

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 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 در حد 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 تأکید دارد.

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

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

۱. مقدمه

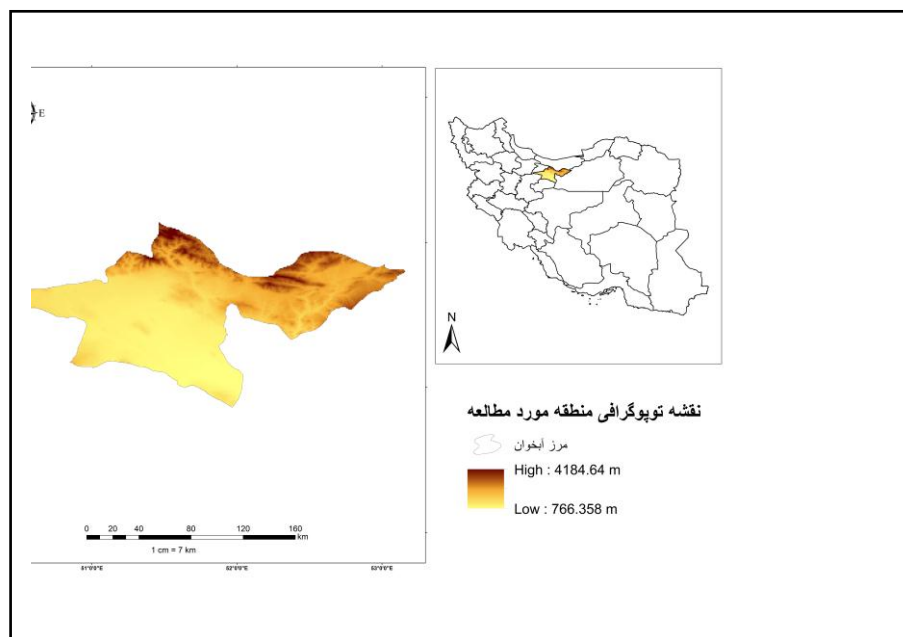
منابع آب زیرزمینی بعد از یخچال‌ها دومین منبع آب شیرین در جهان می‌باشند. در کشور ما با توجه به نوع اقلیم، منابع آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب مورد نیاز برای بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب اهمیت زیادی دارد (رفیعی و تیموری، ۲۰۲۳). در ایران، که با اقلیم خشک و نیمه‌خشک مواجه است، آب زیرزمینی نقش 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 قابل توجهی 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 *GEE* رای 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 *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 به‌طور 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 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- سانتی متر 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 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 بازتحلیل شده *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 *2GWSA* 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



کل ۱. منطقه مورد مطالعه (منبع: نویسندگان)

۳. داده‌ها

۳.۱. داده‌های *GLDAS* و *GRACE*

- 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.

۳.۲. ترکیب داده‌های *GLDAS* و *GRACE*

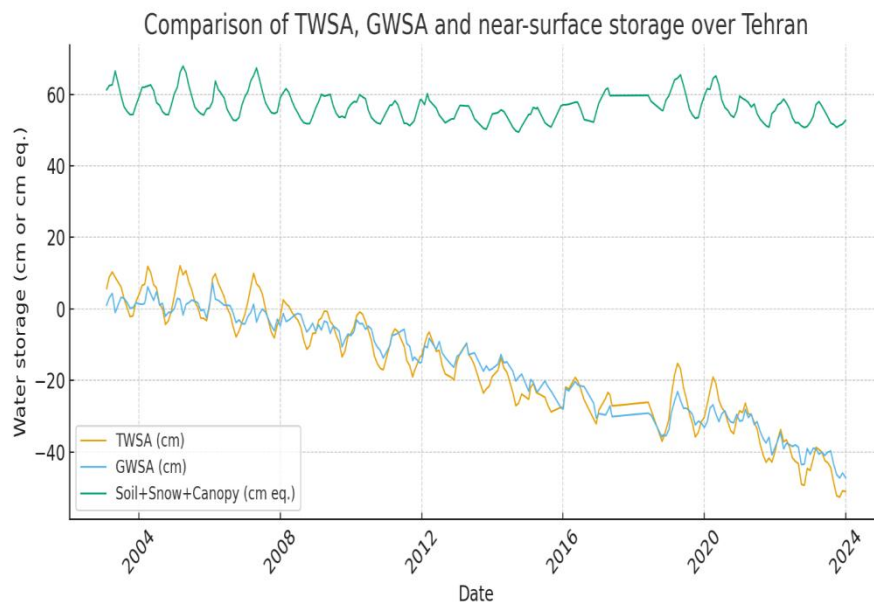
برای محاسبه *GWSA*، ابتدا آنومالی ذخیره کل آب زمینی (*TWSA*) از داده‌های *GRACE* به‌دست آمد. سپس از داده‌های مدل *GLDAS* برای محاسبه آنومالی اجزای سطحی و کم‌عمق استفاده شد. به عبارت دیگر، *GWSA* به عنوان تفاوت بین آنومالی ذخیره کل آب زمینی (*TWSA*) و آنومالی اجزای سطحی و کم‌عمق مدل *GLDAS* محاسبه می‌شود.

این محاسبه نشان‌دهنده تغییرات مربوط به ذخیره آب زیرزمینی است، چرا که سایر اجزای آب (مانند رطوبت خاک، برف و تاج پوشش گیاهی) به‌طور 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 مولفه های مخازن سطحی در محدوده 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 $TWSA$ و $GWSA$ 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 (۲۰۱۷-۲۰۰۲) GRACE و (۲۰۱۸-present) GRACE-FO 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 به صورت ضخامت معادل آب 2 در واحد سانتی‌متر برای 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، 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 ۷۲,۱ با قدرت تفکیک مکانی ۰,۲۵ درجه استفاده شد که شامل چهار لایه رطوبت خاک 3 (۰-۱۰، ۱۰-۴۰، ۴۰-۱۰۰ و ۱۰۰-۲۰۰ سانتی‌متر)، برف معادل آب 4 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 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 به صورت زیر تعریف شد:

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

که در آن $S \text{ Anom}$ 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 به دست آمد.

$$GWSA = TWSA \text{ kg/m}^2 - S \text{ anom} \quad \text{رابطه (۴)}$$

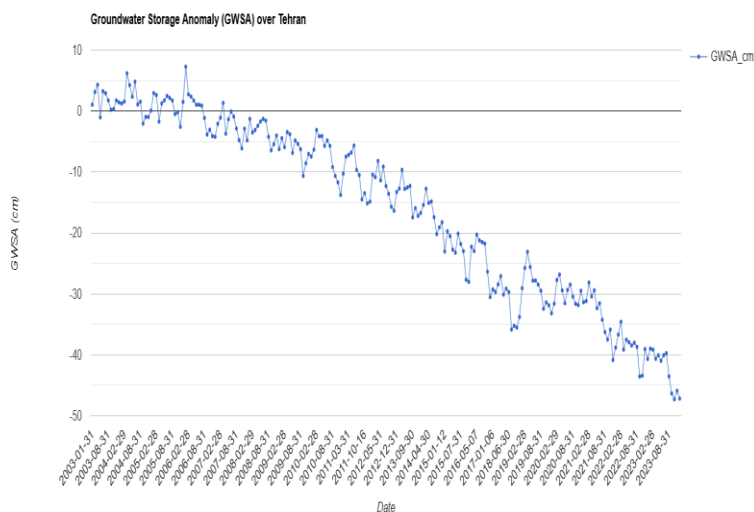
-
- 1 . Terrestrial Water Storage Anomaly
 - 2 . Liquid Water Equivalent Thickness
 - 3 . Soil Moisture
 - 4 . Snow Water Equivalent

به منظور تسهیل تفسیر نتایج، مقدار *GWSA* دوباره به واحد سانتی متر ضخامت معادل آب تبدیل شد. این روش در مطالعات هیدرولوژیکی به عنوان یکی از بهترین روش ها برای برآورد تغییرات آب زیرزمینی در مقیاس های منطقه ای و حوضه ای استفاده می شود، زیرا *GRACE* قادر است تأثیر برداشت های انسان ساخت و تغییرات اقلیمی بر منابع آب را در مقیاس بزرگ به صورت مستقیم آشکار کند. در این مطالعه، برای هر ماه، میانگین مکانی مقدار *TWSA* روی مرز تهران محاسبه شد. خروجی نهایی یک سری زمانی چنددهه ساله از آنومالی آب زیرزمینی در مقیاس حوضه ای تهران است. این سری زمانی سپس برای بررسی روند، نوسانات بین سالانه، و تحلیل اثر عوامل مختلف هیدرولوژیک و انسان ساخت استفاده می شود.

۴. یافته ها:

نودار سری زمانی *GWSA* نوسانات فصلی و بین سالانه را نشان می دهد (شکل ۳) که در کل یک روند نزولی واضح دارد. این الگو معمولاً ناشی از برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، افزایش فشار تقاضای آب در بخش شهری و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان است. رفتار مقادیر *GWSA* در سال های 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 شتاب گیرنده کاهش یافته اند.

در سال های پایانی دوره (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳) مقدار *GWSA* به بیش از ۴۰ سانتی متر منفی رسیده که نشانه کاهش شدید ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس گسترده است. این نتایج مجموعاً نشان می دهند که آبخوان تهران در وضعیت فروکاهشی شدید و مستمر قرار دارد و رفتار آن مستقیماً نشان دهنده برداشت بیش از حد و عدم تعادل ورودی-خروجی در سیستم هیدرولوژیک منطقه است. این یافته ها می توانند پایه ای برای مطالعات بیشتر درباره اثرات فرونشست، مدیریت منابع آب، و برنامه ریزی بلندمدت شهری باشند.



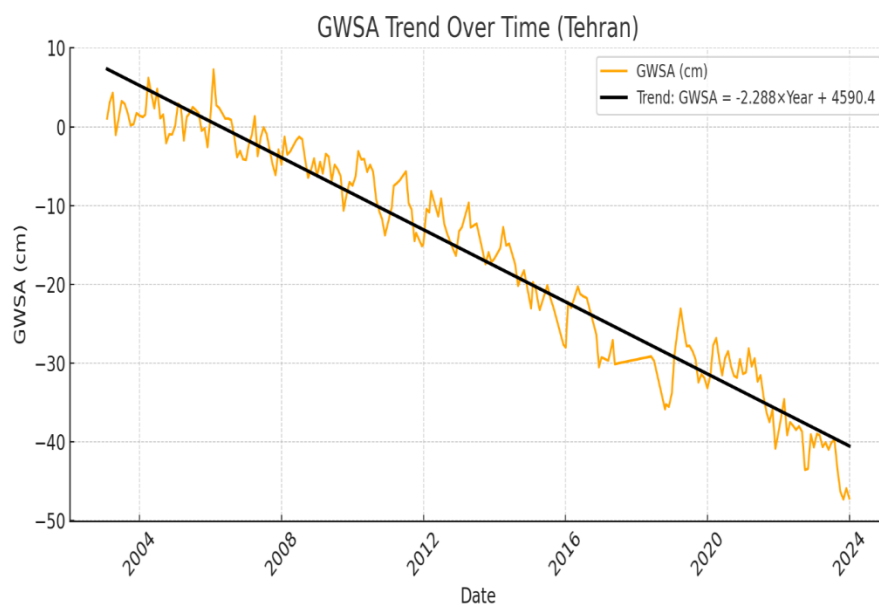
شکل ۳. نمودار سری مانی *GWSA* برای تهران از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳

به منظور 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 کم عمق مدل *GLDAS* بوده و بنابراین بیانگر تغییرات آب زیرزمینی در مقیاس معادل ضخامت آب هستند. به منظور بررسی روند بلندمدت، مقادیر ماهانه *GWSA* به صورت سری زمانی مرتب شده و سپس رگرسیون خطی با روش کمترین مربعات (*IOLS*) 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 سانتی متر 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 بیست ساله تحلیل، کاهش تجمعی حاصل برابر با ۴۷,۸۵ سانتی متر برآورد شده است؛ به بیان دیگر، طی این دوره ارتفاع ستون معادل آب ذخیره شده 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:

$$GWSA = -2.28 \times Year + 4590.4 \quad \text{رابطه (۵)}$$

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 مشاهده شده با اطمینان ۱۰۰ درصد واقعی و معنادار است. همچنین مقدار بسیار کوچک خطای استاندارد ($Std Error = 0.33$) نشان می‌دهد که برآورد شیب روند از دقت و استحکام بالایی برخوردار است و نوسانات کوتاه مدت 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 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 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

1 . Mann-Kendall Test
2 . Sen's SlopeEstimator

کاهش می‌دهد. 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 $|Z|$ به وضوح 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 آن که 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 ($Sen's Slope$) به عنوان یک روش غیرپارامتری مقاوم در برابر داده‌های پرت نیز انجام شد تا اندازه روند بدون وابستگی به مدل رگرسیون مشخص شود. مقدار به دست آمده برای شیب سن برابر با $-۲,۲۶$ سانتی‌متر در سال است که به طور شگفت‌انگیزی با شیب رگرسیون خطی $(-۲,۲۹)$ سازگار است. این سازگاری نشان می‌دهد که روند کاهش مشاهده شده یک ویژگی ساختاری و واقعی در سری زمانی است و به هیچ وجه 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.

$$S = \sum_{k=l}^{n-l} \sum_{j=k+l}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{رابطه (۶)}$$

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:

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x_j - x_k) &= +1 & \text{for } (x_j - x_k) > 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_k) &= 0 & \text{for } (x_j - x_k) = 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_k) &= -1 & \text{for } (x_j - x_k) < 0 \end{aligned} \quad \text{رابطه (۷)}$$

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

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

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

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad \text{for } n < 10 \quad \text{رابطه (۹)}$$

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:

$$z = \frac{S - I}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{for } S > 0 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

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

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

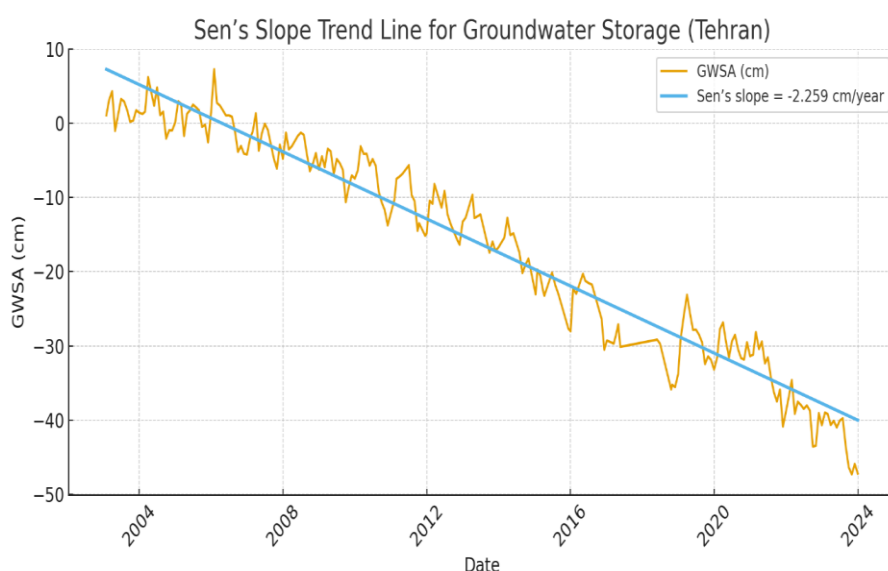
با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می شود که شرط زیر برقرار باشد:

$$|Z| < Z_{\alpha/2} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

که α سطح معنی داری است که برای آزمون در نظر گرفته می شود و $Z\alpha$ آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی داری α می باشد 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 داده ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می شود (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۰).

نمودار سن روند بلندمدت تغییرات آنومالی ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) در تهران را طی سال های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ به صورت دقیق، مقاوم و مستقل از داده های پرت نمایش می دهد (شکل ۵). در این نمودار، خط نارنجی مقادیر واقعی GWSA را در طول زمان نشان می دهد که بیانگر نوسانات ماهانه و فصلی آب زیرزمینی است، در حالی که خط سیاه ضخیم، خط روند سن اسلوپ را نشان می دهد که بر اساس روش غیرپارامتری سن و با استفاده از محاسبه شیب بین تمام زوج های ممکن نقاط سری زمانی محاسبه شده است. مقدار شیب این خط برابر ۲/۲۵۹- سانتی متر در سال است که نشان می دهد آبخوان تهران به طور متوسط سالانه بیش از دو سانتی متر از ذخیره خود را از دست داده است. نتایج نشان می دهد که مقدار GWSA در ابتدای دوره (۲۰۰۳-۲۰۰۵) نزدیک صفر و حتی در برخی ماه ها مثبت بوده است؛ اما با گذشت زمان، کاهش های مداوم و پیوسته مشاهده می شود. خط روند سن نشان می دهد که این کاهش ها تصادفی یا وابسته به نوسانات کوتاه مدت نیستند، بلکه یک روند ساختاری و بلندمدت در داده ها وجود دارد که در طول زمان تقریباً خطی و پایدار باقی مانده است. انطباق بالای خط شیب سن با الگوی کلی داده ها نشانه ای 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 می توان برداشت کرد، افزایش دامنه نوسانات منفی در سال های پایانی دوره است. به ویژه از سال ۲۰۱۶ به بعد، افت ناگهانی تر و مقادیر GWSA پایین تر مشاهده می شود که نشان می دهد شدت برداشت آب زیرزمینی افزایش یافته یا میزان تغذیه طبیعی کاهش پیدا کرده است. این امر باعث شده که مقدار GWSA در سال های پایانی دوره به مقادیری حدود ۴۰ تا ۴۵ سانتی متر منفی برسد که کاهش چشمگیری در ذخیره واقعی آبخوان محسوب می شود. نکته کلیدی این است که روش سن نسبت به داده های 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 کوتاه مدت را هموار کرده و ساختار بلندمدت را استخراج کرده است، می توان نتیجه گرفت که روند کاهش آب زیرزمینی تهران طی دو دهه گذشته کاملاً پایدار، معنی دار، و غیرتصادفی است.

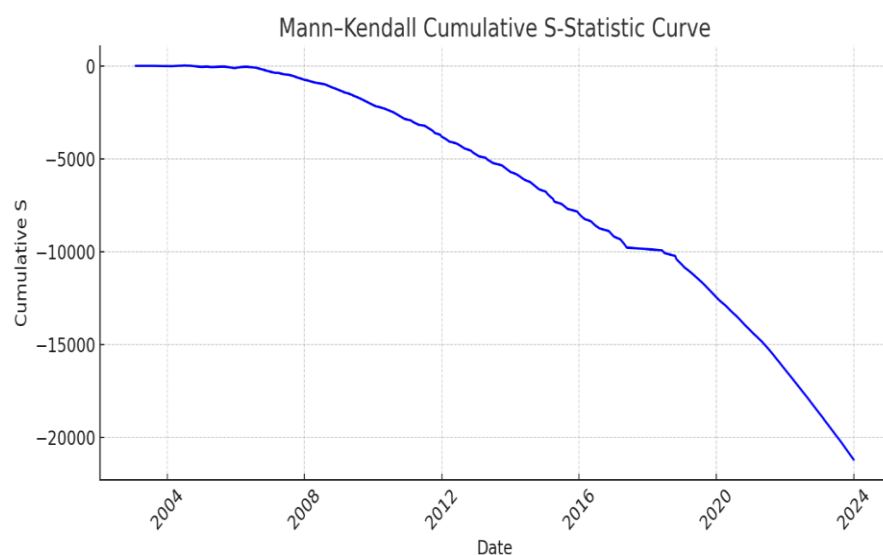
بوده است. این نتیجه با نتایج آزمون منکندال، رگرسیون خطی و p -value بسیار کوچک مطابقت دارد و همگی روند منفی شدید را تأیید می‌کنند. بنابراین، نمودار شیب سن نه تنها مقدار عددی روند را به صورت دقیق نشان می‌دهد، بلکه به صورت تصویری نیز نگرانی از وضعیت آبخوان را برجسته می‌کند. خط روند با شیب منفی یکنواخت نشان 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 به وضوح 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 / 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.



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 به کارگیری روش‌های آماری پارامتری و ناپارامتری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از سری زمانی آنومالی ذخیره آب زیرزمینی (*GWSA*) به صورت 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 ۲۸،۲- 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 منکنندال نیز با آماره Z بزرگ و منفی (۱۹،۲-) و سطح اطمینان ۹۹ درصد، وجود یک روند نزولی یکنواخت و قطعی را تأیید نمود. همچنین، برآوردگر شیب سن با مقدار ۲۶،۲- 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 مشاهده شده تقریباً به طور 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 به دنبال داشته باشد. از این رو، 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 به عنوان سامانه هشدار زودهنگام تأکید می‌کند. به کارگیری 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 به طور کمی و آماری تأیید شد، اتخاذ راهبردهای مدیریتی فوری، علمی و یکپارچه ضروری است. مهم‌ترین پیشنهادها 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

آبخواندر 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

1. 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]
2. 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]
3. 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]
4. Mann, H.B., 1945, Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13: 245-259
5. 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]
6. 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]
7. 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]
8. 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]
9. 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]
10. 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>
11. 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>
12. Kendall, M.G., 1970, Rank Correlation Methods, 2nd Ed., New York: Hafner.