

ارزیابی منابع آب‌های زیرزمینی ایران با استفاده از داده‌های ماهواره ثقل سنجی GRACE

علی اشرف‌زاده‌افشار^{۱*}، غلامرضا جودکی^۲، محمدعلی شریفی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان
a.ashrafzadeh@znu.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان
gh_reza@znu.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی تهران - دانشگاه تهران
sharifi@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت مهر ۱۳۹۴، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۴)

چکیده

داده‌های Level-2 ماهواره‌های GRACE برای برآورد تغییرات ماهیانه ذخایر آب منطقه جنوب ایران طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰ مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده کاهش شدید روند ذخایر آب بر روی غرب و جنوب ایران است. با تصحیح اثر دریای خزر و خروجی مدل‌های هیدرولوژی GLDAS و CLM4 دریافتیم که بیشتر کاهش آب در طولانی‌مدت به دلیل کاهش آب‌های زیرزمینی است. برای اعتبارسنجی نتایج، با مشاهدات ماهیانه چاه‌های پی‌زومتری جنوب کشور مقایسه شد. اثرات هیدرولوژی مانند رطوبت خاک، برف، آب‌های سطحی با استفاده از مدل GLDAS از روی ذخایر آب مشاهدات GRACE حذف می‌شود. نتایج نشان‌دهنده کاهش آب زیرزمینی در حدود ۴۵ کیلومتر مکعب در هر سال می‌باشد. همچنین اثرات انسانی کاهش آب‌های زیرزمینی با حذف تغییرات طبیعی آب‌های زیرزمینی از روی مشاهدات GRACE، با استفاده از مدل CLM4 پیش‌بینی می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده این است که بعد از وقوع خشک‌سالی سال ۲۰۰۷، کاهش آب‌های زیرزمینی توسط بشر به‌طور قابل توجهی کم شده است.

واژگان کلیدی: GRACE، داده‌های Level-2، مدل GLDAS، مدل CLM4، مشاهدات چاه‌ها

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

آب‌وهوا در بیشتر منطقه خاورمیانه گرم و خشک است. کمبود آب، که مسئله جدی در این منطقه است، خشک‌سالی اخیر (سال ۲۰۰۷) نیز فشار بیشتری در محدودیت آب در این منطقه ایجاد کرده است. بر اساس گزارش بانک جهانی در سال ۲۰۰۷، حدود نیمی از کشورهای این منطقه بیشترین آب مصرفی را از بارندگی فراهم می‌کنند و ۸۵ درصد این آب برای کشاورزی استفاده می‌شود. بیابان‌زایی نیز همچنین اثرات گسترده‌ای در خاورمیانه، به‌خصوص در کشورهای ایران، عراق، سوریه و اردن دارد [۱]. گزارش‌های خبری از یک وضعیت وخیم و نابودی اکوسیستم این منطقه و مهاجرت صدها کشاورز به مراکز شهرها برای جست‌وجوی کار، خبر می‌دهد. بیابان‌زایی در سراسر این منطقه به‌خصوص در ایران، عراق، سوریه و اردن اتفاق افتاده است. نظارت بر تغییرات مکانی و زمانی سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند برای مدیریت پایدار منابع آب در این منطقه مفید باشد. به دلیل محدودیت داده‌های هیدرولوژی در این منطقه، نظارت بر سطح آب‌های زیرزمینی با روش‌های مشاهداتی سنتی بسیار سخت است [۲]. با در نظر گرفتن ایران با وسعت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومترمربع و جمعیت ۷۷ میلیون و ۸۰۰ هزار نفر که سازمان ملل متحد در سال ۲۰۱۵ اعلام کرده است و همچنین وضعیت اقلیمی خشک تا نیمه‌خشک، با متوسط بارندگی سالیانه ۲۲۰ تا ۲۴۰ میلی‌متر، کاهش بارندگی در ایران و جهان و سرانجام مسئله بروز خشک‌سالی به‌عنوان پدیده‌ای مهم، نیاز به برخورد علمی، تخصصی و انجام مداوم تحقیقات کاربردی را در زمینه مدیریت منابع آب ایجاد می‌نماید. کشور ایران از نظر وضعیت آب نسبت به متوسط‌های جهانی در شرایط بحرانی‌تری قرار داشته، به‌طوری‌که سهم ایران از کل منابع آب تجدیدشونده جهان تنها ۰٫۳۶ درصد است. در بسیاری از مناطق کشور که جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود، تأمین آب موردنیاز بخش‌های مختلف تنها از منابع آب‌های زیرزمینی امکان‌پذیر است. لذا این منابع از مهم‌ترین عوامل توسعه اقتصادی و اجتماعی در این مناطق بشمار می‌روند [۳]. آنچه باعث بروز خشک‌سالی و کم‌آبی سالانه در بخشی از مناطق کشور می‌شود را می‌توان با قرار گرفتن در کمر بند خشک زمین، عدم مهار

آب‌های سطحی، برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، وجود مناطق بیابانی و پراکنش نامناسب بارندگی، عدم استفاده صحیح از منابع آبی و تبدیل آن به سیلاب‌های فصلی منسوب داشت. بنابراین باید با مدیریت منابع موجود (به‌خصوص آب‌های سطحی) و مصرف آن، با افزایش راندمان بهره‌برداری، کاهش میزان تخریب و آلودگی، پیش‌بینی تغییرات در آینده و تدوین قوانین حفاظت آب به کاهش تأثیرات سو مختلف در آن کوشا بود. محدودیت منابع آب و توزیع فصلی نامناسب بارندگی دال بر این است که بایستی منابع آب‌های موجود سطحی و زیرزمینی را به‌خوبی شناسایی و مطالعه کرده و با برنامه‌ریزی دقیق، بهره‌برداری صحیح از آن‌ها صورت گیرد (منابع اینترنتی مأخذ).

یکی از شاخه‌هایی که می‌تواند در مطالعه منابع آب تأثیرگذار باشد، میدان ثقل زمین و مطالعه تغییرات آن است [۴]. همان‌طور که می‌دانیم، توزیع جرم، چه در اعماق چه در پوسته زمین، میدان ثقل آن را ایجاد می‌نماید. یکی از دلایل تغییرات میدان ثقل زمین با گذشت زمان، ناشی از تغییرات جرم حاصل از دگرگونی در شرایط آب و هوایی به‌صورت فصلی است که خود سبب تغییر در توزیع جرم اتمسفر، اقیانوس‌ها و دریاها در روی سطح زمین می‌شود. چنین تغییرات زمانی با پیوند کوتاه‌مدت را به تغییرات جرم در پوسته زمین نسبت می‌دهند. ماهواره‌های GRACE^۱ نسبت به تغییرات سطح آب‌ها حساسیت زیادی نشان داده و با فراهم کردن تخمینی از میدان ثقل زمین به‌صورت ماهیانه و متوسط در ابعاد چند صد کیلومتر، ارتباط میان تغییرات سطح آب‌ها و تغییرات ماهیانه میدان ثقل زمین برقرار می‌نماید [۵ و ۶]. بنابراین، از این دیدگاه، میدان ثقل زمین برابر با بخش ثابت به‌علاوه بخش دینامیک آن است [۵].

ماهواره ثقل سنجی GOCE برای تعیین میدان ثقل استاتیک زمین است و برای تغییرات آن مناسب نیست، ولی از مدل‌های ترکیبی می‌توان تعیین میدان مینا در بررسی تغییرات میدان ثقل استفاده کرد.

پروژه ماهواره‌ای GRACE، یک پروژه ماهواره‌ای با همکاری مشترک بین دو کشور آلمان و آمریکا است، که از دو ماهواره مشابه و مجزا از هم تشکیل شده است و در

^۱ Gravity Recovery and Climate Experiment

مقایسه با نتایج به دست آمده از مشاهدات ماهواره‌های GRACE، ۲) استفاده از مدل هیدرولوژی GLDAS^۱ برای حذف اثرات هیدرولوژی ۳) استفاده از خروجی یک مدل جهانی آب‌های سطحی زمین در الف) حذف رطوبت خاک و دیگر سهم‌های هیدرولوژیکی (غیر از آب‌های زیرزمینی) از مقادیر ذخایر آب مشاهدات GRACE برای به دست آوردن سطح آب‌های زیرزمینی و ب) حذف تغییرات طبیعی آب‌های زیرزمینی برای به دست آوردن اثرات انسانی می‌باشد.

۲- داده‌ها، مدل‌ها و آنالیز مدل‌ها

در این مطالعه از داده ماهواره‌ای GRACE برای برآورد تغییرات ذخایر آب^۲ در منطقه جنوب ایران استفاده شده است (منظور از جنوب ایران، پایین‌تر از عرض جغرافیایی ۳۴ درجه است). برای به دست آوردن تغییرات سطح آب-های زیرزمینی، با استفاده از مدل GLDAS سهم رطوبت خاک، آب موجود در برف و رودخانه‌ها (آب‌های سطحی) برآورد شده و از ذخایر آب مشاهدات GRACE کسر می‌گردد. سهم ذخایر آب دریاچه خزر که توسط مدل سطحی زمین برآورد نشده را با استفاده از مشاهدات آلتیمتری سطح دریاچه حذف می‌کنیم و نهایتاً تغییرات سطح آب زیرزمینی به دست می‌آید. تغییرات انسانی آب‌های زیرزمینی نیز با کسر تغییرات طبیعی آب‌های زیرزمینی پیش‌بینی شده توسط مدل CLM4 از سطح آب‌های زیرزمینی محاسبه می‌شود.

۲-۱- ماهواره ثقل سنجی GRACE

در این مطالعه از ۹۹ ماه داده ماهواره‌ای GRACE (از اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰) از نسخه پنج مرکز پردازش داده CSR برای بررسی تغییرات ذخایر آب در کشور ایران استفاده می‌کنیم. داده‌های ماهواره‌های GRACE بر اساس روش سونسن و وار (۲۰۰۲ و ۲۰۰۹) به منظور تغییرات ماهیانه ذخایر آب برای منطقه ایران پردازش شدند [۱۰، ۱۱]. قبل از استفاده از ضرایب استوکس به دست آمده از ماهواره‌های GRACE، ضرایب هارمونیک درجه یک به دست آمده از مطالعه سونسن و

ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری از سطح زمین با فاصله ۲۲۰ کیلومتر از هم حرکت می‌کنند. با تغییر میدان ثقل محلی که ماهواره‌ها از آن عبور می‌کنند، فاصله‌های بین ماهواره‌ها تغییر کرده و با آنالیز این تغییرات فاصله، می‌توان به تغییرات میدان ثقل دست یافت [۷].

داده‌های ماهواره‌های GRACE یک ابزار جدید و ارزشمند برای نظارت بر آب‌های زیرزمینی است. ماهواره‌های GRACE در حال حاضر تنها ماهواره سنجش از دوری است که توانایی نظارت بر تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی را دارد. کاربرد اصلی ماهواره‌های GRACE، تعیین تغییرات هیدرولوژیکی با اندازه‌گیری تغییرات پیوسته آب موجود در سفره‌های آب، خاک، مخازن سطحی و برف با دقت چند میلی‌متر در ترم‌های ارتفاع آب با قدرت تفکیک ۴۰۰ کیلومتر می‌باشد [۸].

در دهه گذشته، ماهواره‌های GRACE با اقداماتی در زمینه میدان ثقل زمین، به وقوع خشکسالی شدید طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ پی بردند. در مطالعه وس و همکارانش در سال ۲۰۱۳ می‌توان تاثیر کاهش شدید آب را با استفاده از داده‌های ماهواره‌های GRACE مشاهده کرد [۹ و ۱].

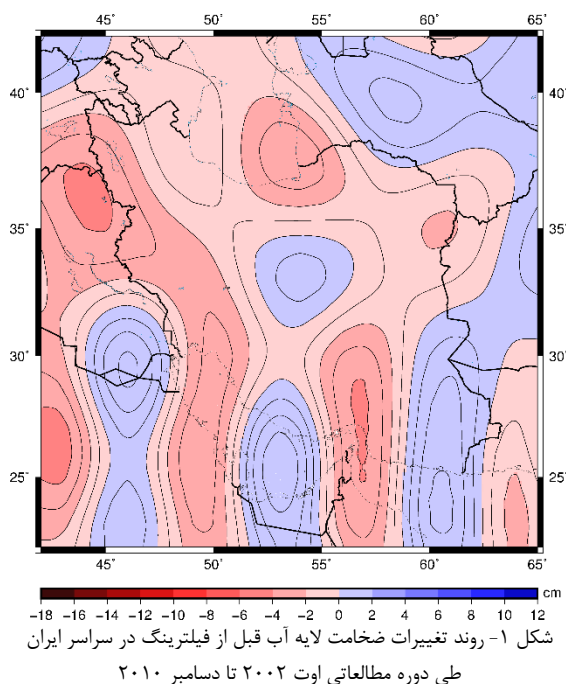
اندازه‌گیری‌های میدانی برای تولید شاخص‌های خشکسالی از دقت بالایی برخوردارند، اما تهیه این شاخص‌ها در پهنه‌های وسیع بسیار پرهزینه است. مشاهدات فضایی با قابلیت دریافت اطلاعات با قدرت تفکیک مکانی و زمانی در سطح وسیعی از زمین، امکان پایش خشکسالی‌ها را با استفاده از تکنولوژی سنجش از دور فراهم می‌نماید. با ارسال پروژه ماهواره‌ای GRACE امکان بررسی تغییرات میدان ثقل و پارامترهای هیدرولوژی موثر بر میدان ثقل در دوره‌های زمانی یک ماهه به وجود آمده است [۲].

مطالعات گذشته توانایی مشاهدات ماهیانه ماهواره‌های GRACE در پایش خشکسالی و تغییرات هیدرولوژی در مناطق مختلف جهان را نشان داده‌اند. در این مطالعه سعی شده که تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی جنوب ایران به منظور پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌های GRACE نشان داده شود. این مطالعه، ادامه مطالعه جودکی و همکاران (۲۰۱۴) و وس و همکاران (۲۰۱۳) است که شامل: ۱) استفاده از داده‌های ماهیانه چاه‌های پیژومتری برای بررسی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی و

^۱ Global Land Data Assimilation System

^۲ TWS (Total Water Storage)

میانگین وزن‌دار از کلیه مقادیر به‌دست‌آمده، گرفته شد. یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در داده‌های ماهیانه GRACE وجود نویز در ضرایب هارمونیک است که با افزایش درجه و مرتبه افزایش می‌یابند. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید، وجود این نویزها در مدل‌های ماهیانه GRACE سبب به وجود آمدن نوارهایی در راستای شمالی-جنوبی می‌شوند که علت وجود این نوارها به ساختار مدار قطبی ماهواره برمی‌گردد [۱۴]. به‌منظور کاهش اثر ضرایب درجه و مرتبه بالا از فیلترهای مختلفی استفاده می‌شود [۱۵] که در این مطالعه از فیلتر گوسین ایزوتروپیک با شعاع ۳۵۰ کیلومتر استفاده شده است. سپس به‌منظور به دست آوردن سیگنال ناشی از کاهش آب‌های زیرزمینی، مؤلفه‌های سالیانه از سری زمانی به‌دست‌آمده با استفاده از روش کمترین مربعات حذف شدند.



شکل ۲ روند تغییرات ذخایر آب مشاهدات GRACE در سراسر ایران در طول دوره اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد. نتایج با یک تابع نرم گوسین با شعاع ۳۵۰ کیلومتر نرم شده است. یک سیگنال کاهشی بزرگ روی دریاچه خزر مشاهده می‌شود. حضور سیگنال روی دریاچه خزر غیرمنتظره است. پروژه GRACE با استفاده از یک مدل جهانی اقیانوسی، قبل از محاسبه ضرایب استوکس، سهم ثقل اقیانوس‌ها و دریاها که شامل خلیج فارس و دریای عمان است را از داده‌های GRACE حذف

همکاران (۲۰۰۸) و ضریب هارمونیک زونال درجه دو^۱ برآورد شده توسط ماهواره‌های ژئودتیک SLR^۲ را جایگزین می‌کنیم. ضرایب استوکس درجه یک مربوط به موقعیت مرکز جرم زمین نسبت به سیستم مختصات اینرشیا^۳ است. از آنجایی که سیستم مختصات طوری تعریف می‌شود که همواره مرکز آن منطبق بر مرکز جرم زمین باشد، این ترم نیز در بررسی تغییرات میدان ثقل به‌دست‌آمده از ماهواره-های GRACE، صفر در نظر گرفته می‌شود. ضریب C_{20} به‌دست‌آمده از داده‌های GRACE از دقت خوبی برخوردار نیست و علت آن هندسه مدار ماهواره‌های GRACE است که نسبت به این ضریب حساسیت کمتری دارد [۱]. اثرات GIA^۴ در این منطقه خیلی کم و قابل چشم‌پوشی است [۹ و ۱۲]. GIA به دلیل ذوب یخچال‌های طبیعی حال حاضر ایجاد نشده‌اند، بلکه به دلیل عکس‌العمل زمین از چندین کیلومتر ورق‌های ضخیم یخ، که بسیاری از محدوده شمال آمریکا و اروپا را پوشانده‌اند، می‌باشد. تاثیر GIA به این صورت می‌باشد که برخی قسمت‌های زمین در حال بالا آمدن و برخی قسمت‌ها در حال پایین رفتن (مانند: کف برخی از اقیانوس‌ها) می‌باشد [۱۳]. سپس با استفاده از رابطه (۱) تغییرات ماهیانه سطح آب (EWH) قابل محاسبه است.

$$EWH(\varphi, \lambda) = \frac{a \rho_{ave}}{3 \rho_w} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{2l+1}{1+k_l} \tilde{P}_{lm}(\sin \varphi) [\Delta C_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta S_{lm} \sin(m\lambda)] \quad (1)$$

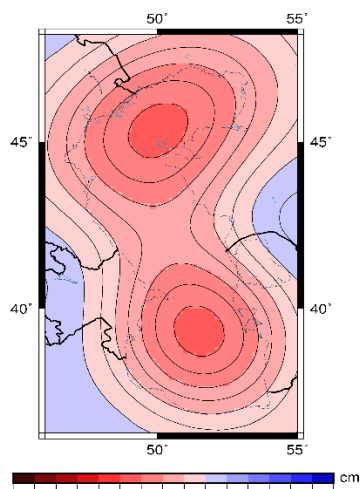
که در این رابطه $\rho_{ave} = 5517 \text{ kg/m}^3$ میانگین دانسیته زمین، $a = 6371$ شعاع کره زمین، $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ دانسیته آب، k_l عدد لاو از درجه l ، ΔC_{lm} و ΔS_{lm} تغییرات ماهیانه ضرایب هارمونیک کروی و $\tilde{P}_{lm}$ توابع نرمالیزه لژاندر است. به‌منظور برآورد تغییرات سطح آب معادل، اختلاف ضرایب مدل‌های ماهیانه ژئوپتانسیل از میانگین کل مدل‌ها محاسبه شده و با قرار دادن در معادله بالا برآورد می‌شود [۱۴]. با استفاده از این رابطه مقدار تغییرات سطح آب معادل برای تمام طول و عرض‌های جغرافیایی که در جنوب ایران قرار دارند محاسبه شد. سپس با توجه به مساحت هر پیکسل

^۱ C_{20}

^۲ Satellite Laser Ranging

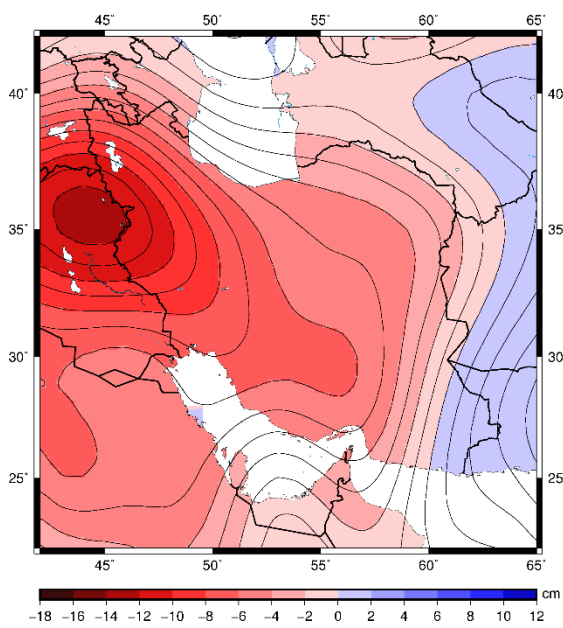
^۳ Inertial

^۴ Glacial Isostatic Adjustment



شکل ۳- روند تغییرات ذخیره آب دریاچه‌ی خزر (سانتی‌متر بر سال) طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰

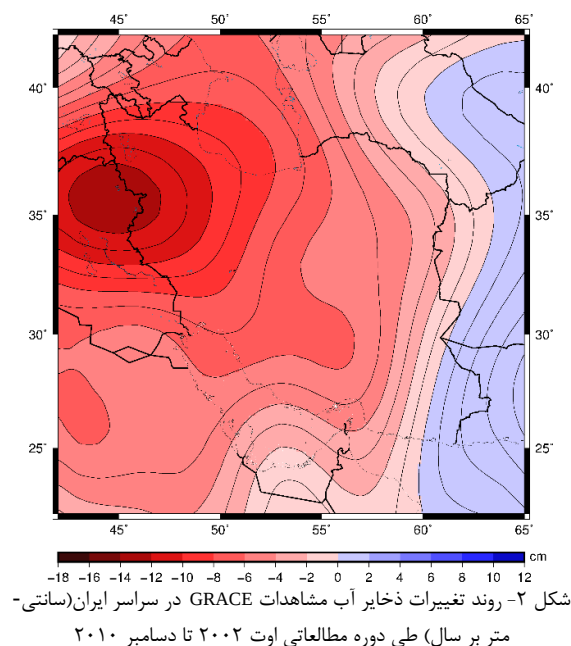
درنهایت، سیگنال‌های نمایش داده‌شده در منطقه، بعد از حذف سیگنال‌های دریاچه خزر، نشان‌دهنده تغییرات ذخایر آب مشاهدات GRACE می‌باشد. شکل ۴ همان شکل ۲ است ولی با این تفاوت که سیگنال دریاچه خزر از روی داده‌های GRACE در این منطقه حذف شده است.



شکل ۴- روند تغییرات ذخایر آب مشاهدات ماهواره GRACE در سراسر ایران طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰

مهم‌ترین ویژگی شکل ۴، پس از حذف اثر دریاچه خزر روند کاهشی روی غرب، مرکز و جنوب ایران است، که یک دلیل روشن از کاهش ذخایر آب در این منطقه است. بعد از محاسبه تغییرات ذخایر آب، که شامل آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، آب معادل برف، رطوبت خاک و غیره است، نیاز داریم که تغییرات سطح آب‌های

می‌کند ولی دریاچه خزر شامل این مدل نیست. بنابراین، برای از بین بردن سیگنال غیرواقعی دریاچه خزر از داده‌های آلتیمتری سطح آب این دریاچه استفاده می‌شود.



شکل ۲- روند تغییرات ذخایر آب مشاهدات GRACE در سراسر ایران (سانتی-متر بر سال) طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰

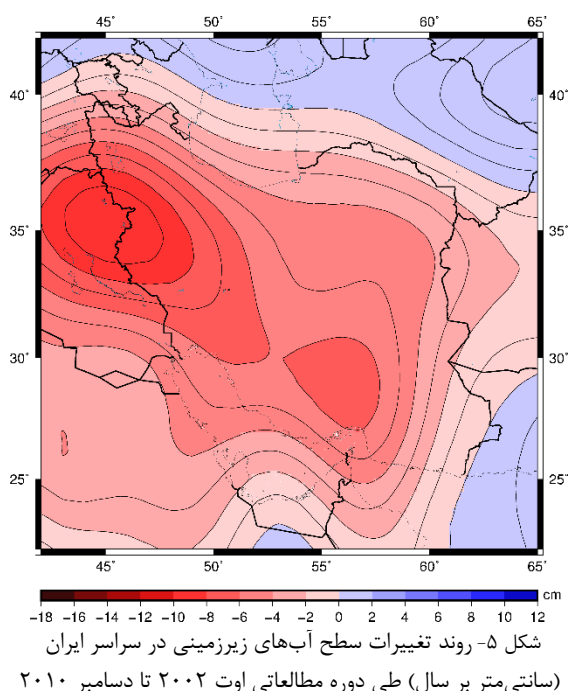
۲-۲- داده‌های آلتیمتری سطح آب

داده‌های سنجش از دوری آلتیمتری از پایگاه داده LEGOS برای محاسبه تغییرات ذخایر آب از آب سطحی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. دریاچه خزر با طول ۱۰۳۰ و عرض متغیر ۴۳۵ تا ۱۹۶ کیلومتر بزرگ‌ترین دریاچه روی کره زمین، در این منطقه مطالعاتی قرار دارد. در این مطالعه سری زمانی داده‌های آلتیمتری دریاچه خزر را از سایت USDA دریافت کردیم [۱۶]. اطلاعات ارتفاع سطح آب دیگر مخازن این منطقه، به دلیل عدم داشتن سری-های زمانی کامل در این مطالعه مناسب نبودند.

در این مرحله از کار، با استفاده از داده‌های آلتیمتری سطح آب دریاچه خزر، تغییرات ذخیره آب دریاچه خزر به دست می‌آید. ما سهم ذخیره آب دریاچه خزر، که توسط مدل برآورد نشده‌اند، را با استفاده از مشاهدات آلتیمتری سطح دریا محاسبه کردیم. سیگنال مربوط به نرخ تغییرات ذخیره آب دریای خزر در شکل ۳ نمایان است. سیگنال دریاچه خزر، با محاسبه ضرایب استوکس ناشی از یک متر افزایش یکنواخت ارتفاع آب دریاچه خزر حذف شد و مقیاس-گذاری آن ضرایب با استفاده از برآورد ماهیانه داده‌های ارتفاع سطح آب دریاچه خزر با مشاهدات آلتیمتری انجام شد.

$$G = S - SWE - SW - SM \quad (2)$$

که G سطح آب زیرزمینی، S ذخایر آب مشاهدات GRACE، SWE آب معادل برف، SW آب سطحی و SM رطوبت خاک است [۲]. شکل ۵ نشان‌دهنده تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی روی منطقه ایران در طول دوره اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰ با استفاده از همان داده‌های GRACE مورد استفاده برای شکل ۴ است.



۲-۴- مدل CLM

مدل CLM یک پروژه مشترک بین TSS^۴ و CGD^۵ در NCAR^۶ است. این مدل زمینی برای مدل کردن سیستم زمین جامع است [۱۹ و ۲۰].

ما در این مطالعه از مدل CLM4 استفاده می‌کنیم. مدل CLM4 شامل مؤلفه آب‌های زیرزمینی است، بنابراین برای جدا کردن تغییرات آب‌های زیرزمینی، این مدل رطوبت خاک، برف، آبخوان‌ها و ذخایر رودخانه‌ها را از نتایج ذخایر آب مشاهدات GRACE کسر می‌کند.

ضرایب استوکس ماهیانه به‌دست‌آمده مدل، با تبدیل خروجی مدل مشبک به هارمونیک‌های کروی، باعث تبدیل ضرایب جرم به ضرایب ثقل می‌شود. ما با ترکیب

زیرزمینی را از مشاهدات ماهواره‌های GRACE استخراج کنیم. برای این منظور، باید با استفاده از یک مدل هیدرولوژی، سهم آب‌های سطحی، آب معادل برف و رطوبت خاک را از روی تغییرات ذخایر آب حذف کنیم.

۲-۳- مدل هیدرولوژی GLDAS

سیستم تحلیل و شبیه‌سازی زمین در پوشش جهانی یا همان GLDAS، یک کار مشترک بین دانشمندان ناسا، GSFC^۱، NOAA^۲ و NCEP^۳ است [۴]. سیستم GLDAS یک مدل سازی جهانی سطح آب زمین است که از داده‌های مشاهده‌ای ماهواره‌ای و همچنین تحقیقات هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی پیشرفته آب‌وهوا استفاده می‌کند [۷]. مدل GLDAS یک مدل عددی است که داده‌های سطح آب معادل را با قدرت تفکیک زمانی و مکانی یک ماه و یک درجه تأمین می‌کند. مشکل عمده و اصلی در استفاده از چنین مدل‌های هیدرولوژی، نداشتن داده در مناطق پوشیده شده از آب است. با توجه به اینکه مدل‌های هیدرولوژی مانند مدل هیدرولوژی GLDAS فقط در مناطق خشکی مقدار دارند، لذا از این مدل در این مطالعه به‌منظور بررسی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی استفاده

می‌شود [۱۷ و ۱۸]. بعد از کسر اثرات هیدرولوژی مدل GLDAS از داده‌های ماهواره‌های GRACE، در نهایت به شکل ۶ که نشان‌دهنده تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی از مشاهدات ماهواره‌های GRACE است، خواهیم رسید. مشابه مطالب ذکر شده در رابطه سری زمانی به‌دست‌آمده از داده‌های GRACE، در مورد داده‌های GLDAS نیز فرکانس سالیانه از سری زمانی حذف‌شده‌اند.

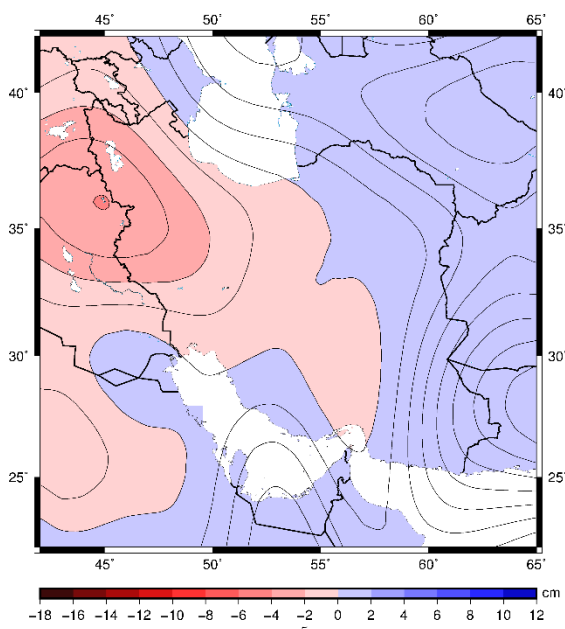
۲-۳-۱- برآورد تغییرات ذخیره آب‌های زیرزمینی

جودکی و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که مؤلفه آب-های زیرزمینی را می‌توان از ذخایر آب‌های محاسبه‌شده از داده‌های GRACE جدا کرد. این روش (رابطه ۲)، با کسر تغییرات ذخیره آب معادل برف، آب سطحی، رطوبت خاک از تغییرات ذخایر آب مشاهدات GRACE، تغییرات ماهیانه سطح آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد.

^۴ Terrestrial Sciences Section
^۵ Climate and Global Dynamics Division
^۶ National Center for Atmospheric Research

^۱ Goddard Space Flight Center
^۲ National Oceanic and Atmospheric Administration
^۳ National Centers for Environmental Prediction

آب‌های زیرزمینی باشد، زیرا وقتی خشک‌سالی در یک منطقه خشک اتفاق می‌افتد، کمبود بارندگی مورد نیاز برای کشاورزی را با افزایش استخراج آب‌های زیرزمینی تأمین می‌کند.



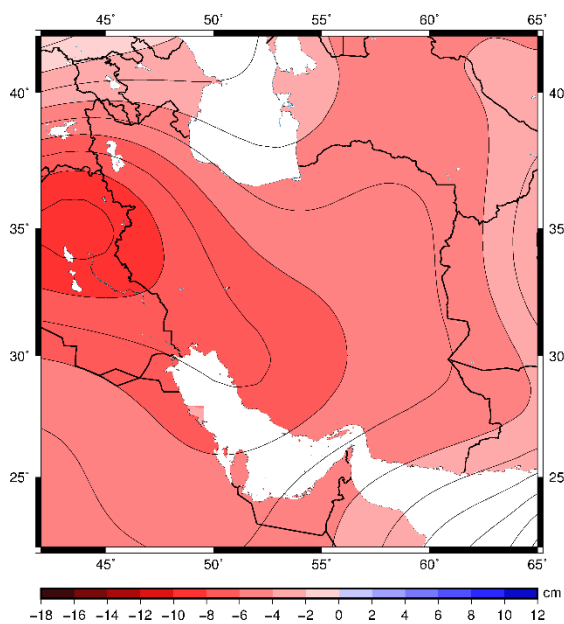
شکل ۷- روند تغییرات انسانی آب‌های زیرزمینی در سراسر ایران (سانتی‌متر بر سال) طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰

۲-۵- داده‌های آب‌های زیرزمینی

ما برآوردهای داده‌های مشاهده‌ای ماهواره‌های GRACE برای جنوب ایران را با برآوردهای آب‌های زیرزمینی به‌دست‌آمده از ۳۳۰ آبخوان از ایستگاه مشاهده چاه که برای نظارت بر سطح و کیفیت منابع آب‌های زیرزمینی در جنوب کشور است، مقایسه کردیم. مشاهدات توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران در سایت wrs.wrm.ir بایگانی شده‌اند. داده‌های بایگانی‌شده بر اساس استان‌های ایران با رزولوشن سالیانه طبقه‌بندی شده‌اند. به دلیل رزولوشن پایین این داده‌ها، برای مقایسه با مشاهدات GRACE (که دارای رزولوشن ماهیانه است) مناسب نیستند. برای این منظور از مشاهدات ماهیانه چاه‌های پیرومتری استان‌های جنوبی ایران که از شرکت مدیریت منابع آب ایران (تهران) دریافت شده‌اند، استفاده کردیم. هر چاه در مجموعه‌ای از داده‌ها، نماینده آبخوان است و هر مقدار داده ماهیانه، میانگین منطقه است که به‌عنوان تغییر زمانی آبخوان منطقه محاسبه می‌شود. شکل ۸ نحوه توزیع آبخوان چاه‌های پیرومتری جنوب ایران را

مدل GLDAS و GRACE برآورد تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی را (با کسر مؤلفه‌های ذخیره رطوبت خاک، برف، آب‌های سطحی از ذخایر آب مشاهدات GRACE) به دست آوردیم، نهایتاً ما تغییرات انسانی آب‌های زیرزمینی را با کسر نتایج مدل CLM4 از ذخایر آب مشاهدات GRACE، برآورد می‌کنیم.

ما با استفاده از مدل CLM4 تغییرات طبیعی آب‌های زیرزمینی را برای ایران محاسبه کرده و با کسر آن از ذخایر آب مشاهدات GRACE تغییرات طبیعی آب‌های زیرزمینی را تخمین زدیم. تغییر سطح آب‌های زیرزمینی شامل بسیاری از مناطق شده است. برخی از تغییرات به علت پدیده‌های طبیعی مانند خشک‌سالی و برخی دیگر به دلیل فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی است.



شکل ۶- روند تغییرات طبیعی آب‌های زیرزمینی در سراسر ایران (سانتی‌متر بر سال) طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰

با استفاده از مدل CLM4 (که توانایی جداسازی مؤلفه‌های طبیعی و انسانی تغییرات آب‌های زیرزمینی را دارد)، روند تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۱ مدل CLM4 (که سهم مدل انسانی نیست) (شکل ۶)، از روند ذخایر آب نشان داده‌شده در شکل ۵ کسر می‌شود و شکل ۷ را نتیجه می‌دهد.

شکل ۷ روند کاهشی قابل توجهی از آب‌های زیرزمینی را در ایران نشان می‌دهد. روند کاهشی سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند به دلیل روند کاهشی تغییرات انسانی

زیرزمینی است (شکل ۶)). نتایج نشان داده‌شده در شکل ۷ نشان‌دهنده تغییرات انسانی آب‌های زیرزمینی است.

توجه کنید که همه نقشه‌ها (ذخایر آب، آب‌های زیرزمینی، آب‌های زیرزمینی طبیعی و آب‌های زیرزمینی انسانی) روند کاهشی قابل توجهی را روی مرکز، جنوب و غرب ایران نشان می‌دهد. روند کاهشی در ذخایر آب (شکل ۴) و تغییرات طبیعی سطح آب‌های زیرزمینی (شکل ۶) نشانه‌ای از خشک‌سالی در این منطقه هستند.

این گفته که این روند کاهشی با یک روند منفی انسانی همراه خواهد بود، صحیح است، زیرا وقتی خشک‌سالی در یک منطقه خشک رخ می‌دهد، افزایش استخراج آب‌های زیرزمینی می‌تواند کمبود مورد نیاز بارندگی را برای بهره‌وری کشاورزی جبران کند. از سوی دیگر، ممکن است مدل‌های هیدرولوژی سطحی زمین، تغییرات غیردقیقی در برخی مؤلفه‌ها ایجاد کنند (مخصوصاً در این منطقه، در مقیاس منطقه‌ای). بنابراین، مطرح کردن دقت روند تغییرات انسانی سطح آب زیرزمینی نشان داده‌شده در شکل ۷ عاقلانه است.

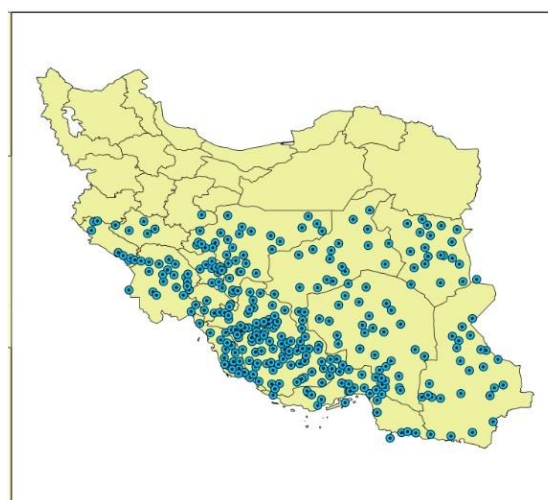
۳-۱- مقایسه ذخیره کل آب مشاهدات ماهواره-ای GRACE و مدل GLDAS

نوسانات ماهیانه ذخایر آب مشاهدات GRACE و مدل هیدرولوژی GLDAS برای منطقه مورد مطالعه مورد مقایسه قرار می‌گیرد (شکل ۹). تغییرات سطح آب معادل به‌دست‌آمده از مدل هیدرولوژی GLDAS طی دوره زمانی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰ میانگین‌گیری شده از کلیه پیکسل‌های جنوب ایران نشان داده‌شده است.

مقایسه مشاهده GRACE با مشاهدات GLDAS تغییرات طبیعی ذخیره آب را به‌خوبی نشان می‌دهد. دامنه تغییرات فصلی ذخایر آب مشاهدات GRACE بیشتر از مدل GLDAS است. مطالعات گذشته در مورد ماهواره‌های GRACE، دلیل آن را ضعف مدل ارائه‌شده از مؤلفه‌های برف، مخازن آب سطحی، عمق کامل خاک و سطح آب-های زیرزمینی می‌دانند، که دلیل اصلی عدم تولید دامنه ذخایر آب مشاهدات GRACE است. مدل شبیه‌ساز ذخیره آب سطحی زمین در مناطقی که تغییرات انسانی سطح آب زیرزمینی وجود داشته و مدیریت (در سطح معنی‌داری

نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تراکم چاه‌ها در جنوب غربی و غرب ایران بیشتر از بخش شرقی است (به دلیل وجود دشت لوت در بخش شرقی). نتایج تغییرات کاهشی آب‌های زیرزمینی GRACE نیز، به نسبت بر روی همین منطقه است.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در مجموع، سفره‌های آب زیرزمینی گزارش‌شده در داده‌ها، تمام جنوب ایران را پوشش نمی‌دهند، و میانگین تغییرات همه چاه‌های منطقه، تغییرات سطح آب زیرزمینی نخواهد شد. تنها ۱۳ درصد کل منطقه ایران توسط آبخوان‌ها پوشش داده‌شده است.



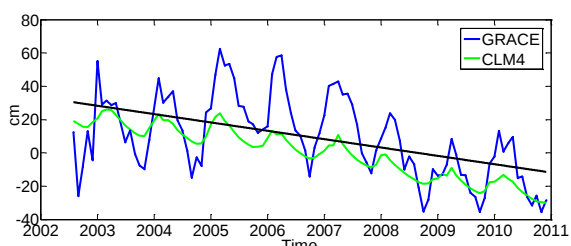
شکل ۸- نحوه توزیع آبخوان چاه‌های آب‌های زیرزمینی جنوب ایران

۳-۲ نتایج

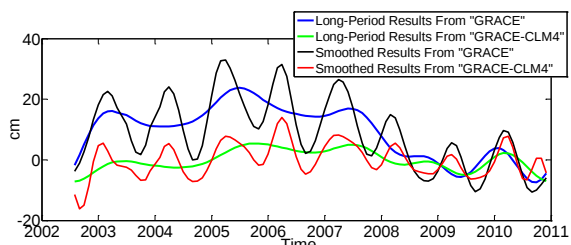
شکل ۴ نشان‌دهنده یک روند کاهشی شدید ذخایر آب مشاهدات GRACE روی مرکز، جنوب و غرب ایران است. برای جدا کردن مؤلفه آب‌های زیرزمینی، ما مدل GLDAS را از داده‌های GRACE کسر کردیم که نتایج در شکل ۵ نمایان است. این نقشه که نشان‌دهنده روند تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی است، هنوز روند کاهشی بزرگی روی مرکز، جنوب و غرب ایران نشان می‌دهد، این موضوع نشان‌دهنده این است که روند کاهشی ذخایر آب مشاهدات GRACE خیلی بیشتر از روند کاهشی مدل GLDAS است. برای جداسازی تغییرات طبیعی آب‌های زیرزمینی، ما مدل CLM4 طی دوره اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰ را از ذخایر آب مشاهدات GRACE نشان داده‌شده در شکل ۵ کسر کردیم (که اثرات طبیعی کاهش آب‌های

۳-۳- مقایسه ذخیره کل آب ماهواره GRACE و مدل CLM4

شکل ۱۱ نشان دهنده برآورد ماهواره‌های GRACE از تغییرات ذخایر آب و مدل CLM4 برای جنوب ایران است. توجه کنید که نتایج مدل GRACE و CLM4 در دوره‌های فصلی تطابق خوبی با یکدیگر دارند، و هردوی آن‌ها نشان‌دهنده کاهش شدید آب از آغاز خشک‌سالی سال ۲۰۰۷ به بعد می‌باشند. نتایج GRACE نشان‌دهنده کاهش پیوسته آب است. با توجه به شکل ۱۲ و از آنجاکه مدل CLM4 شامل مؤلفه‌های انسانی نیست، در نتیجه، کم شدن اختلاف بین مشاهدات ماهواره‌های GRACE و مدل CLM4 بعد از سال ۲۰۰۷ نشان‌دهنده کاهش برداشت انسانی آب-های زیرزمینی و وقوع خشک‌سالی است.



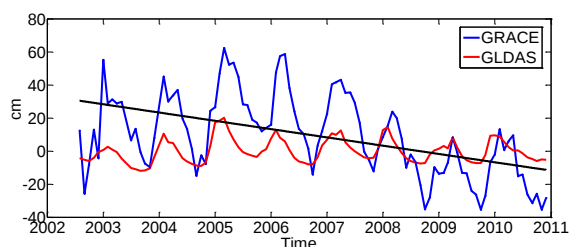
شکل ۱۱- تغییرات ماهیانه ذخایر آب مشاهدات ماهواره GRACE و آب طبیعی جنوب ایران طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰



شکل ۱۲- تغییرات ماهیانه ذخایر آب مشاهدات ماهواره GRACE و آب‌های زیرزمینی انسانی جنوب ایران طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰

شکل ۱۳ نشان‌دهنده برآوردهای تغییرات ذخایر آب برحسب سانتی‌متر بر سال برای جنوب ایران است. همان‌گونه در شکل ۱۳ نمایان است، مدل GLDAS و ترم‌های سالیانه، از روی ذخایر آب مشاهدات GRACE حذف شده‌اند. نتایج GRACE-GLDAS عمدتاً شامل دوره کوتاه‌مدت، نوسانات تصادفی، منطبق بر تغییرات بلندمدت است. نوسانات کوچک نشان‌دهنده خطاهای اندازه‌گیری GRACE و خطاهای ماهیانه در مقادیر مدل شده ذخایر آب می‌باشند. تغییرات بلندمدت بعد از نرم شدن نتایج GRACE-

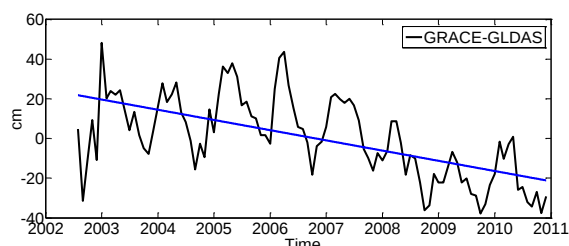
از ذخیره و استخراج آب زیرزمینی) می‌شود، به‌طور چشمگیری با مشاهدات GRACE اختلاف دارد.



شکل ۹- تغییرات ذخایر آب مدل GLDAS و ماهواره GRACE برای منطقه جنوب ایران طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰

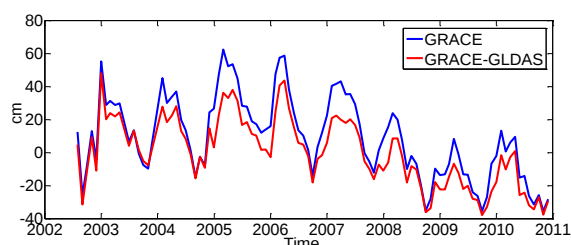
۳-۲- ذخیره کل آب زیرزمینی حاصل از کسر مدل GLDAS از مشاهدات GRACE

بر اساس رابطه ۲، تغییرات سطح آب زیرزمینی، که به‌عنوان مؤلفه باقی‌مانده بعد از کسر مؤلفه‌های آب معادل برف، آب سطحی و رطوبت خاک از تغییرات ذخایر آب مشاهدات GRACE محاسبه می‌شود. شکل ۱۰ نشان‌دهنده تغییرات ماهیانه سطح آب‌های زیرزمینی برآورد شده با این روش است. روند کاهش سطح آب‌های زیرزمینی $5/2 \pm 0/45$ سانتی‌متر بر سال، یک کاهش قابل‌توجه از تغییرات سطح آب از اوت ۲۰۰۲ تا سپتامبر ۲۰۱۲ است. این مقدار معادل $44/46 \pm 3/84$ کیلومتر مکعب کاهش حجم آب زیرزمینی در هر سال و $366/80 \pm 31/68$ کیلومتر مکعب کاهش حجم کل آب زیرزمینی در طول دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰ است. همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌کنید، روند کاهش سطح آب‌های زیرزمینی طی این دوره مطالعاتی به‌خوبی نمایان است و همزمان با خشک‌سالی سال ۲۰۰۷ است. این روند منفی تا حد زیادی اقلیمی و نشان‌دهنده خشک‌سالی منطقه‌ای است.

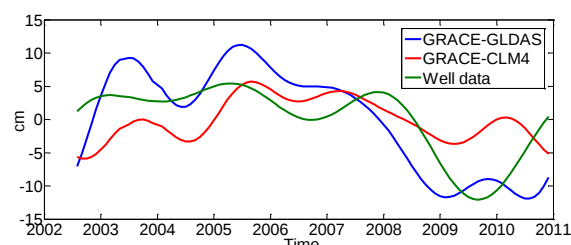


شکل ۱۰- تغییرات ماهیانه سطح آب زیرزمینی جنوب ایران طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰

GLDAS با وضوح بیشتری دیده می‌شوند (شکل ۱۴)، که نشان‌دهنده تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی است. بارزترین ویژگی این نمودار، تغییرات کاهشی ثابت سطح آب‌های زیرزمینی طی این دوره مطالعاتی است.



شکل ۱۳- تغییرات ماهیانه ذخایر آب مشاهدات GRACE و سطح آب زیرزمینی جنوب ایران طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰



شکل ۱۴- تغییرات ماهیانه سطح آب‌های زیرزمینی، آب‌های زیرزمینی انسانی و چاه‌های آب‌های زیرزمینی جنوب ایران طی دوره مطالعاتی اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰

برآورد داده‌های چاه‌های پیزومتری نیز نشان‌دهنده کاهش ثابت آب‌های زیرزمینی در طول این دوره است که روند کاهشی در حدود ۳۱/۰۴ کیلومتر مکعب بر سال دارد. روند کاهشی برآورد چاه‌ها ۳۰ درصد کمتر از نتایج GRACE-GLDAS محاسبه شده است. این تفاوت در روند ممکن است به دلیل خطا در مدل‌سازی GLDAS و یا مهم‌تر از آن، ممکن است به دلیل عدم مقیاس‌گذاری صحیح خود برای تصحیح پوشش مکانی ناکامل در نتایج آبخوان‌های گزارش شده باشد. همچنین ممکن است به دلیل عدم پوشش کامل چاه‌های پیزومتری در سراسر این منطقه باشد.

روند تغییرات انسانی سطح آب‌های زیرزمینی از اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۱ در شکل ۷ نشان داده شده است، با کم کردن برآورد ذخیره آب CLM4 (GLDAS) + آب‌های زیرزمینی طبیعی (از داده‌های GRACE بعد از حذف سهم دریاچه خزر محاسبه می‌شود). کاهش تغییرات انسانی سطح آب‌های زیرزمینی در بیشتر مناطق آشکار است، به‌خصوص منطقه مرکز، جنوب و غرب ایران که سیگنال کاهشی شدیدی روی غرب ایران (شامل استان‌های ایلام و

لرستان) و سیگنال کاهشی کوچک‌تری روی مرکز و جنوب ایران (شامل استان‌های اصفهان، یزد، کرمان، هرمزگان، کهگیلویه و بویراحمد، خوزستان و چهارمحال بختیاری) است. توجه داشته باشید که یک سیگنال افزایشی از آب‌های زیرزمینی در مرز جنوبی ایران (حوضه خلیج فارس) وجود دارد. افزایش بشر سهم مهمی در کاهش آب‌های زیرزمینی دارد. به‌عنوان مثال، افزایش استفاده از آب رودخانه‌ها برای آبیاری در مقیاس بزرگ، می‌تواند باعث افزایش آب‌های زیرزمینی شود. این شاید توضیحی برای سیگنال افزایشی در حوضه خلیج فارس باشد. درواقع، بر اساس گزارش مدیریت منابع آب ایران، روند تغییر آب در این منطقه تا ۱۵ سانتی‌متر بر سال افزایش داشته است [۲].

افزایش استفاده از آب رودخانه‌ها برای آبیاری در مقیاس بزرگ، می‌تواند باعث افزایش سطح آب‌های زیرزمینی شود. این شاید توضیحی برای سیگنال افزایشی سطح آب زیرزمینی در حوضه خلیج فارس باشد. درواقع، بر اساس گزارش مدیریت منابع آب ایران، روند تغییر آب در این منطقه تا ۱۵ سانتی‌متر بر سال افزایش داشته است [۲]. به دلیل ترکیب مدل‌های طبیعی تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی با داده‌های ماهواره‌های GRACE برای تولید شکل ۷، پیشنهاد می‌شود که در هنگام تفسیر نتایج انسانی دقت لازم را داشته باشید. منطقه جنوب ایران افزایش انسانی سطح آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد که روند این تغییرات انسانی $2/99 \pm 1/28$ کیلومتر مکعب بر سال است.

ما با استفاده از اختلاف بین مدل CLM4 و تغییرات فصلی GRACE برای پی بردن به عدم قطعیت روند CLM4 استفاده کردیم. ما ترم‌های دوره‌ای ۶ و ۱۲ ماهه را به دو سری زمانی داده‌های GRACE و آب‌های زیرزمینی CLM4 (GLDAS) + آب‌های زیرزمینی طبیعی برای استخراج یک سری زمانی متناوب فصلی از هر دو مجموعه داده، اضافه کردیم. سپس برای به دست آوردن تغییرات سالیانه باقی‌مانده، سری زمانی CLM4 را از سری زمانی GRACE کم کردیم. ما پارامتر RMS سری زمانی فصلی GRACE و RMS باقی‌مانده سری زمانی را محاسبه و سپس نسبت $R = \frac{RMS_{Residual}}{RMS_{GRACE}}$ را به دست آوردیم. ما این کار را با فرض عدم وجود هرگونه تغییر فصلی در سیگنال-

های انسانی (که از مدل CLM4 کسر شده است) انجام دادیم، به طوری که سیگنال های فصلی باقی مانده باید حذف شوند. در این مورد، R خطای اندازه گیری مؤلفه فصلی مدل CLM4 است. ما فرض می کنیم خطای نسبی روند CLM4 با همان نسبت داده شود، بنابراین عدم قطعیت روند مدل سطحی زمین برابر با $\pm R \times Trend$ می شود [۱]. چون ما برای به دست آوردن این عدم قطعیت، نتایج GRACE را با کل (GLDAS + آب های زیرزمینی طبیعی) خروجی مدل CLM4 مقایسه کردیم، این عدم قطعیت باید برای ذخیره کل مدل CLM4 در نظر گرفته شود. اما ما از این عدم قطعیت برای مؤلفه های مدل GLDAS هم استفاده می کنیم.

۴- بحث و نتیجه گیری

در جنوب ایران برای افزایش بهره برداری کشاورزی در زمان خشک سالی به طور چشمگیری از آبیاری استفاده می شود. خشک سالی های اخیر ۲۰۰۷ نیاز به مدیریت پایدار منابع آب را برجسته و نمایان می کند. زمانی که نزولات آسمانی ناکافی است، آب های سطحی ذخیره شده در رودخانه ها، دریاچه ها و مخازن آب را برای آبیاری فراهم می کنند. به هر حال، این منابع در سراسر این منطقه در دسترس نیستند و در نبود آن ها، آب های زیرزمینی را می توان مورد استفاده قرار داد که باعث کاهش سطح آب های زیرزمینی می شود. در خیلی از موارد، منابع آب های زیرزمینی غیرقابل بازگشت اند و نظارت بر نرخ استفاده کنندگان از اهداف مهم طرح به شمار می رود.

در این مطالعه، از داده های ماهواره ثقلسنجی GRACE برای نظارت بر تغییرات ماهیانه کل آب ها (آب-های زیرزمینی، رطوبت خاک، آب های سطحی و برف) در سراسر جنوب ایران استفاده می شود. نتایج از اوت ۲۰۰۲ تا دسامبر ۲۰۱۰ نشان دهنده یک روند منفی ذخیره کل آب زیرزمینی متمرکز روی جنوب و غرب ایران است (کاهش حجم کل آب زیرزمینی حدود ۳۶۷ کیلومتر مکعب در ۸ سال دوره مطالعاتی). این کاهش شدید زنگ خطری برای جنوب ایران است که قبلاً کمبود آب داشت. این موضوع در گذشته توسط ووس و همکاران در سال ۲۰۱۳ و همچنین جودکی و همکاران در سال ۲۰۱۴ برای منطقه خاورمیانه با استفاده از داده های GRACE به ترتیب

از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ و ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ اشاره شده بود. بعد از حذف سهم آب دریاچه خزر با استفاده از داده های آلتیمتری و همچنین کم کردن تغییرات رطوبت خاک، آب معادل برف و آب های سطحی با مدل GLDAS، تغییرات کل آب های زیرزمینی پیش بینی می شود. نهایتاً با کم کردن اثرات طبیعی کاهش آب های زیرزمینی با مدل CLM4، دریافتیم که اکثر کاهش آب زیرسطحی در درازمدت به دلیل کاهش ذخیره آب های زیرزمینی است. با توجه به آنالیزهای موجود دریافتیم که اکثر کاهش آب-های زیرزمینی بعد از خشک سالی سال ۲۰۰۷ است.

با توجه به مطالعات گذشته، تمرکز کاهش آب های زیرزمینی در منطقه خاورمیانه بر روی کشور ایران است و کشور ایران کاهش هنگفتی از حجم آب های زیرزمینی را در این دوره مطالعاتی تجربه کرده است [۸]. تجزیه و تحلیل داده های چاه های پیژومتری جنوب ایران، کاهش قابل توجه آب های زیرزمینی را تأیید می کند و همخوانی خود را با داده های ماهواره ای نشان می دهد. فرونشست زمین در استان های کرمان، اصفهان، یزد، خراسان جنوبی و غیره به دلیل کم شدن آب زیرزمینی، سند معتبری برای این موضوع است. ما از داده های ماهیانه تمام چاه های پیژومتری جنوب ایران، که از سازمان مدیریت منابع آب تهران تهیه شده بود، برای نمونه برداری مکانی استفاده کردیم که نتایج کاهش آب های زیرزمینی داده های پیژومتری تقریباً ۳۰ درصد کمتر از نتایج کاهش کل آب های زیرزمینی ماهواره GRACE در این منطقه محاسبه شد.

این برآورد نشان دهنده ترکیبی از تغییرات طبیعی آب و هوا مانند خشک سالی و فعالیت های بشری است. از آنجاکه مدل CLM4 قادر به برآورد روند تغییرات آب های زیرزمینی طبیعی است، با کسر این اثرات طبیعی از کل تغییرات آب های زیرزمینی، روند تغییرات آب های زیرزمینی انسانی برآورد می شود [۸]. با توجه به این که اطمینان نسبی در سری های زمانی باقی مانده بالاتر است، نتایج نشان دهنده کاهش قابل توجه آب های زیرزمینی انسانی در غرب و جنوب ایران در طول دوره مطالعاتی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ وجود دارد که عمده این کاهش در سال ۲۰۰۷ رخ داده است. سطح آب های زیرزمینی در ایران به نظر نمی رسد به سطح قبل از ۲۰۰۷ برگردد، زیرا ایران در منطقه خشک و نیمه خشک واقع شده و به دلیل داشتن بارش سالیانه کم در این منطقه، جبران این میزان آب

از این موضوع این است که خشک‌سالی بعدی در این منطقه، منجر به کاهش بیشتر آب‌های زیرزمینی خواهد شد.

زیرزمینی در این منطقه غیرممکن است. نتایج، همچنین نشان می‌دهد که نرخ کاهش آب‌های زیرزمینی طبیعی بیشتر از آب‌های زیرزمینی انسانی است و این نشان‌دهنده اثرات شدید خشک‌سالی در این منطقه است. پیش‌بینی ما

مراجع

- [1] Gert Mulder. (2013) "Observing groundwater depletion in Northern Iraq from space (A comparative study between catchment hydrology and the GRACE satellite mission)", Delft University of Technology.
- [2] Joodaki G. (2014) "Earth Mass Change Tracking Using GRACE Satellite Gravity Data", Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- [3] Wahr J., Swenson S., Zlotnicki V. and Velicogana I. (2004) "Time-variable gravity from GRACE: First results". *Geophys. Res. Lett.*, 31, L11501, doi: 10.1029/2004GL019779.
- [4] Sean Swenson, Pat J.-F. Yeh, John Wahr, and James Famiglietti. (2006) "A comparison of terrestrial water storage variations from GRACE with in situ measurements from Illinois". *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 33, L16401, doi: 10.1029/2006GL026962.
- [5] Joodaki G., J. Wahr, and S. Swenson (2014). "estimating the Human Contribution to Groundwater Depletion in the Middle East, from GRACE Data, Land Surface Models, and Well Observations", *Water Resources Research*, 50, 2679-2692, doi:10.1002/2013WR014633.
- [6] Voss, K. A., J. S. Famiglietti, M. Lo, C. de Linage, M. Rodell, and S. C. Swenson. (2013) "Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region", *Water Resource Research*, 49, doi:10.1002/wrcr.20078.
- [7] Swenson, S., and J. Wahr (2002) "Methods for inferring regional surface mass anomalies from GRACE measurements of time-variable gravity", *J. Geophys. Res.*, 107(B9), 2193, doi: 10.1029/2001JB000576.
- [8] Swenson, S. C., and J. Wahr (2009) "Monitoring the water balance of Lake Victoria, East Africa", from space, *J. Hydrol.*, 370(1-4), 163-176, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.03.008.
- [9] Swenson, S.; Chambers, D. & Wahr, J. (2008) Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output *J. Geophys. Res.*, 113, 8410.
- [10] Volker Klemann, "Glacial Isostatic Adjustment (GIA)", 29 July 2011. URL: <http://www.gfz-potsdam.de/en/research/organizationalunits/departments/departments-1/earth-system-modelling/topics/ice-sheet-and-solid-earth-dynamics/glacial-isostatic-adjustment-gia/>.
- [11] E. Forootan, R. Rietbroek, J. Kusche, M.A. Sharifi, J.L. Awange, M. Schmidt, P. Omondi, J. Famiglietti (2014) "Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE, altimetry and hydrological data", *Remote Sensing of Environment*, 580-595, 140, Doi: 10.1016/j.rse.2013.09.025.
- [12] Rodell, M., J. S. Famiglietti, J. A. Devereaux, et al. (1999) "Ground-based investigation of soil moisture variability within remote sensing footprints during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment." *Water Resources Research*, 35: 1839-1851.
- [13] United States Department of Agriculture (USDA), URL: [http://www.pecad.fas.usda.gov/cropeexplorer/global_reservoir/gr_regional_chart.aspx?regionid=stans &reservoir_name=Caspian](http://www.pecad.fas.usda.gov/cropeexplorer/global_reservoir/gr_regional_chart.aspx?regionid=stans&reservoir_name=Caspian).
- [14] <http://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/GLDASdownload.php>.
- [15] Community Land Model (CLM), URL: <http://www.cesm.ucar.edu/models/clm/>.
- [16] <https://www.earthsystemgrid.org/dataset/ucar.cgd.clm4.output.html>.