. In *Observing Our Changing Earth*. 133.1:501-509
- Vishwakarma, B.D., Devaraju, B. and Sneeuw, N. 2018. What is the spatial resolution of GRACE satellite products for hydrology?. *Remote Sensing*. 10.6:852
- Wang, S., Liu, H., Yu, Y., Zhao, W., Yang, Q. and Liu, J. 2019. Evaluation of groundwater sustainability in the arid Hexi Corridor of Northwestern China, using GRACE, GLDAS and measured groundwater data products. *Science of the Total Environment*. 705.135829
- Yeh, P.J.F., Swenson, S.C., Famiglietti, J.S. and Rodell, M. 2006. Remote sensing of groundwater storage changes in Illinois using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research*. 42.12. W12203
- Zaki, N.A., Haghghi, A.T., Rossi, P.M., Tourian, M.J. and Kløve, B. 2018. Monitoring groundwater storage depletion using gravity recovery and climate experiment (GRACE) data in the semi-arid catchments. 11.1456
- ماهواره GRACE در برآورد تغییرات سطح آب زیرزمینی در استان قزوین. نشریه آکو هیدرولوژی. ۴. ۲: ۴۶۳-۴۷۶.
- فرخ نیا، ا. و مرید، س. ۱۳۹۳. بررسی قابلیت داده‌های ماهواره بازیابی گرانش و آزمایش اقلیمی و خروجی مدل‌های سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی برای برآورد بیلان آب در مقیاس‌های مکانی بزرگ (مطالعه موردی حوضه آبریز دریاچه ارومیه). نشریه تحقیقات منابع آب ایران. ۱۰. ۱: ۶۲-۵۱.
- Bhanja, S.N., Mukherjee, A., Saha, D., Velicogna, I. and Famiglietti, J.S. 2016. Validation of GRACE based groundwater storage anomaly using in-situ groundwater level measurements in India. *Journal of Hydrology*. 543. Part B:729-738
- Famiglietti, J.S., Lo, M., Ho, S.L., Bethune, J., Anderson, K.J., Syed, T.H. and Rodell, M. 2011. Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *Geophysical Research Letters*. 38.L03403
- Jiang, D., Wang, J., Huang, Y., Zhou, K., Ding, X. and Fu, J. 2014. The review of GRACE data applications in terrestrial hydrology monitoring. *Advances in Meteorology*. 2014:58-67
- Jin, S.G., Hassan, A.A. and Feng, G.P. 2012. Assessment of terrestrial water contributions to polar motion from GRACE and hydrological models. *Journal of Geodynamics*. 62.1:40-48
- Kumar, S.V., Zaitchik, B.F., Peters-Lidard, C.D., Rodell, M., Reichle, R., Li, B. and Cosh, M.H. 2016. Assimilation of gridded GRACE terrestrial water storage estimates in the North American Land Data Assimilation System. *Journal of Hydrometeorology*. 17.7:1951-1972.
- Landerer, F.W. and Swenson, S.C. 2012. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water resources research*. 48. W04531
- Leblanc, M.J., Tregoning, P., Ramillien, G., Tweed, S.O. and Fakes, A. 2009. Basin scale integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia. *Water resources research*. 45. W04408
- Longuevergne, L., Scanlon, B.R. and Wilson, C.R. 2010. GRACE Hydrological estimates for small basins: Evaluating processing approaches on the High Plains Aquifer, USA. *Water Resources Research*. 46.W11517

Evaluation of Groundwater Resources using GRACE Satellite Gravimetric Data (Case Study: Khorasan Razavi)

S.N. Nabavi¹, A. Alizadeh^{2*}, A.R. Faridhosseini³
Received: Jan.29, 2020 Accepted: Apr.30, 2020

Abstract

Determining groundwater storage changes, especially in arid and semiarid areas, is a vital issue for groundwater management and planning. GRACE satellite produces changes in water storage with 1 degree spatial resolution using Earth's gravity field changes. In this study, it is tried to evaluate monthly groundwater storage changes between August 2002 and June 2016 in two pixels of one square degree of Khorasan Razavi province, which cover the whole area or parts of 6 aquifers using data from four GRACE satellite information processing centers named CENS, CSR, GFZ and JPL. Utilizing amount of Terrestrial Water Storage (TWS) obtained from GRACE satellite data, with data of soil moisture, snow water equivalent and canopy water storage derived from the GLDAS model which are presented with 1 degree spatial resolution on a monthly basis lead to estimates of monthly groundwater level changes. An estimation of monthly changes in groundwater level of the GLDAS model was obtained at a 25 degrees resolution in order to compare with the results of the GRACE satellite data. Observational data containing monthly groundwater level changes from the piezometric wells of the study area were used to validate the results. The results show that data of GRACE (CENS) with (RMSE = 14.35 cm and MAE = 12.645 cm) are the weakest estimation of groundwater level changes. While the GRACE (JPL) data with RMSE = 5.708 and MAE = 5.038 shows the best estimation. It should be noted that the GLDAS model data with a resolution of 0.25 degree with an RMSE of 2.350 cm and a MAE of 1.826 cm shows a more appropriate estimate than the GRACE data types. GRACE data (CSR) showed the most favorable prediction of the trend of monthly changes in groundwater level by presenting a trend of -0.089 cm / month.

Keywords: Groundwater, Terrestrial Water Storage, GRACE satellite, GLADS model

1- M.Sc. Student of Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM)

2- Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM)

3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM)

(* - Corresponding Author Email: alizadeh@um.ac.ir)