



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

Hamid Ganjaeian^{1*}, Milad Firozeh², Ali Mirakhorli³, Toktam Yazdani⁴

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

² M.Sc. in Urban Engineering, Urban Planning Major, Allameh Tabatabaei 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

Earthquake

Vertical Displacement

Karand–Sarpolzahab Road

ABSTRACT

Landslides are among the most significant hazards threatening many mountainous regions. One such high-risk area, due to its geomorphological and tectonic conditions, is the road corridor between Karand and Sarpolzahab in Kermanshah Province. In this study, Sentinel 1 radar images, 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 main data sources. The most important tools applied in this research included GMTSAR, Google Earth Engine, and ArcGIS. In this study, using relative weight coefficient methods, fuzzy logic, and radar interferometry, landslide-prone areas have been identified by considering the impacts of the Ezgeleh earthquake. Results show that vertical ground displacements in the study area ranged from −5 mm to 334 mm due to the earthquake. Given that such displacements can significantly contribute to slope instability and trigger landslides, this research highlights zones exhibiting both high susceptibility to landslides and vertical displacements exceeding 100 mm as areas with the greatest landslide risk. Accordingly, the mid-slopes and areas near the city of Sarpolzahab, due to their environmental conditions and substantial ground displacement, have been identified as the most hazardous zones in terms of landslide occurrence.

* Corresponding author: Dr. 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 Road). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoeht.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

Landslide is one of the important and destructive geomorphological phenomena that refers to the sudden or gradual displacement of a mass of soil, rock, sediment, or a combination of these materials along a slope. This phenomenon usually occurs in mountainous or sloping areas and can cause severe damage, including destruction of infrastructure, loss of agricultural lands, human casualties, and disruption of transportation and communication networks. Different regions, influenced by geological, hydrological, and topographical conditions, have varying potentials for natural hazards such as landslides. Iran's geographical location places many of its regions at risk of landslides. Among these, the western parts of Kermanshah province, located in the Zagros mountain range, have a high potential for this hazard. Due to high elevation and steep slopes, as well as the development of communication routes and other human activities, this region is highly vulnerable to landslides. Besides these factors, an often overlooked point is the tectonic setting and earthquakes in the area. In fact, the study area is tectonically active, which has caused many earthquakes, including the notable 7.3-magnitude Ezgeleh earthquake in 2017. These earthquakes have had both visible and subtle effects, including impacts on slopes, making them more prone to movement. Given the importance of the topic, this study aims to identify landslide-prone areas along the communication route from Karand to Sarpolzahab, with emphasis on tectonic factors.

Materials and Methods

In this study, Sentinel-1 radar images from before November 7, 2017, and after the Ezgeleh earthquake on November 19, 2017, MODIS satellite images from 2020 to 2024, the 1:100,000 digital geological maps of the Karad and Sarpolzahab sheets, and the 12.5 m ALOS PALSAR Digital Elevation Model were used as the main data sources. The key research tools included GMTSAR (V.6.0) for applying radar interferometry and ArcGIS for standardizing information layers and preparing the required maps. The research was conducted in several stages. In the first stage, to identify landslide-prone areas within the study region, the relative weight coefficient and fuzzy logic models and eight parameters—distance from roads, distance from rivers, elevation, slope, slope aspect, lithology, distance from faults, and vegetation cover—were employed. In the second stage, to examine the impacts of the 2017 Ezgeleh earthquake, radar interferometry was applied to assess the extent of surface displacement. In the third stage, the areas with both the highest vertical displacement and high landslide vulnerability were identified and introduced as zones at risk of landslides.

Discussion and Results

The results show that the Ezgeleh earthquake caused numerous visible and subtle changes in the area. Among the subtle effects was significant vertical displacement. Since such displacement can critically affect slope stability and trigger movements, a map of vertical displacement was created for the study area, showing displacements ranging from -5 mm to 334 mm. Areas with displacements greater than 100 mm were considered unstable. Subsequently, maps combining landslide susceptibility classes of high and very high vulnerability with vertical displacements above 100 mm were prepared. According to the results, the mid-slopes of the region and areas near Sarpolzahab city, due to both environmental susceptibility and vertical displacements above 100 mm, were identified as landslide-prone zones.

Conclusion

The analysis results indicate that the middle sections of this route, particularly due to high elevation, steep slopes, and dominant lithology, have the greatest potential for landslides. One of the main factors increasing slope instability is tectonic activity, especially the Ezgeleh earthquake, which caused significant ground surface displacements, with some points experiencing vertical movements exceeding 300 mm. These displacements can substantially weaken slope stability and increase the likelihood of landslides. Accordingly, areas exhibiting both natural susceptibility and vertical displacements over 100 mm were identified as having the highest landslide risk. Specifically, the mid-slopes and regions near Sarpolzahab

city, due to the combination of favorable environmental conditions and considerable displacement, are classified among the highest-risk landslide zones. Based on the findings, it is recommended to continuously monitor ground displacements in the area using remote sensing techniques, limit construction in high-risk zones, and implement slope stabilization and reinforcement projects. Additionally, educational programs for local residents can play an effective role in reducing landslide-related damages.



تحلیل پتانسیل وقوع زمین لغزش با تأکید بر تأثیر زمین لرزه ها (مطالعه موردی: مسیر ارتباطی کنند تا سرپل ذهاب)

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

^۱دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲کارشناسی ارشد مهندسی شهرسازی، گرایش برنامه ریزی شهری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران

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

^۴دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	یکی از مخاطراتی که بسیاری از مناطق کوهستانی را تهدید می کند، زمین لغزش است. از جمله مناطقی که به دلیل وضعیت ژئومورفولوژیکی و تکتونیکی، پتانسیل بالایی از نظر وقوع این مخاطره دارد، مسیر ارتباطی کنند 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 به عنوان مهم ترین داده های تحقیق استفاده شده است. مهم ترین ابزارهای تحقیق، GMTSAR، سامانه گوگل ارث انجین و ArcGIS بوده است. در این تحقیق با استفاده از روش های ضریب وزنی نسبی، منطق فازی و تداخل سنجی راداری، مناطق مستعد وقوع زمین لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین لرزه از گله شناسایی شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، محدوده مطالعاتی تحت تأثیر زمین لرزه از گله بین ۵- تا ۳۳۴ میلی متر جابجایی عمودی داشته است. با توجه به اینکه جابجایی رخ داده می تواند نقش مهمی در ناپایداری دامنه ها و آماده حرکت کردن آن ها داشته باشد، در این پژوهش مناطقی که دارای پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش بوده اند و همچنین جابجایی بیش از ۱۰۰ میلی متری داشته اند شناسایی شده و به عنوان مناطق دارای بالاترین احتمال وقوع زمین لغزش معرفی شده اند. بر اساس نتایج حاصله، دامنه های 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 جابجایی عمودی بیش از ۱۰۰ میلی متر بوده اند، به عنوان مناطق در معرض مخاطره زمین لغزش شناسایی شده است.
کلمات کلیدی:	
زمین لغزش	
زمین لرزه	
جابجایی عمودی	
مسیر کند-سرپل ذهاب	

مقدمه

زمین لغزش یکی از مهم ترین و مخرب ترین پدیده های ژئومورفولوژیک به شمار می رود که به جابجایی 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 بر جای 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 راه ها (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; Mohammakhani, 2024; Asadi, Ganjaeian & Javedani, 2024). موقعیت جغرافیایی ایران سبب شده است تا بخش های زیادی از آن در معرض مخاطره زمین لغزش باشد (Rezapoore, 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. درواقع، 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 زمین‌لغزش 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 سنج 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 ازگله به‌عنوان یک عامل تشدیدکننده، سبب افزایش آسیب‌پذیری دامنه‌ها شده و ضرورت شناسایی دقیق مناطق مستعد لغزش را دوجندان می‌کند.

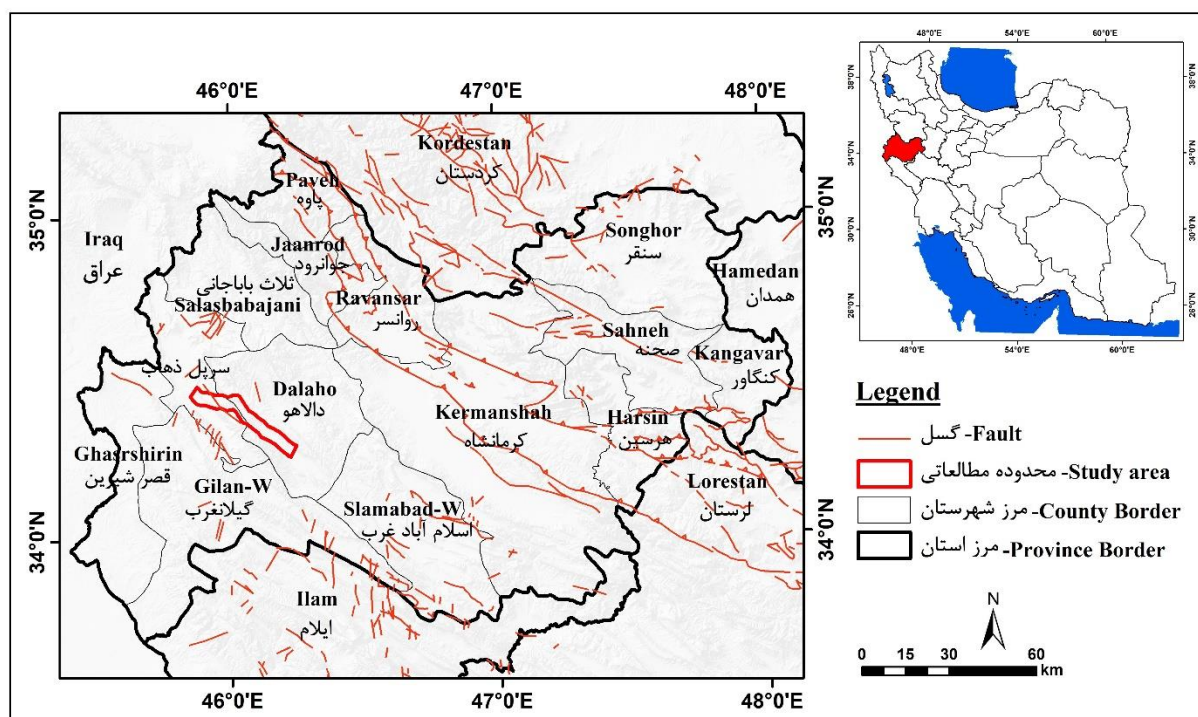
ضرورت این تحقیق از دو جنبه علمی و کاربردی قابل تبیین است. از دیدگاه علمی، این پژوهش با تمرکز بر تأثیر عوامل تکتونیکی و زمین‌لرزه‌های اخیر، خلأ موجود در ادبیات نظری را پر می‌کند. از منظر کاربردی، شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در مسیر ارتباطی کرد - سرپل‌ذهاب می‌تواند به برنامه‌ریزان، مهندسان راه و 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 ازگله است. نوآوری تحقیق نیز در تحلیل نقش زمین‌لرزه به‌عنوان عامل پنهان در تحریک لغزش‌ها و شناسایی دامنه‌های در معرض خطر نهفته است.

مواد و روش‌ها

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 دربر گرفته 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 دربر گرفته 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 میلی متر، دارای زمستان های معتدل و تابستان های گرم و خشک است (Kermanshah Provincial Meteorological Organization, 2025).



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. Location map of the study area

روش تحقیق

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 سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴، لایه رقومی نقشه های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیت های کرد و سرپل ذهاب و مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR به عنوان مهم ترین داده های تحقیق استفاده شده است. مهم ترین ابزارهای تحقیق، GMTSAR (V.6.0) (اجرای روش تداخل سنجی راداری) و ArcGIS (استانداردسازی لایه های اطلاعاتی و تهیه نقشه های مورد نظر) بوده است. این تحقیق در چند مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن ها پرداخته شده است:

مرحله اول (شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش): در این مرحله به منظور 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.

جدول ۱- نحوه تهیه لایه‌های اطلاعاتی

Table 1- How to prepare an information layer

ردیف	پارامتر	نحوه تهیه لایه اطلاعاتی
Row	Parameter	How to prepare an information layer
1	فاصله از جاده	تهیه شده بر اساس تصاویر گوگل ارث Prepared based on Google Earth images
2	فاصله از رودخانه	تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR
3	ارتفاع	تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR
4	شیب	تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR
5	جهت شیب	تهیه شده بر اساس مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر ALOS PALSAR Prepared based on the 12.5 m high digital model ALOS PALSAR
6	لیتولوژی	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
7	فاصله از گسل	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
8	تراکم پوشش گیاهی	تهیه شده با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین و تصاویر MODIS Prepared using Google Earth Engine and MODIS images

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 زمین‌لغزش دارند و مناطقی که دارای ارزش صفر هستند، پتانسیل کمی از نظر وقوع زمین‌لغزش دارند (جدول ۲).

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. به‌طور 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 ارجعیت 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 $\mu_i(x)$ به‌دست آمدند. سپس لایه‌ها با استفاده از عملگر گامای فازی به‌صورت رابطه (۱) ترکیب شدند و نقشه نهایی مناطق مستعد زمین‌لغزش حاصل گردید (Klai, Haddad, Bouzid & Rabia, 2020):

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

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 لایه های اطلاعاتی

Table 2- How to standardize the information layer

ردیف Row	پارامتر Parameter	نحوه استانداردسازی لایه اطلاعاتی How to standardize the information layer	الگو Pattern
1	فاصله از جاده Distance from road	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.	خطی معکوس Inverse linear
2	فاصله از رودخانه Distance from river	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.	خطی معکوس Inverse linear
3	ارتفاع Elevation	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.	خطی مستقیم Straight linear
4	شیب Slope	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.	خطی مستقیم Straight linear
5	جهت شیب Aspect	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.	غیر خطی Nonlinear
6	لیتولوژی Lithology	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.	غیر خطی Nonlinear
7	فاصله از گسل Distance from fault	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.	خطی معکوس Inverse linear
8	تراکم پوشش گیاهی Vegetation density	به مناطق دارای تراکم پوشش گیاهی کم تر، 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.	خطی معکوس Inverse linear

مرحله دوم (ارزیابی اثرات زمین لرزه از گله بر محدوده مطالعاتی): زمین لرزه از گله به بزرگی $7/3$ ریشتر و عمق 32 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 پردازش های لازم بر روی تصاویر انجام شده است و سپس نقشه میزان جابجایی 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 بوده اند، شناسایی شده است.

¹ Differential InSAR, DInSAR

جدول ۳- مشخصات تصاویر مورد استفاده

Table 3- Specifications of the images used

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 از گله): پس از تهیه نقشه میزان جابجایی عمودی و مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه، در این بخش مناطقی که هم دارای بالاترین جابجایی 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 استانداردسازی آن‌ها

فاصله از رودخانه و جاده: رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از عوامل موثر 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 موثر 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).

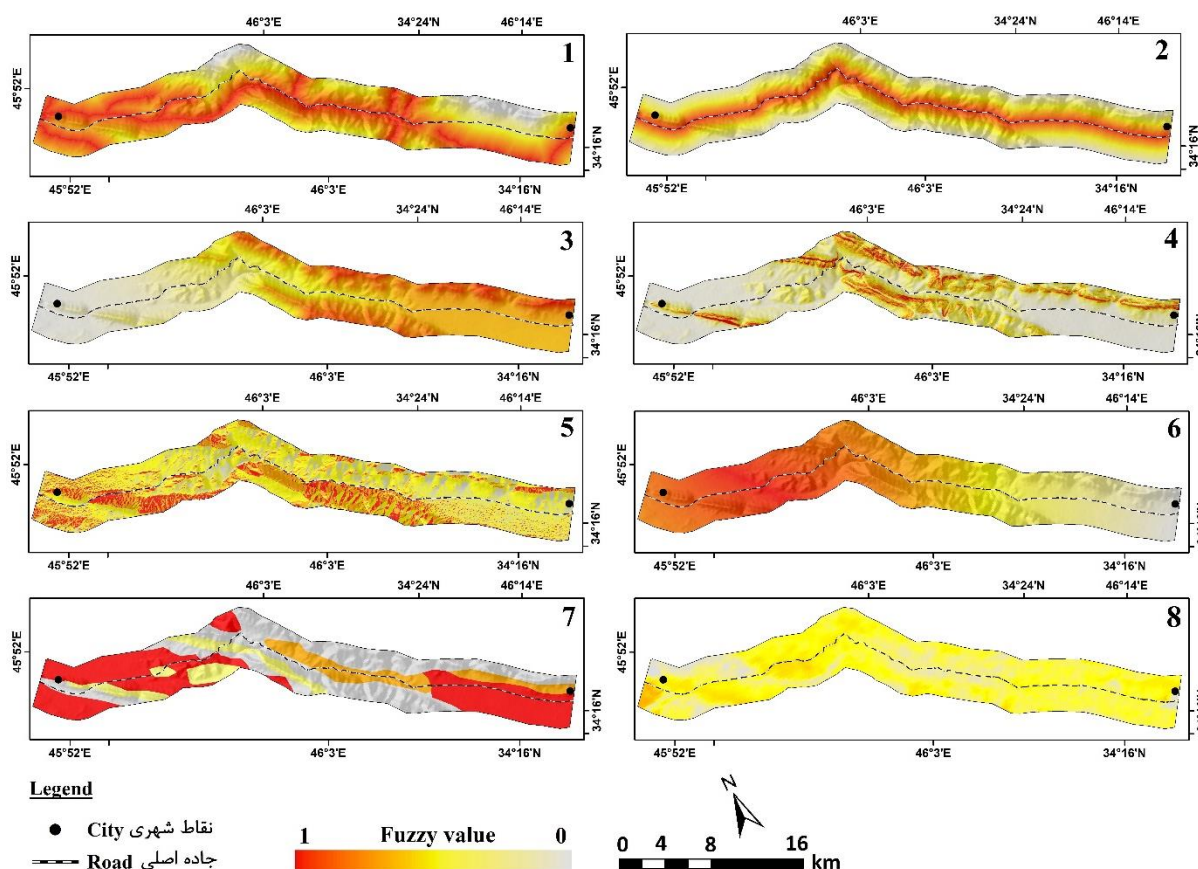
شیب، جهت شیب و ارتفاع: شیب به‌عنوان مهم‌ترین عامل در وقوع حرکات دامنه محسوب می‌شود. مناطق با شیب زیاد به دلیل ناپایداری دامنه‌ای، در معرض حرکات دامنه‌ای از جمله زمین لغزش هستند (Baharvand, 2023). با توجه به کوهستانی بودن منطقه، بخش زیادی از منطقه را دامنه‌های با شیب زیاد در بر گرفته است و به همین دلیل 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 موثر 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 موثر 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 موثر 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 زمین لغزش محسوب می‌شود. به‌طور معمول، مناطقی که دارای پوشش گیاهی کم‌تری هستند، پتانسیل بیش‌تری از نظر وقوع زمین لغزش 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 information layers 1-Distance from river 2-Distance from road 3-Elevation 4-Slope 5-Slope direction 6-Distance from fault 7-Lithology 8- Vegetation 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 بدست 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 تاثیرگذاری را دارند (جدول ۴).

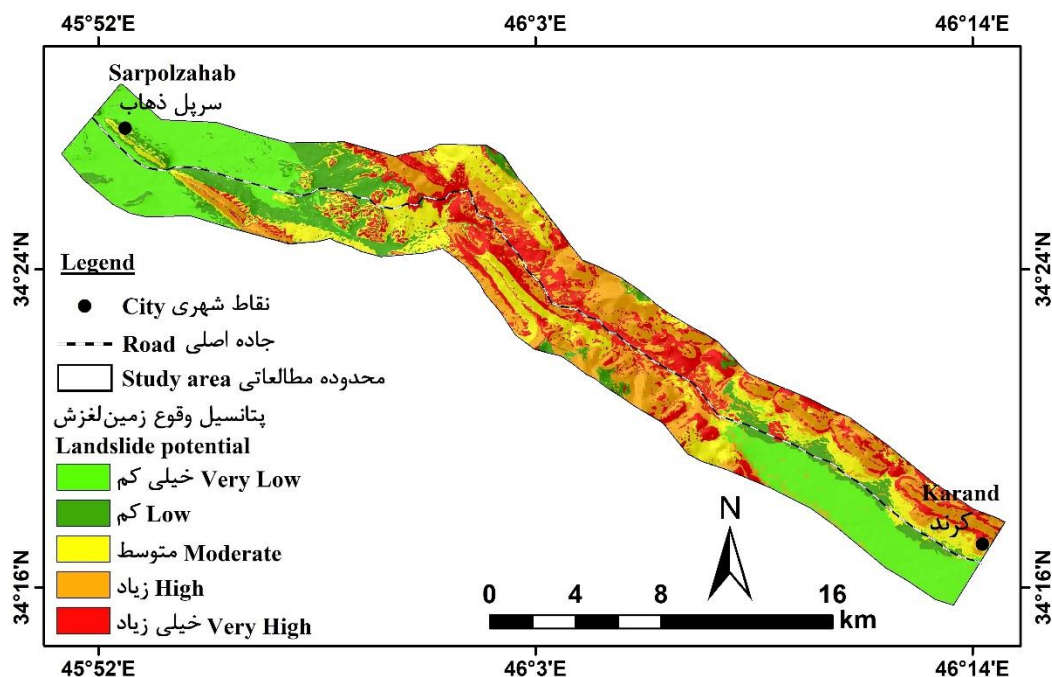
جدول ۴- وزن نهایی پارامترها

Table 4- Final weight of parameters

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

(ج) اجرای مدل گامای فازی

پس از وزن دهی به لایه‌های اطلاعاتی، وزن بدست 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 بدست 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.

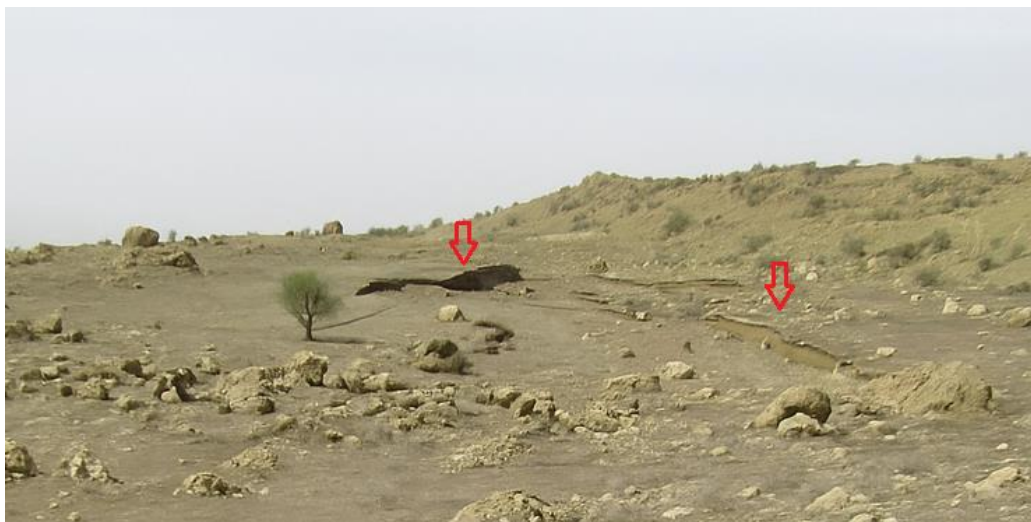


شکل ۳- نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه

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

ارزیابی اثرات زمین لرزه ازگله بر محدوده مطالعاتی

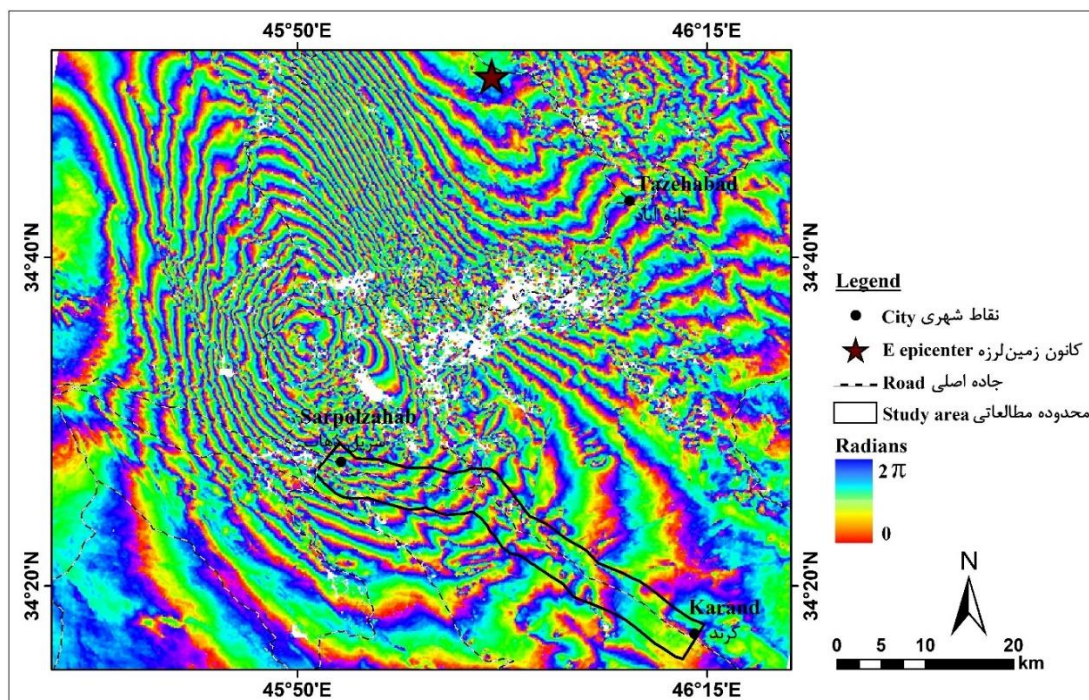
موقعیت زمین ساختی زاگرس سبب شده است تا این واحد دارای پتانسیل لرزه خیزی بالایی باشد (Ganjajian, 2025). زمین لرزه ها با اثرات زیادی بر سطح زمین همراه هستند. یکی از مهم ترین اثرات زمین لرزه ها، جابجایی سطح زمین است. جابجایی های ناشی از زمین لرزه محسوس نیستند و بیانگر میزان انرژی آزاد شده هستند. از جمله زمین لرزه هایی که باعث جابجایی و تغییرات زیادی در سطح زمین شد، زمین لرزه ازگله در سال ۱۳۹۶ بوده است. تحت تاثیر این زمین لرزه، مناطق مجاور آن با جابجایی زیادی مواجه شده است. بخش زیادی از این جابجایی رخ داده مربوط به دامنه هایی بوده است که پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش دارند، بنابراین می توان گفت که زمین لرزه رخ داده یا به طور مستقیم باعث حرکات دامنه ای شده است و یا اینکه زمینه را برای بروز مخاطرات دامنه ای از جمله زمین لغزش فراهم آورده است (شکل ۴). با توجه به اهمیت موضوع در این بخش به بررسی میزان جابجایی عمودی ناشی از زمین لرزه ازگله در سال ۱۳۹۶ پرداخته شده است.



شکل ۴- تصویری از اثرات زمین‌لرزه ازگله بر دامنه‌های منطقه

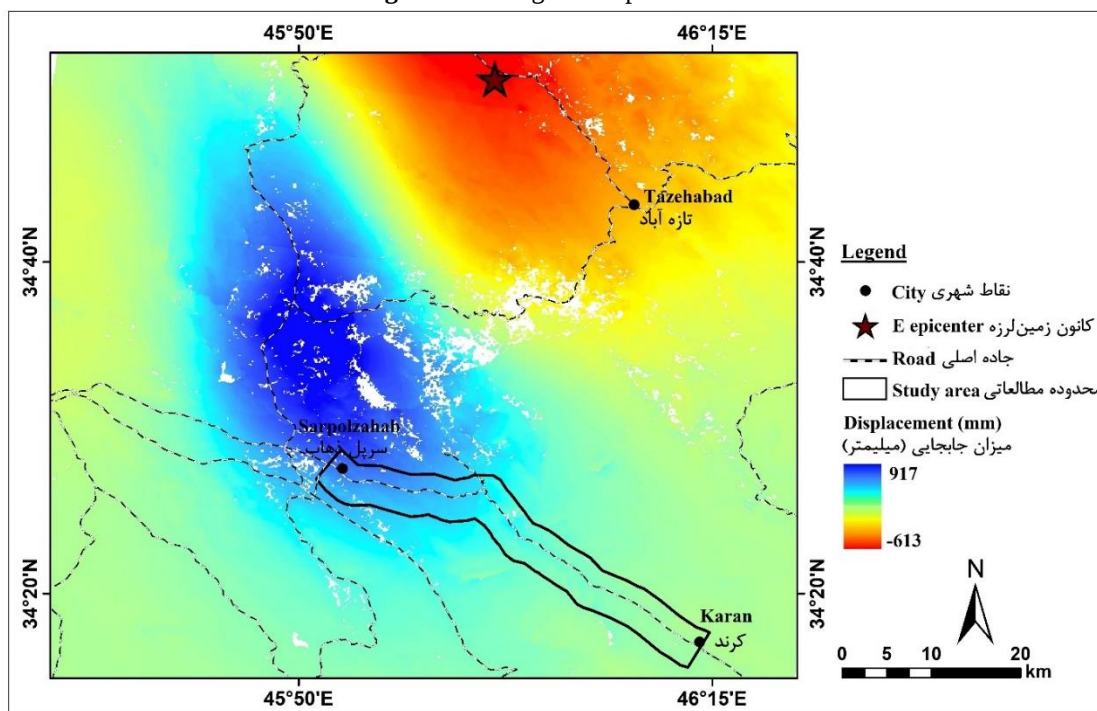
Fig. 4. Image of the effects of the Ezgeleh earthquake on the slopes of the region

در این تحقیق، به‌منظور تهیه نقشه میزان جابجایی عمودی منطقه، از تصاویر سنتینل ۱ قبل و بعد از وقوع زمین‌لرزه 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 جابجایی عمودی منطقه تهیه شده است (شکل ۶). بر اساس نقشه تهیه شده، تحت تاثیر زمین‌لرزه ازگله، منطقه مورد مطالعه بین ۹۱۷ تا ۶۱۳- میلی‌متر جابجایی داشته است. آنالیز جابجایی رخ داده بیانگر این است که تحت تاثیر زمین‌لرزه رخ داده، مناطق جنوبی محدوده منطبق بر مناطق حاشیه شهر سرپل‌ذهاب با بالآمدگی و مناطق شمالی محدوده با پایین‌رفتگی مواجه شده است. جابجایی رخ داده بیانگر انرژی زیاد آزاد شده ناشی از زمین‌لرزه ازگله بوده است که این مسئله می‌تواند نقش مهمی بر ناپایداری‌های دامنه منطقه داشته باشد.



شکل ۵- نقشه اینترفروگرام منطقه

Fig. 5. Interferogram map of the area

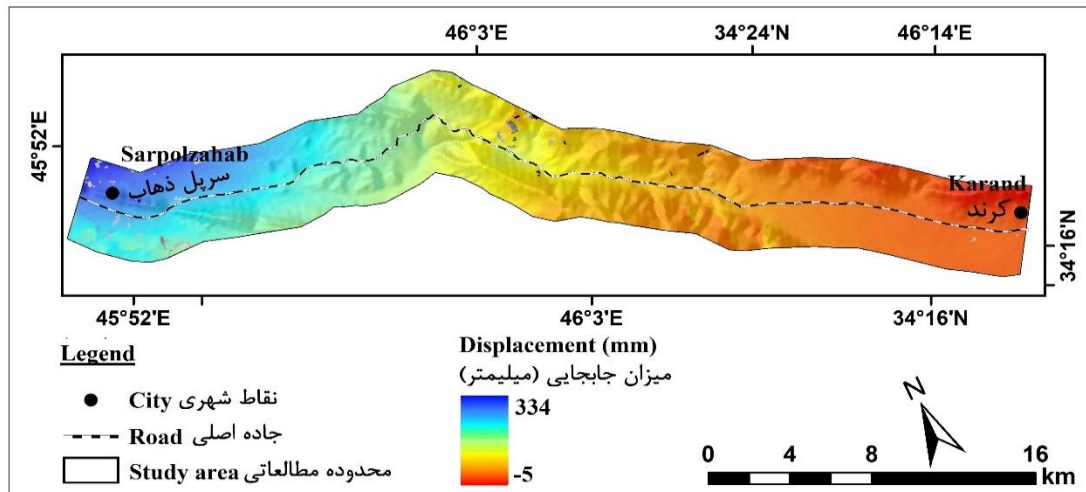


شکل ۶- نقشه میزان جابجایی عمودی منطقه

Fig. 6. Map of the vertical displacement of the area

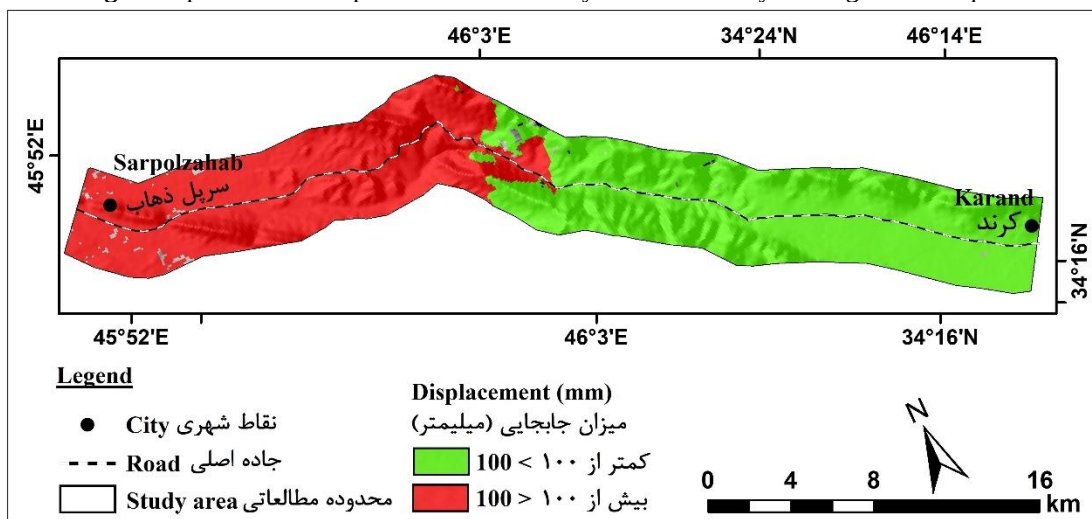
شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش با در نظر گرفتن تاثیرات زمین لرزه ازگله

نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داده است که زمین لرزه ازگله باعث بروز تغییرات محسوس و نامحسوس زیادی در منطقه شده است. از جمله تاثیرات نامحسوس این زمین لرزه، جابجایی عمودی قابل توجه این زمین لرزه بوده است به طوری که جابجایی عمودی ناشی از زمین لرزه ترکمانچای در سال ۱۳۹۸، ماکزیمم ۹۶ میلی متر بوده است (Negahban, Ganjaeian, Saeedi & Ghasemi, 2020) در حالی که ماکزیمم جابجایی ناشی از زمین لرزه ازگله ۹۱۷ میلی متر بوده است. با توجه به اینکه جابجایی رخ داده می تواند نقش مهمی در ناپایداری دامنه ها و آماده حرکت کردن آن ها داشته باشد، در این بخش ابتدا نقشه میزان جابجایی عمودی منطقه در محدوده مطالعاتی تهیه شده است (شکل ۷) که بر اساس آن، محدوده مطالعاتی بین ۵- تا ۳۳۴ میلی متر جابجایی داشته است. در ادامه، مناطقی که دارای بیشترین تغییرات بوده اند شناسایی شده است که برای این منظور مناطق دارای بیش از ۱۰۰ میلی متر جابجایی، به عنوان مناطق ناپایداری در نظر گرفته شده است (شکل ۸).



شکل ۷- نقشه میزان جابجایی عمودی محدوده مطالعاتی تحت تاثیر زمین لرزه ازگله

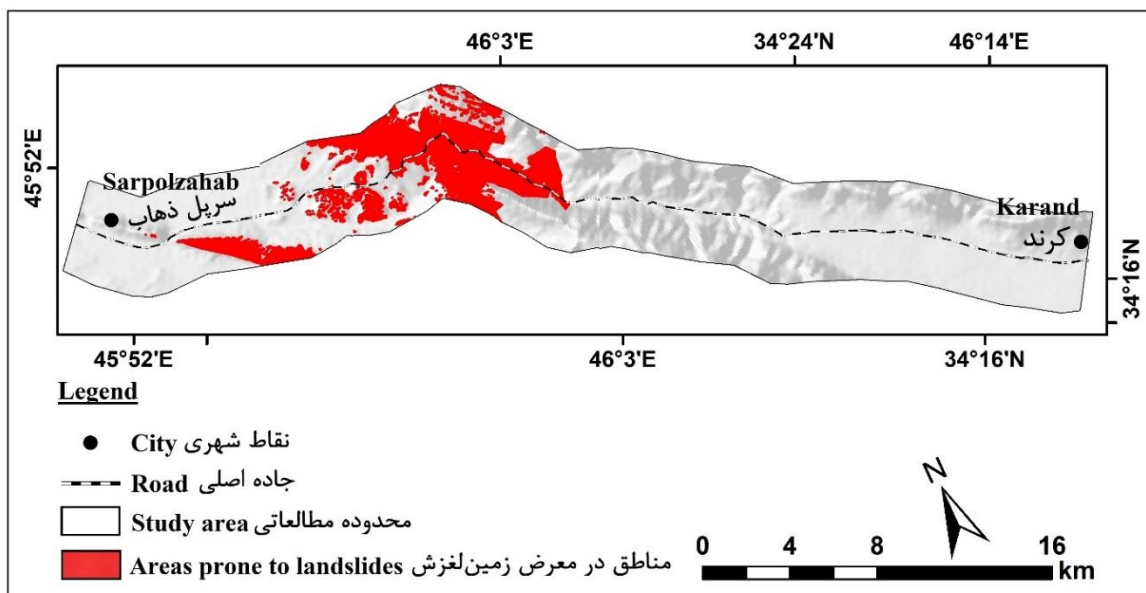
Fig.7. Map of vertical displacement of the study area affected by the Ezgeleh earthquake



شکل ۸- نقشه طبقه بندی شده جابجایی عمودی محدوده مطالعاتی تحت تاثیر زمین لرزه ازگله

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

پس از تهیه نقشه طبقه‌بندی شده جابجایی عمودی محدوده مطالعاتی، نقشه طبقات با پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و خیلی زیاد که دارای جابجایی 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 زمین لغزش هستند و هم اینکه دارای جابجایی عمودی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بوده‌اند، به‌عنوان مناطق در معرض مخاطره زمین لغزش شناسایی شده است.



شکل ۹- نقشه مناطق مستعد وقوع زمین لغزش با در نظر گرفتن تأثیرات زمین لرزه ازگله

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

نتیجه‌گیری

بررسی انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری روش گامای فازی در ترکیب لایه‌های اطلاعاتی محیطی همچون شیب، لیتولوژی و ارتفاع، ابزاری کارآمد برای شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش 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 زمین لغزش دارند. از سوی دیگر، تحلیل اثرات زمین لرزه ازگله سال ۱۳۹۶ نشان داد که این زلزله نه تنها موجب جابجایی محسوس سطح زمین شد، بلکه با ایجاد تغییرات عمودی قابل توجه (حداکثر ۹۱۷ میلی‌متر) زمینه ناپایداری دامنه‌ها را نیز تشدید کرده است. مقایسه میزان جابجایی ناشی از این زلزله با زلزله‌های مشابه همچون زمین لرزه 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 جابجایی عمودی نشان داد که مناطقی با جابجایی 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 زمین لرزه، اهمیت لحاظ کردن اثرات لرزه‌ای در مدل‌های ارزیابی خطر زمین لغزش 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 درباره خطرات زمین‌لغزش و اتخاذ تدابیر مهندسی پایدار برای تثبیت دامنه‌ها، گام‌های مهمی در مدیریت ریسک مخاطرات زمین‌لغزش به شمار 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). Zonning 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/sustaineath.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 Qarahsu 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-Ñañay, 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/geoe.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>