



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Geological and morphotectonic analysis of landslides (Study area: Tang Hamam and Alvand drainage basins in Sarpol Zahab county)

Forouzan Naseri¹ | Shahram Bahrami^{2*} | Alireza Salehipour Milani³ | Mohsen Ehteshami-Moinabadi⁴

1. PhD Student of Geomorphology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran. Email: f_naseri@sbu.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Professor of Geomorphology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: sh_bahrami@sbu.ac.ir
3. Professor of Geomorphology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: ar.salehipour@googlemail.com
4. Associate Professor of the Sedimentary Basins and Petroleum Department., Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: ehteshami58@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received: 08 August 2025
Revised: 09 September 2025
Accepted: 16 September 2025
Published: 22 September 2025

Keywords:

Landslide,
Tectonics,
Morphotectonic Index,
Tang Hamam,
Alvand,
Zagros.

ABSTRACT

Landslides, as one of the unstable slope processes, play an important role in transforming mountainous landscapes and are a serious challenge in environmental management by causing changes in topography and destroying infrastructure. In this study, in order to evaluate the distribution of landslides and their relationship with morphotectonics, two basins of Tang Hamam and Alvand (Sarpol Zahab) in the Zagros zone were investigated. Using field studies and satellite images, a total of 65 landslide events were identified, and the ratio of landslide area to basin area (LA) and landslide density (LD) in the basins were obtained. Then, using geomorphological and tectonic indices, such as hypsometric integral (Hi), the valley height-width ratio (Vf), the basin asymmetry factor (Af), basin shape (Bs), the stream gradient-length ratio (SL), the mountain-front sinuosity (Smf), and Relative Tectonic Activity Index (Iat), the tectonic status of the basins was evaluated. Also, factors affecting the occurrence of landslides, including faults, earthquake focus, slope, and lithology, and their quantitative relationship with the extent and frequency of landslides, were investigated. Spatial analyses of morphometric indices and relative tectonic activity index showed that tectonically, both the Tang Hamam and Alvand basins have moderate activity with values of 2.33 and 2, respectively. The ratio of landslide area to the basin area is 23.69% in the Tang Hamam basin whereas this ratio is 0.45% in the Alvand basin. Investigating the distribution of landslides relative to active faults and earthquake epicenters also showed that more than 97 percent of landslides are located less than 2 kilometers from active faults and more than 95 percent of them are located near earthquake epicenters. The findings also show that slope gradient is one of the effective factors in the occurrence of landslides, and the highest density of landslides was observed in slope angle class of 15-30 degrees. Geologically, most landslides have occurred in loose, low-resistance formations such as Amiran, Pabdeh, and Young alluvial deposits. Also, the presence of alternating hard layers of Asmari formation over loose and soft layers such as Pabdeh, especially in the Alvand basin and the slopes of the Shahneshin Mountain in the Tang Hamam basin, has led to increased instability and the occurrence of landslides. Overall, the study area has moderate tectonic activity with significant structural heterogeneity. These conditions, especially in areas that are simultaneously affected by geology, faults, earthquakes, slope, and morphometric features, increase the occurrence of landslides.

Cite this article: Naseri, F.; Bahrami, Sh.; Salehipour Milani, A. & Ehteshami-Moinabadi, M. (2025). Geological and morphotectonic analysis of landslides (Study area: Tang Hamam and Alvand drainage basins in Sarpol Zahab county). *Environmental Hazards Management*, 12 (2), 117-133. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.400930.892>



© The Author(s). **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.400930.892>

Introduction

landslides as one of the most important hazards cause human and financial losses every year. Tectonic activities play a significant role in the occurrence of slope movements in the Zagros mountain range as one of the tectonically most active regions in Iran. Earthquakes, fault activity, tectonic uplifts, folding, and fault-induced fractures and joints are critical factors contributing to these slope instabilities. Moreover, the rock fractures caused by faulting increase the permeability of rocks, thereby accelerating both mechanical and chemical weathering processes. This, in turn, intensifies the likelihood of landslide events. In this study, the analysis of landslides has been carried out by considering the combined role of lithological, tectonic, and geomorphological factors of the region, in the Tang Hamam and Alvand basins.

Methodology

In this study, first, small and large landslides were identified and extracted using a digital elevation model with a resolution of 12.5 m, topographic maps of 1:500,000 and satellite images available in Google Earth, ArcGIS and Global Mapper software. Then, a number of landslides were examined on a case-by-case basis with field observations of the study area. Faults and their structural information were drawn using 1:100,000 geological maps of Kerend, Qasr-e Shirin, Bayangan and Sarpol Zahab sheets. Data related to earthquake epicenters were received from the national seismological center of the institute of geophysics, university of Tehran. The sub-basins of the region were extracted using Archhydro software. Finally, the extent and intensity of tectonic activities and the impact of these activities on landslides in the region were calculated using morphometric indices and the morphotectonic index (Iat).

Result and Discussion

Morphotectonic indices show that the study area has moderate tectonic activity, but significant heterogeneity is observed at the sub-basin level. For example, in the Tang Hamam basin, sub-basin 2 has high tectonic activity and sub-basin 3 is in a low state. The results of morphometric indices such as hypsometric integral, mountain-front sinuosity, and basin shape index also indicate that in some areas tectonic effects on the form and structure of the basins are obvious. While in others, signs of structural stability and complete erosion are seen. The concentration of more than 84% of landslides on slopes above 15 degrees confirms the importance of this factor in the occurrence of slope instability. The concentration of more than 95% of landslides within a radius of less than 2 km from faults and the significant proximity of landslides to earthquake epicenters indicate that seismic activity and tectonic structures play a key role in inducing slope instability. Among the fault activities in the region, the Kerend fault plays a decisive role in the formation of the structure of the Rijab syncline and the intensification of ground instability. In terms of geology, the highest frequency of landslides in Tang Hamam is observed in the Amiran Formation due to low resistance (56.72%) and in the Young alluvial deposits due to the loose and cement-free composition (26.4%). In the Alvand basin and parts of the Tang Hamam Basin, landslides have also occurred in the Asmari Formation. The location of weak and unstable formations such as the Pabdeh below the hard and resistant Asmari Formation has provided conditions for slope instability, which has resulted in numerous landslides, especially on the slopes of the Shahneshin Mountain.

Conclusion

The study of landslides in the two studied basins using morphometric indices and spatial analyses showed that the study area has moderate tectonic activity. The results also show that slope gradient plays an important role in the occurrence of landslides, so that the highest density of landslides has been observed in the slope angle class of 15-30 degrees. The presence of more than 95% of landslides in the vicinity of faults and earthquake foci less than 2 km also emphasizes the determining role of tectonic structures and seismic activity in creating slope instabilities. Geological survey of the studied area shows that the highest occurrence of landslides is observed in formations such as Amiran, Pabdeh and new alluvial deposits; formations that are prone to landslides due to low resistance and inherent instability. Finally, the results of this study indicate the importance of combined analysis of geomorphological

indicators, seismic data, geological conditions and tectonic structures in accurate assessment of landslide risk.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), 150-173.
- Huang, Y., Tyata, U., Liang, D., Gao, Y., & Yang, Q. (2025). Considering tectonic uplift in landslide susceptibility assessment using MaxEnt model: a case study of Trishuli River watershed. *Environmental Earth Sciences*, 84(7), 181.
- Keller, E. A. & Pinter, N. (2002). Active tectonics earthquakes, uplift, and landscape. Second edition.
- Sabouri, S M; Haji Ali Beigi, H; Talebian, M; Fattahi, M. (2021). Studying the relationship between the frequency of landslide occurrence and active tectonics in the northern Qazvin region. *Journal of Natural Resources of Iran*. 74, No. 2. 423-436. (in Persian)
- Yamani, M; Mohammadi, A; Negahban, S. (2010). Landslide zoning in the Tonekabon aquifer basin using quantitative models, *Geography and Development*. 8, (19), 83-98. (in Persian)



شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۳-۴۱۶۸

مدیریت مخاطرات محیطی

سایت نشریه: <https://jhsci.ut.ac.ir>



انتشارات دانشگاه تهران

تحلیل زمین‌شناختی و مورفوتکتونیک زمین‌لغزش‌ها (منطقه پژوهش: حوضه‌های زهکشی تنگ حمام و الوند در شهرستان سرپل ذهاب)

فروزان ناصری^۱ | شهرام بهرامی^{۲*} | علیرضا صالحی‌پور میلانی^۳ | محسن احتشامی معین‌آبادی^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی. رایانامه: f_nasari@sbu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی. رایانامه: sh_bahrami@sbu.ac.ir
۳. استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی. رایانامه: ar.salehipour@gmail.com
۴. دانشیار گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی. رایانامه: ehteshami58@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

کلیدواژه:

الوند،
تنگ حمام،
زاگرس،
زمین‌ساخت،
زمین‌لغزش،
شاخص مورفوتکتونیک.

زمین‌لغزش یکی از فرایندهای ناپایدار دامنه‌ای است که تأثیر مهمی در تغییر شکل چشم‌اندازهای کوهستانی دارد و با ایجاد تغییر در توپوگرافی و تخریب زیرساخت‌ها، چالشی جدی در مدیریت محیطی به شمار می‌رود. در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی پراکندگی زمین‌لغزش‌ها و ارتباط آنها با مورفوتکتونیک، دو حوضه تنگ حمام و الوند (سرپل ذهاب) در زاگرس چین‌خورده بررسی شدند. با استفاده از پژوهش‌های میدانی و تصاویر ماهواره‌ای موجود در نرم‌افزار google earth، در مجموع ۶۵ رخداد زمین‌لغزش شناسایی شد و نسبت مساحت زمین‌لغزش به مساحت حوضه (LA) و تراکم زمین‌لغزش (LD) در حوضه‌ها به دست آمد. سپس با بهره‌گیری از شاخص‌های مورفوتکتونیک مانند انتگرال هیپسومتر (Hi)، نسبت عرض کف دره به ارتفاع (Vf)، عدم تقارن حوضه (Af)، شکل حوضه (Bs)، گرادیان طولی رودخانه (SL)، سینوسیته جبهه کوهستان (Smf) و شاخص فعالیت نسبی تکتونیک (Lat)، وضعیت زمین‌ساختی حوضه‌ها ارزیابی شد. همچنین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها شامل فاصله از گسل‌ها، فاصله از کانون سطحی زمین‌لرزه‌ها، میزان شیب و لیتولوژی و ارتباط کمی و کیفی آنها با گستردگی و فراوانی زمین‌لغزش‌ها بررسی شد. تحلیل‌های مکانی شاخص‌های مورفوتکتونیک و شاخص فعالیت نسبی تکتونیک نشان داد که از نظر تکتونیک، هر دو حوضه تنگ حمام و الوند به‌ترتیب با مقادیر ۲/۳۳ و ۲، دارای فعالیت متوسط هستند. نسبت درصد مساحت زمین‌لغزش به مساحت کل حوضه در حوضه تنگ حمام ۲۳/۶۹ درصد و در حوضه الوند ۰/۵۴ درصد است. بررسی پراکندگی زمین‌لغزش‌ها نسبت به گسل‌های فعال و کانون‌های زمین‌لرزه نیز نشان داد که بیش از ۹۷ درصد زمین‌لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۲ کیلومتری گسل‌های فعال و بیش از ۹۵ درصد آنها در نزدیکی کانون‌های سطحی زمین‌لرزه قرار دارند. یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که شیب یکی از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌هاست و بیشترین تراکم زمین‌لغزش‌ها در بازه ۱۵ تا ۳۰ درجه مشاهده شده است. از نظر زمین‌شناسی، بیشتر زمین‌لغزش‌ها در سازندهای سست و کم‌مقاومت مانند امیران، پابده و آبرفت‌های جدید رخ داده‌اند. همچنین وجود تناوب لایه‌های سخت آسماری روی لایه‌های سست و نرم مانند پابده، به‌ویژه در حوضه الوند و دامنه کوه شاه‌نشین در حوضه تنگ حمام موجب تشدید ناپایداری‌ها و وقوع زمین‌لغزش شده است. در مجموع، منطقه پژوهش دارای فعالیت تکتونیک متوسط با ناهمگنی ساختاری چشمگیر است. این شرایط، به‌ویژه در نواحی‌ای که همزمان تحت تأثیر لیتولوژی، فعالیت گسل، زمین‌لرزه، شیب و ویژگی‌های مورفومتر قرار دارند، سبب افزایش وقوع زمین‌لغزش‌ها می‌شود.

استناد: ناصری، فروزان؛ بهرامی، شهرام؛ صالحی‌پور میلانی، علیرضا و احتشامی معین‌آبادی، محسن (۱۴۰۴). تحلیل زمین‌شناختی و مورفوتکتونیک زمین‌لغزش‌ها (منطقه پژوهش: حوضه‌های زهکشی تنگ حمام و الوند در شهرستان سرپل ذهاب). مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۲ (۲)، ۱۱۷-۱۳۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.400930.892>

© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.400930.892>



مقدمه

زمین‌لغزش از خطرات طبیعی است که همه‌ساله خسارات جانی و مالی فراوانی را در مناطق کوهستانی، لرزه‌خیز و پرباران دنیا به‌همراه دارد (شیرانی و خوش‌باطن، ۱۳۹۵). بر مبنای دیدگاه‌ها و تعاریف مختلف علمی، زمین‌لغزش‌ها حرکات توده‌ای از مواد مانند خاک، سنگ یا آوار هستند که در اثر عوامل مختلف بر دامنه‌ها رخ می‌دهند و موجب ناپایداری و جابه‌جایی سطح زمین می‌شوند (وارنس، ۱۹۵۸؛ پک، ۱۹۶۹؛ کرودن، ۱۹۹۱؛ گیرتسما، هایلند و واوجیوس، ۲۰۰۹؛ ثاکور و همکاران، ۲۰۲۳) و همه حرکات و گسیختگی‌های دامنه‌ای به‌نسبت سریع را که با کاهش ناگهانی ضریب اطمینان به سطح پایین‌تر از واحد، تحت تأثیر غلبه نیروهای محرک بر نیروهای مقاوم در سطوح شیبدار به وقوع می‌پیوندد شامل می‌شوند (شریعت جعفری، ۱۳۷۶: ۷). زمین‌لغزش‌ها اغلب در نواحی کوهستانی پدید می‌آیند (صفاری و همکاران، ۱۳۹۷) و حضور و نوع فراوانی آنها در یک منطقه به عوامل و شرایط به‌وجودآورنده مؤثر در محیط بستگی دارد (رمضانی و ابراهیمی، ۱۳۸۸). زمین‌ساخت یکی از این عوامل است که با ایجاد زمین‌لرزه و ایجاد نیروی محرک، بالآمدگی‌های تکتونیک و چین‌خوردگی‌ها، شکستگی‌ها و خردشدگی‌های ناشی از گسل، ایجاد درز و شکاف در سنگ‌ها و تسریع فرایند هوازدگی مکانیکی و شیمیایی، ایجاد گسل، افزایش نفوذپذیری سنگ‌ها، تغییر در جهت و میزان شیب لایه‌های زمین‌شناسی و ... موجب رخداد زمین‌لغزش‌ها می‌شود (صبوری و همکاران، ۱۴۰۰).

تحقیقات بسیاری درباره زمین‌لغزش و عوامل اثرگذار بر آن، در سراسر جهان صورت گرفته است؛ از جمله جمیر و همکاران (۲۰۱۹)، اثر لیتولوژی، تکتونیک و بارش را بر زمین‌لغزش‌های دره یامونا در شمال غربی هیمالیا با استفاده از شاخص‌های مورفومتری بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده تسلط ریزش سنگ در بخش‌های مرتفع هیمالیا (HH) و مناطق کم‌ارتفاع هیمالیا (LH) در ارتباط با فعالیت تکتونیک به‌نسبت شدید است و بیشتر لغزش‌های آواری با رانش‌های منطقه‌ای تطابق دارند. کونفورتی و لتو (۲۰۲۰) تأثیر تکتونیک و ویژگی‌های مورفومتری بر توزیع زمین‌لغزش در حوضه مسیما از کالابریا در جنوب ایتالیا را با استفاده از تجزیه و تحلیل مورفومتری با تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بررسی نمودند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که سنگ‌شناسی، تراکم گسل، شیب و نقش ناهمواری‌های محلی تأثیر مهمی در تعیین وقوع زمین‌لغزش دارند. احتشامی معین‌آبادی (۲۰۲۲)، پهنه‌های گسلی و تأثیرات آنها بر زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی را در بخش‌هایی از البرز و زاگرس بررسی کرد. او دریافت کرد که فرایندهای منطقه گسلی، رانش‌های زمین ناشی از بارندگی را از طریق افزایش تراکم شکستگی در نزدیکی گسل‌های اصلی، رشد ضعیف مواد معدنی در مناطق گسلی و ویژگی‌های توپوگرافی ایجادشده توسط گسلش فعال کنترل می‌کنند. وو و همکاران (۲۰۲۲)، در منطقه‌ای در جنوب غربی چین، فرسایش زمین‌لغزش ناشی از زمین‌لرزه همراه با تکتونیک و برش رودخانه و اثرهای حرکت زمین بر الگوهای جفت‌شده را بررسی کردند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که فرسایش زمین‌لغزش ناشی از زمین‌لرزه با تکتونیک و برش رودخانه، هر دو در شرایط مختلف با زمین‌لرزه رخ می‌دهند و رابطه کمی بین نرخ‌های فرسایش زمین‌لغزش لرزه‌ای و معیارهای توپوگرافی، پیامدهای بالقوه مهمی را برای تکامل کمربند کوهستانی ارائه می‌دهد. هوانگ و همکاران (۲۰۲۵)، بالآمدگی تکتونیک در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبخیز رودخانه تریشولی را با استفاده از مدل MaxEnt بررسی کردند. تجزیه و تحلیل استفاده از این مدل نشان داد که بالآمدگی تکتونیک به‌عنوان دومین عامل تأثیرگذار، حدود ۲۸ درصد به ظرفیت پیش‌بینی مدل کمک می‌کند و از ارتفاع و شیب پیشی می‌گیرد. همچنین مناطقی با شاخص شیب بیشتر از ۵۰ و شیب‌های تندتر از ۲۰ درجه، بیشتر مستعد رانش زمین هستند.

مقیمی، علوی‌پناه و جعفری (۱۳۸۷)، به ارزیابی و شناخت سازوکار عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه چناران و پهنه‌بندی این پدیده براساس عوامل اثرگذار با مدل LIM پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که به‌دلیل وجود لایه‌های نفوذناپذیر رسی، مارنی و تبخیری و سیمان انحلال‌پذیر کربناته در سازند شوریه (ksh)، این واحد سنگی با دارا بودن بیشترین وزن $Lnwi = (2/3341)$ ، عامل اساسی در وقوع لغزش حوضه است. سپس لایه‌های آبدار زیرزمینی، افزایش وزن ناشی از رشد درختان تنومند در باغ‌ها، اثر غیرمستقیم طیف ارتفاعی (۱۷۱۵-۱۵۷۰) و فرایندهای حاصل، شیب مناسب (۷/۷۸-۳۸ درجه)، زیربری دامنه توسط رودخانه چناران و نقاط با برف ماندگار در قالب عوامل مؤثر در کاهش و افزایش تنش برشی، به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش حوضه دارند. میرنظری، شهابی و خضری (۱۳۹۱)، به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

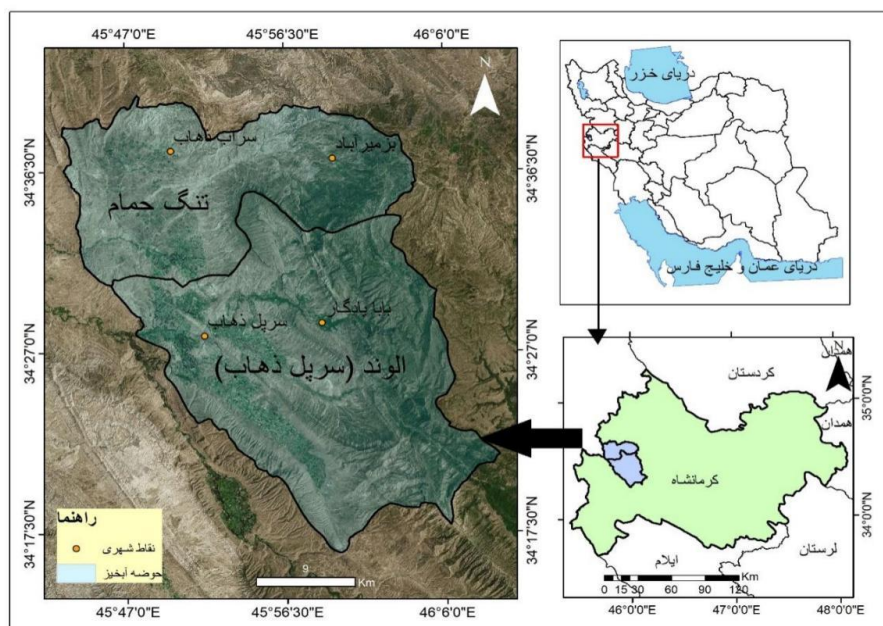
با استفاده از مدل AHP و عملگرهای منطق فازی در حوضه آبریز پشت تنگ سرپل ذهاب در استان کرمانشاه پرداختند. آنها منطقه را براساس وقوع زمین لغزش به صورت پهنه‌های خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی کردند. همچنین ارزیابی مدل‌ها نشان داد که مدل فازی گامای ۰/۷ از دقت بیشتری نسبت به مدل AHP در تهیه نقشه خطر زمین لغزش در حوضه آبریز تحت بررسی برخوردار است. کیانی، ندیم و غفورپور (۱۳۹۹)، ویژگی‌های زمین ساخت فعال در گستره رودبار را با نگرش ویژه بر زمین لغزش‌های فعال منطقه با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک بررسی کردند و بیان داشتند که بیشتر زیرحوضه‌ها فعالیت تکتونیکی شدید و متوسط داشته و با توجه به این موضوع، پهنه‌های زمین لغزش شناسایی شده نیز در دو بخش شدید و متوسط بر پهنه‌های تکتونیکی انطباق دارند. مهرپویا و قویمی‌پناه (۱۴۰۴)، عوامل مؤثر بر زمین لغزش و پهنه‌بندی خطر وقوع آن را با استفاده از روش حداکثر آنتروپی در حوضه آبخیز چالوس را بررسی کردند. براساس نتایج عامل‌های بارندگی، خاک‌شناسی، واحدهای زمین‌شناسی، درصد شیب، کاربری اراضی و فاصله از رودخانه به ترتیب مؤثرترین عوامل در بروز زمین لغزش در منطقه پژوهش معرفی شدند. ناصری و همکاران (۱۴۰۴)، پراکندگی و ارتباط زمین لغزش‌های گستره ایلام و مهران با زمین ساخت و شاخص‌های ژئومورفولوژی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پژوهش‌های میدانی ارزیابی کردند. آنها بیان داشتند که تلفیق داده‌های زمین ساختی، لرزه‌ای و مورفومتری حوضه‌ها نشان می‌دهد در زیرحوضه‌هایی با فعالیت زمین ساختی زیاد، مساحت زمین لغزش‌ها نسبت به مساحت زیرحوضه افزایش می‌یابد و منطقه پژوهش از نظر ژئودینامیک فعال است و زمین لغزش‌ها، تحت تأثیر فعالیت لرزه‌ای، گسل‌ها و شرایط زمین ساختی منطقه شکل گرفته‌اند.

باتوجه به مطالب یادشده می‌توان گفت پژوهش‌های داخلی و خارجی بسیاری با استفاده از روش‌های گوناگون در زمینه بررسی زمین لغزش‌ها مانند توزیع مکانی، پهنه‌بندی، خصوصیات ژئومورفولوژیکی، فعال بودن زمین لغزش‌ها، زمین‌شناسی و ... صورت گرفته است. با توجه به اینکه زمین لغزش در انواع مختلف فراوان است و خسارت‌های جانی و مالی آن اعم از جاده‌های محلی و منطقه‌ای و دیگر زیرساخت‌ها، روستاها، مزارع و املاک خصوصی سالانه شایان توجه است و همچنین فعالیت تکتونیک در بهرک منطقه می‌تواند تأثیر مهمی در توسعه زمین لغزش داشته باشد، در تحقیق حاضر به شناسایی، بررسی و تحلیل تأثیر پارامترهای فعال تکتونیکی بر زمین لغزش‌ها و تغییرات ایجادشده و شواهد ناشی از این فعالیت پرداخته خواهد شد. در این پژوهش تحلیل زمین لغزش‌ها با در نظر گرفتن نقش ترکیبی عوامل لیتولوژی، تکتونیک و ژئومورفولوژی منطقه انجام گرفته است. به دیگر سخن، میزان تأثیرگذاری تکتونیک با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی، گسل‌ها و فعالیت‌های لرزه‌ای بر زمین لغزش، بررسی و ارزیابی می‌شود.

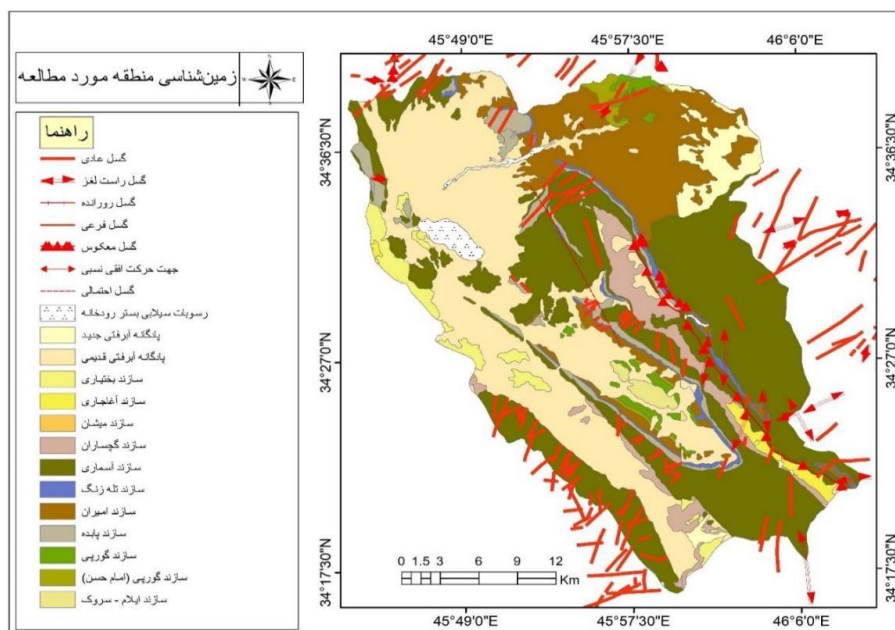
موقعیت منطقه پژوهش

محدوده پژوهش بخشی از زاگرس چین خورده در غرب ایران واقع در جنوب غربی استان کرمانشاه است. حوضه‌های تحت بررسی شامل دو حوضه آبخیز تنگ حمام و الوند (سرپل ذهاب) هستند. این حوضه‌ها از نظر تقسیمات سیاسی در بخش‌های غربی استان کرمانشاه در شهرستان سرپل ذهاب، از طول جغرافیایی $39^{\circ} 45' 29''$ تا $36^{\circ} 07' 16''$ شرقی و عرض جغرافیایی $34^{\circ} 16' 21''$ تا $34^{\circ} 38' 20''$ شمالی واقع شده‌اند (شکل ۱). از نظر اقلیمی این گستره دارای اقلیم نیمه خشک گرم، با میانگین بارش سالانه $421/3$ میلی‌متر و وضعیت فیزیوگرافی دشتی - کوهپایه‌ای است (نوحه‌گر و همکاران، ۱۳۹۲). کمربند زاگرس، فعال‌ترین پهنه سرزمین ایران از نظر لرزه‌خیزی است، به طوری که بیشترین فراوانی کانون زمین لرزه در این پهنه است (صحرائی، احتشامی معین آبادی و علوی، ۲۰۲۳). رخداد زمین لرزه‌های بزرگ در راستای ساختارهای زمین ساختی در این پهنه، نشان از جنبش و فعالیت گسل‌های اصلی و فرعی دارد. همچنین وجود این گسل‌ها که تعداد آنها در محدوده پژوهش زیاد است (گسل‌های کوند، پیکلا، قلاجه و بانکول)، مهم‌ترین عامل برای جدی بودن زمین لرزه‌ها و شکل‌های ایجادشده ناشی از آن، از جمله زمین لغزش است که محدوده آنها تحت تأثیر تکتونیک ناشی از فشار ورقه عربی به ورقه ایران، می‌تواند مهم‌ترین مناطق برای ایجاد زمین لغزش باشد. پراکندگی سازندهای زمین‌شناسی در حوضه‌های تنگ حمام و الوند (سرپل ذهاب) نشان می‌دهد که بیش از ۴۰ درصد از مساحت به پادگانه‌های آبرفتی قدیمی و بیش از ۲۰ درصد به سازند آسماری اختصاص دارد. از جمله دیگر سازندها در

این محدوده می‌توان به سازند گورپی، تله‌زنگ، پابده، بختیاری، امیران، آغاچاری و میشان اشاره کرد که بیشترین وسعت در میان آنها به سازند امیران تعلق دارد (شکل ۲).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه پژوهش

روش پژوهش

در این پژوهش، ابتدا زمین‌لغزش‌های کوچک و بزرگ شامل موارد قطعی و مشکوک با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰ و تصاویر ماهواره‌ای موجود در نرم‌افزارهای Google Earth، Arc GIS و Global Mapper شناسایی و استخراج شد و سپس از طریق بازدیدهای میدانی از محدوده پژوهش به‌صورت موردی، بررسی شده و موارد مشکوک در آن صحت‌سنجی شد. برای بررسی ارتباط مکانی زمین‌لغزش‌ها و گسل‌ها و کانون‌های زمین‌لرزه در

منطقه، گسل‌ها و اطلاعات ساختاری آنها، با استفاده از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی کرند غرب، قصرشیرین، باینگان و سرپل ذهاب ترسیم و داده‌های مربوط به کانون‌های زمین‌لرزه از مرکز لرزه‌نگاری کشور، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران دریافت شد. سپس برای ارزیابی دقیق‌تر منطقه پژوهش در نرم‌افزار Archydro، زیرحوضه‌های حوضه‌های آبخیز منطقه استخراج شد و با استفاده از dem و ابزار slope، شیب برحسب درجه به دست آمد و میزان تأثیرگذاری آن بر زمین‌لغزش‌ها بررسی شد.

در نهایت مطابق با جدول‌های ۱ و ۲، مقدار و شدت فعالیت‌های تکتونیکی و تأثیر این فعالیت‌ها بر زمین‌لغزش‌ها در منطقه با استفاده از شاخص‌های مورفومتری و محاسبه شاخص فعالیت نسبی تکتونیکی (Iat)، برای هر دوازده زیرحوضه آبریز منطقه برآورد شد.

شاخص Iat در تجزیه و تحلیل شاخص‌های ژئومورفولوژیک و جمع‌بندی نتایج آنها استفاده می‌شود تا وضعیت نسبی فعالیت‌های زمین‌ساختی در منطقه مشخص شود. این شاخص، از تقسیم مجموع طبقات کل شاخص‌های مورفوتکتونیک محاسبه شده (S) بر تعداد شاخص‌های محاسبه شده (N) به دست می‌آید.

$$IAT = S/N \quad (\text{رابطه ۱})$$

جدول ۱. شاخص Iat براساس طبقه‌بندی (الحمدونی و همکاران، ۲۰۰۸)

شدت فعالیت تکتونیکی	مقدار شاخص Iat
فعالیت زمین‌ساختی بسیار زیاد	۱ تا ۱/۵
فعالیت زمین‌ساختی زیاد	۱/۵ تا ۲
فعالیت زمین‌ساختی متوسط	۲ تا ۲/۵
فعالیت زمین‌ساختی کم	بیشتر از ۲/۵

جدول ۲. شاخص‌های مورفومتری برای ارزیابی فعالیت نسبی زمین‌ساختی

منبع	تعریف اجزای شاخص	شاخص‌های کمی
(الحمدونی و همکاران، ۲۰۰۶)	H max حداکثر ارتفاع حوضه H mean متوسط ارتفاع حوضه H min حداقل ارتفاع حوضه	$Hi = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$
(یمانی، محمدی و نگهبان، ۱۳۸۹)	ΔH اختلاف ارتفاع دو نقطه اندازه‌گیری شده در یک مقطع خاص از رودخانه ΔL طول بازه L طول کل کانال از خط تقسیم آب تا مرکز بخشی که شیب در آن محاسبه می‌شود	$SL = (\Delta H / \Delta L) \cdot L$
(جباری، ثروتی و حسین زاده، ۱۳۹۴)	Ar مساحت حوضه آبریز در سمت راست آبراهه اصلی At مساحت کل حوضه	$AF = 100(Ar/At)$
(جباری، ثروتی و حسین زاده، ۱۳۹۴)	V_{fW} پهنا یا عرض کف دره E_{ld} ارتفاع خط تقسیم آب (دیواره) در سمت چپ دره E_{rd} ارتفاع خط تقسیم آب (دیواره) در سمت راست دره E_{sc} ارتفاع میانگین کف بستر دره	$Vf = 2 \times V_{fW} / [(E_{ld} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})]$
(منصوری و صفاری، ۱۳۹۴)	BL طول حوضه از سرچشمه تا دهانه یا خروجی حوضه BW عرض حوضه که در وسیع‌ترین نقطه آن اندازه‌گیری می‌شود	$BS = BL/BW$
(جباری، ثروتی و حسین زاده، ۱۳۹۴)	Lmf طول پیشانی کوهستان در مرز بین کوهستان و کوهپایه (خط کنیک) Ls طول مستقیم پیشانی کوهستان	$S_{mf} = \frac{L_{mf}}{L_s}$
-	L مساحت زمین‌لغزش A مساحت حوضه	$LA = \frac{L}{A} \times 100$
-	N تعداد زمین‌لغزش A مساحت حوضه	$LD = \frac{N}{A}$

یافته‌های پژوهش

شناسایی و بررسی تراکم زمین‌لغزش‌ها

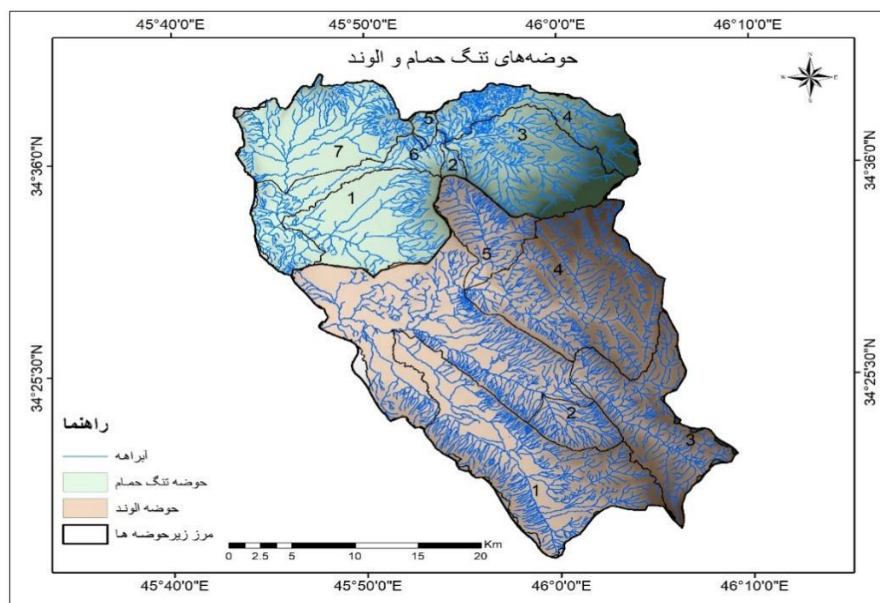
برپایه داده‌ها و روش‌های به‌کاررفته در این پژوهش، در مجموع ۶۵ رخداد زمین‌لغزش در منطقه شناسایی شد. مشاهدات میدانی در محل زمین‌لغزش‌های قدیمی و جدید، وجود نشانه‌هایی همچون آشفته‌گی در پوشش گیاهی، گسیختگی‌ها و درز و شکاف‌ها، قطعه‌سنگ‌های بزرگ، انحراف و کج‌شدگی درختان و تغییر مسیر آبراهه‌ها را نشان می‌دهد. افزون‌بر این، بررسی نقشه‌های توپوگرافی بزرگ‌مقیاس و تغییرات منحنی میزان (به‌صورت چاله‌ها و پرتگاه‌های متعدد) نیز در شناسایی زمین‌لغزش‌ها نقش مؤثری دارد. بررسی و تحلیل پراکنش زمین‌لغزش‌ها در دو حوضه تنگ حمام و الوند نشان می‌دهد که در حوضه تنگ حمام ۴۴ زمین‌لغزش، حدود ۲۳/۶۹ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شوند؛ درحالی که در حوضه الوند (سرپل ذهاب)، ۲۱ زمین‌لغزش تنها ۰/۵۴ درصد از مساحت کل حوضه را دربر گرفته‌اند. همچنین نسبت تعداد زمین‌لغزش‌ها به مساحت حوضه (LD) در حوضه تنگ حمام ۱۱/۵۹ درصد و در حوضه الوند ۳/۳۱ درصد است (جدول ۳، شکل ۵).

جدول ۳. پراکندگی زمین‌لغزش‌ها در حوضه‌های آبخیز منطقه پژوهش

حوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	تعداد زمین‌لغزش	LD (درصد)	مساحت زمین‌لغزش (کیلومتر مربع)	LA (درصد)
تنگ حمام	۳۷۹/۶۱	۴۴	۱۱/۵۹	۸۹/۹۳	۲۳/۶۹
الوند	۶۳۳/۱۸	۲۱	۳/۳۱	۳/۴۳	۰/۵۴

ارزیابی وضعیت زمین‌ساخت محدوده با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیک

برای ارزیابی مورفوتکتونیک منطقه، ابتدا برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، هر حوضه به چند زیرحوضه تقسیم شد. سپس شاخص‌های مورفومتری افزون‌بر حوضه‌های اصلی، در زیرحوضه‌ها نیز محاسبه و تحلیل شد. همان‌طور که در شکل ۳ آمده است در حوضه تنگ حمام ۷ زیرحوضه و در حوضه الوند ۵ زیرحوضه استخراج شد. براساس دسته‌بندی می‌توان ارزیابی دقیق‌تری از ویژگی‌های مورفوتکتونیک و زمین‌ساختی منطقه در مقیاس‌های کوچک‌تر به دست آورد.



شکل ۳. زیرحوضه‌های مربوط به هر حوضه در منطقه پژوهش

به‌منظور بررسی وضعیت زمین‌ساخت منطقه و تحلیل آن از منظر ژئومورفولوژی، مجموعه‌ای از شاخص‌های مورفومتری شامل شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi)، شاخص عدم تقارن حوضه (AF)، شاخص نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن (Vf)،

شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL)، شاخص شکل حوضه (BS) و شاخص سینوزیته جبهه کوهستان (Smf)، در سطح دو حوضه تنگ حمام و الوند و زیرحوضه‌های وابسته محاسبه شد. این شاخص‌ها به منظور تعیین سطح فعالیت نسبی تکتونیکی (Iat) در منطقه به کار گرفته شدند و نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. شاخص انتگرال هیپسومتری در حوضه تنگ حمام رتبه ۳ و در الوند رتبه ۲ را نشان می‌دهد که به ترتیب بیانگر فعالیت کم و متوسط فعالیت زمین‌ساختی است. شاخص عدم تقارن حوضه نیز با رتبه ۲ در هر دو حوضه، بیانگر کج‌شدگی متوسط در ساختارهای زهکشی است. شاخص نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن در تنگ حمام رتبه ۲ و در الوند رتبه ۱ را دارد که نشان‌دهنده دره‌هایی به نسبت پهن و پایداری بیشتر ساختاری در برخی بخش‌هاست. شاخص گرادیان طولی رودخانه در هر دو حوضه در طبقه ۳ (فعالیت کم) قرار گرفته است و مقادیر آن به ترتیب ۸۵۹/۵ برای الوند و ۹۱۰ برای الوند است. شاخص شکل حوضه با رتبه‌های ۳ در تنگ حمام و ۲ در الوند، گویای فعالیت تکتونیکی متوسط است. همچنین شاخص سینوسیتته جبهه کوهستان در هر دو حوضه تنگ حمام و الوند به ترتیب ۱ و ۲ است و در زیرحوضه‌ها، مقادیر متغیری بین ۱ تا ۳ دارد که نشان‌دهنده ناهمگنی در شدت فرایندهای زمین‌ساختی در بخش‌های مختلف منطقه است. ارزیابی شاخص‌های ژئومورفولوژیک در دو حوضه، تفاوت‌هایی در مقادیر شاخص‌ها را در بخش‌های مختلف نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر تفاوت در شرایط ژئومورفولوژیکی یا تأثیر عوامل مختلف ژئومورفیک باشد؛ اما به طور کلی نتایج شاخص‌ها نشان می‌دهد که منطقه دارای فعالیت زمین‌ساختی در سطح متوسط است.

میزان فعال بودن تکتونیکی حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها براساس شاخص فعالیت نسبی تکتونیکی (Iat)، برپایه طبقه‌بندی الحمدونی (۲۰۰۸) در چهار طبقه بسیار زیاد، زیاد، متوسط و کم دسته‌بندی شده است. بر این اساس، در حوضه تنگ حمام، زیرحوضه ۲ دارای فعالیت تکتونیکی زیاد است و زیرحوضه‌های ۱، ۴، ۵، ۶ و ۷ در طبقه متوسط قرار دارند. در مقابل، زیرحوضه ۳ از نظر فعالیت تکتونیکی در طبقه کم ارزیابی شده است. در حوضه الوند نیز به جز زیرحوضه ۱ که در طبقه کم قرار دارد، بقیه زیرحوضه‌ها (۲ تا ۵) فعالیت تکتونیکی متوسط دارند. در مجموع، شاخص Iat برای دو حوضه اصلی (تنگ حمام و الوند) در مقیاس کلی، در طبقه متوسط فعالیت تکتونیکی قرار می‌گیرد (شکل ۴).

جدول ۴. مقادیر به دست آمده از شاخص‌های مورفومتری و شاخص فعالیت نسبی تکتونیک فعال در زیرحوضه‌های الوند و سرپل ذهاب

حوضه‌ها زیرحوضه- ها ← شاخص‌ها و طبقات ↓	تنگ حمام							الوند				
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	کل حوضه	۱	۲	۳	۴
Hi	۰/۱۷	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۸	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۲	۰/۲۷	۰/۳۵	۰/۴۷	۰/۵۲
طبقه	۳	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۲
Af	۲۵/۸۸	۱۶/۹۸	۴۵/۵۳	۶۹/۵۲	۴۶/۳۶	۳۹/۹۸	۳۲/۱۶	۴۱/۴۸	۶۵/۱۹	۴۲/۴۳	۶۵/۹۹	۸۵/۷۱
طبقه	۲	۱	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۳	۲	۳
Vf	۵/۱۰	۰/۹۷	۱/۳۷	۰/۶۰	۲/۰۱	۱/۲۳	۱/۳۰	۱/۲	۲/۸۱	۷/۱۷	۰/۹۶	۰/۳۴
طبقه	۳	۱	۲	۱	۳	۲	۲	۲	۳	۳	۱	۱
Sl	۴۵۹/۵	۳۷۲	۸۵۹	۹۰۲/۵	۱۵۳/۵	۱۷۳/۵	۱۰۷	۸۵۹/۵	۶۳۳/۵	۵۲۵/۵	۷۴۲/۵	۸۵۱
طبقه	۳	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳
Bs	۱/۴۱	۱/۸۱	۱/۴۲	۳/۳۷	۲	۲/۱۵	۲/۲۳	۱/۶۳	۲/۲۴	۱/۰۳	۱/۴۱	۰/۹۲
طبقه	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۳	۲
Smf	۱/۵۳	۱/۴۲	۳/۵۷	۳/۴۸	۲/۵۰	۲/۲۴	۲/۰۷	۱/۳۶	۷/۹۲	۲/۹۳	۳/۸۷	۱/۱۹
طبقه	۱	۱	۳	۳	۲	۲	۳	۱	۳	۲	۲	۱
S/N	۲/۵	۱/۶۶	۲/۶۶	۲/۳۳	۲/۵	۲/۳۳	۲/۵	۲/۳۳	۲/۸۳	۲/۵	۲/۱۶	۲/۱۶
IAT	متوسط	زیاد	کم	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	کم	متوسط	متوسط	متوسط



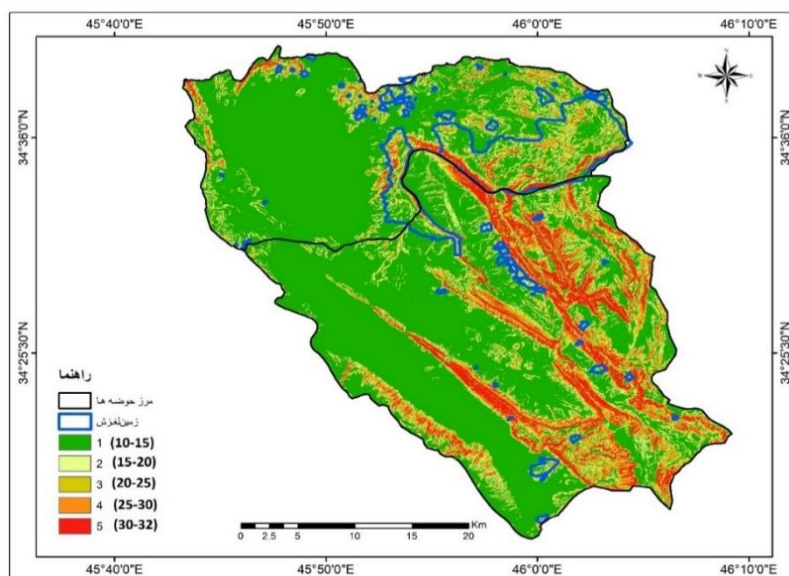
شکل ۴. نمودار نسبت مساحت زمین‌لغزش‌ها به مساحت زیرحوضه‌ها با توجه به طبقه فعالیت زمین‌ساختی زیرحوضه‌ها

تحلیل پراکندگی زمین‌لغزش‌ها در ارتباط با سازندهای زمین‌شناسی

بررسی لیتولوژی محدوده تحت بررسی نشان می‌دهد که در حوضه تنگ حمام، بیش از ۳۴ درصد از سطح حوضه را پادگانه‌های آبرفتی جدید پوشانده‌اند. همچنین سازند امیران ۳۰/۱۴ درصد و سازند آسماری ۱۲/۴۶ درصد از سطح این حوضه را در بر می‌گیرند. در مقابل، در حوضه الوند، سازند آسماری بیشترین گستردگی را دارد و بیش از ۵۲ درصد از سطح حوضه را شامل می‌شود. پس از آن، پادگانه‌های آبرفتی جدید ۲۵/۹۷ درصد و سازند گچساران ۶/۸۸ درصد از مساحت حوضه را در بر دارند. باتوجه به بررسی پراکندگی زمین‌لغزش‌ها در سازندهای زمین‌شناسی در حوضه تنگ حمام، بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها در سازند امیران (۵۶/۷۲ درصد) مشاهده می‌شود. این سازند شامل سنگ‌های نرم، رسی و مارنی با مقاومت برشی کم است که در برابر هوازدگی آسیب‌پذیر و نفوذپذیرند و همین امر احتمال وقوع لغزش را افزایش می‌دهد. همچنین ۲۶/۴ درصد از زمین‌لغزش‌ها در پادگانه‌های آبرفتی جدید رخ داده‌اند. این نهشته‌ها به دلیل ترکیب سست و غیرسیمانی، به تغییرات رطوبتی و ناپایداری حساس‌اند. در حوضه الوند، بیشترین زمین‌لغزش‌ها در سازند آسماری با ۶۱/۳۳ درصد رخ داده‌اند. این سازند اغلب از آهک‌های ضخیم‌لایه تا توده‌ای تشکیل شده است که به‌طور معمول مقاومت زیادی دارند، اما قرارگیری این سازند روی سازند پابده که ترکیبی از مارن‌ها، شیل‌ها و آهک‌های رسی و سست دارد سبب شده است که تفاوت مقاومت لایه‌های سخت و مقاوم روی سازندهای سست و ضعیف، به‌همراه همسویی شیب توپوگرافی با شیب ساختمانی به‌خصوص در دامنه کوه شاه‌نشین، شرایط برای وقوع زمین‌لغزش فراهم شود. همچنین ۷/۰۹ درصد از زمین‌لغزش‌ها در سازند پابده رخ داده‌اند که به دلیل ترکیب مارنی و شیل‌دار به‌طور طبیعی مستعد ناپایداری است.

تحلیل کمی توزیع مکانی زمین‌لغزش‌ها در ارتباط با شیب توپوگرافی

نتایج به‌دست‌آمده از بررسی شیب منطقه نشان می‌دهد که حدود ۸۴/۶۲ درصد از تعداد زمین‌لغزش‌ها در مناطقی با شیب بیش از ۱۵ درجه رخ داده‌اند. همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود، تمرکز رخدادها اغلب در مناطق کوهستانی حوضه قرار دارد، جایی که شیب بیشتر بوده و شرایط ژئومورفولوژیک برای ناپایداری مساعدتر است. در حوضه الوند، نسبت تعداد و مساحت زمین‌لغزش‌ها در طبقات شیب مختلف، مطلوب است، اما در حوضه تنگ حمام با افزایش طبقات شیب، بخش بزرگی از مساحت هر طبقه توسط زمین‌لغزش‌ها پوشیده شده است، به‌طوری که در بازه شیب ۳۰ تا ۳۳ درجه، حدود ۵۷/۳۵ درصد از مساحت را زمین‌لغزش در بر گرفته است. با این حال باید توجه داشت که طبقات شیب بالاتر (۴ و ۵، یعنی بازه‌های بیشتر از ۲۵ درجه) در مقایسه با طبقات دیگر، مساحت کمتری را در حوضه پوشش می‌دهند. این موضوع می‌تواند عامل مؤثری در کاهش تعداد زمین‌لغزش‌های ثبت‌شده در این طبقات باشد.



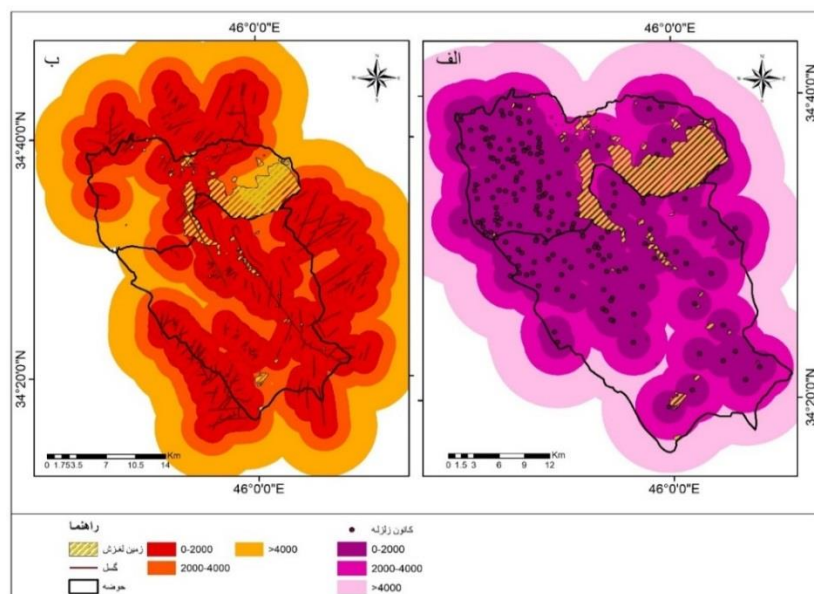
شکل ۵. نقشه شیب منطقه پژوهش و پراکندگی زمین لغزش‌ها

بررسی پراکنش زمین لغزش‌ها و ارتباط آن با گسل‌ها و کانون‌های زمین لرزه

شدت تکان‌ها و ارتعاشات زمین لرزه، عامل اصلی حرکت دامنه‌ها هنگام وقوع زمین لرزه است (کیفر، ۱۹۸۴). همچنین تداوم تکان‌های زمین لرزه در ایجاد زمین لغزش دارای اهمیت است، زیرا مدت زمان طولانی زمین لرزه هرچند با شدت کم، می‌تواند موجب کاهش مقاومت داخلی توده شود و گسیختگی ایجاد کند (جیپسون، هارپ و میشل، ۲۰۰۰). از این رو بررسی گسل‌ها به دلیل توان لرزه‌زایی آنها دارای اهمیت است (شعاعی، ۱۳۹۴: ۱۳۲). اگرچه همه پهنه زاگرس چین خورده، در یک رژیم لرزه زمین ساختی پیوسته قرار دارد، مطالعه پراکندگی کانون زمین لرزه‌ها نشان می‌دهد که تمرکز کانون‌ها در همه جا یکسان نیست و در بعضی نواحی، ویژگی لرزه زمین ساختی از اهمیت بیشتری برخوردار است (آقابیاتی، ۱۳۸۳: ۵۱). با توجه به عوامل یادشده و با استناد به شواهد حاصل از بررسی‌های میدانی از جمله وقوع زمین لغزش‌های متعدد، وجود درز و شکاف‌ها و گسیختگی‌های سطحی، همراه با داده‌های مربوط به کانون‌های لرزه‌نگاری و تحلیل نقشه‌های زمین شناسی مانند وجود گسل‌ها، زمین ساخت منطقه بررسی شد. بیشتر گسل‌های منطقه دارای امتداد شمال شرق - جنوب غرب هستند که برخلاف جهت ناهموازی‌های زمین ساختی زاگرس است و تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی این رشته کوه قرار دارند (شکل ۶). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که ۹۷/۲۴ درصد از مساحت زمین لغزش‌ها در فاصله‌ای کمتر از ۲ کیلومتر از گسل‌های فعال رخ داده‌اند. همچنین ۹۵/۳۸ درصد از سطح زمین لغزش‌ها نیز در شعاع کمتر از ۲ کیلومتری از کانون‌های زمین لرزه به وقوع پیوسته‌اند. در مجموع، درصد وقوع زمین لغزش‌ها با افزایش فاصله از گسل‌ها (۱/۰۶) و کانون‌های زمین لرزه (۰/۲۴) به حداقل می‌رسد.

بحث

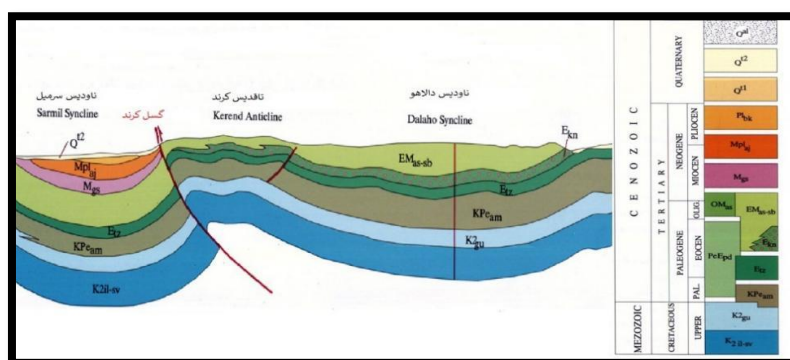
تحلیل داده‌های حاصل از شناسایی و بررسی ۶۵ رخداد زمین لغزش در منطقه پژوهش، نشان‌دهنده تأثیرپذیری زیاد برخی بخش‌ها، به ویژه حوضه تنگ حمام از شرایط زمین ساختی و مورفولوژیکی است. تمرکز بیشتر زمین لغزش‌ها در این حوضه و مقایسه آن با حوضه الوند که درصد بسیار کمتری از سطح آن تحت تأثیر لغزش‌ها قرار گرفته، بر اثر ترکیبی عوامل تکتونیکی، شیب و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی در بروز ناپایداری‌ها تأکید دارد. مشاهدات میدانی نیز قرینه‌ای بر فعالیت‌های لغزشی گذشته و جدید است و نشانه‌هایی همچون شکستگی‌های سطحی، جابه‌جایی پوشش گیاهی و تغییر مسیر آبراهه‌ها، از ناپایداری‌های بالقوه و فعال حکایت دارند. تقسیم حوضه‌ها به زیرحوضه‌ها در این پژوهش، امکان تحلیل دقیق‌تری از تنوع ساختمانی و مورفومتریکی درون حوضه‌ای را فراهم کرده است. شاخص‌های مورفوتکتونیکی نشان می‌دهند که منطقه در مجموع از نظر زمین ساختی در وضعیت فعالیت متوسط قرار دارد، اما در سطح زیرحوضه‌ای ناهمگنی چشمگیری مشاهده می‌شود. برای مثال، در حوضه تنگ



شکل ۶. الف: نقشه فاصله از کانون‌های زمین‌لرزه در محدوده حوضه‌های تنگ حمام و الوند. ب: نقشه فاصله از گسل‌ها در محدوده حوضه‌های تنگ حمام و الوند

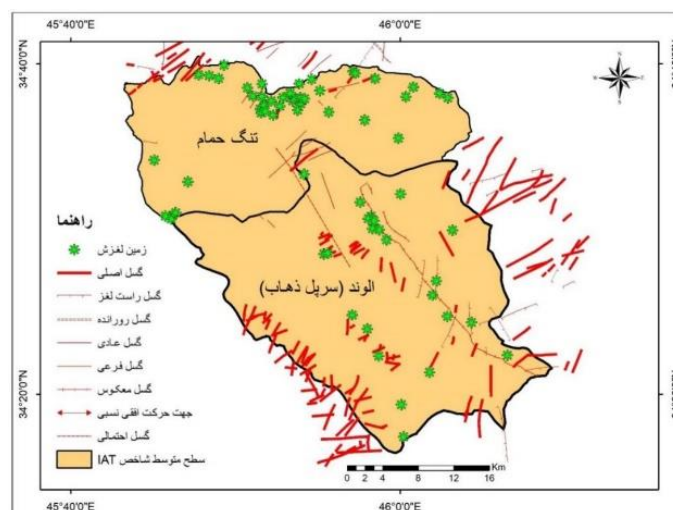
حمام، زیرحوضه ۲ فعالیت تکتونیک زیاد و زیرحوضه ۳ فعالیت تکتونیک کمی دارند. چنین تفاوت‌هایی ممکن است ناشی از کنترل محلی گسل‌ها، تغییرات لیتولوژیکی و اختلاف در مقدار فرسایش یا فعالیت‌های انسانی باشد. نتایج تحلیل شاخص‌های ژئومورفومتری مانند انتگرال هیپسومتری، سینوسیته جبهه کوهستان و شاخص شکل حوضه نیز حاکی از آن است که در برخی مناطق اثرهای تکتونیک بر فرم و ساختار حوضه‌ها بارز است، درحالی که در برخی دیگر، نشانه‌هایی از پایداری ساختاری و فرسایش کامل دیده می‌شود. چنین تغییراتی می‌تواند نتیجه تفاوت در نرخ بالآمدگی تکتونیک یا تفاوت در چرخه‌های فرسایش و رسوبگذاری در مقیاس‌های زمانی مختلف باشد. می‌توان گفت کارایی برخی شاخص‌ها در تعیین دقیق شدت فعالیت‌های تکتونیک، به‌ویژه در مناطق چین‌خورده و دارای ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی، محدود است. برای مثال شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi) در مناطق دارای فرورفتگی ساختمانی مانند ناودیس‌ها، به دلیل برداشت نادرست از توزیع ارتفاعی به‌عنوان منطقه فرسایش‌یافته، ممکن است مقادیر کمتری را نشان دهد که به‌اشتباه، منطقه‌ای با فعالیت کم تفسیر شود. همچنین در مناطق دارای خمیدگی‌ها و ساختارهای چین‌خورده، این شاخص نمی‌تواند بازتاب‌دهنده فعالیت‌های تکتونیک باشد. تمرکز بیش از ۸۴ درصد زمین‌لغزش‌ها در شیب‌های بیشتر از ۱۵ درجه، اهمیت این عامل در بروز ناپایداری‌های دامنه‌ای را تأیید می‌کند. این الگو در دیگر مناطق کوهستانی نیز مشاهده شده است، به‌طوری که در ژاپن نشان داده شده است که بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها در بازه‌های شیب ۱۵ تا ۳۰ درجه رخ می‌دهد، درحالی که در شیب‌های بسیار زیاد، به دلیل محدود بودن مساحت و شرایط زمین‌ریخت‌شناسی خاص، تراکم لغزش‌ها کاهش می‌یابد (آیالو و یاماگیشی، ۲۰۰۵: ۱۴). از سوی دیگر، ارتباط مکانی بین رخدادهای زمین‌لغزش با گسل‌ها و کانون‌های زمین‌لرزه، یکی دیگر از محورهای مهم تحلیل است. تراکم بیش از ۹۵ درصد زمین‌لغزش‌ها در شعاع کمتر از ۲ کیلومتر از گسل‌ها و نزدیکی زمین‌لغزش‌ها به کانون‌های زمین‌لرزه، نشان می‌دهد که فعالیت لرزه‌ای و ساختارهای تکتونیک، اثر مهمی در القای ناپایداری دامنه‌ها دارند. از جمله فعالیت گسل‌ها در منطقه می‌توان به گسل کرد اشاره کرد که فعالیت آن به‌عنوان گسل اصلی، اثر زیادی در شکل‌گیری ساختار ناودیس ريجاب و شرایط ناپایداری زمین در منطقه دارد. مطابق با پژوهش علایی طالقانی و رحیم‌زاده (۱۳۹۲)، این گسل سبب تغییر حالت و حرکت لایه‌های آهکی و دولومیتی ناودیس ريجاب در منطقه و شکل‌گیری دیواره‌های پرشیب در حواشی آن شده است که خود از عوامل مؤثر در افزایش پتانسیل زمین‌لغزش‌هاست. از نظر ساختاری، کوه شاه‌نشین در یال جنوبی بخش غربی ناودیس ريجاب قرار گرفته است. در بررسی میدانی نیز مشاهده شد که بخش‌هایی از زمین‌لغزش مله کبود در دامنه کوه شاه‌نشین و زمین‌لغزش‌های بخش شمالی حوضه، در نزدیکی این ساختارهای گسلی و دیواره‌های پرشیب ناودیس ريجاب واقع شده‌اند. این شرایط حاکی از آن است که تمرکز

تنش‌های زمین‌ساختی در حاشیه ناودیس و افزایش شیب دامنه‌ها در نتیجه جابه‌جایی‌های ساختاری، می‌تواند شرایط مساعدی برای وقوع زمین‌لغزش فراهم کرده باشد. در بخش غربی زمین‌لغزش مله کبود نیز شواهدی از گسل‌های کششی مرتبط با تاق‌دیس‌های فرسایش یافته مشاهده شده است که ایجاد شکستگی در سنگ و فراهم آوردن مسیرهای نفوذ آب، در تسریع فرایند لغزش مؤثر بوده‌اند. از نظر زمین‌شناسی نیز، در تنگ حمام بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها در سازند امیران به دلیل نفوذناپذیری و مقاومت کم (۵۶/۷۲) و در پادگانه‌های آبرفتی جدید به علت ترکیب سست و فاقد سیمان (۲۶/۴) مشاهده می‌شود. در حوضه الوند و بخش‌هایی از حوضه تنگ حمام، رخداد زمین‌لغزش‌ها در سازند آسماری نیز به وقوع پیوسته است. قرارگیری سازندهای سست و ناپایدار مانند پایده در زیر سازند سخت و مقاوم آسماری، شرایط ناپایداری دامنه‌ای را فراهم کرده است که نتیجه آن، به‌ویژه در دامنه کوه شاهنشین، وقوع زمین‌لغزش‌های متعدد بوده است. در یال جنوبی، تاق‌دیس‌ها بر گشته و جابه‌جا شده است، به‌گونه‌ای که سنگ آهک‌های سازند آسماری شهبازان روی سازندهای آماجاری و گچساران رانده شده‌اند که در پیشانی راندگی، سبب لغزش‌ها و ریزش‌های سنگی در سازند آسماری-شهبازان شده و واحدهای جوان‌تر را پوشانده است (شکل ۷).



شکل ۷. نیم‌رخ زمین‌شناسی و ستون چینه‌شناسی تاق‌دیس‌ها در منطقه پژوهش

در مجموع، نتایج شاخص‌های مورفوتکتونیک و IAT با وقوع زمین‌لغزش‌ها تناسبی زیادی ندارد، اما در مقابل گسل‌ها و کانون‌های زمین‌لرزه و همچنین ویژگی ژئومورفیک پرتگاه‌ها به‌خصوص حاشیه ناودیس معلق ریحاب، نقش مهم‌تری در وقوع زمین‌لغزش‌ها داشته‌اند. به‌طور کلی، نتایج تحلیل داده‌های مکانی، آماری و ساختاری نشان می‌دهد که منطقه پژوهش تحت تأثیر مجموعه‌ای از فرایندهای زمین‌ساختی فعال و نیمه‌فعال قرار دارد و زمین‌لغزش‌ها در این منطقه، بیشتر در نقاطی رخ داده‌اند که تحت تأثیر همزمان چند عامل (مانند زمین‌شناسی گسل‌ها، کانون‌های زمین‌لرزه، شیب و ویژگی‌های خاص مورفومتری) قرار داشته‌اند. این مسئله بر ضرورت نگاه چندمتغیره و تلفیقی در تحلیل مخاطرات ژئومورفولوژیک مانند زمین‌لغزش تأکید دارد (شکل ۸).



شکل ۸. فعالیت زمین‌ساختی منطقه پژوهش و پراکندگی زمین‌لغزش‌ها

نتیجه‌گیری

بررسی زمین‌لغزش‌ها در دو حوضه تنگ حمام و الوند (سرپل ذهاب) با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک و تحلیل‌های مکانی نشان داد که منطقه پژوهش دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط است. با این حال، ناهمگنی زیادی در شدت فعالیت تکتونیک در سطح زیرحوضه‌ها مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تأثیرپذیری متفاوت بخش‌های مختلف حوضه‌ها از فرایندهای زمین‌ساختی است. مقایسه شاخص‌های انتگرال هیپسومتری (Hi) و سینوسیته جبهه کوهستان (Smf) و بقیه پارامترها بین حوضه‌ها، گویای آن است که حوضه تنگ حمام در مجموع نسبت به حوضه الوند (سرپل ذهاب) ناپایدارتر و لغزش‌پذیرتر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که شیب عاملی مهم در بروز زمین‌لغزش است، به طوری که بیشترین تراکم زمین‌لغزش‌ها در بازه شیب ۱۵ تا ۳۰ درجه مشاهده شده است؛ این امر نشان‌دهنده حساسیت زیاد دامنه‌ها در شیب‌های متوسط است. وجود بیش از ۹۵ درصد از زمین‌لغزش‌ها در مجاورت کمتر از ۲ کیلومتری گسل‌ها و کانون‌های زمین‌لرزه نیز بر اثر مهم ساختارهای تکتونیک و فعالیت لرزه‌ای در ایجاد ناپایداری‌های دامنه‌ای تأکید دارد. بررسی لیتولوژیکی منطقه پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین رخداد زمین‌لغزش‌ها در سازندهایی مانند امیران، پابده و پادگانه‌های آبرفتی جدید مشاهده می‌شود؛ سازندهایی که به دلیل نفوذناپذیری، مقاومت کم و ناپایداری ذاتی، مستعد وقوع لغزش‌اند. همچنین قرارگیری سازندهای مقاوم مانند آسماری روی واحدهای سست و ضعیف، با ایجاد شرایط ناپایدار به دلیل همسویی شیب توپوگرافی با شیب ساختمانی، تأثیر مهمی در تحریک و تسهیل وقوع زمین‌لغزش در منطقه دارد. در نهایت، نتایج این پژوهش بیانگر اهمیت تحلیل ترکیبی شاخص‌های ژئومورفولوژیکی، داده‌های لرزه‌ای، شرایط زمین‌شناسی و ساختارهای تکتونیک در ارزیابی دقیق‌تر خطر زمین‌لغزش است. چنین رویکردی می‌تواند مبنای مناسبی برای مدیریت ریسک، برنامه‌ریزی کاربری زمین و توسعه پایدار در مناطق کوهستانی و لرزه‌خیز فراهم آورد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در اجرا و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در همه مراحل نگارش، تجزیه و تحلیل، پژوهش‌های میدانی و مدل‌سازی مشارکت داشته‌اند.

حامی مالی

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

همانند جویی

نتیجه همانندجویی مقاله از ایرانداک ۹ درصد است.

منابع

- [۱] آقائباتی، سیدعلی (۱۳۸۳). زمین‌شناسی/ایران. تهران: سازمان زمین‌شناسی کشور.
- [۲] جباری، ندا؛ ثروتی، محمدرضا؛ و حسین‌زاده، محمدمهدی (۱۳۹۱). مطالعه مورفوتکتونیک فعال حوضه آبخیز حصارک (شمال غرب تهران) با استفاده از شاخص‌های تکتونیک. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱(۲)، ۳۴-۱۷.
- [۳] رضائی، بهمن؛ و ابراهیمی، هدی (۱۳۸۸). زمین‌لغزش و راهکارهای تثبیت آن. *فصلنامه جغرافیایی آمایش*، (۷)، ۱۱۰-۱۱۸.
- [۴] شریعت جعفری، محسن (۱۳۷۶). *زمین‌لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی)*. سازه.
- [۵] شعاعی، ضیاءالدین (۱۳۹۴). *زمین‌لغزش‌ها: شناخت، ارزیابی و کنترل*. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [۶] شیرانی، کورش؛ و خوش‌باطن، محبوبه (۱۳۹۵). بررسی و پایش زمین‌لغزش فعال با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: زمین‌لغزش نقل، سمیرم). *کواترنری ایران*، ۳(۱)، ۵۳-۶۵.
- [۷] صبوری، سعیدمحمد؛ حاجی‌علی‌بیگی، حسین؛ طالبیان، مرتضی؛ و فتاحی، مرتضی (۱۴۰۰). بررسی ارتباط فراوانی رخداد زمین‌لغزش با تکتونیک فعال در منطقه شمال قزوین. *منابع طبیعی ایران*، ۷۴(۲)، ۴۲۳-۴۳۶.
- [۸] صفاری، امیر؛ یمانی، مجتبی؛ کرم، عبدالامیر؛ و کرمی، پریش (۱۳۹۷). تأثیرات مورفوژنتیکی تکتونیک فعال بر زمین‌لغزش در حوضه جاجرود. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۷(۳)، ۱۱۷-۱۳۵.
- [۹] کیانی، طیب؛ ندیم، هیراد؛ و غفورپور، عنبران، پرستو (۱۳۹۹). بررسی ویژگی‌های زمین‌ساخت فعال در گستره رودبار با نگرش ویژه بر زمین‌لغزش‌های منطقه. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۷(۱)، ۶۵-۸۸.
- [۱۰] مقیمی، ابراهیم؛ علوی‌پناه، سیدکاظم؛ و جعفری، تیمور (۱۳۸۷). ارزیابی و پهنه‌بندی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش دامنه‌های شمالی آلاداغ (مطالعه موردی: حوضه زهکشی چناران در استان خراسان شمالی). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۶۴، ۵۳-۷۵.
- [۱۱] منصوری، رضا؛ و صفاری، امیر (۱۳۹۴). تحلیل فعالیت زمین‌ساختی حوضه آبخیز فرحزاد از طریق شاخص‌های ژئومورفیک. *اطلاعات جغرافیایی (سپهر)*، ۲۴(۹۵)، ۹۳-۱۰۵.
- [۱۲] مهرپویا، محمدرضا؛ و قویمی‌پناه، محمدحسین (۱۴۰۴). شناسایی عوامل مؤثر و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چالوس). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱۵(۱)، ۲۴۷-۲۶۴.
- [۱۳] میرنظری، جواد؛ شهابی، هیمین؛ و خضری، سعید (۱۳۹۱). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل AHP و عملگرهای منطق فازی در حوضه آبریز پشت تنگ سرپل ذهاب (استان کرمانشاه). *جغرافیا و توسعه*، ۱۲(۳۷)، ۵۳-۷۰.
- [۱۴] ناصری، فروزان؛ بهرامی، شهرام؛ صالحی‌پور میلانی، علیرضا؛ و احتشامی معین‌آبادی، محسن (۱۴۰۴). ارزیابی پراکندگی و ارتباط زمین‌لغزش‌های گستره ایلام-مهران با زمین‌ساخت و شاخص‌های ژئومورفولوژی. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*.
- [۱۵] نوحه‌گر، احمد؛ خورانی، اسدالله؛ و تمسکی، احسان (۱۳۹۲). تحلیل اقلیمی گردوغبار معلق در ایستگاه هواشناسی سرپل ذهاب (۱۹۸۶-۲۰۰۹). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۲(۶)، ۸۹-۱۰۲.
- [۱۶] یمانی، مجتبی؛ محمدی، احمد؛ و نگهبان، سعید (۱۳۸۹). پهنه‌بندی زمین‌لغزش در حوضه آبخیز تنکابن با استفاده از مدل‌های کمی. *جغرافیا و توسعه*، ۸(۱۹)، ۸۳-۹۸.
- [17] Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15-31.
- [18] Conforti, M., & Ietto, F. (2020). Influence of tectonics and morphometric features on the landslide distribution: a case study from the Mesima Basin (Calabria, South Italy). *Journal of Earth Science*, 31(2), 393-409.
- [19] Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 43(1).
- [20] Ehteshami-Moinabadi, M. (2022). Properties of fault zones and their influences on rainfall-induced landslides, examples from Alborz and Zagros ranges. *Environmental Earth Sciences*, 81(5), 168.
- [21] El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), 150-173.
- [22] El Hamdouni, R., Irrigaria, C., Fernandez, T., Fernandez, P., Jimenez, J., & Chacon, J. (2006). Active tectonics as determinant factor in GIS landslides susceptibility mapping: application to the SW border of Sierra Nevada (Granada, Spain). In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 8, p. 03154).
- [23] Geertsema, M., Highland, L., & Vagueouis, L. (2009). *Environmental impact of landslides. Landslides—disaster risk reduction*, 589-607.

- [24] Huang, Y., Tyata, U., Liang, D., Gao, Y., & Yang, Q. (2025). Considering tectonic uplift in landslide susceptibility assessment using MaxEnt model: a case study of Trishuli River watershed. *Environmental Earth Sciences*, 84(7), 181.
- [25] Islah, M; Zareshahi, H; Malekzadeh Bafghi, Sh; Hassanabadi, A. (2015). Landslide investigation using radar images, tacheometry and GPS. 22nd National Geomatics Conference and Exhibition.
- [26] Jamir, I., Gupta, V., Thong, G. T., & Kumar, V. (2020). Litho-tectonic and precipitation implications on landslides, Yamuna valley, NW Himalaya. *Physical Geography*, 41(4), 365-388.
- [27] Jibson, R. W., Harp, E. L., & Michael, J. A. (2000). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering geology*, 58(3-4), 271-289.
- [28] Keefer, D.K., 1984. Landslides caused by earthquakes. Bulletin of the Geological Society of America.
- [29] Peck, R. B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geotechnique*, 19(2), 171-187.
- [30] Sahraei, H., Ehteshami-Moinabadi, M., & Alavi, S. A. (2023). Variation of seismicity parameters and its link to tectonic features of the central portion of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Geol Carpathica*, 74(4), 355-369.
- [31] Thakur, M., Kumar, N., Dhiman, R. K., & Malik, J. N. (2023). Geological and geotechnical investigations of the Sataun landslide along the Active Sirmauri Tal Fault, Sataun, Northwestern Himalaya, India. *Landslides*, 1-19.
- [32] Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Landslides and engineering practice*, 24, 20-47.
- [33] Wu, H., Cui, S., Pei, X., Huang, R., He, L., & Guo, J. (2022). Earthquake-induced landslide erosion coupled to tectonics and river incision, and effects of ground motion on coupled patterns. *CATENA*, 216, 106334.