

Assessment of Land Subsidence Induced by Groundwater Level Decline and Land. Use Changes in the Mahidasht Plain, Kermanshah

Kimia Delpak¹ | Amjad Maleki² | Amir safari³ | Seyyd Morovat Eftekhari⁴

¹ Department of Geography, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

² Corresponding Author, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: a.maleki@razi.ac.ir

³ Department of Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

⁴ Department of Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi, University, Tehran, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 24 Oct 2025

Received in revised form:
26 May 2026

Accepted: 10 Jun 2026

Available online: 23 Sep 2026

Keywords:

Land Subsidence,
Land Use Change,
Groundwater Resources,
SBAS-InSAR Radar
Interferometry.

ABSTRACT

Land subsidence has become a critical geomorphological hazard in many arid and semi-arid regions of Iran, where intensive groundwater extraction and rapid land-use transitions have accelerated ground deformation. This study examines the spatial-temporal dynamics of subsidence in the Mahidasht Plain of Kermanshah Province by integrating SBAS-InSAR time-series analysis, long-term piezometric records, and multi-temporal Landsat-based land-use classifications. Thirty Sentinel-1 SLC images (2022–2024) were processed using SNAP and SARscape to derive vertical displacement rates, while groundwater-level variations from 21 piezometric wells (2001–2023) were interpolated using the Inverse Distance Weighting (IDW) method. Land-use maps for 2001 and 2023 were generated through artificial neural network classification to evaluate the impact of agricultural transformation on subsidence patterns. Results indicate substantial deformation, ranging from +22 mm of uplift to −40 mm of annual subsidence, with the most severe rates concentrated in the eastern and northern sectors of the plain. These hotspots coincide with significant groundwater decline (up to −26.98 m) and extensive conversion of rain-fed agriculture to irrigated farming. The spatial overlap among subsidence zones, declining water tables, and intensified land-use changes confirms the dominant influence of anthropogenic pressures on ground deformation. In contrast, central and western areas exhibit lower deformation rates due to more stable groundwater conditions and limited land-use alteration. Overall, the findings reveal an escalating subsidence crisis driven primarily by unsustainable groundwater exploitation and agricultural expansion. If current trends continue, they may threaten soil stability, water quality, infrastructure integrity, and regional food security. This study underscores the urgent need for sustainable groundwater management, reduction of high-water-demand crops, and stricter land-use regulations to mitigate future risks effectively.

Cite this article: Delpak, K., Maleki, A., Saffri, A., & Eftekhari S. M. (2026). Assessment of Land Subsidence Induced by Groundwater Level Decline and Land. Use Changes in the Mahidasht Plain, Kermanshah. *Geography and Environmental Sustainability*, 16(3), 49-67. <https://doi.org/10.22126/ges.2026.13047.2924>



© The Author (s).

DOI: <https://doi.org/10.22126/ges.2026.13047.2924>

Publisher: Razi University

Introduction

Land subsidence has become an increasingly critical geomorphological hazard in many arid and semi-arid regions of Iran, where rapid agricultural intensification, groundwater over-extraction, and climate-driven water scarcity have accelerated ground deformation. The Mahidasht Plain in Kermanshah Province is one of the regions most severely affected by this phenomenon. Subsidence in such environments typically results from the compaction of unconsolidated sediments, triggered primarily by declining groundwater levels and exacerbated by land-use changes, particularly the conversion of rain-fed agriculture to irrigated farming. Given the region's semi-arid climate and its heavy reliance on groundwater for irrigation, understanding the interplay between hydrological changes and land-surface response is critical for sustainable planning. Given the growing pressure on groundwater resources and the rapid transformation of agricultural practices in Mahidasht, a comprehensive assessment of subsidence dynamics is essential. This study integrates radar interferometry, hydrogeological observations, and multi-temporal land-use analysis to evaluate the spatial-temporal patterns of subsidence and identify the dominant drivers influencing ground deformation in the region.

Materials and Methods

A multi-source analytical framework was employed, combining SBAS-InSAR time-series analysis, piezometric data interpretation, and long-term land-use change assessment. Thirty Sentinel-1 SLC images acquired between January 2022 and July 2024 were processed using SNAP and SARscape to derive vertical displacement rates. Interferograms were generated using small baseline pairs, followed by Goldstein filtering, phase unwrapping, and geocoding. Ground control points were selected in stable zones to enhance phase correction accuracy. The IDW interpolation was performed with a power parameter of 2, and cross-validation was used to assess the accuracy of the groundwater-level maps. Additionally, the land-use classification achieved an overall accuracy exceeding 85% based on field-collected ground truth points. Hydrogeological data from 21 piezometric wells (2001–2023) were analyzed using the IDW interpolation method to map groundwater-level variations. Land-use maps for 2001 and 2023 were produced using an artificial neural network classifier applied to Landsat imagery, supported by field-based ground control points. The integration of these datasets enabled a detailed evaluation of the relationship between subsidence, groundwater decline, and land-use transitions.

Results and Discussion

The SBAS-InSAR analysis revealed significant vertical deformation across the Mahidasht Plain, with displacement ranging from +22 mm uplift to −40 mm annual subsidence. The most severe subsidence occurred in the eastern and northern sectors, where groundwater extraction is most intensive. Piezometric data indicated a maximum groundwater decline of −26.98 m over the study period, with steep hydraulic gradients surrounding high-extraction well clusters. These zones correspond closely with subsidence hotspots, demonstrating a strong spatial correlation between aquifer depletion and ground settlement. Land-use analysis showed substantial expansion of irrigated agriculture between 2001 and 2023, replacing large areas of rain-fed croplands. This transition significantly increased groundwater demand, accelerating aquifer compaction and subsidence. The growth of barren lands further reduced soil moisture retention and increased susceptibility to erosion, contributing to weakened soil structure. The spatial overlap between subsidence zones and areas with high irrigation density was quantified, revealing that regions with more than 50% irrigated crop cover experienced subsidence rates nearly double those with lower irrigation

intensity. Moreover, the temporal analysis indicates an acceleration of subsidence after 2020, coinciding with a period of reduced rainfall. In contrast, central and western areas exhibited lower subsidence rates due to more stable groundwater conditions and limited land-use alteration.

Comparisons with previous studies in other Iranian plains such as Kermanshah, Harris, and Shahr-e Kord confirm that subsidence in Mahidasht is both more intense and spatially distinct. While many regions exhibit central subsidence patterns, Mahidasht shows maximum deformation along its eastern and northern margins, indicating a shift in subsidence dynamics driven by localized human pressures. The combined evidence highlights that anthropogenic factors particularly groundwater over-extraction and agricultural intensification are the primary drivers of subsidence in the region. The findings also reveal that continued land-use transitions, especially the conversion of rain-fed to irrigated farming, have amplified environmental stress, reduced soil stability, and increased vulnerability to long-term degradation. These changes have broader implications for water quality, agricultural productivity, and the resilience of rural communities.

Conclusion

This study demonstrates that the Mahidasht Plain is experiencing a rapidly intensifying subsidence crisis driven primarily by unsustainable groundwater exploitation and extensive land-use transformation. Maximum annual subsidence reached 40 mm, with the most affected areas corresponding to zones of severe groundwater decline and widespread conversion of rain-fed to irrigated agriculture. Continued trends pose serious risks to soil stability, water quality, agricultural productivity, and infrastructure integrity. Effective mitigation requires strict groundwater management, reduction of high-water-demand crops, and regulatory control over land-use practices. Integrating these findings into local water-resource management plans for instance, through managed aquifer recharge and promoting drought-resistant crops could substantially reduce future impacts. The study also emphasises the need for continuous satellite-based monitoring to track deformation trends and inform adaptive management strategies. The findings provide a scientific foundation for regional planning and highlight the urgent need for sustainable resource management to prevent irreversible environmental degradation.

ارزیابی فرونشست زمین متأثر از افت تراز آبخوان‌ها و تغییرات کاربری اراضی در دشت ماهیدشت کرمانشاه

کیمیا دلیاک^۱ | امجد ملکی^۲ | امیر صفاری^۳ | سید مروت افتخاری^۴

۱. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
۲. نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: a.maleki@razi.ac.ir
۳. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
۴. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰ دسترسی آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، تغییرات کاربری اراضی، منابع آب زیرزمینی، تداخل‌سنجی راداری SBAS-InSAR	فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، طی سال‌های اخیر شدت یافته و پیامدهای گسترده‌ای بر منابع آب، خاک و زیرساخت‌های انسانی بر جای گذاشته است. این پژوهش با هدف تحلیل الگوی مکانی-زمانی فرونشست در دشت ماهیدشت استان کرمانشاه، از تلفیق تکنیک SBAS-InSAR، داده‌های بلندمدت چاه‌های پیژومتری و تحلیل تغییرات کاربری اراضی بهره‌گرفت. برای این منظور، ۳۰ تصویر سنتینل-۱ در بازه ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴ پردازش شد و داده‌های ۲۱ حلقه چاه پیژومتری طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ با روش IDW تحلیل گردید. همچنین، نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۴۰۲ با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی تهیه شد. نتایج نشان داد بیشینه فرونشست سالانه در دشت ماهیدشت حدود ۴۰ میلی‌متر و بیشینه بالآمدگی ۲۲ میلی‌متر بوده است. بیشترین نرخ فرونشست در نواحی شرقی و شمالی دشت مشاهده شد؛ مناطقی که با افت شدید سطح ایستابی (تا ۲۶٫۹۸- متر) و تبدیل گسترده کشت دیم به آبی هم‌پوشانی دارند. این هم‌زمانی مکانی بیانگر نقش غالب عوامل انسانی در تشدید فرونشست است. در مقابل، نواحی مرکزی و غربی دشت به دلیل پایداری نسبی سطح آب زیرزمینی و تغییرات محدود کاربری، نرخ نشست کمتری را تجربه کرده‌اند. به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و تغییرات شدید کاربری اراضی، مهم‌ترین محرک‌های فرونشست در ماهیدشت هستند. تداوم روند فعلی می‌تواند تهدیدی جدی برای پایداری خاک، کیفیت آب، زیرساخت‌ها و امنیت غذایی منطقه ایجاد کند. این نتایج ضرورت مدیریت پایدار منابع آب و بازنگری در الگوی کشت را برجسته می‌سازد.

استناد: دلیاک، کیمیا؛ ملکی، امجد؛ صفاری، امیر؛ افتخاری، سید مروت (۱۴۰۵). ارزیابی فرونشست زمین متأثر از افت تراز آبخوان‌ها و تغییرات کاربری اراضی در دشت ماهیدشت کرمانشاه. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۶(۳)، ۴۹-۶۷. <https://doi.org/10.22126/ges.2026.13047.2924>

ناشر: دانشگاه رازی

© نویسندگان
DOI: <https://doi.org/10.22126/ges.2026.13047.2924>



مقدمه

فرونشست زمین یکی از مخاطرات مهم ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی است که در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌عنوان تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های انسانی، منابع طبیعی و توسعه پایدار مطرح شده است. این پدیده که به‌صورت حرکت عمودی و رو به پایین سطح زمین تعریف می‌شود. فرونشست زمین پدیده‌ای پیچیده و چندعاملی است که از فرایندهای طبیعی و انسانی ناشی می‌شود. یکی از عوامل اصلی آن، فعالیت‌های تکتونیکی مانند زلزله و حرکت گسل‌هاست که با افزایش فشار آب منفذی در خاک‌های غیر چسبنده و از بین رفتن پیوند بین دانه‌ها، موجب نشست ناگهانی یا تدریجی سطح زمین و آسیب به سازه‌ها می‌شود (صبوری، ۱۴۰۲؛ Shirzaei & Burgmann, 2018).

نوع دیگری از فرونشست، ناشی از انحلال سنگ‌های تبخیری مانند گچ، نمک و آهک است که در تماس با آب زیرزمینی حل شده و حفره‌هایی در زیر سطح زمین ایجاد می‌کنند. این فرایند به‌ویژه در سنگ‌های کربناته با واکنش شیمیایی کلسیت و اسیدکربنیک رخ می‌دهد و می‌تواند منجر به تشکیل فرو چاله‌ها شود، به‌ویژه در مناطقی با درز و شکستگی‌های سنگی باشد (Waltham et al., 2005; Ford & Williams, 2007; Gutierrez et al., 2014; Zeitoun & Wakshal, 2013). در مناطق خشک، فرونشست ناشی از خشکی رسوبات ریزدانه نیز شایع است. در این حالت، خاک‌های رسی مانند مونت‌موریونیت در اثر چرخه‌های خشک و مرطوب دچار تورم و انقباض می‌شوند و این تغییرات حجمی در حد ۵٪ می‌تواند به سازه‌ها آسیب وارد کرده و موجب ترک‌خوردگی و نشست زمین شود (Zhang et al., 2021; Guardiol-Albert., 2021; Zeitoun & Wakshal, 2013 2025;).

در مقابل، فرونشست ناشی از تراکم آبی زمانی رخ می‌دهد که نفوذ ناگهانی آب به خاک‌های خشک و متخلخل، ساختار خاک را فرومی‌پاشاند. این پدیده با حل شدن ذرات رسی و کاهش پیوستگی خاک، به‌ویژه در مناطق خشک، منجر به نشست شدید سطح زمین می‌شود (زندى و همکاران، ۱۳۹۸؛ Yang & Zhaho., 2025). از سوی دیگر، برداشت سیالات زیرزمینی مانند آب، نفت یا گاز نیز یکی از عوامل مهم فرونشست است. کاهش فشار در منافذ سنگ‌ها در اثر استخراج این منابع، موجب فشردگی رسوبات و نشست سطح زمین می‌شود. به‌ویژه برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک، با افت سطح ایستابی و فشردگی غیر قابل برگشت لایه‌های زیرسطحی همراه است و عامل اصلی حدود ۸۰ درصد از فرونشست‌های شدید ثبت شده در جهان به شمار می‌رود (Pedretti et al., 2024; Liu et al., 2022; Deros et al., 2022).

با این حال، در بسیاری از مناطق، عامل انسانی نقش اصلی در تشدید فرونشست ایفا می‌کند؛ به‌ویژه تغییرات گسترده در کاربری اراضی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی (عبداللهی و صلاحی مقدم، ۱۴۰۴؛ Liu et al., 2022). یکی از مهم‌ترین تغییرات انسانی در کاربری اراضی که به‌طور مستقیم بر منابع آب زیرزمینی و پدیده فرونشست اثر می‌گذارد، تبدیل کشت دیم به کشت آبی است. این تغییر که در بسیاری از دشت‌های کشور به‌عنوان راهکاری برای افزایش تولید کشاورزی دنبال شده است که با افزایش شدید نیاز آبی همراه بوده و فشار مضاعفی بر سفره‌های زیرزمینی وارد کرده است (Chaussard et al., 2014).

در شرایطی که تغذیه طبیعی آبخوان‌ها با کاهش نزولات جوی و تغییر اقلیم محدود شده، این نوع تغییر کاربری موجب افت سطح ایستابی، کاهش فشار منفذی و درنهایت فشردگی لایه‌های آبرفتی و نشست زمین می‌شود؛ بنابراین، تعامل بین تغییرات کاربری اراضی و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، به‌عنوان دو متغیر هم‌افزا، زمینه‌ساز بروز فرونشست‌های شدید و ناهمگن در سطح دشت‌ها است (Liu et al., 2022). دشت ماهیدشت در استان کرمانشاه، نمونه‌ای بارز از این وضعیت است. موقعیت زمین‌شناسی خاص، تغییرات گسترده در کاربری اراضی طی دهه‌های اخیر و بهره‌برداری فشرده از منابع آب زیرزمینی، این منطقه را در معرض خطر فرونشست قرار داده است.

در سال‌های اخیر، روند تبدیل اراضی دیم به کشت آبی در ماهیدشت شدت یافته و با افزایش تقاضا برای آب، فشار

قابل توجهی بر منابع زیرسطحی وارد کرده است. این تغییرات، در کنار برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها، موجب افت سطح ایستابی و بروز جابه‌جایی‌های ناهمگن در سطح زمین شده که آثار آن در قالب شکاف‌های سطحی، آسیب به چاه‌ها، اختلال در سیستم‌های آبیاری و تغییر در بیلان آب زیرزمینی قابل مشاهده است (عبداللهی و صلاحی مقدم، ۱۴۰۴؛ نصیری خانقاه و شریفیان عطار، ۱۳۹۸: ۲۸).

تحلیل دقیق این پدیده نیازمند بهره‌گیری از فناوری‌های نوین پایش زمین است. سنجش‌ازدور راداری، به‌ویژه با استفاده از داده‌های درپچه مصنوعی رادار^۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری^۲، امکان آشکارسازی جابه‌جایی‌های سطحی در مقیاس میلی‌متری را فراهم می‌سازد (عمادالدین و نظری گزیک، ۱۴۰۲؛ Raspini et al., Lu & Dzurisin, 2014). این فناوری با قابلیت تصویربرداری در تمام ساعات شبانه‌روز و شرایط مختلف جوی، ابزار مؤثری برای پایش فرونشست و بررسی ارتباط آن با تغییرات کاربری اراضی و منابع آب زیرزمینی به شمار می‌رود (Raspini et al., 2022; Zhang et al., 2024).

نوشتر پایش رو با هدف تحلیل نقش دو متغیر کلیدی تغییرات کاربری اراضی و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در بروز و تشدید پدیده فرونشست زمین در دشت ماهیدشت، به بررسی داده‌های مکانی و زمانی مرتبط پرداخته و تلاش دارد با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، تصویری جامع از وضعیت موجود و روندهای مخاطره‌آمیز ارائه دهد. این پژوهش می‌تواند به‌عنوان گامی مؤثر در جهت شناخت دقیق‌تر فرایندهای فرونشست و ارائه راهکارهای مدیریتی و پیشگیرانه در سطح منطقه‌ای تلقی شود.

مواد و روش‌ها

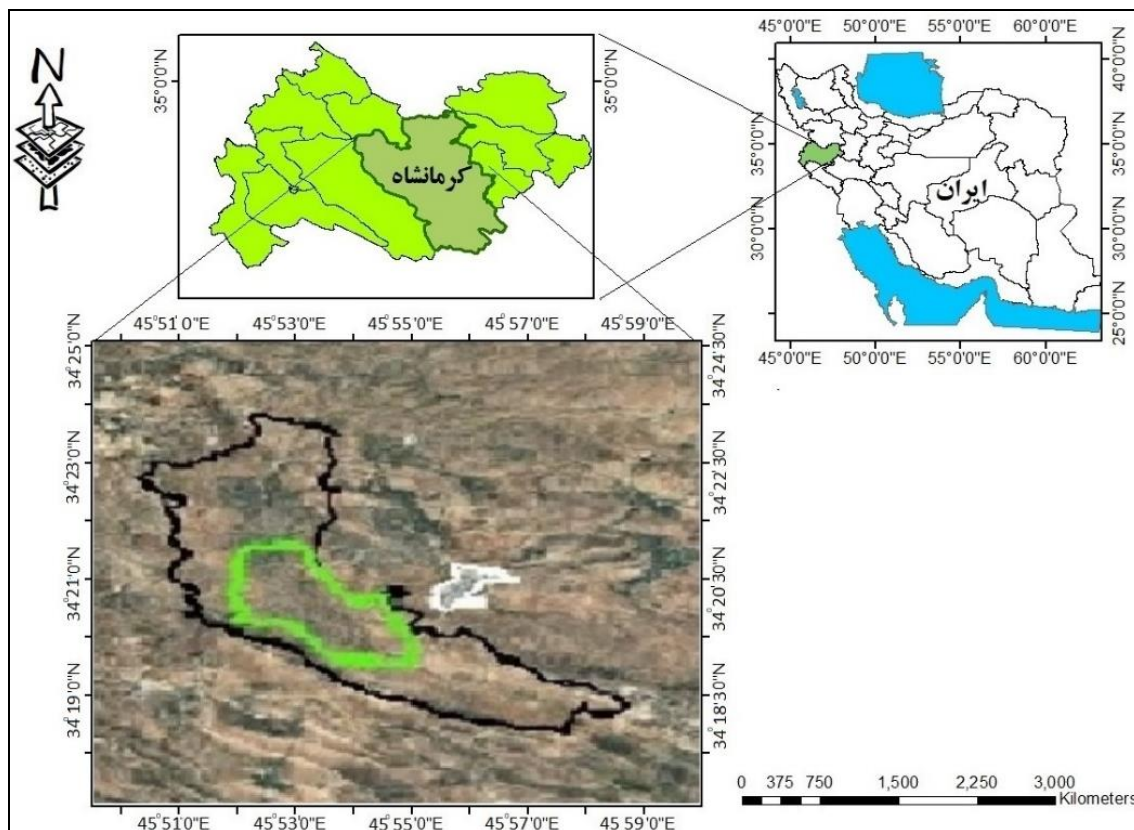
منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، دشت ماهیدشت-سنجایی واقع در شرق شهرستان کرمانشاه، در محدوده جغرافیایی بین $37^{\circ} 46'$ تا $47^{\circ} 01'$ طول شرقی و $34^{\circ} 09'$ تا $34^{\circ} 29'$ عرض شمالی قرار دارد. این دشت کشیده، بخشی از حوضه آبریز رودخانه کرخه و در زمره زیر حوضه‌های حوضه آبریز خلیج فارس محسوب می‌شود. ساختار زمین‌شناسی کف دشت عمدتاً از سنگ‌های سازند کرمانشاه و سازند سر گلو تشکیل شده است که شامل رادیولاریت، شیل‌ها و آهک‌های سیلیسی است. این واحدها در مرکز دشت توسط رسوبات کواترنری با ضخامت حدود ۲۰۰ متر پوشیده شده‌اند. دشت ماهیدشت با روند شمال غربی - جنوب شرقی، حدود ۴۰ کیلومتر امتداد دارد و عمدتاً از آبرفت‌های جوان شامل رس و سیلت تشکیل شده است. این رسوبات با تخلخل بالا، واحد اصلی آبخوان دشت را شکل می‌دهند و نقش مهمی در تغذیه منابع آب زیرزمینی دارند.

توپوگرافی، منطقه دارای ارتفاعی بین ۱۳۲۷ تا ۱۸۰۳ متر و شیب غالب کمتر از ۱۰٪ است. این دشت میانکوهی در کمربند کوهزایی زاگرس قرار دارد و تحت تأثیر ساختارهای زمین‌ساختی مانند زون زاگرس رو رانده و چین‌خورده است. واحدهای ژئومورفولوژیکی شامل کوهستان، مخروط‌افکنه‌ها، دشت‌های رسوبی و سر فرسایشی هستند که در تغذیه منابع آب زیرزمینی و کشاورزی نقش دارند. اقلیم منطقه نیمه‌خشک مدیترانه‌ای با میانگین بارش سالانه ۳۷۸ تا ۵۵۵ میلی‌متر و دمای متوسط $12/3^{\circ}\text{C}$ تا $14/6^{\circ}\text{C}$ درجه سلسیوس است (امیری و همکاران، ۱۳۹۶). منابع آب شامل رودخانه مرگ (فصلی)، چشمه‌ها، قنات‌ها و آب‌های زیرزمینی هستند. آبخوان اصلی در رسوبات آبرفتی دوران چهارم شکل گرفته و بهره‌برداری از آن به‌طور عمده در بخش کشاورزی انجام می‌شود. با توجه به محدودیت منابع آب، الگوی کشت منطقه باید بر پایه محصولات کم‌مصرف تنظیم شود. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد (شکل ۱).

1. SAR

2. InSAR



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش پژوهش

پژوهش حاضر با هدف پایش و تحلیل فرونشست زمین در دشت‌های ماهیدشت، واقع در استان کرمانشاه انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، از ترکیب سه رویکرد اصلی شامل: تداخل‌سنجی راداری با استفاده از تکنیک تحلیل سری زمانی مینا بر پراکندگی‌های کوچک^۱ تحلیل داده‌های چاه‌های پیژومتری و بررسی تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی بلندمدت استفاده گردید. روش تحقیق شامل سه بخش اصلی است که به صورت مرحله به مرحله و با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای تخصصی اجرا شده‌اند. در بخش نخست، داده‌های راداری ماهواره سنیتل-۱^۲ با فرمت تصاویر با قابلیت تداخل‌سنجی Single Look Complex^۳ و در مود تصویربرداری Interferometric Wide Swath^۴ پایگاه داده Alaska^۵ Satellite Facility دریافت شد. این داده‌ها شامل ۳۰ تصویر ماهواره‌ای در بازه زمانی ژانویه ۲۰۲۲ تا جولای ۲۰۲۴ بودند. تصاویر با مسیر صعودی و قطبش دوگانه عمودی-عمودی و عمودی-افقی (VV+VH) انتخاب شدند تا هم برای تحلیل تداخل‌سنجی و هم بررسی پوشش گیاهی قابل استفاده باشند.

پردازش اولیه داده‌ها در نرم‌افزار Sentinel Application Platform^۶ انجام شد که شامل اعمال فایل‌های مدار^۷، حذف نویز اسپیکل، تصحیح هندسی و تولید اینترفروگرام‌ها^۸ بود. تصویر مرجع^۹ با کمترین خط مبنای زمانی و مکانی و قرارگیری در مرکز بازه زمانی انتخاب شد تا دقت تحلیل افزایش یابد.

1. Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR)

2. Sentinel-1

3. SLC

4. IW

5. ASF

6. SNAP

7. Orbit Files

8. Interferograms

9. Master

در ادامه، تصاویر به محیط ENVI Classic و افزونه تخصصی SARscape منتقل شدند. پس از تبدیل ساختار فایل‌ها و وارد کردن مدل رقومی ارتفاعی منطقه^۱ استخراج‌شده از ASTER GDEM در نرم‌افزار Global Mapper، عملیات برش مکانی با استفاده از شیپ‌فایل محدوده مطالعه انجام شد. سپس الگوریتم SBAS در دو مرحله اجرا گردید: در مرحله اول، مؤلفه‌های افقی حذف و مؤلفه‌های قائم جابه‌جایی زمین استخراج شدند؛ در مرحله دوم، با استفاده از نقاط کنترل زمینی^۲ و مدل ارتفاعی، تصحیح فازهای زمانی و فضایی انجام گرفت. نقاط GCP در مناطقی انتخاب شدند که بر اساس تحلیل اولیه سری‌های زمانی جابه‌جایی، فاقد تغییرات قابل ملاحظه در مؤلفه قائم بودند و درعین‌حال، از نظر توپوگرافی صاف و هموار بوده و در خارج از محدوده فرونشست‌های شناسایی‌شده قرار داشتند. این انتخاب با هدف افزایش دقت مسطح سازی و کاهش خطای فاز انجام شد و نقش کلیدی در بارسازی تصاویر ایفا کرد.

فیلتر گلدشتاین^۳ نیز برای بهبود نسبت سیگنال به نویز^۴ در اینترفروگرام‌ها اعمال شد. پس از ژئوکدینگ داده‌ها و تبدیل مختصات تصویری به مختصات جغرافیایی (سامانه WGS84)، نقشه نرخ جابه‌جایی قائم تهیه شد. این نقشه با استفاده از طبقه‌بندی رنگی در ENVI نمایش داده شد و سپس به محیط آرک‌جی‌آی‌اس^۵ منتقل گردید. در آنجا، با استفاده از ابزار Raster Calculator و تعریف ناحیه مورد علاقه^۶، نقشه نهایی فرونشست زمین تولید شد. این نقشه‌ها با سایر لایه‌های اطلاعاتی مانند چاه‌های پیرومتری و نقشه‌های کاربری اراضی تلفیق شدند تا تحلیل همبستگی فضایی انجام گیرد.

در بخش دوم، داده‌های ۲۱ چاه پیرومتری در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ جمع‌آوری شد. این داده‌ها شامل موقعیت مکانی چاه‌ها و مقادیر سطح ایستابی در ماه‌های مختلف سال بودند. در محیط اکسل، میانگین سالانه سطح آب برای هر چاه محاسبه شد و اختلاف آن با تراز سطح زمین به‌عنوان عمق آب زیرزمینی استخراج گردید. سپس داده‌ها به محیط جی‌آی‌اس منتقل‌شده و با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دار معکوس فاصله^۷، نقشه رستری تغییرات سطح آب زیرزمینی تهیه شد. این نقشه‌ها با نقشه‌های نرخ فرونشست تلفیق شدند تا همبستگی فضایی بین افت منابع آبی و شدت فرونشست بررسی شود.

در بخش سوم، برای بررسی نقش تغییرات کاربری اراضی در فرونشست، از تصاویر ماهواره‌ای لندست در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ استفاده شد. تصاویر با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی در هشت کلاس کاربری شامل زراعت دیم، زراعت آبی، جنگل، مرتع، اراضی بدون پوشش و مناطق مسکونی طبقه‌بندی شدند. به‌منظور افزایش دقت طبقه‌بندی و صحت‌سنجی نتایج، از نقاط کنترل زمینی برداشت‌شده در بازدیدهای میدانی نیز استفاده شد. این نقاط نماینده کلاس‌های مختلف کاربری بوده و در ارزیابی و بهبود نتایج طبقه‌بندی نقش مؤثری ایفا کردند. تمرکز ویژه‌بر تبدیل کشت دیم به آبی بود که به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در تشدید فرونشست منطقه شناخته شد. نقشه‌های حاصل با نقشه‌های فرونشست مقایسه شدند تا تأثیر تغییرات کاربری در الگوهای جابه‌جایی سطح زمین ارزیابی گردد.

درمجموع، روش تحقیق حاضر با تلفیق داده‌های راداری، اطلاعات هیدروژئولوژیکی، مدل‌های ارتفاعی، نقاط کنترل زمینی و تحلیل‌های کاربری اراضی، چارچوبی دقیق برای بررسی فرونشست زمین ارائه می‌دهد. این رویکرد قابلیت تعمیم به سایر مناطق دارای مخاطرات مشابه را داراست و می‌تواند در مطالعات آینده به‌عنوان الگوی عملیاتی مورد استفاده قرار گیرد.

1. Digital Elevation Model (DEM)

2. Ground Control Points (GCP)

3. Goldstein Filter

4. Signal to Noise Ratio (SNR)

5. ArcGIS

6. Region of Interest (ROI)

7. Inverse Distance Weighted (IDW)

نتایج

تحلیل جابه‌جایی سطح زمین با روش SBAS

در این پژوهش، به‌منظور پایش دقیق جابه‌جایی سطح زمین در دشت ماهیدشت، از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ و الگوریتم تحلیل سری زمانی مینا بر زیرمجموعه‌های خط مبنای کوتاه استفاده شد. این روش یکی از تکنیک‌های پیشرفته تداخل‌سنجی راداری^۱ است که با بهره‌گیری از زوج تصاویر دارای فاصله مکانی و زمانی کم، امکان استخراج تغییرات فازی با دقت بالا را فراهم می‌کند و برای پایش تدریجی جابه‌جایی‌های سطح زمین در بازه‌های زمانی بلندمدت بسیار مناسب است.

پس از تشکیل شبکه‌ای از ۱۰۰ اینترفروگرام منتخب، مراحل پردازش شامل موارد زیر بود: حذف مؤلفه‌های توپوگرافی با استفاده از مدل ارتفاع رقومی مأخوذ از مأموریت استرا^۲؛ این مدل، نقشه‌ای رقومی از ارتفاع سطح زمین است که برای حذف اثرات پستی‌وبلندی در داده‌های راداری به کار می‌رود. فیلترسازی با الگوریتم گلدشتاین؛ این فیلتر برای کاهش نویز و افزایش نسبت سیگنال به نویز در اینترفروگرام‌ها استفاده می‌شود. بازگشایی فاز با الگوریتم^۳؛ این الگوریتم برای حل مشکل ابهام فاز^۴ به کار می‌رود و با یافتن مسیرهایی با کمترین هزینه، فازهای نسبی را به فاز مطلق تبدیل می‌کند.

نتایج حاصل از این پردازش‌ها نشان داد که تحلیل جابه‌جایی سطح زمین با روش SBAS نشان داد که دشت ماهیدشت طی بازه زمانی ژانویه ۲۰۲۲ تا جولای ۲۰۲۴ دچار تغییرات قابل توجهی در سطح زمین شده است. دامنه این تغییرات از بالاآمدگی ۲۲+ میلی‌متر تا فرونشست ۴۰- میلی‌متر متغیر بوده است. دامنه کلی تغییرات، ۶۲ میلی‌متر (بیشترین نشست و بیشترین بالاآمدگی) بوده است. این اختلاف کمی نشان‌دهنده ناپایداری قابل توجه سطح زمین در منطقه است. به‌طور مقایسه‌ای، نواحی شرقی و شمالی دشت بیشترین نرخ فرونشست را تجربه کرده‌اند؛ در این مناطق نشست سالانه به حدود ۳۵ تا ۴۰ میلی‌متر رسیده است. در مقابل، نواحی مرکزی و غربی دشت نرخ نشست پایین‌تری داشته‌اند و تغییرات در محدوده ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر گزارش شده است. این اختلاف تقریباً نشان‌دهنده ۲ برابر بودن شدت فرونشست در شرق و شمال نسبت به مرکز و غرب است. همچنین، بیشینه بالاآمدگی سطح زمین در نقاطی با فشار کمتر بر منابع آب زیرزمینی و تراکم پایین چاه‌ها مشاهده شده و به حدود ۱۵ تا ۲۲ میلی‌متر رسیده است، درحالی‌که در سایر بخش‌ها این مقدار تنها ۵ تا ۱۰ میلی‌متر بوده است. از نظر روند زمانی، نتایج نشان می‌دهد که: در سال ۲۰۲۲، نشست زمین در بیشتر نقاط در محدوده ۱۰- تا ۱۵- میلی‌متر بود. در سال ۲۰۲۳، نرخ نشست در شرق و شمال افزایش یافته و به حدود ۲۰- تا ۳۰- میلی‌متر رسید. در سال ۲۰۲۴، اوج فرونشست با مقدار ۴۰- میلی‌متر در نواحی بحرانی ثبت شد (شکل ۲).

این روند افزایشی بیانگر آن است که فشار انسانی بر منابع آب زیرزمینی و تغییرات کاربری اراضی (به‌ویژه تبدیل کشت دیم به آبی) در طول زمان شدت یافته و به‌طور مستقیم با افزایش نرخ فرونشست هم‌پوشانی دارد. هم‌زمانی مکانی میان تراکم بالای چاه‌های پی‌زومتری، افت سطح ایستابی تا حدود ۲۶۰۹۸- متر و تغییرات گسترده در نوع کشت، نقش عوامل انسانی را در تشدید این پدیده به‌وضوح تأیید می‌کند.

به‌طور کلی، تحلیل‌ها نشان می‌دهد شرق و شمال دشت: بیشترین نرخ نشست (حدود ۴ سانتی‌متر در سال)، بالاآمدگی بیشتر، تراکم بالای چاه‌ها و تغییرات شدید کاربری مشاهده می‌شود. همچنین در مرکز و غرب دشت: نرخ نشست کمتر (۱ تا ۲ سانتی‌متر در سال)، بالاآمدگی محدود، تراکم کمتر چاه‌ها و تغییرات محدودتر در کاربری دیده می‌شود.

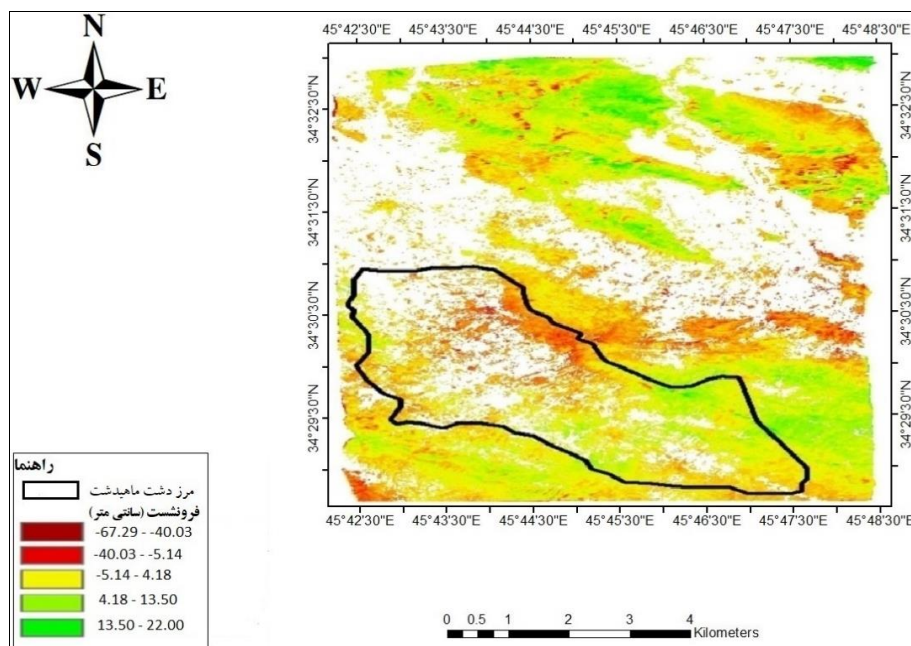
این اختلافات مکانی و روندی نشان می‌دهد که فشار انسانی عامل اصلی تفاوت در شدت فرونشست است و در صورت ادامه روند فعلی، نواحی شرقی و شمالی دشت ماهیدشت بیشترین تهدید را برای پایداری خاک، منابع آب و زیرساخت‌های انسانی خواهند داشت. در شکل ۳ نمایی از موقعیت دشت نسبت به شهر کرمانشاه نشان داده شده است.

1. InSAR

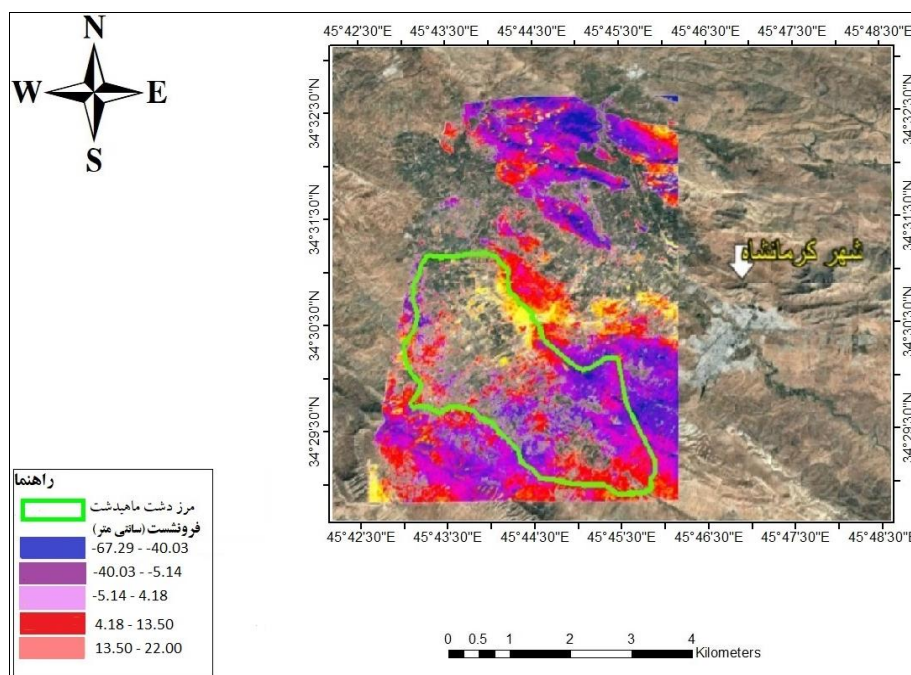
2. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM)

3. Minimum Cost Flow Algorithm

4. Phase Unwrapping



شکل ۲. نقشه میزان جابه‌جایی منطقه مورد مطالعه به روش SBAS در بازه زمانی مورد بررسی



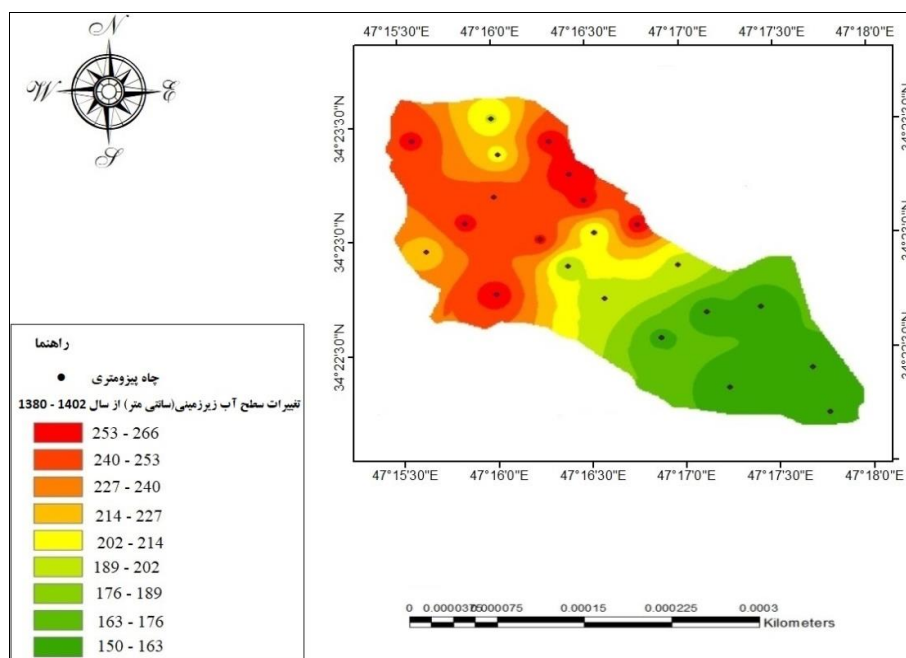
شکل ۳. موقعیت دشت نسبت به شهر کرمانشاه

نتایج سطح آب زیرزمینی بر اساس داده‌های پیزومتری

یکی از عوامل کلیدی در بروز فرونشست زمین، افت سطح آب زیرزمینی است. در این پژوهش، داده‌های ۲۱ حلقه چاه پیزومتری در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲ استخراج و با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دار معکوس فاصله^۱ در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی^۲ تحلیل شدند. این روش درون‌یابی، بر پایه این فرض عمل می‌کند که نقاط نزدیک‌تر به مکان موردنظر، تأثیر بیشتری بر مقدار نهایی دارند. درواقع، مقدار متغیر در هر نقطه ناشناخته بر اساس میانگین وزنی مقادیر نقاط اطراف آن محاسبه می‌شود، به گونه‌ای که وزن هر نقطه با مجذور معکوس فاصله‌اش نسبت به نقطه هدف تعیین می‌گردد.

1. Inverse Distance Weighted (IDW)
2. Geographic Information System (GIS)

با توجه به نقشه تغییرات سطح ایستابی در (شکل ۴) در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲، داده‌های پیزومتری نشان می‌دهند که سطح آب زیرزمینی در بسیاری از نقاط با افت قابل توجهی روبه‌رو بوده است. بیشترین میزان افت ثبت‌شده برابر با ۲۶٫۹۸ متر بوده که عمدتاً در اطراف خوشه‌های چاه‌های دارای برداشت بالا مشاهده شده است. این مناطق هم‌زمان با نرخ بالای فرونشست زمین مشخص شده‌اند و خطوط هم‌تراز فشرده در نقشه‌ها بیانگر شیب تند هیدرودینامیکی و فشار شدید بر آبخوان‌ها هستند. در مقایسه، مناطقی که سطح ایستابی پایدار داشته‌اند (افت کمتر از ۲ متر)، نرخ فرونشست بسیار پایین‌تری را تجربه کرده‌اند؛ به‌طور تقریبی ۳ تا ۵ برابر کمتر از مناطق بحرانی. روند زمانی نیز نشان می‌دهد که در دهه ۱۳۸۰ افت متوسط حدود ۵ تا ۱۰ متر بوده، اما در دهه ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۲ شدت افت افزایش یافته و در برخی نقاط به حدود ۲۷ متر رسیده است. این مقایسه کمی نشان می‌دهد که هرچه افت سطح آب بیشتر باشد، نرخ فرونشست نیز به‌طور مستقیم افزایش می‌یابد؛ بنابراین، برداشت شدید از منابع زیرزمینی نه‌تنها باعث کاهش سطح ایستابی شده، بلکه به‌طور هم‌زمان پایداری خاک را کاهش داده و نشست تدریجی سطح زمین را تشدید کرده است.



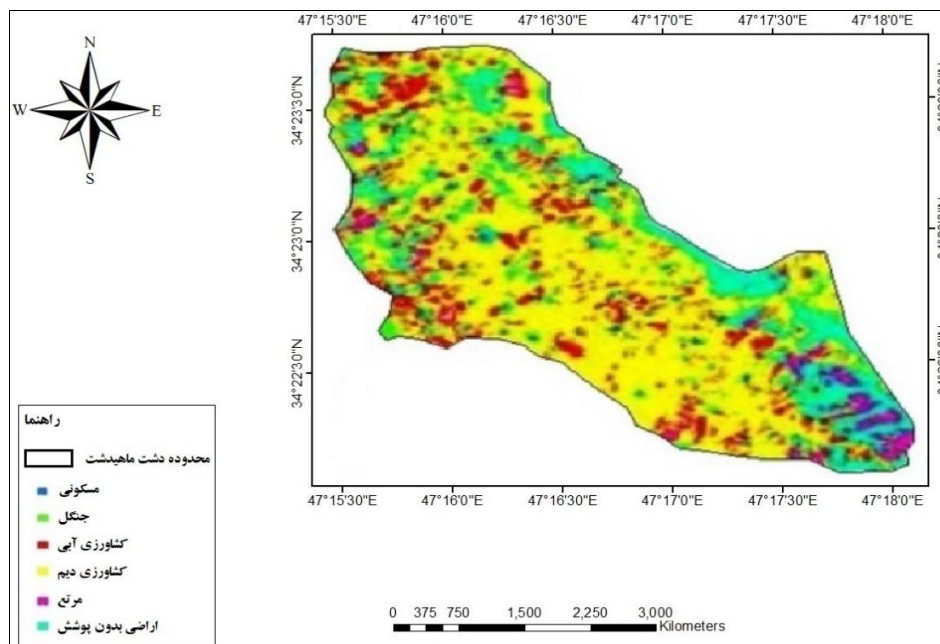
شکل ۴. موقعیت چاه‌های پیزومتری و تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت طی سال‌های ۱۳۸۰_۱۴۰۲

نتایج تغییرات کاربری اراضی بر فرونشست

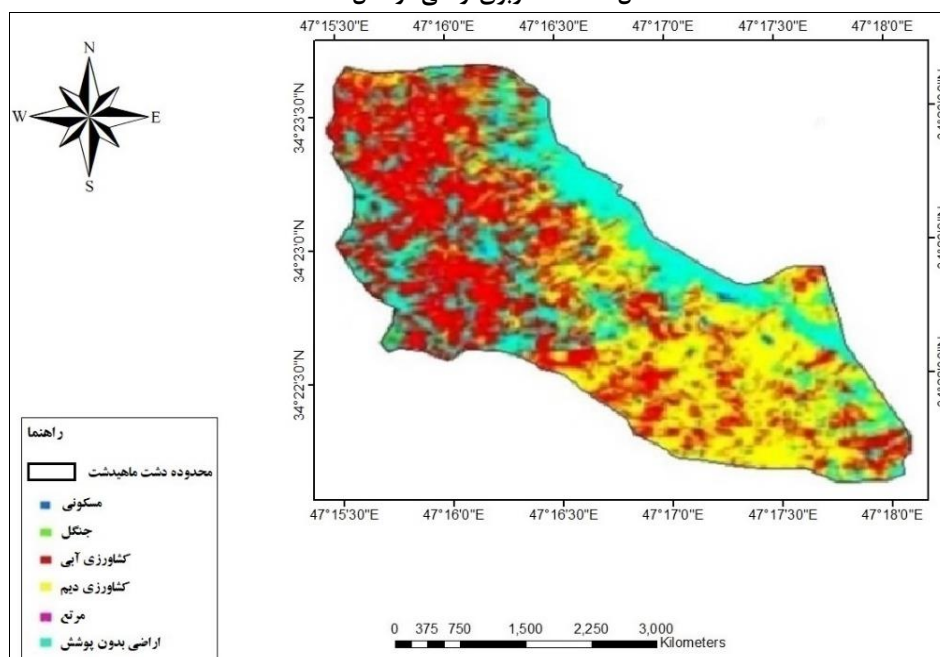
در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲، تغییرات کاربری اراضی نقش بسیار مهمی در تشدید فرونشست زمین داشته است. تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های کاربری در شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که بزرگ‌ترین تغییر مربوط به تبدیل اراضی کشت دیم به کشت آبی بوده است. این تغییر به‌ظاهر یک توسعه کشاورزی محسوب می‌شود، اما در عمل باعث افزایش برداشت آب زیرزمینی شده و افت سطح ایستابی را به‌طور مستقیم تشدید کرده است. در مناطقی که این تغییر رخ داده، نرخ فرونشست زمین تقریباً دو تا سه برابر بیشتر از مناطقی است که همچنان کشت دیم یا کاربری پایدار دارند. از سوی دیگر، اراضی بدون پوشش (بایر) نیز در این دوره افزایش یافته‌اند. این وضعیت نشان‌دهنده کاهش پوشش گیاهی و توان خاک در نگهداشت رطوبت است. خاک‌های بدون پوشش بیشتر در معرض فرسایش و کاهش پایداری قرار دارند و همین امر زمینه نشست سریع‌تر سطح زمین را فراهم کرده است. در مقابل، اراضی مسکونی کمترین تغییر را داشته‌اند و سهم آن‌ها در کل تغییرات کاربری ناچیز بوده است. با این حال، توسعه پراکنده سکونت‌گاه‌ها می‌تواند فشار موضعی بر منابع آب‌و خاک ایجاد کند، هرچند اثر آن در مقایسه با کشاورزی آبی بسیار کمتر است. با توجه به جدول ۱ مقایسه وضعیت در دو مقطع زمانی نشان می‌دهد.

- در سال ۱۳۸۰، بخش عمده اراضی کشاورزی به‌صورت دیم بوده و فشار کمتری بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌شده است.

- در سال ۱۴۰۲، سهم کشت آبی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته و همراه با رشد اراضی بایر، فشار انسانی بر منابع طبیعی شدت گرفته است. این تغییرات نه تنها باعث افت سطح آبخوان‌ها شده، بلکه به‌طور مستقیم با افزایش نرخ فرونشست هم‌پوشانی دارند. به بیان دیگر، افزایش کشت آبی و گسترش اراضی بدون پوشش، دو عامل کلیدی در تشدید فرونشست زمین طی این دوره بوده‌اند. این روند بیانگر رابطه مستقیم میان تغییر کاربری اراضی و کاهش پایداری زمین است و تهدیدی جدی برای کیفیت خاک، سازه‌های انسانی و منابع آب محسوب می‌شود. به شکل کامل‌تر، می‌توان گفت که تغییرات کاربری اراضی در این بازه زمانی نه تنها یک تغییر در الگوی بهره‌برداری از زمین بوده، بلکه به‌عنوان یک محرک اصلی فرونشست عمل کرده و نشان داده است که مدیریت نادرست کاربری‌ها می‌تواند پیامدهای ژرف و بلندمدتی بر محیط‌زیست و زیرساخت‌های انسانی داشته باشد.



شکل ۵. نقشه کاربری اراضی در سال ۱۳۸۰

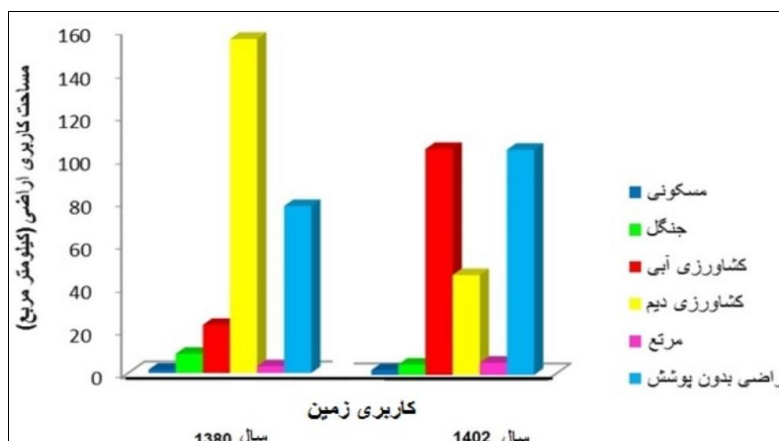


شکل ۶. نقشه کاربری اراضی در سال ۱۴۰۲

جدول ۱. مقایسه کمی اثر تغییرات کاربری اراضی بر فرونشست بین سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۴۰۲

نوع کاربری	سهم در ۱۳۸۰	سهم در ۱۴۰۲	تغییر کمی	اثر بر فرونشست
کشت دیم	بالا (بخش عمده اراضی کشاورزی)	کاهش محسوس	کاهش ۳۰- ٪۴۰ افزایش داده	کاهش برداشت کم، اما جایگزینی با کشت آبی فشار را
کشت آبی	متوسط	افزایش چشم‌گیر	رشد ۲ تا ۳ برابر	افزایش برداشت آب زیرزمینی باعث تشدید فرونشست
اراضی بدون پوشش	محدود	افزایش قابل توجه	رشد ۲۰-۳۰٪	کاهش پایداری خاک، افزایش نرخ نشست
اراضی مسکونی	کم	اندکی بیشتر	رشد کمتر از ۵٪	اثر مستقیم اندک، اثر غیرمستقیم از طریق مصرف آب

نمودار تغییرات کاربری اراضی (شکل ۷) نشان می‌دهد اراضی بدون پوشش افزایش قابل توجه داشته، در حالی که اراضی مسکونی کمترین سهم را داشته‌اند. این تغییرات بیانگر فشار انسانی بر منابع طبیعی و تأثیر مستقیم تغییر کاربری بر پایداری زمین هستند. تبدیل اراضی کشاورزی به کاربری‌های غیر کشاورزی و غیرطبیعی، به‌ویژه در نیمه دوم قرن بیستم، روند فرونشست را تشدید کرده و تهدیدی جدی برای کیفیت خاک، سازه‌ها و منابع آب به شمار می‌رود.



شکل ۷. نمودار تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲

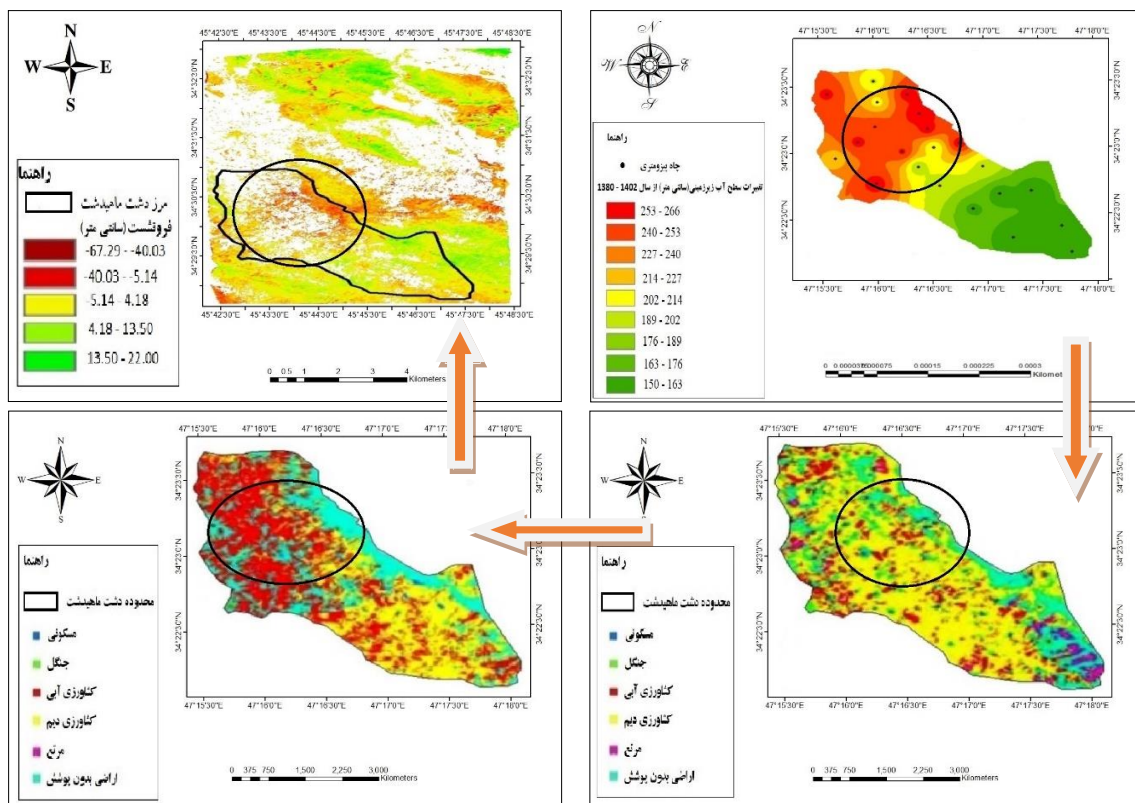
بحث

فرونشست زمین یکی از مخاطرات ژئومورفولوژیکی پیچیده و چند علتی است که در سال‌های اخیر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به‌طور فزاینده‌ای مشاهده شده است. این پدیده در نتیجه فشرده‌گی و تحکیم لایه‌های سست سطحی خاک، عمدتاً تحت تأثیر افت سطح آب زیرزمینی، برداشت بی‌رویه از منابع آبی و تغییرات کاربری اراضی رخ می‌دهد. در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و الگوریتم سری زمانی SBAS، میزان فرونشست در دشت ماهیدشت طی بازه زمانی دوساله (۲۰۲۲-۲۰۲۴) مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ در مدار صعودی، داده‌های چاه‌های پیژومتری و نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های ۱۳۸۰-۱۴۰۲ مبنای تحلیل‌های مکانی و زمانی قرار گرفتند. نتایج حاصل از تلفیق سه لایه اطلاعاتی نقشه فرونشست، نقشه تغییرات سطح آب زیرزمینی و نقشه تغییرات کاربری اراضی نشان داد که پهنه‌های دارای فرونشست شدید، هم‌زمان با افت قابل توجه سطح ایستایی و تغییرات گسترده در نوع کشت (از دیم به آبی) هم‌پوشانی دارند. این هم‌زمانی مکانی و روندی، نقش مستقیم عوامل انسانی در تشدید فرونشست را تأیید می‌کند. به‌ویژه در نواحی شرقی و شمالی دشت که بیشترین نرخ فرونشست ثبت شده، تراکم چاه‌های پیژومتری بالا و تغییرات شدید در الگوی کشت مشاهده شده است.

این یافته‌ها با نتایج سایر محققین در ایران هم‌خوانی دارد. برای نمونه، رجبی و روستایی (۱۴۰۲) در دشت کرمانشاه با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ و روش SBAS، بیشینه فرونشست حدود ۳۵ میلی‌متر در سال گزارش کردند و عامل اصلی را

تراکم چاه‌ها و تغییرات کاربری اراضی معرفی نمودند. همچنین، حجازی و همکاران (۱۴۰۱) در دشت هریس نرخ فرونشست سالانه بین ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر را ثبت کردند که ارتباط مستقیم با تغییر نوع کشت از دیم به آبی داشت. مطالعه حق‌شناس حقیقی و متق (۲۰۲۴) نشان دادند که نرخ فرونشست در بسیاری از دشت‌های ایران بین ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر در سال است و این پدیده به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر خشک‌سالی و برداشت انسانی قرار دارد (Haghshenas & Motagh, 2024). افزون بر این، اطهری و همکاران (۱۴۰۰) گزارش کردند که در مناطقی با افت شدید سطح آب زیرزمینی، نرخ فرونشست چند برابر بیشتر از مناطق با شرایط پایدار است که بیانگر نقش تعیین‌کننده افت آبخوان در تشدید فرونشست است. مقایسه نتایج ماهیدشت با این مطالعات نشان می‌دهد که شدت فرونشست در این دشت (حدود ۴۰ میلی‌متر در سال) بالاتر از بسیاری از مناطق دیگر ایران است و الگوی مکانی آن نیز متفاوت بوده است؛ به‌گونه‌ای که برخلاف انتظار اولیه، بیشترین نرخ در شرق و شمال دشت مشاهده شده و نه در مرکز. این تغییر الگو نسبت به مطالعات پیشین، بیانگر تحول در روندهای مکانی فرونشست است و نیازمند بازنگری در اولویت‌های پایش و مدیریت مخاطره است.

تغییر کاربری اراضی، به‌ویژه تبدیل اراضی کشاورزی به کاربری‌های غیر کشاورزی یا تغییر نوع کشت، نه تنها موجب افزایش برداشت آب زیرزمینی شده، بلکه پیامدهای گسترده‌ای از جمله فرسایش خاک، کاهش تنوع زیستی، افزایش رواناب سطحی، کاهش کیفیت آب و تهدید امنیت غذایی را در پی داشته است. این تغییرات همچنین بر ساختار اجتماعی و معیشت جوامع محلی تأثیر منفی گذاشته و موجب بی‌ثباتی اقتصادی در مناطق وابسته به کشاورزی شده‌اند. در مجموع، نتایج نشان داد که دشت ماهیدشت تحت تأثیر هم‌زمان عوامل انسانی (تغییرات کاربری، برداشت بی‌رویه، تراکم چاه‌ها) و طبیعی (خشک‌سالی، کاهش بارندگی) در معرض فرونشست تدریجی و نگران‌کننده قرار دارد. این یافته‌ها هم‌راستا با مطالعات مشابه در سایر دشت‌های ایران است، اما شدت و گستره فرونشست در ماهیدشت وضعیت بحرانی‌تری را نشان می‌دهد. این امر ضرورت مداخله مدیریتی فوری، پایش مستمر و بازنگری در سیاست‌های بهره‌برداری از منابع طبیعی را بیش‌ازپیش برجسته می‌سازد. شکل ۸ نقشه نهایی از فرایند و عامل اصلی فرونشست در بازه زمانی نشان می‌دهد.



شکل ۵. فرایند و عامل اصلی فرونشست در بازه زمانی در منطقه مورد مطالعه

با توجه به شکل ۸ بررسی نقشه‌های مرحله‌ای و نقشه نهایی فرایند فرونشست نشان می‌دهد که الگوی مکانی تغییرات در بازه زمانی مطالعه، تمرکز مشخصی در نواحی شرقی و شمالی دشت ماهیدشت دارد. در این بخش‌ها، شدت فرونشست به‌طور قابل توجهی بیشتر از سایر نواحی بوده و هم‌زمانی آن با افت شدید سطح آب زیرزمینی و تغییرات گسترده در کاربری اراضی به‌ویژه تبدیل کشت دیم به آبی به‌وضوح مشاهده می‌شود. این هم‌پوشانی مکانی در نقشه‌های تلفیقی، پهنه‌های شرقی و شمالی را در طبقات نامطلوب قرار داده و آن‌ها را به‌عنوان مناطق بحرانی مشخص کرده است.

در مقابل، بخش‌های مرکزی، جنوب غربی و غرب دشت تغییرات محدودتری را نشان می‌دهند و عمدتاً در طبقات مقبول قرار گرفته‌اند؛ موضوعی که با پایداری نسبی سطح ایستایی و ثبات الگوی کشت در این نواحی هم‌خوانی دارد. روند تغییرات از نقشه‌های اولیه تا نقشه نهایی بیانگر آن است که عامل اصلی فرونشست در بازه بررسی، ترکیب افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی و فشار ناشی از تغییرات کاربری اراضی بوده و این اثرات در شرق و شمال دشت به‌صورت برجسته‌تری بروز یافته‌اند. به‌طور کلی، نقشه نهایی نشان می‌دهد که شدت و گستره فرونشست در ماهیدشت الگوی مکانی جدیدی را نسبت به مطالعات پیشین رقم‌زده است؛ به‌گونه‌ای که برخلاف انتظار، بیشترین نرخ‌ها در حاشیه‌های شرقی و شمالی و نه در مرکز دشت رخ داده‌اند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی فرونشست زمین در دشت ماهیدشت، با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته سنجش‌ازدور (InSAR)، تحلیل مکانی در محیط جی‌آی‌اس و داده‌های هیدروژئولوژیکی، نشان داد که این منطقه در معرض مخاطره‌ای جدی و رو به گسترش قرار دارد. بیشینه فرونشست ثبت‌شده با روش SBAS حدود ۴۰ میلی‌متر در سال و بیشینه بالآمدگی حدود ۲۲ میلی‌متر بوده است. این تغییرات عمدتاً در نواحی با تراکم بالای چاه‌های پیرومتری، تغییرات شدید کاربری اراضی و کاهش سطح ایستایی رخ داده‌اند.

نتایج پژوهش تأکید می‌کند که تغییرات کاربری اراضی، به‌ویژه تبدیل کشت دیم به آبی، در کنار برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده فرونشست در منطقه هستند. در صورت ادامه روند فعلی، بحران‌های گسترده‌تری در حوزه منابع آب، کیفیت خاک، پایداری سازه‌ها و امنیت غذایی قابل پیش‌بینی است. همچنین، فرونشست می‌تواند زیرساخت‌های شهری و روستایی را تهدید کرده و موجب خسارات اقتصادی و اجتماعی شود.

افزون بر این، بیشترین نرخ فرونشست در دشت ماهیدشت برخلاف انتظار اولیه، در نواحی شرقی و شمالی مشاهده‌شده و نه در مرکز دشت. این تغییر الگو نسبت به مطالعات پیشین، بیانگر تحول در روندهای مکانی فرونشست است و نیازمند بازنگری در اولویت‌های پایش و مدیریت مخاطره هست. تغییرات گسترده در نوع کشت، به‌ویژه تبدیل اراضی دیم به آبی، به‌طور مستقیم با شدت فرونشست ارتباط دارد. این رابطه در مناطق شیب‌دار که تغییر نوع کشت رخ داده، بارزتر بوده و نشان می‌دهد که فشار انسانی بر منابع آب زیرزمینی، عامل کلیدی در تشدید فرونشست است.

هم‌پوشانی مکانی میان افت سطح ایستایی، تراکم چاه‌های پیرومتری و تغییرات کاربری اراضی، نقش عوامل انسانی را در بروز و گسترش فرونشست به‌وضوح تأیید می‌کند. پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی ناشی از تغییر کاربری اراضی، ازجمله فرسایش خاک، کاهش کیفیت منابع آب، تهدید امنیت غذایی و بی‌ثباتی اقتصادی، ابعاد فرونشست را فراتر از یک پدیده زمین‌شناسی صرف نشان می‌دهد و آن را به یک بحران چندوجهی تبدیل می‌کند.

این نتایج ضرورت مداخله مدیریتی، پایش مستمر و بازنگری در سیاست‌های بهره‌برداری از منابع طبیعی را برجسته می‌سازند؛ بنابراین، مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، کاهش سطح زیر کشت محصولات آبی و ممنوعه اعلام کردن دشت ماهیدشت از نظر بهره‌برداری، ازجمله اقدامات ضروری برای کنترل و کاهش مخاطره فرونشست در آینده هستند. درنهایت، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، برنامه‌ریزی منطقه‌ای و توسعه سیاست‌های حفاظتی در دشت ماهیدشت و مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- اطهری، محمدعلی؛ عزیزی، حمیدرضا؛ هاشمی، سیدهاشم؛ هنری، حمیدرضا (۱۴۰۱). رابطه بین میزان تغییرات سطح زمین در اثر فرونشست و تغییرات زیرزمینی با استفاده از داده‌های InSAR و مدل‌های ماهواره‌ای (مطالعه موردی: دشت ورامین). نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۱ (۷)، ۳۴-۴۳. doi: 10.22112/JWWSE.2021.261650.1232
- امیری، فرزاد؛ محمدی، سمیره؛ زرافشانی، کیومرث؛ مهدی‌زاده، حسین؛ توکلی، محسن (۱۳۹۶). ارائه مدل تخصیص بهینه اراضی کشاورزی با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی بر پایه سیستم دینامیک در حوزه آبخیز دشت ماهیدشت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی کرمانشاه.
- حجازی، اسدالله؛ رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ ولی‌زاده کامران، خلیل؛ موسوی کجبادی، ندا (۱۴۰۱). آشکارسازی و تعیین میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) در محدوده دشت هرسین. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۲ (۱)، ۱۸۳-۲۰۶. <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-645-fa.html>
- رجبی، معصومه؛ روستایی، شهرام؛ مطاعی، سارا (۱۴۰۱). ارزیابی سری‌های زمانی فرونشست زمین در دشت کرمانشاه با استفاده از تکنیک SBAS. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۵ (۱)، ۱۹-۳۷. doi: 10.22059/jphgr
- زند، رحمان؛ فرزین کیا، ربابه؛ شفیعی، نجمه (۱۳۹۸). فرونشست زمین و تداخل‌سنج راداری. تهران: انتشارات ماهواره.
- صبوری، محمد سعید (۱۴۰۲). بررسی ارتباط بین رخداد زمین‌لغزش با پهنه‌های گسلی در ایران. فصلنامه کوآترنری ایران، ۹ (۱-۲)، ۸۰-۱۰۷. doi: 10.22034/irqua.2023.709266
- عبداللهی، زهرا؛ صلاحی مقدم، نفیسه (۱۴۰۴). الگوی پارادایمی ریسک فرونشست زمین با رویکرد توسعه محور در مدیریت منابع آب. مجله مدیریت مخاطرات محیطی، ۲ (۱۲)، ۱۵۳-۱۶۵. doi: 10.22059/jhsci.2025.398222.887
- عمادالدین، سمیه؛ نظری گزیک، زهرا (۱۴۰۲). برآورد میزان فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مشهد). مجله جغرافیا و توسعه، ۷۳ (۲۱)، ۲۲۱-۲۳۹. doi: 10.22111/gdij.2023.8029
- نصیری خانقاه، علیرضا؛ شریفیان عطار، رضا (۱۳۹۸). کاربرد تداخل‌سنجی رادار در مطالعات فرونشست. تهران: انتشارات مهر جالینوس.

References

- Abdollahi, Z., & Salahi-Moghaddam, N. (2025). A paradigmatic model of land subsidence risk with a development-oriented approach in water resources management. *Environmental Hazard Management Journal*, 2(12), 153–165. doi: 10.22059/jhsci.2025.398222.887. (In Persian).
- Amiri, F., Zarafshani, K., Mahdizadeh, H., & Tavakoli, M. (2017). *Optimal agricultural land allocation model considering climate change based on system dynamics in the Mahidasht watershed*. MSc Thesis Industrial Engineering, Kermanshah University of Technology. (In Persian).
- Atohari, M. A., Azizi, H. R., Hashemi, S. H., & Henry, H. R. (2022). Relationship between land surface deformation caused by subsidence and groundwater changes using InSAR data and satellite models (Case study: Varamin Plain). *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 7(1), 34–43. doi: 10.22112/JWWSE.2021.261650.1232. (In Persian).
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383 doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by InSAR and its correlation with groundwater depletion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(8), 7948–7961. doi: 10.1002/2014JB011377.
- Deros, S. N. M., Din, N. M., Norzeli, S. M., Omar, R. C., Usman, F., & Hamim, S. A. (2022). Land subsidence susceptibility projection for Palembang slum area by complex MCDM-AHP technique. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 54(1), 1–17. <https://journals.itb.ac.id/index.php/jets/article/view/14555>.
- Emadoddin, S., & Nazari-Gazik, Z. (2023). Estimating land subsidence using radar interferometry and groundwater level variations (Case study: Mashhad plain). *Geography and Development*

- Journal*, 21(73), 221–239. doi: 10.22111/gdij.2023.8029. (In Persian).
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20. doi: 10.1109/36.898661.
- Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley. ISBN: 978-0470849965.
- Guardiola-Albert, C. (2021). Towards aquifer deformation models integrating SAR remote sensing: Preliminary land subsidence results using GEP tools. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU21-12806. doi: 10.5194/egusphere-egu21-12806.
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., & Jourde, H. (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138, 61–88 doi: 10.1016/j.earscirev.2014.08.002.
- Haghshenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2024). Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Science*, 383(6673), 123–129. <https://www.Science.org/doi/10.1126/sciadv.adk3039>. (In Persian).
- Hejazi, S. A., Rezaei-Moghadam, M. H., Valizadeh-Kamran, Kh., & Mousavi-Kojabadi, N. (2022). Detection and quantification of land subsidence using InSAR technique in the Hersin Plain. *Environmental Erosion Research*, 12(1), 183–206. <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-645-fa.html> (In Persian).
- Liu, Y., Li, Z., Chen, J., & Wang, Y. (2022). Groundwater depletion and land subsidence in arid regions: A global review. *Hydrogeology Journal*, 30(6), 1701–1720. doi: 10.1007/s10040-022-02518-3.
- Lu, Z., & Dzurisin, D. (2014). InSAR imaging of Aleutian volcanoes: Monitoring a volcanic arc from space. *Springer*. 15(7). doi: 10.1007/978-3-642-00348-6.
- Motagh, M., Haghshenas Haghighi, M., &. (2017). Land subsidence in Iran: A nationwide InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 192, 150–161.
- Nasiri-Khaneqah, A., & Sharifian-Attar, R. (2019). *Application of radar interferometry in subsidence studies*. Tehran: Mehr-e Jalinoos Publications. (In Persian).
- Pedretti, D., Wang, Y., & Liu, Z. (2024). Urban subsidence trends in 143 coastal cities: A global InSAR analysis. *Environmental Geoscience*, 31(2), 101–118. doi: 10.3389/feart.2024.1351581.
- Rajabi, M., Roustaei, Sh., & Motaei, S. (2022). Assessment of land subsidence time series in the Kermanshah Plain using the SBAS technique. *Journal of Physical Geography Research*, 55(1), 19–37 doi: 10.22059/jphgr, (In Persian).
- Raspini, F., Bianchini, S., Ciampalini, A., & Moretti, S. (2020). Multi-temporal InSAR analysis for land subsidence monitoring: A review of methods and applications. *Remote Sensing*, 12(18), 3015. doi: 10.3390/rs12183015.
- Raspini, F., Ciampalini, A., Bianchini, S., Bardi, F., Huber, M., & Moretti, S. (2022). Ground deformation monitoring using Sentinel-1 SAR data: Insights and applications for land subsidence analysis. *Remote Sensing of Environment*, 274, 112982.
- Sabouri, M. S. (2023). Investigating the relationship between landslide occurrence and fault zones in Iran. *Iranian Quaternary Journal*, 9(1-2), 80–107. doi: 10.22034/irqua.2023.709266. (In Persian).
- Shirzaei, M., & Bürgmann, R. (2018). Global climate change and local land subsidence exacerbate inundation risk to the San Francisco Bay Area. *Science Advances*, 4(3), eaap9234. doi: 10.1126/sciadv.aap9234.
- Veci, L. (2016). *Sentinel-1 Toolbox: Interferometry tutorial*. ESA, 41.
- Waltham, T., Bell, F., & Culshaw, M. (2005). Sinkholes and subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction. *Springer*. 3(4), doi: 10.1007/1-84628-020-6.
- Yang, Y., & Zhao, J. (2025). Forecasting the spatio-temporal evolution of groundwater vulnerability: A coupled time-series and hydrogeological modeling approach. *Water*, 17(21), 3033. doi: 10.3390/w17213033.
- Zandi, R., Farzin Kia, R., & Shafiei, N. (2019). *Land subsidence and radar interferometry*. Tehran: Mahvareh Publications. (In Persian).

- Zeitoun, D. G., & Wakshal, E. (2013). Land subsidence analysis in urban areas: The Bangkok metropolitan area case study. *Springer*, 307.
- Zhang, J., de Gast, T., Zwanenburg, C., & Gavin, K. G. (2025). Full-scale load tests to assess the bearing capacity of peat at Zegveld. *AIMS Geosciences*, 11(4), 828–845. doi: 10.3934/geosci.2025035.
- Zhang, Y., Liu, H., & Chen, X. (2024). GeoTemporal modeling of urban subsidence using SBAS-InSAR: Case study from Tehran. *Remote Sensing of Environment*, 312, 113–129. doi: 10.1016/j.rse.2024.113129.
- Zisk, S. (1972). A new earth-based radar technique for the measurement of lunar topography. *The Moon*, 4 (4-3).

