



Land subsidence risk assessment and zoning in the watersheds of Isfahan Province using Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR)

Kourosh Shirani^{1*} and Mehrdad Pasandi²

¹ Associate Professor, Department of Soil and Water Management Engineering, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Received: 23 November 2024

Accepted: 12 April 2025

Extended abstract

Introduction

Land subsidence, a significant geological hazard, poses widespread risks to infrastructure, agriculture, and the environment. This phenomenon may result from factors such as excessive groundwater extraction, mining activities, oil/gas extraction, or natural causes like sediment compaction and tectonic movements. Accurate monitoring of land subsidence using advanced technologies is essential for mitigating its adverse effects. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), particularly the Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR) technique, is one of the most advanced methods for monitoring ground deformation. With millimeter-level precision, it enables the detection of subtle land movements and serves as a critical tool for long-term subsidence monitoring over large areas. In this study, Sentinel-1 satellite data (ascending, descending, and combined modes) and the PSInSAR technique were utilized to assess and map land subsidence risk in major watersheds of Isfahan Province, including Isfahan-Borkhar, Najafabad, Northern Mahyar, Southern Mahyar, and Kuhpayeh-Sejzi. By providing detailed insights into the extent and severity of subsidence, this research identifies spatial and temporal patterns, offering crucial information for policymaking and risk management.

Materials and methods

The study area encompasses extensive watersheds that include the metropolis of Isfahan, as well as significant agricultural lands and residential areas. The Sentinel-1 radar data spanning from 2014 to 2023 were used, including ascending and descending imagery, to resolve displacement ambiguities caused by the directional nature of movement. Initial data processing involved co-registration of radar images to align pixels accurately and generate interferograms for phase change extraction. Persistent scatterers (PS) were identified using the Amplitude Dispersion Index (ADI) and phase stability analysis. Atmospheric and orbital errors were corrected using statistical models and inversion techniques to eliminate biases. Temporal analysis of ground displacement was conducted to calculate deformation trends, with data georeferenced for spatial interpretation. Validation was carried out by comparing results with ground-based data and independent sources. Final outputs included cumulative subsidence maps, annual subsidence rates, and risk zoning maps highlighting areas prone to land subsidence.

Results and discussion

The findings reveal that subsidence in the study area ranged from negligible levels to 55 cm over the nine-year observation period. Annual subsidence rates in parts of the Isfahan-Borkhar and Southern Mahyar watersheds reached 60 mm per year. Combining ascending and descending data improved accuracy and enabled the separation of vertical and east-west horizontal displacement components. The highest cumulative subsidence was observed in urban and agricultural zones of the Isfahan-Borkhar watershed and in clayey sediment areas within the Southern Mahyar watershed. Risk zoning maps indicate that the Isfahan-Borkhar and Southern Mahyar watersheds have the largest areas classified as high-risk. The other watersheds predominantly exhibit moderate to low-risk zones. The maps demonstrate a strong correlation between severe subsidence and land use (urban and agricultural areas) as well as geological features (clayey sediments and alluvial deposits).

* Corresponding author: k.shirani@areeo.ac.ir

Conclusions

The application of PSInSAR for monitoring land subsidence in Isfahan Province provides valuable insights into the patterns and trends of this phenomenon. The results highlight severe and ongoing subsidence in the Isfahan-Borkhar and Southern Mahyar watersheds, necessitating urgent planning and management measures to mitigate the associated risks. The link between subsidence and anthropogenic factors, such as excessive groundwater extraction, and geological characteristics underscores the need for integrated planning for sustainable water resource management and land use. The risk zoning maps presented in this study serve as essential tools for policymakers and urban planners to optimize risk management strategies. Future research should focus on continuous monitoring and the development of predictive subsidence models to address this issue effectively.

Keywords: Ascending and descending data, PSInSAR interferometry, Sentinel-1, Land subsidence

Cite this article: Shirani, K., Pasandi, M., 2026. Land subsidence risk assessment and zoning in the watersheds of Isfahan Province using Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR). *Water. Eng. Manag.* 17(4), 534-552.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در حوزه‌های آبخیز استان اصفهان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری روزنه مصنوعی با پراکنده‌سازهای ماندگار (PSInSAR)

کوروش شیرانی^{۱*} و مهرداد پسندی^۲

^۱ دانشیار، گروه تحقیقات مهندسی حفاظت آب و خاک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

چکیده مبسوط

مقدمه

فرونشست زمین به‌عنوان یکی از مخاطرات زمین‌شناسی، تأثیرات گسترده‌ای بر زیرساخت‌ها، کشاورزی و محیط‌زیست دارد. این پدیده می‌تواند ناشی از عواملی همچون برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های معدنی، استخراج نفت/گاز و یا عوامل طبیعی مانند تراکم رسوبات و حرکات تکتونیکی باشد. پایش دقیق این پدیده با استفاده از تکنولوژی‌های نوین، راهکاری کلیدی برای کاهش آثار زیان‌بار آن به شمار می‌رود. روش تداخل‌سنجی راداری روزنه مصنوعی (InSAR)، به‌ویژه تکنیک پراکنده‌سازهای ماندگار (PSInSAR)، یکی از پیشرفته‌ترین روش‌ها برای پایش تغییرات سطح زمین است. این روش با دقت میلی‌متری، امکان شناسایی جابجایی‌های کوچک زمین را فراهم می‌کند و ابزار مهمی برای پایش بلندمدت فرونشست در مناطق وسیع می‌باشد. این مطالعه با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین در برخی از مهم‌ترین حوزه‌های آبخیز استان اصفهان، شامل اصفهان-برخوار، نجف‌آباد، مهیار شمالی، مهیار جنوبی و کوهپایه-سجزی، با استفاده از داده‌های صعودی، نزولی و ترکیبی (صعودی-نزولی) ماهواره Sentinel-1 و تکنیک PSInSAR انجام شده است. این پژوهش ضمن ارائه اطلاعات دقیق در مورد وسعت و شدت فرونشست، به شناسایی الگوهای مکانی و زمانی این پدیده پرداخته و نتایج آن برای سیاست‌گذاری و مدیریت خطرات فرونشست می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شامل حوزه‌های آبخیز گسترده‌ای است که نه‌تنها کلان‌شهر اصفهان را در بر می‌گیرد، بلکه مناطق وسیعی از زمین‌های کشاورزی و سکونتگاه‌های مهم را نیز شامل می‌شود. در این مطالعه، داده‌های راداری Sentinel-1 مربوط به دوره زمانی ۱۳۹۳ (۲۰۱۴) تا ۱۴۰۲ (۲۰۲۳) مورد استفاده قرار گرفته است. این داده‌ها شامل تصاویر صعودی و نزولی این ماهواره می‌باشد که ترکیب آن‌ها به حذف ابهامات ناشی از جهت جابجایی کمک می‌نماید. در ابتدا، پردازش اولیه داده‌ها انجام گردیده که شامل هم‌ثبت‌سازی تصاویر به‌منظور تطابق دقیق پیکسل‌ها و تولید تداخل‌نگارها برای استخراج تغییرات فاز می‌باشد. سپس شناسایی پراکنده‌سازهای ماندگار (PS) صورت گرفته است که در این مرحله، نقاطی با بازتاب پایدار رادار با استفاده از شاخص پراکندگی دامنه (ADI) و تحلیل پایداری فاز شناسایی شده‌اند. در گام بعد،

* مسئول مکاتبات: k.shirani@areeo.ac.ir

تصحیح خطاهای جوی و مداری با استفاده از مدل‌های آماری و روش‌های وارون‌سازی انجام شده تا اثرات جوی و خطاهای مداری حذف شوند. سپس به توسط تحلیل سری زمانی تغییرات زمین، جابجایی در طول زمان محاسبه گردیده و داده‌ها به مختصات جغرافیایی تبدیل شده‌اند. در ادامه، داده‌های به‌دست‌آمده با داده‌های زمینی و سایر منابع مستقل مقایسه شده تا دقت و قابلیت اعتماد نتایج اعتبارسنجی شود. نهایتاً نقشه‌های پهنه‌بندی شامل نقشه‌های فرونشست تجمعی، نرخ سالیانه فرونشست و پهنه‌های خطر وقوع این پدیده تهیه شده‌اند.

نتایج و بحث

نتایج نشان می‌دهد که فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه از مقدار ناچیز تا ۵۵ سانتی‌متر در بازه ۹ ساله مورد بررسی متغیر می‌باشد. نرخ سالیانه فرونشست در مناطقی از حوضه‌های اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی به ۶ سانتی‌متر در سال رسیده است. ترکیب داده‌های صعودی و نزولی علاوه بر کمک به کاهش خطاها، امکان تفکیک جابجایی‌های عمودی و افقی زمین را نیز فراهم ساخته است. بیشترین فرونشست تجمعی در مناطق شهری و کشاورزی حوضه اصفهان-برخوار و همچنین در محدوده رسوبات رسی در حوضه مهیار جنوبی مشاهده می‌شود. پهنه‌بندی خطر نشان می‌دهد که حوضه‌های اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی دارای بیشترین مساحت پهنه‌های با خطر بسیار زیاد هستند. در سایر حوضه‌ها، مناطق با خطر متوسط و کم غالب هستند. نقشه‌های پهنه‌بندی، ارتباط مستقیمی را بین بیشترین میزان فرونشست و کاربری اراضی (مانند مناطق شهری و کشاورزی) و همچنین ویژگی‌های زمین‌شناسی (رسوبات رسی و کلوته‌ها) نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری

استفاده از تکنیک PSInSAR برای پایش فرونشست زمین در استان اصفهان، اطلاعات ارزشمندی درباره الگوها و روند این پدیده ارائه نموده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرونشست در حوضه‌های اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی نه تنها شدید است، بلکه روند مداومی دارد. این موضوع نیازمند برنامه‌ریزی فوری و اجرای اقدامات مدیریتی برای کاهش خطرات فرونشست است. ارتباط بین فرونشست و عوامل انسان‌زاد مانند برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و ویژگی‌های زمین‌شناسی بر ضرورت برنامه‌ریزی یکپارچه برای مدیریت پایدار منابع آب و استفاده از زمین تأکید دارد. نقشه‌های پهنه‌بندی خطر ارائه‌شده در این مطالعه، ابزار ارزشمندی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری به‌منظور مدیریت بهینه ریسک‌های ناشی از فرونشست زمین است. پژوهش‌های آینده باید بر پایش مداوم و توسعه مدل‌های پیش‌بینی فرونشست برای مقابله مؤثر با این پدیده متمرکز شوند.

واژه‌های کلیدی: تداخل‌سنجی راداری PSInSAR، داده‌های صعودی و نزولی، فرونشست، Sentinel-1

مقدمه

زیرزمینی، معدن‌کاری و استخراج نفت و گاز است (Shirani et al., 2021; Galloway et al., 1999). پایش و ارزیابی دقیق فرونشست زمین برای کاهش اثرات این پدیده و اتخاذ شیوه‌های پایدار بهره‌برداری از زمین امری ضروری است (Herrera-García et al., 2021).

تداخل‌سنجی راداری روزنه مصنوعی^۱ یک تکنیک قدرتمند برای نقشه‌برداری توپوگرافی و تغییر شکل

نشست تدریجی سطح زمین یا فرونشست یکی از مخاطرات زمین‌شناسی مهمی است که می‌تواند باعث آسیب گسترده به زیرساخت‌ها، کاهش بهره‌وری کشاورزی و تشدید خطر وقوع سیل در مناطق تحت تاثیر شود. فرونشست زمین معمولاً ناشی از فرآیندهای طبیعی مانند فعالیت‌های تکتونیکی و تراکم رسوبات و همچنین فعالیت‌های انسانی مانند برداشت آب‌های

¹ Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

سطح زمین است که امکان پوشش مکانی بدون تماس گسترده و در همه شرایط آب و هوایی را فراهم می‌کند و دقتی در حد سانتی‌متر یا حتی میلی‌متر برای نظارت بر منطقه تحقیق ارائه می‌دهد (Shirani and Pasandi, 2019; 2020; 2023; Shirani, et al., 2014; 2017; 2021).

طی دو دهه گذشته، InSAR به طور گسترده‌ای برای نقشه‌برداری با رزولوشن بالا یا دیگر کاربردهای سنجش از دور استفاده شده است (Hu et al., 2024; Wang et al., 2019; Ulma et al., 2021). با این حال، تأخیر جوی، خطاهای مداری، خطاهای توپوگرافی و عوامل دیگر، استفاده از InSAR را محدود می‌کنند (Li et al., 2019; Rafiyi et al., 2019). تکنیک‌های تحلیل سری‌های زمانی داده‌های راداری SAR^۱ می‌توانند پارامترهای زمین‌فیزیکی را پس از حذف منابع خطا با تحلیل سری‌های زمانی تصاویر یا تداخل‌نگارهای SAR برآورد نمایند. یکی از تکنیک‌های سری زمانی SAR، روش تداخل‌سنجی راداری روزنه مصنوعی با پراکنده‌سازهای ماندگار^۲ است. تکنیک پیشرفته سنجش از راه دور PSInSAR برای تشخیص و پایش دقیق فرونشست زمین بدون صرف هزینه زیاد به‌کار می‌رود (Shirani and Pasandi, 2001; Ferretti et al., 2019; 2023).

این روش با استفاده از اطلاعات فاز به دست آمده از چندین تصویر راداری روزنه مصنوعی (SAR)، قادر به شناسایی تغییر شکل‌های بسیار کوچک زمین در طول زمان است (Crosetto et al., 2016). PSInSAR با بهره‌گیری از تحلیل سری زمانی تصاویر رادار، تغییر شکل زمین را با شناسایی و ردیابی نقاط ثابت به نام پراکنده‌سازهای ماندگار در مسیر عبورهای متعدد ماهواره اندازه‌گیری می‌کند (Ferretti et al., 2001). این تکنیک نسبت به روش‌های مرسوم نقشه‌برداری زمینی دارای مزایای متعددی از جمله توانایی پوشش مناطق وسیع، قدرت تفکیک مکانی بالا و قابلیت تشخیص جابجایی‌های سطح زمین در حد میلی‌متر است (Karanam et al., 2021; Agarwal et al., 2021). توانمندی روش PSInSAR در پایش فرونشست در

محیط‌های مختلفی در سراسر جهان به اثبات رسیده است و برای تعیین تغییر شکل سطح زمین مرتبط با افت سطح آب زیرزمینی به‌کار رفته و توسعه داده شده است (Agarwal et al., 2020; Mason et al., 2015). (Agarwal et al., 2021; Khorrami et al., 2020). مطالعات مختلف با استفاده از این روش بر تطبیق‌پذیری و قابلیت اطمینان PSInSAR در تخمین جابجایی‌ها در محیط‌های زمین‌شناسی و زیست‌محیطی متنوع تأکید می‌کند. به‌عنوان مثال، (Le and Van Tran, 2022) با اجرای تکنیک PSInSAR بر روی داده‌های Sentinel-1A، فرونشست زمین در استان Thai Nguyen در ویتنام را تخمین زده و نرخ جابجایی را بین ۲۳/۲- میلی‌متر در سال تا ۲۱/۰+ میلی‌متر در سال محاسبه کرده‌اند. این مطالعه فرونشست قابل‌توجهی (جابجایی بین ۴۰- میلی‌متر و ۶۰+ میلی‌متر) را به‌ویژه در مناطق معدن‌کاری زغال‌سنگ نشان می‌دهد.

(Abo and Osawa, 2024) با استفاده از اجرای تکنیک PSInSAR بر روی داده‌های راداری Sentinel-1، فرونشست پنج ساله (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲) زمین در استان چیبا واقع در ژاپن را پایش نموده و توانستند نواحی با نرخ فرونشست بیش از ۰/۴ سانتی‌متر در سال را با دقت شناسایی کنند. یافته‌های این محققان با مطالعات قبلی که فرونشست زمین در استان چیبا را به عواملی مانند استخراج آب‌های زیرزمینی و تولید گاز طبیعی نسبت داده‌اند، هم‌راستا است. مطالعه‌ای که توسط (Lenardón Sánchez et al., 2024) بر روی سه شهر مهم ایتالیا شامل رم، بولونیا و فلورانس انجام شده، کارآمدی تکنیک PSInSAR را در ارزیابی ریسک فرونشست در مناطق شهری نشان می‌دهد.

این پژوهش با ترکیب داده‌های جابجایی زمین مبتنی بر ماهواره با شاخص‌های آسیب‌پذیری شهری، چارچوبی برای این نوع مطالعات در سایر مناطق شهری ارائه می‌دهد. (Souza et al., 2024) با استفاده از تکنیک PSInSAR و سری زمانی تصاویر راداری COSMO-SkyMed، PAZ و Sentinel-1، تصویربرداری شده در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۳، فرونشست زمین در منطقه غربی Recife در

² Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PSInSAR)

¹ Synthetic Aperture Radar (SAR)

۱۰۰- میلی‌متر در سال متغیر بوده و بیشترین میزان فرونشست در بخش‌های شمالی، شمال شرقی و شرقی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود.

این پژوهش به اصول روش PSInSAR و کاربرد آن در تشخیص، پایش و تعیین خطر فرونشست زمین در محدوده استان اصفهان با مقیاسی وسیع‌تر در تعدادی از مهمترین حوزه‌های آبخیز شامل اصفهان-برخوار، نجف آباد، مهیار شمالی، مهیار جنوبی و کوهپایه-سجزی، می‌پردازد. تکنیک PSInSAR بر روی تصاویر راداری Sentinel-1 صعودی، نزولی و ترکیبی (صعودی-نزولی) از منطقه مورد مطالعه اعمال شده است. نتایج این پژوهش با ارتقای شناخت الگوها و مکانیزم‌های فرونشست، به بهبود مدیریت ریسک و سیاست‌گذاری برای کاهش اثرات سوء فرونشست زمین در این منطقه کمک می‌نماید.

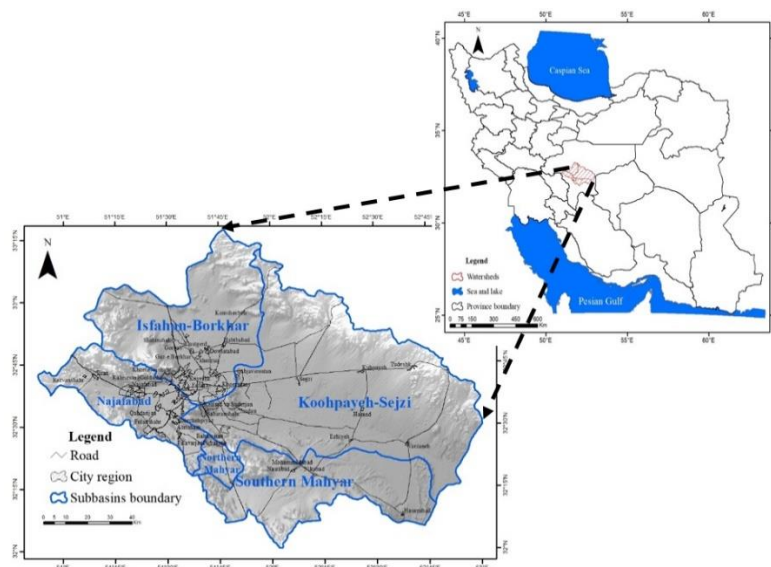
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه تعدادی از حوزه‌های آبخیز استان اصفهان شامل اصفهان-برخوار، نجف آباد، مهیار شمالی، مهیار جنوبی و کوهپایه-سجزی را پوشش می‌دهد (شکل ۱). این منطقه عمده مساحت استان را در بر گرفته و کلان شهر اصفهان و همچنین مناطق کشاورزی و باغداری عمده استان در این محدوده واقع شده‌اند. در ضمن فرونشست در این حوزه‌های آبخیز قابل توجه گزارش شده است (شکل ۲).

برزیل را مورد تخمین قرار داده‌اند. نتایج نرخ فرونشست قابل توجهی را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که برخی مناطق دچار فرونشستی بالغ بر ۲۵- میلی‌متر در سال شده‌اند. این پژوهشگران این جابجایی زمین را با فعالیت‌های انسانی مانند دفن زباله، ساخت‌وساز و برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی مرتبط دانسته‌اند.

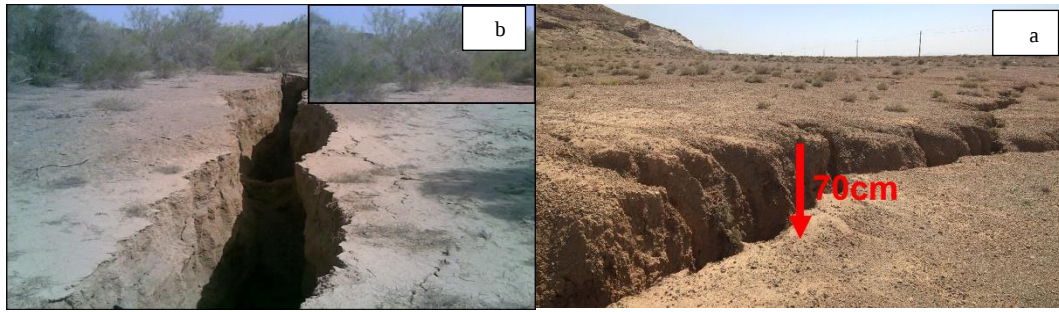
مطالعات متعددی در جهت تخمین فرونشست زمین در محدوده استان اصفهان با استفاده از روش‌های متداول تداخل‌سنجی راداری روزنه مصنوعی (InSAR) و تداخل‌سنجی تفاضلی راداری روزنه مصنوعی انجام شده که از جمله می‌توان به مطالعات Salehi et al., (2013) و Davoodijam et al., (2015) بر روی دشت مهیار، تخمین فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد و مقایسه با داده‌های ترازیابی و افت سطح آب زیرزمینی توسط Shirani et al., (2021)، تخمین و تهیه نقشه خطر رخداد فرونشست در محدوده‌های دامنه و داران توسط Chitsazan et al., (2022) و مطالعه Sorkhabi et al., (2022) بر روی فرونشست در محدوده شهر اصفهان اشاره نمود.

Goorabi et al., (2022) با اعمال تکنیک PSInSAR بر روی تصاویر راداری Sentinel-1 به بررسی پدیده فرونشست زمین در منطقه شهری کلان‌شهر اصفهان در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ پرداخته‌اند. این تحقیق نشان می‌دهد که نرخ فرونشست بین ۵- تا



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. The study area



شکل ۲- پیدایش و پیشرفت ترک‌های حاصل از توسعه فرونشست زمین در مناطق (الف) مهیار و (ب) شمال اصفهان-برخوار
Fig. 2. Formation and development of cracks caused by land subsidence in (a) Mahyar and (b) North of Isfahan-Barkhar

پردازش شد (جدول ۱). تکنیک PSInSAR با خط مبنای کوتاه^۵ در محیط نرم‌افزار SARPROZ 2022 و متلب ۲۰۲۰ اجرا شده است.

برجسته‌ترین ویژگی ماهواره Sentinel-1 داده‌برداری مداوم است. این ماهواره به‌طور مرتب از مناطق مشابه بازدید می‌کند و یک سری تصاویر پیوسته در طول زمان تهیه می‌کند که برای تحلیل PSInSAR ضروری است. این ماهواره از رادار با طول موج بلندتر (باند C) استفاده می‌کند و در نتیجه کمتر تحت تاثیر اختلالات جوی قرار می‌گیرد. این امر کیفیت و قابلیت اطمینان آنالیز تداخلی که جنبه‌ای بنیادی در PSInSAR دارد را بهبود می‌بخشد. مطلب مهم دیگر، دسترسی رایگان به داده‌های این ماهواره است. به‌منظور دسترسی به تصاویر مورد نظر از سایت ASF به آدرس <https://urs.earthdata.nasa.gov> پس از ثبت‌نام و ایجاد شناسه و رمز عبور استفاده شد.

به‌منظور تعیین فرونشست زمین با استفاده از تکنیک PSInSAR در منطقه مورد مطالعه، ابتدا مجموعه‌ای از تصاویر راداری Sentinel-1 که منطقه مورد مطالعه را در دوره‌های زمانی مختلف پوشش می‌دهند و هندسه دریافت مشابهی دارند (یعنی زاویه دید و قطبش یکسان) (Crosetto et al., 2016)، دانلود شده‌اند (شکل ۳).

تعداد ۱۸۷ و ۱۸۲ تصویر Sentinel1 با قطبش VV+VH در وضعیت مداری نزولی^۱ به‌ترتیب با مشخصات گذرهای^۲ ۳۵ و ۱۳۷ و قاب‌های^۳ ۴۸۱ و ۴۸۴ در دو گذر (محدوده زرد و قرمز رنگ در شکل ۳) و تعداد ۱۹۸ تصویر Sentinel1 با قطبش VV+VH در وضعیت مداری صعودی^۴ با مشخصات گذر ۲۸ و قاب ۱۰۲ (محدوده سبز در شکل ۳) به‌صورت سری زمانی نه ساله بین تاریخ‌های ۲۷/۱۰/۲۰۱۴ تا (۱۳۹۳) تا ۲۰۲۳/۰۸/۰۹ دریافت و به‌روش PSInSAR

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای راداری مورد استفاده

Table 1. Specifications of the employed satellite radar images

Look ang.	Sp. Res.	Polarity	Frequency	Bound	Processing level	Image type	Fly direction	Sensor	Image file name
29.1-46	5*20 m	DV (VV+VH)	5.405 GHZ	C	SLC	IW	Descending	Sentinel-1A	S1A_IW_SLC_1SVD
29.1-46	5*20 m	DV (VV+VH)	5.405 GHZ	C	SLC	IW	Descending	Sentinel-1A	S1A_IW_SLC_1SVD
29.1-46	5*20 m	DV (VV+VH)	5.405 GHZ	C	SLC	IW	Ascending	Sentinel-1A	S1A_IW_SLC_1SVD
	Vertical baseline	Pairs no.	End time img	Start timeimg	Frame	Path	Image no.	Tempral Res.	No.
	-230_50 m	173	20230805	20141027	484	137	182	12 Days	1
	-372_189 m	181	20230729	20141027	481	35	187	12 Days	2
	-350_20 m	197	20230809	20141206	102	28	198	12 Days	3

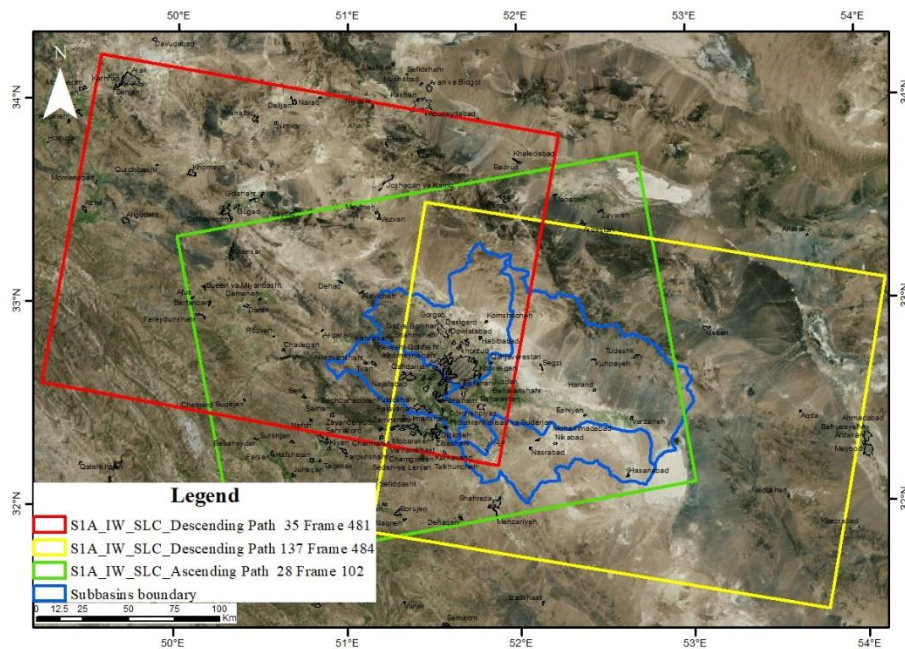
⁴ Ascending

⁵ Satellite Based Augmentation System (SBAS)

¹ Descending

² Path

³ Frame



شکل ۳- گذرهای تصاویر Sentinel-1 از منطقه مورد مطالعه

Fig. 3. Paths of the Sentinel-1 images over the study area

تصاویر راداری هستند. شاخص پراکندگی دامنه (ADI) برای هر پیکسل محاسبه می‌شود و پیکسل‌هایی با ADI پایین‌تر از یک آستانه مشخص به عنوان PS انتخاب می‌شوند (Ferretti et al., 2001).

به پیشنهاد Ferretti et al., (2001)، آستانه ADI معمولاً بین ۰/۲۵ تا ۰/۳ انتخاب می‌گردد و این محدوده تضمین می‌نماید که نقاط انتخاب شده از ثبات کافی برای تحلیل تغییرات مکانی-زمانی (مانند بررسی فرونشست زمین) برخوردار باشند. در این پژوهش مقدار این آستانه ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. سپس برای بهبود انتخاب PS، تحلیل پایداری فاز انجام می‌شود و تنها پیکسل‌هایی با رفتار فاز پایدار باقی می‌مانند (Crosetto et al., 2016).

با مدل‌سازی و حذف فاز جو از تداخل‌نگارها، خطاهای جوی تصحیح می‌شوند. برای رفع خطاهای جوی و مداری، ابتدا با استفاده از روش‌های آماری مانند فیلتر کردن یا مدل‌سازی بر اساس ویژگی‌های مکانی و زمانی، سیگنال تاخیر جوی از سیگنال تغییر شکل زمین مجزا می‌شود (Ferretti et al., 2001). خطاهای مداری در داده‌های رادار با اصلاح عدم دقت موقعیت و

سپس، در مرحله پیش‌پردازش، برای اطمینان از تطابق تک تک پیکسل‌ها در مجموعه تصاویر با یک موقعیت زمینی یکسان، همه تصاویر رادار به صورت هم‌ثبت^۱ به یک هندسه مشترک تراز می‌شوند (Hooper, 2008). معمولاً از یک تصویر مرجع با بهترین کیفیت برای هم‌ثبت نمودن استفاده می‌شود (Berardino et al., 2002). سپس با تفریق فاز هر تصویر رادار از تصویر مرجع، تداخل‌نگارها تولید می‌شوند. این تداخل‌نگارها به برجسته کردن تغییرات در اطلاعات فاز که می‌توانند به جابجایی زمین، توپوگرافی و اثرات جوی مرتبط باشند، کمک می‌کنند (Hanssen, 2001).

پراکنده‌سازهای ماندگار^۲ معمولاً سازه‌های ساخته بشر یا عوارض طبیعی هستند که به طور مداوم سیگنال‌های رادار را بازتاب می‌دهند و بر اساس ثبات دامنه در طول زمان، PS‌ها شناسایی و انتخاب می‌شوند. شاخص پراکندگی دامنه^۳، معیاری است که برای ارزیابی پایداری دامنه سیگنال بازتابیده از هر پیکسل در داده‌های راداری طی زمان استفاده می‌شود. این شاخص به شناسایی پراکنده‌سازهای ماندگار (PS) کمک می‌نماید که نقاطی با بازتاب پایدار و قابل اعتماد در

³ Amplitude Dispersion Index (ADI)

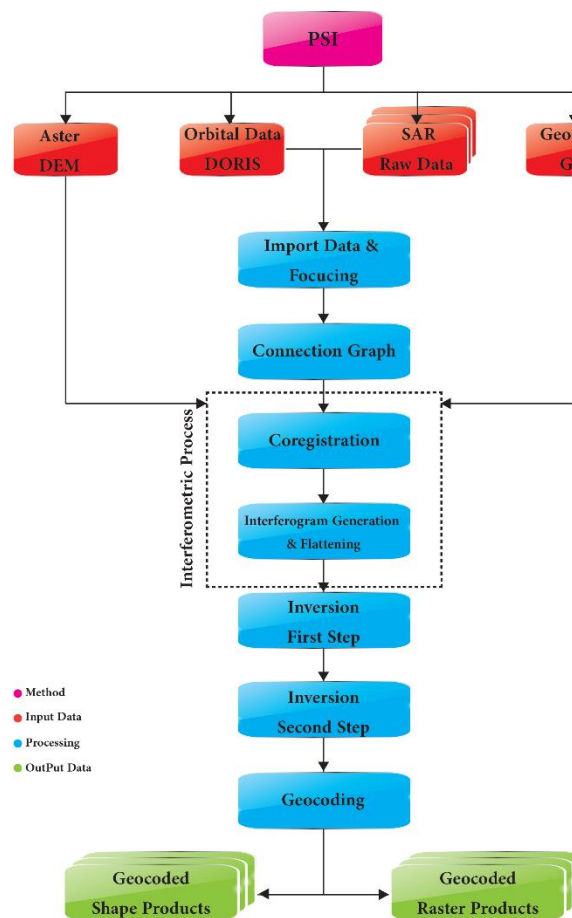
¹ Coregistration

² PS

به دست می‌آید (Bert, 2006). ژئوکدگذاری^۱ اندازه‌گیری‌های جابجایی را از مختصات راداری به مختصات جغرافیایی تبدیل می‌کند و داده‌ها را از خط دید رادار^۲ به اجزای جابجایی زمین (مانند حرکت‌های عمودی و افقی) تغییر می‌دهد (Hooper et al., 2001). شکل ۴ فلوچارت روش PSInSAR برای تعیین فرونشست زمین را نشان می‌دهد.

سرعت ماهواره به هنگام دریافت داده، برطرف می‌گردند (Hanssen, 2001).

تحلیل سری زمانی تغییر شکل شامل تخمین تغییر شکل زمین با برازش مدل‌های خطی یا غیرخطی به داده‌های فاز پراکنده‌سازهای پایدار (PS) است. در این مرحله با حل یک سیستم معادلات وارون‌سازی که تغییرات فاز مشاهده‌شده را به جابجایی زمین در طول زمان مرتبط می‌کند، سری زمانی جابجایی برای هر PS



شکل ۴- فلوچارت روش PSInSAR
Fig. 4. Flowchart of the PSInSAR method

شکل زمین فراهم می‌کند و دقت برآورد فرونشست زمین از طریق تکنیک PSInSAR را افزایش می‌دهد. استفاده از داده‌های صعودی و نزولی به راستی‌آزمایی تغییر شکل‌های ثبت‌شده کمک می‌کند. تطابق نتایج در هر دو مجموعه داده، اطمینان از صحت اندازه‌گیری‌ها را افزایش می‌دهد، در حالی که هرگونه اختلاف می‌تواند نشان‌دهنده خطا یا سوگیری احتمالی باشد و نیاز به

سپس نتایج PSInSAR با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی مانند GPS، ترازیبی و یا سایر منابع مستقل داده برای اطمینان از صحت و قابلیت اعتماد اندازه‌گیری‌های فرونشست زمین، اعتبارسنجی می‌شوند (Wegmuller and Werner, 1995).

ترکیب داده‌های به دست آمده از هر دو مدار صعودی و نزولی، درک سه بعدی کامل‌تری از تغییر

² LOS

¹ Geocoding

جوی یا خطاهای مداری می‌توانند باعث اشتباه در تخمین فرونشست گردند (Li et al., 2009). این روش امکان پوشش گسترده‌تر و شناسایی بهتر مناطق تحت فرونشست و همچنین کاهش و تصحیح اعوجاج‌های هندسی ناشی از تغییرات زمین و اثرات جوی را فراهم می‌سازد (Hanssen, 2001) و در نتیجه دقت و قابلیت اطمینان نتایج تحلیل فرونشست را بهبود می‌بخشد (Pepe and Lanari, 2006). همچنین، باعث بهبود تفکیک زمانی (تعداد مشاهدات در واحد زمان) شده و امکان پایش مکرر و درک بهتر سرعت و روند فرونشست را فراهم می‌آورد (Crosetto et al., 2016).

در نهایت نقشه فرونشست زمین تهیه می‌شود که نمایش بصری توزیع مکانی و تغییرات زمانی حرکات زمین در منطقه مورد مطالعه است. الگوهای فرونشست زمین با در نظر گرفتن عوامل بالقوه‌ای ایجاد کننده مانند برداشت آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های معدنی یا فرآیندهای زمین‌شناسی طبیعی تحلیل می‌شوند (Galloway and Burbey, 1995).

یک تحلیل دقیق سری زمانی برای درک دینامیک فرونشست از جمله روندها، تغییرات زمانی و رویدادهای جابجایی ناگهانی باید انجام شود. روند فرونشست به الگوی جابجایی بلندمدتی اشاره دارد که طی سال‌ها یا دهه‌ها مشاهده می‌شود و معمولاً تحت تأثیر فرآیندهای زمین‌شناسی و انسان‌زاد پایدار قرار دارد. برای مثال، مناطقی که در معرض استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی هستند، معمولاً در طول زمان کاهش ارتفاع مداومی را تجربه می‌کنند. تغییرات زمانی در فرونشست به نوسانات کوتاه‌مدت یا تغییرات دوره‌ای اطلاق می‌شود که در بازه‌های ماهانه یا سالانه رخ می‌دهند.

این تغییرات می‌توانند ناشی از چرخه‌های فصلی تغذیه و برداشت آب‌های زیرزمینی و یا عوامل اقلیمی مانند بارندگی و خشکسالی باشند. در برخی موارد، فرونشست به‌صورت جابجایی‌های ناگهانی ظاهر می‌شود. این جابجایی‌های شدید می‌توانند در اثر زمین‌لرزه‌ها، برداشت سریع سیالات زیرزمینی و تخریب معادن و تونل‌ها ایجاد شوند.

بررسی‌های بیشتر را مطرح کند (Bokhari et al., 2023).

هندسه‌های برداشت متفاوت، اندازه‌گیری فرونشست در جهات مختلف را امکان‌پذیر می‌سازد (Lanari et al., 2004) و به اعتبارسنجی نتایج کمک می‌کند. ماهواره‌های SAR حرکات زمین را در راستای خط دید (LOS) خود ثبت می‌کنند که زاویه‌ای مایل نسبت به سطح زمین دارد. به همین دلیل، هر مدار (صعودی یا نزولی) ترکیبی از جابجایی‌های عمودی و افقی را آشکارسازی می‌کند. با ترکیب داده‌های هر دو مدار، می‌توان این اندازه‌گیری‌ها را به مؤلفه‌های مجزای جابجایی عمودی و افقی (شرق-غرب) تفکیک کرد که منجر به درک دقیق‌تری از الگوهای نشست زمین می‌شود (Gambolati and Teatini, 2023).

ماهواره‌های آژانس فضایی اروپا^۱ هر دو مدار صعودی (جنوب به شمال) و نزولی (شمال به جنوب) را پیمایش می‌کنند. مدارهای صعودی در درجه اول به حرکات شرق به غرب و تا حدی به حرکات عمودی حساس هستند، در حالی که مدارهای نزولی به حرکات شرق به غرب در جهت مخالف حساس بوده و همچنین حرکات عمودی جزئی را ثبت می‌کنند (Mora et al., 2003). این تفاوت در این نوع مطالعه کلیدی است، زیرا فرونشست زمین به ندرت به طور یکنواخت رخ می‌دهد. با ادغام داده‌های جابجایی خط دید از هر دو مسیر با استفاده از مدل‌های ریاضی و تکنیک‌های وارون‌سازی می‌توان مؤلفه‌های قائم (بالا و پایین) و افقی (شرق و غرب) جابجایی زمین را از هم‌دیگر تفکیک نموده و بدین ترتیب درک جامعی از تغییر شکل زمین به دست آورد (Wright et al., 2004؛ Hooper et al., 2004؛ Zhou et al., 2018؛ Aslan et al., 2019).

در ضمن، استفاده از داده‌های هر دو نوع مدار به کاهش خطا کمک می‌کند. تصاویر SAR به‌ویژه در مناطق با توپوگرافی پیچیده ممکن است تحت تأثیر اعوجاج‌های هندسی مانند کوتاه‌شدگی و هم‌پوشانی قرار گیرند. استفاده از داده‌های هر دو مدار صعودی و نزولی به شناسایی و اصلاح این اعوجاج‌ها کمک کرده و دقت اندازه‌گیری نشست زمین را افزایش می‌دهد. اختلالات

¹ The European Space Agency (ESA)

نتایج و بحث

جدول ۲ حداکثر میزان تجمعی و نرخ فرونشست

زمین را در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ به تفکیک حوزه‌های آبخیز اصلی زاینده‌رود به‌همراه مساحت هر یک ارایه می‌دهد. حوضه‌های اصفهان-برخوار، مهیار جنوبی، نجف‌آباد، مهیار شمالی و کوهپایه سجری به‌ترتیب دارای حداکثر میزان و نرخ فرونشست زمین هستند.

در این پژوهش فرونشست تجمعی در منطقه مورد مطالعه در طی بازه زمانی سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ با استفاده از اعمال روش PSInSAR بر روی سری زمانی تصاویر صعودی، نزولی و ترکیبی از صعودی و نزولی محاسبه شده است (شکل ۵).

جدول ۲- حداکثر میزان و نرخ فرونشست زمین حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه زاینده‌رود در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲

Table 2. The maximum amount and rate of land subsidence in the studied watersheds of the Zayandehrud river during 2014-2023

Sub basin name	Area (km ²)	Maximum extent land subsidence (cm)	Land subsidence rate (cm)
Koohpayeh Sejzi	6,674	20	2
Isfahan Borkhar	3,390	55	6
Najafabad	1,712	22	2
Northern Mahyar	279	21	2
Southern Mahyar	2,644	49	5
Sum	14,698		

بیشینه فرونشست تجمعی در حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی رخ داده است.

فرونشست تجمعی در بازه زمانی مورد مطالعه از ناچیز تا حداکثر ۵۵ سانتی‌متر تغییر می‌کند. مقدار

The linked image cannot be displayed. The file may have been moved, renamed, or deleted. Verify that the link points to the correct file and location.

c

The linked image cannot be displayed. The file may have been moved, renamed, or deleted. Verify that the link points to the correct file and location.

b

The linked image cannot be displayed. The file may have been moved, renamed, or deleted. Verify that the link points to the correct file and location.

a

شکل ۵- نقشه‌های پهنه‌بندی فرونشست تجمعی منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ تهیه شده با استفاده از (الف) داده‌های صعودی (ب) داده‌های نزولی (ج) ترکیب داده‌های صعودی و نزولی

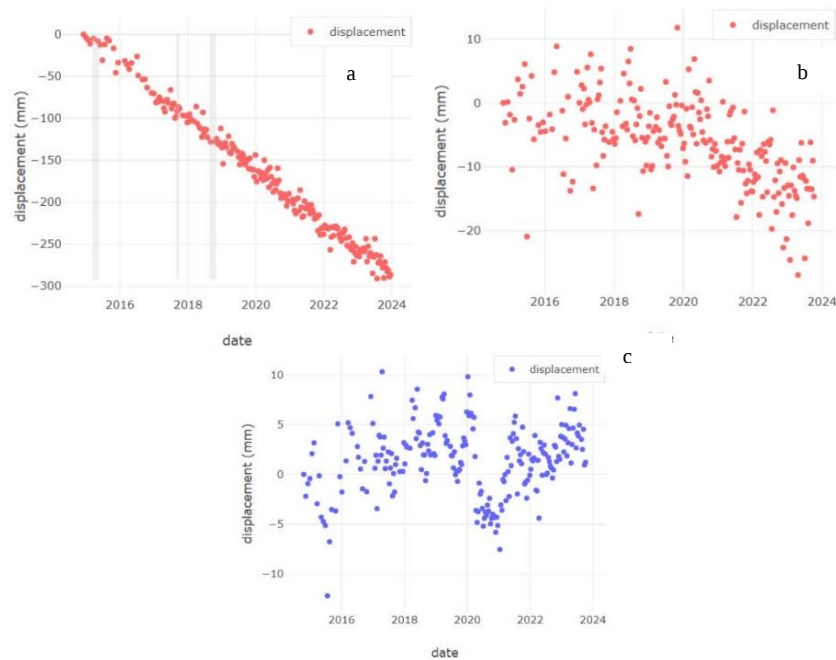
Fig. 5. Zoning maps of the cumulative subsidence in the study area during 2014–2023 generated using (a) ascending data, (b) descending data, and (c) combination of ascending and descending data

به ترتیب حوزه‌های آبخیز نجف‌آباد، مهیار شمالی و کوهپایه-سجری قرار دارند.

محاسبه نرخ سالیانه فرونشست در منطقه مورد مطالعه (شکل ۸) با میزان فرونشست تجمعی مطابقت دارد و در حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی بیشینه است. میزان فرونشست سالیانه از مقادیر ناچیز تا حداکثر ۶۰ میلی‌متر است که مقدار بیشینه در حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی رخ داده و با مناطق فرونشست تجمعی در طی بازه زمانی ۹ ساله (شکل ۵) مطابقت دارد.

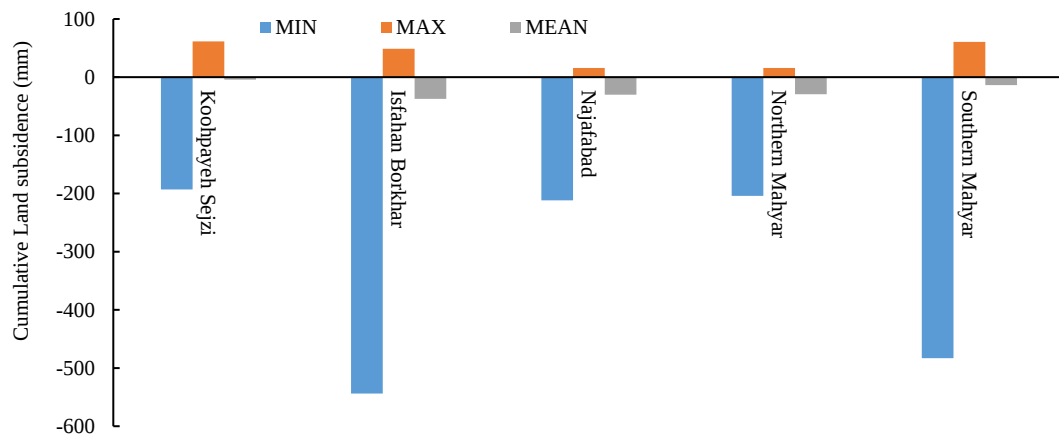
شکل ۶، تغییرات میزان جابجایی‌ها را در حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار، کوهپایه-سجری و مهیار در طی بازه زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود جابجایی‌های منفی (فرونشست) به طور قابل توجه و مداوم در حوزه آبخیز اصفهان-برخوار رخ داده است.

بررسی میزان جابجایی‌های تجمعی رخ داده در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در طی بازه زمانی سال ۱۳۹۳ الی ۱۴۰۲ (شکل ۷) حکایت از حداکثر رخداد فرونشست به ترتیب در حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی دارد. با تفاوت قابل توجه از این لحاظ،



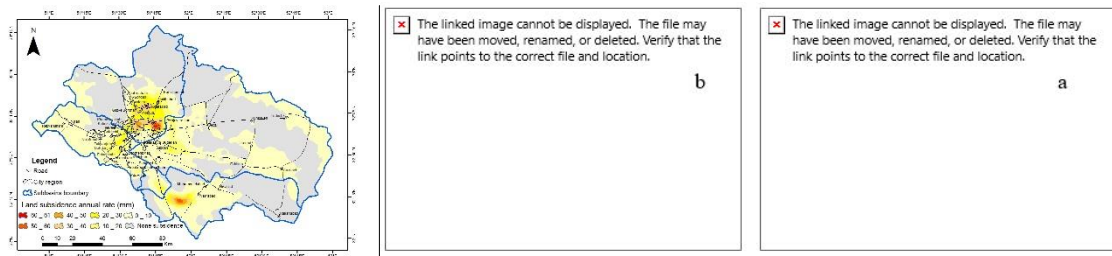
شکل ۶- تغییرات میزان فرونشست در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ در حوزه‌های آبخیز (الف) اصفهان-برخور (ب) کوهپایه-سجزی (ج) مهبیار شمالی و مهبیار جنوبی

Fig. 6. Subsidence variations during 2014–2023 in the watersheds of (a) Isfahan-Borkhar, (b) Kuhpayeh-Sejzi, (c) Northern Mahyar and Southern Mahyar



شکل ۷- میزان جابجایی در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ در منطقه مورد مطالعه شامل حوزه‌های آبخیز کوهپایه-سجزی، اصفهان-برخور، نجف‌آباد، مهبیار شمالی و مهبیار جنوبی

Fig. 7. The amount of displacement during 2014–2023 in the study area, including the watersheds of Kuhpayeh-Sejzi, Isfahan-Borkhar, Najafabad, Northern Mahyar, and Southern Mahyar



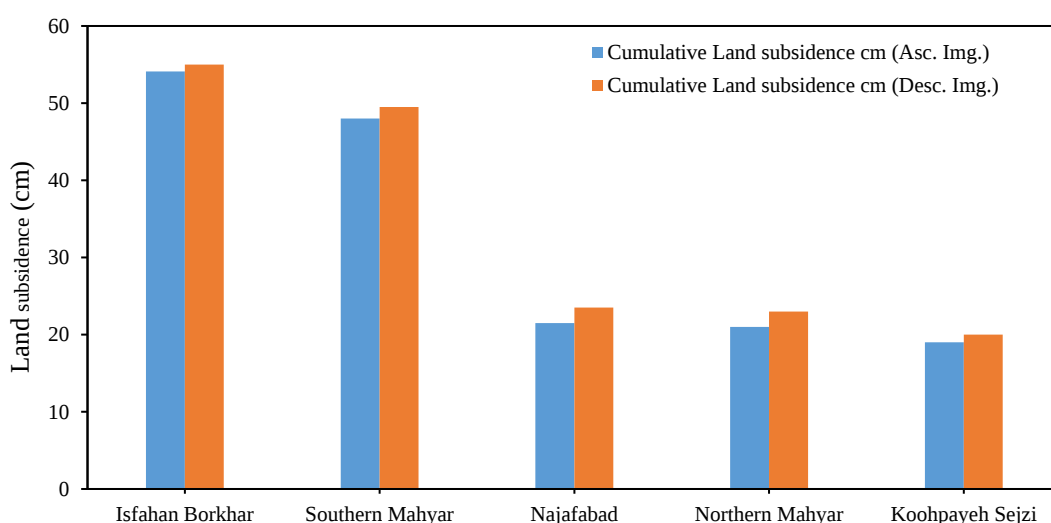
شکل ۸- نقشه‌های پهنه‌بندی نرخ فرونشست منطقه مورد مطالعه، تهیه شده با استفاده از (الف) داده‌های صعودی (ب) داده‌های نزولی (ج) ترکیب داده‌های صعودی و نزولی

Fig. 8. Zoning maps of the subsidence rate in the study area generated using the (a) ascending data, (b) descending data, and (c) combination of the ascending and descending data

منطقه مطالعاتی شامل اصفهان-برخوار، کوهپایه سجزی، مهیار شمالی، جنوبی و نجف آباد برای هر دو حالت مداری صعودی (گذر بالا) و نزولی (گذر پایین) تقریباً نزدیک و مشابه همدیگر (اندکی بیش‌تر برای حالت مداری نزولی) هستند. این موضوع بیان‌گر پردازش درست مراحل تداخل‌سنجی به روش PSInSAR و حذف کامل اختلاف فاز ناشی از توپوگرافی، اثرات اتمسفری و نویز دستگاهی می‌باشد. به عبارت دیگر، تشابه و نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری شده فرونشست زمین نوعی اعتبارسنجی، صرفاً بر مبنای داده‌های راداری می‌تواند باشد.

در این پژوهش از داده‌های راداری Sentinel-1 مدارهای صعودی و نزولی و ترکیب این دو استفاده شده است. استفاده از داده‌های مدارهای مختلف و ترکیب آنها به طور قابل توجهی در شناسایی و پایش فرونشست زمین به توسط PSInSAR مؤثر است. استفاده از داده‌های هر دو مدار ابهام موجود در جهت جابجایی را از بین برده و در نتیجه منجر به دقت بیشتر نتایج می‌شود (Ferretti et al., 2001).

شکل ۹ نشان می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری شده فرونشست زمین بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای راداری سری زمانی به روش PSInSAR در هر چهار



شکل ۹- مقایسه میزان فرونشست تجمعی منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های سنتینل ۱ صعودی و نزولی

Fig. 9. Comparison of the cumulative subsidence in the study area using the ascending and descending Sentinel-1 data

منطقه اصفهان-برخوار، نجف آباد و مهیار در شکل ۱۲ در سه تاریخ طی ۱۳۹۳ الی ۱۴۰۲ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، در تمام مناطق مطالعاتی، شاخص پوشش گیاهی که نماینده توسعه مناطق کشاورزی است، از ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۲ افزایش داشته است. همچنین مناطق با حداکثر میزان فرونشست زمین (محدوده‌های قرمز نارنجی و زرد رنگ در شکل ۱۲)، با بیشترین مقدار شاخص پوشش گیاهی (محدوده‌های سبز رنگ در شکل ۱۲) هم‌پوشانی قابل توجهی دارند.

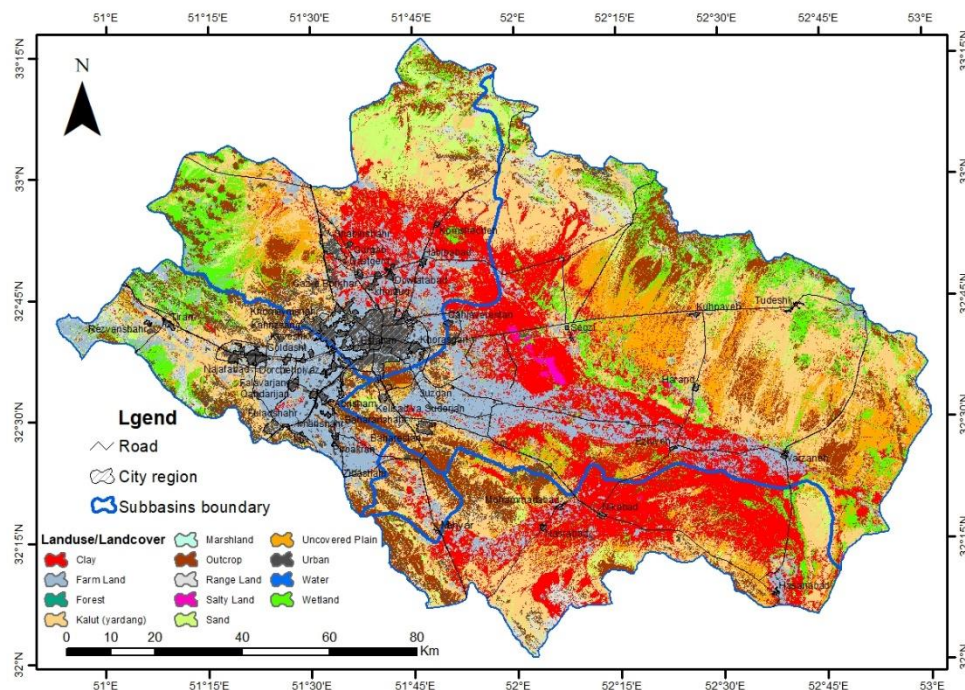
همان‌طور که نمودار شکل ۱۳ نشان می‌دهد، درصد مساحت شاخص پوشش گیاهی (NDVI) طبقه بیشتر از ۰/۱ در پهنه‌های خطر فرونشست زمین در تمامی حوزه‌های آبخیز محدوده مطالعاتی در سال‌های ۲۰۱۵

نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۰) و همچنین پهنه‌بندی میانگین شاخص NDVI در ماه‌های اردیبهشت تا شهریور سال‌های ۲۰۱۵ (۱۳۹۴) تا ۲۰۲۳ (۱۴۰۲) بر اساس پردازش تصاویر Sentinel-1 (شکل ۱۱) نمایان‌گر تطابق مناطق بیشینه فرونشست تجمعی (شکل ۵) و نرخ سالیانه فرونشست (شکل ۸) در حوزه آبخیز اصفهان-برخوار با گستره مناطق شهری و اراضی کشاورزی در این منطقه هستند. در صورتی که این مناطق در حوزه آبخیز مهیار جنوبی با محدوده گسترش کلوت و رسوبات رسی مطابقت دارد. مناطق بیشینه فرونشست در حوزه‌های آبخیز نجف آباد، مهیار شمالی و کوهپایه-سجزی منطبق با گستره تحت پوشش گیاهی (مراتع) است.

نتایج هم‌زادی توسعه کشاورزی آبی و فرونشست در

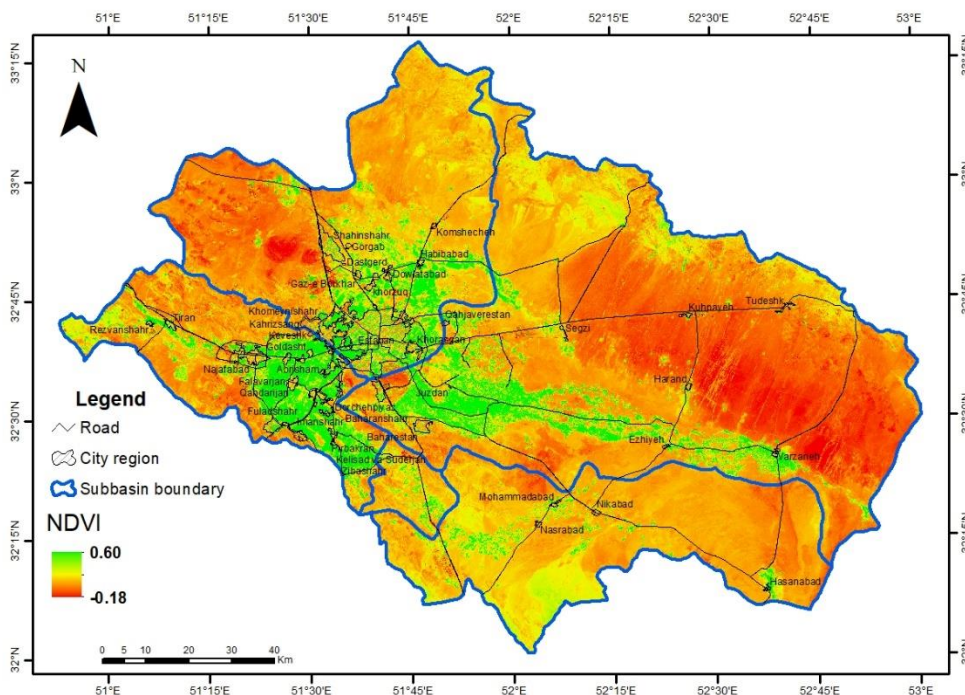
گیاهی (NDVI) طبقه بیشتر از ۰/۱ در پهنه‌های خطر فرونشست زمین به ترتیب در حوزه‌های آبخیز نجف‌آباد، مهیار شمالی، اصفهان برخوار، کوهپایه سجزی و مهیار جنوبی رخ داده است.

(۱۳۹۴)، ۲۰۱۹ (۱۳۹۸) و ۲۰۲۳ (۱۴۰۲) افزایش یافته است که بیان‌گر هم‌زادی افزایش مصرف آب زیرزمینی و مناطق خطر فرونشست زمین می‌باشد. بیشترین مقدار افزایش درصد مساحت شاخص پوشش



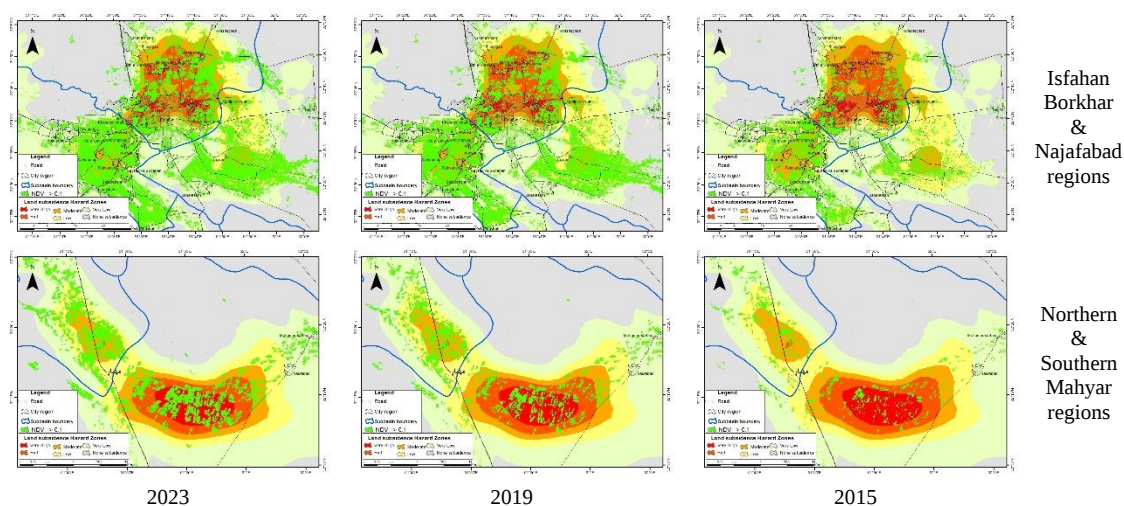
شکل ۱۰- نقشه پهنه‌بندی کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه

Fig. 10. The zoning map of land use in the study area



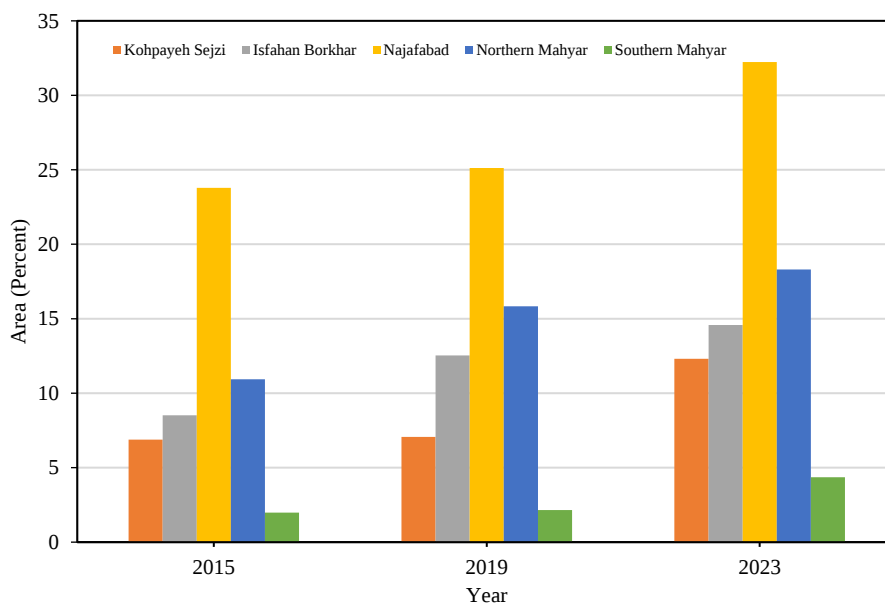
شکل ۱۱- نقشه پهنه‌بندی متوسط چهار ماهه (اردیبهشت تا شهریور) شاخص NDVI طی سال ۱۴۰۲ در منطقه مورد مطالعه

Fig. 11. Zoning map of the average NDVI index of the study area for the four-month period from May to September 2023



شکل ۱۲- هم‌زادی توسعه کشاورزی آبی و فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه

Fig. 12. Coincidence of the irrigated agriculture development and land subsidence in the study area



شکل ۱۳- مقایسه درصد مساحت شاخص پوشش گیاهی (NDVI) مناطق مختلف در سه دوره زمانی

Fig. 13. Comparison of area percentage of the NDVI index across different regions during three time periods

فرونشست مختلف را در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه نشان می‌دهد. بر طبق این نمودار نیز پهنه‌های با خطر وقوع فرونشست خیلی زیاد و زیاد تنها به ترتیب در حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار و مهیار (شمال و جنوبی) مساحتی را به خود اختصاص داده‌اند. پهنه‌های با خطر وقوع فرونشست متوسط به ترتیب در حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار، نجف‌آباد و مهیار شناسایی شده‌اند.

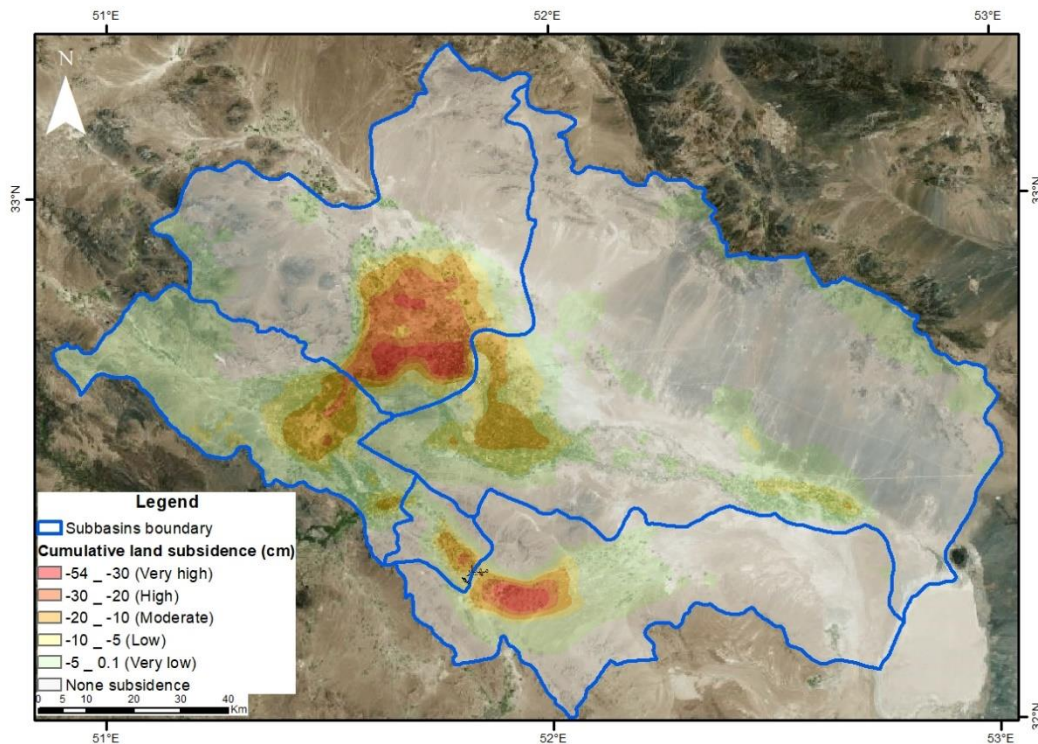
ترتیب درصد مساحت پهنه خطر وقوع فرونشست کم در منطقه مورد مطالعه به صورت حوضه‌های نجف‌آباد، اصفهان-برخوار، مهیار جنوبی و کوهپایه-

پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه بر اساس خطر وقوع فرونشست (شکل ۱۴) نشان‌دهنده وجود پهنه‌های با خطر فرونشست بسیار زیاد و زیاد در محدوده حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی است که از بیشینه فرونشست تجمعی و نرخ سالیانه فرونشست برخوردار هستند. در حوزه‌های آبخیز نجف‌آباد، مهیار شمالی و کوهپایه-سجری تنها پهنه‌های با خطر فرونشست متوسط و کم گسترش دارند. پهنه‌های خطر وقوع فرونشست با نقشه‌های فرونشست تجمعی و نرخ سالیانه فرونشست (شکل ۵ و ۸) تطابق دارند.

شکل ۱۵ درصد مساحت پهنه‌های خطر وقوع

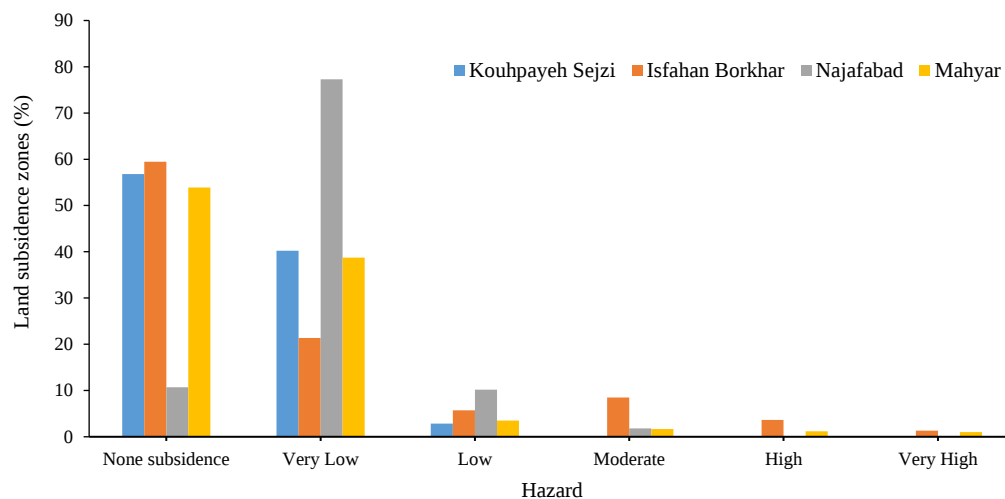
طبقه‌بندی درصد مساحت پهنه‌های خطر وقوع فرونشست نشان‌گر رخداد فرونشست حاد در حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی است.

سجزی است. رتبه‌بندی درصد مساحت پهنه خطر وقوع فرونشست خیلی کم به ترتیب حوضه‌های نجف‌آباد، کوهپایه-سجزی، مهیار و اصفهان-برخوار می‌باشد. این



شکل ۱۴- نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع فرونشست در منطقه مورد مطالعه

Fig. 14. The zoning map of land subsidence risk in the study area



شکل ۱۵- درصد خطر وقوع فرونشست در حوزه‌های آبخیز منطقه مورد مطالعه

Fig. 15. Percentage of land subsidence risk in watersheds of the study area

از مهم‌ترین حوزه‌های آبخیز استان اصفهان، اطلاعات ارزشمندی در خصوص وسعت و دینامیک تغییر شکل زمین در این منطقه ارائه می‌کند. این مطالعه با استفاده از داده‌های راداری Sentinel-1 تصویربرداری شده طی

نتیجه‌گیری

استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری روزنه مصنوعی با استفاده از پراکنده‌سازهای ماندگار (PSInSAR) برای ارزیابی فرونشست زمین در تعدادی

ارزشمندی برای ارزیابی و مدیریت ریسک ارائه می‌دهند.

این نقشه‌ها وجود مناطق پرخطر در اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی را نشان می‌دهد که نیازمند راهبردهای کاهش خطر هدفمند برای محافظت از زیرساخت‌ها، کشاورزی و منابع طبیعی است. نتایج این پژوهش برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی شهری و مدیریت منابع آب برای مقابله و کاهش اثرات سوء فرونشست زمین در استان اصفهان بسیار حائز اهمیت است. پژوهش‌های آتی می‌بایستی بر پایش مستمر، مدل‌سازی رخداد فرونشست و اجرای شیوه‌های پایدار برای مدیریت و کاهش خطرات ناشی از فرونشست زمین در این منطقه متمرکز باشند.

تشکر و قدردانی

نتایج و اطلاعات مورد استفاده در این پژوهش حاصل از پروژه تحقیقاتی سفارشی با عنوان "بررسی فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR)" با کد مصوب "۹۷۰۱۵۶-۲۴-۳۸-۲۹-۰۰۶" است. لذا نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان اصفهان، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به‌خاطر حمایت‌های مالی و ستادی ابراز می‌نمایند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ فرونشست قابل توجهی را به ویژه در حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی نشان می‌دهد، به طوری که حداکثر فرونشست تجمعی در این بازه زمانی تا ۵۵ سانتی‌متر و نرخ فرونشست سالیانه به ۶۰ میلی‌متر در سال می‌رسد.

استفاده از داده‌های راداری با مدارهای صعودی و همچنین نزولی و ادغام این داده‌ها (به‌صورت ترکیبی از داده‌های صعودی و نزولی)، دقت اندازه‌گیری‌های فرونشست را با حذف ابهام جهت‌گیری و کاهش خطاهای جوی و مداری بهبود بخشیده است. این پژوهش تأیید می‌کند که فرونشست در حوزه‌های آبخیز اصفهان-برخوار و مهیار جنوبی نه تنها قابل توجه است، بلکه روند مداومی دارد و این محدوده‌ها را به عنوان مناطقی با خطر بسیار بالای فرونشست زمین معرفی می‌کند.

ارتباط بین الگوهای فرونشست و کاربری اراضی، ویژگی‌های زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی مانند برداشت آب‌های زیرزمینی و توسعه پوشش گیاهی، ماهیت فرونشست در منطقه مورد مطالعه را برجسته می‌کند. نقشه‌های کاربری اراضی و زمین‌شناسی نشان می‌دهند که مناطق با بیشترین میزان فرونشست، با گستره زمین‌های شهری و کشاورزی در حوزه آبخیز اصفهان-برخوار و با محدوده رسوبات رسی کواترنری در حوزه آبخیز مهیار جنوبی مطابقت دارند. این رابطه بر لزوم برنامه‌ریزی یکپارچه استفاده از زمین و مدیریت پایدار منابع آب‌های زیرزمینی برای کاهش اثرات فرونشست تأکید می‌کند. نقشه‌های پهنه‌بندی خطر فرونشست زمین که در این مطالعه تولید شده‌اند، ابزار

منابع مورد استفاده

- Abo, H., Osawa, T., 2024. Land Subsidence Monitoring of PSInSAR Analysis Using Sentinel-1 SAR Data from 2017 to 2022 in Chiba Prefecture, Japan. In IGARSS 2024-2024 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., 10752-10755.
- Agarwal, V., Kumar, A., Gee, D., Grebby, S., Gomes, R.L., Marsh, S., 2021. Comparative study of groundwater-induced subsidence for London and Delhi using PSInSAR. Remote Sens. 13(23), 4741.
- Aslan, G., Cakir, Z., Lasserre, C., Renard, F., 2019. Investigating subsidence in the Bursa Plain, Turkey, using ascending and descending Sentinel-1 satellite data. Remote Sens. 11(1), 85.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 40(11), 2375-2383.
- Bert, M.K., 2006. Radar interferometry: persistent scatterers technique. Springer, The Netherlands.
- Bokhari, R., Shu, H., Tariq, A., Al-Ansari, N., Guluzade, R., Chen, T., Jamil, A., Aslam, M., 2023. Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data. Heliyon, 9(3).

- Chitsazan, M., Rahmani, G., Ghafoury, H., 2022. Land subsidence susceptibility mapping using PWRSTFAL framework and analytic hierarchy process: fuzzy method (case study: Damaneh-Daran Plain in the west of Isfahan Province, Iran). *Environ. Monit. Assess.* 194(3), 192.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., Crippa, B., 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 115, 78-89.
- Davoodijam, M., Motagh, M., Momeni, M., 2015. Land Subsidence in Mahyar Plain, Central Iran, Investigated Using Envisat SAR Data. In: Kutterer, H., Seitz, F., Alkhatib, H., Schmidt, M. (eds) *The 1st International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems (QuGOMS'11)*. International Association of Geodesy Symposia, vol 140. Springer.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39(1), 8-20.
- Galloway, D.L., Jones, D.R., Ingebritsen, S.E. eds., 1999. *Land subsidence in the United States (Vol. 1182)*. Geological Survey (USGS).
- Galloway, D.L., Burbey, T.J., 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeol. J.* 19(8), 1459.
- Gambolati, G., Teatini, P., 2023. *Land Subsidence and Its Mitigation*. Groundwater Project.
- Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., Perissin, D., 2020. Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *J. Arid Environ.* 181, 104238.
- Hanssen, R.F., 2001. *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Springer.
- Hasan, M.F., Smith, R., Vajedian, S., Pommerenke, R., Majumdar, S., 2023. Global land subsidence mapping reveals widespread loss of aquifer storage capacity. *Nat. Commun.* 14(1), 6180.
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R.M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P. and Cabral-Cano, E., 2021. Mapping the global threat of land subsidence. *Science* 371(6524), 34-36.
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.* 31(23).
- Hooper, A., 2008. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophys. Res. Lett.* 35(16).
- Hu, L., Tang, X., Tomás, R., Li, T., Zhang, X., Li, Z., Yao, J., Lu, J., 2024. Monitoring surface deformation dynamics in the mining subsidence area using LT-1 InSAR interferometry: A case study of Datong, China. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 131, 103936.
- Karanam, V.; Motagh, M.; Garg, S.; Jain, K., 2021. Multi-sensor remote sensing analysis of coal fire induced land subsidence in Jharia Coalfields, Jharkhand, India. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 102, 102439.
- Khorrami, M.; Abrishami, S.; Maghsoudi, Y.; Alizadeh, B.; Perissin, D., 2020. Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties. *Sci. Rep.* 10, 1-16.
- Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., 2004. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42(7), 1377-1386.
- Le, H.M., Van Tran, A., 2022. Analyzing of land subsidence by Sentinel-1 time-series images using PSInSAR method: A case study of Thai Nguyen, Vietnam. *Journal of Mining and Earth Sciences (JMES)* 63(6), 92-103.
- Lenardón Sánchez, M., Farías, C.A., Cigna, F., 2024. Multi-Decadal Land Subsidence Risk Assessment at Major Italian Cities by Integrating PSInSAR with Urban Vulnerability. *Land* 13(12), 2103.
- Li, Z., Fielding, E.J., Cross, P., Preusker, R., 2009. Advanced InSAR atmospheric correction: MERIS/MODIS combination and stacked water vapour models. *Int. J. Remote Sens.* 30(13), 3343-3363.
- Li, Z., Cao, Y., Wei, J., Duan, M., Wu, L., Hou, J., Zhu, J. 2019. Time-series InSAR ground deformation monitoring: Atmospheric delay modeling and estimating. *Earth-Sci. Rev.* 192, 258-284.
- Mason, P.J., Ghail, R.C., Bischoff, C., Skipper, J.A., Winter, M.G., Smith, D.M., Eldred, P.J.L., Toll, D.G., 2015. Detecting and monitoring small-scale discrete ground movements across London, using Persistent Scatterer InSAR (PSI). In *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Institution of Civil Engineers, Edinburgh.
- Mora, O., Mallorquí, J.J., Broquetas, A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41(10), 2243-2253.
- Pepe, A., Lanari, R., 2006. On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44(9), 2374-2383.

- Rafyi, M., Rezaei, K., Shirani, K., & Nasrin, M., 2019. Estimation of land subsidence rate using InSAR technique and analysis of the effective parameters in Mahyar Plain. *Watershed Engineering and Management (IJWMSE)*, 11(3), 661-675.
- Salehi, R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G.R., Dehghani, M., 2013. Evaluation of land subsidence in southern Mahyar Plain using radar interferometry. *Irrigation and Water Engineering (IWE)* 3(3), 47-57.
- Shirani, K., Pasandi, M., 2023. Assessment of the ASAR and PALSAR Sensors Applicability for Detecting and Monitoring of Landslides in the Zagros Area (Iran) Through Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DInSAR). *Geotech. Geol. Eng.* 41(2), 611-629.
- Shirani, K., Pasandi, M., 2020. Landslide Monitoring and the Inventory Map Validation by Ensemble DInSAR Processing of ASAR and PALSAR Images (Case Study: Doab-Samsami Basin in Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran). *Geotech. Geol. Eng.* 39(2), 1201-1222.
- Shirani, K., Pasandi, M., 2019. Detecting and monitoring of landslides using persistent scattering synthetic aperture radar interferometry. *Environ. Earth Sci.* 78(42), 1-24.
- Shirani, K., Pasandi, M., Ebrahimi, B., 2021. Assessment of Land Subsidence in the Najafabad Plain Using the Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DInSAR) Technique. *Journal of Water and Soil Science (JWSS)* 25(1), 105-127.
- Shirani, K., Heydari, F., & Arabameri, A., 2017. Comparison of artificial neural network and multivariate regression methods in landslide hazard zonation, case study: Vanak Basin, Isfahan province. *Watershed Engineering and Management (IJWMSE)* 9(4), 451-464.
- Shirani, K., Seif, A., Sharifikia, M., 2014. ASAR and PALSAR sensors assessment for landslide detection, monitoring using differential interferometry in Zagros Mountains. *Watershed Engineering and Management (IJWMSE)* 6(3), 288-301.
- Sorkhabi, O.M., Nejad, A.S., Khajehzadeh, M., 2022. Evaluation of Isfahan City subsidence rate using InSAR and artificial intelligence. *KSCE J. Civ. Eng.* 26(6), 2901-2908.
- Souza, W.D.O., de Moura Reis, L.G., da Silva Pereira Cabral, J.J., Ruiz-Armenteros, A.M., Quental Coutinho, R., da Penha Pacheco, A., Ramos Aragão Junior, W., 2024. Analysis of Urbanization-Induced Land Subsidence in the City of Recife (Brazil) Using Persistent Scatterer SAR Interferometry. *Remote Sens.* 16(14), 2592.
- Ulma, T., Anjasmara, I.M., Hayati, N., 2021. Atmospheric phase delay correction of PS-InSAR to Monitor Land Subsidence in Surabaya. In *IOP Conference Series: Earth Environ. Sci.* 936, 012033.
- Wang, Q., Yu, W., Xu, B., Wei, G., 2019. Assessing the use of GACOS products for SBAS-INSAR deformation monitoring: A case in Southern California. *Sensors* 19(18), 3894.
- Wegmuller, U.R.S., Werner, C.L., 1995. SAR interferometric signatures of forest. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33(5), 1153-1161.
- Wright, T.J., Parsons, B.E., Lu, Z., 2004. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophys. Res. Lett.* 31(1).
- Zhou, H., Wang, Y., Yan, S., Li, Y., Liu, X. and Zhang, F., 2018. Monitoring of recent ground surface subsidence in the Cangzhou region by the use of the InSAR time-series technique with multi-orbit Sentinel-1 TOPS imagery. *Int. J. Remote Sens.* 39(22), 8113-8128.