



Performance Evaluation of the MEREC Method in Landslide Susceptibility Zoning (Case Study: The Slopes Overlooking the Metropolitan City of Tabriz)

Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam¹ , Shahram Roostaei² , Tohid Rahimpour³ ,
Abdolhamid Sartipi⁴ 

1. (Corresponding Author) Department of Geomorphology, Faculty of Planning and environmental sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: rezmogh@tabrizu.ac.ir

2. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and environmental sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: roostaei@tabrizu.ac.ir

3. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and environmental sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: t.rahimpour@tabrizu.ac.ir

4. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and environmental sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: a_hsartipi@yahoo.com

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

3 Nov 2025

Received in revised form:

13 Feb 2026

Accepted:

13 May 2026

pp.155-175

Keywords:

Landslide,
Zoning,
MEREC Method,
GIS,
Tabriz

ABSTRACT

Landslides, as one of the natural hazards, have challenged the sustainable development of the metropolitan area of Tabriz. The present study was conducted with the aim of preparing a landslide susceptibility zoning map for the slopes overlooking the metropolitan area of Tabriz, using the MEREC multi-criteria decision-making method within a Geographic Information System (GIS) environment. To this end, twelve effective criteria were employed, including lithology, slope, aspect, elevation, precipitation, land use, NDVI, distance to the fault, distance to the road, distance to the river, Stream Power Index (SPI), and Topographic Wetness Index (TWI). Data were extracted from various sources, such as Digital Elevation Model (DEM), geological maps, Landsat 8 satellite imagery, and precipitation data, and were prepared in the form of informational layers. The results of the weighting process indicated that lithology, with a weight of 0.164, is the most influential factor in landslide occurrence in the region. Following that, distance to the road (0.124), precipitation (0.118), and slope (0.112) were placed in subsequent ranks. The integration of informational layers and final classification using the Natural Breaks method led to the preparation of the landslide potential map. Based on the results, the northern slopes of Tabriz, particularly the heights of Einali, fall within the high and very high hazard classes, and more than 9 percent of the area (approximately 24 Km²) is at high risk of landslides. The overlap of occurred landslides with the final map confirmed the accuracy of the model.

Cite this article: Rezaei Moghaddam, M. H., Roostaei, S., Rahimpour, T., & Sartipi, A. (2026). Performance Evaluation of the MEREC Method in Landslide Susceptibility Zoning (Case Study: The Slopes Overlooking the Metropolitan City of Tabriz). *Quantitative Geomorphological Research*, 15(1), 155-175.

Doi: [10.22034/gmpj.2026.558279.1591](https://doi.org/10.22034/gmpj.2026.558279.1591)

Extended Abstract

Introduction

The slopes overlooking the metropolitan area of Tabriz are at high risk of landslides due to a combination of natural factors, including the presence of weak formations such as marl, steep slopes, and sufficient rainfall, as well as human factors such as urban development and road construction on unstable slopes. This phenomenon can lead to disastrous consequences, including casualties, extensive financial losses, and damage to infrastructure. Therefore, the main objective of this research is to prepare a landslide susceptibility zoning map for the slopes overlooking the metropolitan area of Tabriz using the MEREC (Method based on the Removal Effects of Criteria) multi-criteria decision-making method within a Geographic Information System (GIS) environment. This study aims to identify and prioritize areas with high potential for landslide occurrence by considering key effective criteria, including geological formations (especially weak marls), slope, rainfall, distance from faults and rivers, as well as human development indicators such as distance from roads and land use. The results of this research provide essential and necessary information for risk management, sustainable urban development planning, and the implementation of landslide mitigation measures in this sensitive region.

Methodology

The study area of the present research is the slopes overlooking the metropolis of Tabriz. The study area is located at latitudes between $38^{\circ} 02'$ and $38^{\circ} 10'$ North, and at longitudes between $46^{\circ} 11'$ and $46^{\circ} 23'$ East.

The present study was conducted with the aim of preparing a landslide susceptibility zonation map for the slopes overlooking the metropolitan city of Tabriz, using the MEREC method and GIS. To this end, twelve effective criteria were employed, including lithology, slope, aspect, elevation, precipitation, land use, NDVI, distance to the fault, distance to the road, distance to the

river, Stream Power Index (SPI), and Topographic Wetness Index (TWI). The data were extracted from various sources such as the Digital Elevation Model (DEM), geological maps, Landsat 8 satellite imagery, and precipitation data, and were prepared in the form of information layers.

Results and discussion

The results of the criteria weighting process indicate that the lithology criterion, with a relative weight of 0.164, is the most determining factor in slope instability and the occurrence of landslides in the region. Subsequently, the criteria of distance from road (0.124), mean annual precipitation (0.118), and slope (0.112) were ranked. In contrast, the aspect and stream power index criteria were identified as the least influential factors in this analysis. To produce the final landslide susceptibility map, the effective informational layers, after being assigned relative weights for each criterion, were integrated within the Geographic Information System (ArcGIS) environment. Based on the final map analysis, the northern slopes of Tabriz, particularly the Einali highlands, fall within the high and very high-risk categories. This situation is attributed to the presence of weak and unstable formations, such as marls in these zones, coupled with the steep slope gradients, which have significantly reduced the natural stability of the land. On the other hand, human activities have also played a significant role in increasing the landslide risk. The construction of the Pasdaran Highway at the foot of these slopes has caused a loss of slope equilibrium and intensified instability along its path.

Conclusion

The results indicated that weak formations such as marls, the steep slopes of northern Tabriz, and human activities including road construction are among the most important factors of instability in this region. Analyses performed on twelve key criteria clearly revealed the prominent role of geological and human factors in the instability of the region's slopes. The most significant finding of this study was the identification of lithology as the most influential criterion (with a weight of

0.164). The presence of weak and erodible formations, particularly marls on the northern slopes of Tabriz, has provided the primary foundation for landslide occurrence. Subsequently, the criteria of distance from roads (0.124), precipitation (0.118), and slope (0.112) were ranked next, indicating the combined influence of construction activities and natural factors in exacerbating this hazard. The construction of roads and highways such as the Pasdaran Highway has disrupted slope equilibrium by creating slope cuts and altering the natural drainage pattern. On the other hand, regional precipitation acts as a triggering factor; by infiltrating weak subsurface layers, it increases pore water pressure and reduces slope stability. The final susceptibility map clearly revealed the spatial distribution of high-risk areas. The concentration of high and very high hazard zones in the northern highlands of the city, particularly in the Einali (Aun-bin-Ali) Mountain range, poses a serious warning for the future development of the city and the safety of residents in these areas. The significant concordance between recorded historical landslides (such as those along the Pasdaran Highway) and the high-risk zones identified in this research strongly confirms the accuracy and validity of the presented model.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

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

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

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

ارزیابی کارایی روش MEREC در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش (مطالعه موردی: دامنه‌های مشرف به کلان‌شهر تبریز)

محمدحسین رضائی مقدم^۱ ✉، شهرام روستائی^۲، توحید رحیم‌پور^۳، عبدالحمید سرتیپی^۴

۱- نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، rezmogh@tabrizu.ac.ir

۲- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، roostaei@tabrizu.ac.ir

۳- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، t.rahimpour@tabrizu.ac.ir

۴- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، a_hsartipi@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی، توسعه پایدار کلان‌شهر تبریز را با چالش مواجه کرده‌اند. پژوهش حاضر با هدف تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در دامنه‌های مشرف به کلان‌شهر تبریز، با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره MEREC و در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد. در این راستا، دوازده معیار مؤثر شامل لیتولوژی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، بارش، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، شاخص توان جریان (SPI) و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) به‌کار گرفته شد. داده‌ها از منابع مختلفی نظیر مدل رقمی ارتفاع (DEM)، نقشه‌های زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و داده‌های بارشی استخراج و در قالب لایه‌های اطلاعاتی آماده شدند. نتایج فرآیند وزن‌دهی نشان داد که لیتولوژی با وزن ۰/۱۶۴، تأثیرگذارترین عامل در وقوع زمین‌لغزش در منطقه است. پس از آن، فاصله از جاده (۰/۱۳۴)، بارش (۰/۱۱۸) و شیب (۰/۱۱۲) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و طبقه‌بندی نهایی با روش Natural Breaks منجر به تهیه نقشه پتانسیل وقوع زمین‌لغزش شد. بر اساس نتایج، دامنه‌های شمالی تبریز به‌ویژه ارتفاعات عینالی، در طبقات خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند و بیش از ۹ درصد از مساحت منطقه (حدود ۲۴ کیلومترمربع) در معرض خطر بالای زمین‌لغزش است. هم‌پوشانی زمین‌لغزش‌های رخ داده با نقشه نهایی، دقت مدل را تأیید نمود.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳	
صص: ۱۷۵-۱۵۵	
واژگان کلیدی: زمین‌لغزش، پهنه‌بندی، روش MEREC، سیستم اطلاعات جغرافیایی، تبریز	

استناد: رضائی مقدم، محمد حسین، روستائی، شهرام، رحیم‌پور، توحید، و سرتیپی، عبدالحمید. (۱۴۰۵). ارزیابی کارایی روش MEREC در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش (مطالعه موردی: دامنه‌های مشرف به کلان‌شهر تبریز). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۵(۱)، ۱۷۵-۱۵۵.

مقدمه

امروزه چالش‌های مهندسی عمران علاوه بر فناوری، ساخت‌وساز، مصالح ساختمانی و موارد مشابه، شامل زمین‌لغزش‌ها نیز می‌شود که هزینه‌های احداث سازه‌های جدید و انجام کارهای ترمیمی را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. این مسئله عمدتاً ناشی از کمبود اطلاعات درباره مناطق مستعد زمین‌لغزش در هنگام انتخاب مکان‌ها برای توسعه است (سیلادجان و طاهّا،^۱ ۲۰۲۵). زمین‌لغزش‌ها یکی از متداول‌ترین مخاطرات طبیعی در بسیاری از نقاط جهان هستند (سعادتخواه و همکاران^۲، ۲۰۱۵) که تحت تأثیر عوامل محیطی، زمین‌شناسی، توپوگرافی، انسانی و هیدرولوژیکی قرار دارند (تاتینگ و همکاران^۳، ۲۰۱۵). این پدیده غالباً به بروز مشکلات بحرانی منجر شده و می‌تواند باعث از دست رفتن جان انسان‌ها، خسارات مالی قابل توجه و آسیب‌های گسترده به منابع طبیعی شود (اینتاراوچیچین و داساناندا^۴، ۲۰۱۱). لغزش‌های زمینی تحت تأثیر پایداری شیب و حرکت زمین قرار دارند، بنابراین جنبه‌های متعددی باید در نظر گرفته شوند. شیب‌های تندتر به دلیل تنش‌های گرانشی روی مواد سطحی، ناپایدارتر هستند. بافت خاک و چسبندگی آن بر توانایی شیب در مقاومت در برابر فرسایش و لغزش تأثیر می‌گذارد؛ چسبندگی ضعیف یا محتوای رس بالا، خطر وقوع زمین‌لغزه را افزایش می‌دهد (نگهبان و همکاران، ۱۴۰۰). بر اساس استحکام سنگ، تراکم درزه‌ها و عوامل هوازدگی، احتمال وقوع زمین‌لغزه در سنگ‌های ضعیف یا درزه‌دار مانند شیل بیشتر است. زهکشی و اشباع آبی مواد تشکیل‌دهنده شیب بسیار حیاتی است، زیرا آب باعث افزایش فشار منفذی، کاهش اصطکاک و در نهایت می‌تواند منجر به گسیختگی شیب شود، به‌ویژه پس از بارندگی‌های شدید (دمیر و همکاران^۵، ۲۰۱۵؛ پاند و همکاران^۶، ۲۰۲۳). جنگل‌زدایی و شهرسازی با کاهش پوشش گیاهی تثبیت‌کننده خاک، احتمال وقوع زمین‌لغزه را افزایش می‌دهند. اشباع خاک ناشی از بارش‌های مداوم یا شدید، پایداری شیب را تضعیف کرده و موجب زمین‌لغزه می‌شود. این عوامل یک اکوسیستم پیچیده را تشکیل می‌دهند که در آن هرگونه تغییر می‌تواند خطر زمین‌لغزه را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (دمیر و همکاران، ۲۰۱۵؛ پاند و همکاران، ۲۰۲۳). درک و پیش‌بینی رخداد زمین‌لغزش مستلزم رویکردی ارزیابانه و جامع است که شامل تلفیق انواع داده‌های مکانی در یک نقشه واحد، یا تحلیل و نمایش هر پارامتر به صورت نقشه‌ای مجزا – مانند توپوگرافی (تاتینگ و همکاران، ۲۰۱۵)، هیدرولوژی (پرادهان و کیم^۷، ۲۰۱۴)، زمین‌شناسی مهندسی (آزدمیر و آلتورال^۸، ۲۰۱۴)، ژئومورفولوژی (ویجیت و مادو^۹، ۲۰۰۸)، کاربری و پوشش زمین (اینتاراوچیچین و داساناندا، ۲۰۱۱) و بارش (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳) – می‌شود. پیشرفت‌های فناوری در حوزه سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، سنجش از دور و مدل‌سازی آماری، این امکان را برای پژوهشگران فراهم کرده‌اند تا با در نظر گرفتن و تعیین دقیق نقش این پارامترها، نقشه‌ای قابل اعتماد و دقیق از پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش تهیه کنند (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲). طبقه‌بندی توپوگرافی به مناطق بر اساس عوامل مؤثر بر ناپایداری شیب، به شناسایی مناطقی که تحت شرایط خاص مستعد زمین‌لغزه هستند کمک می‌کند (ملس و همکاران^{۱۰}، ۲۰۲۲). این نقشه‌ها اطلاعات مهمی را برای تصمیم‌گیری در زمینه توسعه شهری، برنامه‌ریزی کاربری زمین، کاهش ریسک و پیشگیری از بحران در اختیار می‌گذارند (سیلادجان و طاهّا، ۲۰۲۵). روش‌های مدل‌سازی متنوعی برای دستیابی به این هدف به کار

1 - Siladjan and Taha

2 - Saadatkhah et al

3 - Tating et al

4 - Intarawichian and Dasananda

5 - Demir et al

6 - Pande et al

7 - Pradhan and Kim

8 - Ozdemir and Altural

9 - Vijith and Madhu

10 - Melese et al

گرفته شده‌اند (نانه کاران و همکاران^۱، ۲۰۲۳). تکنیک‌های آماری از جمله رگرسیون لجستیک، شبکه‌های عصبی مصنوعی، منطق فازی و درخت‌های تصمیم‌گیری معمولاً برای بررسی و کمی‌سازی روابط بین وقوع زمین‌لغزش‌ها و متغیرهای تأثیرگذار به کار می‌روند (ون وستن و همکاران^۲، ۲۰۰۳؛ نانه کاران و همکاران، ۲۰۲۱). در عین حال، روش‌های یادگیری ماشین (مانند جنگل تصادفی و ماشین‌های بردار پشتیبان) به دلیل قابلیت کشف الگوهای پیچیده در مجموعه داده‌های حجیم، مورد توجه بیشتری قرار گرفته و عملکرد پیش‌بینی را بهبود بخشیده‌اند. به موازات این موارد، سیستم‌های خبره با تلفیق دانش تخصصی حوزه مربوطه و از طریق معیارهای کیفی و کمی تلفیقی، همچنان نقش حیاتی در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش ایفا می‌کنند (زیگمی و همکاران^۳، ۲۰۲۵).

مطالعات زیادی در ارتباط با موضوع مورد مطالعه در ایران و جهان انجام گرفته که به برخی از تازه‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. آتش‌افروز و صفایی‌پور (۱۴۰۰)، در پژوهشی اقدام به ریز پهنه‌بندی زمین‌لغزش با استفاده از تکنیک دیمتل و AHP فازی در بخش دهم استان خوزستان کردند. در این تحقیق از ۱۵ معیار مؤثر در خطرپذیری زمین‌لغزش استفاده شد. نتایج پهنه‌بندی خطرپذیری با مدل دیمتل نشان داد که ۲/۳۲ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های با خطرپذیری بسیار زیاد قرار دارند. همچنین در پهنه‌بندی خطرپذیری با سیستم تحلیل سلسله مراتبی - فازی، ۱۱/۲ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های با خطرپذیری بسیار زیاد قرار دارند. احمدی و ویسی (۱۴۰۰)، در تحقیقی به ارزیابی مخاطره زمین‌لغزش در ارتباط با توسعه شهری پاوه پرداختند. در این تحقیق از مدل ویکور استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که محدودیت‌های توپوگرافی و در رأس آن‌ها شیب زیاد، دره‌های یالی، آبراهه‌ها و مخاطره زمین‌لغزش مهم‌ترین موانع در راه توسعه فیزیکی پایدار شهر پاوه هستند. همچنین نتایج نشان داد که بیش از ۴۳ کیلومترمربع از منطقه مورد مطالعه در محدوده خطر زیاد از نظر مخاطره زمین‌لغزش قرار گرفته است. رحیم‌پور و رضائی‌مقدم (۱۴۰۴) در پژوهشی اقدام به تهیه نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبریز مهران‌رود واقع در شمال غرب ایران نمودند. برای نیل به این هدف، لایه‌های اطلاعاتی هشت عامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش شامل: زمین‌شناسی، کاربری اراضی، شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، بارش، فاصله از رودخانه و فاصله از گسل، در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) تهیه گردید. سپس با به کارگیری روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در نرم‌افزار Super Decisions، به هر یک از این عوامل وزن نسبت داده شد. یافته‌های تحقیق نشان داد که وزن نهایی این هشت عامل به ترتیب ۰/۳۳۱، ۰/۰۸۰، ۰/۱۱۷، ۰/۰۳۶، ۰/۰۵۵، ۰/۲۳۳، ۰/۱۱۲ و ۰/۰۳۲ بوده است. در نهایت، نقشه‌ی نهایی خطری زمین‌لغزش با تلفیق لایه‌های وزندار تهیه و حوضه‌ی مطالعاتی به پنج کلاس خطر با پتانسیل بسیار زیاد (۲۱ کیلومترمربع)، زیاد (۱۳۴ کیلومترمربع)، متوسط (۹۴ کیلومترمربع)، کم (۶۰ کیلومترمربع) و بسیار کم (۵۱ کیلومترمربع) تقسیم‌بندی شد. نتایج نشان می‌دهد که مناطق با پتانسیل خطر زیاد، پهنه‌ی غالب در حوضه را به خود اختصاص می‌دهند. چابانه و همکاران^۴ (۲۰۲۴) در پژوهشی خطر زمین‌لغزش منطقه میله واقع در الجزایر مورد بررسی قرار دادند. دو الگوریتم فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) برای اولویت‌بندی معیارها و زیرمعیارها از طریق تخصیص وزن به آنها به منظور یافتن راه‌حل بهینه توسعه داده شد. با تلفیق داده‌های چندمنبعی، شامل تصاویر ماهواره‌ای و اندازه‌گیری‌های میدانی، در یک سامانه اطلاعات جغرافیایی و اعمال دو الگوریتم مذکور، نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش با موفقیت تولید شد. روش FAHP توانایی بالاتری در مدیریت عدم قطعیت و خطاهای ارزیابی متخصصین نشان داد. در نهایت، مقایسه بین نقشه خطر تهیه‌شده و نقشه موجود ریسک مشاهده‌شده، همبستگی قوی بین مجموعه داده‌های موضوعی را آشکار ساخت. زیگمی و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی

1 - Nanehkaran et al

2 - Van Westen et al

3 - Zighmi et al

4 - Chaabane et al

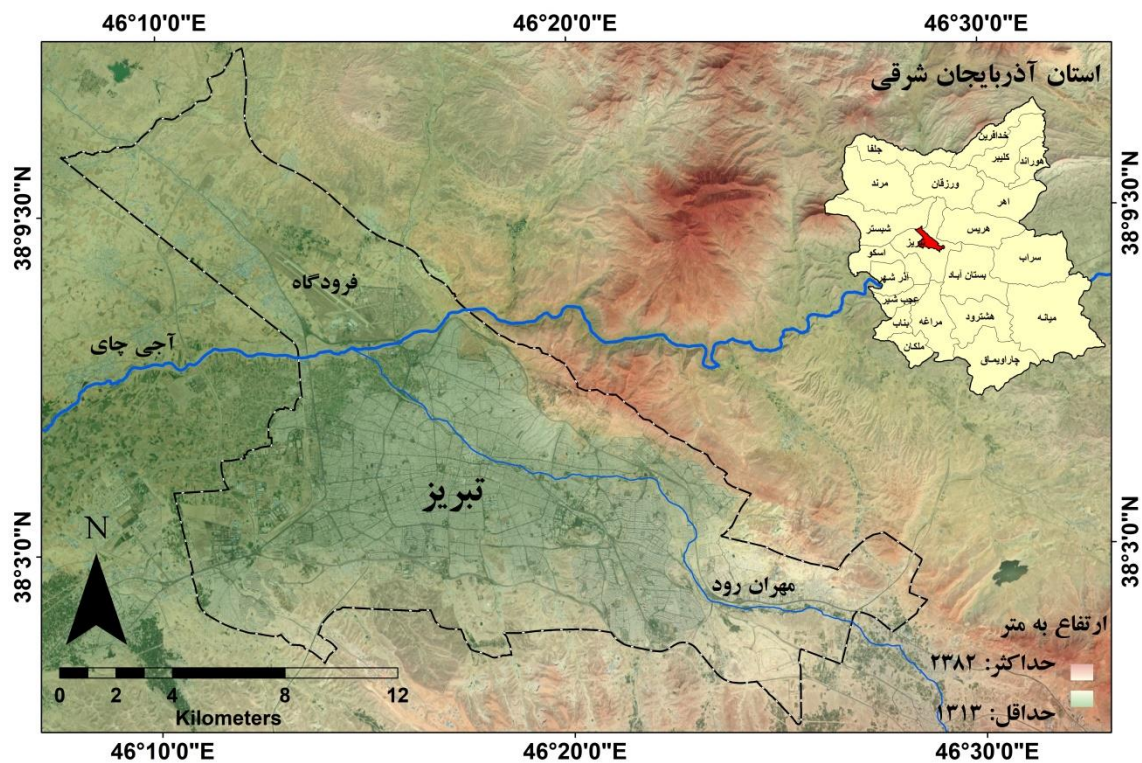
نقشه حساسیت زمین لغزش را با استفاده از یک رویکرد چندمعیاره مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) که در آن ارزیابی آماری با قضاوت خبرگی تلفیق شده، توسعه دادند. یک آماره دقیق از زمین لغزش‌ها متشکل از ۵۰۱ رویداد ثبت شده، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا، عکس‌های هوایی و بازدید میدانی تهیه شد. یازده عامل شرطی ساز (شامل زاویه شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحنا، زمین، لیتولوژی، بارش و فاصله از گسل‌ها، رودخانه‌ها و جاده‌ها، همچنین شاخص توان جریان و شاخص رطوبت توپوگرافی) که از داده‌های سنجش از دور، نقشه‌های زمین‌شناسی و سوابق هواشناسی استخراج شدند، در نظر گرفته شد. این متغیرها استانداردسازی شده و با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که وزن‌های نسبی را از طریق مقایسه‌های زوجی تولید می‌کند، تجزیه و تحلیل شدند. نقشه نهایی حساسیت زمین لغزش با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) اعتبارسنجی شد که مقدار سطح زیر منحنی (AUC) برابر با ۰/۷۵ را به دست داد و حاکی از عملکرد پیش‌بین خوب مدل است. یافته‌ها نشان می‌دهند که مناطقی با شیب‌های تند، لیتولوژی‌های غنی از رس و مجاورت با عوارض تکتونیکی، بالاترین سطح حساسیت را نشان می‌دهند.

دامنه‌های مشرف به کلان‌شهر تبریز، به دلیل ترکیب عوامل طبیعی از جمله وجود سازندهای سست مانند مارن، شیب زیاد زمین، بارش مناسب و همچنین عوامل انسانی مانند توسعه شهرنشینی و ایجاد جاده در دامنه‌های ناپایدار، در معرض خطر بالای زمین لغزش قرار دارد. این پدیده می‌تواند پیامدهای فاجعه‌باری از جمله تلفات جانی، خسارات مالی گسترده و آسیب به زیرساخت‌ها را به دنبال داشته باشد. بنابراین هدف اصلی از انجام این پژوهش، تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در دامنه‌های مشرف به کلان‌شهر تبریز با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره MEREC و در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) است. این پژوهش در پی آن است تا با در نظرگیری معیارهای کلیدی مؤثر از جمله سازندهای زمین‌شناسی (به‌ویژه مارن‌های سست)، شیب، بارش، فاصله از گسل‌ها و رودخانه‌ها، و همچنین شاخص‌های توسعه انسانی مانند فاصله از جاده‌ها و کاربری اراضی، مناطقی را که دارای پتانسیل بالای وقوع زمین لغزش هستند، شناسایی و اولویت‌بندی نماید. نتایج این تحقیق، اطلاعات اساسی و لازم برای مدیریت ریسک، برنامه‌ریزی توسعه شهری پایدار و اجرای اقدامات کاهش اثرات زمین لغزش در این منطقه حساس را فراهم می‌کند.

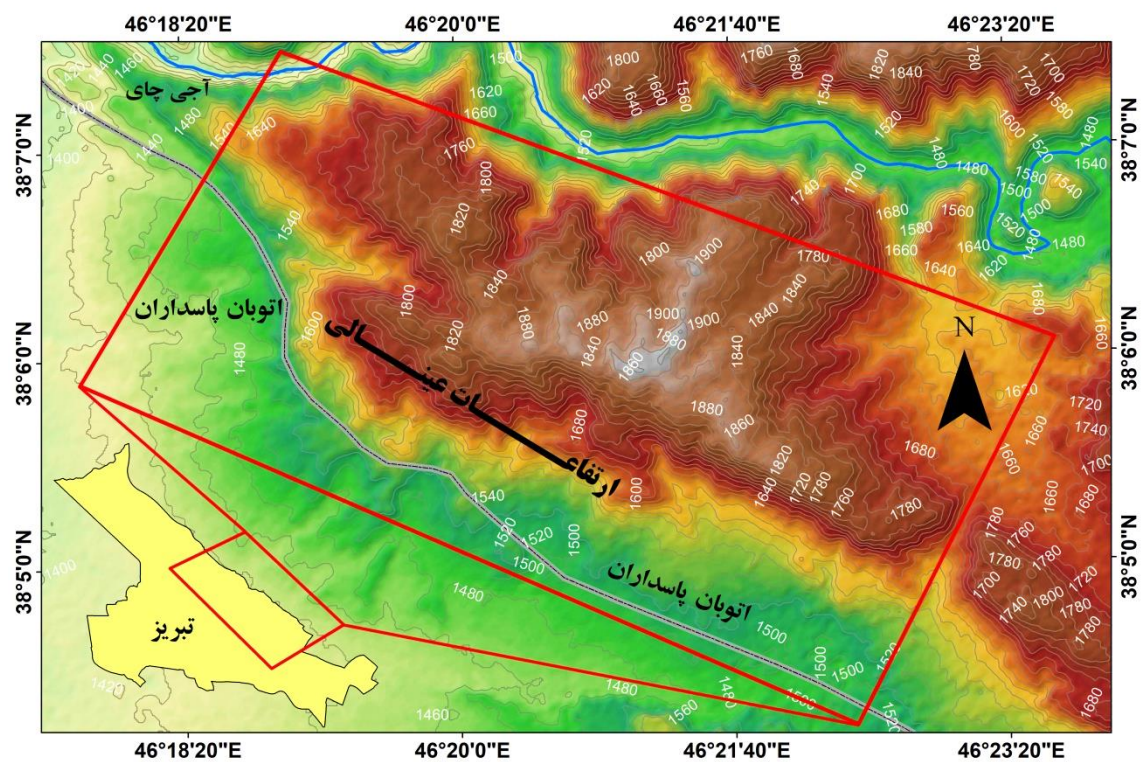
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه پژوهش حاضر دامنه‌های مشرف به کلان‌شهر تبریز است. شهر تبریز به‌عنوان مرکز استان آذربایجان شرقی در مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 01'$ تا $38^{\circ} 12'$ عرض شمالی و $46^{\circ} 07'$ تا $46^{\circ} 28'$ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). شهر تبریز در گوشه شرقی دشت رسوبی همواری با شیب متوسط به‌سوی دریاچه ارومیه گسترده شده است. در شمال آن کوه‌های عون بن علی (عینالی)، بهلول و بابا باغی و در جنوب آن توده آتشفشانی سه‌هند قرار دارد. شکل ۲ نقشه توپوگرافی ارتفاعات عینالی را نشان می‌دهد. متوسط بارندگی سالانه این شهر طبق آمار ایستگاه سینوپتیک واقع در فرودگاه بین‌المللی تبریز و بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۴ حدود ۲۵۵ میلی‌متر می‌باشد. توسعه و گسترش ساخت‌وساز بر روی تپه‌های رسی و مارنی در شرق تبریز موسوم به ساری داغ و ولیعصر به دلیل کیفیت و ویژگی‌های نامطلوب خاک و خاصیت روانگرایی آن در هنگام زلزله و به علت ژئومورفولوژی خاص منطقه علاوه بر خطر زمین‌لرزه، این منطقه در معرض خطر زمین لغزش هم قرار دارد (روستایی، ۱۳۹۰).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی کلان شهر تبریز



شکل ۲. توپوگرافی ارتفاعات عینالی

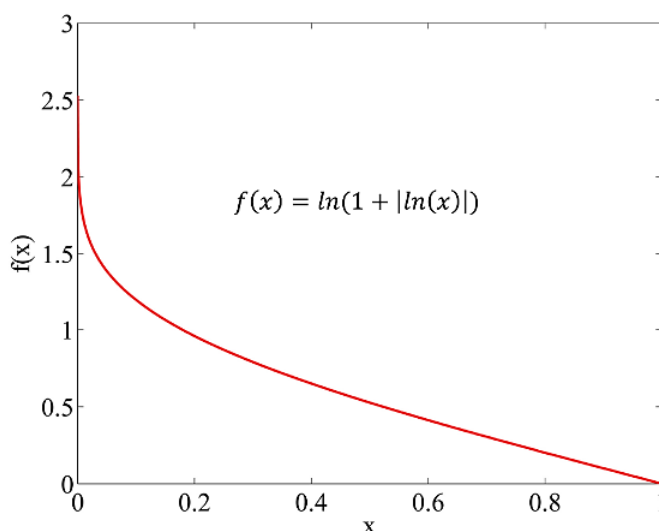
روش MEREC

در پژوهش حاضر از روش محاسبه وزن مبتنی بر اثرات حذف معیارها (MEREC^۱) جهت تهیه نقشه پتانسیل خطر وقوع زمین‌لغزش در دامنه‌های مشرف به شهر تبریز استفاده شده است. روش MEREC یکی از جدیدترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد (رضائی‌مقدم و رحیم‌پور، ۱۴۰۴). این روش در سال ۲۰۲۱ و توسط کشاورز قرابایی و همکاران معرفی شد. روش MEREC جهت تعیین وزن معیارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مراحل انجام این روش به شرح زیر می‌باشد: مرحله اول: ایجاد ماتریس تصمیم. ساختار ماتریس تصمیم در این روش به گونه‌ای است که معیارها در ستون‌ها و گزینه‌ها در سطرها قرار می‌گیرند. مرحله دوم: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم.

گام سوم: تعیین عملکرد کلی گزینه‌ها. از رابطه زیر جهت تعیین عملکرد کلی گزینه‌ها استفاده می‌شود.

$$S_i = \ln \left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_j |\ln(n_{ij}^x)| \right) \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه m تعداد معیارهای تحقیق و n_{ij}^x مقادیر ماتریس نرمال شده می‌باشد. طبق نظر کشاورز قرابایی و همکاران (۲۰۲۱) عملکرد کلی گزینه‌ها از تابع زیر پیروی می‌کند (شکل ۳).



شکل ۳. تحلیل تطبیقی وزن‌ها در مدل MEREC

بر اساس این تابع، یک رابطه معکوس بین مقادیر ماتریس نرمال شده و عملکرد گزینه وجود دارد؛ به این معنا که مقادیر کوچک‌تر نشان‌دهنده عملکرد بهتر هستند.

مرحله چهارم: تعیین عملکرد گزینه‌ها با حذف هر معیار. از رابطه زیر جهت انجام این مرحله استفاده می‌شود.

$$S'_{ij} = \ln \left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_{k, k \neq j} |\ln(n_{ik}^x)| \right) \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

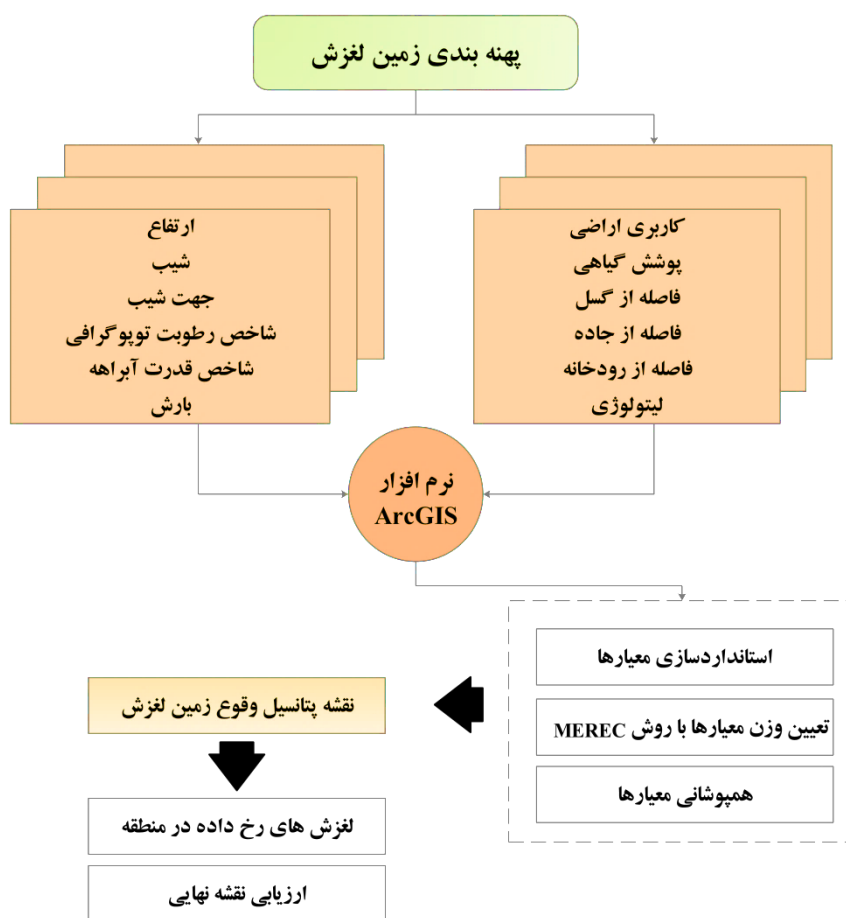
مرحله پنجم: محاسبه مجموع انحرافات مطلق. مجموع انحرافات مطلق را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$E_j = \sum_i |S'_{ij} - S_i| \quad \text{رابطه ۳}$$

مرحله ششم: محاسبه وزن نهایی معیارها.

$$w_j = \frac{E_j}{\sum_k E_k} \quad \text{رابطه ۴}$$

در شکل ۴ فلوجارت مراحل تهیه نقشه پتانسیل وقوع زمین لغزش با استفاده از روش MEREC ارائه شده است.



شکل ۴. فلوجارت مراحل تهیه نقشه پتانسیل وقوع زمین لغزش

بحث و یافته‌ها

ارتفاع، فاصله‌ی عمودی است که از یک سطح مبنا اندازه‌گیری می‌شود (شیرزائی و همکاران، ۲۰۲۱). ارتفاع معمولاً بر انرژی پتانسیل یک شیب تأثیر می‌گذارد (بین و همکاران^۱، ۲۰۲۳) و همچنین شرایط محیطی روی شیب‌ها مانند دما، بارش، پوشش گیاهی، هوازدهی، فعالیت انسانی، اقلیم و فرسایش را تحت تأثیر قرار می‌دهد (مندال و همکاران^۲، ۲۰۲۴).

1 - Yin et al

2 - Mondal et al

تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع، وقوع زمین‌لغزش نیز بیشتر می‌شود (پی و همکاران^۱، ۲۰۲۳) زیرا افزایش رطوبت خاک منجر به کاهش مقاومت خاک و افزایش تنش در ماتریس خاک می‌گردد (وی و همکاران^۲، ۲۰۲۴). شیب نقش مهمی ایفا می‌کند، چرا که میزان زاویه شیب به عنوان عامل اصلی ایجادکننده در بروز زمین‌لغزه‌ها در نظر گرفته می‌شود (ریمینگ و همکاران^۳، ۲۰۲۵). بر اساس پژوهش لی و همکاران^۴ (۲۰۰۴)، با افزایش زاویه شیب، تنش برشی در خاک یا مواد سطحی نیز افزایش می‌یابد. یک شیب تند با نیروی محرک بیشتر ممکن است زودتر گسیخته شود (آنبالاگان و همکاران^۵، ۲۰۱۵). در شیب‌های تند، به دلیل گرانش، وزن مواد زیرسطحی در مقایسه با شیب‌های ملایم بیشتر خواهد بود (ریمینگ و همکاران، ۲۰۲۵). در این تحقیق، نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) استخراج و به پنج کلاس مساوی تقسیم بندی شد.

جهت شیب که به معنی جهت قطب‌نمایی آن (در جهت حرکت عقربه‌های ساعت از شمال) است، نقش حیاتی در آغاز و استعداد وقوع زمین‌لغزش ایفا می‌کند (سوی و همکاران^۶، ۲۰۲۴). از آنجا که جهت شیب بر شدت بارش، الگوی باد و میزان تابش آفتاب تأثیر می‌گذارد، شرایط آب‌وهوایی محلی شیب را کنترل می‌کند (نیراج و همکاران^۷، ۲۰۲۳)؛ از جمله میزان رطوبت، تبخیر، دما و هوازگی (شن و همکاران^۸، ۲۰۲۴). این تفاوت‌ها می‌توانند به تغییر در مقاومت خاک، پوشش گیاهی و در نهایت ناپایداری شیب منجر شوند (بوزولان و همکاران^۹، ۲۰۲۳). افزون بر این، این عوامل در فرآیندهای ژئوشیمیایی که بر شیب اثر می‌گذارند نیز نقش داشته و اغلب موجب ناپایداری شیب می‌شوند (یوواراج و دولوی^{۱۰}، ۲۰۲۳). در این پژوهش، نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع بر اساس مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با اندازه پیکسل ۱۲/۵ متر و در محیط نرم افزار ArcGIS تهیه شد.

شاخص رطوبت توپوگرافی یک پارامتر هیدرولوژیکی کلیدی در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش است که توزیع رطوبت خاک و پتانسیل اشباع‌شدگی را منعکس می‌کند (سلیم و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۹). مناطقی با مقادیر بالای این شاخص، مانند دامنه‌های مقعر و کف دره‌ها، معمولاً شاهد تجمع آب هستند که این پدیده منجر به افزایش فشار منفذی و کاهش مقاومت برشی خاک در طول رویدادهای بارندگی می‌شود (پاندی و همکاران^{۱۲}، ۲۰۲۰). این شرایط، مناطق با شاخص رطوبت توپوگرافی متوسط تا بالا را به‌طور ویژه‌ای مستعد زمین‌لغزش‌های کم‌عمق می‌سازد، چرا که خاک‌های اشباع، انسجام خود را از دست داده و ناپایدار می‌شوند. با این حال، مناطق با شاخص فوق‌العاده بالا ممکن است وقوع زمین‌لغزش کمتری را به دلیل شیب‌های ملایم‌تر و اثر تثبیت‌کنندگی پوشش گیاهی نشان دهند (ژنگ و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۴). این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود (مور و همکاران^{۱۴}، ۱۹۹۱؛ بیون و کرکبای^{۱۵}، ۱۹۷۹):

$$TWI = LN(As/\tan \beta)$$

رابطه ۵

که در آن AS مساحت منطقه و $\tan \beta$ درجه شیب می‌باشد.

- 1 - Pei et al
- 2 - Wei et al
- 3 - Riming et al
- 4 - Lee et al
- 5 - Anbalagan et al
- 6 - Cui et al
- 7 - Niraj et al
- 8 - Shen et al
- 9 - Bozzolan et al
- 10 - Yuvaraj and Dolui
- 11 - Saleem et al
- 12 - Pandey et al
- 13 - Zheng et al
- 14 - Moore et al
- 15 - Beven and Kirkby

شاخص قدرت آبراهه یک شاخص توپوگرافی مرکب است. این شاخص معیاری برای سنجش قدرت فرساینده‌گی آب جاری بر پایه این فرضیه است که دبی جریان با مساحت حوضه آبریز نسبت مستقیم دارد. این شاخص عموماً فرسایش خالص در مناطق محدب و رسوبگذاری خالص در مناطق مقعر را پیش‌بینی می‌کند (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲). شاخص توان جریانی بر اساس فرمول ارائه شده توسط مور و همکاران (۱۹۹۱) محاسبه گردید.

$$SPI = AS \times \tan \beta$$

رابطه ۶)

که در آن AS مساحت منطقه و $\tan \beta$ گرادیان شیب به درجه می باشد.

تحلیل آستانه بارش در علوم زمین و تحقیقات مخاطرات، به‌ویژه برای زمین‌لغزش‌ها، امری حیاتی است (سها و برزا^۱، ۲۰۲۴). تعیین آستانه بارشی وقوع زمین‌لغزش برای درک عوامل محرک زمین‌لغزش و بهبود راهبردهای مدیریت ریسک ضروری است (گونزالز و همکاران^۲، ۲۰۲۴). با افزایش مدت زمان بارش، کاهش ضریب پایداری شیب‌ها مشهودتر می‌گردد (گائو و همکاران^۳، ۲۰۲۴). این امر ناشی از نفوذ آب باران است که موجب افزایش محتوای رطوبتی خاک، گسترش محدوده اشباع، کاهش چسبندگی و مقاومت برشی و در نتیجه تضعیف پایداری شیب می‌شود (هو و همکاران^۴، ۲۰۲۴). برای تهیه نقشه توزیع مکانی بارش در منطقه، از داده‌های بارندگی ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی موجود در منطقه، در یک دوره ۲۰ ساله (۱۳۸۲ تا ۱۴۰۲) استفاده شد. سپس برای تبدیل این داده‌های نقطه‌ای به سطح و تهیه نقشه، از روش درونیابی فاصله‌معکوس وزندار (IDW) بهره گرفته شد.

الگوهای کاربری اراضی به‌طور قابل توجهی بر استعداد وقوع زمین‌لغزش در مناطق کوهستانی تأثیر می‌گذارند (سوان و همکاران^۵، ۲۰۲۴). فعالیت‌هایی مانند جنگل‌زدایی، گسترش سکونتگاه‌ها و افزایش زمین‌های کشاورزی می‌توانند رفتار ساختارهای خاک و سنگ را تغییر دهند (پاتل و همکاران^۶، ۲۰۲۴). این تغییرات موجب تضعیف مواد تشکیل‌دهنده شیب، کاهش توانایی نگهداری آب و تضعیف اثرات تثبیت‌کننده ریشه گیاهان می‌شوند (یانگ و همکاران^۷، ۲۰۲۴). در نتیجه، مناطقی که دستخوش تغییرات شدید کاربری اراضی هستند، به‌شدت مستعد زمین‌لغزش می‌باشند (آروموگام و همکاران^۸، ۲۰۲۴).

شاخص NDVI شاخص‌های زمینی ضروری را برای تعیین سلامت پوشش گیاهی فراهم می‌کند (سن^۹، ۲۰۲۱؛ سریف و همکاران^{۱۰}، ۲۰۲۳) و مقدار آن بین -۱ تا +۱ در نوسان است. پوشش گیاهی می‌تواند هم به عنوان عامل محرک زمین‌لغزه و هم به عنوان عامل کنترل‌کننده زمین‌لغزه در نظر گرفته شود (سینگ^{۱۱}، ۲۰۱۱). کاهش پوشش گیاهی که اغلب با مقادیر پایین NDVI نشان داده می‌شود، می‌تواند به ناپایداری شیب‌ها منجر شود؛ چرا که کاهش تقویت ریشه‌ای که به طور معمول باعث افزایش پیوستگی خاک و پایداری شیب می‌شود، در این شرایط اتفاق نمی‌افتد (خیانگ و همکاران^{۱۲}، ۲۰۲۵). مقادیر بالاتر شاخص NDVI نشان‌دهنده پوشش گیاهی است و می‌توان آن را با استفاده از رابطه شماره ۷ محاسبه کرد.

1 - Saha and Bera

2 - Gonzalez et al

3 - Gao et al

4 - Hou et al

5 - Swain et al

6 - Patel et al

7 - Yang et al

8 - Arumugam et al

9 - Sen

10 - Sarif et al

11 - Singh

12 - Xiong et al

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن NIR باند مادون قرمز نزدیک و RED باند قرمز می باشد. در لندست ۸، باند ۵ مربوط به مادون قرمز نزدیک (NIR) و باند ۴ مربوط به محدوده قرمز (RED) می باشد. در این تحقیق، برای تهیه نقشه پوشش گیاهی منطقه، از داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ استفاده شد. این داده‌ها مربوط به فصل بهار سال ۱۴۰۴ بوده و دارای قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر هستند. گسل‌ها ویژگی‌های ساختاری‌ای هستند که با مناطقی از ضعف همراه با جابجایی نسبی مشخص می‌شوند و سنگ‌ها و خاک اطراف را مستعد لغزش می‌کنند (گوی و همکاران، ۲۰۲۴). مجاورت با گسل‌ها نقش مهمی در وقوع زمین لغزش دارد، چرا که تخریب ساختارهای سنگی - خاکی نزدیک به مناطق گسلی، یکپارچگی دامنه‌ها را کاهش داده و مسیرهایی برای نفوذ آب‌های زیرزمینی فراهم می‌کند که به تغییر شکل و هوازگی منجر می‌شود. وجود ساختارهای گسلی باعث تشکیل درزها و شکاف‌ها شده، یکپارچگی و استحکام مکانیکی توده‌های سنگی و مواد خاکی را تضعیف می‌کند (لیو و همکاران، ۲۰۲۴). در این مطالعه، نقشه فاصله از گسل‌ها با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی در نرم افزار ArcGIS و بر اساس داده‌های رقومی (وکتور) گسل از نقشه‌های زمین‌شناسی تولید شد. تحقیقات نشان می‌دهند مناطق نزدیک به سیستم گسلی، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر زمین لغزش دارند (سوجاتا و همکاران، ۲۰۲۳).

ساخت جاده بر روی شیب، بر وقوع زمین لغزه تأثیر می‌گذارد (یوسف و همکاران، ۲۰۲۵). شیب تندتر ناشی از خاک‌برداری، افزایش بار، تغییرات در شرایط هیدرولوژی و زهکشی می‌تواند بر حالت تنش و تعادل شیب اثرگذار باشد (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲). مراحل تهیه این نقشه به این شرح بوده است: ابتدا نقشه شبکه ارتباطی منطقه در سامانه Google Earth تهیه شد. داده‌های مذکور سپس به منظور ایجاد پایگاه داده‌های مکانی، به محیط ArcGIS وارد شدند. در مرحله نهایی، ابزار تحلیل فاصله اقلیدسی بر روی این داده‌ها اعمال و نقشه نهایی فاصله از شبکه ارتباطی در پنج کلاس مجزا تولید گردید.

نزدیکی شیب به سیستم‌های زهکشی نیز عامل مهم دیگر از نظر پایداری محسوب می‌شود. جریان‌های آبی ممکن است با فرسایش شیب‌ها یا با اشباع کردن بخش پایینی مواد و در نتیجه افزایش سطح آب، اثر نامطلوبی بر پایداری داشته باشند (گوکچوقلو و آکسوی، ۱۹۹۶؛ ساها و همکاران، ۲۰۰۲). این موضوع می‌تواند به این واقعیت مرتبط باشد که تغییرات زمین‌ناشی از فرسایش خندقی می‌تواند بر وقوع زمین لغزش تأثیر بگذارد (دای و لی، ۲۰۰۲). در این پژوهش، لایه فاصله از آبراهه‌ها با اعمال ابزار فاصله اقلیدسی و طبقه‌بندی نتایج در پنج کلاس متمایز، در محیط نرم‌افزار ArcGIS تولید گردید. فاصله از رودخانه‌ها بر حسب متر اندازه گیری شده است. لیتولوژی عامل مهمی در ارزیابی خطر زمین لغزش است (مصفاei و همکاران، ۲۰۲۴). این ویژگی، خواص ژئومکانیکی و هیدرولیکی مواد زیرسطحی از جمله مقاومت و نفوذپذیری را کنترل می‌کند (شو و همکاران، ۲۰۲۱). این خصوصیات به طور مستقیم بر پایداری شیب‌ها و آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر گسیختگی تأثیر می‌گذارند (توماس و همکاران، ۲۰۲۳). مناطقی با سنگ‌های ضعیف، سست یا شکسته در مقایسه با سنگ‌های مقاوم و یکپارچه، بیشتر مستعد رانش زمین هستند (وو و همکاران، ۲۰۲۳). نقشه لیتولوژی بر مبنای نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تبریز تهیه شد. شکل ۵ نقشه لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در تحقیق را نشان می‌دهد.

1 - Gui et al

2 - Liu et al

3 - Sujatha et al

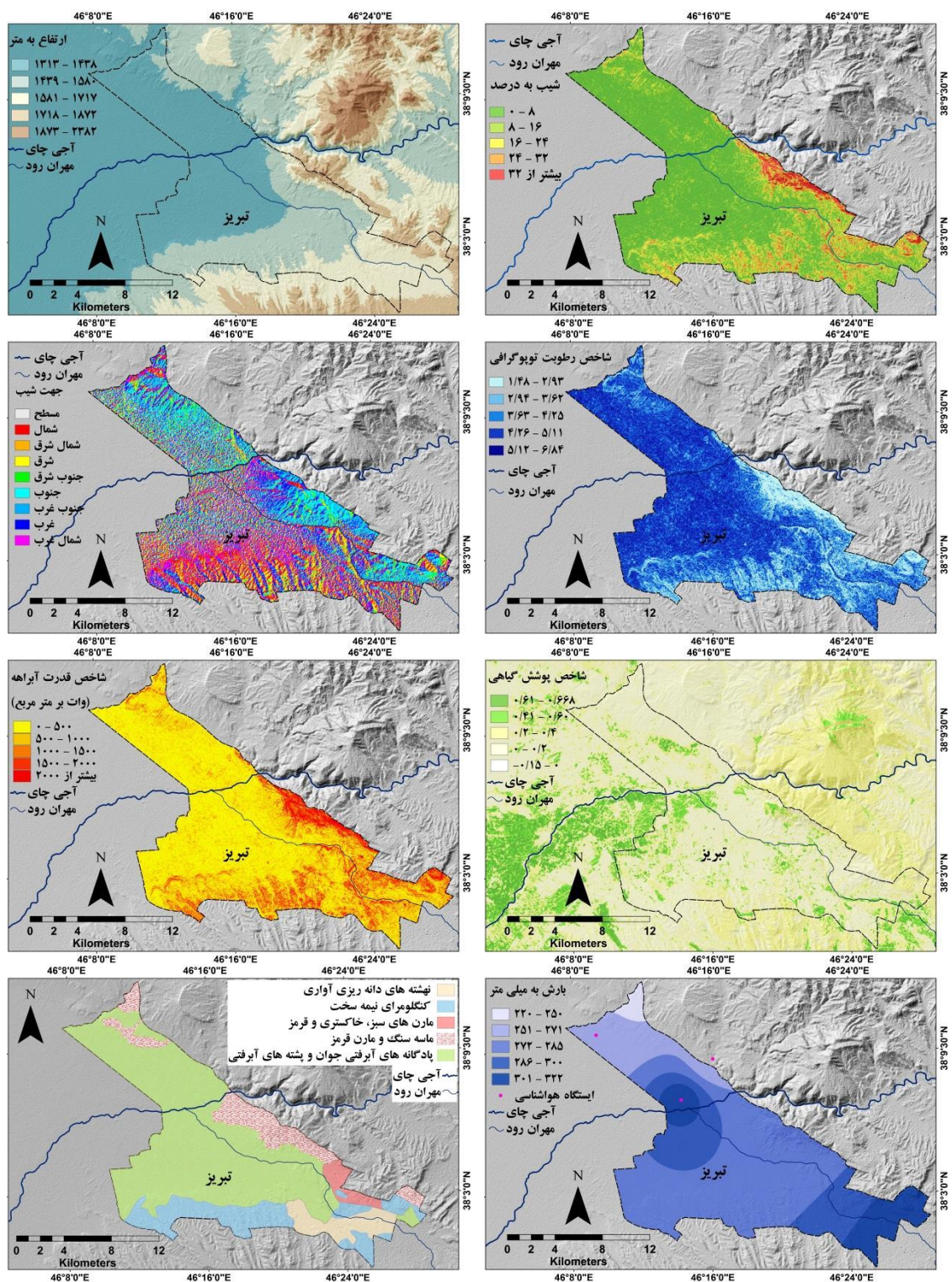
4 - Gokceoglu and Aksoy

5 - Dai and Lee

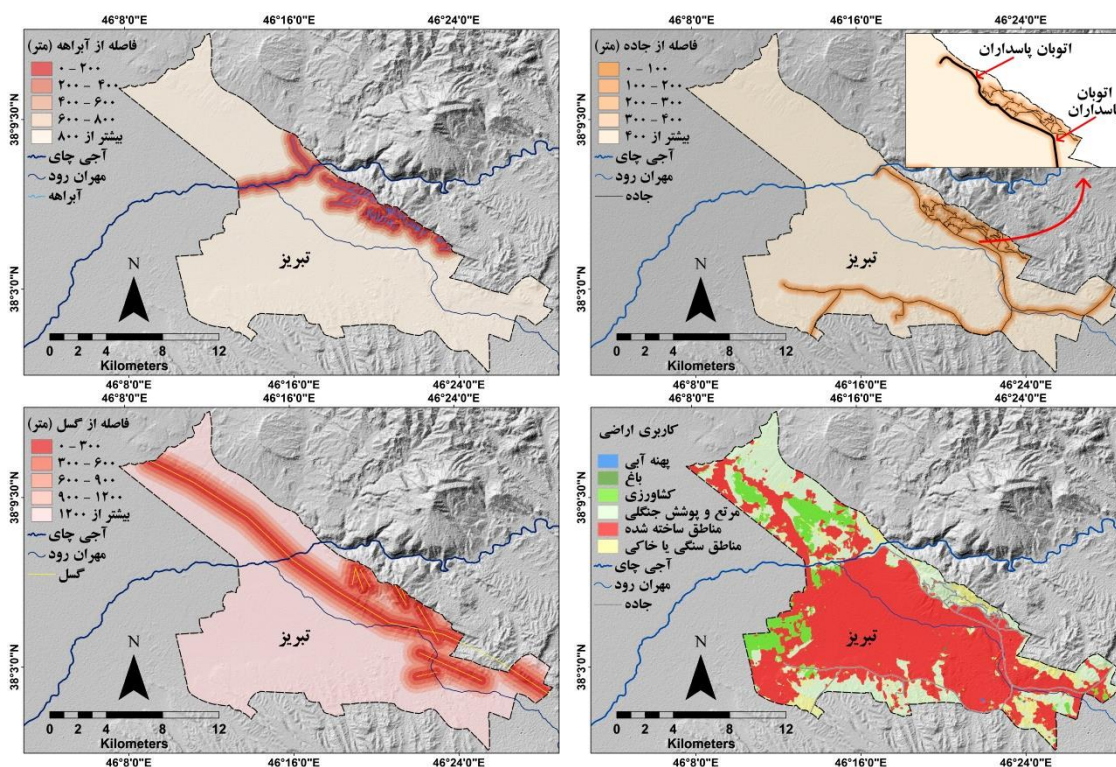
6 - Shu et al

7 - Thomas et al

8 - Wu et al



شکل ۵. لایه های اطلاعاتی



ادامه شکل ۵. لایه های اطلاعاتی

وزن‌دهی به لایه های اطلاعاتی

در چارچوب مدل MEREC، گام آغازین، تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری است. در این ماتریس، معیارها در ستون‌ها و گزینه‌های تحقیق در سطرها قرار می‌گیرند. ارزش‌گذاری ارتباط بین معیارها و گزینه‌ها با بهره‌گیری از مقیاس‌های استاندارد (اعم از طیف ۹ سطحی ساعتی یا مقیاس ۵ سطحی لیکرت) انجام می‌پذیرد (جدول ۱). این تحقیق با هدف طراحی مدلی یکپارچه برای پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش، بر شناسایی و تعیین اهمیت لایه‌های اطلاعاتی مؤثر در ناپایداری شیب‌ها متمرکز است. در همین راستا، چهار پارامتر اصلی شامل لیتولوژی، فاصله از جاده، بارش و شیب به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه شناسایی و معرفی شدند. این عوامل، بیشترین سهم وزنی را در فرآیند مدل‌سازی به خود اختصاص دادند. سایر پارامترها نیز با توجه به نقش تعدیل‌کننده‌ای که در کاهش یا افزایش احتمال ناپایداری دامنه‌ها ایفا می‌کنند، وزن‌دهی شدند. به‌کارگیری این رویکرد تلفیقی، موجب ارتقای چشمگیر دقت در پیش‌بینی مناطق مستعد زمین‌لغزش شده و می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری مؤثر در نظام مدیریت ریسک مخاطرات محیطی بهره برد. همچنین در این مطالعه، برای انجام مقایسات زوجی، از نظرات کارشناسی و تخصصی اساتید و متخصصان حیطه ژئومورفولوژی استفاده شده است.

جدول ۱. ماتریس تصمیم معیار – گزینه در مدل MEREC

معیار گزینه	ارتفاع	شیب	جهت شیب	فاصله از آبراهه	فاصله از جاده	فاصله از گسل	لیتولوژی	بارش	پوشش گیاهی	کاربری اراضی	TWI	SPI
A۱	۵	۶	۳	۶	۳	۵	۶	۴	۴	۳	۵	۴
A۲	۶	۵	۲	۵	۴	۲	۴	۲	۴	۵	۳	۳
A۳	۴	۴	۲	۵	۲	۲	۳	۲	۲	۴	۴	۴
A۴	۵	۳	۲	۳	۲	۲	۳	۴	۵	۳	۳	۳
A۵	۴	۴	۲	۳	۳	۴	۲	۳	۴	۳	۴	۳

در مرحله بعد، ماتریس تصمیم نرمال سازی شد (جدول ۲).

جدول ۲. مقادیر ماتریس تصمیم نرمال شده

معیار گزینه	ارتفاع	شیب	جهت شیب	فاصله از آبراهه	فاصله از جاده	فاصله از گسل	لیتولوژی	بارش	پوشش گیاهی	کاربری اراضی	TWI	SPI
A۱	۰/۸۰	۰/۵۰	۰/۶۶	۰/۵	۰/۶۶	۰/۶۰	۰/۳۳	۰/۵۰	۰/۷۵	۱	۰/۶۰	۰/۷۵
A۲	۰/۶۶	۰/۶۰	۱	۰/۶۰	۰/۵۰	۱	۰/۵۰	۱	۰/۷۵	۰/۶۰	۱	۱
A۳	۱	۰/۷۵	۱	۰/۶۰	۰/۶۶	۱	۰/۶۶	۱	۱	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵
A۴	۰/۸۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۶۶	۰/۵۰	۰/۶۰	۱	۱	۱
A۵	۱	۰/۷۵	۱	۱	۰/۶۶	۰/۷۵	۱	۰/۶۶	۰/۷۵	۱	۰/۷۵	۱

در ادامه عملکرد کلی گزینه‌ها محاسبه گردید (جدول ۳).

جدول ۳. مقادیر عملکرد کلی گزینه‌ها (S_i)

گزینه	مقادیر S_i
A۱	۰/۳۶۹
A۲	۰/۲۴۵
A۳	۰/۱۷۴
A۴	۰/۱۳۲
A۵	۰/۱۴۱

در مرحله بعد، با حذف هر یک از معیارها، عملکرد گزینه‌ها ارزیابی شد (جدول ۴).

جدول ۴. مقادیر عملکرد گزینه‌ها با حذف هر معیار (S'_{ij})

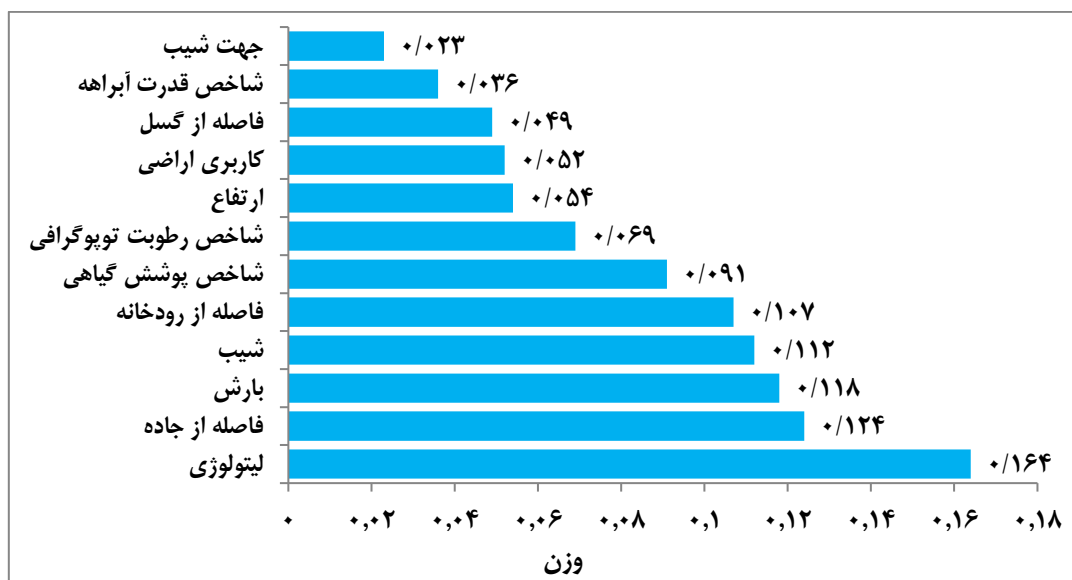
معیار گزینۀ	ارتفاع	شیب	جهت شیب	فاصله از آبراهه	فاصله از جاده	فاصله از گسل	لیتولوژی	بارش	پوشش گیاهی	کاربری اراضی	TWI	SPI
A۱	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۴	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۳۵
A۲	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۲۵
A۳	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶
A۴	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۳
A۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۴

در ادامه مجموع انحرافات مطلق (E_j) محاسبه گردید (جدول ۵).

جدول ۵. مقادیر مجموع انحرافات مطلق (E_j)

معیار	ارتفاع	شیب	جهت شیب	فاصله از آبراهه	فاصله از جاده	فاصله از گسل	لیتولوژی	بارش	پوشش گیاهی	کاربری اراضی	TWI	SPI
مقدار E_j	۰/۰۵۲	۰/۱۰۷	۰/۰۲۲	۰/۱۰۲	۰/۱۱۸	۰/۰۴۷	۰/۱۵۷	۰/۱۱۳	۰/۰۸۷	۰/۰۵۰	۰/۰۶۶	۰/۰۳۴
مجموع	۰/۹۵۶											

در آخرین مرحله وزن نهایی معیارها محاسبه شد (شکل ۶).



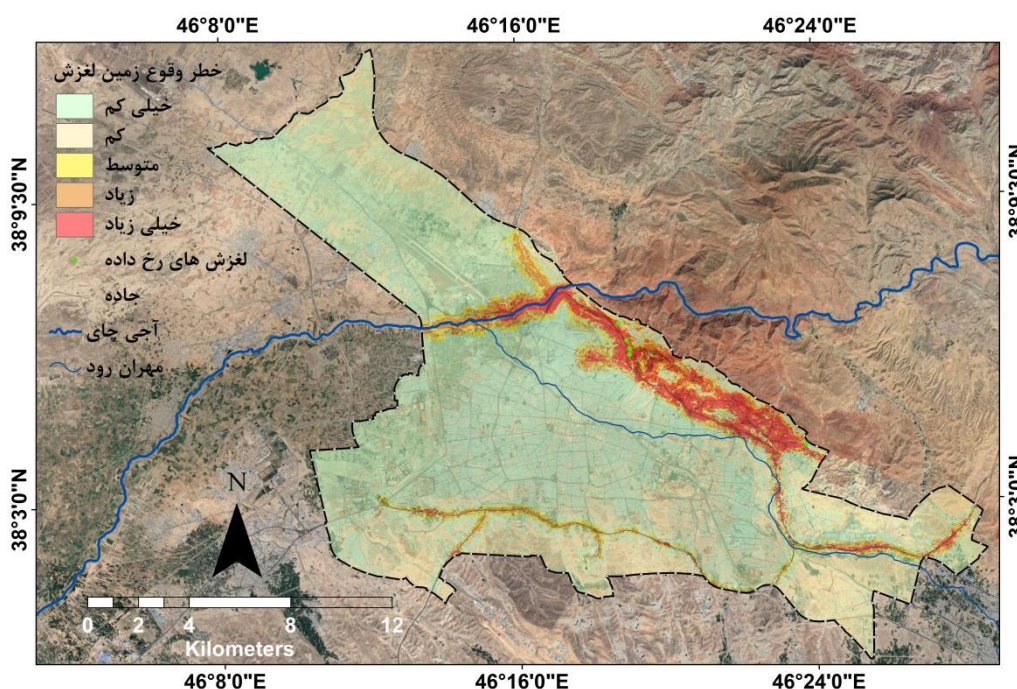
شکل ۶. وزن نهایی معیارها

نتایج حاصل از فرآیند وزندهی معیارها نشان می‌دهد که معیار لیتولوژی با وزن نسبی ۰/۱۶۴، تعیین‌کننده‌ترین عامل در ایجاد ناپایداری دامنه‌ها و وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه است. در مراتب بعدی، معیارهای فاصله از جاده (۰/۱۲۴)، میانگین بارش سالانه (۰/۱۱۸) و شیب (۰/۱۱۲) قرار گرفتند. در نقطه مقابل، معیارهای جهت شیب و شاخص قدرت آبراهه به عنوان کم‌اثرترین عوامل این تحلیل شناخته شدند.

پهنه‌بندی نهایی خطر زمین لغزش

برای تولید نقشه نهایی پتانسیل خطر وقوع زمین لغزش، لایه‌های اطلاعاتی مؤثر پس از اختصاص وزن نسبی هر معیار، در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) با یکدیگر تلفیق شدند. خروجی این فرآیند، نقشه‌ای پیوسته از مقادیر پتانسیل خطر بود. به منظور تفکیک و طبقه‌بندی نهایی، این مقادیر با بهره‌گیری از روش طبقه بندی Natural Breaks در پنج کلاس مجزا، از خطر خیلی کم تا خطر خیلی زیاد، دسته‌بندی شدند. نقشه حاصل از این پهنه‌بندی در شکل ۷ قابل مشاهده است.

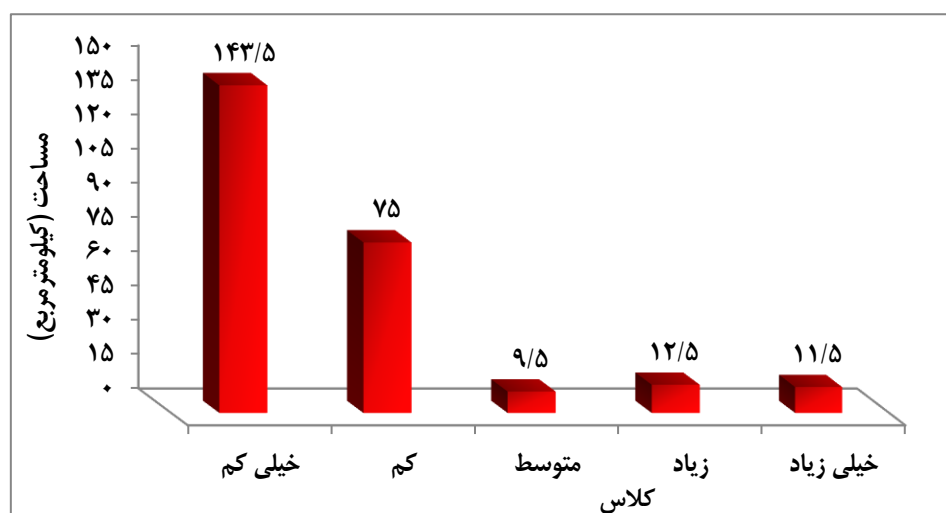
هم‌پوشانی لایه‌ها = (ارتفاع $\times 0.054$) + (شیب $\times 0.112$) + (جهت شیب $\times 0.023$) + (فاصله از رودخانه $\times 0.107$) + (فاصله از جاده $\times 0.124$) + (فاصله از گسل $\times 0.049$) + (لیتولوژی $\times 0.164$) + (بارش $\times 0.118$) + (پوشش گیاهی $\times 0.091$) + (کاربری اراضی $\times 0.052$) + (شاخص رطوبت توپوگرافی $\times 0.069$) + (شاخص قدرت آبراهه $\times 0.036$)



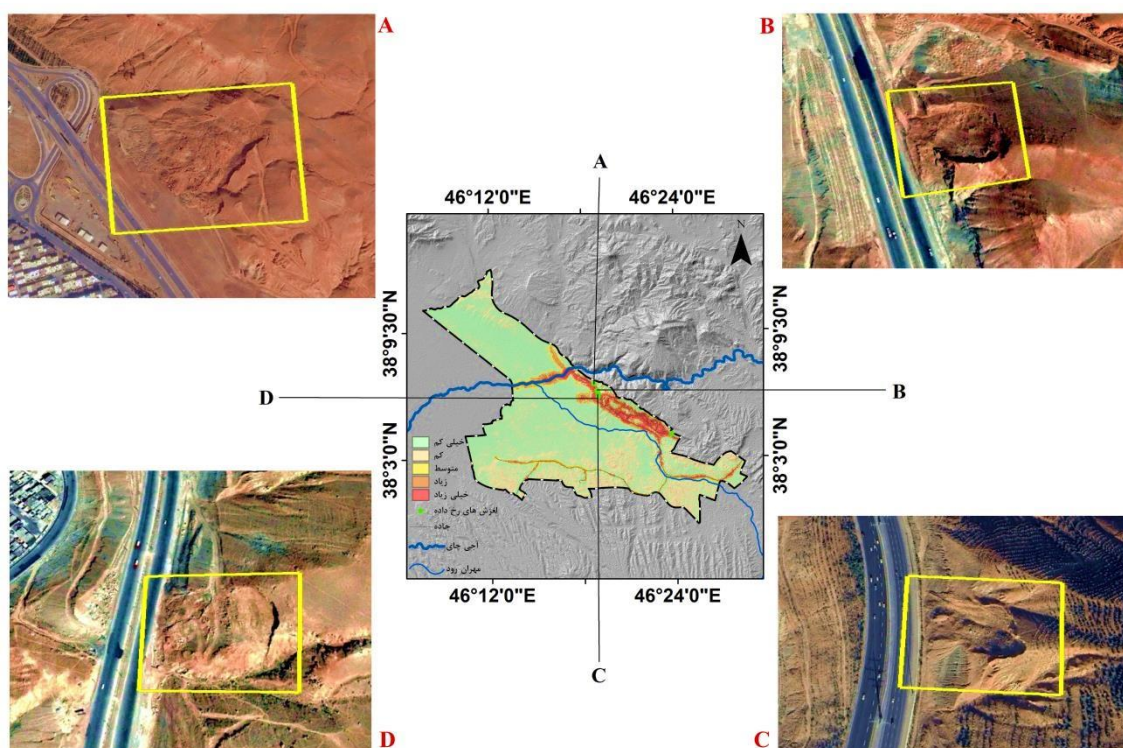
شکل ۷. نقشه پتانسیل خطر وقوع زمین لغزش

بر اساس تحلیل نقشه نهایی، دامنه‌های شمالی تبریز، به‌ویژه ارتفاعات عینالی، در طبقات خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. این وضعیت به دلیل وجود سازندهای سست و ناپایدار، مانند مارن‌ها در این پهنه‌ها و همچنین شیب تند دامنه‌ها است که پایداری طبیعی زمین را به‌شدت کاهش داده‌اند. از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی نیز نقش مهمی در افزایش خطر لغزش ایفا کرده‌اند. احداث اتوبان پاسداران در پای این دامنه‌ها، سبب شکست تعادل شیب‌ها و تشدید ناپایداری در امتداد مسیر شده است. همچنین، جاده‌های فرعی متعددی که در راستای توسعه‌ی تفرجگاه عینالی احداث شده‌اند، موجب بریدگی‌های موضعی در دامنه و تمرکز جریان‌های سطحی گردیده‌اند که می‌تواند شرایط وقوع لغزش را فراهم کند. بررسی مساحت طبقات خطر وقوع زمین لغزش نشان می‌دهد که بیش از ۹ درصد از مساحت کل منطقه، معادل حدود ۲۴ کیلومترمربع، در طبقات خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد (شکل ۸). این میزان در مقیاس شهری، قابل توجه و نیازمند برنامه‌ریزی جدی در مدیریت توسعه شهری و کنترل مخاطرات طبیعی است. همچنین، تطبیق لغزش‌های زمین رخ داده در سال‌های گذشته با نقشه‌ی پتانسیل نهایی، هم‌خوانی بالایی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که اکثر لغزش‌های ثبت‌شده در امتداد اتوبان پاسداران

و دامنه‌های شمالی تبریز مشاهده می‌شوند (شکل ۹). این امر صحت مدل‌سازی انجام‌شده را تأیید کرده و بیانگر نقش مؤثر عوامل زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی در کنترل پایداری دامنه‌های این ناحیه است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که پهنه‌ی شمالی تبریز، به‌ویژه محدوده‌ی عینالی، به‌عنوان یکی از ناپایدارترین بخش‌های پیرامون شهر محسوب می‌شود و لازم است اقدامات مهندسی، از جمله کنترل زهکشی، تثبیت شیب‌ها، محدودسازی ساخت‌وساز و پایش مداوم تغییرات دامنه، در این نواحی با دقت ویژه‌ای دنبال شود.



شکل ۸. مساحت پهنه‌های خطر وقوع زمین‌لغزش



شکل ۹. تطبیق لغزش‌های رخ داده در امتداد مسیر اتوبان پاسداران با پهنه‌های خطر در نقشه نهایی

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و پهنه‌بندی نواحی مستعد زمین‌لغزش در دامنه‌های مشرف به کلان‌شهر تبریز، رویکردی کمی و نوین را با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره MEREC ارائه داد. تلفیق داده‌های مکانی و محیطی در بستر GIS نشان داد که ترکیب پارامترهای زمین‌شناسی، توپوگرافی، هیدرولوژیکی و انسانی درک جامعی از پویایی ناپایداری‌های دامنه‌ای فراهم می‌سازد. نتایج نشان داد که سازندهای سست همچون مارن‌ها، شیب‌های تند شمال تبریز و فعالیت‌های انسانی از جمله احداث جاده‌ها از مهم‌ترین عوامل ناپایداری در این منطقه هستند. تحلیل‌های انجام‌شده بر روی دوازده معیار کلیدی، نقش برجسته‌ی عوامل زمین‌شناختی و انسانی را در ناپایداری شیب‌های این منطقه به وضوح نشان داد. مهم‌ترین یافته این مطالعه، تعیین لیتولوژی به عنوان تأثیرگذارترین معیار (با وزن ۰/۱۶۴) بود. وجود سازندهای سست و فرسایش‌پذیر، به‌ویژه مارن‌ها در دامنه‌های شمالی تبریز، بستر اصلی را برای وقوع زمین‌لغزش فراهم کرده است. معیارهای فاصله از جاده (۰/۱۲۴)، بارش (۰/۱۱۸) و شیب (۰/۱۱۲) در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند که گویای تأثیر هم‌افزای فعالیت‌های عمرانی و عوامل طبیعی در تشدید این مخاطره است. احداث جاده‌ها و اتوبان‌هایی مانند اتوبان پاسداران، از طریق ایجاد برش‌های شیبی و تغییر الگوی زهکشی طبیعی، تعادل دامنه‌ها را برهم زده است. از سوی دیگر، بارش‌های منطقه، به‌عنوان عامل محرک، با نفوذ به لایه‌های سست زیرسطحی، فشار منفذی را افزایش داده و پایداری شیب‌ها را کاهش می‌دهد. نقشه نهایی پهنه‌بندی، توزیع فضایی مناطق پرخطر را به‌خوبی آشکار ساخت. تمرکز پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد در ارتفاعات شمالی شهر، به‌ویژه در محدوده کوه عینالی (عون‌بن‌علی)، هشدار جدی برای توسعه آتی شهر و ایمنی ساکنان این نواحی به شمار می‌رود. تطابق قابل‌توجه لغزش‌های تاریخی ثبت‌شده (مانند موارد واقع در امتداد اتوبان پاسداران) با پهنه‌های پرخطر شناسایی‌شده در این تحقیق، صحت و اعتبار مدل ارائه‌شده را به خوبی تأیید می‌کند. یافته‌های این تحقیق با نتایج مطالعات پیشین از جمله روستایی و همکاران (۱۳۹۳)، رحیم‌پور و همکاران (۱۳۹۶)، نوجوان و همکاران (۱۳۹۸)، مختاری و همکاران (۱۳۹۹)، روستایی و حسین‌زاده دمریق (۱۴۰۱)، رحیم‌پور و رضائی مقدم (۱۴۰۴)، رضائی مقدم و همکاران (۱۴۰۴) و رضائی مقدم و رحیم‌پور (۱۴۰۴) مطابقت دارد. این پژوهش‌ها نیز به‌طور یکسان، اثربخشی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را در پهنه‌بندی مخاطرات محیطی نشان داده‌اند و نتایج حاضر، مؤید همین یافته‌ها است. با توجه به نتایج تحقیق، پیشنهاد می‌شود برای مدیریت بهینه این مخاطره، اقدامات مهندسی همچون سیستم‌های کنترل زهکشی عمقی و سطحی، اجرای عملیات تثبیت شیب (مانند به‌کارگیری دیوارهای حائل و میخ‌کوبی) و نیز پایش مداوم این دامنه‌های ناپایدار با استفاده از تکنیک‌های نوین سنجش از دور در دستور کار مسئولان قرار گیرد.

منابع

- احمدی، عبدالحمید؛ ویسی، عبدالکریم (۱۴۰۰)، ارزیابی مخاطره زمین‌لغزش در ارتباط با توسعه شهری پاوه، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۰(۱)، ۱۹۱-۱۷۲.
- آتش‌افروز، نسرين؛ صفایی پور، مسعود (۱۴۰۰)، ریز پهنه‌بندی زمین‌لغزش با استفاده از تکنیک دیمتل و AHP فازی (مطالعه موردی: بخش دهدز استان خوزستان)، فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای، ۲(۲)، ۸۱-۶۱.
- رحیم‌پور، توحید؛ رضائی مقدم، محمدحسین (۱۴۰۴)، تهیه نقشه خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS مطالعه موردی: حوضه مهران رود، ایران. هیدروژئومورفولوژی، ۱۲(۴۴)، ۱۳۱-۱۱۶.
- رحیم‌پور، توحید؛ روستایی، شهرام؛ نخستین‌روحي، مهسا (۱۳۹۶)، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و GIS (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز سردول چای، استان اردبیل). هیدروژئومورفولوژی، ۴(۱۳)، ۲۰-۱.
- رضائی مقدم، محمدحسین؛ رحیم‌پور (۱۴۰۴)، ارزیابی مکان‌گزینی کارخانه‌ی سیمان آذربادگان خوی از نظر مخاطرات سیلاب با استفاده از مدل MEREC. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۲(۲)، ۱۵۲-۱۳۵.

- رضائی مقدم، محمدحسین؛ رحیم‌پور، توحید (۱۴۰۴)، کاربرد روش‌ها و فنون تصمیم‌گیری چندمعیاره در مدل‌سازی مخاطرات محیطی، چاپ اول، تبریز، انتشارات دانشگاه تبریز. ۲۱۰ صفحه.
- رضائی مقدم، محمدحسین؛ سمندر، نسرين؛ رحیم‌پور، توحید (۱۴۰۴). پهنه‌بندی ناپایداری دامنه‌ها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری SWARA و CRITIC در محدوده شهر تبریز. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۷(۲)، ۵۵-۳۹.
- روستایی، شهرام (۱۳۹۰)، پهنه‌بندی خطر گسل تبریز برای کاربری‌های مختلف اراضی شهری، فصلنامه جغرافیا و توسعه، ۹(۲۱)، ۴۱-۲۷.
- روستایی، شهرام؛ حسین‌زاده دمریق، هاجر (۱۴۰۱)، بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدوده مخزن سد علویان مراغه. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱(۱)، ۱-۱۸.
- روستائی، شهرام؛ خدائی قشلاق، لیلا؛ خدائی قشلاق، فاطمه (۱۳۹۳)، ارزیابی روش‌های تحلیل شبکه (ANP) و تحلیل چندمعیاره مکانی در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدوده محور و مخزن سدها (مطالعه موردی: سد قلعه‌چای). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۶(۴)، ۴۹۵-۵۰۸.
- مختاری، داود؛ رضائی مقدم، محمدحسین؛ رحیم‌پور، توحید؛ معزز، سمیه (۱۳۹۹)، تهیه نقشه خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز گمناب‌چای با استفاده از مدل ANP و تکنیک GIS/کوهیدرولوژی، ۷(۲)، ۴۹۷-۵۰۹.
- نوجوان، محمدرضا؛ شاه زیدی، سمیه سادات؛ داودی، محمود؛ امین رعایا، هاجر (۱۳۹۸)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تلفیق دو مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی و فازی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کمه، استان اصفهان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۷(۴)، ۱۴۲-۱۵۹.
- نگهبان، سعید، پی سوزی، تینا، گنجائیان، حمید و نوروزی، میلاد. (۱۴۰۰). شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش و جابجایی عمودی با استفاده از تصاویر راداری (مطالعه موردی: محدوده شهری و حاشیه شهری لواسان). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰(۳)، ۱-۱۸.
- Anbalagan, R., Kumar, R., Lakshmanan, K., Parida, S. and Neethu, S. (2015). Landslide hazard zonation mapping using frequency ratio and fuzzy logic approach: a case study of Lachung Valley, Sikkim. *Geoenvironmental Disasters*, 2(6), 1-17.
- Arumugam, A., Sigid, M. F., Ab Rahman, A., & Fadhullah, W. (2024). Land use changes and climate parameters assessments in a tropical highland region of Cameron Highlands, Malaysia. *Journal of Water and Climate Change*, 15(4), 1693-1711.
- Bozzolan, E., Holcombe, E. A., Pianosi, F., Marchesini, I., Alvioli, M., & Wagener, T. (2023). A mechanistic approach to include climate change and unplanned urban sprawl in landslide susceptibility maps. *Science of the total environment*, 858, 159412.
- Chaabane, F. Z., Lamine, S., Guettouche, M. S., Bachari, N. E. I., & Hallal, N. (2024). Landslide risk assessments through Multicriteria Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(9), 303.
- Cui, H., Ji, J., Hürlimann, M., & Medina, V. (2024). Probabilistic and physically-based modelling of rainfall-induced landslide susceptibility using integrated GIS-FORM algorithm. *Landslides*, 21(6), 1461-1481.
- Dai, F.C., Lee, C.F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3-4), 213-228.
- Demir, G., Aytekin, M., Akgun, A. (2015). Landslide susceptibility mapping by frequency ratio and logistic regression methods: an example from Niksar-Resadiye (Tokat, Turkey). *Arab J Geosci*, 8, 1801-12
- Gao, K., Kong, Z., Li, Y., Zhao, F., Cai, B., Shi, D., Wang, R. (2024). Experimental study on runoff and sediment production of the fully weathered granite backfill slope under heavy rain in Longling, Yunnan Province. *Sustainability*. 16(4), 1454.
- Gokceoglu, C., Aksoy, H. (1996). Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Eng Geol*, 44, 147-161

- Gonzalez, F. C. G., Cavacanti, M. D. C. R., Ribeiro, W. N., de Mendonça, M. B., & Haddad, A. N. (2024). A systematic review on rainfall thresholds for landslides occurrence. *Heliyon*, 10(1).
- Gui, J., Shi, W., Zhou, L., Peng, X., & Zhang, S. (2024). Formation mechanism of the Guanling landslide under the action of heavy rain in Guizhou, China. *Environ Earth Sci.* 83(24), 1–19.
- Hou, C. Q., Xu, Q., Li, Y. X., & Sun, Z. B. (2024). Reliability analysis of geosynthetic-reinforced slopes under rainfall infiltration. *Geotextiles and Geomembranes*, 52(1), 156-165.
- Intarawichian, N., & Dasananda, S. (2011). Frequency ratio model based landslide susceptibility mapping in lower Mae Chaem watershed, Northern Thailand. *Environmental Earth Sciences*, 64(8), 2271-2285.
- Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E.K., Turskis, Z., Antucheviciene, J. (2021). Determination of ObjectiveWeights Using a New Method Based on the Removal Effects of Criteria (MEREC), *Symmetry*, 13(525), 1-20
- Lee, S., Choi, J. and Min, K., (2004). Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 25(11), 2037–2052.
- Liu, Z., Zheng, L., Zuo, Y., Liu, H., Hou, Y., Zhu, Z., Hao, Z., Wang, X., Huang, G. (2024). Investigation of three-dimensional model reconstruction and fractal characteristics of crack propagation in jointed sandstone. *Geomech Geophys Geo-Energy Geo-Resour.* 10(1),75.
- Mondal, A., Chowdhury, I., Mukherjee, S., & Goswami, A. (2024). Assessment of Climate Change Impact on Landslides in Darjeeling District of West Bengal: A Geospatial, Geostatistical and Ecosystem Service Based Approach. In *Landslide: Susceptibility, Risk Assessment and Sustainability: Application of Geostatistical and Geospatial Modeling* (pp. 357-380). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Sarfaraz, F. (2024). Landslide risk assessment based on susceptibility and vulnerability. *Environ Dev Sustain.* 26(4), 9285–303
- Nanehkaran, Y. A., Chen, B., Cemiloglu, A., Chen, J., Anwar, S., Azarafza, M., & Derakhshani, R. (2023). Riverside landslide susceptibility overview: leveraging artificial neural networks and machine learning in accordance with the United Nations (UN) sustainable development goals. *Water*, 15, 2707.
- Nanehkaran, Y. A., Mao, Y., Azarafza, M., Kockar, M. K. & Zhu, H. H. (2021). Fuzzy-based multiple decision method for landslide susceptibility and hazard assessment: A case study of Tabriz. Iran. *Geomech. Eng.* 24 (5), 407–418.
- Niraj, K. C., Singh, A., & Shukla, D. P. (2023). Effect of the normalized difference vegetation index (NDVI) on GIS-enabled bivariate and multivariate statistical models for landslide susceptibility mapping. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(8), 1739-1756.
- Ozdemir, A., & Altural, T. (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 180-197. doi: 10.1016/j.jseas.2012.12.014.
- Pande, CB., Moharir, KN., Varade, AM., Abdo, HG., Mulla, S., Yaseen, ZM. (2023). Intertwined impacts of urbanization and land cover change on urban climate and agriculture in Aurangabad city (MS), India using google earth engine platform. *J Clean Prod.* 422, 138541.
- Pandey, V. K., Pourghasemi, H. R., & Sharma, M. C. (2020). Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor, Garhwal Himalaya. *Geocarto International*, 35(2), 168-187.
- Patel, A. B., & Bakshi, V. (2024). Determining Land Induced Factors for Landslide Susceptibility in Indian Cities. In *Landslide: Susceptibility, Risk Assessment and Sustainability: Application of Geostatistical and Geospatial Modeling* (pp. 243-266). Cham: Springer Nature Switzerland..

- Pei, Y., Qiu, H., Zhu, Y., Wang, J., Yang, D., Tang, B., Wang, F., Cao, M. (2023). Elevation dependence of landslide activity induced by climate change in the eastern Pamirs. *Landslides*, 20(6), 1115–33
- Pourghasemi, H. R., Moradi, H. R., & Fatemi Aghda, S. M. (2013). Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Natural hazards*, 69(1), 749-779. doi: 10.1007/s11069-013-0728-5.
- Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural hazards*, 63(2), 965-996.
- Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., & Deylami Moezzi, K. (2012). Landslide susceptibility mapping using a spatial multi criteria evaluation model at haraz watershed, Iran, in *Terrigenous Mass Movements: Detection, Modelling, Early Warning and Mitigation Using Geoinformation Technology*, vol. 9783642254956, SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 23–49.
- Pradhan, A. M. S., & Kim, Y. T. (2014). Relative effect method of landslide susceptibility zonation in weathered granite soil: a case study in Deokjeok-ri Creek, South Korea. *Natural hazards*, 72(2), 1189-1217.
- Riming, T., Dey, P., Patnaik, S. K. and Narzary, M. (2025). Modeling landslide hazard in the Eastern Himalayan Mountain region of the Papumpare District of Arunachal Pradesh, India using multicriteria decision-making (MCDM) and geospatial techniques. *Nature Environment and Pollution Technology*, 24(1), B4208.
- Saadatkah, N., Kassim, A., Lee, L.M. (2015). Susceptibility Assessment of Shallow Landslides in Hulu Kelang Area, Kuala Lumpur, Malaysia Using Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio, *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(1), 43–57.
- Saha, AK., Gupta, RP., Arora, MK. (2002). GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *Int J Remote Sens*, 23(2), 357–369
- Saha, S., Bera, B. (2024). Rainfall threshold for prediction of shallow landslides in the Garhwal Himalaya, India. *Geosyst Geoenviron*. 3(3), 100285.
- Saleem, N., Huq, M. E., Twumasi, N. Y. D., Javed, A., & Sajjad, A. (2019). Parameters derived from and/or used with digital elevation models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and landslide risk assessment: a review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(12), 545.
- Sarif, M. O., Gupta, R. D., & Murayama, Y. (2023). Assessing local climate change by spatiotemporal seasonal LST and six land indices, and their interrelationships with SUHI and hot-spot dynamics: A Case study of Prayagraj City, India (1987–2018). *Remote Sensing* 15(1):1–40.
- Sen, S. (2021). Temporal analysis of vegetation health of murti river basin: An approach through geospatial technique temporal analysis of vegetation health of Murti River Basin : An approach through Geospatial technique. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, 9(5):49–56.
- Shen, Q., Zhang, Y., Xie, C., Zhang, C., & Wang, C. (2024). Study on the moisture and thermal characteristics of vegetated expansive soil slopes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(6), 2552-2563.
- Shirzaei, M., Freymueller, J., Törnqvist, T. E., Galloway, D. L., Dura, T., & Minderhoud, P. S. (2021). Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence. *Nat Rev Earth Environ*. 2(1), 40–58.
- Shu, H., Guo, Z., Qi, S., Song, D., Pourghasemi, H. R., & Ma, J. (2021). Integrating landslide typology with weighted frequency ratio model for landslide susceptibility mapping: A case study from Lanzhou city of northwestern China. *Remote Sensing*, 13(18), 3623.
- Siladjan, S., Taha, N. A. (2025). Landslide susceptibility mapping and assessment: a review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1495, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.

- Singh, S. (2011). *Geomorphology*, 5th ed. Prayag Pustak Bhawan.
- Sujatha, E. R., Sudarsan, J. S., & Nithiyanantham, S. (2023). A review on sustainable reinforcing techniques to stabilize slopes against landslides. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(12), 13873-13882.
- Swain, J. B., Singh, N. J., & Gupta, L. R. (2024). Landslide susceptibility zonation of a hilly region: A quantitative approach. *Natural Hazards Research*, 4(1), 75-86.
- Tating, F. F., Hack, R., & Jetten, V. (2015). Landslide susceptibility assessment using information value statistical method: a case study on northern Kota Kinabalu, Sabah. *Malaysian journal of remote sensing and GIS*, 4(2), 92-109.
- Thomas, J., Gupta, M., & Prusty, G. (2023). Assessing global parameters of slope stability model using Earth data observations for forecasting rainfall-induced shallow landslides. *Journal of Applied Geophysics*, 212, 104994.
- Van Westen, C. J., Rengers, N. & Soeters, R. (2003). Use of Geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Nat. Hazards*, 30(3), 399-419.
- Vijith, H., & Madhu, G. (2008). Estimating potential landslide sites of an upland sub-watershed in Western Ghat's of Kerala (India) through frequency ratio and GIS. *Environmental Geology*, 55(7), 1397-1405.
- Wu, Q., Liu, Y., Tang, H., Kang, J., Wang, L., Li, C., Wang, D., Liu, Z. (2023). Experimental study of the influence of wetting and drying cycles on the strength of intact rock samples from a red stratum in the three gorges reservoir area. *Eng Geol.* 314,107013.
- Xiong, J., Chen, H., Tang, C., Chen, M., Yang, T., Gong, L., Zhang, X., Shi, Q., Li, N., Li, M. (2025). Dynamic impact of hillslope landslide sediment transfer to ecological environment recovery in earthquake disturbed area. *Bull Eng Geol Env.* 84(2), 1-21.
- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72, 1-12
- Yang, Y., Xiong, K., Xiao, J., & Huang, Y. (2024). Quantification of Agroforestry Ecosystem Services in Karst Desertification Control. *Academic Journal of Environment & Earth Science*, 6(3), 1-9.
- Yin, Y., Li, B., Gao, Y., Wang, W., Zhang, S., & Zhang, N. (2023). Geostructures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(1), 66-101.
- Youssef, A. M., Al-Kathery, M., & Pradhan, B. (2015). Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models. *Geosciences Journal*, 19(1), 113-134.
- Yuvaraj, R., Dolui, B. (2023). Geographical assessment of landslide susceptibility using statistical approach. *Quater Sci Adv.*11:100097.
- Zheng, W., Cao, Y., Fan, W., Liang, X., Yuan, S., Gao, W., & Zhang, J. (2024). Formation processes and mechanisms of a fault-controlled colluvial landslide in the Qinling-Daba Mountains, China. *Scientific Reports*, 14(1), 19167.
- Zighmi, K., Zahri, F., Faeih, K., Al Amri, A., Riheb, H., Alamri, S. M., & Alamery, E. (2025). AHP multi criteria analysis for landslide susceptibility mapping in the Tellian Atlas chain. *Sci Rep.* 15, 25747.