



Evaluation of distribution of landslides of Ilam-Mehran area and their relationship with tectonics and geomorphologic indices

Forouzan Naseri ¹, Shahram Bahrami ², Alireza Salehi pour milani ³,
Mohsen Ehteshai_Moinabadi ⁴

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

Email: f_naseri@sbu.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Email: sh_bahrami@sbu.ac.ir

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

Email: ar.salehipour@gmail.com

4. Department of Petroleum Sedimentary Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Email: ehteshami58@gmail.com

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

9 June 2025

Received in revised form:

8 July 2025

Accepted:

13 July 2025

pp.59-83

Keywords:

Tectonics,
Landslides,
Morphometry,
Iat Index,
Southwestern Zagros.

ABSTRACT

Landslides are one of the most important slope movements that often cause serious damage to human life. Studies conducted around the world indicate that landslides are more frequent in tectonically active areas. The study area is part of the folded Zagros in southwestern Iran, including the Ilam-Mehran range. The aim of this research is to identify landslides and examine their distribution and spatial relationship with tectonic parameters. In this study, 257 landslides were identified in the study area using field studies and satellite images. To assess the distribution and relationship of these landslides with tectonics, geomorphological indices including hypsometric integral (Hi), the stream length-gradient index (SL), the basin asymmetry factor (AF), the basin shape (Bs), the ratio of valley floor width to valley height (Vf), and the index of mountain-front sinuosity (Smf) were calculated for the watersheds of the study area, and the relative tectonic activity of the region was obtained using the Iat index. Also, a quantitative relationship between the epicenter of earthquakes, faults, and landslide frequency was examined. The results obtained from studying the distribution of landslides relative to the epicenter of earthquakes and faults show that landslides are mostly concentrated in the vicinity of active faults and close to the epicenter of earthquakes (with a radius of less than 2 km), and proximity to structural fractures and seismic activity have played an important role in triggering landslides. By moving away from these tectonic features, the frequency and intensity of landslides decreases. The study of geomorphological indices and relative tectonic activity index (Iat) indicates moderate tectonic activity in the Ilam (2.33), Salehabad (2.33), and Mehran 1 (2.33) basins and high tectonic activity in the Mehran 2 basin (2). The results show that, with the increase in hypsometric integral (Hi) in sub-basins, the value of landslide density (LD) and the ratio of landslide area to total basin area (LA) indices increases. This indicates that younger (with higher Hi) and steeper basins are more prone to landslides. Combining tectonic, seismic, and morphometric data of basins shows that in subbasins with high tectonic activity, the LA value increases. In general, the study area is geodynamically active, and landslides, as a clear consequence of these activities, have formed under the influence of seismic activity, faults, and tectonic conditions of the region.

Cite this article: naseri,F. , bahrami,Sh. , salehi pour milani,A. and ehteshami-moinabadi,M. (2026). Evaluation of distribution of landslides of Ilam-Mehran area and their relationship with tectonics and geomorphologic indices. *Quantitative Geomorphological Research*, 14(3) 59-83. [Doi: 10.22034/gmpj.2025.529362.1566](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.529362.1566)

Extended Abstract

Introduction

Tectonic forces originate from the earth's interior and cause deformation of the earth's surface. Tectonic is important in the geomorphology, especially in terms of formation of earth surfaces (landforms), and the formation of mountain ranges is the function of tectonic forces. One of the important natural hazards in mountainous areas is landslides, which has serious consequences for human life. According to the World Development Report, 3.7 million square kilometers of the earth and 5 percent of the world's population are at risk of landslides. Studies conducted around the world also indicate that landslides occur more frequently in tectonically active areas, and that mass movements occur more frequently in mountainous areas where fault density is higher.

Methodology

The main purpose of this study is to identify landslides and investigate the effect of active tectonic parameters on the slope instability in the sub-basins of the southern part of Zagros (Ilam-Mehran range). Therefore, initially, 257 small and large landslides were identified and characterized using a digital elevation model with a resolution of 12.5 m, 1:50,000 scale topographic maps, satellite images in Google Earth, Arc GIS, and Global Mapper softwares. Then, through more detailed studies in images with higher spatial resolution and field works, the study area was studied on a case-by-case basis and the suspected cases were verified (Figure 3). Next, to evaluate the spatial relationship of landslide occurrence, the tectonic activity of the sub-basins was extracted using Arc Hydro software. Finally, to estimate the relative tectonic activity index (Iat), morphometric indices such as hypsometric integral (Hi), stream length-gradient index (SL), basin asymmetry (AF), basin shape (Bs), the ratio of valley floor width to valley height (Vf) and mountain front sinuosity (Smf); and to investigate the uneven conditions of sub-basins, topographic slope

(S), the ratio of landslide area to total basin area (LA), landslide density (LD) and Melton index (Me) were calculated and the statistical relationship between the indices was estimated using the Pearson correlation test. Also, faults and their structural information were extracted using 1:100,000 scale geological maps of Mehran, Ilam, Palanganeh and Somar, and data related to the epicenter of earthquakes were obtained from the database of the National Seismological Center.

Results and discussion

Evaluation of the spatial distribution of 257 identified landslides shows that the largest number of landslides was observed in the Ilam, Mehran 1, Mehran 2, and Salehabad basins, respectively. In terms of the ratio of landslide area to the total basin area (LA), Mehran 2 basin has the largest portion with 4.66 percent, which indicates the high sensitivity of this basin to the occurrence of landslides. In contrast, Salehabad basin has the lowest landslide area with 2.35 percent. Analysis of the relationship between landslides and faults shows that more than 57 percent of landslides occurred within a distance of less than 2 km from faults. This finding indicates that fault activity plays a fundamental role in creating unstable conditions on slopes. Also, the investigation of the distribution of landslides in relation to earthquake centers shows a direct relationship between landslides and earthquake occurrence. About 68.87 percent of the landslides occurred less than 4 kilometers from the earthquake focus with a magnitude of more than 2.5 on the Richter scale. The findings show that with increasing distance from the earthquake focus, the percentage of landslides decreases significantly, which indicates a decrease in the impact of seismic waves on the occurrence of these phenomena. In fact, the vibrations caused by earthquakes play a major role in the activation of landslides, and in areas where the faults have less activity or there are no earthquake centers, the frequency of landslides is reduced and their

spreading is increased. The results of morphometric indices show that the Ilam, Mehran 1 and Salehabad basins are in the medium tectonic activity class, and the Mehran 2 basin, being in the high tectonic activity class, has a higher level of tectonic activity. On the other hand, the distribution of landslides in the basins, considering their size and area, confirms the existence of active tectonics in the region. Especially, the Mehran 2 basin, despite its smaller size, has a high level of tectonic activity and demonstrates the highest frequency of landslides. Also, the results of the analysis of the ratio of the area of landslides to the area of sub-basins (LA) indicate that this ratio increases significantly with an increase in the tectonic activity class. This indicates that in sub-basins with higher tectonic activity, the extent of landslides is relatively greater and their probability of occurrence increases. In general, the results of the assessment of the tectonic activity of the region, based on the quantitative relationship between landslides and parameters such as faults, earthquake foci, basin area, and Iat index, indicate that the region is tectonically active and each of these factors has had a positive impact on the occurrence of landslides independently.

Conclusion

In this study, the relative tectonic activity of the study area, which is part of the folded Zagros, was investigated using the Iat index calculation and also by examining the earthquake foci and faults. The findings show that landslides are mostly concentrated in the vicinity of active faults and close to earthquake epicenters, and proximity to structural fractures and seismic activity has played an important role in triggering landslides. By moving away from these tectonic elements, the frequency and intensity of landslides decrease. Therefore, it can be said that faults and earthquake foci, as the main drivers, have a direct impact on the occurrence and spread of landslides in the region. Also, the study of geomorphological indices and relative tectonic activity index (Iat) shows moderate activity of Ilam, Mehran 1 and Salehabad basins and high activity of Mehran 2 basin. The distribution of landslides in the studied

basins shows that the phenomenon of slope instability has occurred significantly in all basins, but its rate is higher in some basins. The significant positive correlation between landslide density and the ratio of landslide area to the basin hypsometric integral and Melton index indicates the effective role of tectonic activities and the level of geomorphological dynamics of the basin in increasing the number and extent of landslides. In fact, in sub-basins with high tectonic activity, the area of landslides increases relative to the area of the sub-basin. Therefore, some basins, such as Mehran 2, despite their smaller basin size, witness a greater number and extent of landslides, which indicates their high sensitivity to factors affecting instability, especially tectonic factors. In general, the integration of tectonic, seismic, and morphometric data of the basins shows that the studied area is geodynamically active and landslides, as a clear consequence of these activities, have been formed under the direct influence of seismic activity, faults, and tectonic conditions of the region.

Funding

This work is based upon research funded by Iran National Science Foundation (INSF) under project No.4027911.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

ارزیابی پراکندگی و ارتباط زمین لغزش‌های گستره ایلام-مهران با زمین ساخت و شاخص‌های ژئومورفولوژی

فروزان ناصری^۱، شهرام بهرامی^۲✉، علیرضا صالحی پور میلانی^۳، محسن احتشامی معین آبادی^۴

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: f_nasari@sbu.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: sh_bahrami@sbu.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: ar.salehipour@gmail.com

۴- گروه حوضه‌های رسوبی نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: ehteshami58@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	زمین لغزش یکی از مهم‌ترین حرکات دامنه‌ای است که اغلب منجر به ایجاد خسارت‌های جدی در زندگی انسان می‌شود. مطالعات صورت گرفته در سراسر جهان حاکی از آن است که وقوع زمین لغزش‌ها در مناطق فعال زمین ساختی، دارای فراوانی بیشتری است. منطقه مورد مطالعه بخشی از زاگرس چین خورده در جنوب غربی ایران، شامل گستره ایلام-مهران است. هدف این تحقیق، شناسایی زمین لغزش‌ها و بررسی پراکندگی و ارتباط مکانی آن‌ها با پارامترهای زمین ساختی است. در این مطالعه، با استفاده از مطالعات میدانی و تصاویر ماهواره‌ای تعداد ۲۵۷ زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد. جهت ارزیابی پراکندگی و ارتباط این زمین لغزش‌ها با زمین ساخت، شاخص‌های ژئومورفولوژی از جمله انتگرال هیپسومتری (Hi)، گرادیان طولی رودخانه (SL)، عدم تقارن حوضه (AF)، نسبت شکل حوضه (Bs)، پهنای عرض کف دره (Vf) و سینوسیته جبهه کوهستان (Smf) برای حوضه‌های آبریز منطقه مورد مطالعه محاسبه گردید و با استفاده از شاخص Iat میزان فعالیت نسبی زمین ساختی منطقه به دست آمد. همچنین ارتباط کمی بین رومرکز زمین لرزه‌ها، گسل‌ها و فروانی زمین لغزش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از بررسی پراکندگی زمین لغزش‌ها نسبت به رومرکز زمین لرزه‌ها و گسل‌ها نشان می‌دهد که زمین لغزش‌ها بیشتر در مجاورت گسل‌های فعال و نزدیک به رومرکز زمین لرزه‌ها (با شعاع کمتر از ۲ کیلومتر) متمرکز شده‌اند و نزدیکی به شکستگی‌های ساختاری و فعالیت‌های لرزه‌ای نقش مهمی در تحریک لغزش دامنه‌ها ایفا کرده است. با فاصله گرفتن از این عناصر زمین ساختی، فراوانی و شدت زمین لغزش‌ها کاهش می‌یابد. بررسی شاخص‌های ژئومورفولوژیک و شاخص مورفوتکتونیک (Iat) نشان دهنده فعالیت زمین ساختی متوسط در حوضه‌های ایلام (۲,۳۳)، صالح آباد (۲,۳۳) و مهران ۱ (۲,۳۳) و فعالیت زمین ساختی زیاد در حوضه مهران ۲ (۲) می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش انتگرال هیپسومتری (Hi) در زیرحوضه‌ها مقدار شاخص‌های تراکم زمین لغزش (LD) و نسبت مساحت زمین لغزش به مساحت کل حوضه (LA) افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد حوضه‌های جوان‌تر (با Hi بالاتر) و پرشیب‌تر، بیشتر مستعد وقوع زمین لغزش هستند. تلفیق داده‌های زمین ساختی، لرزه‌ای و مورفومتری حوضه‌ها، نشان می‌دهد که در زیرحوضه‌هایی با فعالیت زمین ساختی بالا، مساحت زمین لغزش‌ها نسبت به مساحت زیرحوضه (LA) افزایش می‌یابد. به طور کلی منطقه مورد مطالعه از نظر ژئودینامیک فعال بوده و زمین لغزش‌ها به عنوان پیامد بارز این فعالیت‌ها، تحت تأثیر فعالیت لرزه‌ای، گسل‌ها و شرایط زمین ساختی منطقه شکل گرفته‌اند.

استناد: ناصری، فروزان، بهرامی، شهرام، صالحی پور میلانی، علیرضا و احتشامی معین آبادی، محسن. (۱۴۰۴). ارزیابی پراکندگی و ارتباط زمین لغزش‌های گستره ایلام-مهران با زمین ساخت و شاخص‌های ژئومورفولوژی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۴ (۳)، ۵۹-۸۳.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.529362.1566

مقدمه

حرکات زمین‌ساختی مهم‌ترین عامل تغییر شکل و تشکیل ناهمواری در پوسته زمین از طریق فرایندهایی مانند چین‌خوردگی، گسلش و بالاآمدگی هستند (بوربانک و اندرسون^۱، ۲۰۱۲). نیروهای زمین‌ساختی از درون زمین منشأ می‌گیرند و موجب تغییر شکل در سطح زمین می‌شوند (علایی‌طالقانی، ۱۳۹۱: ۲۹). زمین‌ساخت در دانش ژئومورفولوژی به خصوص از منظر تشکیل عوارض سطحی (لندفرم‌ها) اهمیت پیدا می‌کند و تشکیل رشته‌کوه‌ها حاصل نیروهای زمین‌ساخت است. یکی از خطرات مهم طبیعی در مناطق کوهستانی زمین‌لغزش است (رامشت و باباجمالی، ۱۳۹۸: ۲۳۳) که اغلب منجر به عواقب جدی بر زندگی انسان می‌شود (هوانگ و همکاران^۲، ۲۰۲۳). بر اساس گزارش توسعه جهانی، ۳٫۷ میلیون کیلومتر مربع از کره زمین و ۵ درصد از جمعیت جهان در معرض خطر زمین‌لغزش قرار دارند (دیلی و همکاران^۳، ۲۰۰۵: ۴۴). همچنین مطالعات صورت گرفته در سراسر جهان حاکی از آن است که وقوع زمین‌لغزش‌ها در مناطق فعال زمین‌ساختی، دارای فراوانی بیشتری است (افشاری و همکاران، ۱۳۹۸) و در مناطق کوهستانی که تراکم گسل بیشتر باشد می‌توان شاهد تعدد وقوع حرکات توده‌ای بود. خطر زمین‌لغزش در نواحی که فاصله کمتری از گسل دارند بیشتر می‌باشد (نوجوان و همکاران، ۱۳۹۸).

بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها مربوط به نواحی زمین‌ساختی فعال می‌باشد (الحمّدونی و همکاران^۴، ۲۰۰۶). مطالعه اثر زمین‌ساخت بر زمین‌لغزش و رابطه این دو باهم همواره توسط محققان متعددی مورد بررسی قرار گرفته است؛ ازجمله گروم^۵ (۲۰۱۹)، تأثیرات زمین‌ساخت، توپوگرافی و نوع سنگ بر زمین‌لغزش‌های بزرگ در حاشیه شمالی فلات آناتولی را مورد بررسی قرار داد. نتایج مقایسه‌های منطقه‌ای نشان داد که علاوه بر دامنه و شیب دامنه، تفاوت‌های سنگ‌شناختی و زمین‌ساختی تا حد زیادی فراوانی زمین‌لغزش‌ها را در امتداد حاشیه‌های شمالی فلات آناتولی کنترل می‌کند. بهرامی و همکاران (۲۰۲۰)، اثرات زمین‌ساختی و سنگ‌شناسی بر وقوع زمین‌لغزش در امتداد نوار افیولیتی سروآباد را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی^۶ بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که بیشتر زمین‌لغزش‌ها نزدیک به گسل اصلی جدید و گسل اصلی معکوس زاگرس هستند. این گسل‌ها به صورت محلی مناطق کششی و فشاری را ایجاد کرده‌اند که باعث گسلش و شکستگی شدید سنگ‌ها و در نتیجه تشدید زمین‌لغزش‌ها شده است. جمیر و همکاران^۷ (۲۰۲۰)، پیامدهای سنگ‌شناختی و بارش بر زمین‌لغزش در دره یامونا در شمال غربی هیمالیا را بررسی نمودند. بخش‌های هیمالیای مرتفع^۸ و مناطق هیمالیای پست^۹ نشان‌دهنده همبستگی ریزش سنگ در ارتباط با فعالیت زمین‌ساختی نسبتاً بالا است. ابعاد لغزش در واریزه کمتر تحت تأثیر شرایط سنگ‌شناختی و بارش قرار می‌گیرد؛ در حالی که ابعاد سنگ‌افت‌ها به این شرایط حساس‌تر است. کونفورتی و لتو^{۱۰} (۲۰۲۰)، تأثیر زمین‌ساخت و ویژگی‌های مورفومتری بر توزیع زمین‌لغزش در حوضه مسیما از کالابریا، در جنوب ایتالیا را بررسی نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که سنگ‌شناسی، تراکم گسل، شیب و نقش ناهمواری‌های محلی نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش دارند. کوی و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۲)، نقش ناپیوستگی‌های

¹ Burbank and Anderson

² Huang et al

³ Dilley et al

⁴ Elhamdouni et al

⁵ Gorum

⁶ AHP

⁷ Jamir et al

⁸ HH

⁹ LH

¹⁰ Conforti and Letto

¹¹ Cui et al

زمین‌ساختی در تحریک زمین‌لغزش‌های بزرگ را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و شاخص‌های مورفومتری مورد ارزیابی قرار دادند. مقایسه زمین‌لغزش‌های هم‌لرزه با زمین‌لغزش‌های تحریک شده از گرانش، نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های قوی با کاهش مقادیر شاخص مقاومت زمین‌شناسی^۱ زمین‌لغزش‌ها، روند فرسایش را تسریع می‌کنند. اندو و ایواهاشی^۲ (۲۰۲۴)، توزیع فضایی زمین‌لغزش‌های هم‌لرزه زمین‌لرزه بزرگ کانتو در سال ۱۹۲۳ در ژاپن را تجزیه و تحلیل نمودند. آن‌ها بیان داشتند که زاویه شیب، زمین‌شناسی و تغییر شکل زمین‌لرزه به ترتیب با تراکم زمین‌لغزش ارتباط دارد و هیچ ارتباط واضحی بین تراکم زمین‌لغزش و جنبش زمین‌لرزه یافت نشد. در نهایت در مناطقی با زاویه شیب زیاد یا سنگ‌شناسی نامقاوم در منطقه با تکان‌های قوی، تراکم زمین‌لغزش بیشتر بود. آژیده و همکاران^۳ (۲۰۲۴)، به مطالعه زمین‌لغزش‌های ناشی از زمین‌لرزه در ایتالیا از طریق ارزیابی پتانسیل محرک بر اساس خطر لرزه‌ای پرداختند. برای این منظور، نقشه‌های خطر لرزه‌ای و نتایج تفکیک خطر را در مقیاس ملی با در نظر گرفتن چهار دوره طیفی و سه دوره بازگشت تجزیه و تحلیل نمودند. در نهایت به عنوان نتیجه تحقیق، نقشه‌های غربالگری برای کل ایتالیا که پتانسیل ایجاد زمین‌لغزش را بر اساس سطح خطر لرزه‌ای نشان می‌دهد، تهیه نمودند. ژانگ و همکاران^۴ (۲۰۲۵)، تکامل زمین‌لغزش‌های بزرگ در مناطق فعال زمین‌ساختی را بررسی نمودند و بیان داشتند که فعالیت زمین‌ساختی و سنگ‌شناسی نقش مهمی در توسعه زمین‌لغزش دارند. همچنین تغییرات تدریجی در آب و هوا می‌تواند به طور قابل توجهی رژیم بارش را تغییر دهد، که بر پایداری دامنه‌ها و تحرک زمین‌لغزش‌های بزرگ و کند حرکت، تأثیر می‌گذارد.

صفاری و همکاران (۱۳۹۷)، با استفاده از شاخص‌های مورفومتری به بررسی تأثیرات زمین‌ساخت فعال بر زمین‌لغزش در حوضه جاجرود پرداختند و بیان داشتند که جاجرود از نظر زمین‌ساختی بسیار فعال بوده و این موضوع استعداد روان‌گرایی دامنه‌ای و زمین‌لغزش را به نسبت افزایش داده است. افشاری و همکاران (۱۳۹۸)، کاربرد شاخص‌های مورفومتری در تحلیل مخاطرات زمین‌لغزش در راه آهن ناحیه‌ی لرستان را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که منطقه از لحاظ فعالیت‌های نوزمین‌ساختی جوان است، اما شدت فعالیت در همه جای آن یکسان نیست. همچنین بر اساس مشاهدات میدانی، بیش از ۸۰ درصد کل زمین‌لغزش‌های منطقه در محدوده‌ی فعالیت زمین‌ساختی زیاد تا بسیار زیاد قرار دارد که این موضوع نشان‌دهنده‌ی تأثیر فعالیت زمین‌ساخت بر فراوانی زمین‌لغزش‌های منطقه است. صبوری و همکاران (۱۴۰۰)، ارتباط فراوانی رخداد زمین‌لغزش با زمین‌ساخت فعال در منطقه شمال قزوین را بررسی نمودند و بیان داشتند که فعالیت‌های زمین‌ساختی باعث رخداد زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی گردیده است، به‌طوری‌که حدود ۵۹ درصد از زمین‌لغزش‌ها در نواحی گسلی واقع شده‌اند و بین فعالیت‌های زمین‌ساختی و افزایش فراوانی زمین‌لغزش‌ها رابطه مستقیم وجود دارد. جعفری و خدایی (۱۴۰۲)، در مطالعه‌ای به مورفومتری و بازسازی زمین‌لغزش معلم کلاویه براساس مشاهدات میدانی و تفسیر پدیدارشناسانه پرداختند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد که این زمین‌لغزش با ابعاد ۱٫۳ کیلومتر عرض (قسمت تاج زمین‌لغزش)، ۱٫۶ کیلومتر طول و متوسط ۸۰ متر عمق در کنگلومرای اندج رخ داده و زمین‌لغزش‌های کوچک در بالادست، شرایط هیدرولوژیکی مناطق پایین‌دست را به هم می‌ریزد و شرایط زمین‌لغزش‌های بزرگ را فراهم می‌نماید. تقوی و همکاران (۱۴۰۳)، به بررسی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش در محدوده کیاسر مازندران پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که ۶ درصد از مساحت منطقه در معرض خطر زمین‌لغزش قرار دارند. عابدینی و پیروزی (۱۴۰۳)، با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره MARCOS و CODAS بر پایه شاخص‌هایی مانند شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش و فاصله از گسل، به ارزیابی خطر زمین‌لغزش در محور ارتباطی نیر-سراب، پرداختند. یافته‌های تحقیق آن‌ها نشان داد که شیب و

¹ GSI² Endo and Iwahashi³ Azhideh et al⁴ Zhang et al

کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌ها دارند. انتظاری و همکاران (۱۴۰۳)، خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز طارم را با استفاده از مدل همپوشانی ریسک-آسیب‌پذیری و لایه‌های اطلاعاتی مختلف شامل زمین‌شناسی، توپوگرافی، بارش، تراکم آبراهه، تراکم گسل، کاربری اراضی، تراکم جاده، جمعیت و ساختمان تجزیه و تحلیل نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که نواحی شرقی و شمال‌شرقی حوضه بیشترین سطح ریسک-آسیب‌پذیری را دارا هستند و بیان داشتند که نتایج تحقیق آن‌ها می‌تواند نقش مؤثری در برنامه‌ریزی و مدیریت خطر در مناطق کوهستانی ایفا کند. گیلانی‌پور و همکاران (۱۴۰۴)، به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبخیز گلندرود، با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و عواملی مانند شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، بارش، کاربری اراضی و فاصله از گسل پرداختند. آن‌ها با شناسایی ۳۵۲ نقطه لغزشی در محدوده مورد نظر، بیان داشتند که بیش از ۳۰ درصد منطقه در کلاس خطر بسیار زیاد زمین‌لغزش قرار دارد و عامل ارتفاع بیشترین تأثیر را در وقوع لغزش‌ها دارد.

کشور ایران به دلیل شرایط لرزه‌خیزی، زمین‌شناسی و توپوگرافی متنوع از جمله کشورهایی است که وقوع زمین‌لغزش‌های متعددی را تجربه نموده است (غیومیان و همکاران، ۱۳۸۶). حرکت ورقه عربی از سمت جنوب غربی و برخورد با ورقه اوراسیا، سبب تحولات زمین‌شناسی در طول سنوزوئیک و کواترنری در فلات ایران بوده است (محل و فرگوسن^۱، ۲۰۱۴). این فرایند هنوز تداوم دارد که وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب، فعالیت گل‌فشان‌ها و بسیاری دیگر از پدیده‌های جوان در حال حاضر پیامد آن محسوب می‌شوند (علایی‌طالقانی، ۱۳۹۱: ۶۸). با توجه به خصوصیات توپوگرافی و ژئومورفولوژیکی زاگرس، وقوع زمین‌لغزش‌ها همواره یکی از تهدیدات جدی برای زیرساخت‌های انسانی و طبیعی این ناحیه بوده است. از سوی دیگر، مطالعات جامع و سیستماتیک در زمینه زمین‌لغزش‌ها در این منطقه به خصوص در گستره ایلام-مهران کمتر انجام شده است. از این رو هدف اصلی این تحقیق، شناسایی زمین‌لغزش‌ها و بررسی تأثیر پارامترهای فعال زمین‌ساختی بر ناپایداری دامنه‌ای در زیرحوضه‌های بخشی از جنوب باختری زاگرس (گستره ایلام-مهران)، می‌باشد. از آنجا که زمین‌ساخت از عوامل مهم و اثرگذار در رخداد زمین‌لغزش است. در این تحقیق زمین‌لغزش‌ها در ارتباط با فعالیت‌های زمین‌ساختی با استفاده از پارامترهای مورفومتری و پراکندگی زمین‌لرزه‌ها، بررسی و ارزیابی می‌گردد و یافته‌های پژوهش می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای برنامه‌ریزی‌های آینده در حوزه مدیریت بحران، توسعه پایدار کاربری اراضی و کاهش خسارات ناشی از زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

گستره مورد مطالعه در جنوب‌غربی ایران و در محدوده استان ایلام واقع شده است و شامل زیرحوضه‌های ایلام، صالح آباد، مهران ۱ و مهران ۲ با مساحتی حدود ۳۰۶۱٫۶۹ کیلومترمربع می‌باشد که از نظر هیدرولوژی، جزئی از حوضه آبریز خلیج فارس هستند (شکل ۱). استان ایلام از شمال با استان کرمانشاه، از جنوب با استان خوزستان، از شرق با استان لرستان و از غرب با کشور عراق همسایه است. این منطقه بخشی از زاگرس چین‌خورده است و در بین طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۵۱ دقیقه و ۳۲ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۳۹ دقیقه و ۵۵ ثانیه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۱۰ دقیقه و ۴۴ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۴۹ دقیقه و ۴۸ ثانیه شمالی قرار دارد. از نظر اقلیمی این گستره دارای آب و هوای معتدل کوهستانی با میانگین بارش سالانه ۵۸۰٫۸ میلیمتر و متوسط دمای مطلق آن از منفی ۱۳٫۶ تا ۴۲ درجه سانتیگراد در نوسان است (ارزانی و همکاران، ۱۴۰۱). کمربند زاگرس، فعال‌ترین پهنه سرزمین ایران از نظر لرزه‌خیزی است، به طوری که بیشترین فراوانی کانون زمین‌لرزه‌ها در این پهنه می‌باشد (صحرائی و همکاران^۲، ۲۰۲۳) و شامل توالی ستبری از سنگ‌های با سن اواخر پرکامبرین تا پلیوسن است که به صورت مجموعه‌ای از تاقدیس‌ها و ناودیس‌های بزرگ با روند شمال باختری-جنوب خاوری است که چین‌خورده اند (قرشی و آرین، ۱۳۸۹: ۲۹، ۲۲۲). رخنمون غالب در ناهمواری‌های این منطقه عموماً از

¹ Mohajjel and Fergusson

² Sahraei et al

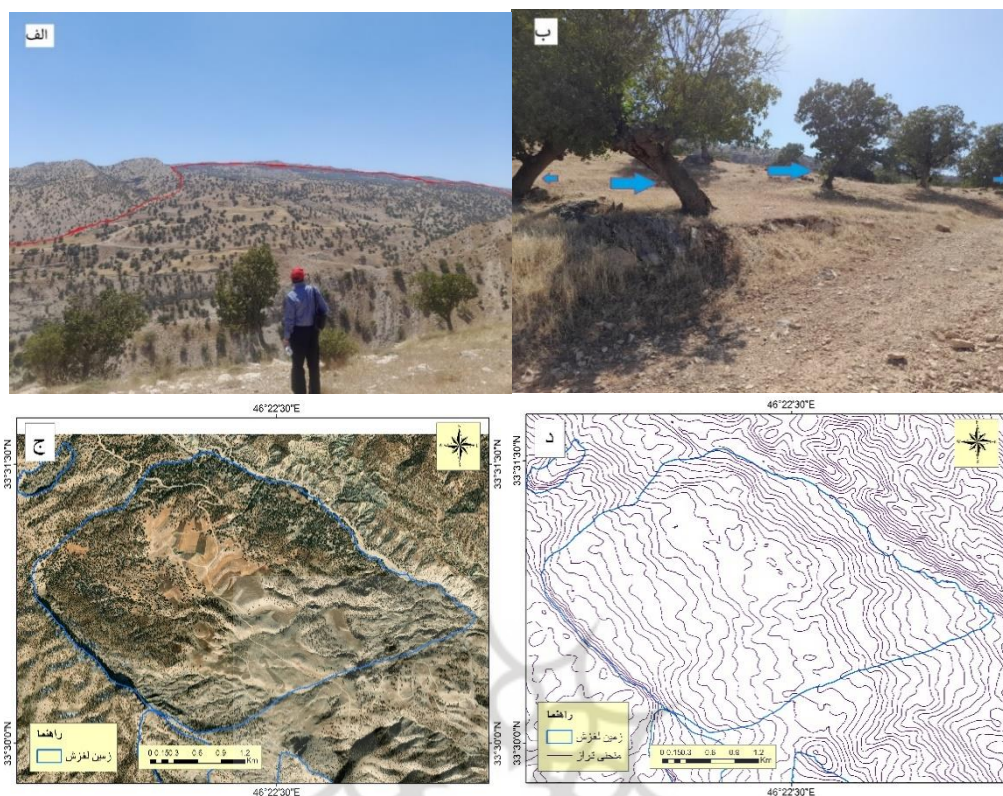
زمین لغزش از طریق مشاهدات میدانی، بررسی نقشه‌های توپوگرافی، عکس هوایی و تصاویر ماهواره‌ای قابل تشخیص است. در بررسی میدانی، نشانه‌هایی مانند به هم ریختگی پوشش گیاهی، کج شدگی درختان، تغییر ناگهانی الگوی آبراهه، مشاهده سطح لغزش و توده لغزیده برجای مانده امکان پذیر می‌باشد. در عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا نیز امکان بررسی زمین لغزش‌ها بر مبنای شواهد فوق فراهم است. بازبینی تغییرات الگوی آبراهه‌ای، تغییر شیب و ارتفاع ناگهانی در محل افراز لغزش، تغییر ناگهانی در تراکم خطوط تراز توپوگرافی نیز به شناسایی زمین لغزش‌ها در نقشه‌های توپوگرافی کمک می‌کند (خداشاهی، ۱۳۹۴: ۳۸). در این تحقیق جهت شناسایی و تحلیل زمین لغزش‌ها، از داده‌های فوق‌الذکر شامل تصاویر ماهواره‌ای (Google Earth)، مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۲٫۵ متر (ALOS PALSAR)، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰،۰۰۰ و نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ مربوط به محدوده‌های ایلام، مهران، سومار و پلنگانه، به عنوان منابع پایه، استفاده شد. همچنین اطلاعات مربوط به رومرکز زمین لرزه‌ها از پایگاه مرکز لرزه‌نگاری کشور دریافت گردید. پردازش‌های مکانی در نرم‌افزارهای ArcGIS، Global Mapper و Google Earth انجام گرفت. سپس با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای، مشاهدات میدانی و بررسی نقشه‌های توپوگرافی، تعداد ۲۵۷ زمین لغزش کوچک و بزرگ در محدوده مورد مطالعه شناسایی گردید. نمونه‌هایی از این شواهد در تصاویر با قدرت تفکیک بالا به صورت موردی تحلیل و با بازدیدهای میدانی صحت‌سنجی شدند (شکل ۳). در ادامه جهت ارزیابی فعالیت زمین‌ساختی و ویژگی‌های ناهمواری، شاخص‌های متعددی محاسبه گردیدند. این شاخص‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند:

الف) شاخص‌های فعالیت نسبی تکتونیک (Iat) شامل: انتگرال هیپسومتری (Hi)، گرادیان طولی رودخانه (SL)، عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)، نسبت شکل حوضه (Bs)، سینوسیته جبهه کوهستان (Smf) و نسبت عرض کف دره به ارتفاع دره (Vf) می‌باشند. هدف از محاسبه این شاخص‌ها بررسی میزان جوانی و فعالیت زمین‌ساخت زیرحوضه‌ها است. لازم به ذکر است از مقدار $|AF-50|$ جهت بی‌بعدسازی شاخص عدم تقارن استفاده شد.

ب) شاخص‌های ژئومورفولوژیکی مؤثر در لغزش: شامل شیب (S)، و شاخص ملتون (Me) است. این شاخص‌ها به شناسایی مناطق با ویژگی‌های هندسی مستعد ناپایداری کمک می‌کنند (جدول ۱). محل محاسبه برخی شاخص‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

ج) شاخص‌های مربوط به لغزش شامل تراکم زمین لغزش (LD)، نسبت مساحت لغزش به مساحت حوضه (LA) (جدول ۱).

در نهایت جهت بررسی رابطه آماری بین شاخص‌های محاسبه‌شده و پراکنش زمین لغزش‌ها، از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. این تحلیل در محیط Excel و SPSS انجام گردید. شاخص‌هایی که همبستگی معنادار با تراکم لغزش‌ها داشتند به عنوان عوامل مؤثر در تحلیل نهایی لحاظ شدند.



شکل ۳: الف: نمایی از دیواره و افراز لغزش به همراه توده جاری شده متعلق به زمین لغزش شماره ۲۳ در محدوده حوضه ایلام. ب) کج‌شدگی درختان در داخل زمین لغزش. ج: شکل زمین لغزش در تصاویر ماهواره‌ای Bing. د) شکل زمین لغزش در منحنی میزان‌های ارتفاعی.

جدول ۱: شاخص‌های مورفومتری جهت ارزیابی فعالیت نسبی زمین‌ساختی (هک^۱، ۱۹۷۳؛ کلر و پینتر^۲، ۲۰۰۲؛ الحمدونی و همکاران^۳، ۲۰۰۸؛ سیلوا و همکاران^۴، ۲۰۰۳؛ مارچی و فونتانا^۵، ۲۰۰۵؛ ریچمن و اسچیدل^۶، ۲۰۱۲).

تعریف اجزای شاخص	شاخص‌های کمی	مقدار	کلاس
H max حداکثر ارتفاع حوضه	$Hi = \frac{H_{mean} - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}$	Hi > ۰.۶۰	۱
H mean متوسط ارتفاع حوضه		۰.۴۰ < Hi < ۰.۶۰	۲
H min حداقل ارتفاع حوضه		Hi < ۰.۴۰	۳
Ar مساحت حوضه آبریز در سمت راست آبراهه اصلی	$AF = 100(Ar/At)$	۳۰ - ۰ < AF < ۷۰ - ۷۰	۱
At مساحت کل حوضه		۴۰ - ۳۰ < AF < ۷۰ - ۶۰	۲
		۵۰ - ۴۰ < AF < ۶۰ - ۵۰	۳
BL طول حوضه از سرچشمه تا دهانه یا خروجی حوضه	$BS = BL/BW$	۴Bs <	۱
BW عرض حوضه که در وسیع‌ترین نقطه آن اندازه‌گیری می‌شود		۴ > BS > ۳	۲
		BS < ۳	۳
Lmf طول پیشانی کوهستان در مرز بین کوهستان و کوهپایه (خط کنیک)	$Smf = \frac{Lmf}{Ls}$	۱ - ۱.۶	۱
Ls طول مستقیم پیشانی کوهستان		۱.۶ - ۳	۲
		Smf > ۳	۳
ΔH اختلاف ارتفاع دو نقطه اندازه‌گیری شده در یک مقطع خاص از رودخانه	$SL = (\Delta H / \Delta Lr) Lsc$	SL > ۵۰۰	۱
ΔL طول بازه		۳۰۰ < SL < ۵۰۰	۲
L طول کل کانال از خط تقسیم آب تا مرکز بخشی که شیب در آن محاسبه می‌شود		SL < ۳۰۰	۳
V_{fw} پهنا یا عرض کف دره	$Vf = 2 * Vfw / [(Eld - Esc) + (Erd - Esc)]$	۰.۵ > Vf	۱
E_{ld} ارتفاع خط تقسیم آب (دیواره) در سمت چپ دره		۱ > Vf > ۰.۵	۲
E_{rd} ارتفاع خط تقسیم آب (دیواره) در سمت راست دره		۱ > Vf	۳
E_{sc} ارتفاع میانگین کف بستر دره	$Me = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{A}}$	-	-
H max حداکثر ارتفاع حوضه (به کیلومتر)		-	-
H mean متوسط ارتفاع حوضه (به کیلومتر)		-	-
A مساحت حوضه (به کیلومتر مربع)	$LD = \frac{N}{A}$	-	-
N تعداد زمین لغزش		-	-
A مساحت حوضه		-	-
L مساحت زمین لغزش	$LA = \frac{L}{A} \times 100$	-	-
A مساحت حوضه		-	-

¹ Hack

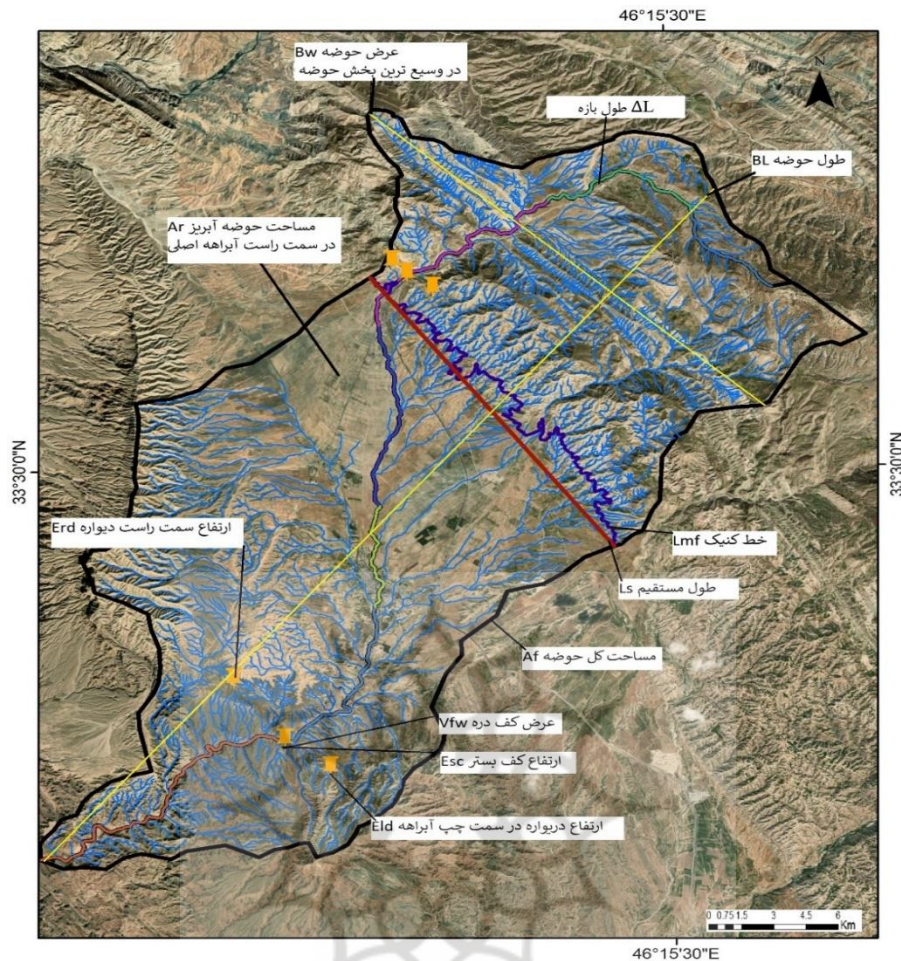
² Pinter and Keller

³ Elhamdouni et al

⁴ Silva et al

⁵ Marchi and Fontana

⁶ Rickenmann and Scheidl



شکل ۴: نمونه‌ای از نحوه اندازه‌گیری اجزای شاخص‌های مورفومتری در حوضه اصلی صالح آباد

جدول ۲: شاخص Iat براساس طبقه بندی (الحمودنی و همکاران، ۲۰۰۸).

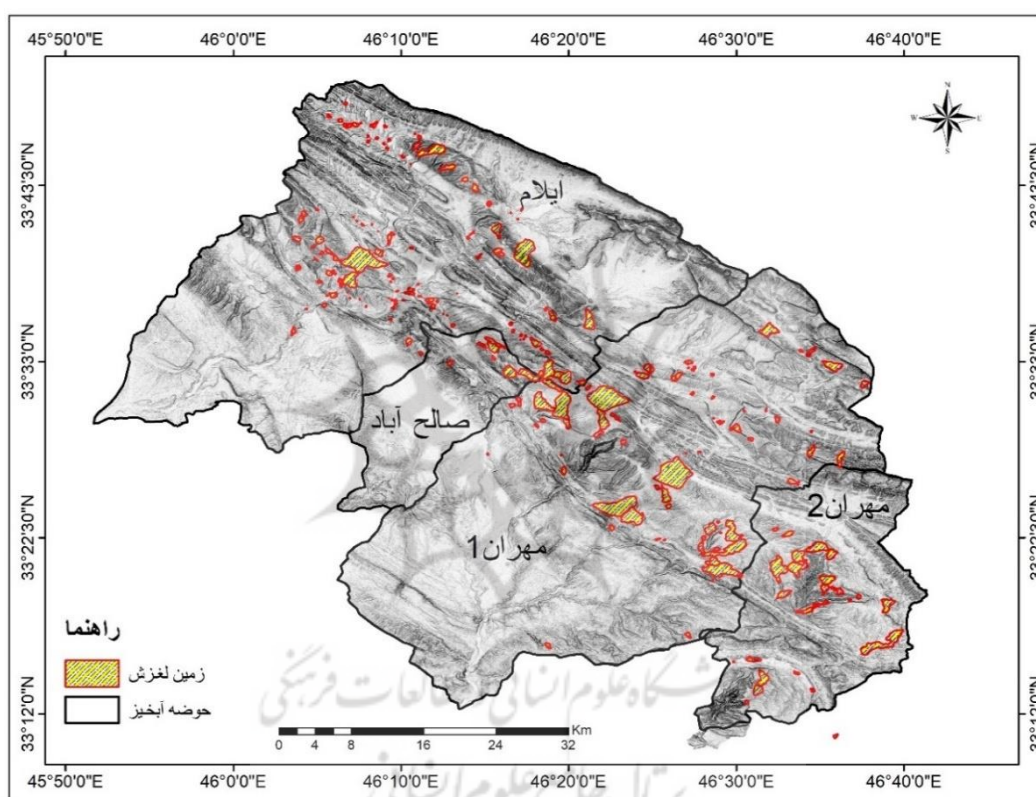
IAT=S/N		شاخص‌های ژئومورفولوژیک محاسبه شده تعداد شاخص‌های محاسبه شده	
بیشتر از ۲,۵	۲ تا ۲,۵	۱,۵ تا ۲	۱ تا ۱,۵
فعالیت زمین‌ساختی کم	فعالیت زمین‌ساختی متوسط	فعالیت زمین‌ساختی زیاد	فعالیت زمین‌ساختی بسیار زیاد

نتایج

بررسی تعداد ۲۵۷ زمین‌لغزش شناسایی شده در حوضه‌های آبخیز نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها به ترتیب مربوط به حوضه‌های ایلام، مهران ۱، مهران ۲ و صالح آباد است. همچنین از نظر نسبت مساحت زمین‌لغزش‌ها به مساحت کل حوضه (LA)، مهران ۲ با ۴,۶۶ درصد دارای بیشترین سهم می‌باشد و حوضه‌های مهران ۱، ایلام و صالح آباد به ترتیب هر کدام ۳,۸۶، ۲,۳۶ و ۲,۳۵ درصد از مساحت زمین‌لغزش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۳) (شکل ۵). شکل (۶) تصاویر تعدادی از زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۳: پراکندگی زمین لغزش‌ها در حوضه‌های مورد مطالعه

حوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	تعداد زمین لغزش	نسبت زمین لغزش مساحت (درصد)	تعداد به حوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	نسبت زمین لغزش مساحت (درصد)	مساحت نسبت زمین لغزش به مساحت حوضه (درصد)
ایلام	۱۲۰۹,۳۵	۱۳۶	۰,۱۱		۲۸,۵۸	۲,۳۶	
مهران ۱	۱۲۸۳,۷۲	۸۲	۰,۰۶		۴۹,۵۹	۳,۸۶	
صالح آباد	۱۸۱,۲۷	۷	۰,۰۴		۴,۲۶	۲,۳۵	
مهران ۲	۳۸۷,۳۵	۳۲	۰,۰۸		۱۸,۰۱	۴,۶۶	



شکل ۵: نقشه پراکندگی زمین لغزش‌های شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه



نمایی از زمین لغزش واقع در جنوب شهرستان ایلام، غرب سد ایلام



موقعیت زمین لغزش رخ داده در بخش جنوبی استان ایلام، روستای ماربره



نمایی از روبروی زمین لغزش واقع در روستای انارک بخش بولی استان ایلام



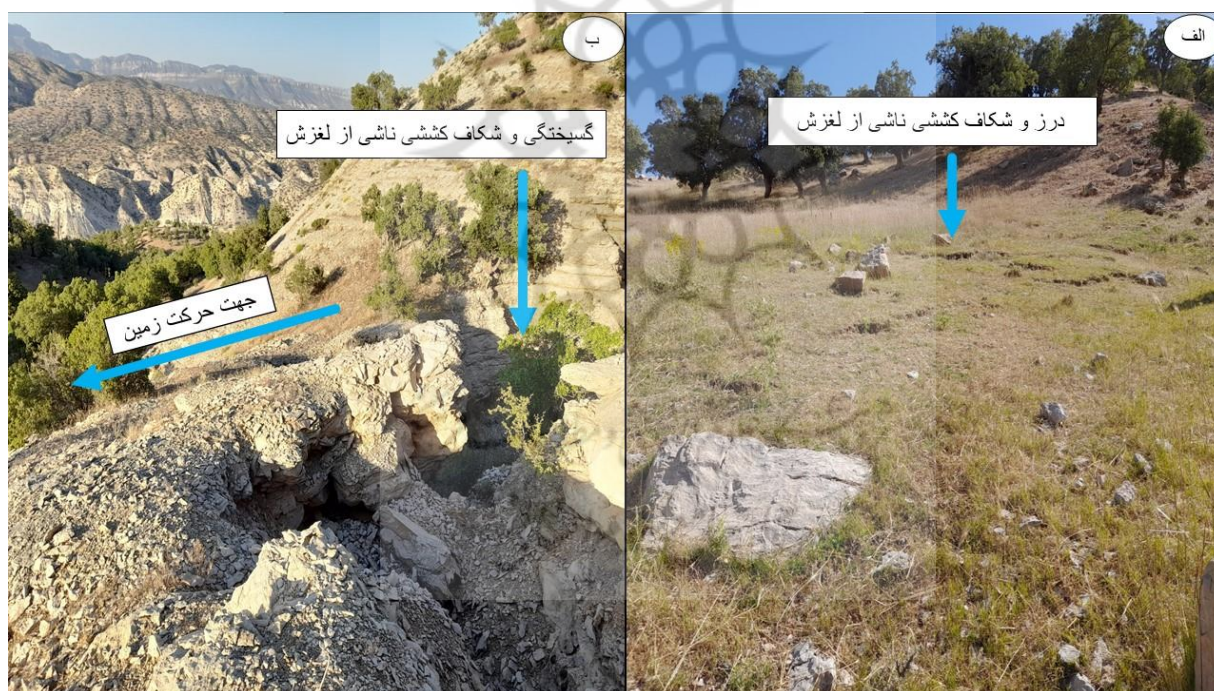
موقعیت زمین لغزش واقع در شرق روستای قبله بخش بولی استان ایلام

شکل ۶: تصاویری از زمین لغزش‌های بررسی شده در محدوده مطالعاتی

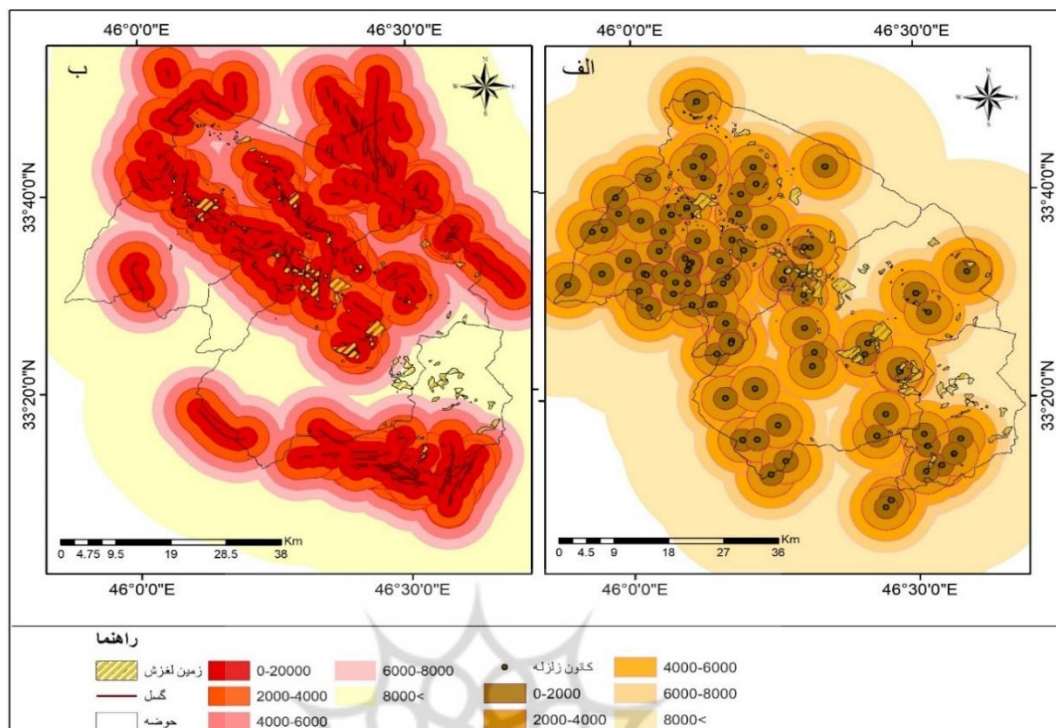
بررسی پراکنش زمین لغزش‌ها و ارتباط آن با گسل‌ها و رومرکزهای زمین لرزه

شواهد حاصل از بررسی‌های میدانی شامل زمین لغزش‌های متعدد، درز و شکاف‌ها و گسیختگی‌های سطحی، به همراه داده‌های مرتبط با رومرکزهای لرزه‌نگاری و همچنین بررسی داده‌های حاصل از نقشه‌های زمین‌شناسی نظیر وجود گسل‌ها، بیانگر زمین ساخت فعال در منطقه مورد مطالعه هستند (شکل ۷). اکثر گسل‌های موجود در منطقه هم جهت با ناهمواری‌های زمین ساختی زاگرس (شمال غربی-جنوب شرقی) و تحت تأثیر فعالیت زمین ساختی این رشته کوه می‌باشند. مطابق با شکل (۸)، حریم گسل‌ها تا شعاع ۱۰ کیلومتری مشخص و طبقه‌بندی شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشترین درصد زمین لغزش‌ها (۵۷,۱۷) در نزدیک‌ترین فاصله (۲ کیلومتر) از گسل‌ها رخ داده است.

همچنین ارزیابی پراکندگی رومرکز زمین لرزه با بزرگای بیش از ۲,۵ ریشتر در محدوده مطالعاتی و ارتباط آن با زمین لغزش‌ها، نشان می‌دهد که بیشترین میزان زمین لغزش‌ها به ترتیب معادل ۳۵,۸۰ و ۳۳,۰۷ درصد در طبقات اول و دوم (با فاصله کمتر از ۴ کیلومتر از رومرکز زمین لرزه) به وقوع پیوسته‌اند و با افزایش فاصله از رومرکز زمین لرزه، درصد وقوع زمین لغزش‌ها به تدریج کاهش می‌یابد (جدول ۴ و ۵).



شکل ۷: درز و شکاف‌ها و گسیختگی‌های سطحی در زمین لغزش‌های واقع در جنوب ایلام. الف: زمین لغزش شماره ۴. ب: زمین لغزش شماره ۳



شکل ۸: الف: شعاع رومرکزهای زمین لرزه در محدوده حوضه‌های ایلام؛ صالح آباد، مهران ۱ و مهران ۲. ب: شعاع گسل‌ها در محدوده حوضه‌های ایلام؛ صالح آباد، مهران ۱ و مهران ۲.

جدول ۴: پراکندگی تعداد زمین لغزش‌ها نسبت به گسل‌ها

کلاس حریم گسل (متر)	تعداد زمین لغزش	مساحت زمین لغزش (کیلومتر مربع)	درصد مساحت	درصد تعداد
۰-۲۰۰۰	۱۴۸	۵۶,۳۶	۵۶,۱۷	۵۶,۱۷
۲۰۰۰-۴۰۰۰	۵۴	۱۶,۲۱	۱۶,۰۱	۱۶,۱۵
۴۰۰۰-۶۰۰۰	۱۷	۴,۳۰	۴,۶۱	۴,۲۹
۶۰۰۰-۸۰۰۰	۱۵	۴,۸۲	۵,۸۳	۴,۸۱
بیشتر از ۸۰۰۰	۲۳	۱۸,۶۲	۱۸,۹۴	۱۸,۵۶

جدول ۵: پراکندگی تعداد زمین لغزش‌ها نسبت به رومرکزهای زمین لرزه

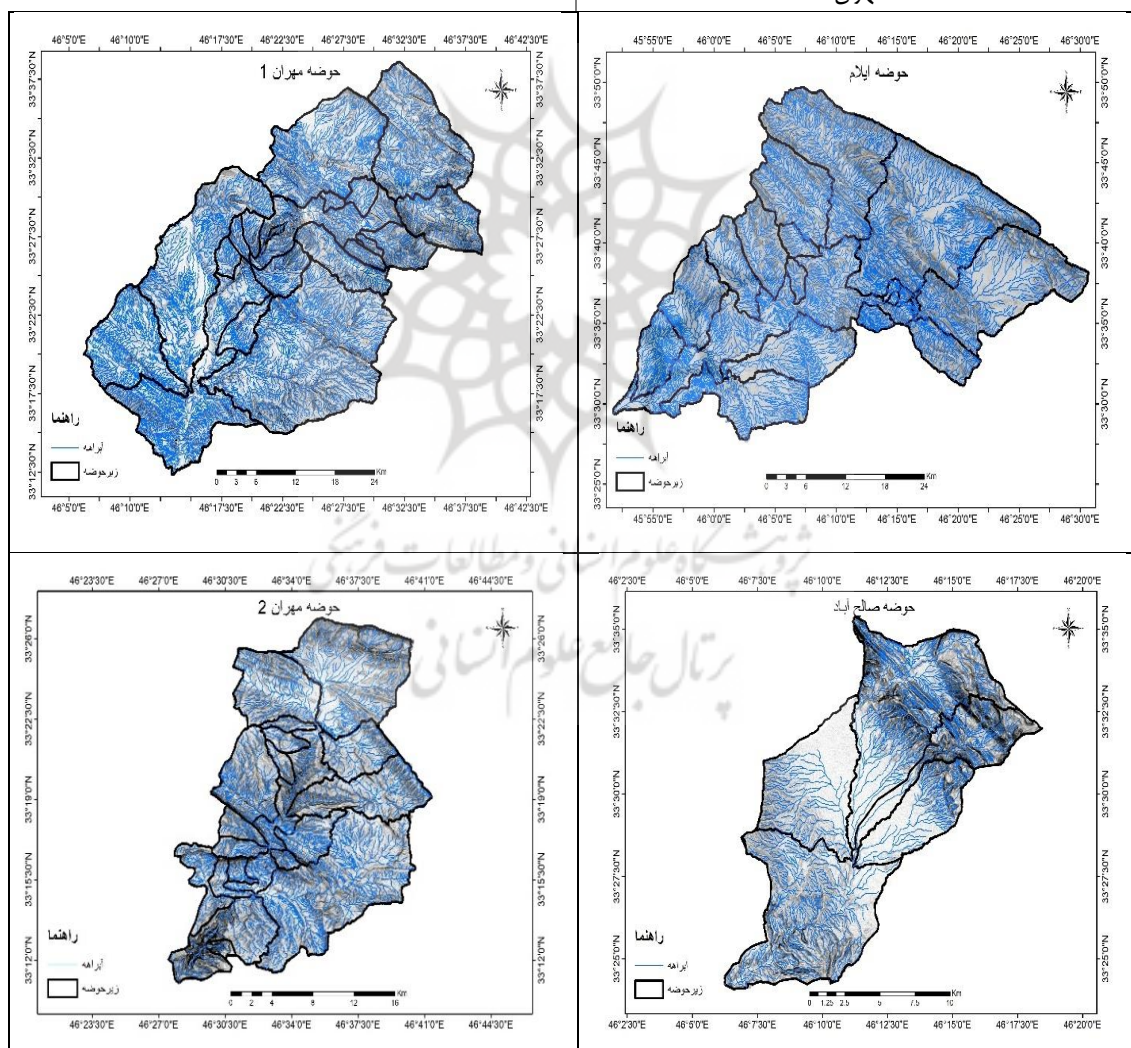
کلاس حریم رومرکز زمین لرزه (متر)	تعداد زمین لغزش	مساحت زمین لغزش (کیلومتر مربع)	درصد مساحت	درصد تعداد
۰-۲۰۰۰	۹۲	۴۵,۷۴	۴۵,۵۸	۳۵,۸۰
۲۰۰۰-۴۰۰۰	۸۵	۱۷,۷۲	۱۷,۶۶	۳۳,۰۷
۴۰۰۰-۶۰۰۰	۴۷	۱۸,۱۷	۱۸,۱۱	۱۸,۲۹
۶۰۰۰-۸۰۰۰	۲۴	۱۲,۶۷	۱۲,۶۳	۹,۳۴
بیشتر از ۸۰۰۰	۹	۶,۰۳	۶,۰۱	۳,۵۰

ارزیابی وضعیت زمین ساخت محدوده با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیک

جهت ارزیابی مورفوتکتونیک در منطقه مورد مطالعه، ابتدا هر حوضه، به چند زیرحوضه تقسیم شد. سپس، شاخص‌های مورفومتری علاوه بر حوضه‌های اصلی، در زیرحوضه‌ها نیز محاسبه و تحلیل گردید. در جدول (۶) و شکل (۹) تعداد زیرحوضه‌ها، برای هر حوضه قابل مشاهده هستند. تقسیم‌بندی انجام شده این امکان را فراهم می‌کند تا ارزیابی دقیق‌تری از ویژگی‌های مورفولوژیکی و زمین‌ساختی منطقه در مقیاس‌های مختلف حاصل گردد.

جدول ۶: تعداد زیرحوضه‌ها برای هر حوضه

حوضه	تعداد زیرحوضه
ایلام	۱۸
مهران ۱	۱۶
صالح آباد	۴
مهران ۲	۱۷



شکل ۹: زیرحوضه‌های مربوط به هر حوضه در منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی وضعیت زمین‌ساختی منطقه و تحلیل ارتباط آن با زمین لغزش، از شاخص‌های ژئومورفولوژیک در سطح زیرحوضه‌های مورد مطالعه، استفاده شد. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های به کاررفته، انتگرال هیپسومتری است که بیانگر مساحت زیر منحنی هیپسومتری و در نتیجه نمایانگر وضعیت توپوگرافی حوضه می‌باشد (گارسیا رودریگز و گمینز سوارز^۱، ۲۰۱۰). مقادیر بالای این شاخص نشان‌دهنده توپوگرافی جوان و فرایندهای بالآمدگی فعال در حوضه است؛ در حالی که مقادیر پایین آن، فعالیت‌های زمین‌ساختی محدود یا فرسایش یافته را بازتاب می‌دهد. نتایج حاصل از محاسبه این شاخص نشان می‌دهد که حوضه مهران ۲ با قرارگیری در کلاس ۲، دارای فعالیت زمین‌ساخت در سطح متوسط است و حوضه‌های ایلام، مهران ۱ و صالح‌آباد که در کلاس ۳ قرار دارند، بیانگر فعالیت زمین‌ساختی کم می‌باشند (جدول ۷).

جدول ۷: شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi) در حوضه‌های اصلی

زیرحوضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	کل حوضه
ایلام	۰,۴۰	۰,۳۳	۰,۳۹	۰,۳۹	۰,۴۹	۰,۴۹	۰,۴۴	۰,۴۱	۰,۴۱	۰,۴۶	۰,۳۵	۰,۳۰	۰,۴۴	۰,۴۷	۰,۵۱	۰,۴۱	۰,۳۵	۰,۴۱	۰,۳۴
کلاس	۲	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۳	۲	۳
مهران ۱	۰,۴۶	۰,۵۳	۰,۴۴	۰,۴۱	۰,۴۰	۰,۳۳	۰,۴۱	۰,۴۱	۰,۵۴	۰,۳۶	۰,۵۹	۰,۴۵	۰,۴۹	۰,۳۰	۰,۳۹	۰,۳۶	۰,۴۸	-	۰,۳۶
کلاس	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۲	-	۳
صالح‌آباد	۰,۲۶	۰,۲۹	۰,۳۹	۰,۲۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰,۲۸
کلاس	۳	۳	۲	۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳
مهران ۲	۰,۲۷	۰,۴۰	۰,۵۵	۰,۶۹	۰,۶۵	۰,۵۴	۰,۶۴	۰,۶۱	۰,۳۴	۰,۲۸	۰,۵۲	۰,۵۶	۰,۵۳	۰,۵۶	۰,۵۷	۰,۴۰	-	-	۰,۴
کلاس	۳	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	-	-	۲

شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی در مناطقی که نیروی زمین‌ساخت عمل کرده باشد بیانگر توپوگرافی متفاوت یعنی بالآمدگی در یک سو و فرونشست در سوی دیگر است (جباری و همکاران، ۱۳۹۱). اگر حوضه‌ای در شرایط پایدار و بدون کج‌شدگی باشد، این شاخص برابر با ۵۰ است و مقادیر بیشتر و کمتر از ۵۰ بیانگر کج‌شدگی و فعالیت زمین‌ساختی است. مقدار این شاخص در تمامی حوضه‌ها کم بوده است و بیانگر زمین‌ساخت غیر فعال می‌باشد (جدول ۸).

جدول ۸: شاخص عدم تقارن حوضه (Af) در حوضه‌های اصلی

زیرحوضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	کل حوضه
ایلام	۴۸,۷۳	۴۵,۱۳	۲۷,۹۹	۶۵,۶۷	۷۹,۹۷	۴۹,۷۳	۱۸,۸۸	۵۱,۲۸	۲۲,۱۵	۲۹,۳۳	۶۲,۷۴	۴۶,۰۷	۵۹,۷۵	۲۷,۲۰	۶۲,۳۱	۳۵,۴۶	۴۹,۹۵	۵۸,۳۱	۵۲,۹۳
کلاس	۳	۳	۱	۲	۱	۳	۱	۳	۱	۱	۲	۳	۳	۱	۲	۲	۳	۳	۳
مهران ۱	۴۴,۳۰	۲۱,۶۴	۴۸,۷۷	۵۰,۷۸	۶۶,۲۸	۴۰,۱۵	۲۸,۴۱	۲۱,۱۷	۷۰,۶۳	۶۴,۸۰	۱۷,۵۳	۳۷,۳۰	۵۲,۳۲	۶۵,۵۳	۶۲,۸۲	۳۱,۸۵	۳۶,۸۰	-	۴۸,۹
کلاس	۳	۱	۳	۳	۲	۳	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۳	۲	۲	۱	۲	-	۳
صالح‌آباد	۵۳,۵۶	۶۶,۱۹	۳۳,۶۵	۶۲,۳۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴۳,۴۶
کلاس	۳	۲	۲	۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳
مهران ۲	۲۲,۳۳	۴۲,۱۹	۴۴,۷۱	۶۱,۵۸	۴۴,۱۸	۲۲,۱۱	۳۹,۶۷	۷۸,۰۷	۲۷,۴۶	۷۶,۸۰	۵۹,۱۲	۴۱,۱۶	۳۳,۴۷	۳۲,۶۹	۶۷,۲۰	۴۸,۷۲	-	-	۴۰,۸۴
کلاس	۱	۳	۳	۲	۳	۱	۲	۱	۱	۱	۳	۳	۱	۱	۲	۳	-	-	۳

مقادیر بالای شاخص نسبت شکل حوضه بیانگر حوضه‌های کشیده در نواحی با فعالیت‌های زمین‌ساختی فعال می‌باشد، در حالی که مقادیر پایین این شاخص بیشتر حوضه‌های دایره‌ای شکل نواحی با فعالیت‌های زمین‌ساختی کم (غیرفعال) را

¹ Garcia Rodríguez and Gimenez Suarez

نشان می‌دهد (منصوری و صفاری، ۱۳۹۴). مقادیر این شاخص در حوضه‌های مورد مطالعه بیانگر این است که ایلام، مهران ۱، صالح آباد و مهران ۲ با دارا بودن مقادیری پایین‌تر از ۳ دارای سطح پایینی از فعالیت زمین‌ساختی هستند (جدول ۹).

جدول ۹: شاخص نسبت شکل حوضه (Bs) در حوضه‌های اصلی

زیرحوضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	کل حوضه
ایلام	۱,۵۶	۱,۳۳	۲,۵۳	۱,۵۸	۲,۱۵	۲,۳	۱,۷۴	۲,۶۵	۱,۲۵	۱,۹۳	۱,۹۳	۲,۴۸	۱,۱۵	۲,۲	۳,۲۸	۱,۱۶	۱,۴۵	۲,۰۹	۱,۵
کلاس	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۳	۳	۳
مهران ۱	۱,۴۴	۳,۲۸	۳,۲۴	۳	۲,۰۱	۱,۷۲	۱,۱۶	۰,۹۸	۱,۲۴	۲,۰۷	۲,۹۱	۲,۷۵	۱,۶	۳,۰۱	۱,۳۵	۲,۶۶	۱,۴۸	-	۱,۷۵
کلاس	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	-	۳
صالح آباد	۲,۵۷	۳,۱	۱,۶۹	۰,۹۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲,۰۳
کلاس	۳	۳	۳	۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳
مهران ۲	۰,۸۷	۱,۳۳	۳,۴۹	۲,۳	۳,۴۶	۰,۹۹	۲,۰۴	۲,۶۳	۱,۵	۳,۰۹	۲,۳۱	۱,۷۸	۱,۱	۱,۷۵	۲,۶۸	۰,۹۴	-	-	۲,۰۳
کلاس	۳	۳	۲	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	-	-	۳

شاخص عرض کف دره برای تفکیک دره‌های U شکل از دره‌های V شکل به کار می‌رود، به گونه‌ای که مقادیر کوچک Vf، وجود دره‌های عمیق و V شکل را نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر زیاد بودن میزان بالآآمدگی تکنونیک باشد. مقادیر بزرگ Vf نیز، نشان‌دهنده کم بودن میزان بالآآمدگی و وجود دره‌هایی با کف پهن و U شکل است که در اثر فرسایش جانبی ناشی از ثبات پیشانی کوهستان تشکیل شده‌اند (جباری و همکاران، ۱۳۹۱). در حوضه مهران ۲ این شاخص با مقدار ۰,۶۸ نشان‌دهنده میزان بالآآمدگی متوسط، در حوضه‌های ایلام و صالح آباد و مهران ۱، این شاخص به ترتیب با مقادیر ۰,۰۷، ۱,۱۱ و ۳,۰۲ دارای کمترین مقدار بالآآمدگی می‌باشد (جدول ۱۰).

جدول ۱۰: شاخص عرض کف دره نسبت به ارتفاع (Vf) در حوضه‌های اصلی

زیرحوضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	کل حوضه
ایلام	۰,۹۴	۰,۵۰	۳,۰۷	۱,۸۴	۱,۱۹	۰,۵۸	۰,۹۳	۰,۴۲	۰,۳۸	۰,۹۶	۱,۴۹	۱,۶۵	۲,۰۲	۱,۰۵	۱,۰۲	۰,۳۸	۱,۴۶	۱,۱۹	۱,۰۰۷
کلاس	۲	۱	۳	۳	۳	۲	۲	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۳	۳	۳
مهران ۱	۰,۶۷	۳,۵۹	۰,۵۵	۱,۱۳	۰,۴۷	۱,۴۶	۲,۸۸	۱,۸۵	۰,۴۵	۰,۷۵	۰,۵۹	۰,۹۷	۰,۲۸	۰,۶۴	۰,۲۸	۰,۸۴	۰,۴۳	-	۳,۰۲
کلاس	۲	۳	۲	۲	۱	۲	۳	۳	۱	۲	۲	۲	۱	۲	۳	۲	۱	-	۳
صالح آباد	۴	۰,۲۵	۰,۵۸	۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱,۱۱
کلاس	۳	۱	۲	۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳
مهران ۲	۱,۶۷	۰,۹۱	۲,۷۴	۰,۴۴	۰,۶۱	۰,۴۱	۰,۳۳	۰,۳۸	۰,۵۹	۱,۳۸	۰,۳۰	۰,۸۱	۰,۱۶	۰,۱۶	۱,۲۰	۰,۶۱	-	-	۰,۶۸
کلاس	۳	۲	۳	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۳	۲	-	-	۲

جهت محاسبه شاخص گرادیان طولی رودخانه، نیمرخ طولی آبراهه‌ها برای هر حوضه ترسیم شد. این شاخص به منظور بررسی تأثیر متغیرهای محیطی بر نیمرخ طولی رودخانه و تعیین تعادل یا عدم تعادل رودها استفاده شد. شاخص گرادیان طولی رود به تغییرات شیب رودخانه بسیار حساس است و این حساسیت برآورد ارتباط موجود بین فعالیت‌های زمین‌ساختی، مقاومت سنگ‌ها و توپوگرافی را امکان‌پذیر می‌سازد (یمانی و همکاران، ۱۳۸۹). برآورد این شاخص در حوضه‌های مورد نظر با در نظر گرفتن بازه متعدد در هر حوضه نشان می‌دهد که همه آن‌ها شامل ایلام ۱۰۴۸,۵، مهران ۱ ۱۰۵۷,۵، صالح آباد ۶۲۹,۵ و مهران ۲ ۱۳۰۰ متر دارای بیشترین میزان فعالیت می‌باشند (جدول ۱۱).

جدول ۱۱: شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) در حوضه‌های اصلی

زیرحوضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	کل حوضه
ایلام	۵۳۴,۵	۷۸۴	۲۸۹	۲۷۷	۲۷۵	۲۶۸	۴۸۶,۵	۳۱۵,۵	۱۲۱	۱۱۸,۵	۳۰۶	۲۹۷	۱۱۶	۲۳۲,۵	۲۳۶	۱۷۸,۵	۶۰,۵	۸۲,۵	۱۰۴۸,۵
کلاس	۱	۱	۳	۳	۳	۲	۲	۲	۳	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۱
مهران ۱	۶۱۵	۲۱۹,۵	۲۳۹,۵	۱۸۳	۲۶۴,۵	۲۱۱	۵۲۳,۵	۱۰۶	۱۸۳	۵۳۸,۵	۴۵۹,۵	۳۶۱,۵	۲۲۷	۶۱۹,۵	۱۸۴	۳۵۳,۵	۵۶۹,۵	-	۱۰۵۷,۵
کلاس	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۳	۳	۱	۲	۲	۳	۱	۳	۲	۱	-	۱
صالح آباد	۲۵۷,۵	۵۶۵,۵	۵۴۳	۶۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۶۲۹,۵
کلاس	۳	۱	۱	۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱
مهران ۲	۵۱۵	۴۷۵,۵	۲۵۷,۵	۲۷۲	۳۱۵	۱۸۱,۵	۱۸۴	۱۲۷	۱۰۵,۵	۳۱۹,۵	۲۹۷	۳۰۳	۲۵۲	۲۶۸	۳۳۳,۵	۱۰۹	-	-	۱۳۰۰
کلاس	۱	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۳	۲	۳	۳	۲	۳	-	-	۱

شاخص سینوسیته جبهه کوهستان بیانگر توازن و تعادل بین شدت و قدرت رود برای ایجاد یک پیشانی کوهستان نامنظم از یک سو و حرکات زمین ساختی قائم و جوان برای ایجاد پیشانی مستقیم از سوی دیگر بوده است (جباری و همکاران، ۱۳۹۱). مقادیر حاصل از این شاخص در حوضه های ایلام ۱,۴۸، مهران ۱,۳، صالح آباد ۱,۰۸ و مهران ۱,۰۶۲ دارای فعالیت زمین ساختی بالا می باشد (جدول ۱۲).

جدول ۱۲: شاخص سینوسیته جبهه کوهستان (Smf) در حوضه های اصلی

زیرحوضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	کل حوضه
ایلام	۲,۲	۳,۷۳	۱,۹۳	۳,۸۶	۱,۱۲	۱,۱۷	۱,۴۱	۱,۳۸	۱,۰۴	۱,۱	۱,۰۵	۱,۰۳	۱,۱۹	۱,۰۶	۰,۰۰۱	۱,۰۶	۱,۲۵	۱,۰۸	۱,۴۸
کلاس	۲	۳	۲	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
مهران ۱	۲,۰۳	۴,۳۱	۰,۰۰۱	۱,۲۳	۳,۲۰	۵,۴۳	۶,۴۲	۳,۸۹	۱,۰۴	۲	۱,۰۴	۱,۲۹	۱,۰۳	۱,۴۵	۱,۰۲	۱,۰۱	۵,۵۲	-	۱,۳۰
کلاس	۲	۳	۱	۱	۳	۳	۳	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳	-	۱
صالح آباد	۲,۵۵	۱,۷۸	۱,۲۵	۱,۰۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱,۰۸
کلاس	۲	۲	۱	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱
مهران ۲	۲,۳۹	۱,۱۶	۱,۱	۱,۰۸	۱,۰۵	۱,۵۱	۱,۴۶	۱,۱۹	۱,۱	۱,۱	۱,۲۹	۵,۲۳	۰,۰۱	۱,۰۳	۱,۱۳	۱,۴۳	-	-	۱,۰۷
کلاس	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۱	۱	۱	۱	۱	-	۱

ارتباط آماری بین متغیرها

جدول (۱۳) ارتباط آماری بین پارامترهای کمی در ۳۴ زیرحوضه دارای لغزش را بر اساس آزمون همبستگی پیرسون^۱ در گستره مطالعاتی را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که شاخص ملتون (Me) با مساحت حوضه (A) دارای رابطه منفی معنی داری است و با شیب حوضه (S) رابطه مثبت معنی داری دارد. در واقع رابطه مثبت بین شیب و شاخص ملتون نشان دهنده حوضه هایی با ناهمواری زیاد و شرایط ناپایدارتر است. شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi) با شاخص ملتون (Me) و شیب حوضه (S) رابطه مثبت معنی داری دارد. شاخص عدم تقارن حوضه (Af) با مساحت حوضه (A) رابطه منفی معنی داری دارد. شاخص (Vf) با شاخص ملتون (Me) رابطه منفی معنی داری دارد. شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) با مساحت حوضه (A) رابطه مثبت معنی داری دارد و با شاخص عدم تقارن حوضه (Af) رابطه منفی معنی داری دارد. شاخص شکل حوضه (BS) با شاخص ملتون (Me) رابطه مثبت معنی دار دارد. شاخص سینوسیته جبهه کوهستان (Smf) با شیب حوضه (S) رابطه مثبت معنی دار دارد. در مناطق با سینوسیته کم جبهه کوهستان، شیب بیشتر خواهد بود و این امر می تواند ناشی از بالآمدگی فعال و فرسایش سریع باشد که منجر به ناپایداری دامنه ها و وقوع زمین لغزش می شود.

¹ Pearson correlation

نسبت مساحت زمین لغزش به مساحت حوضه (LA) با شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi) دارای رابطه مثبت معنی داری است. تراکم تعداد لغزش (LD) با شاخص‌های ملتون (Me)، انتگرال هیپسومتری (Hi) و نسبت مساحت زمین لغزش به مساحت حوضه (LA) دارای رابطه مثبت معنی داری است. روابط فوق نشان می‌دهند که شاخص‌هایی مانند شیب توپوگرافی، شاخص ملتون، انتگرال هیپسومتری، شکل حوضه و سینوسیته جبهه کوهستان، ارتباط نزدیکی با فرایندهای زمین‌ساختی دارند و بیانگر فعالیت‌های زمین‌ساختی در منطقه هستند.

جدول ۱۳: ماتریس ضریب همبستگی پیرسون بین پارامترهای کمی در ۳۴ حوضه و زیر حوضه مورد مطالعه دارای زمین لغزش

پارامتر	A	S	Me	Hi	AF	Vf	SL	Bs	Smf	LA	LD
A	1										
S	-.164	1									
Me	-.455**	.460**	1								
Hi	-.279	.368*	.353*	1							
AF	-.387*	.268	.318	.202	1						
Vf	.243	.024	-.339*	-.121	.143	1					
SL	.728**	-.151	-.308	-.328	-.357*	-.105	1				
Bs	-.176	.015	.500**	.146	.245	.027	-.039	1			
Smf	-.104	.344*	-.213	-.016	-.001	.280	-.122	-	1		
								.286			
LA	-.143	.038	.218	.516**	.149	-.108	-.166	.081	-.101	1	
LD	-.209	.133	.359*	.359*	.124	-.071	-.293	.079	-.312	.350*	1

بحث

بررسی توزیع مکانی تعداد ۲۵۷ زمین لغزش شناسایی شده نشان می‌دهد که بیشترین تعداد لغزش‌ها به ترتیب در حوضه‌های ایلام، مهران ۱، مهران ۲ و صالح آباد مشاهده شده است. از نظر نسبت مساحت زمین لغزش به مساحت کل حوضه، حوضه مهران ۲ با ۴٫۶۶ درصد، بیشترین سهم را دارد که نشان‌دهنده حساسیت بالای این حوضه به وقوع زمین لغزش‌ها است. در مقابل، حوضه صالح آباد با ۲٫۳۵ درصد کمترین مساحت لغزش را دارا است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که تأثیر فعالیت‌های زمین‌ساختی بر پایداری دامنه‌ها در حوضه‌های مختلف متغیر است. همانطور که تحلیل ارتباط زمین لغزش‌ها با گسل‌ها نشان می‌دهد، بیش از ۵۷ درصد از زمین لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۲ کیلومتر از گسل‌ها رخ داده‌اند. این یافته حاکی از آن است که فعالیت گسل‌ها نقش اساسی در ایجاد شرایط ناپایدار دامنه‌ها دارد. گسل‌های منطقه، هم‌راستا با ناهمواری‌های زاگرس (شمال غربی-جنوب شرقی) و تحت تأثیر نیروهای زمین‌ساختی این رشته‌کوه هستند. حرکت‌های مداوم این گسل‌ها می‌تواند به ایجاد درز و شکاف، تضعیف سنگ‌ها، تشدید فعالیت زمین‌ساختی و در نهایت افزایش احتمال وقوع زمین لغزش منجر شود. همچنین بررسی پراکنش زمین لغزش‌ها در ارتباط با رومرکزهای زمین‌لرزه، وابستگی مستقیم بین محل زمین لغزش‌ها و وقوع زمین‌لرزه را نشان می‌دهد. حدود ۶۸٫۸۷ درصد از زمین لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۴ کیلومتری از رومرکز زمین‌لرزه با بزرگای بیش از ۲٫۵ ریشتر رخ داده‌اند. این یافته نشان می‌دهد که ارتعاشات لرزه‌ای نقش قابل توجهی در تحریک زمین لغزش‌ها ایفا می‌کنند. زمین‌لرزه‌ها با ایجاد تغییرات ناگهانی در تنش‌های موجود در دامنه‌ها می‌توانند پایداری آنها را کاهش داده و شرایط را برای بروز زمین لغزش‌ها فراهم کنند. افزون بر این، با افزایش فاصله از رومرکز زمین‌لرزه، درصد وقوع زمین لغزش‌ها به‌طور معناداری کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده کاهش تأثیر امواج لرزه‌ای بر وقوع

این پدیده‌ها است. در واقع ارتعاشات ناشی از زمین‌لرزه به عنوان یک عامل اصلی در فعال‌سازی زمین‌لغزش‌ها نقش دارند. مقایسه این نتایج با سایر مناطق کوهستانی مشابه در منطقه شمال قزوین (صبوری و همکاران، ۱۴۰۰) نشان می‌دهد که در مناطقی با وجود رومرکزهای زمین‌لرزه و حضور گسل‌های فعال، توزیع زمین‌لغزش‌ها معمولاً به صورت خوشه‌ای و متمرکز در نزدیکی این دو عامل است. همچنین، در مناطقی که گسل‌ها دارای فعالیت کم‌تری هستند و یا رومرکزهای زمین‌لرزه وجود ندارند، فراوانی زمین‌لغزش‌ها کاهش یافته و پراکندگی آن‌ها بیشتر می‌شود. در واقع، وجود رومرکزهای زمین‌لرزه، حضور گسل‌های فعال و نزدیکی آن‌ها به حوضه‌های مورد مطالعه، عامل کلیدی در وقوع زمین‌لغزش‌ها بوده است.

نتایج حاصل از شاخص‌های مورفومتری نشان می‌دهد که هر یک از این شاخص‌ها به گونه‌ای منحصر به فرد بر ویژگی‌های توپوگرافی و فعالیت زمین‌ساختی این حوضه‌ها تأثیرگذار هستند. شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی بیانگر این است که تمامی حوضه‌های مورد مطالعه دارای شرایط نیمه فعال زمین‌ساختی هستند. مقادیر این شاخص نزدیک به ۵۰ حاکی از ثبات نسبی بوده و انحراف از این مقدار نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی است. این وضعیت نیمه فعال با نتایج سایر شاخص‌ها نیز تأیید شد. در بررسی شاخص نسبت شکل حوضه، حوضه‌های ایلام، مهران ۱، صالح آباد و مهران ۲ دارای مقادیر کمتر از ۳ بودند که بیانگر کشیدگی کمتر حوضه‌ها و فعالیت زمین‌ساختی کم بوده و اینکه در این مناطق فعالیت‌های زمین‌ساختی تأثیر قابل توجهی بر تغییر شکل حوضه‌ها نداشته است. شاخص عرض کف دره (vf) نشان داد که حوضه مهران ۲ با مقدار ۰٫۶۸ دارای میزان بالآمدگی بیشتر نسبت به دیگر حوضه‌ها و فعالیت زمین‌ساختی متوسط بوده، در حالی که حوضه ایلام با مقدار ۱٫۰۰۷ و حوضه صالح آباد با مقدار ۱٫۱۱ و حوضه مهران ۱ با مقدار ۳٫۰۲ در محدوده بالآمدگی کمترین قرار دارند که نشان‌دهنده کمترین فعالیت زمین‌ساختی، و غلبه فرسایش جانبی است. این اختلاف‌ها ناشی از تغییرات نرخ فرسایش و بالآمدگی در این مناطق است. شاخص گرادیان طولی رودخانه نیز تأیید کرد که تمامی حوضه‌های مورد مطالعه دارای فعالیت زمین‌ساختی زیاد هستند. مقادیر بالای این شاخص نشان‌دهنده بی‌نظمی در نیمرخ طولی رودخانه می‌باشد و به تبع آن بیانگر فعالیت زمین‌ساختی با شدت زیاد است. این شاخص با حساسیت بالا نسبت به تغییرات شیب، تأثیر زیاد فعالیت‌های زمین‌ساختی را در حوضه‌ها مشخص کرد. همچنین شاخص سینوسیته جبهه کوهستان نشان داد که تمامی حوضه‌ها دارای فعالیت زمین‌ساختی بالا هستند. این شاخص با نشان دادن توازن بین قدرت رودخانه و حرکات زمین‌ساختی عمودی، بیانگر پویایی نسبی این حوضه‌ها است. مقادیر این شاخص در حوضه‌های ایلام (۱٫۴۸) و مهران ۱ (۱٫۳) بیشترین فعالیت را نشان داده و حوضه‌های صالح آباد و مهران ۲ با مقادیر ۱٫۰۸ و ۱٫۰۶ فعالیت کمتری داشتند. به طور کلی، به نظر می‌رسد تغییرات قابل توجه در اشکال ساختمانی (تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها)، تفاوت در مقدار فرسایش حوضه‌ها و زیرحوضه و همچنین تفاوت‌های سنگ‌شناسی باعث تغییرات زیاد شاخص‌های Hi ، SL ، AF ، Bs ، Smf و Vf در حوضه‌های مورد مطالعه و زیرحوضه‌های آن‌ها شده است. از یافته‌های قابل توجه در تحلیل روابط بین متغیرها، وجود همبستگی مثبت و معنادار بین شاخص‌های تراکم زمین‌لغزش (LD) و نسبت مساحت زمین‌لغزش (LA) با انتگرال هیپسومتری (Hi) و شاخص ملتون (Me) است. این همبستگی نشان‌دهنده آن است که در حوضه‌هایی با مقادیر بالاتر Hi و Me که بیانگر جوان بودن حوضه، فعالیت بالای زمین‌ساختی و میزان کمتر فرسایش هستند، تعداد و وسعت زمین‌لغزش‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

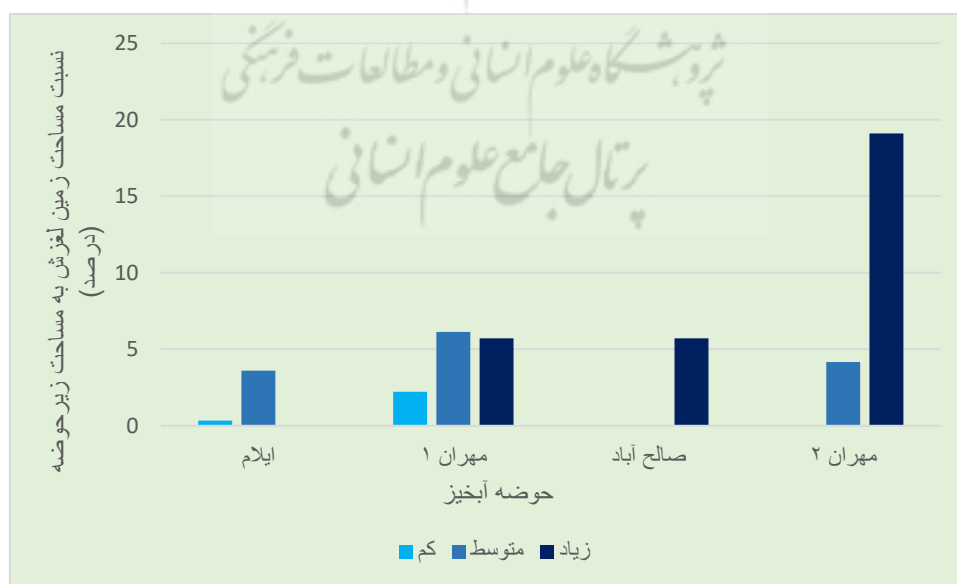
شاخص موفوتکتونیکي Iat

ارزیابی شاخص Iat نشان داد حوضه‌های ایلام، مهران ۱ و صالح آباد در کلاس فعالیت زمین‌ساختی متوسط قرار دارند و حوضه مهران ۲ با قراگیری در کلاس فعالیت زمین‌ساختی زیاد، از سطح بالاتری از فعالیت زمین‌ساختی برخوردار است. از سوی دیگر، پراکندگی زمین‌لغزش‌ها در حوضه‌ها با در نظر گرفتن مساحت آن‌ها، مؤید وجود زمین‌ساخت فعال در منطقه است. به‌ویژه در حوضه مهران ۲، علیرغم وسعت کمتر، دارای سطح بالای فعالیت زمین‌ساختی بوده و بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها را به نسبت مساحت به خود اختصاص داده است. همچنین نتایج حاصل از تحلیل نسبت مساحت زمین‌لغزش‌ها به مساحت زیرحوضه‌ها حاکی از آن است که با افزایش کلاس فعالیت زمین‌ساختی، این نسبت به‌طور معناداری افزایش می‌یابد. این امر بیانگر آن است که در زیرحوضه‌هایی با فعالیت زمین‌ساختی بالاتر (مهران ۲)، میزان گسترش زمین‌لغزش‌ها به‌طور نسبی بیشتر بوده و احتمال وقوع آن‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۱۰).

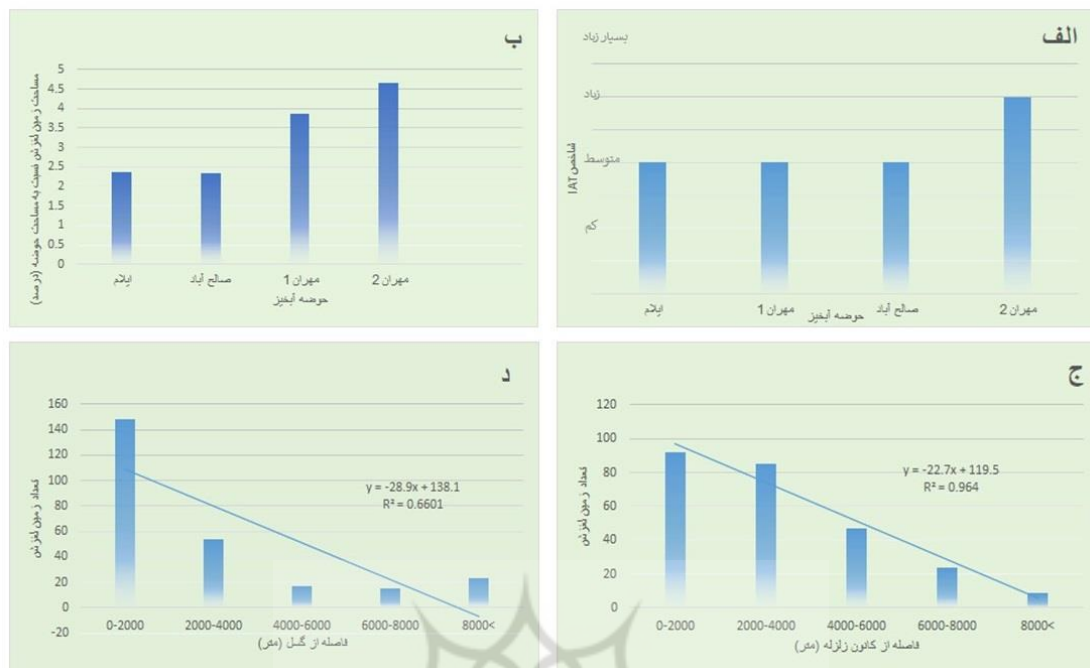
به‌طور کلی نتایج حاصل از ارزیابی فعالیت زمین‌ساختی منطقه، با ارزیابی ارتباط کمی بین زمین‌لغزش‌ها و پارامترهایی مانند گسل‌ها، رومرکزهای زمین‌لرزه، گستردگی حوضه‌ها و شاخص Iat، نشان می‌دهد که منطقه از نظر زمین‌ساختی فعال است و هر یک از این عوامل به‌صورت مستقل تأثیر مثبتی در وقوع زمین‌لغزش‌ها داشته‌اند (شکل ۱۱ و ۱۲).

جدول ۱۴: نتایج حاصل از ارزیابی فعالیت نسبی زمین‌ساختی حوضه‌ها

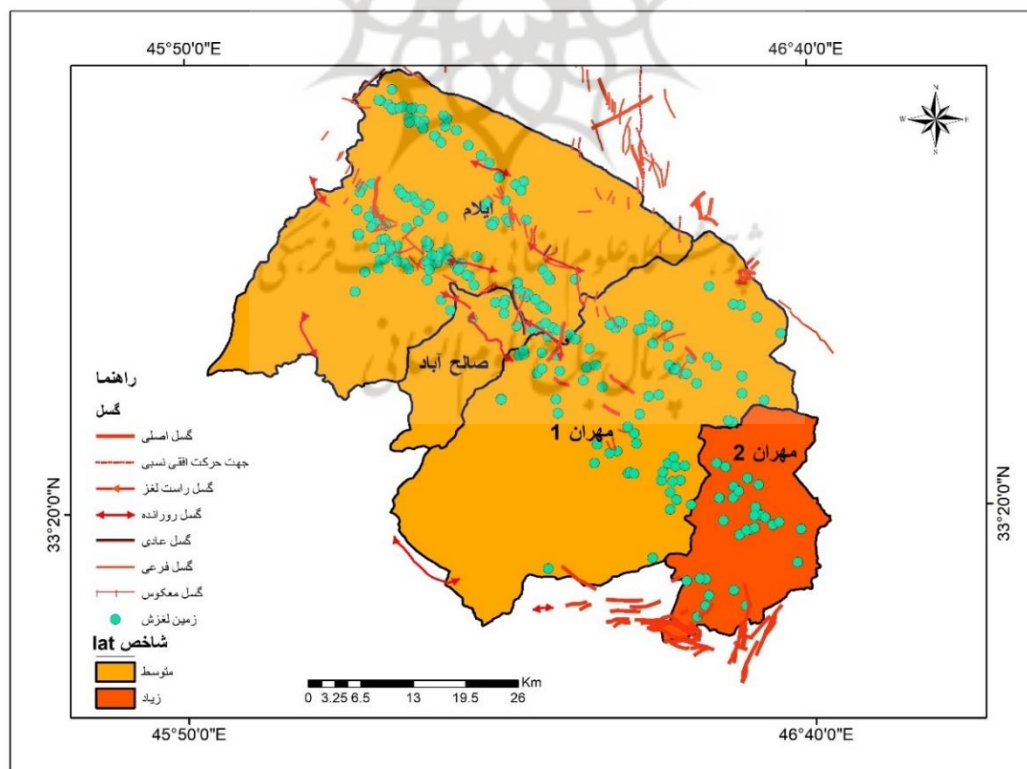
حوضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	کل حوضه
ایلام	S/N	۱۶.۲	۲.۳۳	۲.۵	۲.۸۳	۲.۱۶	۲.۱۶	۲.۱۶	۲.۱۶	۲.۱۶	۲.۳۳	۲.۶۶	۲.۵	۲.۱۶	۲.۱۶	۲.۱۶	۲.۶۶	۲.۵	۲.۳۳
Iat	متوسط	متوسط	متوسط	کم	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	کم	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	کم	متوسط	متوسط
مهران ۱	S/N	۲.۱۶	۲.۳۳	۲.۱۶	۲.۳۳	۲.۳۳	۲.۳۳	۲.۱۶	۱.۸۳	۲.۱۶	۱.۸۳	۲	۲.۱۶	۲	۲.۵	۲	۱.۶۶	-	۲.۳۳
Iat	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	-	متوسط
صالح آباد	S/N	۲.۸۳	۲	۱.۸۳	۲.۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲.۳۳
Iat	کم	زیاد	زیاد	متوسط	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	متوسط
مهران ۲	S/N	۲.۱۶	۲.۱۶	۲.۱۶	۲.۳۳	۱.۸۳	۲	۱.۸۳	۱.۶۶	۲.۱۶	۲.۱۶	۲.۵	۲.۱۶	۲.۱۶	۱.۸۳	۲.۱۶	-	-	۲
Iat	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	متوسط	-	-	زیاد



شکل ۱۰: نمودار نسبت مساحت زمین‌لغزش‌ها به مساحت زیرحوضه‌ها با توجه به کلاس فعالیت زمین‌ساختی زیرحوضه‌ها



شکل ۱۱: الف: نمودار شاخص تکتونیکی Iat. ب: نمودار پراکندگی زمین لغزش‌ها در حوضه‌ها. ج: رابطه بین تعداد زمین لغزش‌ها و فاصله از رومرکزهای زمین لرزه. د: رابطه بین تعداد زمین لغزش‌ها و فاصله از گسل‌ها.



شکل ۱۲: فعالیت زمین ساختی حوضه‌ها و پراکندگی زمین لغزش‌ها.

نتیجه‌گیری

از جمله خصوصیات زاگرس، گسل‌ها و درز و شکاف و اشکال ژئومورفولوژیکی خاصی هستند که بر اثر فشارهای زمین‌ساختی ایجاد شده‌اند. با توجه به وجود چندین گسل فعال مانند گسل قلاجه، گسل نسا، گسل مانشت و گسل بانکول، زمین‌لرزه یکی از مهمترین مخاطرات طبیعی در منطقه مورد مطالعه به شمار می‌رود. در این تحقیق، فعالیت نسبی زمین‌ساختی محدوده مورد مطالعه که بخشی از زاگرس چین‌خورده است با استفاده از محاسبه شاخص Iat و همچنین بررسی رومرکزهای زمین‌لرزه و گسل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهند که زمین‌لغزش‌ها بیشتر در مجاورت گسل‌های فعال و نزدیک به رومرکزهای زمین‌لرزه متمرکز شده‌اند و نزدیکی به شکستگی‌های ساختاری و فعالیت‌های لرزه‌ای نقش مهمی در تحریک لغزش دامنه‌ها ایفا کرده است. با فاصله گرفتن از این عناصر زمین‌ساختی، فراوانی و شدت زمین‌لغزش‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت که گسل‌ها و رومرکزهای زمین‌لرزه به‌عنوان محرک‌های اصلی، تأثیر مستقیمی بر وقوع و گسترش زمین‌لغزش‌ها در منطقه دارند. همچنین بررسی شاخص‌های ژئومورفولوژی و شاخص مورفوتکتونیک (Iat) نشان‌دهنده فعالیت متوسط حوضه‌های ایلام، مهران ۱ و صالح آباد و فعالیت زیاد حوضه مهران ۲ می‌باشد. پراکندگی زمین‌لغزش‌ها در حوضه‌های مطالعه‌شده نشان می‌دهد که پدیده ناپایداری دامنه‌ای به‌طور قابل توجهی در تمامی حوضه‌ها رخ داده، اما میزان آن در برخی حوضه‌ها بیشتر از دیگر مناطق است. همبستگی مثبت معنی‌دار بین شاخص‌های تراکم زمین‌لغزش و نسبت مساحت زمین‌لغزش به مساحت حوضه با انتگرال هیپسومتری حوضه و شاخص ملتون، بیانگر نقش مؤثر فعالیت‌های زمین‌ساختی و شیب توپوگرافی حوضه‌ها در افزایش تعداد و وسعت زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. در واقع در زیرحوضه‌هایی با فعالیت زمین‌ساختی بالا، مساحت زمین‌لغزش‌ها نسبت به مساحت زیرحوضه افزایش می‌یابد. از این رو بعضی از حوضه‌ها مانند مهران ۲ با وجود وسعت کمتر حوضه، شاهد تعداد و وسعت بیشتری از زمین‌لغزش‌ها هستند که بیانگر حساسیت بالای آن‌ها به عوامل مؤثر در ناپایداری، به‌ویژه عوامل زمین‌ساختی است. به‌طور کلی، تلفیق داده‌های زمین‌ساخت، لرزه‌ای و مورفومتری حوضه‌ها، نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه از نظر ژئودینامیک فعال بوده و زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان پیامد بارز این فعالیت‌ها، تحت تأثیر فعالیت لرزه‌ای، گسل‌ها و شرایط زمین‌ساختی منطقه شکل گرفته‌اند. این موضوع لزوم توجه به ارزیابی‌های زمین‌ساختی در تحلیل پایداری دامنه‌ها و مدیریت مخاطرات طبیعی را دوچندان می‌سازد.

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

منابع

- ارزانی، م.، برنا، ر.، مرشدی، ج.، ظهوریان، م.، ۱۴۰۱. مطالعه نقش پارامترهای اقلیمی در توسعه سیاسی و اجتماعی شهر ایلام. فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه‌ای)، ۱۲(۴۷)، ۱۱۶-۱۲۸.
- <https://www.doi.org/10.22034/jgeoq.2022.280631.3012>
- افشاری، ا.، قهرودی‌تالی، م.، صدوق، س. ح.، احتشامی معین‌آبادی، م.، ۱۳۹۸. کاربرد شاخص‌های مورفوتکتونیک در تحلیل مخاطرات زمین‌لغزش در راه‌آهن ناحیه لرستان، نشریه مدیریت مخاطرات محیطی، ۶(۱)، ۵۱-۶۶.
- <https://doi.org/10.22059/jhsci.2019.272472.425>
- انتظاری، م.، استکی، ش.، غلام‌حیدری، ح.، ۱۴۰۳. بررسی وضعیت زمین‌لغزش حوضه آبریز طارم با استفاده از مدل همپوشانی ریسک-آسیب‌پذیری، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۸(۸۹)، ۶۱-۳۹.
- <https://doi.org/10.22034/gp.2023.54607.3073>

- تقوی، ر.، جعفری راد، ع.، زنگنه، م. ص.، خلیلی اواتی، ا.، تقوی، ص.، ۱۴۰۳. پهنه بندی رخداد زمین لغزش در محدوده چهارگوش نقشه زمین شناسی ۱: ۱۰۰۰۰۰ (نمونه موردی: کیاسر، استان مازندران). اندیشه های نو در علوم جغرافیا، ۲ (۴)، ۴۹-۷۲.
<https://doi.org/https://doi.org/10.71787/10.71787/ntigs.2024.1123972>
- جباری، ن.، ثروتی، م.، حسین زاده، م. م.، ۱۳۹۱. مطالعه مورفوتکتونیک فعال حوضه ی آبخیز حصارک (شمال غرب تهران) با استفاده از شاخص های تکتونیک، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۲ (۲)، ۱۷-۳۴.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1391.1.2.2.6>
- جعفری، غ ح.، خدایی، ر.، ۱۴۰۲. مورفومتری و بازسازی زمین لغزش معلم کلايه، مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲ (۳۵)، ۵۹-۷۸.
<https://doi.org/10.22111/jneh.2022.40129.1849>
- خداشاهی، م.، ۱۳۹۴. پهنه بندی خطر زمین لغزش های ناشی از زلزله رودبار-منجیل با استفاده از مدل ناحیه ای جامع زمین لغزش های القایی از زلزله، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، استاد راهنما: ابراهیم رحیمی. دانشگاه دامغان.
 رامشت، م.، باباجمالی، فرهاد.، ۱۳۹۸، ژئومورفولوژی تحلیلی ایران، انتشارات سمت. چاپ اول. ۲۵۸ ص.
- <https://samt.ac.ir/fa/book/2272>
- صبوری، س م.، حاجی علی بیگی، ح.، طالبیان، م.، فتاحی، م.، ۱۴۰۰. بررسی ارتباط فراوانی رخداد زمین لغزش با تکتونیک فعال در منطقه شمال قزوین. مجله منابع طبیعی ایران، ۷۴ (۲)، ۴۲۳-۴۳۶.
<https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.320339.1578>
- صفاری، ا.، یمانی، م.، کرم، ا.، کرمی، پ.، ۱۳۹۷. تأثیرات مورفوتکتیکی تکتونیک فعال بر زمین لغزش در حوضه جاجرود، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۷ (۳)، ۱۱۷-۱۳۵.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22519424.1397.7.3.7.5>
- عابدینی، م.، پیروزی، ا.، ۱۴۰۳. تعیین مناطق مستعد وقوع خطر زمین لغزش در مسیر ارتباطی نیر-سراب، جغرافیا و توسعه، ۷۴ (۲۲)، ۸۲-۱۱۸.
<https://doi.org/10.22111/gdij.2024.8147>
- علایی طالقانی، م.، ۱۳۹۱. ژئومورفولوژی ایران، انتشارات قومس تهران، چاپ هفتم. ۳۶۰ ص.
<https://www.gisoom.com/book/1876022/>
- غیومیان، ج.، فاطمی عقدا، س م.، عطایی، ا.، داوودی، م ه.، نوروزی، ع.، ۱۳۸۶. تعیین روش بهینه برخورد با خطر زمین لغزش در مناطق روستایی با استفاده از سیستم پشتیبان تصمیم (DSS)، مطالعه موردی زمین لغزش باریکان، نشریه علوم زمین. ۱۷ (۶۵)، ۱۱-۱۱.
<https://doi.org/10.22071/gsj.2008.58164>
- قرشی، م.، آرین، مهران.، ۱۳۸۹. تکتونیک ایران. مربع آبی، چاپ دوم. ۳۳۶ ص.
<https://www.gisoom.com/book/1730398>
- گورابی، ا.، ۱۴۰۰. کمی سازی زمین لغزش بزرگ مله کبود ناشی از زمین لرزه ۷٫۳ سال ۱۳۹۶ کرمانشاه با استفاده از اینترفرومتری، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۱ (۶۰)، ۴۷-۶۳.
<http://dx.doi.org/10.52547/jgs.21.60.47>
- گیلانی پور، ع.، متولی، ص.، درفشی، خ.، ۱۴۰۴. ارزیابی حساسیت زمین لغزش و تعیین عوامل مؤثر در وقوع آن با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گلندرود). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۴ (۱)، ۲۵۷-۲۸۴.
<https://civilica.com/doc/2273636>
- منصوری، ر.، صفاری، ا.، ۱۳۹۴. تحلیل فعالیت زمین ساختی حوضه آبخیز فرحزاد از طریق شاخص های ژئومورفیک، ۲۴ (۹۵)، ۹۳-۱۱۳.
<https://doi.org/10.22131/sepehr.2015.15555>
- نوجوان، م.، شاهزیدی، س.، داودی، م.، امین الرعایایی، هاجر.، ۱۳۹۸. پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تلفیق دومدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی و فازی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کمه، استان اصفهان)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۷ (۴)، ۱۴۲-۱۵۹.

<https://doi.org/10.22126/ges.2021.6461.2391>

یمانی، م.، محمدی، ا.، نگهبان، س.، ۱۳۸۹. پهنه‌بندی زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبخیز تنکابن با استفاده از مدل‌های کمی، جغرافیا و توسعه، ۸، (۱۹)، ۸۳-۹۸.

<https://doi.org/10.22111/gdij.2010.1110>

Azhideh, S., Barani, S., Ferretti, G., & Scafidi, D. (2024). Earthquake-Induced Landslides in Italy: Evaluation of the Triggering Potential Based on Seismic Hazard. *Applied Sciences*, 14(8), 3435. <https://doi.org/10.3390/app14083435>

Bahrani, S., Rahimzadeh, B., & Khaleghi, S. (2020). Analyzing the effects of tectonic and lithology on the occurrence of landslide along Zagros ophiolitic suture: A case study of Sarv-Abad, Kurdistan, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(3), 1619-1637. <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-019-01639-3>

Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2012). Tectonic geomorphology. http://www.wiley.com/go/burbank/geomorphology?_gl=1*yxi6vx*_gcl_au*MTk3MzA0Mzc2My4xNzQ0ODY3ODQ1

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. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1231-z>

Cui, S., Wu, H., Pei, X., Yang, Q., Huang, R., & Guo, B. (2022). Characterizing the spatial distribution, frequency, geomorphological and geological controls on landslides triggered by the 1933 Mw 7.3 Diexi Earthquake, Sichuan, China. *Geomorphology*, 403, 108177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108177>

Dilley, M., Chen, U., Deichmann, U., Lerner-Lam, A.L., Arnold, M., Agwe, J., Buys, P., Kjekstad, O., Lyon, B., Yetman, G., (2005). Natural Disaster Hotspots: a Global Risk Analysis. Disaster Risk Management Series, No.5, 34423. International Bank for Reconstruction and Development/ The World Bank and Columbia University, Washington, D.C, pp. 148 p. <http://documents.worldbank.org/curated/en/621711468175150317>

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. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.08.004>

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).

Endo, R., & Iwahashi, J. (2024). Analysis of the spatial distribution of the landslides triggered by the 1923 Great Kanto Earthquake, Japan. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 100(2), 123-139. <https://doi.org/10.2183/pjab.100.009>

García Rodríguez, J. L., & Giménez Suárez, M. C. (2010). Historical review of topographical factor, LS, of water erosion models. https://www.researchgate.net/publication/263468721_Historical_review_of_topographical_factor_LS_of_water_erosion_models

Görüm, T. (2019). Tectonic, topographic and rock-type influences on large landslides at the northern margin of the Anatolian Plateau. *Landslides*, 16(2), 333-346. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_31

Hack, J. T. (1973). Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the US Geological Survey*, 1(4), 421-429. . <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70161653>

Huang, Y. D., Xu, C., Li, L., He, X. L., Cheng, J., Xu, X. W., & Zhang, X. J. (2023). Inventory and spatial distribution of ancient landslides in Hualong County China. *Land* 12: 17. <https://doi.org/10.3390/land12010136>

- 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.
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). Active tectonics, Earthquakes, uplift, and landscape. Second edition.
- Marchi, L., & Dalla Fontana, G. (2005). GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. *Environmental Geology*, 48, 218-228. <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-005-1292-4>
- Mohajjel, M., & Fergusson, C. L. (2014). Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran. *International Geology Review*, 56(3), 263-287. <http://dx.doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>
- Rickenmann, D., & Scheidl, C. (2012). Debris-flow runout and deposition on the fan. In *Dating Torrential Processes on Fans and Cones: Methods and Their Application for Hazard and Risk Assessment* (pp. 75-93). Dordrecht: Springer Netherlands. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4336-6_5
- Sahraei, H., Ehteshami-Moinabadi, M., & Alavi, S. A. (2023). Variation of seismicity parameters and its link to tectonic features of the central portion of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Geol Carpathica*, 74(4), 355-369. <http://dx.doi.org/10.31577/GeolCarp.2023.19>
- Zhang, Y., Li, Y., Dijkstra, T., Wasowski, J., Meng, X., Wu, X. & Chen, G. (2025). Evolution of large landslides in tectonically active regions-A decade of observations in the Zhouqu County, China. *Engineering Geology*, 107967. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.107967>

