Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Analysis of earth surface elevation changes induced by an earthquake using differential radar interferometry in the Khoy region

Seyedeh Aida Mirshafiey[1], Asghar Milan[2]✉

1. MSc student, Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: se.mirshafiey@Mail.sbu.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a_milan@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 1 March 2025
Accepted 7 December 2025

Keywords:
Elevation Change Modeling, Fault, Radar Imagery, Seismic Risk Assessment, Sentinel-1.

ABSTRACT

As one of the key factors causing changes in the Earth's altitude, earthquakes can lead to subsidence or uplift in different areas. These changes are mainly caused by the displacement of tectonic plates, movement along faults and changes in pressure deep within the Earth. The type of fault and the conditions of the earthquake determine whether uplift or subsidence occurs. Monitoring and examining these changes is of great importance for crisis management and relief, improving urban planning, and reducing environmental damage. To study changes in the Earth's surface, various methods are used, including accurate alignment, global positioning systems, laser scanning, and remote sensing, each of which has a specific accuracy and characteristic. Nowadays, satellite data and remote sensing methods are an efficient tool for calculating the vertical displacement of the Earth's surface. This study investigated the potential of Sentinel-1 satellite data and images to study land surface changes due to the 5.6-magnitude Khoy earthquake using the radar differential interferometry technique. Processing the radar images before and after the earthquake allowed us to extract the vertical displacements of the phase changes. The results show uplift and subsidence occurring in some areas close to the epicentre and in more distant places. The maximum uplift was 0.08 metres and the maximum subsidence was -0.156 metres. These results demonstrate the non-uniform pattern of land surface elevation changes caused by this earthquake.

Introduction

Changes in the Earth's surface elevation, including subsidence and uplift, have widespread consequences for the environment, infrastructure, and human life. Earthquakes are among the most significant factors influencing elevation changes, as they cause sudden subsidence or uplift due to the displacement of crustal layers. These changes, in addition to causing economic losses, can lead to humanitarian disasters. Estimating elevation changes caused by earthquakes is a crucial research area that relies on advanced remote sensing techniques, particularly radar interferometry. The advent of Sentinel-1 satellite imagery has significantly enhanced researchers' ability to monitor subsidence phenomena associated with seismic events. To this end, various studies have been conducted, demonstrating that this method is capable of detecting and quantifying ground movements with high accuracy, playing a vital role in analyzing surface deformations after earthquakes. In this context, Maleki et al. (2023) investigated the extent of land subsidence caused by the November 2017 earthquake in western Kermanshah. They reported vertical displacements ranging from -41.72 to -42.99 cm and measured the average annual uplift rate in the satellite's line of sight between 17.53 and

Cite this article: Mirshafiey, A., Milan, A. (2025). Analysis of earth surface elevation changes induced by an earthquake using differential radar interferometry in the Khoy region. Journal of Engineering Geology, 19 (4), 495-517. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.4.1019282

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.4.1019282

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

34.53 cm. Similarly, Mohammadhasani et al. (2023) examined surface changes following the 6.1-magnitude earthquake on January 7, 2022, in the coastal region of the Persian Gulf, particularly in Bandar Khamir. They reported a maximum uplift of 14 cm around Bandar Khamir and a maximum subsidence of 12 cm near Bandar Charak. Continuing these investigations, another study analyzed the geomorphic changes induced by a 5.6-magnitude earthquake in Sisakht (Dana City), revealing a maximum uplift of 0.11 meters and a maximum subsidence of 0.6 meters following the event.

Materials and Methods

In this study, the Differential Radar Interferometry technique was used to analyze vertical land surface changes in Khoy City following an earthquake. Sentinel-1 satellite images were utilized for this purpose, with one image selected as the Master (pre-earthquake) and another as the Slave (post-earthquake). Data processing was performed using SNAP software, which included coregistration, interferogram generation, topographic phase removal, phase unwrapping, and phase-to-displacement conversion. The DInSAR analysis successfully identified vertical ground displacement with high precision. The images used in this study:

S1A_IW_SLC__1SDV_20230322T030125_20230322T030152_047751_05BC88_ACE1.SAFE

S1A_IW_SLC__1SDV_20230403T030125_20230403T030152_047926_05C260_24D7.SAFE.

Results and Discussion

The Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar technique revealed significant vertical ground displacement in the city of Khoy following the earthquake in March 2023. Analysis of Sentinel-1 satellite images revealed a pattern of ground displacement, highlighting areas of subsidence and uplift within the earthquake-affected region. The maximum recorded subsidence was -0.127 metres, while the maximum uplift was 0.07 metres. The heterogeneous distribution of these changes suggests that local geological formations, fault activity and tectonic stresses played a significant role in shaping the pattern of ground displacement. To improve visualisation and interpretation of the results, the processed data were integrated into Google Earth (Figure 5c), providing a more comprehensive assessment of ground changes. Furthermore, displacement charts comparing Salmas and Khoy (Figure 7) showed that the earthquake's effects were also felt in Salmas, clearly illustrating the extent of the ground changes. The histogram analysis (Figure 6-a) revealed that subsidence was predominant in the study area, with the dominant displacement values confirming the presence of zones with varying changes. Furthermore, the scatter plot (Figure 6-b) indicated a negative correlation between displacement and coherence, meaning that areas with significant changes exhibited lower coherence. Finally, the study area was classified into 8 classes (Figure 8), and the area of each class was calculated to enable a more detailed analysis. These findings highlight the importance of continuous, remote-sensing-based monitoring in improving our understanding of seismic hazards and developing effective strategies for mitigating earthquake risk.

Conclusions

This study clearly demonstrated the high capability of the Differential Radar Interferometry technique for analysing earthquake-induced land surface changes when utilising Sentinel-1 satellite imagery. The research revealed that the April 2023 earthquake in Khoy City caused significant terrain alterations, including uplift and subsidence in areas evidently influenced by crustal displacement and fault activity. Such data once again highlight the importance of continuous land deformation monitoring for a deeper

understanding of seismic phenomena and the mitigation of potential hazards. DInSAR, due to its ability to detect millimeter-scale surface changes without the need for extensive field surveys, enables accurate and cost-effective monitoring of earthquake-affected areas. However, integrating radar data with field observations and Global Positioning System (GPS) measurements can enhance the accuracy and reliability of results, leading to a more profound understanding of how the Earth's crust responds to tectonic stresses. Furthermore, long-term studies aimed at assessing the gradual deformation of land in seismically active regions not only contribute to a better understanding of seismic effects but also provide a scientific foundation for hazard prediction and risk management. The findings of this study, besides offering a clear depiction of the recent earthquake's impact, emphasize the need for more precise planning and further research in the field of earthquake-related hazard management. This information can be instrumental in high-level decision-making, including the development of earthquake-resistant infrastructure, urban planning, and the optimization of early warning systems.

Using advanced algorithms such as Persistent Scatterer Interferometry can lead to more precise analyses, especially in regions experiencing complex deformations. By reducing environmental noise and enhancing measurement accuracy, these methods enable the detection of gradual crustal movements. Additionally, the development of machine learning and artificial intelligence-based models can optimize data analysis and provide more accurate predictions of ground displacement patterns. Thus, the integration of cutting-edge technologies plays a crucial role in mitigating earthquake-related damages. This study demonstrated that remote sensing and radar data significantly facilitate the monitoring of seismically active regions and may serve as a foundation for the development of crisis management systems. It can be concluded that analyzing earthquake-induced deformations and improving analytical methods are vital steps toward reducing seismic risks and enhancing resilience against this natural disaster.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰
دانشگاه خوارزمی

تحلیل تغییرات ارتفاعی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه بر اساس تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری در منطقه خوی

سیده آیدا میرشفیعی[۱]، اصغر میلان[2] ✉

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: se.mirshafiey@Mail.sbu.ac.ir

۲. استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_milan@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۶

کلیدواژه‌ها:
ارزیابی خطرات لرزه‌ای، تصاویر راداری، سنتینل۱، گسل، مدل‌سازی تغییرات ارتفاعی.

چکیده

زمین‌لرزه‌ها به‌عنوان یکی از عوامل مهم در ایجاد تغییرات ارتفاعی سطح زمین، می‌توانند منجر به فرونشست یا بالاآمدگی گسترده در نواحی مختلف شوند. این تغییرات عمدتاً به دلیل جابه‌جایی صفحات تکتونیکی، حرکت گسل‌ها، و تغییرات فشار در اعماق زمین رخ می‌دهند. بسته به نوع گسل و شرایط زلزله، ممکن است بالاآمدگی یا فرونشست ایجاد شود. پایش و بررسی این تغییرات برای مدیریت بحران و امدادرسانی، بهبود برنامه‌ریزی شهری و کاهش آسیب‌های محیطی اهمیت بالایی دارد. برای مطالعه تغییرات سطح زمین، از روش‌های مختلفی از جمله ترازسنجی دقیق، سامانه‌های تعیین موقعیت جهانی، لیزر اسکن و سنجش از دور استفاده می‌شود که هر یک از آن‌ها دارای دقت ویژگی خاص هستند. امروزه داده‌های ماهواره‌ای و روش‌های سنجش از دور، ابزاری کارآمد برای محاسبه جابه‌جایی‌های عمودی سطح زمین به شمار می‌روند. در این پژوهش، به بررسی پتانسیل داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل۱ برای مطالعه تغییرات سطح زمین در اثر زلزله ۵/۶ ریشتری خوی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری پرداخته شده است. با پردازش تصاویر راداری قبل و بعد از زلزله، جابه‌جایی‌های عمودی از تغییرات فاز استخراج شده است. نتایج نشان می‌دهد که در برخی مناطق نزدیک به کانون زلزله بالاآمدگی و در نقاط دورتر فرونشست رخ داده است. حداکثر بالاآمدگی ۰/۰۸ متر و بیشترین فرونشست ۰/۱۵۶- متر ثبت شده است. این نتایج الگوی غیر یکنواخت تغییرات ارتفاعی سطح زمین در اثر این زمین‌لرزه را نمایان می‌سازد.

مقدمه

تغییرات ارتفاعی سطح زمین، از جمله فرونشست و بالاآمدگی، پیامدهایی برای محیط‌زیست، زیرساخت‌ها و زندگی انسان دارد. این پدیده‌ها باعث تخریب ساختمان‌ها، ترک‌خوردگی جاده‌ها و مسدود شدن راه‌ها، شکست خطوط انتقال نیرو آسیب به شبکه‌های آب و فاضلاب می‌شوند. فرونشست در مناطق پرجمعیت، ناپایداری سازه‌ها را افزایش داده و خطر سیلاب و رانش زمین را تشدید می‌کند. همچنین بالاآمدگی ناگهانی زمین نیز الگوهای زهکشی را تغییر داده و موجب تخریب اراضی و سکونتگاه‌ها می‌شود. زلزله‌ها از مهم‌ترین عوامل تغییرات ارتفاعی زمین هستند که فرونشست یا بالاآمدگی ناگهانی ایجاد می‌کنند. تغییرات به وجود آمده، علاوه بر خسارت‌های اقتصادی، می‌توانند منجر به فجایع انسانی، از جمله فروریختن ساختمان‌ها و انسداد راه‌های ارتباطی شوند. برای پایش این تغییرات، بسته به دقت، پوشش مکانی، هزینه و قابلیت اجرایی می‌توان از روش‌های زمینی یا سنجش از دور استفاده کرد. روش‌های

استناد: میرشفیعی، آ.، میلان، ا. (۱۴۰۴). تحلیل تغییرات ارتفاعی سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه بر اساس تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری در منطقه خوی. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۴)، ۴۹۵-۵۱۷. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.4.1019282

ناشر: دانشگاه خوارزمی.

© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

زمینی دقت بالایی در حد میلی‌متر دارند و برای بررسی تغییرات موضعی و سازه‌های مهم کاربردی هستند، اما استفاده از این روش‌ها پرهزینه، زمان‌بر و دشوار است، بنابراین برای نشان دادن تغییرات در مقیاس‌های بزرگ کارآمد نیستند. در مقابل، روش‌های سنجش از دور، به‌ویژه تداخل‌سنجی راداری و تکنیک تداخل‌سنجی راداری تفاضلی، امکان پایش گسترده و پیوسته تغییرات سطح زمین را با دقت مناسب و بدون نیاز به حضور در منطقه فراهم می‌کنند. این روش‌ها برای انجام مطالعات منطقه‌ای، مانند نظارت بر تغییرات ارتفاعی ناشی از زمین‌لرزه یا برداشت آب‌های زیرزمینی، کارایی لازم را دارند. با این حال، عواملی مانند پوشش گیاهی متراکم، تغییرات رطوبت سطحی و هندسه تصویربرداری ماهواره می‌توانند بر دقت نتایج تأثیرگذار باشند. بنابراین، در تحلیل‌های دقیق، این محدودیت‌ها باید در نظر گرفته شوند.

برآورد میزان تغییرات ارتفاعی ناشی از زمین‌لرزه‌ها، یکی از حوزه‌های حیاتی تحقیقاتی است که از روش‌های پیشرفته سنجش از دور، به‌ویژه تداخل‌سنجی راداری بهره می‌برد. بهره‌گیری از سنجش از دور و تداخل‌سنجی راداری، اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل‌های سطح زمین در طول زمان را ممکن می‌سازد. ظهور تصاویر ماهواره‌ای سنتینل۱ به شکل قابل توجهی باعث افزایش توانایی در نظارت و کنترل سطح زمین و تغییرات ناشی از زمین‌لرزه شده است. تداخل‌سنجی راداری و تداخل‌سنجی راداری تفاضلی، ابزارهای قدرتمندی برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین به شمار می‌روند. تداخل‌سنجی راداری از تفاوت فاز بین دو یا چند تصویر راداری برای شناسایی تغییرات ناشی از بلایای طبیعی، از جمله زمین‌لرزه‌ها، استفاده می‌کند (Karimi et al., 2023). توانایی تداخل سنجی راداری تفاضلی در ارائه داده‌های فضایی با وضوح بالا آن را برای پایش فرونشست در مناطق شهری مفید و کاربردی می‌سازد. در این مناطق، حرکات زمین می‌تواند پیامدهایی مهم برای زیرساخت‌ها و ایمنی داشته باشد (Zhang et al., 2022). علاوه بر این، یکپارچه‌سازی تداخل‌سنجی با استفاده از پراکندگی‌های پایدار با تداخل‌سنجی راداری تفاضلی، باعث افزایش دقت اندازه‌گیری می‌شود. همچنین امکان شناسایی حرکات جزئی زمین که ممکن است به دلیل زلزله رخ دهد را فراهم می‌کند (Ittycheria et al., 2018). انعطاف‌پذیری روش‌های تداخل‌سنجی راداری فراتر از پایش شهری گسترش یافته و در ارزیابی فرونشست در زمینه‌های مختلف زمین‌شناسی و در مقیاس‌های گوناگون نیز به کار گرفته می‌شوند. در این راستا، مطالعات متعددی به پایش تغییرات زمین ناشی از زمین‌لرزه‌ها اختصاص یافته‌اند. به عنوان مثال، اورچاد و همکاران (Orchard et al., 2021) تغییرات سطح دریا ناشی از زلزله‌ی ۷/۸ ریشتری کایکورا در سال ۲۰۱۶ در سواحل شرقی جزیره‌ی جنوبی نیوزلند را بررسی کرده و تأثیرات آن بر زیستگاه‌های دریایی را تحلیل کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین میزان بالاآمدگی سواحل حدود ۷ متر و فرونشست در برخی مناطق به ۲ متر رسیده است. گورابی (Goorabi, 2021) در مطالعه‌ای به کمی‌سازی تغییرات ناشی از لغزش زمین کبودمله پس از زلزله ۷/۳ ریشتری سال ۱۳۹۶ ازگله کرمانشاه پرداخت. نتایج نشان داد که در اثر این لغزش، حداکثر ۲۰ متر کاهش و بیشتر از ۱۵ متر افزایش ارتفاع رخ داده است. سعد و همکاران (Saed et al., 2022) نیز تغییر شکل زمین ناشی از زلزله ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ در شهر دربندیخان و مناطق اطراف آن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که حداکثر فرونشست در مناطق مسکونی بین ۴- تا ۱۰- سانتی‌متر و جابه‌جایی شرق به غرب بین ۲ تا ۶.۴ سانتی‌متر بوده است. علاوه بر این، برخی نقاط در تاج سد دربندیخان حدود ۱۰- سانتی‌متر فرونشست داشتند. در همین راستا، اولوداره و همکاران (Oludare et al., 2023) با بررسی لغزش‌های ناشی از زلزله‌ی گورخای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

نپال در ۲۵ آوریل ۲۰۱۵، جابه‌جایی‌های عمودی زمین را بین ۰/۲۳- متر (حرکت دور شدن از ماهواره) تا ۰/۲۴ متر (حرکت به سمت ماهواره) اندازه‌گیری کردند. از سوی دیگر، گنجائیان و همکاران (Ganjaeian et al., 2023) با بهره‌گیری از روش خط مبنای کوتاه (SBAS)، اثر زمین‌لرزه دشت کرمانشاه در سال ۱۳۹۶ را مورد بررسی قرار دادند. پژوهشگران در بازه زمانی قبل و بعد از زلزله، به حداکثر فرونشست ۴۶ میلی‌متر و حداکثر بالاآمدگی ۲۲ میلی‌متر دست یافتند. ملکی و همکاران (Maleki et al., 2023) در مطالعه‌ای میزان فرونشست زمین ناشی از زلزله نوامبر ۲۰۱۷ در مناطق غرب کرمانشاه را بررسی کردند. آن‌ها جابه‌جایی عمودی را بین ۴۱/۷۲- تا ۴۲/۹۹- سانتی‌متر گزارش کرده و نرخ متوسط بالاآمدگی سالانه در راستای دید ماهواره را بین ۱۷/۵۳ تا ۳۴/۵۳ سانتی‌متر اندازه‌گیری کردند. در همین راستا، محمدحسنی و همکاران (Mohammadhasani et al., 2023) تغییرات سطح زمین پس از زلزله‌ی ۶/۱ ریشتری ۷ ژانویه ۲۰۲۲ در نوار ساحلی خلیج فارس، به ویژه در منطقه بندر خمیر را بررسی کردند. پژوهشگران بیشترین بالاآمدگی را ۱۴ سانتی‌متر در اطراف بندر خمیر و بیشترین فرونشست را ۱۲ سانتی‌متر نزدیک بندر چارک گزارش کردند. همچنین، ۱۱ روز پس از زلزله، بالاآمدگی ۳۲ سانتی‌متری در شرق و شمال بندر خمیر و فرونشست ۳۱ سانتی‌متری در اطراف بندر لنگه و بندر چارک ثبت شد. همچنین، پرتابیان (Partabian, 2023) تغییرات عمودی سطح زمین ناشی از زلزله ۵/۸ ریشتری بندر گناوه در ۲۹ فروردین ۱۴۰۰ را مورد مطالعه قرار داد. نتایج این پژوهش نشان داد که حداکثر بالاآمدگی و فرونشست به ترتیب ۱۶۵ میلی‌متر ۹ میلی‌متر و با الگوی یک بیضی دوکی‌شکل، بوده است. افتخاری (Eftekhari, 2024) تغییرات ناشی از زلزله‌ای به بزرگی ۵/۶ ریشتر به تاریخ ۲۹ بهمن ۱۳۹۹ در منطقه سی‌سخت (شهر دنا) را بررسی کرد و مشخص شد که پس از زلزله، حداکثر بالاآمدگی ۰/۱۱ متر و حداکثر فرونشست ۰/۶ متر رخ داده است. عمادعلی و همکاران (Emadali et al., 2024) جابه‌جایی‌های ناشی از زمین‌لرزه ۵/۹ ریشتری شهرستان خوی در ۸ بهمن ۱۴۰۱ را تحلیل کردند. نتایج نشان داد در راستای خط دید ماهواره، تغییرات برای تصاویر صعودی و نزولی به ترتیب ۳۲- و ۱۱ میلی‌متر به دست آمده است. دوغان‌آلپ و همکاران (Doğanalp et al., 2024) جابه‌جایی‌های ناشی از زمین‌لرزه در فوریه ۲۰۲۳ در هاتای ترکیه را پایش کرده و تغییراتی حدود ۱ متر در ۶ فوریه و ۱۵ سانتی‌متر در ۲۰ فوریه را ثبت کردند. پس از آن، ابراهیم و همکاران (Ibrahim et al., 2025) نیز در همان رخداد زلزله ۷/۸ ریشتری ترکیه جابه‌جایی‌های عمودی بین ۰/۴۲- تا ۰/۷۱ متر را شناسایی کردند. علاوه بر این، آرگو گالیه و آتریون (Argo Galih and Atriyon, 2025) در زلزله ۵/۶ ریشتری سیانجور اندونزی جابه‌جایی‌های عمودی تا حدود ۱۴- تا ۷/۵ سانتی‌متر را مشاهده کردند. لی و همکاران (Lee et al., 2025) تغییر شکل سطحی مرتبط با زلزله ۶/۴ ریشتری تایوان را بررسی کرده و بالاآمدگی حدود ۵ سانتی‌متر و جابه‌جایی افقی ۳ تا ۴ سانتی‌متر را گزارش کردند. همچنین، کل‌میشی و همکاران (Kalmishi et al., 2025) به بررسی تغییرات ارتفاعی شهرستان دهلران ناشی از زمین‌لرزه در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ پرداختند. بر اساس نتایج این مطالعه، بیشترین میزان فرونشست در نواحی شمالی رخ داده و در بخش‌های جنوبی و دشت‌ها، بالاآمدگی مشاهده شده است. در این بازه زمانی حداکثر میزان فرونشست ۱۰ سانتی‌متر و بیشترین بالاآمدگی نیز ۳ سانتی‌متر گزارش شده است. در نهایت، حسین و همکاران (Hussain et al., 2025) تغییر شکل زمین در شهر کویته پاکستان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این منطقه لرزه‌خیز بوده و فرونشست آن ناشی از ترکیب فعالیت‌های تکتونیکی و برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی است، به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

گونه‌ای که در مناطق شهری نرخ فرونشست تا ۱۶۶- میلی‌متر در سال و در ارتفاعات اطراف بالاآمدگی تا ۴۸ میلی‌متر در سال رخ داده است.

فرونشست زمین می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی همچون حرکات تکتونیکی، استخراج آب‌های زیرزمینی و روانگرایی خاک باشد. تصاویر ماهواره‌ای سنتینل۱ و تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری امکان پایش دقیق و مداوم میزان فرونشست ناشی از این عوامل را فراهم کرده و باعث درک بهتر روندهای تغییرات سطح زمین می‌شوند. به عنوان نمونه، شفیعی و میلان (Shafiei and Milan, 2023) میزان این پدیده را در دشت طلحه، فاریاب و کلمه در استان بوشهر بررسی کرده و دریافتند که حداکثر مقدار فرونشست طی ۳۷۲ روز حدود ۰/۰۶۵ سانتی‌متر بوده است. در همین راستا، خالویی و علمیزاده (Khalooei and Elmizadeh, 2023) تغییرات سطح زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در دشت کازرون را بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ تحلیل کرده و بیشترین میزان فرونشست را در اطراف مقبره شیخ محمد، بین ۸۰ تا ۹۰ میلی‌متر در سال، ثبت کردند. حسین زاده و همکاران (Hosseinzadeh et al., 2023) با بررسی تأثیر تخلیه آبخوان بر فرونشست دشت مرکزی شهرستان قائن، روند افزایشی این پدیده را بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ نشان دادند، به‌گونه‌ای که نرخ سالانه آن از ۲/۶ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۷ به ۷/۸ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۰ افزایش یافت. در مطالعاتی گسترده‌تر، جولزاریکا (Julzarika, 2023) پویایی فرونشست زمین را در ۱۶ شهر مالزی، از جمله جوهور بهرو، کوالالامپور و کوتا بهرو، ارزیابی کرده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که جوهور بهرو با فرونشستی معادل ۲۴/۵ سانتی‌متر، بیشترین میزان آسیب‌پذیری را در میان مناطق مورد بررسی داشته است. از سوی دیگر، هلالی و همکاران (Helali et al., 2024) تغییرات ارتفاعی زمین در دشت سمنان را در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ مورد مطالعه قرار داده و حداکثر نرخ سالانه فرونشست را ۶ سانتی‌متر گزارش کردند. این مطالعات نمایانگر کاربرد تصاویر راداری در محاسبه جابه‌جایی‌ها و تغییرات ارتفاعی سطح زمین است.

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که شیوه‌های تداخل‌سنجی راداری و داده‌های ماهواره‌ای سنتینل۱ در مطالعات مختلفی برای پایش تغییر شکل‌های زمین ناشی از زمین‌لرزه‌ها و نیز فرونشست‌های مرتبط با برداشت آب‌های زیرزمینی به کار گرفته شده‌اند. با این حال، هیچ پژوهشی به طور مشخص به تحلیل تغییرات ناشی از زمین‌لرزه ۴ فروردین ۱۴۰۲ خوی نپرداخته است. از این رو، مطالعه حاضر به مشخص کردن میزان تغییرات ارتفاعی زمین در اثر این رویداد لرزه‌ای می‌پردازد. همچنین، مقادیر تغییر شکل به کلاس‌های مشخص طبقه‌بندی و مساحت هر طبقه برای تحلیل بیشتر، محاسبه شده است. این رویکرد، نمایش دقیقی از الگوی تغییرات سطح زمین در اثر زلزله ۵/۶ ریشتری شهر خوی ارائه می‌دهد و شدت آثار زمین‌لرزه در محدوده مطالعه را نشان می‌دهد.

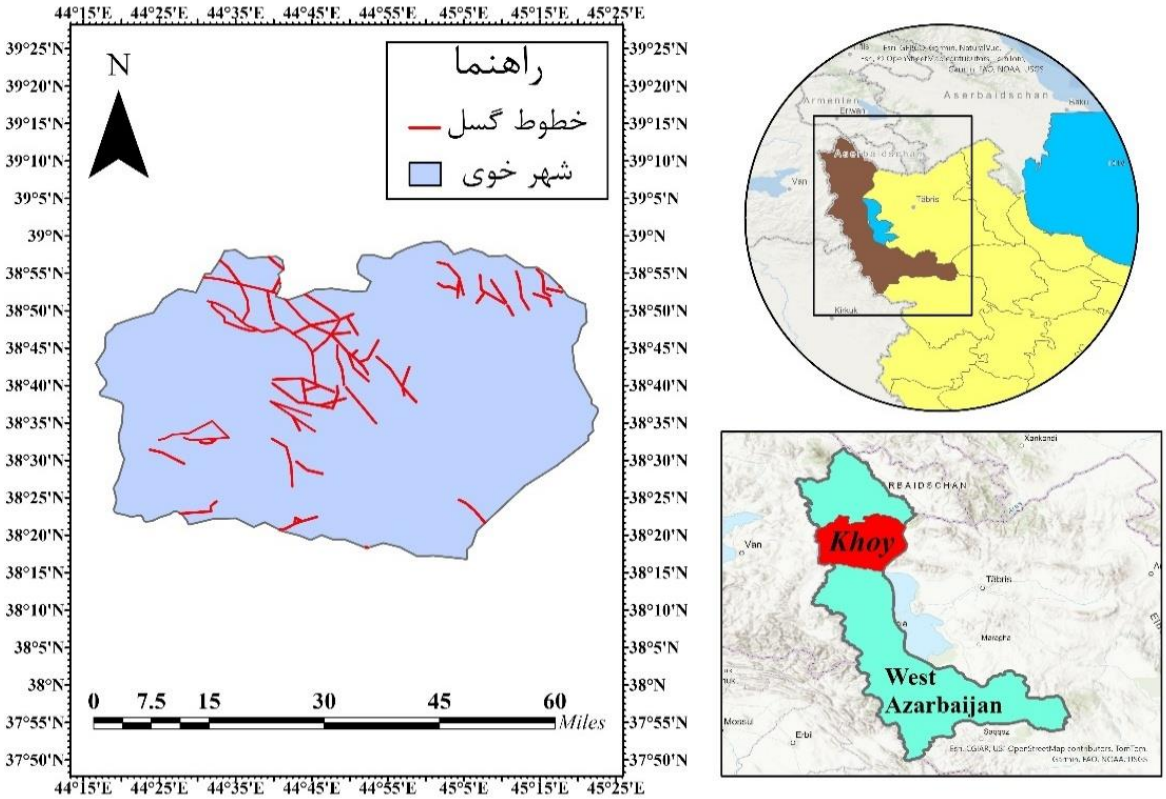
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهر خوی در شمال غرب ایران و در استان آذربایجان غربی واقع شده است. این شهر در مختصات جغرافیایی ۳۸/۵۵۲۵ درجه شمالی و ۴۴/۹۴۷۸ درجه شرقی قرار دارد. خوی با اقلیمی معتدل و نیمه‌خشک، تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد را تجربه می‌کند. این منطقه در نزدیکی مرز ترکیه قرار گرفته و به عنوان یکی از شهرهای تاریخی ایران شناخته می‌شود. این موقعیت جغرافیایی، علاوه بر تأثیرات لرزه‌ای، موجب اهمیت ژئومورفولوژیکی و مطالعاتی این منطقه شده است. همچنین این منطقه شامل دشت‌های مرتفع و دامنه‌های کوهستانی است که بسیاری از روستاهای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

پرجمعیت اطراف شهر را در بر می‌گیرد. مناطق حاصل خیز کشاورزی، رودخانه‌های فصلی و آب‌وهوای معتدل از ویژگی‌های برجسته خوی است. خوی در منطقه گسل‌های خوی-چالدران و ارومیه واقع شده که فعالیت‌های لرزه‌ای در آن نقش مهمی در تغییرات سطح زمین ایفا می‌کنند و در شکل (۱) به نمایش گذاشته شده است. این شهر به عنوان یکی از شهرهای زلزله‌خیز در ایران به شمار می‌رود و در سال‌های اخیر شاهد زمین‌لرزه و پس‌لرزه‌های زیادی بوده است. بر اساس گزارش مرکز لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک، در فروردین ۱۴۰۲، ۴۴۳ زمین‌لرزه در ایران به ثبت رسید. در این میان، زمین‌لرزه به بزرگی ۵/۶ ریشتر در شهر خوی در ۴ فروردین بزرگ‌ترین زمین‌لرزه ثبت شده در اولین ماه سال، به شمار می‌رود. این داده‌ها نشان‌دهنده فعالیت لرزه‌خیزی بالا در این منطقه و نیاز به مطالعات دقیق‌تر در حوزه بررسی زمین‌لرزه‌ها و اثرات آن‌ها است.



شکل ۱. نمایش محدوده منطقه مطالعه و نقشه خطوط گسل آن

Fig. 1. Displaying the study area boundaries and the map of its fault lines

داده‌های مورد استفاده

سنتینل۱ با استفاده از رادار دهانه ترکیبی (SAR) در باند C، امکان تصویربرداری در تمامی شرایط آب و هوایی و در هر زمان از شبانه‌روز را فراهم می‌کند. برای ارزیابی میزان تغییرات ارتفاعی در شهر خوی، از تصاویر راداری ثبت شده توسط سنجنده سنتینل-۱A استفاده شد که جدول (۱) اطلاعات دقیق تصاویر مورد استفاده را نشان می‌دهد. در این پژوهش، تصاویر مربوط به بازه‌های زمانی پیش و پس از زلزله انتخاب شدند که نزدیک‌ترین تاریخ ممکن به وقوع این زمین‌لرزه را پوشش می‌دهند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

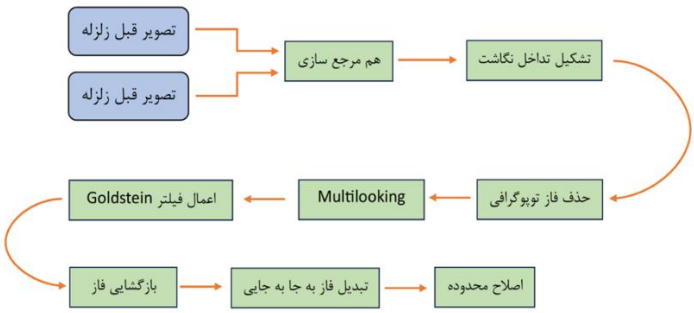
جدول ۱. مشخصات تصاویر راداری به کار گرفته شده در پژوهش

Table 1. Specifications of the radar images used in the research

نام تصاویر	S1A_IW_SLC__1SDV_20230322T030125_20230322T030152_047751_05BC88_ACE1.SAFE S1A_IW_SLC__1SDV_20230403T030125_20230403T030152_047926_05C260_24D7.SAFE	
تاریخ اخذ تصاویر	2023-03-22	2023-04-03
باند تصویربرداری	C-SAR	C-SAR
حالت تصویربرداری	IW	IW
سطح پردازش	SLC	SLC
قطبش مورد پردازش	VV	VV
جهت‌گیری مدار ماهواره	DESCENDING	DESCENDING
همبستگی مدل‌سازی شده	1.00	0.93

روش تحقیق

مراحل انجام این تحقیق در شکل (۲) نشان داده شده است که در ادامه این مراحل توضیح داده خواهد شد.



شکل ۲. مراحل انجام تحقیق

Fig. 2. Steps of conducting research

مطابق شکل (۲)، گام نخست انتخاب و تهیه تصاویر راداری در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. برای انتخاب یک زوج تصویر راداری عوامل زیادی مانند فرکانس سنجنده، پایه مکانی، پایه زمانی و همپوشانی مکانی در جهت حرکت سنجنده باید در نظر گرفته شوند. یک زوج تصویر، زمانی قابلیت تداخل‌سنجی دارند که پراکنش انرژی بازگشتی از سطح زمین حداقل توسط دو آنتن پوشش داده شده باشد یا در دو تصویر راداری ناحیه مشترکی وجود داشته باشد. یکی از مهم‌ترین عوامل، پایه مکانی (Spatial Baseline) است که به فاصله عمود بر خط دید ماهواره بین دو مسیر ثبت تصاویر اشاره دارد. این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

فاصله باید کمتر از یک مقدار بحرانی مشخص باشد تا وابستگی مکانی میان تصاویر حفظ شود. در صورتی که فاصله پایه مکانی بیش از مقدار بحرانی باشد، وابستگی مکانی از بین رفته و انجام تداخل‌سنجی ممکن نخواهد بود (Zebker and Villasenor, 1992). عامل دیگر، پایه زمانی (Temporal Baseline) است که به فاصله زمانی بین دو تصویر اشاره دارد. با افزایش این فاصله، احتمال تغییرات فیزیکی در اهداف زمینی افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات در پراکندگی الکترومغناطیسی ذرات موجود در هر پیکسل تصویر، به مرور زمان می‌تواند موجب کاهش همبستگی سیگنال‌ها و افزایش نویز در نتایج شود. بنابراین، کاهش فاصله زمانی میان تصاویر نقش مهمی در کیفیت داده‌ها، ایفا می‌کند (Hanssen, 2001). همچنین، همپوشانی مکانی تصاویر یکی دیگر از فاکتورهای اساسی است. علاوه بر این، پارامترهایی همچون فرکانس سنجنده، شماره مسیر (Track) و شماره مدار (Orbit) نیز در انتخاب تصاویر نقش مهمی دارند (Ferretti et al., 2002). فرآیند انتخاب دقیق تصاویر باعث می‌شود که مراحل پردازش تداخل‌سنجی به‌درستی انجام شده و نتایج حاصل از تحلیل تغییرات سطح زمین از دقت و صحت بالایی برخوردار باشد.

در ادامه فرایند هم مرجع سازی (Coregistration) تصاویر انجام می‌شود. هم مرجع‌سازی فرآیندی است که در آن دو یا چند تصویر راداری از یک منطقه، که در زمان‌ها یا زوایای مختلف گرفته شدند، به‌طور دقیق بر روی یکدیگر تطبیق داده می‌شوند. این مرحله برای اطمینان از هم‌ترازی پیکسل‌های متناظر در تصاویر مختلف ضروری است. در واقع، هم مرجع‌سازی صحیح، باعث می‌شود هر پیکسل در تصاویر مختلف، نمایانگر همان ویژگی‌های سطح زمین باشد، که این امر برای محاسبه دقیق اختلاف فاز و برآورد جابه‌جایی‌ها اهمیت دارد. در تداخل‌سنجی راداری، هم مرجع‌سازی دقیق تصاویر یکی از مراحل حیاتی است، زیرا هرگونه عدم تطابق می‌تواند منجر به خطا در محاسبه اختلاف فاز و در نتیجه اشتباه در برآورد جابه‌جایی‌های سطح زمین شود (Ghannadi et al., 2019). در تصاویر راداری، تغییرات ارتفاعی می‌تواند باعث جابه‌جایی‌های مکانی شود. یکی از روش‌های رایج برای هم مرجع‌سازی استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) است که برای تنظیم و هم‌تراز کردن تصاویر به کار می‌رود. خطا در انجام هم مرجع‌سازی تصاویر می‌تواند تأثیر منفی بر کیفیت تداخل‌نگاشت حاصل داشته باشد. دقت هم مرجع‌سازی را می‌توان با روش‌های مختلف و پیشرفته‌ای مانند ESD (Enhanced Spectral Diversity) بهبود بخشید. این روش با بهره‌گیری از اطلاعات اختلاف طیفی بین دسته موج‌های (Burst) متوالی، می‌تواند دقت هم مرجع‌سازی را به میزان زیادی افزایش دهد. ESD، تغییر موقعیت پیکسل‌ها را در جهت آزیموت (Azimuth Shift) با استفاده از تغییرات فرکانس داپلر و اختلاف فاز دقیق بین تصاویر تخمین می‌زند. رابطه (۱) برای تخمین جابه‌جایی دقیق آزیموت با استفاده از روش ESD ارائه شده است:

$$\widehat{\Delta y}=\arg\min_{\Delta y}\left\{\left|\arg\sum_{p} e^{j\left(\phi_{ESD,p}-2\pi\Delta f_{DC,p}^{ovl}\frac{\Delta y}{f_{az}}\right)}\right|\right\} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، $\widehat{\Delta y}$ جابه‌جایی تخمین زده شده در راستای آزیموت می‌باشد. تابع $\underset{\Delta y}{\operatorname{argmin}}$ نیز در جست‌وجوی پیدا کردن مقداری از متغیر است که باعث می‌شود عبارت داخل تابع به کمترین مقدار خود برسد. همچنین p نماد پیکسل، $\phi_{ESD,p}$ مقدار فاز ESD در پیکسل p، $\Delta f_{DC,p}^{ovl}$ اختلاف فرکانس مرکز داپلر در ناحیه همپوشانی برای پیکسل p و $\frac{\Delta y}{f_{az}}$ نسبت تغییرات شیفت آزیموتی به فرکانس نمونه‌برداری آزیموتی است (Yagüe-Martínez et al., 2016). هدف رابطه (۱) یافتن تغییراتی است که با توجه به اختلافات فرکانس داپلر، بهترین هم‌ترازی را بین دو تصویر ایجاد می‌کند.

مرحله بعد تشکیل تداخل‌نگاشت (Interferogram) است که یکی از مراحل اساسی و کلیدی در پردازش داده‌های تداخل‌سنجی راداری می‌باشد. تداخل‌نگاشت نتیجه ترکیب فاز دو تصویر راداری با استفاده از اختلاف فاز بین آن‌ها، است. این اختلاف فاز می‌تواند ناشی از عوامل متعددی مانند تغییرات توپوگرافی، تغییرات پوسته زمین (مانند جابه‌جایی‌های ناشی از زلزله)، تغییرات مداری ماهواره و اختلالات جوی باشد (Hanssen, 2001). هدف از تشکیل تداخل‌نگاشت، استخراج تغییرات دقیق سطح زمین از داده‌های راداری است. پس از هم مرجع‌سازی دو تصویر، برای به دست آوردن مقدار هر پیکسل در تداخل‌نگاشت، پیکسل متناظر در تصویر مرجع در مزدوج مختلط پیکسل متناظر در تصویر تابع ضرب می‌شود (Saed et al., 2022). فاز تداخل‌نگاشت، اختلاف فاز بین دو تصویر راداری و دامنه آن، حاصل‌ضرب دامنه‌های همان تصاویر می‌باشد (Khalooei and Elmizadeh, 2023). رابطه (۲) نحوه محاسبه مقدار پیکسل در تداخل‌نگاشت را بیان می‌کند:

$$P(X,Y)=S_1(x,y)\times S_2(x,y) \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، $P(X,Y)$ مقدار پیکسل در تداخل‌نگاشت در موقعیت (X,Y)، $S_1(x,y)$ مقدار پیکسل در تصویر مرجع در موقعیت (x,y) و $S_2(x,y)$ مزدوج مختلط مقدار پیکسل در تصویر تابع در موقعیت (x,y) می‌باشد (Saed et al., 2022). تداخل‌نگاشت حاصل شامل فازهایی مرتبط با تغییرات سطح زمین است که به سه مؤلفه اصلی فاز توپوگرافی، فاز مداری و فاز ناشی از اختلالات جوی تقسیم می‌شود.

فاز توپوگرافی ناشی از ارتفاعات طبیعی سطح زمین، فاز مداری ناشی از تفاوت مسیرهای ماهواره در دو گذر و فاز ناشی از اختلالات جوی به دلیل تغییرات در شرایط اتمسفری بین دو زمان ثبت تصویر است. برای کسب نتایج دقیق، تمامی فازهای اضافی (مانند فازهای مداری و جوی) باید در ادامه فرآیند پردازش تداخل‌سنجی حذف شوند (Karimi et al., 2023). تداخل‌نگاشت نهایی شامل دو بخش اصلی Phase برای نمایش اختلاف فاز حاصل از پردازش و Coherence برای مشخص شدن کیفیت همبستگی بین دو تصویر راداری، است. تصاویر حاصل ابتدا به‌صورت نوارهای موازی در کنار یکدیگر قرار گرفته و سپس طی مرحله‌ای به نام Debursting به یک تصویر یکپارچه تبدیل می‌شوند. این تصویر نهایی، بستری مناسب برای تحلیل تغییرات سطح زمین و بررسی دقیق‌تر پدیده‌های جغرافیایی ارائه می‌دهد (Shafiei and Milan, 2023).

در ادامه، فرآیند حذف اثر توپوگرافی صورت می‌گیرد. حذف اثر توپوگرافی یکی از مراحل در پردازش تداخل‌سنجی راداری است که برای استخراج دقیق جابه‌جایی‌های سطح زمین انجام می‌شود. این فرآیند شامل حذف اطلاعات مرتبط با ارتفاع طبیعی زمین از تداخل‌نگاشت است تا تنها تغییرات ناشی از جابه‌جایی‌های سطح زمین باقی بماند (Hanssen, 2001). با استفاده از مدل‌های ارتفاعی، یک تداخل‌نگاشت شبیه‌سازی‌شده بر اساس ارتفاعات منطقه تولید و سپس این اطلاعات را از تداخل‌نگاشت اصلی حذف می‌شود (Goorabi, 2021). نتیجه نهایی، تداخل‌نگاشتی با فاز یکپارچه و عاری از اثرات توپوگرافی است. این مرحله حائز اهمیت می‌باشد، زیرا حذف اثر توپوگرافی باعث بهبود دقت در اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها و تحلیل تغییرات سطح زمین می‌شود. عدم حذف این اثرات منجر به نتایج نادرست و کاهش کیفیت داده‌های پردازشی می‌گردد (Karimi et al., 2023).

بعد از این مرحله اقدام به اعمال Multilooking و فیلتر Goldstein می‌گردد. در تصاویر راداری، نویزهای مختلفی وجود دارند که می‌توانند کیفیت داده‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. یکی از مهم‌ترین انواع نویز در این تصاویر، نویز اسپکل (Speckle) است. این نویز به دلیل انعکاس پراکنده امواج

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

راداری از سطح زمین ویژگی‌های غیریکنواخت آن، ایجاد می‌شود و به‌صورت تصادفی در تصویر ظاهر می‌شود. برای کاهش اثرات این نویز، معمولاً از تکنیک‌های فیلترینگ و هموارسازی استفاده می‌شود تا همبستگی وضوح تصاویر افزایش یابد (Saxena and Rathore, 2013). Multilooking و فیلتر Goldstein از مراحل مهم برای بهبود کیفیت داده‌ها، کاهش نویز، بهبود تحلیل تغییرات و افزایش دقت نتایج نهایی، محسوب می‌شوند. فیلتر Goldstein نیز یکی از ابزارهای اساسی برای حذف نویزهای غیر همدوس و بهبود کیفیت فاز تداخل‌نگاشت است. این فیلتر برای حذف نویز ناشی از تغییرات جوی، نویز اسپکل و عوامل هندسی استفاده می‌شود. ویژگی‌های فیلتر Goldstein شامل توانایی کاهش نویز اسپکل است که نویزهای غیر همدوس موجود در تداخل‌نگاشت را کاهش داده و افزایش همبستگی فاز را به همراه دارد. این فیلتر برای کاهش نویز و حفظ جزئیات تصویر، با تنظیم پهنای باند تطبیقی در مناطق مختلف، عملکرد خود را بهینه می‌کند. در مناطقی با همبستگی بالا، از پهنای باند کوچک‌تر و در مناطقی با همبستگی پایین از پهنای باند بزرگ‌تر استفاده می‌شود. علاوه بر این، دقت بازگشایی فاز (Phase Unwrapping) را افزایش داده و با بهبود کیفیت فاز، خطاها را به حداقل می‌رساند. یکی دیگر از نتایج استفاده از فیلتر Goldstein، تولید تصویر همدوسی (Coherence) است. این تصویر، شاخصی از کیفیت همبستگی سیگنال‌های بازتابی در دو تصویر راداری بوده و مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است. مقدار یک نشان‌دهنده همبستگی کامل و داده‌های با کیفیت بالا است، در حالی که مقدار صفر بیانگر عدم همبستگی و نامناسب بودن داده‌ها برای تحلیل است (Karimi et al., 2023). همچنین، Multilooking یک تکنیک اساسی برای کاهش نویز اسپکل در تصاویر راداری است که با ترکیب پیکسل‌های مجاور، این نویز را کاهش داده و کیفیت تصویر را افزایش می‌دهد. این فرآیند، کیفیت بصری تصاویر را بهبود بخشیده و نمایش و تحلیل داده‌ها را ساده‌تر می‌کند اما یکی از نتایج آن کاهش وضوح مکانی تصاویر است (Hanssen, 2001).

بعد از حذف نویزها و فازهای اضافی، برای به دست آوردن جابه‌جایی‌های سطح، فرآیند بازگشایی فاز انجام می‌شود. بازگشایی فاز، به عنوان اساسی‌ترین مرحله در پردازش تداخل‌سنجی راداری، داده‌های فازی پیچیده شده را که توسط سنسورهای تداخل‌سنجی راداری اندازه‌گیری می‌شوند، به داده‌های فازی پیوسته و دقیقی تبدیل می‌کند که نمایانگر مقدار واقعی فاز هستند. این فرآیند برای استخراج اطلاعات دقیق در مورد ارتفاع یا تغییر شکل سطح زمین ضروری است. سنسورهای تداخل‌سنجی راداری نمی‌توانند فاز واقعی را به طور مستقیم اندازه‌گیری کنند، بلکه فقط فاز پیچیده شده را اندازه‌گیری می‌کنند که مقداری بین $-\pi$ تا $+\pi$ دارد. فاز پیچیده شده (Phase Wrapped)، در واقع فاز مطلق (Absolute Phase) است که ابهاماتی به صورت مضربی از 2π در آن وجود دارد. هدف بازگشایی فاز، حذف این ابهامات و تبدیل فاز پیچیده شده به فاز مطلق است. رابطه بین فاز پیچیده شده و فاز مطلق با استفاده از عدد ابهام به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$\varphi(s)=\psi(s)-2k(s)\pi \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، $\varphi(s)$ فاز پیچیده شده پیکسل s است که توسط سنسورهای تداخل‌سنجی راداری اندازه‌گیری می‌شود و مقداری بین $-\pi$ تا $+\pi$ دارد. $\psi(s)$ فاز مطلق پیکسل s است و نمایانگر مقدار واقعی فاز است. $k(s)$ عدد ابهام پیکسل s است و این عدد صحیح نشان‌دهنده تعداد دورهای 2π است که باید به فاز پیچیده شده اضافه شود تا فاز مطلق به دست آید. بازگشایی فاز در پی تعیین عدد ابهام برای هر پیکسل و محاسبه فاز مطلق از فاز پیچیده شده، است. در واقع،

بازگشایی فاز یک مسئله معکوس بدوضع (Ill-posed Problem) است، به این معنی که برای یک فاز پیچیده شده معین، چندین فاز مطلق با اعداد ابهام مختلف وجود دارد. برای حل این ابهام، باید فرضیاتی مانند پیوستگی فاز (Phase Continuity Assumption) اعمال شود. این شرط بیان می‌کند که اختلاف فاز مطلق بین دو پیکسل مجاور باید کمتر از π باشد. برای بازگشایی فاز، روش‌های مختلفی وجود دارد که به‌طور کلی به دو دسته الگوریتم‌های مبتنی بر همسایگی و الگوریتم‌های مبتنی بر جریان کمینه تقسیم می‌شوند. یکی از رایج‌ترین روش‌ها، استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر همسایگی است که فازهای متصل به هم را با استفاده از ویژگی‌های همسایگی در تصاویر راداری بازگشایی می‌کنند. این روش‌ها به‌ویژه زمانی مفید هستند که تغییرات فاز به‌طور تدریجی و هموار در فضا پخش شدند (Yu et al., 2019). در الگوریتم کمینه‌سازی، هدف یافتن فاز مطلقی است که مقدار تابع هزینه را کمینه می‌کند و یا به عبارت دیگر یافتن فازی که با کمترین میزان خطا، با داده‌های اندازه‌گیری شده، سازگاری دارد. برای پیدا کردن کمترین مقدار تابع هزینه، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی که مقاومت بیشتری در برابر نویز و ناپیوستگی‌های فاز دارند، استفاده می‌شود. در مواقعی که فاز تغییرات شدیدی را نشان می‌دهد یا دارای نویز است، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و الگوریتم‌های مبتنی بر انرژی برای بازگشایی استفاده می‌شود (Saini and Ramanujam, 2023).

بعد از بازگشایی فاز اقدام به تبدیل فاز به جابه‌جایی می‌گردد. در تداخل‌سنجی راداری، تبدیل فاز به جابه‌جایی برای استخراج اطلاعات دقیق از تغییرات سطح زمین انجام می‌شود، که شامل محاسبه اختلاف فاز بین تصاویر راداری ثبت شده در زمان‌های مختلف و تبدیل آن به مقادیر جابه‌جایی سطح زمین است. تبدیل فاز به جابه‌جایی امکان تحلیل دقیق تغییرات سطح زمین را فراهم می‌کند و در مطالعات مختلفی مانند زلزله‌شناسی، فرونشست زمین و دیگر پدیده‌های ژئودینامیکی کاربرد دارد. پس از حذف اثرات توپوگرافی، خطاهای مداری و اثرات جوی، فاز باقی‌مانده به جابه‌جایی در امتداد خط دید سنجنده (Line of sight) تبدیل می‌شود. این تبدیل با استفاده از رابطه (۴) انجام می‌گیرد:

$$\Delta d=\Delta\phi\cdot\frac{\lambda}{4\pi} \qquad (۴)$$

که در آن Δd جابه‌جایی در امتداد خط دید سنجنده، λ طول موج رادار و Δϕ اختلاف فاز است. با استفاده از این رابطه، می‌توان اختلاف فاز را به جابه‌جایی‌های میلی‌متری یا سانتی‌متری تبدیل کرد (Djenaliev et al., 2022 ; Saed et al., 2022). نهایتاً اصلاح محدوده (Doppler Range Terrain Correction) صورت می‌گیرد. اصلاح محدوده در پردازش داده‌های تداخل‌سنجی به منظور اصلاح هندسی تصاویر راداری و نمایش آن‌ها در یک سیستم مختصات جغرافیایی استاندارد انجام می‌شود. این مرحله باعث حذف اعوجاج‌های هندسی ناشی از زاویه دید مایل رادار و توپوگرافی سطح زمین می‌شود و موقعیت دقیق جغرافیایی پیکسل‌ها را به نقشه‌های مرجع منتقل می‌کند. در تصاویر راداری، به دلیل زاویه دید خاص رادار، اعوجاج‌هایی مانند فشردگی (Foreshortening)، سایه‌اندازی (Shadowing) و افرازش (Layover) رخ می‌دهد که مکان پیکسل‌ها را از موقعیت واقعی منحرف می‌کند. در این تحقیق برای اصلاح محدوده، حذف اعوجاجات فوق و بدست آوردن تصویر با مختصات جغرافیایی صحیح از الگوریتم Range Doppler استفاده شده است. در این فرآیند، ابتدا توپوگرافی منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی شبیه‌سازی می‌شود. سپس، پارامترهای مداری ماهواره، زاویه دید و زمان ثبت تصویر برای تعیین دقیق موقعیت جغرافیایی هر پیکسل به کار می‌رود. در نهایت، مختصات راداری به یک سیستم مختصات

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

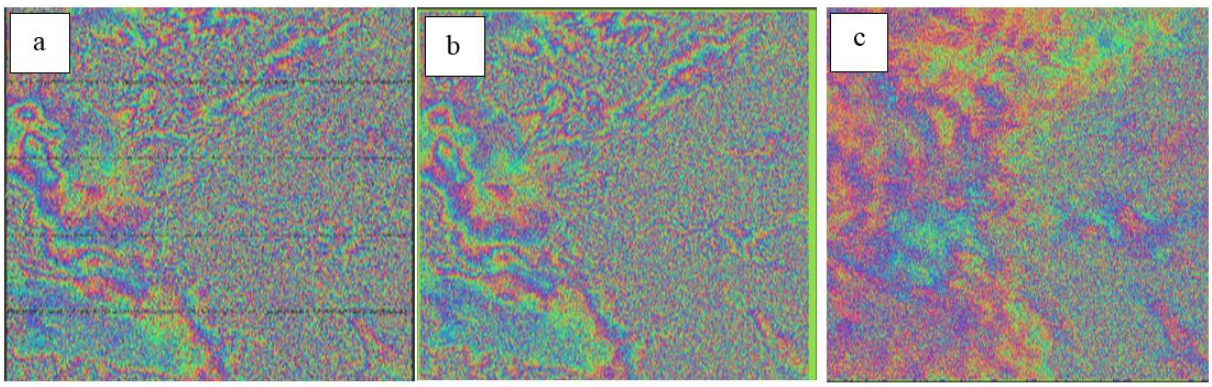
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

استاندارد مانند WGS84 تبدیل می‌شود. این اقدام به افزایش دقت مکانی تصاویر، هم‌تراز سازی آن‌ها با نقشه‌های مرجع و تفسیر بهتر داده‌ها کمک می‌کند (Small, 2011). این فرآیند نقشی حیاتی در اطمینان از صحت و دقت داده‌های حاصل از تداخل‌سنجی راداری ایفا می‌کند. از نقشه به دست آمده در این مرحله می‌توان برای نمایش و تحلیل در نرم افزار Google Earth بهره گرفت. همچنین می‌توان با رسم یک پروفیل بر روی خروجی، میزان جابه‌جایی‌های عمودی را در طول آن پروفیل به صورت نمودار به نمایش گذاشت.

نتایج

برای پیاده‌سازی روش تحقیق، از نرم‌افزار SNAP (نسخه ۸.۰.۰) جهت پردازش داده‌های تداخل‌سنجی راداری، نرم‌افزار Google Earth Pro (نسخه ۷.۳.۴) برای مشاهده و تحلیل موقعیت‌ها در ارتباط با عوارض و نرم‌افزار Arcgis Pro نسخه (۲.۸.۶) برای طبقه‌بندی و محاسبه مساحت استفاده گردیده است.

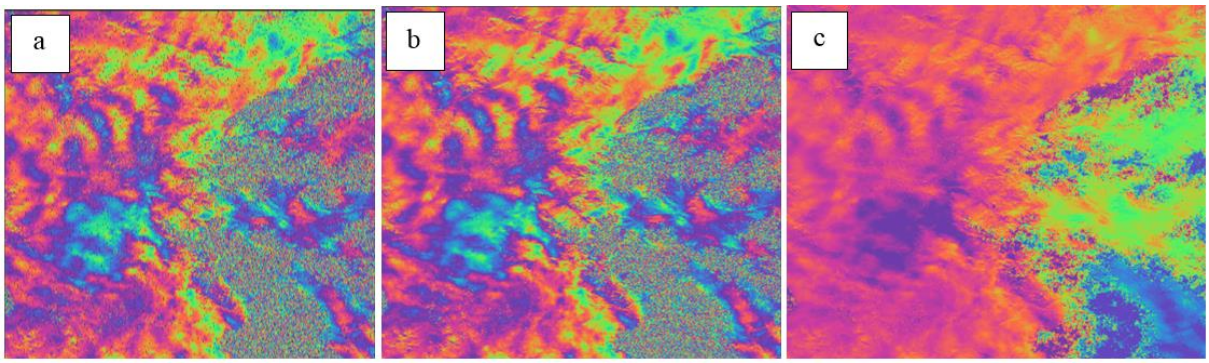
همانگونه که در بالا اشاره گردید تصاویر مورد استفاده در این مطالعه، مربوط به ماهواره سنتینل۱ می‌باشند. تصویر اول به تاریخ دوم فروردین به عنوان تصویر مرجع (Master) و تصویر دوم به تاریخ چهاردهم فروردین به عنوان تصویر تابع (Slave) انتخاب شده است. چون حالت تصویربرداری داده‌ها به صورت IW است پس ترکیبی از اطلاعات و دامنه و فاز خواهد بود. در ابتدا فرآیند هم مرجع‌سازی تصاویر صورت گرفت و بعد از این مرحله، فرآیند تداخل‌نگاشت انجام گرفت. در شکل (۳-a) اختلاف فاز بین دو تصویر راداری قبل و بعد از زلزله محاسبه شده و تداخل‌نگاشت ایجاد شده است. در شکل‌های (۳-b) و (۳-c) به ترتیب عملیات Debursting و حذف اثر توپوگرافی انجام شده است.



شکل ۳. a) نتیجه حاصل از تداخل نگاشت، b) نتیجه حاصل از Debursting، c) نتیجه حاصل از حذف اثر توپوگرافی

Fig. 3. a) The result obtained from the interferogram, b) The result obtained from Debursting, c) The result obtained from topographic effect removal

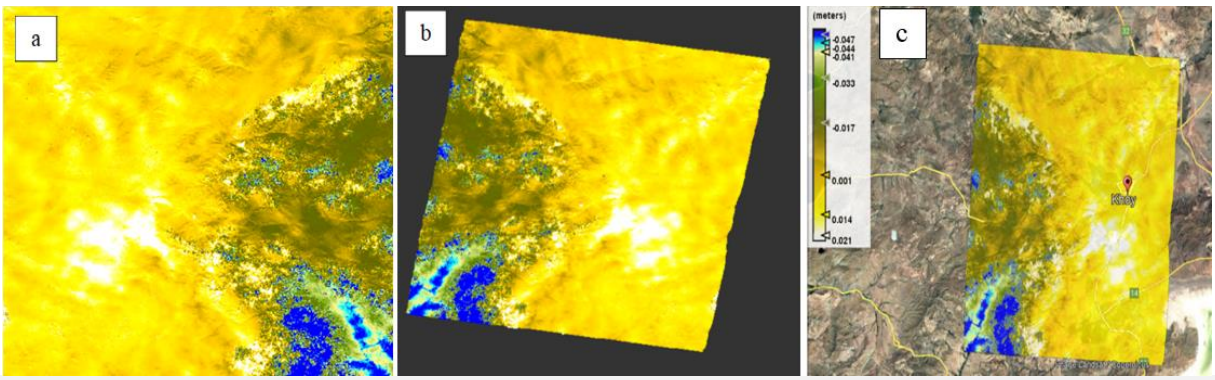
در ادامه فرآیند، اعمال فیلتر Goldstein انجام گرفت که نتیجه حاصل از آن در شکل (۴-a) به نمایش درآمده است. سپس، عملیات Multilooking انجام شد و نتیجه آن در شکل (۴-b) مشاهده می‌شود. پس از این مرحله، بازگشایی فاز با استفاده از الگوریتم مبتنی بر جریان کمینه انجام شد که نتیجه آن در شکل (۴-c) نشان داده شده است.



شکل ۴. a) تصویر خروجی از اعمال فیلتر Goldstein ، b) خروجی مرحله Multilooking، c) نتیجه حاصل از مرحله بازگشایی فاز

Fig. 4. a) The output image from applying the Goldstein filter, b) The output of the Multilooking stage, c) The result obtained from the phase unwrapping stage

در ادامه، فازهای به‌دست‌آمده مطابق شکل (۵-a) به جابه‌جایی تبدیل شدند تا میزان فرونشست و بالاآمدگی سطح مشخص گردد. سپس تصاویر راداری در شکل (۵-b) به روش الگوریتم Range Doppler به یک سیستم مختصات جغرافیایی استاندارد تبدیل شدند. همچنین، شکل (۵-c) میزان فرونشست به‌دست آمده را در محیط Google Earth را به نمایش گذاشته است.



شکل ۵. a) تصویر حاصل از تبدیل فاز به جا به جایی، b) نتیجه نهایی به دست آمده از اصلاح محدوده، c) نمایش فرونشست در نرم افزار Google Earth

Fig. 5. a) The image obtained from phase-to-displacement conversion, b) The final result obtained from range correction, c) Subsidence visualization in Google Earth

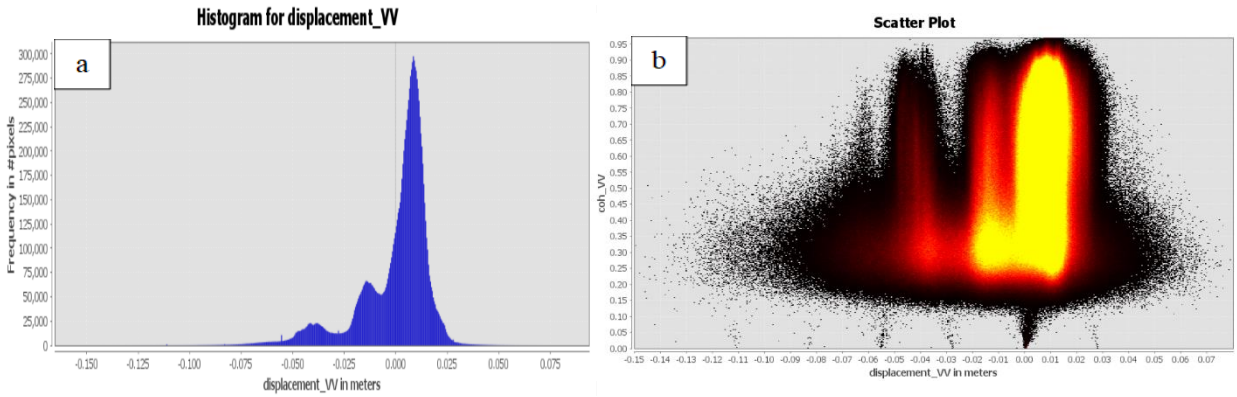
برای تحلیل میزان تغییرات ارتفاعی زمین، نمودار هیستوگرام و پراکندگی به ترتیب در شکل‌های (۶-a) و (۶-b) رسم شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]

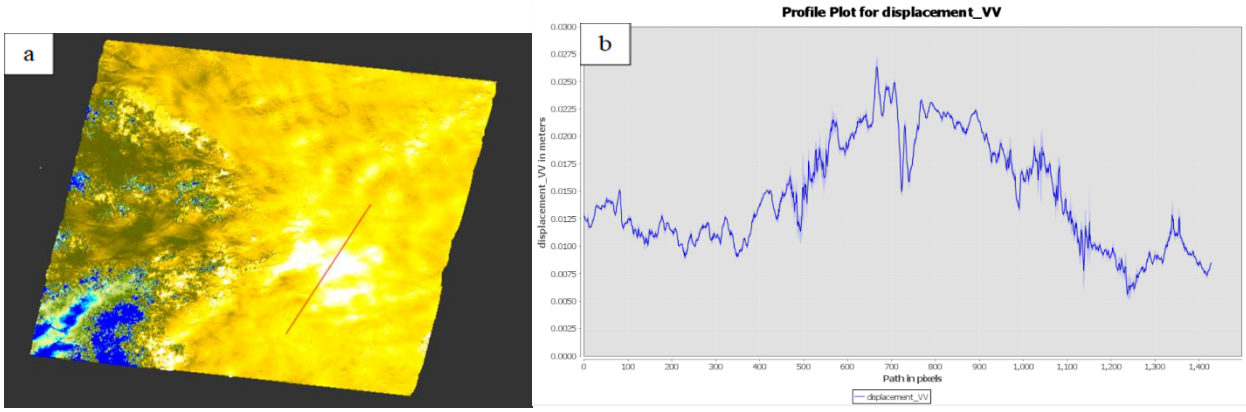
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]



شکل ۶. a) هیستوگرام مقادیر جابه‌جایی در کل محدوده، b) نمودار پراکندگی میزان جابه‌جایی و انسجام

Fig. 6. a) Histogram of displacement values across the entire area, b) Scatter plot of displacement and coherence

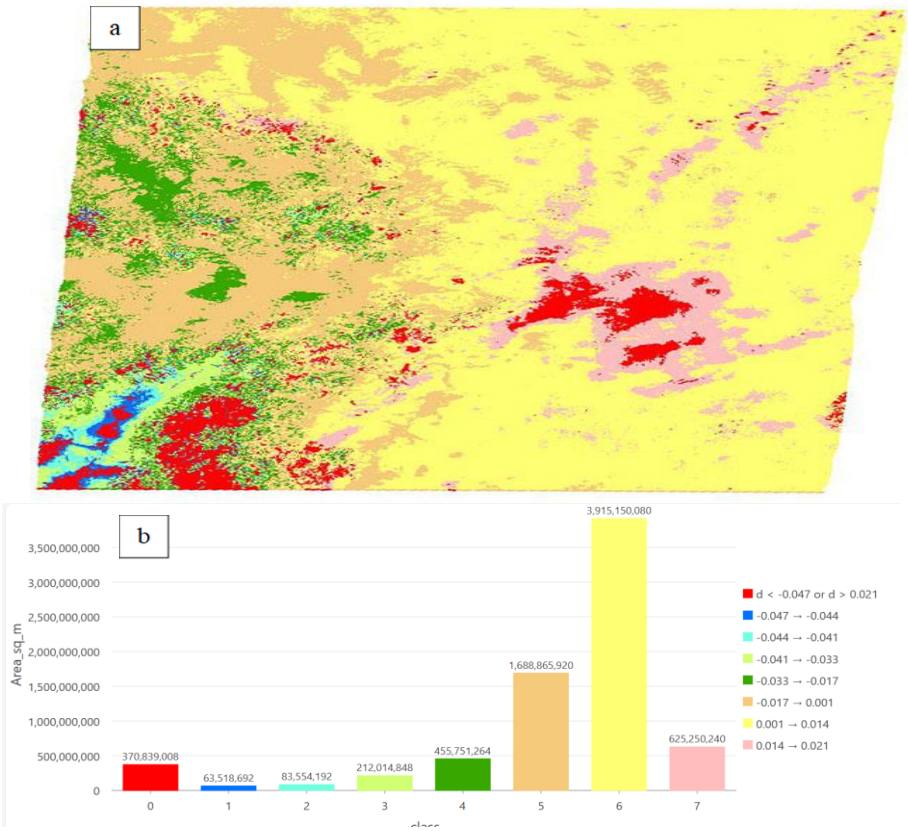
در شکل(۷-a) یک پروفیل برای بررسی تغییرات عمودی سطح زمین در راستای شهر سلماس تا شهر خوی رسم شده است.



شکل ۷. a) پروفیل رسم شده، b) تغییرات جابه‌جایی‌های عمودی برحسب متر در راستای حرکت روی پروفیل

Fig. 7. a) The plotted profile, b) Vertical displacement variations in meters along the movement direction on the profile

در پایان به منظور بررسی بیشتر، میزان برآمدگی و فرونشست در محدوده مورد مطالعه نتایج نهایی در ۸ کلاس



طبقه‌بندی گردید که در شکل (۸-a) به نمایش درآمده است.

شکل ۸. a) نمایش طبقه‌بندی محدوده مورد مطالعه، b) نمودار مساحت ۸ کلاس بر حسب متر مربع

Fig. 8. a) Display of the classification of the study area, b) Area chart of 8 classes in square meters

بحث

پس از مشخص کردن تصویر مرجع و تابع، فرآیند هم مرجع‌سازی به منظور هم‌ترازی پیکسل‌های دو تصویر، انجام گرفت. در ادامه، تداخل‌نگاشت که نخستین گام در آشکارسازی تغییرات سطح زمین است، ایجاد شد. شکل (۳-a) نتیجه تداخل‌نگاشت را نشان می‌دهد که از اختلاف فاز بین دو تصویر راداری قبل و بعد از زمین‌لرزه به‌دست آمده است. الگوهای رنگی این شکل، نشان‌دهنده تغییرات فاز ناشی از جابه‌جایی سطح زمین هستند و خروجی به صورت نوارهای موازی در کنار یکدیگر قرار گرفته است. با توجه به اینکه تصاویر سنتینل۱ به صورت IW دارای چندین بخش مجزا هستند، تداخل‌نگاشت اولیه دارای نواحی خالی و خطوط سیاه در مرز بین بخش‌ها می‌باشد. به همین دلیل، مرحله Debursting اجرا شد و مطابق شکل (۳-b) یک تصویر یکپارچه و منسجم به دست آمد. با این حال، الگوهای رنگی همچنان تحت تأثیر ناهمواری‌های زمین و فازهای اضافی بودند و بخشی از تغییرات، ناشی از توپوگرافی سطح زمین بود که برای تشخیص تغییرات ارتفاعی، اثر توپوگرافی حذف شد. شکل (۳-c) نشان می‌دهد که پس از این مرحله،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

الگوهای رنگی منظم‌تر شده و اکثر تغییرات باقی‌مانده بیانگر جابه‌جایی‌های سطح زمین هستند. در گام بعد، مطابق شکل (۴-a) برای کاهش نویز اسپکل، فیلتر Goldstein اعمال شد. مقایسه این تصویر با شکل (۳-c) نشان می‌دهد که تغییرات رنگی یکنواخت‌تر و مرز جابه‌جایی‌ها واضح‌تر دیده می‌شوند. سپس در شکل (۴-b) عملیات Multilooking انجام گرفت. این فرآیند با ترکیب پیکسل‌های مجاور، باعث کاهش نویزهای تصادفی و افزایش کیفیت بصری شده است. مقایسه این شکل با شکل (۴-a)، حذف نقاط سیاه در راستای این عملیات را آشکار می‌سازد. اگرچه در این مرحله نویز کمتر مشاهده می‌شود، اما کاهش وضوح مکانی نیز رخ داده است. برای تبدیل فازهای محدود به مقادیر مطلق، فرآیند بازگشایی فاز با الگوریتم مبتنی بر جریان کمینه انجام شد تا ناپیوستگی‌های فاز، اصلاح شده و مقادیر واقعی جابه‌جایی سطح زمین استخراج شوند. الگوریتم‌های جریان کمینه به‌عنوان روشی سراسری، قادر به بهینه‌سازی فاز در کل شبکه و ارائه نتایج دقیق در نواحی همبستگی پایین یا ناپیوسته بدون دخالت دستی هستند ولی در مقابل به حافظه بیشتری نیاز دارند. شکل (۴-c) نتیجه بازگشایی فاز را نمایش می‌دهد که در آن اختلاف فاز بین پیکسل‌ها پیوسته شده و امکان تبدیل به جابه‌جایی واقعی فراهم شده است. در شکل (۵-a) فاز بازگشایی شده به جابه‌جایی تبدیل شد. در این تصویر هر رنگ بیانگر محدوده‌ای از تغییرات ارتفاعی زمین است. طیف آبی نشان‌دهنده بیشترین فرونشست بوده و تا ۰/۱۵۶- متر کاهش ارتفاع را نمایش می‌دهد. طیف سبز بیانگر تغییرات متوسط بین ۰/۰۴۸ تا ۰/۰۱۷- متر است. رنگ‌های زرد و نارنجی بالاآمدگی سطح زمین را نمایش می‌دهند که در بازه ۰/۰۰۰۵ تا ۰/۰۲۱ متر قرار دارد. در نهایت، رنگ‌های سفید و زرد روشن بیشترین مقدار بالاآمدگی را نشان می‌دهند که تا ۰/۰۸ متر برآورد شده است. برای انطباق بهتر نتایج با موقعیت‌های واقعی، جابه‌جایی به‌دست آمده در شکل قبل، مطابق شکل (۵-b) به سیستم مختصات جغرافیایی استاندارد منتقل شدند. این فرآیند سبب شد موقعیت جابه‌جایی‌های استخراج‌شده با دقت مکانی بالا بر سطح زمین منطبق شود و امکان تحلیل تغییرات در ارتباط با عوارض طبیعی و انسانی فراهم گردد. در محیط نرم افزار google earth می‌توان مطابق شکل (۵-c) جابه‌جایی را در عوارض مختلف مشاهده و تحلیل کرد. برای تحلیل نتایج، هیستوگرام مقادیر جابه‌جایی سطح زمین در راستای خط دید ماهواره بر اساس تعداد پیکسل‌ها رسم شد. بر اساس نتایج هیستوگرام که در شکل (۶-a) به نمایش درآمده است، بیشترین تغییرات ارتفاعی در نزدیکی صفر متمرکز بوده و به طور کلی مقدار جابه‌جایی منفی است، که بیانگر غالب بودن پدیده‌ی فرونشست نسبت به بالاآمدگی در محدوده مطالعه است. همچنین، قله‌های مشخصی در حدود ۰/۰۲۵- و ۰/۰۱ متر مشاهده می‌شود که نمایانگر رخدادهای متفاوت جابه‌جایی در منطقه است. نمودار پراکندگی شکل (۶-b) مقدار جابه‌جایی سطح زمین در راستای خط دید ماهواره بر اساس میزان همبستگی است. مقادیر همبستگی نزدیک به یک نشان‌دهنده کیفیت داده بالا و اعتمادپذیری بیشتر و نزدیک به صفر نشان‌دهنده نویز بالا و غیرقابل اعتماد بودن نتایج است. این نمودار نشان می‌دهد که بیشترین تراکم داده‌ها در نزدیکی جابه‌جایی صفر و انسجام بالا قرار دارد، درحالی‌که جابجایی‌های منفی و مثبت با انسجام متوسط تا پایین (۰/۵-۰/۲) دیده می‌شوند. به‌طور کلی، همبستگی منفی بین جابه‌جایی و انسجام وجود دارد و مناطق با تغییرات زیاد انسجام کمتری دارند. برای تشخیص اثر زلزله، با توجه به شکل (۵-c) موقعیت شهرهای خوی و سلماس مشخص و در شکل (۷-b) تغییرات ارتفاعی شهر سلماس تا خوی بررسی شد. با استفاده از این شکل، نتایج نشان می‌دهد از پیکسل ۴۰۰ به بعد تغییرات صعودی شده و تا نزدیکی پیکسل ۷۰۰ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. وجود یک قله در بخش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

میانی نمودار نشان‌دهنده منطقه‌ای با بیشترین بالاآمدگی است. با توجه به اینکه زمین‌لرزه در فاصله‌ی ۱۹ کیلومتری خوی و ۲۴ کیلومتری سلماس رخ داده است، بیشترین بالاآمدگی در محدوده‌های نزدیک‌تر به خوی ثبت شده است، در حالی که با دور شدن از کانون و حرکت به سمت سلماس، میزان تغییرات به تدریج کاهش یافته و به مقادیر نزدیک به صفر میل می‌کند که با موقعیت مکانی کانون زلزله هماهنگی دارد. سپس تغییرات ارتفاعی به صورت طبقه‌بندی شده در شکل (۸-a) نمایش داده شد. همچنین مساحت هر طبقه محاسبه گردید تا ارزیابی دقیقی از تغییرات ارتفاعی منطقه به دست آید. مطابق نمودار (۸-b) بیشترین مساحت مربوط به محدوده فرونشست (۰/۰۱۷- ← ۰/۰۳۳-) و بیشترین مساحت مربوط به محدوده برآمدگی (۰/۰۱۴ ← ۰/۰۰۱) می‌باشد که بیانگر تغییرات کوچک و نزدیک به صفر می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که محدوده وسیعی از منطقه دچار تغییر ارتفاع شدید نشده و تغییرات محدود بوده است. نواحی با تغییرات شدیدتر در کلاس صفر به نمایش درآمده که محدوده‌هایی با فرونشست زیاد یا بالاآمدگی زیاد را نشان می‌دهد. اگرچه مساحت این کلاس محدودتر است اما از منظر خطرپذیری اهمیت بیشتری دارد و پراکندگی آن در نواحی کانون زلزله نیز مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۵-c) و نمودار (۸-b) می‌توان متوجه شد که در قسمت جنوب غربی محدوده مطالعه، در کشور ترکیه نیز فرونشست رخ داده که ممکن است به دلیل وجود زمین‌های کشاورزی، فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی باشد.

فرونشست یکی از بحران‌ها و مشکلاتی است که در اکثر مناطق ایران به دلایل مختلف از جمله گسل‌ها و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد. برآوردها نشان می‌دهد میانگین سالانه فرونشست حدود ۶ سانتی‌متر است و نزدیک به ۱۱ درصد از مساحت کشور در محدوده‌های فرونشستی قرار دارد (Zamani, 2025). آمیغپی و همکاران (Amighpey et al., 2023) با تهیه نقشه تجمیعی از اطراف دریاچه ارومیه بر اساس پردازش تصاویر سنتینل ۱ و داده‌های ژئودتیک، شهر خوی را به عنوان یکی از سیزده منطقه در معرض فرونشست اطراف دریاچه ارومیه معرفی کردند. حداکثر نرخ فرونشست در این شهر، در بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸، ۱۲/۱ سانتی‌متر گزارش شده است (Amighpey et al., 2023). عمادعلی و همکاران (Emadali et al., 2024) تغییرات و جابه‌جایی‌های زمین ناشی از زلزله ۵/۹ ریشتری ۸ بهمن ۱۴۰۱ در فاصله ۶ کیلومتری با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری بررسی کردند. در محدوده شهری خوی، جابه‌جایی در راستای خط دید تصاویر صعودی به‌صورت فرونشست ۳۲ میلی‌متر دیده می‌شود و در تصاویر نزولی، بالاآمدگی ۱۱ میلی‌متر ثبت شده است؛ دامنه تغییرات کل منطقه مورد مطالعه نیز بین ۲۴- تا ۱۱ میلی‌متر بوده است (Emadali et al., 2024). در کار حاضر، بر مبنای تصاویر نزولی، تغییرات در شهر خوی ۸/۲ میلی‌متر و در نزدیکی کانون زمین‌لرزه حدوداً ۲۴ میلی‌متر به‌دست آمد که با نتایج پژوهش عمادعلی و همکاران (Emadali et al., 2024) هم‌سو و همگرا می‌باشد.

تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، برای پایش تغییر شکل تفاضلی بر اساس زوایای پوشش مشابه و تفاوت در سیگنال‌ها، کاربرد دارد. از محدودیت‌های این روش، می‌توان به حساسیت در برابر اختلالات جوی، غیر همدوسی زمانی و خطاهای بازگشایی فاز، اشاره کرد (Chatterjee et al., 2006; Reigber et al., 2007). سایر رویکردها نیز هر کدام دارای نقاط قوت و ضعف هستند. روش رادار روزنه مصنوعی تداخل‌سنجی پراکنده‌ساز پایدار (PSInSAR) یک روش بهبود یافته از تداخل‌سنجی تفاضلی راداری به شمار می‌رود. این روش، در نظارت بر فرونشست مناطق شهری کاربرد دارد و هدف آن، تشخیص اهداف راداری با ثبات فاز ثابت در طول دوره مشاهده است. از مزایای آن، می‌توان به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

دقتی در حد میلی‌متر و از محدودیت‌های آن، می‌توان به ناکارآمدی در مناطق پوشیده از گیاه و نیاز به چگالی پراکنده‌کننده‌ها اشاره کرد (Tripathi et al., 2022; Zhang et al., 2023). روش زیرمجموعه خط مبنای کوچک نیز برای اهداف پراکنده و پایش فرونشست در مناطق روستایی بسیار مناسب است. این روش با استفاده از خط مبناهای فضایی کوتاه‌تر، واهمدوسی را کاهش داده و همدوسی را بهبود می‌بخشد. وضوح فضایی محدود در مقایسه با روش رادار روزنه مصنوعی تداخل‌سنجی پراکنده‌ساز پایدار، از محدودیت‌های این روش، می‌باشد (Berardino et al., 2003; Lanari et al., 2004).

نتیجه‌گیری

این پژوهش، توانایی و پتانسیل روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری را با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل۱ در ارزیابی و تحلیل تغییرات سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه را نشان داد. یافته‌های این مطالعه، نمایانگر تغییرات قابل توجهی در شهر خوی در اثر زمین‌لرزه ۴ فروردین ۱۴۰۲ است. حداکثر فرونشست در محدوده مطالعه ۰/۱۵۶- متر و حداکثر بالاآمدگی نیز ۰/۰۸ متر، به دست آمد. نتایج نشان داد که در نزدیک شهر خوی بالاآمدگی و در جنوب غرب محدوده، فرونشست اتفاق افتاده است. همچنین بیشترین مساحت فرونشست در بازه تغییرات ۰/۰۳۳- تا ۰/۰۱۷- و بیشترین مساحت بالاآمدگی در بازه ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۱۴ به دست آمد. این تغییرات، اهمیت نظارت مداوم سطح زمین برای درک دقیق زمین‌لرزه‌ها و کاهش خطر نشان می‌دهد. استفاده از این ابزار، استخراج تغییرات کوچک در سطح زمین را بدون نیاز به بررسی میدانی، ممکن می‌سازد. با این وجود، ترکیب داده‌های راداری با مشاهدات میدانی و سامانه‌های تعیین موقعیت جهانی، می‌تواند دقت و اعتمادپذیری را افزایش دهد. این تحقیق، افزون بر ارائه تأثیرات زمین‌لرزه شهر خوی، به اهمیت برنامه‌ریزی و مطالعات بیشتر در حوزه تغییرات ارتفاعی زمین، می‌پردازد. این اطلاعات، در مدیریت و تصمیم‌گیری‌های شهری، مانند توسعه زیرساخت‌های مقاوم، برنامه‌ریزی شهری و امدادرسانی، کاربرد دارند.

استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر، مانند تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی و پایدار، به خصوص در مناطقی با تغییرات پیچیده، منجر به نتایج دقیق‌تر می‌شود. همچنین توسعه مدل‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌تواند در بهینه‌سازی تحلیل‌ها و برآورد جابه‌جایی‌های سطح زمین، کمک‌کننده باشد. از سوی دیگر، انجام مطالعات به صورت سری زمانی و بلندمدت در مناطق حساس، می‌تواند در بررسی تغییرات سطح ، مدیریت و برنامه‌ریزی، مؤثر باشد. به این ترتیب، استفاده از فناوری‌های نوین گامی مهم در کاهش آسیب‌های ناشی از زمین‌لرزه به شمار می‌رود. بهره‌گیری از روش‌های سنجش از دوری و داده‌های راداری، کنترل مناطق زلزله‌خیز و دارای گسل را راحت‌تر می‌کند. همچنین می‌تواند پایه‌ای برای توسعه سامانه‌های مدیریت بحران به شمار رود. تحلیل تغییرات ناشی از زمین‌لرزه و رشد روش‌های ارزیابی، در کاهش خطرات، کاهش تلفات انسانی و افزایش توانایی مقابله، مؤثر می‌باشد.

References

Amighpey, M., Arabi, S., Ghoraiyan, F., & Molayi, A. (2023). Investigating the land subsidence around Urmia Lake using geodetic observations. Iran-Water Resources Research, 19(2), 196–206. (In Persian)

Argo Galih, S., & Atriyon, J. (2025). InSAR-derived surface displacement gradients unveil subseismic faults of the 2022 Cianjur earthquake. Modeling Earth Systems and Environment, 11(5), 338.

Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2003). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11), 2375–2383.

Chatterjee, R., Fruneau, B., Rudant, J., Roy, P., Frison, P.-L., Lakhera, R., Dadhwal, V., & Saha, R. (2006). Subsidence of Kolkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by differential synthetic aperture radar interferometry (D-InSAR) technique. Remote Sensing of Environment, 102(1–2), 176–185.

Djenaliev, A., Kada, M., Chymyrov, A., Hellwich, O., Bairamov, E., & Muraliev, A. (2022). Investigation of Earthquake Deformation Detectability Using Sentinel-1 Interferometric Data. International Journal of Geoinformatics, 18(6), 81-96.

Doğanalp, S., Coşkuner, B., & Makineci, H. (2024). Analysis of short-term Sentinel-1 data using the DInSAR method for monitoring displacement following the earthquakes of 6 and 20 February in Hatay city. Bulletin of Geophysics & Oceanography (BGO), 65(4).

Eftekhari, S. M. (2024). Analyzing the geomorphometric changes of Dana County due to the Sisakhat earthquake using the Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) method. Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 24(74), 252-270. (In Persian)

Emadali, L., Mehrpak, M., Motaghed, S., & Eftekhari, N. (2024). Determining the displacement components caused by the 2023 January 28 earthquake in Khoy County (M 5.9) using the InSAR radar interferometry method. In Proceedings of the 4th National Conference on Civil Engineering, Smart Development and Sustainable Systems. Gorgan, Iran. (In Persian)

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2002). Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 39(1), 8-20.

Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, A., & Maghsoudi, M. (2023). Estimation of land surface displacement in Kermanshah plain and effect of earthquake Ezgele on displacement process using SBAS method. Quantitative Geomorphological Research, 12(1), 1-13. (In Persian)

Ghannadi, M. A., Enayati, H., & Khesali, E. (2019). Generating Digital Elevation Model of the Earth Using Sentinel-1 Images and Interferometry. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 27(108), 109-121. (In Persian)

Goorabi, A. (2021). Quantification of mass wasting volume associated with the giant landslide Maleh Kabood induced by the 2017 Kermanshah earthquake from InSAR. Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 21(60), 47-63. (In Persian)

Hanssen, R. F. (2001). Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2, pp. 1-308). Dordrecht, Netherlands: Springer Science & Business Media.

Helali, L., Bagheri, R., & Momeni, A. (2024). Investigation of land subsidence using radar interferometry technique (Case study: Semnan plain). Hydrogeology, 9(1), 86-100. (In Persian)

Hosseinzadeh, S. R., Akbari, E., Javanshiri, M., & Mohammadpour, Z. (2023). Spatial Analysis of Ground Subsidence using Radar Interferometry (Case Study: Central Plain of Ghaen City). Journal of Geography and Environmental Hazards, 11(4), 99-126. (In Persian)

Hussain, S., Pan, B., Afzal, Z., Sajjad, M. M., Kakar, N., Ahmed, N., Hussain, W., & Ali, M. (2025). SBAS-InSAR Analysis of tectonic derived ground deformation and subsidence susceptibility mapping via machine learning in Quetta City, Pakistan. International Journal of Digital Earth, 18(1), 2441926.

Ibrahim, H. B., Salah, M., Zarzoura, F. H. F., & El-Mewafi, M. (2025). Mapping of surface deformation associated with the 7.8 magnitude Turkey earthquake of 6 Feb 2023 using radar interferometry. Innovative Infrastructure Solutions, 10(2), 49.

Ittycheria, N., Vaka, D. S., & Rao, Y. (2018). Time series analysis of surface deformation of Bengaluru city using Sentinel-1 images. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4, 473-477.

Julzarika, A. (2023). Land Subsidence Dynamics in Malaysia Based on Time-Series Vertical Deformation Using Modified D-InSAR Sentinel-1. Planning Malaysia, 21, 325-340.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]

Karimi, S., Nouri, P., & Afshinfar, A. (2023). Landslide Measurement in Glendroud Region (From the Central Part of Noor City) in Mazandaran Province Iran by Using Remote Sensing and Radar Interferometry Techniques. Journal of Engineering Research and Reports, 25(1), 90-101.

Kalmishi, Z., Rosta, I., & Zandi, R. (2025). Investigating the Displacement of the Earth's Surface Caused by Earthquakes Using Radar Interferometry (Case Study: Ilam Province, Mountain Frontal Fault). Journal of Geography and Environmental Hazards, 14(2), 287-307. (In Persian)

Khalooei, F., & Elmizadeh, H. (2023). Monitoring the Subsidence of Kazerun Plain Using SENTINEL Images and Radar Interferometric Technique (DInSAR). Journal of Engineering Geology, 17(2), 169-186. (In Persian)

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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(7), 1377–1386.

Lee, Z., Chuang, R. Y., Wang, I., Chen, L., Chang, W.-L., Chiu, C.-Y., Ching, K.-E., Guo, S.-W., & Chen, C.-L. (2025). Fast report: surface deformation associated with the 2025 Dapu earthquake. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 36(1), 1-7.

Maleki, R., Nehzak, H. K., & Asghari, S. (2023). Measuring the amount of land subsidence using radar interferometry technique (Case study: Earthquake-affected areas west of Kermanshah). Natural Environmental Hazards, 12(38), 23-30. (In Persian)

Mohammadhasani, M., Kamali, F., Rashidi, A., Bahrampour, M., Shafieibafti, S., Abbaspour, R., & Derakhshani, R. (2023). Investigating Earthquake-Induced Changes in the Persian Gulf Marginal Strip, Using Sentinel-1A Images and Radar Interferometry. Water, 15(17), 3108-3123.

Partabian, A. (2023). InSAR-derived surface deformation of the April 2021 Genaveh earthquake: Evidence of progress of the Quaternary Zagros Mountain front. Quaternary of Iran, 9(1 & 2), 14–28. (In Persian)

Oludare, O. I., Kazeem, R. A., Adebayo, A. S., Awonusi, A. A., Dare, A. A., Ikumapayi, O. M., & Adaramola, B. A. (2023). An Assessment of Earthquake-Induced Landslides Distribution in Nepal Using Open-Source Applications on Sentinel-1 Tops SAR Imagery. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 18(2), 237-249.

Orchard, S., Fischman, H. S., Gerrity, S., Alestra, T., Dunmore, R., & Schiel, D. R. (2021). Threshold effects of relative sea-level change in intertidal ecosystems: empirical evidence from earthquake-induced uplift on a rocky coast. GeoHazards, 2(4), 302-320.

Reigber, A., Neumann, M., Erten, E., Jager, M., & Prats, P. (2007). Multi-baseline polarimetrically optimised phases and scattering mechanisms for InSAR applications. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

Saed, F. G., Noori, A. M., Kalantar, B., Qader, W. M., & Ueda, N. (2022). Earthquake-Induced Ground Deformation Assessment via Sentinel-1 Radar Aided at Darbandikhan Town. Journal of Sensors, 2022(1), 2020069-2020079.

Saini, A., & Ramanujam, D. M. (2023). Phase unwrapping techniques for SAR interferometry: A comprehensive review. In Proceedings of the 43rd INCA International Conference. INCA, Jodhpur, India.

Saxena, N., & Rathore, N. (2013). A review on speckle noise filtering techniques for SAR images. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering (IJARCSEE), 2(2), 243-247.

Shafiei, M., & Milan, A. (2023). Estimating the amount of earth subsidence caused by groundwater extraction by radar interferometric technique and using Sentinel-1A radar satellite images (Case study: Talheh plain, Faryab, Kelemeh in Bushehr). The Second International Conference and the Seventh National Conference on Architecture and Sustainable City, 2(7), 1734-1744. (In Persian)

Small, D. (2011). Flattening gamma: Radiometric terrain correction for SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(8), 3081-3093.

Tripathi, A., Reshi, A. R., Moniruzzaman, M., Rahaman, K. R., Tiwari, R. K., & Malik, K. (2022). Interoperability of-band Sentinel-1 SAR and GRACE satellite sensors on PSInSAR-based urban surface subsidence mapping of Varanasi, India. IEEE Sensors Journal, 22(21), 21071–21081.

Yagüe-Martínez, N., Prats-Iraola, P., Gonzalez, F. R., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., Eineder, M., & Bamler, R. (2016). Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54(4), 2220-2234.

Yu, H., Lan, Y., Yuan, Z., Xu, J., & Lee, H. (2019). Phase unwrapping in InSAR: A review. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 7(1), 40-58.

Zamani, L. (2025). A comparative study of radar and optical imagery in estimating the surface displacement field, M.Sc. Thesis. (In Persian)

Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(5), 950-959.

Zhang, P., Guo, Z., Guo, S., & Xia, J. (2022). Land subsidence monitoring method in regions of variable radar reflection characteristics by integrating PS-InSAR and SBAS-InSAR techniques. Remote Sensing, 14(14), 3265-3284.

Zhang, Z., Hu, C., Wu, Z., Zhang, Z., Yang, S., & Yang, W. (2023). Monitoring and analysis of ground subsidence in Shanghai based on PS-InSAR and SBAS-InSAR technologies. Scientific Reports, 13(1), 8031.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.4.1.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.4.1019282]