



Research Paper

**Comparative Analysis of Land Deformation Caused by Subsidence
Using Radar Time-Series Data – Case Study:
Nine Populated Cities in Iran**

**Muhammad Amin Bakhshi¹, Behnam Asghari Beirami^{*2}, Mohammad Reza Seif³,
Mohammad Najafgholizadeh Sarai⁴**

1. PhD Student of Remote Sensing & GIS, Geomatics Science & Technology Center, Payambar Azam Faculty, Imam Hossein University, Tehran, Iran

2. Researcher of Department of Surveying eng, Faculty of Civil eng, Imam Hussain University, Tehran, Iran

3. Assistant Professor of Department of Surveying eng, Faculty of Civil eng, Imam Hussain University, Tehran, Iran

4. PhD Student of Remote Sensing & GIS, Imam Hussain University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Subsidence is the gradual downward movement of the Earth's surface, affecting both urban and rural areas. More than 300 locations across Iran are experiencing surface deformation and land subsidence due to natural and anthropogenic factors. This study focuses on quantifying and comparing land deformation in Iran's major densely populated cities by classifying deformation intensity into three levels (low, moderate, and high). The aim of this research is to rank the provincial capitals based on the severity of hazardous land deformation and, consequently, identify the province with the highest subsidence risk. Using the SBAS technique, the subsidence rate in the provincial capitals of Tehran, Alborz, Razavi Khorasan, Isfahan, Khuzestan, Fars, East Azerbaijan, Kerman, and Qom was analyzed through a one-year time series (from November 2024 to November 2025). The results indicate that Tehran, with a subsidence rate of 22 cm per year, ranks first in terms of subsidence risk. In the remaining cities—Isfahan, Karaj, Kerman, Mashhad, Tabriz, Shiraz, Ahvaz, and Qom—the affected areas are also extensive, highlighting the urgent need for preventive measures.

Subsidence, SBAS, Time series, InSAR, Crisis management.

Keywords:

***Corresponding Author:** Safarrahmati@modares.ac.ir

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5774-7154>



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution- NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

L

Introduction

and subsidence, caused by factors like excessive groundwater extraction, urban development, and mining activities, leads to significant damage to infrastructure and the environment. In Iran, groundwater extraction is the primary driver of subsidence in many plains and major cities. Continuous monitoring and identification of susceptible areas using remote sensing techniques like InSAR are crucial for mitigating risks. InSAR is an effective tool for monitoring subsidence due to its wide coverage and high precision, and numerous studies in Iranian cities have utilized this method.

Methodology

Unlike optical systems, radar systems are capable of imaging day and night and under adverse weather conditions. These systems extract precise geometric and structural information about the Earth's surface by transmitting radar pulses and analyzing the returned signals. Radar interferometry (InSAR) measures surface changes by comparing the phases of two radar images acquired at different times. The interferogram phase includes displacement, topography, atmospheric, and noise components, which are corrected using appropriate methods. The SBAS (Small Baseline Subset) method, by utilizing subsets of radar images with short baselines, enables high-precision monitoring of gradual surface changes and is suitable for analyzing subsidence in urban areas and plains. For the study of subsidence in nine populous cities in Iran, Sentinel-1 satellite images were used over a one-year period. The average number of images used for each city was 30. These images, with a C-band radar wavelength, are highly efficient for monitoring large-scale surface changes due to their high penetration power and suitable revisit time. Finally, by employing statistical averaging and considering the weight of pixels with high change amplitudes, the cities were ranked based on subsidence risk.

Results and discussion

Based on the results from processing time-series radar imagery using InSAR and SBAS methods, the highest subsidence rates are observed in most of Iran's densely populated cities, particularly Tehran, Mashhad, Isfahan, and Karaj. These findings indicate a widespread expansion of this phenomenon in urban areas with high population density and a strong reliance on groundwater resources. Tehran, with the highest average weight of changes, is at the forefront of high-risk cities, and Mashhad, Isfahan, Karaj, Kerman, Ahvaz, Shiraz, Tabriz, and Qom are also ranked at high-risk levels, respectively. This alarming trend places significant pressure on urban infrastructure and populations, necessitating immediate attention and action.

However, it is important to note that subsidence patterns vary among different Iranian cities. For instance, in Tehran, the highest vulnerability is observed in the southwestern and southern regions, while in Mashhad and Isfahan, the phenomenon is expanding from the outskirts towards the city center. Some cities like Qom and Ahvaz show near-normal patterns or milder changes. Nevertheless, in areas with dense vegetation, a reduction in the coherence of radar imagery might lead to an underestimation of the actual subsidence rate. Therefore, adopting integrated strategies including sustainable groundwater resource management, implementing appropriate engineering measures, continuous monitoring, and smart urban planning is crucial for mitigating the risks associated with this phenomenon.

Conclusion

This research assesses the risk of land subsidence and uplift in Iran's major cities using the SBAS method and a novel weighting and ranking criterion. Cities like Tehran, Mashhad, Isfahan, Karaj, and Kerman are identified as high-risk areas, highlighting the vulnerability of densely populated urban centers with compact development. The study proposes practical recommendations to mitigate these risks, including groundwater management, urban engineering measures, continuous monitoring, evidence-based urban planning, public awareness enhancement, and regional studies. Ultimately, integrating remote sensing with comprehensive management strategies is key to reducing the hazards associated with land surface deformation in Iranian cities.



تحلیل مقایسه‌ای تغییر شکل زمین بر اثر فرونشست با استفاده از سری زمانی داده‌های راداری - مطالعه موردی: ۹ شهر پرجمعیت ایران

محمدامین بخشی^۱، بهنام اصغری بیرامی^{۲*}، محمدرضا سیف^۳، محمد نجفقلی زاده^۴

۱. دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، مرکز علم و فناوری مهندسی ژئوماتیک، دانشکده و پژوهشکده پیامبر اعظم (ص)، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، تهران، ایران
۲. پژوهشگر، مرکز نقشه برداری دانشکده و پژوهشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، تهران، ایران
۳. استادیار، مرکز نقشه برداری دانشکده و پژوهشکده عمران، آب و انرژی، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، تهران، ایران
۴. دانشجوی دکتری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه جامع امام حسین (علیه السلام)، تهران، ایران

چکیده

فرونشست، پایین رفتن تدریجی سطح زمین است که مناطق شهری و روستایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیش از ۳۰۰ نقطه در ایران، به دلیل عوامل طبیعی و انسانی، تغییر شکل سطح زمین و فرونشست را تجربه می‌کنند. این مطالعه بر کمی‌سازی و مقایسه میزان تغییر شکل زمین در شهرهای پرجمعیت ایران با طبقه‌بندی تغییر شکل زمین به سه سطح (کم، متوسط، زیاد) تمرکز دارد. هدف این مقاله، ارائه چهارچوب مقایسه و رتبه‌بندی مراکز استان‌ها بر اساس میزان تغییر شکل خطرناک زمین و در نتیجه، شناسایی استان با بیش‌ترین خطر فرونشست است. بر اساس روش SBAS، نرخ فرونشست زمین در مراکز استان‌های تهران، البرز، خراسان رضوی، اصفهان، خوزستان، فارس، آذربایجان شرقی، کرمان و قم، به صورت سری زمانی یک‌ساله (بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵ میلادی)، بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که شهر تهران، با میزان ۲۲ سانتی‌متر در سال، در رتبه اول ریسک فرونشست زمین قرار دارد. در شهرهای دیگر، به ترتیب اصفهان، کرج، کرمان، مشهد، تبریز، شیراز، اهواز و قم، بیش‌ترین مناطق درگیر با فرونشست زمین را دارند و باید اقدامات پیشگیرانه در آن‌ها انجام شود.

فرونشست، SBAS، سری زمانی، تداخل‌سنجی راداری، مدیریت بحران

واژگان کلیدی:

Email: b_asghari@ihu.ac.ir

* نویسنده مسئول:

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی کنید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



مقدمه

فرونشست زمین به عنوان یکی از مخاطرات مهم زمین‌شناختی، شامل نشست تدریجی یا فرورفتن ناگهانی سطح زمین است و عمدتاً به سمت پایین رخ می‌دهد؛ هرچند می‌تواند با تغییر شکل‌های افقی و بالاآمدگی موضعی همراه باشد و خسارات قابل توجهی به زیرساخت‌ها و تأسیسات وارد کند (Galloway et al., 2011). این پدیده، یک مخاطره آرام اما پیش‌رونده است که پیامدهای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی گسترده‌ای در سطح جهانی دارد و علاوه بر مناطق ساحلی، شهرهای داخلی را نیز با افزایش خطر سیلاب، آسیب‌های سازه‌ای و اختلال در حمل‌ونقل مواجه می‌کند (Ohenhen et al., 2025؛ باقری گاوکش و همکاران، ۲۰۲۱). در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت، توسعه بی‌رویه شهری، برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های کشاورزی غیراصولی، بهره‌برداری از منابع هیدروکربنی و معدنی، احداث سازه‌های زیرزمینی و تونل‌ها و همچنین عوامل طبیعی نظیر فعالیت‌های تکتونیکی، از مهم‌ترین دلایل تشدید فرونشست زمین شناخته شده‌اند (Wang et al., 2014; Shen et al., 2014; Wu et al., 2017; Gogoi et al., 2025). سهم عوامل انسانی در بروز این پدیده بسیار قابل توجه است و کاهش منابع آب زیرزمینی، به عنوان شایع‌ترین عامل فرونشست در بسیاری از مناطق گزارش شده است.

باتوجه به آثار جبران‌ناپذیر فرونشست بر زیرساخت‌ها، منابع آب و زیست‌بوم‌ها، پایش مستمر تغییر شکل سطح زمین و شناسایی زود هنگام مناطق مستعد، برای کاهش ریسک و مدیریت بحران ضروری است (Pedretti et al., 2024). از این رو، تهیه نقشه‌های حساسیت فرونشست زمین (LSSM) نقش کلیدی در کاهش خسارات اقتصادی و انسانی دارد (عرب‌عامری و همکاران، ۲۰۲۱). در ایران، فرونشست زمین یکی از چالش‌های اساسی زیست‌محیطی و اقتصادی محسوب می‌شود. گزارش‌های متعدد، وقوع فرونشست را در اغلب دشت‌ها و کلان‌شهرهای ایران تأیید می‌کنند و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی از طریق داده‌های چاه‌های پی‌زومتری، به وضوح قابل مشاهده است (راهنما و میراثی، ۲۰۱۲).

روش‌های پایش فرونشست شامل اندازه‌گیری‌های زمینی (نظیر GNSS، ترازبایی و چاه‌های پی‌زومتری) و روش‌های سنجنش‌ازدور، به ویژه تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، است. InSAR با پوشش مکانی وسیع، صحت میلی‌متری، هزینه کمتر و امکان تحلیل سری‌های زمانی، به یکی از مؤثرترین ابزارها برای پایش فرونشست تبدیل شده است (Galloway et al., 1998; Peltzer et al., 1998; Amelung et al., 1999; Crosetto et al., 2002; Motagh et al., 2006). پیشرفت ماهواره‌های SAR با قدرت تفکیک مکانی بالا و دوره بازدید کوتاه، همراه با توسعه الگوریتم‌های سری زمانی InSAR، زمینه پایش دقیق‌تر تغییر شکل‌های سطح زمین را فراهم کرده است (Pedretti et al., 2024). روش‌های سری زمانی مانند PSI، SBAS، SqueeSAR و روش‌های ترکیبی، با کاهش اثرات جوی و افزایش تراکم نقاط پایدار، امکان تحلیل تغییر شکل در مقیاس‌های وسیع را فراهم می‌کنند (Xue et al., 2020; Li et al., 2022). اگرچه مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های سری زمانی InSAR برای پایش فرونشست در شهرهای مختلف ایران انجام گرفته است؛ اما اغلب این پژوهش‌ها به برآورد نرخ فرونشست در یک یا چند منطقه مطالعاتی، محدود است و چهارچوبی یکپارچه برای ارزیابی، مقایسه و رتبه‌بندی ریسک تغییر شکل زمین

میان شهرهای مختلف، ارائه نکرده‌اند. از این رو، در این پژوهش، چهارچوبی باهدف رتبه‌بندی و مقایسه ریسک تغییر شکل زمین در نواحی مختلف، توسعه یافته است. این روش با بهره‌گیری از نتایج سری زمانی SBAS و وزن‌دهی به پیکسل‌های با تغییر شکل، امکان ارزیابی کمی، مقایسه استاندارد و اولویت‌بندی شهرها را از نظر میزان خطر فرونشست و بالآمدگی فراهم می‌کند.

پیشینه تحقیق

نخستین ثبت فرونشست در جهان به سال ۱۹۰۰ در آمریکا و نخستین اندازه‌گیری دقیق آن به سال ۱۹۰۹ در هلند بازمی‌گردد (Pedretti et al., 2024). در ایران، فرونشست نخستین بار در سال ۱۳۵۶ در دشت‌های رفسنجان، سیرجان و کرمان گزارش شد (Rahmanian, 1986). از آن زمان، با رشد جمعیت و توسعه زیرساخت‌های شهری، پایش این پدیده در کلان‌شهرها اهمیت فزاینده‌ای یافته است. به دلیل اقلیم خشک، کاهش بارندگی، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های معدنی، حفاری تونل‌های مترو و بهره‌برداری از منابع هیدروکربنی، پدیده فرونشست زمین در بسیاری از دشت‌ها و کلان‌شهرهای ایران مشاهده شده است. این پدیده، پیامدهایی نظیر آسیب به زیرساخت‌های شهری، افزایش خطر سیلاب، تخریب اراضی کشاورزی، کاهش منابع آب، افزایش هزینه‌های اقتصادی، تهدید امنیت مناطق مسکونی و افت کیفیت زندگی میلیون‌ها نفر را به دنبال دارد. باوجود مطالعات متعدد، بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌ها به محاسبه نرخ سالانه و تحلیل‌های مکانی محدود و کمبود مطالعات جامع چندعامله همچنان محسوس است (Hesarakizad et al., 2024).

در سطح جهانی، فرونشست زمین در شهرهای پرجمعیت طی دو دهه اخیر به یکی از چالش‌های اساسی مدیریت ریسک شهری و توسعه پایدار تبدیل شده است (Massonnet & Feigl, 1998; Hanssen, 2001; Galloway et al., 2016; Shirzaei et al., 2022). در این میان، روش‌های مبتنی بر InSAR به دلیل توانایی اندازه‌گیری تغییر شکل‌های میلی‌متری سطح زمین، ابزار اصلی پایش فرونشست شهری به شمار می‌روند (Ferretti et al., 2001; Berardino et al., 2002; Hooper et al., 2012). با توسعه مأموریت‌های ماهواره‌ای نظیر Sentinel-1 و دسترسی آزاد به داده‌های SAR، استفاده از روش‌های سری زمانی InSAR به طور چشمگیری افزایش یافته است (Torres et al., 2012; Copernicus Sentinel-1 Team, 2020). Xue و همکاران (۲۰۲۰) روش‌های سری زمانی InSAR را معرفی و آن‌ها را بر اساس نوع نقاط پایدار، مدل مرجع و روش بازگشایی فاز طبقه‌بندی کردند. Li et al. (۲۰۲۲) نیز با بررسی نقاط قوت و ضعف PSInSAR و SBAS، بر نسخه‌های بهبودیافته SBAS برای افزایش تراکم نقاط و استخراج تغییر شکل چندبعدی تأکید کردند. مطالعات انجام‌شده در شهرهای پرجمعیت چین، جنوب و جنوب شرق آسیا و قاره آمریکا، ارتباط مستقیم فرونشست زمین با افت سطح آب‌های زیرزمینی، توسعه زیرساخت‌های شهری و شرایط زمین‌شناسی را نشان می‌دهد (Zhu et al., 2021; Liu et al., 2022; Chen et al., 2022; Wang et al., 2023; Zhang et al., 2023; Patel et al., 2021; Chaussard et al., 2021).

Rahman et al., 2022; Hussain et al., 2023; CabralCano et al., 2020; Herrera-García et al., 2023; Ojeda-Olivares et al., 2021). رویکردهای کلان‌مقیاس و مقایسه‌ای با تحلیل هم‌زمان ده‌ها کلان‌شهر، الگوهای جهانی فرونشست شهری را شناسایی کرده‌اند و نشان داده‌اند که بسیاری از شهرهای بزرگ جهان، به‌ویژه در دشت‌های آبرفتی و مناطق ساحلی، در معرض فرونشست تدریجی یا سریع قرار دارند (Nicholls et al., 2021; Shirzaei et al., 2022; Wang et al., 2023). به‌طورکلی، روش‌های سری زمانی InSAR به ابزار استاندارد پایش فرونشست زمین در شهرهای پرجمعیت جهان تبدیل شده‌اند؛ اما تفاوت در شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی، الگوهای بهره‌برداری از منابع آب و ساختار شهری، ضرورت انجام مطالعات منطقه‌ای دقیق را برجسته می‌کند (Galloway et al., 2016; Castellazzi et al., 2022; Wang et al., 2023).

در سطح ملی، مطالعات متعددی در کلان‌شهرهای ایران با استفاده از روش‌های InSAR و سری‌های زمانی PSI، SBAS و NSBAS انجام شده است. در تهران و استان البرز، نرخ‌های قابل‌توجه فرونشست در جنوب و جنوب غرب تهران و شهرهایی نظیر کرج، محمدشهر، مهرشهر و کمال‌شهر گزارش شده است. این پدیده همبستگی بالایی با افت سطح آب‌های زیرزمینی داشته و در برخی نواحی نرخ‌هایی بیش از ۱۵۰ میلی‌متر در سال ثبت شده است (اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۴۰۳). با استفاده از روش تحلیل سری زمانی SBAS-InSAR، جابه‌جایی قائم سطح زمین را در محدوده شهر جدید پردیس پایش و با تلفیق نتایج SBAS با مدل منطبق فازی و AHP، پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش را شناسایی کرده‌اند (یمانی و همکاران، ۱۴۰۰). در استان اصفهان، تشدید خشکسالی، افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و بروز فرو چاله‌ها، منجر به افزایش نرخ فرونشست در دشت اصفهان و منطقه اصفهان - برخوار شده و مطالعات مبتنی بر InSAR و پیرومتری، نرخ‌های چندین سانتی‌متر در سال را گزارش کرده‌اند (Talebiniya et al., 2023; Shiran and Pasandi, 2025; Ajalloeianb et al., 2024). در شمال شرق ایران، پژوهش‌ها در دشت مشهد - چناران، سبزوار و طوس نشان می‌دهد که افت سطح آب‌های زیرزمینی تا چند ده متر، موجب نرخ‌های بالای فرونشست (تا حدود ۲۰ سانتی‌متر در سال) و فرونشست تجمعی قابل‌توجه در مناطق شهری و پیرامونی شده است (Dowlati et al., 2025; یاسینی و اعتمادفرد، ۱۴۰۴؛ عمادالدین و همکاران، ۱۴۰۲؛ Gharechelou et al., 2021). در سایر کلان‌شهرهای ایران از جمله کرمان، قم، شیراز و تبریز نیز شواهد متعددی از فرونشست زمین گزارش شده است و افت سطح آب‌های زیرزمینی، شرایط زمین‌شناسی، فعالیت‌های صنعتی و حفاری‌های زیرزمینی از عوامل اصلی مؤثر در این مناطق به شمار می‌روند (نیکدل منور و فیضی‌زاده، ۱۴۰۱). با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR) فرونشست دشت نوق - بهرمان در استان کرمان، پایش شده است و با استفاده از داده‌های چاه‌های پیرومتری و بازدیدهای میدانی، اعتبارسنجی نتایج، انجام گردید که بخش میانی دشت، بیش‌ترین فرونشست را با نرخ حداکثر ۲۹ میلی‌متر در سال، تجربه کرده است (شریفی کیا، ۱۳۹۱).

روش SBAS یکی از پرکاربردترین روش‌های سری زمانی InSAR برای پایش تغییر شکل سطح زمین است که با تشکیل اینترفروگرام‌ها از تصاویر با کم‌ترین فاصله زمانی و مکانی، اثرات ناشی از همدوس‌زدایی^۱ و نویز فاز را

1 Decorrelation

کاهش می‌دهد. این روش علاوه بر افزایش دقت برآورد نرخ و سری زمانی تغییر شکل سطح زمین، امکان استخراج تغییرات تدریجی و غیرخطی سطح زمین را در مناطق وسیع، فراهم می‌کند و نسبت به روش‌های مبتنی بر یک جفت تصویر (DInSAR)، پایداری و قابلیت اطمینان بیش‌تری دارد. همچنین، استفاده از شبکه‌ای از اینترفروگرام‌های با خط مبنای کوچک، باعث کاهش اثرات جوی و هندسی شده است و دقت پایش تغییر شکل‌ها در مقیاس میلی‌متر را افزایش می‌دهد؛ از این‌رو SBAS به یکی از روش‌های استاندارد برای پایش فرونشست، زمین‌لغزش، فعالیت‌های آتشفشانی و سایر مخاطرات، تبدیل شده است (Casu et al., 2006؛ Li et al., 2022).

باوجود مطالعات گسترده‌ای که در این زمینه انجام شده است، اغلب پژوهش‌ها بر یک یا چند منطقه مطالعاتی متمرکز بوده است و عمدتاً به محاسبه نرخ فرونشست، تحلیل عوامل مؤثر یا تهیه نقشه‌های تغییر شکل، محدود شده‌اند. ازسوی دیگر، به دلیل تفاوت در روش‌های پردازش، دوره‌های زمانی و معیارهای ارزیابی، امکان مقایسه مستقیم وضعیت فرونشست میان کلان‌شهرهای کشور وجود ندارد. همچنین تاکنون چهارچوبی یکپارچه برای رتبه‌بندی و مقایسه ریسک تغییر شکل زمین در شهرهای مختلف، مبتنی بر نتایج سری زمانی InSAR و با در نظر گرفتن هم‌زمان فرونشست و بالآمدگی ارائه نشده است. این خلأ پژوهشی، ضرورت توسعه روشی استاندارد برای ارزیابی و مقایسه ریسک تغییر شکل زمین در نواحی مختلف را آشکار می‌سازد.

مبانی نظری

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سامانه‌های راداری، عملکرد آن‌ها در شرایط جوی نامساعد است. امواج راداری برخلاف دستگاه‌های اپتیکی، از میان ابر، مه، باران و گردوغبار عبور می‌کنند و تصویربرداری پیوسته در شب‌وروز و همه شرایط جوی را فراهم می‌کنند. این سامانه‌ها با ثبت هم‌زمان دامنه و فاز سیگنال‌های بازگشتی، اطلاعات دقیقی از ویژگی‌های هندسی و ساختاری سطح زمین استخراج می‌کنند. با تحلیل زمان تأخیر بین ارسال و دریافت پالس، فاصله هدف از سنجنده محاسبه می‌شود.

تداخل‌سنجی راداری بر پایه تفاضل فاز دو تصویر راداری از یک منطقه در زمان‌های متفاوت عمل می‌کند. حاصل ضرب مختلط یک تصویر در مختلط مزدوج تصویر دوم، اینترفروگرام تولید می‌کند که فاز آن، بیانگر تفاضل فاز دو تصویر است. روابط (۱) تا (۳) نحوه محاسبه موج‌های ثبت‌شده، دامنه، فاز و فاز تداخل‌نما را نشان می‌دهند.

$$y_1 = a_1 \exp(i \varphi_1) \quad (1)$$

$$y_2 = a_2 \exp(i \varphi_2) \quad (2)$$

$$y_1 \cdot y_2^* = a_1 a_2 \exp(i(\varphi_1 - \varphi_2)) = A \exp(i \phi) \quad (3)$$

در روابط (۱) تا (۳) y_1 و y_2 موج‌های ثبت‌شده در تصاویر اول و دوم، a_1 و a_2 دامنه موج‌های ثبت‌شده، φ_1 و φ_2 فاز آن‌ها، A حاصل ضرب دامنه موج‌های ذکر شده و ϕ فاز تداخل‌نما است. علامت * به مفهوم مختلط مزدوج

است.

فاز تداخل نما (ϕ_{InSAR}) علاوه بر جابه‌جایی سطح زمین، شامل مؤلفه‌های فاز توپوگرافی، انحنای زمین، جو (ϕ_{atm}) و نویز (ϕ_{noise}) می‌شود (رابطه ۴) (Kampes, 2005; Hooper, 2006; Dehghani et al., 2013; Yun et al., 2015). فاز توپوگرافی (ϕ_{topo}) با مدل رقومی ارتفاعی (Ding et al., 2008) و اثر انحنای زمین نیز با اطلاعات مداری (ϕ_{orb}) (Yun et al., 2015) حذف می‌شود. فاز نویز با فیلترهایی مانند گلدشتاین کاهش می‌یابد (Hanssen, 2001) و اثرات جوی با مدل‌های عددی مانند WRF, ERA-Interim و داده‌های MERIS تصحیح می‌شوند (Bekaert et al., 2015). رابطه بین فاز جابه‌جایی (ϕ_{defo}) و مقدار جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره (LOS)، مطابق رابطه (۵) است (Massonnet & Feigl, 1998).

$$\phi_{InSAR} = \phi_{topo} + \phi_{orb} + \phi_{defo} + \phi_{atm} + \phi_{noise} \quad (۴)$$

$$\phi_{defo} = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta x_{LOS} \quad (۵)$$

که در آن، λ طول موج سیگنال ارسالی سنجنده است. برای تحلیل فرونشست، این مقدار با فرض ناچیز بودن جابه‌جایی افقی و با استفاده از زاویه برخورد (θ)، به جابه‌جایی قائم تبدیل می‌شود (رابطه ۶) (Barcelonnette, 2013).

$$\Delta x_{vert} = \frac{\Delta x_{LOS}}{\cos \theta} \quad (۶)$$

برای غلبه بر مشکل ناهمبستگی زمانی و مکانی تصاویر، فن‌های سری زمانی تداخل‌سنجی مانند پراکنشگرهای دائمی (PSI) و روش خط مبنای^۱ کوتاه (SBAS) توسعه یافته‌اند (Ferretti et al., 2001؛ مقصودی و مهدوی، ۱۳۹۴). در این پژوهش از روش SBAS استفاده شده است. روش SBAS با بهره‌گیری از زیرمجموعه‌هایی از تصاویر با خطوط مبنای مکانی و زمانی کوتاه، سری زمانی پیوسته‌ای از تغییرات سطح زمین ایجاد کرده و برای پایش و اندازه‌گیری پدیده‌های آهسته مانند فرونشست، مناسب است (Berardino et al., 2002). انتخاب تصاویر بر اساس خط مبنای زمانی (فاصله زمانی بین دو تصویر) و خط مبنای مکانی عمود بر خط دید، انجام می‌شود. خط مبنای مکانی عمودی، از رابطه (۷) محاسبه شده است و مقادیر کوتاه آن برای حفظ همبستگی انتخاب می‌شوند. در داده‌های Sentinel-1، خط مبنای مکانی معمولاً کم‌تر از ۲۰۰ متر است.

$$B \perp = B \cdot \sin(\theta - \alpha) \quad (۷)$$

که در آن B فاصله بین دو مدار، θ زاویه دید ماهواره و α زاویه اختلاف مدارها است. با اعمال تصحیحات بر فاز تداخل‌نما، فاز تصحیح‌شده هر تصویر، قابل بازیابی است. روابط (۸) تا (۱۱) دستگاه معادلات خطی، بردار مشاهدات، ماتریس ضرایب و بردار مجهولات را نشان می‌دهند که در آن، فاز تصویر اول، صفر فرض می‌شود. در رابطه (۸)،

1. Base Line

فاز ϕ_k همچنین $i, j = 1, \dots, m$ و $k = 1, \dots, n$ است؛ به طوری که n تعداد تداخل‌نماها و m تعداد تصاویر است. همچنین فاز ϕ_{ij} تداخل‌نمای k ام، فاز تداخل‌نمای حاصل از تصاویر i ام و j ام، ϕ_i فاز تصویر i ام، ϕ_j فاز تصویر j ام است. این دستگاه را می‌توان به صورت خلاصه، به صورت رابطه (۹) نوشت که در آن، بردار مشاهدات، A ماتریس ضرایب و X بردار مجهولات است. تعریف آن‌ها مطابق رابطه (۱۰) است. در این روش فاز تصویر اول به عنوان مرجع برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در واقع فاز سایر تصاویر نسبت به تصویر اول تعیین می‌گردد. در نتیجه بردار مجهولات به صورت رابطه (۱۱) بیان می‌گردد. در نهایت بردار مجهولات با روش کم‌ترین مربعات، مطابق رابطه (۱۲) برآورد می‌گردد (Berardino et al., 2002).

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \\ \vdots \\ \phi_k = \phi_{ij} = \varphi_i - \varphi_j \end{cases} \quad (8)$$

$$L = AX \quad (9)$$

$$L_{(n \times 1)} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix}, \quad X_{(m \times 1)} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_m \end{bmatrix}, \quad A_{(n \times m)} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ . & . & \dots & . \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\varphi_1 = 0, X_{(m-1 \times 1)} = \begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \vdots \\ \varphi_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

پس از تولید نقشه روند جابه‌جایی یک‌ساله سطح زمین، تمامی پیکسل‌های تصویر، شمارش و مقادیر جابه‌جایی به یازده کلاس دسته‌بندی می‌شوند؛ به گونه‌ای که مقادیر منفی و مثبت هر یک در پنج کلاس مجزا و بازه مرکزی ۰/۰۰۵ ± متر (معادل ۱ میلی‌متر جابه‌جایی) از تحلیل نهایی حذف می‌شود. سپس، مطابق رابطه (۱۳)، میانگین وزن‌دار هر کلاس (Avg_DN) بر اساس مقدار جابه‌جایی و تعداد پیکسل‌های هر کلاس (Pixel_Count) محاسبه و نتایج به صورت نزولی، مرتب می‌شوند. در نهایت، با نرمال‌سازی وزن‌ها و حذف اثر مساحت، منطقه‌ای شناسایی می‌شود که بیش‌ترین ریسک جابه‌جایی ارتفاعی سطح زمین را در بازه زمانی یک‌ساله دارد.

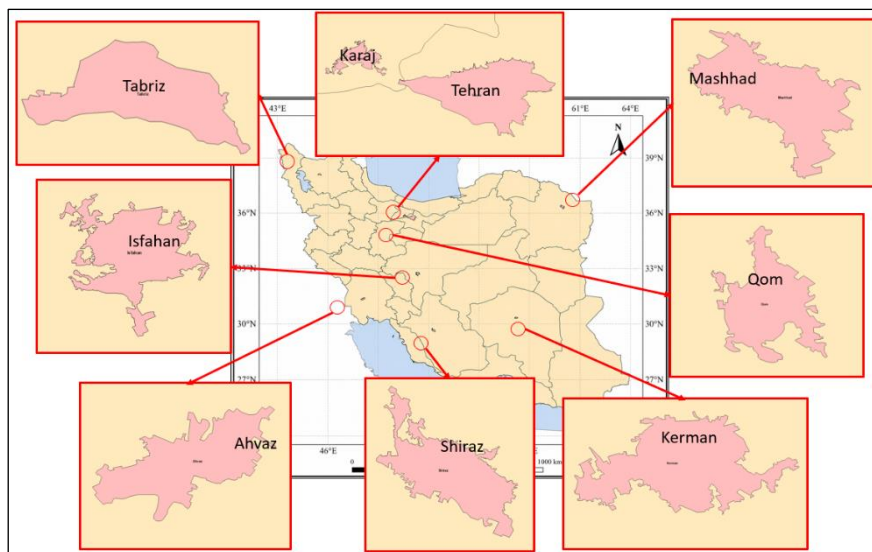
$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (12)$$

$$\sum (\text{Avg_DN} \times \text{Pixel_Count}) \quad (13)$$

مناطق مطالعاتی

منطقه مطالعاتی شامل ۹ شهر پرجمعیت ایران (تهران، کرج، مشهد، اصفهان، اهواز، شیراز، قم، تبریز و کرمان) با تنوع اقلیمی، توپوگرافی و جمعیتی است. مساحت محدوده شهری این مناطق به ترتیب: ۶۳۰، ۸۰، ۲۲۰، ۲۰۰، ۱۴۶، ۱۶۰،

۷۳، ۱۰۰ و ۸۷ کیلومترمربع است که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نقشه مناطق مطالعاتی

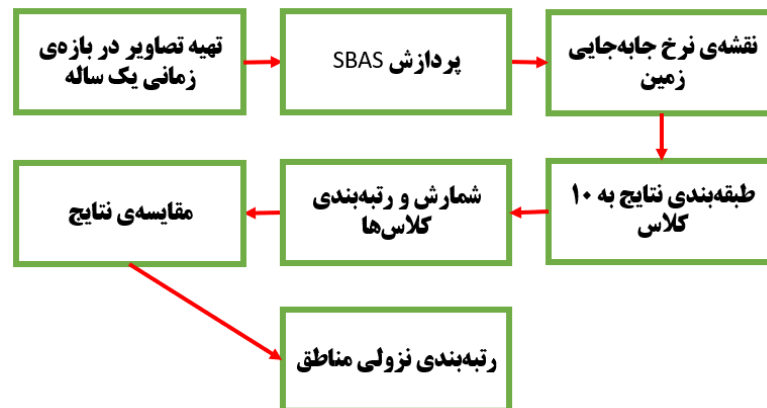
Figure 1. Case Studies Map

روش تحقیق

باتوجه به مزیت‌ها و روش اجرای سریع و ساده در این پژوهش، برای استخراج تغییر شکل سطح زمین از روش SBAS مبتنی بر داده‌های سری زمانی تداخل‌سنجی راداری (InSAR) استفاده شد. برای این منظور، پس از انتخاب تصاویر Sentinel-1 با خط مبنای زمانی و مکانی مناسب، تصاویر، هم‌ثبت^۱ شده و اینترفروگرام‌های با خط مبنای کوتاه تولید گردید. سپس با حذف مؤلفه توپوگرافی به کمک مدل رقومی ارتفاع (DEM)، کاهش نویز، بازگشایی فاز^۲ و تصحیح اثرات جوی، سری زمانی تغییر شکل برای هر پیکسل، محاسبه شد. در ادامه، با حل شبکه اینترفروگرام‌ها به روش SBAS، نرخ جابه‌جایی و سرعت تغییر شکل سطح زمین استخراج و نقشه نهایی فرونشست و بالاآمدگی برای مناطق مورد مطالعه، تولید شد (Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2007).

در ادامه، نرخ فرونشست در بازه زمانی یک‌ساله، از نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵، در محدوده شهری شهرهای پرجمعیت ایران، محاسبه و به صورت روشی جدید، به صورت وزندهی به مناطق درگیر تغییر شکل زمین (فرونشست و بالاآمدگی)، با یکدیگر مقایسه شد. روند کلی مقاله در شکل ۲، مشاهده می‌شود. در این تحقیق از تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 به صورت سری زمانی استفاده شد. قدرت تفکیک مکانی داده‌ها بسته به مد تصویربرداری متفاوت است؛ برای داده‌های مورد استفاده در این مقاله که در حالت Interferometric Wide Swath (IW) هستند، قدرت تفکیک مکانی در حدود ۲۰×۵ متر تا ۱۰×۱۰ متر است. قدرت تفکیک زمانی این ماهواره‌ها برای هر ماهواره به طور میانگین ۱۲ روز است.

1. Coregister
2. Phase Unwrapping

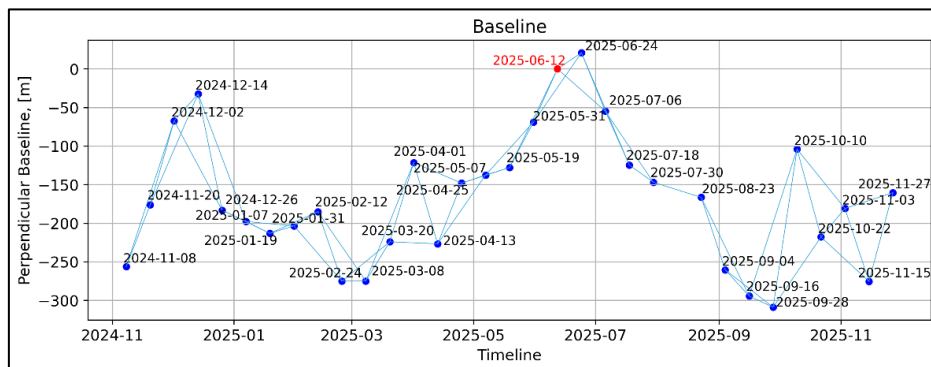


شکل ۲. فلوچارت روش تحقیق

Figure 2. Research methodology flowchart

داده‌های Sentinel-1 مورد استفاده که در قالب SLC (SingleLookComplex) عرضه می‌شوند، شامل اطلاعات کامل دامنه و فاز امواج راداری است و برای پردازش‌های پیشرفته نظیر تداخل‌سنجی راداری (InSAR) در مد IW، تصویربرداری به صورت Burst-Based انجام می‌شود؛ بدین معنا که ناحیه تحت پوشش، به بخش‌هایی کوچک‌تر تقسیم شده است و هر بخش در بازه زمانی کوتاهی تصویربرداری می‌شود. هدف از این ساختار، کاهش حجم داده، افزایش کارایی پردازش‌های مکانی - زمانی و فراهم‌سازی امکان تحلیل‌های دقیق تداخل‌سنجی است. در پردازش‌های پیشرفته، این Burstها مجدداً هم‌راستا شده و برای استخراج تغییرات سطح زمین به کار گرفته می‌شوند. لازم به ذکر است که برای افزایش دقت نتایج محاسبه، از هر دو قطبش VV و VH ارائه‌شده توسط این ماهواره، استفاده و از نرم‌افزار PyGMTSAR برای انجام محاسبات جابه‌جایی سطح زمین استفاده شد.

برای همه منطقه مطالعاتی، از سری زمانی از تاریخ ۱ نوامبر ۲۰۲۴ الی ۳۰ نوامبر ۲۰۲۵، استفاده شد. مطابق جدول-۱، تعداد تصاویر مورد استفاده برای هر منطقه، باتوجه به فاصله خط مبنای زمانی - مکانی تصاویر مورد استفاده در روش SBAS متفاوت است که باید حداکثر ۳۰۰ متر باشد. برای همه مناطق مطالعاتی، تصاویر مورد استفاده به گونه‌ای انتخاب شدند که فاصله زمانی دو تصویر متوالی، ۱۲ روز باشد. برای افزایش هم‌دوسی تصاویر راداری، خط مبنای زمانی برای تولید اینترفروگرام‌ها، ۲۴ روز تعیین شد. در شکل ۳، تصاویر مورد استفاده برای منطقه مطالعاتی تهران، به صورت تعداد تصاویر، فاصله زمانی و خط مبنای مکانی تصاویری مشاهده می‌شود که اینترفروگرام‌ها بر مبنای آن‌ها تولید شدند. در همه مناطق مطالعاتی، یک تصویر در ماه ژوئن، به عنوان مرجع محاسباتی، انتخاب شد که برای منطقه مطالعاتی تهران، تصویر ۱۲ ژوئن که نوزدهمین تصویر فهرست است، تصویر مرجع است (شکل ۳).



شکل ۳. بیس لاین های مکانی و زمانی تصاویر مورد استفاده در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵ برای منطقه مطالعاتی شهر تهران- تصویر ۱۲ ژوئن که با رنگ قرمز مشخص شده، تصویر مرجع محاسباتی است.

Figure 3. Spatial and temporal baselines of the images used in the time period from November 2024 to November 2025 for the study area of Tehran city. The image from June 12th, marked in red, serves as the computational reference image.

جدول ۱. تصاویر مورد استفاده در مناطق مطالعاتی

Table 1. Images employed in the study sites

ردیف	منطقه مطالعاتی	تعداد تصاویر	قطبش	جهت مدار
۱	اصفهان	۳۳	VV + VH	ASCENDING
۲	اهواز	۳۲	VV + VH	ASCENDING
۳	تهران	۳۲	VV + VH	DESCENDING
۴	شیراز	۳۲	VV + VH	DESCENDING
۵	کرمان	۳۲	VV + VH	ASCENDING
۶	البرز	۳۲	VV + VH	DESCENDING
۷	قم	۳۲	VV + VH	DESCENDING
۸	تبریز	۳۳	VV + VH	DESCENDING
۹	مشهد	۳۲	VV + VH	DESCENDING

ذکر این نکته ضروری است که به دلیل نبود داده های مرجع برای اعتبارسنجی نتایج محاسبه شده، نتایج این پژوهش با مطالعات معتبر پیشین، مقایسه شد.

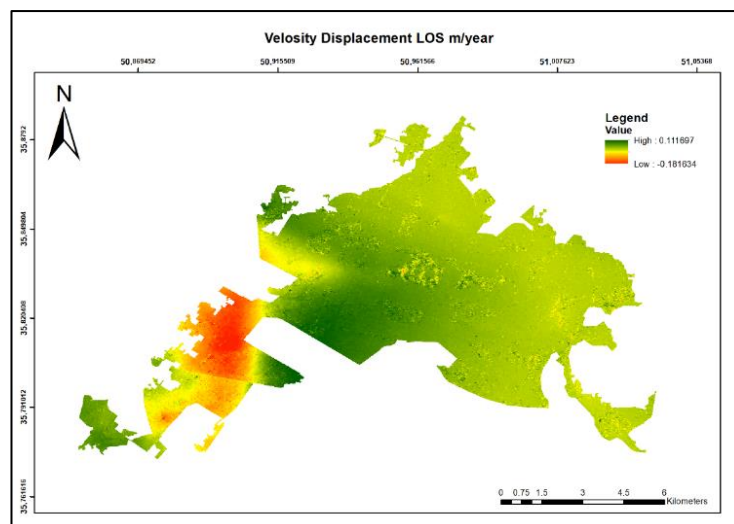
نتایج

بر اساس محاسبات انجام شده، حداکثر میزان جابه جایی زمین در منطقه مطالعاتی کرج، در بازه زمانی یک ساله از نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵، در محدوده $-۰/۱۸۱۶۳۴$ الی $+۰/۱۱۱۶۹۷$ متر، به دست آمد (شکل ۴). باتوجه به بافت شهری پیچیده شهر کرج که از شهرها و مناطق مسکونی، روستایی، کشاورزی و باغات و مناطق کوهستانی تشکیل شده در منطقه اصلی شهر کرج که در شمال آزادراه تهران - کرج قرار دارد و بیش تر به صورت کوهپایه است، شاهد افزایش

آمایش فضا و ژئوماتیک

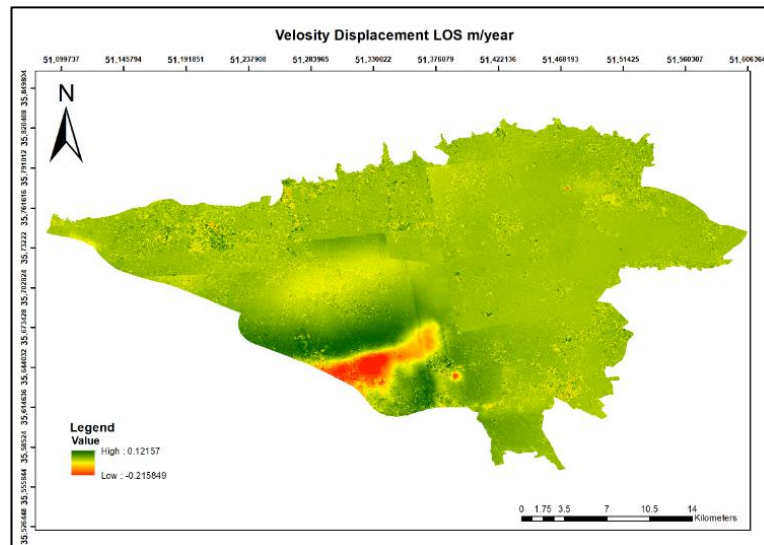
ارتفاع سطح زمین هستیم. از طرف دیگر در مناطق پرجمعیت‌تر در ناحیه غربی و جنوب غربی که شامل شهرهای مهرشهر، محمدشهر و محدوده حریم فرودگاه پیام که به شکل دشت است، فرونشست زمین با سرعت تا ۱۸ سانتی‌متر در سال، محاسبه شد. حداکثر میزان جابه‌جایی زمین در منطقه مطالعاتی تهران، در محدوده ۰/۲۱۵۸۴۹- الی ۰/۱۲۱۵۷+ متر، به دست آمد (شکل ۵). بخش بزرگی از محدوده شهر تهران، در حال ثبات قرار دارد؛ ولی مناطق جنوب غربی که شامل مناطقی از قبیل ابوذر، امامزاده حسن (ع)، یافت‌آباد و... به طور خطرناکی درگیر فرونشست است. میزان سرعت فرونشست یک‌ساله بر اساس داده‌ها و روش بکار گرفته شده، تا ۲۱/۵ سانتی‌متر در سال، به دست آمد. از طرف دیگر، در اطراف این ناحیه، یک بافر دچار بالاآمدگی مشاهده می‌شود. همچنین در مناطق جنوبی اطراف بزرگراه آزادگان در مناطق ۱۶ و ۲۰ شهرداری تهران و قسمت بزرگی از منطقه ۹ و ۲۱ که شامل محدوده فرودگاه مهرآباد و مناطق صنعتی تهرانسر می‌شود، از حالت نرمال خارج شده است و به سمت افزایش تغییرات سطح زمین به‌صورت فرونشست می‌رود که نیازمند انجام اقدامات پیشگیرانه است.

حداکثر میزان جابه‌جایی زمین در منطقه مطالعاتی تبریز، در محدوده ۰/۱۱۵۴۵۴- الی ۰/۰۹۶۶۳۴۸+ متر، به دست آمد (شکل ۶). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، برای قسمت بزرگی از ناحیه مرکزی شهر تبریز، پیش‌بینی وقوع فرونشست در آینده داریم. در مناطق اطراف بزرگراه آذربایجان و بزرگراه آزادگان، فرونشست خفیف مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، محدوده جنوب شرق که در شمال آزادراه شهید کسایی قرار داشته و شامل مناطق ویلاشهر، میرداماد، کوی دادگستری و... می‌شود، بیش‌ترین درگیری با خطر فرونشست زمین را دارد. نرخ سرعت فرونشست این مناطق، در حدود ۱۱ سانتی‌متر در سال، محاسبه شد.

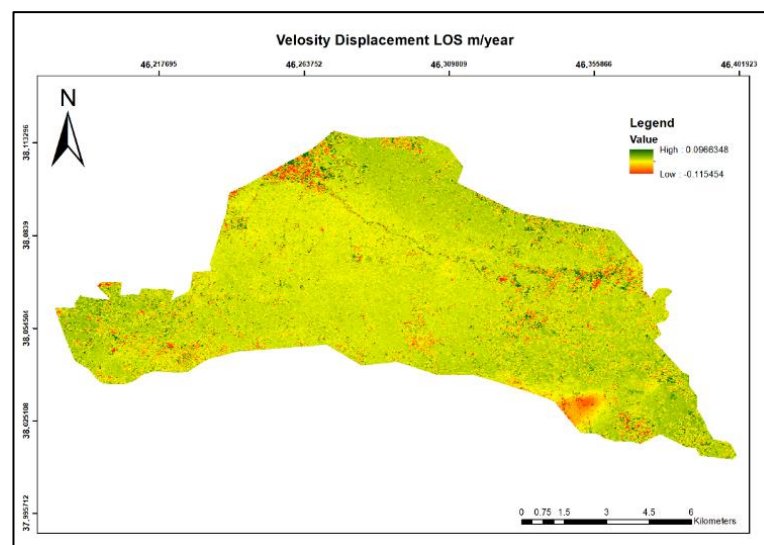


شکل ۴. میزان جابه‌جایی سطح زمین در محدوده شهر کرج در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵

Figure 4. The amount of land surface displacement in the Karaj city area within the time frame of November 2024 to November 2025



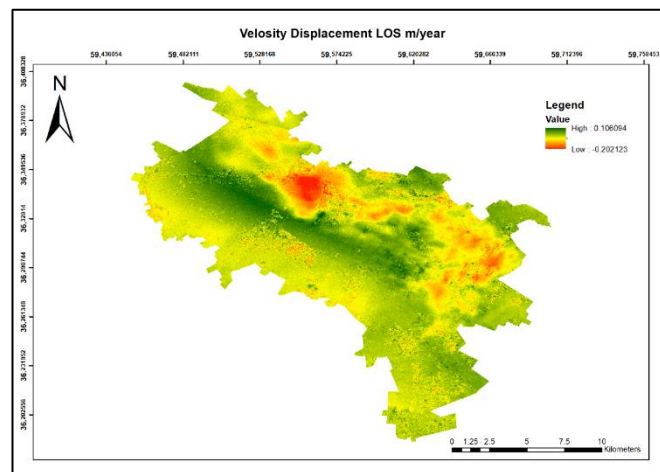
شکل ۵. میزان جابه‌جایی سطح زمین در محدوده شهر تهران در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵
Figure 5. The amount of land surface displacement in the Tehran city area within the time frame of November 2024 to November 2025



شکل ۶. میزان جابه‌جایی سطح زمین در محدوده شهر تبریز در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵
Figure 6. The amount of land surface displacement in the Tabriz city area within the time frame of November 2024 to November 2025

حداکثر میزان جابه‌جایی زمین در منطقه مطالعاتی مشهد، در محدوده $-۰/۲۰۲۱۲۳$ الی $+۰/۱۰۶۰۹۴$ متر، به دست آمد (شکل ۷). می‌توان گفت قسمت بزرگی از شهر مشهد، درگیر فرونشست زمین است. این مخاطره، از شرق مشهد آغاز شده و با گذر از نوار شمال شرقی تا شمال غربی، گسترش یافته است. همچنین در ناحیه غرب تا جنوب غربی محدوده شهری نیز شاهد فرونشست زمین، کمی خفیف‌تر از مناطق شمالی هستیم. مهم‌ترین محل وقوع فرونشست

شهر مشهد با نرخ ۲۰ سانتی متر در سال، در تقاطع بزرگراه‌های پیامبر اعظم (ص)، بزرگراه آزادی، بزرگراه شهید چراغی و بزرگراه امام علی (ع)، قرار دارد. از سوی دیگر، مناطق ۳، ۴ و ۵ شهرداری مشهد نیز درگیر محدوده‌های بزرگی از فرونشست زمین است. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده، بالاآمدگی برای ناحیه خطی در مرکز شهر مشهد، نمایش می‌دهد.



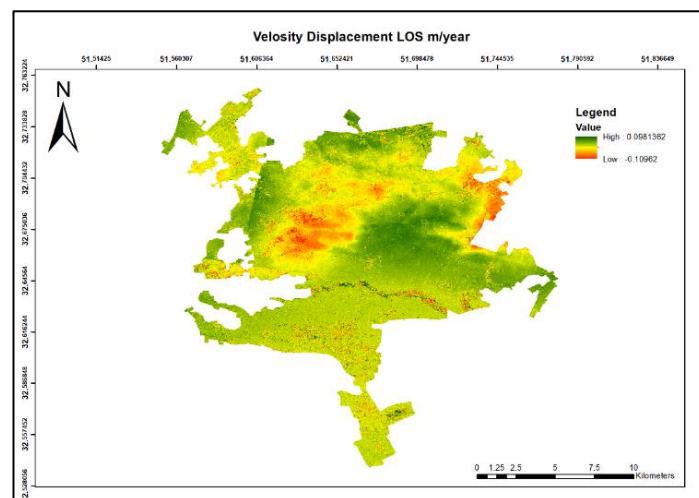
شکل ۷. میزان جابه‌جایی سطح زمین در محدوده شهر مشهد در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵

Figure 7. The amount of land surface displacement in the Mashhad city area within the time frame of November 2024 to November 2025

حداکثر میزان جابه‌جایی زمین در منطقه مطالعاتی اصفهان، در محدوده -0.109620 الی $+0.091362$ متر، به دست آمد (شکل ۸). قسمت بزرگی از نیمه شمالی شهر اصفهان و همچنین مناطقی از شرق آن، بیش‌ترین درگیری با مخاطره فرونشست زمین را دارد. در مناطق جنوبی شهر و کرانه جنوبی زاینده‌رود، ثبات بیش‌تری مشاهده می‌شود. باتوجه‌به بافت پیچیده شهر اصفهان که شامل بافت تاریخی، مناطق مسکونی جدید، مناطق رودخانه و مناطق کشاورزی و روستایی در حاشیه‌های حریم شهری، پراکندگی نامنظم تغییرات سطح زمین در این ناحیه، دور از انتظار نیست. در مناطق ۲، ۹، ۷ و ۸ شهرداری اصفهان و منطقه قلعه‌نو خاتون‌آباد، بیش‌ترین فرونشست زمین با نرخ ۱۰ سانتی متر در سال، مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که در مناطق مرکزی این شهر، شاهد بالاآمدگی سطح زمین هستیم. حداکثر میزان جابه‌جایی زمین در منطقه مطالعاتی کرمان، در محدوده -0.108900 الی $+0.0890919$ متر، به دست آمد (شکل ۹). قسمت بسیار بزرگی از محدوده شهر کرمان، درگیر پدیده فرونشست زمین است که این مورد، بیش‌تر در نیمه شمالی دیده می‌شود. بر همین مبنا، نرخ فرونشست یک‌ساله در مناطق جنوب بزرگراه امام رضا (ع) و به طور مشخص در میدان عاشورا تا ۱۰ سانتی متر در سال است. همچنین در محدوده‌های بافت تاریخی شهر کرمان در قسمت شرق و جنوب آن نیز فرونشست زمین، مشاهده می‌شود. در مناطق غربی و جنوب غربی شهر کرمان بالاآمدگی زمین مشاهده شد که بافت ترکیبی مناطق مسکونی - کشاورزی و زمین‌های بایر دارد.

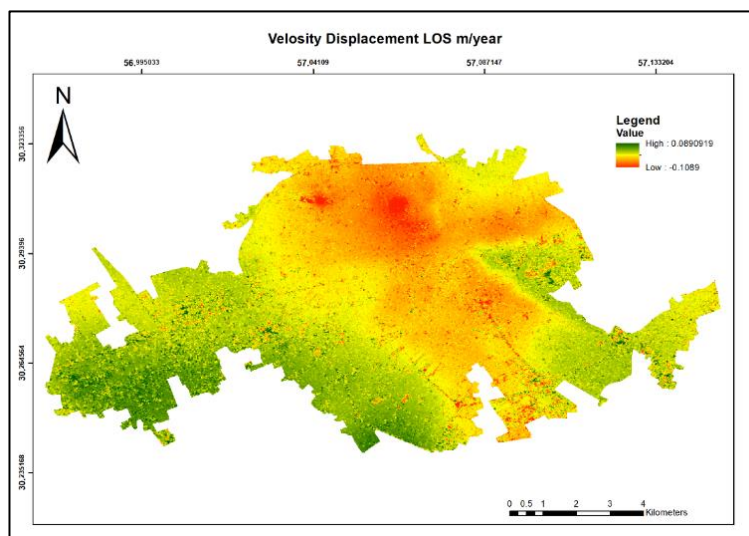
حداکثر میزان جابه‌جایی زمین در منطقه مطالعاتی قم، در محدوده $-0/121821$ الی $+0/0840655$ متر، به دست آمد (شکل ۱۰). تمام مناطق شهری، حالت نرمال دارد؛ اما این بازه تقریباً بزرگ ۲۰ سانتی‌متری، به دلیل وجود رودخانه قم رود در امتداد شمالی - جنوبی شهر و پوشش‌های گیاهی پارک‌ها و زمین‌های کشاورزی در اطراف محدوده مورد محاسبه به دست آمده است که موجب کاهش همدوسی اینترفروگرام‌ها در محاسبه جابه‌جایی زمین می‌شوند. حداکثر میزان جابه‌جایی زمین در منطقه مطالعاتی شیراز، در محدوده $-0/101426$ الی $+0/0927741$ متر، به دست آمد (شکل ۱۱). باتوجه به بافت پیچیده شهری شیراز که شامل مناطق مسکونی دارای پوشش گیاهی می‌شود، در مناطقی مانند پارک‌ها که تراکم گیاهان زیاد است، بیش‌ترین تغییرات جابه‌جایی زمین دیده می‌شود که باتوجه به کاهش همدوسی اینترفروگرام‌ها، قابل چشم‌پوشی است. اما ناحیه اطراف فرودگاه بین‌المللی شهید دستغیب به دلیل وجود بافت ساختمانی و کشاورزی، نیازمند بررسی و ارزیابی بیش‌تری در خصوص وقوع فرونشست است؛ چراکه نتایج به دست آمده، حداکثر میزان فرونشست را برابر ۱۰ سانتی‌متر در سال، نمایش می‌دهد. از طرف دیگر در مناطق مرکزی شهر، نشانه‌های وقوع فرونشست در آینده مشاهده می‌شود. همچنین در قسمت شمال شرقی که به منطقه ۱۱ و ویلاشهر کیمیا می‌رسد، بالاآمدگی خفیفی مشاهده می‌شود.

حداکثر میزان جابه‌جایی زمین در منطقه مطالعاتی اهواز، در محدوده $-0/116968$ الی $+0/130712$ متر، به دست آمد (شکل ۱۲). قرارگرفتن بافت مسکونی، کشاورزی و زمین‌های بایر در مجاورت و درهم‌تنیدگی با یکدیگر، از دلایل مشاهده وضعیت نرمال در سطح این شهر است. علاوه بر این، بیش‌ترین میزان تغییرات منفی، در محدوده حریم رودخانه کارون اتفاق افتاده که می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. همچنین، وضعیت کلی شهر اهواز را می‌توان به صورت بالاآمدگی خفیف قلمداد کرد.



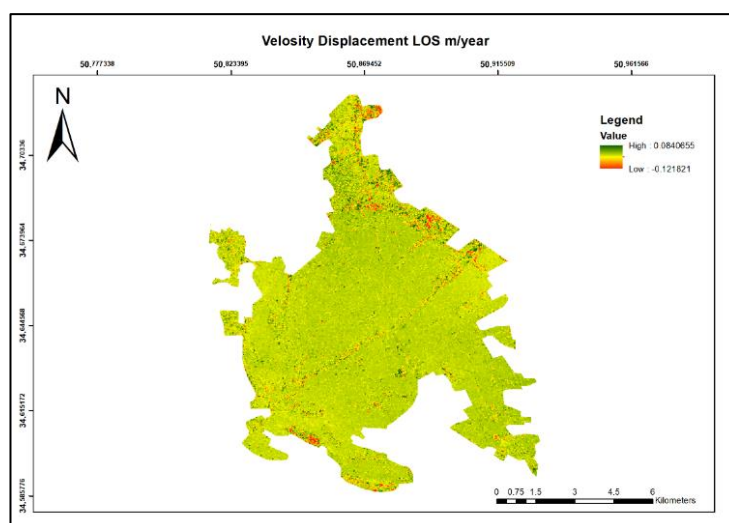
شکل ۸. میزان جابه‌جایی سطح زمین در محدوده شهر اصفهان در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵

Figure 8. The amount of land surface displacement in the Isfahan city area within the time frame of November 2024 to November 2025



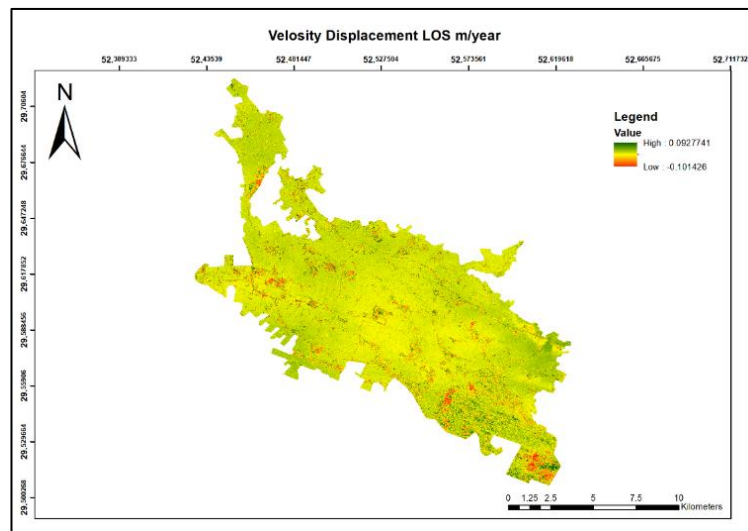
شکل ۹. میزان جابه‌جایی سطح زمین در محدوده شهر کرمان در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵

Figure 9. The amount of land surface displacement in the Kerman city area within the time frame of November 2024 to November 2025

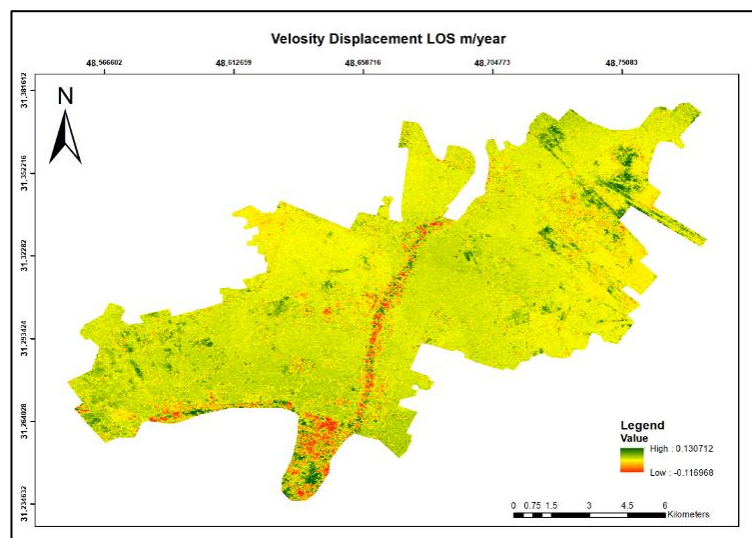


شکل ۱۰. میزان جابه‌جایی سطح زمین در محدوده شهر قم در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵

Figure 10. The amount of land surface displacement in the Qom city area within the time frame of November 2024 to November 2025



شکل ۱۱. میزان جابه‌جایی سطح زمین در محدوده شهر شیراز در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵
Figure 11. The amount of land surface displacement in the Shiraz city area within the time frame of November 2024 to November 2025



شکل ۱۲. میزان جابه‌جایی سطح زمین در محدوده شهر اهواز در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ الی نوامبر ۲۰۲۵
Figure 12. The amount of land surface displacement in the Ahvaz city area within the time frame of November 2024 to November 2025

بحث

هدف این مقاله، ارائه روش رتبه‌بندی مناطق درگیر تغییرات سطح زمین، به دو صورت فرونشست و بالآمدگی به صورت مجموع میانگین وزن دار پیکسل‌های تصویری و مقایسه مناطق مورد مطالعه است؛ بنابراین با شمارش تمام پیکسل‌ها و دسته‌بندی آن‌ها به یازده کلاس، طبقه‌بندی تصاویر انجام می‌شود. در ادامه با کنار گذاشتن پیکسل‌های در محدوده ۵- الی ۵+ میلی‌متر و پیکسل‌های Null، ۱۰ دسته نهایی، شامل ۵ دسته فرونشست و ۵ دسته بالآمدگی برای هر نقشه، بررسی می‌شود. این نتایج، مطابق رابطه (۱۳)، محاسبه و در جدول (۲)، ارائه شده است.

جدول ۲. رتبه‌بندی مناطق پرخطر تغییرات ارتفاعی سطح زمین

Table 2. Ranking of high-risk areas for land surface deformation/subsidence

ردیف	منطقه مطالعاتی	مجموع میانگین وزن
۱	تهران	-29364.715
۲	مشهد	-20365.585
۳	اصفهان	-11278.88
۴	کرج	-8676.915
۵	کرمان	-5860.055
۶	اهواز	-5193.555
۷	شیراز	-4817.79
۸	تبریز	-3257.9449
۹	قم	-1209.21

مطابق نتایج، شهر تهران با بیش‌ترین مجموع میانگین وزن تغییرات و جابه‌جایی زمین، در رتبه اول ریسک پرخطرترین شهر، قرار می‌گیرد. در رتبه‌های ۲ الی ۹، به ترتیب شهرهای: مشهد، اصفهان، کرج، کرمان، اهواز، شیراز، تبریز و قم قرار دارند. علامت منفی در کنار مقادیر ستون «مجموع میانگین وزن»، نشان‌دهنده غلبه تعداد پیکسل‌های منفی (فرونشست) به پیکسل‌های مثبت (بالآمدگی) است. براین اساس می‌توان گفت که همه شهرهای بررسی شده در این مقاله، درگیر فرونشست زمین هستند؛ اما درصد ریسک خطر آن‌ها باتوجه به بافت محدوده بررسی شده، یکسان نیست. البته لازم به ذکر است که برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر، لازم است تا مناطق کشاورزی و رودخانه‌ها، از نتایج بررسی شده نقشه تغییرات ارتفاعی سطح زمین، حذف شوند؛ ولی در این مقاله باتوجه به تأثیر کم این موارد، نتایج نزدیک به واقعیت و همچنین، مطابق با تحقیق‌ها و پژوهش‌های گذشته به دست آمد که در قسمت پیشینه تحقیق بیان شد.

نتایج حاصل از تحلیل سری زمانی InSAR در بازه زمانی نوامبر ۲۰۲۴ تا نوامبر ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که فرونشست

زمین به عنوان یک مخاطره تدریجی اما فراگیر، در اغلب شهرهای پرجمعیت ایران در حال گسترش است. دامنه تغییرات ارتفاعی محاسبه شده و نرخ های بالای فرونشست در برخی مناطق، به ویژه در کلان شهرهایی مانند تهران، مشهد، اصفهان و کرج، بیانگر عبور از آستانه های پایداری زمین و افزایش قابل توجه ریسک برای جمعیت و زیرساخت های شهری است. الگوی مکانی فرونشست در مناطق مورد مطالعه نشان می دهد که بیشترین نرخ ها عمدتاً در نواحی با تراکم جمعیتی بالا، توسعه شهری فشرده و وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی رخ داده است. این هم پوشانی مکانی میان فرونشست و تمرکز جمعیت، اهمیت این پدیده را از یک مسئله ژئوفیزیکی صرف، به یک چالش جدی مدیریت ریسک شهری ارتقا می دهد. مطالعات انجام شده در کلان شهرهای جهان نیز نشان داده اند که فرونشست زمین در مناطق شهری می تواند منجر به آسیب گسترده به ساختمان ها، شبکه های حمل و نقل و تأسیسات زیربنایی شده و در نهایت کیفیت زندگی شهروندان را کاهش دهد (Herrera-García et al., 2021; Ojeda-Olivares et al., 2023).

در شهر تهران، گستره وسیع فرونشست در نواحی جنوب غربی و جنوبی و هم زمانی آن با تمرکز زیرساخت های حیاتی و بافت های متراکم مسکونی، نشان دهنده سطح بالای آسیب پذیری است. وجود الگوهای ترکیبی فرونشست و بالا آمدگی موضعی که در برخی دیگر از شهرها نیز مشاهده شده است، می تواند تنش های ناهمگن در سطح زمین ایجاد کند و خطر آسیب های ناگهانی و غیرخطی به سازه ها را افزایش دهد. چنین رفتاری پیش تر در مطالعات سری زمانی InSAR به عنوان یکی از نشانه های ناپایداری پیش رونده زمین گزارش شده است (Hooper et al., 2012; Castellazzi et al., 2022). در شهرهایی مانند مشهد و اصفهان، گسترش مکانی فرونشست از نواحی حاشیه ای به سمت مناطق مرکزی نشان می دهد که فشار ناشی از برداشت بی رویه آب، به تدریج کل ساختار شهری را تحت تأثیر قرار داده است. این الگو با یافته های مطالعات اخیر در شهرهای پرجمعیت آسیا و آمریکا که افت آبخوان ها را عامل غالب فرونشست معرفی کرده اند، سازگار است (Chaussard et al., 2021; Rahman et al., 2022; Castellazzi et al., 2022). در مقابل، نتایج به دست آمده برای شهرهایی نظیر قم و اهواز که الگوهای نزدیک به حالت نرمال یا تغییرات خفیف را نشان می دهند، نیازمند تفسیر محتاطانه است. کاهش همدوسی اینترفروگرام ها در مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم، رودخانه ها و اراضی کشاورزی می تواند منجر به برآوردهای محافظه کارانه یا کم برآوردی نرخ فرونشست شود؛ موضوعی که در مطالعات پیشین نیز مورد تأکید قرار گرفته است (Goldstein & Werner, 1998; Kampes, 2006).

مرور تجارب جهانی نشان می دهد که کاهش ریسک فرونشست زمین، مستلزم اتخاذ راهبردهای ترکیبی است. مطالعات اخیر بر اهمیت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، از جمله کنترل برداشت و اجرای طرح های تغذیه مصنوعی آبخوان ها، به عنوان مؤثرترین راهکار بلندمدت تأکید دارند (Seidl et al., 2024). در کنار آن، اقدامات مهندسی نظیر بازنگری در ضوابط ساخت و ساز، تقویت سازه ها در مناطق پرخطر و طراحی زیرساخت های مقاوم در برابر نشست، نقش مهمی در کاهش پیامدهای اقتصادی و انسانی فرونشست ایفا می کند (Nappo & Korff, 2025). علاوه بر اقدامات ساختاری، رویکردهای غیرساختاری مانند پایش مستمر تغییرات سطح زمین با استفاده از داده های InSAR، ادغام نتایج پایش در فرایندهای برنامه ریزی شهری و افزایش آگاهی تصمیم گیران و عموم جامعه، به عنوان اجزای کلیدی

مدیریت ریسک فرونشست مطرح شده‌اند (Shirzaei et al., 2022; Wang et al., 2023). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که رتبه‌بندی مناطق بر اساس مجموع میانگین وزن تغییرات ارتفاعی می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و تخصیص منابع مورد استفاده قرار گیرد. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، نرخ‌های فرونشست به دست آمده در این پژوهش با دامنه مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین، همخوانی مناسبی دارد. اختلاف مشاهده شده میان برخی مقادیر را می‌توان به تفاوت در بازه زمانی تصاویر، تعداد داده‌های مورد استفاده، محدوده مطالعاتی، روش پردازش InSAR و مؤلفه‌های پردازشی، نسبت داد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه شدت و الگوی فرونشست در شهرهای مختلف ایران متفاوت است، اما در اغلب موارد، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین عامل ایجاد تغییر شکل سطح زمین به شمار می‌رود. در ادامه، نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات پیشین برای هر یک از شهرهای مورد بررسی، مقایسه شده است. تهران: مطالعات متعدد نشان داده‌اند که بیش‌ترین فرونشست در جنوب و جنوب غرب تهران رخ می‌دهد و عامل اصلی آن، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، تراکم رسوبات آبرفتی و توسعه سریع شهری است. در برخی مناطق، نرخ فرونشست بیش از ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (Mahmoudpour et al., 2016).

جدول ۳. مقایسه نتایج با تحقیقات پیشین

Table 3. Comparison of the Results with Previous Studies

ردیف	منطقه مطالعاتی	نتیجه حداکثر فرونشست	نتیجه سایر تحقیقات	علت اختلاف	منبع
۱	تهران	- ۲۱۶ mm	- ۲۲۷mm	تفاوت منطقه	Asghari & Seif, 2025
۲	مشهد	- ۲۰۲mm	- ۱۷۸mm	تفاوت منطقه	Payne et al., 2025
۳	اصفهان	- ۱۱۰mm	- ۱۱۷Mm	تفاوت منطقه	Ghasemi et al., 2025
۴	کرج	- ۱۸۲ mm	- ۳۲۰mm	تفاوت دوره زمانی و منطقی	اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۴۰۳
۵	کرمان	- ۱۰۸mm	- ۱۳۲mm	تفاوت دوره زمانی و منطقی	محمدحسینی و شیخ‌شریعی، ۲۰۲۱
۶	اهواز	- ۱۱۶mm	-	-	-
۷	شیراز	- ۱۰۱mm	- ۳۰mm	تفاوت دوره زمانی و منطقی	Karami et al., 2023
۸	تبریز	- ۱۱۵mm	- ۱۱۰mm	تفاوت دوره زمانی و منطقی	Ajalloeianb et al., 2024
۹	قم	- ۱۲۱mm	- ۱۷۵mm	تفاوت دوره زمانی و	Golaghaei et al.,

2026	منطق				
------	------	--	--	--	--

کرج (البرز): در دشت تهران - کرج، افت شدید سطح آب زیرزمینی، توسعه شهرنشینی و وجود رسوبات آبرفتی ریزدانه، مهم‌ترین عوامل ایجاد فرونشست معرفی شده‌اند و نرخ‌هایی در حدود ۱۵ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (Payne et al., 2025).

اصفهان: پژوهش‌های انجام‌شده در دشت اصفهان - برخوار نشان می‌دهد که خشکسالی‌های متوالی، کاهش جریان رودخانه زاینده‌رود و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، مهم‌ترین عوامل فرونشست این شهر هستند و نرخ‌هایی در حدود ۱۵ تا ۱۸ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (Sadeghi et al., 2023).

مشهد: مطالعات InSAR نشان داده‌اند که افت مستمر سطح آبخوان، افزایش تقاضای آب ناشی از توسعه شهری و کشاورزی و وجود رسوبات آبرفتی، از عوامل اصلی فرونشست در مشهد بوده و نرخ‌هایی تا حدود ۱۸ تا ۲۰ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (Motaq et al., 2007).

قم: در دشت قم، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، تنش آبی، رسوبات ریزدانه و شرایط هیدروژئولوژیکی، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر فرونشست شناخته شده‌اند و نرخ‌هایی در حدود ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (Sadeghi et al., 2023).

کرمان: مطالعات انجام‌شده در دشت‌ها و مناطق شهری کرمان نشان می‌دهد که افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی، خشکسالی و تراکم رسوبات آبرفتی، از مهم‌ترین عوامل ایجاد فرونشست هستند و در برخی مناطق، نرخ‌هایی بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (محمدحسینی و شیخ‌شریعی، ۲۰۲۱).

شیراز: در شیراز، برداشت مداوم آب‌های زیرزمینی، گسترش شهرنشینی و ویژگی‌های زمین‌شناسی دشت شیراز از مهم‌ترین عوامل ایجاد فرونشست به شمار می‌روند و نرخ‌هایی در حدود ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (Payne et al., 2025).

تبریز: در دشت تبریز، افت سطح آب زیرزمینی، توسعه کشاورزی و وجود رسوبات آبرفتی از عوامل اصلی فرونشست گزارش شده و نرخ تغییر شکل در برخی نواحی به حدود ۶ تا ۸ سانتی‌متر در سال می‌رسد (Payne et al., 2025).

اهواز: اگرچه مطالعات اختصاصی محدودی برای شهر اهواز منتشر شده است، پژوهش‌های انجام‌شده در جنوب غرب ایران نشان می‌دهد که برداشت آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های نفت و گاز، شرایط رسوبات آبرفتی و فرایندهای تکتونیکی، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییر شکل سطح زمین در این منطقه هستند (Fatholahi et al., 2021).

یکی از محدودیت‌های ذاتی روش SBAS، کاهش هم‌دوسی در اراضی کشاورزی، پوشش‌های گیاهی متراکم و حریم رودخانه‌ها است. تغییرات زمانی پوشش زمین، تغییرات رطوبت خاک و ویژگی‌های بازتاب راداری در این مناطق، می‌تواند موجب کاهش هم‌دوسی تصاویر و در نتیجه افزایش عدم قطعیت در محاسبه تغییر شکل سطح زمین شود. از آنجاکه این پژوهش باهدف مقایسه نسبی میزان تغییر شکل در شهرهای مختلف انجام شد، این محدودیت در تفسیر نتایج، موردتوجه قرار گرفته و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده با بهره‌گیری از داده‌های زمینی، روش‌های پیشرفته‌تر

انتخاب نقاط پایدار یا تلفیق داده‌های کمکی، اثر این عوامل، کاهش یابد.

نتیجه‌گیری

با بررسی نُه شهر پرجمعیت ایران از نظر در خطر بودن جمعیت ساکن در مناطق دچار تغییرات ارتفاعی سطح زمین، شامل فرونشست و بالاآمدگی، بر اساس یک معیار جدید وزن‌دهی و رتبه‌بندی، به ترتیب، سه شهر تهران، مشهد و اصفهان، بیش‌ترین ریسک خطر فرونشست و هم‌زمان بالاآمدگی سطح زمین را دارند. فرونشست زمین در ایران، پدیده‌ای فراگیر و در حال تشدید است که پیامدهای آن مستقیماً با جمعیت، زیرساخت‌ها و پایداری شهری گره‌خورده است. تفاوت در شدت و الگوی فرونشست میان شهرهای مختلف، ضرورت اتخاذ رویکردهای منطقه‌محور و مبتنی بر شرایط محلی را برجسته می‌سازد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مناطق پرجمعیت با توسعه شهری فشرده و تمرکز زیرساخت‌های حیاتی، بیش‌تر در معرض آسیب ناشی از تغییرات ارتفاعی سطح زمین هستند. روش SBAS در این مطالعه، نتایجی با تطابق بالا با تحقیقات پیشین ارائه کرد که از چندین ابزار مختلف برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین استفاده کرده بودند که در صورت دسترسی محدود به سایر داده‌ها و روش‌ها، SBAS می‌تواند یک ابزار قابل‌اعتماد و عملی برای پایش تغییرات ارتفاعی سطح زمین در مقیاس شهری و منطقه‌ای باشد. از محدودیت‌های این پژوهش، نبود داده‌های زمینی هم‌زمان برای انجام اعتبارسنجی مستقل در تمامی مناطق مورد مطالعه است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، نتایج حاصل از SBAS با داده‌های GNSS، ترازیبی دقیق و اندازه‌گیری‌های پیزومتری، اعتبارسنجی شوند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود پایش دوره‌ای فرونشست با بهره‌گیری از روش‌های سری زمانی InSAR در قالب یک سامانه ملی پایش تغییر شکل زمین، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، نتایج این پژوهش می‌تواند در تعیین اولویت شهرهای نیازمند مداخله، مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، مکان‌یابی پروژه‌های عمرانی، به‌روزرسانی ضوابط توسعه شهری و تدوین برنامه‌های کاهش خطر فرونشست توسط دستگاه‌های اجرایی و برنامه‌ریزی کشور مورد استفاده قرار گیرد. تلفیق این نتایج با داده‌های هیدروژئولوژی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی نیز می‌تواند دقت تصمیم‌گیری و مدیریت ریسک فرونشست را در مطالعات آینده افزایش دهد.

منابع

- اصغری سراسکانرود، صیاد، اسفندیاری درآباد، فریبا، فعال نذیری، مهدی و زینالی، بتول . (۱۴۰۳). برآورد و ارزیابی خطر فرونشست زمین در محدوده حریم شهری شهرستان‌های ساوجبلاغ -نظرآباد-چهارباغ-کرج-فردیس. هیدروژئومورفولوژی، ۱۱(۴۱)، ۱۶۱-۱۳۵. doi: 10.22034/hyd.2024.62570.1751
- خسروانی، زهرا، اخوان قالیباف، محمد، دهقانی، مریم، درهمی، ولی و بولکا، مصطفی . (۱۴۰۱). مدل‌سازی فرونشست دشت ابرکوه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و هوش مصنوعی. نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری، ۷۵(۳)، ۴۲۹-۴۴۸. doi: 10.22059/jrwm.2022.340930.1652

- حیدریان، لیلا، گورابی، ابوالقاسم و مقصودی، مهران. (۱۴۰۰). مدل‌سازی ناپایداری‌های دامنه‌ای با استفاده از تحلیل سری زمانی تصاویر راداری با تکنیک SBAS (مطالعه موردی: شهر پردیس تهران). آمایش فضا و ژئوماتیک، ۲۵(۲)، ۱۸۳-۲۰۵. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.16059689.1400.25.2.3.0>
- زنگنه‌تبار، ساسان، یمانی، مجتبی، شریفی‌کیا، محمد، حسینی، سید موسی و آمیغ‌پی، معصومه. (۱۴۰۴). به کارگیری تکنیک PS-InSAR برای شناسایی تأثیرات فرونشست زمین بر پل‌های جاده‌ای جنوب غربی شهر تهران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۴(۴)، ۱-۲۰. doi: 10.22067/geoh.2025.93735.1575
- شریفی‌کیا، محمدرضا. (۱۳۹۱). تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق- بهرمان. آمایش فضا و ژئوماتیک، ۱۶(۳)، ۵۵-۷۷.
- صدری‌کیا، منصوره و کاظمی‌پور، ندا. (۱۴۰۳). ارزیابی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تداخل‌سنجی راداری و تحلیل‌های مکانی. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۸(۹۰)، ۱۸۸-۲۰۹. doi: 10.22034/gp.2024.58713.3194
- عمادالدین، سمیه و نظری‌گزیک، 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، ۲۱(۷۳)، ۲۳۹-۲۲۱. doi: 10.22111/gdij.2023.8029
- نیکدل‌منور، احمد و فیضی‌زاده، بختیار. (۱۴۰۱). کاربرد تحلیل‌های مکانی GIS در مدل‌سازی پتانسیل وقوع فرونشست زمین مطالعه موردی: شهرستان تبریز. نشریه کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی، ۲(۲)، ۸۹-۱۰۶.
- یاسینی، سروش و اعتمادفرد، حسین. (۱۴۰۴). پایش فرونشست در حریم خطوط ریلی با الگوریتم LiCSBAS و روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: راه‌آهن مشهد-سرخس). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۴(۱)، ۲۲۷-۲۴۶. doi: 10.22067/geoh.2024.87783.1480
- Ajalloeianb,R. , Rafiee,M. , Dehghani,M. and Mahmoudpour,M. (2024). Study of land subsidence in Isfahan-Borkhar plain using radar images, preparation of subsidence potential map using a combination of methods of AHP and Fuzzy Logic and Multiple Linear Regression. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 17(1), 1-18
- Ali Golaghaei Darzi, Hamed Sadeghi, Amirhossein Zoghi, Seyed Soroush Hosseini Naghavi, A multivariate investigation of land surface deformation mechanisms using remote sensing, neural networks, and field inspections: A case study of Qom province, Iran, Results in Engineering, Volume 30, 2026, 111199, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.111199>.
- Alimpika Gogoi, Girish Ch Kothiyari, Atul Kumar Patidar, Ground subsidence monitoring in India using InSAR: A review of current status and future prospects, Geosystems and Geoenvironment, 2025, 100436, ISSN 2772-8838, <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100436>.
- Arabameri, Alireza & Lee, Saro & Rezaie, Fatemeh & Pal, Subodh & Asadi Nalivan, Omid & Saha, Asish & Chowdhuri, Indrajit & Moayedi, Hossein. (2021). Performance Evaluation of GIS-Based Novel Ensemble Approaches for Land Subsidence Susceptibility Mapping.

- Frontiers in Earth Science. 9. 10.3389/feart.2021.663678.
- Ardha, M., Suhadha, A. G., Julzarika, A., & Yudhatama, D. Utilization of Sentinel-1 satellite imagery data to support land subsidence analysis in DKI Jakarta, Indonesia. J. Degrade. Min. Land Manage. 8(2), 2587–2593 (2021). <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2021.082.2587>
 - ASGHARI BEIRAMI, Behnam and SEIF, Mohammadreza. Investigating the subsidence pattern of southwest Tehran using interferometric SAR time series. Ecological Questions. Online. 4 October 2025. Vol. 36, no. 3, pp. 127-135. [Accessed 8 July 2026]. DOI 10.12775/EQ.2025.029.
 - Asghari Saraskanroud, Sayyad, nazari gazik, zahra. "Investigating the subsidence of Mashhad using radar interferometry." Physical Geography Quarterly, vol. 17, no. 66, 2025, pp. 1-17.
 - Atefeh Hesarakizad, Mojtaba Yamani , Abolghasem Goorabi, (2024). Comprehensive Analysis of Land Subsidence in Iran: A Systematic Review of Current Status, quantitative geomorphological researches, 13(3), 23-45. magiran.com/p2827236
 - Bagheri-Gavkosh, Mehdi, et al. "Land subsidence: A global challenge." Science of The Total Environment 778 (2021): 146193.
 - Castellazzi, P., et al. Country-scale assessment of urban areas, population, and households exposed to land subsidence using Sentinel-1 InSAR, and GPS time series. Nat. Hazards 120, 1577–1601 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06259-5>
 - Cian, F., Blasco, J. M. D., & Carrera, L. (2019). Sentinel-1 for Monitoring Land Subsidence of Coastal Cities in Africa Using PSInSAR: A Methodology Based on the Integration of SNAP and StaMPS. Geosciences, 9(3), 124. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030124>
 - Dowlati, javad, Lashkaripour, Gholamreza, hafezi moghaddas, nasir, maghsoudi, yaser (2025) 'Investigation of land subsidence development trend of Mashhad-Chenaran plain using Sentinel-1A radar images and its relationship with groundwater depletion', Journal of RS and GIS for Natural Resources, 15(3), pp. 69-94. doi:10.30495/girs.2022.691565
 - F. Casu, M. Manzo, R. Lanari, A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data, Remote Sensing of Environment, Volume 102, Issues 3–4, 2006, Pages 195-210, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.023>.
 - Fancheng zhao, Fasheng miao, Yiping wu, Yuan xiong, Shunqi gong, Dingkun Sun, Land subsidence susceptibility mapping in urban settlements using time-series PS-InSAR and random forest model, Gondwana Research, Volume 125, 2024, Pages 406-424, ISSN 1342-937X, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.09.019>.
 - Galloway, D.L., Burbey, T.J. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. Hydrogeol J 19, 1459–1486 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
 - Gharechelou, Saeid, Akbari Ghoochani, Hesam, Golian, Saeed, Ganji, Kamran. "Evaluation of land subsidence relationship with groundwater depletion using Sentinel-1 and ALOS-1 radar data (Case study: Mashhad plain)." Journal of RS and GIS for Natural Resources, vol. 12, no. 3, 2021, pp. 40-61. 10.30495/girs.2021.680336
 - Ghasemi, N. , Khosravi, I. and Bahrami, A. (2025). Preparation of land subsidence susceptibility map using machine learning methods based on decision tree (case study: Isfahan–Borkhar). Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 41(3), 17-40. doi: 10.22108/jssr.2025.144391.1308
 - H. Rahnema and S. Mirasi, "Seismic and Geotechnical Study of Land Subsidence and Vulnerability of Rural Buildings," International Journal of Geosciences, Vol. 3 No. 4A, 2012, pp. 878-884. doi: 10.4236/ijg.2012.324089.

- Haghsheenas Haghighi, M., & Motagh, M. Land subsidence hazard in Iran revealed by country-scale analysis of Sentinel-1 InSAR. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLIII-B3 (2021). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-155-2021>
- Hamed Sadeghi, Ali Golaghaei Darzi, Behzad Voosoghi, Amir Akbari Garakani, Zahra Ghorbani, Seyed Farid Fazel Mojtahedi, Assessing the vulnerability of Iran to subsidence hazard using a hierarchical FUCOM-GIS framework, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Volume 31, 2023, 100989, ISSN 2352-9385, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100989>.
- Hussain, M. A., Chen, Z., Shoaib, M., Shah, S. U., Khan, J., & Ying, Z. Sentinel-1A for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using Persistent Scatterers In-SAR technique. *Sci. Rep.* 12, 5294 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09359-7>
- Huang, G., Fan, H., Lu, L., & Yu, W. Land subsidence monitoring in Dezhou city based on SBAS-InSAR technology. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLIII-B3 (2020). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-299-2020>
- Karami, Ebrahim & Alizadeh, Niloofar & Farhadi, Hadi & Abdolazimi, Hadi & Maghsoudi, Yasser. (2023). MONITORING OF LAND SURFACE DISPLACEMENT BASED ON SBAS-INSAR TIME-SERIES AND GIS TECHNIQUES: A CASE STUDY OVER THE SHIRAZ METROPOLIS, IRAN. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. X-4/W1-2022. 371-378. [10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-371-2023](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-371-2023).
- R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorqui, P. Berardino and E. Sansosti, "A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 7, pp. 1377-1386, July 2004, doi: 10.1109/TGRS.2004.828196.
- Mahdi Motagh, Yahya Djamour, Thomas R. Walter, Hans-Ulrich Wetzel, Jochen Zschau, Siavash Arabi, Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS, *Geophysical Journal International*, Volume 168, Issue 2, February 2007, Pages 518–526, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x>
- Masoud Mahmoudpour, Mashalah Khamchian, Mohammad Reza Nikudel, Mohammad Reza Ghassemi, Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran, *Engineering Geology*, Volume 201, 2016, Pages 6-28, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.004>.
- Mohammadhasani, M and Shikh Shariate Kermani, B. (2021). Determining the Rate of Land Subsidence using Radar Interferometry Technique (Case Study: Industrial Area West of Kerman). *Journal of Transportation Research*, 18(3), 75-90. doi: 10.22034/tri.2021.232651.2770
- Nappo & Korff (2025) – Applicability and effectiveness of structural measures for subsidence (risk) reduction in urban areas. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/nhess-25-1811-2025>
- Ohenhen, L.O., Zhai, G., Lucy, J. et al. Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises. *Nat Cities* 2, 543–554 (2025). <https://doi.org/10.1038/s44284-025-00240-y>
- Pedretti, Laura & Giarola, Alessia & Korff, Mandy & Lambert, John & Meisina, Claudia. (2024). Comprehensive database of land subsidence in 143 major coastal cities around the world: overview of issues, causes, and future challenges. *Frontiers in Earth Science*. 12. 10.3389/feart.2024.1351581.
- Payne, J. A., Watson, A. R., Maghsoudi, Y., Ebmeier, S. K., Rigby, R., Lazecký, M., et al. (2025). Widespread extent of irrecoverable aquifer depletion revealed by country-wide

- analysis of land surface subsidence hazard in Iran. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, e2024JB030367. <https://doi.org/10.1029/2024JB030367>
- Payne, Jessica & Watson, Andrew & Maghsoudi, Yasser & Ebmeier, Susanna & Rigby, Richard & Lazecky, Milan & Thomas, Mark & Elliott, John. (2024). Widespread extent of irrecoverable aquifer depletion revealed by country-wide analysis of land surface subsidence hazard in Iran, 2014–2022, using two component Sentinel-1 InSAR time series. 10.22541/essoar.172770839.99911308/v1.
 - P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383, Nov. 2002, doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.
 - Rahmanian, A. 1986. The land subsidence and earth fissure by groundwater depletion in Kerman. *water*, 5: 25-48 (In Persian)
 - Talebiniya, Marjan, Khosravi, Hassan, Zehtabian, Gholamreza, Malekian, Arash, Keshtkar, Hamidreza. "Investigation of subsidence trend in Isfahan plain using radar differential interferometry technique." *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, vol. 14, no. 3, 2023, pp. 26-46. 10.30495/girs.2023.690220
 - Seidl et al. (2024) – Using managed aquifer recharge to address land subsidence. *Water Security*. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100184>
 - Shaowei Li, Wenbin Xu, Zhiwei Li, Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges, *Geodesy and Geodynamics*, Volume 13, Issue 2, 2022, Pages 114-126, ISSN 1674-9847, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.09.007>.
 - Shen, S. L., Wu, H. N., Cui, Y. J. & Yin, Z. Y. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 40, 309–323. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.10.013>. (۲۰۱۴)
 - Shi, X., Zhang, S., Jiang, M., Pei, Y., Qu, T., Xu, J., & Yang, C. Spatial and temporal subsidence characteristics in Wuhan (China), during 2015–2019, inferred from Sentinel-1 SAR interferometry. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 21, 2285–2297 (2021). <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2285-2021>
 - Shirani, K. and Pasandi, M. (2025). Land subsidence risk assessment and zoning in the watersheds of Isfahan Province using Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR). *Watershed Engineering and Management*, 17(4), 534-552. doi: 10.22092/ijwmse.2025.367922.2091
 - Shirzaei, Manoochehr. (2023). Surface Deformation of New York City from Multitemporal Interferometric Analysis of Sentinel-1 SAR Datasets. 10.48550/arXiv.2307.14477.
 - S. N. Fatholahi, H. He, L. Wang, A. Syed and J. Li, "Monitoring Surface Deformation Over Oilfield Using MT-Insar and Production Well Data," 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021, pp. 2298-2301, doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554972.
 - Wang, H. M., Wang, Y., Jiao, X. & Qian, G. R. Risk management of land subsidence in Shanghai. *Desalin. Water Treat.* 52, 1122–1129. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.826337>. (۲۰۱۴)
 - Wu, Y. X., Shen, J. S., Cheng, W. C. & Hino, T. Semi-analytical solution to pumping test data with barrier, wellbore storage, and partial penetration effects. *Eng. Geol.* 226, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.05.011>. (۲۰۱۷)

- Yu, H., Li, B., Xiao, Y., Sun, J., Chen, C., Jin, G., & Liu, H. Surface subsidence over a coastal city using SBAS-InSAR with Sentinel-1A data: A case of Nansha District, China. *Remote Sens.* 16(1), 55 (2024). <https://doi.org/10.3390/rs16010055>
- Zafar WA, Javed F, Ahmed R, Shah MA, Ahmad M, Khan MY, Abdullah GMS, Khan D, Najeh T and Gamil Y (2024) Time series subsidence evaluation using NSBAS InSAR: a case study of twin megacities (Rawalpindi and Islamabad) in Pakistan. *Front. Earth Sci.* 12:1336530. doi: 10.3389/feart.2024.1336530
- Zhihua Zhang, Qiang Lin, Haowen Yan, Xinyu Zhu, Xinxiu Zhang, Shuwen Yang, Chunlin Huang, Yueling Shi, Jie Hu, Xuhui Li, Li Hou, Lujia Zhao, Wei Wang, Ground subsidence monitoring and prediction based on InSAR and CNN-BiGRU-Attention: A case study of Chengdu, *Engineering Geology*, Volume 357, 2025, 108336, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108336>.
- Zhou, L., Liang, L., Chen, Q., et al. Urban land subsidence analyzed through time-series InSAR coupled with refined risk modeling: A Wuhan case study. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 14(9), 320 (2025). <https://doi.org/10.3390/ijgi14090320>
- Zhu, L., Ren, C., Zhou, L., Shi, X. J., Li, X. G., & Zhang, D. Monitoring Tianjin land subsidence by SBAS-InSAR based on Sentinel-1A SAR images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-3/W10 (2020). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-315-2020>
- Zhu, Y. Y., He, Y. F., Li, H. Y., Lv, Z. P., & Xu, G. C. Land subsidence monitoring and analysis in Fuzhou based on InSAR and multispectral remote sensing technology. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLIII-B3 (2022). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-373-2022>