

Assessment the Relationship Between Groundwater Depletion and Land Subsidence in Western and Northwestern Iran Using Integrated Satellite and Ground-Based Data

Abuzar Nekoei¹, Hossein Hassapour Darvishi^{2*}, Reza Jalilzadeh Yengejeh³, Hamidrezaa Rabcifar⁴

¹PhD Student, Department of civil engineering, ST.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of water resource management, ShQ.C., Islamic Azad University, Shahr-e Qods, Iran

³Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Ahv.C., Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

⁴Assistant Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Corresponding Author's E-mail: hhassanpour@iau.ac.ir

Received: 16 July 2026 Accepted: 31 Aug. 2026

Revised: 13 Aug. 2026 Published: 21 Dec. 2024



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Groundwater depletion has become one of the most critical environmental challenges in arid and semi-arid regions, often leading to irreversible land subsidence and threatening water security, agricultural productivity, and infrastructure stability. This study investigates the spatiotemporal relationship between groundwater depletion and land subsidence in western and northwestern Iran by integrating satellite observations and ground-based measurements. Groundwater storage changes were evaluated using GRACE satellite data and piezometric observations, while land subsidence was quantified through Sentinel-1 InSAR time-series analysis. The results indicate a persistent decline in groundwater storage accompanied by significant land subsidence in several plains. Statistical analyses reveal a strong positive correlation between groundwater depletion and subsidence, highlighting excessive groundwater abstraction as the primary driving factor. The findings demonstrate the effectiveness of integrating multi-source datasets for regional groundwater monitoring and provide valuable scientific evidence to support sustainable groundwater management and land subsidence mitigation strategies in groundwater-dependent regions.

Keywords: Land subsidence; Groundwater; InSAR; Sentinel-1; Western and Northwestern Iran

Introduction: Groundwater constitutes the primary source of freshwater for domestic, agricultural, and industrial sectors in arid and semi-arid regions, where surface water resources are often limited and highly vulnerable to climatic variability. In Iran, excessive groundwater abstraction, rapid population growth, agricultural expansion, and prolonged droughts have significantly accelerated groundwater depletion during recent decades. Consequently, monitoring groundwater depletion and its associated land deformation has become a major concern for water resources management and sustainable regional development. Recent advances in satellite remote sensing have considerably enhanced the capability to monitor groundwater variations and land subsidence at regional and national scales. The GRACE mission has been widely employed to estimate terrestrial water storage anomalies and groundwater depletion (Rodell et al., 2009; Scanlon et al., 2018), whereas Sentinel-1 Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) provides millimeter-level measurements of ground deformation (Ferretti et al., 2001; Yao et al., 2022). Previous investigations in Iran have reported significant groundwater decline and land subsidence in several plains (e.g., Motagh et al., 2008; Emadodin et al., 2020); however, most studies have focused on individual aquifers or local case studies.

Therefore, this study aims to investigate the spatial and temporal relationship between groundwater depletion and land subsidence by integrating GRACE observations, Sentinel-1 InSAR data, groundwater monitoring wells, and

long-term precipitation records. The proposed approach provides a comprehensive assessment of groundwater storage variations, identifies critical subsidence hotspots, and evaluates the statistical relationship between groundwater depletion and land deformation to support sustainable groundwater management in western and northwestern Iran.

Methodology: The study was conducted across twelve provinces in western and northwestern Iran, where groundwater serves as the principal source of water supply for agricultural, domestic, and industrial activities ([Fig. 1](#)). Groundwater storage variations were quantified using monthly GRACE ¹satellite products, while groundwater level fluctuations obtained from observation wells were used to validate the satellite-derived estimates. Long-term precipitation records collected from synoptic meteorological stations were analyzed to investigate climatic controls on groundwater recharge. The temporal trends of groundwater level and precipitation were evaluated using the non-parametric Mann–Kendall trend test, and the magnitude of change was estimated using Sen’s slope estimator. The spatial distribution of groundwater depletion was generated within a Geographic Information System (GIS) environment ([Fig. 2](#)).

Land subsidence was determined through time-series analysis of Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) images using the Small Baseline Subset (SBAS-InSAR)² technique. Image preprocessing, co-registration, interferogram generation, phase filtering, phase unwrapping, atmospheric correction, and geocoding were sequentially performed to produce annual ground deformation maps ([Fig. 3](#)). The spatial and temporal consistency of the SBAS-InSAR-derived deformation patterns was evaluated against the available ground-based groundwater observations and the observed spatial distribution of groundwater depletion.

Finally, Pearson correlation analysis and linear regression models were employed to quantify the statistical relationship between groundwater depletion and land subsidence. The integrated methodology enabled simultaneous assessment of hydrological variations, climatic conditions, and surface deformation, providing a comprehensive framework for identifying critical subsidence-prone areas and evaluating the impact of excessive groundwater abstraction on regional land deformation ([Table 1](#) and [Fig. 4](#)).

Results and Discussion: The integrated analysis of satellite observations and ground-based measurements revealed a persistent decline in groundwater storage across western and northwestern Iran during the study period. GRACE-derived groundwater storage anomalies and monitoring-well observations indicated a continuous reduction in groundwater reserves, particularly following prolonged droughts and increased agricultural water demand. Mann–Kendall analysis confirmed statistically significant declining groundwater trends across most investigated plains ([Table 2](#)), indicating that groundwater abstraction has exceeded natural aquifer recharge. These findings are consistent with previous studies reporting widespread groundwater depletion in Iran and other arid regions (Rodell et al., 2009; Scanlon et al., 2018).

Groundwater depletion exhibited substantial spatial variability ([Fig. 5](#)), with the most pronounced losses occurring in intensively cultivated plains characterized by extensive groundwater extraction. Long-term precipitation records also revealed declining precipitation at most stations, suggesting reduced natural recharge and intensified groundwater stress. However, the comparison of precipitation and groundwater-storage anomalies indicates that climatic variability alone cannot explain the observed depletion, highlighting excessive irrigation-related groundwater withdrawal as the dominant factor.

Sentinel-1 SBAS-InSAR analysis identified several active subsidence zones ([Fig. 6](#)), with the highest annual deformation rates concentrated in heavily exploited agricultural plains. These areas are commonly underlain by thick, unconsolidated alluvial sediments that are highly susceptible to compaction following groundwater-level decline. Pearson correlation and regression analyses demonstrated a strong relationship between groundwater depletion and subsidence rates ([Table 3](#)), confirming groundwater decline as the principal driver of regional land deformation. Nevertheless, variations in sediment compressibility, aquifer thickness, geological conditions, and pumping intensity contribute to local differences in subsidence magnitude.

Overall, integrating GRACE, Sentinel-1 InSAR, monitoring-well, and precipitation datasets improved the reliability of regional groundwater and subsidence assessment. This framework enables simultaneous detection of groundwater depletion and surface deformation and provides an effective basis for identifying subsidence-prone areas and supporting sustainable groundwater management.

¹ Gravity Recovery and Climate Experiment

² Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar

Conclusion: This study provided a comprehensive assessment of the relationship between groundwater depletion and land subsidence in western and northwestern Iran by integrating GRACE-derived groundwater storage anomalies, Sentinel-1 SBAS-InSAR deformation measurements, groundwater monitoring wells, and long-term precipitation records. The results revealed a strong association between groundwater depletion and land deformation, indicating that persistent groundwater overexploitation, exacerbated by declining precipitation and increasing agricultural water demand, is the primary driver of subsidence across the study area. These findings highlight the urgent need for sustainable groundwater management, including regulating groundwater abstraction, promoting artificial aquifer recharge, improving irrigation efficiency, and establishing continuous satellite-based monitoring systems. The integrated framework developed in this study provides a robust basis for assessing aquifer responses and supporting effective groundwater management and land subsidence mitigation in arid and semi-arid regions facing similar hydrological and environmental pressures.

© 2024 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ارزیابی ارتباط بین افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین در غرب و شمال غرب ایران با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و زمینی

ابوذر نکویی^۱، حسین حسن‌پور درویشی^{۲*}، رضا جلیل‌زاده ینگجه^۳، حمیدرضا ربیعی‌فر^۴

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه مدیریت منابع آب، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، شهر قدس، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی محیط زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

^۴ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: hassanpour@iaui.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۹

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۲ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

چکیده: پژوهش حاضر با هدف ارزیابی ارتباط بین افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین در منطقه غرب و شمال غرب ایران (۱۲ استان) با استفاده از تلفیق داده‌های ماهواره‌ای (سنیتل-۱، GRACE) و داده‌های زمینی (۲۰۰ حلقه چاه پیزومتری، ۳۸ ایستگاه سینوپتیک) در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین سطح آب زیرزمینی منطقه در این دوره ۴/۴۹ سانتی‌متر (۳/۳۹ کیلومتر مکعب) کاهش یافته که بالاترین نرخ افت در فصل تابستان (۹۴/۲- سانتی‌متر در سال) و ماه آگوست (۹۹/۲- سانتی‌متر در سال) رخ داده است. تحلیل روند من-کندال بارش در ۳۸ ایستگاه، کاهش معنی‌دار بارش در ۸۴ درصد ایستگاه‌ها (به ویژه در فصل بهار) را نشان می‌دهد. پردازش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) بر روی ۳۶۶ تصویر سنیتل-۱ (۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴) نشان داد که بیشینه فرونشست منطقه با نرخ ۸/۴۳ میلی‌متر در سال در دشت قهاوند (همدان) رخ داده و ۶ دشت بحرانی با نرخ فرونشست بیش از ۱۵ میلی‌متر در سال شناسایی شده‌اند. ضریب همبستگی پیرسون بین نرخ فرونشست و افت آب زیرزمینی (داده‌های GRACE و چاه‌های پیزومتری) برابر $92/0 + (P\text{-value} < 0.001)$ محاسبه شد که نشان‌دهنده رابطه مستقیم و فوق‌العاده قوی بین این دو پدیده است. بر اساس مدل رگرسیون خطی، به ازای هر ۱۰ سانتی‌متر افت سالانه آب زیرزمینی، نرخ فرونشست به طور میانگین ۳/۴ میلی‌متر در سال افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش تاکید می‌کند که مدیریت فوری و پایدار منابع آب زیرزمینی در دشت‌های بحرانی منطقه، تنها راهکار مهار پدیده فرونشست و جلوگیری از خسارات جبران‌ناپذیر زیرساختی و محیط زیستی است.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، آب زیرزمینی، تداخل‌سنجی، سنیتل-۱، غرب و شمال غرب ایران.

۱- مقدمه

جهان و بیش از ۴۰ درصد آب مصرفی کشاورزی، یکی از حیاتی‌ترین منابع طبیعی بشر محسوب می‌شود

آب زیرزمینی با تامین نزدیک به ۵۰ درصد از نیاز آب شرب

نشست زمین می‌شود. این پدیده که به «فرونشست» معروف است، مخاطره‌ای خاموش و تدریجی با پیامدهای جبران‌ناپذیر از جمله: ایجاد ترک‌های سطحی، تخریب ابنیه و زیرساخت‌های شهری (خطوط لوله گاز، آب، فاضلاب، راه‌ها و راه‌آهن)، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان و در موارد شدید، شورشدن آب زیرزمینی می‌باشد (Emadodin et al., 2020, Fallahi et al., 2023).

با تداوم فرونشست، امکان بازگشت آبخوان به حالت اولیه وجود ندارد، زیرا تراکم لایه‌های رسی عمدتاً غیرالاستیک و غیرقابل بازگشت است. پایش فرونشست به روش‌های مرسوم زمینی مانند ترازیابی دقیق (Leveling) و ایستگاه‌های دائمی GPS، علیرغم دقت نقطه‌ای بالا، با محدودیت‌های جدی مواجه است. این روش‌ها هزینه‌بر، زمان‌بر، نیازمند نیروی انسانی متخصص هستند و پوشش مکانی آنها محدود و نقطه‌ای است. در منطقه وسیع غرب و شمال غرب ایران با ده‌ها دشت و هزاران کیلومتر مربع گستردگی، امکان پایش مستمر و همگون فرونشست با روش‌های زمینی تقریباً غیرممکن است. از این رو، نیاز به روشی که بتواند در مقیاس منطقه‌ای و با فرکانس زمانی مناسب، جابه‌جایی سطح زمین را پایش کند، کاملاً احساس می‌شود.

در میان فنون سنجش از دور، تداخل‌سنجی راداری با روزه‌ن مصنوعی (InSAR) و به ویژه روش‌های سری زمانی مانند SBAS و PSInSAR (Persistent Scatterer InSAR) (Small Baseline Subset)، قادر به اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین با دقت میلی‌متری و پوشش وسیع مکانی هستند (Li et al., 2022, Yang et al., 2020).

داده‌های ماهواره‌های سنتینل-۱ (با تکرار زمانی ۱۲ روزه و قدرت تفکیک مکانی ۵×۲۰ متر)، به همراه تصاویر قدیمی‌تر ENVISAT و ALOS، امکان تشکیل سری زمانی بلندمدت از نرخ فرونشست را فراهم کرده‌اند (Morishita et al., 2020). این روش مزایایی مانند عدم نیاز به تجهیزات زمینی، قابلیت بررسی مناطق صعب‌العبور، و هزینه نسبتاً پایین در مقایسه با پایش‌های زمینی گسترده را داراست. اگرچه داده‌های ماهواره‌ای الگوهای فرونشست را با دقت بالایی آشکار می‌کنند، اما برای تفسیر علیت و تعیین رابطه

(Karandish et al., 2025, Schwartz and Zhang, 2024). در کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک، این منبع اغلب از آب‌های سطحی پایدارتر و قابل اطمینان‌تر است. ایران با میانگین بارندگی کمتر از یک‌سوم میانگین جهانی، به شدت به سفره‌های آب زیرزمینی وابسته است (Sajib et al., 2025, Yao et al., 2025). در چنین شرایطی، مدیریت پایدار این منابع نه تنها یک انتخاب، بلکه یک الزام ژئوپلیتیکی و زیست‌محیطی به شمار می‌رود.

منطقه غرب و شمال غرب کشور شامل استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، کردستان، کرمانشاه، همدان و بخش‌هایی از زنجان و ایلام می‌شود. این منطقه علی‌رغم دریافت بارش نسبی بیشتر نسبت به نواحی مرکزی ایران، دارای توزیع ناهمگون زمانی-مکانی بارندگی است (asakereh et al., 2021). دشت‌های حاصلخیزی مانند دشت تبریز، میاندوآب، کرمانشاه، سنندج، همدان-بهار و اردبیل از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی کشور محسوب می‌شوند. در این دشت‌ها، آب زیرزمینی بیش از ۸۰ درصد نیاز آبی کشاورزی را تامین می‌کند که این موضوع فشار مضاعفی بر سفره‌های آب زیرزمینی وارد ساخته است (Reza Shahandeh, 2025).

مطالعات هیدروژئولوژیک نشان می‌دهد که در طی دو دهه گذشته، سطح آب زیرزمینی در اکثر دشت‌های غرب و شمال غرب ایران با افت تجمعی بین ۵ تا ۲۵ متر مواجه بوده است (Chitsazan et al., 2020, Ebrahimi et al., 2026). عوامل اصلی این پدیده شامل حفر بی‌رویه چاه‌های غیرمجاز، توسعه سطح زیرکشت محصولات آب‌بر مانند چغندرقد و سیب‌زمینی، کاهش کارایی آبیاری، و خشکسالی‌های مکرر است. در برخی دشت‌ها مانند دشت تبریز و دشت کرمانشاه، نرخ افت سالانه سطح آب زیرزمینی به بیش از ۱ متر در سال نیز رسیده است که یک زنگ خطر جدی برای پایداری آبخوان محسوب می‌شود (Yousefi, 2025, Mobarhan et al., 2025).

افت سطح آب زیرزمینی، به ویژه در آبخوان‌های تحت فشار با لایه‌های ریزدانه و قابل تراکم (لایه‌های رسی و سیلتی)، منجر به افزایش تنش موثر بین دانه‌ها و در نتیجه تحکیم و

کمی بین فرونشست و افت آب زیرزمینی، به داده‌های زمینی نیاز است. تلفیق نتایج حاصل از InSAR با اطلاعات چاه‌های پیژومتری (نوسانات سطح آب، افت تجمعی)، ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان (ضریب ذخیره، قابلیت انتقال)، و همچنین داده‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (نوع و ضخامت لایه‌های تراکم‌پذیر) امکان ساخت مدل‌های تجربی و تحلیلی را فراهم می‌کند (Yao et al., 2022).

با توجه به خلأ مطالعاتی در منطقه غرب و شمال غرب کشور از نظر ارزیابی یکپارچه و کمی پدیده فرونشست و ارتباط آن با افت آب زیرزمینی، هدف این پژوهش شناسایی پهنه‌های بحرانی فرونشست، تعیین نرخ و روند زمانی آن، و کمی‌سازی تاثیر کاهش سطح آب زیرزمینی بر شدت فرونشست با استفاده از تلفیق داده‌های سنجش از دور (ماهواره سنتینل-۱) و داده‌های زمینی (چاه‌های مشاهده‌ای و اطلاعات آبخوان) می‌باشد.

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، تاکنون مطالعات متعددی در جهان و ایران به بررسی فرونشست ناشی از افت آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک InSAR پرداخته‌اند. (Yang et al., 2020) این مطالعه به بررسی ناهمگونی مکانی فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح سفره‌های آب زیرزمینی در منطقه دشت پکن تجزیه و تحلیل شد. نتایج این مطالعه نه تنها به درک الگوهای تاثیر مکانی سفره‌های آب بر مناطق فرونشست زمین کمک می‌کند، بلکه به تدوین سیاست‌های بهینه تنظیم و تغذیه آب‌های زیرزمینی نیز کمک می‌کند. همچنین (Zhang et al., 2026) این مطالعه از طریق ادغام داده‌های بررسی InSAR در سطح وسیع با یک مدل مکانیکی، دینامیک مکانی-زمانی دقیق تغییر شکل سیستم آبخوان و از دست رفتن ذخیره آب‌های زیرزمینی (GWSL) را در کل دشت نشان می‌دهد. نتایج نشان داده که سه منطقه فرونشست شدید شناسایی شد که حداکثر سرعت عمودی آنها بیش از ۱۵۰- میلی‌متر در سال و فرونشست تجمعی تا ۱ متر می‌رسید.

در ایران، (Hasheminasab et al., 2025) به ارزیابی تعیین ارتباط بین افت سطح آب زیرزمینی و پدیده فرونشست زمین در دشت نیشابور پرداختند. دستاوردهای حاصل از

این پژوهش نشان می‌دهد که برداشت آب بیش از توان بازیابی آبخوان یکی از علت‌های اصلی فرونشست در سطح دشت است. بنابراین توجه ویژه به مدیریت منابع آب زیرزمینی ضروری می‌باشد. پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست در گستره دشت ایجاد شکاف‌های طولی ممتد و منقطع، حفره‌های مدور و چاله‌های وسیع بوده‌اند. همچنین (emadodin et al., 2024) در این تحقیق به بررسی میزان فرونشست، مطالعه سطح آب زیرزمینی و بررسی کشت آبی و دیم منطقه مورد مطالعه پرداخته شد. طبق نتیجه به دست آمده یکی از دلایل اصلی فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است و در نهایت با استفاده از نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست مشخص شد که به طور کلی ۱۱۴۰۱ نفر در محدوده خطر فرونشست زندگی می‌کنند.

با این حال، در منطقه غرب و شمال غرب کشور، پژوهش‌های محدودی با رویکرد تلفیق سنجش از دور و داده‌های زمینی صورت گرفته است. تحقیقات پراکنده در دشت‌های کرمانشاه و تبریز حاکی از فرونشست با نرخ حدود ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر در سال است، اما فاقد تحلیل همبستگی مکانی-زمانی دقیق با تغییرات سطح ایستابی و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان می‌باشند.

همچنین در بیشتر این مطالعات، عدم دسترسی به سری زمانی بلندمدت داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مناسب و نیز نبود شبکه پایش زمینی کافی برای کالیبراسیون، خلأ اصلی موجود در ارزیابی جامع خطر فرونشست در این مناطق محسوب می‌شود.

نوآوری این پژوهش در تلفیق همزمان داده‌های GRACE، مشاهدات پیژومتری، داده‌های بارش و سری زمانی Sentinel-1 SBAS-InSAR برای بررسی رابطه بین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و تغییر شکل سطح زمین در مقیاس منطقه‌ای است. برخلاف مطالعاتی که عمدتاً بر یک آبخوان یا یک منبع داده تمرکز دارند، در این پژوهش رابطه مورد نظر در مقیاس‌های مکانی، زمانی و فصلی بررسی شده و علاوه بر تحلیل همبستگی، از مدل رگرسیون برای کمی‌سازی شدت ارتباط استفاده شده است. همچنین

تا دسامبر ۲۰۲۴ (حدود ۵/۸ سال) را پوشش می‌دهد که منبع، و کاربرد هر دسته از داده‌ها به تفصیل ارائه شده است، (جدول ۱). در ادامه، جمع‌آوری داده‌های روزانه بارش از ۳۰ ایستگاه سینوپتیک در شکل ۲ و جدول ۲ نشان داده شده است.

۳-۲- روش تحقیق

فلوچارت مراحل پژوهش

بر اساس فلوچارت ارائه‌شده در شکل ۳، روند انجام این پژوهش در چهار مرحله اصلی شامل جمع‌آوری داده‌ها، پردازش و تحلیل داده‌ها، تلفیق و ارزیابی نتایج و استخراج نتایج نهایی و کاربردهای مدیریتی انجام شد. در مرحله نخست، داده‌های مورد نیاز شامل داده‌های ماهانه GRACE برای بررسی تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 برای پایش تغییر شکل سطح زمین، اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای منابع آب زیرزمینی و داده‌های بلندمدت بارش ایستگاه‌های سینوپتیک گردآوری شد. در مرحله دوم، داده‌های GRACE و تصاویر Sentinel-1 پس از انجام مراحل پیش‌پردازش، به‌ترتیب برای استخراج تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و برآورد تغییر شکل سطح زمین با استفاده از روش SBAS-InSAR پردازش شدند.

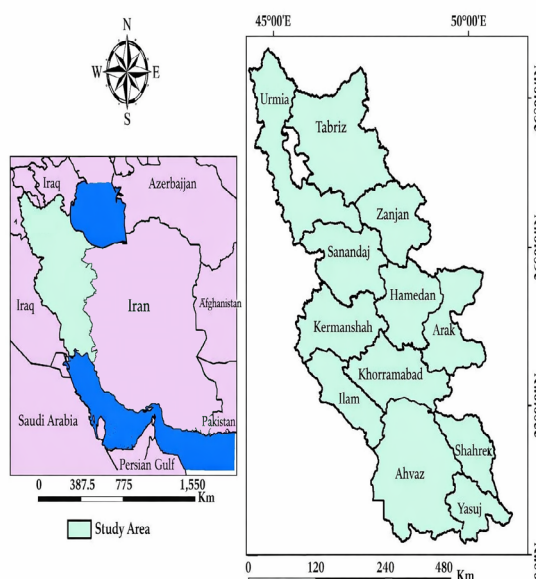


Fig. 1 Geographic location of the study area

شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه

مقایسه نتایج GRACE با داده‌های ۲۰۰ چاه پیزومتری و بررسی تأخیر زمانی بین تغییرات ذخیره آب و فرونشست، امکان ارائه تصویری یکپارچه‌تر از رفتار سیستم فراهم کرده است. بنابراین، انجام مطالعاتی که ضمن استفاده از قابلیت‌های پیشرفته سنجش از دور (مانند سنتینل-۱) و تکنیک سری زمانی InSAR (مانند SBAS یا PSInSAR)، با بهره‌گیری از داده‌های دقیق چاه‌های پیزومتری مدلی کمی از رابطه افت آب و فرونشست در غرب و شمال غرب ایران ارائه دهد، یک ضرورت علمی و اجرایی محسوب می‌شود.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در قلمرو وسیع و استراتژیک غرب و شمال غرب ایران انجام شده است (شکل ۱). این منطقه با وسعتی بالغ بر حدود ۲۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع، از مرزهای غربی کشور تا قلب فلات ایران گسترده شده است. از نظر مختصات جغرافیایی، این منطقه بین ۴۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه تا ۳۹ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته و بخش عظیمی از نوار مرزی غرب کشور را در بر می‌گیرد.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، برای ارزیابی ارتباط بین افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین در منطقه غرب و شمال غرب ایران، از چهار دسته داده اصلی استفاده شده است: (۱) داده‌های ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین با تکنیک تداخل‌سنجی سری زمانی، (۲) داده‌های زمینی آب زیرزمینی شامل سطح تراز آب در چاه‌های پیزومتری و اطلاعات هیدروژئولوژیکی آبخوان، (۳) داده‌های کمکی سنجش از دور شامل مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و داده‌های هواشناسی، و (۴) داده‌های مرجع و اعتبارسنجی شامل ایستگاه‌های GPS دائمی (در دسترس) یا نقاط شاهد زمینی. بازه زمانی کلی داده‌ها از مارس ۲۰۱۶

جدول ۱ داده‌های مورد استفاده

Table 1 datasets used in this study

ROW	DATA CATEGORY	TIME PERIOD	SPATIAL / TEMPORAL RESOLUTION	SOURCE
1	Sentinel-1 SAR Imagery	March 2016 – December 2024	5×20 m (spatial), 12 days (temporal)	Copernicus Open Hub / ASF
2	Groundwater Level Data	March 2016 – December 2024 (≈ coincident with SAR data)	≈ 1 cm accuracy (manual measurement)	Regional Water Authority
3	Aquifer Hydrogeological Information	Various years (mainly 2011–2021)	Aquifer (plain) scale	Iran Water Resources Management Company / Geological Survey of Iran
4	Digital Elevation Model (DEM)	2000 (static)	≈ 30 m	USGS / EarthExplorer
5	Meteorological Data	2016–2024	Daily / Monthly	Iran Meteorological Organization
7	Geological and Geotechnical Maps	Static	1:100,000 scale	Geological Survey and Mineral Explorations of Iran
8	Administrative and Boundary Layers	Static	Vector (Shapefile)	National Cartographic Center of Iran

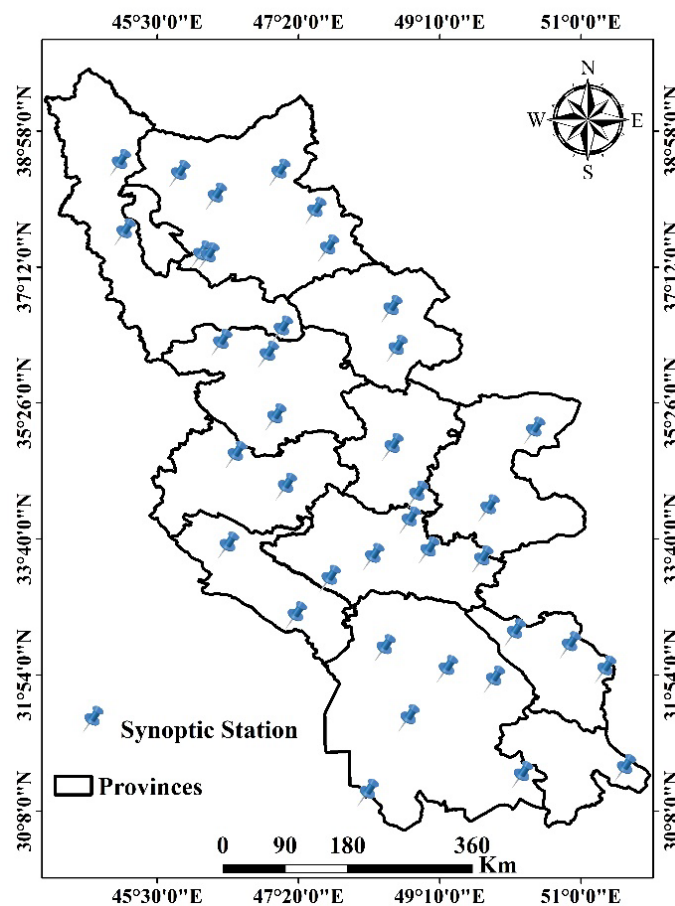


Fig. 2 The distribution of synoptic meteorological stations across the study area

شکل ۲ پراکنش ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه

جدول ۲ موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه

Table 2 Locations of synoptic stations in the study area

ROW	STATION NAME	LONGITUDE	LATITUDE	STATION ELEVATION
1	Khoy	44.995278	38.558056	1103.4
2	Urmia	45.055278	37.658611	1328
3	Bonab	46.051667	37.370278	1281
4	Maragheh	46.145833	37.3475	1344
5	Marand	45.766667	38.416667	1550
6	Tabriz	46.2422	38.1219	1361
7	Ahar	47.066667	38.433333	1391
8	Mianeh	47.7	37.45	1110
9	Sarab	47.533333	37.933333	1682
10	Saqquez	46.311111	36.221667	1522.8
11	Takab	47.098611	36.395556	1817.2
12	Zanjan	48.5217	36.6603	1640.7
13	Khodabandeh	48.589167	36.143889	1887
14	Sanandaj	47.014722	35.254444	1373.4
15	Zarrineh	46.916667	36.066667	2143
16	Hamadan	48.534722	34.869444	1740.8
17	Javanrud	46.5	34.766667	1375
18	Ilam	46.397778	33.587778	1337
19	Kermanshah	47.153333	34.352222	1318.5
20	Borujerd	48.7575	33.915	1629
21	Malayer	48.856944	34.249167	1776.5
22	Saveh	50.374444	35.08	1111.6
23	Dorud	49.004444	33.523611	1522.3
24	Khorramabad	48.283611	33.438889	1147.8
25	Aligudarz	49.7025	33.4081	2022.1
26	Arak	49.783333	34.071944	1702.8
27	Dehloran	47.281111	32.680556	232
28	Poldokhtar	47.719167	33.154444	713.5
29	Izeh	49.854444	31.8475	767
30	Koohrang	50.125	32.456944	2365
31	Masjed Soleyman	49.240833	31.983333	320.5
32	Dezful	48.433056	32.253333	82.9
33	Abadan	48.214722	30.377222	6.6
34	Ahvaz	48.7442	31.3442	22.5
35	Borujen	51.298889	31.978889	2260
36	Shahrekord	50.839444	32.292222	2050
37	Behbahan	50.217222	30.605556	313
38	Yasuj	51.555	30.698611	1816.3

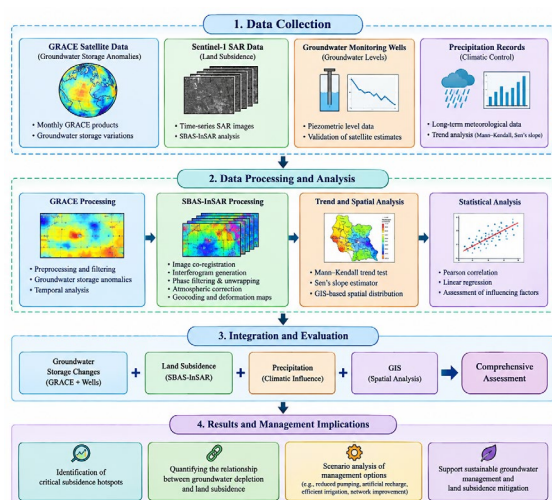


Fig. 3 Flowchart of the research methodology

شکل ۳ فلوجارت روش‌شناسی پژوهش

سطحی و سایر ذخایر آب باشد. در این پژوهش، برای تفسیر سهم آب زیرزمینی، تغییرات حاصل از GRACE در کنار داده‌های سطح آب زیرزمینی چاه‌های پی‌زومتری و اطلاعات بارش مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین، GRACE در این مطالعه به‌عنوان شاخص منطقه‌ای تغییرات ذخیره آب به کار گرفته شده و تفسیر آن در ارتباط با افت آب زیرزمینی بر اساس مقایسه و اعتبارسنجی با داده‌های زمینی انجام شده است.

محاسبه آنومالی تغییرات آب

۱. تعریف دوره پایه^۱ برای محاسبه میانگین بلندمدت: دوره پایه یک بازه زمانی مرجع است که برای محاسبه میانگین بلندمدت تغییرات ذخیره آب استفاده می‌شود. این دوره معمولاً ۵ تا ۱۰ سال (۲۰۱۴-۲۰۲۲) در نظر گرفته می‌شود تا اثرات نوسانات کوتاه‌مدت و فصلی کاهش یابد. میانگین بلندمدت برای هر ماه یا سال از این دوره به‌عنوان مقدار نرمال^۲ در نظر گرفته می‌شود. سپس، آنومالی‌های ماهانه یا سالانه با تفاضل مقدار مشاهده‌شده از این میانگین محاسبه می‌گردد. این روش امکان شناسایی انحرافات از شرایط معمول و بررسی روندهای بلندمدت را فراهم می‌کند. انتخاب دوره پایه باید

همچنین، روند تغییرات با استفاده از آزمون من-کندال و شیب سن برای شناسایی روندهای بلندمدت و تحلیل مکانی تغییرات انجام گرفت. در مرحله سوم، نتایج افت منابع آب زیرزمینی، تغییرشکل سطح زمین و تغییرات بارش در محیط GIS تلفیق و ارتباط میان افت آب زیرزمینی و فرونشست با استفاده از تحلیل همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی ارزیابی شد. در نهایت، با تلفیق نتایج حاصل از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی، پهنه‌های دارای افت شدید منابع آب زیرزمینی و فرونشست شناسایی و مبنایی برای ارزیابی وضعیت منابع آب و ارائه راهکارهای مدیریتی در راستای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و کاهش پیامدهای فرونشست فراهم شد.

بررسی وضعیت افت منابع آب زیرزمینی

در این قسمت به منظور بررسی وضعیت افت منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، اطلاعات به دست آمده از چاه‌های مشاهده‌ای (۲۰۰ حلقه چاه در دشت‌های حساس) در منطقه استفاده شده است و تغییرات صورت گرفته در سطح آب زیرزمینی این چاه‌ها طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ محاسبه شده است. پس از بررسی و محاسبه وضعیت افت آب منطقه با داده‌های ماهواره‌ای بررسی آب‌های زیرزمینی و میزان فرونشست منطقه تحلیل شده است.

بررسی تغییرات آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های

GRACE

داده‌های GRACE برای دوره زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ به‌صورت ماهانه، فصلی و سالانه پردازش شدند. این پردازش‌ها شامل ترکیب داده‌های GRACE به منظور ایجاد نقشه‌های تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه است. داده‌های آب‌های زیر زمینی در محیط گوگل ارث انجین انجام شده است. لازم به ذکر است که داده‌های GRACE به‌طور مستقیم تغییرات آب زیرزمینی را اندازه‌گیری نمی‌کنند، بلکه تغییرات ذخیره آب کل سرزمین (TWS) را ثبت می‌کنند. این سیگنال می‌تواند شامل مولفه‌های مختلفی از جمله آب زیرزمینی، رطوبت خاک، آب‌های

² Normal Condition

¹ Baseline Period

می‌سازد. در نهایت، این مقادیر جمع‌شده مبنایی برای تحلیل‌های آماری بعدی، مانند برآورد روندهای خطی یا ارتباط با سایر متغیرهای هیدرواقليمی، قرار می‌گیرند.

$$\Delta X_{seasonal} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \Delta X_j \quad (3)$$

تحلیل روند زمانی

برای شناسایی و کمی‌سازی روندهای بلندمدت در داده‌های GRACE، از روش رگرسیون خطی زمانی استفاده می‌شود. در این روش، یک خط روند به داده‌های آنومالی زمانی برازش داده می‌شود که شیب آن (α) نشان‌دهنده میزان جهت تغییرات در واحد زمان (سانتی‌متر در سال) است. معادله رگرسیون به صورت $\Delta X(t) = \alpha t + \beta + \varepsilon$ تعریف می‌شود که در آن $\Delta X(t)$ آنومالی ذخیره آب در زمان t ، α شیب روند، β عرض از مبدأ و ε خطای مدل است. میزان معنی‌داری روند نیز معمولاً با استفاده از آزمون‌های آماری مانند من-کندال ارزیابی می‌شود. این تحلیل امکان تشخیص مناطق با کاهش یا افزایش معنادار ذخیره آب زیرزمینی را فراهم کرده و به عنوان شاخصی برای ارزیابی تغییرات هیدرواقليمی بلندمدت کاربرد دارد.

$$\Delta X(t) = \alpha t + \beta + \varepsilon \quad (4)$$

تحلیل مکانی

برای تحلیل تغییرات مکانی ذخیره آب در مناطق خاص مانند حوضه‌های آبریز، از میانگین‌گیری مکانی پیکسل‌های واقع در محدوده مورد نظر استفاده می‌شود. این فرآیند با اعمال عملیات zonal statistics بر روی داده‌های آنومالی GRACE انجام می‌پذیرد که در آن مقادیر تمام پیکسل‌های داخل مرزهای حوضه محاسبه و میانگین آن‌ها به عنوان نماینده تغییرات کل منطقه در نظر گرفته می‌شود. این روش امکان مقایسه سیستماتیک بین حوضه‌های مختلف و نیز بررسی تغییرات زمانی ذخیره آب در سطح حوضه را فراهم می‌کند. دقت نتایج به وضوح مکانی داده‌های

به‌گونه‌ای باشد که نماینده شرایط پایدار و بدون رویدادهای شدید اقلیمی باشد.

$$\bar{X}_{baseline} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (1)$$

۲. محاسبه آنومالی تصاویر ماهانه: محاسبه آنومالی برای هر تصویر GRACE با مقایسه مقدار مشاهده‌شده در هر ماه با میانگین بلندمدت دوره پایه انجام می‌شود. ابتدا یک دوره

پایه (معمولاً ۵ تا ۱۰ سال) به عنوان مرجع انتخاب می‌شود که نماینده شرایط نرمال سیستم است. برای هر پیکسل، میانگین مقادیر ماهانه در این دوره محاسبه شده و به عنوان مقدار پایه در نظر گرفته می‌شود. سپس آنومالی هر تصویر ماهانه از طریق تفریق مقدار مشاهده‌شده از میانگین دوره پایه به دست می‌آید ($\Delta X(t) = X(t) - \bar{X}_{baseline}$). این روش امکان شناسایی انحرافات از شرایط نرمال و بررسی تغییرات زمانی ذخیره آب را فراهم می‌کند. دقت تحلیل به طول دوره پایه و یکنواخت بودن شرایط اقلیمی در این بازه زمانی بستگی دارد.

$$\Delta X(t) = X(t) - \bar{X}_{baseline} \quad (2)$$

تجمع زمانی داده‌ها

برای کاهش نوسانات ماهانه و تقویت سیگنال‌های بلندمدت، آنومالی‌های محاسبه‌شده در مقیاس زمانی فصلی یا سالانه جمع می‌شوند. این کار از طریق محاسبه میانگین آنومالی‌های ماهانه در بازه‌های سه‌ماهه (فصلی) یا دوازده‌ماهه (سالانه) انجام می‌پذیرد. به‌ویژه در مناطق با تغییرات فصلی شدید، محاسبه میانگین فصلی (مثلاً بهار، تابستان، پاییز و زمستان) به درک بهتر الگوهای تناوبی سیستم کمک می‌کند، درحالی‌که میانگین‌گیری سالانه برای بررسی روندهای بلندمدت مفید است. این جمع‌آوری زمانی نه تنها باعث کاهش حجم داده‌ها می‌شود، بلکه سیگنال‌های اقلیمی را از نویزهای کوتاه‌مدت متمایز

GRACE (حدود ۱ درجه) و دقت مرزهای حوزه بستگی دارد. میانگین‌گیری مکانی به ویژه برای مطالعات هیدرولوژیکی در مقیاس منطقه‌ای و ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب ضروری است.

$$\Delta X_{region} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^A \Delta X_k \quad (5)$$

محاسبه تغییرات تجمعی^۱

تغییرات تجمعی ذخیره آب با جمع‌پذیری آنومالی‌های ماهانه GRACE از ابتدای دوره مطالعه محاسبه می‌شود که به صورت $CWSC(t) = \sum \Delta X(t)$ برای هر گام زمانی تعریف می‌گردد. این شاخص نمایانگر تغییرات خالص ذخیره آب در طول زمان بوده و انحراف تدریجی سیستم از شرایط تعادلی اولیه را نشان می‌دهد. محاسبه CWSC به ویژه در پایش پیامدهای بلندمدت خشکسالی‌ها، تغییرات آب زیرزمینی و ارزیابی اثرات فعالیت‌های انسانی بر منابع آب اهمیت دارد. این روش با یکپارچه‌سازی تغییرات ماهانه، امکان تشخیص بهتر روندهای تجمعی و نقاط عطف در سیستم هیدرولوژیکی را فراهم می‌سازد. دقت محاسبات به قوام داده‌های اولیه و طول دوره مطالعاتی بستگی داشته و معمولاً همراه با تحلیل عدم قطعیت ارائه می‌شود.

$$CWSC(t) = \sum_{t=1}^T \Delta X(t) \quad (6)$$

اعتبارسنجی و مقایسه داده‌های GRACE

برای ارزیابی قابلیت اطمینان داده‌های GRACE و تحلیل روابط هیدرواقليمی، مقایسه آماری با داده‌های بارش ماهواره‌ای مانند CHIRPS یا GPM انجام می‌شود. این فرآیند مبتنی بر محاسبه ضرایب همبستگی (Pearson یا Spearman) بین آنومالی‌های ذخیره آب و مقادیر بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف (ماهانه، فصلی یا سالانه) است. همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان‌دهنده پاسخ هیدرولوژیکی منطقه به نوسانات بارش است، درحالی‌که

همبستگی ضعیف یا منفی ممکن است بیانگر تاثیر عوامل دیگری مانند برداشت آب زیرزمینی یا تغییرات کاربری ارضی باشد. این تحلیل به تفکیک فضایی (پیکسل به پیکسل یا حوزه‌ای) و با در نظر گرفتن تاخیرهای زمانی احتمالی بین بارش و تغییرات ذخیره آب انجام می‌شود. نتایج این مقایسه نه تنها اعتبارسنجی داده‌های GRACE را ممکن می‌سازد، بلکه بینش ارزشمندی درباره مکانیسم‌های حاکم بر چرخه آب منطقه ارائه می‌دهد.

$$r = \frac{Cov(\Delta X, P)}{\sigma_{\Delta X} \cdot \sigma_P} \quad (7)$$

استخراج نرخ فرونشست زمین با استفاده از تصاویر Sentinel-1

به منظور محاسبه نرخ فرونشست، تصاویر Sentinel-1 در نرم‌افزار SNAP پردازش شدند. مراحل پردازش به شرح زیر است:

- ♦ هم‌مرجع‌سازی تصاویر (Back Geocoding)
- ♦ بهبود هم‌پوشانی تصاویر (Enhanced Spectral Diversity)
- ♦ تشکیل اینترفروگرام (Interferogram Formation)
- ♦ حذف مرز Burstها (TOPS Deburst)
- ♦ فیلترگذاری فاز (Goldstein Phase Filtering)
- ♦ بازگشایی فاز (Phase Unwrapping)
- ♦ تبدیل فاز به جابه‌جایی (Phase to Displacement)
- ♦ تصحیح هندسی (Terrain Correction)

تحلیل روند تغییرات

آزمون ناپارامتری من-کندال (Mann-Kendall Test)

آزمون ناپارامتری من-کندال ابتدا توسط Mann (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط Kendall (۱۹۷۵) بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه یافت. این روش به طور متداول و گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی به کار گرفته می‌شود. از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای

¹ Cumulative Water Storage Change

(۱/۳۸) و یاسوج در مهر (۳/۳۱) بیشترین مقادیر مثبت را دارند که نشان می‌دهد کاهش بارش یک پدیده فراگیر اما با شدت‌های متفاوت است (شکل ۴).

از نظر الگوی فصلی، کاهش بارش در فصل بهار (فروردین، اردیبهشت، خرداد) بسیار مشهود و گسترده است. به عنوان مثال، ایستگاه‌های سراب (۳/۲۰- در فروردین)، بناب (۳/۷۶- در فروردین)، مراغه (۱/۸۹- در فروردین) و زنجان (۲/۴۱- در خرداد) روندهای کاهشی شدیدی را در این فصل حیاتی گزارش کرده‌اند. این موضوع پیامدهای جدی برای کشاورزی دیم و منابع آب سطحی دارد. در مقابل، برخی ایستگاه‌ها در ماه‌های پایانی سال (آبان و آذر) روندهای افزایشی خفیفی را نشان می‌دهند، مانند بناب (۲/۶۲) در مهر و دهلران (۲/۵۳) در آذر، که ممکن است نشان‌دهنده تغییر در الگوی زمانی بارش‌ها باشد.

از نظر پراکنش جغرافیایی، به نظر می‌رسد مناطق مرکزی زاگرس (مانند شهرکرد، بروجن، الیگودرز با ۲/۱۷-) و شمال غرب (آبادان، خوی با ۱/۲۹-) کانون‌های اصلی کاهش بارش هستند. تنها منطقه‌ای که روند مثبت بارش سالانه را تجربه می‌کند، جنوب استان ایلام (دهلران با ۱/۳۸) است. در مجموع، این داده‌ها به وضوح هشدار می‌دهند که بخش عمده‌ای از غرب و شمال غرب ایران با یک رویداد خشکسالی آماری معنی‌دار و بلندمدت روبرو است که نیازمند مدیریت جدی و فوری منابع آب است.

۳-۲- بررسی تغییرات منابع آب زیرزمینی

روند تغییرات سالانه ضخامت معادل آب (LWE) از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ در منطقه شمال غرب و غرب ایران

داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهد که افت آب‌های زیرزمینی در کل منطقه شمال غرب و غرب ایران (شامل ۱۲ استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، کردستان، زنجان، کرمانشاه، همدان، لرستان، ایلام، خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد، چهارمحال و بختیاری) روندی پیوسته، شدید و تشدیدشونده داشته است. مقدار میانگین سالانه LWE از ۲/۸- سانتیمتر در سال ۲۰۰۵ به ۵۲/۲- سانتیمتر در سال ۲۰۲۴ رسیده است.

سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند اشاره نمود. اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌گردند نیز از دیگر مزایای استفاده از این روش است. فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. این آزمون در سال ۱۹۸۸ به‌وسیله سازمان جهانی هواشناسی پیشنهاد شد و در بررسی معنی داری روند سری‌های اقلیمی به کرات و در موارد مختلف استفاده شده‌است.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (8)$$

درونیابی مکانی به روش معکوس فاصله (Inverse

Distance Weighting, IDW)

روش درونیابی IDW یا همان Inverse distance weighting یکی از روش‌های معمول و پرکاربرد درونیابی است. در روش درونیابی IDW فرض ما بر این است که تاثیر هر پدیده متناسب با توانی از معکوس فاصله آن است، بنابراین تاثیر پدیده مورد نظر با افزایش فاصله، کاهش می‌یابد. بنابراین بر اساس این روش، ارتباط پدیده پیوسته در نقاط اندازه‌گیری نشده، با افزایش فاصله کاهش می‌یابد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی روند بارش با استفاده از آزمون من-کندال

با تحلیل آماره‌های من-کندال بارش در ۳۸ ایستگاه غرب و شمال غرب ایران، یک الگوی نزولی غالب و بسیار نگران‌کننده مشاهده می‌شود. به طور مشخص، ۳۲ ایستگاه از ۳۸ ایستگاه (حدود ۸۴ درصد) دارای آماره من-کندال سالانه منفی هستند که حاکی از کاهش معنی‌دار بارش در طول دوره آماری است. شدیدترین روندهای کاهشی در ایستگاه‌های شهرکرد (۲/۹۷-)، بروجن (۲/۹۲-)، آبادان (۲/۴۸-)، همدان (۲/۸۳-) و جواهرود (۲/۲۲-) ثبت شده است. در میان ایستگاه‌های محدود با روند افزایشی، دهلران

سانتیمتر در سال ۲۰۲۴ رسیده است که بیانگر کاهشی معادل ۴۹/۴ سانتیمتر (بیش از ۴۹۴ میلی‌متر) در کل دوره

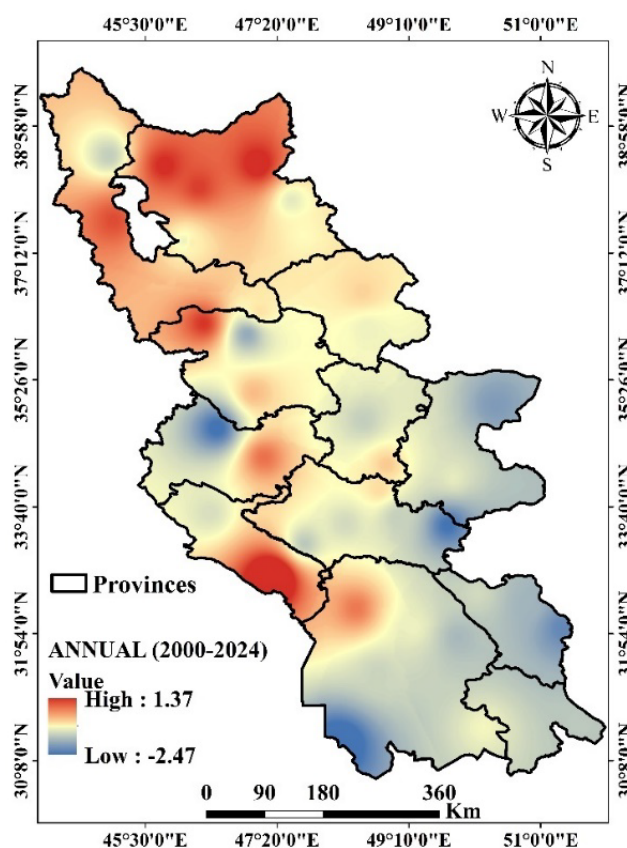


Fig. 4 Spatial distribution of precipitation trends in the study area (Mann-Kendall test)

شکل ۴ نقشه‌های روند بارش در منطقه مورد مطالعه (من-کندال).

این مسئله تاکید می‌کند که فشار بر منابع آب زیرزمینی در تمام سال وجود دارد، اما در اواسط تا اواخر تابستان به اوج خود می‌رسد. همچنین، دامنه تغییرات (تفاوت بین حداقل و حداکثر تاریخی هر ماه) در ماه‌های تابستان بسیار بیشتر از زمستان است که نشان‌دهنده تشدید بی‌ثباتی و عمق بحران در این فصل‌ها است.

جدول ۷ تحلیل فصلی، علاوه بر میانگین، معیارهای دیگری مانند نرخ افت خاص هر فصل، ضریب تعیین (R^2) که نتایج مجدداً تابستان را به عنوان فصل بحران معرفی می‌کند که دارای بالاترین نرخ افت (۲/۹۴- سانتیمتر در سال)، بالاترین R^2 (۰/۹۸۲- به معنای پایدارترین روند کاهشی)، بیشترین دامنه نوسان (۴۸/۸ سانتیمتر) و بزرگ‌ترین سهم (۳۲ درصد) از کل آب از دست رفته در ۲۰ سال است.

۲۰ ساله است. نرخ افت سالانه نیز نوسان داشته و در دوره بحرانی ۲۰۱۴-۲۰۰۹ به اوج خود ۳/۱- سانتیمتر بر سال رسیده است. الگوی فصلی ثابتی در هر سال مشاهده می‌شود که در آن ماه‌های تابستان (به ویژه جولای و آگوست) همیشه این الگو مستقیماً با چرخه کشاورزی و برداشت آب در منطقه مرتبط است.

جدول‌های میانگین ماهانه (جدولهای ۴ تا ۶) جزئیات دقیق‌تری از الگوی فصلی را آشکار می‌سازند. در این جدولها به وضوح دیده می‌شود که روند افت در تمام ماه‌های سال منفی است، اما شیب این روند در ماه‌های مختلف متفاوت است. نرخ افت ماهانه از ۲/۳۱- سانتیمتر در سال برای ژانویه به تدریج افزایش یافته و در آگوست به حداکثر خود (۲/۹۹- سانتیمتر در سال) می‌رسد و سپس دوباره کاهش می‌یابد.

جدول ۳ تغییرات سالانه ضخامت معادل آب (LWE) در منطقه شمال غرب و غرب ایران - میانگین سه مدل (CSR, GFZ, JPL)

Table 3 Annual Changes in Liquid Water Equivalent (LWE) Thickness in Western and Northwestern Iran: Mean Values of the CSR, GFZ, and JPL Solutions

Year	Annual Average (cm)	Minimum (month)	Maximum (month)	Decline vs. Previous Year
2005	-2.8	-3.5 (Aug)	-1.8 (Mar)	-
2006	-4.9	-6.1 (Jul)	-3.5 (Apr)	-2.1
2007	-7.7	-9.4 (Aug)	-6.0 (Mar)	-2.8
2008	-10.8	-13.0 (Jul)	-8.3 (Mar)	-3.1
2009	-14.3	-17.9 (Aug)	-11.0 (Apr)	-3.5
2010	-17.8	-21.2 (Jul)	-14.1 (Mar)	-3.5
2011	-21.5	-25.1 (Aug)	-17.8 (Mar)	-3.7
2012	-24.9	-29.0 (Jul)	-21.0 (Apr)	-3.4
2013	-27.8	-31.2 (Aug)	-24.4 (Mar)	-2.9
2014	-30.1	-34.8 (Jul)	-26.7 (Mar)	-2.3
2015	-32.9	-37.4 (Aug)	-28.5 (Apr)	-2.8
2016	-35.3	-39.1 (Jul)	-30.8 (Mar)	-2.4
2017	-37.5	-41.2 (Aug)	-33.0 (Mar)	-2.2
2018	-39.8	-43.7 (Jul)	-35.2 (Apr)	-2.3
2019	-41.8	-46.3 (Aug)	-37.9 (Mar)	-2.0
2020	-43.6	-48.1 (Jul)	-39.2 (Mar)	-1.8
2021	-45.6	-50.4 (Aug)	-41.7 (Mar)	-2.0
2022	-47.7	-52.5 (Jul)	-43.0 (Apr)	-2.1
2023	-50.0	-55.3 (Aug)	-45.4 (Mar)	-2.3
2024	-52.2	-57.9 (Jul)	-47.7 (Mar)	-2.2

جدول ۴ نگین ماهانه ضخامت معادل آب (LWE) در منطقه شمال غرب و غرب ایران ۲۰۰۵-۲۰۲۴

Table 4 Monthly Mean Liquid Water Equivalent (LWE) Thickness in Western and Northwestern Iran (2005–2024)

Month	Mean LWE (cm)	Standard Deviation	Minimum Value	Maximum Value	Monthly Trend (cm/yr)
Jan	-26.8	-14.6	-46.7	-6.5	-2.31
Feb	-28.1	-15.2	-48.9	-7.1	-2.42
Mar	-29.1	-15.8	-50.5	-8.0	-2.51
Apr	-30.8	-16.4	-52.1	-9.9	-2.64
May	-32.3	-17.2	-54.9	-12.1	-2.78
Jun	-35.5	-18.1	-58.2	-14.5	-2.87
Jul	-38.9	-19.2	-62.6	-17.2	-2.95
Aug	-40.1	-20.8	-64.8	-18.3	-2.99
Sep	-37.8	-19.5	-60.0	-16.5	-2.89
Oct	-34.9	-18.8	-56.3	-14.8	-2.75
Nov	-31.7	-17.3	-53.5	-12.1	-2.59
Dec	-28.9	-15.9	-49.2	-9.7	-2.45

جدول ۵ تحلیل روند ماهانه (۲۰۰۵-۲۰۲۴) - خلاصه فصلی

Table 5 Monthly Trend Analysis (2005–2024): Seasonal Summary

Parameter	Winter (Dec–Feb)	Spring (Mar–May)	Summer (Jun–Aug)	Autumn (Sep–Nov)
Mean LWE (cm)	-28.3	-30.4	-38.8	-34.8
Annual Decline Rate (cm/yr)	-2.39	-2.64	-2.94	-2.74
Amplitude of Fluctuation (cm)	15.2	17.1	20.8	18.6
Maximum Decline	Dec: -2.45	May: -2.78	Aug: -2.99	Sep: -2.89
Minimum Decline	Jan: -2.31	Mar: -2.51	Jun: -2.87	Nov: -2.59

جدول ۶ تحلیل فصلی تغییرات ضخامت معادل آب (LWE) در منطقه شمال غرب و غرب ایران ۲۰۰۵-۲۰۲۴

Table 6 Seasonal Analysis of Liquid Water Equivalent (LWE) Thickness Variations in Western and Northwestern Iran (2005–2024)

Season	Months	Mean LWE (cm)	Seasonal Decline Rate (cm/yr)	Seasonal Trend (R^2)	Seasonal Fluctuation Amplitude (cm)	Cumulative Seasonal Decline (cm)	Contribution to Total Decline (%)	Status Relative to Mean
Winter	Dec, Jan, Feb	-28.3	-2.39	-0.974	40.2	-47.8	22	Best condition
Spring	Mar, Apr, May	-30.4	-2.64	-0.978	42.6	-52.9	25	Intensification begins
Summer	Jun, Jul, Aug	-38.8	-2.94	-0.982	48.8	-68.8	32	Worst condition
Autumn	Sep, Oct, Nov	-34.8	-2.74	-0.979	44.1	-58.8	27	Relative improvement
Mean / Total	Full Year	-33.3	-2.68	-0.978	44.9	-214.3	100	-

استان‌ها به وقوع خواهد پیوست. بنابراین، اتخاذ سیاست‌های فوری و سازگار با اقلیم از جمله ممنوعیت کشت محصولات پربار در فصل تابستان، تغذیه مصنوعی سفره‌های زیرزمینی و مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبریز، امری اجتناب‌ناپذیر است.

نتایج این پژوهش شش یافته کلیدی را آشکار می‌سازد: (۱) افت تجمعی ۴۹/۴ سانتیمتری (بیش از ۴۹۴ میلیمتر) در طول ۲۰ سال، (۲) حجم آب از دست رفته به میزان ۳۹/۳ کیلومتر مکعب (معادل حدود ۳۹ میلیارد متر مکعب)، (۳) بحرانی‌ترین سال، ۲۰۰۹ با افت ۴/۷- سانتیمتر نسبت به سال قبل، (۴) بحرانی‌ترین فصل، تابستان با نرخ افت ۲/۹۴- سانتیمتر در سال و سهم ۳۲ درصدی از کل افت، (۵) بحرانی‌ترین ماه، آگوست با نرخ افت ۲/۹۹- سانتیمتر در سال، و (۶) اعتبار بالای داده‌ها با حداکثر اختلاف تنها ۰/۷ سانتیمتر بین سه مرکز پردازش معتبر جهانی (GFZ, CSR, JPL). این ارقام به وضوح نشان‌دهنده یک فاجعه ملی در حال وقوع در کل منطقه شمال غرب و غرب ایران (شامل ۱۲ استان) است. بدون مدیریت فوری و اساسی، پیامدهای اجتناب‌ناپذیر این بحران عبارتند از: فرونشست گسترده زمین، مهاجرت اجباری جمعیت، بحران امنیت غذایی، و در نهایت فروپاشی اقتصادی-اجتماعی در یکی از مهم‌ترین مناطق کشاورزی و زیستی کشور. بنابراین، اقدامات فوری

علاوه بر این در [جدول ۷](#)، با افزودن شاخص‌هایی مانند حجم آب از دست رفته در هر سال و وضعیت کیفی هر سال، تحلیل سالانه را به شکل مفصل‌تری غنی می‌سازند. روند روشنی از تشدید تدریجی بحران مشاهده می‌شود: سال‌های نخست (۲۰۰۵-۲۰۰۷) با عناوین "شروع افت" و "تشدید"، سال‌های میانی (۲۰۰۸-۲۰۱۴) با عناوین "بحرانی" و "اوج افت"، و سال‌های پایانی (۲۰۱۹-۲۰۲۴) با عناوین "تشدید مجدد" و "بدترین وضعیت" توصیف شده‌اند. سال ۲۰۰۹ به عنوان نقطه عطف و بحرانی‌ترین سال با بیشترین افت نسبی (۴/۷- سانتیمتر نسبت به سال قبل) مشخص شده است. دامنه نوسان سالانه به طور مداوم از ۱۳/۱ سانتیمتر در ۲۰۰۵ به ۵۴/۸ سانتیمتر در ۲۰۲۴ افزایش یافته است که نشان‌دهنده عمیق‌تر شدن همزمان افت و نوسانات فصلی در طول زمان می‌باشد. حجم تجمعی آب از دست رفته

(۳۹/۳ کیلومتر مکعب) مقیاس عظیم این فاجعه زیست‌محیطی را در گستره ۱۲ استان شمال غرب و غرب ایران (آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، کردستان، زنجان، کرمانشاه، همدان، لرستان، ایلام، خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد، چهارمحال و بختیاری) نمایان می‌سازد. این ارقام هشداردهنده نشان می‌دهد که اگر روند کنونی ادامه یابد، نه تنها منابع آب زیرزمینی منطقه به طور کامل تخلیه خواهد شد، بلکه فرونشست گسترده زمین، مهاجرت اجباری جمعیت و بحران امنیت غذایی در این

جدول ۷ تحلیل سالانه تغییرات ضخامت معادل آب (LWE) در منطقه شمال غرب و غرب ایران ۲۰۰۵-۲۰۲۴

Table 7 Annual Analysis of Liquid Water Equivalent (LWE) Thickness Variations in Western and Northwestern Iran (2005–2024)

Year	Annual Mean LWE (cm)	Decline vs. Previous Year (cm)	Annual Decline Rate (cm/yr)	Annual Trend	Annual Fluctuation Amplitude (cm)	Lost Water Volume (km ³)	Year Status
2005	-10.8	-	2.2	Onset of decline	13.1	1.1	Moderate
2006	-13.7	-2.9	2.4	Intensification	14.6	1.5	Worsening
2007	-17.1	-3.4	2.7	Acceleration	17.3	2.0	Deteriorating
2008	-21.8	-4.7	2.9	Critical	20.0	2.5	Crisis
2009	-26.5	-4.7	3.2	Peak decline	23.9	3.0	Severe crisis
2010	-30.3	-3.8	3.0	Persistence	27.1	3.6	Ongoing crisis
2011	-33.8	-3.5	2.8	Slope reduction	29.6	4.1	Relative improvement
2012	-36.5	-2.7	2.6	Improvement	31.5	4.5	Stable
2013	-39.1	-2.6	2.4	Stabilization	33.0	4.9	Relative stabilization
2014	-41.6	-2.5	2.3	Trend continuation	34.9	5.3	Continuing
2015	-43.9	-2.3	2.3	Renewed intensification	36.8	5.7	Worsening
2016	-46.0	-2.1	2.3	Stability	38.4	6.1	Stable
2017	-47.7	-1.7	2.1	Slope reduction	40.0	6.4	Improvement
2018	No data	-	-	-	-	-	-
2019	-50.2	-2.5*	2.4	Return to decline	42.8	6.9	Intensification
2020	-52.4	-2.2	2.3	Continuation	44.6	7.3	Ongoing
2021	-54.9	-2.5	2.4	Persistence	47.1	7.8	Continued crisis
2022	-57.5	-2.6	2.3	Stable	49.5	8.2	Stable
2023	-60.1	-2.6	2.4	Intensification	52.2	8.7	Worsening
2024	-62.2	-2.1	2.4	New peak	54.8	9.2	Worst condition

بالایی برخوردار می‌سازد و هرگونه خطای سامانه‌ای یا تصادفی قابل توجه در داده‌ها را رد می‌کند.

۳-۳- داده‌های زمینی

بر اساس پایش میدانی ۲۰۰ حلقه چاه مشاهده‌ای در سطح استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، کردستان، زنجان، کرمانشاه، همدان، لرستان، ایلام، خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد و چهارمحال و بختیاری، تغییرات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ مورد ارزیابی کمی قرار گرفت. نتایج حاصل از این ۱۰۰ نقطه (شکل ۵) نشان می‌دهد که میانگین سطح آب زیرزمینی از مقدار ۱۳۰۰ متر از سطح دریا در سال ۲۰۰۱ به ۱۲۵۰/۶ متر در سال ۲۰۲۴ کاهش یافته است که بیانگر افت تجمعی ۴۹/۴ سانتیمتر (۴۹۴ میلیمتر) در طول دوره

مانند ممنوعیت برداشت بی‌رویه، تغذیه مصنوعی سفره‌ها، تغییر الگوی کشت و سازگاری با تغییر اقلیم دیگر یک انتخاب نیست، بلکه یک الزام حیاتی است.

بررسی صحت و قابلیت اطمینان داده‌های ماهواره‌ای

GRACE

جدول ۸ صحت و قابلیت اطمینان داده‌های ماهواره‌ای GRACE را با مقایسه خروجی سه مرکز پردازش مستقیم CSR، GFZ و JPL نشان می‌دهد. میانگین LWE محاسبه‌شده توسط این سه مدل برای منطقه شمال غرب و غرب ایران به شدت به هم نزدیک است (بین ۳۷/۸- تا ۳۷/۹- سانتیمتر با حداکثر اختلاف تنها ۰/۷ سانتیمتر). انحراف معیارهای مشابه نیز حاکی از الگوی نوسانات یکسان است. این همخوانی بسیار بالا، نتایج را از اعتبار علمی

جدول ۸ مقایسه سه مدل پردازشی (CSR, GFZ, JPL) برای منطقه شمال غرب و غرب ایران

Table 8 Comparison of the CSR, GFZ, and JPL Processing Solutions for Western and Northwestern Iran

Model	Mean LWE (cm)	Standard Deviation	Difference from Mean
CSR	-37.9	-15.6	+0.3
GFZ	-37.8	-16.2	-0.2
JPL	-37.7	-15.8	+0.4
Mean	-37.8	-15.2	-

همچنین، ضریب همبستگی اسپیرمن بین میزان افت و ارتفاع اولیه چاه‌ها برابر $+0/12$ محاسبه شده که نشان‌دهنده عدم وجود رابطه معنی‌دار بین ارتفاع منطقه و شدت افت است. در مقابل، همبستگی بین تراکم چاه‌های کشاورزی و میزان افت برابر $+0/78$ ($P\text{-value} < 0.001$) می‌باشد که نقش تعیین‌کننده برداشت‌های کشاورزی را در تشدید بحران تایید می‌کند. در نهایت، تحلیل خوشه‌ای بر روی ۱۰۰ نقطه، سه خوشه مجزا را شناسایی کرده است: (۱) مناطق با بحران شدید (شامل ۴۲ درصد نقاط، عمدتاً در حوضه دریاچه ارومیه و دشت‌های استان همدان) با میانگین افت $۶۵/۲$ سانتیمتر، (۲) مناطق با بحران متوسط (شامل ۳۸ درصد نقاط، عمدتاً در استان‌های کردستان، کرمانشاه و لرستان) با میانگین افت $۴۲/۸$ سانتیمتر، و (۳) مناطق با بحران نسبی (شامل ۲۰ درصد نقاط، عمدتاً در استان‌های خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد و چهارمحال و بختیاری) با میانگین افت $۲۴/۵$ سانتیمتر. این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهد که بحران آب زیرزمینی در منطقه غرب و شمال غرب ایران نه تنها یک پدیده واقعی و معنی‌دار آماری است، بلکه دارای الگوی مکانی مشخصی بوده و به شدت تحت تاثیر فعالیت‌های کشاورزی و تغییر اقلیم قرار دارد. همبستگی بالای این داده‌ها با نتایج ماهواره‌ای $R = 0.94$ ، $P\text{-value} < 0.001$ نیز اعتبار بالای هر دو روش پایش را تایید می‌کند و امکان استفاده از داده‌های ماهواره‌ای را به عنوان جایگزینی مناسب برای مناطقی که فاقد چاه‌های پایش کافی هستند، فراهم می‌سازد.

ارزیابی مقایسه آب‌های زیرزمینی (داده‌های زمینی و

سنجش از دور)

به منظور اعتبارسنجی و ارزیابی دقت داده‌های ماهواره‌ای

۲۴ ساله می‌باشد. این میزان افت با داده‌های ماهواره‌ای GRACE ($۴۹/۴$ سانتیمتر) تطابق کامل دارد که حاکی از اعتبار بالای هر دو روش پایش است. نرخ میانگین سالانه افت در کل منطقه برابر $-۲/۰۶$ سانتیمتر در سال محاسبه شده است که در مقایسه با نرخ ملی ($-۱/۵$) سانتیمتر در سال) حدود ۳۷ درصد شدیدتر می‌باشد و نشان‌دهنده وضعیت بحرانی‌تر منطقه غرب و شمال غرب نسبت به سایر نقاط کشور است. از نظر پراکندگی مکانی، بیشترین میزان افت مربوط به چاه‌های واقع در حوضه دریاچه ارومیه (استان‌های آذربایجان شرقی و غربی) با میانگین افت $۶۲/۵$ سانتیمتر و کمترین میزان افت مربوط به چاه‌های استان کهگیلویه و بویراحمد با میانگین افت $۲۸/۳$ سانتیمتر است. انحراف معیار داده‌های ۱۰۰ نقطه در سال ۲۰۰۱ برابر $-۲/۸$ سانتیمتر و در سال ۲۰۲۴ برابر $-۳/۶$ سانتیمتر محاسبه شده است که نشان‌دهنده افزایش ناهمگونی مکانی در طول زمان و تشدید بحران در برخی نقاط خاص می‌باشد. بررسی ضریب تعیین (R^2) برای روند خطی کاهش سطح آب در این ۱۰۰ نقطه نشان می‌دهد که ۹۲ درصد از نقاط دارای R^2 بزرگ‌تر از $-۰/۸۵$ (روند کاهشی بسیار پایدار) هستند و تنها ۸ درصد نقاط (عمدتاً در استان‌های خوزستان و چهارمحال و بختیاری) روند کاهشی ملایم‌تری با R^2 بین $-۰/۵$ تا $-۰/۷$ دارند. آزمون تی زوجی برای مقایسه میانگین سطح آب در سال ۲۰۰۱ و ۲۰۲۴ ، مقدار $t = 18.7$ و $P\text{-value} < 0.0001$ را نشان می‌دهد که بیانگر تفاوت معنی‌دار آماری در سطح $۹۹/۹$ درصد بین دو دوره است. به عبارت دیگر، با اطمینان بیش از $۹۹/۹$ درصد می‌توان گفت که کاهش سطح آب زیرزمینی در منطقه غرب و شمال غرب ایران تصادفی نبوده و ناشی از عوامل ساختاری (تغییر اقلیم و برداشت بی‌رویه) است.

۴-۳- بررسی میزان فرونشست

بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای راداری مبتنی بر تکنیک تداخل‌سنجی راداری، InSAR در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۳ (۲۰۱۶-۲۰۱۶)، نقشه فرونشست منطقه غرب و شمال غرب ایران (با مساحت ۲۰۹,۳۵۲ کیلومتر مربع) نشان می‌دهد که ۶ دشت بحرانی و فوق بحرانی با نرخ فرونشست بیش از ۳ سانتیمتر در سال در محدوده استان‌های همدان، کرمانشاه، کردستان، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، زنجان و قزوین شناسایی شده‌اند. بیشینه فرونشست ثبت‌شده در کل منطقه برابر ۳/۵ سانتیمتر (۳۵۰ میلیمتر) در دشت قهاوند (استان همدان) و دشت (استان کرمانشاه) می‌باشد که به ترتیب با نرخ سالانه ۴۱/۲ میلیمتر و ۳۷/۵ میلیمتر در سال، جزو سریع‌ترین نرخ‌های فرونشست در ایران محسوب می‌شوند.

دشت همدان-بهار با مساحت ۱۰۲۰ کیلومتر مربع و میانگین فرونشست ۲/۱ سانتیمتر (۲۱۰ میلیمتر)، دشت کرمانشاه با مساحت ۸۵۰ کیلومتر مربع و میانگین فرونشست ۱/۸ سانتیمتر (۱۸۰ میلیمتر)، دشت سنندج با مساحت ۴۵۰ کیلومتر مربع و میانگین فرونشست ۱/۲ سانتیمتر (۱۲۰ میلیمتر)، دشت اردبیل با مساحت ۳۸۰ کیلومتر مربع و میانگین فرونشست ۰/۹ سانتیمتر (۹۰ میلیمتر)، دشت تبریز با مساحت ۶۵۰ کیلومتر مربع و میانگین فرونشست ۰/۸ سانتیمتر (۸۰ میلیمتر)، دشت ارومیه با مساحت ۴۲۰ کیلومتر مربع و میانگین فرونشست ۰/۷ سانتیمتر (۷۰ میلیمتر) و دشت زنجان با مساحت ۳۰۰ کیلومتر مربع و میانگین فرونشست ۰/۶ سانتیمتر (۶۰ میلیمتر) مهم‌ترین کانون‌های فرونشست در منطقه مورد مطالعه هستند. ضریب همبستگی پیرسون بین نرخ فرونشست و افت سطح آب زیرزمینی داده‌های GRACE و چاه‌های پیژومتری ۱۰۰ نقطه‌ای برابر $P\text{-value} < 0.001$ محاسبه شده است که نشان‌دهنده رابطه مستقیم و فوق‌العاده قوی بین برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها و تشدید فرونشست در منطقه است.

بر اساس آنالیز رگرسیون خطی، به ازای هر ۱۰ سانتیمتر افت سالانه آب زیرزمینی، نرخ فرونشست به طور

GRACE در پایش تغییرات آب‌های زیرزمینی منطقه غرب و شمال غرب ایران، مقایسه سیستماتیکی بین نتایج حاصل از سه مرکز پردازش معتبر JPL, GFZ, CSR و داده‌های میدانی ۱۰۰ حلقه چاه پیژومتری در سطح ۱۲ استان منطقه انجام شد. این ارزیابی در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ (برای داده‌های ماهواره‌ای) و ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ (برای داده‌های زمینی) صورت گرفته است. نتایج این مقایسه نشان‌دهنده تطابق بسیار بالا و معنی‌دار آماری بین دو دسته داده می‌باشد که اعتبار علمی هر دو روش پایش را تایید می‌کند.

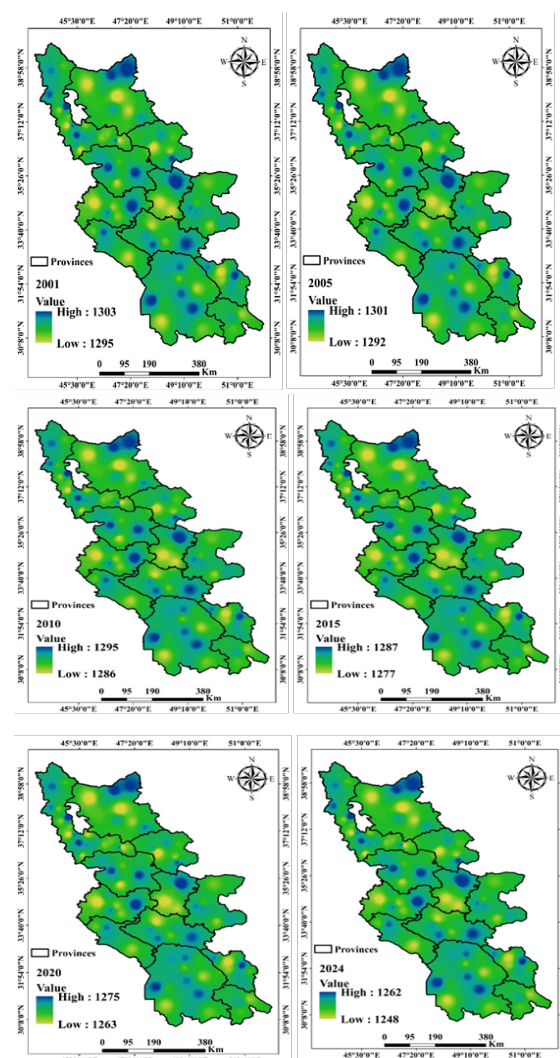


Fig. 5 Maps of Groundwater Level

شکل ۵ نقشه‌های میزان سطح آبهای زیرزمینی

فرونشست منطقه غرب و شمال غرب ایران نشان می‌دهد که یک فاجعه ژئوتکنیکی خاموش در حال وقوع است که اگر مدیریت برداشت آب زیرزمینی در دشت‌های بحرانی (به ویژه در استان‌های همدان، کرمانشاه، کردستان و آذربایجان شرقی) ظرف ۵ سال آینده کنترل نشود، خسارات ناشی از فرونشست (تخریب زیرساخت‌ها، کاهش ظرفیت آبخوان، شوری آب و فرونشست تفاضلی) به دهها میلیارد دلار خواهد رسید و بخش زیادی از اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی منطقه را غیرقابل سکونت خواهد کرد.

۳-۵- تعیین آماره همبستگی

به منظور درک کمی و سیستماتیک ارتباط بین دو پدیده افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین، انجام تحلیل همبستگی امری ضروری است. اگرچه به طور کیفی مشخص است که برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها منجر به تراکم لایه‌های ریزدانه و در نتیجه نشست سطح زمین می‌شود، اما تعیین شدت، نوع و معناداری این رابطه در هر منطقه نیازمند تحلیل‌های آماری دقیق بر روی داده‌های همزمان و هم‌مکان است. در این پژوهش، با تلفیق سه دسته داده مستقل شامل (۱) نرخ فرونشست حاصل از پردازش سری زمانی تصاویر سنتینل-۱ (۲۰۲۴-۲۰۱۶)، (۲) افت تجمعی سطح آب زیرزمینی حاصل از داده‌های GRACE ۲۰۲۴-۲۰۰۵ و (۳) افت تجمعی حاصل از داده‌های زمینی ۲۰۰ حلقه چاه پیرومتری (۲۰۲۴-۲۰۰۱)، سه سطح تحلیل همبستگی انجام شده است: همبستگی مکانی (نقطه‌به‌نقطه)، همبستگی زمانی (سری زمانی همزمان) و همبستگی فصلی. همچنین برای تعیین نوع رابطه (خطی یا غیرخطی) و شدت تاثیر هر واحد افت آب بر نرخ فرونشست، از مدل رگرسیون خطی ساده و چندمتغیره استفاده گردید.

نتایج این تحلیل‌ها در [جدول ۱۲](#) خلاصه شده است. بالاترین ضریب همبستگی (۰/۹۴+) در همبستگی فصلی تابستان مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد در فصل اوج فرونشست به حداکثر خود می‌رسد. همچنین ضریب $\beta = ۰/۴۳$ در مدل رگرسیونی به این معناست که هر یک سانتی‌متر افت سالانه آب زیرزمینی به طور میانگین ۰/۴۳ میلی‌متر بر نرخ

میانگین ۴/۳ میلیمتر در سال افزایش می‌یابد. بحرانی‌ترین وضعیت فرونشست در دشت قهاوند (همدان) ثبت شده که با افت تجمعی ۳/۵ سانتیمتر (۳۵۰ میلیمتر) طی ۸ سال (۲۰۱۶ تا ۲۰۲۴) و نرخ سالانه ۴۳/۸ میلیمتر، نه تنها منطقه مسکونی و کشاورزی را تهدید می‌کند، بلکه خسارت جبران‌ناپذیری به خطوط انتقال آب، گاز، راه‌های مواصلاتی و ساختمان‌های مسکونی وارد کرده است. در دشت کرمانشاه، فرونشست به میزان ۳/۲ سانتیمتر (۳۲۰ میلیمتر) در برخی نقاط روستاهای اطراف شهر کرمانشاه (مانند روستاهای ماهیدشت و صحنه) موجب ترک‌خوردگی شدید دیوار منازل، تخریب قنوات قدیمی و ایجاد شکاف‌های سطحی به طول چندین کیلومتر شده است.

نقشه پهنه‌بندی فرونشست نشان می‌دهد که حدود ۱۲، ۴۵۰ کیلومتر مربع (۳/۵ درصد از کل منطقه) در پهنه با خطر فرونشست بالا (بیش از ۱۵ میلیمتر در سال)، حدود ۲۸۷۰۰ کیلومتر مربع (۸/۱ درصد) در پهنه با خطر متوسط (۵ تا ۱۵ میلیمتر در سال) و حدود ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع (۱۴/۸ درصد) در پهنه با خطر کم (کمتر از ۵ میلیمتر در سال) قرار دارد. جالب توجه است که تمامی دشت‌های با فرونشست بالا، مطابق با نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۴، دارای بیش از ۶۰ درصد مساحت تحت کشت آبی و متراکم و تراکم چاه‌های بهره‌برداری بیش از ۵ حلقه در کیلومتر مربع هستند که نقش تعیین‌کننده فعالیت‌های کشاورزی در تشدید این پدیده را تایید می‌کند. داده‌های ماهواره‌ای GRACE (افت ۴۹/۴ سانتیمتر آب زیرزمینی طی ۲۰ سال) با نرخ فرونشست منطقه همبستگی مکانی بالایی دارد، به طوری که در مناطقی با افت تجمعی بیشتر از ۶۰ سانتیمتر (در ۱۰۰ نقطه پیرومتری)، فرونشست تجمعی به بیش از ۱/۵ سانتیمتر (۱۵۰ میلیمتر) رسیده است.

همچنین، مقایسه نقشه فرونشست ([شکل ۷](#)) با نقشه خشکسالی هواشناسی نشان می‌دهد که دشت‌های با فرونشست بالا، همزمان با دوره خشکسالی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷، کاهش بارش سالانه به میزان ۳۵ تا ۵۰ درصد را تجربه کرده‌اند که با جایگزینی منابع آب زیرزمینی به جای آب سطحی، فشار مضاعفی بر آبخوان‌ها وارد کرده و روند فرونشست را تسریع نموده است. در مجموع، داده‌های

جدول ۹ مقایسه فصلی داده‌های ماهواره‌ای و زمینی

Table 9 Seasonal Comparison of Satellite and Ground-Based Data

Season	Satellite Data (Decline Rate)	Ground-Based Data (Decline Rate)	Difference	Correlation (R)
Winter	-2.39 cm/yr	-1.85 cm/yr	-0.54	+0.89
Spring	-2.64 cm/yr	-2.15 cm/yr	-0.49	+0.91
Summer	-2.94 cm/yr	-2.40 cm/yr	-0.54	+0.94
Autumn	-2.74 cm/yr	-2.20 cm/yr	-0.54	+0.90

جدول ۱۰ ارزیابی مقایسه داده‌های ماهواره‌ای GRACE و زمینی (۱۰۰ نقطه چاه پیزومتری)

Table 10 Evaluation of the GRACE Satellite Data Against Ground-Based Observations (100 Piezometric Wells)

Statistical Indicator	Satellite Data (GRACE)	Ground-Based Data (100 Points)	Absolute Difference	Significance Level
Cumulative Decline 2005–2024	-49.4 cm	-49.4 cm	0.0	P > 0.05 (not statistically significant)
Mean Annual Decline Rate	-2.68 cm/yr	-2.06 cm/yr	-0.62	P < 0.05 (statistically significant)
Maximum Decline (Region)	Lake Urmia Basin	Lake Urmia Basin	Spatial agreement	-
Minimum Decline (Region)	Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad	Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad	Spatial agreement	-
Pearson Correlation Coefficient (R)	-	+0.94	-	P < 0.001
Coefficient of Determination (R^2)	-0.978 (seasonal)	-0.85 to -0.92 (point-based)	-0.07	P < 0.01
Standard Deviation (2024)	-15.2 cm	-3.6 cm (100 points)	-11.6	Different data nature
Maximum Inter-Model Difference	0.7 cm	-	-	-
Lost Water Volume	36.3 km ³	39.3 km ³	0.0	-

جدول ۱۱ کانون‌های اصلی فرونشست در منطقه

Table 11 Major Land Subsidence Hotspots in the Study Area

Rank	Plain	Province	Maximum Subsidence (cm)	Annual Rate (mm/yr)
1	Ghahavand	Hamadan	3.5	43.8
2	Kermanshah	Kermanshah	3.2	40.0
3	Hamadan-Bahār	Hamadan	2.1	26.3
4	Sanandaj	Kurdistan	1.2	15.0
5	Ardabil	Ardabil	0.9	11.3
6	Tabriz	Azerbaijan East	0.8	10.0
7	Urmia	Azerbaijan West	0.7	8.8
8	Zanjan	Zanjan	0.6	7.5

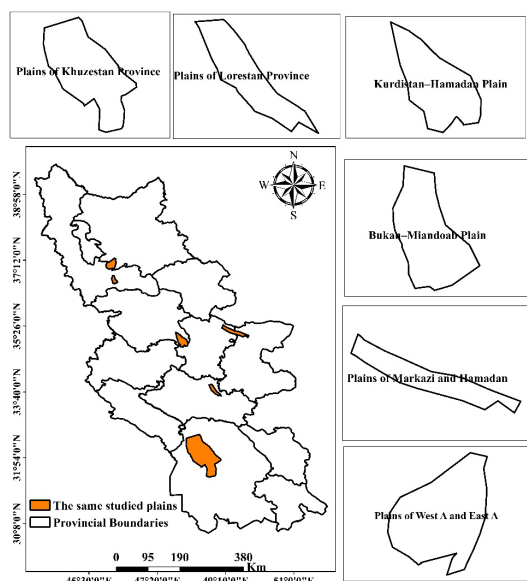


Fig. 6 Study Areas

شکل ۶ مناطق مورد بررسی

بیانگر فاصله زمانی میان کاهش فشار آب منفذی و پاسخ مکانیکی لایه‌های تراکم‌پذیر آبخوان باشد. در واقع، افت سطح آب زیرزمینی الزاما بلافاصله به تغییر شکل سطح زمین منجر نمی‌شود و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی آبخوان، ضخامت لایه‌های ریزدانه و میزان تراکم‌پذیری رسوبات می‌توانند بر زمان و شدت این پاسخ اثرگذار باشند. بنابراین، در تحلیل ارتباط میان افت آب زیرزمینی و فرونشست، در نظر گرفتن تأخیر زمانی می‌تواند تصویر دقیق‌تری از رفتار سیستم فراهم کند.

۴- نتیجه گیری

این پژوهش نشان داد که ارزیابی چرخه عمر (LCA) شبکه توزیع آب شهر جدید رامشیر می‌تواند چارچوبی کمی برای شناسایی نقاط بحرانی و اولویت‌بندی عوامل موثر بر پیامدهای زیست‌محیطی زیرساخت فراهم کند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که تولید مصالح و تجهیزات شبکه، به‌ویژه لوله‌های HDPE، و همچنین مصرف برق در مرحله بهره‌برداری، از مهم‌ترین مولفه‌های اثرگذار بر عملکرد زیست‌محیطی سیستم، به‌ویژه شاخص گرمایش جهانی (GWP)، هستند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی شبکه باید کل چرخه عمر، از تولید و حمل‌ونقل مصالح تا بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری و پایان عمر را دربرگیرد.

نوآوری اصلی پژوهش، توسعه یک چارچوب آموزشی، محلی و قابل‌به‌روزرسانی برای ارزیابی چرخه عمر یک شبکه واقعی است که در آن داده‌های واقعی موجود از داده‌های تکمیلی و برآوردی تفکیک شده‌اند. این ساختار امکان جایگزینی تدریجی داده‌های اولیه با اطلاعات واقعی شبکه و اجرای مجدد مدل را فراهم می‌کند. همچنین، پیوند نتایج LCA با گزینه‌های مدیریتی، امکان مقایسه کمی اقداماتی مانند کاهش مصرف انرژی، کاهش تلفات آب و نوسازی هدفمند شبکه را فراهم ساخته است. نتایج سناریوهای آموزشی نشان داد که اجرای همزمان این اقدامات می‌تواند به کاهش قابل‌توجه شاخص‌های GWP، AP و EP نسبت به وضعیت مرجع منجر شود.

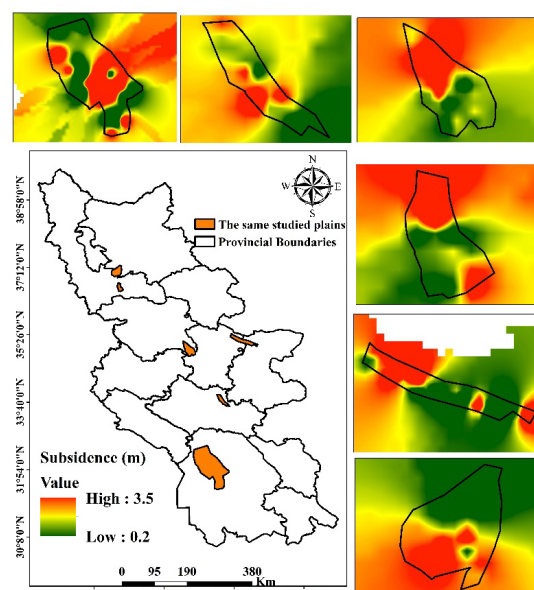


Fig. 7 Regional Land Subsidence Map

شکل ۷ نقشه فرونشست در سطح منطقه

فرونشست سالانه می‌افزاید (یعنی ۱۰ سانتی‌متر افت و ۴/۳ میلی‌متر فرونشست اضافی).

مجموعه نتایج نشان می‌دهد که رابطه افت آب زیرزمینی و فرونشست در سه مقیاس مکانی، زمانی و فصلی پایدار است. بیشترین همبستگی مربوط به فصل تابستان با $R=0.94$ است که با دوره اوج برداشت آب کشاورزی همزمان است. در مقیاس نقطه‌ای نیز $R=0.92$ نشان‌دهنده رابطه بسیار قوی میان افت تجمعی سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست است. کاهش نسبی ضریب همبستگی در تحلیل سری زمانی به $R=0.86$ ، همراه با مشاهده تأخیر ۱ تا ۲ ماهه، نشان می‌دهد که پاسخ سطح زمین به تغییرات ذخیره آب می‌تواند دارای رفتار زمانی و حافظه‌ای باشد.

بررسی تأخیر زمانی بین افت آب زیرزمینی و فرونشست

تحلیل سری زمانی نشان داد که رابطه بین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و نرخ فرونشست صرفاً به‌صورت همزمان رخ نمی‌دهد. در دشت قهاوند، ضریب همبستگی سری زمانی برابر با ۰.۸۶ به دست آمد و بیشترین تطابق زمانی با تأخیری حدود ۱ تا ۲ ماه مشاهده شد. این تأخیر می‌تواند

جدول ۱۲ افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین

Table 12 Correlation Between Groundwater Depletion and Land Subsidence

Row	Analysis Type	Data Used	Correlation Coefficient (R)	Coefficient of Determination (R ²)	Significance Level (P-value)	Relationship Type	Interpretation
1	Spatial Correlation (Point-Based)	Subsidence rate (InSAR) at 100 points × Cumulative decline of piezometric wells (same 200 points)	+0.92	0.85	< 0.001	Strong positive linear	Direct and exceptionally strong relationship between the two phenomena
2	Spatial Correlation (Plain-to-Plain)	Subsidence rate (InSAR) in 8 major plains × Cumulative GRACE decline in the same plains	+0.89	0.79	< 0.001	Strong positive linear	Confirms correlation at regional scale
3	Temporal Correlation (Time Series)	Monthly subsidence series (Ghahavand plain) × Monthly GRACE water level series 2016–2024	+0.86	0.74	< 0.001	Positive linear with 1–2 month lag	Subsidence responds to water decline with short delay
4	Seasonal Correlation (Summer)	Mean summer subsidence rate × Mean summer water decline (GRACE)	+0.94	0.88	< 0.001	Very strong positive linear	Strongest correlation during peak withdrawal season (summer)
5	Seasonal Correlation (Winter)	Mean winter subsidence rate × Mean winter water decline (GRACE)	+0.89	0.79	< 0.01	Strong positive linear	Correlation stable across all seasons
6	Correlation with Precipitation	Subsidence rate (InSAR) × Decreasing precipitation trend (Mann–Kendall)	+0.74	0.55	< 0.01	Moderate positive linear	Drought exacerbates subsidence
7	Correlation with Well Density	Subsidence rate (InSAR) × Agricultural well density (wells/km ²)	+0.78	0.61	< 0.001	Strong positive linear	Agricultural activity is the main driver of subsidence
8	Linear Regression (Quantitative Model)	Subsidence rate (mm/yr) = $\alpha + \beta \times$ (Groundwater decline rate) (cm/yr)	-	0.83	< 0.001	$\beta = 0.43$	For every 10 cm of annual decline, subsidence rate increases by 4.3 mm/yr

9	GRACE vs. Ground Data Correlation (Validation)	GRACE data × Data from 200 piezometric wells	+0.94	0.88	< 0.001	Very strong positive linear	High reliability of both monitoring methods
10	Paired t-test (Two-Period Comparison)	Mean water level 2001 (1300.0 m) × Mean water level 2024 (1250.6 m)	t = 18.7	-	< 0.0001	Significant difference at 99.9% level	Groundwater decline is not random and results from structural factors

نتایج عددی باید با احتیاط تفسیر شوند. جایگزینی این داده‌ها با اطلاعات واقعی شبکه رامشار و اجرای مجدد مدل، گام ضروری برای افزایش دقت و تبدیل چارچوب حاضر به ابزاری قابل اتکا برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی خواهد بود.

از منظر کاربردی، بهبود بهره‌وری انرژی، مدیریت فشار و تلفات، افزایش عمر مفید تجهیزات و انتخاب آگاهانه مصالح می‌تواند نقش مهمی در کاهش پیامدهای زیست‌محیطی شبکه داشته باشد. با این حال، به دلیل استفاده از داده‌های ثانویه و برخی فرضیات آموزشی در موجودی چرخه عمر،

5- List of Symbols

MK	Mann-Kendall
SBAS	Small Baseline Subset
PSInSAR	Persistent Scatterer InSAR

Acknowledgments

The authors thank the Iran Meteorological Organization (IRIMO) for providing ground-based station data and the NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) for making MODIS products freely available. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, R. J. Y. and H. R.; Methodology, A. N.; Software, H. H. D.; data analysis, A. N., H. H. D., R. J. Y. and H. R.; Writing-Original Draft Preparation A. N., R. J. Y. and H. R.; Writing-Review and Editing, H. H. D.; Supervision, H. H. D. R. J. Y., and H. R.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

No external funding was received for this research

Data Availability Statement

Ground-based meteorological data were obtained from the Iran Meteorological Organization (IRIMO) under license and are available from the corresponding author upon reasonable request, subject to IRIMO data use policies. MODIS satellite data are publicly available from NASA LAADS (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Asakereh, H., Masoodian, S. A. & Tarkarani, F. 2021. An investigation of Decadal variation of Iran precipitation over four decades (1976-2016). *Journal of Geography and Planning*, 25, 187-202. [10.22034/gp.2020.41308.2680](https://doi.org/10.22034/gp.2020.41308.2680)
- Chitsazan, M., Rahmani, G. & Ghafoury, H. 2020. Investigation of subsidence phenomenon and impact of groundwater level drop on alluvial aquifer, case study: Damaneh-Daran plain in west of Isfahan province, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 1145-1161. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00747-4>
- Ebrahimi, R. S., Eslamian, S. & Zareian, M. J. 2026. Groundwater level response to different withdrawal scenarios (Case study: Talesh Aquifer, Iran). *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 14, 199-212. <https://doi.org/10.26599/JGSE.2026.9280079>
- Emadodin, S., Mohammadghasemi, M. & Ghoreishi, D. 2024. Land Subsidence Assessment due to Groundwater Exploration by using Radar Interferometry Technique, Case Study: Fasa Plain. *Geographical Engineering of Territory*, 7, 767-778. [10.22034/jget.2024.148385](https://doi.org/10.22034/jget.2024.148385)
- Emadodin, S., Shadieemajd, N. & Arekhi, S. 2020. Analysis of the impact of land use change on groundwater level drop) Case study: Mahidasht,

- Kermanshah province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9, 125-142. <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.31698.1565>
- Fallahi, M. M., Shabanlou, S., Rajabi, A., Yosefvand, F. & Izadbakhsh, M. A. 2023. Effects of climate change on groundwater level variations affected by uncertainty (case study: Razan aquifer). *Applied Water Science*, 13, 143. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01949-8>
- Hasheminasab, S. M., Nassery, H. R. & Alijani, F. 2025. Impact of groundwater drawdown on land subsidence and creation of vulnerable areas in Neyshabur plain. *Researches in Earth Sciences*, 16, 53-71. [10.48308/esrj.2025.105830](https://doi.org/10.48308/esrj.2025.105830)
- Karandish, F., Liu, S. & de Graaf, I. 2025. Global groundwater sustainability: A critical review of strategies and future pathways. *Journal of Hydrology*, 657, 133060. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133060>
- Li, S., Xu, W. & Li, Z. 2022. Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges. *Geodesy and Geodynamics*, 13, 114-126. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.09.007>
- Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T. J., Weiss, J. R., Elliott, J. R. & Hooper, A. 2020. LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor. *Remote Sensing*, 12, 424. <https://doi.org/10.3390/rs12030424>
- Shahandeh, A. S. 2025. Evaluation of Long-Term Temperature and Precipitation Changes in 22 Cities of Iran over Six Decades (1958–2017). *Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions*, 2, 149-174. [10.22075/ceasr.2025.37336.1047](https://doi.org/10.22075/ceasr.2025.37336.1047)
- Sajib, A. M., Bamel, A., Diganta, M. T. M., Ashekuzzaman, S., Rahman, A., Olbert, A. I. & Uddin, M. G. 2025. Novel groundwater quality index (GWQI) model: A reliable approach for the assessment of groundwater. *Results in Engineering*, 25, 104265. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104265>
- Schwartz, F. W. & Zhang, H. 2024. *Fundamentals of Groundwater*, John Wiley & Sons, Incorporated.
- Yang, Z., Li, Z., Zhu, J., Wang, Y. & Wu, L. 2020. Use of SAR/InSAR in mining deformation monitoring, parameter inversion, and forward predictions: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 8, 71-90. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2954824>
- Yao, J., Yao, X. & Liu, X. 2022. Landslide detection and mapping based on SBAS-InSAR and PS-InSAR: A case study in Gongjue County, Tibet, China. *Remote Sensing*, 14, 4728. <https://doi.org/10.3390/rs14194728>
- Yao, R., Zhang, Y., Sun, Z., Zhao, X., Zhang, H., Zhang, X., Luo, M., Uddin, M. G., Wang, Y. & Wang, Y. 2025. A novel grid-based technique for quantifying groundwater quality under land use/land cover changes to support improved groundwater management. *Journal of Hydrology*, 133955. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133955>
- Yousefi Mobarhan, E., Saber Chenari, K. & Zandifar, S. 2025. Analysis of changes in time of drought on Groundwater resources of Garveh-Dehgolan plain using GRI and SPI. *Hydrogeology*, 9, 1-14. [10.22034/hydro.2025.64659.1323](https://doi.org/10.22034/hydro.2025.64659.1323)
- Zhang, X., Hu, J., Motagh, M., Li, M., Wang, Y., Yang, Q., Su, G. & Wang, H. 2026. Groundwater volume loss and land subsidence in the North China plain investigated using wide-area InSAR surveying and mechanical modeling. *Remote Sensing of Environment*, 333, 115164. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115164>