Scientific journal of Intelligence Horizons

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

Hamidreza Sadeghi*, Muslim Derikvand, Sirous Naderi

۸
Year 1
Winter1404

Research paper

:Date received
۱٤۰٤/۰۵/۰۷
:Date accepted
۱٤۰٤/۰۶/۲۶
Pages: 101-122

Auantitative 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

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

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

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

نشریه علمی آفاق اطلاعات

تقییم اتجاه انخفاض مخزون المیاه الجوفیۀ فی طبقۀ المیاه الجوفیۀ فی طهران باستخدام بیانات الأقمار الصناعیۀ والتحلیلات الإحصائیۀ

حمیدرضا صادقی[1]*، مسلم دریکوند، [2]سیروس نادری[3]

۸
نته الثانیه
الشتاء ۱٤۰٤
ورقۀ بحثیۀ
تاریخ الاستلام:
۱٤۰٤/۰۵/۰۷
تاریخ القبول:
۱٤۰٤/۰۶/۲۶
الصفحات: ۱۲۲-۱۰۱

ملخص

أُجری تقییم کمی للاتجاه طویل الأجل لتغیرات مخزون المیاه الجوفیۀ فی طبقۀ المیاه الجوفیۀ فی طهران باستخدام بیانات الأقمار الصناعیۀ والتحلیلات الإحصائیۀ خلال الفترۀ من ۲۰۰۳ إلی ۲۰۲۳. حُسب شذوذ مخزون المیاه الجوفیۀ (GWSA) من الفرق بین شذوذ إجمالی مخزون المیاه الجوفیۀ (TWSA) المُستمد من مهمۀ GRACE/GRACE-FO ومکونات سطح نموذج GLDAS. ولتحلیل الاتجاه، استُخدم الانحدار الخطی للمربعات الصغری، واختبار مانکیندال غیر البارامتری لفحص دلالۀ الاتجاه، ومُقدّر میل العمر لتقدیر مقدار میل الاتجاه. تُظهر النتائج وجود اتجاه تنازلی قوی بدرجۀ عالیۀ من الثقۀ الإحصائیۀ فی السلسلۀ الزمنیۀ لشذوذ مخزون المیاه الجوفیۀ. أکد اختبار مانکیندال، بقیمۀ إحصائیۀ Z تساوی -۱۹,۲۸ وقیمۀ احتمالیۀ تساوی صفرًا، وجود اتجاه تنازلی منتظم عند مستوی ثقۀ ۰,۹۹. وأظهر مُقدّر میل العمر میلًا قدره -۲,۲۶ سم/سنۀ، وهو ما یتوافق بشکل کبیر مع تقدیر الانحدار الخطی، مما یشیر إلی أن هذا الاتجاه حقیقی وبنیوی، ومستقل عن القیم الشاذۀ. وتُشیر النتائج بقوۀ إلی النضوب المستمر والمتسارع لخزان طهران الجوفی خلال العقدین الماضیین. ویُشیر هذا الاتجاه الخطی الثابت إلی اختلال فی التوازن الهیدرولوجی، ویکشف عن الوضع الحرج لاحتیاطیات المیاه الجوفیۀ فی هذه المحافظۀ. وتُؤکد هذه الدراسۀ علی الحاجۀ المُلحۀ لمراجعۀ سیاسات إدارۀ موارد المیاه، والتحکم فی عملیات السحب، وتحدید الحقوق الأساسیۀ لکبح هذا الاتجاه التنازلی ومنع حدوث عواقب لا رجعۀ فیها، مثل هبوط الأرض.

الکلمات المفتاحیۀ: المیاه الجوفیۀ، GRACE، GLDAS، التحلیل الإحصائی، طهران

---

۱ . طالب دکتوراه فی علم المناخ، وباحث ومحاضر فی جامعۀ الإمام الحسین (علیه السلام) لتدریب ضباط الحرس.
۲ . عضو هیئۀ التدریس بجامعۀ الإمام الحسین (علیه السلام) لتدریب ضباط الحرس
۳ . طالب دکتوراه فی الأرصاد الجویۀ، المدیر العام للأرصاد الجویۀ فی محافظۀ إیلام
sirzarnd@yahoo.com

نشریه علمی آفاق اطلاعات

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

حمیدرضا صادقی[1*]، مسلم دریکوند[2] سیروس نادری[3]

۸
سال دوم
زمستان ۱۴۰۴
مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۵/۰۷
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۶/۲۶
صص: ۱۲۲-۱۰۱

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) مشتق‌شده 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 ۲,۲۸- سانتی‌متر در سال و یک افت تجمعی حدود ۴۷,۸۵ سانتی‌متر را در طول دوره مطالعه برآورد کرد. آزمون منکندال با آماره Z معادل ۱۹,۲۸ - و p-value درحد صفر ، وجود روند یکنواخت کاهشی را در سطح اطمینان ۰,۹۹ تأیید نمود.برآوردگر شیب سن، شیبی معادل ۲,۲۶- 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 حقابه‌های پایه برای مهار این روند نزولی و جلوگیری از عواقب جبران‌ناپذیری مانند فرونشست زمین تاکید دارد.

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

۱ .دانشجوی دکتری اقلیم شناسی وپژوهشگرو 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 وهواشناسی، مدیرکل هواشناسی استان ایلام
sirzarnd@yahoo.com

۱. 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، به‌کار 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[۱] GEE 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

۱. Google Earth Engine

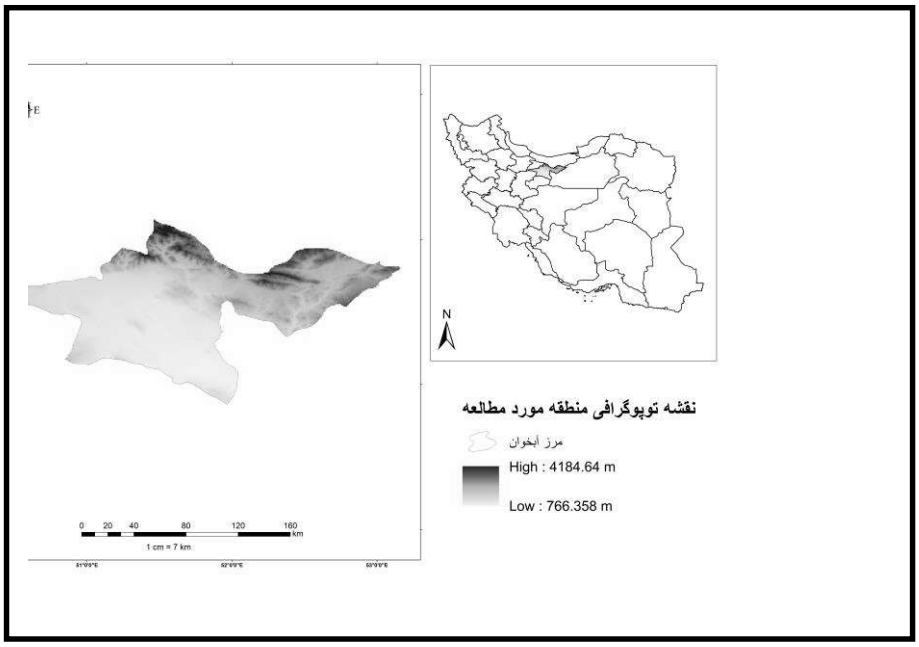
GRACE، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و Landsat 7 ، و همچنین داده‌های دما، رطوبت و بارندگی بودند. نتایج تحقیق نشان داد که در اکثر ماه‌های سال، روند تغییرات سطح آب زیرزمینی به طور معنی‌داری کاهشی بوده است. همچنین، کاهش مساحت پهنه‌های آب سطحی در این منطقه به دلیل عوامل طبیعی و انسانی مختلفی نظیر کاهش بارندگی، 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 باندهایJPL ، 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 منفی۱,۱۷ 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. بادکوبه هزاوه 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 بهینه‌سازیGA-ANN ، ICA-ANN و-PSO ANNاستفاده 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 به‌دنبال بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و بارش در ایران است، از نسخه جدید داده‌های ماهواره‌ای GRACE-Masconبرای 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[1]در استان تهران با استفاده از نسل جدید داده‌های ماهواره‌ایGRACE به نام Mascon است ما به دنبال کاهش یا افزایش روند تغییرات آب زیرزمینی برای این منطقه بودیم. برای این کار از داده های ماهواره ای 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 آتی 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 GWSA[2] از طریق ترکیب داده‌های ماهواره‌ای GRACEو مدل GLDAS برای محاسبه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس زمانی و فضایی مختلف استخراج گردید. این پژوهش به‌منظور 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[3]و شیب سن[4]بهره گرفته شد.

۲. منطقه مورد مطالعه

استان تهران به مرکزیت شهر تهران، با وسعتی حدود ۱۲,۹۸۱ کیلومتر مربّع، بین ۳۴ تا ۳۶,۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۳ درجه طول شرقی واقع شده‌است. این استان از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از جنوب‌غربی به استان مرکزی، از غرب به استان

۱. Liquid Water Equivalent
۲. Groundwater Storage Anomaly
۳. Mann-Kendall
٤. Sen’s Slope



۳،۱. داده‌های GRACE وGLDAS

- ماهواره‌های GRACE برای اندازه‌گیری تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس جهانی به‌کار 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 وGLDAS

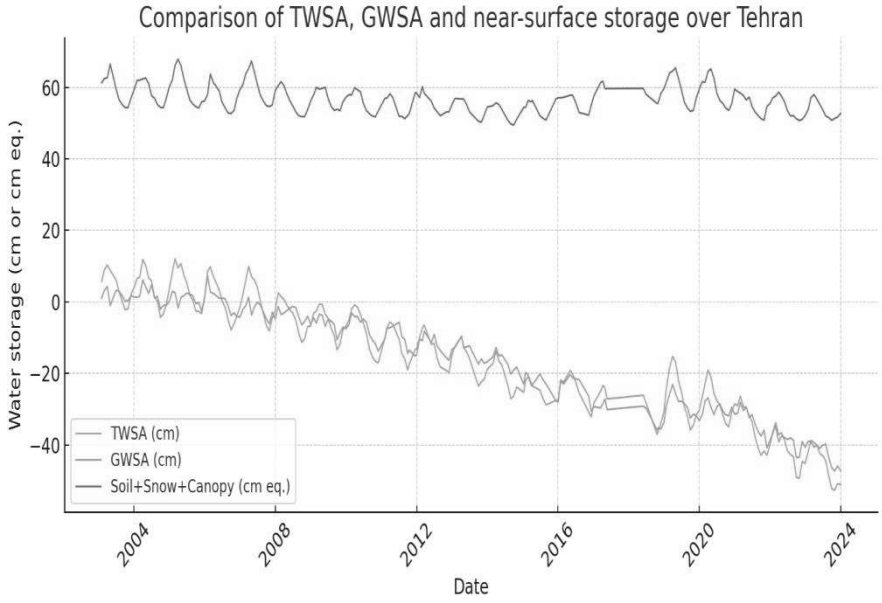
برای محاسبهGWSA ، ابتدا آنومالی ذخیره کل آب زمینی (TWSA) از داده‌های GRACE به‌دست آمد. سپس از داده‌های مدل GLDAS برای محاسبه آنومالی اجزای سطحی و کم‌عمق استفاده شد. به‌عبارت دیگر، GWSA به‌عنوان تفاوت بین آنومالی ذخیره کل آب زمینی (TWSA)و آنومالی اجزای سطحی و کم‌عمق مدل GLDAS محاسبه می‌شود. این محاسبه نشان‌دهنده تغییرات مربوط به ذخیره آب زیرزمینی است، چرا که سایر اجزای آب (مانند رطوبت خاک، برف و تاج پوشش گیاهی) به‌طور جداگانه مدل‌سازی شده و از TWSA حذف می‌شوند. در شکل(۲) سه کمیت با هم مقایسه شده اند، منحنی TWSAو GWSA بسیار شبیه هم هستند، اما GWSA کمی پایین‌تر است؛ یعنی سهم مخازن سطحی در مقایسه با آب زیرزمینی کوچکتر و نوسان‌دارتر است. منحنی مولفه های مخازن سطحیدر 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.

$$GWSA=TWSA-(SM+SWE+Canopy)$$ رابطه(۱)

که در این فرمول:

- TWSA: آنومالی ذخیره کل آب زمینی حاصل از داده‌های GRACE
- SM: آنومالی رطوبت خاک حاصل از مدلGLDAS
- SWE : آنومالی برف معادل آب حاصل از مدلGLDAS

- Canopy: آنومالی ذخیره آب تاج پوشش گیاهی حاصل از مدلGLDAS



شکل۲. مقایسه GWSA و TWSA با مولفه های مخازن سطحی

۴. روش کار:

برای بررسی تغییرات زمانی ذخیره آب زیرزمینی در محدوده تهران، از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای GRACE/GRACE-FO و داده‌های مدل GLDAS استفاده شد. ماهواره‌های GRACE (2002–2017)و GRACE-FO (2018–present) قادرند تغییرات جرم سطح زمین را در مقیاس‌های بزرگ اندازه‌گیری کنند. این تغییر جرم، عمدتاً ناشی از تغییرات ذخیره آب در چرخه هیدرولوژیک است. محصول Mascon این ماهواره، ، مقدار آنومالی ذخیره کل آب زمینی(TWSA) را به‌صورت ضخامت معادل آب۲در واحد سانتی‌متر برای

۱. Terrestrial Water Storage Anomaly
۲. Liquid Water Equivalent Thickness

هر 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، TWSAشامل 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 کم‌عمق از مقدار کل تفکیک و حذف شود.

به‌منظور 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 خاک۱(۰–۱۰، ۱۰–۴۰، ۴۰–۱۰۰ و ۱۰۰–۲۰۰ سانتی‌متر)، برف معادل آب۲و 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، به‌منظور انجام تفاضل مستقیم، ابتدا مقدار TWSA با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$۱\ kg/m^2 \approx 1cm\ water \qquad \text{رابطه(۲)}$$

برای تعیین سهم واقعی آب سطحی و کم‌عمق در هر ماه، ابتدا میانگین بلندمدت هر یک از اجزای GLDAS (رطوبت خاک چهارلایه، 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 به‌صورت زیر تعریف شد:

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

۱. Soil Moisther
۲. Snow Water Equivalent

که در آن SAnom 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.

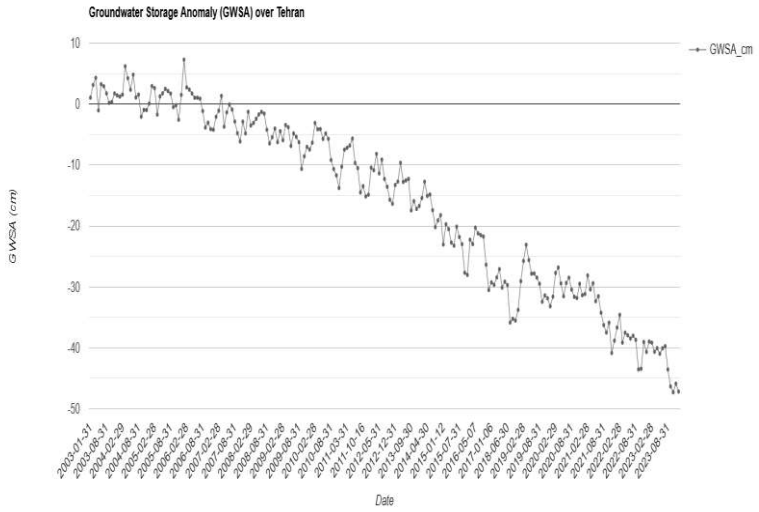
$$GWSA=TWSA\ kg/m2-S \qquad \text{رابطه(۴)}$$
$$anomGWSA$$

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 چنده‌ساله از آنومالی آب زیرزمینی در مقیاس حوضه‌ای تهران است. این سری زمانی سپس برای بررسی روند، نوسانات بین‌سالانه، و تحلیل اثر عوامل مختلف هیدرولوژیک و انسان‌ساخت استفاده می‌شود.

۴. یافته‌ها:

نودار سری زمانی GWSA نوسانات فصلی و بین‌سالانه را نشان می‌دهد(شکل۳) 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 GWSAدر 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.

شکل۳. 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 GRACEاز آنومالی اجزای سطحی و کم‌عمق مدل GLDAS بوده و بنابراین بیانگر تغییرات آب زیرزمینی در مقیاس معادل ضخامت آب هستند. به منظور بررسی روند بلندمدت، مقادیر ماهانه GWSA به‌صورت سری زمانی مرتب شده و سپس رگرسیون خطی با روش کمترین

مربعات (OLS[1]) 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 به‌معنای افت سالانه ذخیره آب زیرزمینی و کاهش مداوم آبخوان تهران است(شکل۴) 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 به‌صورت کمی نشان می‌دهد.

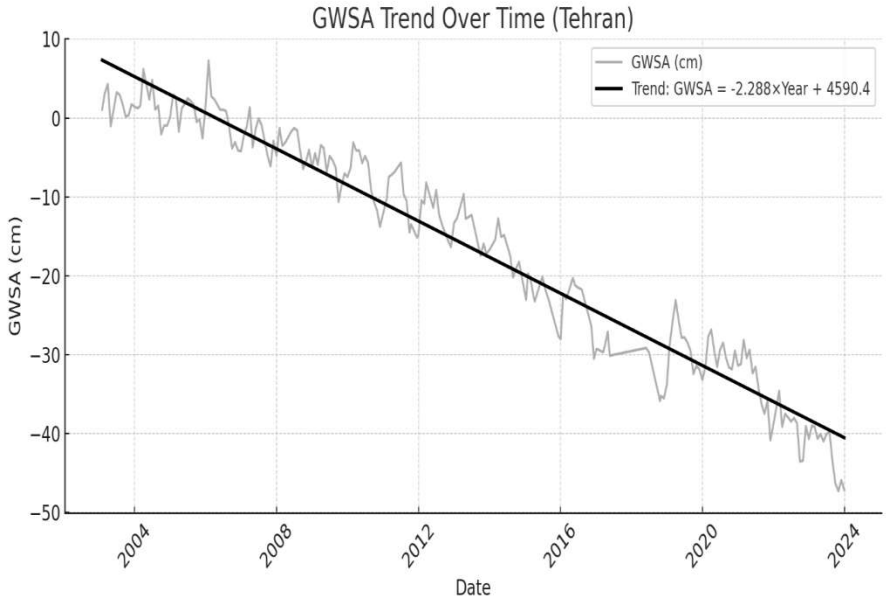
معادلهٔ خط روند به صورت زیر به دست آمد:

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

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 رابطهٔ بسیار قوی، پایدار و منفی بین زمان و مقدار GWSA است. این مقدار به‌وضوح 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 ($۳,۲۵\times۱۰^{-۱۴۹}$) گزارش شد که از نظر آماری تقریباً صفر است. چنین مقدار بسیار کوچکی($p < 0.001$) بیانگر آن است که احتمال وقوع چنین روندی به‌صورت تصادفی عملاً وجود ندارد و روند نزولی مشاهده‌شده با اطمینان ۱۰۰ درصد واقعی و معنادار است. همچنین مقدار بسیار کوچک خطای استاندارد ($Std\ Error = 0.033$) نشان می‌دهد که برآورد شیب روند از دقت و استحکام بالایی برخوردار است و نوسانات کوتاه‌مدت تأثیر قابل توجهی بر تخمین روند بلندمدت نداشته‌اند.

۱. Ordinary Least Squares.

شکل۴. 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 به‌صورت گسترده در تحلیل روند داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیک 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 هیدرولوژیک با نوسان‌های 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

۱. Mann–Kendall Test
۲. Sen’s SlopeEstimator

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 مثبت S نشان‌دهنده روند افزایشی و مقدار منفی S نشان‌دهنده روند کاهشی است. نتایج این آزمون نشان داد که آماره Sمقدار 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 10^{-85} 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)

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

که n تعداد مشاهدات سری، و xj و xk به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری می‌باشند. تابع علامت sgn نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

رابطه(۷) *for* $(x_j-x_k)>0$

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

for $(x_j-x_k)=0$

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

for $(x_j-x_k)<0$

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

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

رابطه (۸) *for* $n>10$

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

رابطه (۹) *for* $n< 10$

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

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:

رابطه (۱۰) *for* $S>0$

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

$$z = 0 \qquad for\ S=0$$

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

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

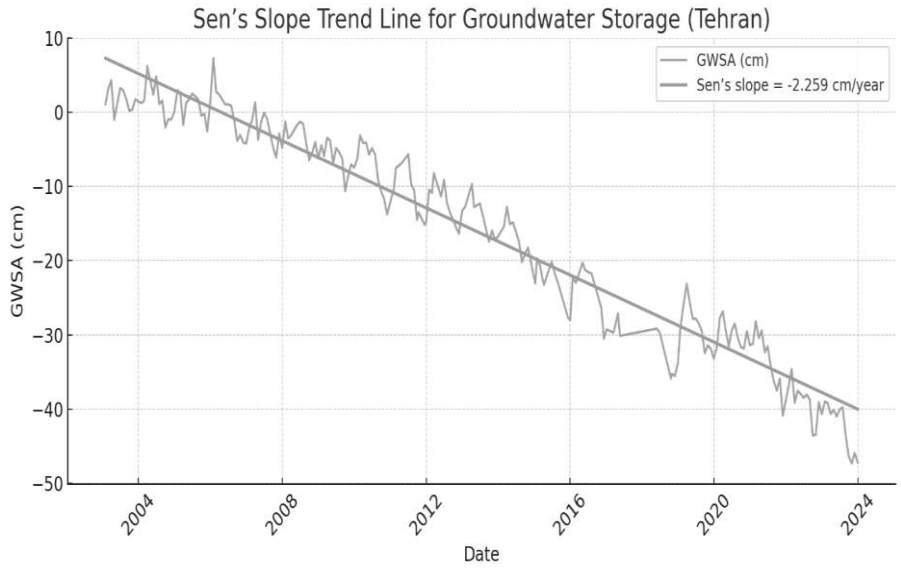
رابطه (۱۱)

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

که α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Zα آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی داری 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 به‌صورت دقیق، مقاوم و مستقل از داده‌های پرت نمایش می‌دهد(شکل۵). در این نمودار، خط نارنجی مقادیر واقعی GWSA را در طول زمان نشان می‌دهد که بیانگر نوسانات ماهانه و فصلی آب زیرزمینی است، در حالی‌که 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 به‌طور 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 اسلوپ 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 نه‌تنها 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 توجیه نیست و به‌وضوح نشان‌دهنده اثرات فزاینده برداشت‌های انسان‌ساخت از آبخوان است.



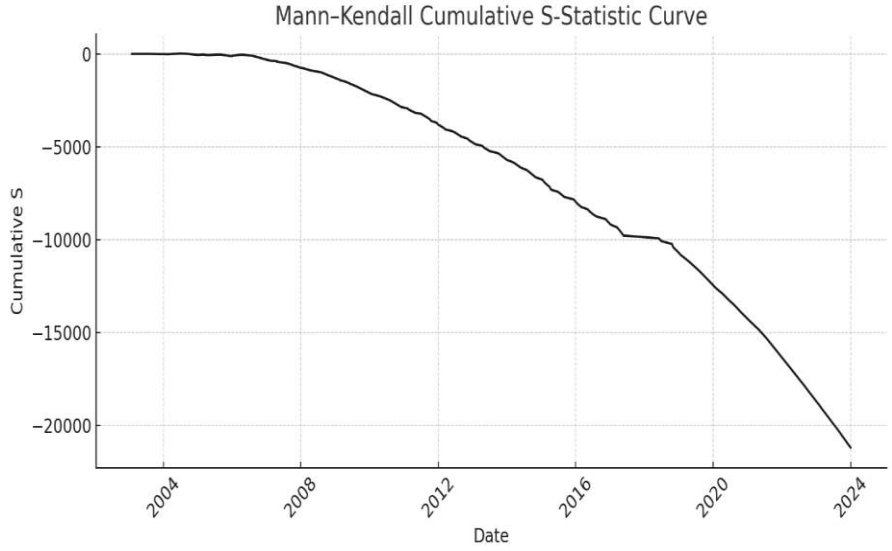
شکل۵. نمودار شیب سن برای روند آب زیرزمینی تهران

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 به‌صورت دقیق و غیرپارامتری نشان می‌دهد. در این نمودار، مقدار S به‌صورت 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، Sافزایش 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 به‌وضوح 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 نه‌تنها 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[1]شناخته می‌شود. در سال‌های پایانی دوره، از حدود ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، شیب منحنی به‌صورت قابل‌توجهی 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 نه‌تنها 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



شکل۶. 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 ۲,۲۸- سانتی‌متر در سال را نشان داد که منجر به افت تجمعی نزدیک به ۴۸ 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 (۱۹,۲۸-) و سطح اطمینان ۹۹ درصد، وجود یک روند نزولی یکنواخت و قطعی را تأیید نمود. همچنین، برآوردگر شیب سن با مقدار ۲,۲۶- 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 و بازنگری در سیاست‌های مدیریت منابع آب، کنترل و کاهش برداشت‌های بی‌رویه، تعیین و اجرای حقابه‌های 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 بازتحلیل 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]

٤.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]

٦.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.