Journal of Applied Researches in Geographical Sciences
Print ISSN: 2228-7736 Online ISSN: 2588-5138
https://jgs.khu.ac.ir/

# Identification and zoning of landslide-prone areas in Khalkhal city

**Elnaz Piroozi** [1] | **Sayyad Asghari Saraskanrood** [2]✉ | **Batool Zeinali** [3]

1. Postdoctoral Researcher, Department of Physical Geography, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. **E-mail:** e.pirouzi@uma.ac.ir
2. Corresponding author, Professor of Geomorphology, Department of Physical Geography, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. **E-mail:** s.asghari@uma.ac.ir
3. Assistant Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. **E-mail:** zeynali.b@uma.ac.ir

**Article Info**

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
Received
2023/12/24
Received in revised
2024/01/17
Accepted
2024/02/09
Published
2024/02/15
Published online
2026/03/21

**Keywords**:
hazard,
mass movement,
GIS,
MCDM.

**ABSTRACT**

"Landslides are among the most common and destructive natural hazards that change the shape of the earth's surface, and reviewing the damages caused by landslides, the need to investigate the factors influencing the occurrence of this phenomenon and predict its occurrence. proves that Khalkhal City, due to its special geological, climatic, and geomorphological characteristics and human activities, has been affected by the risk of landslides for a long time. Therefore, considering the importance of the issue; The purpose of this research is to produce a landslide risk map in this city. In this regard, first, the distribution map of landslides and influencing variables, including; DEM, slope, aspect, land use, lithology, distance from fault, distance from river, distance from road, and rainfall were provided. Next, after the fuzzy membership and determining the weight values of each factor using the CRITIC method, the landslide susceptibility map was prepared using the MARCOS multi-criteria decision-making method. The results of the study showed, respectively; that The factors of slope, land use, and lithology with weight coefficients of 0.148, 0.139, and 0.132 have the greatest influence on the occurrence of landslides in the region. According to the results of the research, respectively; 707.14 and 512.87 square kilometers of the area of the city are in high-risk and very high-risk categories, and these areas are areas that need management work and the implementation of protection projects. Also, considering the use of the ROC curve method the area under the curve (0.89), and the correlation of 0.83% between the final map obtained from the research and the distribution of sliding surfaces, the accuracy of the MARCOS method in identifying and zoning prone areas The risk of landslides in Khalkhal city is great.

**Cite this article:** Piroozi, Elnaz., Asghari Saraskanrood, Sayyad., & Zeinali, Batool. (2026). Identification and zoning of landslide-prone areas in Khalkhal city. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 26 (80), 92-113. DOI: http://dx.doi.org/10.61882/jgs.26.80.12

© The Author(s). Publisher: Kharazmi University.
DOI: http://dx.doi.org/10.61882/jgs.26.80.12

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

Journal of Applied Researches in Geographical Sciences
Print ISSN: 2228-7736 Online ISSN: 2588-5138
https://jgs.khu.ac.ir/

# Extended Abstract

## Introduction

landslide is the displacement of a large volume of soil, rock, or a combination of them down the slope due to the force of gravity (Rajabi, Rezaeimoghadam, Takzare., 2021: 171). Landslide is a phenomenon that depends on various factors such as slope, geology, climate, hydrology, land use, vegetation, human factors, and earthquakes (Zhou, Zhou, Tan., 2020:2). Landslides are referred to as geomorphological landforms that result in great loss of lives, finances, and natural resources every year (Silakhori, Vahabzadekebriya, Poorghasemi., 2023:122). Therefore, the threatening and harmful consequences of the landslide phenomenon on the environment prompt us to think about dealing with and mitigating the damage caused by this hazard (Pourfarrazeshzadeh and Asghari Saraskanroud, 2022:42). Khalkhal City, due to its special geological, climatic, geomorphological features and human activities, has been affected by the risk of landslides for a long time, so considering the importance of the issue; In this research, the zoning of Khalkhal city against this risk has been considered, so that the areas with high probability of occurrence against this risk can be determined using spatial and descriptive data.

## Methods and Materoal

The current research is of an applied type and its research method is an analysis based on the integration of data analysis, geographic information system, and the use of multi-criteria analysis techniques. ENVI, Ecognition, Arc GIS, Idrisi, and Excel software have been used for image processing and data analysis. To assess the risk of landslides, first, the effective factors (including slope, aspect, DEM, lithology, land use, rainfall, distance from the communication road, distance from the river, and distance from the fault), according to the natural and human conditions of the identified area became in the next step, information layers related to each of the factors were prepared in the geographic information system environment. The weighting of the investigated factors was done according to the CRITIC method and the final analysis was done using the MARCOS multi-criteria method. After preparing the landslide susceptibility map, the accuracy of the models has been checked using the ROC curve.

## Resultss and Discussion

According to the landslide risk zoning map obtained from the MARCOS method, respectively; 707.14 and 512.87 square kilometers of the area of the city are made up of very dangerous and high-risk classes. Also, 26.55 square kilometers of the area of the city have medium risk and 18.70 and 8.96 square kilometers have very low and low risk, respectively. Examining the location of cities and villages about the zoning of the possibility of landslides also shows that the city of Kolur along with 40 villages (equivalent to 26.67% of the villages of the city) are in a very high-risk zone. The high-risk category consists of 43 villages (equivalent to 28.67% of the total villages of the city). In addition, the spatial analysis of the vulnerability of the cities and villages of the city shows that Khalkhal and Hashtjin along with 41 villages (equivalent to 27.33% of the villages in the city) have medium risk potential. Respectively; 8 villages (equivalent to 12% of the total

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

Journal of Applied Researches in Geographical Sciences
Print ISSN: 2228-7736 Online ISSN: 2588-5138
https://jgs.khu.ac.ir/

villages of the city) and 8 villages (equivalent to 5.33% of the total villages of the city) are in the low and very low probability category in terms of the risk of landslides.
In addition, the results of this research showed that the factors of slope, land use, lithology, and precipitation, respectively; With weight coefficients of 0.148, 0.139, 0.132, and 0.127, are the most important influencing factors in the occurrence of instability in the study area. Also, considering the use of the ROC curve method the area under the curve (0.89), and the correlation of 0.83% between the final map obtained from the research and the distribution of sliding surfaces, the accuracy of the MARCOS method in identifying and zoning prone areas The risk of landslides in Khalkhal city is great.

**Conclusion**

The output of the research shows the high potential of the studied area in terms of the occurrence of landslide risk and according to the results, it can be found that many landslides occur in these areas with very high risk. have given. Therefore, custodian organizations must carry out proper and expert watershed protection measures in these potentially dangerous areas. Among these measures, we can prevent the quantitative and qualitative reduction of vegetation and stabilize slopes by creating and strengthening vegetation in areas prone to landslides, preventing rain fed cultivation in sloping lands, and adjusting and reducing the slope in the slopes. Heights overlooking the construction of roads, grading the slopes, drainage and correct water routing in the upstream and downstream areas prone to landslides, the use of retaining walls, and most importantly, educating the public (especially the residents around the areas) sensitive to landslides) To have basic information about the phenomenon of landslides and to pay more attention to the damages caused by it and reduce investment in the future. It is expected that the results of the present research, considering the use of the MARCOS multi-criteria analysis method, in the matter of choosing the appropriate method for landslide risk assessment and zoning, especially in areas with natural and human conditions similar to Khalkhal city, to be noticed by researchers.

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی
شاپا چاپی: ۲۲۲۸-۷۷۳۶ شاپا الکترونیکی: ۲۵۸۸-۵۱۳۸
https://jgs.khu.ac.ir/

# شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع خطر زمین‌لغزش در شهرستان خلخال

الناز پیروزی[۱]، صیاد اصغری سراسکانرود[۲]✉، بتول زینالی[۳]

۱. پژوهشگر پسادکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: e.pirouzi@uma.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: s.asghari@uma.ac.ir

۳. استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: zeynali.b@uma.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۱۰/۰۳

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۲/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۱۱/۲۰

تاریخ انتشار:
۱۴۰۲/۱۱/۲۶

تاریخ انتشار آنلاین:
۱۴۰۵/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:
مخاطره،
حرکات دامنه‌ای،
سیستم اطلاعات جغرافیایی،
تحلیل چندمعیاره.

**چکیده**

**در زمین‌لغزش‌ها از مخرب‌ترین و متداول‌ترین مخاطرات طبیعی تغییردهنده شکل سطح زمین می‌باشند و ارزیابی و بررسی خسارات ناشی از زمین‌لغزش، لزوم بررسی عوامل تأثیرگذار بر وقوع این پدیده و پیش‌بینی رخداد آن را به اثبات می‌رساند. شهرستان خلخال، به دلیل ویژگی‌ها و شرایط خاص زمین‌شناسی، اقلیمی، ژئومورفولوژیکی و فعالیت‌های انسانی، از دیرباز تحت تأثیر وقوع خطر زمین‌لغزش بوده است. لذا، با نظر به اهمیت موضوع؛ هدف این پژوهش، تولید نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش در این شهرستان، می‌باشد. در این راستا، ابتدا نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها و متغیرهای تأثیرگذار، شامل؛ ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، کاربری اراضی، لیتولوژی و بارش فراهم شد. در ادامه پس از عضویت فازی و تعیین مقادیر وزنی هر یک از عوامل با استفاده از روش کریتیک، نقشه حساسیت زمین‌لغزش با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مارکوس، تهیه شد. نتایج مطالعه نشان داد، به ترتیب؛ عوامل شیب، کاربری اراضی و لیتولوژی با ضرایب وزنی ۰/۱۴۸، ۰/۱۳۹ و ۰/۱۳۲، بیشترین تأثیرگذاری را در رخداد لغزش‌های منطقه دارند. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش، به ترتیب؛ ۷۰۷/۱۴ و ۵۱۲/۸۷ کیلومترمربع از مساحت شهرستان، در طبقه پرخطر و بسیار پرخطر قرار دارد و این مناطق پهنه‌هایی هستند که به کارهای مدیریتی و اجرای پروژه‌های حفاظتی نیازمند هستند. همچنین، با توجه به بهره‌گیری از روش منحنی راک و سطح زیرمنحنی (۰/۸۹) و همبستگی ۰/۸۳ درصدی بین نقشه نهایی حاصل از پژوهش و پراکنش سطوح لغزشی، دقت روش مارکوس، در شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع خطر زمین‌لغزش شهرستان خلخال، عالی می‌باشد.**

**استناد**: پیروزی، الناز؛ اصغری سراسکانرود، صیاد؛ و زینالی، بتول (۱۴۰۵). شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع خطر زمین‌لغزش در شهرستان خلخال. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۶ (۸۰)، ۱۱۳-۹۲.
http://dx.doi.org/10.61882/jgs.26.80.12

ناشر: دانشگاه خوارزمی تهران.

© نویسندگان.

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

**مقدمه**

زمین‌لغزش حرکت و جابه‌جایی حجم زیادی از خاک، سنگ و یا مخلوطی از آن‌ها به سمت پایین شیب، بر اثر نیروی گرانش می‌باشد (رجبی، رضایی‌مقدم و تک‌زارع، ۱۷۱:۱۳۹۹؛ شرفی، صادقی‌راد و جوادی‌نیا،۱۷۸:۱۳۹۹). وقوع زمین‌لغزش به عوامل متعددی؛ همچون شیب، شرایط زمین‌شناسی، ویژگی‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی، نوع کاربری زمین، پوشش‌گیاهی و عوامل انسانی بستگی دارد (ژو، ژو و تان[1]، ۲:۲۰۲۰؛ گورابی، ۴۸:۱۴۰۰). این پدیده طبیعی به اختلال در سیستم آب‌وخاک، تخریب راه‌های ارتباطی، مناطق مسکونی، خطوط انتقال نیرو، سازه‌های مهندسی، تخریب پوشش‌گیاهی و اراضی کشاورزی، رسوب‌گذاری سریع و گسترده، تسریع فرایند فرسایش و انتقال حجم زیادی از رسوبات به پشت سدها و تغییر و تحول سیمای زمین منجر می‌گردد (ماترازی و همکاران[2]، ۲:۲۰۲۱). زمین‌لغزش‌ها به پدیده‌های ژئومورفولوژیکی گفته می‌شود که هر ساله خسارات جانی، مالی و منابع طبیعی زیادی را به دنبال دارد (سیلاخوری، وهابزاد کبریا و پورقاسمی ۱۲۲:۱۴۰۲). در کشـــورهای درحال‌توسعه همه‌ساله بیش از ۰/۵۰ درصد از تولید ناخالص ملی به دلیل زمین‌لغزش از بین مـــی‌رود (چن و همکاران[3]، ۱۲۳:۲۰۱۵). رانش زمین از نظر تلفات در بین بزرگ‌ترین بلایای طبیعی، رتبه هفتم را دارد و بیش از ۱۷ درصد تلفات ناشی از بلایای طبیعی را شامل می‌شود (علی‌محمدلو، نجفی و یالسین[4]، ۲۲۰:۲۰۱۳). لذا، پیامدهای تهدیدساز و زیان‌بار پدیده زمین‌لغزش در برابر محیط‌زیست ما را بر آن می‌دارد تا به فکر مقابله و کاهش خسارات ناشی از این خطر باشیم (پورفرازش‌زاده و اصغری سراسکانرود، ۴۲:۱۴۰۱). در این راستا، شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش، با استفاده از تکنیک‌های پهنه‌بندی، به منظور مدیریت این خطر ضرورت می‌یابد (رابی و همکاران[5]، ۱:۲۰۲۲؛ نصیری و همکاران، ۱۰۶:۱۴۰۱).

با رشد و توسعه فنّاوری‌های جدید و روش‌های موجود، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی انواع مخاطرات و محیط ارائه این نقشه‌ها به استفاده از ابزارهای کارآمدتری نیازمند است. با توجه به اینکه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به منظور شناسایی بهترین گزینه توسط تصمیم‌گیرندگان، امکان تعیین اهمیت همه معیارها و ادغام آن‌ها در یک شاخص ترکیبی را فراهم می‌کنند (ژو و لیو[6]، ۳:۲۰۲۱). در چند دهه اخیر، این روش‌ها به‌طور گسترده در یکپارچه‌سازی، شناسایی یا رتبه‌بندی عوامل تأثیرگذار و به‌ویژه در تجزیه‌وتحلیل مخاطرات طبیعی مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند (محمودی‌وانعلیا، ارگانی و جلوخانی نیارکی، ۳۹۷:۱۴۰۰). طی دو دهه اخیر تحقیقات زیادی نیز در زمینه تعیین احتمال خطر وقوع و تهیه نقشه ریسک زمین‌لغزش برای مناطق مختلف با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره صورت پذیرفته است و بر عملکرد مطلوب این روش‌ها در امر پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تأکید شده است. به‌عنوان‌مثال؛ عابدینی و پیروزی (۱۳۹۸)، خطر زمین‌لغزش در شهرستان خلخال را با استفاده از تلفیق روش‌های تحلیل لکه داغ، فرایند تحلیل شبکه و ترکیب خطی وزنی، موردبررسی قرار دادند و بر اساس نتایج مطالعه؛ بیان شده است که عوامل شیب، کاربری اراضی، بارش و لیتولوژی بیشترین تأثیر را بر ایجاد زمین‌لغزش در شهرستان خلخال داشته و به ترتیب ۲۴۹/۳۳، ۳۸۵/۰۸ و ۴۲۷/۱۴ کیلومترمربع از مساحت محدوده، در طبقات لکه داغ، با ضریب اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰ درصد، قرار دارند. مددی و همکاران (۱۳۹۹)، با استفاده الگوریتم‌های چند معیاره ماباک و کوداس، به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، در شهرستان کوثر پرداختند. با توجه به نتایج این مطالعه، به ترتیب؛ عوامل شیب، کاربری اراضی، خاک و لیتولوژی، بیشترین ضریب وزنی را به خود اختصاص دادند و نتایج به دست آمده، حاکی از توان بالای این شهرستان از لحاظ وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. شریفی و همکاران (۱۴۰۰)، خطر زمین‌لغزش در شهرستان نور را با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه بررسی کردند و یافته‌های پژوهش نشان داده است، حدود ۱۴/۴۹ درصد از منطقه در کلاس زمین‌لغزش با احتمال زیاد قرار دارند که به‌طور عمده، در بخش‌های

1. Zhou, Zhou & Tan
2. Materazzi et al
3. Chen et al
4. Alimohammadlou, Najafi & Yalcin
5. Rabby et al
6. Zhu and Liu

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

شمال، شمال‌غرب و شمال‌شرق قرار دارند. اصغری سراسکانرود و پیروزی (۱۴۰۱)، با بهره‌گیری از روش‌های چند معیاره ویکور، ماباک، ترکیب خطی وزنی و میانگین وزن‌دار ترتیبی، زمین‌لغزش حوضه گیوی‌چای را موردبررسی قرار دادند و طبق یافته‌های پژوهش، شیب، لیتولوژی و کاربری‌اراضی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل دخیل در وقوع زمین‌لغزش حوضه، معرفی شده‌اند و همچنین بیان شده است که مساحت زیادی از سطح حوضه، در طبقات با خطر متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. مددی و پیروزی (۱۴۰۲)، به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه بالادست سد یامچی، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مارکوس و کوداس پرداختند. طبق نتایج به دست آمده، عامل شیب، کاربری اراضی و لیتولوژی، در وقوع زمین‌لغزش حوضه، بیشترین اهمیت را دارند و خروجی حاصل از روش‌های مورد استفاده، نشان‌دهنده توان بالای حوضه، از لحاظ رخداد زمین‌لغزش می‌باشد. به علاوه، با توجه به نتایج صحت‌سنجی، دقت روش مارکوس، با مساحت زیر منحنی ۰/۸۱، به صورت عالی محاسبه شده است. وجتکووا و وجتک[7] (۲۰۲۰)، با استفاده از روش فرآیند سلسله‌مراتبی، به ارزیابی پتانسیل لغزش زمین، در شهر هاندلوا اسلواکی پرداختند. با توجه به نتایج مطالعه، شیب به‌عنوان مهم‌ترین عامل شناسایی شده است و همچنین، طبق یافته‌های این پژوهش، پهنه با حساسیت بالا و بسیار بالا، ۵۱/۹ درصد از کل محدوده مطالعاتی را تشکیل می‌دهد. صالح‌پورجم، مصفایی و سرفراز[8] (۲۰۲۱)، با بهره‌گیری از روش‌های ویکور، تاپسیس و روش شاخص زمین‌لغزش[9]، حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبخیز الموت ایران را موردمطالعه قرار دادند. طبق نتایج حاصل از این مطالعه بیان شده است که به دلیل مساحت زیاد مناطق با پتانسیل بالا و بسیار بالا، مدیریت ریسک زمین‌لغزش در این حوضه بسیار مهم است و به‌طورکلی، نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌های چند معیاره، عملکرد خوب این مدل‌ها را برای تولید خطر زمین‌لغزش، نشان می‌دهد. کومار، شارما و بانسال[10] (۲۰۲۲)، به پیش‌بینی فضایی خطر زمین‌لغزش در منطقه کولو هیماچال پرادش هند، با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، پرداختند. نتایج مطالعه نشان داده است که ۶۸ درصد از مساحت محدوده مطالعاتی دارای پتانسیل بالای لغزش می‌باشد. همچنین با توجه به نقشه پراکنش لغزش‌های موجود، دقت پیش‌بینی ۹۰ درصدی برای این پژوهش، محاسبه شده است. ساها و همکاران[11] (۲۰۲۳)، با بهره‌گیری از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، خطر زمین‌لغزش در بخشی از ناحیه دارجلینگ در شمال‌شرقی هند را مورد ارزیابی قرار دادند و بر اساس نتایج به دست آمده، ۳۷/۸۶ درصد از منطقه در پهنه‌های پرخطر قرار دارد و انجام اقدامات مدیریتی، در منطقه ضروری به نظر می‌رسد.

شهرستان خلخال از لحاظ ویژگی‌های منحصربه‌فرد از جمله؛ توپوگرافی، وجود مواد سست و نامقاوم سطحی بر روی سازندهای مقاوم، شرایط اقلیمی (به‌ویژه؛ به دلیل بارش‌های بهاری و ذوب شدن برف‌ها در فصل بهار) و استفاده غیراصولی و بی‌رویه از اراضی (به‌ویژه کشاورزی)، از پتانسیل بالای وقوع زمین‌لغزش برخوردار است. این شهرستان از حادثه‌خیزترین شهرستان‌های استان اردبیل، از نظر رخداد خطر زمین‌لغزش، می‌باشد، به‌طوری‌که حدود ۵۲/۵ درصد از زمین‌لغزش‌های استان اردبیل، در حوضه سد سفیدرود و در شهرستان‌های کوثر و خلخال قرار دارد. در شکل (۱)، نمایی از دامنه‌های مستعد وقوع رانش زمین و زمین‌لغزش‌های رخ داده در شهرستان خلخال، نمایش داده شده است. می‌توان اذعان داشت که وجود پتانسیل بالای وقوع زمین‌لغزش در شهرستان خلخال، بررسی موضوع خطر لغزش زمین در این شهرستان را دوچندان نموده است. لذا با نظر به اهمیت موضوع؛ در این پژوهش، پهنه‌بندی شهرستان خلخال در برابر این مخاطره، مدنظر قرار گرفته است تا با استفاده از داده‌های مکانی و توصیفی بتوان مناطق با احتمال وقوع زیاد در برابر این خطر را تعیین کرد. انتظار می‌رود با شناسایی مناطق اولویت‌دار از نظر پتانسیل وقوع زمین‌لغزش، اقدامات لازم برای کنترل اثرات منفی آن، عملیات اجرایی و اصلاحی و برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه از منابع انجام شود.

7. Vojtekova and Vojtek
8. Salehpour Jam, Mosaffaie & Sarfaraz
9. Landslide Index Method (LIM)
10. Kumar, Sharma & Bansal
11. Saha et al

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]




**شکل (۱). نمایی از دامنه‌های مستعد وقوع رانش زمین و زمین‌لغزش‌های رخ داده در سطح شهرستان خلخال**

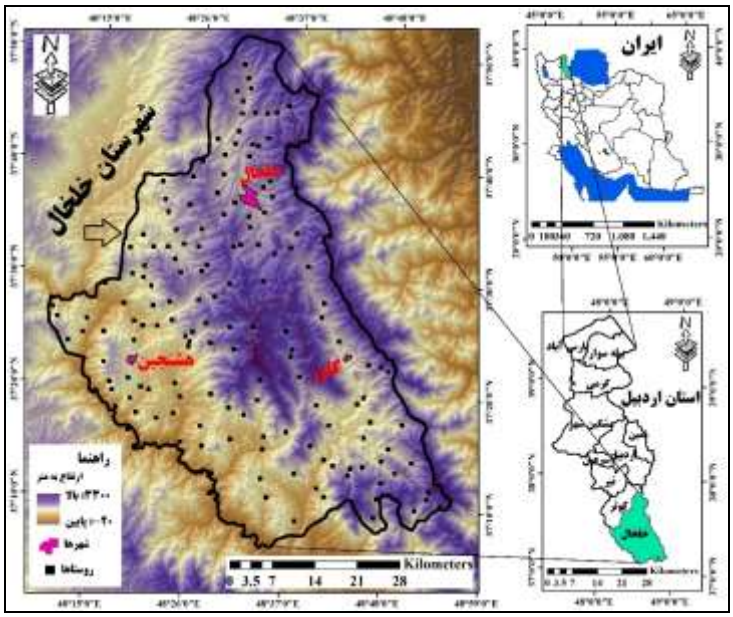
## روش‌شناسی

### موقعیت منطقه موردمطالعه

شهرستان خلخال با مساحت ۲۶۶۴ کیلومترمربع، در طول شرقی ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۵ دقیقه و عرض شمالی ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۷ درجه و در جنوب استان اردبیل، قرار گرفته است شکل (۲). این شهرستان، از سمت شمال با شهرستان کوثر (گیوی)، از شرق با استان گیلان، از سمت جنوب با استان زنجان و از غرب با شهرستان میانه واقع در استان آذربایجان شرقی هم‌جوار می‌باشد. قلّه آق‌داغ با ۳۳۰۹ متر بلندترین نقطه شهرستان و مناطق حاشیه رودخانه قزل‌اوزن با ۵۲۰ متر پست‌ترین نقطه آن است (عابدینی و پیروزی، ۲۲:۱۳۹۸). آق‌داغ با ارتفاع ۳۳۰۹ متر، بعد از سبلان، دومین قلّه مرتفع استان محسوب می‌شود و تقریباً در جنوب شهرستان خلخال واقع شده است. قله عجم نیز در قسمت شمالی شهرستان واقع گردیده است و با ارتفاع ۳۰۰۹ متر، دومین قله بلند شهرستان خلخال محسوب می‌شود. از دیگر ارتفاعات شهرستان می‌توان به پلنگان، اوجقاز، آلوچه‌داغ و ازناو به ترتیب، با ارتفاعات ۲۶۴۰، ۲۵۵۰، ۲۱۹۰ و ۱۹۵۰ متر اشاره کرد. محدوده شهرستان، از لحاظ تکتونیکی، در زون البرز (زیر پهنه البرز غربی و آذربایجان)، قرار دارد. در شهرستان خلخال، رود قزل‌اوزن و شاخه‌های آن مانند ازنوچای، نورعلی‌چای، قئز باخان‌چای، هیروچای، آرپاچای، شاهرود جریان دارد. منطقه موردمطالعه از لحاظ اقلیمی، دارای هوای سرد در زمستان و هوای نسبتاً معتدل در تابستان می‌باشد. نوع اقلیم منطقه نیز بر اساس فرمول دومارتن و سلیانینوف، به صورت نیمه‌خشک است. میانگین بارش سالانه این شهرستان، ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد و به ترتیب؛ بهمن و مرداد ماه، سردترین و گرم‌ترین ماه هستند.

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]



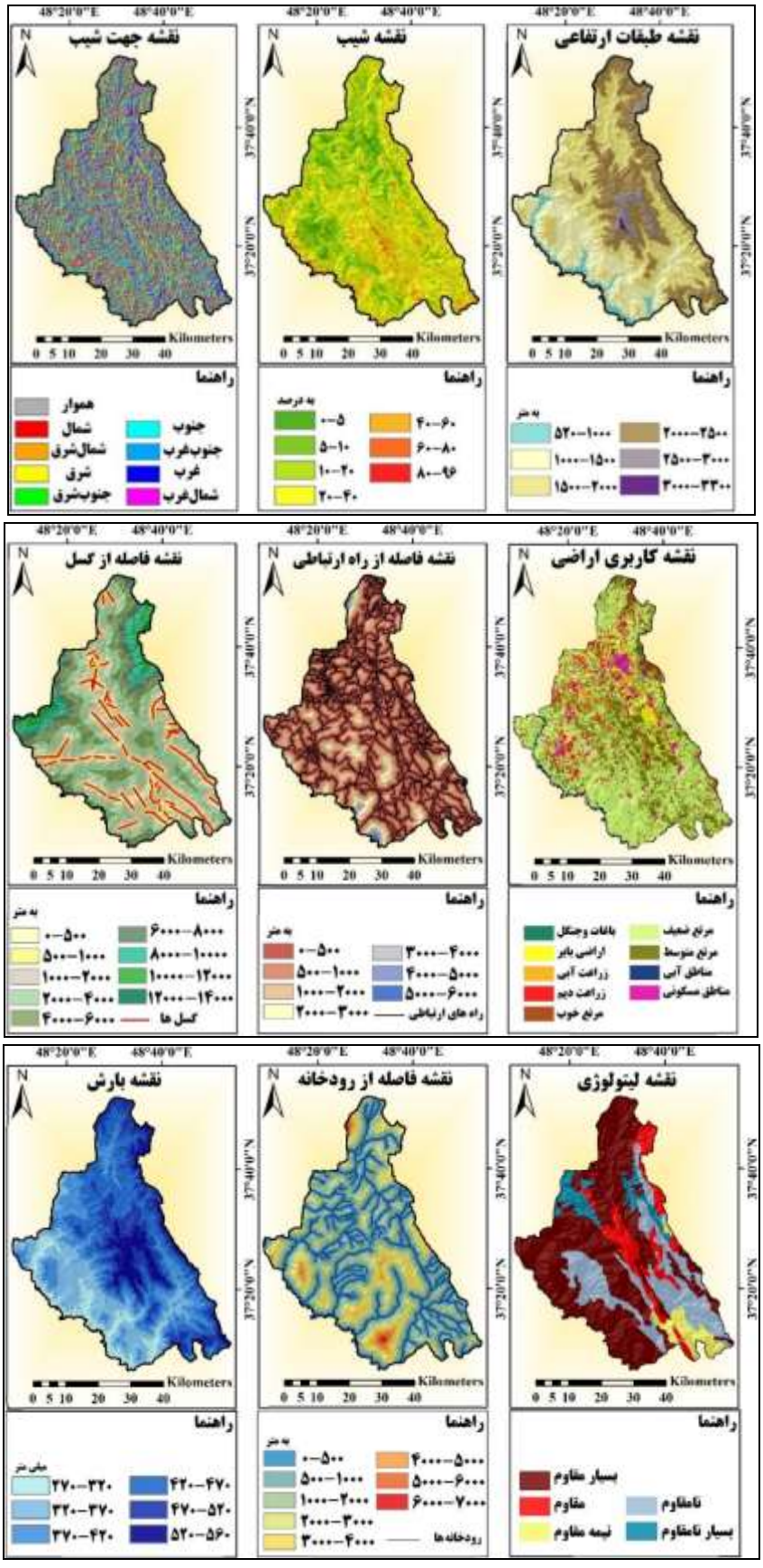

**شکل (۲). نقشه موقعیت محدوده موردمطالعه**

**منابع داده‌ها و ابزارها**

تحقیق حاضر، با توجه به ماهیت مسئله و موضوع موردبررسی، از نوع پژوهشی-کاربردی است. با توجه به اینکه زمین‌لغزش‌ها، تحت تأثیر عوامل متعدّدی هستند و در هر منطقه‌ای تحت شرایط مختلفی رخ می‌دهند، انتخاب و شناخت عوامل مؤثر در وقوع لغزش‌ها از مراحل دارای حائز اهمیت می‌باشد. لذا، ابتدا معیارهای شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از راه ارتباطی، فاصله از آبراهه و فاصله از گسل، لیتولوژی، کاربری‌اراضی و بارش، با مطالعه منابع و بررسی پیشینه پژوهشی مرتبط با موضوع، استفاده از نظرات کارشناسان و نیز با توجه به مشاهده میدانی، به‌عنوان عوامل مؤثر در ایجاد خطر زمین‌لغزش شهرستان خلخال، شناسایی شدند. در مرحله بعد، لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از عوامل، در سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. لایه‌های راه‌های ارتباطی و شبکه رودخانه، با استفاده از نقشه‌های خطوط ارتباطی و رودخانه‌های استان اردبیل، تهیه گردید. مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک (۱۲/۵×۱۲/۵ متر) از سایت دانشگاه آلاسکا دریافت و محدوده موردمطالعه استخراج شد و لایه‌های شیب و جهت‌شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی تهیه شد. لایه‌های لیتولوژی (مقاومت سنگ‌ها) و پراکنش گسل‌ها، با بهره‌گیری از نقشه زمین‌شناسی استان؛ با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. نقشه کاربری اراضی شهرستان، با استفاده از تصاویر سنجنده لندست ۹ (تاریخ: ۲۰۲۲/۰۸/۵) و طبقه‌بندی شیءگرا استخراج گردید. نقشه بارش نیز، با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی (خلخال، مجره، هشتجین، برندق، هل‌آباد، آرپاچایی، میان‌رودان، گیوی‌علیا، خانقاه‌سادات، قره‌قشلاق، پردتسلو و کلور) و با استفاده از معادله گرادیان بارش (P= 0/1029 H+218.15)، ترسیم شد. در شکل (۳)، نقشه معیارهای مطرح در بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان خلخال، نمایش داده شده است.

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]




**شکل (۳). نقشه معیارهای مطرح در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان خلخال**

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

**مراحل تهیه نقشه پهنه‌بندی با استفاده از روش مارکوس (سنجش و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس راه‌حل سازشی[۱۲])**

مرحله اول- اولین گام در این روش تعیین عوامل و گزینه‌های پژوهش و تشکیل ماتریسی است که ستون‌های آن نشان‌دهنده معیارهای مسئله و سطرها نیز نشانگر گزینه‌ها هستند. مرحله دوم- به صورت تعیین مقادیر ایده‌آل (AI) و ضد ایده‌آل (AAI) با توجه به روابط (۱) و (۲)، است. در روابط (۱ و ۲)، B به معنای معیارهایی می‌باشد که جنبه سود دارند و C نیز بیانگر معیارهای با جنبه هزینه یا منفی است.

$$AI = \max x_{ij} if\ j \in B\ and \min x_{ij}\ if\ j \in C \qquad \text{رابطه (۱)}$$

$$AAI = \min x_{ij} if\ j \in B\ and \max x_{ij}\ if\ j \in C \qquad \text{رابطه (۲)}$$

مرحله سوم- استانداردسازی، لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از معیارها می‌باشد که در این پژوهش این مرحله با توجه به تابع عضویت در مجموعه فازی انجام شده است جدول (۱). در مجموعه‌های فازی، برای حداکثر عضویت، مقدار یک و برای حداقل عضویت، مقدار عددی صفر، در نظر گرفته می‌شود (ژانگ، ژانگ و دونگ[۱۳]، ۱۷:۲۰۲۳).

**جدول (۱). نوع توابع فازی‌ساز لایه‌های موضوعی تأثیرگذار بر خطر زمین‌لغزش شهرستان خلخال**

| متغیر | توضیحات | نوع تابع فازی |
|---|---|---|
| **شیب** | کلاسه‌بندی مجدد و اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین‌لغزش | تابع بزرگ فازی |
| **جهت شیب** | کلاسه‌بندی مجدد و اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین‌لغزش | تابع بزرگ فازی |
| **طبقات ارتفاعی** | با افزایش ارتفاع، خطر زمین‌لغزش افزایش می‌یابد | تابع خطی افزایشی |
| **کاربری اراضی** | اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین‌لغزش | تابع بزرگ فازی |
| **فاصله از راه ارتباطی** | در مناطق مجاور راه ارتباطی، پتانسیل وقوع مخاطره زمین‌لغزش افزایش می‌یابد | تابع نزدیک فازی |
| **لیتولوژی** | اختصاص کدها بر اساس اهمیت آن در وقوع خطر زمین‌لغزش | تابع بزرگ فازی |
| **فاصله از گسل** | در مناطق مجاور گسل، پتانسیل وقوع مخاطره زمین‌لغزش افزایش می‌یابد | تابع نزدیک فازی |
| **فاصله از رودخانه** | در مناطق مجاور رودخانه، پتانسیل وقوع مخاطره زمین‌لغزش افزایش می‌یابد | تابع نزدیک فازی |
| **بارش** | با افزایش مقدار بارش، خطر زمین‌لغزش افزایش می‌یابد | تابع خطی افزایشی |

منبع: اصغری و پیروزی (۱۴۰۱)، مددی و پیروزی (۱۴۰۲).

مرحله چهارم- وزن‌دار نمودن ماتریس استاندارد شده می‌باشد. مرحله وزن‌دهی عوامل با استفاده از روش کریتیک[۱۴]، انجام شده است. در این روش، داده‌ها بر اساس میزان تداخل و تضاد بین معیارها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرد. به منظور پیاده‌سازی این روش، پس از محاسبه انحراف معیار عوامل، با توجه به تعداد معیارهای موردبررسی، ماتریس متقارنی در ابعاد m×m ایجاد می‌گردد که شامل ضرایب همبستگی بین بردارهای تشکیل شده است. با تعیین مقدار همبستگی، تضاد موجود بین هر معیار با معیارهای دیگر، محاسبه می‌شود و با توجه به مقادیر همبستگی، تضاد و انحراف معیار هر عامل موردبررسی، میزان اطلاعات آن محاسبه می‌گردد. سپس، وزن نهایی هر معیار، از تقسیم میزان اطلّاعات هر معیار بر مجموع میزان کل اطلّاعات تمامی معیارها به دست می‌آید (علی‌نژاد و خلیلی[۱۵]، ۱۹۹:۲۰۱۹). در راستای انجام مراحل وزن‌دهی کریتیک ابتدا در محیط نرم‌افزار ادریسی انحراف‌معیار و همبستگی میان لایه‌ها، با استفاده از تابع REGRESS به دست آمد و در مرحله بعد، نسبت به محاسبه ماتریس تضاد، میزان اطلّاعات و وزن نهایی در نرم‌افزار اکسل اقدام گردید.

12. MARCOS (Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution)
13. Zhang, Zhang & Dong
14. (CRITIC) CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation
15. Alinezhad & Khalili

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

مرحله پنجم- محاسبه مطلوبیت هر گزینه است. در این مرحله، بر اساس روابط (۳) و (۴)، درجه مطلوبیت ایده‌آل +K و ضد ایده‌آل -K گزینه‌ها محاسبه می‌شود.

$$K_i+ = \frac{S_i}{S_{ai}}$$ رابطه (۳)

$$K_i- = \frac{S_i}{S_{aai}}$$ رابطه (۴)

در روابط (۳ و ۴)، Si=(i=1,2,3,..m)، جمع مقادیر هر سطر در ماتریس وزن‌دار می‌باشد که از رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

$$S_i = \sum_{j:1}^{n} v_{ij}$$ رابطه (۵)

مرحله ششم-تعیین عملکرد نهایی و رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌باشد که با استفاده از رابطه (۶)، عملکرد مطلوب هر گزینه محاسبه می‌شود.

$$f(k_i) = \frac{k_i^+ + k_i^-}{1 + \frac{1-f(k_i^+)}{f(k_i^+)} + \frac{1-f(k_i^-)}{f(k_i^-)}}$$ رابطه (۶)

در رابطه (۶) f(k-)، عملکرد مطلوبیت ضد ایده‌آل و f(k+) عملکرد مطلوب ایده‌آل برای هر گزینه می‌باشد که از روابط (۷) و (۸)، محاسبه می‌گردد. سپس بر اساس اعداد به دست آمده از f(k)، هر گزینه رتبه‌بندی انجام می‌شود و هر گزینه با مقدار f(k) بزرگ‌تر، رتبه بهتری دارد (استویچ و همکاران[16]، ۷:۲۰۲۰؛ جعفرزاده قوشچی و همکاران[17]، ۴۵۵۵:۲۰۲۳).

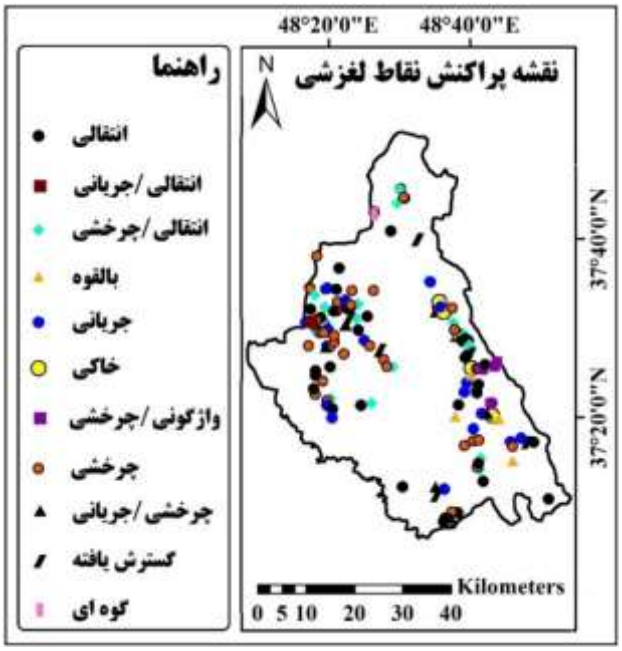
$$f(k_i^-) = \frac{k_i^+}{k_i^+ + k_i^-}$$ رابطه (۷)

$$f(k_i^-) = \frac{k_i^-}{k_i^+ + k_i^-}$$ رابطه (۸)

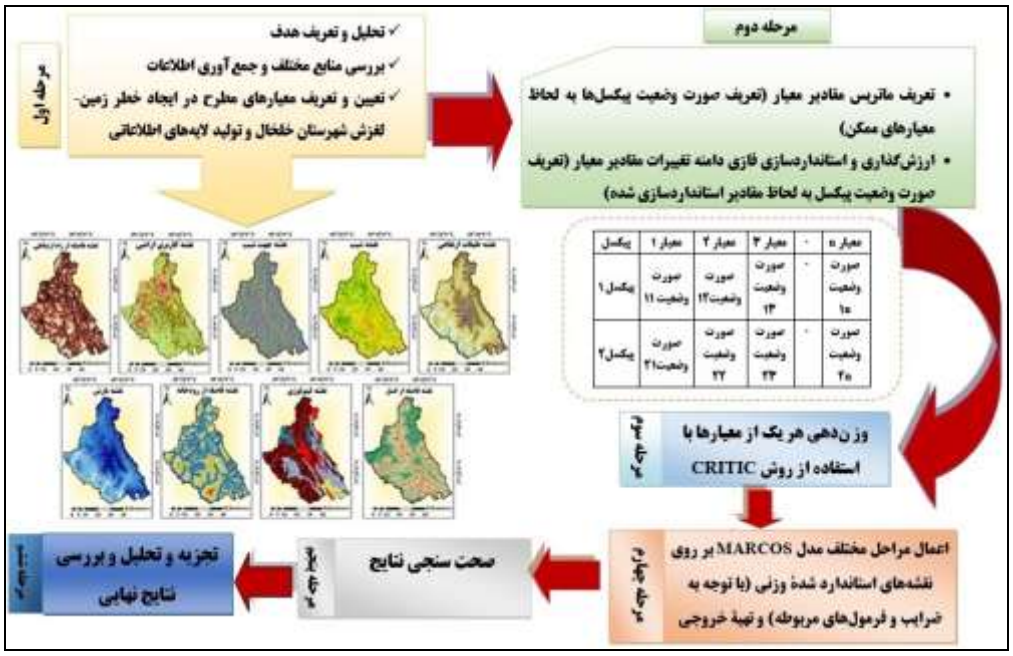
در نهایت، با توجه به اینکه، منحنی تشخیص عملکرد نسبی راک[18] از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی، سیستم‌ها است که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (سیلاخوری، وهابزاده کبریا و پورقاسمی، ۱۲۸:۱۴۰۲؛ محمدنیا و فلاح قالهری، ۱۱۹:۱۳۹۷). صحت خروجی نهایی مطالعه، با توجه به نقشه پراکنش لغزش شهرستان خلخال اخذ شده از سازمان آبخیزداری استان اردبیل شکل (۴)، با استفاده از منحنی راک انجام شده است. فلوچارت مربوط به فرآیند پژوهش، در شکل (۵)، نمایش داده شده است.

16. Stević et al
17. Jafarzadeh Ghoushchi et al
18. ROC (Receiver operating characteristic)

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]




**شکل (۴). نقشه پراکنش نقاط لغزشی شهرستان خلخال**

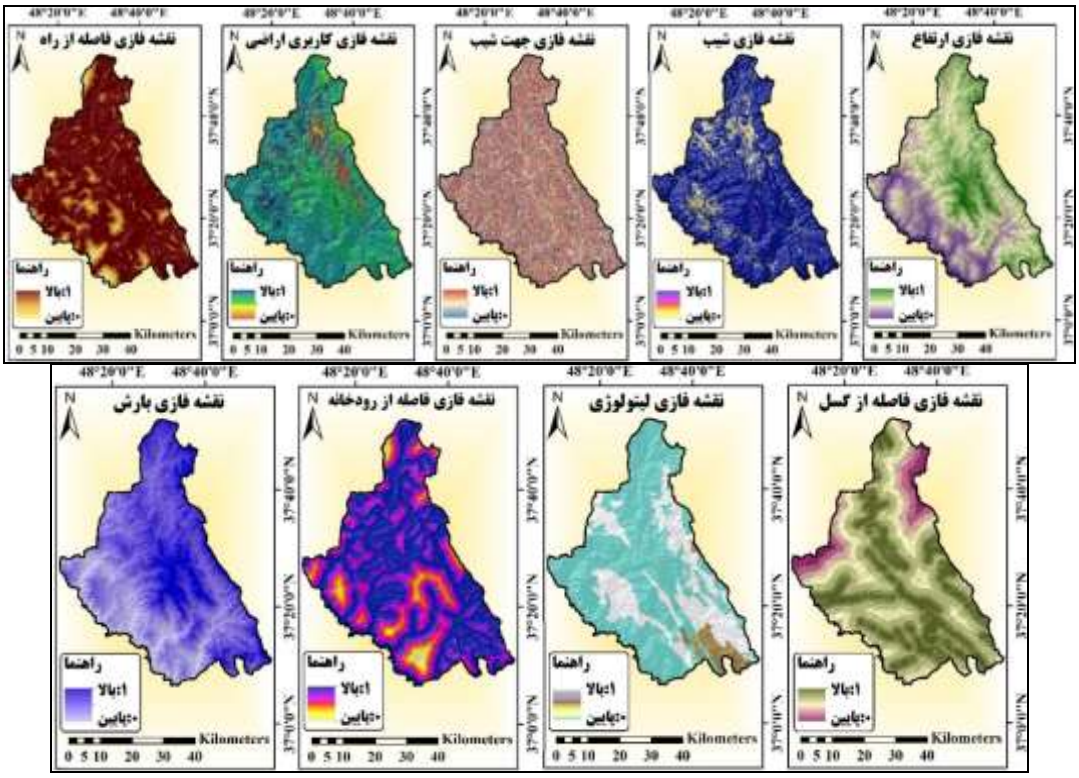



**شکل (۵). فلوچارت مربوط به فرآیند تحقیق**

## نتایج و بحث

پس از تعیین معیارهای مؤثر در پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های استاندارد شده هر یک از معیارهای شکل (۶)، به منظور تعیین شاخص‌های مؤثر در تعیین پهنه‌های مختلف خطر، میزان اهمیت هر یک از معیارها جداول (۲ تا ۴)، به دست آمد و با اعمال کردن وزن‌های مربوطه در لایه‌های فازی شده و با اجرای دیگر مراحل به صورت عملیات ریاضی بر روی لایه‌های استاندارد شده، نقشه خروجی نهایی در ۵ طبقه بسیار پرخطر تا بسیار کم‌خطر، به دست آمد شکل (۷).

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]




**شکل (۶). نقشه استاندارد شده معیارهای مطرح در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان خلخال**

**جدول (۲). ماتریس همبستگی معیارها**

| معیار | شیب | جهت شیب | ارتفاع | کاربری | راه | لیتولوژی | گسل | رودخانه | بارش |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| شیب | ۱ | ۰/۰۶۵ | ۰/۳۱۳ | -۰/۰۸۲ | -۰/۱۹۸ | -۰/۳۳۶ | ۰/۱۳۵ | -۰/۰۳۲ | ۰/۲۸۹ |
| جهت شیب | ۰/۰۶۵ | ۱ | -۰/۰۸۵ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۵۶ | ۰/۰۵۴ | ۰/۰۷۷ | ۰/۰۸۳ | -۰/۵۴۵ |
| ارتفاع | ۰/۳۱۳ | -۰/۰۸۵ | ۱ | ۰/۰۱۲ | -۰/۵۲۶ | -۰/۰۷۲ | ۰/۰۸۳ | -۰/۰۸۲ | ۰/۹۲۳ |
| کاربری | -۰/۰۸۲ | ۰/۰۳۴ | ۰/۰۱۲ | ۱ | ۰/۰۵۴ | ۰/۲۰۱ | ۰/۰۸۵ | -۰/۰۴۱ | ۰/۰۱۰ |
| راه | -۰/۱۹۸ | ۰/۰۵۶ | -۰/۵۲۶ | ۰/۰۵۴ | ۱ | ۰/۳۴۱ | ۰/۰۲۲ | ۰/۲۱۳ | -۰/۵۶۳ |
| لیتولوژی | -۰/۳۳۶ | ۰/۰۵۴ | -۰/۰۷۲ | ۰/۲۰۱ | ۰/۳۴۱ | ۱ | ۰/۲۴۵ | ۰/۰۸۹ | -۰/۵۴۷ |
| گسل | ۰/۱۳۵ | ۰/۰۷۷ | ۰/۰۸۳ | ۰/۰۸۵ | ۰/۰۲۲ | ۰/۲۴۵ | ۱ | -۰/۱۷۷ | ۰/۰۳۶ |
| رودخانه | -۰/۰۳۲ | ۰/۰۸۳ | -۰/۰۸۲ | -۰/۰۴۱ | ۰/۲۱۳ | ۰/۰۸۹ | -۰/۱۷۷ | ۱ | -۰/۲۴۲ |
| بارش | ۰/۲۸۹ | -۰/۵۴۵ | ۰/۹۲۳ | ۰/۰۱۰ | -۰/۵۶۳ | -۰/۵۴۷ | ۰/۰۳۶ | -۰/۲۴۲ | ۱ |

**جدول (۳). ماتریس تضاد معیارها**

| معیار | شیب | جهت شیب | ارتفاع | کاربری | راه | لیتولوژی | گسل | رودخانه | بارش |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| شیب | ۰ | ۰/۹۳۴ | ۰/۶۸۷ | ۱/۰۸۲ | ۱/۱۹۸ | ۱/۳۳۵ | ۰/۸۶۵ | ۱/۰۳۲ | ۰/۷۱۱ |
| جهت شیب | ۰/۹۳۴ | ۰ | ۱/۰۸۵ | ۰/۹۶۶ | ۰/۹۴۴ | ۰/۹۴۵ | ۰/۹۳۲ | ۰/۹۱۷ | ۱/۵۴۵ |
| ارتفاع | ۰/۶۸۷ | ۱/۰۸۵ | ۰ | ۰/۹۸۸ | ۱/۵۲۶ | ۱/۰۷۲ | ۰/۹۱۷ | ۱/۰۸۲ | ۰/۰۷۷ |
| کاربری | ۱/۰۸۲ | ۰/۹۶۶ | ۰/۹۸۸ | ۰ | ۰/۹۴۶ | ۰/۷۹۹ | ۰/۹۱۵ | ۱/۰۴۱ | ۰/۹۹۰ |
| راه | ۱/۱۹۸ | ۰/۹۴۴ | ۱/۵۲۶ | ۰/۹۴۶ | ۰ | ۰/۶۵۹ | ۰/۹۷۷ | ۰/۷۸۷ | ۱/۵۶۳ |
| لیتولوژی | ۱/۳۳۵ | ۰/۹۴۵ | ۱/۰۷۲ | ۰/۷۹۹ | ۰/۶۵۹ | ۰ | ۰/۷۵۵ | ۰/۹۱۱ | ۱/۵۴۷ |

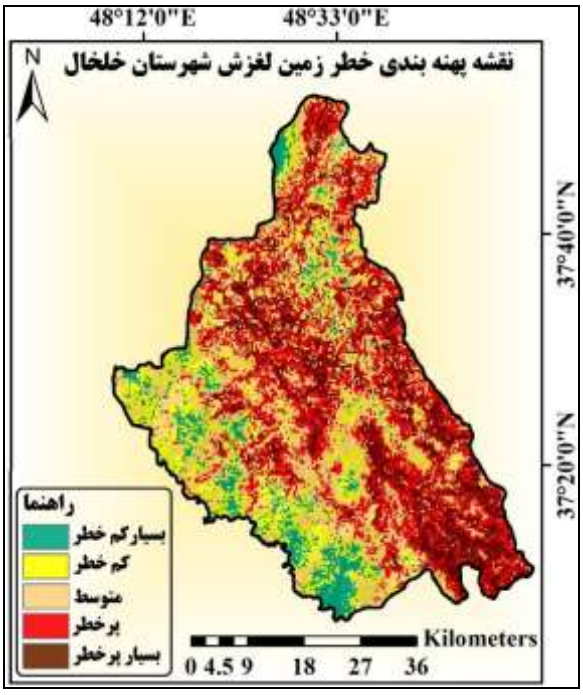
[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| گسل | ۰/۸۶۵ | ۰/۹۳۲ | ۰/۹۱۷ | ۰/۹۱۵ | ۰/۹۷۷ | ۰/۷۵۵ | ۰ | ۱/۱۷۷ | ۰/۹۶۳ |
| رودخانه | ۱/۰۳۲ | ۰/۹۱۷ | ۱/۰۸۲ | ۱/۰۴۱ | ۰/۷۸۷ | ۰/۹۱۱ | ۱/۱۷۷ | ۰ | ۱/۲۴۲ |
| بارش | ۰/۷۱۱ | ۱/۵۴۵ | ۰/۰۷۷ | ۰/۹۹۰ | ۱/۵۶۳ | ۱/۵۴۷ | ۰/۹۶۳ | ۱/۲۴۲ | ۰ |
| مجموع تضاد | ۷/۸۴۴ | ۸/۲۸۰ | ۷/۴۳۴ | ۷/۷۲۷ | ۸/۶۰۰ | ۸/۰۲۳ | ۷/۴۹۳ | ۸/۱۸۹ | ۸/۶۳۸ |

**جدول (۴). انحراف معیار، میزان اطلّاعات و وزن نهایی معیارها با استفاده از روش کرتیک**

| معیار | شیب | جهت شیب | ارتفاع | کاربری | راه | لیتولوژی | گسل | رودخانه | بارش |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| انحراف معیار | ۰/۳۶۷ | ۰/۱۶۵ | ۰/۱۹۶ | ۰/۳۵۱ | ۰/۲۶۶ | ۰/۳۲۱ | ۰/۳۰۲ | ۰/۱۶۸ | ۰/۲۸۷ |
| میزان اطلاعات | ۲/۸۷۹ | ۱/۳۶۶ | ۱/۴۵۷ | ۲/۷۱۲ | ۲/۲۸۷ | ۲/۵۷۵ | ۲/۲۶۲ | ۱/۳۷۵ | ۲/۴۷۹ |
| وزن نهایی | ۰/۱۴۸ | ۰/۰۷۰ | ۰/۰۷۵ | ۰/۱۳۹ | ۰/۱۱۷ | ۰/۱۳۲ | ۰/۱۱۶ | ۰/۰۷۰ | ۰/۱۲۷ |

طبق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به دست آمده از روش مارکوس، به ترتیب؛ ۷۰۷/۱۴ و ۵۱۲/۸۷ کیلومترمربع از مساحت شهرستان را طبقات پرخطر و بسیار پرخطر تشکیل می‌دهد جدول (۵). تطبیق سطوح لغزش یافته و پهنه‌های مواجه با خطر نشان می‌دهد که در خروجی حاصل از روش موردبررسی، مناطقی که در پهنه بسیار پرخطر، پرخطر قرار دارند، دارای بیشترین تعداد و درصد از سطوح لغزشی هستند. به‌طوری‌که ۳۳/۹۹ درصد از لغزش‌های رخ داده در شهرستان در طبقه بسیار پرخطر و ۳۵/۲۹ درصد از لغزش‌ها نیز در پهنه پرخطر قرار گرفته است. بررسی موقعیت شهرها و روستاها در ارتباط با پهنه‌بندی احتمال وقوع لغزش نیز، نشان می‌دهد که شهر کلور به همراه ۴۰ روستا (معادل ۲۶/۶۷ درصد از روستاهای شهرستان)، در پهنه بسیار پرخطر قرار گرفته‌اند. طبقه پرخطر مشتمل بر ۴۳ روستا (معادل ۲۸/۶۷ درصد از مجموع روستاهای شهرستان)، می‌باشد. به علاوه، تحلیل فضایی آسیب‌پذیری شهرها و روستاهای شهرستان، نشان می‌دهد که شهر خلخال و هشتجین به همراه ۴۱ روستا (معادل ۲۷/۳۳ درصد از روستاهای شهرستان)، دارای پتانسیل خطر متوسط می‌باشند. به ترتیب؛ ۸ روستا (معادل ۱۲ درصد از مجموع روستاهای شهرستان) و ۸ روستا (معادل ۵/۳۳ درصد از مجموع روستاهای شهرستان) در طبقه با احتمال وقوع کم و بسیار کم، از نظر وقوع خطر زمین‌لغزش قرار دارند.




**شکل (۷). نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان خلخال با استفاده از روش مارکوس**

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

**جدول (۵). اطلّاعات طبقات خطر زمین‌لغزش حاصل از به‌کارگیری الگوریتم چند معیاره مارکوس**

| اطلّاعات طبقه خطر | طبقه خطر | بسیار پرخطر | پرخطر | خطر متوسط | کم‌خطر | بسیار کم‌خطر |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مساحت کلاس‌های خطر زمین‌لغزش | مساحت(KM2) | ۵۱۲/۸۷ | ۷۰۷/۱۴ | ۷۰۷/۳۲ | ۴۹۸/۱۶ | ۲۳۸/۵۱ |
| | درصد | ۱۹/۲۵ | ۲۶/۵۴ | ۲۶/۵۵ | ۱۸/۷۰ | ۸/۹۶ |
| تعداد و درصد نقاط پراکنش لغزشی | تعداد | ۵۲ | ۵۴ | ۳۳ | ۱۱ | ۳ |
| | درصد | ۳۳/۹۹ | ۳۵/۲۹ | ۲۱/۵۷ | ۷/۱۹ | ۱/۹۶ |

عامل ارتفاع بر بسیاری از ویژگی‌های محیطی مؤثر در رخداد زمین‌لغزش‌ها (مانند؛ افزایش بارش، نوع و تراکم پوشش‌گیاهی و همچنین فرآیندهای هوازدگی)، تأثیر می‌گذارد. شهرستان خلخال، در ارتفاع ۵۲۰ تا ۳۳۰۰ متر از سطح دریا قرارگرفته است و ارتفاع متوسط شهرستان، حدود ۱۹۰۰ متر می‌باشد. اطلّاعات مربوط به طبقات ارتفاعی شهرستان خلخال در جدول (۶)، نمایش داده شده است. مقایسه نقشه نهایی پهنه‌بندی با نقشه ارتفاع شهرستان خلخال بیانگر این امر هست که سطوح ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متری که سطوح ارتفاعی میانی شهرستان هستند، از پتانسیل بالای وقوع زمین‌لغزش برخوردار است. به‌طوری‌که ۴۷۵/۶۲ کیلومترمربع از کل مساحت طبقه بسیار پرخطر و ۵۸۱/۳۲ کیلومترمربع از پهنه پرخطر، دارای ارتفاع ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر می‌باشند. طبقات ارتفاعی ۳۰۰۰-۲۵۰۰ و ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متری نیز از لحاظ پتانسیل احتمال وقوع لغزش در اهمیت دوم قرار دارند. با توجه به غلبه مورفولوژی پرشیب و پرتگاهی، شرایط اقلیمی و هوازدگی مکانیکی، در سطوح ارتفاعی بالاتر از ۳۰۰۰ متری حرکات ریزشی و واژگونی رخ می‌دهند و به دلیل وجود اراضی کم شیب، بارش کمتر و تراکم پوشش‌گیاهی در پهنه‌های ارتفاعی پایین‌تر از ۱۵۰۰ متر، از احتمال وقوع زمین‌لغزش در این ارتفاعات کاسته می‌شود. مقایسه نقشه پراکنش لغزش‌های موجود و عامل ارتفاع نیز نشانگر این امر می‌باشد که در مجموع ۱۱۲ پهنه لغزشی (معادل ۷۳/۲۰ درصد از نقاط لغزش یافته)، در طبقات ارتفاعی ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر قرار دارد.

**جدول (۶). اطلّاعات طبقات ارتفاعی شهرستان خلخال**

| طبقات ارتفاعی به متر | ۵۲۰ تا ۱۰۰۰ | ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ | ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ | ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ | ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ | ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مساحت به کیلومترمربع | ۱۲۸/۱۷۳ | ۶۳۴/۱۹۸ | ۹۴۹/۶۹۵ | ۷۹۰/۶۵۸ | ۱۵۶/۴۷۸ | ۴/۷۹۸ |
| مساحت به درصد | ۴/۸۱ | ۲۳/۸۱ | ۳۵/۶۵ | ۲۹/۶۸ | ۵/۸۷ | ۰/۱۸۰ |

با افزایش شیب، تنش برشی افزایش می‌یابد و افزایش تنش برشی نیز به ناپایداری دامنه‌ها منجر می‌گردد. در محدوده مورد پژوهش، مقدار شیب بین ۰ تا ۹۶ درصد می‌باشد. مقادیر شیب و مساحت مربوطه در جدول (۷)، ذکر شده است. از نظر معیار شیب، مناطق با احتمال خطر زیاد و بسیار زیاد، عمدتاً؛ بین شیب ۱۰ تا ۶۰ درصد، قرار دارند. به‌طوری‌که به ترتیب؛ ۳۵۸/۶۶ از طبقه بسیار پرخطر و ۶۶۸/۳۷ کیلومترمربع از مساحت طبقه پرخطر، در این دامنه شیبی قرار دارند. به علاوه، مقایسه بین نقاط لغزشی موجود با نقشه شیب نیز، نشان می‌دهد، ۱۲۴ لغزش (معادل ۸۱/۰۵ درصد از نقاط لغزشی)، در شیب ۱۰ تا ۶۰ درصد قرار دارند. در شهرستان خلخال، در شیب‌های بیش از ۶۰ درصد به علت کاهش ضخامت خاک و در شیب‌های کمتر از ۱۰ درصد با نظر به کاهش شدّت ناهمواری‌ها از پتانسیل رخداد زمین‌لغزش کاسته می‌شود.

**جدول (۷). اطلّاعات مقادیر شیب شهرستان خلخال**

| شیب به درصد | ۰-۵ | ۵-۱۰ | ۱۰-۲۰ | ۲۰-۴۰ | ۴۰-۶۰ | ۶۰-۸۰ | ۸۰-۹۶ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مساحت به کیلومترمربع | ۹۴/۳۲۹ | ۳۲۳/۶۲۳ | ۸۲۷/۵۶۳ | ۱۰۹۴/۴۹۲ | ۳۰۲/۷۳۱ | ۲۰/۸۱۸ | ۰/۴۴۴ |
| مساحت به درصد | ۳/۵۴ | ۱۲/۱۵ | ۳۱/۰۷ | ۴۱/۰۸ | ۱۱/۳۶ | ۰/۷۸۱ | ۰/۰۱۹ |

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

جهت‌شیب در میزان انرژی خورشیدی و درجه حرارت، وجود پوشش‌گیاهی، بارندگی، نگهداشت رطوبت و ایجاد شرایط هوازدگی مکانیکی و تخریب سنگ‌ها، نقش ایفا می‌کند. در شهرستان خلخال، ۷۲/ ۳۸۰ کیلومترمربع از مساحت محدوده در جهت‌شیب جنوب، ۲۹۸/۱۸ کیلومترمربع در جهت جنوب‌شرقی و ۳۵۹/۰۶ کیلومترمربع در جهت جنوب‌غربی قرار گرفته است. همچنین به ترتیب ۳۶۵/۴۴، ۳۰۷/۷۷ و ۳۴۰/۹۸ کیلومترمربع از مساحت محدوده را جهات شمال، شمال‌غرب و شمال‌شرق پوشش می‌دهد. به علاوه، ۲۹۶/۸۱ و ۳۱۳/۴۲ کیلومترمربع از مساحت محدوده به ترتیب؛ دارای جهت شیب شرقی و غربی می‌باشد و اراضی صاف و هموار، ۱/۶۲ کیلومترمربع از مساحت را تشکیل می‌دهد. دامنه‌های پشت به آفتاب (جهات شمالی و غربی در نیمکره شمالی)، موجب تجمع برف و رطوبت بیشتر می‌شود و ممکن است به تشدید زمین‌لغزش منجر شود و با توجه به اینکه این شهرستان از نظر موقعیت جغرافیایی در نیمکره شمالی واقع شده است، براساس فرضیه‌های اولیه جهت‌های شمالی و غربی باید پهنه‌های پرخطر باشند و نقطه‌های لغزشی بیشتری در این جهات رخداده باشد. بعد از بررسی عامل جهت شیب مشاهده شد که به ترتیب؛ ۷۸/۱۰ و ۶۱/۰۶ کیلومترمربع از پهنه بسیار پرخطر و ۸۲ و ۷۳/۰۸ کیلومترمربع از پهنه پرخطر دارای جهات شمالی و غربی هستند. همچنین بر اساس مقایسه بین جهت شیب و نقاط لغزشی، به ترتیب؛ ۲۲/۸۸ و ۱۸/۹۵ درصد از نقاط لغزشی در جهات شمالی و غربی رخ داده است و سپس دامنه‌های شمال‌غربی و شمال شرق و شرقی، بیشترین درصد از مساحت طبقات خطر و نقاط لغزشی را پوشش می‌دهند.

از شاخص‌های اصلی در مطالعه پایداری دامنه‌ها و پهنه‌بندی خطر آن‌ها در یک ناحیه، کاربری زمین می‌باشد. کاربری زمین ویژگی‌های سطحی زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد و سبب تغییر رفتار آن در مقابل فرایندهای زمین‌شناسی حاکم بر منطقه از جمله هوازدگی و فرسایش می‌شود. جدول (۸)، نشان‌دهنده انواع کاربری‌های شهرستان خلخال و مساحت آن‌ها می‌باشد. از لحاظ معیار کاربری اراضی، به ترتیب؛ مراتع و اراضی زراعی، بیشترین مقدار از مساحت مناطق بسیار پرخطر و پرخطر را به خود اختصاص داده است و باغات و نواحی انسان‌ساخت (مناطق شهری و روستایی)، نیز از نظر پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در شهرستان خلخال، در اولویت بعدی قرار دارند. مقایسه بین نقاط لغزشی موجود با نقشه معیار کاربری نیز نشان می‌دهد، ۷۵/۱۶ درصد از نقاط لغزشی در کاربری مراتع و ۱۷ درصد، در اراضی زراعی دیده می‌شود. لذا، چرای بیش‌ازحد دام‌ها در مراتع و نابودی پوشش‌گیاهی، رعایت نکردن تناوب زارعی و زراعت در اراضی شیب‌دار، به رخداد زمین‌لغزش در کاربری‌های مراتع و کشاورزی در سطح شهرستان، سرعت می‌بخشد.

**جدول (۸). مساحت و درصد مربوط به انواع کاربری‌های شهرستان خلخال**

| نوع کاربری | زراعت دیم | زراعت آبی | باغات | اراضی بایر | مناطق مسکونی | مراتع فقیر | مراتع متوسط | مراتع خوب | مناطق آبی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مساحت به کیلومترمربع | ۱۶۹/۸۹ | ۹۶/۰۱ | ۲۲/۶۱ | ۱۵۱/۵۰ | ۲۱/۰۳ | ۱۵۲۳/۲۲ | ۵۸۷/۷۰ | ۸۷/۱۱ | ۴/۹۳ |
| مساحت به درصد | ۶/۳۸ | ۳/۶۰ | ۰/۸۵ | ۵/۶۹ | ۰/۷۹ | ۵۷/۱۸ | ۲۲/۰۶ | ۳/۲۷ | ۰/۱۸ |

فاصله تا جاده یکی از عوامل اصلی انسانی است که بر وقوع زمین‌لغزش تأثیر می‌گذارد و در حین کار عمرانی به علّت زیربری و از بین بردن پاشنه دامنه و تغییر در شیب دامنه‌ها، لغزش‌هایی ایجاد می‌شود. در محدوده مطالعاتی فاصله از جاده در حدفاصل صفر تا ۶۰۰۰ متر می‌باشد و مسیر ارتباطی اسالم-خلخال، اردبیل-خلخال و میانه-خلخال، مهم‌ترین محورهای ارتباطی این شهرستان محسوب می‌شوند. از لحاظ معیار فاصله از راه ارتباطی، باید اشاره داشت، مناطق بسیار پرخطر و پرخطر، به‌طور عمده از فاصله صفر تا ۱۰۰۰ متری از راه ارتباطی قرار دارند، به‌طوری‌که ۱۰۴۱/۲۲ کیلومترمربع از مجموع مساحت طبقات پرخطر و بسیار پرخطر، در این فاصله از راه ارتباطی قرار دارد. مقایسه نقاط لغزشی و نقشه موضوعی راه ارتباطی نیز نشان می‌دهد که ۹۴/۱۱ درصد از نقاط لغزشی، در فاصله صفر تا ۱۰۰۰ متری از راه‌های ارتباطی قرار دارند.

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

شکستگی‌ها و گسیختگی‌های سطح زمین در نفوذ آب به داخل زمین، خرد شدن سنگ‌ها و سست شدن اتصال بین مواد سنگی تأثیر زیادی دارند که درنهایت، شرایط بروز حرکات توده‌ای را فراهم می‌سازند. گسل‌های شهرستان خلخال به شکل شکستگی‌های کوچک و بزرگ، در بخش عمده‌ای از شهرستان به چشم می‌خورد. از مهم‌ترین گسل‌های ناحیه می‌توان به گسل تالش، گسل نئور، گسل دویل اشاره نمود. فاصله از گسل در محدوده مطالعاتی بین صفر تا ۱۴۰۰۰ متر، می‌باشد. طبق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نقاط بسیار پرخطر و پرخطر، عمدتاً از فواصل صفر تا ۲۰۰۰ متری، از گسل واقع شده‌اند. مقایسه نقشه فاصله از گسل با نقشه پراکنش نقاط لغزشی، نشان می‌دهد، ۴۵/۷۵ درصد از زمین‌لغزش‌ها تا فاصله ۲۰۰۰ متری از گسل ایجاد شده است و مابقی نقاط لغزشی در فواصل بیش از ۲۰۰۰ متری از گسل رخ داده‌اند.

از لایه‌های اطلاعاتی که در بیشتر روش‌های خطر زمین‌لغزش به کار می‌رود، مطالعات مربوط به زمین‌شناسی و واحدهای لیتولوژی است. لیتولوژی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ناپایداری شیب و به‌طورکلی بیانگر ساخت، بافت، مقاومت و دوام نسبی یک توده سنگ است. واحد Eav (آندزیت ولکانیکی)، با مساحت ۱۳۳۵/۴۵۳ کیلومترمربع، بیشترین سطح شهرستان را پوشانده است و Jl (آهکی توده‌ای و گچی نازک و خاکستری روشن)، با مساحت ۳۲/۰۳۹ کیلومترمربع و Od.av (داسیت و آندزیت آتشفشانی)، با مساحت ۴۲/۷۱۴ کیلومترمربع، کم‌ترین مقدار از مساحت شهرستان را به خود اختصاص داده‌اند. از لحاظ مقاومت سازندهای محدوده به ۵ طبقه، از مقاومت بسیار کم تا مقاومت بسیار زیاد، تقسیم گردیده است. به ترتیب ۱۶۶/۶۲ و ۵۹۹/۸۲ کیلومترمربع از مساحت محدوده دارای مقاومت بسیار کم و کم هستند. ۱۳۴/۵۱ کیلومترمربع از سطح محدوده را سازندهای با مقاومت متوسط (نیمه مقاوم)، پوشانده است و به ترتیب سازندهایی با لیتولوژی مقاوم و بسیار مقاوم، ۲۷۷/۵۲ و ۱۴۸۵/۵۳ کیلومترمربع از مساحت محدوده را تشکیل داده است. در رابطه با نقشه لیتولوژی می‌توان گفت طبقات بسیار پرخطر و پرخطر، به‌طور عمده؛ در سازندهایی با مقاومت بسیار کم، کم، متوسط و همچنین، در آندزیت‌های آتشفشانی و سنگ‌های خرد شده بازالتی، قرار دارند. بررسی مقایسه‌ای پراکنش لغزش‌ها با معیار لیتولوژی نیز نشان می‌دهد، ۵۸/۸۲ درصد از لغزش‌های رخ داده در سازندهایی با مقاومت بسیار کم و کم؛ به صورت نهشته‌های آبرفتی دوران چهارم (رسوبات دشت، تراس‌های آبرفتی جوان و مخروط‌افکنه‌ای) و مارن، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا رخ داده است. ۷/۱۸ درصد نقاط لغزشی نیز بر دامنه‌های شیب‌دار متشکل از سازندهایی با لیتولوژی متوسط (مارن، ماسه‌سنگ آهکی، آهک ماسه‌ای و کنگلومرای، سنگ‌های آهکی ماسه‌ای و سیلتی و سنگ‌های آهکی گچ‌دار)، قرار دارند و دیگر لغزش‌های محدوده، در آندزیت‌های آتشفشانی و سنگ‌های خرد شده بازالتی رخ داده‌اند.

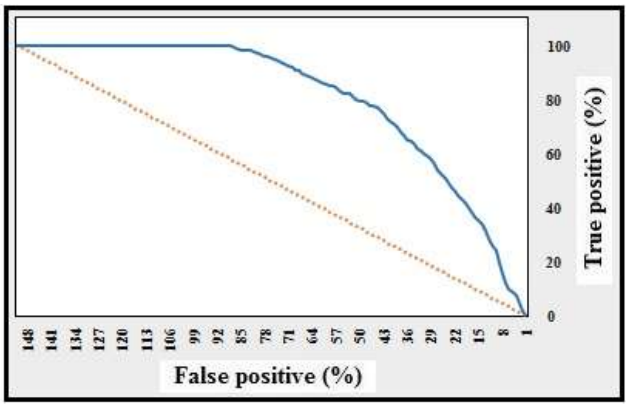
تأثیر فعّالیّت و عملکرد آبراهه‌ها به صورت مجموعه‌ای از عملکردهای دینامیکی بیرونی و فعالیت‌های مکانیکی، مانند، اشباع مواد و افزایش حجم، کاهش مقاومت مکانیکی، افزایش سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش بارهای استاتیکی و دینامیکی، زیرشویی دامنه‌ها و از بین بردن تکیه‌گاه دامنه‌ها، مشاهده می‌گردد. فاصله از آبراهه، در سطح محدوده بین صفر تا ۷۰۰۰ متر می‌باشد. از لحاظ معیار فاصله از رودخانه، می‌توان نتیجه گرفت، مناطق بسیار پرخطر و پرخطر تا فاصله ۱۰۰۰ متری از رودخانه قرار دارند. نسبت پراکنش لغزش‌ها با این معیار موردبررسی، نشان می‌دهد که به‌طور عمده، ۶۵/۳۵ درصد از زمین‌لغزش‌های رخ داده در محدوده، در فاصله صفر تا ۵۰۰ متری از رودخانه‌ها اتفاق افتاده است و مابقی نیز در فاصله ۵۰۰ تا ۱۰۰ متری از رودخانه‌ها قرار دارند؛ بنابراین می‌توان گفت که بیشتر زمین‌لغزش‌های محدوده در فواصل نزدیک از رودخانه رخ داده است و این موضوع تأییدکننده نقش برداشت پای شیب دامنه‌ها توسط یک عامل طبیعی است که با از میان برداشتن تکیه‌گاه دامنه و کاهش مقاومت برشی آن زمینه ایجاد زمین‌لغزش مهیا می‌گردد.

با افزایش حجم آب موجود در بافت خاک به دنبال وقوع بارندگی، افزایش فشار استاتیکی آب بر درز و شکاف‌ها، به وقوع زمین‌لغزش موجب می‌شود، لذا بارندگی، از پارامترهای مهم در بررسی پهنه‌بندی زمین‌لغزش محسوب می‌گردد. حداقل بارش محدوده، ۲۷۰ میلی‌متر و حداکثر آن ۵۶۰ میلی‌متر می‌باشد. ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور، کم‌بارش‌ترین ماه‌های سال در سطح منطقه می‌باشند و بیشترین مقدار بارش شهرستان نیز در ماه‌های فروردین و اردیبهشت اتفاق می‌افتد و در حالت کلی ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت به دلیل برخورداری از بارش زیاد، اهمیت

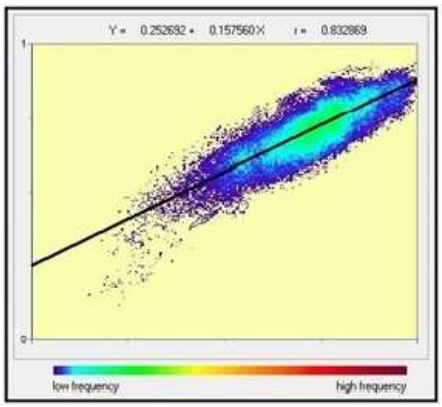
[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

بسیار زیادی در ایجاد زمین‌لغزش در سطح شهرستان خلخال دارند. در واقع، بارش مستمر در طول این ماه‌ها (همراه با ذوب برف و یخ)، شرایط لازم برای وقوع زمین‌لغزش که همان حضور آب می‌باشد را فراهم می‌سازد. مقادیر بارشی در مناطق دارای پتانسیل خطر ما بین ۵۶۰-۳۲۰ میلی‌متر قرار گرفته است. بررسی نسبت نقاط لغزشی و مقادیر بارش نیز نشان می‌دهد، بیشترین فراوانی پراکنش نقاط لغزشی موجود، در مقدار بارشی ۴۲۰- ۳۷۰ میلی‌متر (۴۴/۴۴ درصد از زمین‌لغزش‌های موجود)، قرار دارند و سطوحی با مقدار بارش ۴۷۰-۴۲۰ میلی‌متر نیز ۲۵/۴۹ درصد از نقاط لغزش را شامل می‌شوند. به علاوه ۱۹/۶۰ درصد از زمین‌لغزش‌های رخ داده در محدوده در سطوح بارشی ۳۷۰-۳۲۰ میلی‌متر قرار دارند.

اعتبارسنجی نتایج حاصل از به‌کارگیری روش مارکوس، به‌وسیله منحنی راک، مقدار سطح زیر منحنی (۰/۸۹) را نشان می‌دهد. با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده برای سطح زیر منحنی (به صورت ۱-۰/۹: عالی، ۰/۹-۰/۸: خیلی‌خوب، ۰/۸-۰/۷: خوب، ۰/۷-۰/۶: متوسط، ۰/۶-۰/۵: ضعیف)، دقت روش مارکوس در تشخیص مناطق دارای احتمال وقوع خطر زمین‌لغزش شهرستان خلخال، در طبقه عالی قرار دارد شکل (۸). به علاوه، به منظور صحت‌سنجی دقیق‌تر نتایج مطالعه، نسبت به محاسبه همبستگی بین دو لایه نقشه نهایی پهنه‌بندی حاصل از به‌کارگیری روش مارکوس با نقشه پراکنش سطوح لغزشی، اقدام شد شکل (۹)؛ که با توجه به همبستگی ۰/۸۳ درصدی بین این دو نقشه، نتایج پهنه‌بندی به وسیله واقعیت‌های زمینی، قابل‌قبول می‌باشد.




**شکل (۸). منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیر منحنی.**




**شکل (۹). همبستگی نقشه نهایی با نقاط لغزشی موجود**

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری چند معیاره مارکوس، به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح شهرستان خلخال، پرداخته شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که عوامل شیب، کاربری اراضی، لیتولوژی و بارش، به ترتیب؛ با ضرایب وزنی ۰/۱۴۸، ۰/۱۳۹، ۰/۱۳۲ و ۰/۱۲۷، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در وقوع ناپایداری در منطقه موردمطالعه می‌باشند. نتایج مطالعه حاضر با نتایج حاصل از پژوهش عابدینی و پیروزی (۱۳۹۸)، با نظر به معرفی معیارهای شیب و کاربری اراضی به‌عنوان عوامل اصلی دخیل در وقوع زمین‌لغزش منطقه، مطابقت و همخوانی دارد. ولی ترتیب اهمیت دیگر معیارهای دخیل در وقوع زمین‌لغزش شهرستان خلخال در پژوهش حاضر با یافته‌های عابدینی و پیروزی (۱۳۹۸)، مقداری متفاوت می‌باشد. بایستی بیان داشت که عابدینی و پیروزی (۱۳۹۸)، در مطالعه خود با استفاده از روش فرآیند تحلیل شبکه (ANP) که مبتنی بر نظرات کارشناسی می‌باشد، به تعیین ضریب وزنی و اولویت‌بندی نقش معیارهای دخیل در وقوع زمین‌لغزش پرداختند و در این روش ناگزیر نظرات کارشناسی دخیل می‌باشد. ولی در پژوهش حاضر از روش کریتیک استفاده شده است که مقدار ضرایب وزنی در این روش، با توجه به میزان همبستگی، تضاد و انحراف‌معیار بین نقشه‌های معیارهای موردبررسی، تعیین می‌گردد؛ لذا، استفاده از روش کریتیک، در وزن‌دهی معیارها در پژوهش حاضر می‌تواند راه‌حلی در جهت حل مسئله استقلال صفات از یکدیگر باشد که در طی

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]
[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

مقایسه زوجی در چارچوب روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و فرایند تحلیل شبکه‌ای و در شرایط عدم وجود همبستگی بین صفات، عینیت می‌یابد.

علاوه بر این، خروجی حاصل از پژوهش، نشان‌دهنده پتانسیل بالای منطقه موردمطالعه، از لحاظ وقوع خطر زمین‌لغزش می‌باشد. با توجه به مقایسه پراکنش لغزش‌های رخ داده با نقشه پهنه‌بندی حاصل از پژوهش، می‌توان دریافت بسیاری از لغزش‌های رخ داده در سطح شهرستان در این مناطق بسیار پرخطر و پرخطر، قرار دارند. لذا با توجه به بالا بودن مساحت پهنه‌های دارای احتمال خطر، لازم است تا سازمان‌های متولی اعم از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری، اداره کل راه و شهرسازی، سازمان جهاد کشاورزی و سازمان آب منطقه‌ای، به صورت مسئولانه و با هم‌افزایی لازم، اقدامات حفاظتی، آبخیزداری مناسب و البته کارشناسی شده را در این پهنه‌های دارای احتمال خطر، انجام دهند. از جمله این اقدامات می‌توان به ایجاد و تقویت پوشش‌گیاهی در مناطق مستعد لغزش، جلوگیری از کشت دیم در اراضی شیب‌دار، تعدیل و کاهش شیب دامنه ارتفاعات مشرف بر مسیر راه‌های ارتباطی، پایدارسازی و تثبیت ترانشه‌ها، پلکانی کردن شیب‌ها، زهکشی مناسب و هدایت صحیح آب در بالادست و پایین مناطق مستعد حرکات لغزشی، جلوگیری از نفوذ آب به درون توده دارای امکان لغزش با پخش ماسه‌های آغشته به قیر و یا با استفاده از بتن‌پاشی روی توده خاک و سنگ، استفاده از دیوارهای حائل، از همه مهم‌تر آموزش عموم مردم (به ویژه ساکنان اطراف مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش)، به منظور داشتن اطلّاعات مبنایی در مورد پدیده زمین‌لغزش، توجه بیشتر به صدمات ناشی از آن و کاهش سرمایه‌گذاری در آینده، اشاره داشت.

در نهایت، همان‌طور که می‌دانیم هر یک از روش‌های بررسی مخاطرات محیطی از جمله؛ زمین‌لغزش مزایا و معایب خاص خود را دارند. با توجه به نتایج حاصل از صحت‌سنجی نتایج مطالعه حاضر، دقت روش مارکوس، با مساحت زیر منحنی ۰/۸۹ و همبستگی ۰/۸۳ درصدی بین نقشه نهایی حاصل از پژوهش و پراکنش سطوح لغزشی، در سطح عالی می‌باشد. لذا نتایج ارزیابی عملکرد مدل تحلیل چندمعیاره در پژوهش حاضر، به‌طور اعم با نتایج حاصل از مطالعات؛ عابدینی و پیروزی (۱۳۹۸)، مددی و همکاران (۱۳۹۹)، شریفی و همکاران (۱۴۰۰)، اصغری سراسکانرود و پیروزی (۱۴۰۱)، وجتکووا و وجتک (۲۰۲۰)، صالح‌پورجم و همکاران (۲۰۲۱)، کومار و همکاران (۲۰۲۲)، ساها و همکاران (۲۰۲۳)، در رابطه با عملکرد خوب روش‌های چندمعیاره، به‌عنوان ابزار راهنمای قدرتمند و عملی جهت مطالعه مخاطره زمین‌لغزش و به‌طور اخص با نتایج مددی و پیروزی (۱۴۰۲)، مبنی بر دقت عالی روش مارکوس در زمینه بررسی مخاطره زمین‌لغزش، هم‌خوانی دارد. انتظار می‌رود، نتایج حاصل از این پژوهش، با توجه به استفاده از روش تحلیل چند معیاره مارکوس، در زمینه انتخاب روش مناسب و کارآمد در راستای بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، به‌ویژه در مناطقی مشابه با شرایط محیطی شهرستان خلخال، مورد توجه محققان قرار گیرد.

**تقدیر و تشکر**

این مقاله مستخرج از طرح دوره پسادکتری می‌باشد که با حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شده است. از این‌رو تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌داریم.

**ملاحظات اخلاقی**

**پیروی از اصول اخلاق پژوهش**

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

**مشارکت نویسندگان**

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از طرح دوره پسادکتری تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: بررسی منابع، گردآوری داده‌ها، تولید لایه‌های اطلاعاتی، پردازش داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

نویسنده دوم: استاد راهنما، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد راهنما، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله

## تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

## حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد.

## منابع

اصغری‌سراسکانرود، صیاد؛ پیروزی، الناز (۱۴۰۱). ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چند معیاره WLC، OWA، VIKOR وMABAC در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش مطالعه موردی: حوضه گیوی‌چای استان اردبیل، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۴(۱)، ۶۵-۹۴. https://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.333658.1007656

پورفراش‌زاده، فهیمه؛ اصغری سراسکانرود، صیاد (۱۴۰۱). ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش آماری در حوضه آبخیز بالیخلی (ایستگاه یامچی)، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۱ (۲)، ۵۹-۴۱. https://doi.org/10.22067/GEOEH.2021.72256.1103

رجبی، معصومه؛ رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ تکزارع، احمد (۱۳۹۹). پهنه‌بندی پتانسیل خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل شبکه عصبی (موردمطالعه: حوضه آبریزالموت رود استان قزوین)، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*، ۹(۳)، ۱۸۵-۱۷۱. https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.122223

سیلاخوری، زهرا؛ وهابزادکبریا، قربان؛ پورقاسمی، حمیدرضا (۱۴۰۲). تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل بیزین (مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبخیز تالار، استان مازندران)، *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۳ (۲)، ۱۴۰-۱۲۲. http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-683-fa.html

شرفی، سیامک؛ صادقی‌راد، مسعود؛ جوادی‌نیا، زهرا (۱۳۹۹). بازسازی پالئوژئومورفولوژی زمین لغزش دلا و شکل‌گیری دریاچه سدی شیمبار شهرستان اندیکا- استان خوزستان، *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۰ (۵۶)، ۱۷۷-۱۹۲. https://doi.org/10.29252/jgs.20.56.177

شریفی، حسین؛ رمضانی‌پور، مهرداد؛ ابراهیمی، لیلا؛ حق‌زاد، آمنه (۱۴۰۰). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شهرستان نور با استفاده از مدل تحلیل شبکه، *پژوهش‌های جغرافیای اقتصادی*، ۱(۶)، ۵-۴۰. 20.1001.1.27173747.1400.2.6.4.0

عابدینی، موسی؛ پیروزی، الناز (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تلفیق روش‌های Hot Spot، ANP و WlC (مطالعه موردی: شهرستان خلخال)، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۸(۴)، ۳۶-۱۹. https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.81836

گورابی، ابوالقاسم (۱۴۰۰). کمی‌سازی زمین‌لغزش بزرگ مله‌کبود ناشی زمین‌لرزه ۷/۳ سال ۱۳۹۶ کرمانشاه با استفاده از اینتروفرمتری، *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۱ (۶۰)، ۴۷-۶۳. https://doi.org/10.52547/jgs.21.60.47

محمدنیا، ملیحه؛ فلاح قالهری، غلامعباس (۱۳۹۷). شبیه‌سازی احتمال وقوع زمین لغزش با استفاده از منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله مراتبی، *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۸ (۴۸)، ۱۱۵-۱۳۰. https://doi.org/10.29252/jgs.18.48.115

محمودی‌وانعلیا، نرجس؛ ارگانی، میثم؛ جلوخانی نیارکی، محمدرضا (۱۴۰۰). تهیه نقشه چندخطره استان مازندران با استفاده از تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۸(۴)، ۴۱۱-۳۹۵. https://doi.org/10.22059/jhsci.2022.332933.686

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

مددی، عقیل؛ پیروزی، الناز (۱۴۰۲). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه بالادست سد یامچی استان اردبیل، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره MARCOS و CODAS، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*، ۱۲(۱)، ۹۴-۷۳.
https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.370812.1390

مددی، عقیل؛ پیروزی، الناز؛ فعال‌نذیری، مهدی (۱۳۹۹). ارزیابی مقایسه‌ای الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ MABAC و CODAS در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش؛ نمونهٔ پژوهش: شهرستان کوثر، *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۱(۴)، ۲۴-۱.
https://doi.org/10.22108/gep.2020.124723.1348

نصیری، مهران؛ محمدزاده، مجتبی؛ لطفعلیان، مجید؛ پارساخو، آیدین (۱۴۰۱). پهنه‌بندی و مطالعه میدانی لغزش و رانش‌ها در اطراف جاده‌های جنگلی دارابکلا- ساری، *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۳ (۲۶)، ۱۰۵-۱۱۴.
https://doi.org//10.52547/jwmr.13.26.105

Abedini, M., & Piroozi, E. (2020). Landslide hazard Zoning with Using Combination Methods of Hot Spot, ANP and WlC (Case Study: Khalkhal County), Journal of Geography and Environmental Hazards, 8(4), 19-36. (In Persian) https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.81836

Alimohammadlou, Y., Najafi, A., &Yalcin, A. (2013). Landslide process and impacts: A propused classification method, Catena, 104, 219-232. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.013

Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). New Methods and Applications in Multiple Attribute Decision Making (MADM). International Series in Operations Research & Management Science, 277, Springer, Cham, 231 p. https:// doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9

Asghari Saraskanrood, S., & Piroozi, E. (2022). Comparative evaluation of WLC, OWA, VIKOR, and MABAC multi-criteria decision-making methods in landslide risk zoning Case study: Givi-chay watershed of Ardabil province, Physical Geography Research Quarterly, 54(1), 65-94. (In Persian) https://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.333658.1007656

Chen, H.X., Zhang, LM., Gao, L., Zhu, H., & Zhang, S. (2015). Presenting regional shallow landslide movement on three-dimensional digital terrain, Engineering Geology, 195(1), 122–134. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.027

Goorabi, A. (2017). Quantification of mass wasting volume associated with the giant landslide Maleh Kabood induced by the 2017 Kermanshah earthquake from InSAR, Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 21 (60), 47-63. (In Persian) https://doi.org/10.52547/jgs.21.60.47

Jafarzadeh Ghoushchi, S., Shaffiee Haghshenas, S., Memarpour Ghiaci, A. Guido, G., & Vitale, A. (2023). Road safety assessment and risks prioritization using an integrated SWARA and MARCOS approach under spherical fuzzy environment, Neural Comput & Applic, 35, 4549–4567. https://doi.org/10.1007/s00521-022-07929-4

Kumar, A., Sharma, R., & Bansal, V. (2022). Spatial Prediction of Landslide Hazard using GIS-multi-criteria Decision Analysis in Kullu District of Himachal Pradesh, India, Journal of Mining and Environment, 13(4), 943-956. https://jme.shahroodut.ac.ir/article_2535.html

Madadi, A., & piroozi, E. (2023). Landslide risk zoning in the upstream basin of Yamchi Dam in Ardabil province, using multi-criteria decision making methods MARCOS and CODAS, Quantitative Geomorphological Research, 12(1), 73-94. (In Persian) https://doi.org/10.22034/gmpj.2023.370812.1390

Madadi, A., Piroozi, E., & Faal Naziri, M. (2021). A Comparative Evaluation of MABAC and CODAS Multi-Criteria Decision Algorithms in Landslide Risk Zoning (Case Study: Kowsar County), Geography and Environmental Planning, 31(4), 1-24. (In Persian) https://doi.org/10.22108/gep.2020.124723.1348

Mahmoody-Vanolya, N., Argany, M., & Jelokhani-Niaraki, M. (2021). Multi-hazard potential mapping of Mazandaran province using multi-criteria spatial decision analysis, Environmental Management Hazards, 8(4), 395-411. (In Persian) https://doi.org/10.22059/jhsci.2022.332933.686

Materazzi, M., Bufalini, M., Gentilucci, M., Pambianchi, G., Aringoli, D., & Farabollini, P., (2021). Landslide hazard assessment in a monoclinal setting (Central Italy): Numericalvs, geomorphological approach, Land, 10 (6), 624, 1-22. https://doi.org/10.3390/land10060624

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]

Mohammadnia, M., & Fallah, G. (2018). Landslides susceptibility mapping using fuzzy logic and AHP, Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 18 (48), 115-130. (In Persian) https://doi.org/10.29252/jgs.18.48.115

Nasiri, M., Mohammadzade, M., Lotfalian, M., & Parsakhoo, A. (2022). Zoning and Field Study of Landslid es along Forest Roads of Darabkola-Sari, Journal of Watershed Management Research, 13(26), 105-114. (In Persian) https://doi.org//10.52547/jwmr.13.26.105

Pour farrash zadeh, F., & Asghari Sareskanrudb, S. (2022). Assessment and Zoning the Landslide Susceptibility Using Statistical Method in the Blaikhly Catchment (Yamchy Station), Journal of Geography and Environmental Hazards, 11(2), 41-59. (In Persian) https://doi.org/10.22067/GEOEH.2021.72256.1103

Rabby, Y.W., Li, Y., Abedin, J., & Sabrina, S., (2022). Impact of Land Use/Land Cover Change on Landslide Susceptibility in Rangamati Municipality of Rangamati District, Bangladesh, International Journal of Geo-Information, 11 (89), 1-16. https://doi.org/10.3390/ijgi11020089

Rajabi, M., Rezaeimoghadam, M., & Takzare, A. (2020). Landslide hazard potential zoning using the neural network method (Case study: Alamut watershed in Qazvin province), Quantitative Geomorphological Research, 9(3), 185-171. (In Persian) https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.122223

Saha, A., Villuri, VGK., Bhardwaj, A., & Kumar, S.A. (2023). Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) Approach for Landslide Susceptibility Mapping of a Part of Darjeeling District in North-East Himalaya, India, Applied Sciences, 13(8), 5062, 1-23. https://doi.org/10.3390/app13085062

Salehpour, Jam., Mosaffaie, A., & Sarfaraz, F. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping using hybrid MCDM models, Nat Hazards, 108, 1025–1046. https://doi.org/10.1007/s11069-021-04718-5

Sharafi, S., Sadeghirad, M., Javadinia, Z. (2020). Paleogeomorphology Reconstruction of Della Landslide and the Formation of the Shimbar Dam Lake in Indica – Khuzestan province, Journal of Applied Research in Geographical Sciences, 20 (56), 177-192. (In Persian) https://doi.org/10.29252/jgs.20.56.177

Sharifi, H., Ramazanipore, M., Ebrahimi, L., & Haghzad, A. (2022). Landslide hazard zoning of Noor city using network analysis model, Journal of Economic Geography Research, 2(6), 40-55. (In Persian) 20.1001.1.27173747.1400.2.6.4.0

Silakhori, Z., Vahabzadekebriya, G., & Poorghasemi, H. (2023). Landslide Susceptibility Mapping using Bayesian Model: A Case Study of some Regions of Talar Watershed, Mazandaran Province, Environmental Erosion Research Journal, 13 (2), 122-140. (In Persian) http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-683-fa.html

Stevic´, Z., Pamučar, D., Puška, A., & Chatterjee, P. (2020) Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COmpromise solution (MARCOS), Comput Ind Eng, 140, 10623, 1-29. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231

Vojtekova, J., & Vojtek, M, (2020). Assessment of landslide susceptibility at a localspatial scale applying the multi-criteria analysisand GIS: a case study from Slovaki, Geomatics, Natural Hazards and Risk, 11 (1),131–148. https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1713233

Zhang, Y., Zhang, J., & Dong, L. (2023). Fuzzy Logic Regional Landslide Susceptibility Multi-Field Information Map Representation Analysis Method Constrained by Spatial Characteristics of Mining Factors in Mining Areas, Processes, 11(4), 985, 1-33. https://doi.org/10.3390/pr11040985

Zhou, S., Zhou, S., & Tan, X., (2020). Nationwide susceptibility mapping of landslides in Kenya using the fuzzy analytic hierarchy process model, Land, 9(12), 1-22. https://doi.org/10.3390/land9120535

Zhu H, & Liu, F. (2021). A group-decision-making framework for evaluating urban flood resilience: a case study in Yangtze river, Sustain, 13(2), 1–16. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102355

[ Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-07 ]

[ DOI: 10.66224/jgs.26.80.12 ]