

Research Paper



Landslide hazard zoning in the Lanbaran Chai watershed of Varzaghan County using the MACBETH model



Shahram Roostaei¹ , Seyyed Asadullah Hejazi² , Seyyed Hossein Faghih Khelejani³ 

1. Professor, Department of Geomorphology, Tabriz University, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz, Iran. roostaei@tabrizu.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran. s_hejazi@tabrizu.ac.ir
3. Master's degree in Geomorphology Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran. s.h.faghih50@gmail.com

Keywords

Landslide, Zoning, MACBETH Model, Lanbaran Chai, Varzeghan, Northwestern, Iran.

Receive: 2025/07/31

Accepted: 2025/12/17

Published: 2026/06/22

ABSTRACT

Introduction

Landslides are among the most significant geomorphological hazards in mountainous regions, causing extensive damage each year to natural resources, infrastructure, and human settlements. Identifying landslide-prone areas is a key priority in environmental planning aimed at reducing vulnerability and improving risk management. Watersheds with unstable geological conditions, steep slopes, and considerable precipitation are particularly sensitive to landslide occurrences. The Lanbaran chai watershed, located in Varzeghan County in northwestern Iran, is considered one of the high-risk areas due to its susceptible natural and anthropogenic features. This study aims to map landslide hazard zones within this watershed using the MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) multi-criteria decision-making model. By applying qualitative pairwise comparisons and converting them into quantitative values, this model enables a structured and logical analysis of the factors influencing landslide occurrences. Key criteria integrated into the model include distance from drainage networks, lithology, soil type, slope, slope aspect, elevation classes, precipitation, land use, and distance from roads. The model outputs were generated in a GIS environment as a landslide hazard zoning map, through which high-risk areas were identified.

Methodology

The Lanbaran sub-watershed is located on the eastern flank of the Ahar chai River. It covers an area of approximately 8,226 hectares within the study boundary and serves as one of the main headwater branches of the Ahar chai River. The study area lies between the geographical coordinates of 46°20'07" to 46°30'00" E longitude and 38°28'17" to 38°33'52" N latitude. In this study, to perform landslide hazard zonation in the Lanbaran watershed, spatial and descriptive data related to landslide-inducing factors were initially collected from official sources. Subsequently, through library-based research and a review of previous studies, the relevant evaluation criteria were identified.

*Correspondin Author: Seyyed Hossein Faqih: s.h.faghih50@gmail.com

How to cite this article: Roostaei, Shahram; Hejazi, Seyyed Asadullah; & Faghih Khelejani, Seyyed Hossein. (2026). Landslide hazard zoning in the Lanbaran Chai watershed of Varzaghan County using the MACBETH model. *Hydrogeomorphology*, 13(47):41– 59.

DOI: 10.22034/HYD.2025.68225.1804



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

In the next stage, the MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) multi-criteria decision-making model was applied to assign relative weights to the identified factors. Spatial analyses and the integration of thematic layers were conducted in a Geographic Information System (GIS) environment. Finally, landslide hazard zonation maps were generated and analyzed using ArcGIS software and its related extensions.

Results and Discussion

To assess and identify high-risk areas within the Lanbaran Chai watershed, nine factors related to natural, anthropogenic, and morphological characteristics influencing landslide occurrence were considered. These factors include distance from drainage networks, lithology, soil type, slope, slope aspect, elevation classes, precipitation, land use, and distance from roads. Prior to zonation and map integration, all relevant layers were standardized. Each class within the layers was assigned one of five susceptibility levels—very high, high, moderate, low, and very low—based on their relative sensitivity to landslides. Accordingly, all layers were reclassified before applying the weights derived from the MACBETH model. Following the evaluation of the influence of these parameters, all nine factors were input into the M-MACBETH software. Pairwise comparison matrices were constructed, and through the MACBETH multi-criteria decision-making method, the final weight of each parameter was calculated. The results indicate that slope, with a weight of 38.1%, has the greatest influence on landslide hazard assessment, whereas precipitation received the lowest weight of 2.5%. Based on the analysis of the landslide hazard zonation map generated using the MACBETH model, the study area is distributed as follows: approximately 3.7 km² (very high hazard), 10.20 km² (high hazard), 20.46 km² (moderate hazard), 32.18 km² (low hazard), and 15.36 km² (very low hazard).

Conclusions

Identifying susceptible areas, particularly for geomorphological hazards such as landslides, is a fundamental component of disaster management and environmental planning. The present study aimed to delineate landslide-prone zones within the Lanbaran Chai watershed located in Varzeghan County. To achieve this objective, nine key factors influencing landslide occurrence were selected, including slope, slope aspect, lithology, precipitation, elevation, distance from roads, distance from drainage networks, and land use. The relative importance of these factors was assessed using the MACBETH multi-criteria decision-making model. Analysis of the hazard zoning map produced by the MACBETH model revealed that approximately 4.58%, 12.25%, 25.01%, 39.34%, and 18.78% of the study area fall into very high, high, moderate, low, and very low hazard zones, respectively. Furthermore, the model demonstrated high predictive accuracy, achieving area under the curve (AUC) values of 0.86 for training data and 0.88 for validation data. These findings indicate that the MACBETH model is an effective tool for analyzing and prioritizing factors influencing landslides. Its high accuracy in identifying high-risk zones can significantly aid in preventive policymaking and resource allocation for disaster management. It is recommended that future studies explore the integration of this model with other machine learning approaches to further enhance the precision of landslide hazard maps.

مقاله پژوهشی



پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبریز لنبران چای شهرستان ورزقان با استفاده از مدل MACBETH



شهرام روستایی^۱، سیداسدالله حجازی^۲، سیدحسین فقیه خلجانی^۳

1- استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران. roostaei@tabrizu.ac.ir

2- دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران. s_hejazi@tabrizu.ac.ir

3- دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران. s.h.faghieh50@gmail.com

چکیده

کلیدواژه‌ها

ارزیابی زمین به منظور شناخت و پهنه‌بندی عرصه‌های حساس به حرکت‌های دامنه‌ای، به‌ویژه زمین‌لغزش، از پژوهش‌های مربوط به جغرافیای دانان طبیعی، به‌ویژه ژئومورفولوژیست‌ها است. شناسایی و تعیین مناطق حساس و مستعد لغزش می‌تواند ضمن جلوگیری از بروز آسیب‌ها، زمینه را برای اجرای طرح‌های پایدارسازی دامنه‌ها فراهم آورد. مساحت این حوضه در محدوده مورد مطالعه ۸۲۲۶ هکتار است و سرشاخه اصلی رودخانه اهر چای محسوب می‌شود. این حوضه بر پایه تقسیمات کشوری در دهستان سینای بخش مرکزی شهرستان ورزقان واقع شده و به استان آذربایجان شرقی تعلق دارد. هدف اصلی این مطالعه با عنایت به اهمیت مسائل مرتبط با زمین‌لغزش و حرکات توده‌ای در سطح حوضه، شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی نواحی مستعد خطر زمین‌لغزش است؛ بنابراین برای ارزیابی و شناسایی مناطق پرخطر، در حوضه آبریز لنبران چای با استفاده از ویژگی‌های طبیعی، انسانی و مورفولوژیکی، از ۹ فاکتور مؤثر در وقوع زمین‌لغزش شامل فاصله از آبراهه، لیتولوژی، خاک، شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، بارش، کاربری اراضی و فاصله از راه ارتباطی استفاده گردید. سپس با بهره‌گیری از الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز لنبران چای انجام گرفته است. نتایج نشان داد که عامل شیب بیشترین وزن را دارد و عامل‌های فاصله از آبراهه و لیتولوژی در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. بررسی نقشه پهنه‌بندی با استفاده از مدل MACBETH نشان داد که ۴/۵۸، ۱۲/۲۵، ۲۵/۰۱، ۳۹/۳۴ و ۱۸/۷۸ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به ترتیب در پهنه‌های خطر خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم قرار گرفته‌اند. همچنین، نتایج ارزیابی عملکرد مدل MACBETH حاکی از دقت قابل‌قبول این مدل در پیش‌بینی پهنه‌بندی لغزش زمین است. مقدار سطح زیر منحنی (AUC) برای داده‌های آموزشی برابر با ۰/۸۶ و برای داده‌های اعتبارسنجی برابر با ۰/۸۸ به‌دست آمده است که بیانگر عملکرد مناسب مدل در هر دو مجموعه داده و توانایی بالای آن در تفکیک نواحی مستعد لغزش از نواحی غیرمستعد است.

زمین لغزش، پهنه بندی، مدل MACBETH، لنبران چای، ورزقان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

ارجاع به این مقاله: روستایی، شهرام؛ حجازی، سیداسدالله؛ فقیه خلجانی، سید حسین. (۱۴۰۵). پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبریز لنبران چای شهرستان ورزقان با استفاده از مدل MACBETH. هیدرو ژئومورفولوژی، ۱۳(۴۷): 41-59.

*نویسنده مسئول دکتر شهرام روستایی

رایانامه roostaei@tabrizu.ac.ir

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/HYD.2025.68225.1804



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

زمین لغزش یکی از فرایندهای ژئومورفیکی اصلی تأثیرگذار بر چشم‌انداز تکاملی در مناطق کوهستانی به شمار می‌رود که باعث حوادث فاجعه‌باری شده است (روستایی و همکاران، ۱۳۹۹؛ ۱۲۶). بر اساس برآوردهای دفتر هماهنگ‌کننده امور کمک‌های اضطراری سازمان ملل متحد (OCHA)، بلایا و سوانح طبیعی سالانه بین ۳۰ تا ۵۰ میلیارد دلار خسارت اقتصادی در سطح جهان به همراه دارند (کلارک و ساندرس^۱، ۲۰۱۱؛ اصغری و پیروزی، ۱۴۰۱؛ ۷۲)؛ بنابراین، می‌توان گفت بلایا و سوانح طبیعی از جمله چالش‌های مهم در سطح جهانی به شمار می‌آیند و بخش قابل توجهی از آن‌ها ماهیتی ژئومورفولوژیکی دارند (اصغری و پیروزی، ۱۴۰۱؛ ۷۲). بر پایه گزارش‌های جهانی درباره وقایع زیان‌بار، زمین لغزش‌ها به طور متوسط سالانه موجب وارد آمدن میلیاردها دلار خسارت اقتصادی به کشورهایی نظیر ژاپن، هند، ایتالیا و ایالات متحده آمریکا می‌شوند. (با سو و بال^۲، ۲۰۱۹؛ ایلدرمی و سپهری، ۱۴۰۲؛ ۶۲). زمین لغزش، حرکت یک توده از سنگ و خاک به سمت پایین یک دامنه است که در اثر از بین رفتن پایداری و تعادل آن توده اتفاق می‌افتد (کازیو و پوستیو^۳، ۲۰۱۷؛ شریفی پیچون و همکاران، ۱۴۰۰؛ ۱۴۰). با این‌که توده در حال لغزش ممکن است دچار جابه‌جایی شود، اما پیوند آن با دامنه همچنان به صورت مستمر حفظ می‌گردد. از این‌رو، فرایند شکل‌گیری و گسترش یک زمین لغزش را می‌توان به‌عنوان توالی‌ای سیستماتیک از تغییرات در وضعیت تنش کششی توده‌ای در دامنه تلقی کرد که تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی رخ می‌دهد (لی و مو^۴، ۲۰۱۹؛ ۶۸). اهمیت این پدیده را می‌توان از دیدگاه‌های گوناگونی مورد بحث و بررسی قرارداد. مهم‌ترین دلیل بااهمیت بودن آن زمانی است که فعالیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار دهد و موجب خسارات مالی و جانی فراوانی شود؛ بنابراین، بررسی عوامل مؤثر در ایجاد حرکات توده‌ای به منظور برنامه‌ریزی و انجام کارهای اصولی و ارائه راهکارهای مدیریتی صحیح در مناطق حساس ضروری است. اگرچه این پدیده تحت تأثیر عوامل متعددی مانند زمین‌شناسی، نوع و عمق خاک، شیب پوشش گیاهی، فعالیت‌های انسانی و زلزله قرار دارد (داهال و همکاران^۵، ۲۰۰۸؛ برا و همکاران^۶، ۲۰۱۹؛ رضایور و همکاران، ۱۴۰۲؛ ۲۰). اما نقش عوامل هیدرولوژیکی (بارش، رطوبت خاک، جریان‌های زیرسطحی و عمق آب‌های زیرزمینی) می‌تواند در بروز خطر آن نقش اساسی داشته باشد (رضایور و همکاران، ۱۴۰۲؛ ۲۰). ایران با داشتن توپوگرافی کوهستانی، فعالیت‌های زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، و شرایط بسیار متنوع اقلیمی و زمین‌ساختی، شرایط مساعدی برای بروز پدیده زمین لغزش دارد. اهمیت آن در مناطق نزدیک به سکونتگاه‌ها و تأسیسات انسانی بیشتر احساس می‌شود (عمادالدین و مرادی، ۱۳۹۷؛ ۱۷۳). انتخاب و شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش‌ها یکی از مراحل ابتدایی و بسیار مهم است. با توجه به این رخداد، پدیده زمین لغزش تحت تأثیر عوامل بسیار متعددی بوده و در هر منطقه‌ای می‌تواند تحت شرایط مختلفی اتفاق بیفتد. بنابراین نمی‌توان در انتخاب تعداد و عوامل دخیل در رخداد زمین لغزش‌ها استاندارد مشخص و معینی تعریف کرد (آقایاری و همکاران، ۱۴۰۳؛ ۴). بنابراین در سال‌های اخیر، امکان ارزیابی پتانسیل خطر زمین لغزش با استفاده از تهیه نقشه خطر زمین لغزش فراهم و توسعه فزاینده‌ای پیدا کرده است (برا و همکاران، ۲۰۱۹؛ ایلدرمی و سپهری، ۱۴۰۲؛ ۶۷). این روش به‌عنوان ابزاری مؤثر در ارزیابی و مدیریت کاهش ریسک مورد استفاده قرار گرفته است (هونگ و همکاران^۷، ۲۰۱۶؛ ۲۳۸). بنابراین پهنه‌بندی زمین لغزش شامل تقسیم‌بندی زمین به مناطق مجزا و رتبه‌بندی کردن این مناطق بر اساس درجه واقعی یا پتانسیل حساسیت ناشی از بروز خطر زمین لغزش بر روی شیب دامنه‌هاست (شریعت جعفری، ۱۳۷۷). در جهان و ایران تحقیقات بسیار زیادی جهت مطالعه و پهنه‌بندی زمین لغزش‌ها صورت گرفته است و سعی شده است با روش‌های مختلف به ارزیابی این حرکات دامنه‌ای بپردازند که به مواردی از این مطالعات اشاره می‌گردد.

(وو و سو^۸، ۲۰۰۹) در تایوان دلایل انواع زمین لغزش‌ها را بررسی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که فعالیت‌هایی مانند ساخت جاده و از همه مهم‌تر شیب دامنه و بارندگی، از جمله مهم‌ترین عوامل در ایجاد حرکات توده‌ای هستند. آنبالاگان و همکاران^۹ (۲۰۱۵) به بررسی استفاده از نسبت فراوانی و منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش دره لا چونگ واقع در هیمالیا پرداختند. آبا و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۹) به ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از AHP در اتیوپی پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سنگ‌شناسی، نزدیکی به گسل،

1 - Sanders & Clark
2 - Basu & Pal
3 - Kazeev & Postoev
4 - Li & Mo

5 - Dahal et al
6 - Bera et al
7 - Hong et al
8 - Wu & Su

9 - Anbalagan et al
10 - Abay et al

شیب، کاربری اراضی و ارتفاع نقش مهمی در وقوع زمین لغزش‌ها دارند. همچنین، کومار و همکاران^۱ (۲۰۲۱) به بررسی خطر زمین لغزش در منطقه اوتار کاشی هندوستان پرداختند و سور و همکاران^۲ (۲۰۲۱) به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در کریدور جاده‌ای کالسی چاکراتا واقع در هندوستان اشاره کردند. یکی و همکاران^۳ (۲۰۲۴) خطر زمین لغزش در جنوب شرقی تبت را با استفاده از مدل AHP بررسی و مطالعه نمودند. نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع، جهت شیب، فاصله از جاده، کاربری زمین، فاصله از رودخانه، شیب و بارندگی بیشترین تأثیر را دارند. روستایی و کریستینه (۱۳۹۸) پهنه‌بندی خطر وقوع ناپایداری دامنه‌ای در حوضه آبریز بالقلو چای اردبیل با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی، روستایی و همکاران (۱۳۹۹) تحلیل کمی و مقایسه‌ای ناپایداری‌های دامنه‌ای در دامنه‌های مشرف بر جاده کرج- چالوس (کرج- گچسر) و اتوبان در حال احداث تهران- شمال (تهران- سولقان)، روستایی و حسین‌زاده مریق (۱۴۰۱) بررسی پتانسیل وقوع زمین لغزش در محدوده سد علویان مراغه، غیوربلورفروشان و همکاران (۱۴۰۳) رفتار شناسایی فضایی و زمانی زمین لغزش قدیمی روستای حسین‌آباد کالپوش، آقایی و همکاران (۱۴۰۳) پهنه‌بندی زمین لغزش در شهرستان گرمی، اسفندیاری درآباد و همکاران (۱۴۰۳) پهنه‌بندی زمین لغزش در حوضه آبریز زمکان، جعفری و براتی (۱۴۰۳) تحلیل فضایی لیتولوژی زمین لغزش الموت شرقی، دهنوی ئیلاق و پهلوانی (۱۴۰۳) ارزیابی خطر زمین لغزش در شهرستان سوادکوه، اصغری و پیروزی (۱۴۰۱) پهنه‌بندی زمین لغزش در حوضه آبریز گیوی چای اردبیل، همتی و همکاران (۱۴۰۳) ارزیابی خطر ناپایداری دامنه‌ای در حوضه آبریز شهرچای ارومیه، را از طریق روش‌های آماری مختلف و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمتغیره بررسی و مطالعه کرده‌اند. بررسی منابع نشان می‌دهد که برای پهنه‌بندی و مطالعه زمین لغزش مدل‌های تصمیم‌گیری چند متغیره، رگرسیون لجستیک، روش نسبت فراوانی و با استفاده از عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای صورت گرفته است. نوآوری اصلی این پژوهش به کارگیری مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره MACBETH در ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبریز لنبران چای است؛ رویکردی که تاکنون در این حوضه مورد استفاده قرار نگرفته و در مقایسه با روش‌های متداول، قابلیت تلفیق معیارهای کمی و کیفی را به شکلی دقیق‌تر و شفاف‌تر فراهم می‌سازد. همچنین، دستاوردهای این تحقیق می‌تواند به‌عنوان الگویی بومی برای مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی کاربری اراضی در سایر حوضه‌های کوهستانی استان آذربایجان شرقی و مناطق مشابه کشور مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

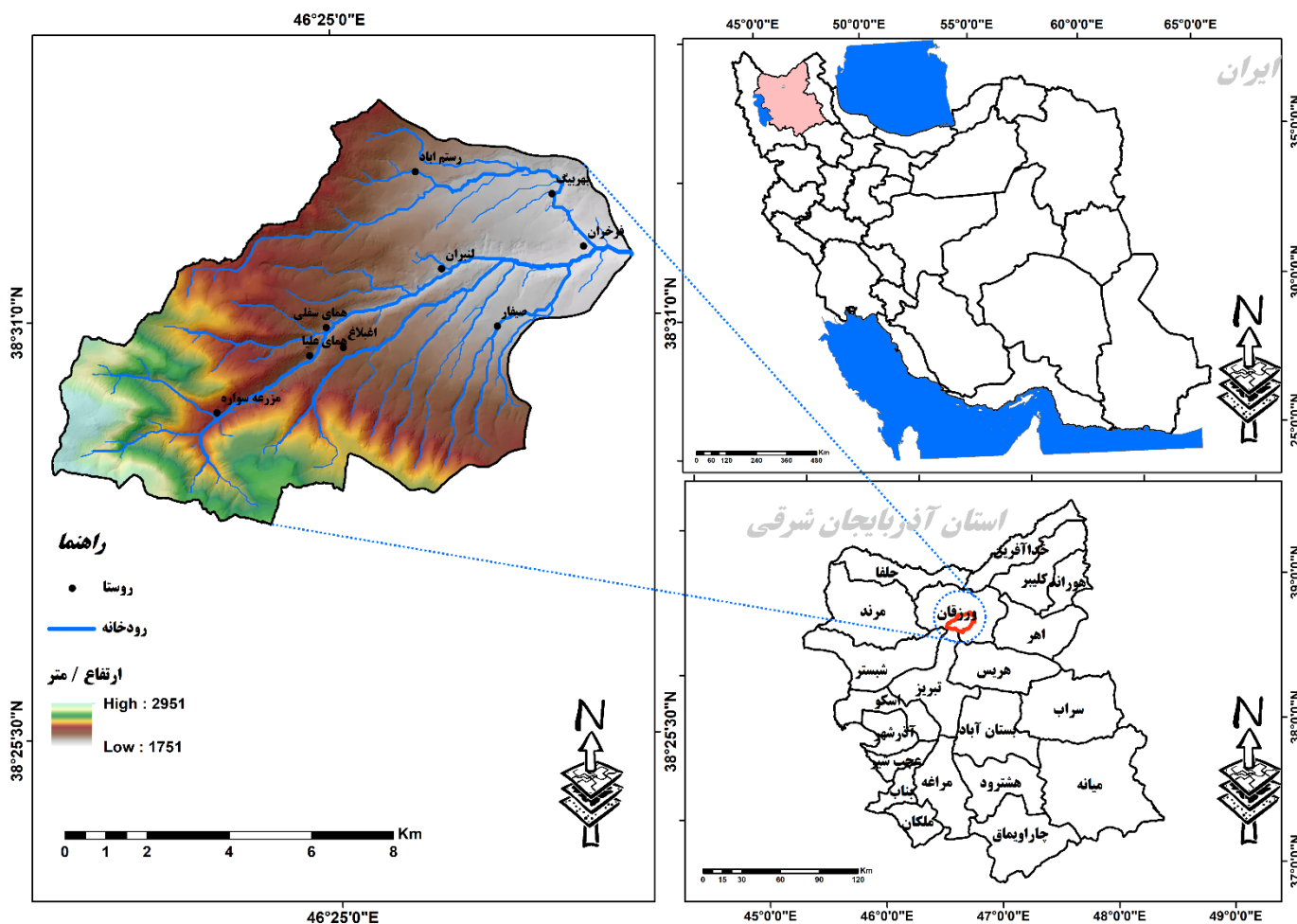
منطقه مورد مطالعه

زیر حوضه لنبران در سمت ضلع شرقی رودخانه اهر چای واقع شده است. مساحت این زیرحوضه ۸۲۲۶ هکتار هست و سرشاخه اصلی رودخانه اهر چای محسوب می‌شود. محدوده مورد مطالعه در بین مختصات جغرافیایی $20^{\circ}07'$ تا $30^{\circ}30'$ طول‌های شرقی و $38^{\circ}28'$ تا $38^{\circ}52'$ عرض‌های شمالی قرار گرفته است. این حوضه از نظر تقسیمات کشوری در دهستان سینا از بخش مرکزی شهرستان ورزقان از توابع استان آذربایجان شرقی واقع شده است. شهرستان ورزقان از لحاظ موقعیت جغرافیایی خاص و به دلیل اینکه از نواحی سرسبز جنگل‌های ارسباران به شمار می‌آید، به شهرستان ارسباران معروف بوده است. این حوضه از طرف شمال به اراضی روستای اوئلیق و ارتفاعات کوه‌های کمرقیه، دیبکلی، کهورداغی، سلمان داغی و نریمان داغی، از سمت جنوب به ارتفاعات قرقی کلگی و از جهت جنوب غربی به ارتفاعات کوه قصبه داغی، از غرب به ارتفاعات کوه آی گرون مزداغ و کوه آی گرمز، از ناحیه شمال غربی به ارتفاعات کوه‌های پیرسقاداغی و قزل آغل و از قسمت شرق به تپه‌های تپه و دهانه خروجی حوضه متصل است. مرتفع‌ترین نقطه‌ی حوضه در بخش غربی آن قرار دارد. این قله که به «کوه آی گرون مزداغ» شهرت دارد، دارای ارتفاعی معادل ۲۹۵۱ متر از سطح دریا است. پایین‌ترین نقطه‌ی حوضه در بخش شرقی و در پایین‌دست روستای فرخران واقع شده و ارتفاع آن به ۱۷۵۱ متر از سطح دریا می‌رسد. همچنین متوسط بارش این حوضه ۳۹۵ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۱).

¹ - Kumar et al

² - Sur et al

³ - Yeqi et al

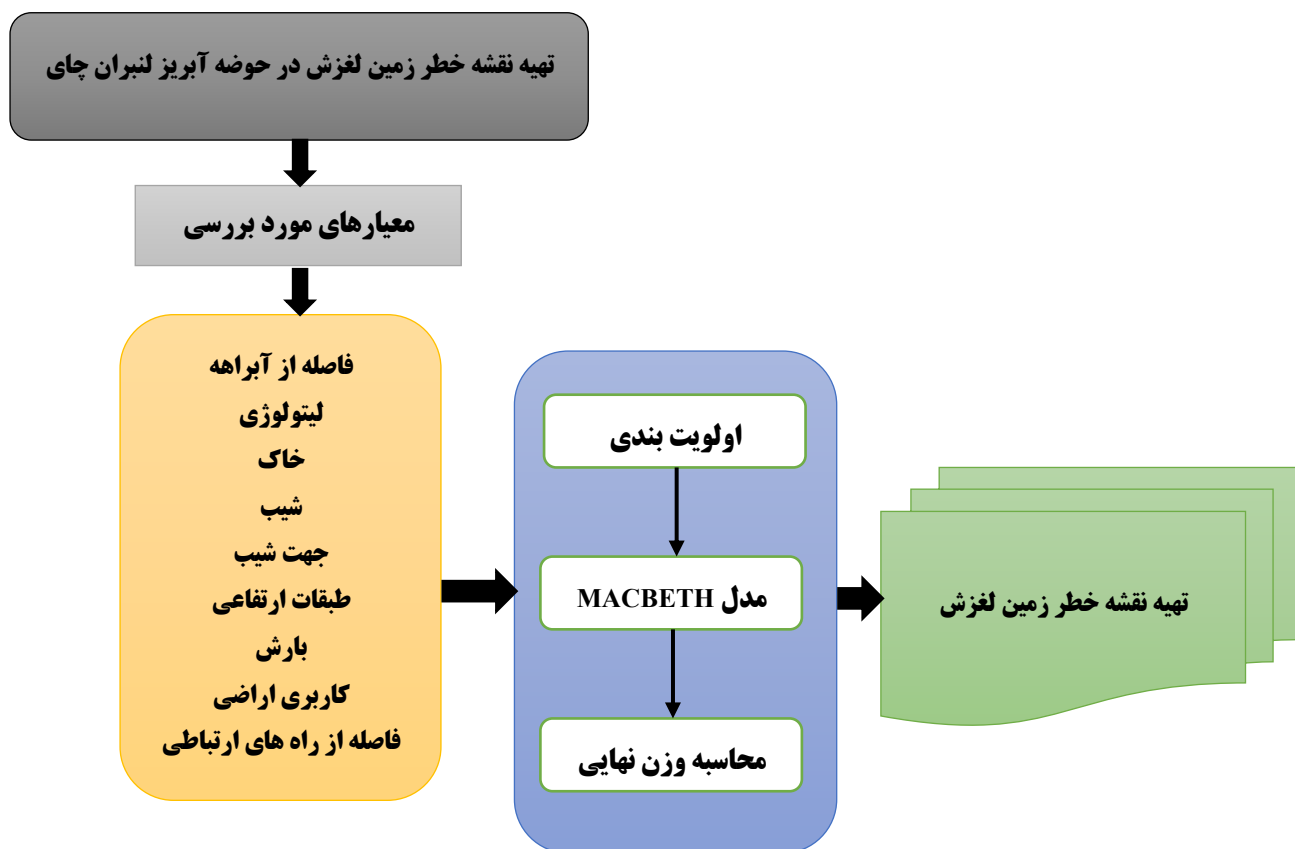


شکل (۱): موقعیت حوضه آبریز لنبران
Figure (1): Location of the Lenbaran watershed

مواد و روش

در این پژوهش با توجه به اینکه آبراهه‌ها به دلیل فرسایش و افزایش رطوبت، پایداری دامنه‌ها را کاهش می‌دهند. نوع سنگ و خاک نیز مقاومت و نفوذپذیری زمین را مشخص می‌کند. شیب و جهت آن با تغییر نیروهای محرک و شرایط رطوبتی از عوامل کلیدی لغزش‌اند. اختلاف ارتفاع از طریق اثر بر دما و بارش نقش غیرمستقیم دارد و بارندگی به‌عنوان مهم‌ترین محرک، مقاومت برشی خاک را کاهش می‌دهد. کاربری اراضی با میزان پوشش گیاهی و بهره‌برداری انسانی، شرایط هیدرولوژیک و مکانیکی دامنه‌ها را تغییر می‌دهد. همچنین فاصله از راه‌های ارتباطی به دلیل تغییرات مصنوعی در مورفولوژی دامنه، از مهم‌ترین عوامل انسانی مؤثر بر بروز لغزش محسوب می‌شود. بنابراین به منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، اقلیمی و عوامل محیط زیستی و انسانی از ۹ فاکتور مؤثر در وقوع زمین‌لغزش شامل فاصله از آبراهه، لیتولوژی، خاک، شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، بارش، کاربری اراضی و فاصله از راه ارتباطی استفاده گردید (شکل ۲) و لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.7 با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متری، زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، ورسود، ورزقان و خواجه، نقشه خاک و نقشه کاربری اراضی نقشه خاک منطقه مورد مطالعه با مقیاس ۱/۱۲۵۰۰۰ تهیه گردید. نقشه‌های شیب، جهت شیب، شبکه آبراهه‌ای و طبقات ارتفاعی به وسیله مدل رقومی ارتفاعی، نقشه همبارش با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های بارانسنجی ورزقان، اویلق، کمانج و افشرد طی دوره ۱۳۷۵-۱۴۰۲ و با استفاده از روش درونیابی IDW حاصل شد. در ادامه، با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره MACBETH، میزان تأثیر نسبی هر یک از معیارها تعیین شد. برای این منظور، ۹ پرسشنامه تخصصی شامل مقایسه‌های زوجی معیارها بین کارشناسان تهیه و توزیع گردید که

توسط تعدادی از اساتید دانشگاهی و کارشناسان منابع طبیعی تکمیل شد. نهایتاً، با بهره‌گیری از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه‌های مورد نیاز برای تحلیل فضایی و ارزیابی خطر تهیه و تولید گردید.



شکل (۲): فلوچارت مراحل تهیه نقشه پتانسیل خطر زمین لغزش
Figure (2): Flowchart of steps for preparing a landslide hazard potential map

مدل MACBETH

مدل MACBETH یا اندازه‌گیری جذابیت توسط یک تکنیک ارزیابی مبتنی بر طبقه‌بندی یک رویکرد تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط بانا کاستا و همکاران در دهه ۱۹۹۰ معرفی شده است. مدل MACBETH مدلی تعاملی است که از قضاوت‌های طبقه‌بندی شده درباره روابط جبری بین پدیده‌ها استفاده می‌کند و مهم‌ترین امتیاز آن توانایی ایجاد مقیاس‌های عددی بر اساس مقایسه‌های کیفی است که از تفاوت در جذابیت‌های گزینه‌ها به دست می‌آید (دتونی^۱، ۱۹۹۶). این روش مبتنی بر مقایسات زوجی بوده و از مقیاس فاصله‌ای استفاده می‌کند. مراحل انجام این مدل به صورت زیر است:

گام اول: تعیین معیارها و گزینه‌های ارزیابی و ایجاد درخت ارزش^۲. مدل MACBETH مسئله را به صورت یک درخت یا یک سلسله‌مراتب ارائه می‌دهد.

گام دوم: قرارگرفتن گزینه‌ها و معیارها در ماتریس ارزیابی طبق اهمیت‌شان. در این مرحله ماتریس ارزیابی تشکیل شده و مقایسه زوجی معیارها و گزینه‌ها طبق مقیاس‌های معنایی و عددی (جدول ۲) انجام می‌گیرد (کاراند و چاکرابورتی^۳، ۲۰۱۳).

¹ - Detoni

² - value tree

³ - Karande and Chakraborty

جدول (۲): مقیاس معنایی مدل MACBETH و اهمیت‌شان
 Table (2): Semantic scales of the MACBETH model and their importance

مقیاس معنایی	مقیاس عددی	میزان اهمیت
هیچ	۰	عدم تفاوت بین گزینه‌ها
بسیار ضعیف	۱	یک گزینه جذابیت خیلی ضعیفی نسبت به دیگری دارد.
ضعیف	۲	یک گزینه دارای جذابیت ضعیفی نسبت به دیگری است.
متوسط	۳	یک گزینه دارای جذابیت متوسطی نسبت به دیگری است.
قوی	۴	یک گزینه دارای جذابیت قوی نسبت به دیگری است.
بسیار قوی	۵	یک گزینه دارای جذابیت خیلی قوی نسبت به دیگری است.
بی‌نهایت	۶	یک گزینه نسبت به دیگری کاملاً جذاب‌تر است.

گام سوم: در این مرحله قضاوت‌های کارشناسی که از مقایسه زوجی حاصل شده است وارد مقیاس MACBETH شده و مدل برنامه‌ریزی خطی با استفاده از رابطه‌های زیر اجرا می‌شود. در این مدل $V(X)$ امتیاز اختصاص داده شده به گزینه X است. X^+ نشان می‌دهد که حداقل به اندازه گزینه دیگر X جذاب است. X^- نیز نشان می‌دهد که به همان اندازه برای هر گزینه دیگری از X جذابیت دارد (بانا کاستا^۱ و همکاران، ۲۰۱۲).

$$\text{Min}[V(X^+) - V(X^-)]$$

$$V(X^-) = 0 \text{ (Arbitrary assignment)} \quad (1)$$

$$\forall (X, Y) \in C_0: V(X) - V(Y) = 0 \quad (2)$$

$$\forall (X, Y) \in C_i \cup \dots \cup C_s \text{ with } i, s \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\} \text{ and } i \leq s: V(X) - V(Y) \geq i \quad (3)$$

$$\forall (X, Y) \in C_i \cup \dots \cup C_s \text{ and } \forall (W, Z) \in C_{i'} \cup \dots \cup C_{s'} \quad (4)$$

$$\text{With } i, s, i', s' \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$i \leq s, i' \leq s' \text{ and } i > s': V(X) - V(Y) \geq V(W) - V(Z) + i - s'$$

در صورتی که برنامه خطی به درستی اجرا نشود قضاوت‌ها ناسازگار خواهند بود. اگر برنامه اجرا شود نشان‌دهنده سازگاری قضاوت‌ها می‌باشد. در این موارد میانگین‌شان به‌عنوان مقیاس MACBETH در نظر گرفته می‌شود (بانا کاستا و همکاران، ۲۰۰۵).

گام چهارم: تعیین امتیاز کلی گزینه‌ها با استفاده از روابط زیر:

$$V(A_i) = \sum_{j=1}^n W_j (V_j) \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1, W_j > 0 \text{ and } \begin{cases} V_j(A_i^{\text{upper reference level}}) = 100 \\ V_j(A_i^{\text{lower reference level}}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

¹ - Bana e Costa

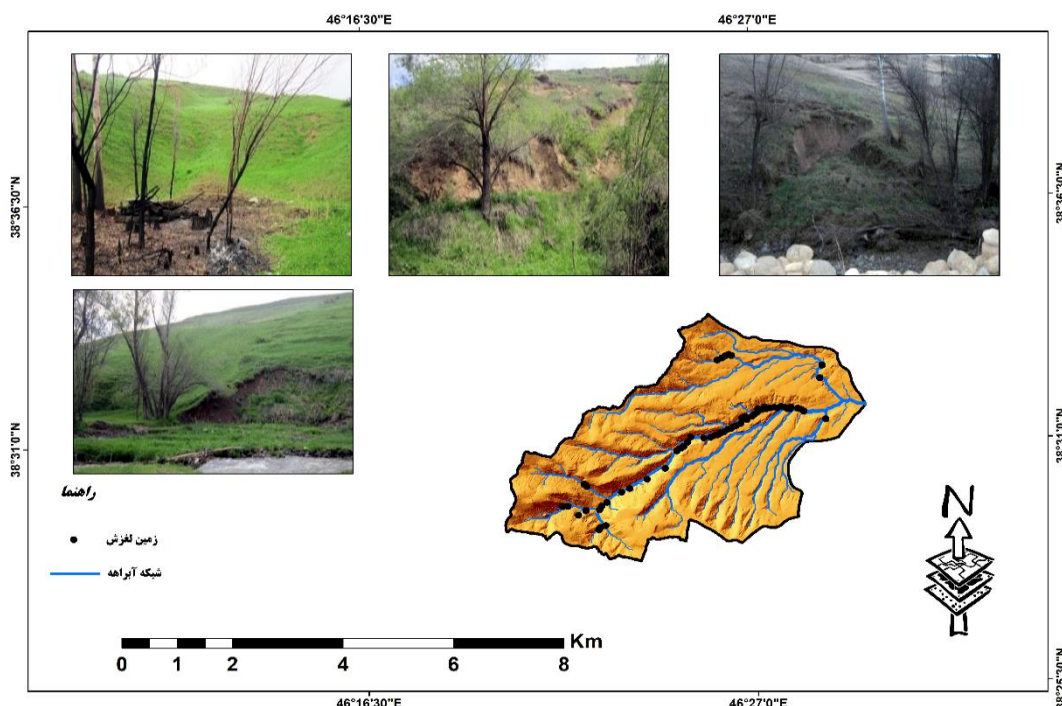
که در آن W_j نشان دهنده وزن معیار j^{th} می باشد. در نهایت گزینه‌ها طبق مقادیر $V(A_i)$ به ترتیب نزولی، رتبه‌بندی می‌شوند که در آن مرجع بالا ۱۰۰ و مرجع پایین صفر می‌باشد (بانا کاستا و همکاران، ۲۰۰۵؛ کراند و چاکرابورتی، ۲۰۱۴). در این تحقیق از نرم‌افزار M-MACBETH جهت وزن دهی پارامترها با بر اساس مدل MACBETH استفاده شده است.

ارزیابی نقشه‌های پهنه‌بندی زمین لغزش

منحنی تشخیص عملکرد نسبی ROC از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در پیش‌بینی و تعیین دقت مدل‌سازی است (زندى و همکاران، ۱۳۹۷؛ عابدینی و همکاران، ۱۴۰۰). منحنی ROC نموداری است که در آن روی محور افقی، پیکسل‌هایی که وقوع یا عدم وقوع زمین لغزش به وسیله مدل را به درستی پیش‌بینی کرده‌اند، مثبت درست و نسبت پیکسل‌هایی که نادرست پیش‌بینی شده‌اند، مثبت غلط روی محور عمودی ترسیم می‌گردد. در حقیقت، منحنی ROC یک نمایش تصویری از موازنه‌ی بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از نقاط برش، یا همان مقادیر مربوط به رده‌های خطر است. مساحت زیر این منحنی AUC نام دارد و مدلی که بیشترین مقدار AUC را دارا باشد، دارای عملکرد نسبی بالاتری است.

توزیع زمین لغزش‌ها در سطح حوضه

دسترسی به اطلاعات دقیق در خصوص الگوی مکانی نواحی مستعد وقوع زمین لغزش، از اساسی‌ترین پیش‌نیازها برای انجام مطالعات کارآمد در زمینه کاهش مخاطرات محسوب می‌شود. سیاهه زمین لغزش‌ها داده‌های کلیدی و ارزشمندی برای تحلیل، ارزیابی و مدیریت زمین لغزش فراهم می‌سازند. در این راستا، به‌روزرسانی مستمر داده‌های میدانی و به‌کارگیری رویکردهای تحلیلی پیشرفته، نقش مهمی در ارتقای دقت نقشه‌ها و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی‌های کاهش خطر ایفا می‌کنند. همچنین به‌منظور بررسی و ثبت لغزش‌های رخ داده در حوضه آبریز لنبران با استفاده از نرم‌افزار Earth Google، مشاهدات میدانی و بررسی اسناد و مدارک موجود در اداره کل منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی محل لغزش‌ها مشخص و سپس با استفاده از دستگاه GPS مختصات نقاط لغزشی به نرم‌افزار Arc GIS منتقل گردید و نقشه پراکنش زمین لغزش‌های حوضه تهیه شد (شکل ۳).



شکل (۳): توزیع مکانی زمین لغزش‌های ثبت شده در محدوده حوضه آبریز لنبران چای

Figure (3): Spatial distribution of recorded landslides within the Lanbaran Chay watershed

یافته ها و بحث

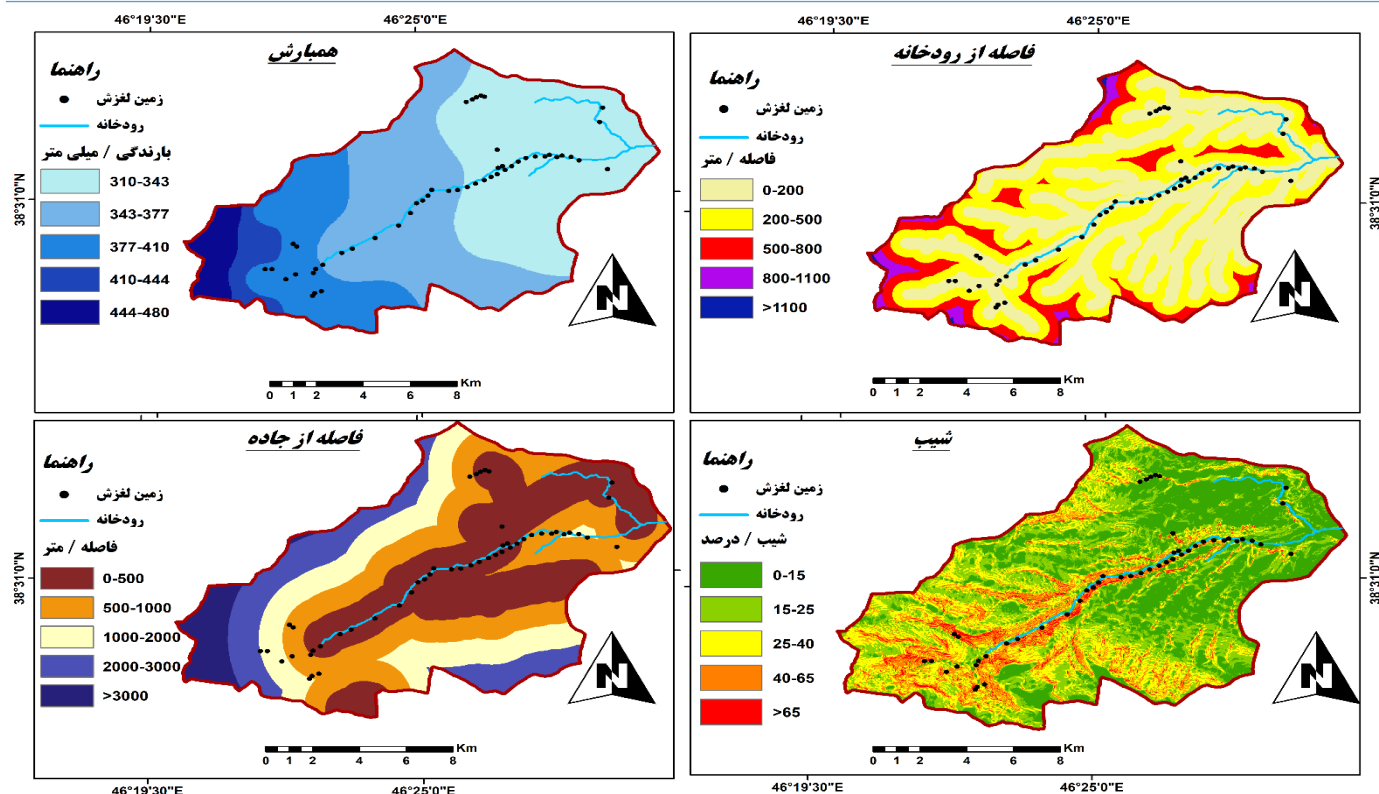
تحلیل پارامترهای مورداستفاده در تحقیق

شیب: شیب و مورفولوژی بر وقوع پدیده زمین لغزش تاثیر زیادی دارد. با افزایش شیب منطقه تا ۴۰ درصد، احتمال وقوع زمین لغزش نیز افزوده می شود. اما باید به این نکته توجه نمود که در شیب‌های بسیار بالا، بالای ۴۰ درجه، به علت عدم امکان تشکیل خاک و نیز ناپایداری رسوبات، خطر وقوع زمین لغزش کمتر می شود (نوجوان و همکاران، ۱۳۹۸). در حوضه آبریز لنبران هم در مناطق شیب‌دار لغزش‌های متعددی مشاهده می‌شود این لغزش‌ها عمدتاً در شیب‌های مشرف به رودخانه بیشتر مشاهده می‌گردد که عمدتاً در طبقه بیش ۴۰ درجه قرار دارند. نقشه شیب در ۵ کلاس طبقه‌بندی گردید (شکل ۴). بیشترین مساحت منطقه در کلاس ۱۵-۰ درصد قرار دارد و ۲۸/۳۴ کیلومترمربع از مساحت منطقه را تشکیل می دهد.

فاصله از آبراهه: با وجود شبکه آبراهه‌های گسترده در سطح حوضه آبریز لنبران چای، می‌توان تصور نمود که این آبراهه‌ها قادرند رخداد زمین لغزش در سطح حوضه را تحت‌تأثیر قرار دهند. اثر آبراهه‌ها بر وقوع زمین لغزش می‌تواند به طرق مختلفی اعمال شود که از جمله می‌توان به افزایش رطوبت پای دامنه‌ها و مهم‌تر از آن، زیربری و خالی نمودن پای دامنه‌ها اشاره کرد. به منظور لحاظ نمودن تأثیر آبراهه‌های منطقه بر رخداد زمین لغزش، ابتدا شبکه آبراهه‌های حوضه آبریز لنبران چای از روی پردازش تصویر مدل رقومی ارتفاع (DEM) در محیط نرم‌افزار ArcGIS استخراج شده و سپس نسبت به تهیه لایه فاصله از آبراهه اقدام گردید (شکل ۴). در این حوضه نیز پهنه‌های مجاور آبراهه‌ها از پتانسیل زمین لغزش بالاتری برخوردار هستند لغزش‌های متعددی در حاشیه رودخانه اصلی مشاهده می‌شود (شکل ۳). این لغزش‌ها بیشتر در طبقه ۲۰۰-۰ متری مشاهده می‌شوند. البته می‌توان گفت تغییرات مورفولوژیکی بستر رودخانه و شدت فرسایش جانبی، عامل تشدید این لغزش‌ها بوده است.

فاصله از جاده: احداث جاده در نزدیکی دامنه‌ها موجب تغییر شرایط شیب و ایجاد شکاف‌های تنشی و فراهم شدن راه نفوذ آب و بی‌ثباتی در دامنه می‌شود. معمولاً احداث جاده به شیب‌های طبیعی آسیب رسانده و احتمال وقوع زمین لغزش، به خصوص در مناطق کوهستانی، را افزایش می‌دهد. در حوضه آبریز لنبران چای نیز به‌خاطر کوهستانی بودن احداث مسیرهای ارتباطی پایداری شیب‌ها را کاهش داده و با برهم‌زدن تعادل طبیعی زمین، وقوع زمین لغزش‌ها را تشدید کرده است. همچنین، موجب تغییر زهکش طبیعی و تمرکز رواناب سطحی شده است و این مسئله باعث افزایش فرسایش و اشباع لایه‌های خاک می‌شود که از عوامل مهم تحریک زمین لغزش در این منطقه است (شکل ۴). فراوانی لغزش‌ها در این حوضه در طبقه ۱۰۰۰-۰ متری مشاهده می‌شود.

بارندگی: با افزایش حجم آب موجود در بافت خاک به علت وقوع بارندگی، ناپایداری خاک در دامنه افزایش می‌یابد و با افزایش فشار استاتیکی آب بر درز و شکاف‌های دامنه، موجب ریزش دامنه‌های ناپایدار گردیده و منجر به وقوع زمین لغزش می‌شود. نقشه هم‌بارش با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های ورزقان، اویلق، کمانج و افشرد در داخل و اطراف حوضه بر اساس مدل درون‌یابی IDW، تهیه گردید (شکل ۴). همان‌طوری که مشاهده می‌گردد بیشترین مقدار بارندگی در بالادست حوضه آبریز با ۴۸۰ میلی‌متر و کمترین مقدار بارندگی نیز در خروجی حوضه با ۳۱۰ میلی‌متر مشاهده می‌گردد.



شکل (۴): نقشه بارندگی، فاصله از رودخانه، جاده و شیب حوضه آبریز لنبران
Figure (4): Rainfall map, distance from river, road and slope of the Lenbaran watershed

لیتولوژی: در پژوهش حاضر، برای تهیه واحدهای لیتولوژی حوضه آبریز لنبران از نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰ تبریز و سیهرود سازمان زمین شناسی استفاده شد (شکل ۵). بیشترین مساحت حوضه آبریز سازند Plc است که شامل سنگ‌های کنگلومرا و سیلت و مارن می‌باشد و ۴۹/۳ درصد منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد. در رتبه دوم سازند Plv که عمدتاً از توف‌های اسیدی تشکیل شده است و ۲۴/۶ درصد منطقه را شامل می‌شود. سازند Qtv که از سنگ‌های آذرآواری و بازالت تشکیل شده است و در قسمت‌های مرتفع حوضه مشاهده می‌شود با ۱۹/۸ درصد در رتبه سوم قرار دارد. با وجود آنکه سازندهای جوان تنها در سطحی بسیار محدود در منطقه مورد مطالعه گسترش یافته‌اند و حدود ۵/۳ درصد از وسعت کل حوضه را تشکیل می‌دهند، بیشترین رخداد لغزش‌های زمین در محدوده همین سازندها مشاهده می‌شود. این امر بیانگر آن است که ویژگی‌های زمین‌شناختی و مکانیکی این واحدها به گونه‌ای است که حساسیت بیشتری نسبت به ناپایداری دامنه‌ها دارند. به عبارت دیگر، هرچند سهم این سازندها از نظر مساحت اندک است، اما نقش آن‌ها در بروز مخاطرات ژئومورفولوژیکی حائز اهمیت ویژه‌ای می‌باشد.

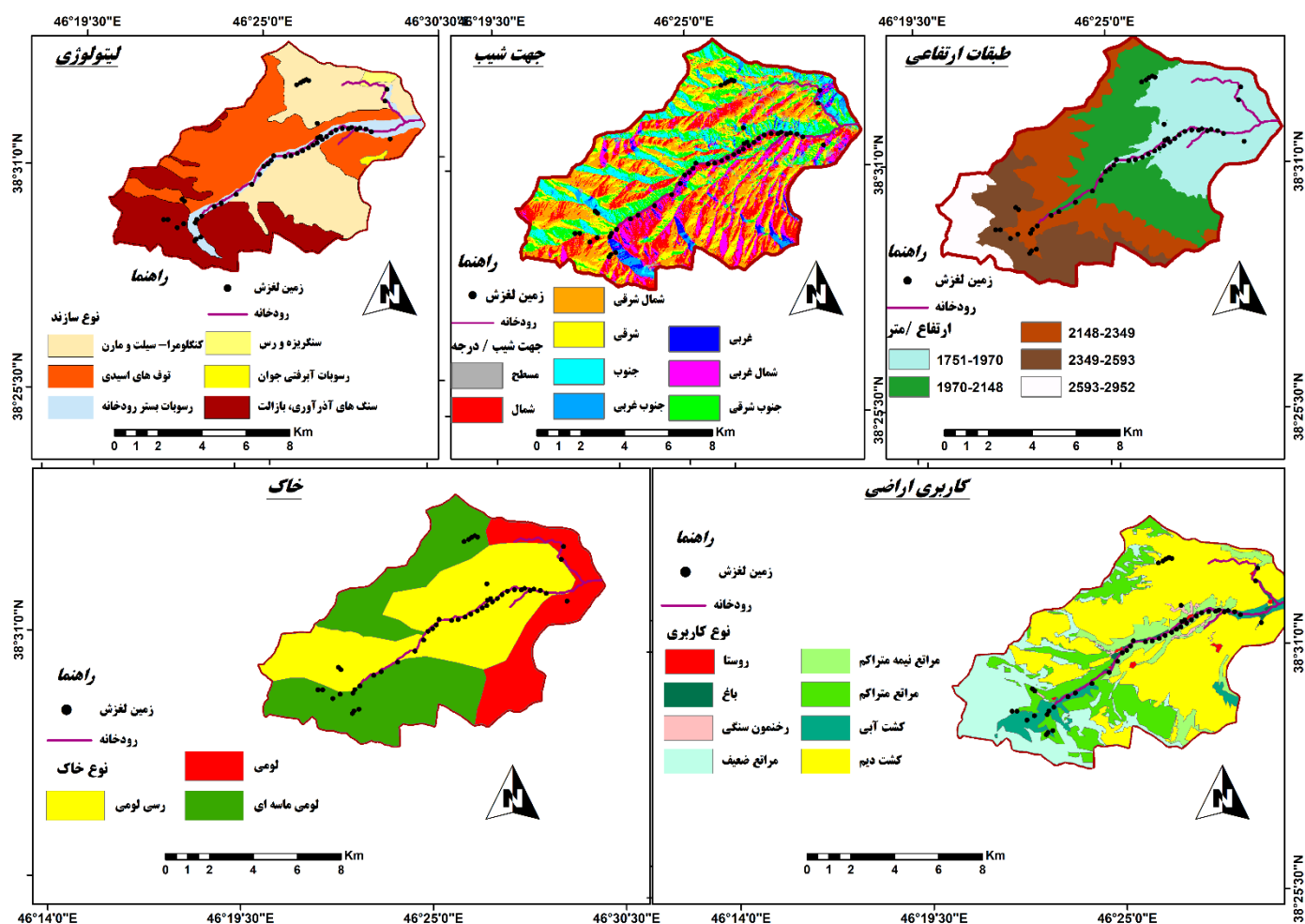
جهت شیب: جهت شیب از معیارهای تأثیرگذار در میزان دریافت نور و میزان بارندگی در جهات مختلف است. میان توزیع فراوانی ناپایداری‌های دامنه‌ای و معیار جهت شیب ارتباط معنی‌داری هست به طوری که تراکم ناپایداری‌های دامنه‌ای در دامنه‌های شمالی بیشتر و در دامنه‌های جنوبی رو به آفتاب کم می‌شود (همتی و حجازی، ۱۳۹۶). بررسی نقشه جهت شیب نشان می‌دهد که لغزش‌ها در تمامی جهات رخ داده‌اند، اما پراکندگی آنها در برخی جهات شیب بیشتر است. به طور خاص، تراکم بالاتری از لغزش‌ها در دامنه‌های با شیب شمال غربی و شرقی مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از شرایط ژئومورفولوژیکی و تأثیر عوامل اقلیمی مانند بارش و رطوبت باشد. در مقابل، دامنه‌های مسطح و کم‌شیب میزان وقوع لغزش بسیار کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۵).

طبقات ارتفاعی: باتوجه به اینکه درجه و نوع فرسایش و فعالیت‌های انسانی تحت تأثیر ارتفاع هست و به عنوان یک معیار تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. دامنه‌های با ارتفاع بالا معمولاً از سنگ‌هایی تشکیل شده است که دارای مقاومت برشی بالا و ارتفاعات پایین دارای مقاومت برشی کم هستند. در صورتی که در ارتفاعات متوسط، بی‌ثباتی شیب محتمل تر

و احتمال وقوع زمین لغزش بالاتر هست (حمزه و امیری، ۱۳۹۹). بررسی نقشه طبقات ارتفاعی حوضه مورد مطالعه نشان می دهد که این حوضه دارای اختلاف ارتفاعی ۱۲۰۰ متر است به طوری که ارتفاع زمین در بلندترین نقطه ۲۹۵۱ متر و در خروجی حوضه ۱۷۵۱ متر است و ۲۷/۰۹ درصد از مساحت این حوضه در طبقه ارتفاعی ۱۹۷۰ تا ۲۱۴۸ متر و ۷/۲۶ درصد در بازه ارتفاعی ۲۵۹۳ تا ۲۹۵۲ متر قرار دارد (شکل ۵). فراوانی لغزش ها در همه طبقات ارتفاعی مشاهده می شود.

کاربری اراضی: به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز لنبران، از نقشه کاربری اراضی برگرفته از سازمان منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی استفاده شده است (شکل ۵). نقشه کاربری منطقه مورد مطالعه در هشت کلاس طبقه بندی شده است با توجه به اینکه رودخانه در دره ای عمیق جریان دارد بنابراین عمدتاً کشت آبی و باغات در اطراف رودخانه اصلی دیده می شود ولی بیشترین مساحت منطقه مورد مطالعه بصورت دیم کشت می شود. بیشترین فراوانی لغزش ها عمدتاً در کاربری کشت آبی و باغات مشاهده می شود.

خاک: نوع خاک تأثیر زیادی در بررسی زمین لغزش دارد. به همین منظور ابتدا نقشه خاک منطقه مورد مطالعه تهیه شد و سپس درصد و مساحت هر یک از واحدهای خاک محاسبه و مشخص گردید (شکل ۵). همانطوری که مشاهده می شود بیشترین مساحت حوضه از خاک های رسی لومی تشکیل شده است. از آن جا که خاک های رسی-لومی در شرایط اشباع شدگی مستعد کاهش مقاومت برشی هستند، حضور گسترده آن ها در منطقه می تواند یکی از عوامل اصلی بروز زمین لغزش به شمار رود. بنابراین بیشترین فراوانی لغزش ها در خاک های رسی لومی مشاهده می شود.

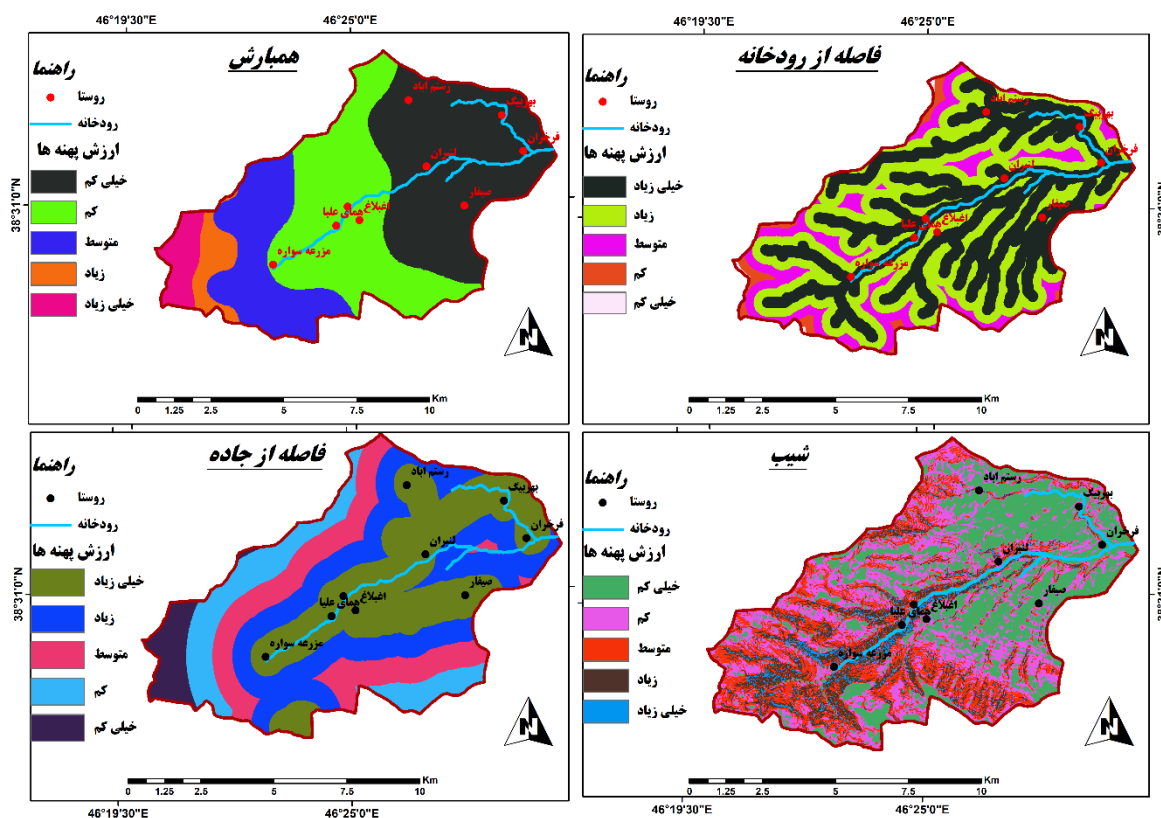


شکل (۵): نقشه لیتولوژی، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، خاک و کاربری اراضی حوضه آبریز لنبران

Figure (5): Lithology, slope direction, elevation, soil and land use map of the Lenbaran watershed.

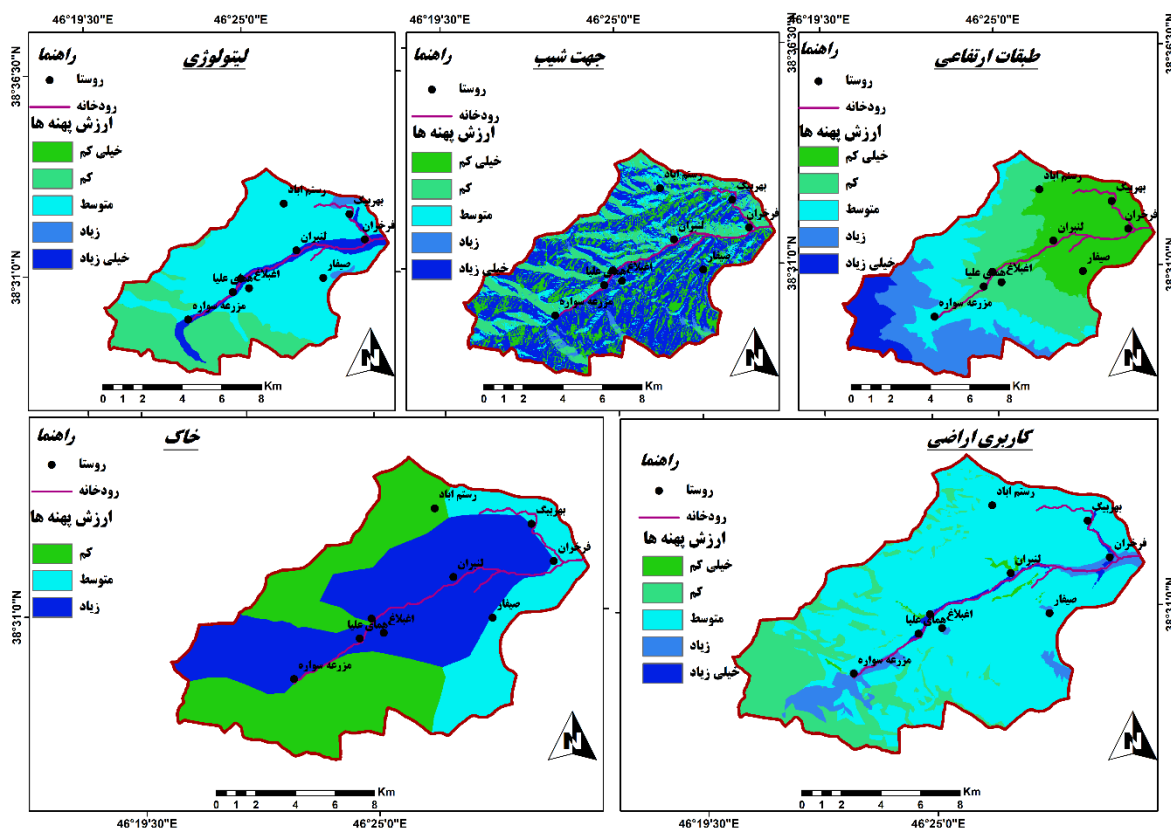
استانداردسازی نقشه‌های معیار

جهت انجام عملیات پهنه‌بندی و ادغام نمودن نقشه‌ها، باید لایه‌های مؤثر در پهنه‌بندی استانداردسازی شوند. به عبارت دیگر، داده‌های پیوسته باید به داده‌های گسسته تبدیل شوند. این عملیات لازمه استفاده از قواعد تصمیم‌گیری است. یعنی لایه‌ها با استفاده از قواعد تصمیم‌گیری به مقیاس تبدیل می‌شوند تا بتوان آن‌ها را با یکدیگر ادغام نمود. به دلیل اینکه نقشه‌های اولیه واحد مشخصی ندارند، هر کدام از لایه‌های اطلاعاتی شامل شیب، جهت شیب، لیتولوژی، بارش، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی در ۵ کلاس طبقه‌بندی گردید. بر اساس درجه خطر نسبت به زمین‌لغزش، به هر کدام از طبقات، پنج درجه خطرپذیری خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم تعلق گرفت. بنابراین تمام لایه‌ها قبل از اعمال اوزان به دست‌آمده از مدل MACBETH با دستور طبقه‌بندی مجدد استانداردسازی شدند (شکل ۶ و ۷).



شکل (۶): نقشه استاندارد شده بارندگی، فاصله از رودخانه، جاده و شیب حوضه آبریز لنبران

Figure (6): Standardized map of rainfall, distance from river, road, and slope of the Lenbaran watershed

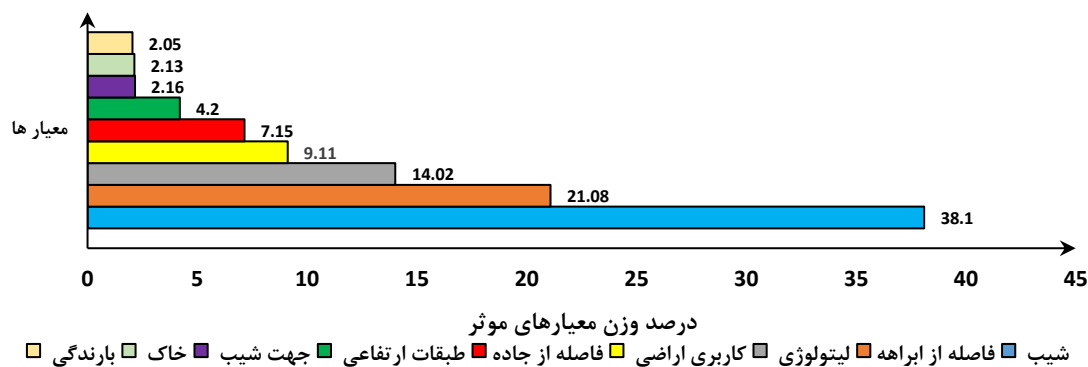


شکل (۷): نقشه استاندارد شده لیتولوژی، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، خاک و کاربری اراضی حوضه آبریز لنبران

Figure (7): Standardized map of lithology, slope direction, elevation, soil and land use of the Lenbaran watershed.

برای تحلیل نقش پارامترهای مؤثر بر وقوع لغزش، تمامی ۹ پارامتر منتخب برای فرایند وزن دهی وارد نرم افزار M-MACBETH شدند. نخستین گام در این نرم افزار، ساخت درخت ارزش بر اساس ساختار مفهومی پارامترهای مورد استفاده در پژوهش است که این درخت به منظور ساماندهی سلسله مراتبی معیارها طراحی می گردد. به منظور تعیین میزان ارجحیت هر پارامتر، از نظرات خبرگان، کارشناسان حوزه منابع طبیعی و اساتید دانشگاهی بهره گیری شد. سپس با تشکیل ماتریس های ارزیابی و انجام مقایسه های زوجی میان معیارها، وزن نهایی هر پارامتر از طریق روش تصمیم گیری چندمعیاره MACBETH محاسبه گردید. نتایج حاصل نشان می دهد که معیار شیب با ضریب اهمیت ۳۸/۱ درصد بیشترین تأثیر را در ارزیابی خطر لغزش داشته، در حالی که بارندگی با ضریب ۲/۰۵ درصد کمترین وزن را به خود اختصاص داده است (شکل ۸). این نتایج با یافته های مددی و پیروزی (۱۴۰۲)، آقایی و همکاران (۱۴۰۳)، اصغری سراسکانرود و پیروزی (۱۴۰۱) و ذاکرنژاد و عموشاهی (۱۴۰۱) مطابقت می کند. زیرا محققین مذکور نیز در مطالعات خود به تأثیر بیشتر معیارهای شیب، فاصله از رودخانه و لیتولوژی اشاره کرده اند.

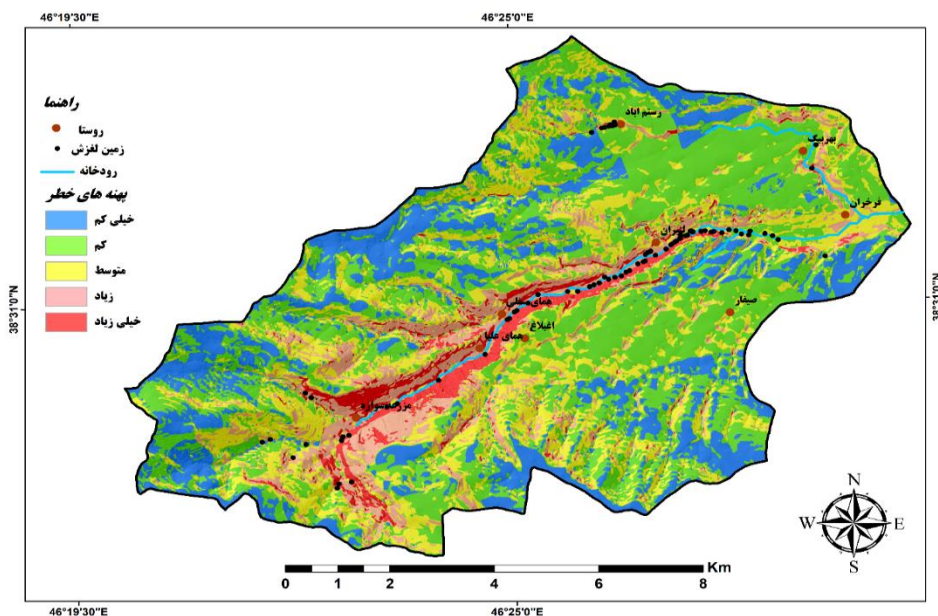
نمودار وزن پارامترهای موثر در لغزش



شکل (۸): وزن نهایی معیارهای اصلی بر اساس مدل MACBETH

Figure (8): Final weight of main criteria based on the MACBETH model

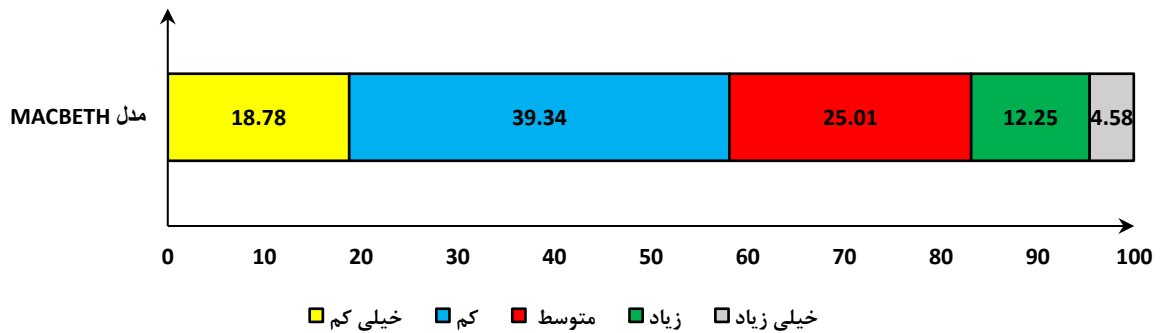
پس از تعیین وزن نهایی پارامترها، جهت پهنه‌بندی حوضه آبریز لنبران با اعمال اوزان به‌دست‌آمده بر هر یک از لایه‌ها نقشه نهایی تهیه گردید (شکل ۹).



شکل (۹): نقشه پهنه بندی زمین لغزش حوضه آبریز لنبران چای با استفاده از مدل MACBETH

Figure (9): Landslide zoning map of the Lanban Chay watershed using the MACBETH model

بر اساس تحلیل نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با بهره‌گیری از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره MACBETH، نتایج حاصله نشان می‌دهد که به ترتیب مساحت‌هایی معادل ۳/۷، ۱۰/۰۲، ۲۰/۴۶، ۳۲/۱۸ و ۱۵/۳۶ کیلومترمربع از منطقه مورد مطالعه در پهنه‌های خطر «خیلی زیاد»، «زیاد»، «متوسط»، «کم» و «خیلی کم» قرار دارند (شکل ۱۰). همچنین بررسی توزیع فضایی این پهنه‌ها نشان می‌دهد که نواحی با خطر «زیاد» و «خیلی زیاد» عمدتاً در مجاورت آبراهه اصلی متمرکز شده‌اند، که بیانگر تأثیر چشمگیر عوامل هیدرو ژئومورفولوژیکی در بروز ناپایداری‌های شیب در منطقه است. همچنین، نتایج حاصل از بازدید میدانی انجام‌شده تطابق قابل توجهی با یافته‌های مدل‌سازی دارد و به خوبی صحت و دقت مدل MACBETH در تحلیل خطر زمین لغزش را تأیید می‌کند. این هم‌راستایی میان داده‌های مدل و مشاهدات میدانی، بیانگر کارایی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در ارزیابی مخاطرات محیطی و مدیریت بهینه سرزمین است.

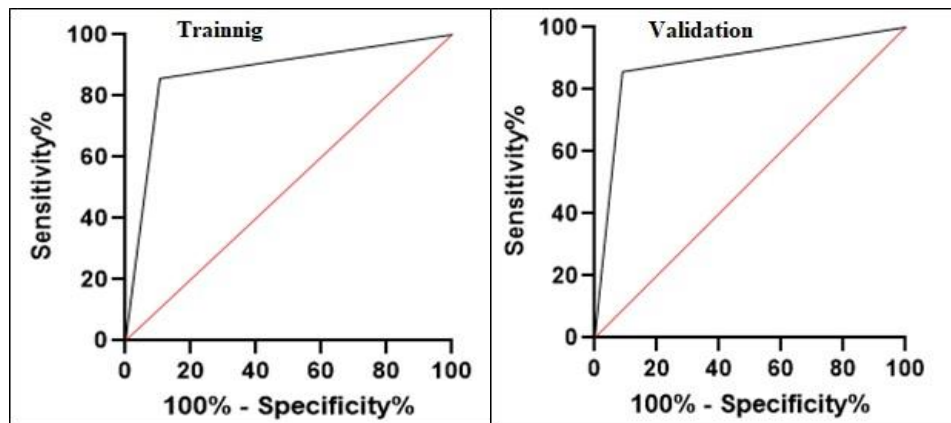


شکل (۱۰): نمودار درصد مساحت پهنه های خطر زمین لغزش در حوضه آبریز لنبران چای با استفاده از مدل MACBETH

Figure (10): Percentage chart of landslide hazard areas in the Lenbaran Chay watershed using the MACBETH model

ارزیابی عملکرد مدل MACBETH

نتایج بررسی شاخص ارزیابی نشان می‌دهد که مدل MACBETH با ضریب $0.87/5$ دقت خوبی را از نظر داده های آموزشی داشته است. همچنین برای سنجش دقت نقشه نهایی پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبریز لنبران چای از منحنی ROC و سطح زیر منحنی در نرم افزار Excel استفاده شد (شکل ۱۱). منحنی ROC نمایشی گرافیکی از موازنه بین نرخ مثبت صحیح و نرخ مثبت غلط برای هر مقدار احتمالی از خطای برشها می باشد. سطح زیر منحنی ROC که به اختصار AUC نامیده می شود. بیانگر توانایی یک مدل برای پیش بینی پیکسل های لغزش و بدون لغزش می باشد. سطوح مختلف ناحیه زیر منحنی (AUC) به صورت طبقه بندی شده به شرح زیر تعریف می گردند: مقدار 0.91 و بالاتر به عنوان «عالی»، بازه 0.89 تا 0.8 به عنوان «بسیار خوب»، مقادیر بین 0.8 تا 0.7 در سطح «خوب»، دامنه 0.7 تا 0.6 در سطح «متوسط»، و مقادیر بین 0.6 تا 0.5 به عنوان «ضعیف» در نظر گرفته می شوند (نندی و شکور، ۲۰۱۰؛ مددی و پیروزی، ۱۴۰۲). مدلی که دارای بیشترین مقدار AUC باشد، از نظر کارایی عملکردی در مقایسه با سایر مدل ها از برتری نسبی برخوردار است. نتایج نشان داد که در مورد داده های آموزشی، مدل MACBETH با سطح زیر منحنی برابر با 0.86 از دقت خوبی برخوردار است. برای داده های اعتبار سنجی نیز این مقدار برابر با 0.88 است که نشان دهنده عملکرد خوب این مدل در تهیه نقشه پهنه بندی لغزش است.



شکل (۱۱): منحنی ROC براساس داده های آموزشی و اعتبار سنجی

Figure (11): ROC curve based on training and validation data

¹ - Nandi & Shakoor

نتیجه‌گیری

شناسایی نواحی مستعد خطر، به‌ویژه در زمینه پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مانند زمین‌لغزش، از ارکان اساسی در مدیریت بحران و برنامه‌ریزی محیطی محسوب می‌شود. پیش‌بینی و پیشگیری از وقوع این مخاطرات طبیعی، نیازمند تحلیل دقیق و علمی شرایط محیطی و انسانی منطقه است. در همین راستا، پژوهش حاضر باهدف شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش در حوضه آبریز لنبران چای واقع در شهرستان ورزقان انجام گرفت. برای دستیابی به این هدف، از ۹ شاخص کلیدی مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش استفاده شد که شامل شیب، جهت شیب، لیتولوژی، بارش، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی بود. به‌منظور ارزیابی اهمیت نسبی این شاخص‌ها، از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره MACBETH بهره گرفته شد. نتایج وزن‌دهی معیارهای اصلی نشان می‌دهد که معیار شیب، فاصله از آبراهه و لیتولوژی به ترتیب با ضریب ۳۸/۱، ۲۱/۰۸ و ۱۴/۰۲ درصد بیشترین اهمیت را نسبت به سایر معیارها دارند. بررسی نقشه پهنه بندی با استفاده از مدل MACBETH نشان می‌دهد که ۴/۵۸، ۱۲/۲۵، ۲۵/۰۱، ۳۹/۳۴ و ۱۸/۷۸ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به ترتیب در پهنه‌های خطر خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج حاکی از آن است که این مدل با دستیابی به سطح زیر منحنی ۰/۸۶ برای داده‌های آموزشی و ۰/۸۸ برای داده‌های اعتبارسنجی، از دقت و قابلیت پیش‌بینی بالایی در تهیه نقشه پهنه‌بندی لغزش برخوردار است. یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که مدل MACBETH ابزاری کارآمد در تحلیل و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش محسوب می‌شود. دقت بالای مدل در شناسایی پهنه‌های پرخطر می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های پیشگیرانه و تخصیص منابع برای مدیریت بحران مؤثر واقع شود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، از ترکیب این مدل با سایر روش‌های یادگیری ماشین برای ارتقاء دقت نقشه‌های خطر استفاده گردد.

References

- Abay Asmelash, Barbieri, G., & Woldearegay, K. (2019). GIS-based landslide susceptibility evaluation using analytical hierarchy processes (AHP) approach: The case of Tarmaber District, Ethiopia. *Momona Ethiopian Journal of Science*, 11(1), 14–36. <https://www.ajol.info/index.php/mejs/article/view/186815>.
- Ayyari, L., Asghari Saraskanroud, S., & Zeinali, B. (2024). Identification and zoning of landslide-prone areas in Germe County. *Hydrogeomorphology*, 11(39), 1–18. <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.58703.1709>.
- Anbalagan, R., Kumar, R., Lakshmanan, K., Parida, S., & Neethu, S. (2015). Landslide hazard zonation mapping using frequency ratio and fuzzy logic approach: A case study of Lachung Valley, Sikkim. *Geoenvironmental Disasters*, 2, 1–17.
- Asghari Saraskanroud, S., & Piroozi, E. (2022). Comparative evaluation of multi-criteria decision-making algorithms: WLC, OWA, VIKOR, and MABAC in landslide hazard zoning. Case study: Givi Chay Basin, Ardabil Province. *Physical Geography Research*, 54(1), 65–94. <https://sid.ir/paper/1062633/fa>.
- Asghari Saraskanroud, S., & Piroozi, E. (2024). Identification and zoning of landslide-prone areas using ARAS multi-criteria analysis. Case study: Qaranguchay watershed, southeast East Azerbaijan Province. *Geography and Environmental Planning*, 35(3), 65–94. <https://doi.org/10.22108/gep.2024.140985.1639>.
- Bana e Costa, C. A., De Corte, J. M., & Vansnick, J. C. (2005). On the mathematical foundations of MACBETH. In *Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* (pp. 409–437). Springer.
- Bana e Costa, C. A., De Corte, J. M., & Vansnick, J. C. (2012). MACBETH. *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 11(2), 359–387. <https://doi.org/10.1142/S0219622012400068>.
- Basu, T., & Pal, S. (2019). RS-GIS based morphometrical and geological multi-criteria approach to the landslide susceptibility mapping in Gish River Basin, West Bengal, India. *Advances in Space Research*, 63(3), 1253–1269.
- Bera, S., Chakrabarty, D., Flores, N., & Negahbani, M. (2019). Fair algorithms for clustering. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32.

- Chun-Hung Wei, & Su-Chin Chen. (2009). Determining landslide susceptibility in Central Taiwan from rainfall and six site factors using the analytical hierarchy process method. *Geomorphology*, 112(3–4), 190–204. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(09\)00233-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(09)00233-5).
- Clark, P. D., & Sanders, M. H. (2010). *Geomorphology: Processes, taxonomy and applications*. Nova Science Publishers.
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S., & Paudyal, P. (2008). Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102(3–4), 496–510.
- Dehnavi Eilaq, M., & Pahlevani, P. (2024). Landslide susceptibility assessment using VIKOR and OWA models. Case study: Savadkooh County. *Physical Geography Research*, 56(1), 41–59. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.366517.1007792>.
- Detoni, M. (1996). Application of multi criteria methodology for decision support in defining features construction projects (Unpublished MSc dissertation). Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, Brazil.
- Emadeddin, S., & Moradi, A. (2018). Landslide hazard assessment using AHP, ANN, and field surveys: A risk reduction approach in Haraz road axis. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(4), 172–190. <https://sid.ir/paper/513900/fa>.
- Esfandiari, F., Rostami, G., Mostafazadeh, R., & Abedini, M. (2024). Spatial assessment and landslide hazard zoning in the Zemkan watershed using Support Vector Machine and Logistic Regression. *Hydrogeomorphology*, 11(40), 102–123. <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.61467.1737>.
- Ghayoor Bolourforoushan, M., Hosseinzadeh, S. R., Lashkaripour, G., Minaei, M., & Morabbi Heravi, H. (2024). Spatio-temporal behavior of reactivated landslides in Hoseynabad Kalpush Village. *Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 314–343. <https://doi.org/10.22067/geoh.2023.82181.1358>.
- Hamzeh, S., & Amiri, A. (2020). Landslide hazard zoning using weighted overlay and network analysis methods. Case study: Nasrabad area, Golestan Province. *Sepehr Geographical Information Quarterly*, 29(114), 117–132. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.44597>.
- Hemmati, F., & Hejazi, S. A. (2017). Landslide hazard zoning using logistic regression in the Lavasanat watershed. *Applied Research in Geographical Sciences*, 17(45), 7–24.
- Hong, H., Pradhan, B., Jebur, M. N., Bui, D. T., Xu, C., & Akgun, A. (2016). Spatial prediction of landslide hazard at the Luxi area (China) using support vector machines. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–14.
- Ilderemi, A., & Sepehri, M. (2023). Accuracy assessment of landslide hazard potential maps in the Kurdistan dam watershed using AHP, BWM, and FUCOM methods. *Hydrogeomorphology*, 10(37), 63–80. <https://doi.org/10.22034/hyd.2023.55538.1682>.
- Jafari, G. H., & Barati, Z. (2024). Spatial analysis of lithology in the occurrence of landslides in the East Alamut Basin: Case study of Moallem Kalayeh watershed. *Hydrogeomorphology*, 11(40), 124–142. <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.61470.1738>.
- Karande, P., & Chakraborty, S. (2013). Using MACBETH method for supplier selection in manufacturing environment. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 4, 259–272. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2013.01.002>.
- Karande, P., & Chakraborty, S. (2014, January 7–9). A facility layout selection model using MACBETH method. In *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Bali, Indonesia.
- Kazeev, A., & Postoev, G. (2017). Landslide investigations in Russia and the former USSR. *Natural Hazards*, 88(Suppl. 1), 81–101.
- Li, Y., & Mo, P. (2019). A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review. *Geomorphology*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.020>.
- Madadi, A., & Piroozi, E. (2023). Landslide hazard zoning in the upstream basin of Yamchi Dam, Ardabil Province using MARCOS and CODAS multi-criteria decision methods. *Quantitative Geomorphological Research*, 12(1), 73–94.

- Nandi, A., & A. Shakoor., 2010. A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses, *Engineering Geology*, 110, 11–20.
- Rezapour, A., Jabbari, I., & Bahrami, K. (2023). Impact of groundwater on landslides in the southern slopes of Shahnesht Mountain. *Physical Geography Research*, 55(3), 19–36. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2023.364630.1007788>.
- Roustaei, Sh., & Hajer, H. M. (2022). Evaluation of landslide potential around Alavian Dam, Maragheh. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(1), 1–18.
- Roustaei, Sh., Mokhtari, D., & Jananeh, K. (2020). Quantitative and comparative analysis of slope instability along Karaj–Chalous Road and Tehran–Soleqan Highway using logistic regression. *Hydrogeomorphology*, 7(24), 41–63. <https://doi.org/10.22034/hyd.2020.38806.1522>.
- Roustaei, Sh., Mokhtari Keshki, D., & Ashrafi Fini, Z. (2020). Landslide hazard zoning in Taleghan watershed using Shannon entropy index. *Geography and Planning*, 24(71), 125–150. <https://sid.ir/paper/395732/fa>.
- Roustaei, Sh., & Jananeh, K. (2019). Landslide hazard zoning in Balghelu Chay Basin, Ardabil, using fuzzy AHP. *Geography and Planning*, 23(70), 169–188. <https://sid.ir/paper/358659/fa>.
- Shariat Jafari, M., & Ghayoomian, J. (2005). The relationship between sedimentation, slope failure, and landslides in the central Taleghan Basin. *Geosciences*, 14(55), 90–97. <https://sid.ir/paper/31720/fa>.
- Sharifi Pichon, M., Shirani, K., & Shirani, M. (2021). Prioritization of factors affecting landslide occurrence using multivariate linear regression. Case study: Vahregan watershed, west Isfahan. *Hydrogeomorphology*, 8(26), 139–163. <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.12902>.
- Sur, U., Singh, P., & Rai, P. K. (2021). Landslide probability mapping by considering fuzzy numerical risk factor (FNRF) and landscape change for road corridor of Uttarakhand, India. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 13526–13554. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01226-1>.
- Yeqi, Z., Yonggang, G., Guowen, W., & Shengjie, W. (2024). Evaluation of landslides susceptibility in Southeastern Tibet considering seismic sensitivity. *Heliyon*, 10(18).
- Zakerinejad, R., & Amooshahi, N. (2022). Landslide hazard assessment using remote sensing data and Maximum Entropy model: Case study: Komeh Watershed, South Isfahan. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(2), 128–149.
- Zandi, R., AmirAhmadi, A., & Mohammadnia, M. (2018). Application of entropy model in landslide hazard assessment along the proposed Torghabeh–Doroud road (Mashhad–Neyshabur). *Geography and Human Relations*, 1(2), 37–58.