



Assessment of Vulnerability of Communication Lines and Rural Settlements against Landslide Hazard in Mountainous Areas (Case Study: Mianeh to Bostanabad Road)

Kamya Emami ^{1*} , Negar Dehdehi ² , Ali Mirakhorli ³ 

1. Department of Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. (Corresponding author).

Email: kamyaremami71@gmail.com

2. Department of Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: negar.d7474@gmail.com

3. Department of Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: mirakhorli.ali@ut.ac.ir

Article Info

Article Type: Research Article

Article History:

Received: 10 August 2025

Revised: 07 October 2025

Accepted: 02 December 2025

Published: 29 March 2026

Use Your Device to Scan and Read the Article Online



Keywords: Landslide, Vulnerability, WLC, OWA, Rural Settlements .

ABSTRACT

Landslides are one of the most significant hazards causing considerable damage annually in mountainous regions. Among the vulnerable areas is the communication corridor between the cities of Mianeh and Bostanabad. Given the importance of this issue, this study focuses on identifying landslide-prone areas and analyzing the vulnerability of rural settlements along this route. The research utilized key datasets including MODIS satellite imagery, the 30-meter resolution SRTM Digital Elevation Model (DEM), and a 1:100,000 scale digital geological map of the region. The main tools employed in this study were Google Earth Engine, ArcGIS, and TerrSet software. Additionally, the WLC, OWA, and AHP models were applied to identify landslide susceptibility zones. According to the results, approximately 27.8% of the study area identified by the WLC method and 27.6% by the OWA method fall within high and very high landslide susceptibility classes, mainly located in the western and central parts of the study area, coinciding with the slopes adjacent to the Mianeh–Bostanabad road. Moreover, the results of this study have shown that at least 10 villages in the region are at risk of landslides, making it essential to take necessary measures such as managing land-use changes and monitoring compliance with proper principles in the development of transportation routes.

Cite this article: Emami, K., Dehdehi, N., & Mirakhorli, A. (2026). Assessment of Vulnerability of Communication Lines and Rural Settlements against Landslide Hazard in Mountainous Areas (Case Study: Mianeh to Bostanabad Road). *Environmental Research in Mountainous Regions*, 2(1), 68-84. <https://doi.org/10.22034/ermr.2025.144297.1031>



© The Author(s) retain the copyright

Publisher: University of Kurdistan

Extended Abstract

Introduction

Natural hazards refer to environmental phenomena and events that can cause human casualties, financial losses, and environmental damage to people and infrastructure. The increasing population growth, expansion of human activities, and lack of attention to environmental capacities have intensified the likelihood of natural hazards in recent years. Landslides are among the most dangerous and common natural hazards in mountainous and sloped areas, caused by the downward sliding of large volumes of soil and rock. This phenomenon is usually triggered or exacerbated by heavy rainfall, earthquakes, human activities such as deforestation, and unstable construction, and can lead to road blockages, destruction of buildings, and harm to human lives. Therefore, identifying and managing landslide hazards is crucial for reducing damages and increasing the safety of local communities. In countries with rugged topography like Iran, landslides can cause significant human and financial losses and threaten vital infrastructures such as roads, bridges, and civil installations. The occurrence of landslides is influenced by various factors. In addition to natural factors such as topography, geology, and hydroclimatic conditions, human activities including construction development and land-use changes contribute to landslide occurrence in many regions. Among the vulnerable areas is the road corridor between Mianeh and Bostanabad located in East Azerbaijan Province. Given the importance of the issue, this study aims to identify landslide-prone areas along this rout.

Methodology

In this study, satellite images from MODIS, the 30-meter SRTM Digital Elevation Model (DEM), and the 1:100,000 scale digital geological map of the area were used as the primary data sources. The main tools employed in this research included Google Earth Engine, ArcGIS, and TerrSet software. Additionally, the WLC, OWA, and AHP models were utilized. Given the objectives of the study, the research was conducted in several stages. In the first stage, after identifying the relevant parameters and preparing their informational layers, each data layer was assigned an intra-layer value

ranging from zero to one to enable evaluation; these layers were standardized based on their intra-layer values, where landslide-prone areas were assigned values close to one, and non-prone areas values near zero. In the second stage, using the Analytic Hierarchy Process (AHP) model and Expert Choice software, weights were assigned to the data layers, and these weights were then applied. In the third stage, using the WLC and OWA models, the data layers were combined, and the final landslide susceptibility map was produced. In the fourth stage, the vulnerability status of the villages within the study area against landslide hazards was evaluated.

Results and Discussion

The assessment of area and percentage of landslide susceptibility classes indicates that areas with high and very high landslide potential cover approximately 178 and 171 square kilometers (equivalent to 27.8% and 27.6% of the total area) in the WLC and OWA methods, respectively. A significant portion of these areas adjoin the main Mianeh–Bostanabad road, thus possessing high importance and sensitivity. Conversely, areas with low and very low landslide potential cover about 291 and 242 square kilometers (equivalent to 46.9% and 38.9% of the area) in the WLC and OWA methods, respectively. These areas are mainly located in the eastern parts of the region, particularly near Mianeh city, where the elevation and slope are low, resulting in lower landslide susceptibility. After producing the final landslide susceptibility maps, the spatial distribution of 49 village points within the study area was analyzed according to susceptibility classes. The results showed that 9 and 11 villages (representing 18.4% and 22.4% of all villages in the area) are situated in high and very high landslide potential zones according to the WLC and OWA methods, respectively. Additionally, 30 and 28 villages (61.2% and 57.1% of all villages) fall within low and very low susceptibility zones in the WLC and OWA analyses.

Conclusion

The results indicate that topographical factors such as elevation and steep slopes, lithology type, and proximity to faults play significant roles in increasing landslide risk. According to the analyses, about 27.8% of the total area in the

WLC method and 27.6% in the OWA method fall within high and very high susceptibility classes, primarily located in the western and central parts, mostly corresponding to slopes adjacent to the Mianeh–Bostanabad road corridor. Areas with low and very low susceptibility are mainly in the eastern region, especially around Mianeh city. The vulnerability assessment of 49 villages indicated that at least 10 villages are in high-risk zones, necessitating special attention and management actions to reduce potential damages. Based on the findings, it is recommended that land-use planning and developmental projects in high susceptibility zones be limited and based on detailed

geotechnical studies. Implementing slope stabilization projects, constructing retaining walls, and applying surface water control engineering methods can effectively reduce landslide hazards. Moreover, installing monitoring and early warning systems in critical points, particularly in villages at risk, is essential. Educating and raising awareness among local residents about early signs of landslides and preventive measures plays a crucial role in minimizing human and financial losses. Continuous updating of landslide susceptibility maps with new data and employing remote sensing and GIS technologies can enhance the accuracy of management decisions.

Ethical Considerations

Funding

According to the corresponding author, this research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author Contributions

The authors have contributed collectively to all stages of the research.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors declare that no artificial intelligence (AI) tools were used in the writing of this manuscript.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Data Availability Statement

The data are available upon request from the authors.

Acknowledgments

The authors wish to express their sincere gratitude to all individuals, organizations, and institutions that contributed to the preparation of this article.



ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری خطوط ارتباطی و نقاط روستایی در برابر مخاطره زمین‌لغزش در قلمروهای کوهستانی (مطالعه موردی: مسیر ارتباطی میانه تا بستان‌آباد)

کامیار امامی^{۱*} ID، نگار ده‌دهی^۲ ID، علی میرآخوری^۳ ID

۱. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: kamyaremami71@gmail.com

۲. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: negar.d7474@gmail.com

۳. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mirakhorli.ali@ut.ac.ir

چکیده

زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین مخاطراتی است که هر ساله باعث بروز خسارات زیادی در مناطق کوهستانی می‌شود. از جمله مناطقی که در معرض این مخاطره قرار دارد، مسیر ارتباطی شهر میانه تا بستان‌آباد است. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش و تحلیل وضعیت آسیب‌پذیری نقاط روستایی در این مسیر پرداخته شده است. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌های MODIS، مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM و لایه رقومی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق، سامانه گوگل ارث انجین، ArcGIS و TerrSet بوده است. همچنین در این تحقیق از مدل‌های WLC، OWA و AHP به منظور شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، در روش WLC حدود ۸/۲۷ درصد و در روش OWA حدود ۶/۲۷ درصد از کل مساحت منطقه در طبقات با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین‌لغزش قرار دارند که بیش‌تر در بخش‌های غربی و میانی و منطبق بر دامنه‌های منتهی به مسیر جاده میانه-بستان‌آباد واقع شده‌اند. همچنین، نتایج این تحقیق نشان داده است که حداقل ۱۰ مورد از روستاهای منطقه در معرض مخاطره زمین‌لغزش قرار دارند که ضروری است اقدامات لازم از جمله مدیریت تغییرات کاربری اراضی و نظارت بر رعایت اصول صحیح توسعه راه‌های ارتباطی صورت گیرد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۹

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



واژه‌های کلیدی:

زمین‌لغزش، آسیب‌پذیری، WLC، OWA، نقاط روستایی.

استناد: امامی، کامیار؛ ده‌دهی، نگار و میرآخوری، علی. (۱۴۰۵). ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری خطوط ارتباطی و نقاط روستایی در برابر مخاطره زمین‌لغزش در قلمروهای کوهستانی (مطالعه موردی: مسیر ارتباطی میانه تا بستان‌آباد). پژوهش‌های محیطی در قلمروهای کوهستانی، ۲ (۱)، ۶۸-۸۴. <https://doi.org/10.22034/ermr.2025.144297.1031>



مقدمه

مخاطرات طبیعی به پدیده‌ها و رویدادهای زیست‌محیطی گفته می‌شود که می‌توانند خسارات جانی، مالی و زیست‌محیطی به انسان‌ها و زیرساخت‌ها وارد کنند (نگهبان و همکاران، ۱۳۹۸؛ اسدی و همکاران، ۱۳۹۹؛ نورالدین‌موسی و همکاران، ۱۴۰۲). روند افزایشی جمعیت و توسعه فعالیت‌های انسانی و همچنین عدم توجه به توانمندی‌های محیطی، سبب تشدید احتمال وقوع مخاطرات طبیعی در طی سال‌های اخیر شده است (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۸؛ اسدی و همکاران، ۱۴۰۱). در این میان، زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از خطرناک‌ترین و شایع‌ترین مخاطرات طبیعی در مناطق کوهستانی و شیب‌دار مطرح است که به‌دلیل لغزش حجم زیادی از خاک و سنگ به پایین شیب ایجاد می‌شود (یانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۰؛ سو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱؛ نگهبان و همکاران، ۱۴۰۰). این پدیده نه‌تنها تهدیدی برای محیط طبیعی به شمار می‌رود، بلکه پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیرساختی گسترده‌ای را نیز به همراه دارد.

زمین‌لغزش‌ها معمولاً در اثر بارش‌های شدید، زلزله، فعالیت‌های انسانی نظیر قطع درختان و ساخت‌وسازهای ناپایدار تشدید می‌شوند و می‌توانند باعث انسداد جاده‌ها، تخریب ساختمان‌ها و خسارت‌های مستقیم به جان و مال انسان‌ها شوند (تانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین، شناسایی، پیش‌بینی و مدیریت مخاطرات زمین‌لغزش اهمیت بالایی در کاهش خسارات و افزایش ایمنی جوامع محلی دارد (سارو^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). اهمیت این مسئله در کشورهایی با شرایط توپوگرافی ناهموار مانند ایران دوچندان است؛ زیرا زمین‌لغزش‌ها می‌توانند خسارات جانی و مالی گسترده‌ای به همراه داشته باشند و زیرساخت‌های حیاتی همچون جاده‌ها، پل‌ها، خطوط انتقال انرژی و تأسیسات عمرانی را با تهدید جدی مواجه سازند (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۳؛ کنعانی، ۱۴۰۲). وقوع این پدیده تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی نظیر وضعیت زمین‌شناسی، شیب، بارندگی و پوشش گیاهی، و همچنین عوامل انسانی همچون تغییر کاربری اراضی و توسعه ساخت‌وسازها است (سالاری و همکاران، ۱۳۹۹).

از سوی دیگر، شرایط جغرافیایی و اقلیمی ایران، با وجود رشته‌کوه‌های متعدد و بارش‌های متغیر (مددی و تقی‌زاده، ۱۴۰۳)، زمینه‌ساز افزایش احتمال وقوع زمین‌لغزش است. ایران به دلیل قرارگیری در کمربند کوهزایی آلپ-همیالیا، از ناهمواری‌های قابل توجهی برخوردار است و بخش وسیعی از آن را مناطق کوهستانی و دامنه‌های پرتابی تشکیل می‌دهد. این ویژگی توپوگرافی، همراه با تنوع اقلیمی و بارش‌های فصلی نامنظم، شرایط ناپایداری زمین را افزایش داده و در بسیاری از مناطق مستعد لغزش‌های متعدد و گاه گسترده کرده است. علاوه بر این، نوع لیتولوژی و وجود لایه‌های سست و ناپایدار در برخی مناطق، حساسیت این سرزمین را در برابر حرکات توده‌ای تشدید می‌کند. همچنین زمین‌لرزه‌های متعدد، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل ناپایداری دامنه‌ها، این تهدید را تشدید می‌کنند (گنجائیان، ۱۴۰۳). موقعیت لرزه‌خیز ایران که ناشی از فعالیت گسل‌های بزرگ و فعال در پهنه‌های مختلف کشور است، موجب می‌شود که زمین‌لرزه‌ها اغلب با جابه‌جایی و شکستگی دامنه‌ها همراه باشند. بسیاری از زمین‌لغزش‌های بزرگ در کشور در پی زمین‌لرزه‌های متوسط تا شدید رخ داده‌اند که علاوه بر خسارت‌های ناشی از خود زلزله، پیامدهای ثانویه آن‌ها را نیز افزایش داده است.

یکی از مناطق در معرض این پدیده، مسیر جاده‌ای میانه - بستان‌آباد در استان آذربایجان شرقی است. این مسیر به دلیل واقع شدن در منطقه‌ای کوهستانی و قرارگیری در نزدیکی گسل‌ها و دامنه‌های مستعد لغزش، همواره در معرض خطر قرار دارد. جاده مذکور به‌عنوان یکی از محورهای اصلی ارتباطی شمال غرب کشور، نقش اساسی در حمل‌ونقل شهری، اقتصادی و منطقه‌ای دارد؛ بنابراین هرگونه اختلال ناشی از زمین‌لغزش در این مسیر، می‌تواند پیامدهای اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای را به همراه داشته باشد. به‌عنوان نمونه، زمین‌لغزش ناشی از زلزله ۱۷ آبان ۱۳۹۸ با بزرگی ۵.۹ ریشتر در حوالی شهر ترکمانچای، منجر به ریزش کوه و انسداد بخشی از جاده میانه-بستان‌آباد شد. این حادثه نه‌تنها خسارت‌های مستقیم به همراه داشت، بلکه اهمیت توجه به مدیریت و پیشگیری از چنین مخاطراتی را نیز برجسته ساخت. در واقع، چنین رخدادهایی بیانگر ضرورت مطالعات جامع زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و مهندسی در جهت کاهش خطرپذیری و مدیریت بهتر زمین‌لغزش‌ها هستند.

با توجه به آنچه گفته شد، زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین تهدیدها برای جاده میانه - بستان‌آباد به شمار می‌رود. موقعیت جغرافیایی خاص منطقه، شرایط زمین‌شناسی پیچیده، وقوع زمین‌لرزه‌های متعدد و همچنین فشار ناشی از توسعه انسانی و تغییرات کاربری اراضی، همگی عواملی هستند که خطر زمین‌لغزش را در این محور ارتباطی افزایش می‌دهند. با توجه به نقش حیاتی این جاده در حمل‌ونقل و اقتصاد منطقه، هرگونه انسداد یا خسارت ناشی از زمین‌لغزش می‌تواند منجر به اختلال در زندگی روزمره مردم و فعالیت‌های اقتصادی شود. با توجه به موارد ذکر

1. Yang
2. Su
3. Tang
4. Saro

شده، ضرورت دارد مطالعات دقیق و علمی در خصوص شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش در این مسیر انجام شود. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین سنجش‌ازدور، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌سازی‌های پیشرفته می‌تواند نقش مؤثری در پیش‌بینی و مدیریت این پدیده داشته باشد. چنین رویکردی نه تنها به کاهش خسارات احتمالی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند الگویی کاربردی برای سایر مناطق کوهستانی و پرخطر کشور نیز فراهم آورد. بنابراین، این پژوهش با هدف شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش در مسیر میانه - بستان‌آباد و ارائه راهکارهای مدیریتی برای کاهش خطرپذیری انجام شده است.

مرور ادبیات و سوابق پژوهش

زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از رایج‌ترین انواع حرکات دامنه‌ای، حاصل جابه‌جایی توده‌ای از خاک، سنگ یا آوار در امتداد یک سطح لغزش است که در نتیجه برهم خوردن تعادل بین نیروهای مقاوم و نیروهای محرک رخ می‌دهد. این پدیده از مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیک به شمار می‌رود و پیامدهای گسترده‌ای بر محیط طبیعی، زیرساخت‌های انسانی و فعالیت‌های اقتصادی دارد. عوامل مؤثر در بروز زمین‌لغزش را می‌توان به دو دسته کلی عوامل طبیعی (نظیر شیب دامنه، جنس سنگ و خاک، بارندگی‌های شدید و زلزله‌ها) و عوامل انسانی (مانند تغییر کاربری اراضی، قطع درختان و فعالیت‌های عمرانی) تقسیم کرد (گوزتی^۱ و همکاران، ۱۹۹۹). از دیدگاه زمین‌شناسی، وجود لایه‌های سست و ناپایدار، ساختارهای گسلی و شکستگی‌ها، از اصلی‌ترین بسترهای مستعد وقوع لغزش هستند. از منظر اقلیمی نیز، بارش‌های شدید و ناگهانی و ذوب برف، نقش مهمی در افزایش فشار آب منفذی و کاهش پایداری دامنه‌ها دارند. در همین حال، فعالیت‌های انسانی بدون در نظر گرفتن توان محیطی، مانند راه‌سازی و توسعه شهرها در دامنه‌های پرشیب، اغلب موجب تشدید این پدیده می‌شوند (کوردن و وارنس^۲، ۱۹۹۶). زمین‌لغزش‌ها با اشکال گوناگون همچون لغزش‌های چرخشی و انتقالی، ریزش‌ها، خزش‌ها و جریان‌های گل و آوار نمایان می‌شوند و هر یک پیامدهای خاص خود را به همراه دارند. انسداد جاده‌ها، تخریب ساختمان‌ها، نابودی اراضی کشاورزی و حتی جابه‌جایی سکونتگاه‌های انسانی از جمله خسارات مستقیم و غیرمستقیم این پدیده به شمار می‌روند. بنابراین، شناسایی عوامل مؤثر و بهره‌گیری از ابزارهای نوین تحلیل و مدل‌سازی، ضرورتی اساسی در مدیریت پایدار مخاطرات زمین‌لغزش است (هایلند و بوبوروسکی^۳، ۲۰۰۸).

با توجه به اهمیت موضوع، در ارتباط با زمین‌لغزش تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. از جمله تحقیقات صورت گرفته در ایران می‌توان به جمینی و همکاران (۱۴۰۲) اشاره کرد که با استفاده از تصاویر راداری و روش‌های وزن‌دهی و پهنه‌بندی، به شناسایی سکونتگاه‌های روستایی در معرض خطر وقوع زمین‌لغزش شهرستان پاره‌پاره پرداختند. اسفندیاری درآبادی و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در مسیر جاده خلخال به شاهرود پرداختند. پیره و گنجائیان (۱۴۰۳) با استفاده از روش‌های وزن‌دهی و پهنه‌بندی، مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در شهرستان سنندج را شناسایی کردند. ساداتی و همکاران (۱۴۰۴) با استفاده از روش‌های ارزیابی مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان، مناطق در معرض زمین‌لغزش در حوضه تجن استان مازندران را شناسایی کردند. محمدی (۱۴۰۴) با استفاده از مدل‌های هم پوشانی فازی و تجمع وزنی، به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در حوضه سد چراغ ویس شهرستان سقز پرداختند.

در سطح جهان نیز تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به بویی^۴ و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد که در مطالعه‌ای در استان هوا بین ویتنام، با استفاده از مدل‌های درخت تصمیم، ماشین بردار پشتیبان و بیز ساده، نقشه حساسیت زمین‌لغزش را تهیه کردند و نشان دادند که روش‌های یادگیری ماشین دقت بالایی در شناسایی مناطق پرخطر دارند. احمدی و همکاران (۲۰۱۹) در حوزه آبخیز کرج، با مقایسه مدل‌های نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک و درخت تصمیم، دریافتند که ترکیب این مدل‌ها می‌تواند پیش‌بینی دقیق‌تری از زمین‌لغزش ارائه دهد. پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۹) در شمال ایران، ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش را با به‌کارگیری مدل‌های مختلف یادگیری ماشین انجام دادند و مدل‌های پیشرفته‌تر را برای مدیریت بهتر مخاطرات توصیه کردند. خسروی و همکاران (۲۰۲۰) با معرفی روش ترکیبی یادگیری عمیق و GIS در نقشه‌برداری حساسیت زمین‌لغزش، توانستند دقت پیش‌بینی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند. تراوات^۵ و همکاران (۲۰۲۰) در یک مرور سیستماتیک، کاربرد تکنیک‌های یادگیری ماشین در نقشه‌برداری حساسیت زمین‌لغزش را بررسی کردند و بر ضرورت استفاده از داده‌های چندمنبع برای بهبود نتایج تأکید کردند. پورتقی و همکاران (۲۰۲۱) مدل یادگیری عمیق را با استفاده از داده‌های چندمنبع در ایران توسعه دادند و نشان دادند که این رویکرد می‌تواند حساسیت زمین‌لغزش را با دقت بالا پیش‌بینی کند. ارنر و اوزسیلان^۶ (۲۰۲۱) در

1. Guzzetti
2. Cruden & Varnes
3. Highland & Bobrowsky
4. Bui
5. Taravat
6. Erner & Özceylan

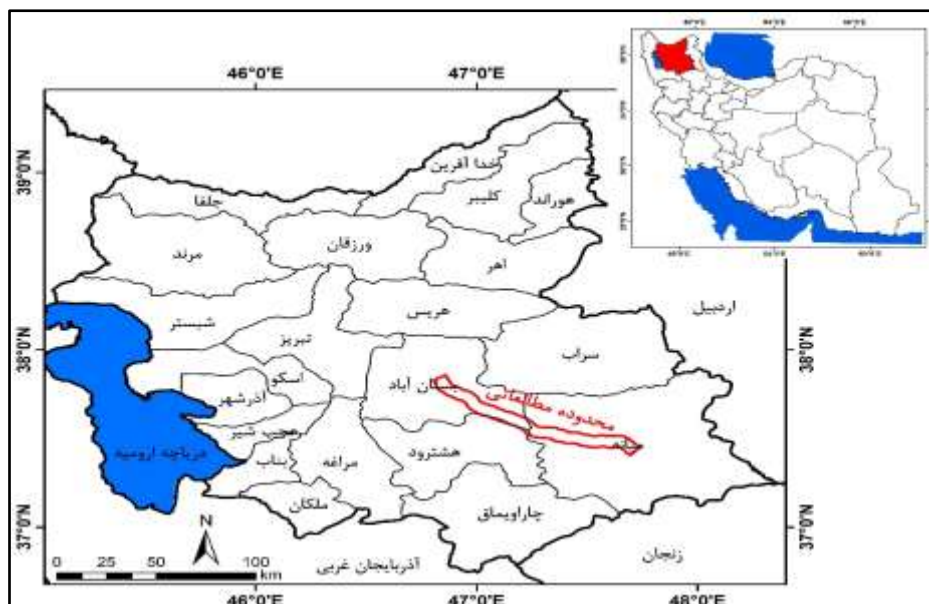
مطالعه‌ای از ترکیه، مدل‌های مجموعه‌ای یادگیری ماشین را برای نقشه‌برداری حساسیت زمین‌لغزش مقایسه کردند و بهترین الگوریتم‌ها را برای مناطق با ویژگی‌های پیچیده معرفی کردند. گنجائیان و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل‌های WIC و OWA، به شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در ارتفاعات کوه خان (مسیر ارتباطی شهرهای سقز و بانه) پرداختند. سان^۱ و همکاران (۲۰۲۲) در مرور جامع خود، کاربرد یادگیری عمیق در نقشه‌برداری زمین‌لغزش را بررسی کردند و تأکید کردند که این روش‌ها قابلیت‌های بسیار بالایی برای تحلیل داده‌های پیچیده دارند. چن^۲ و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنی و داده‌های GIS، نقشه حساسیت زمین‌لغزش در یک منطقه کوهستانی چین را تهیه کردند و نتایج بهبود یافته‌ای نسبت به روش‌های سنتی گزارش کردند. ژانگ^۳ و همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه جدید، ترکیب داده‌های سنجش از دور و یادگیری ماشین را برای ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در مناطق کوهستانی بررسی کردند و نشان دادند که این ترکیب ابزار قدرتمندی برای مدیریت ریسک است.

آنالیز تحقیقات پیشین نشان داده است که در این مطالعات، شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش بر اساس روش‌ها و مدل‌های متنوع انجام شده است. با این حال، اکثر تحقیقات پیشین تمرکز صرف بر تعیین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش داشته و ارزیابی دقیق آسیب‌پذیری سکونتگاه‌ها در منطقه مطالعه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، بر خلاف مطالعات پیشین، علاوه بر شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش با استفاده از دو روش WLC و OWA، به ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری روستاهای منطقه نیز پرداخته شده است. این رویکرد دوگانه، امکان تحلیل جامع‌تر و ارائه راهکارهای مدیریتی همدمندتر برای کاهش خسارات احتمالی زمین‌لغزش را فراهم می‌آورد و نوآوری اصلی این پژوهش را در مقایسه با مطالعات گذشته برجسته می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه

در این پژوهش، مسیر ارتباطی شهر میانه تا شهر بستان‌آباد به طول ۱۰۵ کیلومتر، به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شده است. این منطقه از نظر تقسیمات سیاسی، در استان آذربایجان شرقی و محدوده شهرستان‌های میانه و بستان‌آباد قرار دارد. این منطقه از نظر تقسیمات مورفوتکتونیک جزئی واحد شمال غرب محسوب می‌شود و به دلیل نزدیکی به گسل‌های اصلی، دارای پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی است (نگهبان و همکاران، ۱۳۹۹). از نظر ژئومورفولوژی نیز بخش زیادی از وسعت منطقه را واحد کوهستان دربر گرفته است و همین مسئله سبب شده است تا بخش زیادی از مسیر ارتباطی میانه تا بستان‌آباد از اطراف به دامنه‌های پرتیب منتهی شود.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

1. Sun
2. Chen
3. Zhang

روش تحقیق

در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌های MODIS، مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر SRTM و لایه رقومی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. مهم‌ترین ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق، سامانه گوگل ارث انجین، ArcGIS و TerrSet بوده است. همچنین در این تحقیق از مدل‌های WLC، OWA و AHP استفاده شده است. با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، این تحقیق در چند مرحله انجام شده است که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:

مرحله اول (شناسایی و استانداردسازی پارامترها): به‌منظور شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، از پارامترهای مختلف طبیعی و انسانی استفاده شده است (جدول ۱). پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق، بر مبنای وضعیت منطقه، نظرات کارشناسان و مطالعات کتابخانه‌ای بوده است. پس از شناسایی پارامترهای مورد نظر و تهیه لایه‌های اطلاعاتی آن‌ها، به‌منظور قابل ارزیابی کردن آن‌ها، به هر لایه اطلاعاتی، ارزش درون لایه‌ای بین صفر تا ۱ داده شده است؛ لایه‌های اطلاعاتی بر مبنای ارزش درون لایه‌ای، استانداردسازی شده‌اند. یعنی به مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، ارزش نزدیک ۱ و به مناطقی که مستعد نیستند، ارزش نزدیک صفر داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در تحقیق و نحوه تهیه لایه‌های اطلاعاتی آن‌ها

ردیف	پارامتر	نحوه تهیه لایه اطلاعاتی
۱	ارتفاع	با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر STRM
۲	شیب	با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر STRM
۳	جهت شیب	با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر STRM
۴	فاصله از رودخانه	با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر STRM
۵	لیتولوژی	با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰
۶	فاصله از گسل	با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰
۷	فاصله از جاده	با استفاده از تصاویر گوگل ارث
۸	تراکم پوشش گیاهی	با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS و سامانه گوگل ارث انجین

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

مرحله دوم (وزن‌دهی به پارامترها): پس از استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی، با استفاده مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و نرم‌افزار Expert Choice، به لایه‌های اطلاعاتی وزن داده شده است و سپس وزن بدست آمده بر روی لایه‌ها اعمال شده است. لازم به ذکر است که به‌منظور وزن‌دهی به پارامترها، از نظرات ۵ کارشناس ژئومورفولوژی استفاده شده است.

مرحله سوم (ترکیب لایه‌های اطلاعاتی): پس از وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی و اعمال وزن بدست آمده بر روی هر لایه، لایه‌های اطلاعاتی وارد نرم‌افزار TerrSet شده است و در نهایت با ترکیب این لایه‌ها، نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی تهیه شده است. با توجه به اینکه روش میانگین وزن‌دار ترکیبی (OWA) و روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC) به‌عنوان مهم‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شناخته می‌شوند (تابش و همکاران، ۱۳۹۹)، در این پژوهش برای تحلیل و مقایسه نتایج از هر دو روش استفاده شده است. در روش WLC، وزن‌های به‌دست‌آمده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) مستقیماً در ترکیب لایه‌ها به کار می‌شود و خروجی به‌صورت یک نقشه پیوسته از پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تهیه می‌شود. در روش OWA، علاوه بر وزن‌های معیارها، پارامترهای ریسک‌پذیری و جبرگرایی نیز در فرایند ترکیب لایه‌ها لحاظ می‌شود که امکان سناریوسازی و ارزیابی حساسیت نتایج را فراهم می‌کند (گنجائیان، ۱۳۹۹).

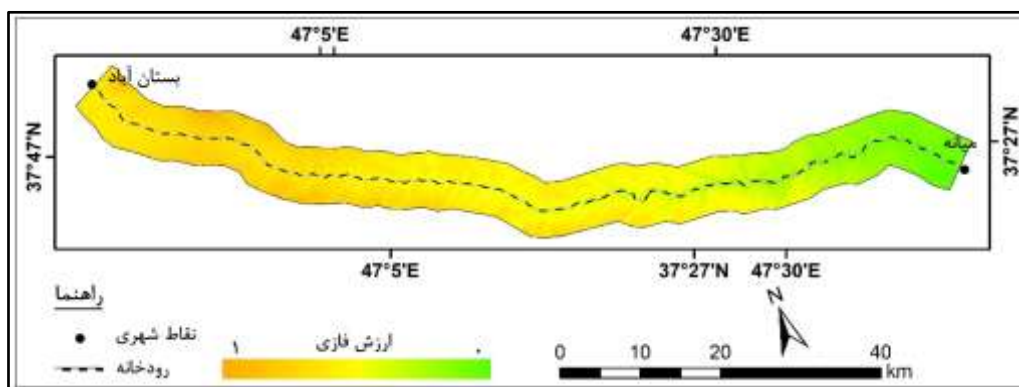
مرحله چهارم (ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری نقاط روستایی در برابر مخاطره زمین‌لغزش): پس از شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر مخاطرات زمین‌لغزش، به ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری روستاهای محدوده مطالعاتی در برابر مخاطرات زمین‌لغزش پرداخته شده است.

یافته‌ها و بحث

تشریح پارامترهای مورد استفاده

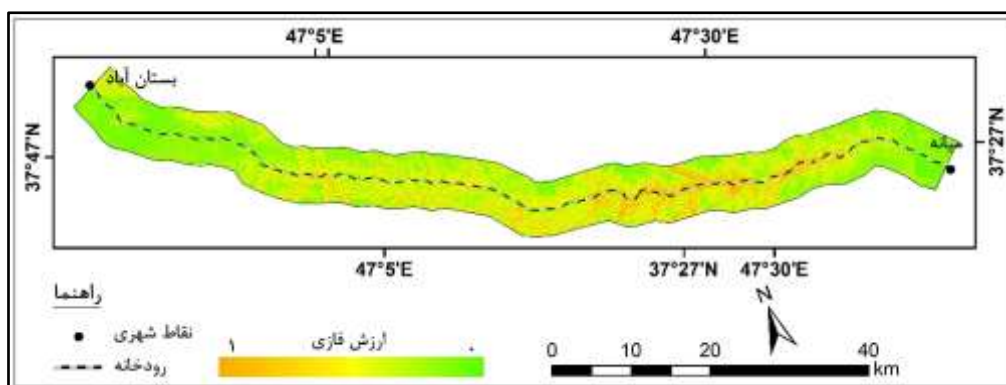
در این پژوهش، به‌منظور شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در مسیر ارتباطی شهرهای میانه تا بستان‌آباد، از مجموعه‌ای از پارامترهای مؤثر محیطی و ژئومورفولوژیکی استفاده شده است. این پارامترها هر یک به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر پایداری دامنه‌ها و احتمال وقوع لغزش اثرگذار هستند.

پارامترهای ژئومورفولوژیکی: این پارامترها شامل ارتفاع، شیب و جهت شیب هستند. ارتفاع یکی از شاخص‌های مهم در تحلیل خطر زمین‌لغزش به شمار می‌آید. تغییرات ارتفاع می‌تواند بر شرایط آب‌وهوایی، میزان رطوبت خاک، شدت و مدت زمان یخبندان، و تراکم پوشش گیاهی اثرگذار باشد. در اغلب مطالعات، مناطق مرتفع به دلیل داشتن شیب تندتر، بارش بیشتر و فرآیندهای هوازدگی شدیدتر، از پتانسیل بالاتری برای وقوع زمین‌لغزش برخوردارند. بررسی‌های انجام‌شده در محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد که با حرکت از شهر میانه به سمت بستان‌آباد، روند ارتفاع به‌طور محسوسی افزایشی است و به همین دلیل، این مناطق به لحاظ خطرپذیری امتیاز نزدیک به ۱ دریافت کرده‌اند (شکل ۲). شیب زمین یکی از عوامل کلیدی و غالب در بروز زمین‌لغزش است. هرچه شیب دامنه بیش‌تر باشد، نیروی برشی وارد بر ذرات خاک و سنگ افزایش یافته و احتمال جابه‌جایی توده‌ها بیشتر می‌شود. تحلیل نقشه شیب محدوده نشان می‌دهد که بخش وسیعی از منطقه، به‌ویژه نواحی میانی، دارای درصد شیب بالا هستند که آن‌ها را در طبقه مناطق مستعد زمین‌لغزش قرار می‌دهد (شکل ۳). این مسئله به‌خصوص در دامنه‌هایی که ترکیب لیتولوژیکی ناپایدار دارند، اهمیت بیش‌تری می‌یابد. جهت شیب یا همان سمت قرارگیری دامنه نسبت به نور خورشید و جریان باد، پارامتری است که بر شرایط رطوبتی و یخبندان سطحی تأثیرگذار است. معمولاً دامنه‌های شمالی به دلیل دریافت کم‌تر تابش خورشید، دمای پایین‌تر و رطوبت بالاتر، نسبت به سایر جهات مستعدتر برای لغزش هستند. این شرایط سبب افزایش ماندگاری برف و یخ، و در نتیجه نفوذ آب به لایه‌های زیرین خاک پس از ذوب، و نهایتاً کاهش مقاومت برشی مصالح دامنه می‌شود. در محدوده مطالعاتی نیز نتایج نشان می‌دهد که دامنه‌های با جهت شمالی از پتانسیل بالاتری برای وقوع زمین‌لغزش برخوردارند (شکل ۴).



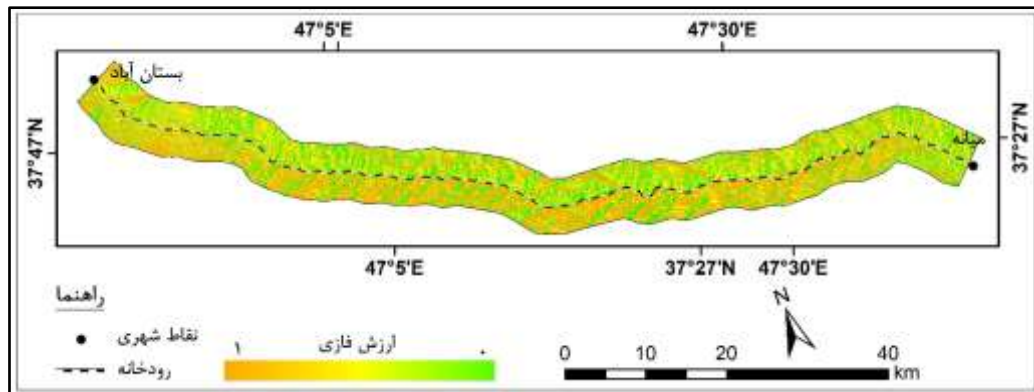
شکل ۲. نقشه استانداردسازی لایه ارتفاعی محدوده مطالعاتی

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۳. نقشه استانداردسازی لایه شیب محدوده مطالعاتی

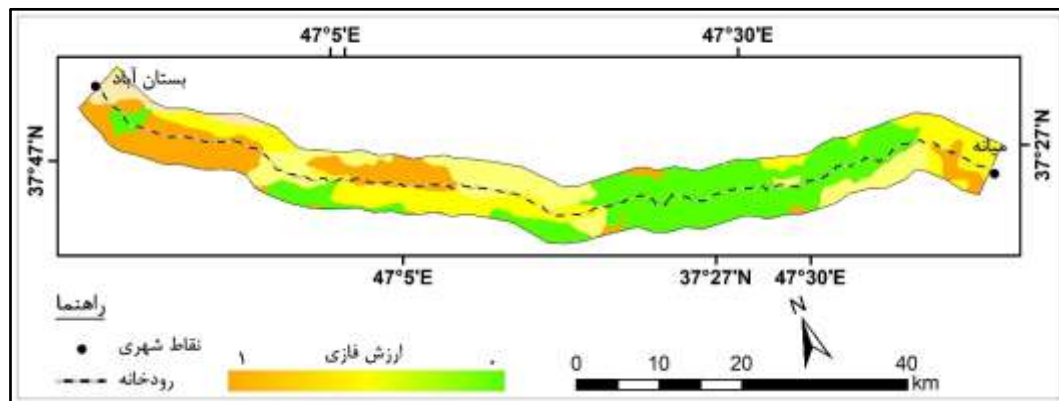
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۴. نقشه استانداردسازی لایه جهت شیب محدوده مطالعاتی

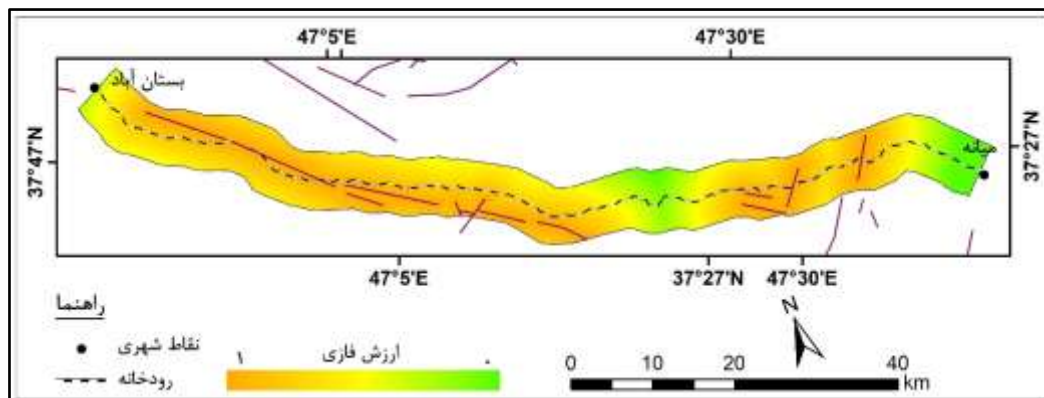
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

پارامترهای زمین‌شناسی: از دیگر عوامل کلیدی که در مطالعات زمین‌لغزش مورد بررسی قرار می‌گیرد، ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه است. در این پژوهش، دو پارامتر لیتولوژی و فاصله از خطوط گسل به‌عنوان مهم‌ترین شاخص‌های زمین‌شناسی مؤثر بر پایداری دامنه‌ها انتخاب شده‌اند. نوع و ترکیب سنگ‌ها و رسوبات، نقش تعیین‌کننده‌ای در مقاومت برشی، نفوذپذیری و در نتیجه پایداری دامنه‌ها دارد. لیتولوژی‌های سست و کم‌مقاومت، به‌ویژه رسوبات آبرفتی، ماسه‌سنگ‌های سست و مارن‌ها، به دلیل تراکم کم و پیوند ضعیف ذرات، به‌مراتب آسیب‌پذیرتر در برابر حرکات دامنه‌ای از جمله زمین‌لغزش هستند. در این مطالعه، به چنین مناطقی ارزش نزدیک به ۱ اختصاص یافته است. در مقابل، سنگ‌های سخت و مقاوم مانند بازالت‌ها، به دلیل تراکم بالا و مقاومت زیاد در برابر هوازدگی و فرسایش، کم‌ترین پتانسیل لغزش را دارند و در مدل پهنه‌بندی، امتیاز نزدیک به صفر دریافت کرده‌اند (شکل ۵). گسل‌ها با ایجاد شکستگی‌ها، درزها و شکاف‌های متعدد در توده‌های سنگی، ساختار مکانیکی دامنه‌ها را تضعیف می‌کنند و زمینه نفوذ آب و کاهش مقاومت مصالح را فراهم می‌سازند. در محدوده مورد مطالعه، تراکم بالای خطوط گسلی سبب شده است که بخش قابل‌توجهی از منطقه دارای شبکه‌ای متراکم از ناپیوستگی‌ها باشد. این شرایط موجب افزایش پتانسیل وقوع لغزش در مجاورت این ساختارها شده است. بر همین اساس، به مناطق نزدیک به خطوط گسل، ارزش نزدیک به ۱ و به مناطق دورتر از آن‌ها، امتیاز کم‌تری اختصاص داده شده است (شکل ۶).



شکل ۵. نقشه استانداردسازی لایه لیتولوژی محدوده مطالعاتی

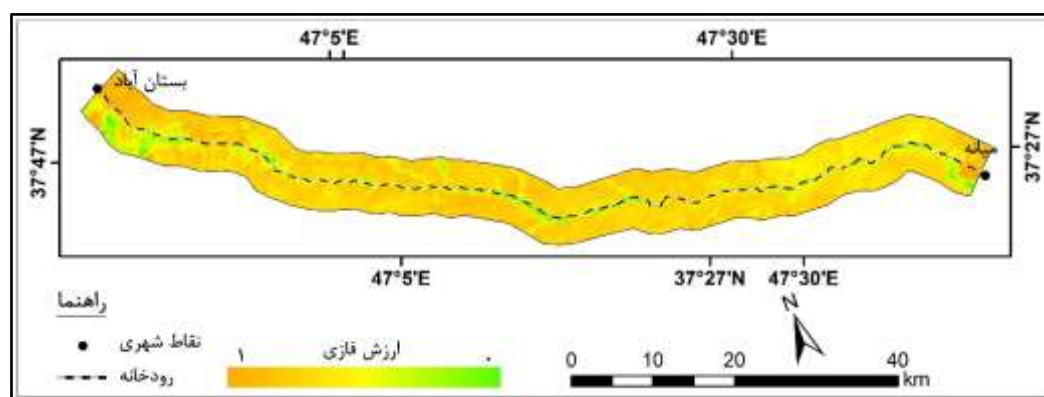
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۶. نقشه استانداردسازی لایه فاصله از خطوط گسل محدوده مطالعاتی

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

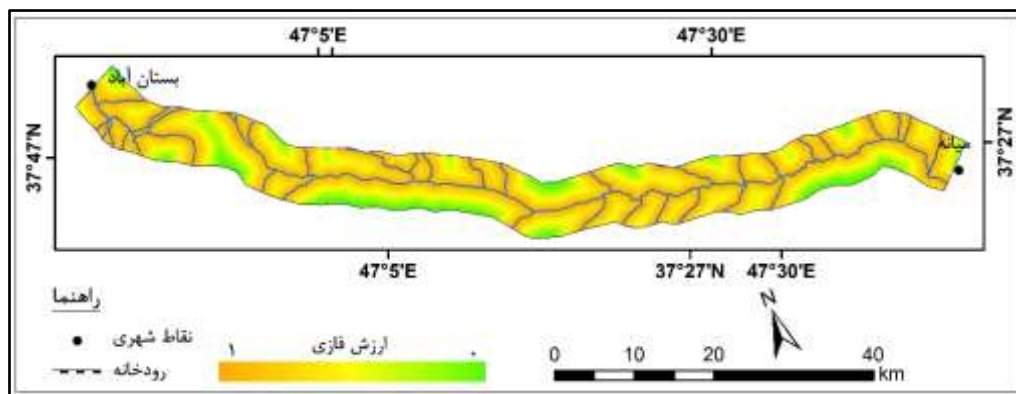
پوشش گیاهی: پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری دامنه‌ها فرسایش و کنترل حرکات دامنه‌ای دارد. به‌طور معمول دامنه‌هایی که دارای تراکم بالای پوشش گیاهی هستند، کم‌تر با حرکات دامنه‌ای مواجه می‌شوند. با توجه به کاربرد و دقت بالای سامانه گوگل ارث انجین و همچنین کاربردی بودن تصاویر ماهواره MODIS جهت استخراج لایه تراکم پوشش گیاهی (صفری نامیوندی و همکاران، ۱۴۰۳؛ نگهبان و همکاران، ۱۴۰۳)، در این پژوهش با استفاده از این روش، نقشه تراکم پوشش گیاهی محدوده مطالعاتی تهیه شده است. پس از تهیه لایه اطلاعاتی مورد نظر، به مناطق دارای تراکم کم پوشش گیاهی، به دلیل پتانسیل بالایی که از نظر وقوع زمین‌لغزش دارند، ارزش نزدیک ۱ داده شده است (شکل ۷).



شکل ۷. نقشه استانداردسازی لایه تراکم پوشش گیاهی محدوده مطالعاتی

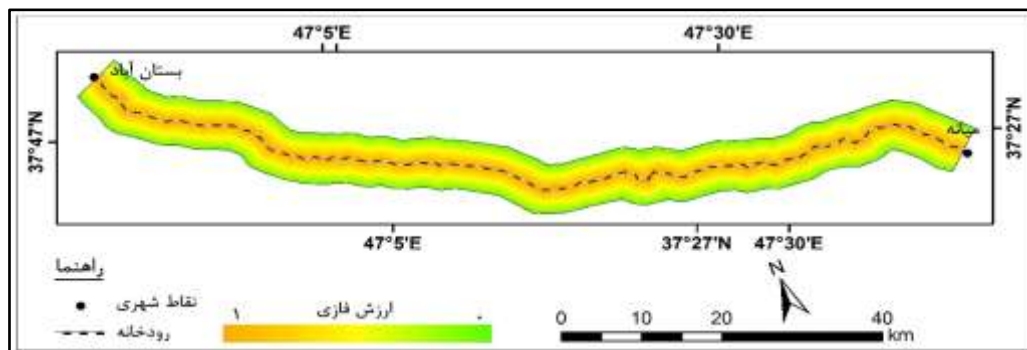
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

فاصله از رودخانه و جاده: رودخانه‌ها و جاده‌ها از جمله عوامل انسانی و طبیعی مهمی هستند که می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم موجب ناپایداری دامنه‌ها شوند. رودخانه‌ها از طریق فرسایش کناره‌ها و به‌ویژه برش پای دامنه، به تدریج پایداری شیب را کاهش داده و شرایط لازم برای آغاز حرکات توده‌ای از جمله زمین‌لغزش را فراهم می‌کنند. شدت این اثر به عواملی همچون دبی جریان، تغییرات فصلی، جنس رسوبات بستر و سرعت جریان بستگی دارد. در محدوده‌های کوهستانی، فرسایش رودخانه‌ای می‌تواند به‌سرعت موجب گسیختگی و ریزش دامنه‌های مجاور شود. جاده‌ها نیز به عنوان یکی از مهم‌ترین مداخلات انسانی در محیط، از طریق عملیات برش و خاک‌برداری پای دامنه‌ها، ایجاد شیب‌های تندتر از حد تعادل و تغییر در شرایط زهکشی، پایداری طبیعی دامنه را بر هم می‌زنند. این تغییرات اغلب منجر به افزایش تنش‌های برشی و کاهش مقاومت برشی مصالح دامنه می‌شود. علاوه بر این، نفوذ آب ناشی از بارش یا نشت آبراهه‌ها در حاشیه جاده، می‌تواند فرآیند لغزش را تسریع کند. بر اساس این ویژگی‌ها، مناطق واقع در مجاورت رودخانه‌ها و جاده‌ها، به‌ویژه در محدوده‌های دارای شیب زیاد و لیتولوژی سست، از پتانسیل بالاتری برای وقوع زمین‌لغزش برخوردارند. در این مطالعه، به این نواحی امتیاز بالاتر (ارزش نزدیک به ۱) داده شده است (شکل ۸ و ۹).



شکل ۸. نقشه استانداردسازی لایه فاصله از رودخانه‌های محدوده مطالعاتی

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

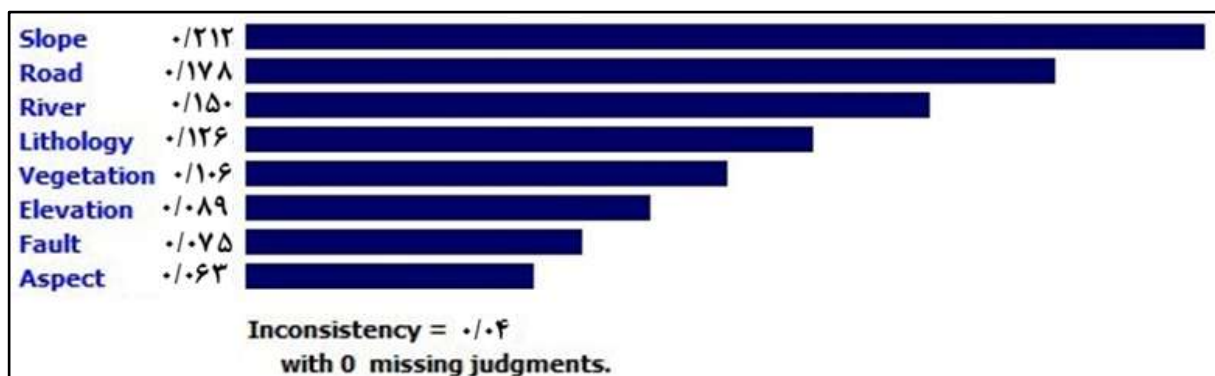


شکل ۹. نقشه استانداردسازی لایه فاصله از جاده اصلی محدوده مطالعاتی

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

وزن‌دهی به پارامترها

با توجه به اینکه اهمیت و تأثیرگذاری لایه‌های اطلاعاتی در بروز زمین‌لغزش یکسان نیست، در این مرحله از پژوهش، فرآیند وزن‌دهی به لایه‌ها با بهره‌گیری از مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) انجام شده است. پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی و انجام محاسبات مربوط به نرخ سازگاری، وزن نهایی هر پارامتر تعیین شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که پارامتر شیب، با وزن ۰/۲۱۲، بالاترین اهمیت را در بین تمام عوامل مؤثر دارد (شکل ۱۰). این نتیجه منطقی است، زیرا شیب زمین مستقیماً بر میزان نیروی برشی و پایداری دامنه‌ها اثر می‌گذارد و معمولاً به‌عنوان مهم‌ترین عامل در آغاز لغزش‌ها شناخته می‌شود. سایر پارامترها همچون فاصله از جاده، فاصله از رودخانه و لیتولوژی نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. وزن‌های به‌دست‌آمده به‌عنوان ضرایب اصلی در فرآیند ترکیب لایه‌ها و تهیه نقشه نهایی پتانسیل زمین‌لغزش به کار رفته‌اند.

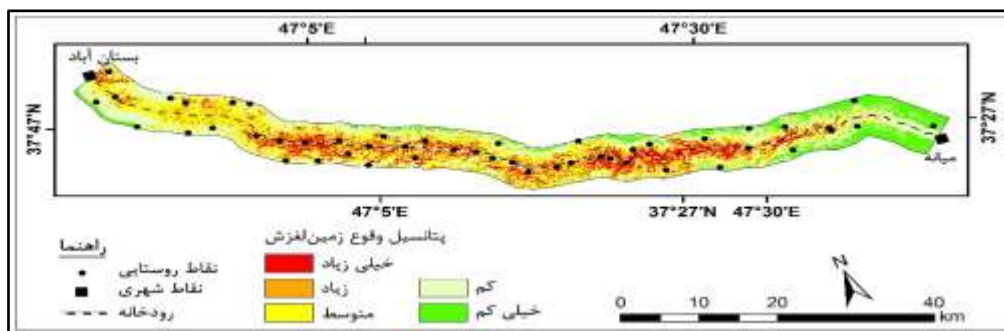


شکل ۱۰. وزن نهایی پارامترهای بر اساس مدل AHP

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

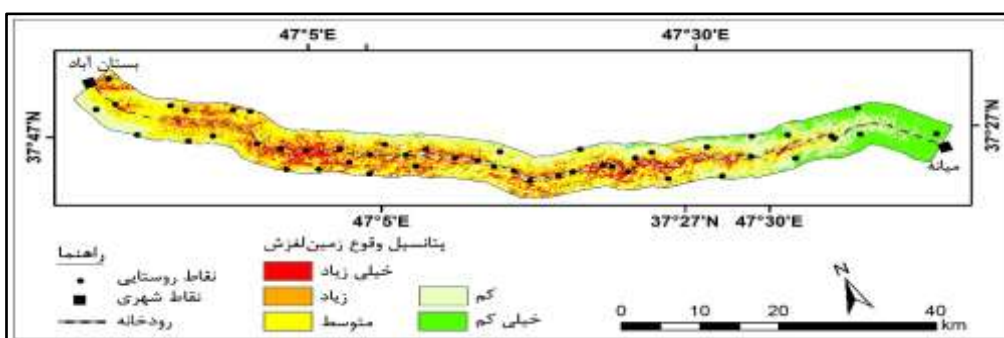
ترکیب لایه‌های اطلاعاتی و تهیه نقشه‌های نهایی

پس از وزن‌دهی و اعمال وزن لایه‌های اطلاعاتی، لایه‌های اطلاعاتی وارد نرم‌افزار TerrSet شده است و سپس با استفاده از عملگرهای WLC و OWA با هم ترکیب شده‌اند و به این صورت نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش با استفاده از این دو روش تهیه شده است (شکل ۱۱ و ۱۲). بر اساس نتایج بدست آمده، مناطق میانی و غربی محدوده مطالعاتی به دلیل ارتفاع و شیب زیاد، نوع لیتولوژی و فاصله کم از خطوط گسلی، پتانسیل بالایی از نظر وقوع مخاطره زمین لغزش دارند.



شکل ۱۱. نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش بر اساس مدل WLC

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۱۲. نقشه نهایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش بر اساس مدل OWA

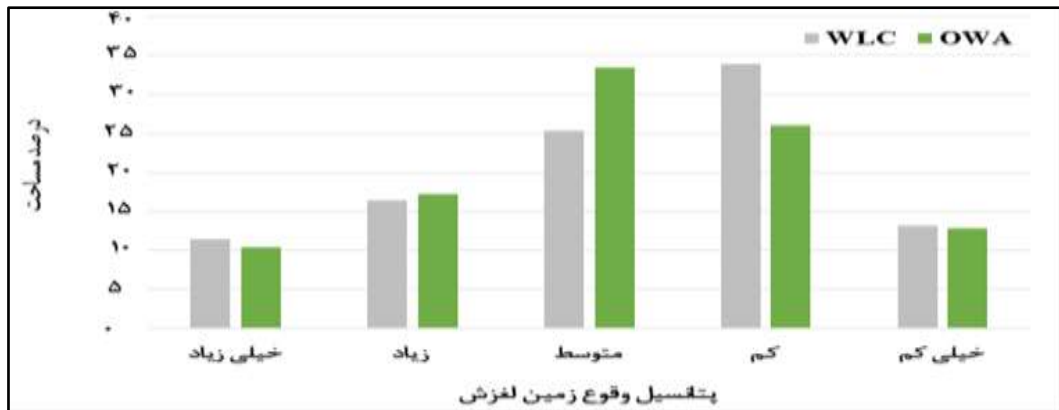
منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

نتایج ارزیابی مساحت و درصد مساحت طبقات پتانسیل وقوع زمین لغزش بیانگر این است که طبقات با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین لغزش در روش‌های WLC و OWA به ترتیب ۱۷۸ و ۱۷۱ کیلومترمربع (به ترتیب معادل ۲۷/۸ و ۲۷/۶ درصد از وسعت منطقه) وسعت دارند که بخش زیادی از این مناطق، منتهی به جاده اصلی میانه-بستان آباد می‌شوند به همین دلیل دارای اهمیت و حساسیت بالایی هستند. همچنین طبقات با پتانسیل کم و خیلی کم وقوع زمین لغزش در روش‌های WLC و OWA به ترتیب با ۲۹۱ و ۲۴۲ کیلومترمربع (به ترتیب معادل ۴۶/۹ و ۳۸/۹ درصد از وسعت منطقه)، عمدتاً منطبق بر مناطق شرقی منطقه یعنی مناطق مجاور شهر میانه هستند که به دلیل ارتفاع و شیب کم، پتانسیل کمی از نظر وقوع زمین لغزش دارند (جدول ۲ و شکل ۱۳).

جدول ۲. مساحت و درصد مساحت طبقات پتانسیل وقوع زمین لغزش

ردیف	طبقات	روش WLC		روش OWA	
		مساحت (km ²)	درصد مساحت	مساحت (km ²)	درصد مساحت
۱	خیلی زیاد	۷۰/۵	۱۱/۴	۶۴/۴	۱۰/۴
۲	زیاد	۱۰۲/۱	۱۶/۴	۱۰۶/۷	۱۷/۲
۳	متوسط	۱۵۶/۸	۲۵/۳	۲۰۸/۳	۳۳/۵
۴	کم	۲۱۰/۲	۳۳/۹	۱۶۱/۹	۲۶/۱
۵	خیلی کم	۸۱/۲	۱۳/۱	۷۹/۸	۱۲/۸

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۱۳. نمودار درصد مساحت طبقات پتانسیل وقوع زمین‌لغزش

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

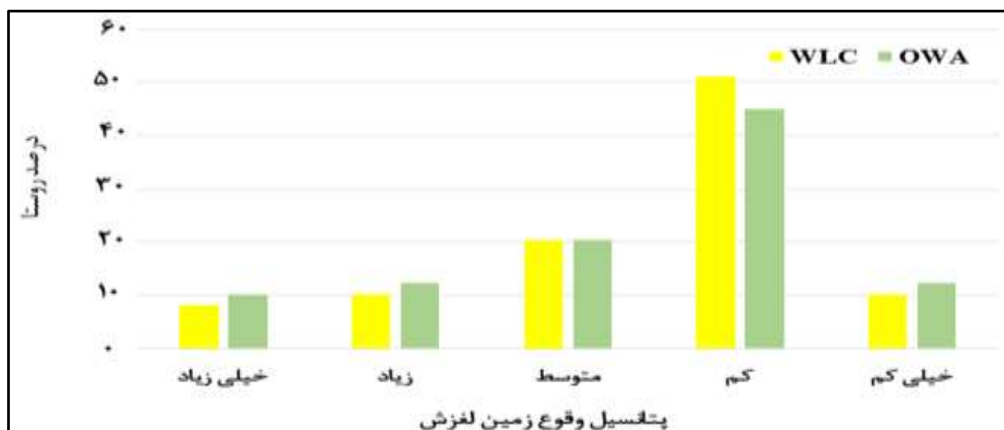
ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری نقاط روستایی محدوده مطالعاتی در برابر مخاطره زمین‌لغزش

پس از تهیه نقشه‌های نهایی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش، در این بخش به بررسی وضعیت پراکنش ۴۹ نقطه روستایی واقع شده در محدوده مطالعاتی، در طبقات پتانسیل وقوع زمین‌لغزش پرداخته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، تعداد نقاط روستایی واقع شده در طبقات پتانسیل زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین‌لغزش در روش‌های WLC و OWA به ترتیب ۹ و ۱۱ (به ترتیب معادل ۱۸/۴ و ۲۲/۴ درصد از کل روستاهای محدوده) مورد بوده است. همچنین تعداد نقاط روستایی واقع شده در طبقات پتانسیل کم و خیلی کم وقوع زمین‌لغزش در روش‌های WLC و OWA به ترتیب ۳۰ و ۲۸ (به ترتیب معادل ۶۱/۲ و ۵۷/۱ درصد از کل روستاهای محدوده) مورد بوده است (جدول ۳ و شکل ۱۴). با توجه به نتایج بدست آمده از هر دو روش، حداقل ۱۰ مورد از روستاهای منطقه در معرض مخاطره زمین‌لغزش قرار دارند که ضروری است اقدامات لازم جهت کنترل و کاهش احتمال وقوع زمین‌لغزش در این روستاها صورت گیرد.

جدول ۳. ارزیابی وضعیت پراکندگی نقاط روستایی در طبقات پتانسیل وقوع زمین‌لغزش

ردیف	طبقات	روش WLC		روش OWA	
		تعداد روستا	درصد روستا	تعداد روستا	درصد روستا
۱	خیلی زیاد	۴	۸/۲	۵	۱۰/۲
۲	زیاد	۵	۱۰/۲	۶	۱۲/۲
۳	متوسط	۱۰	۲۰/۴	۱۰	۲۰/۴
۴	کم	۲۵	۵۱	۲۲	۴۴/۹
۵	خیلی کم	۵	۱۰/۲	۶	۱۲/۲

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۱۴. نمودار درصد پراکنش نقاط روستایی در طبقات پتانسیل وقوع زمین‌لغزش

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه، تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و توپوگرافی قرار دارد. عواملی مانند ارتفاع و شیب دامنه، نوع لیتولوژی و نزدیکی به گسل‌ها، به‌طور قابل توجهی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را افزایش می‌دهند. تحلیل مساحت و درصد مساحت طبقات پتانسیل وقوع زمین‌لغزش نشان داد که در روش WLC حدود ۸/۲۷ درصد و در روش OWA حدود ۶/۲۷ درصد از کل مساحت منطقه در طبقات با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. این مساحت قابل توجه عمدتاً شامل دامنه‌های غربی و میانی محدوده مطالعاتی است که به جاده اصلی میانه-بستان‌آباد منتهی می‌شوند، بنابراین از نظر حساسیت و اهمیت ایمنی راه، توجه ویژه‌ای را می‌طلبد. این یافته‌ها با مطالعات مشابه در مناطق شمالی شهرستان سهند (پیره و گنجائیان، ۱۴۰۳) و حوضه آبریز تجن (ساداتی و همکاران، ۱۴۰۴) همخوانی دارد و نشان می‌دهد که دامنه‌های کوهستانی و شیب‌دار به‌طور معمول بیشترین خطر را در مواجهه با زمین‌لغزش دارند. در مقابل، طبقات با پتانسیل کم و خیلی کم، عمدتاً در بخش شرقی منطقه و اطراف شهر میانه واقع شده‌اند. این مناطق به دلیل شیب و ارتفاع کم، پتانسیل پایینی برای وقوع زمین‌لغزش دارند. بر اساس نتایج عددی، این دسته از مناطق در روش WLC حدود ۹/۴۶ درصد و در روش OWA حدود ۹/۳۸ درصد از مساحت کل منطقه را شامل می‌شوند. این تفاوت مکانی بین مناطق با خطر بالا و پایین، اهمیت ترکیب تحلیل توپوگرافی با داده‌های مکانی و روش‌های مدل‌سازی پیشرفته را در شناسایی مناطق مستعد تأکید می‌کند.

ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری ۴۹ روستای محدوده نیز نتایج مهمی ارائه داد. حداقل ۱۰ روستا در طبقات با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند، به‌طوری که در روش WLC تعداد ۹ روستا و در روش OWA تعداد ۱۱ روستا در معرض خطر بالا هستند. این یافته‌ها اهمیت اقدامات پیشگیرانه و مدیریتی در این مناطق را برجسته می‌کند، زیرا ساکنان روستاها در صورت وقوع زمین‌لغزش با خطر جانی و مالی مواجه خواهند شد. همچنین، بخش عمده‌ای از روستاهای واقع در طبقات با پتانسیل کم و خیلی کم نشان می‌دهد که ارزیابی‌های محلی می‌تواند به‌طور مؤثری مناطق پرخطر را از مناطق کم‌خطر تفکیک کند. مناطق پرخطر شناسایی شده در این تحقیق، به ویژه دامنه‌های منتهی به جاده میانه-بستان‌آباد، اهمیت بالایی برای برنامه‌ریزی توسعه‌ای و مهندسی راه‌ها دارند. انسداد مسیرهای ارتباطی یا آسیب به زیرساخت‌ها می‌تواند پیامدهای اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای به همراه داشته باشد. از این رو، مدیریت زمین‌لغزش در این مناطق باید با استفاده از اقدامات پیشگیرانه و پایش مستمر انجام شود.

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، توصیه‌های کاربردی زیر برای کاهش خطر زمین‌لغزش و افزایش ایمنی ساکنان و زیرساخت‌ها ارائه می‌شود: اولاً، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و توسعه عمرانی در مناطق با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین‌لغزش باید محدودیت‌دار و بر اساس مطالعات ژئوتکنیکی دقیق انجام شود تا از افزایش آسیب‌پذیری جلوگیری شود. ثانیاً، اجرای پروژه‌های پایدارسازی دامنه‌ها، شامل احداث دیواره‌های حائل، تثبیت شیب و کنترل فرسایش خاک، نقش مؤثری در کاهش خطر لغزش دارد. ثالثاً، مدیریت آب‌های سطحی و به‌کارگیری سیستم‌های زهکشی مناسب می‌تواند فشار هیدرولیکی بر دامنه‌ها را کاهش داده و پایداری را افزایش دهد. نصب سامانه‌های پایش و هشدار سریع در نقاط بحرانی، به‌ویژه در نزدیکی روستاها و مسیر جاده میانه-بستان‌آباد، امکان اطلاع‌رسانی به موقع به ساکنان و کاهش خسارات جانی را فراهم می‌کند. آموزش و آگاه‌سازی محلی در خصوص علائم اولیه زمین‌لغزش و اقدامات پیشگیرانه، از جمله آمادگی برای تخلیه اضطراری، نیز بسیار مهم است. نهایتاً، به‌روزرسانی مستمر نقشه‌های پتانسیل زمین‌لغزش با داده‌های جدید و استفاده از فناوری‌های GIS و سنجش از دور، دقت تصمیم‌گیری مدیریتی را افزایش می‌دهد و امکان برنامه‌ریزی بلندمدت برای کاهش خطر را فراهم می‌سازد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به صورت مشترک در انجام همه مراحل پژوهش مشارکت داشته‌اند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان اعلام می‌کنند که از ابزار هوش مصنوعی (AI) برای نگارش این مقاله استفاده نکرده‌اند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تضاد منافی ندارند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌ها بنا به درخواست نویسندگان در دسترس هستند.

سپاسگزاری

نویسندگان مایل هستند از تمامی افراد، سازمان‌ها و مؤسساتی که در تهیه این مقاله مشارکت داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

- اسدی، معصومه؛ اکبری، فاطمه و امامی، کامیار. (۱۳۹۹). ارزیابی مناطق مستعد توسعه فیزیکی شهر سقز با استفاده از مدل تلفیقی AHP-Fuzzy. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۲(۴)، ۲۳۰-۲۳۹. https://www.gahr.ir/article_106209.html
- اسدی، معصومه؛ حیدری، زهرا و امامی، کامیار. (۱۴۰۱). ارزیابی روند توسعه فیزیکی شهر پلدختر به سمت مناطق سیل‌خیز. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۲(۱۱)، ۱۵۹-۱۷۴. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.72169.1101>
- اسفندیاری درآباد، فریبا؛ رحیمی، مسعود و وهاب‌زاده، مهرداد. (۱۴۰۳). پهنه‌بندی مخاطره ریزش سنگ در جاده خلخال به شاهرود با استفاده از الگوریتم پرسپترون چندلایه. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۴(۴)، ۱-۲۶. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.87847.1482>
- پیره، مهین و گنجائیان، حمید. (۱۴۰۳). تحلیل زمین‌لغزش‌های رخ داده در ارتباط با عوامل محیطی (مطالعه موردی: شهرستان سنندج). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۷(۳)، ۲۴۲-۲۷۸. <https://doi.org/10.22034/gahr.2025.458065.2135>
- تابش، سعید؛ نوری‌خان‌پوردی، میثم؛ دوستی، مرتضی و گنجائیان، حمید. (۱۳۹۹). ارائه مدل پیشنهادی برای مکان‌یابی اماکن ورزشی با استفاده از مدل تلفیقی WLC و AHP (مطالعه موردی: شهر تبریز). *مدیریت و توسعه ورزش*، ۹(۲۱)، ۲-۲۲. <https://doi.org/10.22124/jsmd.2020.4096>
- جمینی، داود؛ شهبابی، هیمین؛ نظری، حمید و آتش‌بهار، رامین. (۱۴۰۲). شناسایی سکونتگاه‌های روستایی در معرض خطر وقوع زمین‌لغزش در زیست‌بوم‌های عشایری (مطالعه موردی: شهرستان پاوه). *مطالعات برنامه‌ریزی قلمرو کوچ‌نشینان*، ۳(۱)، ۱۰۷-۱۲۲. <https://doi.org/10.22034/jsnap.2023.410697.1066>
- ساداتی، سیدحمید؛ موسوی، سیدرمضان؛ وهاب‌زاده کبریا، قربان و روشان، سیدحسین. (۱۴۰۴). ارزیابی مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه تجن، استان مازندران). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۴(۴۵)، ۱۳۳-۱۵۴. <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.50031.2071>
- سالاری، ممند؛ نیری، هادی؛ گنجائیان، حمید و امانی، خبات. (۱۳۹۹). ارزیابی و پیش‌بینی روند توسعه فیزیکی نواحی سکونتگاهی با تأکید بر رویکرد ژئومورفولوژیک و مدیریت محیط (مطالعه موردی: شهر پاوه). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۹(۱)، ۸۶-۱۰۱. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.109536>
- صفری نامیوندی، مهدی؛ گنجائیان، حمید؛ نصرتی، مژگان و محمدیان، کلثوم. (۱۴۰۳). شناسایی مناطق سیل‌زده و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن (مطالعه موردی: جنوب شرق استان سیستان و بلوچستان). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۳(۲)، ۱۸۱-۱۹۴. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.449586.1494>
- عابدینی، موسی؛ قبادی علمداری، سودا و قاسمیان، بهار. (۱۴۰۳). بررسی و پهنه‌بندی نقشه خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز ليقوان‌چای با استفاده از مدل ANP. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۶(۴)، ۵۰۳-۵۲۵. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.399799.1886>
- کنعانی، سیمرا. (۱۴۰۲). شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز سد ایلام با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۵(۴)، ۵۱۶-۵۲۴. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.377424.1785>
- گنجائیان، حمید. (۱۴۰۳). ارزیابی استعداد لرزه‌خیزی کلان‌شهرهای ایران. *فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۳۳(۱۳۲)، ۱۷۳-۱۸۸. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2019284.3047>
- گنجائیان، حمید. (۱۴۰۳). تحلیل مکانی و زمانی زمین‌لرزه‌های ایران در طی سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۲۳. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۳(۴)، ۲۲۲-۲۴۳. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.87246.1470>
- گنجائیان، حمید؛ نصرتی، مژگان؛ ابراهیمی، عطیرین و قیصریان، سیدسعدی. (۱۴۰۴). ارزیابی وضعیت آسیب‌پذیری روستاهای مناطق کوهستانی در برابر مخاطرات طبیعی (مطالعه موردی: روستاهای منطقه اورامان). *پژوهش‌های محیطی در قلمروهای کوهستانی*، ۱(۲)، ۵۷-۷۰. <https://doi.org/10.22034/ermr.2024.63510>

- محمدخان، شیرین؛ گنجائیان، حمید؛ شهری، سمیه و عباس‌زاده، امیرعلی. (۱۳۹۸). پیش‌بینی روند توسعه شهری به سمت مناطق مخاطره‌آمیز با استفاده از تصاویر چندزمانه؛ مطالعه موردی: شهر مریوان. *فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۲۸(۱۱۰)، ۱۰۷-۱۱۷. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.36615>
- محمدی، ایوب. (۱۴۰۴). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در مجاورت سدهای قلمروهای کوهستانی با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: سد چراغ‌ویس؛ شهرستان سقز). *پژوهش‌های محیطی در قلمروهای کوهستانی*، ۱(۱)، ۱۵-۲۴. <https://doi.org/10.22034/ermr.2025.63295>
- مددی، عقیل و تقی‌زاده، داور. (۱۴۰۳). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در گردنه صائین (محور ارتباطی شهر اردبیل-سراب). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۷(۳)، ۸۲۲-۸۴۲. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.422684.1975>
- نگهبان، سعید؛ پیسوزی، تینا؛ گنجائیان، حمید و نوروزی، میلاد. (۱۴۰۰). شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش و جابه‌جایی عمودی با استفاده از تصاویر راداری (مطالعه موردی: محدوده شهری و حاشیه شهری لواسان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۰(۳۹)، ۱-۱۸. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.71728.1094>
- نگهبان، سعید؛ گنجائیان، حمید؛ ابراهیمی، عطیرین و امامی، کامیار. (۱۳۹۸). پایش و پیش‌بینی روند تغییرات نواحی سکونتگاهی با استفاده از تصاویر چندزمانه (مطالعه موردی: شهر سنقر). *فیزیک زمین و فضا*، ۴۵(۲)، ۳۴۳-۳۵۴. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.275076.1007084>
- نگهبان، سعید؛ گنجائیان، حمید؛ ابراهیمی، عطیرین و قیصریان، سیدسعدی. (۱۴۰۳). تحلیل نقش عوامل محیطی در وقوع سیلاب‌ها با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین (مطالعه موردی: غرب استان گلستان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۵(۴)، ۱-۱۸. <https://doi.org/10.22108/gep.2024.142342.1659>
- نگهبان، سعید؛ گنجائیان، حمید؛ سعیدی، شهلا و قاسمی، افشان. (۱۳۹۹). مطالعه جابه‌جایی قائم حاصل از زمین‌لرزه ۹/۸/۱۷ ترکمانچای با استفاده از روش InSAR. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۶(۳)، ۴۴۵-۴۵۶. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2020.295046.1007182>
- نگهبان، سعید؛ گنجائیان، حمید؛ فریدونی‌کردستانی، مژده و چشمه‌سفیدی، زیبا. (۱۳۹۸). ارزیابی توسعه فیزیکی شهرها و گسترش به سمت مناطق ممنوعه ژئومورفولوژیکی با استفاده از LCM (مطالعه موردی: شهر سنندج). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۸(۲۰)، ۳۹-۵۲. <https://doi.org/10.22111/jneh.2018.21943.1317>
- نورالدین موسی، فاطمه؛ محمودی، رضا و امامی، کامیار. (۱۴۰۲). ارزیابی روند توسعه فیزیکی نواحی سکونتگاهی به سمت مناطق سیل‌خیز (مطالعه موردی: شهر سنندج). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۵(۴)، ۶۵۳-۶۶۴. https://www.gahr.ir/article_171651.html
- Ahmadi, M., Arabameri, A., & Pradhan, B. (2019). Landslide susceptibility mapping at Karaj Watershed, Iran: A comparison of frequency ratio, logistic regression, and decision tree models. *Environmental Earth Sciences*, 78(8), 235. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8144-3>
- Bui, D. T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. B. (2018). Landslide susceptibility assessment using decision tree, support vector machines, and Naïve Bayes models in the Hoa Binh province, Vietnam. *Environmental Earth Sciences*, 77(15), 569. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7584-7>
- Chen, X., Zhang, Y., & Chen, W. (2023). Landslide susceptibility mapping using convolutional neural networks and GIS data: A case study in China. *Environmental Earth Sciences*, 82(2), 75. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10570-2>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Research Council, 247, 36-57. <https://www.researchgate.net/publication/269710331>
- Erener, A., & Özceylan, E. (2021). Comparison of ensemble models for landslide susceptibility mapping: A case study from Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 80(14), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09748-2>
- Ganjiaian, H., Rezaei Arefi, M., Peysoozi, T., & Emami, K. (2021). 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/sustaineearth.1.2.43>
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The landslide handbook—A guide to understanding landslides. US Geological Survey. <https://www.researchgate.net/publication/276206970>
- Khosravi, K., Blaschke, T., & Omrani, H. (2020). A novel hybrid method for landslide susceptibility mapping using deep learning and geographic information systems. *Environmental Earth Sciences*, 79(8), 198. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08953-6>
- Pourghasemi, H. R., Rahmati, O., & Reichenbach, P. (2019). A comparative assessment of landslide susceptibility mapping using machine learning models in northern Iran. *Environmental Earth Sciences*, 78(20), 597. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8657-0>

- Pourtaghi, Z. S., Blaschke, T., & Omrani, H. (2021). A deep learning model for landslide susceptibility mapping using multi-source data in Iran. *Environmental Earth Sciences*, 80(6), 181. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09568-4>
- Saro, L., Woo, J. S., Kwan-Young, O., & Moun-Jin, L. 2016. The spatial prediction of landslide susceptibility applying artificial neural network and logistic regression models: A case study of Inje, Korea. *Open Geosciences*, 8(1), 117-132. <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0010>
- Su, Q., Weiheng, T., Shiguang, M., Xiaoyuan, Zh., Kaixin, L., Xiaoye, S., Jianli, G., & Yonggang, Y. (2021). Landslide Susceptibility Zoning Using C5. 0 Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machine and Comparison of Their Performance in a Coal Mine Area. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.781472>
- Sun, J., Wu, S., Zhang, Y., & Zhang, Q. (2022). A review of deep learning in landslide susceptibility mapping. *Environmental Earth Sciences*, 81(8), 240. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10442-1>
- Tang, H., Yong, R., & Eldin, M.E. (2017). Stability analysis of stratified rock slopes with spatially variable strength parameters: the case of Qianjiangping landslide. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 76(3), 839-853. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0876-4>
- Taravat, A., Pourghasemi, H. R., & Ghanbarian, G. (2020). Landslide susceptibility mapping using machine learning techniques: A review. *Environmental Earth Sciences*, 79(20), 502. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09133-4>
- Yang, Z., Qiao, J., & Zhang, X. (2010). Regional Landslide Zonation Based on Entropy Method in ThreeGorges Area, China. *Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, (FSKD 2010). <https://doi.org/10.1109/FSKD.2010.5569097>
- Zhang, J., Wang, H., & Li, J. (2023). Integration of remote sensing and machine learning for landslide susceptibility assessment in mountainous regions. *Environmental Earth Sciences*, 82(5), 112. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10623-4>

References

- Abedini, M., Ghobadi Alamdari, S., & Ghasemian, B. (2024). Assessment and zoning of landslide occurrence hazard using the ANP model in the Liqvan Chay Watershed. *Geography and Human Relations*, 6(4), 503–525. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.399799.1886> (In Persian)
- Ahmadi, M., Arabameri, A., & Pradhan, B. (2019). Landslide susceptibility mapping at Karaj Watershed, Iran: A comparison of frequency ratio, logistic regression, and decision tree models. *Environmental Earth Sciences*, 78(8), 235. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8144-3>
- Asadi, M., Akbari, F., & Emami, K. (2020). Assessment of areas suitable for the physical development of Saqqez City using the integrated AHP–Fuzzy model. *Geography and Human Relations*, 2(4), 230–239. https://www.gahr.ir/article_106209.html (In Persian)
- Asadi, M., Heidari, Z., & Emami, K. (2022). Assessment of the trend of physical development of Poldokhtar City toward flood-prone areas. *Geography and Environmental Hazards*, 11(2), 159–174. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.72169.1101> (In Persian)
- Bui, D. T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. B. (2018). Landslide susceptibility assessment using decision tree, support vector machines, and Naïve Bayes models in the Hoa Binh province, Vietnam. *Environmental Earth Sciences*, 77(15), 569. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7584-7>
- Chen, X., Zhang, Y., & Chen, W. (2023). Landslide susceptibility mapping using convolutional neural networks and GIS data: A case study in China. *Environmental Earth Sciences*, 82(2), 75. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10570-2>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Research Council, 247, 36-57. <https://www.researchgate.net/publication/269710331>
- Erener, A., & Özceylan, E. (2021). Comparison of ensemble models for landslide susceptibility mapping: A case study from Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 80(14), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09748-2>
- Esfandiyari Darabad, F., Rahimi, M., & Vahabzadeh, M. (2024). Zonation of rockfall hazard along the Khalkhal–Shahrud road using the multilayer perceptron algorithm. *Geography and Environmental Hazards*, 14(4), 1–26. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.87847.1482> (In Persian)
- Ganjajean, H. (2024). Assessment of seismicity potential of Iranian metropolises. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 33(132), 173–188. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2019284.3047> (In Persian)
- Ganjajean, H. (2024). Spatial and temporal analysis of earthquakes in Iran during 1907–2023. *Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 222–243. <https://doi.org/10.22067/geoh.2024.87246.1470> (In Persian)

- Ganjaeian, H., Nosrati, M., Ebrahimi, A., & Qeysarian, S. S. (2025). Assessment of the vulnerability of villages in mountainous areas to natural hazards (Case study: Hawraman villages). *Environmental Research in Mountainous Territories*, 1(2), 57–70. <https://doi.org/10.22034/ermr.2024.63510> (In Persian)
- Ganjaeian, H., Rezaei Arefi, M., Peysoozi, T., & Emami, K. (2021). 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/sustaineearth.1.2.43>
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181–216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The landslide handbook—A guide to understanding landslides. US Geological Survey. <https://www.researchgate.net/publication/276206970>
- Jamini, D., Shahabi, H., Nazari, H., & Atashbahar, R. (2023). Identification of rural settlements at risk of landslides in nomadic ecosystems (Case study: Paveh County). *Nomadic Territory Planning Studies*, 3(1), 107–122. <https://doi.org/10.22034/jsnap.2023.410697.1066> (In Persian)
- Kenani, S. (2023). Identification of landslide-prone areas in the Ilam Dam watershed using the analytic network process model. *Geography and Human Relations*, 5(4), 516–524. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.377424.1785> (In Persian)
- Khosravi, K., Blaschke, T., & Omrani, H. (2020). A novel hybrid method for landslide susceptibility mapping using deep learning and geographic information systems. *Environmental Earth Sciences*, 79(8), 198. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08953-6>
- Madadi, A., & Taghizadeh, D. (2024). Zoning of landslide occurrence hazard at Sain Pass (Ardabil–Sarab communication route). *Geography and Human Relations*, 7(3), 822–842. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.422684.1975> (In Persian)
- Mohammadi, A. (2025). Zoning of landslide occurrence hazard in the vicinity of dams in mountainous territories using remote sensing and geographic information systems (Case study: Cheraghveys Dam, Saqez County). *Environmental Research in Mountainous Territories*, 1(1), 15–24. <https://doi.org/10.22034/ermr.2025.63295> (In Persian)
- Mohammadkhan, S., Ganjaeian, H., Shahri, S., & Abbaszadeh, A. A. (2019). Prediction of urban development trends toward hazardous areas using multitemporal imagery (Case study: Marivan City). *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(110), 107–117. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.36615> (In Persian)
- Negahban, S., Ganjaeian, H., Ebrahimi, A., & Emami, K. (2019). Monitoring and prediction of changes in settlement areas using multitemporal imagery (Case study: Sonqor City). *Physics of the Earth and Space*, 45(2), 343–354. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.275076.1007084> (In Persian)
- Negahban, S., Ganjaeian, H., Ebrahimi, A., & Qeysarian, S. S. (2024). Analysis of the role of environmental factors in flood occurrence using the Google Earth Engine platform (Case study: Western Golestan Province). *Geography and Environmental Planning*, 35(4), 1–18. <https://doi.org/10.22108/gep.2024.142342.1659> (In Persian)
- Negahban, S., Ganjaeian, H., Faridouni-Kurdistan, M., & Cheshmeh-Sefidi, Z. (2019). Assessment of the physical development of cities and expansion toward geomorphologically restricted areas using LCM (Case study: Sanandaj City). *Natural Environmental Hazards*, 8(20), 39–52. <https://doi.org/10.22111/jneh.2018.21943.1317> (In Persian)
- Negahban, S., Ganjaeian, H., Saeedi, S., & Ghasemi, A. (2020). Study of vertical displacement resulting from the 17/8/1398 Torkamanchay earthquake using the InSAR method. *Physics of the Earth and Space*, 46(3), 445–456. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2020.295046.1007182> (In Persian)
- Negahban, S., Pisouzi, T., Ganjaeian, H., & Norouzi, M. (2021). Identification of areas susceptible to landslides and vertical displacement using radar imagery (Case study: Urban and suburban areas of Lavasan). *Geography and Environmental Hazards*, 10(39), 1–18. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.71728.1094> (In Persian)
- Nouraldin Mousa, F., Mahmoudi, R., & Emami, K. (2023). Assessment of the trend of physical development of settlements toward flood-prone areas (Case study: Sanandaj City). *Geography and Human Relations*, 5(4), 653–664. https://www.gahr.ir/article_171651.html (In Persian)
- Pireh, M., & Ganjaeian, H. (2024). Analysis of landslides in relation to environmental factors (Case study: Sanandaj County). *Geography and Human Relations*, 7(3), 242–278. <https://doi.org/10.22034/gahr.2025.458065.2135> (In Persian)
- Pourghasemi, H. R., Rahmati, O., & Reichenbach, P. (2019). A comparative assessment of landslide susceptibility mapping using machine learning models in northern Iran. *Environmental Earth Sciences*, 78(20), 597. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8657-0>

- Pourtaghi, Z. S., Blaschke, T., & Omrani, H. (2021). A deep learning model for landslide susceptibility mapping using multi-source data in Iran. *Environmental Earth Sciences*, 80(6), 181. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09568-4>
- Sadati, S. H., Mousavi, S. R., Vahabzadeh-Kobra, G., & Roshan, S. H. (2025). Evaluation of random forest and support vector machine models for landslide susceptibility mapping (Case study: Tajan Watershed, Mazandaran Province). *Natural Environmental Hazards*, 14(45), 133–154. <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.50031.2071> (In Persian)
- Safari Namivandi, M., Ganjaeian, H., Nosrati, M., & Mohammadian, K. (2024). Identification of flooded areas and analysis of factors affecting their occurrence (Case study: Southeastern Sistan and Baluchestan Province). *Quantitative Geomorphological Research*, 13(2), 181–194. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.449586.1494> (In Persian)
- Salari, M., Neyri, H., Ganjaeian, H., & Amani, K. (2020). Assessment and prediction of the physical development trend of settlements with emphasis on the geomorphological approach and environmental management (Case study: Paveh City). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(1), 86–101. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.109536> (In Persian)
- Saro, L., Woo, J. S., Kwan-Young, O., & Moun-Jin, L. 2016. The spatial prediction of landslide susceptibility applying artificial neural network and logistic regression models: A case study of Inje, Korea. *Open Geosciences*, 8(1), 117–132. <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0010>
- Su, Q., Weiheng, T., Shiguang, M., Xiaoyuan, Zh., Kaixin, L., Xiaoye, S., Jianli, G., & Yonggang, Y. (2021). Landslide Susceptibility Zoning Using C5. 0 Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machine and Comparison of Their Performance in a Coal Mine Area. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.781472>
- Sun, J., Wu, S., Zhang, Y., & Zhang, Q. (2022). A review of deep learning in landslide susceptibility mapping. *Environmental Earth Sciences*, 81(8), 240. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10442-1>
- Tabesh, S., Nouri-Khanyordi, M., Dousti, M., & Ganjaeian, H. (2020). Developing a proposed model for locating sports facilities using the integrated WLC and AHP model (Case study: Tabriz City). *Sport Management and Development*, 9(21), 2–22. <https://doi.org/10.22124/jsmd.2020.4096> (In Persian)
- Tang, H., Yong, R., & Eldin, M.E. (2017). Stability analysis of stratified rock slopes with spatially variable strength parameters: the case of Qianjiangping landslide. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 76(3), 839–853. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0876-4>
- Taravat, A., Pourghasemi, H. R., & Ghanbarian, G. (2020). Landslide susceptibility mapping using machine learning techniques: A review. *Environmental Earth Sciences*, 79(20), 502. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09133-4>
- Yang, Z., Qiao, J., & Zhang, X. (2010). Regional Landslide Zonation Based on Entropy Method in ThreeGorges Area, China. *Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, (FSKD 2010). <https://doi.org/10.1109/FSKD.2010.5569097>
- Zhang, J., Wang, H., & Li, J. (2023). Integration of remote sensing and machine learning for landslide susceptibility assessment in mountainous regions. *Environmental Earth Sciences*, 82(5), 112. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10623-4>