

Evaluation of the trend of groundwater storage decline in the Tehran aquifer using satellite data and statistical analyses

Hamidreza Sadeghi^{1*}, Muslim Derikvand², Sirous Naderi³

A quantitative assessment of the long-term trend of groundwater storage changes in the Tehran aquifer was conducted using satellite data and statistical analyses during the period 2003 to 2023. The groundwater storage anomaly (GWSA) was calculated from the difference of the total groundwater storage anomaly (TWSA) derived from the GRACE/GRACE-FO mission and the surface components of the GLDAS model. For trend analysis, least squares linear regression, the nonparametric Mankendal test to examine the significance of the trend, and the age slope estimator to estimate the magnitude of the trend slope were used. The results indicate a strong downward trend with very high statistical confidence in the GWSA time series. The linear regression analysis estimated an annual decline rate of -2.28 cm per year and a cumulative decline of about 47.85 cm during the study period. The Mankendall test, with a Z-statistic of -19.28 and a p-value of zero, confirmed the existence of a uniform downward trend at a confidence level of 0.99. The age slope estimator showed a slope of -2.26 cm/year, which is in very close agreement with the linear regression estimate and indicates that the trend is real and structural, independent of outliers. The findings strongly indicate the continuous and accelerated depletion of the Tehran aquifer in the past two decades. This stable linear trend indicates an imbalance in the hydrological balance and reveals the critical situation of groundwater reserves in this province. This study emphasizes the urgent need to review water resources management policies, control withdrawals, and determine basic rights to curb this downward trend and prevent irreversible consequences such as land subsidence.

Keywords: Groundwater, GRACE, GLDAS, Statistical Analysis, Tehran

secondYear
Autumn and Winter1404

Research
paper

:Date received

۱۴۰۴/۰۵/۰۷

:Date accepted

۱۴۰۴/۰۶/۲۶

Pages: 303-332

1 . PhD student in climatology, researcher and lecturer at Imam Hussein (AS) Guards Officer Training and Training University

2 . Member of the faculty of Imam Hussein (AS) Guards Officer and Training University

3 . PhD student in meteorology, Director General of Meteorology of Ilam Province
sirzarnd@yahoo.com

تقييم اتجاه انخفاض مخزون المياه الجوفية في طبقة المياه الجوفية في طهران باستخدام بيانات

الأقمار الصناعية والتحليلات الإحصائية

حميدرضا صادقي^{١*}، مسلم دريكوند،^٢ سيروس نادري^٣

٤

السنة الثانية

شريف والشتاء ١٤٠٤

ورقة بحثية

تاريخ الاستلام:

١٤٠٤/٠٥/٠٧

تاريخ القبول:

١٤٠٤/٠٦/٢٦

الصفحات: ٣٣٢-٣٠٣

ملخص

أُجرى تقييم كمي للاتجاه طويل الأجل لتغيرات مخزون المياه الجوفية في طبقة المياه الجوفية في طهران باستخدام بيانات الأقمار الصناعية والتحليلات الإحصائية خلال الفترة من ٢٠٠٣ إلى ٢٠٢٣. حُسب شذوذ مخزون المياه الجوفية (GWSA) من الفرق بين شذوذ إجمالي مخزون المياه الجوفية (TWSA) المُستمد من مهمة GRACE/GRACE-FO ومكونات سطح نموذج GLDAS. ولتحليل الاتجاه، استُخدم الانحدار الخطي للمربعات الصغرى، واختبار مانكيندال غير البارامترى لفحص دلالة الاتجاه، ومُقدّر ميل العمر لتقدير مقدار ميل الاتجاه. تُظهر النتائج وجود اتجاه تنازلي قوى بدرجة عالية من الثقة الإحصائية في السلسلة الزمنية لشذوذ مخزون المياه الجوفية. أكد اختبار مانكيندال، بقيمة إحصائية Z تساوى -١٩.٢٨، قيمة احتمالية تساوى صفراً، وجود اتجاه تنازلي منتظم عند مستوى ثقة ٠.٩٩. وأظهر مُقدّر ميل العمر ميلاً قدره -٢.٢٦ سم/سنة، وهو ما يتوافق بشكل كبير مع تقدير الانحدار الخطي، مما يشير إلى أن هذا الاتجاه حقيقي وبنوي، ومستقل عن القيم الشاذة. وتُشير النتائج بقوة إلى النضوب المستمر والمتسارع لخزان طهران الجوفى خلال العقدى الماضيين. ويُشير هذا الاتجاه الخطى الثابت إلى اختلال فى التوازن الهيدرولوجى، ويكشف عن الوضع الحرج لاحتياطيات المياه الجوفية فى هذه المحافظة. وتؤكد هذه الدراسة على الحاجة الملحة لمراجعة سياسات إدارة موارد المياه، والتحكم فى عمليات السحب، وتحديد الحقوق الأساسية لكبح هذا الاتجاه التنازلى ومنع حدوث عواقب لا رجعة فيها، مثل هبوط الأرض.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، GRACE، GLDAS، التحليل الإحصائي، طهران

١. طالب دكتوراه فى علم المناخ، وباحث ومحاضر فى جامعة الإمام الحسين (عليه السلام) لتدريب ضباط الحرس.

٢. عضو هيئة التدريس بجامعة الإمام الحسين (عليه السلام) لتدريب ضباط الحرس

٣. طالب دكتوراه فى الأرصاد الجوية، المدير العام للأرصاد الجوية فى محافظة إيلام

sirzarnd@yahoo.com

ارزیابی روند کاهش ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان تهران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های آماری

حمیدرضا صادقی^{۱*}، مسلم دریکوند^۲، سیروس نادری^۳

چکیده

ارزیابی کمی روند بلندمدت تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان تهران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های آماری طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ انجام شد. آنومالی ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) از تفاضل آنومالی ذخیره کل آب زیرزمینی (TWSA) مشتق شده از مأموریت GRACE/GRACE-FO و مؤلفه‌های سطحی مدل GLDAS محاسبه گردید. برای تحلیل روند، از رگرسیون خطی حداقل مربعات، آزمون ناپارامتری منکندال برای بررسی معناداری روند، و برآوردگر شیب سن برای تخمین مقدار شیب روند استفاده شد. نتایج، وجود یک روند نزولی شدید و با اطمینان آماری بسیار بالا را در سری زمانی GWSA نشان می‌دهد. تحلیل رگرسیون خطی نرخ کاهش سالانه‌ای معادل $-2,28$ سانتی‌متر در سال و یک افت تجمعی حدود $47,85$ سانتی‌متر را در طول دوره مطالعه برآورد کرد. آزمون منکندال با آماره Z معادل $-19,28$ و p -value در حد صفر، وجود روند یکنواخت کاهشی را در سطح اطمینان $0,99$ تأیید نمود. برآوردگر شیب سن، شیبی معادل $-2,26$ سانتی‌متر بر سال را نشان داد که همخوانی بسیار نزدیکی با برآورد رگرسیون خطی داشته و حکایت از واقعی و ساختاری بودن روند، مستقل از نقاط پرت دارد. یافته‌ها به‌طور قاطع بیانگر تخلیه مستمر و شتابان آبخوان تهران در دو دهه گذشته است. این روند خطی پایدار، نشان دهنده عدم تعادل در بیلان هیدرولوژیک است و وضعیت بحرانی ذخایر آب زیرزمینی این استان را آشکار می‌سازد. این مطالعه بر ضرورت فوری بازنگری در سیاست‌های مدیریت منابع آب، کنترل برداشت و تعیین حقبه‌های پایه برای مهار این روند نزولی و جلوگیری از عواقب جبران‌ناپذیری مانند فرونشست زمین تأکید دارد.

واژگان کلیدی: آب زیرزمینی، GRACE، GLDAS، تحلیل آماری، تهران

۴

سال دوم

پاییز و زمستان ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۲۶

صص: ۳۰۳-۳۳۲

۱. دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی و پژوهشگر و مدرس دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)

۲. عضو هیئت علمی دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)

۳. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، مدیرکل هواشناسی استان ایلام

sirzarnd@yahoo.com

1. مقدمه

منابع آب زیرزمینی بعد از یخچال‌ها دومین منبع آب شیرین در جهان می‌باشند. در کشور ما با توجه به نوع اقلیم، منابع آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب مورد نیاز برای بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب اهمیت زیادی دارد (رفیعی و تیموری، ۲۰۲۳). در ایران، که با اقلیم خشک و نیمه‌خشک مواجه است، آب زیرزمینی نقش اساسی در تأمین نیازهای آبی ایفا می‌کند. با این حال، در سال‌های اخیر، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق کشور مشاهده شده است که ناشی از عواملی همچون مصرف بی‌رویه، تغییرات اقلیمی و کاهش بارش‌ها است. یکی از روش‌های مؤثر در ارزیابی تغییرات آب زیرزمینی، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های اقلیمی است. فرجی و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای برآورد تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در استان قزوین پرداختند. آنان از داده‌های بارش، رواناب‌های سطحی و زیرسطحی، رطوبت خاک و مدل GLDAS بهره بردند. نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های ماهواره‌ای GRACE توانایی زیادی در شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی دارند. نبوی و همکاران (۲۰۲۰) طی مطالعه‌ای به ارزیابی منابع آب زیرزمینی استان خراسان رضوی از ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ پرداختند. در این مطالعه، از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و مدل GLDAS استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بازه زمانی مورد بررسی، کاهش قابل‌توجهی در ذخیره آب زیرزمینی استان مشاهده شده است. این کاهش عمدتاً ناشی از برداشت‌های بی‌رویه آب و کاهش بارش‌ها بوده است. این تحقیق به‌ویژه بر اهمیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در پایش منابع آب زیرزمینی تأکید کرده و نشان می‌دهد که این داده‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به کار گرفته شوند. هدایت و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از محصولات ماهواره‌ای در منطقه کابل، افغانستان پرداختند. در این تحقیق، از داده‌های ماهواره‌ای سامانه GEE^۱ برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ و داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های زمینی در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۱ استفاده شد. این داده‌ها شامل پارامترهایی نظیر تبخیر-تعرق، شاخص پوشش گیاهی (EVI)، محصولات جهانی پهنه‌های آب سطحی، داده‌های ماهواره‌ای

1. Google Earth Engine

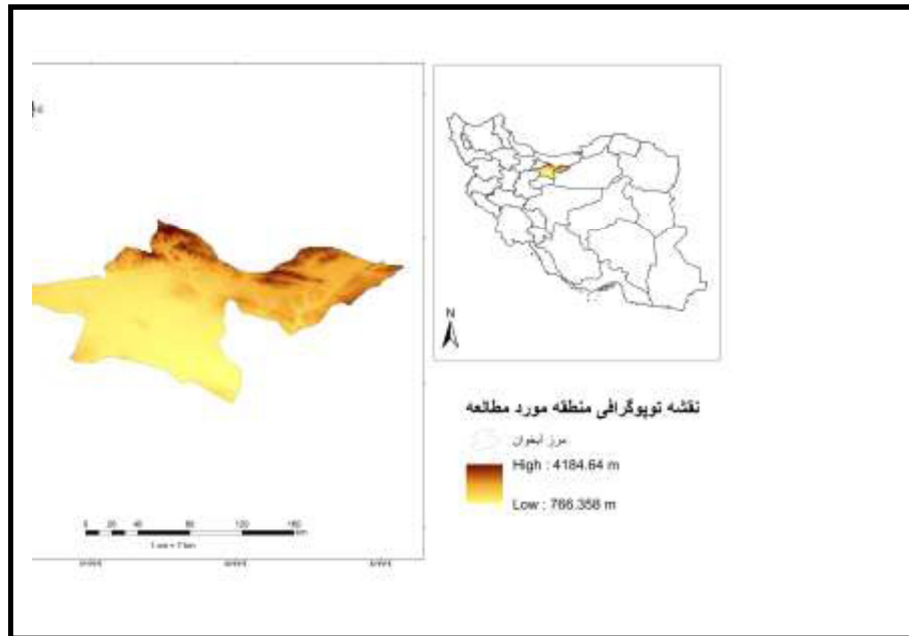
GRACE، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و Landsat 7، و همچنین داده‌های دما، رطوبت و بارندگی بودند. نتایج تحقیق نشان داد که در اکثر ماه‌های سال، روند تغییرات سطح آب زیرزمینی به طور معنی‌داری کاهشی بوده است. همچنین، کاهش مساحت پهنه‌های آب سطحی در این منطقه به دلیل عوامل طبیعی و انسانی مختلفی نظیر کاهش بارندگی، افزایش دما، افزایش تبخیر-تعرق، تغییرات در پوشش گیاهی و گسترش مناطق شهری، به ویژه در شهر کابل، قابل تبیین است. این عوامل به همراه افزایش جمعیت بهره‌بردار از منابع آبی، نقش مهمی در کاهش منابع آبی منطقه ایفا کرده‌اند. عیسی‌زاده و ارگانی (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات سطح آب سفره‌های آب زیرزمینی در حوضه دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE باند‌های JPL، GFZ و CSR پرداختند. نتایج حکایت از کاهش جدی سطح آب در سفره‌های زیرزمینی شمال و شمال‌شرق حوضه را دارد. بازیان و عمادی (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به ارزیابی تغییرات ماهانه ذخیره آب زیرزمینی زیرزمینی در غرب ایران پرداختند. آنان از مشاهدات ماهواره‌ای GRACE و GRACE-FO از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در این منطقه با نرخ متوسط سالانه منفی ۱.۱۷ سانتی‌متر کاهش یافته و همچنین کاهش سالانه ذخیره کل منابع آب (شامل آب‌های سطحی، زیرزمینی، معادل برف و رطوبت خاک) حدود ۱/۲۸- سانتی‌متر بوده است. بادکوبه‌هزاده و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به پیش‌بینی نوسانات ضخامت معادل آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی و هوش مصنوعی برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. در این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای GRACE طی بازه زمانی آوریل ۲۰۰۲ تا مارس ۲۰۱۷ استفاده شده است. برای مدل‌سازی نوسانات ضخامت معادل آب زیرزمینی، از مدل‌های ترکیبی الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA-ANN، ICA-ANN و PSO-ANN استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل ICA-ANN بهترین عملکرد را در پیش‌بینی ضخامت معادل آب زیرزمینی دارد. با توجه به مطالعات صورت گرفته، داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند ابزار موثری برای مطالعه در سطح ایران باشند. پژوهش حاضر به دنبال بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و بارش در ایران است، از نسخه جدید داده‌های ماهواره‌ای GRACE-Mascon برای ارزیابی روند تغییرات آب زیرزمینی و از داده‌های بازتحلیل‌شده

ERA5 برای تحلیل بارش‌ها استفاده شده است. هدف ما از این مطالعه تحلیل تغییرات ضخامت معادل آب زیرزمینی^۱ در استان تهران با استفاده از نسل جدید داده‌های ماهواره‌ای GRACE به نام Mascon است ما به دنبال کاهش یا افزایش روند تغییرات آب زیرزمینی برای این منطقه بودیم. برای این کار از داده‌های ماهواره‌ای بهره گرفتیم تا نقش هوش مصنوعی را در مطالعات اقلیمی تبیین کنیم. تحلیل روند تغییرات آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین ارزیابی‌ها برای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی بحران‌های آبی در مناطق مختلف است. در این پژوهش، روند بلندمدت تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در تهران طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ با استفاده از آنومالی ذخیره آب زیرزمینی GWSA بررسی شده است. داده‌های ۲GWSA از طریق ترکیب داده‌های ماهواره‌ای GRACE و مدل GLDAS برای محاسبه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس زمانی و فضایی مختلف استخراج گردید. این پژوهش به منظور ارزیابی روند بلندمدت تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در تهران طی دو دهه گذشته، از داده‌های آنومالی ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) استفاده کرده است. برای تحلیل این داده‌ها، از روش‌های آماری مختلف، از جمله رگرسیون خطی، آزمون منکندال^۳ و شیب سن ۴ بهره گرفته شد.

۲. منطقه مورد مطالعه

استان تهران به مرکزیت شهر تهران، با وسعتی حدود ۱۲،۹۸۱ کیلومتر مربع، بین ۳۴ تا ۳۶،۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۳ درجه طول شرقی واقع شده است. این استان از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از جنوب غربی به استان مرکزی، از غرب به استان البرز و از شرق به استان سمنان محدود است.

-
- 1 . Liquid Water Equivalent
 - 2 . Groundwater Storage Anomaly
 - 3 . Mann-Kendall
 - 4 . Sen's Slope



۳.۱. داده‌های GRACE و GLDAS

- ماهواره‌های GRACE برای اندازه‌گیری تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس جهانی به کار می‌روند. این ماهواره‌ها تغییرات میدان گرانشی زمین را اندازه‌گیری می‌کنند که با توجه به تغییرات ذخیره آب، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی و سطحی، تغییر می‌کند. داده‌های TWSA که توسط GRACE به‌دست می‌آید، مجموع تغییرات در ذخیره تمام منابع آبی شامل آب‌های سطحی، زیرزمینی، برف و رطوبت خاک را نشان می‌دهد.

- مدل GLDAS شامل داده‌های مرتبط با اجزای مختلف سطحی و کم‌عمق است که از جمله این اجزا می‌توان به رطوبت خاک، برف معادل آب و ذخیره آب تاج پوشش گیاهی اشاره کرد. این مدل قادر است تغییرات ذخیره آب در بخش‌های کم‌عمق‌تر از آبخوان‌ها و منابع سطحی را مدل‌سازی کند.

۲.۳. ترکیب داده‌های GRACE و GLDAS

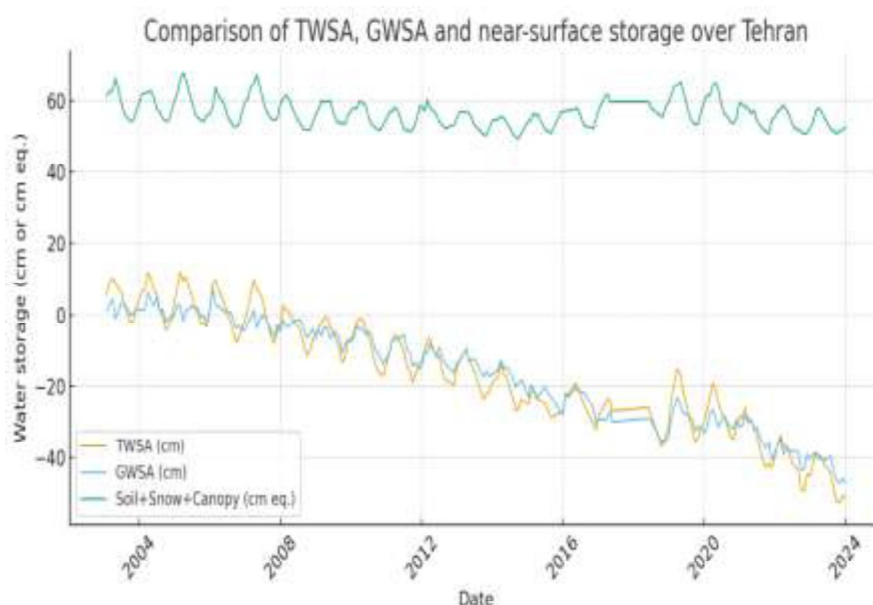
برای محاسبه GWSA، ابتدا آنومالی ذخیره کل آب زمینی (TWSA) از داده‌های GRACE به دست آمد. سپس از داده‌های مدل GLDAS برای محاسبه آنومالی اجزای سطحی و کم‌عمق استفاده شد. به عبارت دیگر، GWSA به عنوان تفاوت بین آنومالی ذخیره کل آب زمینی (TWSA) و آنومالی اجزای سطحی و کم‌عمق مدل GLDAS محاسبه می‌شود. این محاسبه نشان‌دهنده تغییرات مربوط به ذخیره آب زیرزمینی است، چرا که سایر اجزای آب (مانند رطوبت خاک، برف و تاج پوشش گیاهی) به طور جداگانه مدل‌سازی شده و از TWSA حذف می‌شوند. در شکل (۲) سه کمیت با هم مقایسه شده اند، منحنی TWSA و GWSA بسیار شبیه هم هستند، اما GWSA کمی پایین‌تر است؛ یعنی سهم مخازن سطحی در مقایسه با آب زیرزمینی کوچکتر و نوسان‌دارتر است. منحنی مولفه‌های مخازن سطحی در محدوده حدود ۵۵-۶۵ سانتی‌متر نوسان می‌کند و روند بلندمدت خیلی قوی مانند GWSA ندارد؛ بیشتر رفتار فصلی/سالانه نشان می‌دهد. این مقایسه تأیید می‌کند که روند نزولی بلندمدت عمدتاً مربوط به آب زیرزمینی است و نه رطوبت خاک یا برف.

$$GWSA = TWSA - (SM + SWE + Canopy) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این فرمول:

- TWSA: آنومالی ذخیره کل آب زمینی حاصل از داده‌های GRACE
- SM: آنومالی رطوبت خاک حاصل از مدل GLDAS

- SWE: آنومالی برف معادل آب حاصل از مدل GLDAS
- Canopy: آنومالی ذخیره آب تاج پوشش گیاهی حاصل از مدل GLDAS



شکل ۲. مقایسه GWSA و TWSA با مولفه های مخازن سطحی

۴. روش کار:

برای بررسی تغییرات زمانی ذخیره آب زیرزمینی در محدوده تهران، از ترکیب داده های ماهواره ای GRACE/GRACE-FO و داده های مدل GLDAS استفاده شد. ماهواره های GRACE (2002–2017) و GRACE-FO (2018–present) قادرند تغییرات جرم سطح زمین را در مقیاس های بزرگ اندازه گیری کنند. این تغییر جرم، عمدتاً ناشی از تغییرات ذخیره آب در چرخه هیدرولوژیک است. محصول Mascon این ماهواره، مقدار آنومالی ذخیره کل آب زمینی (TWSA₁) را به صورت ضخامت معادل آب ۱ در واحد سانتی متر برای هر

1. Terrestrial Water Storage Anomaly

ماه تولید می‌کند. این کمیت نشان‌دهنده‌ی میزان افزایش یا کاهش ذخیره آب در هر ماه نسبت به یک میانگین بلندمدت است. با این وجود، GRACE قادر به تفکیک سهم مخازن مختلف هیدرولوژیک از یکدیگر نیست؛ به عبارت دیگر، TWSA شامل مجموع تغییرات رطوبت خاک، برف، آب تاج پوشش گیاهی، آب سطحی و آب زیرزمینی است. بنابراین برای جدا کردن مؤلفه آب زیرزمینی، لازم است سهم مخازن سطحی و کم عمق از مقدار کل تفکیک و حذف شود.

به منظور برآورد سهم این مخازن، از داده‌های مدل GLDAS نسخه V2.1 با قدرت تفکیک مکانی ۰٫۲۵ درجه استفاده شد که شامل چهار لایه رطوبت خاک (۰-۱۰، ۱۰-۴۰، ۴۰-۱۰۰ و ۱۰۰-۲۰۰ سانتی‌متر)، برف معادل آب ۳ و ذخیره آب تاج پوشش گیاهی است. تمام این اجزا در GLDAS در واحد kg/m^2 ارائه می‌شوند که تقریباً معادل میلی‌متر آب هستند. از آنجا که واحد TWSA در GRACE سانتی‌متر است، به منظور انجام تفاضل مستقیم، ابتدا مقدار TWSA با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$1 \text{ kg/m}^2 \approx 1 \text{ cm water} \quad \text{رابطه (۲)}$$

برای تعیین سهم واقعی آب سطحی و کم عمق در هر ماه، ابتدا میانگین بلندمدت هر یک از اجزای GLDAS (رطوبت خاک چهار لایه، SWE و آب تاج پوشش گیاهی) در کل دوره محاسبه شد. این میانگین، مبنایی برای تعیین آنومالی اجزای سطحی-خاکی قرار گرفت. سپس برای هر ماه، مقدار این اجزا نسبت به میانگین بلندمدتشان انحراف‌گیری شد تا تأثیر چرخه‌های فصلی و نوسانات کوتاه‌مدت حذف شود. این مقدار به صورت زیر تعریف شد:

$$S \text{ Anom} - TWSA \text{ kg/m}^2 = GWSA \quad \text{رابطه (۳)}$$

- 1 . Liquid Water Equivalent Thickness
- 2 . Soil Moisture
- 3 . Snow Water Equivalent

که در آن S_{anom} نشان‌دهنده آنومالی مجموع مؤلفه‌های رطوبت خاک، SWE و آب تاج پوشش گیاهی در واحد kg/m^2 است. پس از محاسبه آنومالی سطحی، آنومالی ذخیره آب زیرزمینی با کم کردن سهم مؤلفه‌های سطحی از مقدار $TWSA$ به‌دست آمد.

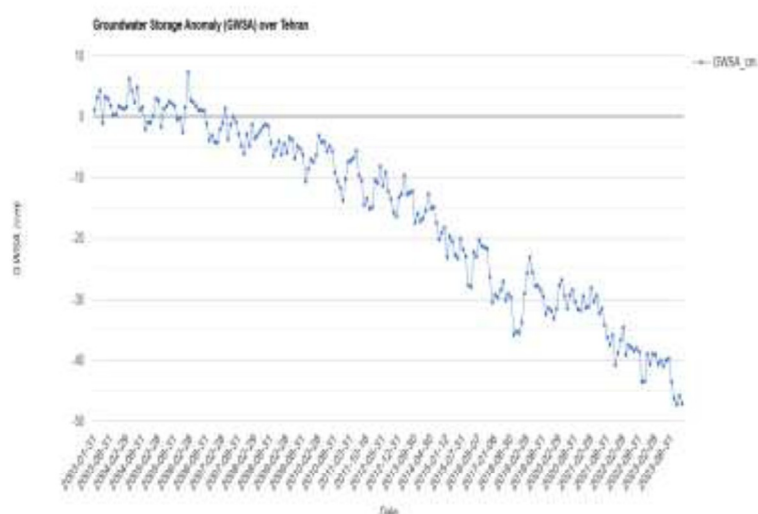
$$GWSA = TWSA - S_{anom} \quad \text{رابطه (۴)}$$

به‌منظور تسهیل تفسیر نتایج، مقدار $GWSA$ دوباره به واحد سانتی‌متر ضخامت معادل آب تبدیل شد. این روش در مطالعات هیدرولوژیکی به‌عنوان یکی از بهترین روش‌ها برای برآورد تغییرات آب زیرزمینی در مقیاس‌های منطقه‌ای و حوضه‌ای استفاده می‌شود، زیرا $GRACE$ قادر است تأثیر برداشت‌های انسان‌ساخت و تغییرات اقلیمی بر منابع آب را در مقیاس بزرگ به‌صورت مستقیم آشکار کند. در این مطالعه، برای هر ماه، میانگین مکانی مقدار $TWSA$ روی مرز تهران محاسبه شد. خروجی نهایی یک سری زمانی چنددهه‌ساله از آنومالی آب زیرزمینی در مقیاس حوضه‌ای تهران است. این سری زمانی سپس برای بررسی روند، نوسانات بین‌سالانه، و تحلیل اثر عوامل مختلف هیدرولوژیکی و انسان‌ساخت استفاده می‌شود.

۴. یافته‌ها:

نودار سری زمانی $GWSA$ نوسانات فصلی و بین‌سالانه را نشان می‌دهد (شکل ۳) که در کل یک روند نزولی واضح دارد. این الگو معمولاً ناشی از برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی، افزایش فشار تقاضای آب در بخش شهری و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان است. رفتار مقادیر $GWSA$ در سال‌های اولیه دوره (۲۰۰۳ تا حدود ۲۰۰۸) نزدیک به صفر یا مثبت بوده و بیانگر وضعیت نسبتاً متعادل آبخوان است؛ اما از حدود سال ۲۰۱۰ به بعد، مقادیر $GWSA$ وارد محدوده منفی شده و با سرعتی یکنواخت و شتاب‌گیرنده کاهش یافته‌اند. در سال‌های پایانی دوره (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳) مقدار $GWSA$ به بیش از ۴۰ سانتی‌متر منفی رسیده که نشانه کاهش شدید ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس گسترده است. این نتایج مجموعاً نشان می‌دهند که آبخوان تهران

در وضعیت فروکاهشی شدید و مستمر قرار دارد و رفتار آن مستقیماً نشان‌دهنده برداشت بیش‌ازحد و عدم تعادل ورودی-خروجی در سیستم هیدرولوژیک منطقه است. این یافته‌ها می‌توانند پایه‌ای برای مطالعات بیشتر درباره اثرات فرونشست، مدیریت منابع آب، و برنامه‌ریزی بلندمدت شهری باشند.



باشند.

شکل ۳. نمودار سری زمانی GWSA برای تهران از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳

به‌منظور ارزیابی روند تغییرات آب زیرزمینی در محدوده تهران، آنومالی ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) طی دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ محاسبه و با استفاده از روش رگرسیون خطی تحلیل شد. داده‌های GWSA حاصل از تفاضل آنومالی ذخیره کل آب زمینی (TWSA) ماهواره GRACE از آنومالی اجزای سطحی و کم‌عمق مدل GLDAS بوده و بنابراین بیانگر تغییرات آب زیرزمینی در مقیاس معادل ضخامت آب هستند. به‌منظور بررسی روند بلندمدت، مقادیر ماهانه GWSA به‌صورت سری زمانی مرتب شده و سپس رگرسیون خطی با روش کمترین

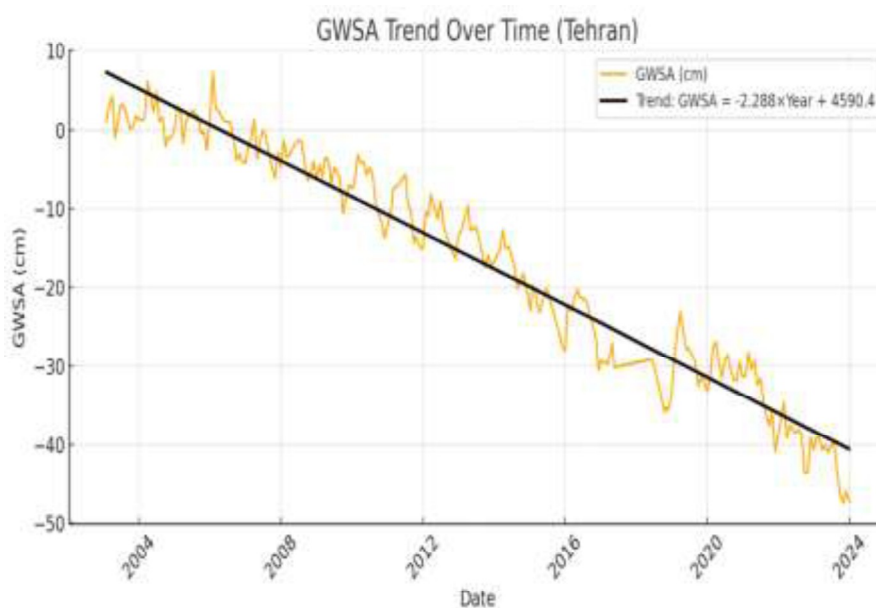
مربعات (OLS) بین مقدار GWSA به عنوان متغیر وابسته و زمان (بر حسب سال) به عنوان متغیر مستقل اعمال شد. نتایج تحلیل آماری، نشان می‌دهد که شیب خط روند برابر با ۲,۲۸ سانتی‌متر کاهش در سال است. این مقدار به معنای افت سالانه ذخیره آب زیرزمینی و کاهش مداوم آبخوان تهران است (شکل ۴) با توجه به دوره تقریباً بیست‌ساله تحلیل، کاهش تجمعی حاصل برابر با ۴۷,۸۵ سانتی‌متر برآورد شده است؛ به بیان دیگر، طی این دوره ارتفاع ستون معادل آب ذخیره‌شده در آبخوان تهران تقریباً نیم متر کاهش یافته است. این مقدار افت، در مقیاس حجمی، به معنای کاهش قابل توجه ذخایر زیرزمینی شهر تهران است و اهمیت بحران آب را به صورت کمی نشان می‌دهد.

معادله خط روند به صورت زیر به دست آمد:

$$\text{GWSA} = -2.288 \times \text{Year} + 4590.4 \quad \text{رابطه (۵)}$$

که یک بیان ریاضی از سرعت و جهت تغییرات آب زیرزمینی است. علامت منفی شیب نشان‌دهنده کاهش مداوم آب‌های زیرزمینی است. ضریب همبستگی خطی ($R = -0.977$) نشان‌دهنده وجود رابطه بسیار قوی، پایدار و منفی بین زمان و مقدار GWSA است. این مقدار به وضوح بیان می‌کند که بیش از ۹۵٪ تغییرات آب زیرزمینی توسط روند خطی قابل توضیح است و نقش نویز یا عوامل تصادفی در آن بسیار ناچیز بوده است. مقدار p-value مربوط به آزمون معنی‌داری شیب روند نیز برابر با (3.25×10^{-149}) گزارش شد که از نظر آماری تقریباً صفر است. چنین مقدار بسیار کوچکی ($p < 0.001$) بیانگر آن است که احتمال وقوع چنین روندی به صورت تصادفی عملاً وجود ندارد و روند نزولی مشاهده‌شده با اطمینان ۱۰۰ درصد واقعی و معنادار است. همچنین مقدار بسیار کوچک خطای استاندارد ($\text{Std Error} = 0.033$) نشان می‌دهد که برآورد شیب روند از دقت و استحکام بالایی برخوردار است و نوسانات کوتاه‌مدت تأثیر قابل توجهی بر تخمین روند بلندمدت نداشته‌اند.

شکل ۴. نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی تهران از ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳



۱.۴. آزمون منکندال و شیب سن

برای ارزیابی روند بلندمدت تغییرات آب زیرزمینی در تهران، علاوه بر تحلیل رگرسیون خطی، از دو آزمون ناپارامتری مهم و پرکاربرد در مطالعات هیدرولوژیکی یعنی آزمون مان-کندال^۱ و برآورد گر شیب سن^۲ استفاده شد. این دو روش به صورت گسترده در تحلیل روند داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی توصیه می‌شوند، زیرا در برابر داده‌های پرت، توزیع‌های غیرنرمال و نوسانات فصلی عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش‌های پارامتری دارند. آزمون منکندال برای تشخیص وجود روند یکنواخت (صعودی یا نزولی) در سری‌های زمانی استفاده می‌شود و ویژگی‌های برجسته‌ای دارد؛ مستقل از توزیع داده‌ها، مقاوم در برابر داده‌های پرت و نویز، مناسب برای داده‌های هیدرولوژیکی با نوسانات فصلی، بدون نیاز به فرض نرمال بودن داده‌ها. از این رو، برای تحلیل روند GWSA بسیار مناسب است؛ زیرا این داده‌ها تحت تأثیر نوسانات فصلی و سالانه بوده و توزیع آنها الزاماً نرمال نیست. آزمون با محاسبه آماره S آغاز می‌شود. این مقدار بر اساس مقایسه تک‌تک مقادیر سری زمانی با یکدیگر به دست می‌آید. مقدار

1. Mann-Kendall Test
2. Sen's Slope Estimator

نشریات علمی دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه‌السلام)

مثبت S نشان‌دهنده روند افزایشی و مقدار منفی S نشان‌دهنده روند کاهشی است. نتایج این آزمون نشان داد که آماره S مقدار بسیار بزرگ و منفی داشته و آماره استاندارد شده Z برابر با $-۱۹,۲۸$ محاسبه شده است. چنین مقدار بزرگی از $|Z|$ به‌وضوح نشان‌دهنده وجود روند قوی، یک‌جهته و پایدار در سری زمانی است. مقدار p -value متناظر با این Z بسیار کوچک‌تر از $۱۰^{-۸۵}$ بوده و عملاً معادل صفر است. این نتیجه به این معناست که احتمال آن‌که چنین روندی در اثر نوسانات تصادفی ایجاد شده باشد تقریباً صفر بوده و می‌توان با اطمینان کامل وجود روند منفی در سری زمانی GWSA را پذیرفت. برآورد شیب سن (Sen's Slope) به‌عنوان یک روش غیرپارامتری مقاوم در برابر داده‌های پرت نیز انجام شد تا اندازه روند بدون وابستگی به مدل رگرسیون مشخص شود. مقدار به‌دست‌آمده برای شیب سن برابر با $-۲,۲۶$ سانتی‌متر در سال است که به‌طور شگفت‌انگیزی با شیب رگرسیون خطی $(-۲,۲۹)$ سازگار است. این سازگاری نشان می‌دهد که روند کاهشی مشاهده‌شده یک ویژگی ساختاری و واقعی در سری زمانی است و به‌هیچ‌وجه ناشی از انتخاب روش تحلیل، مدل‌سازی یا وجود چند نقطه پرت نیست. چنین همگرایی بین روش‌های پارامتری و غیرپارامتری، از قوی‌ترین شواهد موجود درباره پایداری روند و مشخصه یک سری زمانی با رفتار روندی غالب است.

رابطه (۶)

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

که n تعداد مشاهدات سری، و x_j و x_k به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری می‌باشند. تابع

علامت sgn نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\text{for } (x_j - x_k) > 0 \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = +1$$

$$\text{for } (x_j - x_k) = 0$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = 0$$

$$\text{for } (x_j - x_k) < 0$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = -1$$

در مرحله بعد محاسبه واریانس S توسط یکی از روابط زیر محاسبه شد:

$$\text{for } n > 10 \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18}$$

$$\text{for } n < 10 \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

که n و m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t

نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله (تعداد گره‌ها) می‌باشد. در نهایت نیز

آماره Z به کمک یکی از روابط زیر استخراج می‌شود:

$$\text{for } S > 0 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}$$

$$z = 0 \quad \text{for } S = 0$$

$$z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{for } S < 0$$

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر برقرار باشد:

(۱۱)

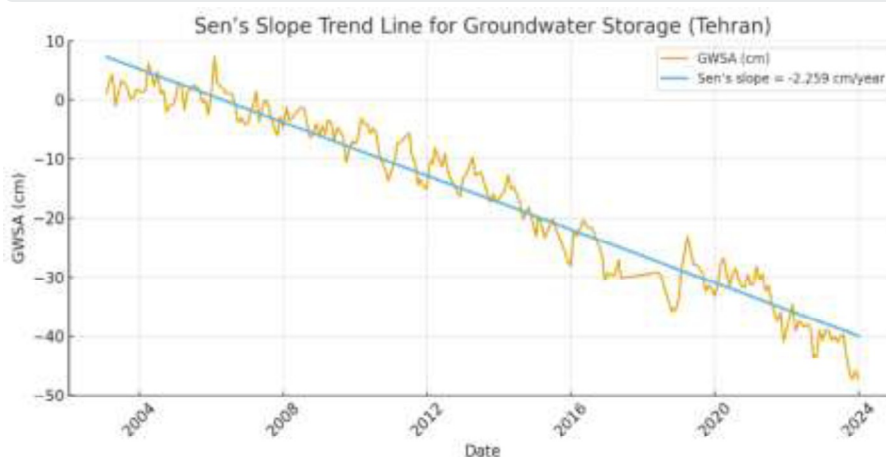
رابطه

$$|Z| < Z_{\alpha/2}$$

که α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری α می‌باشد که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، $\alpha/2$ استفاده شده است. در بررسی حاضر این آزمون برای سطوح اعتماد ۹۵٪ و ۹۹٪ به کار گرفته شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۰).

نمودار سن روند بلندمدت تغییرات آنومالی ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) در تهران را طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ به صورت دقیق، مقاوم و مستقل از داده‌های پرت نمایش می‌دهد (شکل ۵). در این نمودار، خط نارنجی مقادیر واقعی GWSA را در طول زمان نشان می‌دهد که بیانگر نوسانات ماهانه و فصلی آب زیرزمینی است، در حالی که خط سیاه ضخیم، خط روند سن اسلوپ را نشان می‌دهد که بر اساس روش غیرپارامتری سن و با استفاده از محاسبه شیب بین تمام زوج‌های ممکن نقاط سری زمانی محاسبه شده است. مقدار شیب این خط برابر $-۲/۲۵۹$ سانتی‌متر در سال است که نشان می‌دهد آبخوان تهران به طور متوسط سالانه بیش از دو سانتی‌متر از ذخیره خود را از دست داده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار GWSA در ابتدای دوره (۲۰۰۳-۲۰۰۵) نزدیک صفر و حتی در برخی ماه‌ها مثبت بوده است؛ اما با گذشت زمان، کاهش‌های مداوم و پیوسته مشاهده می‌شود. خط روند سن نشان می‌دهد که این کاهش‌ها تصادفی یا وابسته به نوسانات کوتاه‌مدت نیستند، بلکه یک روند ساختاری و بلندمدت در داده‌ها وجود دارد که در طول زمان تقریباً خطی و پایدار باقی مانده است. انطباق بالای خط شیب سن با الگوی کلی داده‌ها نشانه‌ای از این است که اثرات انسانی بر آبخوان تهران در طول زمان ثابت یا حتی تشدید شده و این کاهش ناشی از یک تغییر موقتی یا نوبتی در شرایط آب و هوایی نیست. یکی از نکات

مهمی که از این نمودار می‌توان برداشت کرد، افزایش دامنه نوسانات منفی در سال‌های پایانی دوره است. به‌ویژه از سال ۲۰۱۶ به بعد، افت ناگهانی‌تر و مقادیر GWSA پایین‌تر مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد شدت برداشت آب زیرزمینی افزایش یافته یا میزان تغذیه طبیعی کاهش پیدا کرده است. این امر باعث شده که مقدار GWSA در سال‌های پایانی دوره به مقادیری حدود ۴۰ تا ۴۵ سانتی‌متر منفی برسد که کاهش چشمگیری در ذخیره واقعی آبخوان محسوب می‌شود. نکته کلیدی این است که روش سن نسبت به داده‌های پرت، نویز سری زمانی و رفتار غیرنرمال حساسیت کمتری دارد. از آنجا که خط سن اسلوب با شیب ثابت و منفی قوی تقریباً تمام نوسانات کوتاه‌مدت را هموار کرده و ساختار بلندمدت را استخراج کرده است، می‌توان نتیجه گرفت که روند کاهش آب زیرزمینی تهران طی دو دهه گذشته کاملاً پایدار، معنی‌دار، و غیرتصادفی بوده است. این نتیجه با نتایج آزمون منکندال، رگرسیون خطی و p -value بسیار کوچک مطابقت دارد و همگی روند منفی شدید را تأیید می‌کنند. بنابراین، نمودار شیب سن نه تنها مقدار عددی روند را به‌صورت دقیق نشان می‌دهد، بلکه به‌صورت تصویری نیز نگرانی از وضعیت آبخوان را برجسته می‌کند. خط روند با شیب منفی یکنواخت نشان می‌دهد که منابع آب زیرزمینی تهران طی ۲۰ سال گذشته در مسیر تخلیه مداوم قرار داشته‌اند و روند کاهش آن‌ها به شکلی پایدار ادامه یافته است. این روند سازگار با تغییرات اقلیمی کوتاه‌مدت قابل توجه نیست و به‌وضوح نشان‌دهنده اثرات فزاینده برداشت‌های انسان‌ساخت از آبخوان است.

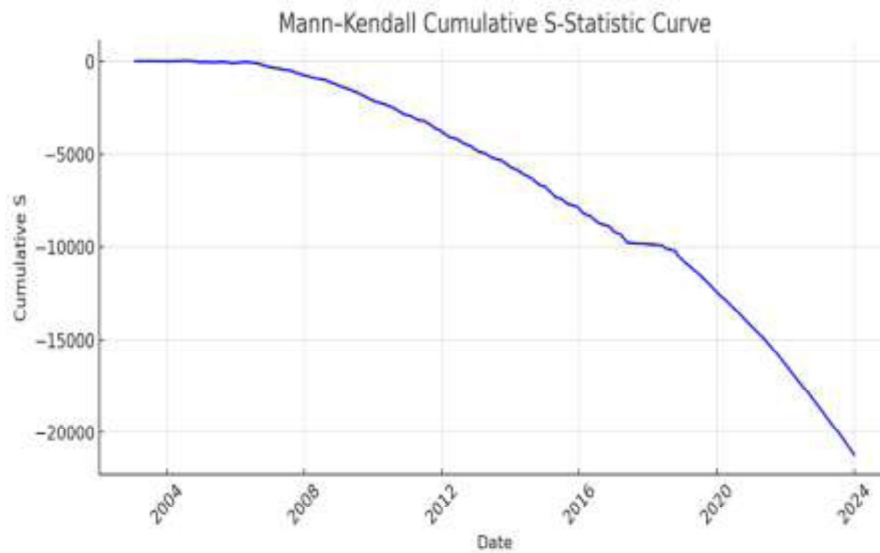


شکل ۵. نمودار شیب سن برای روند آب زیرزمینی تهران

نمودار تجمعی آماره S حاصل از آزمون منکندال روند بلندمدت تغییرات آنومالی ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) در تهران را در دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ به صورت دقیق و غیرپارامتری نشان می‌دهد. در این نمودار، مقدار S به صورت تجمعی در طول زمان محاسبه شده است و محور عمودی آن هیچ واحد فیزیکی ندارد، بلکه بیانگر میزان غالب بودن افزایش‌ها یا کاهش‌ها در سری زمانی است. هر بار که مقدار جدید GWSA نسبت به مقادیر قبلی کاهش داشته باشد، مقدار S کاهش می‌یابد و اگر افزایش باشد، S افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، شکل منحنی تجمعی S شاخصی بسیار قدرتمند برای نمایش تصویری ساختار روند در داده‌هاست. منحنی این نمودار از ابتدای دوره تقریباً با مقداری نزدیک صفر شروع می‌شود و در چند سال نخست (۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷) رفتار نسبتاً مسطحی دارد، که نشان‌دهنده نبود تغییرات شدید در این دوره و ثبات نسبی وضعیت آب زیرزمینی است. اما از حدود سال ۲۰۰۸ به بعد، منحنی وارد شیب منفی ملایمی می‌شود و به وضوح نشان می‌دهد که تعداد موارد کاهش GWSA نسبت به موارد افزایش بیشتر شده است. این تغییرات بیانگر آغاز روند کاهشی آب زیرزمینی در این دوره است. با ورود به دهه دوم دوره آماری مورد مطالعه، به‌ویژه از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۶، شیب نزولی منحنی S بسیار منظم‌تر و سریع‌تر می‌شود. این الگوی یکنواخت نشان می‌دهد که روند کاهش ذخیره آب زیرزمینی نه تنها آغاز شده، بلکه با سرعت در حال تداوم است. ساختار پیوسته و

بدون نوسان این بخش از منحنی نشان می‌دهد که کاهش‌ها نسبت به افزایش‌ها با یک ریتم پایدار غالب بوده‌اند، چیزی که در آزمون منکندال به‌عنوان نشانه‌ای از روند یکنواخت^۱ شناخته می‌شود. در سال‌های پایانی دوره، از حدود ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، شیب منحنی به‌صورت قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند و نمودار با یک سقوط عمیق به سمت مقادیر منفی حرکت می‌کند. این شیب تند نشان می‌دهد که شدت افت آب زیرزمینی در این دوره به مراتب بیشتر از سال‌های پیش بوده است و تقریباً تمامی مقادیر GWSA نسبت به مقادیر قبلی کاهش بیشتری را ثبت کرده‌اند. مقدار نهایی S که به حدود ۲۱۰۰۰- رسیده است، بسیار بزرگ و منفی است و از نظر آماری نشان‌دهنده یک روند کاهشی شدید، قطعی و با احتمال بسیار بالا غیرتصادفی است. ماهیت بدون واحد محور عمودی این نمودار و رفتار تجمعی آن باعث می‌شود که این نوع نمودار یکی از شفاف‌ترین روش‌ها برای نمایش روندهای هیدرولوژیکی باشد، زیرا مستقل از مقیاس داده‌هاست و تنها بر اساس تعداد افزایش‌ها و کاهش‌ها عمل می‌کند. یکنواختی شکل منحنی و نبود فازهای افزایشی پایدار در کل دوره مطالعه نشان می‌دهد که آبخوان تهران در طول دو دهه اخیر از هیچ دوره احیای قابل توجهی برخوردار نبوده و روند کاهش ذخیره آن به‌طور مستمر تشدید شده است. به‌طور خلاصه، نمودار شیب سن نشان می‌دهد که روند کاهشی ذخیره آب زیرزمینی تهران نه تنها وجود دارد، بلکه پیوسته، قوی، یکنواخت و کاملاً معنی‌دار است. این نمودار یکی از قوی‌ترین شواهد بصری برای تأیید تحلیل‌های آماری انجام‌شده شامل Z-value بسیار بزرگ منفی و p-value تقریباً صفر به‌شمار می‌آید و نشان می‌دهد که فرآیند افت آب زیرزمینی یک پدیده پایدار و ساختاری بوده و ناشی از برداشت‌های مداوم و بیش از حد انسان‌ساخت است، نه نوسانات کوتاه‌مدت اقلیمی یا خطاهای تصادفی داده‌ها.

^۱ monotonic trend



شکل ۶. نمودار منکندال برای انومالی تغییرات آب زیرزمینی تهران

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، روند بلندمدت تغییرات ذخیره آب زیرزمینی آبخوان تهران طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE/GRACE-FO و مدل GLDAS و به‌کارگیری روش‌های آماری پارامتری و ناپارامتری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از سری زمانی آنومالی ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) به‌صورت شفاف و همگرا نشان داد که آبخوان تهران در طول دو دهه گذشته با یک روند کاهشی شدید، یکنواخت و پایدار مواجه بوده است. تحلیل رگرسیون خطی حداقل مربعات نرخ کاهش سالانه‌ای در حدود $-2,28$ سانتی‌متر در سال را نشان داد که منجر به افت تجمعی نزدیک به 48 سانتی‌متر در ذخیره معادل آب زیرزمینی طی دوره مطالعه شده است. مقدار بسیار بالای ضریب همبستگی و p -value تقریباً صفر، بیانگر معناداری آماری بسیار قوی این روند و غیرتصادفی بودن آن است. نتایج آزمون ناپارامتری منکندال نیز با آماره Z بزرگ و منفی $(-19,28)$ و سطح اطمینان 99 درصد، وجود یک روند نزولی یکنواخت و قطعی را تأیید نمود. همچنین، برآوردگر شیب سن با مقدار $-2,26$ سانتی‌متر در سال، همخوانی بسیار نزدیکی با نتایج رگرسیون خطی داشت که نشان‌دهنده ساختاری

و واقعی بودن روند کاهش، مستقل از داده‌های پرت و نوسانات کوتاه‌مدت است. بررسی تطبیقی مؤلفه‌های سطحی GLDAS با TWSA نشان داد که سهم مخازن سطحی و کم‌عمق عمدتاً دارای نوسانات فصلی بوده و روند بلندمدت قوی مشاهده‌شده تقریباً به‌طور کامل به تخلیه آب زیرزمینی نسبت داده می‌شود. این امر بیانگر عدم تعادل جدی در بیلان هیدرولوژیک منطقه و غلبه برداشت‌های انسان‌ساخت بر فرآیندهای تغذیه طبیعی آبخوان است. تشدید افت ذخیره آب زیرزمینی در سال‌های پایانی دوره مطالعه نیز حاکی از افزایش فشار تقاضای آب و کاهش تاب‌آوری سیستم هیدرولوژیک تهران است. در مجموع، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که آبخوان تهران در وضعیت بحرانی قرار داشته و روند فعلی، در صورت تداوم، می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری نظیر تشدید فرونشست زمین، کاهش کیفیت آب زیرزمینی و تهدید امنیت آبی کلان‌شهر تهران را به‌دنبال داشته باشد. از این‌رو، نتایج این مطالعه بر ضرورت فوری اصلاح بازنگری در سیاست‌های مدیریت منابع آب، کنترل و کاهش برداشت‌های بی‌رویه، تعیین و اجرای حقایق‌های زیست‌محیطی و استفاده از ابزارهای پایش ماهواره‌ای به‌عنوان سامانه هشدار زودهنگام تأکید می‌کند. به‌کارگیری مستمر داده‌های ماهواره‌ای در کنار تحلیل‌های آماری می‌تواند نقش مهمی در تصمیم‌سازی علمی و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور ایفا کند. با توجه به روند نزولی شدید، پایدار و معنادار ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان تهران که در این پژوهش به‌طور کمی و آماری تأیید شد، اتخاذ راهبردهای مدیریتی فوری، علمی و یکپارچه ضروری است. مهم‌ترین پیشنهاد‌های مدیریتی حاصل از این مطالعه به شرح زیر ارائه می‌شود:

- کنترل و کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی از طریق بازنگری در پروانه‌های بهره‌برداری و انسداد چاه‌های غیرمجاز
- تدوین و اجرای برنامه جامع مدیریت پایدار آبخوان تهران مبتنی بر ظرفیت واقعی تجدیدپذیری
- تعیین حد آستانه بحرانی افت آب زیرزمینی و اعمال محدودیت‌های مدیریتی در صورت عبور از این آستانه

-توسعه و تقویت طرح‌های تغذیه مصنوعی آبخوان با استفاده از رواناب‌های سطحی و سیلاب‌های شهری

-استفاده نظام‌مند از داده‌های ماهواره‌ای GRACE/GRACE-FO و مدل‌های بازتخلیل در پایش مستمر منابع آب زیرزمینی

-استقرار سامانه هشدار زودهنگام افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین بر پایه داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های آماری

-کاهش فشار تقاضای آب در بخش‌های شهری و کشاورزی از طریق اصلاح الگوی مصرف و به‌کارگیری فناوری‌های کم‌مصرف

-افزایش استفاده از پساب تصفیه‌شده به‌عنوان منبع جایگزین برای مصارف غیرشرب و فضای سبز شهری

-همسوسازی برنامه‌ریزی توسعه شهری و جمعیتی تهران با محدودیت‌های منابع آب زیرزمینی
-یکپارچه‌سازی مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در سطح حوضه‌ای به‌جای مدیریت بخشی
-توجه ویژه به ارتباط افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین در تصمیم‌گیری‌های زیرساختی و عمرانی

-حمایت از پژوهش‌های تلفیقی داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌سازی هیدرولوژیک و هوش مصنوعی برای پیش‌بینی آینده آبخوان

در مجموع، اجرای هم‌زمان این پیشنهادها می‌تواند گامی مؤثر در جهت مهار روند تخلیه آبخوان تهران، افزایش تاب‌آوری منابع آب زیرزمینی و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از بحران آب در این کلان‌شهر باشد.

۶. منابع

۱. Rafiei, M., & Zarei Teymouri, M. (2023). Relationship between groundwater quality and precipitation in Saveh Plain from 2017 to 2019. *Journal of Hydrology and Environment*, 11(1). <https://doi.org/10.22037/jhf.v11i1.42590>. [In Persian]
۲. Faraji, Z., Kaviani, A., & Ashrafzadeh, A. (2017). Assessment of GRACE satellite data for estimating the groundwater level changes in Qazvin province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(2), 463–476. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.61482>. [In Persian]
۳. Noboui, S. N., & Alizadeh, A. (2020). Evaluation of groundwater resources using satellite gravity data: A case study of Khorasan Razavi Province. *Journal of Geographical Research*, 14(3), 11-8. <https://doi.org/20.1001.1.20087942.1399.14.3.11.8>. [In Persian]
۴. Mann, H.B., 1945, Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13: 245-259
۵. Hedayat, S., Ebrahimi Khoshfi, M., Omidvar, K., & Sharifi Pichon, M. (2023). *Investigating the factors* affecting changes in surface and groundwater resources using satellite products: A case study of Kabul, Afghanistan. *Journal of Water and Soil Dynamics*, 11(1), 2312-1291. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i1.2312-1291>. [In Persian]
۶. Bazian, S., & Emadi, S. R. (2024). Assessment of underground water resources in western Iran using GRACE and GRACE-FO satellite observations from 2002 to 2021. *Hydrophysics*, 9(2), 81-88. <https://doi.org/10.1001/1.24767131.1402.9.2.7.4>. [In Persian]
۷. Issazadeh, V., & Argany, M. (2021). Changes in water surface of aquifers using GRACE satellite data in the Google Earth Engine: A study of the Urmia Lake Watershed from 2002 to 2017. *Journal of Town & Country Planning*, 13(1), 193-214. <https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.304748.670127>. [In Persian]
۸. Badkoubeh-Hazaveh, M., Najarchi, M., Jalali, M. R., Mazaheri, H., & Shabankolayi, S. (2024). Predicting variations in groundwater equivalent thickness using satellite data and a combination of optimization algorithms and artificial intelligence. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(4), 569-586. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.367628.669601>. [In Persian]
۹. Safaei, V., Zarrin, A., Mosaedi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2025). Intensifying droughts and their relationship with temperature and precipitation extremes in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05663-0>. [In Persian]
۱۰. Hassler, B., & Lauer, A. (2021). Comparison of reanalysis and observational precipitation datasets including ERA5 and WFDE5. *Atmosphere*, 12(11), 1462. <https://doi.org/10.3390/atmos12111462>
۱۱. Wiese, D. N., Yuan, D.-N., Boening, C., Landerer, F. W., & Watkins, M. M. (2023). JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height JPL RL06.3Mv04 (Version RL06.3Mv04). PO.DAAC. <https://doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ634>
۱۲. Kendall, M.G., 1970, Rank Correlation Methods, 2nd Ed., New York: Hafner.