



Assessment of the Impact of the Ezgeleh Earthquake on Landslide Activity in the Tang Hamam and Alvand Basins, Kermanshah

Forouzan Naseri¹, Alireza Salehipour Milani¹, Shahram Bahrami^{1*}, Mohsen Ehteshami-Moinabadi²

¹ Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

² Department of Sedimentary Basins and Petroleum, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 15 March 2026

Revised: 21 September 2026

Accepted: 26 September 2026

Available Online:

01 October 2026

Keywords:

Earthquake-induced landslide

SBAS-InSAR

Sentinel-1A

Kermanshah Province

Zagros

ABSTRACT

Earthquake-induced landslides are among the most significant geological hazards capable of causing substantial loss of life and property damage. The present study was conducted with the aim of evaluating the impact of the Ezgeleh earthquake of November 12, 2017 ($M_s = 7.3$) on the occurrence of landslides, and quantifying the displacement of landslides within the Tang Hamam and Alvand basins. In this regard, landslides within the study area were first identified and located using satellite imagery and field observations. Subsequently, new landslides were detected by comparing satellite images taken before and after the earthquake. Then, employing multi-temporal radar interferometry, 12 Sentinel-1A images—comprising data from both before and after the earthquake—were processed. The results indicate that, among the identified landslides, the earthquake triggered the activation of four landslides; in addition to surface ruptures, these exhibited significant deformation in the form of displacement along the satellite's line-of-sight (LOS). The largest landslide occurring on the slopes of Mount Shahneshin covering an area of 18,242,677.47 square meters exhibits an average displacement of approximately 42 cm and a maximum displacement of up to about 53 cm along the satellite's line of sight, indicating a high degree of slope instability in this area. Additionally, three other landslides on the slopes of Mount Gamishan despite their smaller extent have exhibited a relatively uniform pattern of displacement along the satellite line-of-sight, averaging approximately 45 centimeters; this indicates a similar response of these slopes to seismic triggering. A simultaneous analysis of radar interferometry results, the distribution of earthquake epicenters, and the locations of active faults in the region indicates that earthquake-induced movements played a significant role in triggering and intensifying landslide displacements.

* Corresponding author: Shahram Bahrami

E-mail address: sh_bahrami@sbu.ac.ir

How to cite this article: Naseri, F., Salehipour Milani, A., Bahrami, S., & Ehteshami-Moinabadi, M. (2026). Assessment of the Impact of the Ezgeleh Earthquake on Landslide Activity in the Tang Hamam and Alvand Basins, Kermanshah. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoe.2026.98145.1657>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Landslides caused by earthquakes are considered one of the most important geological hazards, and due to their rapid occurrence, they can cause extensive loss of life and property. In this regard, the intensity and duration of earthquake motion are considered to be the most important factors stimulating the movement of slopes. In this context, radar interferometry is one of the newest remote sensing methods that, by processing radar images, enables the preparation of maps of the displacement of the earth's crust over a large and continuous surface. One of the main applications of synthetic aperture radar (SAR) remote sensing is the monitoring of areas affected by surface deformation using the differential interferometry of synthetic aperture radar (DInSAR) method. The Ezgeleh earthquake occurred on November 12, 2017, with a magnitude of 7.3, 10 km from Ezgeleh and about 37 km northwest of Sarpole Zahab County in Kermanshah Province. The study of the earthquake's focal mechanism showed that a rupture in a blind fault in the Zagros Fold Thrust Belt (ZFTB) was the main cause of this earthquake, which led to various instabilities, including landslides and rockfalls. Therefore, the present study focused on landslides caused by the aforementioned earthquake, within the Alvand and Tang Hamam watersheds. The primary objective of this study is to evaluate the impact of the Ezgeleh earthquake on landslide activity in the Tang Hamam and Alvand basins. This study aims to determine the earthquake's role in landslide occurrence, assess the displacements caused by the event within the study area, and establish a foundation for future research on geological hazards.

Material and Methods

In this study, landslides were first identified and located using a digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 12.5 m, topographic maps with a scale of 1:50,000, satellite images available in Google Earth, Arc GIS, and Global Mapper software, and field observations. Then, in order to investigate and determine the amount of displacement and movement of landslide masses, radar interferometry and Sentinel-1 radar images were used. A total of 12 Sentinel-1 radar images, including six images before the earthquake and six images after it, were downloaded from <https://scihub.copernicus.eu>. After importing the images into the ENVI and SARscape software environments, in order to fully cover the study area, the burst corresponding to the Sarpole Zahab region was selected from the Sentinel-1 images to be used in the radar interferometry process. Then, the temporal and spatial relationship between the images was examined using a connection graph. Next, interferometric processing was performed within the framework of the SBAS Interferometric Processing method, which included image co-referencing, view interferometry generation, filtering, and phase unwrapping. The output of this step included filtered view interferometry (FINT), differential view interferometry without topography effect (DINT), and unwrapped phase (UFA). In order to reduce systematic errors and improve data quality, the Refinement and Reflating step was performed using ground control points (GCP). In the next step, data inversion was performed by executing SBAS Inversion – First Step, and the average land surface displacement rate map was extracted. Then, by executing SBAS Inversion – Second Step, the land surface displacement time series was calculated for each imaging date and atmospheric effects were corrected. Finally, the Geocoding step was performed to transfer the results from the satellite view geometry to the terrestrial coordinate system.

Results and Discussion

An examination of the spatial distribution of old and new landslides alongside active faults and earthquake epicenters shows that the seismic activity of the region has played a decisive role in activating these landslides. Also, an examination of objective evidence of land surface deformation on the slopes of Shahneshin Mountain indicates the occurrence of displacement, local uplift, and rupture of soil and rock masses in the landslide area. The results of the present study also confirm the occurrence of significant deformation in this domain and the important role of seismic stresses in activating and intensifying the domain instability; however, simultaneous examination of the Shahneshin and Gamishan landslides showed that the intensity and pattern of deformation in all landslides caused by this earthquake are not the same. While the Shahneshin landslide shows the

largest range of deformation and displacement, the Gamishan landslides, despite being smaller in size, have a relatively more uniform deformation pattern. This uniformity in displacement values could indicate the similar response of the Gamishan slopes to seismic loading and the relatively homogeneous tectonic conditions of this part of the region. In other words, although the intensity of instability in Gamishan is less than in Shahneshin, the mechanical behavior of the slopes against seismic movements follows a more specific and predictable pattern. This difference indicates that the simultaneous assessment of multiple landslides allows for a better understanding of the spatial variability of the response of the slopes to a single seismic event, a topic that is less likely to be investigated in studies focused on a single landslide. The results of radar interferometric analysis based on the SBAS-InSAR method show that the identified landslides, in addition to surface ruptures, were accompanied by significant displacement along the satellite line of sight. The displacement values along the satellite line of sight extracted for the Shahneshin landslide and the Gamishan landslides indicate a high intensity of deformation of the slopes after the earthquake. This displacement rate can indicate the continued deformation of the landslide mass after the seismic event. The difference between the deformation amplitudes in the Shahneshin landslide and the Gamishan landslides can be attributed to the difference in the slip extent, the geometry of the slope, and the concentration of seismic stresses.

Conclusion

The analyses show that four new landslides have occurred in the study area. The largest landslide on the slopes of Mount Shahneshin, with an area of 18242677.47 square meters, had a maximum displacement along the satellite line of sight of about 53 centimeters and an average displacement of 42 centimeters. Three other landslides on the slopes of Mount Gamishan, with areas of 22560.07, 6727.73, and 5528.86 square meters, respectively, show an average displacement of about 45 centimeters, and their deformation pattern has been relatively uniform. The study of the spatial distribution of landslides along active faults and earthquake epicenters indicates the important role of seismic movements as a driving factor in the activation and development of slope instabilities; although the contribution of other effective factors such as geological characteristics, slope morphometry, and environmental conditions requires independent and more detailed studies. The results of InSAR analysis show that the concentration of deformation in the central and lower parts of the slopes shows the highest intensity of displacement along the satellite line of sight, indicating the effective role of seismic stresses on the instability of the slopes.



ارزیابی تأثیر زمین لرزه ازگله بر فعالیت زمین لغزش ها در حوضه های تنگ حمام و الوند کرمانشاه

فروزان ناصری^۱، علیرضا صالحی پور میلانی^۱ , شهرام بهرامی^{۱*}، محسن احتشامی معین آبادی^۲

^۱ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ گروه حوضه های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۰۴ کلمات کلیدی: زمین لغزش ناشی از زمین لرزه SBAS-InSAR Sentinel-1A استان کرمانشاه زاگرس	زمین لغزش های ناشی از زمین لرزه از مهم ترین مخاطرات زمین شناختی هستند که می توانند خسارات جانی و مالی قابل توجهی به همراه داشته باشند. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر زمین لرزه ازگله بر وقوع زمین لغزش ها و کمی سازی جابه جایی زمین لغزش های رخ داده در حوضه های تنگ حمام و الوند، ناشی از زمین لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ ازگله با بزرگی ۷/۳ انجام شده است. در این راستا، ابتدا زمین لغزش های محدوده مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره ای و مشاهدات میدانی شناسایی و تعیین موقعیت شدند و در ادامه با مقایسه تصاویر ماهواره ای قبل و بعد از زمین لرزه، زمین لغزش های جدید مشخص گردیدند. سپس با بهره گیری از روش تداخل سنجی راداری چندزمانه، ۱۲ تصویر Sentinel-1A، شامل تصاویر پیش و پس از رخداد زمین لرزه، مورد پردازش قرار گرفتند. نتایج نشان می دهد که در بین زمین لغزش های شناسایی شده، زمین لرزه منجر به فعال شدن ۴ زمین لغزش شده است، که علاوه بر گسیختگی های سطحی، دچار تغییر شکل قابل توجهی به صورت جابه جایی در راستای خط دید ماهواره (LOS) شده اند. بزرگ ترین زمین لغزش رخ داده در دامنه های کوه شاهنشین با مساحت ۱۸۲۴۲۶۷۷/۴۷ متر مربع، میانگین جابه جایی در راستای خط دید ماهواره حدود ۴۲ سانتی متر و بیشینه جابه جایی در راستای خط دید ماهواره تا حدود ۵۳ سانتی متر را نشان می دهد که بیانگر شدت بالای ناپایداری دامنه ای در این محدوده است. همچنین سه زمین لغزش دیگر در دامنه های کوه گامیشان، علی رغم وسعت کمتر، الگوی نسبتاً یکنواختی از جابه جایی در راستای خط دید ماهواره با میانگین در حدود ۴۵ سانتی متر را ثبت کرده اند که بیانگر پاسخ مشابه این دامنه ها به تحریک لرزه ای می باشد. تحلیل هم زمان نتایج تداخل سنجی راداری با پراکنش رومرکزهای زمین لرزه و موقعیت گسل های فعال منطقه نشان می دهد که جنبش های ناشی از زمین لرزه نقش مهمی در فعال سازی و تشدید جابه جایی زمین لغزش ها داشته اند.

مقدمه

زمین‌لغزش‌ها حرکات توده‌ای از مواد مانند خاک، سنگ یا آوار هستند که در اثر عوامل مختلف بر دامنه‌ها رخ می‌دهند و موجب ناپایداری و جابه‌جایی سطح زمین می‌شوند (Peck, 1969; Cruden, 1991; Geertsema, Highland & Vaugeouis, 2009). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که زمین‌لغزش‌ها به‌ویژه در اثر زمین‌لرزه‌های شدید، در مناطق کوهستانی و دره‌ای فراوانی بیشتری دارند (Xiao et al., 2023). زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه، از مهم‌ترین مخاطرات زمین‌شناختی به‌شمار می‌آیند و به دلیل سرعت بالای وقوع، می‌توانند خسارات جانی و مالی گسترده‌ای به‌همراه داشته باشند (Goorabi, 2021). در این میان، شدت و مدت دوام جنبش زمین‌لرزه از مهم‌ترین عوامل تحریک‌کننده حرکت دامنه‌ها محسوب می‌شوند (Keefer, 1984; Jibson, Harp & Michael, 2000). در این زمینه، روش تداخل‌سنجی راداری یکی از جدیدترین روش‌های سنجش از دوری است که با پردازش تصاویر راداری امکان تهیه نقشه‌های جابه‌جایی پوسته زمین در سطحی وسیع و پیوسته را فراهم می‌کند (Sadeghi, Sharifi Hashjin, Rahimipour, 2022). یکی از کاربردهای اصلی سنجش از دور رادار روزه مصنوعی (SAR)، پایش مناطقی است که تحت تأثیر تغییر شکل سطح زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی رادار روزه مصنوعی (DInSAR) قرار گرفته‌اند (Vidal-Paez et al., 2025).

زمین‌لرزه ازگله در روز ۲۱ آبان ۱۳۹۶ هجری شمسی مطابق با روز ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ میلادی با بزرگای گشتاوری ۷/۳ در فاصله ۱۰ کیلومتری ازگله و حدود ۳۷ کیلومتری شمال غرب شهرستان سرپل ذهاب از استان کرمانشاه به وقوع پیوسته است. بررسی مکانیسم کانونی زمین‌لرزه نشان داده که شکستگی در گسل پنهان در کمر بند چین‌خورده و رانده زاگرس^۱ (ZFTB) علت اصلی این زمین‌لرزه بوده است (Heidari, Mazidi & Rousta, 2024). این گسل با شیب کم ۱۱/۲ درجه در عمق ۱۷ کیلومتر در امتداد شمال غربی با حداکثر لغزش مورب ۵ متر، منبع اصلی این زمین‌لرزه بوده است (Vajedian & Motagh, 2018; Yang et al., 2018). برخورد مورب بین صفحات عربستان و اوراسیا در نزدیکی مرز عراق و ایران، حرکات و لغزش گسل‌های مورب را تسهیل می‌کند (Chen et al., 2018)، که منجر به انواع ناپایداری‌ها از جمله زمین‌لغزش و ریزش سنگ شده است (Naderi, Fotouhi, Negaresh & Khalili, 2021).

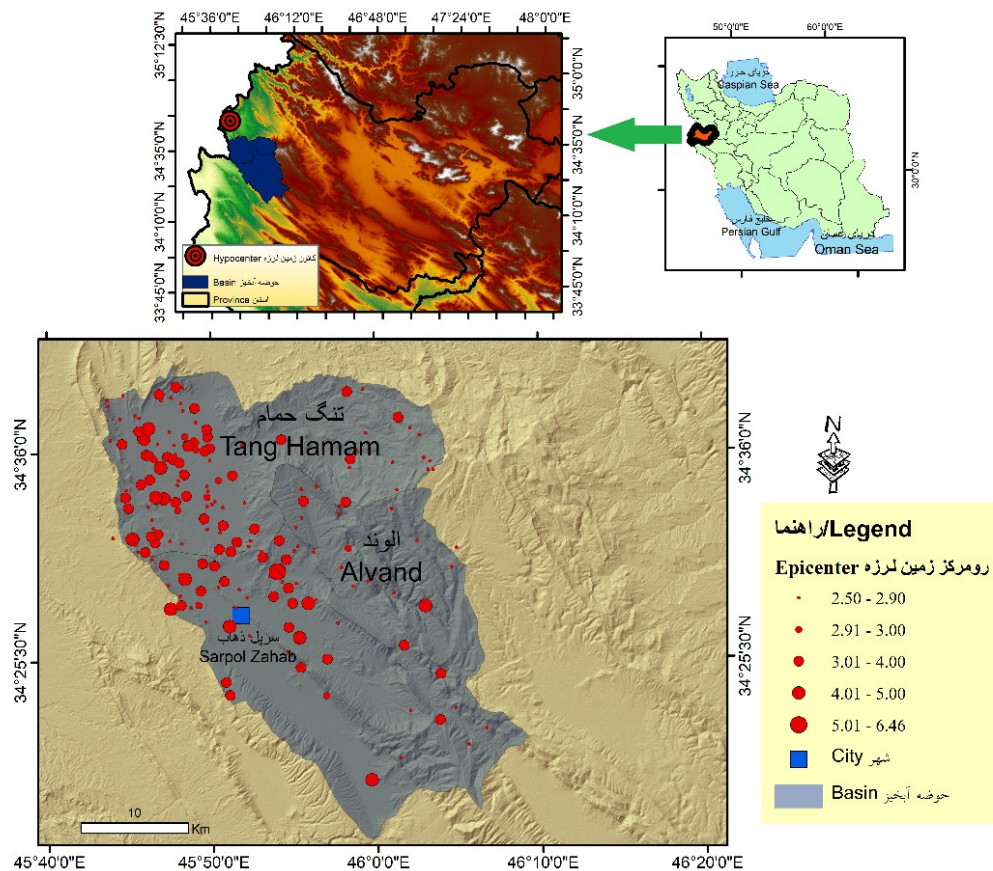
در زمینه تأثیر تکتونیک و زمین‌لرزه بر وقوع زمین‌لغزش، مطالعات زیادی انجام شده است که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. کولسانتی و همکاران (Colesanti, Ferrtti, Prati & Rocca, 2003)، در منطقه آنکونا در مرکز ایتالیا به پایش زمین‌لغزش‌ها و حرکات تکتونیکی با استفاده از تداخل‌سنجی رادار دیافراگم مصنوعی دیفرانسیل فضایی (DInSAR) پرداختند و تکامل زمین‌لغزش آنکونا را با پردازش ۶۱ تصویر ERS به‌دست آمده در بازه زمانی بین ژوئن ۱۹۹۲ و دسامبر ۲۰۰۰ مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند که ویژگی‌های PS، GPS و نقشه برداری تسطیح نوری تا حدی مکمل هم هستند؛ به‌طوری‌که استفاده هم‌افزایی از این سه روش می‌تواند کیفیت و قابلیت اطمینان نظارت بر تغییر شکل زمین را به‌شدت افزایش دهد. گریف و ولکو (Greif & Vlcko, 2012)، با استفاده از داده‌های رادار دیافراگم مصنوعی تداخل‌سنجی از سنسورهای ERS و ENVISAT زمین‌لغزش و تغییر شکل‌های پس از آن در منطقه‌ای در شهر لوبیتوا اسلواکی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و در نهایت مرزهای دقیق زمین‌لغزش‌ها را تعیین نمودند. ژاو و همکاران (Zhao et al., 2016)، به پایش لغزش لسی در مقیاس کوچک بر پایه روش رادار دیافراگم مصنوعی تداخل‌سنجی در یک زمین‌لغزش، در شانگهای چین پرداختند و بیان داشتند تغییر شکل سریع زمین‌لغزش از یک تا دو ماه قبل از زمین‌لغزش، می‌تواند سرخ مهمی برای هشدار اولیه این نوع زمین‌لغزش ارائه دهد. گروم (Gorum, 2019)، تأثیرات زمین‌ساختی، توپوگرافی و نوع سنگ بر زمین‌لغزش‌های بزرگ در حاشیه شمالی فلات آناتولی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و مدل ارتفاعی رقومی سه بعدی مورد بررسی قرار داد. نتایج مقایسه‌های منطقه‌ای نشان می‌دهد که علاوه بر دامنه و شیب دامنه، تفاوت‌های

تکتونیکی، تا حد زیادی فراوانی زمین‌لغزش‌ها را در امتداد حاشیه‌های شمالی فلات آناتولی کنترل می‌کنند. علاوه بر این، وجود این زمین‌لغزش‌های بزرگ و نهشته‌های ناشی از آن، فرصتی بی‌نظیر برای رمزگشایی رویدادهای اقلیمی و لرزه‌ای گذشته فراهم می‌کند. گورابی (Goorabi, 2020)، در مطالعه‌ای به تشخیص زمین‌لغزش ناشی از زلزله بزرگ با استفاده از تکنیک‌های همدوسی InSAR در شمال غربی زاگرس پرداخت. او بیان داشت که زمین‌لرزه ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ باعث ایجاد بزرگ‌ترین زمین‌لغزش لرزه‌ای در ایران (مله کبود) در چند قرن گذشته شده است و نتایج همدوسی امکان تشخیص مساحت سطح این زمین‌لغزش را فراهم کرد و ناپایداری آن با گذشت زمان تشخیص داده شد. نتایج همچنین نشان داد که تغییر شکل سطحی زمین لغزش مله کبود به دلیل پس‌لرزه‌هایی با اندازه بزرگتر از ۴.۵ پس از زمین‌لرزه ازگله ادامه داشته است. این نتایج نشان‌دهنده قدرت تکنیک همدوسی InSAR در تشخیص تغییر شکل سطحی و همچنین مطالعات زمین‌لغزش لرزه‌ای و پایش محیطی است. هی و همکاران (He et al., 2021)، زمین‌لغزش ایجاد شده ناشی از زمین‌لرزه ۲۰۲۰ کیاجوجیا در شهر یونان چین را با تأکید بر توزیع، عوامل تأثیرگذار و اهمیت زمین‌ساختی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قبل و بعد از زمین‌لرزه بررسی نمودند و تراکم تعداد زمین‌لغزش (LND)، درصد مساحت زمین‌لغزش (LAP) و توزیع فضایی را به‌دست آوردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که لغزش‌ها عمدتاً در جهت شمال غربی-جنوب شرقی، تقریباً موازی با محور طولانی مناطق شدت لرزه‌ای و راستای گسل توزیع شده‌اند. تمام زمین‌لغزش‌های ناشی از این رویداد در منطقه با شدت لرزه‌ای شش ریشتر یا بیشتر از زمین‌لرزه ۲۰۱۴ لودیپان رخ داده است. چیب و همکاران (Cheaib et al., 2022)، با استفاده از داده‌های سنجش از دور شامل تصاویر نوری، همبستگی تصویر و InSAR به بررسی زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه ۷/۳ ریشتری سال ۲۰۱۷ سرپل ذهاب در شمال کوه‌های زاگرس، پرداختند. براساس نتایج تحقیق آن‌ها تعداد ۳۹۵ ریزش و زمین‌لغزش شناسایی شد و بیشتر آن‌ها شامل ریزش‌های سنگی کوچک در نزدیکی کانون زمین‌لرزه بودند، در حالی که چند زمین‌لغزش عمیق و بسیار بزرگ از پیش موجود در فواصل دورتر نیز دچار جابه‌جایی لرزه‌ای (حدود ۱۰ تا ۹۰ سانتی‌متر) شدند. همچنین نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تعداد زمین‌لغزش‌ها نسبت به زمین‌لرزه‌های با بزرگی مشابه، بسیار کم بوده که به شرایط نیمه‌خشک منطقه و گسلش پنهان نسبت داده شده است. همچنین شواهد InSAR نشان داد برخی از زمین‌لغزش‌های بزرگ پیش از زمین‌لرزه نیز دارای حرکت آهسته بوده‌اند و رویداد لرزه‌ای موجب افزایش سرعت حرکت آن‌ها شده است. لی و همکاران (Li et al., 2024)، در مطالعه‌ای به تشخیص زمین‌لغزش قدیمی با استفاده از تصاویر سنجش از دور نوری بر اساس YOLOv8 بهبود یافته پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که مدل بهبودیافته انتخاب شده، عملکرد عالی در تشخیص زمین‌لغزش‌های قدیمی در منطقه سیچوان-تبت را دارد. گنجائیان و همکاران (Ganjaeian, Firozeh, Mirakhorli & Yazdani, 2025)، پتانسیل وقوع زمین‌لغزش با تأکید بر زمین‌لرزه‌ها را در مسیر ارتباطی کردند تا سرپل ذهاب، با استفاده از ضریب وزنی نسبی، منطق فازی و تداخل سنجی راداری مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که محدوده مطالعاتی تحت تأثیر زمین‌لرزه ازگله بین ۵- تا ۳۳۴ میلیمتر جابه‌جایی عمودی داشته است. همچنین مناطقی که دارای پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش بوده‌اند و جابه‌جایی بیش از ۱۰۰ میلیمتر داشته‌اند، شناسایی شده و به‌عنوان مناطق دارای بالاترین احتمال وقوع زمین‌لغزش معرفی شده‌اند. براین اساس دامنه‌های میانی منطقه و مناطق نزدیک به شهر سرپل ذهاب، به‌عنوان مناطق در معرض مخاطره شناسایی شده است. ویدال-پائز و همکاران (Vidal-Paez et al., 2025)، با استفاده از روش DInSAR با تصاویر PAZ و Sentinel-1 به پایش از راه دور تغییر شکل زمین در یک محدوده زمین‌لغزش فعال در حوضه رودخانه مایوچو علیا در شیلی مرکزی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که سرعت جابه‌جایی عمودی بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ در زمین‌لغزش یربا لوکا به ۹۴- میلی‌متر در سال رسیده است که نشان‌دهنده ادامه فعالیت در این منطقه است. بنابراین، ممکن است به زودی دوباره فرو بریزد و بر خدمات گردشگری و اکوسیستم محلی تأثیر بگذارد. همچنین این مطالعه با تمرکز بر یک منطقه کوهستانی، سودمندی تصاویر راداری برای بررسی زمین‌لغزش در مناطق دورافتاده یا صعب‌العبور، مانند بخش کوهستانی مرکز شیلی را نشان می‌دهد.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که عوامل زمین‌ساختی و رخداد‌های لرزه‌ای نقش مهمی در وقوع، توزیع و فعالیت مجدد زمین‌لغزش‌ها دارند و روش‌های سنجش از دور، به‌ویژه InSAR و DInSAR، ابزارهای کارآمدی برای پایش تغییر شکل زمین و بررسی رفتار زمین‌لغزش‌ها محسوب می‌شوند. با این حال، اغلب پژوهش‌های انجام‌شده بر رخداد‌های منفرد یا مناطق خاص متمرکز بوده‌اند و مطالعات جامعی که به‌طور هم‌زمان ارتباط ویژگی‌های تکتونیکی، زمین‌لرزه‌ها و جابه‌جایی زمین‌لغزش‌ها را در زاگرس چین‌خورده و به‌ویژه محدوده حوضه‌های تنگ حمام و الوند بررسی کنند، محدود است. از این‌رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه آبان ماه ۱۳۹۶ ازگله با بزرگی ۷/۳، در محدوده دو حوضه آبخیز مذکور انجام شده است. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی تأثیر زمین‌لرزه ازگله بر فعالیت زمین‌لغزش‌ها در حوضه‌های تنگ حمام و الوند است تا از این طریق، نقش زمین‌لرزه در وقوع زمین‌لغزش‌ها تعیین گردد و جابه‌جایی زمین‌لغزش‌های ناشی از این زمین‌لرزه در محدوده مورد مطالعه ارزیابی شود و پایه‌ای برای مطالعات آینده در زمینه مخاطرات زمین‌شناختی فراهم آورد.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شامل حوضه‌های آبخیز تنگ حمام و الوند از زاگرس چین‌خورده می‌باشد. از نظر تقسیمات سیاسی این حوضه‌ها در بخش‌های غربی استان کرمانشاه، واقع شده‌اند (شکل ۱). از نظر زمین‌شناسی، منطقه در کمربند چین‌خورده - رانده زاگرس قرار دارد و واحدهای سنگی منطقه شامل توالی ستبری از سنگ‌های رسوبی پرکامبرین تا پلیوسن و کواترنری است (Qorshi & Arian, 2010). کمربند زاگرس، فعال‌ترین پهنه سرزمین ایران از نظر لرزه‌خیزی محسوب می‌شود، به‌طوری‌که بیشترین فراوانی کانون زمین‌لرزه در این پهنه ثبت شده است (Sahraei, Ehteshami-Moinabadi & Alavi, 2023). رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ در راستای ساختارهای زمین‌شناختی در این پهنه، نشان از جنبش و فعالیت گسل‌های اصلی و فرعی دارد. وجود این گسل‌ها که تعداد آن‌ها در محدوده مورد مطالعه قابل توجه است (شامل گسل‌های کوند، پیکلا، قلاجه و بانکول)، نقش مهمی در وقوع زمین‌لرزه‌ها و شکل‌گیری پیامدهای ژئومورفولوژیکی ناشی از آن‌ها، به‌خصوص زمین‌لغزش ایفا می‌کنند. از جمله فعالیت گسل‌ها در منطقه می‌توان به گسل کوند اشاره کرد که در نتیجه فعالیت آن به‌عنوان گسل اصلی، در شکل‌گیری ساختار ناودیس ریجاب و شرایط ناپایداری زمین در منطقه نقش دارد. از نظر ساختاری، کوه شاهنشین در یال جنوبی بخش غربی ناودیس ریجاب قرار گرفته است و تمرکز تنش‌های زمین‌ساختی در حاشیه ناودیس و افزایش شیب دامنه‌ها در نتیجه جابه‌جایی‌های ساختاری، می‌تواند شرایط مساعدی برای وقوع زمین‌لغزش در منطقه را فراهم کند (Naseri, Bahrami, Salehipour Milani & Ehteshami-Moinabadi, 2025). به‌طور کلی این منطقه به‌واسطه تأثیر تکتونیک فعال ناشی از فشار صفحه عربستان به صفحه ایران، از مستعدترین نواحی برای رخداد زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه به‌شمار می‌آید. همچنین پراکندگی سازندهای زمین‌شناسی در این منطقه نشان می‌دهد که سطح وسیعی از آن را پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و سازند آسماری پوشش می‌دهد. از جمله دیگر سازندها در این محدوده می‌توان به سازند گورپی، تله‌زنگ، پابده، بختیاری، امیران، آغا‌جاری و میشان اشاره کرد که بیشترین وسعت در میان آن‌ها به سازند امیران تعلق دارد. رخنمون غالب در ناهمواری‌های این منطقه عموماً از سنگ آهک می‌باشد. ایجاد اشکال ژئومورفولوژی خاص گسل‌های راندگی فعال و رخداد زمین‌لرزه مهم‌ترین عامل خطرات زمین‌شناختی در منطقه می‌باشد (Goorabi, 2021) (شکل ۲).



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه و رومرکزهای زمین‌لرزه (منبع داده‌های رومرکز: مرکز لرزه نگاری کشور، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران)

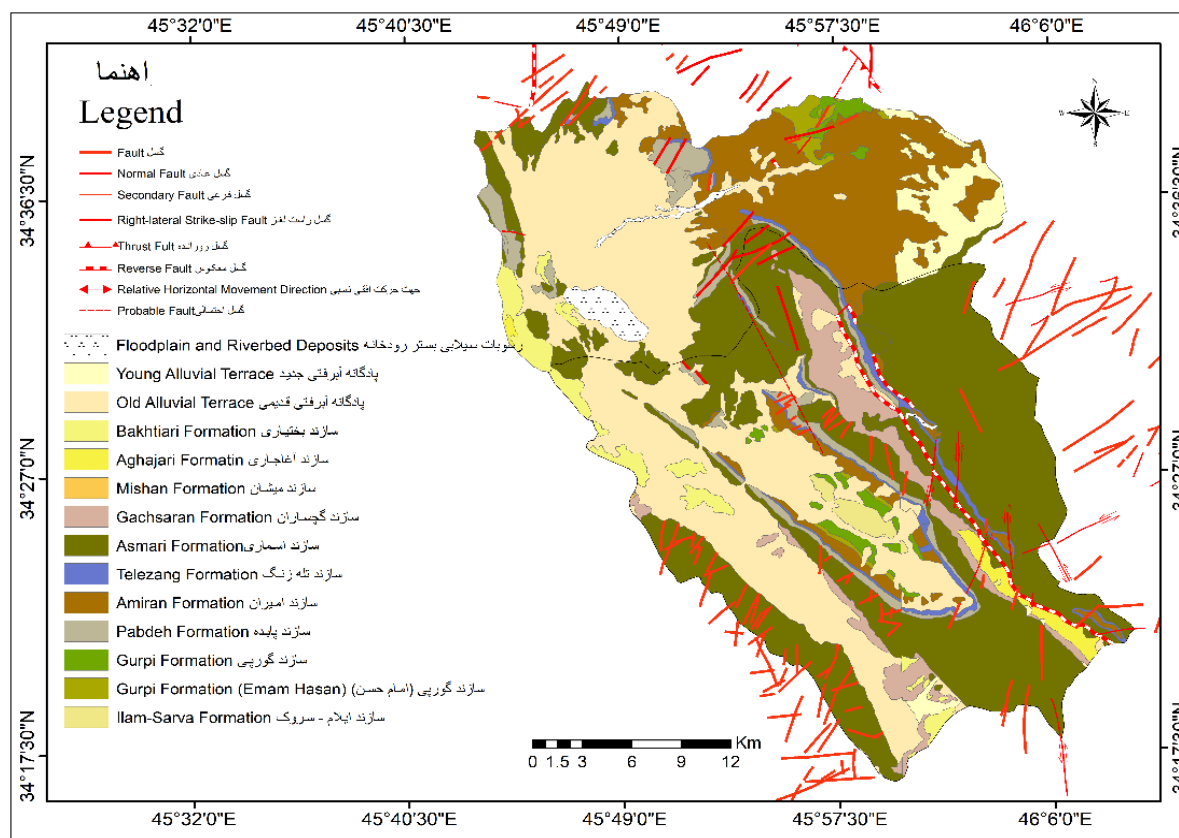
Fig. 1. Location map of the study area and earthquake epicenters (Source of earthquake epicenter data: Iranian Seismological Center (IRSC), Institute of Geophysics, University of Tehran)

مواد و روش‌ها

الف: شناسایی و تعیین فعالیت زمین‌لغزش

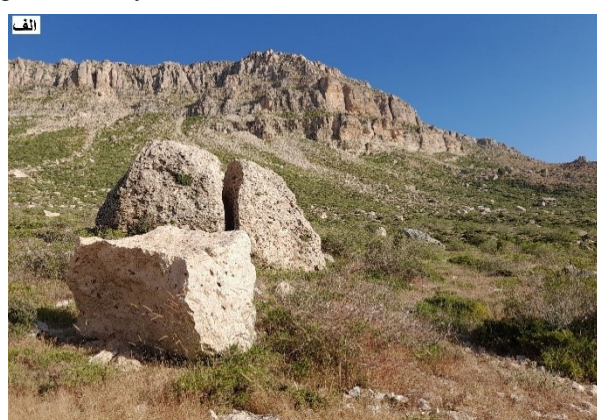
در این پژوهش، ابتدا زمین‌لغزش‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲.۵ متر حاصل از ماهواره ALOS PALSAR از طریق پایگاه داده Alaska Satellite Facility، نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای موجود در نرم افزارهای Google Earth، Arc GIS و Global Mapper شناسایی شدند. در این مطالعه، تنها زمین‌لغزش‌های از نوع Slide (شامل لغزش‌های انتقالی و چرخشی) مورد بررسی قرار گرفتند و سایر حرکات دامنه‌ای مانند ریزش سنگی، واژگونی و جریان واریزه‌ای در پایگاه داده نهایی لحاظ نشدند. همچنین، تفکیک زمین‌لغزش‌های قدیمی و جدید بر اساس مقایسه تصاویر ماهواره‌ای قبل و بعد از زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ انجام شد؛ به‌گونه‌ای که زمین‌لغزش‌هایی که آثار آن‌ها در تصاویر پیش از زمین‌لرزه قابل مشاهده بود، به‌عنوان زمین‌لغزش قدیمی و رخدادهایی که پس از زمین‌لرزه ایجاد شده بودند به‌عنوان زمین‌لغزش جدید در نظر گرفته شدند. سپس به منظور بررسی موقعیت دقیق و صحت سنجی زمین‌لغزش‌ها بازدید میدانی در محدوده مورد مطالعه انجام گرفت. مشاهدات میدانی در محل زمین‌لغزش‌های قدیمی و جدید، وجود نشانه‌هایی همچون آشفتگی در پوشش گیاهی، گسیختگی‌ها و درز و شکاف‌ها، قطعه سنگ‌های بزرگ، انحراف و کج شدگی درختان و تغییر مسیر آبراهه‌ها را نشان می‌دهد. افزون بر این، بررسی

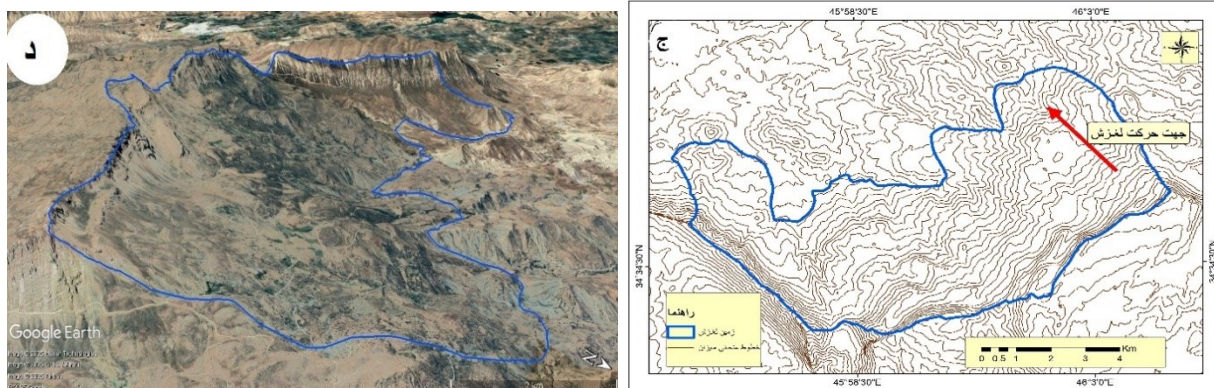
نقشه‌های توپوگرافی بزرگ مقیاس و تغییرات منحنی میزان (به‌صورت چاله‌ها و پرتگاه‌های متعدد) نیز در شناسایی زمین‌لغزش‌ها نقش مؤثری دارد، به‌طور کلی با شواهدی مانند پرتگاه جدید، تغییرات رنگ و بافت خاک سطح دامنه و تغییرات پوشش گیاهی، زمین‌لغزش‌های جدید از قدیمی تفکیک شدند (شکل ۳) (Naseri et al., 2025).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

Fig. 2. Geological map of the study area





شکل ۳ - نمونه‌هایی از معیارهای مورفولوژیکی و تصویری مورد استفاده در شناسایی زمین‌لغزش‌ها در محدوده مورد مطالعه: الف) وجود قطعات و بلوک‌های جابه‌جاشده در توده لغزشی جدید؛ ب) گسیختگی و شکاف در سطح زمین‌لغزش جدید؛ ج) خطوط و ناهمواری‌های توپوگرافی مرتبط با زمین‌لغزش قدیمی در منطقه، براساس DEM؛ د) نمایی از زمین‌لغزش قدیمی در تصویر Google Earth.

Fig. 3. Examples of morphological and visual criteria used for landslide identification in the study area: A) Displaced rock fragments and blocks within a recent landslide mass; B) Surface ruptures and cracks on the recent landslide surface; C) Topographic lineaments and morphological features associated with an old landslide derived from the DEM; D) Google Earth image showing an old landslide in the study area.

ب: تعیین میزان جابه‌جایی زمین

با هدف ارزیابی میزان تغییرات سطح زمین در نتیجه وقوع زمین‌لغزش در بعد از وقوع زلزله از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده گردید. روش تداخل‌سنجی و اینترفرومتری روزه مصنوعی رادار (InSAR) برای اندازه‌گیری جابه‌جایی سطوح کوچک در موقعیت‌های مختلف از جمله پدیده‌های مختلف انسانی، زمین‌لغزش‌ها و حفاری استفاده شده‌اند (Bayer, Simoni, Schmidt & Bertello, 2017). در تداخل‌سنجی راداری تفاوت فاز دو تصویر از یک منطقه زمانی و خط مبنای مشخص تعیین می‌گردد (Dehghani Bidgoli, 2020). روش تداخل‌سنجی راداری (InSAR) امکان تولید مدل رقومی ناهمواری‌های زمین را فراهم می‌آورد (Abedini & Mohammadzadeh Shishehgaran, 2022). در واقع، در روش تداخل‌سنجی راداری فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌ها در بازه‌های زمانی مختلف تصویربرداری، پیکسل به پیکسل مقایسه می‌گردد و از ضرب دو سیگنال وابسته، فاز تداخل‌سنجی راداری از طریق روابط (۱ و ۲) به دست می‌آید (Eslah, Zarehshahi, Malekzadeh Bafghi & Hassanabadi, 2015). که در آن y_1 و y_2 به ترتیب سیگنال‌های مختلط تصاویر مرجع و ثانویه، $|y|$ دامنه سیگنال، φ فاز سیگنال، i واحد موهومی و $*$ نشان‌دهنده مزدوج مختلط (Complex Conjugate) است. در نتیجه ضرب سیگنال تصویر مرجع در مزدوج مختلط تصویر ثانویه، اختلاف فاز $(\varphi_1 - \varphi_2)$ استخراج شده و این اختلاف فاز، مبنای تشکیل اینترفروگرام و برآورد جابه‌جایی سطح زمین در روش InSAR است.

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

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

$$y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| \exp(i(\varphi_1 - \varphi_2))$$

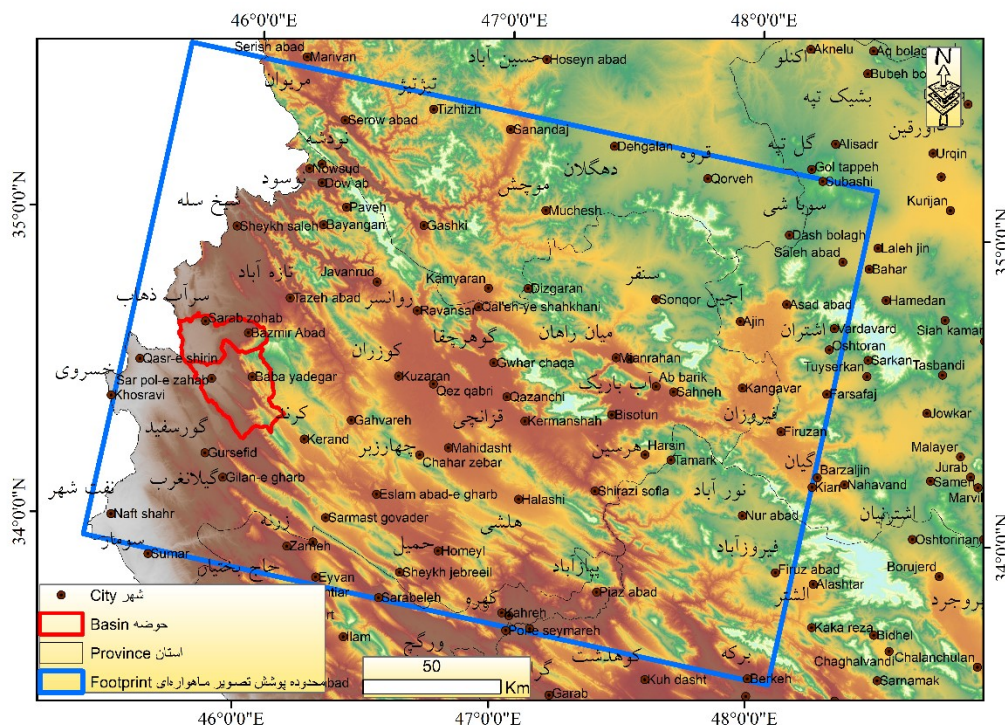
به منظور بررسی و تعیین میزان جابه‌جایی و حرکت توده‌های لغزشی از روش تداخل‌سنجی رادار و تصاویر راداری سنجنده Sentinel-1 استفاده شد. تداخل‌سنجی یا اینترفرومتری روش استفاده از اختلاف فاز سیگنال‌های برگشتی از سطح زمین در دو تصویر SAR گرفته شده با تأخیر زمانی یا دارای پارالاکس از یک منطقه برای استخراج ارتفاع یا اطلاعات مربوط به تغییرات سطح

زمین اطلاق می شود. اساس کار این روش، استفاده از اطلاعات فاز راداری بازتابی از زمین است، به نحوی که تغییرات ایجاد شده در سطح زمین سبب اختلاف فاز در دو تصویر رادار در دو زمان مختلف از منطقه ای مشابه می شود (Shirani & Khosh Baten, 2016)؛ که با استفاده از آن اختلاف فاز ناشی از دگرشکلی و جابه جایی زمین در منطقه مورد مطالعه برای زمین لرزه هایی که در اثر زمین لرزه در سال های اخیر به وقوع پیوسته است، بررسی شده است. در مجموع ۱۲ تصویر راداری Sentinel-1 شامل شش تصویر قبل از وقوع زمین لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ (۱۲ نوامبر ۲۰۱۷) و شش تصویر بعد از آن، از <https://scihub.copernicus.eu> دانلود گردید (شکل ۴). لازم به ذکر است که به دلیل ضرورت انتخاب تصاویر با همدوسی مناسب و حداقل تأثیرپذیری از تغییرات فصلی در سطح زمین از جمله رویش پوشش گیاهی در دوره های زمانی مختلف و تأثیر آن بر نتایج تداخل سنجی راداری و فاصله زمانی بین اواخر دسامبر ۲۰۱۷ تا ژوئیه ۲۰۱۸ در مجموعه داده انتخاب گردید. مشخصات تصاویر شامل تاریخ تصویربرداری، مدار قطبش و سایر ویژگی ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- داده های راداری مورد استفاده و مشخصات آن ها

Table 1- Radar data used and their specifications

شماره Num.	زمان تصویر Image time	دوره پایش Monitoring period	مشخصات تصویر Image specification	قطبش Polarization	مسیر مداری Orbit direction	مشخصات اوربیت Orbit specification	زمان اوربیت Orbit time
1	2017-07-10T08:26:18	قبل (before)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20170711
2	2017-08-15T05:08:56	قبل (before)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20170816
3	2017-09-08T05:19:54	قبل (before)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20170909
4	2017-09-20T05:21:56	قبل (before)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20170921
5	2017-10-02T05:29:04	قبل (before)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20171003
6	2017-11-07T05:21:05	قبل (before)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20171108
7	2017-11-19T05:30:32	بعد (after)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20171120
8	2017-12-01T05:22:04	بعد (after)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20171202
9	2017-12-25T06:25:24	بعد (after)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20171226
10	2018-07-05T05:32:39	بعد (after)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20180706
11	2018-08-10T05:14:40	بعد (after)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20180811
12	2018-09-15T05:18:38	بعد (after)	S1A_IW_SLC__1S DV	VV+VH	نزولی (Descending)	S1A_OPER_AUX_PO EORB_OPOD	20180916



شکل ۴- محدوده پوشش تصاویر راداری ALOS PALSAR

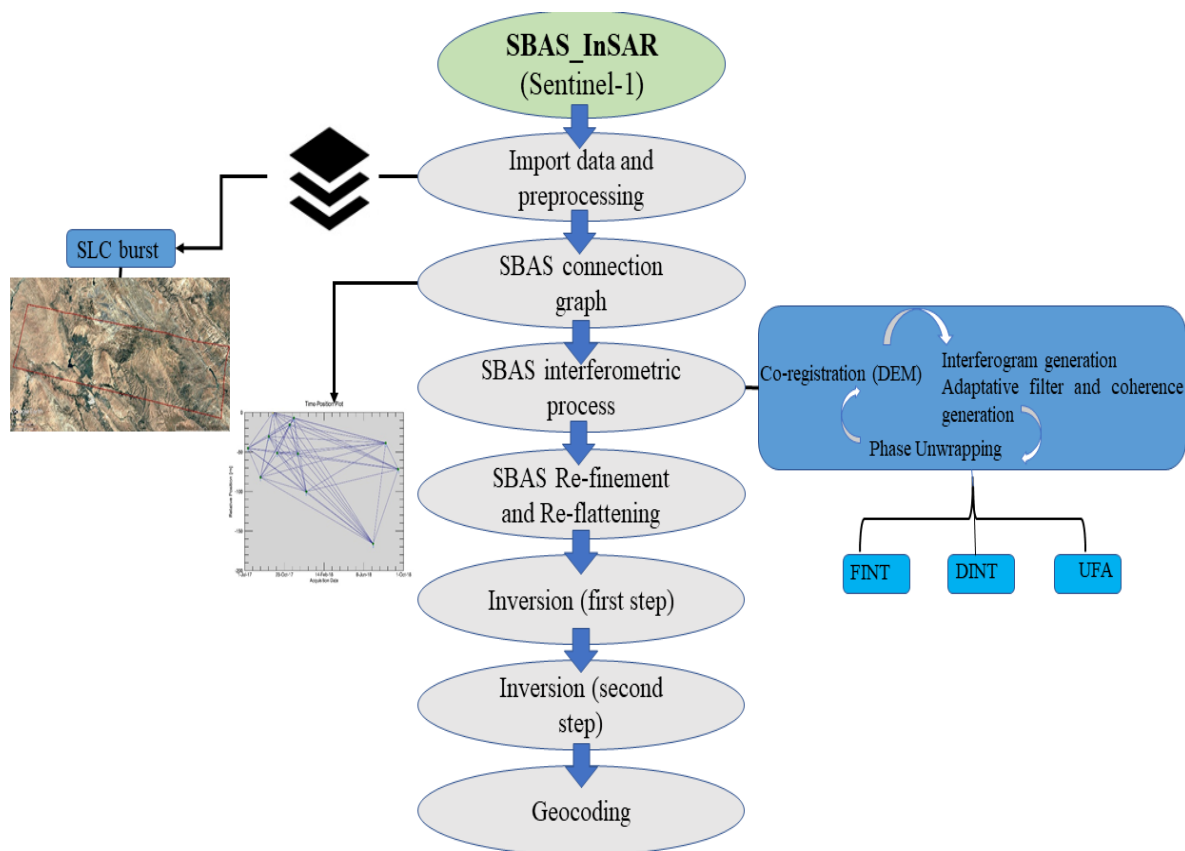
Fig. 4. ALOS PALSAR radar image footprint

پس از واردسازی تصاویر به محیط نرم‌افزارهای ENVI و SARscape، به منظور پوشش کامل محدوده مورد مطالعه، برست^۱ متناظر با منطقه از تصاویر Sentinel-1 انتخاب شد تا در فرایند تداخل‌سنجی راداری مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۵). سپس ارتباط زمانی و مکانی بین تصاویر با استفاده از گراف اتصال (Connection Graph) بررسی شد. این گراف‌ها به منظور ارزیابی توزیع خط مبناها و اطمینان از پیوستگی شبکه تداخل‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند و بر اساس آن‌ها، جفت‌های تصویری مناسب برای پردازش SBAS انتخاب شدند. حداکثر خط مبنای زمانی ۳۶۵ روز و حداکثر خط مبنای مکانی ۴۵ متر در فرایند اینترفروگرام‌ها در محیط SARscape در نظر گرفته شد. در ادامه، پردازش تداخل‌سنجی در چارچوب روش SBAS Interferometric Processing انجام شد که شامل هم‌مرجع‌سازی تصاویر، تولید تداخل‌نماهای، فیلترگذاری و بازپیچی فاز بود. برای حذف مؤلفه توپوگرافی از فاز تداخلی، مدل رقومی ارتفاع منطقه به‌عنوان داده کمکی در فرایند پردازش به‌کار گرفته شد. خروجی این مرحله شامل تداخل‌نماهای فیلترشده (FINT)، تداخل‌نماهای تفاضلی فاقد اثر توپوگرافی (DINT) و فاز بازپیچی‌شده (UFA) بود. به منظور کاهش خطاهای سیستماتیک و بهبود کیفیت داده‌ها، مرحله Refinement and Re flattening با استفاده از نقاط کنترل زمین (GCP) اجرا شد. این مرحله موجب تصحیح شیب‌های باقی‌مانده فاز و هموارسازی شبکه تداخل‌نماها گردید. در مرحله بعد، وارون‌سازی داده‌ها با اجرای SBAS Inversion – First Step انجام شد و نقشه نرخ متوسط جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره سطح زمین استخراج گردید. سپس با اجرای SBAS Inversion – Second Step، سری زمانی جابه‌جایی سطح زمین برای هر تاریخ تصویربرداری محاسبه و اثرات اتمسفری تصحیح شد. در نهایت، به منظور انتقال نتایج از هندسه دید ماهواره‌ای به سیستم مختصات زمینی، مرحله Geocoding انجام گرفت (اشکال ۶ و ۷).



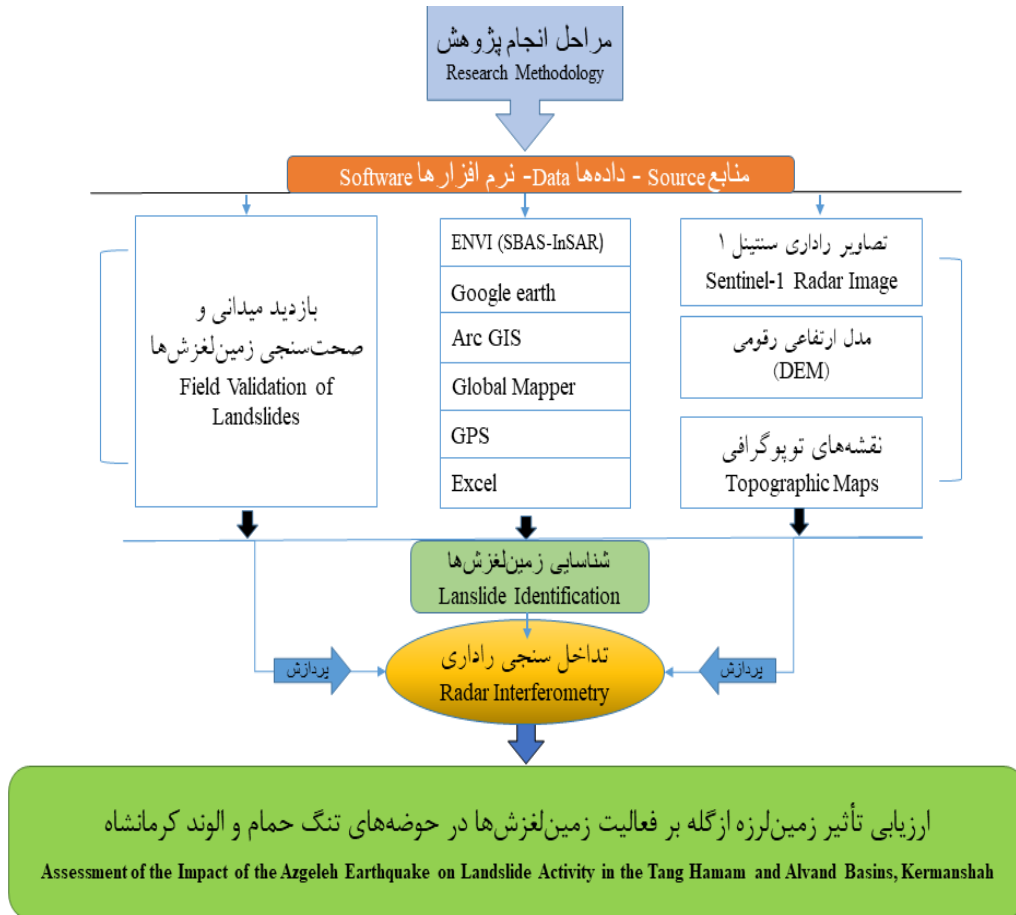
شکل ۵- برست متناظر با منطقه مورد مطالعه (burst_IW3_6_SLS)

Fig. 5. Burst corresponding to the study area (Burst_IW3_6_SLS)



شکل ۶- مراحل پردازش تداخل‌سنجی راداری (SBAS_InSAR) داده‌های Sentinel-1

Fig. 6. SBAS-InSAR processing workflow for Sentinel-1 data



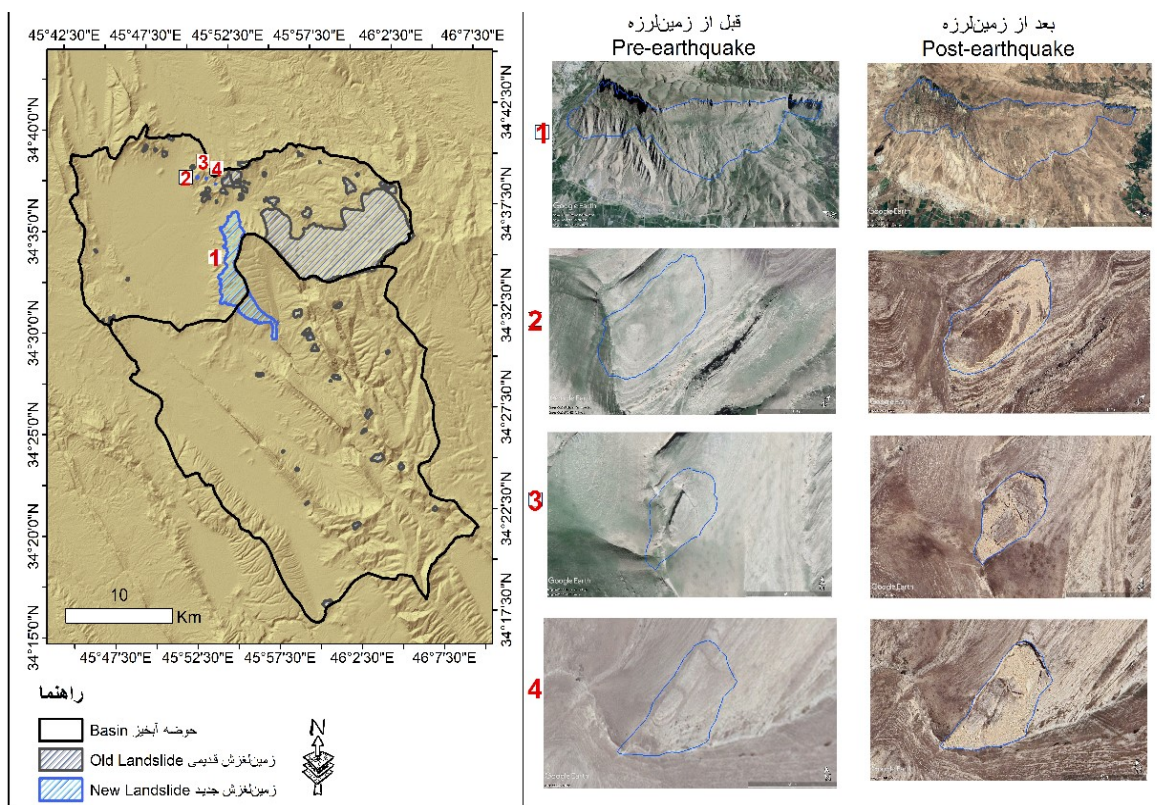
شکل ۷- فرایند روش‌شناسی پژوهش

Fig. 7. Research methodology workflow

نتایج و بحث

شناسایی و توزیع فضایی زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه

در این پژوهش با استفاده از تفسیر تصاویر ماهواره‌ای موجود در نرم افزار Google Earth و بررسی‌های تکمیلی در محیط Arc GIS و کنترل میدانی در بازه‌های مختلف زمانی (اردیبهشت ماه ۱۳۹۸، خرداد ماه ۱۴۰۳)، در مجموع تعداد ۶۵ زمین‌لغزش قدیمی و جدید در محدوده مورد مطالعه شناسایی شد. بررسی تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی نشان می‌دهد که در اثر زمین‌لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶، چهار زمین‌لغزش جدید در این محدوده به وقوع پیوسته است. بزرگ‌ترین زمین‌لغزش از نظر وسعت، در دامنه‌های کوه شاهنشین رخ داده و مساحت آن برابر با ۱۸۲۴۲۶۷۷/۴۷ متر مربع است که به‌طور قابل توجهی بیشتر از سایر زمین‌لغزش‌های منطقه است (شکل ۸). این زمین‌لغزش بخش وسیعی از دامنه را درگیر کرده و از نظر ابعاد، توسعه جانبی و میزان تغییر شکل، شاخص‌ترین پدیده ناپایداری دامنه‌ای پس از زمین‌لرزه محسوب می‌شود. در مقابل، سه زمین‌لغزش دیگر که به‌ترتیب دارای مساحت‌های ۲۲۵۶۰/۰۷، ۶۷۲۷/۷۳ و ۵۵۲۸/۸۶ متر مربع هستند، در دامنه‌های کوه گامیشان رخ داده‌اند. زمین‌لغزش‌های واقع در دامنه گامیشان با وجود مساحت کمتر نسبت به زمین‌لغزش شاهنشین، به‌وضوح به‌عنوان زمین‌لغزش‌های جدید و مرتبط با رویداد لرزه‌ای قابل تفکیک بوده و بیانگر تأثیر زمین‌لرزه بر ناپایداری دامنه‌های این بخش از منطقه می‌باشند.

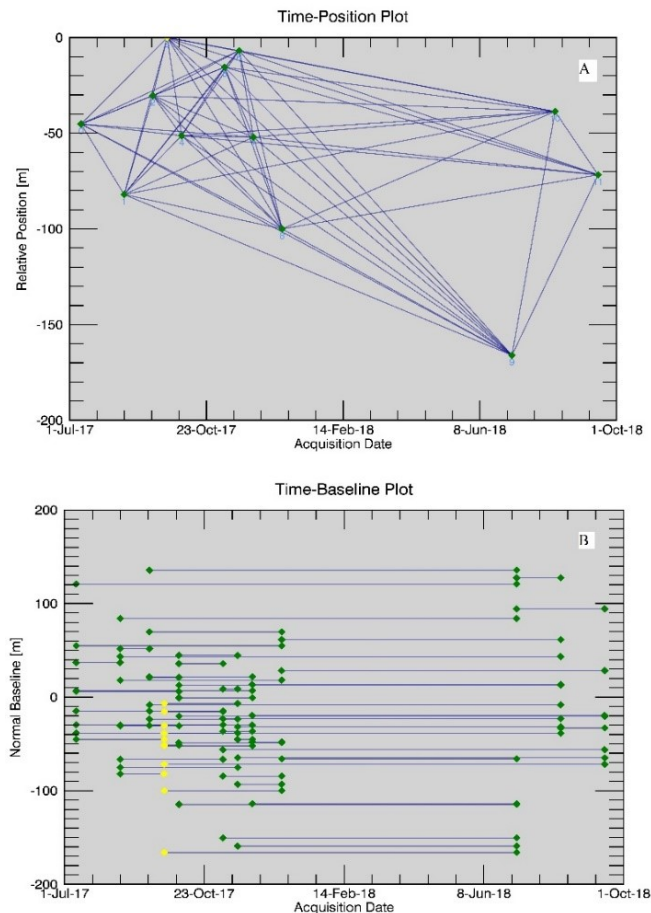


شکل ۸- موقعیت زمین‌لغزش‌های شناسایی‌شده در منطقه مورد مطالعه و تصاویر قبل و بعد از وقوع زمین‌لغزش‌ها. تصویر شماره ۱ مربوط به دامنه کوه شاهنشین و تصاویر شماره ۲، ۳ و ۴ مربوط به دامنه کوه گامیشان

Fig. 8. Locations of the identified landslides in the study area and images acquired before and after the landslide events. Image No. 1 corresponds to the Shahneshin Mountain slope, whereas Images Nos. 2, 3, and 4 correspond to the Gamishan Mountain slope.

تحلیل داده‌های راداری و بررسی روند زمانی آن‌ها

در این پژوهش، تصاویر راداری Sentinel-1 مورد استفاده با توجه به پوشش مناسب محدوده مطالعه و شرایط مطلوب از نظر فاصله زمانی و خط مبنای عمود انتخاب شدند. بررسی نمودار اتصال زوج تصاویر (Time-Position Plot) نشان می‌دهد که این تصاویر راداری منتخب، بازه زمانی از اواخر سال ۲۰۱۷ تا اواخر سال ۲۰۱۸ را پوشش می‌دهند. این بازه زمانی شامل دوره پیش‌لرزه‌ای و به‌ویژه دوره پس از وقوع زمین‌لرزه ۷/۳ ریشتری ۲۱ آبان ۱۳۹۶ ازگله است که امکان بررسی تغییر شکل‌های پس‌لرزه‌ای سطح زمین را فراهم می‌سازد. تمرکز بیشتر اتصالات بین تصاویر مربوط به ماه‌های پس از رخداد زمین‌لرزه بیانگر افزایش تعداد زوج تصاویر قابل استفاده در این دوره و در نتیجه افزایش توان شبکه تداخل‌سنجی در آشکارسازی جابه‌جایی‌های سطحی می‌باشد. همچنین، اغلب زوج تصاویر دارای فاصله زمانی کوتاه بوده که این امر موجب کاهش دکوره‌شدگی زمانی و افزایش قابلیت اطمینان فاز تداخلی شده است. با توجه به نمودار (Time-Baseline Plot) بیشتر تصاویر حول محدوده صفر قرار دارند و از نظر مکانی، توزیع موقعیت نسبی تصاویر نشان می‌دهد که بخش عمده زوج تصاویر دارای خط مبنای عمود محدود و کمتر از مقادیر بحرانی هستند. این الگو حاکی از پایداری شبکه اینترفروگرام‌ها و مناسب بودن شرایط هندسی داده‌ها برای استخراج جابه‌جایی سطح زمین می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹- ویژگی‌های داده‌های راداری تصاویر Sentinel-1. A: نمودار اتصال زوج تصاویر. B: نمودار خط مبنای عمود زوج تصاویر
Fig. 9. Characteristics of Sentinel-1 radar data. A: Image pair connection diagram. B: Perpendicular baseline diagram of image pairs

تداخل‌سنجی راداری و برآورد جابه‌جایی زمین‌لغزش‌ها در راستای خط دید ماهواره (LOS)

نتایج حاصل از تحلیل تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر روش SBAS-InSAR که بر روی داده‌های راداری Sentinel-1 با استفاده از نرم‌افزار SARscape و در نرم‌افزار ENVI بر اساس قطبش‌های ترکیبی VV+VH انجام شده است، بیانگر وقوع تغییر شکل‌های قابل توجه در پهنه زمین‌لغزش‌های شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که زمین‌لغزش‌های رخ داده، علاوه بر گسیختگی‌های سطحی، با جابه‌جایی معناداری همراه بوده‌اند که به‌وضوح در نقشه‌های تغییر شکل حاصل از پردازش InSAR، قابل آشکارسازی است.

در دامنه‌های کوه شاهنشین، زمین‌لغزش اصلی منطقه بیشترین میزان تغییر شکل را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که مقادیر جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره استخراج شده از نتایج تداخل‌سنجی در این پهنه، حداقل حدود ۲۴ سانتی‌متر و حداکثر نزدیک به ۵۳ سانتی‌متر برآورد شده است. میانگین جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره در این زمین‌لغزش حدود ۴۲ سانتی‌متر محاسبه گردید که بیانگر شدت بالای تغییر شکل دامنه و تأثیر تنش‌های لرزه‌ای ناشی از زمین‌لرزه بر فعال‌سازی و گسترش این ناپایداری دامنه‌ای است. در دامنه‌های کوه گامیشان نیز سه زمین‌لغزش (شماره‌های ۲، ۳ و ۴) با توجه به مساحت کمتر، الگوی نسبتاً یکنواختی از جابه‌جایی را نشان می‌دهند. بیشینه میزان جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره در این زمین‌لغزش‌ها به ترتیب حدود ۴۵، ۴۶ و ۴۳

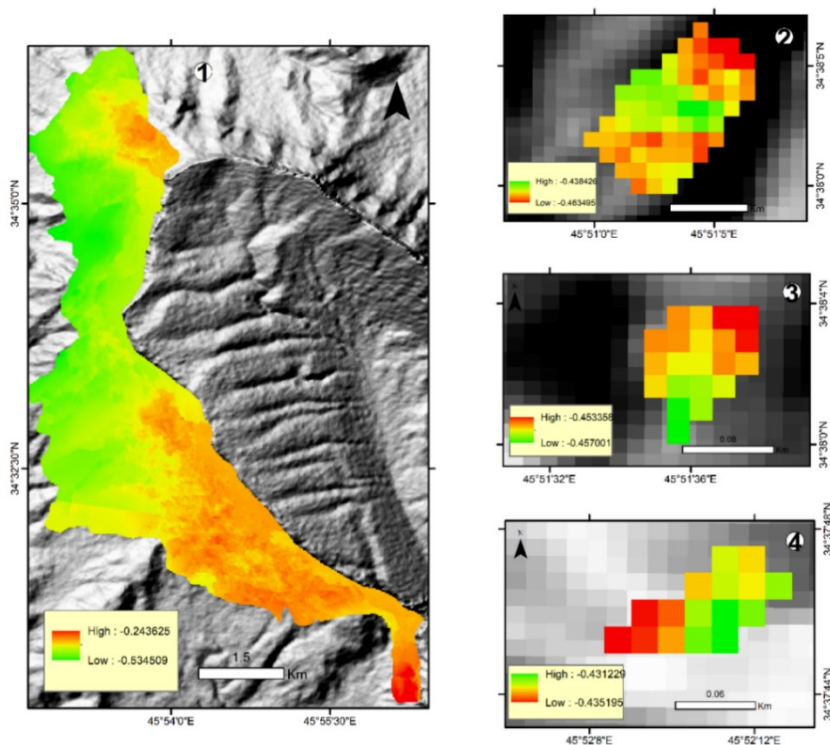
سانتی‌متر و کمینه مقادیر ثبت‌شده در بازه‌ای نزدیک به ۴۳ تا ۴۵ سانتی‌متر قرار دارد. میانگین جابه‌جایی محاسبه‌شده برای هر سه زمین‌لغزش حدود ۴۵ سانتی‌متر می‌باشد که حاکی از پاسخ مشابه دامنه‌های گامیشان به بارگذاری لرزه‌ای و شرایط زمین‌ساختی حاکم بر منطقه است (جدول ۲).

به‌طور کلی، نتایج تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد که اگرچه زمین‌لغزش شاهنشین از نظر وسعت و دامنه تغییر شکل شاخص‌تر است، اما زمین‌لغزش‌های گامیشان نیز مقادیر قابل توجهی از جابه‌جایی را تجربه کرده‌اند. به منظور بررسی صحت نتایج، بازدیدهای میدانی از زمین‌لغزش‌های شناسایی شده انجام شد و موقعیت آن‌ها ثبت گردید. این موضوع بر نقش مؤثر زمین‌لرزه در ایجاد و تشدید ناپایداری‌های دامنه‌ای و بروز الگوهای مشخص تغییر شکل و جابه‌جایی در پهنه مورد مطالعه تأکید می‌کند. همچنین لازم به ذکر است که کنترل کیفیت نتایج براساس شاخص همدوسی (Coherence) و معیارهای داخلی روش SBAS در مرحله انتخاب اینترفروگرام‌ها انجام شده است و تنها زوج تصاویر با کیفیت مناسب در پردازش نهایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (اشکال ۱۰ و ۱۱).

جدول ۲- میزان جابه‌جایی زمین‌لغزش‌ها در راستای خط دید ماهواره (LOS) براساس نتایج تداخل‌سنجی راداری

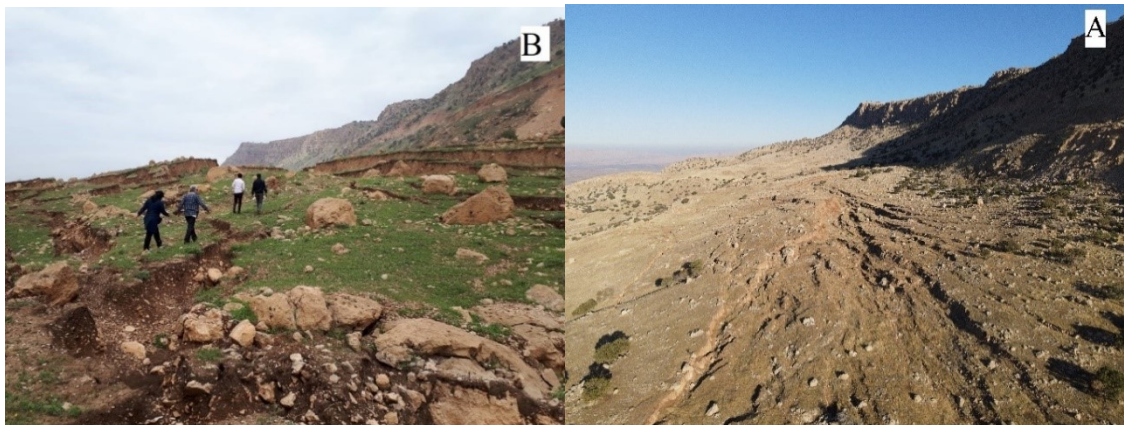
Table 2- Rate of landslide displacement along the satellite line-of-sight (LOS) direction based on the results of InSAR analysis

میانگین جابه‌جایی Mean (m)	کمترین جابه‌جایی Min (m)	بیشترین جابه‌جایی Max (m)	مساحت زمین‌لغزش landslide area (m ²)	زمین‌لغزش landslide
-0/428	-0/243	-0/534	18242677/47	شاهنشین ۱
-0/452	-0/438	-0/463	22560/07	گامیشان ۲
-0/454	-0/453	-0/457	6727/73	گامیشان ۳
-0/433	-0/431	-0/435	5528/86	گامیشان ۴



شکل ۱۰- نقشه میزان جابه‌جایی زمین‌لغزش‌ها در راستای خط دید ماهواره (LOS)

Fig. 10. Map of landslide displacement along the satellite line-of-sight (LOS) direction

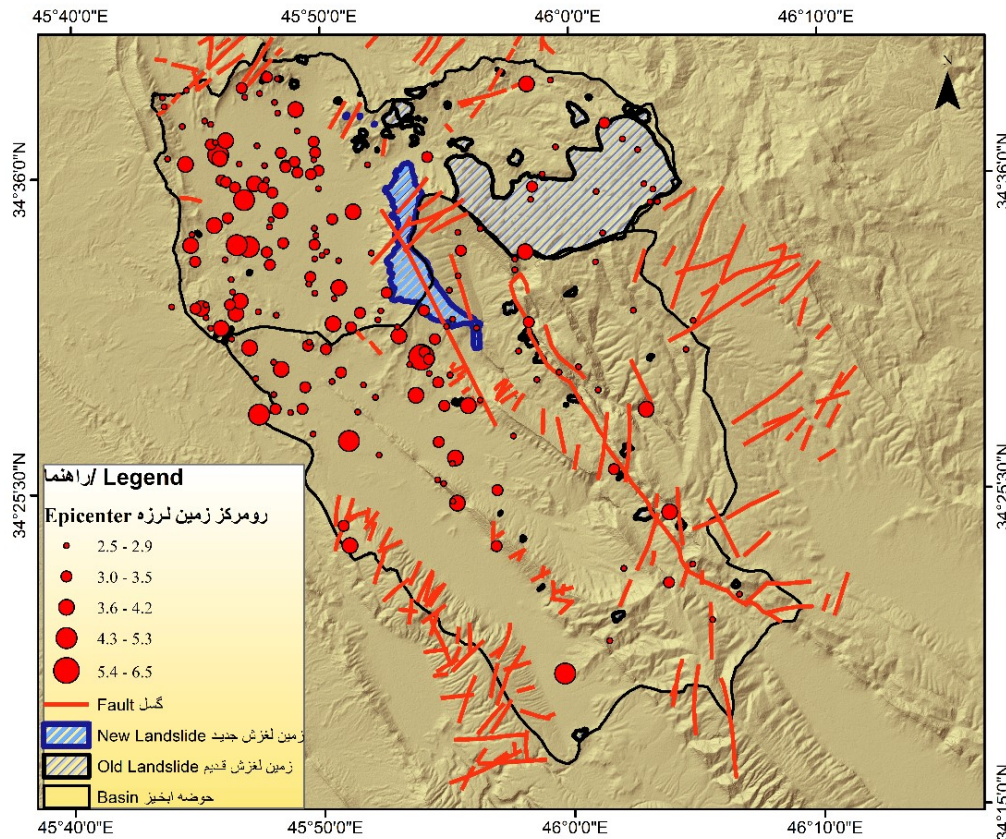


شکل ۱۱- تصویری از محل وقوع زمین لغزش ناشی از زمین لرزه در دامنه کوه شاهنشین در منطقه مورد مطالعه

Fig. 11. Images of the earthquake-induced landslide location on the slope of Mount Shahneshin in the study area

وقوع زمین لغزش‌ها حاصل برهم‌کنش عوامل زمینه‌ای دامنه و عوامل محرک است. در این میان، زمین لرزه‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محرک، می‌توانند موجب کاهش مقاومت و گسیختگی ناگهانی دامنه‌های مستعد شوند. هم‌زمانی وقوع چهار زمین لغزش جدید با زمین لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶، همراه با نزدیکی مکانی آن‌ها به ساختارهای فعال و شواهد تغییر شکل سطحی، نقش مهم این رویداد لرزه‌ای را به‌عنوان عامل محرک در فعال‌سازی این ناپایداری‌ها نشان می‌دهد.

بزرگ‌ترین زمین لغزش رخ داده در دامنه‌های کوه شاهنشین، از نظر وسعت، میزان تغییر شکل و دامنه جابه‌جایی، شاخص‌ترین پدیده ناپایداری دامنه‌ای پس از زمین لرزه محسوب می‌شود. وسعت بسیار زیاد این زمین لغزش در مقایسه با سایر زمین لغزش‌های منطقه، نشان‌دهنده فراهم بودن شرایط زمین‌ساختی مساعد برای گسیختگی گسترده دامنه است. قرارگیری این دامنه در مجاورت گسل‌های فعال و رخنمون سنگ‌های آهکی درهم‌شکسته، می‌تواند موجب تمرکز تنش و کاهش مقاومت برشی توده‌ها در زمان وقوع زمین لرزه شده باشد. بررسی توزیع فضایی زمین لغزش‌های قدیم و جدید در کنار گسل‌های فعال و رومرکزهای زمین لرزه نشان می‌دهد که فعالیت لرزه‌ای منطقه نقش تعیین‌کننده‌ای در فعال‌سازی این زمین لغزش‌ها داشته است. رومرکزهای زمین لرزه با بزرگی ۴/۵ و بالاتر، تراکم قابل توجهی را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهند. این تمرکز لرزه‌ای در مجاورت ساختارهای گسلی فعال، هم‌زمانی و هم‌پوشانی مکانی روشنی با محل وقوع زمین لغزش‌های جدید دارد که بیانگر حساسیت بالای دامنه‌های این ناحیه نسبت به جنبش‌های لرزه‌ای است. همچنین بررسی شواهد عینی تغییر شکل سطح زمین در دامنه کوه شاهنشین نشان‌دهنده بروز جابه‌جایی، بالآمدگی‌های موضعی و گسیختگی توده‌های خاک و سنگ در محدوده زمین لغزش می‌باشد. این الگوها بیانگر جابه‌جایی نامتقارن توده لغزشی و تمرکز تغییر شکل در بخش‌های مرکزی و پایینی دامنه هستند و نشان می‌دهند که زمین لرزه موجب ناپایداری شدید و تغییر شکل قابل توجه دامنه در این بخش از منطقه شده است. مجموعه این شواهد، نقش مهم زمین لرزه به‌عنوان عامل محرک در ایجاد و توسعه زمین لغزش‌های جدید را نشان می‌دهد. هم راستا با یافته‌های این پژوهش، گورابی (Goorabi, 2021) و واجدیان و همکاران (Vajedian et al., 2018)، نیز زمین لغزش دامنه کوه شاهنشین را شاخص‌ترین زمین لغزش ناشی از زمین لرزه منطقه معرفی کرده و جابه‌جایی قابل توجه توده لغزشی را پس از زمین لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ گزارش کرده‌اند. نتایج پژوهش حاضر نیز وقوع تغییر شکل قابل ملاحظه در این دامنه و همچنین نقش مهم تنش‌های لرزه‌ای در فعال‌سازی و تشدید ناپایداری دامنه را تأیید می‌کند؛ با این حال، بررسی هم‌زمان زمین لغزش‌های شاهنشین و گامیشان نشان داد که شدت و الگوی تغییر شکل در تمامی زمین لغزش‌های ایجادشده بر اثر این زمین لرزه، یکسان نیست. در حالی که زمین لغزش شاهنشین بیشترین دامنه تغییر شکل و جابه‌جایی را نشان می‌دهد، زمین لغزش‌های گامیشان با وجود وسعت کمتر، از الگوی تغییر شکل نسبتاً یکنواخت‌تری برخوردار هستند. این یکنواختی



شکل ۱۳- پراکندگی زمین لغزش‌ها نسبت به گسل‌ها و رومرکزهای زمین‌لرزه
Fig. 13. Distribution of landslides relative to faults and earthquake epicenters

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر زمین‌لرزه بر وقوع زمین‌لغزش ناشی از زمین‌لرزه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ از گله در محدوده حوضه‌های آبخیز تنگ حمام و الوند ارزیابی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با وجود بزرگی ۷/۳ زمین‌لرزه، تعداد زمین‌لغزش‌های ایجادشده، در زمان وقوع زمین‌لرزه و همچنین موارد فعال‌شدن مجدد زمین‌لغزش‌های قدیمی، بسیار کم است. از بین ۶۵ زمین‌لغزش قدیمی و جدید که در منطقه مورد مطالعه شناسایی شده بود تنها ۴ زمین‌لغزش (۶ درصد) هم‌زمان با وقوع زمین‌لرزه شکل گرفته یا مجدداً فعال شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که وقوع زمین‌لرزه تنها یک متغیر در وقوع زمین‌لغزش است و تأثیر آن در مناطق مختلف متفاوت است و می‌بایست نقش سایر متغیرها در شکل‌گیری زمین‌لغزش مورد بررسی قرار گیرد. یافته این تحقیق می‌تواند رویکرد و نگرشی جدید در رابطه با نقش فرایندهای لرزه‌ای بر وقوع زمین‌لرزه باشد تا در انجام مطالعات به‌خصوص پهنه‌بندی‌های زمین‌لغزش وزن مناسبی برای زمین‌لرزه در شکل‌گیری لغزش در نظر گرفته شود.

تحلیل‌ها نشان می‌دهد بزرگ‌ترین زمین‌لغزش در دامنه کوه شاهنشین با مساحت ۱۸۲۴۲۶۷۷/۴۷ متر مربع، بیشینه جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره، حدود ۵۳ سانتی‌متر و میانگین جابه‌جایی ۴۲ سانتی‌متر داشته است. سه زمین‌لغزش دیگر در دامنه‌های کوه گامیشان، با مساحت‌های به ترتیب ۲۲۵۶۰/۰۷، ۶۷۲۷/۷۳ و ۵۵۲۸/۸۶ متر مربع، میانگین جابه‌جایی حدود ۴۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهند و الگوی تغییر شکل آن‌ها نسبتاً یکنواخت بوده است. بررسی توزیع فضایی زمین‌لغزش‌ها در کنار گسل‌های فعال و

رومکرهای زمین‌لرزه، نشان دهنده نقش مهم جنبش‌های لرزه‌ای به‌عنوان عامل محرک در فعال‌سازی و توسعه ناپایداری‌های دامنه‌ای است؛ اگرچه سهم سایر عوامل مؤثر مانند ویژگی‌های زمین‌شناسی، مورفومتری دامنه و شرایط محیطی نیازمند بررسی‌های مستقل و تفصیلی‌تر است. نتایج حاصل از تحلیل InSAR نشان می‌دهد که تمرکز تغییر شکل در بخش‌های مرکزی و پایینی دامنه‌ها بیشترین شدت جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره را نشان می‌دهد و بیانگر نقش مؤثر تنش‌های لرزه‌ای بر ناپایداری دامنه‌ها است. این یافته‌ها بر اهمیت پایش مناطق لرزه‌خیز با استفاده از روش‌های سنجش از دور، InSAR و همچنین مدل‌سازی تغییر شکل ناشی از زمین‌لغزش‌ها برای مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی ایمن در این نواحی تأکید دارد.

با وجود اینکه داده‌های ماهواره‌ای راداری و تکنیک تداخل‌سنجی راداری ابزار بسیار مناسبی برای ارزیابی میزان جابه‌جایی سطح زمین می‌باشند ولی از آنجایی که در لغزش‌های کوچک ممکن است میزان جابه‌جایی در داخل محدوده لغزش با نرخ متفاوتی روی داده باشد، استفاده از داده‌های دقیق‌تر همانند تصاویر پهبادی و همچنین مطالعات میدانی با استفاده از GPS دو فرکانسه در قبل و بعد از وقوع لغزش در مکان‌هایی که احتمال وقوع زمین‌لغزش در آن‌ها وجود دارد یا در حال لغزش است می‌تواند به افزایش دقت نتایج کمک نماید.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش تحت حمایت مادی بنیاد علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۲۷۹۱۱ انجام شده است.

References

- Abedini, M., & Mohammadzadeh Shishehgaran, M. (2022). Landslide assessment using radar images and radar interferometry of the case study area, Nirchai Basin. *Environmental Science Studies*, 7(3), 5161-5171. [in Persian] <https://doi.org/10.22067/geoe.2025.89542.1514>
- Bayer, B., Simoni, A., Schmidt, D., & Bertello, L. (2017). Using advanced InSAR techniques to monitor landslide deformations induced by tunneling in the Northern Apennines, Italy. *Engineering Geology*, 226, 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.026>
- Cheaiab, A., Lacroix, P., Zerathe, S., Jongmans, D., Ajorlou, N., Doin, M. P., & Abdallah, C. (2022). Landslides induced by the 2017 Mw7. 3 Sarpol Zahab earthquake (Iran). *Landslides*, 19(3), 603-619. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01832-0>
- Chen, K., Xu, W., Mai, P. M., Gao, H., Zhang, L., & Ding, X. (2018). The 2017 Mw 7.3 Sarpol Zahāb Earthquake, Iran: A compact blind shallow-dipping thrust event in the mountain front fault basement. *Tectonophysics*, 747, 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.09.015>
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2003). Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology*, 68(1-2), 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00195-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00195-3)
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 43(1). <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Dehghani Bidgoli, R., Kouhbanani, H. R., & Yazdani, M. R. (2020). Mapping the subsidence of Semnan plain caused by excessive groundwater extraction using radar interferometry technique and Sentinel-1 images. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 10(39), 175-187. [in Persian] <https://doi.org/10.22125/iwe.2020.107100>

- Eslah, M., Zarehshahi, H., Malekzadeh Bafghi, S., & Hassanabadi, A. (2015), Investigation of Landslides Using Radar Imagery, Tacheometry, and GPS. The 22nd National Conference and Exhibition on Geomatics. [in Persian]
- Ganjaeian, H., Firozeh, M., Mirakhorli, A., & Yazdani, T. (2025). Landslide Susceptibility Analysis with Emphasis on Earthquake Impacts (Case Study: Karand to Sarpolzahab Corridor). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 66-84. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.94360.1591>
- Geertsema, M., Highland, L., & Vagueouis, L. (2009). Environmental impact of landslides. In *Landslides-disaster risk reduction* (pp. 589-607). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_31
- Goorabi, A. (2020). Detection of landslide induced by large earthquake using InSAR coherence techniques-Northwest Zagros, Iran. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(2), 195-205. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2019.04.002>
- Goorabi, A. (2021). Quantification of the large Melle Kaboud landslide caused by the 7.3 earthquake in Kermanshah in 2017 using interferometry. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*. 21(60), 47-63. [in Persian] <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.21.60.47>
- Görüm, T. (2019). Tectonic, topographic and rock-type influences on large landslides at the northern margin of the Anatolian Plateau. *Landslides*, 16(2), 333-346. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1097-7>
- Greif, V., & Vlcko, J. (2012). Monitoring of post-failure landslide deformation by the PS-InSAR technique at Lubietova in Central Slovakia. *Environmental Earth Sciences*, 66(6), 1585-1595. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0951-x>
- He, X., Xu, C., Qi, W., Huang, Y., Cheng, J., Xu, X., & Dai, B. (2021). Landslides triggered by the 2020 qiaojia Mw5.1 earthquake, yunnan, China: distribution, influence factors and tectonic significance. *Journal of Earth Science*, 32(5), 1056-1068. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1492-1>
- Heidari, M., Mazidi, A., & Rousti, I. (2024). Investigating the Earthquake Cloud Precursor in the 2017 Ezgeleh Earthquake in Kermanshah, Iran, *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(49), 151-171. [in Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75548.1186>
- Jibson, R. W., Harp, E. L., & Michael, J. A. (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, 58(3-4), 271-289. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00039-9)
- Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of America*. [Bahrami-eng.docx](#)
- Li, Y., Ding, M., Zhang, Q., Luo, Z., Huang, W., Zhang, C., & Jiang, H. (2024). Old Landslide Detection Using Optical Remote Sensing Images Based on Improved YOLOv8. *Applied Sciences*, 14(3), 1100. <https://doi.org/10.3390/app14031100>
- Naderi, F., Fotoohi, S., Negaresh, H., & Khalili, M. (2021). Zoning of Geomorphological Instabilities Caused by Ezgeleh Earthquake (November 13, 2017, Mw = 7.3) in Ilam and Kermanshah Provinces With Vikor Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(2), 21-41. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.68682.1016>
- Naseri, F., Bahrami, Sh., Salehipour Milani, A., & Ehteshami-Moinabadi, M. (2025). Geological and morphotectonic analysis of landslides (Study area: Tang Hamam and Alvand drainage basins in Sarpol Zahab county). *Environmental Hazards Management*, 12(2), 117-133. <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.400930.892>
- Peck, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geotechnique*, 19(2), 171-187. <https://doi.org/10.1680/geot.1969.19.2.171>
- Qorshi, M., & Arian, M. (2010). *Tectonics of Iran*. Blue Square Publications. [in Persian]
- Sadeghi, A., Sharifhashjin, S., Rahimipour Sheikhhaninejad, M. A., & Mahmoodi Chenari, H. (2022), Landslide detection and monitoring using InSAR, case study: Ardal and koohrang Counties, Iran. *Quantitative Geomorphology Research*, 11(1), 133-153. [in Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.320461.1326>

- Sahraei, H., Ehteshami-Moinabadi, M., & Alavi, S. A. (2023). Variation of seismicity parameters and its link to tectonic features of the central portion of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Geol Carpathica*, 74(4), 355-369. <http://dx.doi.org/10.31577/GeolCarp.2023.19>
- Shirani, K., & Khosh Baten, M. (2016). The study and monitoring of an active landslide using differential interferometry synthetic aperture RADAR (Case atudy: Noghol landslide, semirom). *Quaternari Journal of Iran*, 2(1), 5-65. <https://doi.org/10.22034/iraqua.2016.701900>
- Vajedian, S., & Motagh, M. (2018). Coseismic displacement analysis of the 12 November 2017 Mw 7.3 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from SAR Interferometry, burst overlap interferometry and offset tracking. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 205-209. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-205-2018>
- Vajedian, S., Motagh, M., Mousavi, Z., Motaghi, K., Fielding, E. J., Akbari, B., ... & Darabi, A. (2018). Coseismic deformation field of the Mw 7.3 12 November 2017 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake: A decoupling horizon in the northern Zagros Mountains inferred from InSAR observations. *Remote Sensing*, 10(10), 1589. <https://doi.org/10.3390/rs10101589>
- Vidal-Páez, P., Clavero, J., Ramírez, V., Fernández-Sarria, A., Meseguer-Ruiz, O., Aguilera, M., & Mena, F. (2025). Remote Monitoring of Ground Deformation in an Active Landslide Area, Upper Mapocho River Basin, Central Chile, Using DInSAR Technique with PAZ and Sentinel-1 Imagery. *Remote Sensing*, 17(17), 2921. <https://doi.org/10.3390/rs17172921>
- Xiao, Z., Xu, C., Huang, Y., He, X., Shao, X., Chen, Z., & Xu, X. (2023). Analysis of spatial distribution of landslides triggered by the Ms 6.8 Luding earthquake in China on September 5, 2022. *Geoenvironmental Disasters*, 10(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s40677-023-00233-w>
- Yang, Y. H., Hu, J. C., Yassaghi, A., Tsai, M. C., Zare, M., Chen, Q., ... & Kamranzad, F. (2018). Midcrustal thrusting and vertical deformation partitioning constraint by 2017 M w 7.3 Sarpol Zahab earthquake in Zagros Mountain Belt, Iran. *Seismological Research Letters*, 89(6), 2204-2213. <https://doi.org/10.1785/0220180022>
- Zhao, C., Zhang, Q., He, Y., Peng, J., Yang, C., & Kang, Y. (2016). Small-scale loess landslide monitoring with small baseline subsets interferometric synthetic aperture radar technique-case study of Xingyuan landslide, Shaanxi, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(2), 026030. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19910>