



Landslide Susceptibility Analysis with Emphasis on Earthquake Impacts (Case Study: Karand to Sarpolzahab Corridor)

Hamid Ganjaeian ^{1*}, Milad Firozeh ², Ali Mirakhorli ³, Toktam Yazdani ⁴

^{1*} Ph.D. in Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran

² M.Sc. in Urban Engineering, Urban Planning Major, Allameh Tabatabaie University, Tehran, Iran

³ Ph.D. Student in Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ Ph.D. in Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 15 June 2025

Revised: 09 September 2025

Accepted: 11 September 2025

Available Online: 14 September 2025

Keywords:

Landslide Susceptibility

Earthquake

Earthquake-induced landslide

Remote Sensing

Slope Stability

ABSTRACT

Landslides are among the most significant hazards threatening many mountainous regions. One such high risk area, due to its geomorphological and tectonic characteristics, is the transport corridor between Karand and Sarpolzahab in Kermanshah Province. In this study, Sentinel-1 radar imagery, MODIS satellite images, the 1:100,000 digital geological map of the area, and the 12.5 m ALOS PALSAR Digital Elevation Model were used as the primary data sources. The main analytical tools applied included GMTSAR, Google Earth Engine, and ArcGIS. Using relative weight coefficient methods, fuzzy logic, and radar interferometry, landslide-prone areas were identified while considering the impacts of the Ezgaleh earthquake. Results indicate that vertical ground displacements in the study area ranged from -5 to 334 mm. Given that such displacements can significantly contribute to slope instability and trigger landslides, zones exhibiting both high susceptibility to landslides and vertical displacements exceeding 100 mm were classified as areas with the greatest landslide risk. Accordingly, mid-slope areas and those adjacent to Sarpolzahab city, owing to both their environmental susceptibility and substantial vertical displacements, were identified as the most hazardous zones in terms of landslide occurrence.

* Corresponding author: Hamid Ganjaeian

E-mail address: h.ganjaeian@ut.ac.ir

How to cite this article: 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>



©2025 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 are among the most destructive geomorphological hazards, involving the sudden or gradual movement of soil, rock or debris downslope under the influence of gravity. This phenomenon is particularly common in mountainous and steep terrains and can result in severe consequences, including infrastructure damage, loss of agricultural land, human casualties and disruption of transportation and communication networks. Landslide occurrence is influenced by both natural and anthropogenic factors. Natural triggers include intense rainfall, earthquakes, snowmelt, erosion processes and geological conditions, while human activities such as unplanned road construction, deforestation, landuse change, and construction on steep slopes can significantly increase landslide susceptibility. The impacts of landslides are not limited to physical damage but also extend to economic, social, and environmental dimensions. Economically, they impose substantial reconstruction costs and lead to the destruction of farmlands and infrastructure. Socially, landslides may cause fatalities, displacement, forced migration and a decline in quality of life. Environmentally, they contribute to vegetation loss, habitat destruction, and the formation of landslide dams. Therefore, landslides represent a multidimensional hazard that threatens both human security and environmental sustainability. Due to variations in geological, geomorphological, hydrological and topographic conditions, different regions exhibit varying levels of landslide susceptibility. Iran's geographical setting has made large parts of the country prone to landslide hazards, particularly the western regions of Kermanshah Province within the Zagros mountainous belt. This area is characterized by steep slopes, high elevations, extensive transportation networks, and intense human activities, resulting in high vulnerability to landslides. Moreover, the active tectonic setting and frequent earthquakes, including the Mw 7.3 Azgaleh earthquake in 2017, have played a crucial role in slope destabilization. Beyond their immediate impacts, such earthquakes induce subtle changes that weaken slope stability and increase landslide potential. Accordingly, this study aims to identify landslide-prone areas along the transportation corridor between Kerend and Sarpol-e Zahab cities, with a particular emphasis on tectonic factors.

Material and Methods

This study utilized Sentinel-1 radar images acquired before (07/11/2017) and after (19/11/2017) the Azgaleh earthquake, MODIS satellite imagery from 2020 to 2024, 1:100,000 geological maps of the Kerend and Sarpol-e Zahab sheets, and a 12.5 m resolution ALOS PALSAR digital elevation model as the primary datasets. The main analytical tools included GMTSAR (version 6.0) for interferometric processing and ArcGIS for data standardization and map production. The research was conducted in three main stages. First, landslide susceptibility was assessed using eight parameters: distance to roads, distance to rivers, elevation, slope, aspect, lithology, distance to faults, and vegetation cover. All layers were standardized to a common scale ranging from 0 to 1. Weights were assigned to each parameter based on expert judgment from ten geomorphology specialists using the relative weighting method. In the second stage, the effects of the 2017 Azgaleh earthquake were evaluated using Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR). Sentinel-1 images acquired before and after the earthquake were processed to calculate vertical ground displacement over a 12 day period. In the final stage, the landslide susceptibility map was integrated with the vertical displacement map. Areas exhibiting both high displacement and high susceptibility were identified as zones exposed to landslide hazard.

Results and Discussion

The results of this study indicate that the 2017 Azgaleh earthquake played a significant role in intensifying slope instability and increasing landslide susceptibility within the study area. The analysis of Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) data demonstrates that, beyond its immediate and visible impacts, the earthquake induced subtle but highly influential changes in slope structures. One of the most critical of these changes is the substantial vertical ground displacement, which can be considered a key factor in weakening the geomechanical equilibrium of slopes. Based on the vertical displacement map derived from Sentinel-1 imagery, ground surface deformation within the study area

ranged from -5 to 334 mm. This wide range of displacement values reflects the heterogeneous response of different geological units and slope conditions to seismic stress. In particular, areas characterized by weaker lithological units, moderate to steep slopes, and proximity to active faults experienced the highest levels of vertical displacement. These findings are consistent with previous studies conducted in the seismically active Zagros region, which emphasize that earthquakes can alter slope structures and significantly increase the likelihood of subsequent landslides over short to medium-term periods. In this research, areas exhibiting vertical displacement greater than 100 mm were classified as unstable zones. The integration of these zones with the landslide susceptibility map revealed a strong spatial correspondence between areas of high landslide potential and zones affected by intense seismic-induced displacement. This overlap is especially pronounced in the midslope sections of the region and in the vicinity of Sarpol-e Zahab city. These areas are characterized not only by favorable geomorphological conditions for landsliding such as appropriate slope gradients, unstable lithologies, and sparse vegetation cover but also by direct exposure to earthquake-induced stress and deformation.

Conclusion

The results of this study demonstrate that integrating radar remote sensing data with multi criteria decision making models is an effective approach for identifying and zoning landslide prone areas in mountainous and seismically active regions. The application of the fuzzy gamma method for combining environmental information layers such as slope, lithology, elevation, distance to faults, and vegetation cover enabled the simultaneous analysis of multiple contributing factors while reducing uncertainty inherent in spatial data. The findings indicate that the central sections of the Kerend–Sarpol-e Zahab transportation corridor exhibit the highest landslide susceptibility due to their specific geological and geomorphological characteristics. The analysis of the 2017 Azgaleh earthquake using the DInSAR technique revealed that this seismic event played a decisive role in exacerbating slope instability. Significant vertical displacements, exceeding 100 mm in several locations and reaching much higher values in certain areas, highlight the profound impact of the earthquake on slope structures and stability. Although such deformations may not immediately result in landslide occurrence, they substantially increase slope vulnerability and predispose hillslopes to failure under subsequent triggering factors such as intense rainfall or smaller seismic events. One of the key contributions of this research is the demonstration of the importance of incorporating indirect and subtle seismic effects into landslide hazard assessments. The results show that areas experiencing vertical displacement greater than 100 mm particularly around Sarpol-e Zahab city and within the midslope zones fall into high and very high hazard classes. This spatial coincidence between environmental susceptibility factors and earthquake-induced deformation emphasizes the need to move beyond static landslide models toward dynamic, multi-source hazard assessment frameworks. Overall, the findings of this study provide a valuable scientific basis for landuse planning, infrastructure development, and disaster risk management in seismically active regions. The produced landslide susceptibility and hazard maps offer practical tools for decision makers to identify high risk areas and implement preventive measures such as slope stabilization, route realignment, and restrictions on construction activities in hazardous zones.



تحلیل پتانسیل وقوع زمین لغزش با تأکید بر تأثیر زمین لرزه‌ها (مطالعه موردی: مسیر ارتباطی کوند تا سرپل ذهاب)

حمید گنجائیان^{۱*}، میلاد فیروزه^۲، علی میرآخوری^۳، تکتیم یزدانی^۴

^{۱*}دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲کارشناسی ارشد مهندسی شهرسازی، گرایش برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه علامه طباطبایی، تهران، ایران

^۳دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰</p>	<p>یکی از مخاطراتی که بسیاری از مناطق کوهستانی را تهدید می‌کند، زمین لغزش است. از جمله مناطقی که به دلیل وضعیت ژئومورفولوژیکی و تکتونیکی، پتانسیل بالایی از نظر وقوع این مخاطره دارد، مسیر ارتباطی کوند تا سرپل ذهاب در استان کرمانشاه است. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در این محدوده پرداخته شده است. در این تحقیق از تصاویر راداری Sentinel 1، تصاویر ماهواره MODIS، لایه رقومی نقشه زمین-شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه و مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR به‌عنوان مهم-ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، GMTSAR، سامانه گوگل ارث انجین و ArcGIS بوده است. در این تحقیق با استفاده از روش‌های ضریب وزنی نسبی، منطق فازی و تداخل‌سنجی راداری، مناطق مستعد وقوع زمین لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین لرزه از گله شناسایی شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، محدوده مطالعاتی تحت تأثیر زمین لرزه از گله بین ۵- تا ۳۳۴ میلی‌متر جابه‌جایی عمودی داشته است. با توجه به اینکه جابه‌جایی رخ داده می‌تواند نقش مهمی در ناپایداری دامنه‌ها و آماده حرکت کردن آن‌ها داشته باشد، در این پژوهش مناطقی که دارای پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش بوده‌اند و همچنین جابه‌جایی بیش از ۱۰۰ میلی‌متری داشته‌اند شناسایی شده و به‌عنوان مناطق دارای بالاترین احتمال وقوع زمین لغزش معرفی شده‌اند. بر اساس نتایج حاصله، دامنه‌های میانی منطقه و مناطق نزدیک شهر سرپل ذهاب به دلیل اینکه هم از نظر پارامترهای محیطی مستعد وقوع زمین لغزش هستند و هم اینکه دارای جابه‌جایی عمودی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بوده‌اند، به‌عنوان مناطق در معرض مخاطره زمین لغزش شناسایی شده است.</p>
<p>کلمات کلیدی:</p> <p>پتانسیل وقوع زمین لغزش</p> <p>زمین لرزه</p> <p>زمین لغزش ناشی از زمین لرزه</p> <p>سنجش از دور</p> <p>پایداری دامنه</p>	

مقدمه

زمین لغزش یکی از مهم ترین و مخرب ترین پدیده های ژئومورفولوژیک به شمار می رود که به جابه جایی ناگهانی یا تدریجی توده ای از خاک، سنگ یا رسوب در امتداد شیب منجر می شود (Zhang, Wang & Xia, 2012; Addis, 2023). این پدیده به ویژه در نواحی کوهستانی و دامنه دار رخ می دهد و می تواند خسارات گسترده ای همچون تخریب زیرساخت ها، از بین رفتن زمین های کشاورزی، تلفات انسانی و اختلال در شبکه های حمل و نقل و ارتباطی برجای گذارد (Adnan et al., 2020; Zhou et al., 2023).

عوامل متعددی در بروز زمین لغزش نقش دارند که به دو دسته طبیعی و انسانی تقسیم می شوند. در میان عوامل طبیعی می توان به بارش های شدید، زمین لرزه، ذوب برف، فرسایش و شرایط زمین شناسی اشاره کرد (Jaafari, 2024). از سوی دیگر، فعالیت های انسانی مانند توسعه بی برنامه راهها (Khazaei & Ghaemi, 2015; Ebrahimi, Zakerian, Dawoudian & Amir-Ahmadi, 2018)، جنگل زدایی، تغییر کاربری اراضی و ساخت و ساز در مناطق پرشیب نیز می توانند وقوع این مخاطره را تشدید کنند (Novellino, 2024; Salari, Nayeri, Amani & Ganjaeian, 2017; Pennington & Leeming, 2024).

پیامدهای زمین لغزش صرفاً محدود به تخریب کالبدی نیست و آثار اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی متعددی را در پی دارد. در بعد اقتصادی، هزینه های بازسازی، نابودی اراضی کشاورزی و تخریب زیرساخت ها تحمیل می شود (Negahban, Peysoozi, 2021; Ganjaeian, Rezaei Arefi, Peysoozi & Emami, 2021). در بعد اجتماعی، زمین لغزش ها می توانند باعث تلفات انسانی، آوارگی، مهاجرت اجباری و کاهش کیفیت زندگی شوند. همچنین از منظر زیست محیطی، نابودی پوشش گیاهی، تخریب زیستگاه های جانوری و ایجاد زمین لغزش سدی، از جمله پیامدهای مهم آن است (Walker & Shiels, 2013). بنابراین، زمین لغزش پدیده ای چندبعدی است که امنیت انسانی و پایداری محیطی را تهدید می کند (Miao, Wu & Xie, 2018).

مناطق مختلف تحت تأثیر وضعیت زمین شناسی، ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و توپوگرافی، پتانسیل های متفاوتی از نظر بروز مخاطرات طبیعی از جمله زمین لغزش دارند (Negahban, Ganjaeian, Ebrahimi & Emami, 2019; Mohammakhhan, 2024). موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است تا بخش های زیادی از آن در معرض مخاطره زمین لغزش باشد (Rezapoor, Jabbari & Bahrami, 2023). از جمله مناطقی که پتانسیل بالایی از نظر وقوع این مخاطره دارد، مناطق غربی استان کرمانشاه در واحد کوهستانی زاگرس است. این منطقه به ارتفاع و شیب زیاد و همچنین توسعه خطوط ارتباطی و سایر فعالیت های انسانی، پتانسیل آسیب پذیری بالایی در برابر مخاطره زمین لغزش دارد. علاوه بر موارد ذکر شده، نکته ای که کم تر مورد توجه قرار گرفته شده است، وضعیت تکتونیکی منطقه و زمین لرزه های رخ داده است. در واقع، منطقه مورد مطالعه دارای وضعیت تکتونیکی فعالی است و همین مسئله سبب بروز زمین لرزه های زیادی از جمله زمین لرزه ۷/۳ ریشتری از گله (در سال ۱۳۹۶) در این منطقه شده است (Ganjaeian, Yamani, Goorabi & Maghsoudi, 2020). زمین لرزه های رخ داده، با پیامدهای محسوس و نامحسوس زیادی همراه بوده است و از جمله پیامدهای نامحسوس آن، تأثیر بر روی دامنه ها و مستعد حرکت کردن آن ها بوده است (Ganjaeian, Yamani, Goorabi & Maghsoudi, 2024). با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در مسیر ارتباطی شهر کرد تا شهر سرپل ذهاب با تأکید بر عوامل تکتونیکی پرداخته شده است.

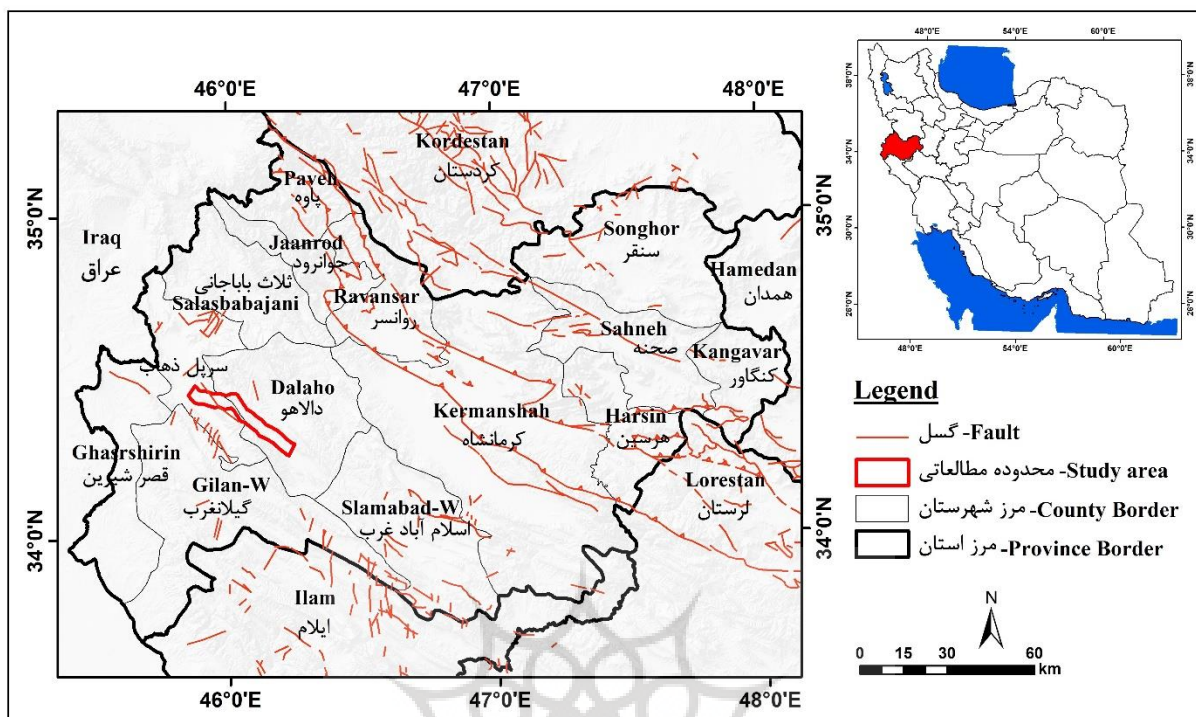
در ارتباط با موضوع مورد مطالعه تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که از جمله آن ها می توان به اسمره (Asmare, 2023) اشاره کرد که با استفاده از روش تلفیقی Fuzzy-AHP، به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در مناطق شمال غربی اتیوپی پرداختند و نشان دادند که ۲۰ درصد منطقه، دارای پتانسیل آسیب پذیری بالایی است. ژانگ و همکاران (Zhang, Xie, Xu, Li & Chen, 2024) بر مبنای پارامترهای محیطی، روش AHP و مدلسازی جنگل تصادفی، به بررسی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در استان چوشیونگ چین پرداختند و نشان دادند که مناطق شمال غربی این استان، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش دارد. ماسرورو و همکاران (Masruroh, Irawan & Anam, 2025) به مدلسازی پتانسیل وقوع زمین لغزش در منطقه جاوه اندونزی پرداختند.

نتایج این تحقیق بیانگر کاربرد مدلسازی LSZ بر مبنای پارامترهای محیطی در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر است. کسانتینی و همکاران (Ksantini et al., 2025) به تحلیل کاربرد مدلسازی‌های مختلف در شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در تونس پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر دقت بالای روش SFL-AHP بوده است. کیانی و همکاران (Kiani, Karimkhani & Mazidi, 2021) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و آنفیس به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز هشتجین استان اردبیل پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که حدود ۷ درصد از این حوضه، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین‌لغزش دارد. بهاروند (Baharvand, 2023) با استفاده از مدل نسبت فراوانی و منطق فازی، به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در آزادراه خرم‌آباد - اراک پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که حدود ۲۸ درصد از منطقه، در معرض مخاطره زمین‌لغزش قرار دارند. پیره و گنجائیان (Pireh & Ganjaeian, 2024) به تحلیل زمین‌لغزش‌های رخ داده شهرستان سنندج در ارتباط با عوامل محیطی پرداختند. نتایج این تحقیق بیانگر پتانسیل بالایی مناطق جنوبی شهرستان سنندج از نظر وقوع زمین‌لغزش است. معاوی و همکاران (Moavi, Elmizadeh & Entezari, 2025) به مدلسازی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبریز سد شهید عباس‌پور با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داده است که مناطق جنوب غربی و شمالی حوضه، پتانسیل آسیب‌پذیری بیش‌تری دارند. بررسی تحقیقات پیشین نشان داده است که با وجود این مطالعات، هنوز بررسی تأثیر هم‌زمان شرایط تکتونیکی فعال و زمین‌لرزه‌های اخیر بر ناپایداری دامنه‌ها، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. بیان مسئله این پژوهش آن است که در مسیر ارتباطی کرد - سرپل‌ذهاب، علاوه بر عوامل محیطی و انسانی، وقوع زمین‌لرزه از گله به‌عنوان یک عامل تشدیدکننده، سبب افزایش آسیب‌پذیری دامنه‌ها شده و ضرورت شناسایی دقیق مناطق مستعد لغزش را دوچندان می‌کند.

ضرورت این تحقیق از دو جنبه علمی و کاربردی قابل تبیین است. از دیدگاه علمی، این پژوهش با تمرکز بر تأثیر عوامل تکتونیکی و زمین‌لرزه‌های اخیر، خلأ موجود در ادبیات نظری را پر می‌کند. از منظر کاربردی، شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در مسیر ارتباطی کرد - سرپل‌ذهاب می‌تواند به برنامه‌ریزان، مهندسان راه و مدیران بحران کمک کند تا اقدامات پیشگیرانه مؤثرتری اتخاذ کنند. این موضوع به‌ویژه در این مسیر که یکی از شریان‌های حیاتی استان کرمانشاه محسوب می‌شود، دارای اهمیت حیاتی است. در راستای این ضرورت، هدف اصلی تحقیق حاضر، شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در محور کرد - سرپل‌ذهاب با تأکید بر عوامل تکتونیکی و اثرات زمین‌لرزه ۱۳۹۶ از گله است. نوآوری تحقیق نیز در تحلیل نقش زمین‌لرزه به‌عنوان عامل پنهان در تحریک لغزش‌ها و شناسایی دامنه‌های در معرض خطر نهفته است.

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش مسیر ارتباطی شهر کرد تا شهر سرپل‌ذهاب به طول ۴۴ کیلومتر، به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شده است و برای این منظور، حریم ۲ کیلومتری از مسیر در نظر گرفته شده است (شکل ۱). حریم ۲ کیلومتری بر مبنای هدف تحقیق و همچنین وضعیت توپوگرافی منطقه انتخاب شده است. محدوده مطالعاتی از نظر تقسیمات مورفوتکتونیکی در واحد زاگرس قرار دارد و از نظر لیتولوژی بخش زیادی از وسعت آن را توده‌های آهکی مربوط با سازندهای آسماری و بنگستان دربرگرفته است. همچنین به دلیل نزدیکی به گسل اصلی زاگرس، دارای پتانسیل لرزه‌خیزی بالای است (Ganjaeian, Yamani, Goorabi & Maghsoudi, 2023). این محدوده از نظر ارتفاعی در بین ارتفاع ۵۴۰ تا ۲۰۴۵ متری از سطح دریا قرار دارد و از نظر ژئومورفولوژی، بخش زیادی از آن را واحد کوهستان دربرگرفته است و به همین دلیل دامنه‌های پرشیب بخش زیادی از منطقه را شامل می‌شوند. همچنین از نظر اقلیمی نیز این منطقه با میانگین بارش حدود ۳۵۰ میلیمتر، دارای زمستان‌های معتدل و تابستان‌های گرم و خشک است (Kermanshah Provincial Meteorological Organization, 2025).



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Location map of the study area

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از تصاویر راداری Sentinel 1 مربوط به قبل ۲۰۱۷/۱۱/۰۷ و بعد از زمین لرزه از گله ۲۰۱۷/۱۱/۱۹، تصاویر ماهواره MODIS مربوط به سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴، لایه رقومی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت‌های کرد و سرپل ذهاب و مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای تحقیق، GMTSAR (V.6.0) (اجرای روش تداخل سنجی راداری) و ArcGIS (استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی و تهیه نقشه‌های مورد نظر) بوده است. این تحقیق در چند مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

مرحله اول (شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش): در این مرحله به‌منظور شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در محدوده مطالعاتی، از ۸ پارامتر فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، ارتفاع، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، فاصله از گسل و پوشش گیاهی استفاده شده است (جدول ۱). انتخاب پارامترها بر مبنای وضعیت محیطی، نظرات کارشناسان و مطالعات پیشین بوده است و دلیل عدم استفاده از پارامترهایی مانند بارش، اختلاف کم میانگین بارش در محدوده مطالعاتی بوده است. همچنین به دلیل استفاده از پارامتر تراکم پوشش گیاهی، از پارامتر کاربری اراضی نیز استفاده نشده است.

پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی مربوط به پارامترها، به‌منظور قابل ارزیابی کردن لایه‌های اطلاعاتی، به لایه‌های اطلاعاتی ارزش دورن لایه‌ای بین صفر تا ۱ داده است (لایه‌های اطلاعاتی استانداردسازی شده‌اند). مناطقی که دارای ارزش ۱ هستند، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش دارند و مناطقی که دارای ارزش صفر هستند، پتانسیل کمی از نظر وقوع زمین لغزش دارند (جدول ۲).

جدول ۱- نحوه تهیه لایه‌های اطلاعاتی

Table 1- Preparation of the spatial data layers

نحوه تهیه لایه اطلاعاتی How to prepare an information layer	پارامتر Parameter	ردیف Row
تهیه شده بر اساس تصاویر گوگل ارث Prepared based on Google Earth images	فاصله از جاده Distance from road	1
تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR	فاصله از رودخانه Distance from river	2
تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR	ارتفاع Elevation	3
تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR	شیب Slope	4
تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR	جهت شیب Aspect	5
تهیه شده بر اساس لایه رقومی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت‌های کرد و سرپل‌ذهاب Prepared based on the digital layer of 1:100,000 geological maps of Kerand and Sarpolzahab sheets	لیتولوژی Lithology	6
تهیه شده بر اساس لایه رقومی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت‌های کرد و سرپل‌ذهاب Prepared based on the digital layer of 1:100,000 geological maps of Kerand and Sarpolzahab sheets	فاصله از گسل Distance from fault	7
تهیه شده با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین و تصاویر MODIS Prepared using Google Earth Engine and MODIS images	تراکم پوشش گیاهی Vegetation density	8

پس از استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی، با استفاده از نظرات کارشناسان (۱۰ کارشناس ژئومورفولوژی) و روش ضریب وزنی نسبی (Ganjaeian, Shahjamali, Ebrahimi & Akbarian, 2025)، به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است. در این روش، تمامی معیارها با هم مقایسه شده است و وزن نهایی بر مبنای تعداد اولویت هر پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر سنجیده شده است. به طور مثال برای شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، پارامتر شیب از تمامی پارامترها مهم‌تر است، بنابراین وزن ۱/۶ را گرفته است. یعنی چون از ۶ پارامتر مهم است، به ازای هر پارامتر، ۰/۱ به ضریب آن اضافه شده است. بر این اساس، در این روش، به ازای هر بار ارجحیت نسبت به پارامترهای دیگر، ضریب ۰/۱ به وزن آن پارامتر اضافه خواهد شد. پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی و اعمال وزن‌ها، مقادیر عضویت فازی $\mu_i(x)$ به دست آمدند. سپس لایه‌ها با استفاده از عملگر گامای فازی به صورت رابطه (۱) ترکیب شدند و نقشه نهایی مناطق مستعد زمین‌لغزش حاصل گردید (Klari, Haddad, Bouzid & Rabia, 2020):

$$((\mu_i(x)-1)^{i-1} \prod_{j=1}^{i-1} (\mu_j(x)-1)^{\gamma-1}) \cdot (\mu_i(x)-1)^{i-1} \prod_{j=1}^{i-1} (\mu_j(x)-1)^{\gamma-1} = \mu_{\gamma}(x)$$

رابطه ۱: گامای فازی

در این رابطه، $\mu_i(x)$ مقدار عضویت (فازی) لایه i در مکان x است. n تعداد لایه‌های اطلاعاتی است و γ پارامتر گاما در بازه $\{0$ تا $1\}$ است.

جدول ۲- نحوه استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی

Table 2- Standardization procedure of the Spatial date layers

الگو Pattern	نحوه استانداردسازی لایه اطلاعاتی How to standardize the information layer	پارامتر Parameter	ردیف Row
خطی معکوس Inverse linear	به مناطق نزدیک جاده، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق دورتر، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas near the road are assigned a value close to 1, and areas farther away are assigned a value close to 0.	فاصله از جاده Distance from road	1
خطی معکوس Inverse linear	به مناطق نزدیک رودخانه، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق دورتر، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas near the river are assigned a value close to 1, and areas farther away are assigned a value close to 0.	فاصله از رودخانه Distance from river	2
خطی مستقیم Straight linear	به مناطق دارای ارتفاع بیشتر، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق کم ارتفاع، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas with higher elevation are assigned a value close to 1, while areas with lower elevation are assigned a value close to 0.	ارتفاع Elevation	3
خطی مستقیم Straight linear	به مناطق دارای شیب بیشتر، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق کم شیب، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas with steeper slopes are assigned a value close to 1, while areas with gentler slopes are assigned a value close to 0.	شیب Slope	4
غیرخطی Nonlinear	به جهات شیب شمالی ارزش نزدیک ۱ و به جهات شیب جنوبی، ارزش نزدیک صفر داده شده است. North-slope directions are given a value close to 1 and south-slope directions are given a value close to 0.	جهت شیب Aspect	5
غیرخطی Nonlinear	به مناطق دارای مواد آبرفتی، ارزش نزدیک ۱ و به مناطق دارای لیتولوژی آهکی، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas with alluvial materials are assigned a value close to 1, while areas with limestone lithology are assigned a value close to 0.	لیتولوژی Lithology	6
خطی معکوس Inverse linear	به مناطق نزدیک گسل، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق دورتر، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas near the fault are assigned a value close to 1, and areas farther away are assigned a value close to 0.	فاصله از گسل Distance from fault	7
خطی معکوس Inverse linear	به مناطق دارای تراکم پوشش گیاهی کم‌تر، ارزش نزدیک ۱ داده شده و به مناطق با تراکم پوشش گیاهی بیشتر، ارزش نزدیک صفر داده شده است. Areas with lower vegetation density are assigned a value close to 1, and areas with higher vegetation density are assigned a value close to 0.	تراکم پوشش گیاهی Vegetation density	8

مرحله دوم (ارزیابی اثرات زمین لرزه از گله بر محدوده مطالعاتی): زمین لرزه از گله به بزرگی $7/3$ ریشتر و عمق ۳۲ کیلومتری از سطح زمین، در ۲۱ آبان سال ۱۳۹۶ در نزدیکی شهر از گله در شهرستان تازه آباد استان کرمانشاه رخ داد. در این پژوهش به منظور بررسی تأثیرات زمین لرزه از گله در سال ۱۳۹۶، از روش تداخل سنجی راداری تفاضلی^۱ استفاده شده است و با استفاده از این روش، میزان تغییرات سطح زمین ارزیابی شده است. به منظور ارزیابی میزان تغییرات صورت گرفته، از تصاویر راداری سنتینل ۱ قبل و بعد از وقوع زمین لرزه استفاده شده است (جدول ۳). پس از تهیه تصاویر مورد نظر، ابتدا پیش پردازش‌های لازم بر روی تصاویر انجام شده است و سپس نقشه میزان جابه‌جایی عمودی منطقه در طی دوره زمانی ۱۲ روزه قبل و بعد از زمین لرزه از گله تهیه شده است و به این صورت مناطقی که دارای بالاترین تغییرات بوده‌اند، شناسایی شده است.

1- Differential InSAR, DInSAR

جدول ۳- مشخصات تصاویر مورد استفاده

Table 3- Specifications of the utilized images

Date	Type	Orbital mode	Polarization	Baseline
2017/11/07	SLC	Descending	VV	.
2017/11/19	SLC	Descending	VV	14/2

مرحله سوم (شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین لرزه ازگله): پس از تهیه نقشه میزان جابه‌جایی عمودی و مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه، در این بخش مناطقی که هم دارای بالاترین جابه‌جایی عمودی بوده‌اند و هم اینکه در طبقه دارای آسیب‌پذیری بالا در برابر زمین لغزش بوده‌اند، شناسایی شده است و به‌عنوان مناطق در معرض مخاطره زمین لغزش معرفی شده‌اند.

بحث و نتایج

شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش

الف) تشریح پارامترهای مورد استفاده و استانداردهای آن‌ها

فاصله از رودخانه و جاده: رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش محسوب می‌شوند. رودخانه‌ها به دلیل نقش مهمی که در زیربری و فرسایش پای دامنه‌ها دارند، زمینه را برای وقوع زمین لغزش فراهم می‌کنند. بررسی وضعیت رودخانه‌های محدوده مطالعاتی بیانگر این است که این رودخانه‌ها فصلی هستند و در بخش زیادی از محدوده، به موازات جاده اصلی، جریان دارند. همچنین توسعه خطوط ارتباطی به‌عنوان مهم‌ترین فعالیت‌های انسانی مؤثر در وقوع حرکات دامنه محسوب می‌شود. با توجه به اینکه توسعه خطوط ارتباطی در مناطق کوهستانی با تخریب پای دامنه‌ها همراه است، بنابراین خطوط ارتباطی زمینه را برای وقوع زمین لغزش فراهم می‌آورد (Kiani et al., 2021).

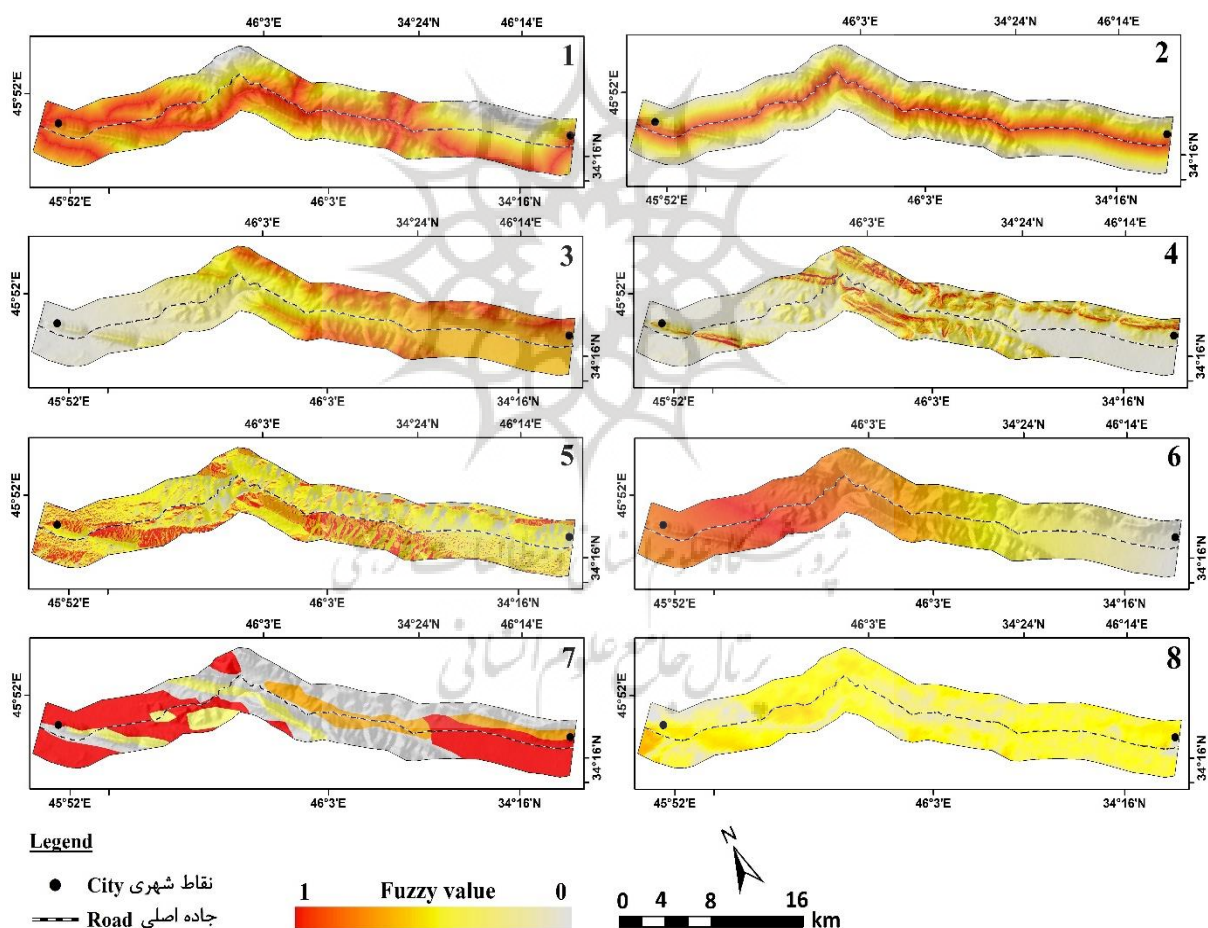
شیب، جهت شیب و ارتفاع: شیب به‌عنوان مهم‌ترین عامل در وقوع حرکات دامنه محسوب می‌شود. مناطق با شیب زیاد به دلیل ناپایداری دامنه‌ای، در معرض حرکات دامنه‌ای از جمله زمین لغزش هستند (Baharvand, 2023). با توجه به کوهستانی بودن منطقه، بخش زیادی از منطقه را دامنه‌ها با شیب زیاد در بر گرفته است و به همین دلیل بخش زیادی از منطقه، مستعد وقوع زمین لغزش است. جهت شیب نیز به دلیل تأثیر مستقیمی که بر میزان رطوبت، تراکم پوشش گیاهی تبخیر و نفوذ دارد، از جمله عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش محسوب می‌شوند. به‌طور معمول، جهات شیب شمالی به دلیل رطوبت و یخبندان بیش‌تری که دارند، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش دارند. همچنین، ارتفاع از دیگر عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش است. مناطق مرتفع دارای رطوبت و یخبندان بیش‌تری هستند، بنابراین این مناطق پتانسیل بالاتری از نظر وقوع مخاطره زمین لغزش دارد (Ganjaeian, Nosrati, 2025). بررسی وضعیت ارتفاعی محدوده مورد مطالعه بیانگر این است که این محدوده بین ارتفاع ۵۴۰ تا ۲۰۴۵ متری از سطح دریا قرار دارد و در یک روند کلی، میزان ارتفاع در مناطق مرکزی محدوده بیش‌تر است. اختلاف ارتفاع زیاد محدوده، سبب تنوع در وضعیت هیدرواقليمی و پوشش گیاهی منطقه شده است.

لیتولوژی و فاصله از گسل: پارامترهای زمین‌شناسی نیز نقش مهمی در وقوع زمین لغزش دارند. لیتولوژی و فاصله از گسل به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهای زمین‌شناسی مؤثر در وقوع زمین لغزش محسوب می‌شود. نوع لیتولوژی و میزان مقاومتی که در برابر حرکت دارد، نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع زمین لغزش دارد. بر این اساس، مناطقی که دارای لیتولوژی سست هستند، در معرض مخاطره زمین لغزش قرار دارند. همچنین خطوط گسلی نیز به دلیل اینکه نقش مهمی در گسترش درز و شکاف‌ها دارند، زمینه را برای بروز مخاطره زمین لغزش فراهم می‌آورند (Moavi et al., 2025). بررسی وضعیت لیتولوژی محدوده مورد مطالعه، بیانگر این است که بخش زیادی از این محدوده را سازندهای آهکی گروه بنگستان و آسماری دربرگرفته است و بخش‌های کم ارتفاع محدوده نیز توسط

ماسه‌سنگ، کنگلومرا و مواد آبرفتی پوشیده شده است. همچنین از نظر تراکم خطوط گسلی نیز، بخش‌های غربی محدوده دارای تراکم بیشتری هستند.

تراکم پوشش گیاهی: پوشش گیاهی نیز از دیگر عوامل مؤثر در تعیین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش محسوب می‌شود. به‌طور معمول، مناطقی که دارای پوشش گیاهی کمتری هستند، پتانسیل بیشتری از نظر وقوع زمین‌لغزش دارند (Pireh & Ganjaeian, 2024). نتایج بررسی وضعیت تراکم پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه، نشان داده است که بالاترین تراکم پوشش گیاهی مربوط به مناطق کم ارتفاع و منطبق بر مواد آبرفتی است.

با توجه به موارد ذکر شده، پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، به منظور استانداردسازی آن‌ها، به مناطق نزدیک رودخانه و جاده، مناطق دارای ارتفاع و شیب زیاد، جهات شیب شمالی، مناطق دارای لیتولوژی مواد آبرفتی و مناطق نزدیک خطوط گسل، ارزش نزدیک یک داده شده است. همچنین به مناطق دور از رودخانه و جاده، مناطق دارای ارتفاع و شیب کم، جهات شیب جنوبی، مناطق دارای لیتولوژی آهکی و مناطق دور از خطوط گسل، ارزش نزدیک صفر داده شده است (شکل ۲).



شکل ۲- نقشه استانداردسازی شده لایه‌های اطلاعاتی ۱- فاصله از رودخانه ۲- فاصله از جاده ۳- ارتفاع ۴- شیب ۵- جهت شیب ۶- فاصله از گسل ۷- لیتولوژی، ۸- تراکم پوشش گیاهی

Fig. 2. Standardized map of the spatial data layers: 1-Distance from river 2-Distance from road 3-Elevation 4-Slope 5-Aspect 6-Distance from fault 7-Lithology 8- Vegetation cover density

ب) وزن دهی به پارامترها

پس از استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی، با استفاده از روش ضریب وزنی نسبی و بر مبنای نظرات کارشناسان (۱۰ کارشناس ژئومورفولوژی)، به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، پارامترهای شیب، فاصله از جاده و فاصله از رودخانه به ترتیب با ضریب ۱/۷، ۱/۶ و ۱/۵، دارای بالاترین ضریب هستند و بالاترین تأثیرگذاری را دارند (جدول ۴).

جدول ۴- وزن نهایی پارامترها**Table 4- Final weights of the parameters**

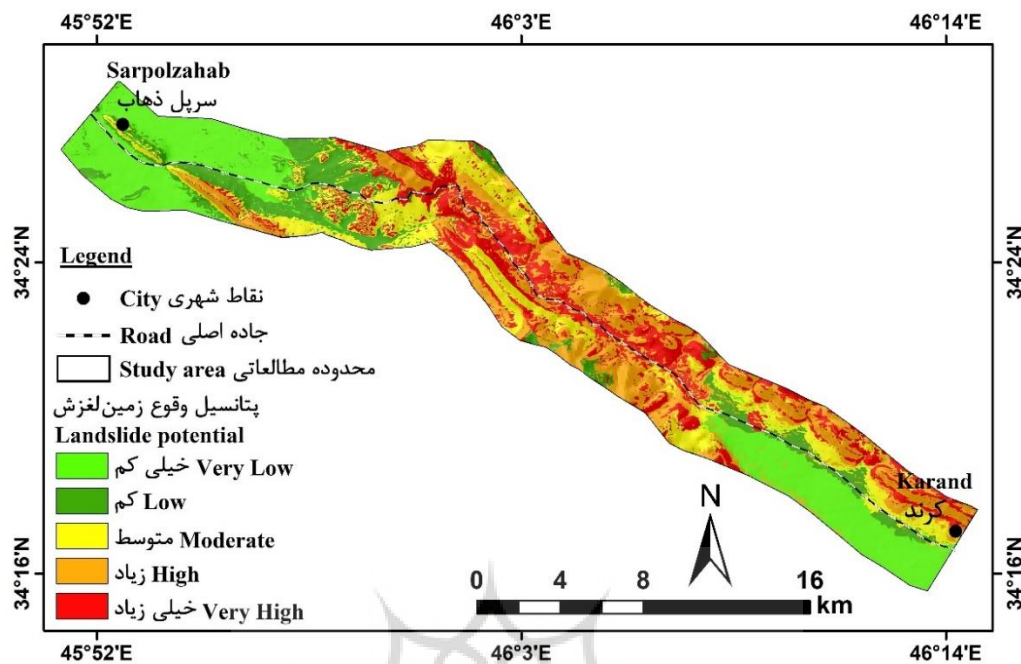
وزن نهایی Point	ارجعیت نسبت به پارامترهای دیگر Value relative to other parameters	پارامتر Parameter	ردیف Row
1/7	فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، لیتولوژی، پوشش گیاهی، ارتفاع، جهت شیب و فاصله از گسل Dis. Road, Dis. River, Lithology, V. Density, Elevation, Aspect, Dis. Fault	شیب Slope	1
1/6	فاصله از رودخانه، لیتولوژی، پوشش گیاهی، ارتفاع، جهت شیب و فاصله از گسل Dis. River, Lithology, V. Density, Elevation, Aspect, Dis. Fault	فاصله از جاده Dis. Road	2
1/5	لیتولوژی، پوشش گیاهی، ارتفاع، جهت شیب و فاصله از گسل Lithology, V. Density, Elevation, Aspect, Dis. Fault	فاصله از رودخانه Dis. River	3
1/4	پوشش گیاهی، ارتفاع، جهت شیب و فاصله از گسل V. Density, Elevation, Aspect, Dis. Fault	لیتولوژی Lithology	4
1/3	ارتفاع، جهت شیب و فاصله از گسل Elevation, Aspect, Dis. Fault	تراکم پوشش گیاهی V. Density	5
1/2	جهت شیب و فاصله از گسل Aspect, Dis. Fault	ارتفاع Elevation	6
1/1	فاصله از گسل Dis. Fault	جهت شیب Aspect	7
1	-	فاصله از گسل Dis. Fault	8

ج) اجرای مدل گامای فازی

پس از وزن دهی به لایه‌های اطلاعاتی، وزن به دست آمده بر روی هر لایه اعمال شده است و سپس لایه‌های با استفاده از عملگر گامای فازی با هم ترکیب شده و سپس نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش منطقه مورد مطالعه در ۵ کلاس تهیه شده است (شکل ۳). بر اساس نتایج به دست آمده، مناطق میانی مسیر ارتباطی کردند تا سرپل ذهاب به دلیل ارتفاع و شیب زیاد و نوع لیتولوژی، پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش دارد.

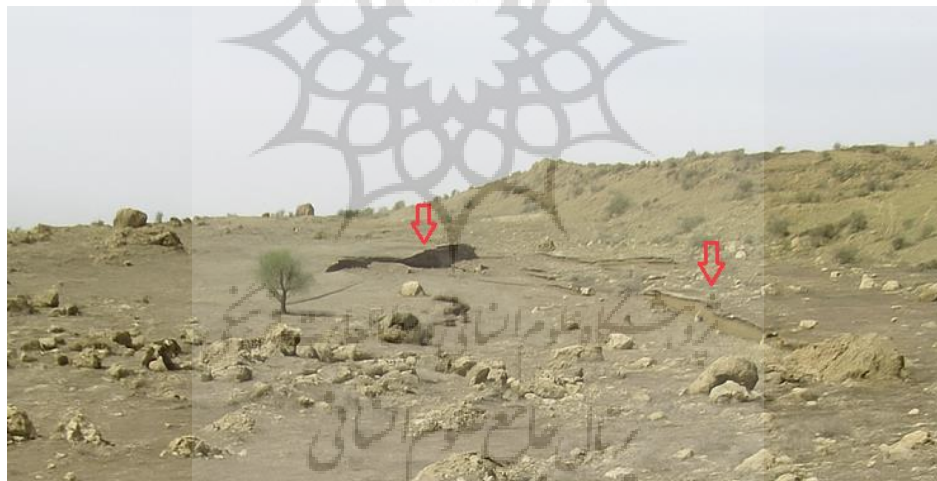
ارزیابی اثرات زمین لرزه از گله بر محدوده مطالعاتی

موقعیت زمین ساختی زاگرس سبب شده است تا این واحد دارای پتانسیل لرزه خیزی بالایی باشد (Ganjaeian, 2025). زمین لرزه‌ها با اثرات زیادی بر سطح زمین همراه هستند. یکی از مهم‌ترین اثرات زمین لرزه‌ها، جابه‌جایی سطح زمین است. جابه‌جایی‌های ناشی از زمین لرزه محسوس نیستند و بیانگر میزان انرژی آزاد شده هستند. از جمله زمین لرزه‌هایی که باعث جابه‌جایی و تغییرات زیادی در سطح زمین شد، زمین لرزه از گله در سال ۱۳۹۶ بوده است. تحت تأثیر این زمین لرزه، مناطق مجاور آن با جابه‌جایی زیادی مواجه شده است. بخش زیادی از این جابه‌جایی رخ داده مربوط به دامنه‌هایی بوده است که پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش دارند، بنابراین می‌توان گفت که زمین لرزه رخ داده یا به طور مستقیم باعث حرکات دامنه‌ای شده است و یا اینکه زمینه را برای بروز مخاطرات دامنه‌ای از جمله زمین لغزش فراهم آورده است (شکل ۴). با توجه به اهمیت موضوع در این بخش به بررسی میزان جابه‌جایی عمودی ناشی از زمین لرزه از گله در سال ۱۳۹۶ پرداخته شده است.



شکل ۳- نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه

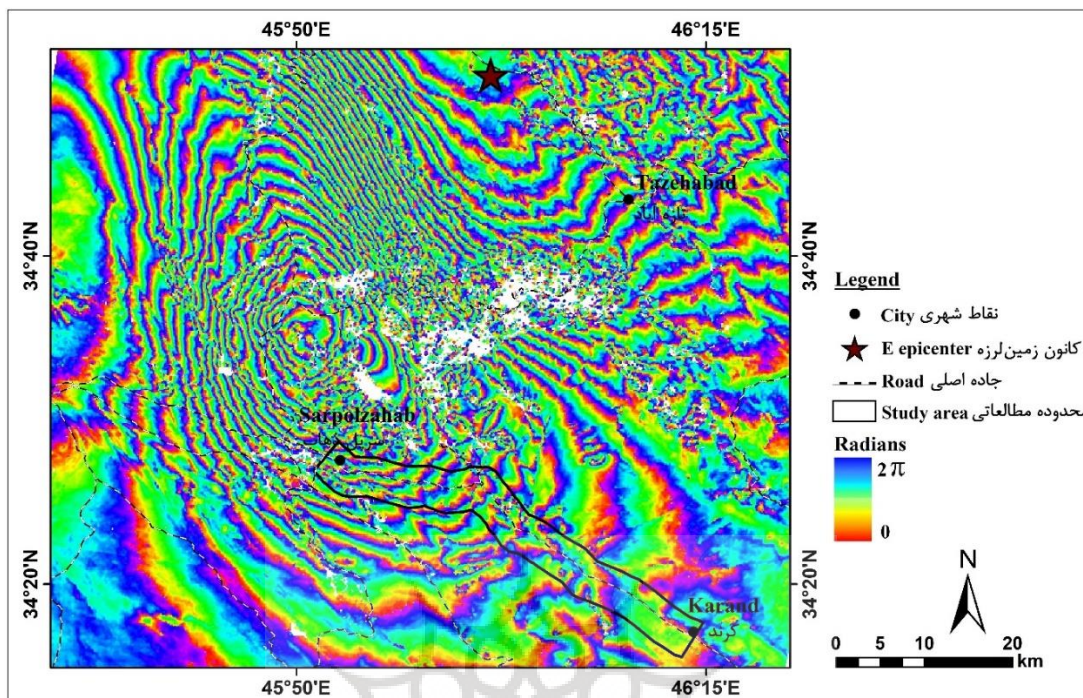
Fig. 3. Final map of landslide prone areas in the study area



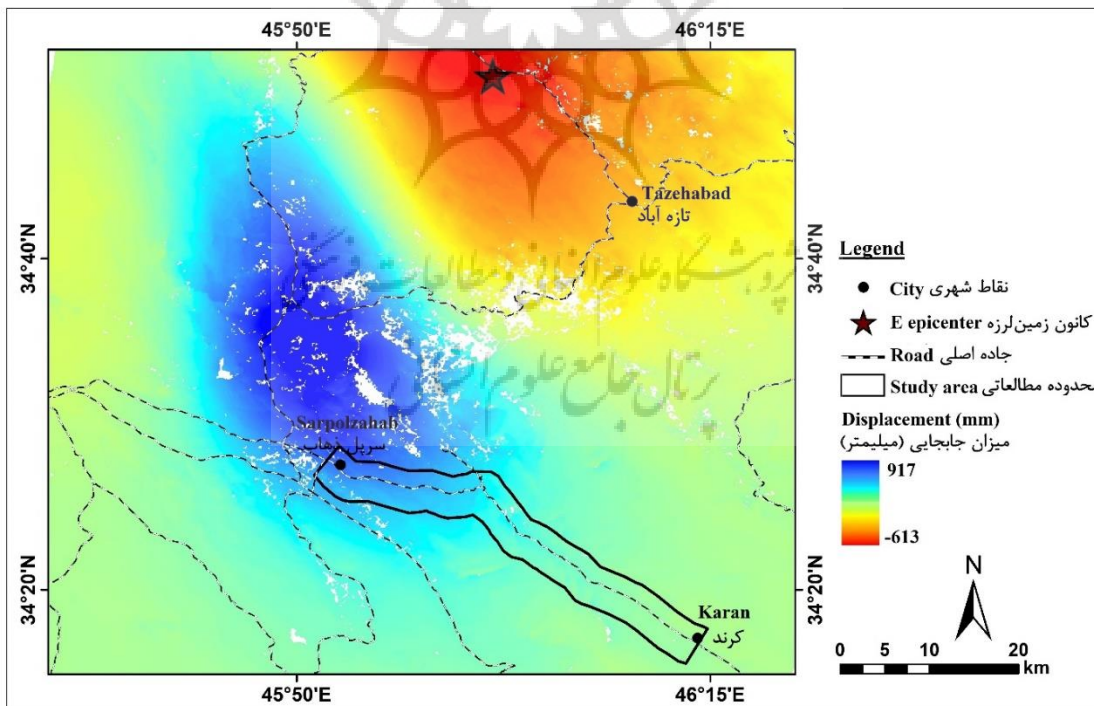
شکل ۴- تصویری از اثرات زمین لرزه ازگله بر دامنه‌های منطقه

Fig. 4. Image showing the effects of the Ezgeleh earthquake on the region's slopes

در این تحقیق، به منظور تهیه نقشه میزان جابه‌جایی عمودی منطقه، از تصاویر سنتینل ۱ قبل و بعد از وقوع زمین لرزه استفاده شده است. برای این منظور، پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، ابتدا نقشه اینترفروگرام منطقه تهیه شده است (شکل ۵). پس از تهیه نقشه اینترفروگرام، نقشه جابه‌جایی عمودی منطقه تهیه شده است (شکل ۶). بر اساس نقشه تهیه شده، تحت تأثیر زمین لرزه ازگله، منطقه مورد مطالعه بین ۹۱۷ تا ۶۱۳- میلیمتر جابه‌جایی داشته است. آنالیز جابه‌جایی رخ داده بیانگر این است که تحت تأثیر زمین لرزه رخ داده، مناطق جنوبی محدوده، منطبق بر مناطق حاشیه شهر سرپل ذهاب با بالا آمدگی و مناطق شمالی محدوده با پایین رفتگی مواجه شده است. جابه‌جایی رخ داده بیانگر انرژی زیاد آزاد شده ناشی از زمین لرزه ازگله بوده است که این مسئله می‌تواند نقش مهمی بر ناپایداری‌های دامنه منطقه داشته باشد.

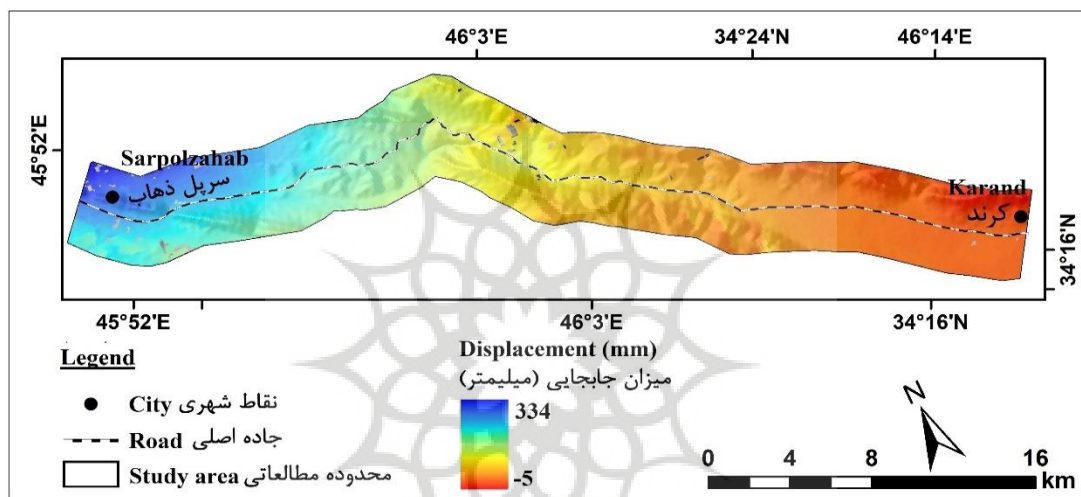


شکل ۵- نقشهٔ اینترفروگرام منطقه
 Fig. 5. Interferogram map of the area



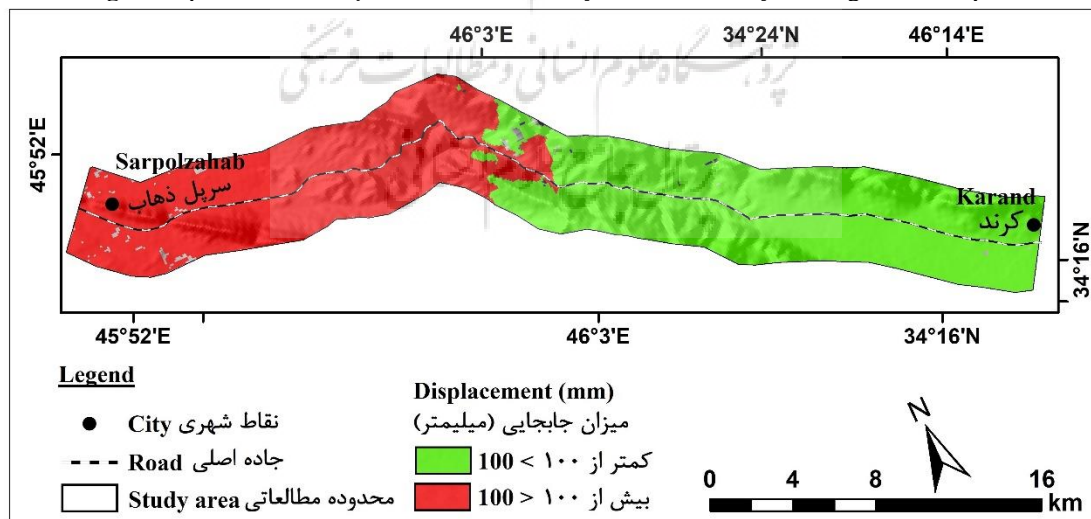
شکل ۶- نقشهٔ میزان جابه‌جایی عمودی منطقه
 Fig. 6. Map of the vertical displacement of the area

شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین لرزه از گله نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داده است که زمین لرزه از گله باعث بروز تغییرات محسوس و نامحسوس زیادی در منطقه شده است. از جمله تأثیرات نامحسوس این زمین لرزه، جابه‌جایی عمودی قابل توجه این زمین لرزه بوده است به طوری که جابه‌جایی عمودی ناشی از زمین لرزه ترکمانچای در سال ۱۳۹۸، ماکزیمم ۹۶ میلیمتر بوده است (Negahban, Ganjaeian, Saeedi & Ghasemi, 2020) در حالی که ماکزیمم جابه‌جایی ناشی از زمین لرزه از گله ۹۱۷ میلیمتر بوده است. با توجه به اینکه جابه‌جایی رخ داده می‌تواند نقش مهمی در ناپایداری دامنه‌ها و آماده حرکت کردن آن‌ها داشته باشد، در این بخش ابتدا نقشه میزان جابه‌جایی عمودی منطقه در محدوده مطالعاتی تهیه شده است (شکل ۷) که بر اساس آن، محدوده مطالعاتی بین ۵- تا ۳۳۴ میلی‌متر جابه‌جایی داشته است. در ادامه، مناطقی که دارای بیشترین تغییرات بوده‌اند شناسایی شده است که برای این منظور مناطق دارای بیش از ۱۰۰ میلی‌متر جابه‌جایی، به عنوان مناطق ناپایداری در نظر گرفته شده است (شکل ۸).



شکل ۷- نقشه میزان جابه‌جایی عمودی محدوده مطالعاتی تحت تأثیر زمین لرزه از گله

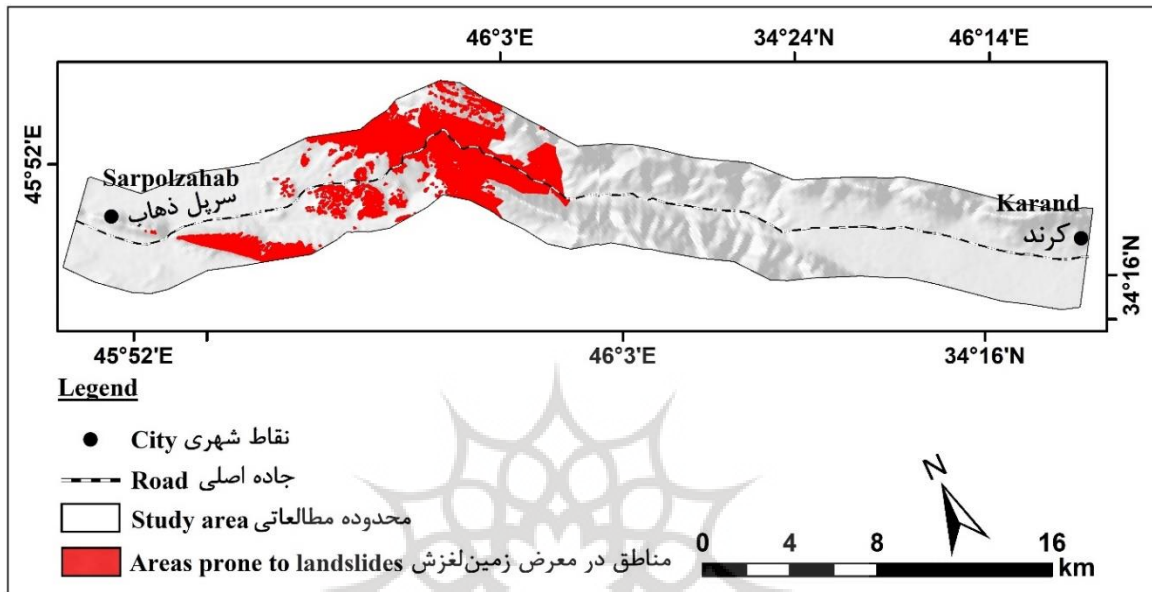
Fig.7. Map of vertical displacement of the study area affected by the Ezgeleh earthquake



شکل ۸- نقشه طبقه‌بندی شده جابه‌جایی عمودی محدوده مطالعاتی تحت تأثیر زمین لرزه از گله

Fig. 8. Classified map of vertical displacement of the study area affected by the Ezgeleh earthquake

پس از تهیه نقشه طبقه‌بندی شده جابه‌جایی عمودی محدوده مطالعاتی، نقشه طبقات با پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد که دارای جابه‌جایی عمودی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بوده است تهیه شده است (شکل ۹). بر اساس نتایج حاصله، دامنه‌های میانی منطقه و مناطق نزدیک شهر سرپل‌دهاب به دلیل اینکه هم از نظر پارامترهای محیطی مستعد وقوع زمین‌لغزش هستند و هم اینکه دارای جابه‌جایی عمودی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بوده‌اند، به‌عنوان مناطق در معرض مخاطره زمین‌لغزش شناسایی شده است.



شکل ۹- نقشه مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین‌لرزه ازگله

Fig. 9. Map of landslide prone areas considering the effects of the Ezgeleh earthquake

نتیجه‌گیری

بررسی انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری روش گام‌افزایی در ترکیب لایه‌های اطلاعاتی محیطی همچون شیب، لیتولوژی و ارتفاع، ابزاری کارآمد برای شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش است. نتایج حاصل بیانگر آن است که بخش‌های میانی مسیر ارتباطی کرند تا سرپل‌دهاب همانند مناطق جنوب غربی حوضه آبریز سد شهید عباس‌پور (Moavi et al., 2025)، به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و مورفولوژیکی، پتانسیل بالاتری در وقوع زمین‌لغزش دارند. از سوی دیگر، تحلیل اثرات زمین‌لرزه ازگله سال ۱۳۹۶ نشان داد که این زلزله نه تنها موجب جابه‌جایی محسوس سطح زمین شد، بلکه با ایجاد تغییرات عمودی قابل توجه (حداکثر ۹۱۷ میلی‌متر) زمینه‌ناپایداری دامنه‌ها را نیز تشدید کرده است. مقایسه میزان جابه‌جایی ناشی از این زلزله با زلزله‌های مشابه همچون زمین‌لرزه ترکمانچای (Negahban et al., 2020) نشان می‌دهد که شدت و پیامدهای آن در منطقه مورد مطالعه بسیار بیشتر بوده است.

نتایج پردازش تصاویر سنتینل-۱ و تهیه نقشه‌های جابه‌جایی عمودی نشان داد که مناطقی با جابه‌جایی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر به‌ویژه در اطراف شهر سرپل‌دهاب و دامنه‌های میانی، در طبقات خطر بالا و خیلی بالا قرار دارند. این هم‌پوشانی بین عوامل محیطی و تغییرات ناشی از زمین‌لرزه، اهمیت لحاظ کردن اثرات لرزه‌ای در مدل‌های ارزیابی خطر زمین‌لغزش را بیش از پیش آشکار می‌سازد. یافته‌ها تأکید می‌کنند که تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور با مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند به‌عنوان روشی نوین و دقیق در مدیریت ریسک حرکات دامنه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

به‌طور کلی، نتایج تحقیق حاضر اهمیت توجه به زمین‌لرزه‌ها را در ارزیابی مخاطرات ژئومورفولوژیکی منطقه‌ای نشان داده و نقشه‌های تهیه‌شده می‌توانند به‌عنوان مرجعی علمی برای برنامه‌ریزان، مدیران شهری و مسئولان مدیریت بحران در کاهش خسارات و افزایش ایمنی مناطق مسکونی و زیرساختی مورد استفاده قرار گیرند.

با توجه به یافته‌های این تحقیق، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده با استفاده از سری زمانی بلندمدت داده‌های راداری و تکنیک‌های پیشرفته مانند InSAR زمان‌مند انجام گیرد تا تغییرات تدریجی دامنه‌ها به‌طور پیوسته پایش شود. همچنین استفاده از مدل‌های عددی پویای پایداری شیب، در کنار داده‌های سنجش‌ازدور، می‌تواند دید جامع‌تری از رفتار دامنه‌ها پس از زمین‌لرزه ارائه دهد. توسعه سامانه‌های هشدار سریع زمین‌لغزش بر پایه داده‌های ماهواره‌ای و بومی‌سازی آن‌ها در مناطق پرخطر، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش تلفات انسانی و خسارات اقتصادی داشته باشد. از سوی دیگر، توجه به آموزش جوامع محلی، ارتقای سطح آگاهی عمومی دربارهٔ خطرات زمین‌لغزش و اتخاذ تدابیر مهندسی پایدار برای تثبیت دامنه‌ها، گام‌های مهمی در مدیریت ریسک مخاطرات زمین‌لغزش به‌شمار می‌آیند.

References

- Addis, A. (2023). GIS-Based landslide susceptibility mapping using frequency ratio and Shannon Entropy Models in Dejen District, Northwestern Ethiopia. *Journal of Engineering*, 2023(1), 1062388. <https://doi.org/10.1155/2023/1062388>
- Adnan, M. S. G., Rahman, M. S., Ahmed, N., Ahmed, B., Rabbi, M. F., & Rahman, R. M. (2020). Improving spatial agreement in machine learning-based landslide susceptibility mapping. *Remote Sensing*, 12(20), 3347. <https://doi.org/10.3390/rs12203347>
- Asadi, M., Ganjaeian, H., & Javedani, M. (2024). Analysis of Tectonic Status of Lavasan Sub-Basins Using Geomorphic Indicators and Radar Images. *Geography and Environmental Planning*, 35(1), 73-88. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2023.133365.1518>
- Asmare, D. (2023). Application and validation of AHP and FR methods for landslide susceptibility mapping around choke mountain, northwestern Ethiopia. *Scientific African*, 19, 398-415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01470>
- Baharvand, S. (2023). The Evaluation of Landslide Sensitivity using Frequency Ratio and Fuzzy Logic Models (Case Study: Khorramabad-Arak Freeway). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(1), 103-116. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75264.1201>
- Ebrahimi, M., Zakerian, A., Dawoudian, J., & Amir-Ahmadi, A. (2018). Stability Analysis and Stabilization Solutions for Landslides (Case Study: Khorramabad-Pole Zaal Freeway). *Geography and Environmental Sustainability*, 7(4), 1-17. [In Persian] https://ges.razi.ac.ir/article_867.html
- Ganjaeian, H. (2025). Evaluating the seismic potential of megacities in Iran. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 33(132), 173-188. [In Persian] <https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2019284.3047>
- Ganjaeian, H., Nosrati, M., Ebrahimi, A., & Ghisarian, S. S. (2025a). Assessing the Vulnerability of Rural Areas Against Natural Hazards (Case Study: Villages of Oraman Region). *Journal of Environmental Research in Mountainous Regions*, 1(2), 57-70. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/ermr.2024.63510>
- Ganjaeian, H., Rezaei Arefi, M., Peysoozi, T., & Emami, K. (2021a). Zoning susceptible areas of landslide using WLC and OWA methods -A case study in Mountain cliff Khan, Iran. *Sustainable Earth Trends*, 1(2), 35-43. <https://doi.org/10.52547/sustaineearth.1.2.43>
- Ganjaeian, H., Shahjamali, M., Ebrahimi, A., & Akbarian, M. (2025b). Identifying Areas Prone to Landfill and Waste Depots in Kamyaran County by Implementing Prohibited Areas. *Environment and Interdisciplinary Development*, 10(87), 1-15. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/envj.2025.500751.1458>

- Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, A., & Maghsoudi, M. (2020). Analyzing Tangible and Intangible Effects of Kermanshah Ezgeleh Earthquake on Landforms. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(2), 89-103. [In Persian] <https://doi.org/10.22126/ges.2020.5571.2274>
- Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, A., & Maghsoudi, M. (2021b). Adaptation of Morphotectonic Indices with Seismic Centers in Zagros Northwest (Sirvan and Qarahu Basins). *Geography and Environmental Planning*, 31(4), 113-130. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2021.124247.1335>
- 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] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2021.141038>
- Ganjaeian, H., Yamani, M., Goorabi, M., & Maghsoudi, M. (2024). Evaluating the Impacts of Earthquake in Ezgele, Kermanshah (Iran) (Occurred on 2017/11/12). *Current Research in Environmental Science and Ecology Letters*, 1(1), 1-10. <https://doi.org/10.33140/CRESEL.01.01.06>
- Jaafari, A. (2024). An Overview of Triggering and Causing Factors of Landslides. In: Chatterjee, U., Lalmalsawmzauva, K., Biswas, B., Pal, S.C. (eds), *Landslides in the Himalayan Region. Disaster Risk Reduction*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4680-4_2
- Kermanshah Provincial Meteorological Organization. (2025). <http://www.kermanshahmet.ir>
- Khazaei, J., & Ghaemi, M. (2015). A Comparison and Evaluation of Landslide Stabilization Methods (Case Study: The Landslide Occurred in the 194 km of Malayer - Kermanshah Railway). *Geography and Environmental Sustainability*, 5(3), 39-53. [In Persian] https://ges.razi.ac.ir/article_380.html
- Kiani, S., Karimkhani, A., & Mazidi, A. (2021). Landslide Risk Zoning using Logistic Regression and Anfis Models in Hashtjin Catchment Area in Ardabil Province. *Geography and Environmental Sustainability*, 11(2), 55-73. [In Persian] <https://doi.org/10.22126/ges.2021.6461.2391>
- Klai, A., Haddad, R., Bouzid, M. K., & Rabia, M. C. (2020). Landslide susceptibility mapping by fuzzy gamma operator and GIS, a case study of a section of the national road n°11 linking Mateur to Béja (Northern Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(2). <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-019-5029-1>
- Ksantini, F., Sdiri, A., Aydi, A., Almeida-Nauñay, A. F., Achour, H., & Tarquis, A. M. (2025). A comparative study based on AHP and fuzzy logic approaches for landslide susceptibility zoning using a GIS-based multi-criteria decision analysis. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 10(2), 649-668. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00552-w>
- Masruroh, H., Irawan, L. Y., & Anam, C. (2025). Comprehensive spatial analysis landslide susceptibility modelling, spatial cluster analysis and priority zoning for environment analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 5555-5576. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05950-9>
- Miao, F., Wu, Y., & Xie, Y. (2018). Prediction of landslide displacement with step-like behavior based on multialgorithm optimization and a support vector regression model. *Landslides*, 15, 475-488. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-017-0883-y>
- Moavi, M., Elmizadeh, H., & Entezari, M. (2025). Modeling Landslide Susceptibility Using Artificial Neural Network Algorithm: A Case Study of Shahid Abbaspour Dam Basin, Northeast Khuzestan. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3). [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.92634.1557>
- Mohammakhhan, S., Ganjaeian, H., Shahri, S., & Abbaszade, A. (2019). Predicting the trend of urban development toward hazardous areas using multi temporal images (Case Study: Marivan City). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(110), 107-117. [In Persian] <https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.36615>
- Negahban, S., Ganjaeian, H., Ebrahimi, A., & Emami, K. (2019). Monitoring and predicting the trend of changes in residential areas using multi-timed images (Case study: Songhor city). *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(2), 343-354. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.275076.1007084>

- Negahban, S., Ganjaeian, H., Saeedi, S., & Ghasemi, A. (2020). Study of vertical displacement caused by 2019 Turkmanchay earthquake based on InSAR method. *Journal of the Earth and Space Physics*, 46(3), 445-456. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jesphys.2020.295046.1007182>
- Negahban, S., Peysoozi, T., Ganjaeian, H., & Norozi, M. (2021). Identify areas prone to landslide and vertical displacement using Radar images (Case study: Lavasan urban area and urban margin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(3), 1-18. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.71728.1094>
- Novellino, A., Pennington, C., & Leeming, K. (2024). Mapping landslides from space: A review. *Landslides*, 21, 1041-1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02215-x>
- Pireh, M., & Ganjaeian, H. (2024). Analysis of landslides occurred in connection with environmental factors (Case study: Sanandaj County). *Geography and Human Relationships*, 7(3), 262-278. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gahr.2025.458065.2135>
- Rezapoor, A., Jabbari, I., & Bahrami, K. (2023). The Impact of Groundwater on the Landslide Occurrence in the Southern Slope of Shah Neshin Mountain. *Physical Geography Research*, 55(3), 19-36. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.364630.1007788>
- Salari, M., Nayeri, H., Amani, K., & Ganjaeian, H. (2017). Locating Suitable Directions for Kamyaran Urban Development through a Hazardology Approach based on the Application of Geomorphologically Restricted Areas. *Environmental Management Hazards*, 4(4), 419-436. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jhsci.2018.252694.341>
- Walker, L. R., & Shiels, A. B. (2013) Physical causes and consequences. in *Landslide Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press, pp.46-82. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511978685>
- Zhang, W., Wang, W., & Xia, Q. (2012). Landslide risk zoning based on contribution rate weight stack method. *Energy procedia*, 16, 178-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.030>
- Zhang, X., Xie, H., Xu, Z., Li, Z., & Chen, B. (2024). Evaluating landslide susceptibility: an AHP method-based approach enhanced with optimized random forest modeling. *Natural Hazards*, 120, 8153-8207. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06306-1>
- Zhou, J., Tan, Sh., Li, J., Xu, J., Wang, Ch., & Ye, H. (2023). Landslide Susceptibility Assessment Using the Analytic Hierarchy Process (AHP): A Case Study of a Construction Site for Photovoltaic Power Generation in Yunxian County, Southwest China. *Sustainability*, 15(6), 51-81. <http://dx.doi.org/10.3390/su15065281>