

## برآورد تغییرات سالیانه آب‌های زیرزمینی در ایران به کمک مشاهدات ماهواره ثقل‌سنجی گریس

فرزام فتح‌الله زاده<sup>۱</sup>، بهزاد وثوقی<sup>۲</sup>، مهدی روفیان نایینی<sup>۳</sup>، محمود محبی<sup>۴</sup>

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>۲</sup>دانشیار، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>۳</sup>استادیار، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

<sup>۴</sup>کارشناس ارشد، معاون سازمان جغرافیایی کشور

### چکیده:

در این مطالعه، روشی برای برآورد تغییرات سالیانه آب‌های زیرزمینی در ایران ارائه شده است. این تغییرات به کمک مشاهدات ۱۱ ساله ماهواره ثقل‌سنجی گریس از بازه زمانی ۲۰۰۳ تا آوریل ۲۰۱۴ در کنار داده‌های مدل هیدرولوژی با نام سیستم تحلیل و شبیه‌سازی زمین در پوشش جهانی یا گلداس شامل رطوبت خاک، آب معادل برف و آب ذخیره شده در تاج پوشش گیاهان محاسبه می‌گردند. بدین منظور، مجموع خروجی‌های مدل هیدرولوژی پس از تبدیل به ضرائب هارمونیک کروی به کمک آنالیز هارمونیک کروی، از تغییرات مربوط به کل ذخایر آب‌های زمینی که توسط گریس بدست می‌آیند، حذف گردیده و لذا اثرات باقیمانده در مشاهدات گریس تغییرات آب‌های زیرزمینی را نشان خواهد داد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دهنده این است که بیشترین تغییرات آب‌های زیرزمینی روی کل ایران در سال ۲۰۰۵ و کمترین تغییرات آب‌های زیرزمینی در کل ایران در سال ۲۰۱۰ بدست آمده است.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌های زیرزمینی، آب معادل برف، آب ذخیره شده در تاج پوشش گیاهان، رطوبت خاک، مدل هیدرولوژی گلداس و ماهواره ثقل‌سنجی گریس



## ۱- مقدمه

آب‌ها به طور کلی در روی زمین به ترتیب نزولی بر حسب حجم منابع به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند: اقیانوس‌ها، یخ‌های قطبی، آب‌های زیرزمینی، دریاچه‌ها، رودها و رطوبت جو. از تمام آب‌های موجود در کره زمین، ۹۷ درصد در دریاها، دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها توزیع شده که میزان شوری آن‌ها بالا بوده و برای مصارف شهری قابل استفاده نیست. از ۳ درصد باقیمانده، ۲ درصد شامل یخ‌های قطبی بوده که قابل استفاده نمی‌باشد. ۱ درصد باقیمانده ذخایر آب‌های زمینی است که شامل آب ذخیره شده در خاک، برف روی زمین و آب‌های زیرزمینی می‌باشد. با توجه به گفته‌های بالا می‌توان فهمید که تنها چیزی، کمتر از یک درصد کل آب‌های دنیا شیرین و قابل استفاده می‌باشند لذا به اهمیت آب-های زیرزمینی پی می‌بریم.

کاهش ذخیره آب‌های زیرزمینی یکی از بحران‌های پیش‌روی قرن حاضر است. به طوری که تمامی ملل را بر آن داشته تا در زمینه مدیریت و حفظ این ذخایر ارزشمند اقداماتی اساسی انجام دهند. در قسمت اعظم کشور ما، به ویژه در مناطقی که آب‌های سطحی وجود ندارند و یا دائمی نیستند و یا به مقدار کم وجود دارند، آب مورد نیاز شهرها، صنایع، و روستاها و دامداری‌ها از منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود. در مناطقی نیز که بارندگی زیاد بوده و آب و هوای مرطوب دارند مانند گیلان و مازندران که آب سطحی نیز دارند و پرباران‌ترین نقاط ایران را تشکیل می‌دهند، برای رسیدن به تولید بالا در کشاورزی و جبران کمبود آب مورد نیاز، از آب زیرزمینی استفاده می‌کنند، در تمام شهرهای ایران نیز به دلیل نبود یا کمبود آب سطحی و یا به دلیل آلوده بودن آب‌های سطحی از این نوع آب برای تامین آب شرب استفاده می‌شود. بنابراین در اینجا و در کشور خود نیز به اهمیت بالای مطالعه بر روی منابع آب زیرزمینی پی می‌بریم. علاوه بر این مسائل، کشور ما به سبب قرارگیری در محدوده خشک و نیمه‌خشک، همواره با مشکل کمبود آب دست و پنجه نرم کرده است. امروزه به سبب آلودگی هوا و کاهش نزولات جوی، سطح منابع آب زیرزمینی کاهش یافته که این مشکل در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند در آینده‌ای نه چندان دور کشور را دچار بحران‌های زیست محیطی کند.

از دیرباز احداث چاه‌های پیژومتری یکی از روش‌های معمول در بررسی سطح سفره‌های زیرزمینی و آگاهی از روند تغییرات آن بوده است [۱]. متأسفانه به سبب نداشتن رزولوشن مکانی خوب، نقطه‌ای بودن اندازه‌گیری‌ها، زحمت زیاد و هزینه بالا، این روش چندان مقرون به صرفه نیست. با رشد تکنولوژی اندازه‌گیری این تغییرات به کمک داده‌های سنجش از دوری صورت گرفت. در این روش علی‌رغم اینکه رزولوشن مکانی نسبتاً خوب می‌باشد ولی تنها می‌تواند تا عمق چند سانتی‌متری زمین را مورد اندازه‌گیری قرار دهند. با پرتاب ماهواره‌های ثقل‌سنجی از جمله گریس<sup>۱</sup> دریاچه‌های به سمت مطالعه فرآیندهای هیدرولوژیکی و تخمین جریان‌های زیرزمینی باز شده است. گریس علاوه بر پوشش مکانی و زمانی مناسب و دقت قابل قبول در کنار مدل‌های هیدرولوژی می‌تواند به عنوان ابزاری جایگزین به منظور مطالعه تغییرات منابع زیرزمینی استفاده شود. این ماهواره اطلاعات بسیار مفیدی در رابطه با چرخه هیدرولوژیکی در یک منطقه خاص ارائه می‌کند. این ماهواره همچنین قابلیت ایجاد میدان‌های ثقل ماهیانه را دارا می‌باشد [۲]. تغییرات این میدان‌های ثقل ایجاد شده را می‌توان در طی یک پروسه تبدیل به تغییرات کلی آب بر روی زمین کرد. با برداشتن اثر تغییرات رطوبت خاک که همواره سهم مهمی در تغییرات آب منطقه‌ای دارد و همچنین به کمک عوامل دیگر می‌توان مقدار تغییرات باقیمانده را به تغییرات آب‌های زیرزمینی نسبت داد [۳]. با توجه به این مسئله مهم که مشاهدات زمینی رطوبت خاک بسیار گران قیمت بوده و در ایران نیز انجام نمی‌شود برای بدست آوردن این اطلاعات در ایران، از مدل-های جهانی هیدرولوژی استفاده می‌شود.

در کشور ایران مطالعات و پژوهش‌هایی در زمینه تخمین تغییرات آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر صورت گرفته است. فروتن و همکاران در سال ۲۰۱۴ تخمینی از تغییرات ذخایر آب‌ها در ایران را با استفاده از ترکیب داده‌های

<sup>1</sup>Gravity Recovery and Climate Experiment



GRACE، آلتیمتری و داده‌های هیدرولوژی بدست آوردند [۴]. همچنین آنالیزهای آنان یک کاهش جرمی با میانگین نرخ خطی ۱۵ میلی‌متر در سال برای تغییرات آب‌های زیرزمینی برای بازه ۲۰۰۵ تا مارچ ۲۰۱۱ نشان داد. جودکی و همکاران در سال ۲۰۱۴ به سهم بشر در کاهش آب‌های زیرزمینی در ایران پرداختند و نشان دادند که نصف کاهش ذخایر آب‌های زیرزمینی به دلیل عوامل بشری می‌باشد [۵]. همچنین در سال ۲۰۱۳ ووس و همکاران کاهش حدود ۹۱ کیلومتر مکعب در آب‌های زیرزمینی واقع در ایران را در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ تخمین زدند [۶].

## ۲-۱- ماهواره ثقل‌سنجی گریس و داده‌های آن

برای بررسی میدان ثقل زمین در بازه‌های زمانی متفاوت از ماهواره ثقل‌سنجی گریس استفاده می‌کنیم. گریس میدان ثقل زمین را در بازه‌های زمانی سی‌روزه در اختیار قرار می‌دهد لذا می‌توان به صورت ماهیانه به بررسی تغییرات در میدان ثقل زمین پرداخت. گریس تغییرات در میدان ثقل را بر اساس اندازه‌گیری‌های خود که بر پایه تغییرات جرم است در اختیار قرار می‌دهد [۷]. زلزله باعث تغییر شکل در لایه‌های درونی زمین می‌شود و این تغییر شکل باعث تغییر در توزیع جرم می‌شود. پروژه تعیین ثقل و آزمایشات آب و هوایی یک پروژه مشترک بین آلمان و آمریکا که شامل ناسا و مرکز فضایی آلمان (DLR) می‌شود می‌باشد. ماهواره‌های دوقلوی گریس در ۱۷ مارچ سال ۲۰۰۲ از ایستگاه پلستیک در روسیه به فضا پرتاب شدند. این دو ماهواره در ارتفاع حدود ۴۰۰ کیلومتری از سطح زمین و با فاصله اسمی ۲۲۰ کیلومتر از هم در حال حرکت می‌باشند، البته ارتفاع ماهواره در حال کاهش می‌باشد پس فواصل خالی بین خطوط پوشش زمینی از بین می‌رود [۷]. مدار این ماهواره به صورت قطبی با زاویه میل ۸۹.۵ درجه می‌باشد.

برای نمایش تغییرات جرم در قالب ضخامت لایه آب معادل بر اساس مدل‌های ماهیانه گریس ابتدا باید ضرائب هارمونیک کروی که به تغییرات جرم بسط داده می‌شوند را بر حسب ضرائب مدل ماهیانه گریس بیان کنیم. تغییرات جرم بر حسب ضخامت لایه آب معادل به صورت زیر بیان می‌شود [۸]:

$$\Delta\sigma(\varphi, \lambda) = \frac{a\rho_E}{3\rho_w} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} \bar{P}_{nm}(\cos\varphi)(\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) \quad (1)$$

که در آن  $\varphi$  و  $\lambda$  عرض و طول جغرافیایی،  $\bar{P}_{nm}$  توابع وابسته لژاندر از درجه  $n$  و مرتبه  $m$ ،  $C_{nm}$  و  $S_{nm}$  ضرائب هارمونیک کروی،  $a$  شعاع استوایی زمین،  $\rho_E$  و  $\rho_w$  به ترتیب چگالی متوسط زمین (۵۵۱۷ کیلوگرم بر متر مکعب) و چگالی میانگین آب (۱۰۲۷ کیلوگرم بر متر مکعب) و  $k_n$  اعداد لاو از نوع دوم می‌باشد.

در این مطالعه از ضرائب ماهیانه هارمونیک کروی سطح ۲ میدان جاذبه گریس مطابق با رزولوشن مکانی ۳۰۰ کیلومتر و بالاتر استفاده شده است. این ضرائب ماهیانه از آخرین ورژن داده‌های گریس یعنی release-05 در طول بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۳ تا آوریل ۲۰۱۴ از مرکز UTCSR استفاده شده است. این داده‌ها برای بازه ۱۳۲ ماهه استخراج گردیده‌اند.

## ۲-۲- مدل هیدرولوژی گلداس و داده‌های آن

مدل‌های هیدرولوژی فراوانی وجود دارند که ذخایر آب‌های زمینی را توصیف می‌کنند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مدل سیستم تحلیل و شبیه‌سازی زمین در پوشش جهانی (GLDAS<sup>۲</sup>)، مرکز پیش‌بینی اقلیم (CPC<sup>۳</sup>)، مراکز ملی برای تخمین محیطی و مطالعات اتمسفری (NCEP/NCAR<sup>۴</sup>) و مدل جهانی هیدرولوژی خلا آب (WGHM<sup>۵</sup>) اشاره

<sup>۲</sup>Global Land Data Assimilation System

<sup>۳</sup>Climate Prediction Center

<sup>۴</sup>National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research

<sup>۵</sup>WaterGAP Global Hydrology Model



کرد. اخیراً یک سری آنالیزها نشان گر آن است که مدل گلداس تغییرات هیدرولوژیکی جهانی را نسبت به بقیه مدل‌ها بهتر نمایش می‌دهد [۹]. مدل گلداس پروژه مشترک بین سازمان ملی هوانوردی و فضایی (NASA<sup>۶</sup>), برنامه ملی کمک‌های اجتماعی (NSAP<sup>۷</sup>), NOAA و مرکز پرواز فضایی گودارد (GSFC<sup>۸</sup>) است [۱۰]. این مدل ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمین‌مرجع، که بر اساس مدل‌های پیشرفته خشکی‌ها و روش‌های پیشرفته ترکیب داده‌ها ایجاد شده است، می‌باشد که به منظور تعیین وضعیت بهینه از سطح زمین می‌پردازد. آنچه این مدل هیدرولوژی را نسبت به سایر مدل‌ها متمایز می‌سازد جهانی بودن، قدرت تفکیک‌های زمانی و مکانی بالا، به‌کارگیری ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و زمین‌مرجع و ترکیب آن با روش‌های پیشرفته و دقیق به‌منظور تولید بهینه حالت سطح زمین و جریانات در حالت نزدیک به آبی و از همه مهم‌تر تطابق بالا با داده‌های ماهواره‌های ثقل‌سنجی از جمله گریس می‌باشد. همچنین این مدل غیروابسته به اتمسفر است که از جفت مشاهدات زمینی و ماهواره‌ای برای شبیه‌سازی زمین استفاده کرده است.

در این مقاله از مدل هیدرولوژی گلداس شامل مدل سطحی نوا با رزولوشن مکانی ۱ درجه در ۱ درجه و در بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۳ تا آوریل ۲۰۱۴ استفاده شده است. علت انتخاب این مدل سطحی این بود که رطوبت خاک در این مدل سطحی تا عمق ۲ متر در دسترس بود، درحالی‌که در مدل‌های دیگر اطلاعات رطوبت خاک تا عمق ۱ متری زمین در دسترس قرار داشت.

### ۳- الگوریتم تعیین تغییرات آب‌های زیرزمینی

ابتدا با مدل هیدرولوژی شروع می‌کنیم. در این تحقیق از سه نوع خروجی‌های این مدل استفاده می‌کنیم. از جمله آن‌ها رطوبت موجود در لایه ریشه‌ای خاک، آب موجود در پوشش برف، و آب موجود در تاج پوشش گیاهان است. پس به طور کلی مجموع تغییرات ذخایر آب بدست آمده از این مدل هیدرولوژی مجموع این سه پارامتر است. برای مقایسه این داده‌ها با داده‌های گریس می‌توان دو تئوری در پیش گرفت. اول اینکه داده‌های گریس را در قالب تغییرات جرم بر حسب ضخامت لایه آب معادل بیان کرده، داده‌های هیدرولوژی را نیز بر حسب ضخامت لایه آب معادل نوشته و سپس به مقایسه آن‌ها بپردازیم. راه دوم بدین صورت است که داده‌های مدل هیدرولوژی را به ضرائب هارمونیک کروی تبدیل کرده تا قابل مقایسه با ضرائب هارمونیک گریس باشند. در این تحقیق از تئوری اول استفاده نمی‌کنیم زیرا داده‌های مدل گلداس دارای طول موج کوتاه بوده ولی در داده‌های گریس به کمک فیلتر گوسین سهم طول‌موج‌های کوتاه را کاهش می‌دهیم.

این پارامترها بر حسب چگالی سطحی می‌باشند پس بایستی بر چگالی میانگین آب تقسیم شوند تا بر حسب ضخامت لایه آب معادل بشوند. برای استخراج تغییرات جرم و نیز تغییرات چگالی به دلیل این اثرات، بایستی نتایج حاصل را در قالب ضخامت لایه معادل آب در فضای گراویتی تبدیل کنیم. این تبدیل به کمک اعداد لاو صورت می‌گیرد [۸]. به عبارت دیگر سیگنال جاذبه می‌تواند در قالب اعداد لاو به نمایش درآید [۱۱]:

$$\Delta^{Gravity}(\phi, \lambda, t) = \left( \frac{1 + k_n}{2n + 1} \times \frac{3\rho_w}{a\rho_E} \right) \times \Delta^{Hydrology}(\phi, \lambda, t) \quad (2)$$

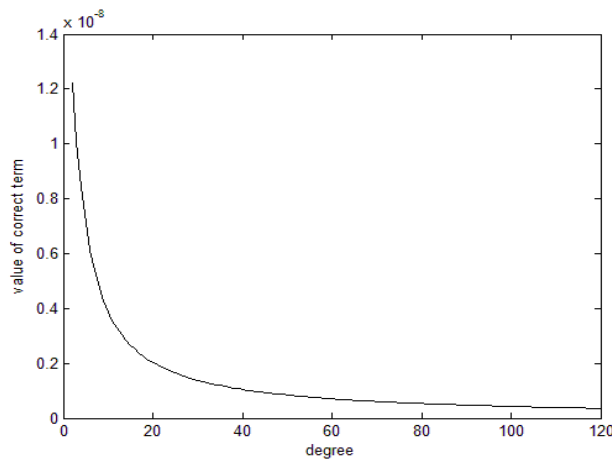
<sup>۶</sup>National Aeronautics and Space Administration

<sup>۷</sup>National Social Assistance Programme

<sup>۸</sup>Goddard Space Flight Center



$\rho_w$  چگالی متوسط آب (۱۰۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب)،  $\rho_E$  چگالی متوسط زمین (۵۵۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب)،  $a$  شعاع متوسط زمین و  $n$  درجه در بسط به هارمونیک‌های کروی است. شکل زیر رفتار اعداد لاو را که تابعی از  $n$  می‌باشد نشان می‌دهد.



شکل ۱: رفتار اعداد لاو به صورت تابعی از ضرائب هارمونیک

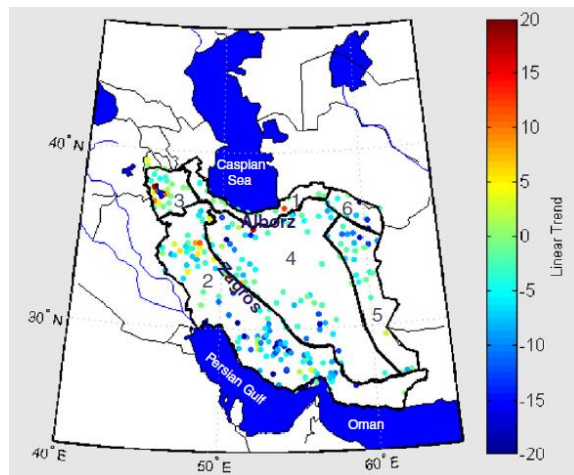
نهایتاً برای مقایسه با داده‌های گریس بایستی تغییرات جرم در فضای جاذبه به ضرائب هارمونیک کروی تبدیل بشوند. این پروسه به کمک آنالیز هارمونیک کروی در یک شبکه ۱ درجه در ۱ درجه روی مدل هیدرولوژی صورت می‌گیرد. در نهایت اگر این ضرائب بدست آمده از مدل هیدرولوژی را از ضرائب گریس کم کنیم می‌توان به تغییرات آب‌های زیرزمینی رسید. به عبارت دیگر فرمول زیر را برای دنبال کردن این هدف خواهیم داشت:

$$\Delta GW = \Delta TWS - (\Delta SM + \Delta SWE + \Delta TCW) \quad (3)$$

که در سمت چپ تساوی تغییرات آب‌های زیرزمینی قرار گرفته و در سمت راست تساوی به ترتیب از چپ به راست تغییرات کل ذخایر آب ناشی از ماهواره گریس، تغییرات رطوبت خاک، تغییرات آب معادل برف و تغییرات کل آب موجود در تاج پوشش گیاهان در مدل هیدرولوژی قرار گرفته‌اند. برای یافتن این تغییرات به صورت سالیانه پروسه بدین صورت دنبال می‌شود که ابتدا خروجی‌های لازم از مدل هیدرولوژی به صورت سالیانه با هم جمع شده سپس روی آن‌ها آنالیز هارمونیک کروی صورت گرفته تا تبدیل به ضرائب شوند. در همین حال از ضرائب گریس که به صورت ماهیانه هستند یک میانگین‌گیری سالیانه بر رویشان انجام شده تا این ضرائب نیز به صورت سالیانه بدست آیند. حال با استفاده از فرمول فوق می‌توان تغییرات ذخایر آب‌های زیرزمینی را به صورت سالیانه بدست آورد.

#### ۴- منطقه مورد مطالعه و نتایج عددی

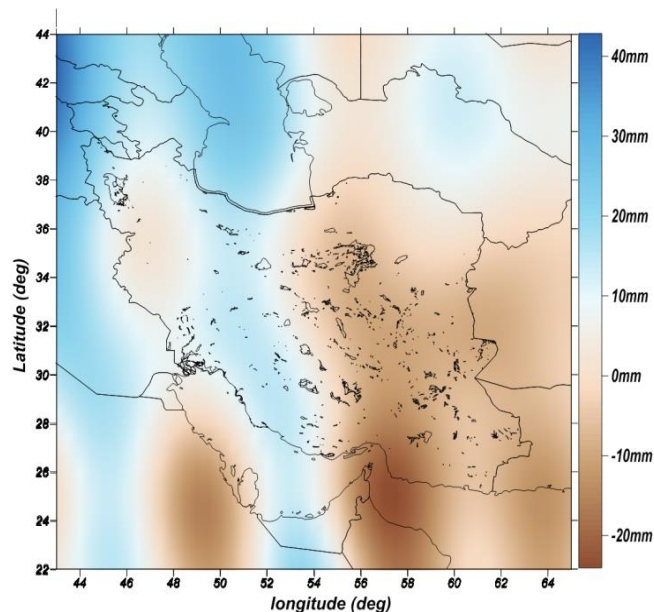
ایران با مساحتی در حدود ۱.۷ میلیون کیلومترمربع بین عرض جغرافیایی ۲۴ درجه تا ۴۰ درجه و همچنین بین طول جغرافیایی ۴۴ درجه تا ۶۴ درجه قرار گرفته است. نمای زمینی ایران به وسیله کوه‌های ناهموار و یک‌سری حوزه‌های مجزا مشخص می‌شود.



شکل ۲: نمایی از پراکندگی ایستگاه‌های آب زیرزمینی و شش حوزه مهم ایران [۴]

در ایران شش حوزه مهم وجود دارد که شامل فلات مرکزی در مرکز ایران، حوزه دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران، حوزه خلیج فارس و دریای عمان در غرب و جنوب ایران، حوزه دریاچه هامون در شرق ایران، حوزه کاراکوم در سرخس در شرق ایران و حوزه دریای خزر در شمال ایران می‌باشد. آب و هوای ایران کاملاً در نقاط مختلف آن متفاوت است. علی‌رغم اینکه در بخش شمالی ایران آب و هوای استوایی وجود دارد، در ۹۰ درصد باقیمانده آب و هوای خشک تا نیمه خشک با تابستان‌هایی گرم در مناطق مرکزی و سواحل جنوبی حاکم است.

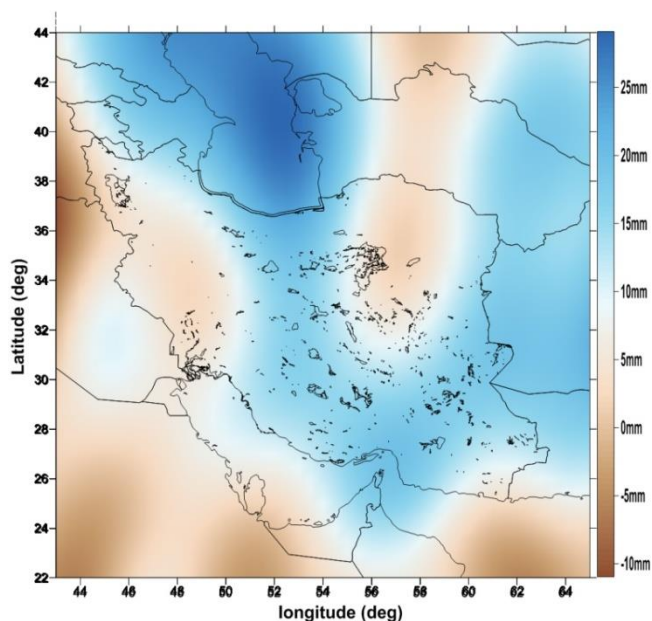
در این بخش به نتایج عددی حاصل از این پژوهش برای تخمین تغییرات آب‌های زیرزمینی در ایران می‌پردازیم. تئوری‌های مربوط به ماهواره ثقل‌سنجی گریس و مدل هیدرولوژی و همچنین داده‌های مورد استفاده در این پژوهش در بخش‌های قبل توضیح داده شد. آنالیز تغییرات آب‌های زیرزمینی در محدوده ایران در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ صورت گرفته است. خطای نواری گریس به کمک یک فیلتر گوسین با شعاع ۳۵۰ کیلومتر برطرف شده است. شکل زیر تغییرات آب‌های زیرزمینی را بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴ نشان می‌دهد.



شکل ۳: تغییرات آب‌های زیرزمینی بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴



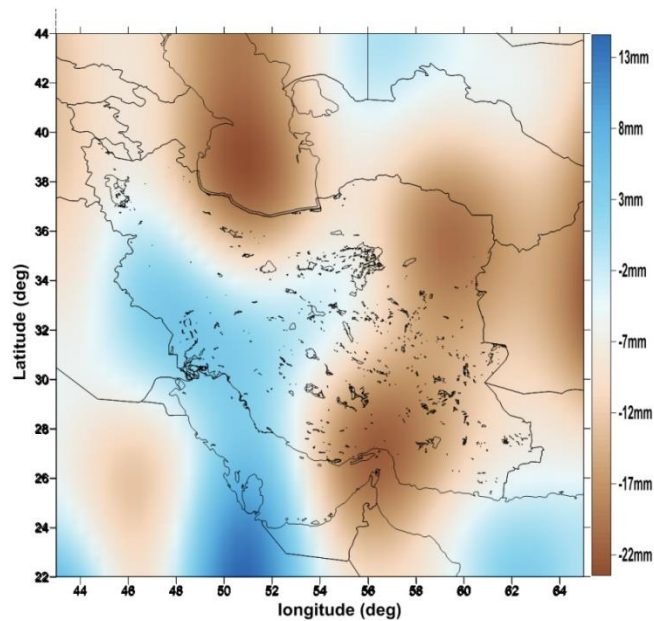
همان‌طور که از شکل مشخص است، رنگ قهوه‌ای نشان دهنده کاهش تغییرات آب‌های زیرزمینی و رنگ آبی نشان دهنده افزایش تغییرات این منبع آب می‌باشد. با توجه به شکل تقریباً در نواحی شرقی و جنوبی ایران کاهش تغییرات آب‌های زیرزمینی نسبت به مکان‌های دیگر بیشتر است. حداقل این تغییرات حدوداً برابر با ۲۰- میلی‌متر و حداکثر این تغییرات برابر با ۴۰ میلی‌متر است. با توجه به شکل کشورهای همسایه شرقی ایران شاهد کاهش تغییرات آب‌های زیرزمینی بوده‌اند. شکل زیر نمایشی از تغییرات آب‌های زیرزمینی بین سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵ است.



شکل ۴: تغییرات آب‌های زیرزمینی بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۵

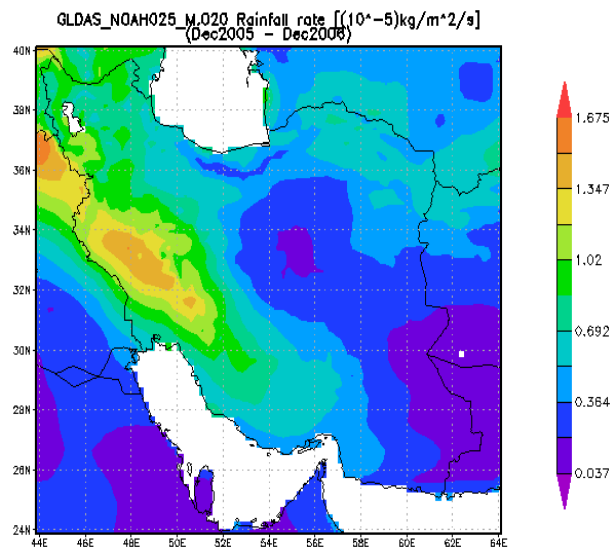
همان‌طور که از این شکل مشخص است در این سال‌ها تغییرات آب‌های زیرزمینی در نواحی مرکزی و شمالی ایران روند افزایشی را داشته است. حداکثر این تغییرات در دریای خزر و تقریباً برابر با ۲۵ میلی‌متر مشاهده شده است. همچنین کاهش شدیدی در تغییرات آب‌های زیرزمینی در کشورهای غربی همسایه ایران اتفاق افتاده است. در بین این سال‌ها در کشور ایران حداقل تغییرات آب‌های زیرزمینی برابر با ۱۰- میلی‌متر بدست آمده است. شکل زیر تغییرات آب‌های زیرزمینی را بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶ نمایش می‌دهد.





شکل ۵: تغییرات آب‌های زیرزمینی بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶

همان‌طور که در شکل فوق مشخص است در نواحی شرقی ایران و همچنین دریای خزر کاهش تغییرات آب‌های زیرزمینی اتفاق افتاده است. حداکثر این تغییرات برابر با ۱۳ میلی‌متر و حداقل این تغییرات برابر با ۲۲- میلی‌متر است. اگر بخواهیم به مقایسه‌ای بین تغییرات بوجود آمده در این سال‌ها با سال‌های اخیر بدست آمده انجام بدهیم متوجه می‌شویم که بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶ در ایران سطح آب‌های زیرزمینی به طور محسوسی کاهش یافته است. این پدیده را احتمالاً می‌توان به عواملی از جمله بارش باران اشاره کرد. با توجه به اینکه مهم‌ترین منبع آب‌های زیرزمینی در ایران بارش‌های سالیانه می‌باشد، می‌توان این نتیجه را گرفت که بین سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶ در ایران بارش باران به میزان زیادی کاهش داشته است. شکل زیر این واقعیت را نشان می‌دهد. در این شکل میزان نرخ بارش در این سال‌ها نشان داده شده است. با توجه به این شکل میزان نرخ بارش در نواحی شرقی کاهش و در نواحی غربی افزایش یافته است (در واحد کیلوگرم بر مترمربع).

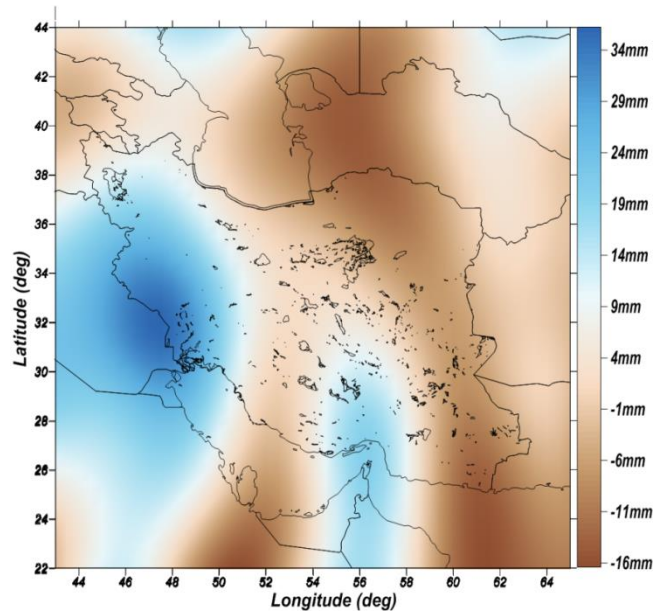


شکل ۶: نرخ ریزش باران در واحد کیلوگرم بر مترمربع بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶



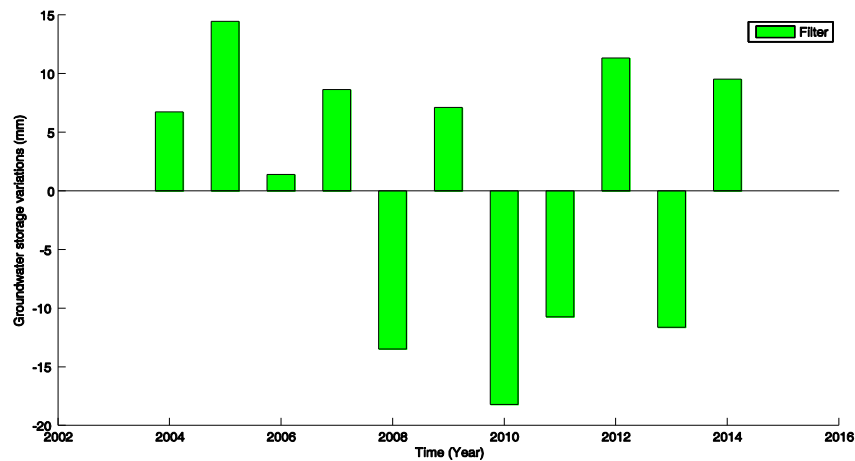


به همین ترتیب تغییرات آب‌های زیرزمینی برای سال‌های بعدی نیز بدست آمد که در اینجا به بازه زمانی آخر یعنی بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ می‌پردازیم. شکل زیر این تغییرات به معرض نمایش می‌گذارد:



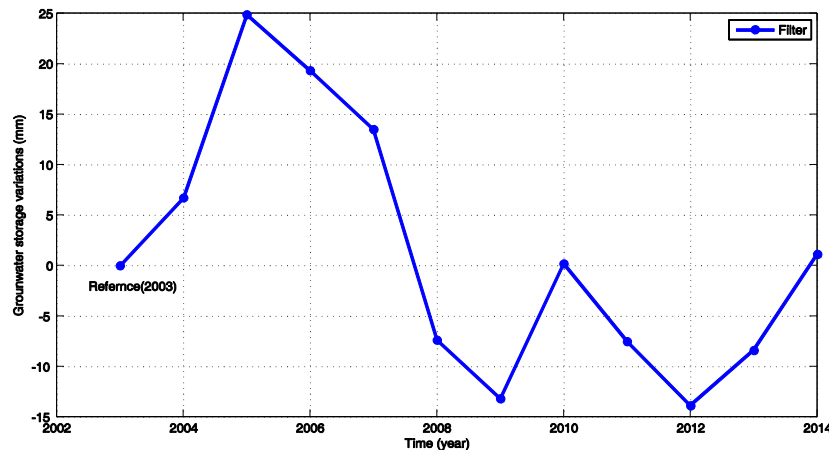
شکل ۷: تغییرات آب‌های زیرزمینی بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴

حال برای اینکه یک آنالیز کلی روی تغییرات آب‌های زیرزمینی در ایران انجام دهیم مجموع کل این تغییرات را روی گرید کل ایران بدست آورده و به صورت سالیانه از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۱۴ در یک نمودار میله‌ای محاسبه کردیم. این نمودار در شکل زیر به نمایش در آمده است.



شکل ۸: میانگین کل تغییرات آب‌های زیرزمینی سالیانه در کل ایران

همچنین برای اینکه ببینیم به طور کلی از ابتدای سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۱۴ سطح آب‌های زیرزمینی افزایش یا کاهش داشته است پروسه زیر را در نظر گرفتیم. ابتدا سال ۲۰۰۳ را به عنوان سال مرجع یا رفرنس قرار داده و تغییرات آب-های زیرزمینی در سال‌های آتی را نسبت به این سال به صورت یک سری زمانی بدست آوردیم. بدین ترتیب توانستیم به منظور فهم افزایش یا کاهش سطح تغییرات و برنامه‌ریزی برای مدیریت بهتر منابع آب، یک آنالیز دقیق انجام دهیم. سری زمانی انجام شده در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل ۹: سری زمانی تغییرات آب‌های زیرزمینی در ایران با انتخاب سال ۲۰۰۳ به عنوان مرجع

همان‌طور که از این شکل مشخص است، به‌طور میانگین سطح آب‌های زیرزمینی نسبت به سال ۲۰۰۳ به صورت سالیانه از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۵ افزایش یافته و سپس از سال ۲۰۰۷ تا سال ۲۰۱۴ کاهش یافته است. بیشترین کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ اتفاق افتاده است که این مقدار تقریباً برابر با ۱۵- میلی‌متر می‌باشد. همچنین در سال ۲۰۰۵ بیشترین مقدار افزایش تغییرات آب‌های زیرزمینی که برابر با ۲۵ میلی‌متر است اتفاق افتاده است.

##### ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

هدف از انجام این تحقیق، استفاده از ضرائب ماهیانه میدان جاذبه ماهواره ثقل‌سنجی گریس به منظور تخمین تغییرات آب‌های زیرزمینی بود. بدین‌منظور کل کشور ایران برای این مطالعه انتخاب شد. با پرتاب ماهواره‌های گراویمتری با مدار پایین از جمله ماهواره گریس از سال ۲۰۰۲ امکان تخمین میدان جاذبه زمین با دقت و رزولوشن مکانی و زمانی بالا و تعیین تغییرات آب‌های زیرزمینی فراهم شد. به کمک حذف یکسری عوامل از روی داده‌های گریس و استفاده از ابزارهای مختلف، تعیین تغییرات آب‌های زیرزمینی صورت گرفت. به‌طور کلی می‌توان به نتایج و پیشنهادهای زیر حاصل از این تحقیق پرداخت:

۱- شکل‌ها و نمودارهای حاصل از این تحقیق نشان‌دهنده این است که بیشترین تغییرات آب‌های زیرزمینی روی کل ایران در سال ۲۰۰۵ و کمترین تغییرات آب‌های زیرزمینی در کل ایران در سال ۲۰۱۰ بدست آمده است.

۲- تابع میانگین‌گیری گوسی نتایج قابل‌قبولی را برای از بین بردن خطای ضرائب بالاتر ارائه کرده و توانسته خطای نواری را در مشاهدات گریس حذف کند گرچه استفاده از تابع موجک برای محلی‌سازی سیگنال‌ها می‌تواند نیز نتایج بهتری را در تخمین تغییرات آب‌های زیرزمینی ایجاد کند.

۳- نتایج حاصل از پارامترهای محیطی از مدل‌های هیدرولوژی تطابق خوبی با نتایج حاصل از تلفیق مشاهدات با داده‌های گریس را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان از سایر مدل‌های هیدرولوژی و مقایسه آن با مدل استفاده شده در این تحقیق پرداخت. همچنین می‌توان از مدل‌ها و نقشه‌هایی که برخی پارامترهای محیطی مثل رطوبت خاک را نتیجه می‌دهد استفاده کرده و با نتایج حاصل مقایسه کرد.

۴- تغییرات آب‌های زیرزمینی متناسب با پارامترها خود از قبیل دامنه یا فصلی بودن، تاثیر متفاوتی در ضرائب هارمونیک خواهد داشت. لذا پیشنهاد می‌شود میزان تاثیر تغییرات آب‌های زیرزمینی بر روی ضرائب هارمونیک با تست



نتایج حاصل از این پژوهش مورد بررسی قرار گیرد تا مشخص شود آیا این تئوری می‌تواند متناسب با تغییرات شدید آب‌های زیرزمینی یا فصلی بودن آن‌ها مورد استفاده واقع شود یا خیر؟

۵- کم شدن آب‌های زیرزمینی می‌تواند پیامدهای زیر را به دنبال داشته باشد: پائین رفتن سطح آب زیرزمینی درآبخوان‌ها، گسترش بیابان‌زایی و خشک شدن مزارع و باغات. کاهش آبدهی قنوت و چشمه سارها، خشک شدن رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها. افت کیفیت منابع آب زیرزمینی و افزایش شوری خاک و تخریب محیط زیست. خشک شدن دشت‌ها و تشدید فرسایش اراضی و گسترش زمینه‌های تولید ریزگردها. فرونشست اراضی و از بین رفتن ظرفیت مخازن ذخیره و پالایش طبیعی آب و خسارت دیدن زمین‌های کشاورزی، تأسیسات زیربنایی، راه‌ها و... افزایش هزینه‌ها و کاهش تولیدات کشاورزی که منجر به گسترش فقر و بیکاری، بروز مشکلات و بحران‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی و همچنین مهاجرت کشاورزان به شهرها می‌گردد. از بین رفتن فرصت‌های کمی و کیفی تامین آب برای مصارف شرب و صنعت مورد نیاز جمعیت رو به افزایش و ایجاد بحران جدی در حفظ نیازهای اولیه تمدن دیرپای ملی در مناطق مختلف کشور. لذا این طرح می‌تواند هر یک از پیامدهای بالا را با مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح برآورد سازد.

## مراجع

- [1] S. Swenson, and J. Wahr. "Post processing removal of correlated errors in GRACE data". *Geophysical Research Letters* 33: L08402, 2006.
- [2] G. Feng, S. Jin, "Global water cycle and climate change signals observed by satellite gravimetry", *Geo and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE Int*, 832-835, 2012.
- [3] F. Fatolazadeh, B. [Voosoghi](#), M. Raoofian Naeeni, "Comparison of Wavelet and Gaussian filtering approaches for measurements of groundwater storage variations", *Groundwater*, 2015, DOI:10.1011/gwat.12325.
- [4] E. Forootan, R. Rietbroek, J. Kusche, M.A. Sharifi, J.L. Awange, M. Schmidt, P. Omondi, and J. Famiglietti. "Separation of large scale water storage patterns over Iran using GRACE, altimetry and hydrological data". *Remote Sensing of Environment* 140: 580-595, 2014.
- [5] G. Joodaki, J. Wahr, and S. Swenson. "Estimating the human contribution to groundwater depletion in the Middle East, from GRACE data, land surface models, and well observations". *Water Resources Research* [50, no. 3: 2679-2692](#), 2014.
- [6] K.A. Voss, J.S. Famiglietti, M.H. Lo, C.D. Linage, M. Rodell, and S.C. Swenson. Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water Resources Research* [49, no. 2: 904-914](#), 2013.
- [7] B. D. Tapley, S. Bettadpur, M. Watkins, C. Reigber, The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607, 2004.
- [8] J. Wahr, M. Molenaar, F. Bryan, Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *J. Geophys. Res.*, 103, 30,229– 32,205, 1998.
- [9] S.G.Jin, A.Hassan, G.Feng, "Assessment of terrestrial water contributions to polar motion from GRACE and hydrological models", *J. Geodynamics.*, 62, 40–48, 2012.
- [10] M. Rodell, P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C. J.Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, D. Toll, "The Global Land Data Assimilation System" *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 381-394, 2004.
- [11] D. C. Agnew, *Earth Tides*. University of California San Diego, CA, USA. 2007.