

Total Water Storage Changes in Iran's Main Basins According to the GRACE Gravimetry Mission

Moradi, A. R. 

Department of Surveying Engineering, Faculty of Geoscience Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Corresponding Author E-mail: a-moradi@araut.ac.ir

(Received: 23 Feb 2025, Revised: 1 July 2025, Accepted: 29 July 2025, Published online: 20 Sep 2025)

Summary

The GRACE gravimetry mission included two satellites measuring Earth's gravity field changes from 2002 to 2017. These changes are primarily due to variations in groundwater and surface water storage. Due to its high accuracy and extensive coverage, GRACE data enables more precise and comprehensive monitoring of water resources compared to classical hydrological monitoring methods. This mission has continued with the post-GRACE mission since 2018. The GRACE mission data has provided a 15-year snapshot of total water storage changes on global and regional scales. This long-term dataset is invaluable for understanding the dynamics of water resources, especially in regions experiencing significant water stress. The mission's data have been extensively used in research and policy-making to better manage water resources and address issues related to droughts, floods, and other water-related challenges. This study presents a comprehensive summary of these changes across the major watershed basins of Iran, including the Caspian Basin, Eastern Border Basin, Qareh Qum Basin, Central Plateau, Persian Gulf and Oman Sea Basin, and the Urmia Lake Basin, from May 2002 to September 2017. Utilizing conventional signal processing techniques, such as the Mann-Kendall test, least squares trend analysis, autocorrelation analysis, and discrete and continuous wavelet transforms, this research seeks to address the following questions: From the perspective of the GRACE mission, what patterns do long-term, short-term, and periodic trends and changes in total water storage exhibit across Iran's main basins, and how can these be linked to climatic and management parameters?

The extracted linear and nonlinear trends from the time series confirm the reduction of total water storage in all main basins of Iran and the alarming water stresses in these areas. According to the results, mean annual reductions in total water storage of 19, 4, 5, 9, 9, and 13 millimeters were observed in the Caspian Sea, Eastern Border, Qara Qum, Central Plateau, Persian Gulf and Oman Sea, and Lake Urmia basins, respectively. Alongside the intensity and variability of components derived from wavelet transforms, these findings demonstrate that climate change and water resource management have significantly impacted water storage trends across Iran's main basins. The annual components of water storage changes in the basins are recognized as the most important part extracted from the time series of water resource changes in these regions. These components reveal noticeable variation in the intensity of the annual component in drier basins, indicating the significant impact of seasonal variation on water availability. Although in many basins, the occurrence and persistence of droughts after 2007 have led to changes in water storage, the non-weakening of the annual component in most studied areas indicates the significant impact of poor water resource management, in addition to drought, in the basins.

In conclusion, the GRACE mission data has provided valuable insights into the changes in total water storage in Iran's main basins. The results highlight the importance of effective water resource management and the need for appropriate strategies to tackle the issues posed by climate change and water scarcity. The continuation of the mission through GRACE-FO ensures that we can continue to monitor and understand these vital changes, enabling more informed decision-making for sustainable water resource management.

Keywords: Total Water Storage, Iran's Main Basins, GRACE, Signal processing.

Cite this article: Moradi, A. R. (2025). Total Water Storage Changes in Iran's Main Basins According to the GRACE Gravimetry Mission. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(2), 309-324. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.389004.1007663>



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.389004.1007663>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

تغییرات ذخایر کلی آب در حوزه‌های آبریز اصلی ایران بر اساس داده‌های ثقل‌سنجی گریس

✉ امیررضا مرادی

۱. گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: a-moradi@arakut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۵، بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۱۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۵/۷، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۶/۲۹)

چکیده

مأموریت ثقل‌سنجی گریس تغییرات میدان ثقل زمین را که به‌طور عمده ناشی از دگرگونی‌های ذخایر آبی زمین هستند از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ اندازه‌گیری و تصویری ۱۵ ساله از تغییرات ذخایر کلی آب در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای ارائه داده است. داده‌های گریس به‌دلیل دقت بالا و پوشش گسترده، امکان پایش دقیق‌تر و جامع‌تر منابع آب را در مقایسه با روش‌های سنتی پایش هیدرولوژیک فراهم می‌کنند. این مأموریت از سال ۲۰۱۸ با مأموریت پساگریس ادامه یافت. این تحقیق یک جمع‌بندی از این تغییرات را در گستره حوزه‌های آبریز اصلی ایران، در بازه فعالیت گریس و مبتنی بر تکنیک‌های متداول پردازش سیگنال، به‌ویژه آزمون من-کندال، روندیابی کمترین مربعات، تحلیل خودهمبستگی و تبدیلات موجک ارائه می‌دهد تا بدین پرسش پاسخ دهد که از منظر مأموریت گریس، روندها و تغییرات بلندمدت و کوتاه‌مدت و تناوبی ذخایر کلی آب در حوزه‌های آبریز اصلی ایران یعنی حوزه‌های خزر، مرزی شرق، قره‌قوم، فلات مرکزی، خلیج‌فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه چه الگویی را نشان می‌دهند و چگونه می‌توان آنها را به عوامل اقلیمی و مدیریتی منتسب کرد؟ کاهش سالیانه، معادل ۰٫۴، ۰٫۹، ۰٫۹ و ۱۳ میلی‌متر از ذخایر کلی آب به‌ترتیب در حوزه‌های خزر، مرزی شرق، قره‌قوم، فلات مرکزی، خلیج‌فارس و دریاچه ارومیه، به روایت مأموریت گریس، در کنار شدت و ضعف مؤلفه‌های مختلف منبع از تبدیل موجک، نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی و مدیریت منابع آب تأثیر قابل‌توجهی بر ذخایر آب در حوزه‌های آبریز ایران داشته‌اند؛ اگرچه روندها و رفتار مؤلفه‌ها در همه حوزه‌ها یکسان نبوده‌اند.

واژه‌های کلیدی: ذخایر کلی آب، حوزه‌های آبریز اصلی ایران، مأموریت گریس، پردازش سیگنال.

۱. مقدمه

ماهواره توسط گیرنده‌های سامانه‌های تعیین موقعیت جهانی و نیز اندازه‌گیری شتاب‌های غیرجاذبی توسط شتاب‌سنج-های دقیق نصب شده در مرکز جرم هر ماهواره، امکان ثبت و پردازش تغییرات میدان ثقل زمین ناشی از تغییرات توزیع جرم سطحی در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای را از اوایل سال ۲۰۰۲ تا اواسط ۲۰۱۷ فراهم کرد. از آنجا که بخش عمده تغییرات میدان ثقل زمین ناشی از دگرگونی‌ها و تغییرات هیدرولوژیکی است، این بازه ۱۵ ساله، داده‌های ارزشمندی را در زمینه تغییرات ذخایر کلی آب فراهم کرده است. به‌دلیل موفقیت این مأموریت، در سال ۲۰۱۸، مأموریت پساگریس (GRACE-FO) به‌منظور ادامه این پایش‌ها آغاز شد و همچنان ادامه دارد (چن و همکاران، ۲۰۲۲).

در سطح جهانی، مطالعات متعددی با استفاده از داده‌های

تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در دهه‌ها و سال‌های اخیر تأثیرات قابل‌توجهی بر منابع آب جهانی داشته‌اند. ایران به‌عنوان کشوری با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، به‌شدت تحت‌تأثیر این تغییرات قرار گرفته است. منابع آبی در ایران نیز مانند همه کشورها نقش حیاتی در تأمین نیازهای کشاورزی، صنعتی و شرب دارند. با این حال، کاهش ذخایر آب به‌دلیل برداشت‌های بی‌رویه، تغییرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی، به یکی از چالش‌های اصلی مدیریت منابع آب در ایران تبدیل شده است.

مأموریت گریس (GRACE) به‌عنوان یک مأموریت ماهواره‌ای اختصاصی ثقل‌سنجی، مشتمل بر دو ماهواره هم مدار کم‌ارتفاع با قابلیت ردیابی بین دو ماهواره بود که با اتکا بر ثبت مشاهدات تغییرات فاصله بین دو ماهواره، با دقتی بسیار بالا، در کنار ثبت دقیق موقعیت مکانی هر

گریس انجام شده است. این مطالعات به بررسی تغییرات ذخایر آب‌های زیرزمینی، یخچال‌ها و سایر مؤلفه‌های منابع آبی پرداخته‌اند. لی‌یو و سان (۲۰۲۳) در یک تحلیل کمی به مرور پژوهش‌های مرتبط با تغییرات میدان ثقل زمین، حاصل از مأموریت گریس و کاربردهای آن پرداخته‌اند. آنها سیر توسعه و وضعیت کنونی بخش متغیر میدان ثقل زمین که از این مأموریت به‌دست آمده و همچنین نقاط داغ تحقیقاتی را با جستجو در منابع موجود در پایگاه‌های داده زیرساخت دانش ملی چین و وب آو ساینس (WOS) در طول ۲۰ سال گذشته تحلیل کرده‌اند. بر اساس این تحقیق عمده پژوهش‌های ارائه شده، بر مطالعه و پایش ذخایر آبی، تغییرات آب‌وهوایی و نوسانات سطح دریاها متمرکز بوده و بخش قابل توجه مطالعات به تغییرات در مناطق قطبی، فلات تبت، حوزه آبریز آمازون، مناطق شمالی هند و چین و حوزه آبریز یانگ‌تسه پرداخته‌اند.

برای جمع‌بندی و به‌دست آوردن تصویری جامع از مطالعات بین‌المللی مرتبط با تغییرات هیدرولوژیکی حاصل از گریس، به‌عنوان نمونه مطالعات انجام شده توسط فراپارت و رامیلین (۲۰۱۸) و چن و همکاران (۲۰۱۶)، با محوریت پایش تغییرات آب‌های زمینی، رودل و همکاران (۲۰۱۸) برای مطالعه روند طولانی‌مدت تغییرات آب شیرین، جیروتو و رودل (۲۰۱۹) با تمرکز بر کاربردهای منطقه‌ای تا جهانی گریس برای پایش نوسانات شدید در ذخیره آب زمینی، از جمله خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها و تپلی و همکاران (۲۰۱۹) برای آگاهی از نقش گریس در پایش چرخه آب زمینی، توازن جرم یخچال‌ها و صفحات یخی، تغییرات سطح دریا و فشار کف اقیانوس و پیش‌بینی روندهای مهم اقلیمی، شایان توجه هستند.

در ایران نیز مطالعات متعددی بر مبنای داده‌های گریس و با رویکرد مدیریت منابع آب انجام شده است. به‌عنوان مثال، شامی و قربانی (۲۰۱۹) به بررسی تغییرات منابع آبی در ایران و مقایسه روند این تغییرات با میزان بارش بر اساس داده‌های گریس و داده‌های چیرپس (CHIRPS) در موتور گوگل‌ارث بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که منابع آبی ایران بیش از ۱۰ سانتی‌متر از

سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ کاهش سطح داشته‌اند. خاکی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از همگام‌سازی تغییرات منابع آبی حاصل از گریس در یک مدل هیدرولوژیکی، در محدوده حوزه‌های آبریز اصلی ایران از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ و با تمرکز بر پایش تغییرات آب‌های زیرسطحی در این محدوده‌ها، دریافتند که این منابع آبی در بازه زمانی مذکور کاهشی معادل ۸/۹ میلی‌متر در سال را متحمل شده‌اند. صفائیان و همکاران (۲۰۲۳) با اتکای به داده‌های گریس، ارتباط بین کاهش منابع آبی در ایران و افزایش گازهای گلخانه‌ای حاصل از ماهواره‌های سنجنده این گازها، یعنی گوست (GOSAT) و انویست (ENVISAT) را تحلیل کردند. معماریان سرخابی و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی تغییرات ذخیره آب زیرسطحی در ایران از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱ با استفاده از داده‌های ماهواره‌های گریس و پسا گریس و مدل‌های یادگیری عمیق پرداختند که بر آن اساس، بیشترین کاهش ذخیره آب زیرزمینی در جنوب تهران و شمال شرق قزوین با نرخ ۱۵ میلی‌متر در سال رخ داده است. پژوهش دیگری که مبتنی بر داده‌های گریس و با تمرکز بر حوزه‌های آبریز اصلی ایران انجام شده، مطالعه‌ای است که توسط مرادی و شریفی (۲۰۱۷) با هدف استخراج رفتار زمانی-فرکانسی سری‌های زمانی مشاهدات تغییر فاصله بین دو ماهواره گریس، به‌عنوان مشاهده کلیدی این مأموریت، انجام پذیرفته است. آنها در این مقاله، با استفاده از تبدیل فوریه پنجره‌ای کمترین مربعات، تطابق خوبی بین رفتار زمانی-فرکانسی این سری‌های زمانی با تغییرات ذخایر آبی حاصل از مدل هیدرولوژی و اترگپ (WaterGAP) در حوزه‌های آبریز، در فاصله زمانی بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ مشاهده کردند. مقیم (۲۰۲۰) در پژوهشی تغییرات ذخیره آب با استفاده از تلفیق داده‌های گریس با اطلاعات حاصل از مدل هیدرولوژی همسان‌سازی داده‌های زمینی (GLDAS) در ایران را بررسی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که در شمال ایران، به‌ویژه در سواحل دریای خزر، کاهش زیادی در ذخیره آب رخ داده است. همچنین، بزرگ‌ترین کاهش ذخیره آب در آب‌خوان‌های کارستی و آبرفتی زاگرس مشاهده شده است. به‌علاوه این

و پیوسته (تشخیص نوسانات دوره‌ای و تغییرات مقیاس-زمان)، تحلیل خودهمبستگی (بررسی پایداری زمانی داده‌ها) و روندیابی کمترین مربعات (مدل‌سازی روند خطی) استفاده خواهد شد.

پس از مقدمه حاضر، در بخش دوم این تحقیق، خلاصه‌ای از مبانی ریاضی ابزار مورد استفاده، بیان شده و در بخش سوم، داده‌ها، محدوده‌های مورد مطالعه و سری‌های زمانی مربوط، معرفی و در بخش چهارم به ارائه نتایج و بحث پرداخته و در بخش پایانی، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲. داده‌ها و محدوده‌های مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، داده‌های سطح ۲ مأموریت گریس هستند که بین ماه مه ۲۰۰۲ و ژوئن ۲۰۱۷ یعنی از ابتدا تا انتهای دوره انتشار داده‌های این مأموریت، برای تولید سری‌های زمانی استفاده شده‌اند. این داده‌ها از نسخه ۰۶ تولیدی توسط مرکز تحقیقات فضایی (CSR) در دانشگاه تگزاس استخراج شده‌اند. داده‌های سطح ۲ گریس، ابتدا با جایگزینی ضریب هارمونیک کروی درجه یک با آنهایی که توسط سوئسون و همکاران (۲۰۰۸) محاسبه شده و نیز ضریب هارمونیک زونال C₂₀، متناظر با فشردگی زمین، با آنهایی که از اندازه‌گیری‌های لیزری ماهواره‌ای (SLR) تخمین زده شده، اصلاح و نتیجه در قالب سری زمانی تغییرات ارتفاعات آب معادل (EWH) حاصل از گریس، به عنوان یک محصول رایج این مأموریت، ارائه شده است. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش حوزه‌های آبریز اصلی ایران است که با وجود محدودیتی که در داده‌های مورد استفاده از گریس، به لحاظ قدرت تفکیک مکانی، ناشی از فرایندهای پس‌پردازش، به خصوص اعمال فیلترهای لازم برای رفع نویز و خطاهای نواری در این محصولات وجود دارد (فراپارت و رامیلین، ۲۰۱۸)، گستره حوزه‌های آبریز اصلی ایران، به ویژه در حوزه‌های وسیع، سری‌های زمانی مورد مطالعه را چندان دچار تداخل نمی‌کنند. سری‌های زمانی تغییرات سطح آب معادل حاصل از گریس، برای هر یک از حوزه‌های آبریز

پژوهش به استخراج همبستگی بین تغییرات ذخیره آب ایران و متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش پرداخته است. علاوه بر نمونه تحقیقات ذکر شده فوق که عمدتاً در گستره کل کشور، داده‌های گریس را استفاده کرده‌اند، پژوهش‌های چندی نیز بر مبنای اطلاعات هیدرولوژیکی مستخرج از گریس و در محدوده‌های کوچک‌تر از ایران انجام شده که به عنوان نمونه، مطالعات انجام شده توسط مرادی و شریفی (۲۰۱۸)، طوریان و همکاران (۲۰۱۵) و ابوزکی و همکاران (۲۰۱۹) قابل ذکر هستند.

اکنون که تقریباً هفت سال از اتمام موفقیت‌آمیز مأموریت گریس گذشته و با ۱۱ ماه وقفه، اهداف گریس با مأموریتی شبیه به آن تداوم یافته است و درحالی که مطالعات چندی برای تخمین اطلاعاتی نظیر تغییرات منابع آبی در این وقفه ۱۱ ماهه انجام شده‌اند (مطالعه گیاولی و همکاران (۲۰۲۲) را جهت مرور ملاحظه کنید)، در مقاله حاضر یک تحلیل کلی از منظر پردازش سیگنال، از رفتار تغییرات منابع آبی حاصل از گریس در حوزه‌های آبریز اصلی ایران، به عنوان عرصه‌های سرزمینی دارای اهمیت از حیث مدیریت منابع آب، ارائه می‌شود تا یک تصویر جامع را از اطلاعات به دست آمده از این منبع اطلاعاتی مهم در بخش منابع آبی این محدوده‌ها در ایران، پیش روی برنامه‌ریزان ذی‌ربط قرار دهد.

در این پژوهش، قابلیت‌های اختصاصی ابزار پردازش سیگنال برای پاسخ به دو پرسش کلیدی زیر دنبال می‌شوند:

- روندهای بلندمدت، کوتاه‌مدت و تناوبی تغییرات ذخایر آب در حوزه‌های آبریز اصلی ایران، از منظر اولین مأموریت اختصاصی ثقل‌سنجی ماهواره‌ای که با هدف پایش تغییرات هیدرولوژیک، دوره ۱۵ ساله موفق را در این راستا طی کرده، چه الگوهایی را نشان می‌دهند؟

- چگونه عوامل اقلیمی و مدیریتی به تفاوت‌های مکانی این روندها در بین حوزه‌ها منجر شده‌اند؟

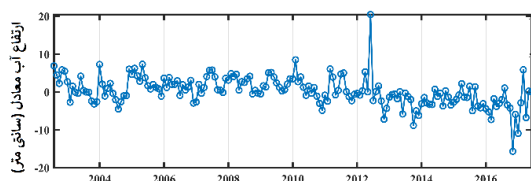
برای پاسخ به این پرسش‌ها، از ترکیبی از تکنیک‌های آزمون من-کندال (شناسایی روند)، تبدیل موجک گسسته

مطالعه به همراه سری‌های زمانی استخراج شده در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند.

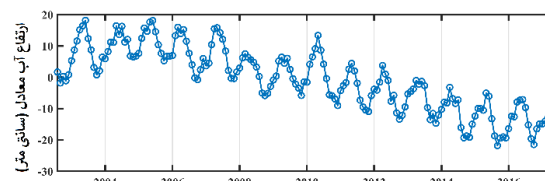
اصلی ایران، یعنی دریای خزر، دریاچه ارومیه، قره‌قوم، مرکزی، هامون و خلیج فارس، استخراج شده‌اند. منطقه



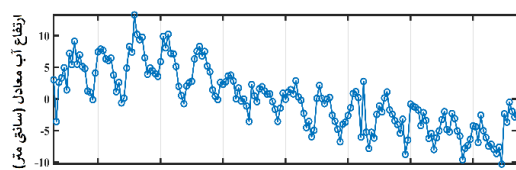
شکل ۱. نقشه حوزه‌های آبریز اصلی ایران.



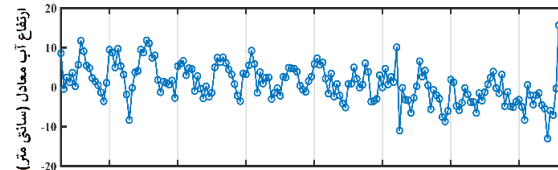
(ب)



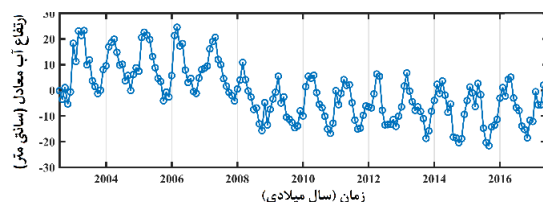
(الف)



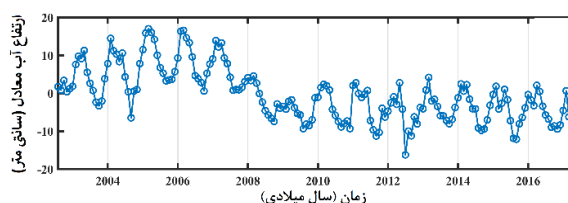
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل ۲. سری‌های زمانی تغییرات ذخایر کلی آب حاصل از مأموریت گریس در حوزه‌های آبریز اصلی ایران: (الف) تا (و)، به ترتیب حوزه‌های آبریز خزر، مرزی شرق، قره‌قوم، فلات مرکزی، خلیج فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه.

۳. روش‌ها

۳-۱. تشخیص داده‌های پرت با استفاده از روش معیار

Z اصلاح شده

داده‌های پرت به داده‌هایی گفته می‌شود که به‌طور قابل توجهی با سایر مقادیر در یک دسته مشاهدات یا یک سری زمانی تفاوت دارند. در فرایندهای تحلیل سری‌های زمانی، شناسایی داده‌های پرت اهمیت زیادی دارد زیرا این داده‌ها می‌توانند تأثیر زیادی بر نتایج تحلیل‌های آماری و مدل‌های پیش‌بینی داشته باشند. داده‌های پرت ممکن است ناشی از خطاهای اندازه‌گیری، اشکالات احتمالی در ثبت داده‌ها، یا پدیده‌های نادر و خاص باشند. در هنگامی که این داده‌ها ناشی از بروز اشتباه یا خطاهای بزرگ در مشاهدات هستند، حذف یا تصحیح آنها، دقت و اعتبار تحلیل‌ها را بهبود می‌بخشد. به‌همین دلیل، استفاده از روش‌های مناسب برای شناسایی و مدیریت داده‌های پرت، بخش مهمی از فرایند تحلیل داده‌ها است.

روش‌های متعددی برای شناسایی داده‌های پرت احتمالی در داده‌های یک سری زمانی وجود دارند. بلازکز گارسیا و همکاران (۲۰۲۱) روش‌های تشخیص داده‌های پرت را از منظرهای مختلف طبقه‌بندی کرده‌اند. در این مقاله، از یک روش ساده، متداول و درعین حال مستحکم در شناسایی داده‌های پرت در سری‌های زمانی تغییرات منابع آبی منبعث از گریس استفاده شده است که به روش معیار Z اصلاح شده موسوم است. در این روش از میانه و انحراف مطلق میانه (MAD) به‌عنوان معیارهایی برای اندازه‌گیری پراکندگی داده‌ها استفاده می‌شود. میانه به‌عنوان یک معیار مرکزی، مقدار وسط داده‌ها را نشان می‌دهد و در مقابل داده‌های پرت مقاوم است. انحراف مطلق میانه نیز میزان پراکندگی داده‌ها را با محاسبه میانگین قدر مطلق انحرافات از میانه اندازه‌گیری می‌کند. بر اساس میانه و انحراف مطلق میانه محاسبه شده برای داده‌ها، معیار Z اصلاح شده (M_i) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (اینگلوویچ و هوگلین، ۱۹۹۳).

$$M_i = \frac{0.6745(x_i - \bar{x})}{MAD} \quad (1)$$

که در آن، $\bar{x}$ میانه داده‌ها بوده و مشاهدات زمانی به‌عنوان داده‌های پرت شناخته می‌شوند که در سطح معنی‌دار ۰/۰۰۰۵ قدر مطلق معیار Z اصلاح شده بزرگ‌تر از ۳/۵ باشد (اینگلوویچ و هوگلین، ۱۹۹۳).

پس از شناسایی داده‌های پرت احتمالی، می‌توان آنها را با روش‌های مختلفی جایگزین کرد که ساده‌ترین راه متناسب با داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر استفاده از روش درون‌یابی خطی است که داده جدید را از طریق میانگین‌گیری ساده از مقادیر پیش و پس آن تولید می‌کند.

۳-۲. تشخیص روند داده‌ها با آزمون من-کندال

آزمون من-کندال یک آزمون غیرپارامتریک است که برای شناسایی روندهای صعودی یا نزولی در سری‌های زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون نیازی به نرمال بودن توزیع داده‌ها نداشته و می‌توان آن را برای داده‌هایی که به‌صورت خطی نیستند نیز به کار برد. آزمون من-کندال به‌طور گسترده‌ای در تحلیل‌های محیطی و هیدرولوژیکی برای بررسی تغییرات بلندمدت در داده‌ها و سری‌های زمانی متناظر به کار می‌رود (گوچیچ و تراجکوویچ، ۲۰۱۳).

فرض صفر آزمون من-کندال این است که هیچ روندی در داده‌ها وجود ندارد، در حالی که فرض مقابل بیان می‌کند که سری زمانی مورد نظر دارای روند می‌باشد. این آزمون با مقایسه نشانه‌های تفاوت بین داده‌های اولیه و داده‌های بعدی در سری زمانی چنین عمل می‌کند که اگر تعداد نشانه‌های مثبت بیشتر از نشانه‌های منفی باشد، حاکی از وجود یک روند صعودی و برعکس، فزونی نشانه‌های منفی نشانگر وجود روند نزولی در سری زمانی خواهد بود. معیار سنجش نشانه‌های مثبت و منفی در یک سری زمانی از رابطه (۲) به‌دست می‌آید (من، ۱۹۴۵ و کندال، ۱۹۷۰).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (2)$$

که در آن، n تعداد داده‌های سری زمانی، x_i و x_j مقادیر نام و نام سری زمانی و sign نشان‌گر تابع علامت است. برای یک مجموعه داده با تعداد بیش از ۱۰ عدد، کمیت S در رابطه (۲) دارای میانگین صفر و واریانس به‌قرار زیر خواهد

باشد، باید در فرایند تصحیح آزمون من-کندال، این مقوله را هم لحاظ کرد که برای مطالعه در این خصوص مطالعه پژوهش انجام شده توسط هیرش و اسلک (۱۹۸۴) پیشنهاد می‌شود.

۳-۳. تبدیل موجک و کاربرد آن در تحلیل سری‌های

زمانی

اگر بتوان تابعی مانند $f(t)$ را به صورت ترکیب خطی $\sum_i a_i \psi_i$ نوشت که در آن a_i ها ضرایبی حقیقی موسوم به ضرایب بسط و ψ_i ها نیز توابعی حقیقی بنام توابع بسط هستند، آنگاه ممکن است بتوان تحلیل، توصیف و پردازش سری زمانی متناظر با تابع $f(t)$ را به طریقی ملموس تر و کارآمدتر انجام داد و اساس تحلیل طیفی بر این موضوع استوار است (بوروس و همکاران، ۱۹۹۸). اگر مجموعه ضرایب بسط فوق، منحصر به فرد باشند توابع بسط را پایه ای برای فضای شامل $f(t)$ می نامیم و در صورتی که این توابع پایه، متعامد یک‌ه باشند ضرایب بسط را می توان چنین به دست آورد:

$$a_i = \langle f(t), \psi_i(t) \rangle = \int f(t) \psi_i(t) dt \quad (۷)$$

در تبدیل فوریه، توابع پایه متعامد یک‌ه سیستم، به صورت توابع نمایی یا سینوسی با دامنه نامحدود در فضای زمان و در تبدیل موجک، توابعی متعامد و یا غیرمتعامد موسوم به موجک‌ها هستند که امواجی متمرکز و با انرژی محدود در زمان می‌باشند. بنابراین در تناظر با رابطه (۷) می‌توان به ترتیب از روابط (۸) و (۹) برای انتقال از فضای زمان به فرکانس در تبدیلات فوریه و موجک استفاده کرد:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-2\pi j \omega t} dt \quad (۸)$$

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (۹)$$

در رابطه (۹)، ψ^* مزدوج مختلط موجک مورد استفاده خواهد بود که با تغییر مقیاس (انبساط و انقباض) و جابه‌جایی موجک مادر برای استخراج اطلاعات فرکانسی در لحظات مختلف از سری‌های زمانی ساخته می‌شوند. دو پارامتر τ و s به ترتیب پارامترهای جابه‌جایی و مقیاس نامیده می‌شوند و ضریب $\frac{1}{\sqrt{|s|}}$ در رابطه (۹) برای نرمال سازی

بود (من، ۱۹۴۵ و کندال، ۱۹۷۰):

$$VAR(s) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(t_p+5)] \quad (۳)$$

که در آن q تعداد داده‌های دارای گره (داده‌های هم اندازه پشت سرهم) و t_p طول p امین گروه گره‌دار می‌باشد. اکنون می‌توان آماره آزمون من-کندال را به صورت زیر محاسبه کرد (من، ۱۹۴۵ و کندال، ۱۹۷۰):

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{VAR(s)}}, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{VAR(s)}}, & s < 0 \end{cases} \quad (۴)$$

که در آن، اگر اندازه آماره Z در سطح اطمینان ۹۵ درصدی، از مقدار ۱/۹۶ بزرگ‌تر باشد، فرض صفر آزمون رد شده و مقادیر مثبت یا منفی Z به ترتیب نشان‌دهنده موجود روند افزایشی یا کاهش‌ی در سری زمانی خواهد بود. در آزمون من-کندال، وجود خودهمبستگی مثبت در داده‌ها می‌تواند منجر به تشخیص روندهای کاذب شود (حامد و رآئو، ۱۹۹۸). مطابق پژوهش حامد و رآئو (۱۹۹۸)، خودهمبستگی مثبت باعث افزایش واریانس آماره آزمون می‌شود که می‌تواند نتایج نادرستی را به همراه داشته باشد. برای رفع این مشکل، واریانس آماره آزمون من-کندال مطابق رابطه زیر اصلاح می‌شود (حامد و رآئو، ۱۹۹۸):

$$V^*(s) = VAR(s) * \frac{n}{n_s^*} \quad (۵)$$

که در رابطه (۵)، $V^*(s)$ همان واریانس اصلاح شده و ضریب $\frac{n}{n_s^*}$ ضریب اصلاح واریانس به دلیل وجود خودهمبستگی در داده‌ها است و مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{n}{n_s^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} [(n-i)(n-i-1)(n-i-2)\rho_s(i)] \quad (۶)$$

که در آن، $\rho_s(i)$ تابع خودهمبستگی رتبه‌های داده‌ها می‌باشد که میزان شباهت بین رتبه‌های یک سری زمانی را با تأخیرهای مختلف اندازه‌گیری می‌کند.

شایان ذکر است که در صورتی که در یک سری زمانی علاوه بر خودهمبستگی، مقوله تغییرات فصلی نیز چشمگیر

۴. نتایج و بحث

در ابتدا بر اساس روش تشخیص داده‌های پرت که در بخش ۳-۱ توضیح داده شد، هر یک از سری‌های زمانی مورد مطالعه، در آزمون معیار Z اصلاح شده، تحلیل گشته و داده‌های پرت محتمل شناسایی شده‌اند. شکل ۳، نتایج این مرحله از تحلیل داده‌ها را برای هر حوزه آبریز نشان می‌دهند. داده‌های پرت شناسایی شده، فقط در حوزه‌های مرزی شرق و قره‌قوم ملاحظه شده و این داده‌ها در زمان‌های ذی‌ربط، با استفاده از درون‌یابی خطی جایگزین شده‌اند. همچنین بر اساس آزمون من-کندال اصلاح شده، برای همه سری‌های زمانی منتسب به حوزه‌های آبریز، وجود روند منفی در تغییرات ذخایر آبی حوزه‌ها، تأیید می‌شود که خطوط روند هر سری زمانی پالایش شده، با برازش کمترین مربعات تعیین و در شکل ۳، با خط چین آبی به تصویر درآمده‌اند. دلیل این که از نسخه اصلاح شده آزمون من-کندال استفاده شده این است که مطابق شکل ۴، نمودارهای خودهمبستگی سری‌های زمانی مورد مطالعه، به ازای تأخیرهای اولیه، به خصوص تأخیر ۱، اندازه چشمگیری داشته و این مبین خودهمبستگی سیگنال‌ها بوده و از سویی نمودارهای میانگین متحرک متناظر با سری‌های زمانی، رفتار تناوبی را در شکل ۵ نشان نمی‌دهد که نشان‌دهنده این است که تنها منظور کردن اثر خودهمبستگی در آزمون من-کندال کفایت می‌کند و نیازی به اعمال اثر تغییرات فصلی در آزمون نیست. لازم به توضیح است که از آنجا که مطابق پیش‌بینی از رفتار سری‌های زمانی، دوره تناوب غالب، سالانه (۱۲ ماهه) است؛ بنابراین، طول پنجره میانگین متحرک ۱۲ ماهه انتخاب شده تا اطمینان حاصل شود که اثرات فصلی به‌طور کامل حذف شده‌اند.

پس از آزمون، وجود روند و برازش خطوط روند هر سری زمانی پالایش شده، شکل ۶، مقایسه‌ای از شیب خطوط روند ۱۵ ساله تغییرات ذخایر آبی حوزه‌ها را ارائه می‌دهد.

موجک، مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع این نرمال‌سازی برای اطمینان از این که تبدیل‌های موجک در هر مقیاس به‌طور مستقیم با یکدیگر و با تبدیل‌های سری‌های زمانی دیگر قابل مقایسه باشند، صورت می‌پذیرد تا تابع موجک در هر مقیاس انرژی واحد داشته باشد. نکته شایان توجه دیگر در تبدیل موجک پیوسته این است که با توجه به مختلط بودن نتیجه این تبدیل، معمولاً از مربع اندازه بخش حقیقی آن، به عنوان طیف توان موجک استفاده می‌شود که نشان‌دهنده آن است که در چه زمان‌هایی و در چه مقیاس‌هایی (یا فرکانس‌هایی) سیگنال مورد تحلیل دارای بیشترین انرژی است. این ابزار به‌ویژه در تحلیل سری‌های زمانی که دارای تغییرات پیچیده و غیر ثابت هستند، بسیار مفید است.

در صورتی که بخواهیم از تبدیل موجک گسسته استفاده کنیم، بسط تابع به کمک موجک‌ها از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

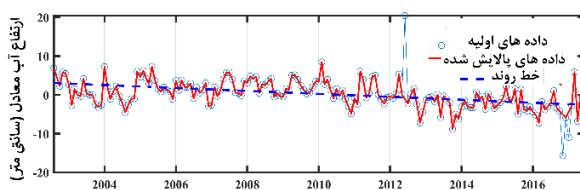
$$f(t) = \sum_k \sum_j a_{j,k} 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (10)$$

که در آن از دو پارامتر k و j بهره گرفته شده است که این دو، به ترتیب معادل همان دو پارامتر جابه‌جایی و مقیاس، یعنی دو پارامتر τ و S در رابطه (۹) می‌باشند و این بیانگر آن است که تغییرات مقیاس در تبدیل گسسته، به صورت دوتایی (Dyadic) می‌باشد.

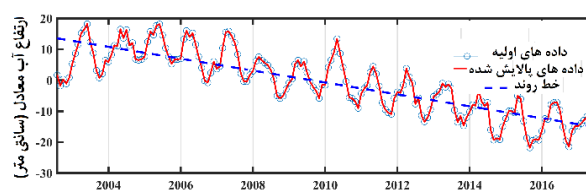
در آنالیز موجک می‌توان با استفاده از دو دسته تابع موسوم به توابع مقیاس و موجک به بیانی دست یافت که در آن کلیات و جزئیات تشکیل دهنده یک سیگنال از یکدیگر تفکیک شوند. در این صورت، در بسط هر تابع دلخواه می‌توان شاهد دو بخش مجزا، به صورت زیر بود:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k \varphi(t-k) + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=0}^{+\infty} d_{j,k} \psi(2^j t - k) \quad (11)$$

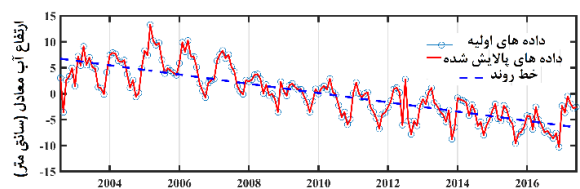
که در آن ضرایب بسط c_k و $d_{j,k}$ همان تبدیل گسسته موجک سیگنال هستند و دسته توابع پایه φ ، به عنوان تابع مقیاس، تولیدکننده کلیات سیگنال بوده و جزئیات تابع به کمک توابع موجک تبیین می‌شوند.



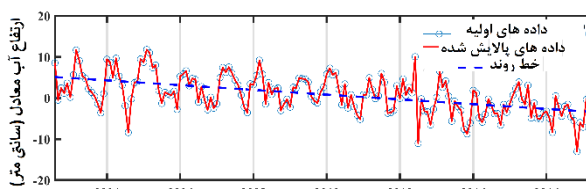
(ب)



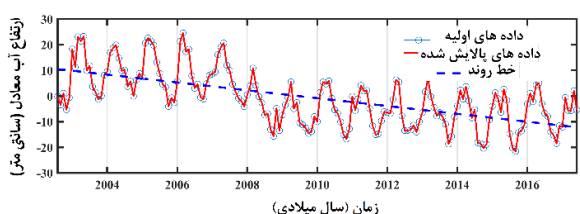
(الف)



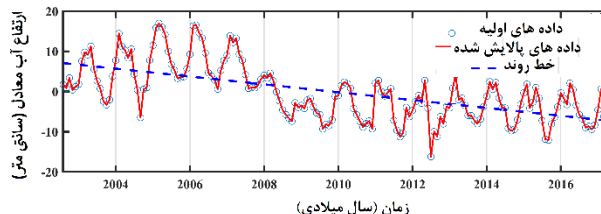
(د)



(ج)

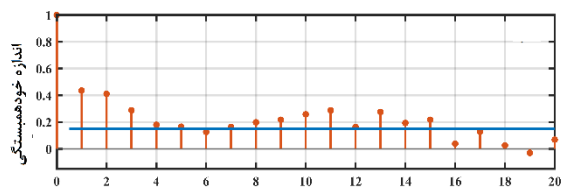


(و)

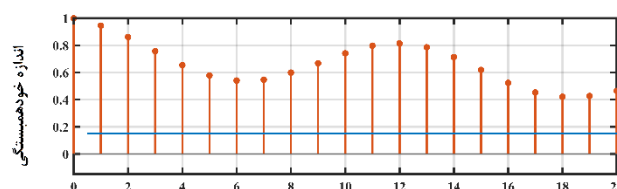


(ه)

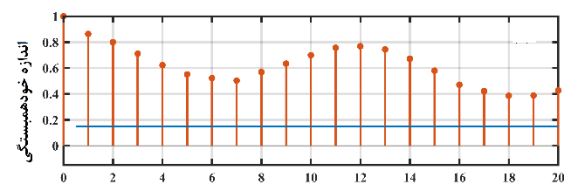
شکل ۳. سری‌های زمانی تغییرات ذخایر کلی آب حاصل از مأموریت گریس در حوزه های آبریز اصلی ایران: (الف) تا (و)، به‌ترتیب حوزه‌های آبریز خزر، مرزی شرق، قره‌قوم، فلات مرکزی، خلیج فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه به‌صورت داده‌های اولیه، داده‌های پالایش شده (شناسایی و حذف داده‌های پرت) و روند خطی برازش داده شده به داده‌ها که کاهش سالانه، معادل ۹، ۴، ۵، ۹ و ۱۳ میلی‌متر را به‌ترتیب در حوزه‌های آبریز خزر، مرزی شرق، قره‌قوم، فلات مرکزی، خلیج فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه نشان می‌دهد.



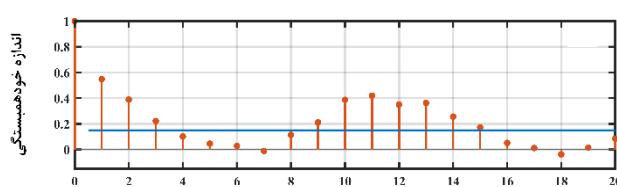
(ب)



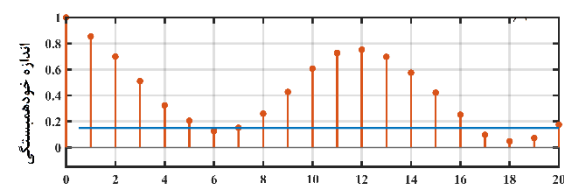
(الف)



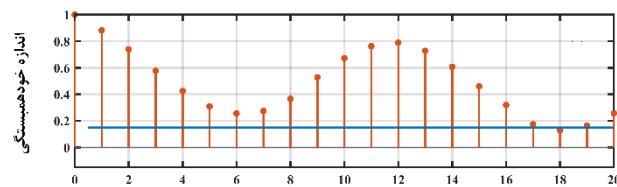
(د)



(ج)

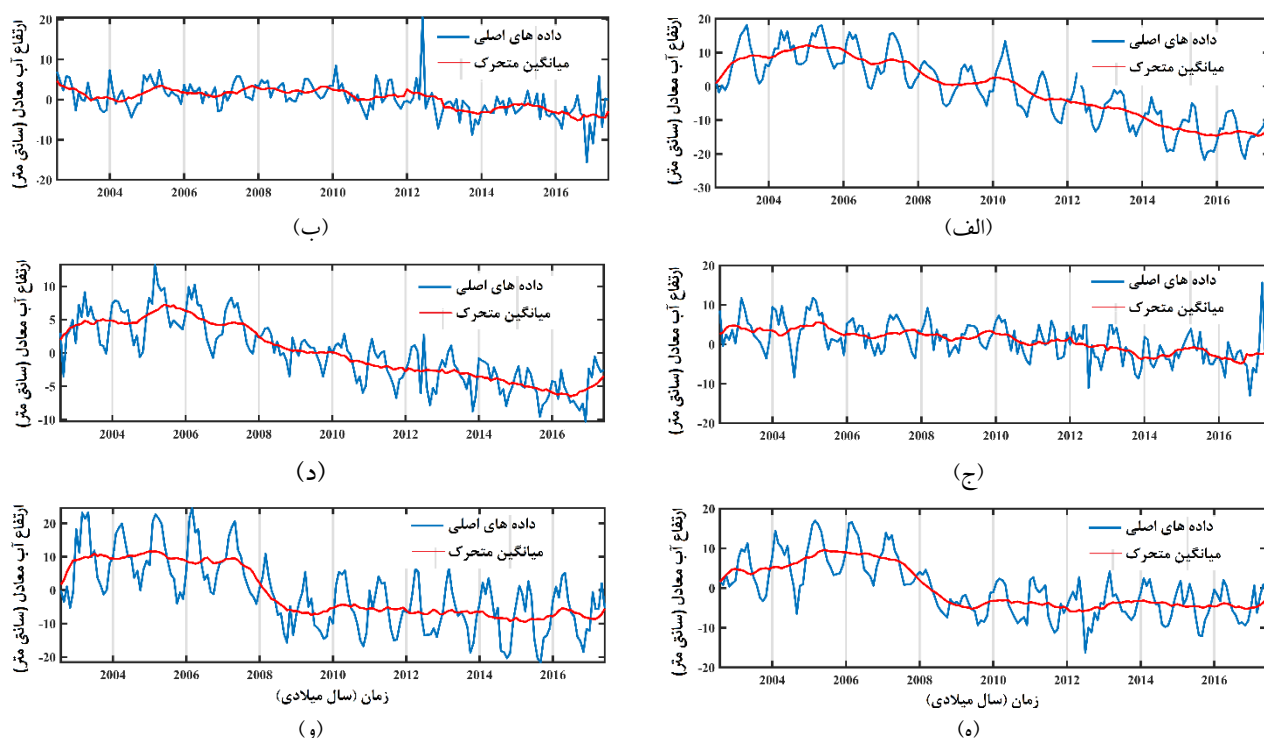


(و)

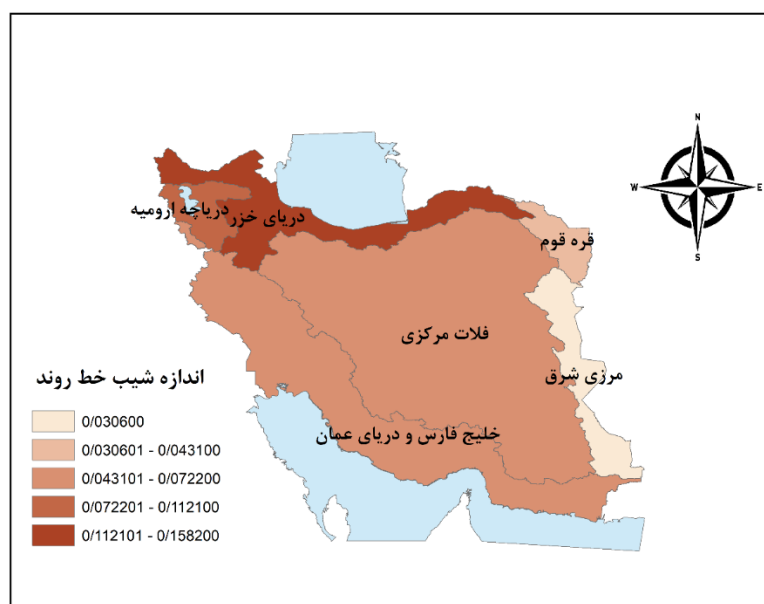


(ه)

شکل ۴. خودهمبستگی سری‌های زمانی تغییرات ذخایر کلی آب حاصل از مأموریت گریس در حوزه های آبریز اصلی ایران: (الف) تا (و)، به‌ترتیب حوزه‌های آبریز خزر، مرزی شرق، قره‌قوم، فلات مرکزی، خلیج فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه (میل‌های قرمز، نشان‌دهنده مقادیر خودهمبستگی در تأخیرهای مختلف و خطوط آبی‌رنگ، نشان‌دهنده محدوده اطمینان هستند).



شکل ۵. میانگین متحرک دوازده ماهه سری‌های زمانی تغییرات ذخایر کلی آب حاصل از مأموریت گریس در حوزه‌های آبریز اصلی ایران: (الف) تا (و)، به ترتیب حوزه‌های آبریز خزر، مرزی شرق، قره‌قوم، فلات مرکزی، خلیج فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه.



شکل ۶. نقشه مقایسه‌ای اندازه شیب روند تغییرات ذخایر کلی آب حاصل از مأموریت گریس در حوزه‌های آبریز اصلی ایران

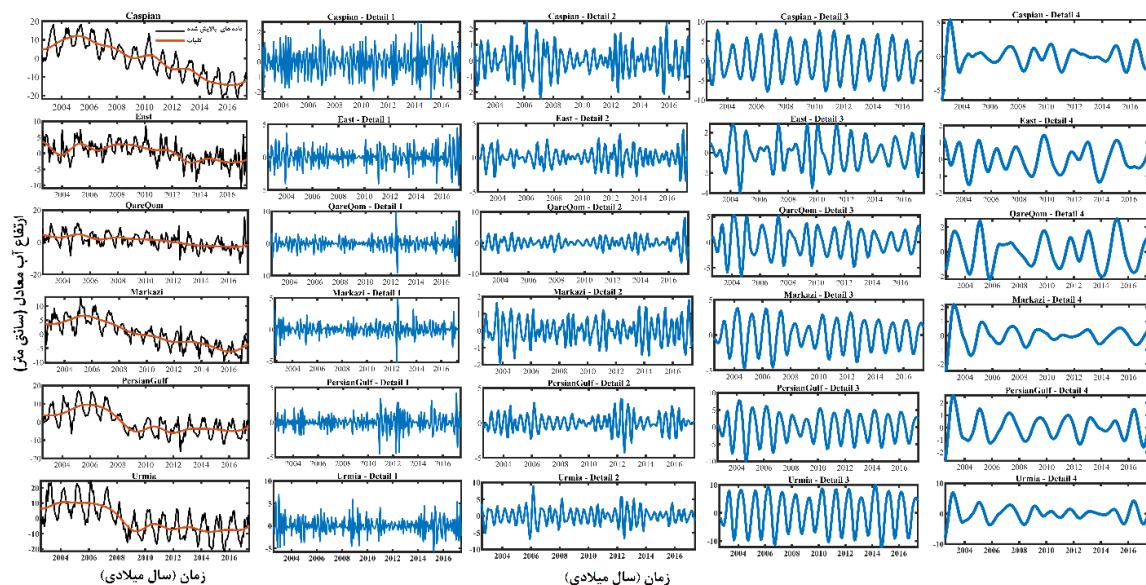
انتخاب چندین خانواده موجک متناسب با کاربرد موردنظر یک مزیت مهم برای این تبدیل به حساب می‌آید، لازم است موجکی که بهترین تطابق را با ویژگی‌های مورد نظر در سیگنال یا سری زمانی دارد، شناسایی شود. هر خانواده موجک از نظر شکل، فشردگی و نرمی متفاوت است و این

پس از انجام تحلیل‌های ذکر شده که همگی در حوزه زمان انجام شدند، در ادامه، تحلیل طیفی رفتار سری‌های زمانی مورد مطالعه بر مبنای تبدیلات گسسته و پیوسته موجک ارائه شده است. انتخاب موجک مادر اولین گام در انجام تبدیل موجک گسسته است. از آنجاکه در تبدیل موجک امکان

کننده را نشان دهند (آبه‌به و همکاران، ۲۰۲۲). از آنجا که در هر حوزه آبریز، یک سری زمانی با ۱۷۹ نقطه داده تحلیل شده و باتوجه به این که ترتیب دایادیک نزدیک به ۱۷۹، برابر با 2^8 می‌باشد، از موجک db_8 استفاده خواهد شد.

پس از انتخاب موجک مادر مناسب، گام بعدی تعیین حداکثر سطح تجزیه است. حداکثر سطح تجزیه به طول سری زمانی ورودی و نوع موجک بستگی دارد. در هر تجزیه موجک گسسته، تعداد نمونه‌ها در سری زمانی پس از تبدیل به نصف کاهش می‌یابد. به دلیل این کاهش نمونه، در مرحله‌ای از فرایند، تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای تجزیه سطح بعدی کمتر از اندازه نمونه (طول فیلتر) مورد نیاز توسط موجک می‌شود. این سطح به عنوان حداکثر سطح تجزیه شناخته می‌شود. حداکثر سطح تجزیه، عبارت است از $\log_2(n/k - 1)$ که در آن n تعداد نقاط داده در سری زمانی و k طول فیلتر موجک استفاده شده خواهد بود. طول فیلتر دو برابر لحظه محوشدگی موجک است؛ بنابراین در این مطالعه، بر اساس تعداد داده‌ها و تعداد فیلترهای موجک مورد استفاده که ۱۶ می‌باشد، سطح تجزیه را برابر با ۴ انتخاب کرده‌ایم. شکل ۷ نتیجه اعمال تبدیل موجک گسسته بر سری‌های زمانی موردتحلیل را نشان می‌دهد.

تفاوت‌ها باعث می‌شود که در شرایط مختلف مفید باشند. در این مطالعه، از دسته‌ای از موجک‌های دوپیشی (Daubechies) استفاده شده است زیرا آنها دارای توابع پایه غیر صفر در یک بازه محدود و دارای ویژگی تعامدی که هستند که ضمن آن که برای مکان‌یابی ویژگی‌های سری زمانی مؤثر هستند محاسبه جزئیات و کلیات سیگنال‌ها را با سرعت و سهولت انجام داده و علاوه بر آن، مطالعات هیدرومترولوژیکی متعددی که مبتنی بر تبدیل موجک انجام شده‌اند با موفقیت از موجک‌های دوپیشی در تحلیل‌های خود استفاده کرده‌اند (آبه‌به و همکاران، ۲۰۲۲). خانواده موجک‌های دوپیشی دارای چندین زیرمجموعه هستند که بر اساس تعداد ضرایب موجک تقسیم‌بندی می‌شوند. این زیرمجموعه‌ها بر اساس تعداد ضرایب موجک و سطح تجزیه‌ای که می‌توانند پشتیبانی کنند، متفاوت هستند. شماره مرتبه در زیرمجموعه‌های موجک دوپیشی نشان‌دهنده مرتبه نرمی موجک است. به طور کلی، موجک‌های دوپیشی با مرتبه پنج یا بیشتر به عنوان موجک‌های نرم در نظر گرفته می‌شوند. در سری‌های زمانی هیدرومترولوژیکی، موجک‌های نرم‌تر ترجیح داده می‌شوند. این ترجیح به دلیل این است که روندهای موجود در این داده‌ها باید تدریجی باشند و فرایندهای به آرامی تغییر



شکل ۷. کلیات و جزئیات سری‌های زمانی تغییرات ذخایر کلی آب حاصل از مأموریت گریس در حوزه‌های آبریز اصلی ایران، حاصل از اعمال تبدیل موجک گسسته بر سری‌های زمانی: از بالا به پایین، به ترتیب برای حوزه‌های آبریز خزر، مرزی شرق، قره‌قوم، فلات مرکزی، خلیج فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه.

در تصاویر سمت چپ همه اشکال فوق، علاوه بر سری زمانی تغییرات ذخایر کلی آب در هر یک از حوزه‌های آبریز اصلی ایران که با رنگ سیاه نشان داده شده، خطوط قرمز نیز کلیات این سیگنال‌ها را که حاصل از اعمال تبدیل گسسته موجک بر سری‌های زمانی بوده به تصویر درآورده که به نوعی روند کلی تغییرات غیرخطی این سری‌های زمانی را سازگار با روند خطی نشان داده شده در شکل ۳، ارائه می‌دهد. این کلیات، ماهیتی شبیه به رفتار نشان داده شده از تغییرات سیگنال‌های مورد مطالعه در شکل ۶ دارند که از میانگین‌گیری متحرک ۱۲ ماهه سری‌های زمانی حاصل شد. علاوه بر این، تصاویر متناظر با جزئیات سیگنال‌ها در سطوح مختلف نیز حاوی اطلاعات مفیدی است. این جزئیات که در تصاویر نشان داده شده در شکل ۷، با نمودارهای آبی‌رنگ نمایش داده شده‌اند، از نظر محدوده فرکانسی، با توجه به تغییرات سطوح تجزیه تبدیل موجک، به ترتیب از سمت چپ به راست، متناظر با مؤلفه‌های با دوره تناوب ۲ تا ۴ ماهه، ۴ تا ۸ ماهه، ۸ تا ۱۶

ماهه و ۱۶ تا ۳۲ ماهه هستند. که مطابق انتظاری که از رفتار تغییرات هیدرولوژیکی در حوزه‌ها داریم، مهم‌ترین بخش پریودیک، دوره تناوب سالانه دارد که به وضوح در جزئیات متناظر با سطح سوم تجزیه موجک، قابل مشاهده است. سهم هریک از مؤلفه‌های نشان داده شده در شکل ۷، در بازسازی سیگنال‌های متناظرشان در جدول ۱ با یکدیگر مقایسه شده است.

تحلیل موجک پیوسته سری‌های زمانی مورد نظر، تصویری از تغییرات زمانی-فرکانسی ذخایر کلی آب در حوزه‌های آبریز اصلی ایران ارائه می‌دهد. در تحلیل موجک پیوسته، زمانی که استخراج رفتار زمانی-فرکانسی با استفاده از مقیاس نمای حاصل از محاسبه انرژی ضرایب تبدیل مدنظر باشد، موضوع انتخاب تابع پایه چندان حیاتی نیست (تورنس و کومپو، ۱۹۹۸). در این تحقیق از موجک‌های مورلت (Morlet) استفاده کرده و مقیاس نمای حاصل، متناظر با حوزه‌های آبریز مورد مطالعه در شکل ۸ نمایش داده شد.

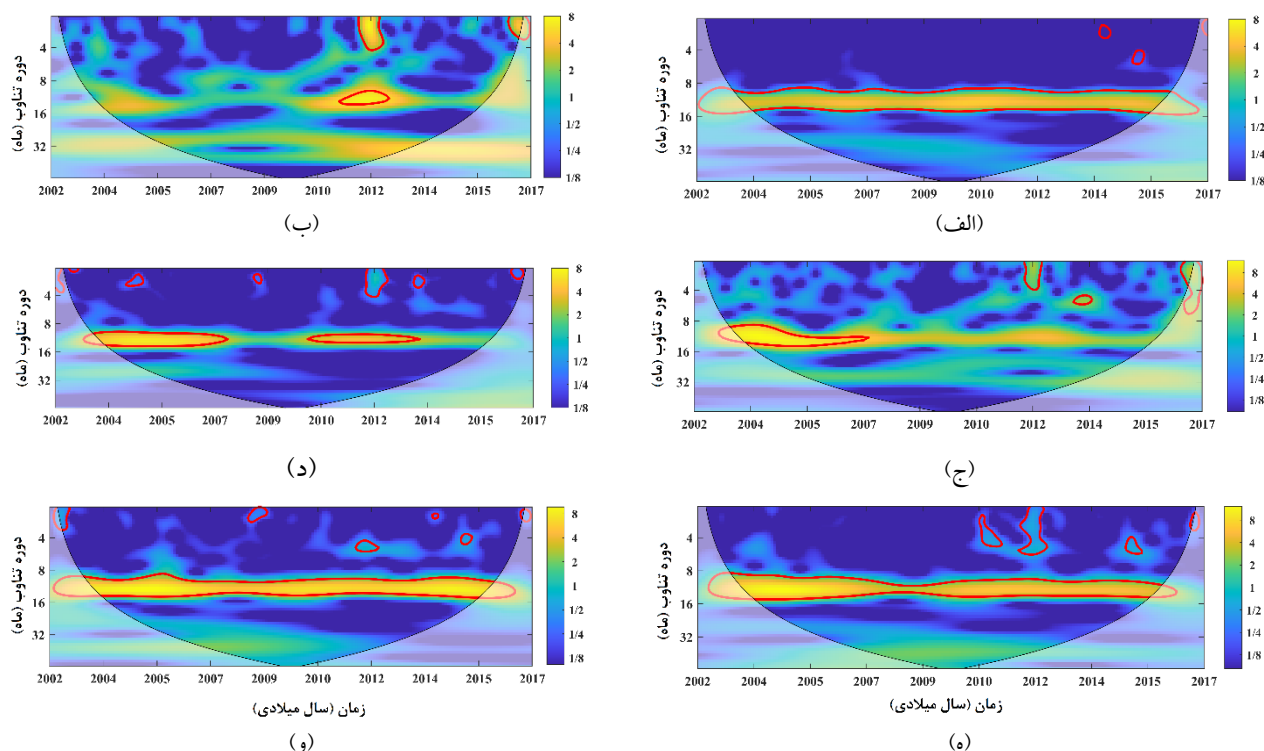
جدول ۱. سهم جزئیات و کلیات به دست آمده از تبدیل موجک سری‌های زمانی تغییرات ذخایر کلی آب حاصل از مأموریت گریس در حوزه‌های آبریز اصلی ایران در بازسازی سری‌های زمانی.

حوزه آبریز	سهم کلیات (درصد)	سهم جزئیات سطح اول با دوره تناوب ۲ تا ۴ ماهه (درصد)	سهم جزئیات سطح دوم با دوره تناوب ۴ تا ۸ ماهه (درصد)	سهم جزئیات سطح سوم با دوره تناوب ۸ تا ۱۶ ماهه (درصد)	سهم جزئیات سطح چهارم با دوره تناوب ۱۶ تا ۳۲ ماهه (درصد)
دریای خزر	۷۵/۱۱	۱/۲۶	۱/۷۶	۱۷/۷۶	۴/۱۱
مرزی شرق	۳۴/۶۳	۲۱/۹۶	۱۵/۷۰	۱۸/۲۴	۹/۴۷
قره‌قوم	۳۰/۳۵	۱۸/۷۰	۱۴/۳۸	۲۹/۹۹	۶/۵۷
فلات مرکزی	۷۰/۸۲	۵/۷۷	۳/۰۳	۱۷/۱۹	۳/۱۹
خلیج فارس و دریای عمان	۵۸/۹۰	۳/۳۸	۳/۷۶	۳۰/۹۷	۲/۹۸
دریاچه ارومیه	۵۱/۴۷	۴/۳۶	۴/۲۳	۳۵/۴۴	۴/۴۹

موجک برای تحلیل داده‌ها به زمان بیشتری نیاز خواهد داشت و در نتیجه مخروط تأثیر بزرگ‌تر می‌شود. برای آشنایی بیشتر با این موضوع به مقاله ارائه شده توسط تورنس و کومپو (۱۹۹۸) مراجعه شود.

مطابق مقیاس‌نماهای نشان داده شده در شکل ۸، مولفه سالیانه در همه حوزه‌ها، مهم‌ترین بخش سری‌های زمانی تغییرات منابع آبی در این حوزه‌ها است که ناشی از تأثیرپذیری تغییرات هیدرولوژیکی از گردش کلی جو و تحت تأثیر حرکت انتقالی زمین دور خورشید می‌باشد. این مؤلفه‌ها در حوزه‌های آبریز خزر، خلیج فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه نظم بیشتری را داشته و در تمام سال‌ها از شدت تقریباً یکسانی برخوردار است ولی در حوزه‌های کم‌آب‌تر شدت مولفه سالیانه در طول دوره تحلیل تغییرات ملموسی کرده است؛ به‌عنوان نمونه در حوزه آبریز فلات مرکزی در فاصله سال ۲۰۰۷ تا نزدیکی سال ۲۰۱۰، کاهش چشمگیر داشته و بعد از سال ۲۰۱۴ نیز کاهش شدت این مؤلفه، بسیار مشهود است.

در این تصویر، منحنی‌های قرمز رنگ نشان‌دهنده محدوده‌های اطمینان ۹۵ درصدی برای مقادیر طیف موجک مندرج در مقیاس نماها هستند. فواصل اطمینان بر مبنای طیف پس زمینه با نوفه قرمز به‌دست آمده‌اند که برای پدیده‌های هیدرولوژیکی به دلیل رفتار طیفی موردانتظار (وابستگی توان طیفی به دوره تناوب) مناسب می‌باشند. باید اضافه کرد که در شکل ۸، منحنی‌های سیاه رنگ حاشیه‌های تصاویر به‌عنوان مخروط تأثیر (Cone of influence) شناخته می‌شوند که نشان‌دهنده بازه زمانی است که در آن ضرایب موجک تحت تأثیر اثرات مرزی به دلیل طول محدود سری‌های زمانی مورد تحلیل قرار می‌گیرند و فراتر از این ناحیه که به صورت مات در تصاویر نشان داده شده، قابلیت اطمینان ضرایب موجک به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همان‌طور که در اشکال مشهود است در فرکانس‌های پایین‌تر (پریدهای بالاتر)، موجک مادر بیشتر کشیده می‌شود و به دلیل پهن‌تر شدن موجک مورد استفاده،



شکل ۸. مقیاس نما یا دوره‌نگار سری‌های زمانی تغییرات ذخایر کلی آب حاصل از مأموریت گریس در حوزه‌های آبریز اصلی ایران حاصل از اعمال تبدیل موجک پیوسته روی سری‌های زمانی: (الف) تا (و)، به ترتیب حوزه‌های آبریز خزر، مرزی شرق، قره‌قوم، فلات مرکزی، خلیج فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه. منحنی‌های سیاه، نشان‌گر سطح اطمینان ۹۵ درصد می‌باشند.

در حوزه قره‌قوم از سال ۲۰۰۷ به بعد این مؤلفه به شدت تضعیف شده و جالب است که در حوزه مرزی شرق، تنها از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ شدت مؤلفه سالیانه بالا است و در اکثر بازه زمانی مورد مطالعه، این بخش سیگنال از شدت چندانی برخوردار نیست. شدت و ضعف مؤلفه سالیانه در مقیاس‌نماهای فوق، به‌ویژه از نظر زمانی بسیار در تطابق با خشکسالی‌های گزارش شده در خاورمیانه از سال ۲۰۰۷ به بعد بوده (طوریان و همکاران، ۲۰۱۵) و این مقوله، با توجه با تأثیرپذیری تغییرات کلی منابع آب منبعث از گریس از پدیده خشکسالی و ترسالی، قابل انتظار است.

نکته قابل توجه دیگر در مقیاس‌نماهای نشان داده شده در شکل ۸، رخداد مؤلفه‌های درون‌سالی ۲ تا ۴ ماهه و یا ۴ تا ۸ ماهه در برخی از سال‌ها است که در سطح ۹۵ درصد، با شدتی کمتر از مؤلفه سالیانه (به استثنای حوزه مرزی شرق) مشهود است که بازهم نشان‌دهنده اثرپذیری مورد انتظار تغییرات ذخایر کلی آب از پدیده‌های ترسالی و خشکسالی در حوزه‌ها می‌باشد.

مطالب توضیح داده شده در مورد شکل ۸ را می‌توان در تفسیر سهم جزئیات سری‌های زمانی مورد تحلیل که در جدول ۱ ارائه شدند و نیز جزئیات نشان داده شده در شکل ۷ و همراستا با آنها تلقی کرد که به‌نوعی بخش‌های متناوب تغییرات منابع آبی منبعث از مأموریت گریس را به‌خصوص به پدیده ترسالی و خشکسالی و گردش کلی جو مرتبط می‌کنند؛ ولیکن تغییرات ذخایر کلی آب که بیشتر به عوامل انسانی و مدیریت منابع آب بر می‌گردد را بهتر است در روندهای کلی ارئه شده در تصاویر ۳، ۶ و ۷ جستجو کرد که گرچه این روندها هم در حوالی سال ۲۰۰۷ میلادی و خشکسالی پس از آن، در بسیاری مناطق تغییر چشمگیری داشته‌اند ولی می‌توان گفت که عدم تغییرات شدت مؤلفه سالیانه، حداقل در حوزه‌های آبریز خزر، خلیج فارس و دریای عمان و دریاچه ارومیه، موید اثر چشمگیرتر ضعف مدیریت منابع آبی در اکثر حوزه‌ها بوده است.

مباحثی که منبعث از اعمال تبدیل موجک گسسته و پیوسته، با استناد به اشکال ۷ و ۸ و نیز جدول ۱ مطرح شد، مؤید قابلیت‌های ویژه تبدیل موجک در تحلیل سیگنال‌های

مورد مطالعه، در مقایسه با سایر تکنیک‌های مورد استفاده در تحقیق حاضرند؛ چنان‌که به‌عنوان نمونه شدت و ضعف مؤلفه‌های مختلف تغییرات ذخایر آب در حوزه‌ها، با فرکانس‌های متفاوت، به‌خوبی در اشکال ۷ و ۸، تفکیک و مقایسه شده‌اند و الگوهای رفتاری نشان داده شده در این مؤلفه‌ها، به‌هیچ‌وجه از تحلیل روندهای ساده در تصاویر پیشین قابل استخراج نیستند.

۵. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، داده‌های تغییرات ضخامت لایه آب معادل با تغییرات ذخایر آبی حاصل از مأموریت ماهواره‌ای گریس، از مه ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۱۷ و منتسب به حوزه‌های آبریز اصلی ایران مورد تحلیل قرار گرفتند تا یک جمع‌بندی از آن‌چه این مأموریت، به‌عنوان اولین مأموریت ماهواره‌ای ثقل‌سنجی، از تغییرات هیدرولوژیک در ایران ارائه کرده است، حاصل شود. رویکرد تحلیل‌های ارائه شده در این پژوهش، بهره‌گیری از تکنیک‌های پایه پردازش سری‌های زمانی در حوزه زمان و استفاده از تبدیلات گسسته و پیوسته موجک برای بررسی رفتار زمانی-فرکانسی سری‌های زمانی، به تفکیک حوزه‌های اصلی شش‌گانه ایران بود. موارد زیر به‌عنوان جمع‌بندی نتایج این تحقیق قابل شایان توجه می‌باشند:

- روندهای خطی و غیرخطی استخراج شده برای سری‌های زمانی، تأییدکننده کاهش ذخایر کلی آب در همه حوزه‌های آبریز اصلی ایران و تنش‌های آبی هشداردهنده در این نواحی است. حوزه‌های آبریز خزر و دریاچه ارومیه، به‌ترتیب، با کاهش متوسط ۱۹ و ۱۳ میلی‌متر در سال، بیشترین روند کاهشی تغییرات منابع آبی را از دید مأموریت گریس تجربه کرده‌اند. مؤلفه‌های سالیانه تغییرات ذخایر آبی در حوزه‌ها، به‌عنوان مهم‌ترین بخش مستخرج از سری‌های زمانی تغییرات منابع آبی در این مناطق، شناخته شده و در حوزه‌های کم‌آب‌تر شدت مؤلفه سالیانه، تغییرات ملموسی را داشته است.

- باوجود آن‌که در بسیاری از حوزه‌ها، بروز و تداوم خشکسالی بعد از سال ۲۰۰۷، منجر به تغییرات ذخایر آبی

گريس راه‌اندازی شده است، با حفظ اصول اصلی گريس در برآورد تغییرات میدان گرانش زمین، با ارتقای فناوری اندازه‌گیری و استفاده از تداخل سنجی لیزری به‌جای سیستم مایکروویو، که دقت اندازه‌گیری تغییرات میدان گرانش را تا ۲۵ درصد افزایش داده و وضوح مکانی-زمانی داده‌ها را بهبود بخشیده با تداوم مشاهدات بلندمدت، امکان پایش طولانی‌تر روندهای بحرانی مانند کاهش ذخایر آب زمینی را فراهم کرده است و ترکیب داده‌های این دو مأموریت و نیز مأموریت‌های طراحی شده آتی، چارچوبی جامع برای درک پیوستگی روندهای بحرانی در سیستم هیدرولوژیکی حوزه‌های آبریز ایران ایجاد خواهد کرد.

مراجع

- Abebe, S. A., Qin, T., Zhang, X., & Yan, D. (2022). Wavelet transform-based trend analysis of streamflow and precipitation in Upper Blue Nile River basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101251.
- Abou Zaki, N., Torabi Haghighi, A., M. Rossi, P., J. Tourian, M., & Kløve, B. (2019). Monitoring groundwater storage depletion using gravity recovery and climate experiment (GRACE) data in Bakhtegan Catchment, Iran. *Water*, 11(7), 1456.
- Blázquez-García, A., Conde, A., Mori, U., & Lozano, J. A. (2021). A review on outlier/anomaly detection in time series data. *ACM computing surveys (CSUR)*, 54(3), 1-33.
- Burrus, C. S., Gopinath, R. A., & Guo, H. (1998). Wavelets and wavelet transforms. *rice university, houston edition*, 98.
- Chen, J., Cazenave, A., Dahle, C., Llovel, W., Panet, I., Pfeffer, J., & Moreira, L. (2022). Applications and challenges of GRACE and GRACE follow-on satellite gravimetry. *Surveys in Geophysics*, 43(1), 305-345.
- Chen, J., Famiglietti, J. S., Scanlon, B. R., & Rodell, M. (2016). Groundwater storage changes: present status from GRACE observations. *Remote sensing and water resources*, 207-227.
- Frappart, F., & Ramillien, G. (2018). Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review. *Remote Sensing*, 10(6), 829.
- Giroto, M., & Rodell, M. (2019). Terrestrial water storage. Extreme Hydroclimatic Events and Multivariate Hazards in a Changing Environment.
- Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). *Analysis of*

شده ولیکن عدم تضعیف مؤلفه سالیانه در اغلب مناطق مورد مطالعه، نشان‌دهنده اثر قابل توجه ضعف مدیریت منابع آبی، علاوه بر خشکسالی، در حوزه‌ها می‌باشد.

- تضعیف مؤلفه‌های مختلف ذخایر آبی در حوزه‌های آبریز، که در نتیجه اعمال تبدیل موجک بر سری‌های زمانی متناظر استخراج شد و تشدید خشکسالی حاصله در بازه‌های طولانی‌مدت، نشان می‌دهد که لازم است سیاست‌گذاری مؤثرتری در زمینه کاهش و اصلاح الگوی مصرف آب، به‌ویژه در بخش کشاورزی به‌عنوان پرمصرف‌ترین بخش در این مقوله، مورد توجه قرار گیرد.

- مأموریت پساگريس که در سال ۲۰۱۸ به‌عنوان جانشین

changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. Elsevier.

- Gyawali, B., Ahmed, M., Murgulet, D., & Wiese, D. N. (2022). Filling temporal gaps within and between GRACE and GRACE-FO terrestrial water storage records: An innovative approach. *Remote Sensing*, 14(7), 1565.
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196.
- Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water resources research*, 20(6), 727-732.
- Iglewicz, B., & Hoaglin, D. C. (1993). *Volume 16: how to detect and handle outliers*. Quality Press.
- Kendall, M. G. (1970). Rank correlation methods (london: Charles griffin, 1948). *Kendall Rank Correlation Methods 1948*.
- Khaki, M., Forootan, E., Kuhn, M., Awange, J., van Dijk, A. I., Schumacher, M., & Sharifi, M. A. (2018). Determining water storage depletion within Iran by assimilating GRACE data into the W3RA hydrological model. *Advances in Water Resources*, 114, 1-18.
- Liu, C., & Sun, W. (2023). GRACE time-variable gravity and its application to geoscience: Quantitative analysis of relevant literature. *Earth and Planetary Physics*, 7(2), 295-309.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
- Memarian Sorkhabi, O., Asgari, J., & Randhir, T. O. (2023). Monitoring groundwater storage based on satellite gravimetry and deep learning. *Natural Resources Research*, 32(3),

- 1007-1020.
- Moghim, S. (2020). Assessment of water storage changes using GRACE and GLDAS. *Water Resources Management*, 34(2), 685-697.
- Moradi, A., & Sharifi, M. A. (2018). Wavelet analysis of GRACE K-band range rate measurements related to Urmia Basin. *Iranian Journal of Geophysics*, 11(5), 4354.
- Moradi, A., & Sharifi, M. A. (2017). Windowed least-squares spectral analysis of GRACE K-band range rate measurements. *Appl. Ecology Env. Res*, 15(1), 429-437.
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M. H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557(7707), 651-659.
- Safaeian, S., Falahatkar, S., & Tourian, M. J. (2023). Satellite observation of atmospheric CO₂ and water storage change over Iran. *Scientific Reports*, 13(1), 3036.
- Shami, S., & Ghorbani, Z. (2019). Investigating water storage changes in Iran using grace and chirps data in the google earth engine system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 981-984.
- Swenson, S., Chambers, D., & Wahr, J. (2008). Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8).
- Tapley, B.D., Watkins, M.M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., Sasgen, I., Famiglietti, J.S., Landerer, F.W., Chambers, D.P. and Reager, J.T., (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature climate change*, 9(5), 358-369.
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1), 61-78.
- Tourian, M. J., Elmi, O., Chen, Q., Devaraju, B., Roohi, S., & Sneeuw, N. (2015). A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment*, 156, 349-360.