

ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE در برآورد تغییرات سطح آب زیرزمینی در استان قزوین

زهرة فرجی^{۱*}، عباس کاویانی^۲، افشین اشرفزاده^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام‌خیمینی^(ره)

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۹/۱۷؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۲/۲۵)

چکیده

استان قزوین در رتبه هفتم خشکسالی در کشور قرار گرفته است، بنابراین مدیریت گسترده منابع آبی در این استان ضروری است. بهره‌گیری از تغییرات میدان گرانشی مشاهده‌شده از ماهواره GRACE از روش‌های مدیریتی است. ماهواره ثقل‌سنجی GRACE مجموعه‌ای از داده‌های تغییرات ذخیره آب را در مقیاس منطقه با قدرت تفکیک مکانی ۱ درجه تولید می‌کند. این پژوهش با هدف ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE در استان قزوین برای یافتن راه حلی جامع برای دستیابی آسان و سریع به اطلاعات تغییرات منابع آبی این استان انجام شد. برای اعتبارسنجی داده‌های ماهواره GRACE از داده‌های مدل سطح زمین GLDAS و داده‌های مشاهداتی چاه‌ها در منطقه استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد ماهواره GRACE به‌عنوان ماهواره‌ای ثقل‌سنج که فقط به‌منظور برآورد تغییرات ذخیره آب تولید شده است، برآورد خوبی از روند تغییرات ذخیره آب و همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی در اختیار کاربران قرار می‌دهد. نتایج تحلیل آماری انجام‌شده نشان‌دهنده $MAE=4/16$ ، $RMSE=5/54$ و $MBE=1/5$ در واحد سانتی‌متر در مقیاس فصلی بین داده‌های تغییرات سطح آب زیرزمینی به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE و چاه‌های مشاهداتی در دشت قزوین و همچنین $MAE=4/32$ ، $RMSE=5/46$ و $MBE=-0/18$ سانتی‌متر در ماه بین داده‌های تغییرات ذخیره آب به‌دست‌آمده از مدل GLDAS و ماهواره GRACE است. همچنین همبستگی بین داده‌های تغییرات ذخیره آب به‌دست‌آمده از مدل GLDAS و ماهواره GRACE و تغییرات سطح آب زیرزمینی به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE و داده‌های مشاهداتی در سطح احتمال ۹۹ درصد معنادار است. نتایج بیانگر آن است که ماهواره GRACE روند تغییرات ذخیره آب را بهتر از مدل GLDAS نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌گان: آب زیرزمینی، بارش، ماهواره GRACE، مدل GLDAS.

مقدمه

مناطق پرجمعیت و صنعتی در سراسر جهان با کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی به‌عنوان بحرانی هیدرولوژیکی رو به رشد و تأثیرگذار بر بیشتر بخش‌های تولیدی و اقتصادی مواجه‌اند. کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت دارد که مقدار بارش در آنها بسیار کمتر از تبخیر-تعرق است [۱]. مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح منابع آب‌های زیرزمینی در یک استان به میزان آگاهی از روند تغییرات مکانی و زمانی این منابع باارزش وابسته است. بنابراین، ضرورت دستیابی به شبکه‌ای از داده‌های منابع آب زیرزمینی در مناطق بزرگ‌مقیاس انکارناپذیر است. از آنجا که نصب و نگهداری تجهیزات مشاهداتی بسیار پرهزینه است، بنابراین استفاده از روش‌های سنجش از دور به‌عنوان جایگزینی مناسب برای تکنیک‌های سنتی و پرهزینه سابق رو به گسترش است [۲ و ۳]. تحقیقات اخیر در علوم فضا، شامل ماهواره‌ی ثقل‌سنج و مدل‌های وابسته، اطلاعات بسیار سودمندی از تغییرات ذخایر آب‌های زیرزمینی در اختیار محققان قرار می‌دهد [۴]. ماهواره‌های ثقل‌سنج GRACE و مدل سطح زمین GLDAS هر دو تکنیک‌هایی فضایی هستند که با استفاده از ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های سطح زمین (LSM)، داده‌های مشاهداتی و همگون‌سازی آماری، پارامترهای هیدرولوژیکی مختلفی را تولید می‌کنند [۲]. استفاده از محصولات به‌دست‌آمده از ماهواره‌ی GRACE و مدل GLDAS برای شبیه‌سازی روندهای هیدرولوژیکی، توانایی بشر را در درک و مدیریت متغیرهای آن افزایش می‌دهد [۵].

جفت ماهواره‌ی GRACE محصول مشترک سازمان ناسای آمریکا و مرکز هوافضای آلمان است که قابلیت برآورد تغییرات ستون ذخیره آب را دارد [۶]. این ماهواره قادر است با اندازه‌گیری تغییرات میدان ثقل کره زمین براساس عرض جغرافیایی مرجع مقدار تغییرات ذخیره آب را برآورد کند. به‌رغم اینکه ماهواره‌ی GRACE توانمند است، به‌دلیل ناتوانی در توان تفکیک عمودی، امکان تفکیک اجزای ذخیره آب^۱ از جمله آب سطحی، رطوبت خاک و آب زیرزمینی را ندارد [۷]. بنابراین، کاربرد داده‌های مدل‌های مبتنی بر اندازه‌گیری‌های زمینی نظیر مدل

GLDAS می‌تواند اطلاعات لازم از اجزای ذخیره آب را در اختیار قرار دهد [۸].

مدل سطح زمین (GLDAS) مأموریت مشترک از مرکز گودارد^۲ ناسا و سازمان ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) برای پیش‌بینی محیط زیست را به‌عهده دارد. مدل GLDAS به‌طور جداگانه با استفاده از مدل‌های Noah، Mosaic و LSMs توزیع جهانی متغیرهای سطح زمین را برآورد می‌کند. رطوبت خاک، رواناب و تبخیر-تعرق حاصل از مدل GLDAS تخمینی واقعی از اجزای اصلی ذخیره آب زیرزمینی برآوردشده توسط ماهواره‌ی GRACE را فراهم می‌کنند [۲]. در واقع محتوای آب زمین^۳ یا به‌بیانی ذخیره آب به‌دست‌آمده از مدل GLDAS مجموع رطوبت چهار لایه از خاک، مقدار تجمعی برف و مجموع آب ذخیره‌شده در گیاه است. ذخیره آب در بخشی از زمین که قابلیت ذخیره آن را دارد، نه تنها برای چرخه هیدرولوژی ضروری است، بلکه برای تأمین آب شیرین، تولید محصولات کشاورزی و ثبات اجتماعی بسیار اهمیت دارد. برآورد دقیق ذخیره آب مشکل است، ولی درک کامل از کل اجزای ذخیره آب حتی از حل یک چالش هیدرولوژیکی نیز دشوارتر است.

رامیلین و همکارانش (۲۰۰۸) به ارزیابی داده‌های ماهواره‌ی GRACE طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ در حوضه رودخانه‌ی آمازون پرداختند. بدین‌منظور از داده‌های دو ایستگاه در حوضه مد نظر استفاده کرده و پس از اصلاح داده‌های ماهواره‌ی GRACE، روند تغییرات سطح آب زیرزمینی را ارزیابی کرده‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده بیش‌برآوردی معادل ± 400 میلی‌متر در داده‌های ماهواره‌ی GRACE نسبت به داده‌های ایستگاهی است. همچنین نتایج بیانگر آن است که چگونگی اصلاح داده‌های GRACE در نتایج نهایی بسیار تأثیرگذار است [۹]. لانگورن و همکارانش (۲۰۱۰) داده‌های مراکز پردازش CSR و GRGS ماهواره‌ی GRACE را در حوضه‌ای به مساحت ۲۰۰ هزار کیلومتر مربع طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ ارزیابی کردند. در این پژوهش برای اصلاح داده‌های ماهواره‌ی GRACE از فیلتر گاوسی ۳۰۰ کیلومتر استفاده شده است. پس از مقایسه روند تغییرات ذخیره آب به‌دست‌آمده از مدل GLDAS، ماهواره‌ی GRACE و داده‌های چاه‌های پیژومتری، نتایج بیان‌کننده آن است که ماهواره‌ی GRACE

2. Goddard
3. Land Water Content

1. Terrestrial Water Storage (TWS)

دریاچه است. همچنین تغییرات حجم آب دریاچه نسبت به تغییرات GRACE تأخیری دوماهه دارد [۱۵]. شریفی و همکارانش (۲۰۱۴) داده‌های ماهواره GRACE و مدل GLDAS را با هدف پایش خشکسالی در ایران طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ ارزیابی کردند. در این تحقیق به‌منظور بررسی دقت داده‌های GRACE و GLDAS از داده‌های بارش ماهانه برای دوره یادشده استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد با توجه به روند کاهشی مقدار بارش، داده‌های مدل GLDAS قادر نیستند این روند را در مقدار ذخیره آب در زمین به‌خوبی نشان دهند در صورتی که داده‌های ماهواره GRACE به‌خوبی این روند کاهشی در ذخیره آب را نشان می‌دهند [۱۶]. اشرف‌زاده و همکارانش (۲۰۱۵) منابع آب زیرزمینی جنوب ایران را برای سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها بیان می‌کند که منابع آب زیرزمینی در این محدوده با کاهش محسوس مواجه است که ماهواره GRACE این روند کاهشی را نشان می‌دهد در صورتی که مدل GLDAS قادر به نشان‌دادن این روند نیست [۱۷]. مطالعات گذشته توانایی ماهواره GRACE در برآورد تغییرات ذخیره آب در نقاط مختلف جهان و همچنین برتری آن را نسبت به مدل GLDAS نشان داده‌اند. در این مطالعه تلاش شده است روند تغییرات ذخیره آب و تغییرات سطح آب زیرزمینی در استان قزوین بررسی شود که با کاهش شدید منابع آب زیرزمینی مواجه است. بنابراین، هدف از این تحقیق محاسبه مقدار ذخیره آب و تغییرات سطح آب زیرزمینی توسط داده‌های ماهواره GRACE، برآورد مقدار ذخیره آب با استفاده از مدل GLDAS، مقایسه روند تغییرات ذخیره آب به‌دست‌آمده از مدل GLDAS و ماهواره GRACE و در نهایت اعتبارسنجی داده‌های تغییرات سطح آب زیرزمینی به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE توسط داده‌های چاه‌های مشاهداتی در سطح استان قزوین است.

مواد و روش‌ها

استان قزوین با مساحتی معادل ۱۵۸۲۱ کیلومترمربع به‌ترتیب بین طول و عرض جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه در گوشه شمال غرب و ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۸ دقیقه در گوشه جنوب شرقی در حوزه مرکزی ایران واقع شده است. موقعیت استان در سطح کشور در شکل ۱ نشان داده شده است. میانگین بارش

روند تغییرات ذخیره آب را بهتر از مدل GLDAS نشان می‌دهد [۱۰]. مویوو و همکارانش (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های مدل GLDAS و معادله بیلان آب، مقدار ذخیره آب زیرزمینی را در منطقه شمال چین برای سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ به‌دست آوردند. علاوه بر این، با استفاده از ماهواره GRACE تغییرات ماهانه و سالانه ذخیره آب زیرزمینی را نیز محاسبه کردند. نتایج مقایسه این دو سری داده $R^2=0.65$ در مقیاس ماهانه و $R^2=0.8$ در تغییرات سالانه را نشان می‌دهد [۱۱]. فریرا و همکارانش (۲۰۱۳) مقدار کل تخلیه آب حوضه یانگتس در کشور چین را با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE، TRMM و مدل GLDAS در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ برآورد کردند. نتایج تحقیقات این محققان نشان‌دهنده $RMSE=14/3$ میلی‌متر در ماه بین داده‌های ماهواره GRACE و داده‌های ایستگاهی است [۱۲]. لی و همکارانش (۲۰۱۴) پس از محاسبه بیلان آب در استان جیونجی در کره جنوبی، تغییرات ذخیره آب آن را با داده‌های مدل GLDAS و ماهواره GRACE مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد در فصل‌هایی که مقدار بارش زیاد است، داده‌های GLDAS دقت بیشتری نسبت به داده‌های GRACE دارند [۱۳]. چن و همکارانش (۲۰۱۶) با هدف یافتن روشی برای افزایش دقت داده‌های GRACE، به بررسی داده‌های این ماهواره طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ پرداختند. در این تحقیق از داده‌های مرکز پردازش GFZ، CSR و JPL استفاده شده و داده‌های ماهواره GRACE با استفاده از فیلتر گاوسی ۳۰۰ کیلومتر اصلاح شده است. مقایسه تغییرات ذخیره آب داده‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده ماهواره GRACE، نشان‌دهنده بهبود روند تغییرات در داده‌های اصلاح‌شده است [۱۴].

فرخ‌نیا و مرید (۲۰۱۴) قابلیت داده‌های ماهواره‌های GRACE و مدل GLDAS در برآورد بیلان آب و تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را بحث و بررسی کردند. مقایسه مقادیر برآوردشده تغییرات بیلان کل آب در حوضه توسط ماهواره GRACE و تغییرات مشاهداتی حجم آب دریاچه نشان‌دهنده وجود روند یکسان است. همچنین مقایسه روند تغییرات ذخیره آب به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE و حجم آب دریاچه نشان‌دهنده مشابهت روند سالانه سری‌های زمانی آنهاست؛ ولی در مقیاس ماهانه نوسانات تغییرات ذخیره آب GRACE بسیار شدیدتر از حجم

داده‌های بارش

در تحقیق حاضر از اطلاعات بارش ۱۳ ایستگاه سینوپتیک (شش ایستگاه در استان قزوین و هفت ایستگاه در استان‌های مجاور) استفاده شده است که اطلاعاتشان در جدول ۱ مشاهده می‌شود. از داده‌های ایستگاه قزوین (یک دوره آماری ۵۵ ساله) برای تعیین سال‌های تر، نرمال و خشک و از اطلاعات سایر ایستگاه‌ها به منظور تهیه نقشه مکانی تغییرات بارش با استفاده از روش کریجینگ استفاده شده است. در بین داده‌های ایستگاه‌های مد نظر، داده‌های سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ ایستگاه‌های کوهین، بوین‌زهرا و تاکستان و همچنین داده‌های سال ۲۰۰۸ ایستگاه کوهین موجود نیستند.

در گام اول ۱۶ پیکسل در محدوده استان قزوین به گونه‌ای انتخاب شدند که از یک طرف کل محدوده استان قزوین را پوشش دهند و از طرفی دیگر دقت نتایج زیاد شود. با توجه به اینکه پیکسل سایز داده‌های GRACE، 1×1 درجه است و همچنین با توجه به اینکه استان قزوین با مساحت ۱۵۸۲۱ کیلومترمربع تقریباً با یک پیکسل از ماهواره GRACE پوشش داده می‌شود، بنابراین با انتخاب ۱۶ پیکسل در محدوده استان قزوین دقت نتایج افزایش یافت. موقعیت این پیکسل‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. از داده‌های ۱۶ پیکسل دریافتی از ماهواره GRACE، داده‌های ۳ پیکسل (طول و عرض جغرافیایی $37/5 - 51/5$ ، $37/5 - 50/5$ و $37/5 - 49/5$) به دلیل خطای ناشی از دریاچه خزر حذف شدند. با توجه به تحقیقات اشرف‌زاده و همکارانش ماهواره GRACE با استفاده از نوعی مدل جهانی اقیانوسی، قبل از محاسبه ضرایب استوکس، سهم ثقل اقیانوس‌ها و دریاها را از داده‌های GRACE حذف می‌کند؛ ولی دریاچه خزر شامل این مدل نیست. بنابراین، در این پژوهش سهم دریاچه خزر برای کاهش خطای ناشی از آن حذف شد [۱۷]. در گام بعدی نقشه‌های تغییرات ذخیره آب برای محدوده تحت پوشش ۱۳ پیکسل با استفاده از روش میان‌یابی کریجینگ^۴ برای ماهواره GRACE و مدل GLDAS تولید شدند. در نهایت، محدوده استان قزوین از نقشه‌های اصلی جدا شد تا به صورت مجزا بحث و بررسی شود.

سالانه در سطح استان از ۲۱۰ میلی‌متر در بخش‌های شرقی تا بیش از ۵۵۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمال شرقی متغیر است. پرباران‌ترین نقاط استان دامنه‌های شمال شرقی منطقه الموت با بارشی بیش از ۵۵۰ میلی‌متر است که این شرایط بارشی کم و بیش در مناطق مرتفع شمالی شهرستان قزوین مشاهده می‌شود. علاوه بر این، در ارتفاعات جنوب غربی استان [اوج] نیز بارش سالانه بیش از ۴۵۰ میلی‌متر است. خشک‌ترین مناطق استان از سمت جنوب شرق استان و مناطق بیابانی بوین‌زهرا شروع و تا بخش‌های جنوبی شهرستان تاکستان امتداد می‌یابد. بارندگی سالانه در این مناطق در بازه ۲۱۰ تا ۲۳۰ میلی‌متر ثبت شده است. در شمال غرب استان روند کاهش بارش به واسطه کاهش ارتفاع مشهود است به طوری که با رسیدن به مناطق لوشان و منجیل در خارج استان میزان بارندگی به ۲۱۰ میلی‌متر می‌رسد. همچنین کمترین مقدار میانگین سالانه دما ۲ درجه سانتی‌گراد و در قله‌های شمال شرقی مشاهده می‌شود و بیشترین میانگین سالانه دما ۱۸ درجه سانتی‌گراد و در نقاط کم‌ارتفاع شمال غربی و پیرامون دریاچه سد سفیدرود ثبت شده است.

دریافت و پردازش داده‌ها

در این پژوهش برای بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی به دست آمده از ماهواره GRACE و مقایسه نتایج با داده‌های مشاهداتی، از داده‌های سطح ۲ و نسخه ۵ مرکز پردازش GFZ ماهواره GRACE و همچنین داده‌های بارش (kg/m^2) ، رواناب سطحی و زیرسطحی (kg/m^2) ، رطوبت خاک تا عمق ۲۰۰ سانتی‌متر (kg/m^2) و آب معادل برف (kg/m^2) از مدل GLDAS طی ماه می^۱ ۲۰۰۳ تا دسامبر^۲ ۲۰۱۰ در دشت قزوین استفاده شد. طی ۹۲ ماه داده‌های تغییرات ذخیره آب (سانتی‌متر) ماهواره GRACE در دشت قزوین، فقط داده‌های سه ماه موجود نبودند. همچنین برای بررسی روند تغییرات ذخیره آب ماهواره‌های GRACE و مقایسه آن با نتایج مدل GLDAS در استان قزوین، داده‌های تغییرات ذخیره آب ماهواره GRACE و مدل GLDAS برای دوره ژانویه^۳ ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۱۰ برای ۱۶ پیکسل 1×1 درجه به صورت ماهانه از سایت سازمان ناسا دریافت شدند.

1. May
2. December
3. January

4. Kriging

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک

نام ایستگاه	طول جغرافیایی UTM	عرض جغرافیایی UTM	نام ایستگاه	طول جغرافیایی UTM	عرض جغرافیایی UTM
قزوین	۴۰۰۱۰۲۲	۳۹۹۶۰۷۳	خدابنده	۴۱۲۷۴۰/۸	۲۶۱۳۷۷
آوج	۳۹۱۲۳۵۳	۴۰۳۰۵۶۸	زنجان	۳۳۰۰۵۸	۲۵۸۷۲۹/۵
بویین‌زهرا	۳۹۵۸۴۷۱	۴۱۱۷۱۹۴	فرودگاه رشت	۴۱۵۶۳۲/۶	۳۵۵۳۲۵/۴
تاکستان	۳۹۹۰۲۷۶	۴۱۲۸۴۴۷	بندر انزلی	۳۸۲۹۰۵	۳۴۶۳۵۱/۷
کوهین	۴۰۲۵۴۸۶	۳۸۷۶۶۶۲	ساوه	۳۷۷۳۹۴/۸	۴۲۷۰۲۴/۵
معلم‌کلايه	۴۰۱۴۱۲۹/۸	۴۰۱۱۷۱۹	سیاه‌بیشه	۴۳۶۲۲۷/۷	۵۲۶۹۵۲/۷
کرج	۳۹۲۶۳۶۰			۴۶۰۹۹۲/۲	

داده‌های ماهواره‌های GRACE و مدل GLDAS

$(\overline{\Delta\sigma})$ برای درجه و مرتبه تا ۶۰ با استفاده از معادله ۱ برآورد شد.

$$\overline{\Delta\sigma}(\theta, \varnothing) = \frac{\alpha \rho_{ave}}{2\rho_w} \sum_{l,m} \frac{2l+1}{1+k_l} w_l \tilde{p}_{lm}(\cos\theta) [\Delta C_{lm} \cos(m\varnothing) + \Delta S_{lm} \sin(m\varnothing)] \quad (1)$$

$$w_l = 1, w_l = \frac{1+e^{-\gamma b}}{1-e^{-\gamma b}} - \frac{1}{b}, w_{l+1} = -\frac{2l+1}{b} w_l + w_{l-1} \quad (2)$$

که در آن، r شعاع میانگین‌گیری و a شعاع استوایی زمین است. در این پژوهش بعد از بررسی مقادیر مختلف برای پارامتر r مقدار ۵۵۰ کیلومتر انتخاب شد.

داده‌های ماهواره GRACE و داده‌های مشاهداتی چاه‌ها
برای بررسی صحت داده‌های ماهواره GRACE از داده‌های ۱۶ چاه مشاهداتی در دشت قزوین و مجموع ۲۴ چاه مشاهداتی در استان‌های همدان و زنجان استفاده شد. داده‌های GRACE قدرت تفکیک مکانی ۱ درجه دارند، بنابراین یک پیکسل به مختصات مرکز عرض جغرافیایی ۳۶ و طول جغرافیایی ۵۰ درجه، تقریباً کل محدوده دشت قزوین را پوشش می‌دهد. همچنین برای افزایش دقت نتایج از دو پیکسل دیگر که محدوده استان‌های همدان و زنجان را پوشش می‌دهند به مختصات مرکز عرض جغرافیایی و طول جغرافیایی ۳۵/۵-۴۸/۵ و ۳۶/۵-۴۸/۵ درجه استفاده شد. موقعیت چاه‌ها در شکل ۱ مشخص شده است. میانگین داده‌های ۱۶ چاه برای ۸۸ ماه در دشت قزوین، داده‌های ۱۲ چاه در استان‌های زنجان و همدان برای ۴۵ ماه با داده‌های ۳ پیکسل از ماهواره GRACE مقایسه شدند. برای اعتبارسنجی داده‌های

به‌منظور آنالیز داده‌های ماهواره GRACE و تفکیک داده‌ها برای منطقه مطالعه‌شده با استفاده از روش وار (۱۹۹۸ و ۲۰۰۷)، تغییرات ستون ذخیره آب نرم‌شده

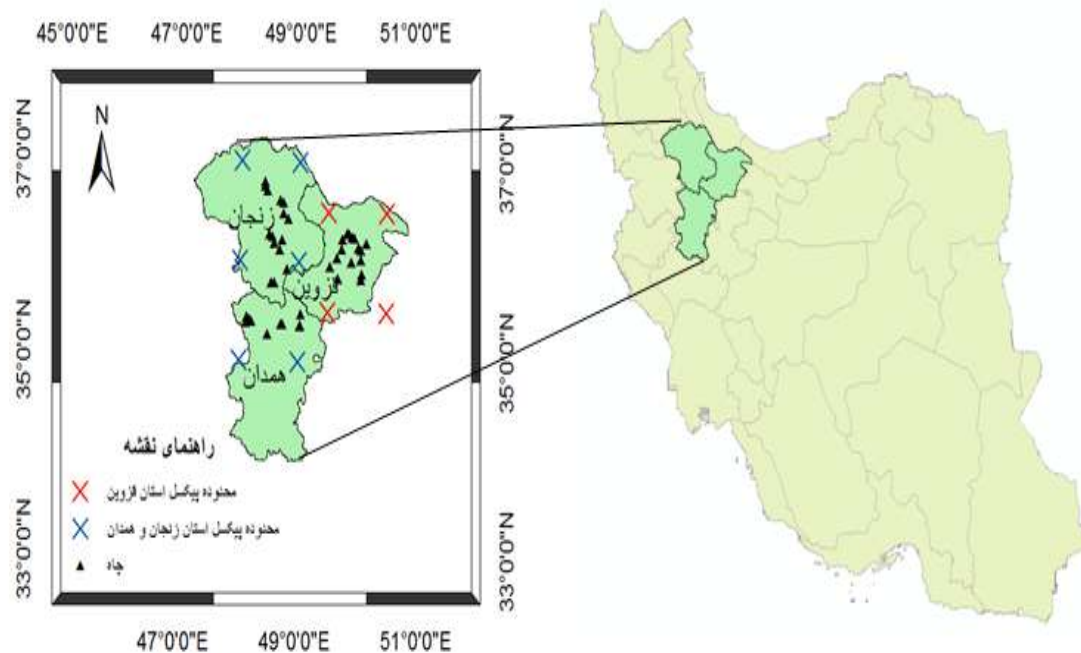
در معادله یادشده، (θ, \varnothing) : به‌ترتیب متمم عرض جغرافیایی و طول جغرافیایی، $\alpha = 6380 km$: شعاع کره زمین، $\rho_{ave} = 5517 kg/m^3$: میانگین دانسیته زمین، $\rho_w = 1000 kg/m^3$: دانسیته آب، k_l : عدد لاو از درجه l ΔC_{lm} و ΔS_{lm} : تغییرات ماهانه ضرایب هارمونیک کروی از درجه l و مرتبه m \tilde{P}_{lm} : توابع نرمالیزه لژاندر و w_l : ضرایب وزن فیلتر گاوسی.

فیلتر گاوسی

با توجه به اینکه خطاهای موجود در داده‌های GRACE، با افزایش درجه و مرتبه، به‌سرعت افزایش می‌یابند و استفاده مستقیم از آنها در مناطق کوچک و در کاربردهایی مثل زیر نظر گرفتن چرخه هیدرولوژیکی که به دقت بیشتری در برآورد کردن سیگنال‌های مد نظر نیاز دارد، به تولید نتایج غیرواقعی از تغییرات کلی سطح آب در منطقه بررسی‌شده منجر می‌شود. به همین دلیل، ضرورت استفاده از فیلترها با هدف کاهش سهم ضرایب با درجات بیشتر در محاسبات که خود موجب کاهش خطاهای مدل و رسیدن به نتایج دقیق‌تر می‌شود، از سوی جکلی (۱۹۸۱) مطرح شد [۱۸]. ضرایب فیلتر گاوسی با یک رابطه بازگشتی از سری معادلات ۲ محاسبه می‌شود.

قزوین بین دو پیکسل 1×1 درجه قرار می‌گیرد. بنابراین، نمی‌توان دشت قزوین را در مرکز یک پیکسل از مدل GLDAS در نظر گرفت و به‌همین دلیل از این بخش از داده‌های مدل GLDAS صرف نظر شده است.

پیکسل‌هایی از ماهواره GRACE استفاده شد که استان‌های زنجان و همدان را پوشش می‌دهند. با توجه به اینکه محصول ذخیره آب مدل GLDAS برای طول جغرافیایی $0/5$ تا $359/5$ و عرض جغرافیایی $89/5$ تا $89/5$ به‌صورت 1 درجه در دسترس است و محدوده دشت



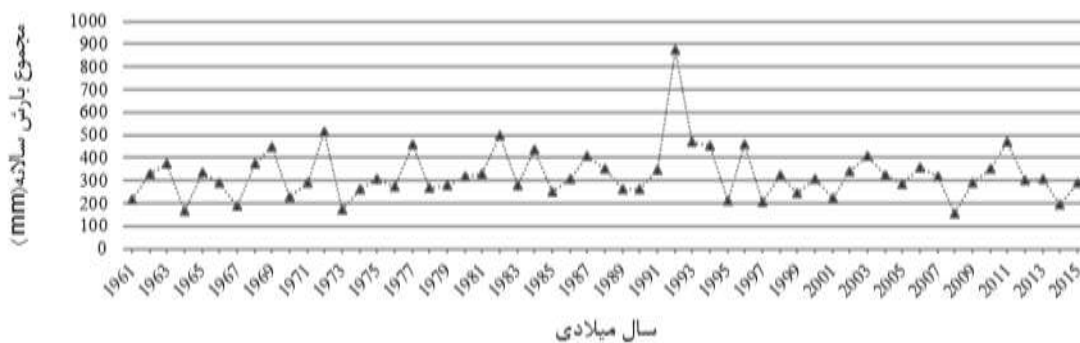
شکل ۱. موقعیت منطقه در سطح کشور و موقعیت چاه‌های مطالعه‌شده در 3 پیکسل

میانگین مقدار بارش طی سال‌های مطالعه‌شده $310/63$ میلی‌متر است. در شکل ۲ روند تغییرات مجموع بارش سالانه طی دوره سال‌های 1961 تا 2015 ، در شکل ۳ روند تغییرات مجموع بارش ماهانه در دوره مطالعه‌شده (2003 تا 2010) و در شکل‌های 5 – 7 نیز نتایج بررسی تغییرات مکانی بارش با استفاده از روش کریجینگ در سطح استان نشان داده شده است. با استفاده از نرم‌افزار SPSS مقدار همبستگی بین داده‌های بارش ماهانه مدل GLDAS و ایستگاه باران‌سنجی قزوین طی 96 ماه توسط روش پیرسون 1 بررسی شد. نتایج ضریب همبستگی $0/889$ است و همبستگی بین این دو سری داده در سطح احتمال 99 درصد معنادار است.

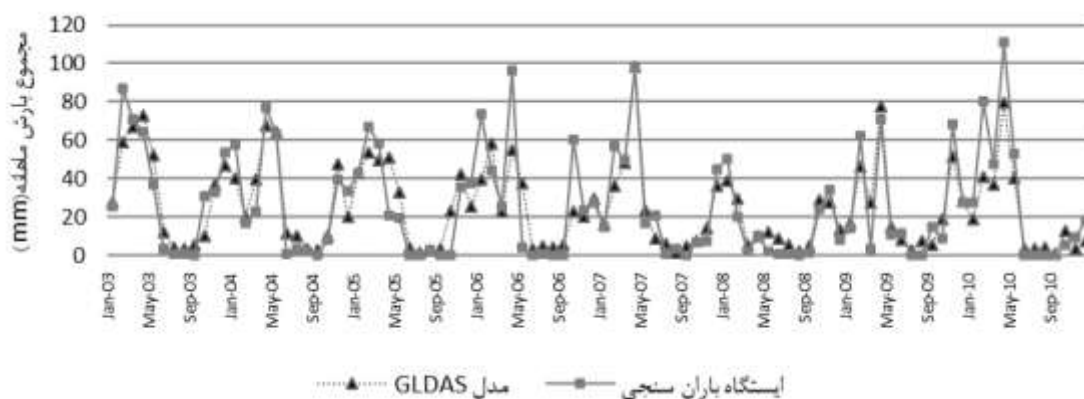
نتایج و بحث

بررسی تغییرات مکانی و زمانی بارش

با محاسبه مقدار شاخص ZSI (Z-SCORE) برای 55 سال از داده‌های بارش ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه مطالعه‌شده طی سال‌های 2003 تا 2010 ، سال‌های 2003 ، 2008 و 2010 به‌ترتیب به‌عنوان سال‌های نسبتاً مرطوب، نسبتاً خشک و نرمال انتخاب شدند. برای محاسبه شاخص ZSI از نرم‌افزار DIP استفاده شد [۱۹]. نتایج برای کل دوره 55 ساله در جدول ۲ نشان داده شده است. طی سال‌های مطالعه‌شده، سال 2003 با مقدار بارش $405/68$ میلی‌متر به‌عنوان پربارش‌ترین و سال 2008 با مقدار بارش $154/17$ میلی‌متر به‌عنوان کم‌بارش‌ترین سال ثبت شده‌اند. شایان یادآوری است که سال 2008 طی 55 سال بررسی‌شده نیز کمترین مقدار بارش را داشته است و



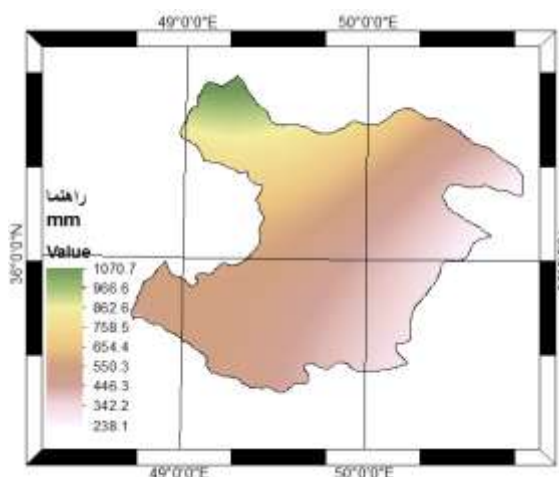
شکل ۲. روند تغییرات مجموع بارش سالانه در استان قزوین (mm)



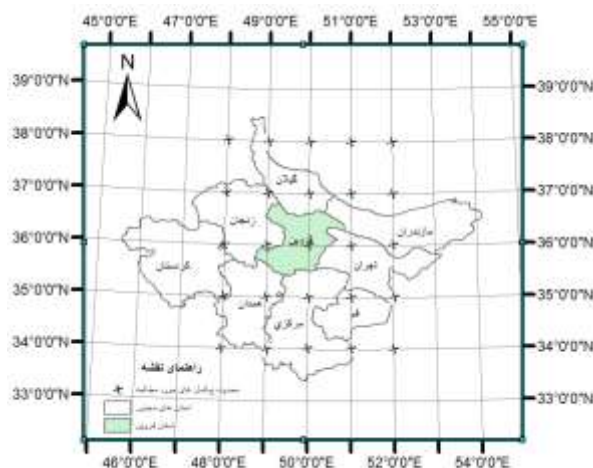
شکل ۳. روند تغییرات مجموع بارش ماهانه طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ در استان قزوین

جدول ۲. نتایج پایش خشکسالی براساس شاخص ZSI در استان قزوین

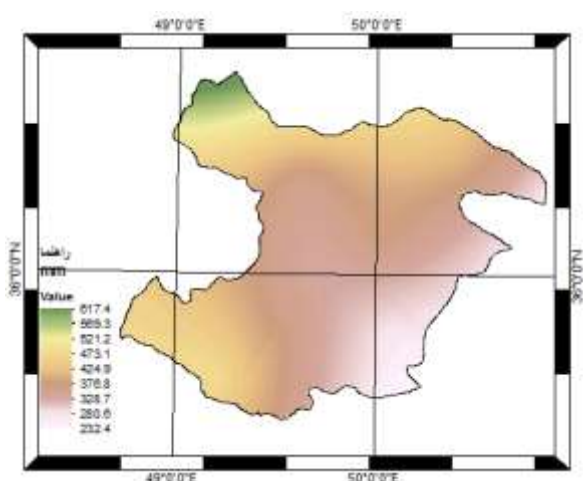
سال	۱۹۶۱	۱۹۶۲	۱۹۶۳	۱۹۶۴	۱۹۶۵	۱۹۶۶	۱۹۶۷	۱۹۶۸	۱۹۶۹	۱۹۷۰	۱۹۷۱
شدت خشکسالی	نسبتاً خشک	نزدیک نرمال	نزدیک نرمال	نسبتاً خشک	نزدیک نرمال	نزدیک نرمال	نسبتاً خشک	نزدیک نرمال	نسبتاً مرطوب	نسبتاً خشک	نزدیک نرمال
سال	۱۹۷۲	۱۹۷۳	۱۹۷۴	۱۹۷۵	۱۹۷۶	۱۹۷۷	۱۹۷۸	۱۹۷۹	۱۹۸۰	۱۹۸۱	۱۹۸۲
شدت خشکسالی	بسیار مرطوب	نسبتاً خشک	نسبتاً خشک	نزدیک نرمال	نزدیک نرمال	نسبتاً مرطوب	نزدیک نرمال	نزدیک نرمال	نزدیک نرمال	نزدیک نرمال	نسبتاً مرطوب
سال	۱۹۸۳	۱۹۸۴	۱۹۸۵	۱۹۸۶	۱۹۸۷	۱۹۸۸	۱۹۸۹	۱۹۹۰	۱۹۹۱	۱۹۹۲	۱۹۹۳
شدت خشکسالی	نزدیک نرمال	نسبتاً مرطوب	نسبتاً خشک	نزدیک نرمال	نسبتاً مرطوب	نزدیک نرمال	نسبتاً مرطوب	نسبتاً مرطوب	نسبتاً مرطوب	نسبتاً مرطوب	نسبتاً مرطوب
سال	۱۹۹۴	۱۹۹۵	۱۹۹۶	۱۹۹۷	۱۹۹۸	۱۹۹۹	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴
شدت خشکسالی	نسبتاً مرطوب	نسبتاً مرطوب	نسبتاً مرطوب	نسبتاً مرطوب	نزدیک نرمال	نسبتاً مرطوب	نزدیک نرمال	نسبتاً خشک	نزدیک نرمال	نسبتاً مرطوب	نزدیک نرمال
سال	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴	۲۰۱۵
شدت خشکسالی	نزدیک نرمال	نزدیک نرمال	نزدیک نرمال	نسبتاً خشک	نزدیک نرمال	نزدیک نرمال	نسبتاً مرطوب	نسبتاً مرطوب	نسبتاً مرطوب	نسبتاً خشک	نزدیک نرمال



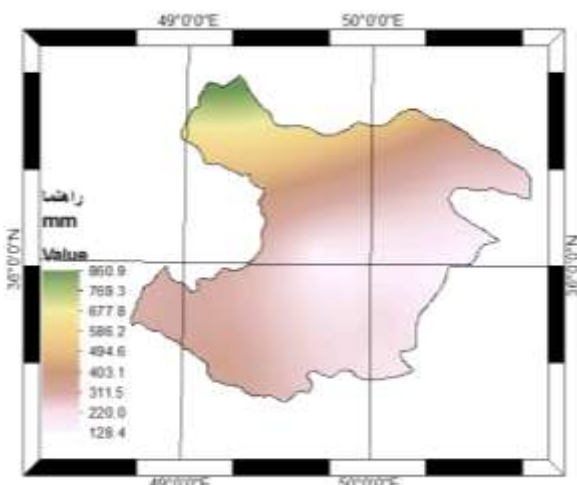
شکل ۵. تغییرات مکانی مجموع بارش سالانه مربوط به سال ۲۰۰۳ در ۱۰ ایستگاه



شکل ۴. محدوده ۱۶ پیکسل مطالعه شده



شکل ۷. تغییرات مکانی مجموع بارش سالانه مربوط به سال ۲۰۱۰ در ۱۳ ایستگاه



شکل ۶. تغییرات مکانی مجموع بارش سالانه مربوط به سال ۲۰۰۸ در ۱۲ ایستگاه

که در آنها: C_i مقدار محاسبه شده، M_i مقدار مشاهده شده، M میانگین حسابی داده‌های مشاهده شده و n تعداد داده‌هاست. در شرایطی که $RMSE$ ، MAE و MBE برابر صفر و یا نزدیک به صفر باشند نشان دهنده این است که روش استفاده شده دقت زیادی دارد و با فاصله یافتن از صفر، دقت روش مد نظر کاهش می‌یابد [۲۰]. نتایج آنالیز آماری انجام شده بر یافته‌های این پژوهش در جدول ۳ نشان داده شده است.

شاخص‌های تحلیل آماری

شاخص‌های کمی که به منظور ارزیابی نتایج استفاده شده‌اند عبارت‌اند از: ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین خطای اریبی (MBE) و میانگین مطلق خطا (MAE) که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (C_i - M)^2}{n}} \quad (۳)$$

$$MBE = \frac{\sum (C_i - M_i)}{n} \quad (۴)$$

$$MAE = \frac{\sum |C_i - M_i|}{n} \quad (۵)$$

جدول ۳. آنالیز آماری داده‌های تغییرات ذخیره آب و تغییرات سطح آب زیرزمینی بر حسب سانتی‌متر

	RMSE	MBE	MAE
تغییرات ذخیره آب (ماهانه) GLDAS-GRACE	۲/۹۴	۰/۱۸	۴/۳۲
تغییرات سطح آب زیرزمینی (فصلی) (دشت قزوین)-GRACE-چاه‌ها	۵/۵۴	۱/۵	۴/۱۶
تغییرات سطح آب زیرزمینی (فصلی) (استان زنجان)-GRACE-چاه‌ها	۳/۸۴	-۰/۴۳	۲/۲
تغییرات سطح آب زیرزمینی (فصلی) (استان زنجان و همدان)-GRACE-چاه‌ها	۳/۸۶	-۰/۹۶	۱/۷۲

ذخیره آب مدل GLDAS و ماهواره GRACE بیانگر ضریب همبستگی ۰/۲۹ و ۰/۲۱ است و همبستگی بین این دو سری داده در سطح ۹۹ درصد معنادار است. مویو و همکارانش (۲۰۱۲) در تحلیل آماری که بین داده‌های تغییرات ذخیره آب به دست آمده از ماهواره GRACE و مقدار محاسبه شده با استفاده از بیلان آب داده‌های تخیل-تغرق اصلاح شده، بارش و رواناب مدل GLDAS انجام داده‌اند، ریشه میانگین مربعات خطا بین این دو سری داده را مقدار ۲۶/۷ میلی‌متر در مقیاس ماهانه به دست آوردند.

مقایسه تغییرات مکانی تغییرات ذخیره آب GRACE و GLDAS

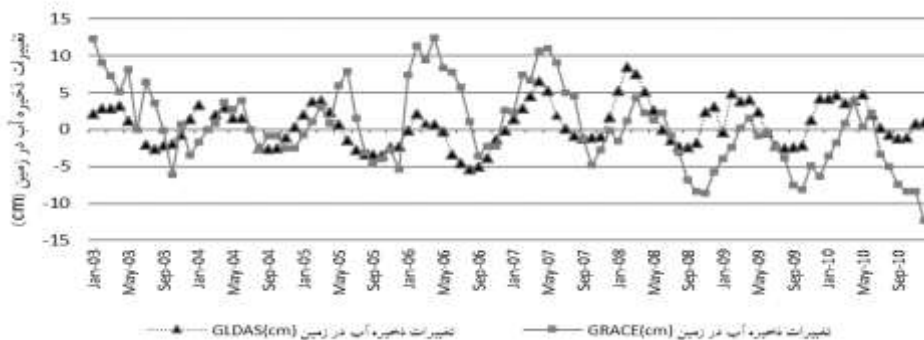
بررسی تغییرات مکانی داده‌های تغییرات ذخیره آب به دست آمده از ماهواره GRACE و مدل GLDAS می‌تواند درک بهتری از این مجموعه داده‌ها در اختیار ما قرار دهد. بدین منظور نقشه‌های تغییرات سالانه تغییرات ذخیره آب (cm) ماهواره GRACE و مدل GLDAS برای سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ با استفاده از نرم‌افزار Arc Map تولید شدند. همان طور که در شکل‌های ۹ تا ۱۴ مشاهده می‌شود در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ که براساس شاخص ZSI به ترتیب به عنوان سال‌های خشک و نرمال بررسی شده‌اند، روند تغییرات مکانی ذخیره آب ماهواره GRACE و مدل GLDAS تقریباً عکس یکدیگر است. در صورتی که در سال ۲۰۰۳ (سال نسبتاً تر) روند تغییرات مکانی تغییرات ذخیره آب ماهواره GRACE و مدل GLDAS تقریباً یکسان است. با توجه به گزارش شرکت آب منطقه‌ای استان قزوین از سال ۱۳۸۵ (۲۰۰۶ میلادی) و پس از آن، در دشت قزوین تغذیه مصنوعی انجام شده است که مقدار آن از ۳۱/۸ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۵ تا ۲۶/۲۳ میلیون مترمکعب در سال

مقایسه روند تغییرات ذخیره آب GRACE و GLDAS مدل GLDAS یکی از مدل‌هایی است که معمولاً برای مقایسه با نتایج ماهواره GRACE انتخاب می‌شود [۶، ۱۱ و ۱۳]. بنابراین، در این بخش به مقایسه نتایج میانگین تغییرات ذخیره آب ماهواره GRACE برای ۱۶ پیکسل (شکل ۴) یاد شده با نتایج به دست آمده از مدل GLDAS پرداخته شد. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود تغییرات پرپودیک سالانه به خوبی در سری زمانی مدل GLDAS و ماهواره GRACE وجود دارد. همچنین ماهواره GRACE از یک روند کاهشی تبعیت می‌کند، ولی این مورد در روند تغییرات ذخیره آب مدل GLDAS دیده نمی‌شود. با توجه به خشکسالی‌های اخیر وجود یک روند کاهشی در تغییرات ذخیره آب محتمل است. احتمالاً دلیل اصلی اینکه این روند کاهشی در مدل GLDAS مشاهده نمی‌شود، ناتوانی مدل GLDAS در برآورد شرایط واقعی موجود در سطح زمین است. در واقع محصول ذخیره آب مدل GLDAS فقط حاصل جمع محصولات رطوبت خاک، رواناب و ذخیره برف مدل GLDAS است. در تحقیقی که توسط شریفی و همکارانش در سال ۱۳۹۳ انجام شده است علت اصلی، نبود تغییرات آب‌های زیرزمینی در سیگنال‌های به دست آمده از مدل GLDAS بیان شده است. اشرفزاده و همکارانش (۲۰۱۵) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. با توجه به جدول ۳ در داده‌های GLDAS نسبت به داده‌های GRACE به مقدار ۰/۱۸ سانتی‌متر بیش برآورد مشاهده می‌شود. همچنین ریشه میانگین مربعات خطا بین این دو سری داده مقدار ۲/۹۲ سانتی‌متر در مقیاس ماهانه برآورد شده است. نتایج بررسی همبستگی به روش پیرسون و کندال^۱ بین داده‌های تغییرات

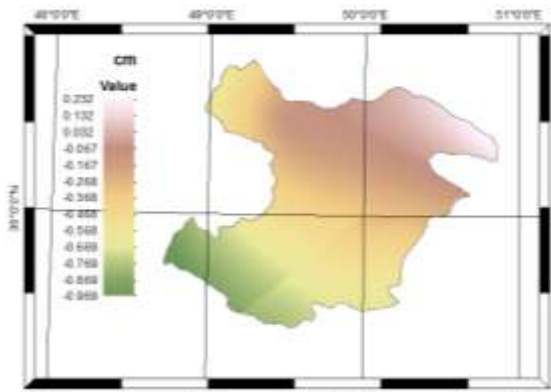
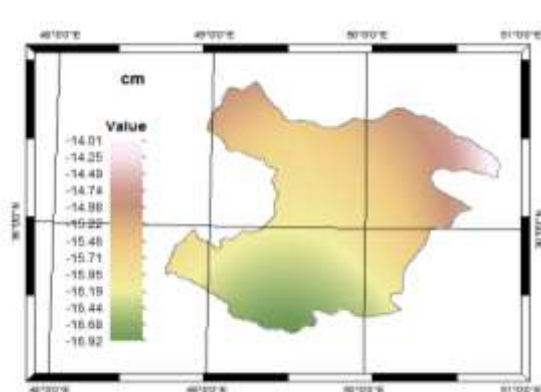
1. Kendall

تطابق نداشتن نقشه‌های سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ مدل GLDAS با ماهواره GRACE و همچنین تطابق این نقشه‌ها در سال ۲۰۰۳ قابل توجه است.

۱۳۸۹ (سال ۲۰۱۰ میلادی) متغیر بوده است. با توجه به اینکه مدل GLDAS قادر نیست آب تغذیه‌شده به زمین یا حتی آبیاری انجام‌شده را شبیه‌سازی کند [۲۱]، در نتیجه

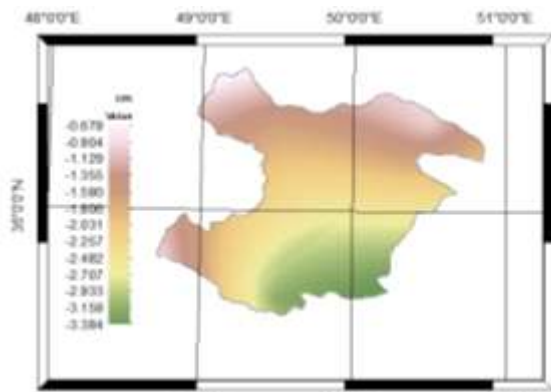
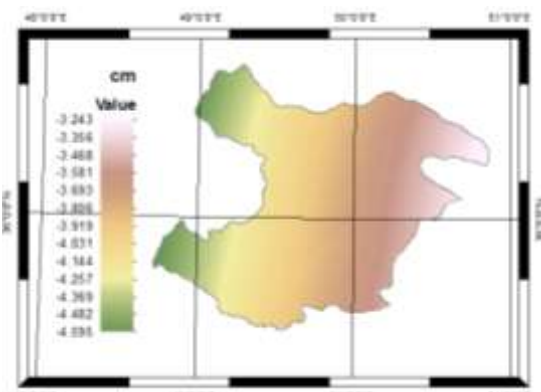


شکل ۸. مقایسه روند تغییرات ذخیره آب برآوردشده توسط ماهواره GRACE و مدل GLDAS برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ در استان قزوین



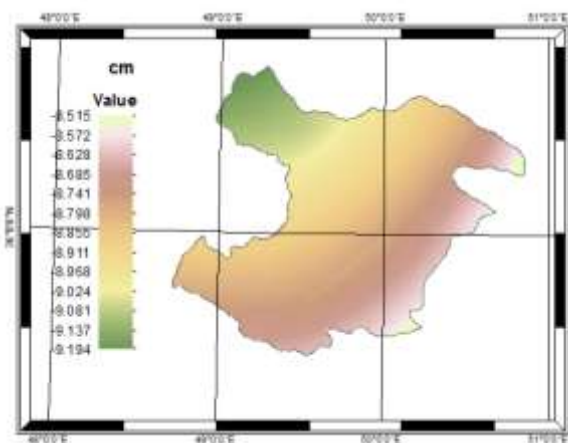
شکل ۱۰. تغییرات ذخیره آب به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE در سال ۲۰۰۳

شکل ۹. تغییرات ذخیره آب در زمین به‌دست‌آمده از مدل GLDAS در سال ۲۰۰۳

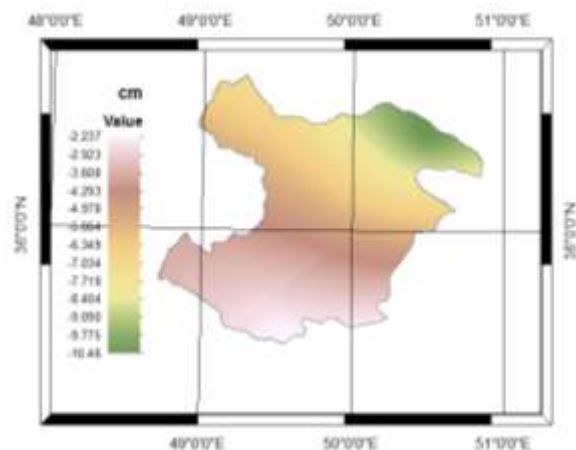


شکل ۱۲. تغییرات ذخیره آب به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE در سال ۲۰۰۸

شکل ۱۱. تغییرات ذخیره آب در زمین به‌دست‌آمده از مدل GLDAS در سال ۲۰۰۸



شکل ۱۴. تغییرات ذخیره آب حاصل از ماهواره GRACE در سال ۲۰۱۰



شکل ۱۳. تغییرات ذخیره آب در زمین حاصل از مدل GLDAS در سال ۲۰۱۰

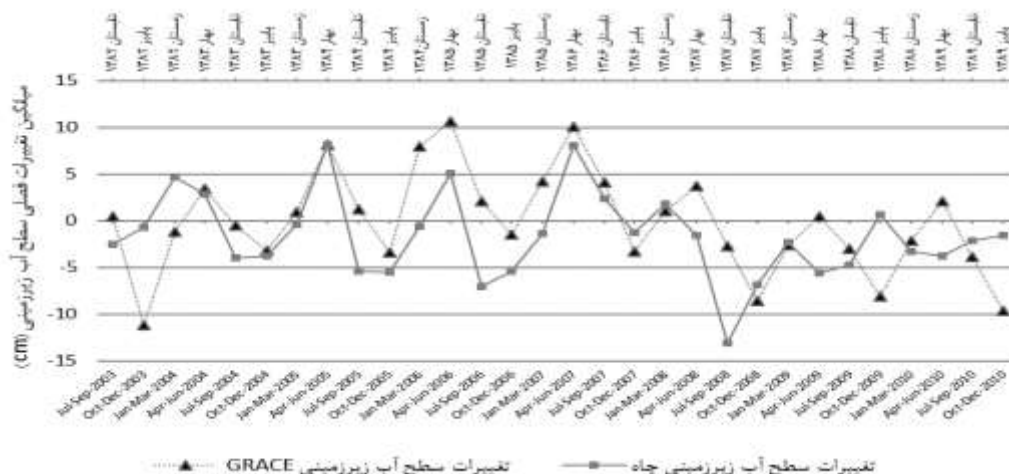
شدیدی مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه داده‌های سه‌ماهه از ماهواره GRACE برای سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ در پایگاه داده سازمان ناسا موجود نبودند، بنابراین ممکن است خطای ایجاد شده ناشی از نبود داده در این سه ماه باشد. طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ روند تغییرات داده‌های GRACE و چاه‌های مشاهداتی تقریباً مشابه یکدیگرند؛ ولی از سال ۲۰۰۸ که مصادف با دوره خشکسالی در این استان است، یک تأخیر زمانی در داده‌ها مشاهده می‌شود. ممکن است این تأخیر زمانی به علت تغذیه مصنوعی انجام شده در دشت قزوین در دوره مد نظر به وجود آمده باشد. نتایج تحلیل آماری داده‌های ماهواره GRACE و داده‌های چاه‌های مشاهداتی نشان‌دهنده $RMSE=5/54$ ، $MAE=4/16$ و $MBE=1/5$ در واحد سانتی‌متر در مقیاس فصلی است (جدول ۳). مثبت بودن مقدار MBE نشان‌دهنده بیش‌برآورد در مقدار تغییرات سطح آب زیرزمینی به دست آمده از ماهواره GRACE نسبت به داده‌های مشاهداتی است. نتایج بررسی همبستگی به روش پیرسون بین داده‌های تغییرات ذخیره آب به دست آمده از ماهواره GRACE و داده‌های مشاهداتی بیان‌کننده ضریب همبستگی $0/488$ است و همبستگی بین این دو سری داده در سطح ۹۹ درصد معنادار است. با توجه به اینکه داده کافی برای تهیه نقشه تغییرات مکانی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی در منطقه مطالعه شده موجود نبود و همچنین با توجه به این نکته که

مقایسه تغییرات سطح آب زیرزمینی به دست آمده از ماهواره GRACE و داده‌های مشاهداتی

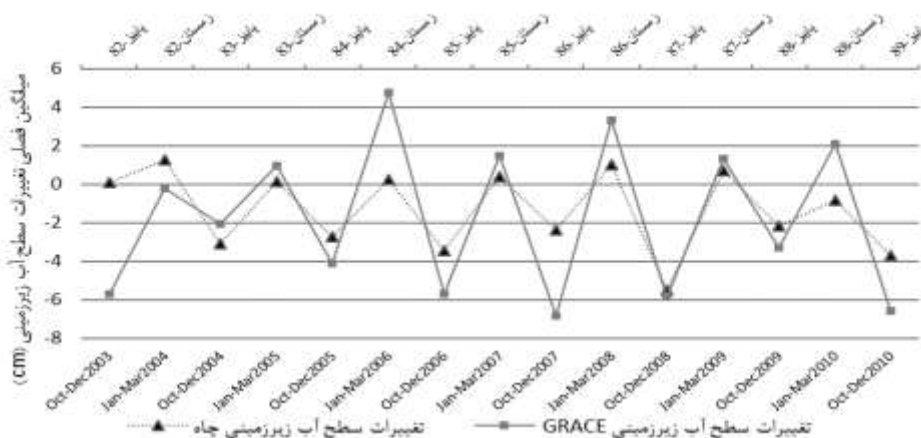
اگرچه دانش سنجش از دور به سرعت رو به رشد است، استفاده از داده‌هایی که با استفاده از روش‌های مختلف سنجش از دور به دست می‌آیند بدون مقایسه و صحت‌سنجی با داده‌های مشاهداتی قابل استفاده نخواهند بود. بنابراین، در این بخش به مقایسه روند تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی و تغییرات سطح آب زیرزمینی برآورد شده توسط ماهواره GRACE پرداخته می‌شود. با در نظر گرفتن این نکته که در ماهواره GRACE مقدار کل تغییرات ذخیره آب شامل مجموع آب زیرزمینی، رطوبت خاک، آب معادل ذوب برف و آب سطحی است، در نتیجه برای تبدیل مقدار تغییرات ذخیره آب به تغییرات سطح آب زیرزمینی نیاز به کسر مجموع مقدار رطوبت خاک، آب معادل برف و آب سطحی از مقادیر تغییرات ذخیره آب به دست آمده از ماهواره GRACE است. در این پژوهش برای محاسبه مقدار رطوبت خاک، آب معادل برف و آب سطحی از داده‌های ماهانه با قدرت تفکیک مکانی ۱ درجه مدل GLDAS استفاده شد. روند تغییرات فصلی سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهداتی و ماهواره GRACE برای دوره جولای^۱ ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۱۰ در شکل ۱۵ نشان داده شده است. طی سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ در روند تغییرات داده‌های ماهواره GRACE کاهش

GRACE، در درجه و مرتبه‌های بالا باشد. در نتیجه احتمالاً استفاده از فیلتر گاوسی به‌تنهایی برای حذف خطاهای ماهواره GRACE نیست. همان‌طور که نتایج آنالیز آماری نشان می‌دهد (جدول ۳)، ماهواره GRACE کم‌برآوردی به مقدار $-0/43$ و $-0/96$ سانتی‌متر در برآورد مقدار تغییرات سطح آب زیرزمینی نسبت به داده‌های مشاهداتی دارد. نتایج بررسی همبستگی به روش پیرسون بین داده‌های تغییرات ذخیره آب به‌دست‌آمده از مدل GLDAS و ماهواره GRACE بیان‌کننده ضریب همبستگی $0/748$ و $0/849$ به‌ترتیب برای استان‌های زنجان و همدان- زنجان است و همبستگی بین این دو سری داده در سطح ۹۹ درصد معنادار است.

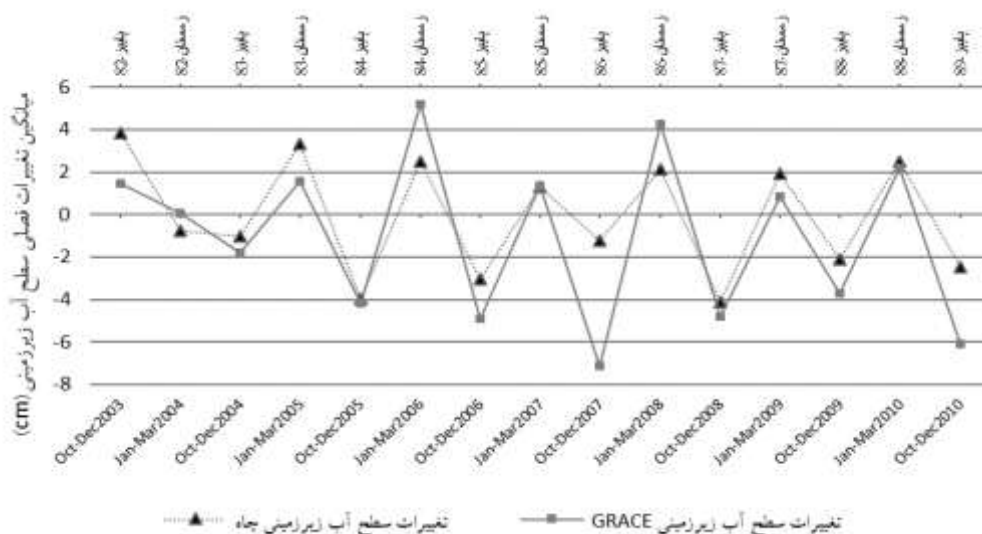
با بررسی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی فقط در یک پیکسل، دقت داده‌های ماهواره GRACE مشخص نمی‌شود. بنابراین، تغییرات سطح آب زیرزمینی GRACE و چاه‌های مشاهداتی برای دو استان هم‌مرز با استان قزوین در مقیاس فصلی (پاییز و زمستان) بررسی شد که نتایج آن در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مشاهده می‌شود. در هر دو شکل روند تغییرات پرودیوک سطح آب زیرزمینی و افزایش سطح آب در فصل زمستان نسبت به پاییز کاملاً مشهود است. در هر دو نمودار روند تغییرات سطح آب زیرزمینی یکسان است با این تفاوت که ماهواره GRACE روند این تغییرات را شدیدتر نشان می‌دهد. ممکن است تغییرات شدیدی که در روند تغییرات ماهواره GRACE مشاهده می‌شود به‌دلیل خطاهای موجود در داده‌های



شکل ۱۵. روند میانگین تغییرات فصلی سطح آب زیرزمینی (cm) در دشت قزوین



شکل ۱۶. روند میانگین تغییرات فصلی (پاییز و زمستان) سطح آب زیرزمینی (cm) در استان زنجان



شکل ۱۷. روند میانگین تغییرات فصلی سطح آب زیرزمینی (cm) در استان زنجان و همدان

(GRACE) and an empirical climate model. *Water Resources Research*. 2011b; 47: W07521. DOI: 10.1029/2010WR010157

- [2].Moiwo JP, Yang Y, Li H, Han S, Hu Y. Comparison of GRACEwith in situ hydrological measurement data shows storage depletion inHai River basin, Northern China. *Water SA*. 2009 ;35: 663–670
- [3].Sean Swenson, Pat J.-F. Yeh, John Wahr, and James Famiglietti. A comparison of terrestrial water storage variations from GRACE with in situ measurements from Illinois". *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*.2006; VOL. 33, L16401, doi: 10.1029/2006GL026962.
- [4].Wahr J, Swenson SC, Zlotnicki V, Velicogna I. 2004. Time-variable gravity from GRACE: first results. *Geophysical Research Letters* 31:L11501. DOI: 10.1029/2004GL019779
- [5].Rodell M, Houser P. R, Jambor U, Gottschalck J, Mitchell K,Meng C,et al. The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*.2004;85(3): 381-394.
- [6].Chen JL, Wilson CR, Tapley BD, Yang ZL, Niu GY. drought event in the Amazon River basin as measured by GRACE and estimated by climate models. *Journal of Geophysical Research*. 2009; 114: B05404. DOI: 10.1029/2008JB006056
- [7].Lemoine J-M, Bruinsma S, Loyer S, Biancale R, Marty J-C, Perosanz F, Balmino G. Temporal gravity field models inferred from GRACE data. *Advances in Space Research*.2007; 39: 1620–1629.

نتیجه‌گیری

مقایسه روند تغییرات زمانی داده‌های تغییرات ذخیره آب به‌دست‌آمده از ماهواره GRACE و مدل GLDAS و همچنین مقایسه تغییرات مکانی آنها (شکل‌های ۹ تا ۱۴) نشان می‌دهد که ماهواره GRACE در تخمین روند تغییرات زمانی و مکانی تغییرات ذخیره آب در خاک بهتر از مدل GLDAS عمل می‌کند. نکته بسیار مهمی که در داده‌های تغییرات ذخیره آب مدل GLDAS وجود دارد، ناتوانی این مدل در شبیه‌سازی اثر تغذیه مصنوعی و آبیاری انجام‌شده روی زمین است، که این مورد ضعف مهمی برای داده‌های این مدل با ارزش محسوب می‌شود. همان‌طور که مشاهده شد، روند تغییرات سطح آب زیرزمینی به‌دست‌آمده از GRACE با روند تغییرات سطح آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای همخوانی دارد؛ ولی در داده‌های GRACE نسبت به داده‌های مشاهده‌ای در استان قزوین بیش‌برآورد و در استان‌های زنجان و همدان کمی برآورد مشاهده می‌شود. در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان‌دهنده قابلیت مناسب داده‌های ماهواره GRACE در برآورد سریع و کم‌هزینه تغییرات سطح آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطق غیرقابل دسترس است.

منابع

- [1].Moiwo JP, Yang Y, Tao F, Lu W, Han S. Water storage change in the Himalayas from the Gravity Recovery and Climate Experiment

- [8]. Zaitchik BF, Rodell M, Reichle RH. Assimilation of GRACE terrestrial water storage data into a land surface model: results for the Mississippi river basin. *Journal of Hydrometeorology*. 2008; 9: 535–548
- [9]. Ramillien G, Famiglietti JS, Wahr J. Detection of continental hydrology and glaciology signals from GRACE: a review. *Surveys in Geophysics*. 2008;29: 361–374. DOI: 10.1007/s10712-008-9048-9.
- [10]. Longuevergne L, Scanlon BR, Wilson CR. GRACE hydrological estimates for small basins: evaluating processing approaches on the High Plains Aquifer, USA. *Water Resources Research*. 2010;46: W11517. DOI: 10.1029/2009WR008564.
- [11]. Moiwo JP, Yang Y, Tao F, Lu W. Analysis of satellite-based and in situ hydro-climatic data depicts water storage depletion in North China Region. *Hydrological Processes*. 2012; DOI: 10.1002/hyp.9276
- [12]. Ferreira, V., Z. Gong, X. He, Y. Zhang. Estimating Total Discharge in the Yangtze River Basin Using Satellite-Based Observations." *Remote Sensing*. 2013; 5(7): 3415-3430.
- [13]. Lee S, Seo J, Lee SK. Validation of Terrestrial Water Storage Change Estimates Using Hydrologic Simulation. *Journal of Water Resources and Ocean Science*. 2014;3(1): 5-9.
- [14]. Chen Q, Shen Y, Chen W, Zhang X, Hsu H. An improved GRACE monthly gravity field solution by modeling the non-conservative acceleration and attitude observation errors. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2016; 90:503–523.
- [15]. Farokhnia A, Morid S. Assessment of GRACE and GLDAS capabilities for estimation of water. *Iran-Water Resources Research*. 2014;10(1):52-61. (In Persian)
- [16]. Sharifi M.A, Akhoondzadeh M, Shahrivand M, Sanatgar M. Drought monitoring in Iran by GRACE satellite data and GLDAS hydrologic model. *Proceedings of the Sixteenth Conference of Iran Geophysics*. 2014;35-39. (In Persian)
- [17]. Ashrafzade A, Judaki GH, Sharifi M. Iran's groundwater resources assessment using data from the GRACE satellite gravity survey. *Journal of Research Science and Technology Mapping*. 2015;5(4):73-84. (In Persian)
- [18]. Sharifi M.A, Najafi Alamdari, Mokhtari, E.A. A comparison of Gaussian and Wiener filters to suppress GRACE data errors. *Journal of Geophysics of IRAN*. 2011;5(4):57-73. (In Persian)
- [19]. Broghani M, Moradi H.R, Zangane M.A. Zoning and determine the best indicator of drought in Khorasan Razavi. *Geographical Studies of Arid Zones*. 2015; 5(16):70-84. (In Persian)
- [20]. Sokuti Oskooi, R. Mahdian, M. Mahmoudi, Sh. Compared the performance of some geostatistical methods to predict the spatial distribution of soil salinity, Urmia plain case study. *Journal of Research and Construction*. 2007; No. 74. (In Persian)
- [21]. Gao, Y., Long, D., Li, Z. Estimation of daily evapotranspiration from remotely sensed data under complex terrain over the upper Chao river basin in north China. *International Journal of Remote Sensing*. 2008; 29(11):3295-3315.