

Assessment of Hydrological Drought in the Central Plateau Basins Using the New Groundwater Storage Product

Hamidreza Sadeghi, Student¹, Amanollah Fathniya^{1*}, Ehsan Sharifi²

Dep of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany

a_fathnia@razi.ac.ir:* Corresponding Author

Abstract

Background and Objective: Groundwater drought, defined as the persistent deficit in groundwater storage, is a major subcategory of hydrological drought that directly affects drinking water, irrigation, and industry. The Central Plateau of Iran faces chronic water stress due to climate variability and increasing demand. Here we provide a basin-scale, reproducible assessment of groundwater drought conditions and long-term groundwater storage anomalies (GWSA) across the Central Plateau using the new G3P product, which integrates GRACE/GRACE-FO gravity observations with ancillary land-surface components. By relying on a spatially consistent 0.5° monthly dataset (April 2002–September 2023), our analysis complements sparse in-situ monitoring and reduces field costs, while enabling uniform comparisons among sub-basins. Given the central role of groundwater in sustaining domestic, agricultural, and industrial water use in this arid to semi-arid region, quantifying both trends and drought characteristics is essential for risk-aware planning..

Materials and Methods: We analyzed monthly G3P data (0.5° resolution) for 16 April 2002–16 September 2023 from the G3P Data Portal. G3P estimates surface water storage components—soil moisture, surface water, snow/ice, and vegetation water and computes groundwater storage by applying the terrestrial water balance to GRACE/GRACE-FO total water storage. derived GWSA time series (mm water equivalent) for each sub-basin and calculated a Groundwater Drought Index (GDI) by standardizing monthly GWSA anomalies relative to a baseline climatology (z-score). Drought classes were assigned using common thresholds (e.g., no drought to extreme drought). To quantify trends, we estimated Theil–Sen slope; trend monotonicity and significance were tested with the non-parametric Mann–Kendall (MK) test, reporting τ and p-values. Total change (mm) was computed as slope (mm yr⁻¹) times record length (years). All processing was implemented in Python (time-series extraction, trend/GDI computation, and uncertainty summaries).

Results and Discussion: The Central Plateau basins of Iran exhibited statistically significant negative trend in both GWSA and GDI during 2002–2023. Many basin time-series and GDI indicate widespread intensification of groundwater deficit, particularly after 2016. Spatially, southern and central sub-basins—especially Abarkooh–Sirjan, Tashk–Bakhtegan–Maharloo, and the Darreh Anjir desert—show the steepest losses, whereas northern sub-basins (Semnan, Tehran, parts of Khorasan) display milder yet still negative trends. Seasonally, deficits peak from late winter through spring, consistent with precipitation seasonality and increased withdrawals. Time-series GDI maps and plots corroborate recurrent, prolonged groundwater drought episodes over the past decade. At the monthly scale, January, February, March, April, May, June, and December show negative tendencies, with February (≈ -66.8 mm), March (≈ -65.8 mm), and January (≈ -54.8 mm) presenting the sharpest declines. Among basins, Salt Lake exhibits the weakest decline (≈ -2.2 mm over the study period), while Abarkooh–Sirjan shows the strongest (≈ -22.2 mm), consistent with the trend table and horizontal bar-chart (Theil–Sen slopes with 95% confidence intervals). Overall Theil–Sen slope reflecting an approximately linear, monotonic decrease with limited outlier influence—yet we emphasize Theil–Sen + MK for robust inference. Uncertainty is conveyed via 95% confidence intervals on slopes and MK p-values, providing a transparent basis for comparing sub-basins. Because G3P operates at 0.5° and relies on a separation of storage components, sub-grid pumping and leakage/partitioning errors may persist locally; nevertheless, the large-scale, multi-basin consistency lends confidence to the regional signal.

Conclusion: Groundwater storage across the Central Plateau of Iran has declined persistently since 2002, with marked intensification after 2016 and no evidence of sustained recovery. The steepest, statistically significant losses are concentrated in southern–central sub-basins (e.g., Abarkooh–Sirjan, Tashk–Bakhtegan–Maharloo, Darreh Anjir),

while northern basins also decline but at smaller rates. Routine use of satellite-based GWSA, complemented by a standardized GDI and robust trend testing (Theil-Sen/MK), offers a cost-effective, reproducible framework for early drought warning and strategic allocation in data-scarce settings. The combined table (trend statistics, uncertainties, total change) and the horizontal bar-chart (slopes with 95% CIs) furnish decision for prioritizing management actions, with implications for irrigation scheduling, groundwater licensing, and drought contingency planning. Integrating this framework with targeted well observations and abstraction records would further refine local attribution while preserving the regional diagnostic power of G3P.

Keywords: Groundwater storage, drought, watershed, Central Plateau of Iran, G3P

ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه‌های فلات مرکزی ایران با استفاده از محصول جدید ذخیره آب زیرزمینی

حمیدرضا صادقی^۱، امان اله فتح نیا^{۱*}، احسان شریفی^۲

^۱. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

^۲. موسسه فناوری کارلسروهه (KIT)، کارلسروهه، آلمان

*نویسنده عهده دار مکاتبات : a_fathnia@razi.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: خشکسالی آب زیرزمینی که به عنوان کمبود پایدار ذخیره آب زیرزمینی تعریف می‌شود، یکی از زیرمجموعه‌های اصلی خشکسالی هیدرولوژیکی است که به طور مستقیم بر آب شرب، آبیاری و صنعت تاثیر می‌گذارد. فلات مرکزی ایران به دلیل تغییرات اقلیمی و افزایش تقاضا با تنش آبی مزمن مواجه است. در اینجا، ارزیابی مقیاس حوضه از شرایط خشکسالی آب زیرزمینی و ناهنجاری‌های ذخیره آب زیرزمینی بلندمدت (GWSA) در فلات مرکزی با استفاده از محصول جدید G3P ارائه می‌شود که مشاهدات گرانشی GRACE/GRACE-FO را با اجزای سطحی زمین ترکیب می‌کند. با استفاده از مجموعه داده ماهانه و فضایی ۵. درجه، تحلیل ما مکمل نظارت‌های میدانی محدود بوده و هزینه‌های میدانی را کاهش می‌دهد، در حالی که مقایسه‌های یکنواختی بین زیرحوضه‌ها انجام می‌دهد. با توجه به نقش مهم آب زیرزمینی در پایداری مصرف آب خانگی، کشاورزی و صنعتی در این منطقه خشک و نیمه‌خشک، کمی‌سازی روندها و ویژگی‌های خشکسالی برای برنامه‌ریزی مبتنی بر ریسک ضروری است.

مواد و روش‌ها: داده‌های ماهانه G3P (با رزولوشن ۵. درجه) از ۱۶ آوریل ۲۰۰۲ تا ۱۶ سپتامبر ۲۰۲۳ از پورتال داده‌های G3P اخذ شد G3P اجزای ذخیره آب سطحی مانند رطوبت خاک، آب سطحی، برف/یخ و آب گیاهان را تخمین می‌زند و ذخیره آب زیرزمینی را با اعمال تعادل آب زمین به مجموع ذخیره آب GRACE/GRACE-FO محاسبه می‌کند. سری زمانی GWSA (با واحد میلی‌متر معادل آب) برای هر زیرحوضه استخراج شده و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی (GDI) با استانداردسازی ناهنجاری‌های ماهانه GWSA نسبت به یک اقلیم پایه محاسبه شد. کلاس‌های خشکسالی با استفاده از آستانه‌های معمول (مثلاً از عدم خشکسالی تا خشکسالی شدید) اختصاص داده شد. برای کمی‌سازی روندها، شیب Theil-Sen تخمین زده شد؛ همگونی روند و معناداری آن با آزمون ناپارامتریک Mann-Kendall (MK) آزمایش شد و مقادیر τ و p گزارش شد. تغییرات کلی (میلی‌متر) به عنوان شیب (میلی‌متر در سال) ضربدر طول رکورد (سال‌ها) محاسبه شد. (تمام پردازش‌ها، استخراج سری زمانی، محاسبه روند GDI و خلاصه‌سازی عدم قطعیت‌ها در Python انجام شد).

نتایج و بحث: حوضه‌های فلات مرکزی ایران کاهش معناداری در شاخص‌های GWSA و GDI از ۲۰۰۲-۲۰۲۳ نشان دادند. بسیاری از سری‌های زمانی حوضه و شاخص GDI نشان‌دهنده تشدید گسترده کسری آب‌های زیرزمینی، به ویژه پس از سال ۲۰۱۶ هستند. در سطح مکانی، زیرحوضه‌های جنوبی و مرکزی به‌ویژه ابرقو-سیرجان، طشک-بختگان-مه‌ارلو و کویر دره انجیر بیشترین کاهش را نشان دادند، در حالی که زیرحوضه‌های شمالی (سمنان، تهران، بخش‌هایی از خراسان) روندهای منفی کمتری داشتند. از نظر فصلی، کسری‌ها از اواخر زمستان تا بهار اوج می‌گیرند که با فصلی بودن بارش و افزایش برداشت‌ها هماهنگ است. نقشه‌ها و نمودارهای سری زمانی GDI نشان‌دهنده دوره‌های خشکسالی طولانی و مکرر در دهه گذشته است. در مقیاس ماهانه، ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، مه، ژوئن و دسامبر روند منفی دارند، به طوری که فوریه (۶۶۰۸- میلی‌متر)، مارس (۶۵۰۸- میلی‌متر) و ژانویه (۵۴۰۸- میلی‌متر) بیشترین کاهش‌ها را نشان می‌دهند. در بین حوضه‌ها، دریاچه نمک کمترین کاهش را نشان می‌دهد (۲۰۲- میلی‌متر)، در حالی که ابرقو-سیرجان بیشترین کاهش را دارد (۲۲۰۲- میلی‌متر)، که با جدول روند و نمودار میله‌ای (شیب Theil-Sen با فاصله اطمینان ۹۵٪) همخوانی دارد. شیب Theil-Sen به طور نزدیکی هماهنگ هستند که

نشان‌دهنده کاهش تقریباً خطی و یکنواخت با تأثیر محدود بر داده‌های پرت است. با این حال، برای استنباط قوی، تأکید بر Theil-Sen و MK است. عدم قطعیت از طریق فاصله اطمینان ۹۵٪ بر روی شیب‌ها و مقادیر p آزمون MK منتقل می‌شود، که مبنای واضحی برای مقایسه زیرحوضه‌ها فراهم می‌آورد. از آنجا که G3P با دقت ۰۰۵ درجه عمل می‌کند و به جداسازی اجزای ذخیره‌سازی متکی است، خطاهای پمپاژ و نشت/تقسیم در مقیاس زیرشبکه ممکن است به‌طور محلی باقی بماند؛ با این حال، همخوانی بزرگ مقیاس و چندحوضه‌ای به اعتبار سیگنال منطقه‌ای افزوده است.

نتیجه‌گیری: ذخیره آب زیرزمینی در فلات مرکزی ایران از سال ۲۰۰۲ به طور پیوسته کاهش یافته و از سال ۲۰۱۶ به‌طور قابل‌توجهی تشدید شده است. بیشترین کاهش‌ها به طور معنادار در زیرحوضه‌های جنوبی-مرکزی متمرکز است. مثلاً ابرقو-سیرجان، طشک-بختگان-مه‌ارلو، دره انجیر، حوضه‌های شمالی نیز با شدت کمتر روندکاهشی داشته‌اند. استفاده منظم از GWSA مبتنی بر ماهواره، تکمیل شده با GDI استاندارد شده و آزمون روند (Theil-Sen/MK)، چارچوبی مقرون به صرفه و قابل تکرار برای هشدار زودهنگام خشکسالی و تخصیص استراتژیک در شرایط داده‌های کمیاب ارائه می‌دهد. جدول ترکیبی (آمار روند، عدم قطعیت‌ها، تغییرات کلی) و نمودار میله‌ای (شیب با فاصله اطمینان ۹۵٪) تصمیم‌گیری را برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی فراهم می‌کند، که پیامدهایی برای زمان‌بندی آبیاری، مجوز آب زیرزمینی و برنامه‌ریزی اضطراری خشکسالی دارد. یکپارچه‌سازی این چارچوب با مشاهدات چاه‌های هدفمند و سوابق برداشت، تخصیص محلی را بیشتر اصلاح می‌کند درحالی‌که قدرت تشخیصی منطقه‌ای G3P را حفظ می‌کند.

واژگان کلیدی: ذخیره آب زیرزمینی، خشکسالی، حوضه، فلات مرکزی ایران، G3P

خشکسالی آب زیرزمینی، به عنوان زیرگونه‌ای از خشکسالی هیدرولوژیکی، زمانی رخ می‌دهد که ذخیره آب زیرزمینی در یک پهنه مکانی مشخص طی دوره‌ای طولانی با کسری پایدار مواجه شود. این پدیده از منظر پس‌افت زمانی (lag) و ماندگاری اثرات با خشکسالی‌های هواشناسی و کشاورزی تفاوت دارد؛ آثار آن اغلب پس از پایان کسری بارش نیز ادامه می‌یابد و می‌تواند سال‌ها بر منابع آبی و محیط زیست اثر بگذارد (Van Loon, 2015). پیامدهای شناخته‌شده شامل فرونشست زمین، افت کیفیت آب، کاهش خدمات اکوسیستمی و تهدید امنیت غذایی است (Taylor et al., 2013). در مقیاس جهانی، اسناد و گزارش‌ها نشان می‌دهد کمبود دسترسی به آب سالم و نابرابری فضایی-زمانی منابع، بیش از یک میلیارد نفر را تحت تأثیر قرار داده و در صورت تداوم روندهای کنونی، فشار بر منابع آب تشدید خواهد شد (Eliasson, 2014; UN-Water, 2009). در کشورهایی مانند ایران، با اقلیم عمدتاً خشک و نیمه‌خشک، وابستگی بالا به آب‌های زیرزمینی برای تأمین شرب، کشاورزی و صنعت، آسیب‌پذیری را دوچندان می‌کند. در ایران، به علت کاهش بارندگی‌ها، افزایش دما و فشار ناشی از رشد جمعیت، میزان آب در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در مناطق مرکزی و شرقی کشور، که دسترسی به منابع آب سطحی محدود است، به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است. شواهد حکمرانی آب نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از نیاز آبی کشور از سفره‌های زیرزمینی تأمین می‌شود و این اتکا، با رشد جمعیت، توسعه کشاورزی و تغییرات اقلیمی، به ناترازی فزاینده منجر شده است (Madani, 2014). پایش سنتی آب زیرزمینی در ایران عمدتاً مبتنی بر چاه‌های مشاهده‌ای است؛ اما پراکندگی نامتوازن فضایی، گسست‌های زمانی، کیفیت ناهمگن و به‌روزرسانی نامنظم داده‌ها و دسترسی محدود به داده‌ها، ارزیابی جامع و دقیق روندها را در مقیاس ملی و حوضه‌ای دشوار می‌کند (Nazemi et al., 2018; Forootan et al., 2021). در نتیجه، بحران آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطقی که به شدت به این منابع وابسته هستند، می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری برای محیط‌زیست، کشاورزی و بهداشت عمومی به همراه داشته باشد. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور، به‌ویژه مشاهدات گرانشی GRACE/GRACE-FO، به عنوان مکملی کم‌هزینه و مقیاس‌پذیر برای پایش ناهنجاری ذخیره آب زمینی و به تبع آن ناهنجاری ذخیره آب زیرزمینی^۱ (GWSA) اهمیت یافته است. در سال‌های اخیر، محصول G3P با تفکیک مؤلفه‌های ذخیره آب (آب سطحی، رطوبت ناحیه ریشه، برف، یخچال) امکان استخراج GWSA سازگار و قابل مقایسه را در مقیاس ماهانه و شبکه ۰.۵° فراهم کرده است. پایش سنتی آب زیرزمینی در ایران عمدتاً مبتنی بر چاه‌های مشاهده‌ای است؛ اما پراکندگی نامتوازن فضایی، گسست‌های زمانی، کیفیت ناهمگن و به‌روزرسانی نامنظم داده‌ها و دسترسی محدود به داده‌ها، ارزیابی جامع و دقیق روندها را در مقیاس ملی و حوضه‌ای دشوار می‌کند (Nazemi et al., 2018; Forootan et al., 2021). در نتیجه، بحران آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطقی که به شدت به این منابع وابسته هستند، می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری برای محیط‌زیست، کشاورزی و بهداشت عمومی به همراه داشته باشد. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور، به‌ویژه مشاهدات گرانشی GRACE/GRACE-FO، به عنوان مکملی کم‌هزینه و مقیاس‌پذیر برای پایش ناهنجاری ذخیره آب زمینی و به تبع آن ناهنجاری ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) اهمیت یافته است. در سال‌های اخیر، محصول G3P با تفکیک مؤلفه‌های ذخیره آب (آب سطحی، رطوبت ناحیه ریشه، برف، یخچال) امکان استخراج GWSA سازگار و قابل مقایسه را در مقیاس ماهانه و شبکه ۰.۵° فراهم کرده است. مرور مطالعات پیشین در ایران: مدنی و همکاران با طرح استعاره ورشکستگی آبی بر سه محرک اصلی مسائل آب در ایران شامل تغییر اقلیم، فشارهای انسان‌زاد، برداشت بی‌رویه و محدودیت‌های حکمرانی و اقتصادی، تأکید کرده‌اند (Madani et al., 2016). در ادامه، چارچوب‌هایی برای کمی‌سازی سهم فعالیت‌های انسانی در ناترازی آب زیرزمینی پیشنهاد شده که بر تراز ورودی-خروجی انسان‌زاد و سناریوهای برداشت تکیه دارد

¹ . GroundWater Storage Anomaly

(Madani et al., 2017) و مفهوم خشکسالی انسان‌ساخت را به‌عنوان وضعیت‌هایی که عمدتاً از فشار برداشت‌ها نشأت می‌گیرند، برجسته می‌کند (Madani et al., 2019). پژوهش‌های تلفیقی مبتنی بر GRACE با داده‌های مدل‌های بازتخلیل شده نیز برای حوضه‌های بزرگ ایران روندهای کاهشی معنادار و پس‌افت زمانی چندماهه میان خشکسالی هواشناسی و پاسخ آب زیرزمینی را گزارش کرده‌اند (نمونه: تلفیق GRACE با GLDAS در چند حوضه اصلی؛ Madani et al., 2020). مطالعات مبتنی بر GRACE در غرب ایران نشان داده‌اند که خشکسالی‌های متوالی به افت قابل‌توجه ذخیره آب زیرزمینی انجامیده و با نوسانات بارش هم‌بسته است (Aghakouchak et al., 2015). بررسی‌های بعدی با ترکیب داده‌های بارش نیز این الگو را در بازه‌های بلندمدت تأیید کرده‌اند (Zarezadeh et al., 2022). مطالعات متعددی در اصفهان با استفاده از GRACE و داده‌های بارش، روندهای کاهشی پایدار و اتصال آنها با دوره‌های خشکسالی را نشان داده‌اند؛ همچنین در این مطالعات به ریسک فرونشست ناشی از افت آبخوان اشاره شده است (Aghakouchak et al., 2016). در یزد، ادغام GRACE با تصاویر Landsat کاهش قابل‌توجه سطح/ذخیره آب زیرزمینی را طی بازه‌های چندساله و هم‌زمان با کاهش بارش و گرمایش مستند کرده است (Aghakouchak et al., 2018). در سطح فلات مرکزی، تحلیل‌های بازه‌ای طولانی (مثلاً ۲۰۰۲-۲۰۱۴/۲۰۱۷) بر هم‌زمانی/پس‌افت میان کسری بارش و افت GWSA تأکید دارند و نقش سنجش‌ازدور را در مناطق کم‌داده برجسته می‌کنند (Farahmand et al., 2017). در فارس، ادغام GRACE و MODIS نشان داده است که هم‌رخدادی خشکسالی و گرمایش، افت شدید ذخیره آب زیرزمینی را رقم زده است (Aghakouchak et al., 2020). در سیستان نیز ترکیب GRACE و Landsat برای دوره‌های بلندمدت، کاهش چشمگیر ذخایر و تشدید اثرات تحت خشکسالی‌های ممتد را مستندسازی کرده است (Amini & Amiri, 2020). در خوزستان، ادغام GRACE با Landsat کاهش سطح/ذخیره آب زیرزمینی و ارتباط آن با رخدادهای خشکسالی و تغییرات اقلیمی را نشان داده است (Movahedi et al., 2021). در مطالعه‌های دیگر نوسانات سطح آب زیرزمینی در دشت قزوین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE ارزیابی شد. نتایج مطالعه نشان داد که داده‌های ماهواره‌ای GRACE و داده‌های چاه‌های مشاهداتی، روند مشابهی در کاهش سطح آب زیرزمینی در دشت قزوین نشان می‌دهند (Ranjbar et al., 2025). طی مطالعه‌ای در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۷ از داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای ارزیابی وضعیت منابع آب زیرزمینی در دشت‌های تبریز استفاده شد. نتایج نشان داد که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در این دشت با خشکسالی‌های طولانی‌مدت و کاهش بارش‌ها ارتباط مستقیم داشته است (Karami et al., 2021). در کرمانشاه نیز کاهش منابع زیرزمینی و هم‌بستگی آن با شاخص‌های خشکسالی در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ گزارش شده است (Hafezparast, 2021). بطور کلی مطالعات انجام شده سه الگوی مشترک را مستمر گزارش می‌کنند: (۱) روند کاهشی GWSA در بسیاری از دشت‌ها و حوضه‌ها طی دو دهه اخیر، (۲) پس‌افت زمانی چندماهه بین خشکسالی هواشناسی و پاسخ آب زیرزمینی، (۳) تقویت سیگنال افت تحت فشارهای انسان‌زاد (برداشت، توسعه آبیاری، تغییر کاربری) و پیامدهایی چون فرونشست. با وجود مطالعات متعدد مبتنی بر GRACE، این پژوهش با تکیه بر محصول G3P، به دنبال ارائه تصویری حوضه‌مقیاس از روندهای بلندمدت GWSA و پویایی زمانی - فضایی خشکسالی آب زیرزمینی بر پایه شاخص GDI در فلات مرکزی است. هدف‌های این پژوهش عبارت‌اند از برآورد روندهای بلندمدت GWSA در حوضه‌های فرعی فلات مرکزی، پایش خشکسالی آب زیرزمینی با شاخصی استاندارد شده نسبت به اقلیم مرجع (مانند GDI) همراه با کمی‌سازی زمان آغاز، مدت و شدت آن، و شناسایی کانون‌های بحرانی فضایی-فصلی و ارتباطشان با ویژگی‌های اقلیمی و الگوهای برداشت.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

فلات مرکزی ایران مجموعه‌ای از حوضه‌های درون‌ریز در قلب کشور است که به‌صورت هیدرولوژیک از دامنه‌های جنوبی البرز تا حاشیه‌های شمالی و شرقی زاگرس امتداد می‌یابد و به بیابان‌های پهن‌گستر دشت کویر و دشت لوت ختم می‌شود (شکل ۱). این پهنه، به‌سبب کمبود جریان‌های سطحی پایدار، تبخیر-تعرق بالقوه بالا و نوسان مکانی-زمانی بارش، یکی از حساس‌ترین مناطق ایران از منظر اتکا به آب‌های زیرزمینی و ریسک خشکسالی آب زیرزمینی است. مساحت فلات مرکزی ایران به‌طور تقریبی ۳۷۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع است و طول آن حدود ۱۰۰۰ کیلومتر و عرض آن حدود ۶۰۰ کیلومتر می‌باشد. این فلات در حدود عرض جغرافیایی 30° تا 35° شمالی و طول جغرافیایی 50° تا 57° شرقی قرار دارد. ارتفاع متوسط این فلات حدود ۹۰۰ متر از سطح دریا است و در آن کوه‌های متعددی با ارتفاعات بالای ۳۰۰۰ متر به چشم می‌خورند. به‌عنوان نمونه، کوه هزار در استان کرمان با ارتفاع ۴۵۰۰ متر یکی از بلندترین قله‌های این منطقه است. حوضه آبریز فلات مرکزی ایران شامل تعدادی از استان‌های مهم کشور است که به‌دلیل ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی خود، به‌ویژه در زمینه منابع آب زیرزمینی با چالش‌های زیادی مواجه است. این حوضه شامل استان‌های اصفهان، یزد، کرمان، مرکزی، سمنان، قم، خراسان جنوبی و بخش‌هایی از استان‌های فارس و تهران می‌شود. از جمله شهرهایی که در این حوضه قرار دارند، می‌توان به اصفهان، یزد، کرمان، شیراز، سمنان و کاشان اشاره کرد. حوضه آبریز فلات مرکزی ایران از چندین حوضه فرعی تشکیل شده است (جدول ۱) که هریک از آن‌ها ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی خاص خود را دارند. اقلیم فلات مرکزی ایران به‌طور کلی خشک و نیمه‌خشک است. میانگین بارش سالانه در این منطقه حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که بیشتر بارش‌ها در فصل‌های سرد سال رخ می‌دهند. همچنین، دمای میانگین سالانه این منطقه حدود 18.4°C درجه سانتی‌گراد است، اما در تابستان‌ها، دما در بسیاری از نقاط ممکن است به بیش از 40°C درجه سانتی‌گراد برسد. چنین اقلیمی باعث تبخیر بالای آب‌های سطحی و کاهش منابع آب‌های تجدیدپذیر در این ناحیه می‌شود. این شرایط اقلیمی همراه با ویژگی‌های توپوگرافی خاص، باعث ایجاد دشت‌های وسیع و بیابان‌هایی همچون دشت کویر و دشت لوت شده است که به‌عنوان یکی از بارزترین ویژگی‌های زیست‌محیطی فلات مرکزی ایران شناخته می‌شوند. این ویژگی‌های جغرافیایی، اقلیمی و توپوگرافی بر منابع آب زیرزمینی تأثیرات عمیقی دارند. به‌ویژه در مناطقی مانند استان‌های اصفهان، یزد، کرمان و سمنان که عمده تأمین آب آنها از منابع زیرزمینی است، بحران خشکسالی به‌صورت جدی‌تر احساس می‌شود. آب‌های زیرزمینی در این حوضه به‌دلیل تبخیر بالا و محدودیت منابع آبی، در معرض خطر جدی قرار دارند. این منطقه به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود نیازمند توجه ویژه در زمینه مدیریت منابع آب و مقابله با بحران خشکسالی است. به‌طور کلی، فلات مرکزی ایران با توجه به ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی خاص خود، از جمله مناطقی است که برای مطالعه و بررسی بحران خشکسالی آب‌های زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌ویژه در استان‌هایی مانند اصفهان و یزد که با مشکلات آبی روبه‌رو هستند، مطالعات و راهکارهای مدیریتی در راستای حفظ و استفاده بهینه از منابع آبی ضروری است. در این مطالعه، فلات مرکزی به زیرحوضه‌های فرعی زیر تفکیک شده است (شکل ۱؛ جدول ۱). این زیرحوضه‌ها از نظر توپوگرافی، زمین‌ساخت، رژیم بارش و کاربری اراضی متفاوت‌اند و همین تفاوت‌ها بر رفتار آبخوان‌ها (تغذیه/تخلیه، پس‌افت زمانی، شدت افت) اثر می‌گذارد. به‌منظور مقایسه هم‌ارز، کلیه آمارهای این پژوهش به‌صورت میانگین‌گیری وزن‌دار فضایی در مرزهای هر زیرحوضه گزارش می‌شود.



شکل ۱. نقشه حوضه‌های آبریز فرعی فلات مرکزی ایران

جدول ۱. مشخصات حوضه‌های آبریز فرعی فلات مرکزی ایران

نام حوضه	هامون جازموریان	طشک- بختگان- مهارلو	ابرقو- سیرجان	کویر دره انجیر	کویر لوت	سیاه کوه	گاوخونی	دریاچه نمک	کویر مرکزی
مساحت (km ²)	۶۹۳۷۴۸	۳۱۴۵۱۹	۵۷۱۲۵۳	۵۰۷۳۶۵	۲۰۶۳۵۴	۴۸۵۹۹۱	۴۱۵۵۲۳	۹۲۸۸۴۲	۲۲۶۵۳۳۱

۲-۲- داده‌ها

برای تحلیل تغییرات آب زیرزمینی در حوضه‌های فلات مرکزی ایران از محصول^۲ (G3P) استفاده شد. این محصول با تکیه بر مشاهدات گرانشی ماهواره‌های GRACE (۲۰۰۲-۲۰۱۷) و GRACE-FO (از ۲۰۱۸ تاکنون) تهیه می‌شود و به صورت ماهانه با تفکیک مکانی 0.5 درجه (۵۰ کیلومتر) در قالب NetCDF منتشر می‌گردد (Güntner et al., 2024). دوره استفاده شده در این پژوهش ۲۰۰۲/۰۴ تا ۲۰۲۳/۰۹ است. رویکرد G3P به این صورت است که ابتدا ناهنجاری ذخیره کل آب زمینی (TWSA)؛ از GRACE/GRACE-FO به دست می‌آید. سپس با بهره‌گیری از داده‌های مشاهداتی برای مخازن ذخیره آب شامل معادل آبی برف^۳ (SWEA)، رطوبت ناحیه ریشه^۴ (RZSMA)، ذخیره آب سطحی^۵ (SWSA) و جرم یخچال‌ها^۶ (GM)، سهم هر یک برآورد و از TWSA کسر می‌شود تا ناهنجاری ذخیره آب زیرزمینی (GWSA)؛ استخراج گردد. واحد تمام کمیت‌ها میلی‌متر ارتفاع معادل آب است (Sharifi et al., 2025). شکاف‌های

² . Global Gravity-based Groundwater Product

³ . Snow Water Equivalent Anomaly

⁴ . Root Zone Soil Moisture Anomaly

⁵ . Surface Water Storage Anomaly

⁶ . Glacier Mass

زمانی GRACE/GRACE-FO با ماسک‌گذاری مدیریت و از درون‌یابی زمانی پرهیز شد. لازم به ذکر است که برای مقایسه حوضه‌ای، ابتدا میدان‌های شبکه‌ای به مرز هر زیرحوضه نگاشت و سپس با میانگین‌گیری وزن‌دار فضایی بر حسب مساحت سلول مقدار میانگین هر زیرحوضه محاسبه شد. تمام محاسبات در Python (numpy، xarray، geopandas) و با واحد یکتا (mm) انجام گرفت.

۲-۲-۱- روند زمانی تغییرات آب زیرزمینی (GWSA)

در این پژوهش، ناهنجاری هر مؤلفه ذخیره آب به صورت اختلاف مقدار ماهانه از میانگین کل دوره مرجع ۲۰۰۲/۰۴ تا ۲۰۲۳/۰۹ محاسبه شده است. بنابراین در رابطه (۱)، تمام پارامترها، ناهنجاری نسبت به میانگین کل دوره مرجع هستند:

رابطه (۱)

$$GWSA = TWSA - SWE - RZSM - GW - SWS$$

که در آن TWSA، SWE، RZSM، GM و SWS به ترتیب نمایانگر تغییرات ذخیره آب کل، تغییرات ذخیره آب برف، تغییرات رطوبت خاک، تغییرات آب یخچالی و تغییرات آب سطحی هستند. این شاخص به‌ویژه در ارزیابی خشکسالی آب زیرزمینی و تحلیل تغییرات منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد دارد و می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی و نظارت بر خشکسالی‌های آتی و مدیریت منابع آبی استفاده شود. این معادله در واقع تغییرات در ذخیره آب زیرزمینی را از طریق تفاضل بین ذخیره آب کل و دیگر اجزاء (برف، رطوبت خاک، یخچال‌ها و ذخیره آب سطحی) محاسبه می‌کند.

۲-۲-۲- شاخص خشکسالی آب زیرزمینی⁷ (GDI)

برای پایش شدت و دوام خشکسالی آب زیرزمینی از شاخص GDI استفاده شد. در اینجا GDI به صورت نمره استاندارد (z-score) از GWSA ماهانه تعریف می‌شود. این شاخص به‌ویژه در ارزیابی کاهش منابع آب زیرزمینی و تحلیل روند خشکسالی مفید است (Tian et al., 2019).

$$GDI_i = \frac{GWSA_i - \mu}{\sigma} \quad \text{رابطه (۲)}$$

- $GWSA_i$ انحراف ذخیره آب زیرزمینی برای ماه i است،
- μ میانگین سری زمانی GWSA است،
- σ انحراف معیار سری زمانی

آستانه‌های طبقات شدت (نرمال تا «بسیار شدید») طبق جدول شدت (جدول ۲) درج شده است.

⁷ . Groundwater Drought Index

جدول ۲. شدت خشکسالی

$GDI > -0.5$	تر / نزدیک به نرمال
$-1.0 < GDI \leq -0.5$	خشکسالی خفیف
$-1.5 < GDI \leq -1.0$	خشکسالی متوسط
$-2.0 < GDI \leq -1.5$	خشکسالی شدید
$GDI \leq -2.0$	خشکسالی بسیار شدید

۳-۲. تحلیل روند Theil-Sen و آزمون Mann-Kendall

برای برآورد روندهای بلندمدت GWSA در هر زیرحوضه، دو برآوردگر شیب محاسبه شد: (۱) شیب میانی Theil-Sen به عنوان روش مقاوم نسبت به برون داده‌ها و ناپایستگی‌های خفیف، برای مقایسه. معنی داری یکنوایی روند با آزمون ناپارامتری Mann-Kendall (MK) سنجیده شد و آماره‌ی τ (تاو) و مقدار p گزارش گردید. بازه اطمینان ۹۵٪ برای شیب‌ها با بوت‌استرپ/فرمول بندی متناظر محاسبه شد. طول دوره آماری در همه زیرحوضه‌ها از ۱۶ آوریل ۲۰۰۲ تا ۱۶ سپتامبر ۲۰۲۳ بوده است ($N=225$ ماه). «تغییر کل» (Total_change_mm) از ضرب شیب سالانه (mm/yr) در طول دوره برحسب سال به دست آمده است؛ مثلاً برای Abarghoo-Sirjan با شیب (-150.30 mm/yr) و طول ۲۱۰۴ سال، تغییر کل (-60327 mm) محاسبه می‌شود. برای کدگذاری معنی داری، MK_sig به صورت ($***: p<0.001$; $*: p<0.01$; $*: p<0.5$) گزارش شده است. مطابق جدول روندها، همه زیرحوضه‌ها در بازه ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ روند کاهشی و معنادار در ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) نشان می‌دهند؛ مقادیر τ در آزمون Mann-Kendall همگی منفی و مقدار p بسیار کوچک (اغلب 0.0001 ، سه ستاره در شکل) است؛ بنابراین کاهش‌ها یکنواخت/تک‌سویه و از نظر آماری پایدار هستند. بازه اطمینان ۹۵٪ برای شیب Theil-Sen در همه حوضه‌ها صفر را قطع نمی‌کند که مؤید معناداری روند است. ستون «Total change (mm)» تغییر تجمعی را به صورت «شیب (میلی متر در سال) × طول دوره» نشان می‌دهد.

جدول ۳. روندهای GWSA بر اساس Theil-Sen/OLS و آزمون Mann-Kendall در زیرحوضه‌های فلات مرکزی (۲۰۲۳-۲۰۰۲)

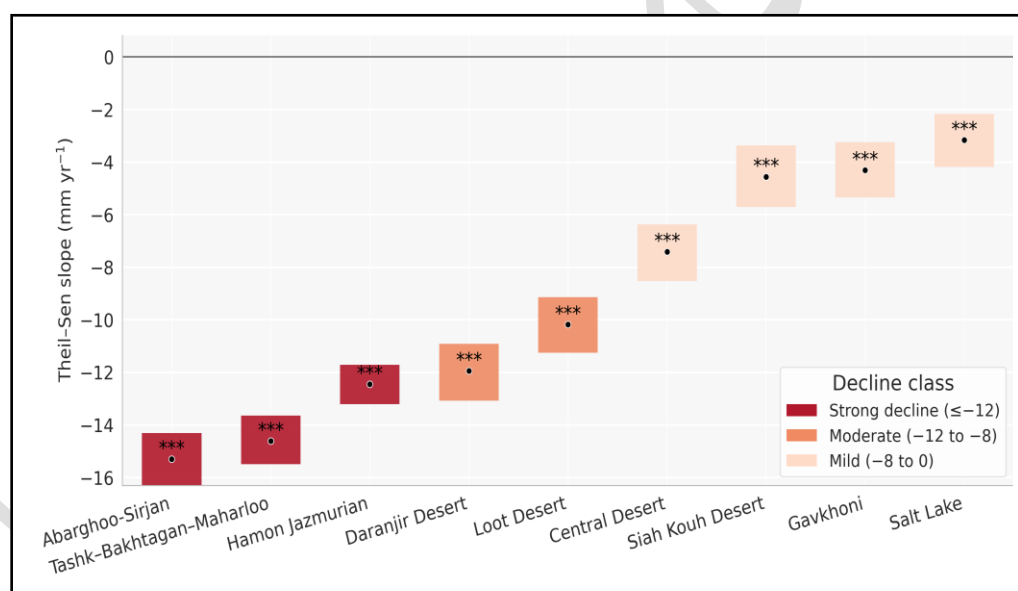
Basin	Period	TheilSen_slope_CI	MK_tau	MK_p	MK_sig	Total_change_mm
Abarghoo-Sirjan	2002-2023	-15.30 [-16.30, -14.31]	-0.732	4.10E-60	***	-6.327
Tashk-Bakhtagan-Maharloo	2002-2023	-14.60 [-15.50, -13.64]	-0.742	1.30E-61	***	-8.312
Hamon Jazmurian	2002-2023	-12.45 [-13.20, -11.71]	-0.735	1.40E-60	***	-7.266
Daranjir Desert	2002-2023	-11.94 [-13.07, -10.92]	-0.628	9.90E-45	***	-7.255
Loot Desert	2002-2023	-10.17 [-11.25, -9.14]	-0.569	6.10E-37	***	-9.217
Central Desert	2002-2023	-7.41 [-8.53, -6.38]	-0.475	2.50E-26	***	-8.158
Siah Kouh Desert	2002-2023	-4.56 [-5.70, -3.37]	-0.316	1.60E-12	***	-6.97
Gavkhoni	2002-2023	-4.31 [-5.34, -3.24]	-0.334	9.40E-14	***	-3.92
Salt Lake	2002-2023	-3.16 [-4.19, -2.17]	-0.26	6.60E-09	***	-6.67

TheilSen_slope_CI = Theil-Sen (mm/yr) و بازه اطمینان ۹۵٪ در گروه؛ نمونه: -15.30 - $[-16.30, -14.31]$ یعنی بهترین برآورد شیب سالانه (-15.30) است و مقدار واقعی با احتمال ۹۵٪ بین (-16.30) و (-14.31) قرار دارد. عدد داخل گروه عدم قطعیت برآورد را نشان می‌دهد.

Mann-Kendall τ آزمون منفی، روند کاهشی یکنواخت را نشان می‌دهد. MK_tau, MK_p, MK_sig = آماره τ ، مقدار p و گد معنی‌داری آزمون τ Mann-Kendall منفی، روند کاهشی یکنواخت را نشان می‌دهد.

Total_change_mm = شیب (mm/yr) $\times$ طول دوره (سال)

دامنه شیب‌ها از حدود -3.1 تا -15.3 میلی‌متر/سال است؛ یعنی اختلاف شدت افت بین حوضه‌ها زیاد است. جنوب و مرکز فلات مرکزی (ابرقو-سیرجان، بختگان، هامون جازموریان) بیشترین افت را دارند ($-9 \approx$ تا -15 میلی‌متر/سال). حوضه‌های شمالی و شمال شرق مانند دریاچه نمک هم کاهشی‌اند ولی ضعیف‌تر (حدود -3 تا -4 میلی‌متر/سال) با این حال؛ از نظر MK همگی معنی‌دار هستند (P بسیار کوچک). ضرایب MK τ عمدتاً بین -0.45 تا -0.75 است؛ یعنی روند یکنواخت و قوی کاهشی در اکثر حوضه‌ها (τ منفی بزرگ = کاهش یکنواخت).



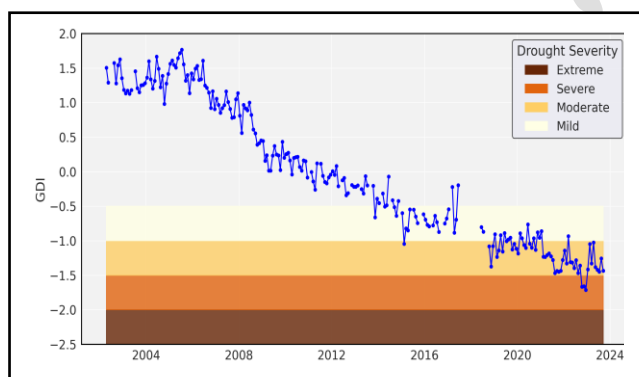
شکل ۲. روند سالانه ذخیره آب زیرزمینی (GWSA) برآورد شده با Theil-Sen برای زیرحوضه‌های فلات مرکزی (۲۰۰۲-۲۰۲۳)

در شکل ۲ نقاط سیاه مقدار شیب Theil-Sen (mm yr⁻¹) را نشان می‌دهند و مستطیل‌های رنگی کلاس شدت افت را مشخص می‌کنند (قوی/متوسط/ملایم). سه ستاره (***) کنار هر نقطه یعنی $p < 0.001$ در آزمون Mann-Kendall. هر چه مقدار شیب منفی‌تر باشد، سرعت افت بیشتر و «Total change» بزرگ‌تر (منفی‌تر) است؛ میله‌های خطا بازه اطمینان ۹۵٪ را نمایش می‌دهند. رنگ‌بندی/برچسب‌ها مطابق معنی‌داری آزمون MK گزارش شده در جدول است ($p < 0.001$: ***, $p < 0.01$: *, $p < 0.5$: p). ترتیب چیدمان از پرکاهش‌ترین تا کم‌کاهش‌ترین است تا قیاس دیداری تسهیل شود. ترتیب مکانی با الگوی شناخته‌شده تنش آبی همخوان است: زیرحوضه‌های جنوبی-مرکزی (ابرقو-سیرجان، طشک-بختگان-مهارلو، هامون جازموریان) کانون افت؛ در مقابل، زیرحوضه‌های شمالی‌تر (مثلاً دریاچه نمک، گاوخونی) افت ملایم‌تری دارند. شدت و پایداری روندهای منفی به‌ویژه در ابرقو-سیرجان، طشک-

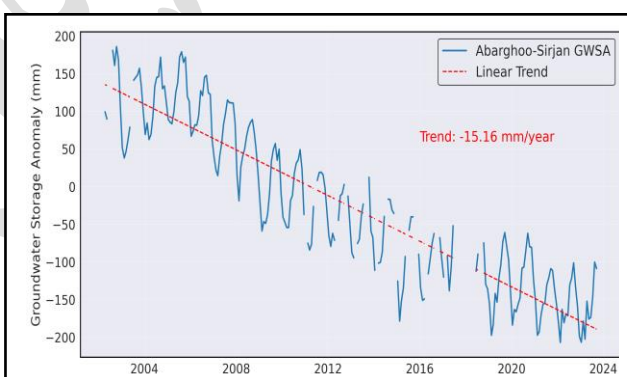
بختگان-مهارلو و هامون جازموریان نیاز به اقدام‌های فوری در مدیریت برداشت، بهبود بهره‌وری آبیاری و هشدار خشکسالی آب زیرزمینی را برجسته می‌کند.

۳- نتایج و بحث:

۳-۱- حوضه آبریز ابرقو-سیرجان: نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی (شکل ۳) نشان‌دهنده وضعیت نسبی بهتر در سال‌های آغازین دوره (۲۰۰۲ تا حدود ۲۰۰۸) مقادیر GWSA عمدتاً مثبت یا نزدیک به صفر بوده و سپس با یک روند نزولی معنادار وارد ناحیه منفی شده است. در این بازه زمانی، ذخایر آب زیرزمینی در مقادیر مثبت و نسبتاً بالا قرار دارند. از سال ۲۰۰۸ به بعد روند کاهشی شدیدی در ذخایر آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. از این سال مقادیر ذخایر آب زیرزمینی به تدریج منفی شده است به‌طوری که سال ۲۰۲۳ با میانگین منفی ۱۶۰۰۶۲ میلی‌متر نزولی‌ترین روند را دارد. از سال ۲۰۱۴ شاهد یک روندکاهشی حدی با مقادیر نزولی بین منفی ۱۰۰۰۲۹ در آگوست ۲۰۲۳ تا منفی ۲۰۶۰۸۸ میلی‌متر در فوریه سال ۲۰۲۲ هستیم که نشان‌دهنده بحرانی شدن وضعیت منابع آب زیرزمینی از سال ۲۰۱۴ به بعد در این حوضه است. بر اساس خط روند خطی، نرخ افت ذخیره آب زیرزمینی حدود منفی ۱۵۰۱۶ میلی‌متر در سال برآورد می‌شود. این بدان معناست که در هر سال به‌طور میانگین حدود ۱۵ میلی‌متر از ذخایر آب زیرزمینی کاسته شده است. نمودار GDI (شکل ۴) نیز گذار از وضعیت نزدیک به نرمال به خشکسالی پایدار را از حدود ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ تأیید می‌کند؛ به‌طوری که پس از ۲۰۱۶ اغلب ماه‌ها در بازه خشکسالی متوسط تا شدید قرار گرفته‌اند و در ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ وقوع مقاطع شدید و بسیار شدید افزایش یافته است. این الگو با یک تغییر رژیم در میانه دوره سازگار است. ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن و دسامبر دارای روند منفی هستند بطوریکه ماه مارس با مقدار منفی ۷۴۰۷۱ میلی‌متر نزولی‌ترین است.



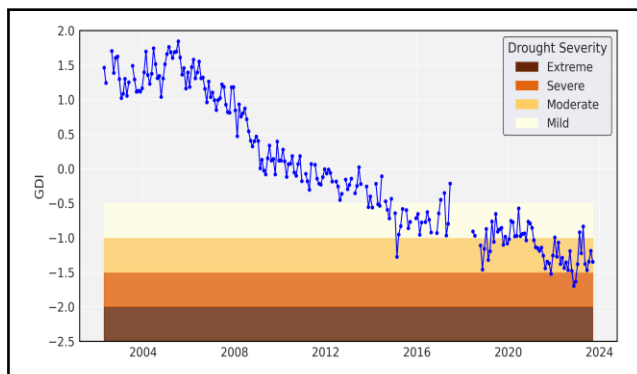
شکل ۴. نمودار سری زمانی شاخص خشکسالی GDI حوضه ابرقو-سیرجان



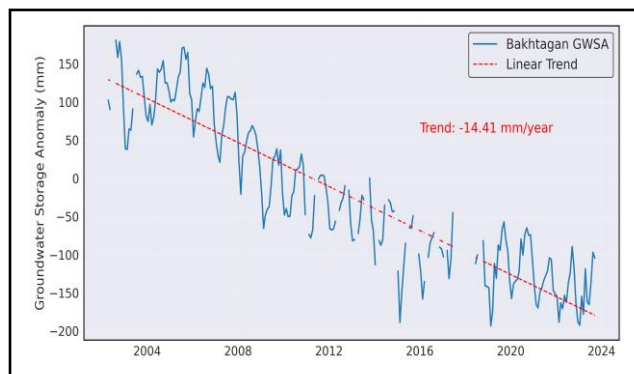
شکل ۳. نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی حوضه ابرقو-سیرجان

۳-۲- حوضه آبریز طشک- بختگان-مهارلو: میزان کاهش سطح آب زیرزمینی این حوضه در این دوره ۱۴۰۴۱ میلی‌متر در هر سال است (شکل ۵). نمودار روند نشان می‌دهد که در سال‌های اولیه این دوره، سطح آب زیرزمینی نسبتاً بالا بوده است. از سال ۲۰۰۹ به بعد شاهد روند منفی در داده‌ها هستیم، این سال با مقدار منفی ۷۰۸۸ میلی‌متر کمترین و سال ۲۰۲۲ با مقدار منفی ۱۵۰۰۹۷ میلی‌متر میانگین سالانه دارای بیشترین روند نزولی هستند. در طول دوره آماری ماه‌های آگوست، سپتامبر، اکتبر دارای روند مثبت هستند. ماه سپتامبر با مثبت ۲۵۰۱۲ میلی‌متر دارای بیشترین نوسان مثبت است. ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، ژوئیه و دسامبر دارای روند منفی و نزولی هستند که در این بین ماه فوریه با میانگین منفی ۶۶۰۳۱ میلی‌متر دارای بیشترین نوسان نزولی است. براساس نتایج شاخص GDI این حوضه از سال ۲۰۱۴ وارد فاز خشکسالی خفیف شده است (شکل ۶). در نهایت نتایج

شاخص GDI حاکی از این است که این حوضه شاهد خشکسالی شدید در سال‌های اخیر، یعنی از ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ است (شکل ۶). روند نزولی به ویژه از سال ۲۰۱۱ به بعد، واضح‌تر است و این می‌تواند به عواملی چون افزایش مصرف منابع آب برای کشاورزی، خشکسالی‌های متوالی، و تغییرات اقلیمی نسبت داده شود. کاهش سطح آب زیرزمینی می‌تواند به‌ویژه از تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش دما و کاهش بارش‌ها، و همچنین از برداشت‌های بی‌رویه برای مصارف کشاورزی و صنعتی تأثیر پذیرفته باشد.

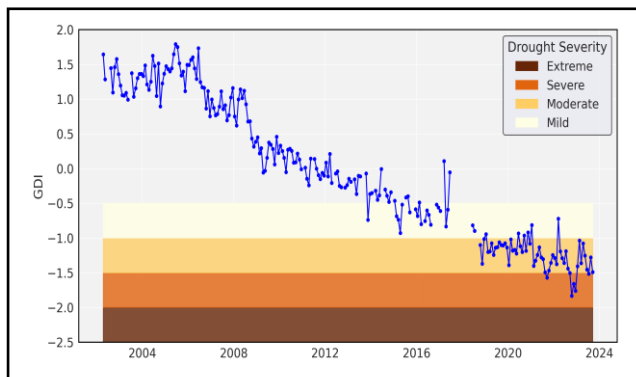


شکل ۶. نمودار سری زمانی شاخص خشکسالی GDI حوضه طشک-بخنگان

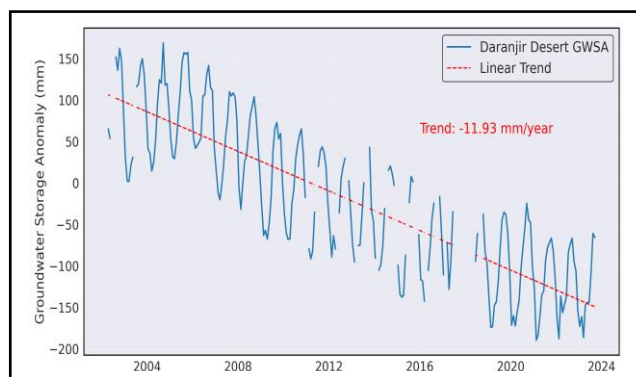


شکل ۵. نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی طشک-بخنگان

۳-۳- حوضه آبریز کویر دره انجیر: روند خطی کاهش ذخایر آب زیرزمینی در طول دوره آماری، کاهش سالانه ۱۱.۹۳ میلی‌متر را نشان می‌دهد (شکل ۷). در سال‌های ابتدایی این دوره، از ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶، ذخایر آب زیرزمینی نوسانات زیادی را تجربه کرده‌اند، به‌طوری‌که در برخی سال‌ها افزایش‌هایی در سطح ذخایر مشاهده شد، اما به‌طور کلی روند کاهش ذخایر آب در این سال‌ها نیز قابل مشاهده بود. از فوریه سال ۲۰۰۷ میزان تغییرات با رنج منفی ۱۲۰.۱۸ شروع شده و تا پایان این سال با شدت و ضعف همراه است به طوریکه ماه‌های آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر دارای تغییرات مثبت با رنج بالای ۱۰۰ میلی‌متر است. این افزایش احتمالاً به دلیل تغذیه ناشی از بارش‌ها در این سال بوده است. کمترین رنج منفی با عدد منفی ۱۰۷۳ مربوط به آوریل ۲۰۰۷ و بیشترین رنج منفی مربوط به فوریه ۲۰۲۱ با عدد منفی ۱۸۹.۶۰ میلی‌متر است. بر اساس نتایج شاخص GDI این حوضه از سال ۲۰۱۴ وارد خشکسالی خفیف شده و در سال‌های ۲۰۱۸ به بعد خشکسالی شدید و خیلی شدید را تجربه کرده است (شکل ۸). در مجموع، کاهش کل ذخایر آب زیرزمینی در این دوره به میزان ۲۵۰ میلی‌متر است. این کاهش‌ها نشان‌دهنده روند منفی در ذخایر آب زیرزمینی و وضعیت بحرانی منابع آب در حوضه آبریز دره انجیر است. این روند کاهشی می‌تواند ناشی از چندین عامل طبیعی و انسانی باشد. از جمله تغییرات اقلیمی که به کاهش بارش‌ها و تغییرات در دما منجر شده و تأثیر زیادی بر منابع آب زیرزمینی دارد. همچنین، استفاده بیش از حد از منابع آب زیرزمینی برای کشاورزی از عوامل اصلی کاهش این منابع است. در کنار این‌ها، خشکسالی‌های مکرر و دوره‌ای نیز به شدت ذخایر آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش بیشتر این ذخایر شده است.

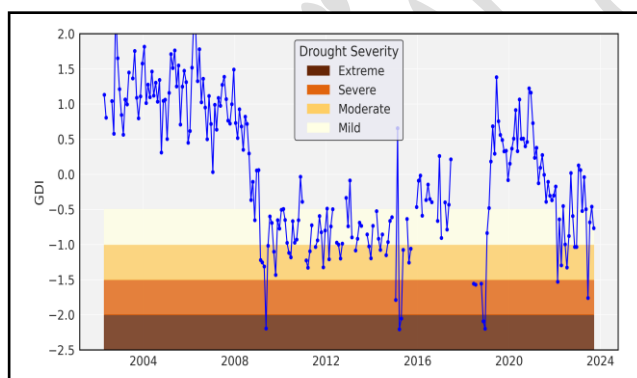


شکل ۸. نمودار سری زمانی شاخص خشکسالی GDI حوضه دره انجیر

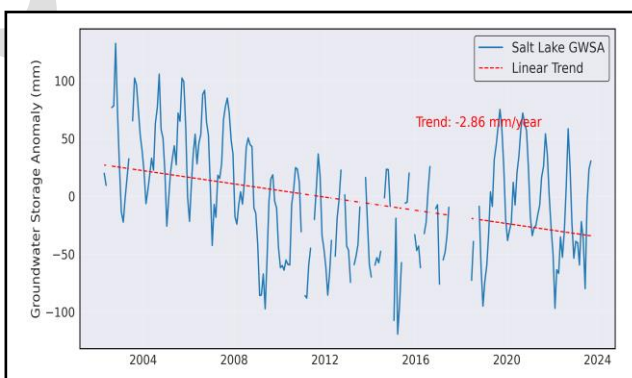


شکل ۷. نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی دره انجیر

۳-۴- حوضه آبریز دریاچه نمک: مقدار کاهش ذخیره آب زیرزمینی این حوضه آبریز سالانه ۲.۸۶ میلی متر است (شکل ۹). در بررسی تغییرات سالانه، اکتبر سال ۲۰۰۲، با مثبت ۱۳۲۰۱۵ میلی متر بیشترین تغییرات مثبت را در طول دوره مورد مطالعه دارد. بیشترین کاهش در سطح آب زیرزمینی به میزان منفی ۱۱۹۰۲۰ میلی متر مربوط به مارس ۲۰۱۵ است که بزرگترین کاهش در طول دوره آماری مورد مطالعه است. از ژانویه ۲۰۰۳ کاهش نزولی با رنج منفی نمایان می شود و در سال های بعدی، تغییرات به طور محسوس و بیشتر به ویژه در سال های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۳ مشاهده می شود. این دوره به عنوان دوره ای با تغییرات زیاد و نوسانات بزرگ در سطح آب زیرزمینی شناخته می شود. میانگین آنومالی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در طول دوره مطالعاتی منفی ۲۰۸۲ میلی متر است. براساس نتایج شاخص GDI این حوضه آبریز از سال ۲۰۰۹ وارد فاز خشکسالی شده و با شدت و ضعف تا سال ۲۰۲۳ خشکسالی شدید و خیلی شدید را تجربه کرده است. بطوری که در ماه می ۲۰۰۹، مارس و آوریل ۲۰۱۵، نوامبر و دسامبر ۲۰۱۸ خشکسالی خیلی شدید رخ داده است و این سال با مقدار منفی ۱۰۷۹ میلی متر بدترین وضعیت خشکسالی را داشته است (شکل ۱۰). ماه های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن و دسامبر دارای روند منفی هستند در این بین ماه ژانویه با مقدار منفی ۴۳۰۶۳ میلی متر نزولی ترین است.



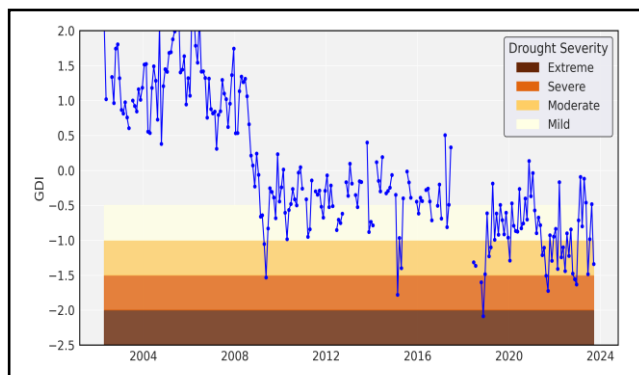
شکل ۱۰. نمودار سری زمانی شاخص خشکسالی GDI حوضه دریاچه نمک



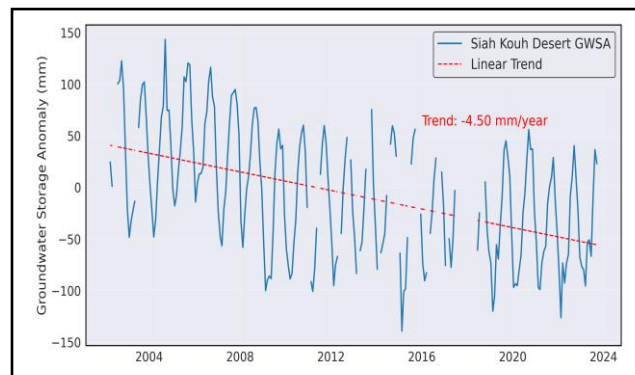
شکل ۹. نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی دریاچه نمک

۳-۵- حوضه آبریز سیاه کوه: از سال ۲۰۰۳ روند منفی در تغییرات ذخیره آب زیرزمینی نمایان می شود. فوریه سال ۲۰۱۵ با عدد منفی ۱۳۹۰۲۰ میلی متر نزولی ترین و سپتامبر سال ۲۰۱۴ با مقدار مثبت ۱۴۳۰۴۰ میلی متر افزایش رکوردهای حداقل و حداکثر دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ بودند. از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ همه سال ها دارای روند منفی هستند به طوریکه سال ۲۰۲۲ با میانگین منفی ۴۵۰۷۳ میلی متر نوسان، رتبه اول در بین سال های دوره آماری مورد مطالعه دارد. با توجه به روند نزولی و داده های موجود،

می‌توان گفت که میزان کاهش آب زیرزمینی در حوضه سیاه کوه به‌طور متوسط سالانه ۴۰۵۰ میلی‌متر بوده است (شکل ۱۱). براساس نتایج شاخص GDI از سال ۲۰۰۹ این حوضه آبریز وارد فاز خشکسالی شده و در سال ۲۰۱۹ خشکسالی خیلی شدید را تجربه نموده است (شکل ۱۲). ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن و دسامبر دارای روند منفی هستند در این ماه فوریه با مقدار منفی ۷۶۰۸۵ بیشترین روند نزولی را دارد.

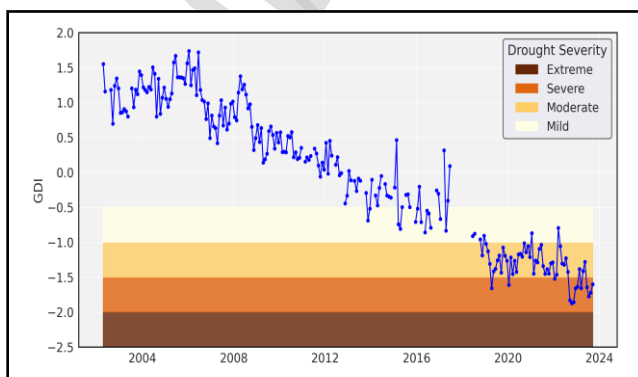


شکل ۱۲. نمودار سری زمانی شاخص خشکسالی GDI حوضه سیاه کوه

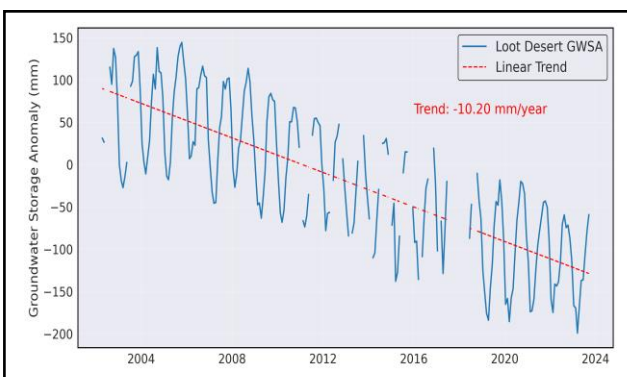


شکل ۱۱. نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی سیاه کوه

۳-۶- حوضه آبریز کویرلوت: بر اساس نتایج، کاهش ذخیره آب زیرزمینی این حوضه سالانه ۱۰۰۲۰ میلی‌متر است (شکل ۱۳). این کاهش نشان‌دهنده روند نزولی مستمر در ذخایر آب زیرزمینی در طول این دوره آماری است. مارس ۲۰۲۳ با مقدار منفی ۱۹۹۰۲۹ میلی‌متر نزولی‌ترین و اکتبر ۲۰۰۵ با مقدار مثبت ۱۴۴۰۲۲ میلی‌متر افزایش رکوردهای حداقل و حداکثر دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ بودند. از سال ۲۰۱۲ به بعد شاهد روند منفی در میانگین سالانه داده‌ها هستیم به طوری‌که در این سال میانگین سالانه مقدار منفی ۱۵۰۲۱ میلی‌متر کمترین و سال ۲۰۲۳ با مقدار منفی ۱۳۵۰۸۸ میلی‌متر میانگین سالانه دارای بیشترین روند نزولی هستند. در مجموع از سال ۲۰۱۲ به بعد، روند کاهش ذخیره آب زیرزمینی شدت گرفته است (شکل ۱۳). براساس نتایج شاخص GDI از سال ۲۰۱۳ این حوضه آبریز وارد فاز خشکسالی خفیف شده و از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ خشکسالی شدید و خیلی شدید را تجربه نموده است (شکل ۱۴). ماه‌های ژوئیه، آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر دارای روند مثبت هستند که در این بین ماه اکتبر با مثبت ۵۳۰۸۳ دارای بیشترین نوسان مثبت است. در طول دوره آماری مطالعه شده، ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می و ژوئن دارای روند منفی و نزولی هستند که در این بین ماه مارس با میانگین منفی ۸۸۰۱۸ میلی‌متر دارای بیشترین نوسان نزولی است.

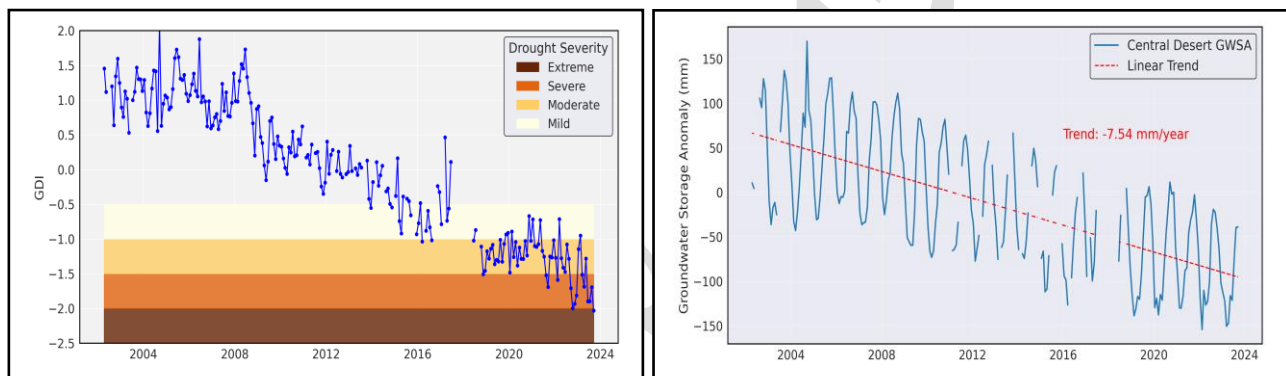


شکل ۱۴. نمودار سری زمانی شاخص خشکسالی GDI حوضه کویر لوت



شکل ۱۳. نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی کویر لوت

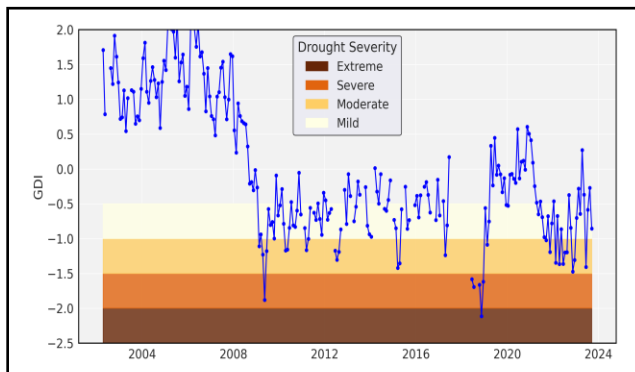
۷-۳- حوضه آبریز کویر مرکزی: روند کاهش سالانه ذخایر آب زیرزمینی در حوضه آبریز کویر مرکزی ایران به میزان ۷۰۵۴ میلی‌متر در سال است (شکل ۱۵). فوریه سال ۲۰۲۲ با مقدار منفی ۱۵۴۰۱۷ میلی‌متر و سپتامبر ۲۰۰۴ با مقدار مثبت ۱۶۹۰۶۱ میلی‌متر به ترتیب نزولی‌ترین و صعودی‌ترین ماه‌ها هستند. ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن و دسامبر دارای روند منفی هستند. در این بین ماه مارس دارای مقدار منفی ۷۴۰۵۲ میلی‌متر است. از سال ۲۰۱۱ روند کاهش ذخایر آب زیرزمینی با مقدار میانگین سالانه منفی ۲۰۶۷ میلی‌متر آغاز شده است. سال ۲۰۲۳ با میانگین منفی ۱۰۲۰۹۴ میلی‌متر، سال ۲۰۲۲ با میانگین منفی ۸۴۰۷۸ و سال ۲۰۲۱ با میانگین منفی ۶۹۰۵۲ به ترتیب دارای بیشترین نوسان منفی در طول دوره هستند که نشان‌دهنده یک دوره بحرانی برای این حوضه است. سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ از نظر میانگین سالانه دارای روند مثبت هستند که در این بین سال ۲۰۰۲ دارای مقدار میانگین مثبت ۷۲۰۶۰ میلی‌متر است. این تغییرات افزایشی موقتی بوده و ممکن است ناشی از بارش‌های شدید یا نوسانات فصلی باشد. سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۱۹ نسبت به دیگر سال‌ها دارای نوسان نزولی بیشتری است، براساس نتایج شاخص GDI از سال ۲۰۱۴ به بعد این حوضه آبریز وارد خشکسالی خفیف شده و از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ وارد خشکسالی شدید و از سال ۲۰۲۱ تا پایان دوره آماری در برخی از ماه‌ها خشکسالی خیلی شدید را تجربه نموده است (شکل ۱۶).



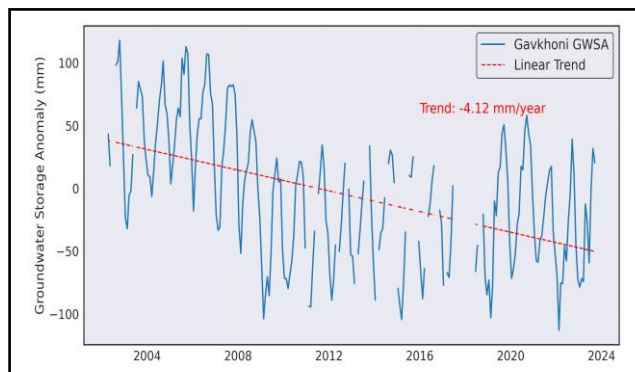
شکل ۱۵. نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی کویر مرکزی

شکل ۱۶. نمودار سری زمانی شاخص خشکسالی GDI حوضه کویر مرکزی

۸-۳- حوضه آبریز گاوخونی: بر اساس تحلیل داده‌ها، روند کلی کاهش سطح آب زیرزمینی در این حوضه معادل ۴۰۱۲ میلی‌متر در سال است (شکل ۱۷). این به معنی کاهش ۸۶۰۵۲ میلی‌متر در طول دوره آماری است. این مقدار نشان‌دهنده کاهش قابل توجه در منابع آب زیرزمینی منطقه است. سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ روند تغییرات سالانه مثبت بوده که در این بین سال ۲۰۰۲ دارای مقدار مثبت ۶۸۰۲۰ میلی‌متر است. از سال ۲۰۰۹ به بعد روند تغییرات منفی شده است به طوری که سال ۲۰۱۸ دارای مقدار میانگین منفی ۵۷۰۵۴ میلی‌متر است. ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن و دسامبر دارای روند منفی هستند. در این بین ماه فوریه دارای مقدار منفی ۶۰۰۹۱ میلی‌متر است. ماه‌های ژوئیه، آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر دارای روند مثبت هستند که در این بین ماه سپتامبر دارای مقدار مثبت ۵۳۰۵۷ میلی‌متر است. بر اساس نتایج شاخص GDI از سال ۲۰۰۹ این حوضه آبریز وارد خشکسالی خفیف شده و در برخی ماه‌ها خشکسالی شدید و خیلی شدید رخ داده است. به طور کلی از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ خشکسالی خفیف تا شدید تجربه شده است (شکل ۱۸).

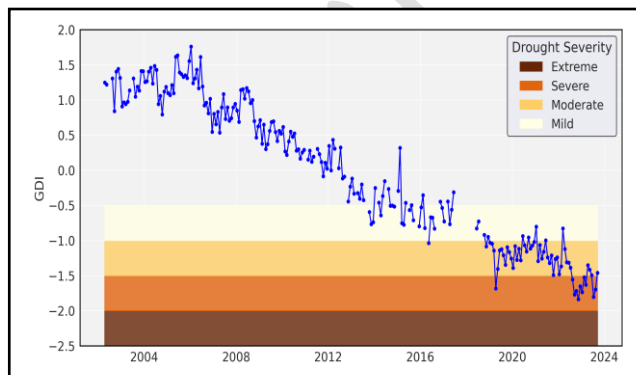


شکل ۱۸. نمودار سری زمانی شاخص خشکسالی GDI حوضه گاوخونی

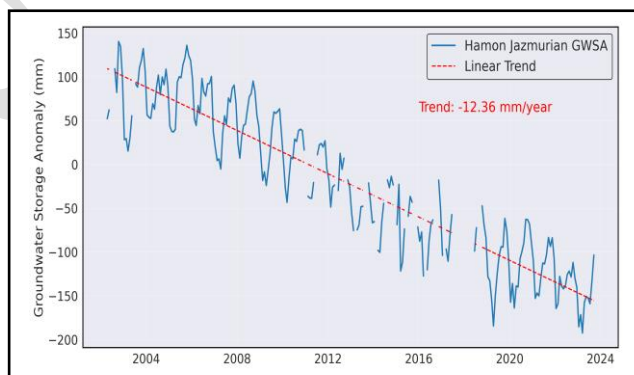


شکل ۱۷. نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی گاوخونی

۳-۹- حوضه آبریز هامون جازموریان: از بررسی نمودار روند، می‌توان دریافت که میزان تغییرات آب زیرزمینی در این دوره زمانی به‌طور متوسط سالانه برابر با ۱۲.۳۶ میلی‌متر کاهش داشته است (شکل ۱۹). این کاهش به‌طور پیوسته در سال‌های مختلف مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که در برخی از سال‌ها افزایش‌های مقطعی کوتاه‌مدت وجود دارد، ولی روند کلی کاهش در طول زمان کاملاً مشهود است. از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰، روند تغییرات مثبت بوده که در این بین سال ۲۰۰۲ با مقدار میانگین مثبت ۹۷.۱۷ میلی‌متر بیشترین می‌باشد. از سال ۲۰۱۱ روند تغییرات منفی بوده به‌طوری‌که سال ۲۰۲۳ دارای بیشترین روند منفی با مقدار منفی ۱۳۵.۷۳ میلی‌متر است. ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، ژوئیه و دسامبر دارای روند منفی هستند. که در این بین ماه مارس دارای مقدار منفی ۶۰.۹۰ میلی‌متر است. ماه‌های ژوئیه، آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر دارای روند مثبت هستند. که در این بین ماه اکتبر دارای مقدار مثبت ۲۶.۸۴ میلی‌متر است. براساس شاخص GDI از سال ۲۰۱۳ این حوضه آبریز چار خشکسالی خفیف شده است و از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ خشکسالی متوسط تا شدید را تجربه کرده است همچنین سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ خشکسالی خیلی شدید رخ داده است (شکل ۲۰).



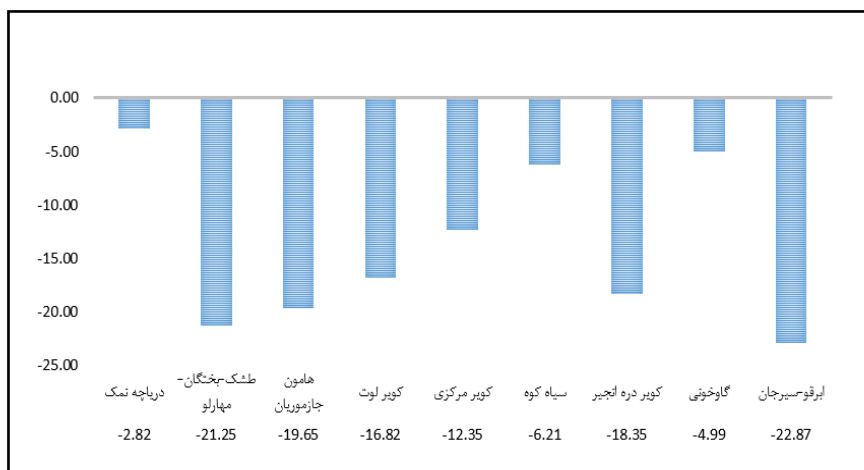
شکل ۲۰. نمودار سری زمانی شاخص خشکسالی GDI حوضه جازموریان



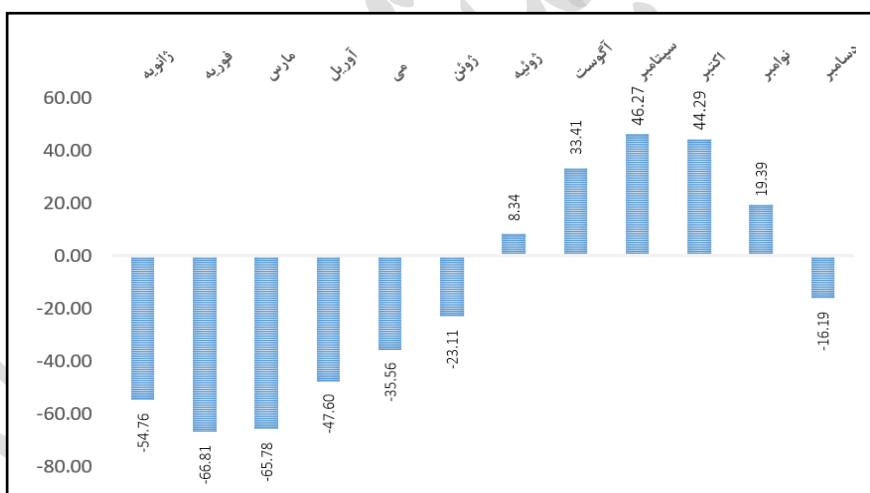
شکل ۱۹. نمودار روند تغییرات آب زیرزمینی هامون جازموریان

زیرحوضه‌های حوضه آبریز فلات مرکزی ایران هرکدام ویژگی‌های جغرافیایی، اقلیمی و منابع آبی خاص خود را دارند. براساس نتایج بدست آمده در قالب نمودارهای روند سری زمانی GWSA و شاخص GDI مشخص شد که حوضه‌های آبریز فلات مرکزی ایران از سال ۲۰۱۱ به بعد تحت شرایط خشکسالی قرار گرفته‌اند. شدت خشکسالی از سال ۲۰۱۶ به بعد به روند افزایشی داشته است. در طول دوره آماری مورد مطالعه (۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳) ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن و دسامبر دارای روند منفی هستند.

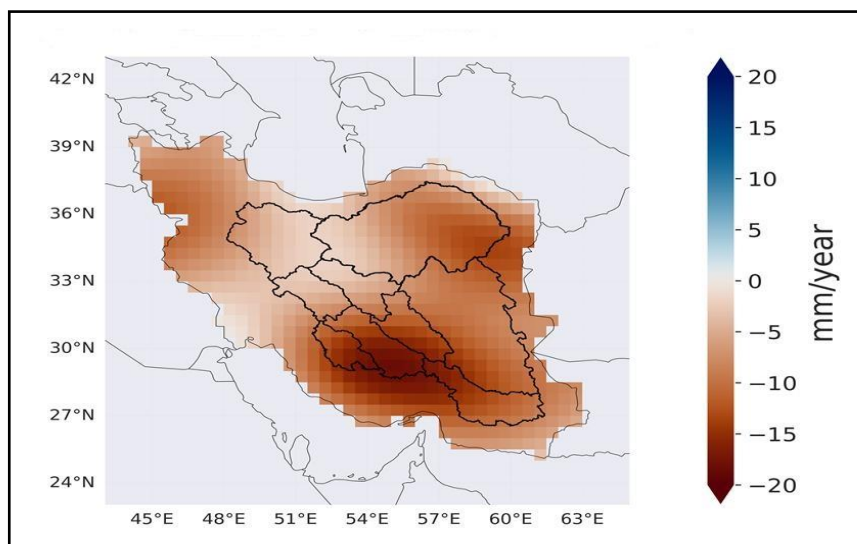
ماه فوریه با مقدار منفی ۶۶۰۸۱ میلی‌متر و ماه مارس با مقدار منفی ۶۵۰۷۸ میلی‌متر و ماه ژانویه با مقدار منفی ۵۴۰۷۶ میلی‌متر به ترتیب دارای بیشترین روند منفی هستند (شکل ۲۲).



شکل ۲۱. نمودار مقایسه تغییرات ذخیره آب زیرزمینی حوضه‌ها در طول دوره آماری



شکل ۲۲. مقایسه روند تغییرات بر اساس ماه در طول دوره آماری از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳



شکل ۲۳. روند خشکسالی آب زیرزمینی در ایران و حوضه آبریز فلات مرکزی از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳

۴- نتیجه گیری:

پایش و اندازه‌گیری مستمر وضعیت منابع آب زیرزمینی نقش بسیار مهمی در پیشگیری از بحران‌ها و مدیریت بهینه منابع آبی ایفا می‌کند. استفاده از فناوری سنجش از دور و دسترسی به داده‌ها و محصولات ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مختلف، به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد تا از وضعیت منابع آب در هر زمان آگاه شده و بتوانند اقدامات لازم برای پیشگیری از وقوع بحران‌های آبی را اتخاذ کنند. یکی از ابزارهای مؤثر در این زمینه، داده‌های ماهواره‌ای G3P است. این ماهواره با استفاده از داده‌های مربوط به تغییرات میدان گرانشی زمین، قادر است تغییرات منابع آب زیرزمینی را ارزیابی کند و به‌عنوان ابزاری مکمل برای پایش وضعیت ذخایر آب زیرزمینی عمل کند. به کمک این فناوری، سیاست‌گذاران و محققان می‌توانند تحلیل‌های بهتری از روند تغییرات منابع آب زیرزمینی در مقیاس وسیع ارائه دهند. نتایج این پژوهش نشان داد که حوضه آبریز دریاچه نمک با میانگین منفی ۲۲.۲۱ میلی‌متر و حوضه آبریز ابرقو-سیرجان با مقدار منفی ۲۲.۲۱ میلی‌متر به ترتیب دارای کمترین و بیشترین روند کاهشی بوده‌اند (شکل ۲۱). بر اساس نقشه ترسیم‌شده (شکل ۲۳)، روند تغییرات آب زیرزمینی در حوضه‌های فرعی فلات مرکزی ایران طی دوره‌ی آوریل ۲۰۰۲ تا سپتامبر ۲۰۲۳ به‌طور کلی منفی بوده است. داده‌ها نشان می‌دهند که تقریباً تمامی مناطق این حوضه با کاهش مستمر سطح و ذخیره‌ی آب زیرزمینی مواجه شده‌اند. شدت این کاهش در بخش‌های جنوبی و مرکزی حوضه، شامل استان‌های یزد، کرمان، اصفهان و شمال فارس، قابل توجه‌تر بوده و در برخی نقاط به حدود منفی ۲۰ میلی‌متر در سال رسیده است. مناطق شمالی‌تر همچون سمنان، تهران و بخش‌هایی از خراسان نیز روند کاهشی داشته‌اند، هرچند شدت آن نسبت به بخش‌های مرکزی و جنوبی کمتر است. مقایسه این نتایج با نمودار شکل (شکل ۲۱) نشان می‌دهد که حوضه‌های ابرقو-سیرجان، طشک-بختگان-مهارلو و کویر دره انجیر با نزولی‌ترین وضعیت مواجه هستند. عدم مشاهده‌ی هیچ‌گونه روند مثبت (افزایش یا تثبیت) در محدوده‌ی فلات مرکزی نشان می‌دهد که طی دو دهه‌ی اخیر این منطقه با بحران جدی افت منابع آب زیرزمینی مواجه بوده است. این امر عمدتاً می‌تواند ناشی از برداشت بیش از حد در بخش کشاورزی، کاهش بارش‌های مؤثر، تغییرات اقلیمی و ضعف در مدیریت منابع آب باشد. تداوم این روند پیامدهایی همچون فرونشست زمین، کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی، شور شدن آبخوان‌ها و در نهایت تشدید ناپایداری‌های زیست‌محیطی و اجتماعی را به دنبال خواهد داشت. نتایج پژوهش حاضر با مطالعه محسن و زهره ابراهیمی خوسفی (۲۰۲۲) در خصوص روند تغییرات منابع آب و عوامل مؤثر در آن در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران و مطالعه نعیمی و همکاران (۲۰۲۵) مبنی بر بررسی اثرات فعالیت‌های انسانی بر کمیت منابع آب زیرزمینی در حوضه کویر مرکزی ایران همخوانی دارد.

نتایج آن پژوهش‌ها نشان می‌دهد که منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز فلات مرکزی در حال کاهش است. همچنین نتایج مطالعه پاریزی و همکاران (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که وضعیت پایداری مدیریت منابع آب زیرزمینی در فلات مرکزی ایران به‌ویژه در مناطق نزدیک به کلان‌شهرها به شدت ضعیف است. یکی از دلایل این ضعف، تراکم جمعیت بالای این مناطق است که موجب بهره‌برداری بیشتر از منابع آب زیرزمینی شده است.

۴- منابع

- Aghakouchak, A., Farahmand, A., & Amini, A. (2015). Drought and groundwater depletion in the western Iran: A GRACE-based study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2757-2771. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2757-2015>
- Aghakouchak, A., Farahmand, A., & Amini, A. (2016). Drought and groundwater depletion in Isfahan, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(15), 1052. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5802-3>
- Aghakouchak, A., Farahmand, A., & Amini, A. (2018). Impact of prolonged droughts on groundwater resources in central Iran. *Journal of Hydrology*, 556, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.021>
- Aghakouchak, A., Farahmand, A., & Amini, A. (2020). Analysis of drought impact on groundwater resources in Fars province, Iran using GRACE data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(8), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08394-x>
- Aghakouchak, A., Farahmand, A., & Amini, A. (2021). Satellite-based monitoring of groundwater depletion in central Iran. *Journal of Hydrology*, 597, 126153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126153>
- Alizadeh, A., & Keshavarz, A. (2005). Status of agricultural water use in Iran. *Proceedings of Water Conservation, Reuse, and Recycling*.
- Amini, M., & Amiri, N. (2021). "Satellite-based monitoring of groundwater depletion in Iran." *Journal of Hydrology*, 576, 1-14.
- Ebrahimi Khusfi, M., & Ebrahimi Khusfi, Z. (2022). An analysis of the trend changes in water resources and factors affecting it in the Central Plateau of Iran using satellite products. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 15(4), 41-60. <https://doi.org/10.48308/gisj.2022.102889>
- Eliasson, J. (2014). "Global Water Crisis: Causes, Consequences and Solutions." *Nature*, 517, 6-12. <https://www.nature.com/articles/517006a>.
- Farahmand, A., Moosavi, V., Aghakouchak, A., & Mirzaie, A. (2017). Groundwater level and its temporal variations in Iran using GRACE data. *Hydrological Sciences Journal*, 62(12), 2093-2107. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1367851>
- Forootan, E., Safari, A., & Awange, J. L. (2021). Large-scale total water storage and water flux changes over Iran using GRACE and reanalysis products. *Science of The Total Environment*, 793, 148487.
- Ghaedi, A. (2021). Impact of Recent Droughts on Water Availability in Drought-Prone Countries: A Case Study of Iran. *Journal of Water Resources*, 35(4), 123-136.
- Güntner, A., Sharifi, E., Haas, J., Boergens, E., Dahle, C., Dobsław, H., Dorigo, W., Dussailant, I., Flechtner, F., Jäggi, A., Kosmale, M., Luoju, K., Mayer-Gürr, T., Meyer, U., Preimesberger, W., Ruz Vargas, C., & Zemp, M. (2024). Global Gravity-based Groundwater Product (G3P) (Version 1.12) [Data set]. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/g3p.2024.001>
- Hafezparast, M. (2021). Monitoring groundwater level changes of Mianrahan aquifer with GRACE satellite data. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(2), 428-443. <https://doi.org/10.1001.1.20087942.1400.15.2.16.8>
- Humphrey, V., & Simmons, C. T. (2023). G3P: A global product of monthly groundwater storage changes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(2), 405-426. <https://doi.org/10.5194/hess-27-405-2023>
- Karami, E., Karami, B., Mahdavi, M., & Dargahi, B. (2021). Satellite-based monitoring of groundwater in southern Iran. *Water Resources Management*, 35, 1011-1025. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02621-4>
- Kulshreshtha, S. N. (1998). "Water Resources and Their Management in Arid and Semi-Arid Regions." *Water Resources Management*, 12(4), 269-282.
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315-328.

- Madani, K., Karami, E., & Morid, S. (2017). A framework for quantifying human-induced pressures on groundwater resources. *Scientific Reports*, 7(1), 12269. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12877-4>
- Movahedi, M., Asgari, H., Kousari, M., & Malekian, A. (2021). Impact of drought on groundwater resources in southern Iran using satellite data. *Hydrological Processes*, 35(18), 3769-3785. <https://doi.org/10.1002/hyp.13853>
- Nazemi, A., & Wheat, H. S. (2018). On the role of anthropogenic water regulation in the hydrology of Iran. *Water Resources Research*, 54(5), 3391–3411. <https://doi.org/10.1029/2017WR022247>
- Naimi, M., Jalili, A., & Zandi-Far, S. (2025). Effects of human activities on the quantity of groundwater resources (Case study: Central Kavir Basin of Iran). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 32(2), 160–184. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2025.133605>
- Parizi, E., Hosseini, S. M., & Sadeghi, A. R. (2023). Assessing the sustainability of groundwater resource management in aquifers of Iran's Central Plateau Basin. *Iranian Journal of Water and Sustainable Development*, 19(3), 10–9. <https://doi.org/10.1001.1.17352347.1402.19.3.10.9>
- Rodell, M., Velicogna, I., & Famiglietti, J. S. (2009). The gravity recovery and climate experiment (GRACE). *Geophysical Research Letters*, 36(18), L18401. <https://doi.org/10.1029/2009GL039624>
- Ranjbar, S., Kholghi, M., & Abdeh Kolahchi, A. (2025). Assessment and validation of GRACE satellite data with groundwater resources index (GRI) at Qazvin aquifer plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(4), 1103-1117. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.383301.669806>
- Sharifi, E., Haas, J., Boergens, E., Dobslaw, H., & Güntner, A. (2025). Technical Note: GRACE-compatible filtering of water storage data sets via spatial autocorrelation analysis [Preprint]. *egusphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1514>
- Taylor, R. G., Scanlon, B. R., & Doherty, J. (2013). Groundwater and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Tian, H., Voss, K. A., & Konar, M. (2019). Groundwater depletion and its impact on the sustainability of global water resources. *Nature Sustainability*, 2(11), 1089-1098. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0329-x>
- UN-Water (2009). "Water in a Changing World: The United Nations World Water Development Report." United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359–392.
- Zarezadeh, A., Mohammadi, M., Ghorbani, S., & Sadeghi, S. (2022). Impact of drought on groundwater resources in Iran: A comprehensive review. *Hydrological Processes*, 36(5), 1036-1051. <https://doi.org/10.1002/hyp.14122>