

Identifying effective factors and landslide risk zoning using the maximum entropy method (Case study: Chalus Watershed)

Mohammad Reza Mehrpouya^{1*} , Mohammad Hossein Ghavimipناه² 

¹ Assistant Professor, Department of Environmental Hazards, Natural Disasters Research Institute, Tehran, Iran

² Former Ph.D. Student, Watershed Management Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Extended Abstract

Introduction

Landslides are one of the most devastating natural hazards, occurring suddenly and causing widespread destruction to the environment and human communities. These phenomena result from the movement of large masses of soil and rock on steep slopes, triggered by various factors such as heavy rainfall, earthquakes, climate change, and human activities. Landslides can lead to the destruction of infrastructure, homes, roads, and agricultural lands, affecting thousands of lives. Globally, landslides are a major concern, particularly in mountainous and hilly regions. They not only cause direct damage to structures and infrastructure but also lead to soil erosion, loss of natural habitats, and economic disruption. Rapid population growth and urban development further exacerbate the risk and impact of landslides. Therefore, understanding the factors that contribute to landslide occurrences and employing advanced prediction and management techniques are crucial. Modern tools and models, such as geographic information systems (GIS) and mathematical models, play a vital role in identifying landslide-prone areas and developing effective mitigation strategies. Collaborative efforts among researchers, engineers, and policymakers are essential to enhance community resilience against landslides. By integrating advanced technologies and continuous monitoring, we can better predict and manage the risks associated with landslides, ultimately safeguarding lives and promoting sustainable development in vulnerable regions. This concerted approach will not only minimize the immediate impacts of landslides but also ensure long-term stability and prosperity for affected communities. Based on this, the current research was planned with the aim of landslide risk zoning using the maximum entropy method in the Chalus Watershed of Mazandaran province.

Materials and Methods

To identify the most influential variables and determine the relative importance of each factor in recognizing landslide-prone areas and performing sensitivity analysis of the model, the maximum entropy algorithm was employed. After developing a comprehensive model incorporating all variables, the modeling process was repeated by excluding each variable one at a time. This approach allowed for assessing the impact of each variable on predicting susceptible areas. Subsequently, the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve was used to evaluate the model, and the Area Under the Curve (AUC) obtained was considered as a measure of the model's discriminative power in identifying presence and absence points. To prepare the stability index, the SINMAP extension and ArcGIS 10.8 software were utilized. By accepting default values for calibrating the variables and applying the relevant settings and values, the stability index was derived. In the final stage, based on the influential factors, a landslide hazard zoning map for the Chalus Watershed was prepared using the ArcGIS 10.8 software.

Results and Discussion

Based on the model results, the factors of rainfall, soil science, geological units, slope percentage, land use, and distance from the river were identified as the most influential in the occurrence of landslides in the study area. The AUC value for validating the landslide zoning was obtained as 0.73, indicating the model's acceptable identification and modeling of landslides by the model in the study area. According to the results, the low, relatively low, moderate, relatively high-, and high-risk classes respectively occupied 13.29%, 18.57%, 23.73%, 35.90%, and 8.49% of the study area, indicating the high potential of the region for landslide occurrences. Overall, it can be stated that in areas with low resistance formations, suitable slopes for landslide occurrence, and susceptible landforms, the risk of landslides is

higher. Given that the role of each factor depends on other influential factors, their role in the occurrence or non-occurrence of landslides is not uniform. The combination of these factors creates optimal conditions for the occurrence of this natural phenomenon.

Conclusion

In conclusion, landslide hazard zoning is recognized as one of the essential tools in disaster management and urban and environmental planning. Utilizing advanced modeling methods such as maximum entropy and GIS-based spatial analysis techniques allow for the accurate identification and mapping of landslide-prone areas. The findings of this research not only clarify the impact of environmental, geological, and human factors on landslide occurrences but also help in providing effective management solutions to reduce risks and enhance community resilience. Especially in regions facing landslide hazards, these results can serve as a basis for formulating policies and strategies for prevention and risk reduction. Therefore, based on the results of the current research, according to the effective factors in priority areas, with a suitable solution and proper management analysis, it is possible to plan to improve the level of watershed management and soil and water protection, and reduce the damage caused by landslides.

Keywords: Landslide mapping, Mass movement, MaxEnt, Soil erosion.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

This article was not sponsored by any specific organization.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mohammad Reza Mehrpouya: Conceptualization, methodology, software, formal analysis, and investigation;

Mohammad Hossein Ghavimippanah: Resources, Writing - original draft preparation, Software, Manuscript editing

*Corresponding Author, E-mail:

Citation: Mehrpouya, M. R., & Ghavimippanah, M. H. (2025). Identifying effective factors and landslide risk zoning using the maximum entropy method (Case study: Chalus Watershed). *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 247-264. doi:10.22098/mmws.2024.14799.1436

Received: 14 March 2024, Received in revised form: 20 April 2024, Accepted: 06 May 2024, Published online: 21 March 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 1, pp. 247-264

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





شناسایی عوامل مؤثر و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چالوس)

محمد رضا مهرپویا^{۱*}، محمدحسین قویمی‌پناه^۲

^۱ استادیار، گروه مخاطرات زیست‌محیطی، پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران
^۲ دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

چکیده

زمین‌لغزش‌ها یکی از مخرب‌ترین نوع حرکت‌ها و ناپایداری‌های دامنه‌ای هستند که همواره موجب فرسایش خاک، تولید رسوب، از بین بردن زمین‌های زراعی، باغی و جاده‌ها می‌شوند. هم‌چنین، باعث خسارت جانی و مالی قابل توجهی در نقاط مختلف جهان به‌ویژه در کشور ایران به‌دلیل دارا بودن شرایط خاص ساختار زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی می‌شود. لذا پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش حداکثر آنتروپی در حوزه آبخیز چالوس استان مازندران انجام شد. جهت شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر بر شناسایی مناطق زمین‌لغزش و تحلیل حساسیت مدل، از الگوریتم حداکثر آنتروپی به کمک نرم‌افزار MaxEnt استفاده شد. سپس به‌منظور ارزیابی مدل از منحنی ROC استفاده شد و سطح زیر نمودار AUC به‌دست آمده به‌عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور و عدم حضور مورد توجه قرار گرفت. در نهایت بر اساس عوامل مؤثر، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز چالوس تهیه شد. بر اساس نتایج حاصل از مدل، عامل‌های بارندگی، خاک‌شناسی، واحدهای زمین‌شناسی، درصد شیب، کاربری اراضی و فاصله از رودخانه به‌ترتیب مؤثرترین عوامل در بروز زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه معرفی شدند. مقدار AUC برای اعتبارسنجی پهنه لغزشی ۰/۷۳ به‌دست آمد که نشان‌دهنده شناسایی و مدل‌سازی قابل قبول زمین‌لغزش توسط مدل در منطقه مورد مطالعه بود. طبق نتایج به‌دست آمده طبقات خطر کم، نسبتاً کم، متوسط، نسبتاً زیاد و زیاد به‌ترتیب ۱۳/۲۹، ۱۸/۵۷، ۲۳/۷۳، ۳۵/۹۰ و ۸/۴۹ درصد از محدوده مورد مطالعه را به خود اختصاص دادند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای منطقه جهت ایجاد زمین‌لغزش است. لذا با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، بر اساس عوامل مؤثر شناسایی شده در مناطق دارای اولویت با راهکاری مناسب و تحلیل مسائل مدیریتی می‌توان جهت ارتقای سطح مدیریت حوزه‌های آبخیز و حفاظت خاک و آب برنامه‌ریزی نمود و خسارت ناشی از زمین‌لغزش را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: MaxEnt، حرکت توده‌ای، مکانیابی زمین‌لغزش، فرسایش خاک

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mr.ghavimi@yahoo.com

استناد: مهرپویا، محمد رضا، و قویمی‌پناه، محمدحسین (۱۴۰۴). شناسایی عوامل مؤثر و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چالوس). *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۱)، ۲۴۷-۲۶۴.
doi:10.22098/mmws.2024.14799.1436



تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۲۴۷ تا ۲۶۴
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان

۱- مقدمه

زمین لغزش‌ها در بسیاری از مناطق دنیا مخصوصاً کشورهای با تنوع زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی کوهستانی از جمله ایران، از مهم‌ترین بلایای طبیعی به شمار می‌آیند. همچنین، آن‌ها به‌عنوان یکی از فرآیندهای فعال، نقش مهمی در فرسایش و تحول چشم‌اندازهای طبیعی دارند (Goetz et al., 2011) و در استان‌های شمالی، چهارمحال و بختیاری، اردبیل، کردستان و البرز بیش‌ترین میزان احتمال رخداد آن وجود دارد (Motevali et al., 2017). عوامل مختلفی از قبیل فعالیت‌های انسان (Pourghasemi and Kerle, 2016) ریخت‌شناسی زمین (Perdhan et al., 2014)، ویژگی‌های خاک (Nampak et al., 2014)، تندی شیب (Roslee, 2017)، جهت شیب (Youssef et al., 2016)، شرایط آب و هوایی (Peng et al., 2014) و ویژگی‌های حوزه آبخیز مانند رودخانه و گسل (Girma et al., 2015) از جمله عوامل مؤثر در وقوع پدیده زمین‌لغزش هستند. همچنین، متغیرهای اقلیمی و مکانی مانند بارش‌های شدید، زمین‌لرزه و فعالیت‌های آتش‌فشانی در ایجاد زمین‌لغزش نقش مهمی را ایفا می‌کنند (Nahayo et al., 2019) که هر ساله منجر به خسارت مالی و جانی فراوانی در سراسر جهان می‌گردند؛ لذا مطالعه تخصصی و ارزیابی جامع و علمی این پدیده در جهان به دلایل زیاد، از مسائل مهم به‌شمار می‌رود. طبق مطالعات انجام‌شده، زمین‌لغزش به‌تنهایی ۱۷ درصد از بلایای طبیعی جهان را به خود اختصاص داده و روند مذکور هم‌چنان به دلیل افزایش شهرنشینی بدون برنامه‌ریزی، جنگل‌زدایی، تغییر کاربری اراضی و تغییر شرایط اقلیمی در حال توسعه است (Ocakoglu et al., 2002). از جمله حساس‌ترین و مهم‌ترین مسائل در پروژه‌های عمده عمرانی، مانند مسیر احداث بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی و فرعی، انتخاب محل احداث سدهای خاکی و نیز آب‌بندها و کانال‌های انتقال آب، احداث تونل‌های عبور و مرور و طرح‌هایی مانند توسعه جنگل‌ها و مراتع طبیعی و هر گونه توسعه معدنی در گرو مطالعه پایداری شیب‌های طبیعی منطقه است. عدم توجه به این مسئله می‌تواند خسارت جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد (Al-Rawabdeh et al., 2016).

بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، شناخت عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و مناطق دارای پتانسیل خطر امری ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو در دهه‌های اخیر مطالعات زیادی با هدف و روش‌های مختلفی در نقاط مختلف جهان صورت گرفته است. برای نمونه، (Vieira et al., 2018) به ارزیابی خطرات زمین‌لغزش‌های سطحی با استفاده از مدل‌های فیزیک بنیان

TRIGRS و SHALSTAB، در دامنه‌های سرا دو مار، برزیل پرداخته بودند. آن‌ها بیان نمودند که هر دو مدل در پیش‌بینی مناطق مستعد به زمین‌لغزش‌های سطحی مؤثر بوده‌اند. همچنین، (Nahayo et al., 2019) با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش شاخص آماری در رواندا به نقشه‌برداری خطر زمین‌لغزش پرداخته بودند. طبق نتایج آنها عمده‌ترین عوامل مؤثر بر خطر زمین‌لغزش ارتفاع، شیب، بارندگی و مدیریت ضعیف زمین بودند. در ادامه، (Versain et al., 2019) با استفاده از روش‌های وزن شواهد (WOE)، ارزش اطلاعات (IV) و نسبت فراوانی (FR) برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (LHZ) در منطقه کوچک هیمالیا در ناحیه کولو (HP) هند پرداخته‌اند. نتایج اعتبارسنجی و مقایسه نقشه‌های خطر آنها مؤید نتایج تقریباً مشابه بوده است. (Ram and Gupta, 2022) در مطالعه‌ای، به ارزیابی خطر زمین‌لغزش، آسیب‌پذیری و ارزیابی خطر شهرستان هیمالیا، واقع در قسمت پایین هیمالایای کوچک پرداختند که طبق نتایج آنها ۴۰ درصد منطقه در محدوده خطر بسیار زیاد و آسیب‌پذیری بالا، حدود ۱۱ درصد دارای خطر متوسط و حدود ۴۹ درصد در محدوده خطر کم و بسیار کم قرار گرفت. (Li et al., 2023) در یک مطالعه پویا در مورد خطر زمین‌لغزش در یک پروژه نیروگاه فتوولتائیک بزرگ تحت شرایط بارندگی شدید پرداختند. یافته‌های آنها نشان داد که دره مرکزی و شیب تند شرقی منطقه مورد مطالعه، مناطق پرخطر هستند. علاوه بر این، با افزایش مدت بارندگی، سطح خطر زمین‌لغزش نیز افزایش می‌یابد. (Zhang et al., 2023) یک روش جدید برای ارزیابی خطرات زمین‌لغزش در امتداد بزرگراه‌ها با استفاده از سنجش از دور و یادگیری ماشین ارائه دادند. این مدل به درستی پنج مورد از هفت رویداد زمین‌لغزش را در این دوره با نرخ هشدار معقول پیش‌بینی کرد. طبق نتایج آنها داده‌های بیش‌تر در مورد زمان لغزش و رویدادهای اختلال انسانی ممکن است صحت مدل را در مناطق و زمین‌های مختلف جغرافیایی بهبود بخشد.

(Ghavimippanah et al., 2017) در حوزه آبخیز ولی عصر استان اردبیل، به صحت‌سنجی دو روش تحلیل سلسله‌مراتبی و رگرسیون چندمتغیره در پهنه‌بندی زمین‌لغزش پرداختند. بر اساس نتایج حاصله آنها، روش رگرسیون چندمتغیره و روش تحلیل سلسله‌مراتبی به ترتیب با میزان ۲۱ و ۵۶ درصد مغایرت، از بیش‌ترین صحت و کم‌ترین صحت برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه برخوردارند. (Motevali et al., 2017) با استفاده از مدل‌های SINMAP و SHALSTAB به تهیه نقشه پایداری دامنه در محدوده چهاردانگه استان مازندران پرداختند. نتایج

حوزه آبخیز چالوس و اهمیت پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش، در پژوهش حاضر سعی بر آن شده است تا با استفاده از مدل MaxEnt ضمن شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های محدوده مورد مطالعه، نقشه مناطق دارای پتانسیل خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش حداکثر آنتروپی تهیه شود و از این طریق بر اساس نتایج حاصل از آن از خسارت ناشی از وقوع این رخداد طبیعی کاسته شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز چالوس در دامنه شمالی البرز مرکزی و در جنوب این شهرستان در طول جغرافیایی $0^{\circ} 51'$ شرقی تا $35^{\circ} 51'$ شرقی و عرض جغرافیایی $0^{\circ} 36'$ شمالی تا $43^{\circ} 36'$ شمالی واقع شده است (شکل ۱). محدوده مورد مطالعه از غرب به رودخانه سردآبرود، از شرق به رودخانه کورکورسر، از جنوب به حوزه آبخیز کرج و از شمال به دریای مازندران منتهی می‌شود.

۲-۲- توپوگرافی

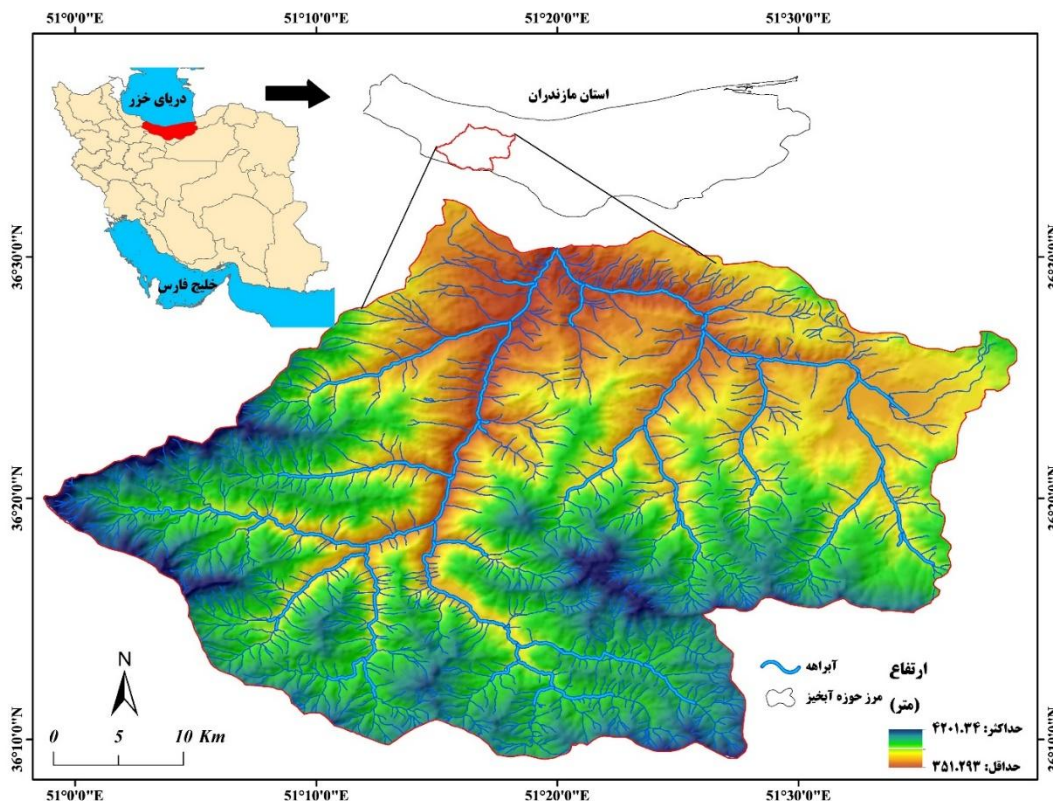
به منظور بررسی ارتفاع خطوط منحنی میزان موجود در نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ رقمی وارد نرم افزار ArcGIS شد. مدل رقمی ارتفاع محدوده با پیکسل‌های 10×10 متر تهیه و با اعمال فیلتر پایین‌گذر سلول‌های غیرعادی احتمالی اصلاح شد. سپس اطلاعات مورد نیاز از نقشه‌ها استخراج شد و در نهایت منجر به تهیه نقشه پایه محدوده طرح شد. از مدل رقمی ارتفاع، نقشه شیب تهیه شد.

۲-۳- اقلیم‌شناسی

یکی از متغیرهای اقلیمی که در میزان هوازدگی سنگ‌ها و به مراتب ایجاد حرکت‌های توده‌ای تأثیر زیادی دارد، بارندگی و دما است. داده‌های مورد نیاز مربوط به سه ایستگاه هواشناسی واقع در منطقه مورد مطالعه، از سال ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۱ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد (جدول ۱). جهت تهیه لایه‌های مربوط به اقلیم از روش کریجینگ^۱، استفاده شد.

آنها نشان داد مدل‌های مورد استفاده با نرخ موفقیت $87/33$ و $69/51$ درصد از کارایی بالایی برای پیش‌بینی و شناسایی ناپایداری دامنه برخوردار هستند. (Mousavi et al., (2022). در پژوهشی برای حوزه آبریز رودخانه زرد واقع در استان خوزستان با استفاده از روش منطق فازی به پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش پرداختند. طبق نتایج به دست آمده حدود ۲۱ درصد از مساحت منطقه در طبقه خطر زیاد و حدود ۴۳ درصد در طبقه خطر کم واقع شده است. (Seddighi and Ghasemi (2023). در مطالعه‌ای به عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و احتمال وقوع آن در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. نتایج آنها نشان داد ۴۷ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی در ناحیه با خطر وقوع زمین‌لغزش کم، $39/2$ درصد در ناحیه با خطر وقوع متوسط و $13/8$ درصد مساحت منطقه در محدوده با احتمال وقوع بالای زمین‌لغزش قرار دارد. (Asadi Nalivan et al., (2024). در پژوهشی به اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) و تعیین مناطق دارای پتانسیل حساسیت زمین‌لغزش پرداختند. بر اساس نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش بیش از ۳۵ درصد از پهنه حوزه آبخیز مورد مطالعه دارای پتانسیل حساسیت زمین‌لغزش زیاد و خیلی زیاد است. بر اساس بررسی پژوهش‌های صورت گرفته نرم‌افزارها و مدل‌های گوناگونی با استفاده از عوامل مؤثر برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی خطر وقوع زمین‌لغزش استفاده شده است. استان مازندران نیز به دلیل برخورداری از شرایط ویژه زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، لرزه‌خیزی، نزولات جوی زیاد و شرایط توپوگرافی از جمله استان‌هایی است که مستعد وقوع زمین‌لغزش است. لذا به دلیل اهمیت زیاد این مناطق از نظر تنوع موجودات جانوری و پوشش گیاهی متراکم و خدمات متنوع بوم‌سازگان باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد و نسبت به شناسایی مناطق مستعد لغزش و برنامه‌ریزی جهت مدیریت زمین‌لغزش به منظور کاهش خسارات جانبی و مستقیم آن اقدام شود. با توجه به شرایط جغرافیایی و اقلیمی حوزه آبخیز چالوس، بالا بودن میزان خسارات ناشی از زمین‌لغزش‌ها، و گزارش‌های متعدد مبنی بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه، این حوزه آبخیز از مناطق دارای خطر وقوع زمین‌لغزش در استان مازندران به شمار می‌روند. بر همین اساس با توجه به عدم وجود مطالعات جامع در

¹ Kriging



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز چالوس در استان مازندران و ایران
Figure 1- Location of Chalus Watershed in Mazandaran Province, Iran

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی حوزه آبخیز چالوس

Table 1- Characteristics of rain gauge stations in Chalus Watershed

ردیف	نام ایستگاه	نوع	سازمان	UTM Y	UTM X	ارتفاع از سطح دریا (متر)
1	پل ذغال	تبخیرسنجی	وزارت نیرو	4040537	529649	360
2	واسپول	باران‌سنج معمولی	وزارت نیرو	4018419	520647	1000
3	سیاه بیشه	سینوپتیک	سازمان هواشناسی	4011719	526952	1855

آب مشخص کند. جهت تهیه لایه خاک‌شناسی نقشه تپ خاک و داده‌های بافت خاک و میزان نفوذپذیری از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری نوشهر با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ دریافت شد و نقشه خاک‌شناسی محدوده مورد مطالعه تهیه شد.

۲-۶- کاربری اراضی

نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز مورد مطالعه با استفاده از نقشه‌های با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور به صورت اولیه تهیه شد. سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای موجود در گوگل‌ارث و بازدید میدانی از حوزه آبخیز اقدام به تدقیق و تهیه نقشه نهایی کاربری اراضی با دقت بالا شد.

۲-۴- زمین‌شناسی

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش عامل سنگ‌شناسی است (Pourghasemi and Kerle, 2016). برای بررسی این عامل نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برای شناخت وضعیت زمین‌شناسی کلی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس تفسیر فتوژئولوژیکی عکس‌های هوایی، پردازش تصاویر ماهواره ASTER مربوط به سال ۲۰۲۲ در نرم‌افزار ERDAS ER Mapper 11 و نیز انجام پیمایش‌ها، نقشه زمین‌شناسی منطقه تهیه شد.

۲-۵- خاک‌شناسی

خاک یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ایجاد زمین‌لغزش است که ویژگی‌های آن می‌تواند با ترکیب سایر عوامل، مانند یک عامل هیدرولوژیکی تعیین کننده، میزان نفوذ آب یا ظرفیت نگهداشت

۷-۲- فاصله از جاده و رودخانه

لایه اولیه جاده و آبراهه‌های منطقه مورد مطالعه ابتدا از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استخراج شدند. سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث و بازدید میدانی از حوزه آبخیز اقدام به تدقیق و تهیه نقشه نهایی جاده‌ها با صحت بالا شد و در گام بعدی لایه‌های مذکور در محیط نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از دستور توابع Euclidean Distance روی لایه‌های اولیه، نقشه فاصله از جاده و آبراهه‌ها تهیه شد.

۸-۲- شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI^۱)

در مناطقی که بارندگی و رطوبت زیاد است، بالا بودن سطح آب زیرزمینی و یا وجود چشمه‌ها، سبب حرکت سریع دامنه به دلیل رسیدن به حالت اشباع می‌شود و سبب افزایش فشار آب منفذی دامنه می‌شود، با این وجود این مسأله به ظرفیت نفوذ دامنه بستگی دارد که بر اساس متغیرهای مختلفی مانند تخلخل، مواد آلی تشکیل دهنده، شیب توپوگرافی، نفوذپذیری، نوع خاک، رطوبت، پوشش زمین و غیره کنترل می‌شود (Shirani and Arabameri, 2015). از این شاخص‌های به‌عنوان یک ابزار مفید برای نشان دادن الگوی پراکنش مکانی رطوبت خاک در مقیاس حوزه آبخیز استفاده می‌شود. مقادیر بالای TWI معمولاً در بدنه زمین‌لغزش‌ها یافت می‌شود (Pourghasemi et al., 2012). این شاخص مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک در حوزه آبخیز را بر فرض برابر بودن شیب آب زیرزمینی با شیب سطح زمین، تقریب می‌زند. در رابطه (۱) نحوه محاسبه این شاخص نشان داده شده است.

$$TWI = [\ln \text{Slope}/CA] \quad (1)$$

CA: منطقه‌ای است که با یک شبکه تخلیه می‌شود و Slope: شیب برای هر سلول بر اساس ارتفاع نقاط و فاصله آن بر حسب درجه یا درصد است، به طوری که ارزش هر سلول معادل شیب متوسط آن در جهت‌های مختلف خواهد بود (Tarboton, 1997).

۹-۲- شاخص پوشش گیاهی

پوشش گیاهی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر میزان نفوذ رواناب سطحی است که همواره نقش خود را در حرکت توده‌ای زمین ایفا می‌نماید (Pourghasemi and Kerle, 2016). برای تهیه نقشه پوشش گیاهی حوزه آبخیز چالوس از تصاویر ماهواره لندست سنجنده OLI سال

۲۰۲۲ استفاده شد و پس از تهیه نقشه پوشش گیاهی از شاخص تفاضل پوشش گیاهی (NDVI)^۲ برای محاسبه شاخص پوشش گیاهی استفاده شد. پس از مشخص شدن مهم‌ترین عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز مورد مطالعه، لایه‌های مربوط به این عامل‌ها تهیه شدند. سپس برای اولویت‌بندی عامل‌ها، از الگوریتم حداکثر آنتروپی به کمک نرم‌افزار MaxEnt اقدام شد. یکی از قابلیت‌های این مدل در شناسایی متغیرهای تأثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی هر یک از عوامل مؤثر بر شناسایی مناطق زمین‌لغزش و تحلیل حساسیت مدل به روش Jackknife است (Asadi Nalivan et al., 2024). در این روش پس از ایجاد مدل کامل با دخالت تمامی متغیرها، مدل‌سازی به تعداد متغیرها تکرار شده و هر بار یکی از متغیرها از روند مدل‌سازی حذف شد. بدین ترتیب میزان تأثیر هر یک از متغیرها در پیش‌بینی نواحی مطلوب مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس به منظور ارزیابی مدل از منحنی ROC استفاده شد و سطح زیر نمودار AUC به دست آمده به‌عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور و عدم حضور مورد توجه قرار گرفت. به منظور تهیه شاخص پایداری از افزونه SINMAP و نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. سپس با پذیرفتن ارزش‌های پیش‌فرض جهت واسنجی متغیرها و نیز اعمال تنظیمات و مقادیر مربوطه، شاخص پایداری استخراج شد. در آخرین مرحله بر اساس عوامل مؤثر در محیط نرم‌افزار ArcGIS نقشه پهنه خطر وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز چالوس تهیه شد.

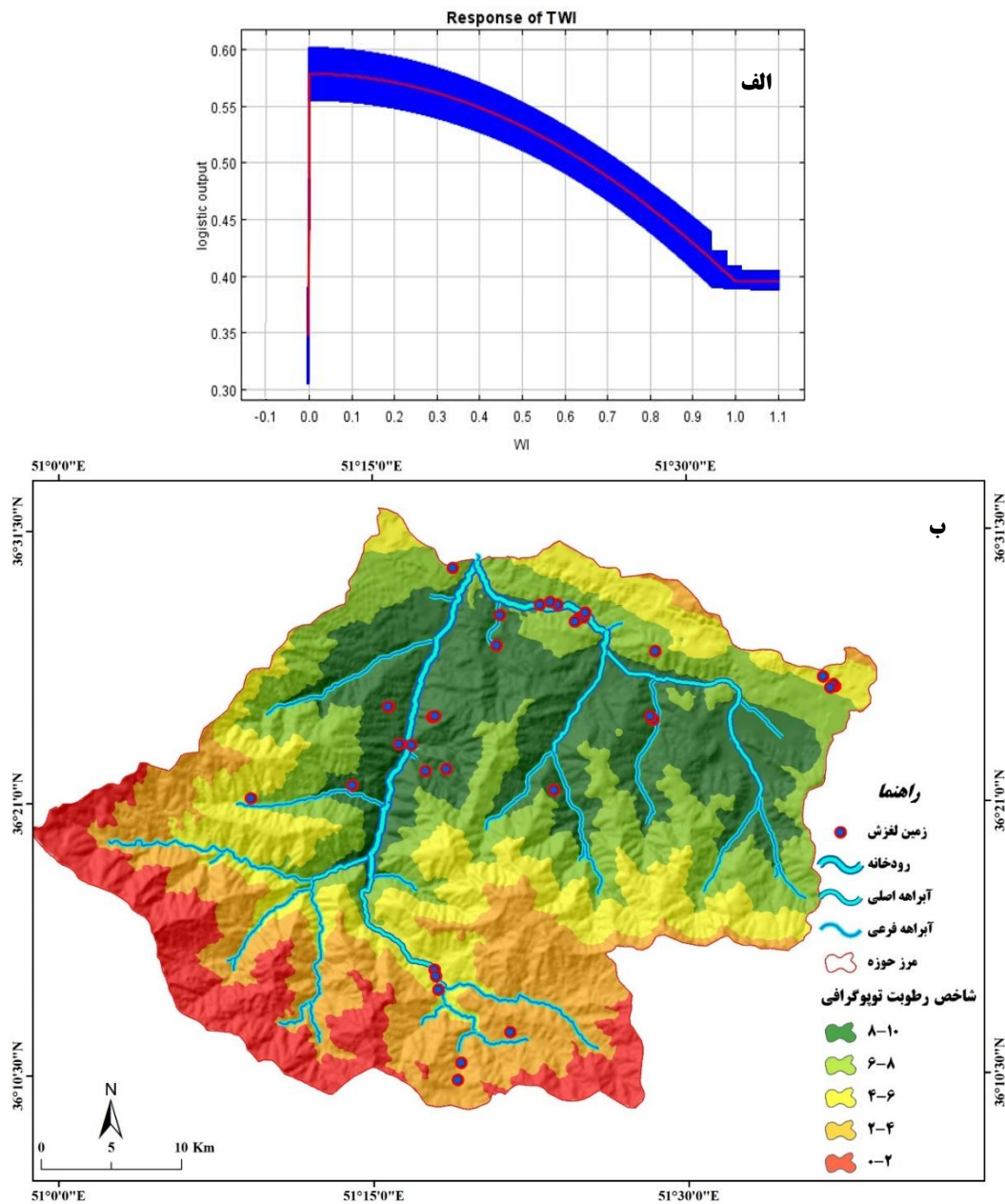
۳- نتایج و بحث

طبق شرح ارائه شده در بخش مواد و روش اقدام به تهیه لایه‌ها شد و جهت ارزیابی نقش هر یک از عوامل مؤثر در بروز زمین‌لغزش‌های محدوده مورد مطالعه اقدام شد که نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۲ تا ۷ نشان داده شده است.

طبق نتایج به دست آمده همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، به طور کلی با افزایش میزان شاخص رطوبت توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه، پتانسیل ایجاد زمین‌لغزش افزایش یافته است. می‌توان چنین استنباط نمود که در رطوبت‌های کم، افزایش مقاومت برشی سطح لغزنده، مانع وقوع زمین‌لغزش شده و در رطوبت‌های بیش‌تر نیز پوشش گیاهی مناسب، سبب کاهش احتمال رخداد زمین‌لغزش می‌شود که در پژوهش Seddighi and Ghasemi (2023) نیز به نتیجه مشابه دست یافتند.

² Normalized difference vegetation index

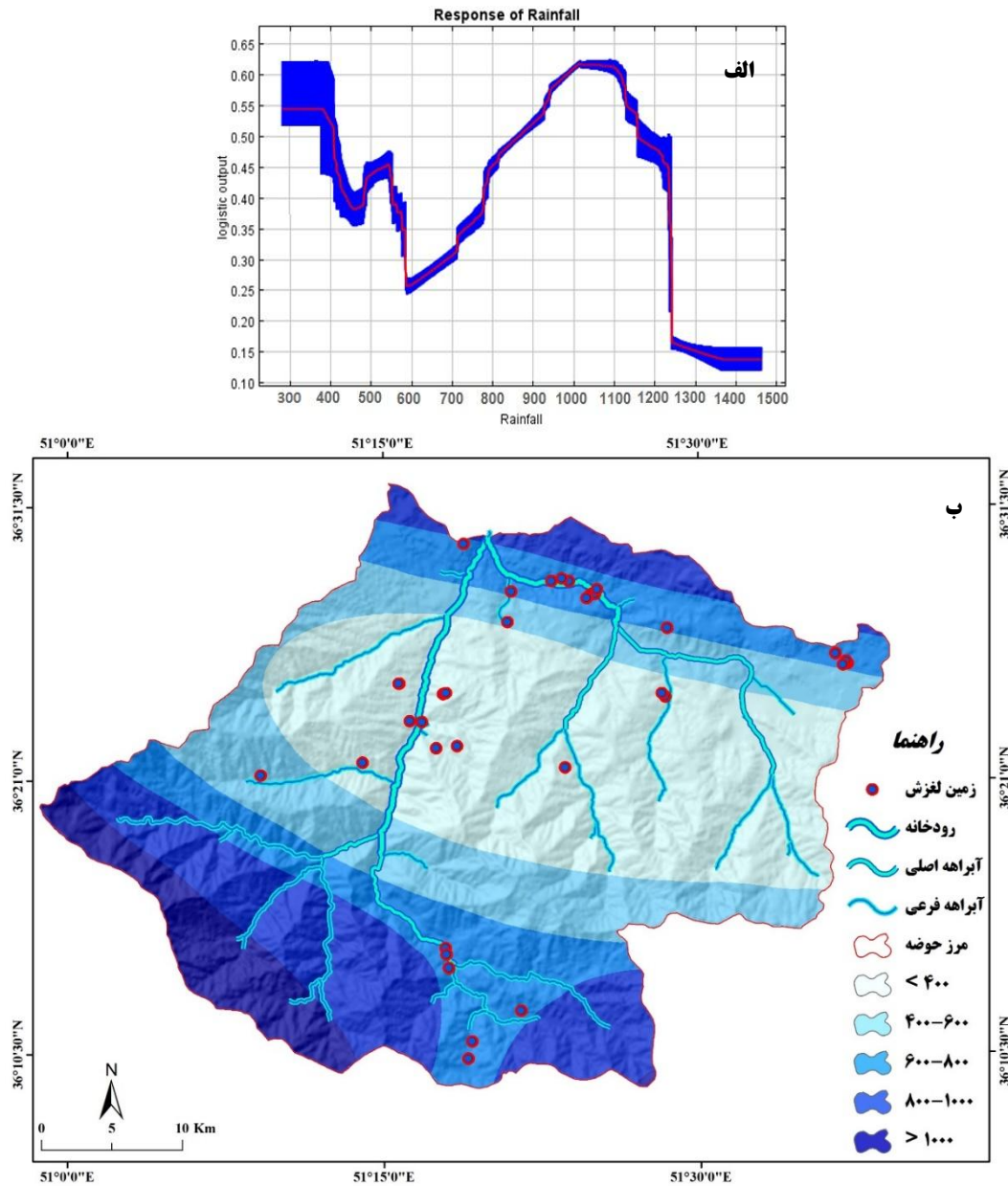
¹ Topographic wetness index



شکل ۲- (الف) نمودار منحنی پاسخ عامل رطوبت توپوگرافی (ب) نقشه عامل رطوبت توپوگرافی در ایجاد زمین لغزش
 Figure 2- (a) Response curve diagram of topographic humidity factor and (b) map of topographic humidity factor in landslide occurrence

گلی یا حرکت‌های توده‌ای، که پس از اشباع خاک رخ می‌دهد، خواهد شد که با نتایج مطالعات قبلی (Vieira et al., 2018; Versain et al., 2019; Ram and Gupta, 2022) هم‌راستا است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نتایج نشان داد تا میزان بارندگی حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر در ساعت، با افزایش بارندگی احتمال زمین‌لغزش، افزایش پیدا خواهد کرد و پس از آن روند معکوسی را در پیش خواهد گرفت که می‌توان اظهار داشت بارندگی بیش‌تر سبب ایجاد انواع دیگر حرکت‌های توده‌ای مانند جریان‌های

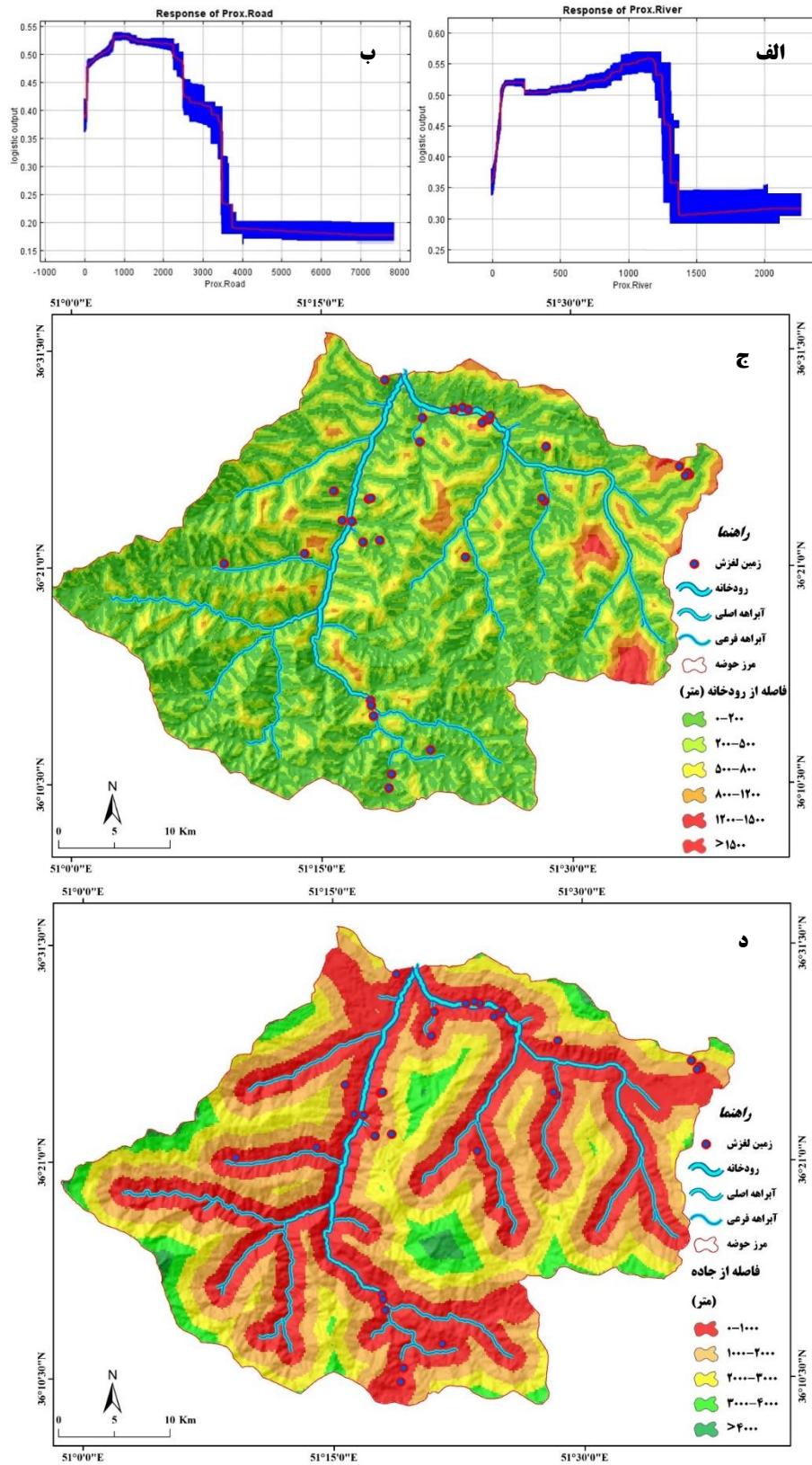


شکل ۳- (الف) نمودار منحنی پاسخ عامل بارندگی و (ب) نقشه عامل بارندگی در ایجاد زمین‌لغزش

Figure 3- (a) Response curve diagram of the rainfall factor and (b) Map of the rainfall factor in landslide occurrence

میزان پتانسیل زمین‌لغزش کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، بررسی عامل فاصله از جاده و آبراهه نشان می‌دهد که بیش‌ترین زمین‌لغزش‌های رخ داده به‌ترتیب در فاصله ۰ تا ۲۰۰ و ۰ تا ۱۰۰۰ متری آبراهه و جاده است که به خوبی همبستگی وقوع زمین‌لغزش با حریم جاده و آبراهه را نشان می‌دهد که در این راستا پژوهش‌های پیشین (Greco et al., 2007; Nefeslioglu et al., 2008) نیز نقش دو عامل مذکور را مورد تأیید قرار داده‌اند.

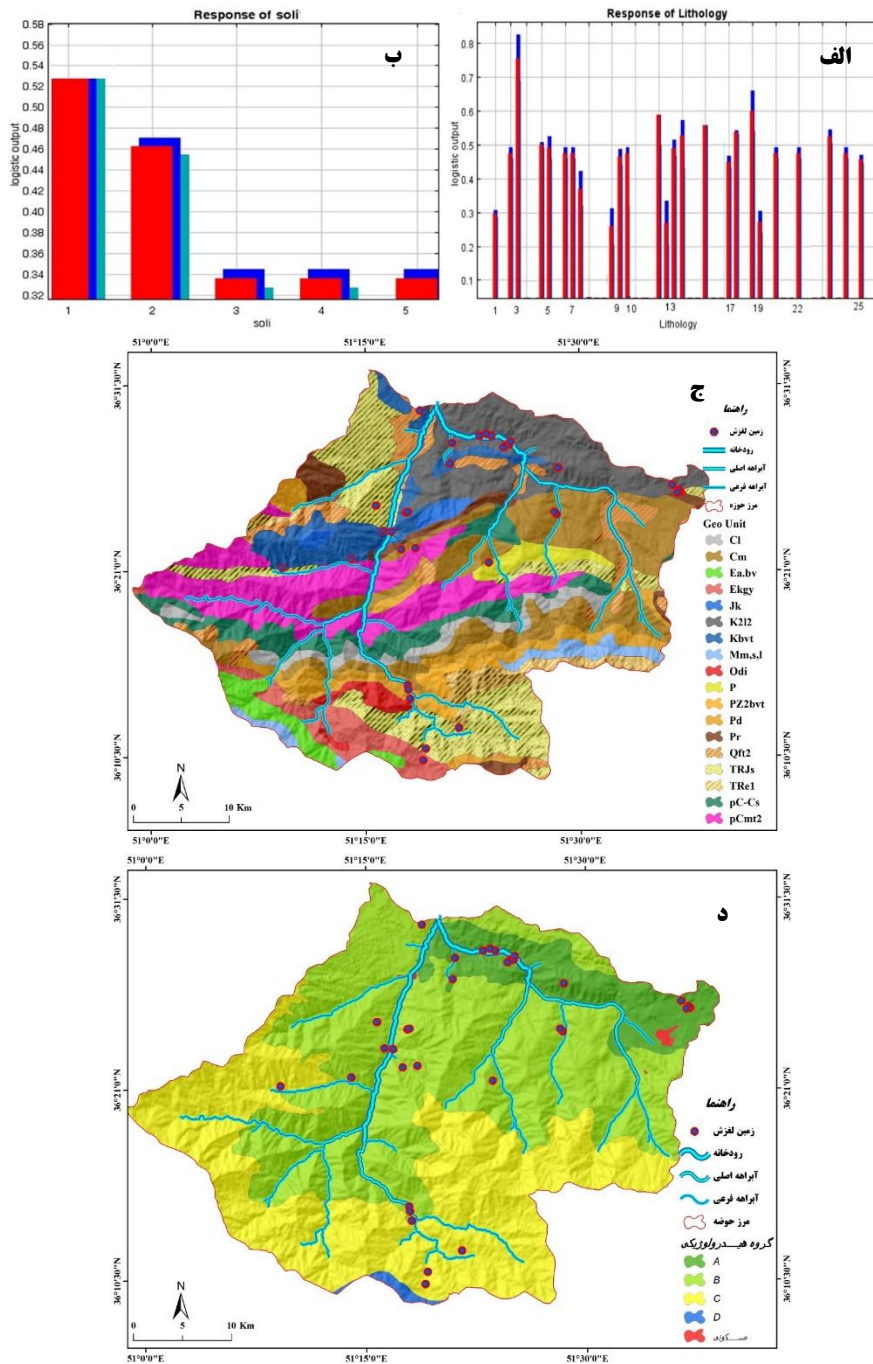
از مهم‌ترین عوامل ایجاد زمین‌لغزش خاکبرداری یا زیرشویی مواد است که باعث ایجاد شکستگی کششی در پشت توده شده و منجر به واژگونی توده می‌شود. لذا با توجه به نتایج نشان داده شده در مناطق دارای جریان دائمی در منطقه مورد مطالعه، این امر موجب زیرشویی در پای دامنه شده و به‌تدریج باعث کاهش وزن توده خاک در پایین‌دست و غلبه نیروی برشی بر مقاومت برشی شده و سبب تسریع حرکت توده در جهت شیب می‌شود و طبق نتایج به دست آمده با افزایش میزان فاصله از رودخانه یا جاده،



شکل ۴- نمودارهای منحنی پاسخ عامل فاصله از رودخانه (الف)، جاده (ب) و نقشه عامل فاصله از رودخانه (ج) و جاده (د) در ایجاد زمین لغزش
 Figure 4- Response curve diagrams of distance factor from the river (a), and road (b); and Map of the distance factor from the river (c) and road (d) in landslide occurrence

ماسه‌سنگ و سیلتستون و شیل در این نوع واحدهای سنگی نیز به دلیل حساسیت زیاد در مقابل رطوبت، از پتانسیل زیادی برای بروز زمین‌لغزش برخوردار هستند و می‌توان اظهار نمود که این عامل یکی از مؤثرترین عامل‌های ایجاد زمین‌لغزش در منطقه است.

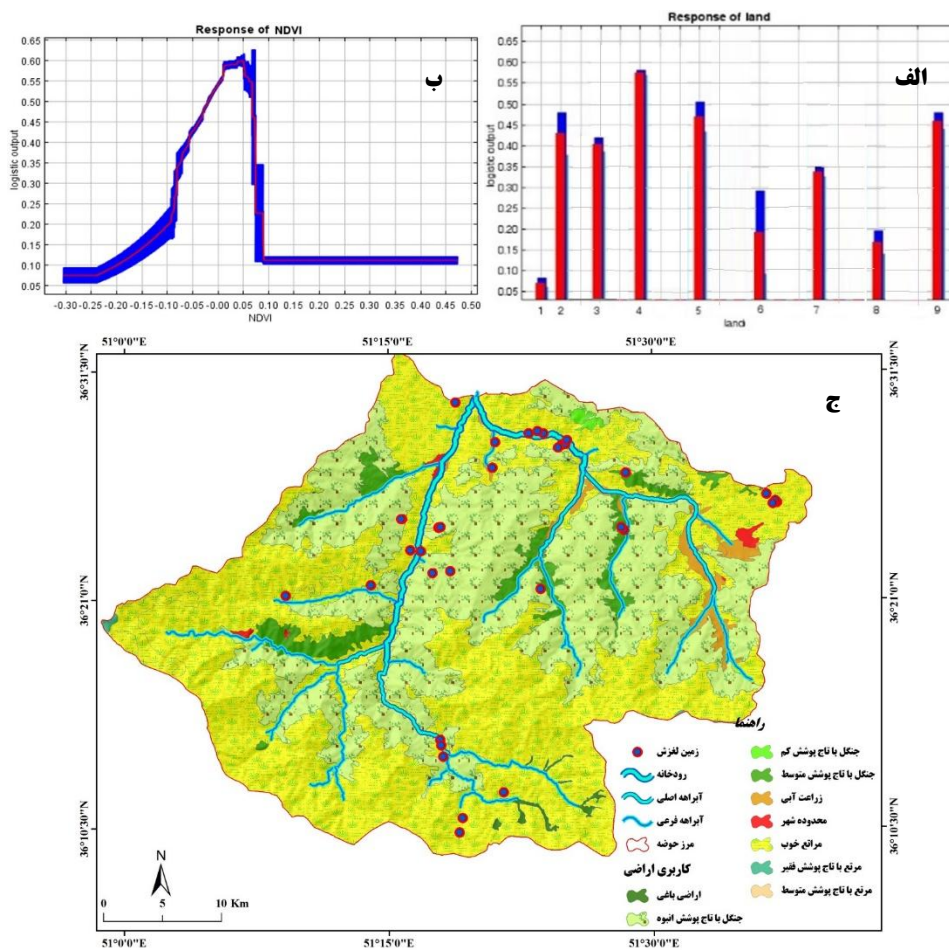
همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، حوزه آبخیز مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی ساختاری در البرز مرکزی قرار گرفته است و تشکیلات زمین‌شناسی و واحدهای موجود از پرکامبرین شروع شده و تا سنوزوئیک ادامه می‌یابد. در بخش شرقی و مرکزی حوزه آبخیز سنگ‌های ولکانیکی آئوسن نیز لایه‌هایی از رسوبات نئوژن گسترش دارند. به دلیل دارا بودن توف‌های خرد شده،



شکل ۵- نمودارهای منحنی پاسخ عامل زمین‌شناسی (الف)، خاک‌شناسی (ب) و نقش عامل زمین‌شناسی (ج) و خاکشناسی (د) در ایجاد زمین‌لغزش
 Figure 5- Response curve diagrams of geological factor (a) and soil science (b); and Map of geological factor (c) and soil science (d) in landslide occurrence

کاربری اراضی در منطقه به وجود می‌آید، نسبت داد. Motevali et al. (2017) و Mousavi et al., (2022) در مطالعات خود نیز به این نتیجه دست یافتند. از طرفی دلیل این امر را می‌توان وسعت زیاد کاربری مرتع نسبت به سایر کاربری‌ها دانست.

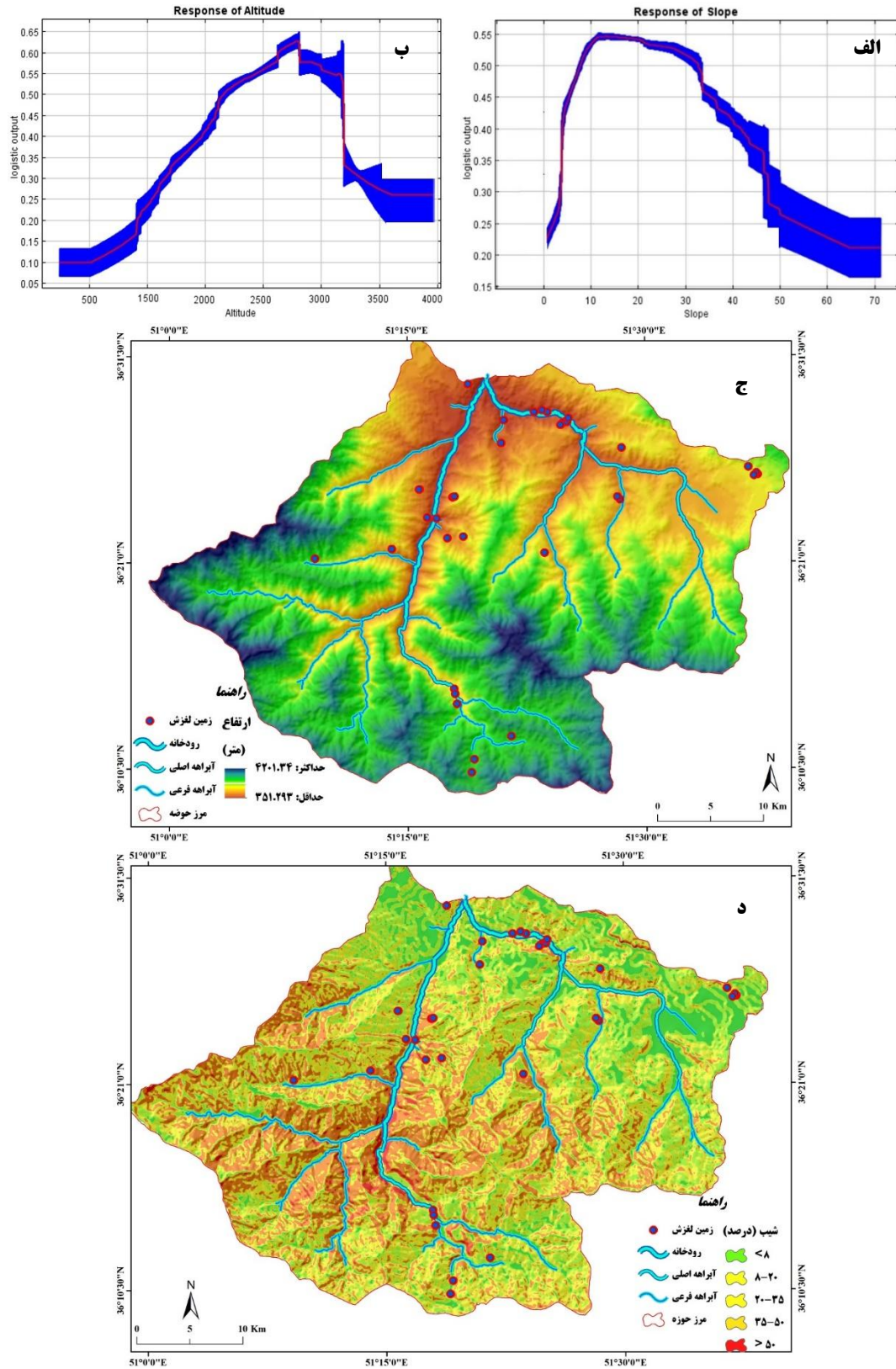
طبق شکل ۶، نوع استفاده از زمین یا پوشش گیاهی موجود، یکی از عوامل مهم در ناپایداری دامنه‌ها در منطقه مورد مطالعه بوده است، که ویژگی‌های زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باعث تغییر رفتار آن می‌شود. طبق نتایج بیش‌ترین زمین‌لغزش‌ها در کاربری مرتع مشاهده شده است، این امر را می‌توان به نقش مؤثر انسان در بوم‌سازگان‌های طبیعی و تخریب‌هایی که به واسطه تغییر



شکل ۶- نمودارهای منحنی پاسخ عامل کاربری اراضی (الف)، پوشش گیاهی (ب) و نقشه عامل کاربری اراضی و پوشش گیاهی (ج) در ایجاد زمین‌لغزش
Figure 6- Response curves of land use factor (a) and vegetation (b); and Map of land use factor and vegetation (c) in landslide occurrence

عامل شیب نشان داد، با افزایش شیب تا ۲۰ درصد میزان زمین‌لغزش نیز افزایش یافته و پس از آن رابطه شیب و زمین‌لغزش معکوس می‌شود که این امر ناشی از وجود خاک با عمق کم در شیب‌های زیاد است و با نتایج پژوهش Ghavimippanah et al., (2017) هم‌خوانی دارد.

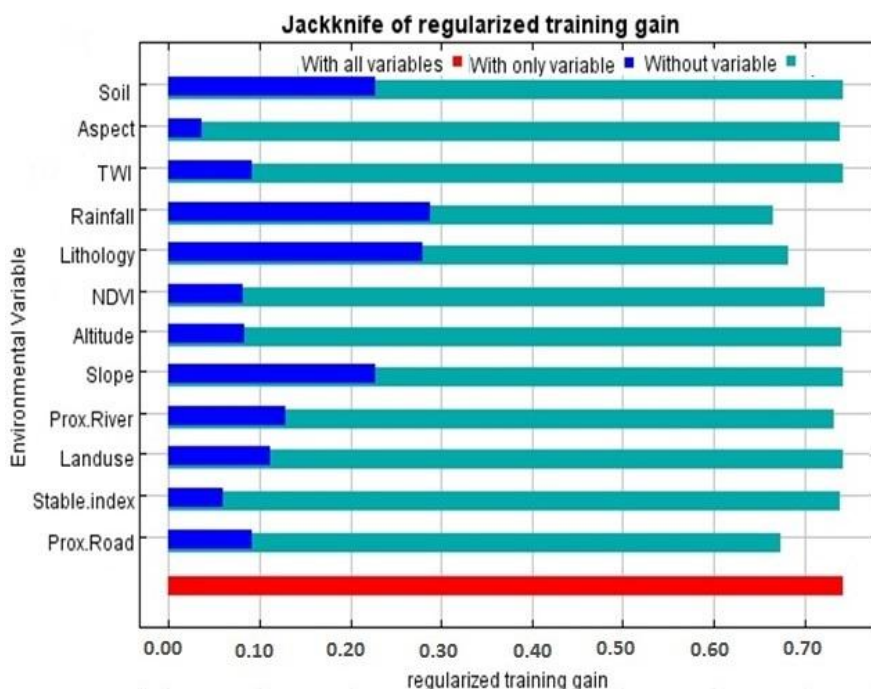
مطابق با شکل ۷، عامل توپوگرافی به دلیل تأثیر بر برخی از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش از جمله، رژیم بارندگی، تغییرات دما، مقدار بارش، تخریب فیزیکی و یخبندان و ذوب یخ به‌طور غیرمستقیم نقش تعیین‌کننده‌ای در شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش دارد، طبق نتایج به دست آمده به طور کلی با افزایش ارتفاع، تعداد وقوع لغزش‌ها افزایش یافته و بعد از ارتفاع ۳۰۰۰ متری رابطه ارتفاع و وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه معکوس می‌شود. بررسی



شکل ۷- نمودارهای منحنی پاسخ عامل شیب (الف)، ارتفاع (ب) و نقشه عامل ارتفاع (ج)، شیب (د) در ایجاد زمین لغزش
 Figure 7- Response curve diagrams of the slope factor (a) and elevation (b); and Map of elevation factor (c) and slope (d) in landslide occurrence

منطقه مورد مطالعه، بارندگی، خاک شناسی، واحدهای زمین شناسی، درصد شیب، کاربری اراضی و فاصله از رودخانه بودند. نتایج حاصل از تعیین سهم هر یک از متغیرها در شکل ۸ نشان داده شده است.

پس از مشخص شدن نقش هر یک از عوامل در ایجاد زمین لغزش، لایه های اطلاعاتی جهت تعیین اولویت هر یک از عوامل در ایجاد زمین لغزش وارد مدل MaxEnt شدند. بر اساس نتایج حاصل از مدل، مؤثرترین عامل های بروز زمین لغزش در



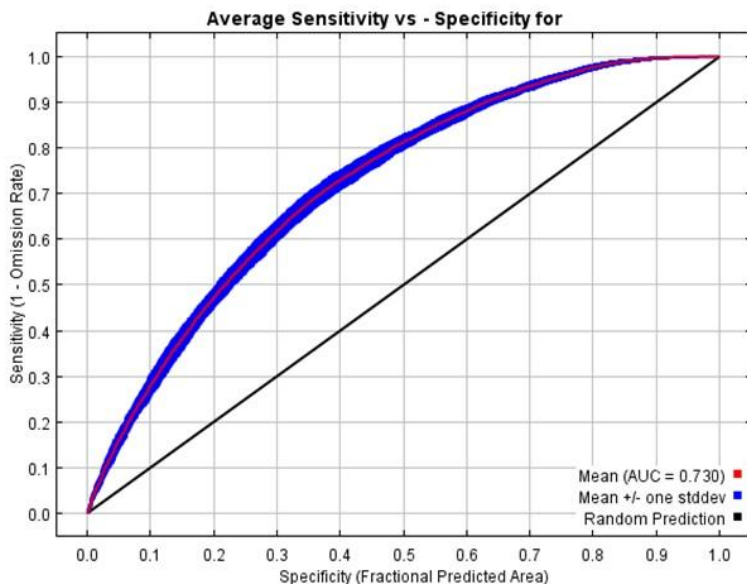
شکل ۸- نمودار میزان مشارکت سهم هر یک از متغیرها در رخداد لغزش و پهنه های لغزشی
Figure 8- The chart of the contribution of each variable in landslide occurrence and landslide-prone zones

قرار گرفته است و خط سیاه، نشان دهنده پیش بینی مدل به صورت تصادفی است. در نمودار میانگین ROC، خط قرمز نشان دهنده میانگین مقادیر برای ۲۰ تکرار مدل است. همان طور که در شکل ۹ مشخص است، مقدار AUC برای اعتبارسنجی پهنه لغزشی ۰/۷۳ است، که نشان دهنده پیش بینی و مدل سازی قابل قبول زمین لغزش توسط مدل در منطقه مورد مطالعه است که نتایج حاصل از پژوهش حاضر با پژوهش Asadi Nalivan et al. (2024) مطابقت داشت.

۳-۱- اعتبارسنجی مدل

در پژوهش حاضر برای اعتبارسنجی مدل از نمودار AUC استفاده شد. تعداد نمودارهای خروجی مدل با تعداد تکرار مدل برابر است. در نهایت میانگین تکرارهای مدل به عنوان نمودار ROC جهت ارزیابی اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. شکل ۹ نمودار ROC نشان می دهد.

همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، برای هر تکرار، خط قرمز نشان دهنده داده های مورد استفاده در مدل است، خط آبی نشان دهنده داده هایی است که برای آزمون مدل مورد استفاده



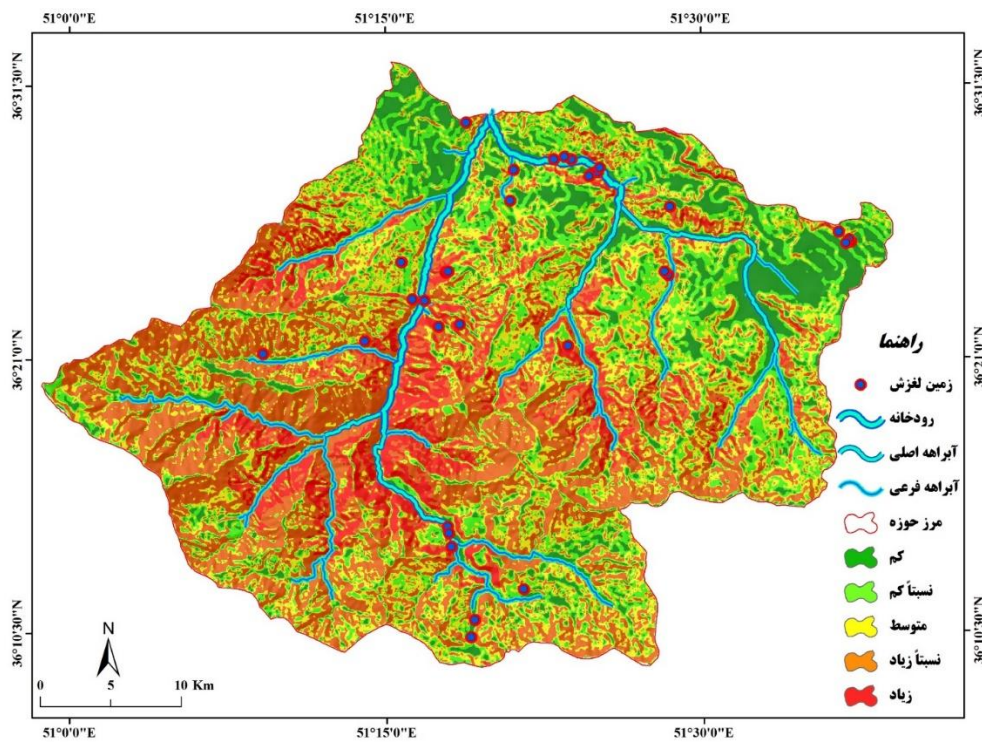
شکل ۹- منحنی ROC زمین لغزش در محدوده مورد مطالعه

Figure 9- ROC curve of landslide in the study area

۳-۲- پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

با توجه به نتایج به دست آمده از تلفیق نتایج بخش‌های قبلی نقشه نهایی تهیه شد که طبق یافته‌های پژوهش مساحت و درصد هر کدام از کلاس‌های خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه به

دست آمد. در نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، حساسیت منطقه به وقوع این پدیده طبیعی، بین صفر و یک مشخص شد. شکل ۱۰ نقشه پهنه‌بندی خطر لغزش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

Figure 10- Landslide risk zoning map

برای رخداد زمین لغزش برخوردار است. جدول ۲ مساحت و درصد هر یک از طبقات خطر در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. طبق نتایج نشان داده شده در جدول ۲ طبقه مناطق با خطر نسبتاً زیاد، بیشترین میزان از محدوده مورد مطالعه را با ۳۵/۹۵ درصد از کل محدوده به خود اختصاص داد و این امر نشان‌دهنده پتانسیل زیاد منطقه در ایجاد زمین لغزش است. همچنین، ۸/۴۹ درصد از منطقه مورد مطالعه از پتانسیل خطر زیاد برخوردار است که نشان‌دهنده اهمیت لزوم برنامه‌ریزی و توجه به این پدیده طبیعی به منظور مدیریت صحیح و کاهش خسارت‌های مترتب بر آن است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه از پتانسیل بیش‌تری برای وقوع زمین لغزش برخوردار است که دلیل آن وجود مناطق با شیب بین ۱۰ تا ۳۰ درصد بوده و بالا بودن تراکم آبراهه است. همچنین، از نظر خاک‌شناسی نیز این مناطق دارای نفوذپذیری بالایی است و غالب کاربری مناطق پرخطر کاربری اراضی مرتع است که طبق یافته‌های پژوهش (Zhang et al., 2023; Li et al., 2023) نتایج حاصل از این پژوهش صدق می‌کند. نیمه شمالی حوزه آبخیز مورد مطالعه نیز به دلیل کم بودن میزان شیب و ارتفاع از خطر کم

جدول ۲- مساحت و درصد هر یک از طبقات خطر در محدوده مورد مطالعه
Table 2- The area and percentage of each of each risk class in the study area

ردیف	طبقه خطر	مساحت (هکتار)	درصد
1	کم	2002.75	13.29
2	نسبتاً کم	27972.49	18.57
3	متوسط	35751	23.73
4	نسبتاً زیاد	54071.51	35.91
5	زیاد	12792.75	8.49
	مجموع	132590.50	100

۱۸/۵۷، ۲۳/۷۳، ۳۵/۹۰ و ۸/۴۹ درصد از منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص دادند. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای منطقه جهت ایجاد زمین لغزش است. لذا نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان کمک زیادی کند تا بتوانند بر اساس داده‌های مکانی، بهتر تصمیم‌گیری نمایند.

سپاسگزاری

این مقاله تحت حمایت ارگان خاصی نبوده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچگونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این تحقیق وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این تحقیق از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

محمدرضا مهرپویا: انجام مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نرم‌افزار، تحلیل و بررسی رسمی؛ محمدحسین قویمی پناه: نگارش، تهیه پیش‌نویس اصلی، نرم‌افزار، ویرایش نسخه خطی.

نتیجه‌گیری

استان مازندران، با توجه به شرایط خاص زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، اقلیمی، آب‌های زیرزمینی، سرعت تغییرات کاربری اراضی، شاهد وقوع حرکت‌های توده‌ای متنوع و فراوان همراه با خسارت‌های مالی، جانی و فرسایش شدید خاک است. خسارت‌های ناشی از زمین لغزش‌ها بر منابع طبیعی، ساختمان‌ها، جاده‌ها و تأسیسات گاهی مواقع جبران‌ناپذیر است. از مهم‌ترین راهکارها تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در مقیاس‌های ملی، منطقه‌ای و محلی است تا با بهره‌گیری از آن بتوان مناطق حساس را شناسایی و از وقوع خسارت جلوگیری نمود. در مجموع می‌توان چنین بیان نمود که در مناطقی که از سازندهایی با مقاومت کم، شیب‌هایی مناسب برای فراهم نمودن شرایط لغزش و شکل‌های زمین مستعد لغزش همراه بوده است، خطر زمین لغزش در آن مناطق از احتمال بیش‌تری برخوردار بوده است. با توجه به این که نقش هر یک از عوامل به سایر عامل‌های مؤثر نیز وابسته است، لذا نقش آن در بروز یا عدم وقوع زمین لغزش یکسان نیست، در کنار هم قرار گرفتن عوامل سبب ایجاد بستری مناسب برای بروز این پدیده طبیعی شده است. در همین راستا در این پژوهش پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش حداکثر آنتروپی در حوزه آبخیز چالوس انجام شد که طبق نتایج به دست آمده طبقات خطر کم، نسبتاً کم، متوسط، نسبتاً زیاد و زیاد به ترتیب ۱۳/۲۹،

منابع

- قویمی‌پناه، محمدحسین، خالدی درویشان، عبدالواحد و قویمی‌پناه، محمدرضا (۱۳۹۶). صحت‌سنجی روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و رگرسیون چند متغیره (MR) در پهنه‌بندی زمین‌لغزش، مطالعه موردی: حوزه آبخیز ولی‌عصر، استان اردبیل، *اکوهیدرولوژی*، ۴(۳)، ۷۷۵-۷۸۹.
doi: 10.22059/ije.2017.62626
- متولی، علیرضا، طالبی، علی، صفایی، مهرداد و اختصاصی، محمدرضا (۱۳۹۶). بررسی کارایی دو مدل پایه فیزیکی SINMAP و SHALSTAB در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش، مطالعه موردی: محدوده منطقه چهاردانگه، استان مازندران. مرتع و *آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)*، ۷۰(۱)، ۲۰۷-۲۱۸. doi: 10.22059/jrwm.2017.61977
- موسوی، سیده معصومه، رضایی مقدم، محمدحسین، رجبی، معصومه (۱۴۰۱). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز رودخانه زرد با استفاده از منطق فازی. *هیدروژئومورفولوژی*، ۳(۹)، ۲۵-۴۸.
- اسدی نلیوان، امید، رحمانی، مجید، وکیلی تجربه، فرزانه و بیات، اصغر (۱۴۰۳). اولویت‌بندی عوامل و پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز سد کرج. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۶(۱)، ۱-۱۵.
doi: 10.22092/ijwmse.2023.357778.1960
- شیرانی، کورش و عرب عامری، علیرضا (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک، مطالعه موردی: حوزه دز علیا. *علوم آب و خاک*، ۷۲، ۳۳۴-۳۲۱.
doi:10.18869/acadpub.jstnar.19.72.27
- صدیقی، حدیثه، قاسمی، احمدرضا. ۱۴۰۲. مدل‌سازی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: استان چهار محال و بختیاری). *پژوهش‌های دانش زمین*، ۱۴، ۶۰-۴۲.
doi: 10.48308/esrj.2023.104053
- susceptibility models using generalized additive models. *Geomorphology*, 129, 376-386. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.02.024
- Greco, R., Sorriso, Valvo. And Catalano, E. (2007). Logistic regression analysis in the evaluation of mass movement's susceptibility case study: Calabria, Italy. *Engineering geology*, 89, 47-66. doi: 10.1016/j.enggeo.2006.10.004
- Li, R., Huang, S., & Dou, H. (2023). Dynamic risk assessment of landslide hazard for large-scale photovoltaic power plants under extreme rainfall conditions. *Water*, 15(15), 2832. doi: 10.3390/w15152832
- Motevali, A., Talebi, A., Safaei, M., & Ekhtesasi, M. (2017). Investigation of the efficiency of SINMAP and SHALSTAB Physically-based Models for landslide hazard zonation (Case Study: Chahar Donge region, Mazandaran Province). *Journal of Range and Watershed Management*, 70(1), 207-218. doi: 10.22059/jrwm.2017.61977. [In Persian]
- Mousavi, S. M., Rezaei Moghaddam, M. H. & rajabi, M. (2022). Landslide Hazard Zoning in the Yellow River Basin Using Fuzzy Logic. *Hydrogeomorphology*, 9(30), 48-25. doi: 10.22034/hyd.2021.43189.1560. [In Persian]
- Nahayo, L., Mupenzi, C., Habiyaemye, G., Kalisa, E., Udahogora, M., Nzabarinda, V., & Li, L. (2019). Landslides hazard mapping in Rwanda using bivariate statistical index method. *Environmental Engineering Science*, 36(8), 892-902. doi: 10.1089/ees.2018.0469
- Nampak, H., Pradhan, B., & Manap, M. A. (2014). Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater

References

- Al-Rawabdeh, A., He, F., Moussa, A., El-Sheimy, N., & Habib, A. (2016). Using an unmanned aerial vehicle-based digital imaging system to derive a 3D point cloud for landslide scarp recognition. *Remote Sensing*, 8(2), 95. doi: 10.3390/rs8020095
- Asadi Nalivan, O., Rahmani, M., Vakili tajareh, F. & Bayat, A. (2024). Prioritization of factors and zoning susceptibility of landslide in Karaj Dam Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 16(1), 1-15. doi: 10.22092/ijwmse.2023.357778.1960. [In Persian]
- Cakoglu, F., Gokceoglu, C., & Ercanoglu, M. (2002). Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: a case study from NW Turkey. *Geomorphology*, 42(3), 329-341. doi: 10.1016/S0169-555X(01)00094-7
- Ghavamipannah, M. H., Khaledi Darvishan, A. & Ghavamipannah, M. R. (2017). Verification methods of Analytical Hierarchy Process (AHP) and Multivariate Regression (MR) in landslide zoning (Case Study: Valiasr Watershed in Ardabil Province). *Journal of Ecohydrology*, 4(3), 775-789. doi: 10.22059/ije.2017.62626. [In Persian]
- Girma, F., Raghuvanshi, T.K., Ayenew, T., Hailemariam, T. (2015). Landslide hazard zonation in Ada Berga District, Central Ethiopia a GIS based statistical approach. *Journal of Geomatics* 90, 25-38. doi: 10.1007/s11069-014-1128-0
- Goetz, J. N., Guthrie, R. H., & Brenning, A. (2011). Integrating physical and empirical landslide

- potential zonation. *Hydrology*, 513, 283-300. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.02.053
- Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., & Durmaz, S. (2008). Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Easten Black Sea Region of Turkey). *Geomorphology*, 94, 401-418. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.10.039
- Ocakoglu, F., Gokceoglu, C., & Ercanoglu, M. (2002). Dynamics of a complex mass movement triggered by heavy rainfall: a case study from NW Turkey. *Geomorphology*, 42(3-4), 329-341. doi:10.1016/S0169-555X(01)00094-0
- Peng, L., Niu, R., Huang, B., Wu, X., Zhao, Y., & Ye, R. (2014). Landslide susceptibility mapping based on rough set theory and support vector machines: A case of the Three Gorges area, China. *Geomorphology*, 204, 287-301. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.08.013
- Pourghasemi, H. R., & Kerle, N. (2016). Random forests and evidential belief function-based landslide susceptibility assessment in Western Mazandaran Province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), 185. doi: 10.1007/s12665-015-4892-7
- Pourghasemi, H. R., Mohammady, M., & Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*, 97, 71-84. doi: 10.1016/j.catena.2012.05.005
- Ram, P., & Gupta, V. (2022). Landslide hazard, vulnerability, and risk assessment (HVRA), Mussoorie Township, Lesser Himalaya, India. *Environment, Development and Sustainability*, 1-29. doi: 10.1007/s10668-022-02443-4
- Roslee, R. (2017). Landslide susceptibility analysis (LSA) using deterministic model (Infinite Slope) (DESSISM) in the Kota Kinabalu Area, Sabah, Malaysia. *Geological Behavior*, 1(1), 6-9. doi: 10.26480/gbr.01.2017.06.09
- Seddighi, H., & Ghasemi, A. R. (2023). Landslide risk modeling using logistics regression model (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province). *Researches in Earth Sciences*, 14(4), 42-60. doi: 10.48308/esrj.2023.104053. [In Persian]
- Shirani K, Arabameri A R. (2015). Landslide Hazard Zonation Using Logistic Regression Method (Case Study:Dez-e-Oulia Basin). *Journal of Water and Soil Science*; 72: 321-335. doi:10.18869/acadpub.jstnar.19.72.27. [In Persian]
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319. doi.org/10.1029/96WR03137
- Versain, L. D., Banshtu, R. S., & Pandey, D. D. (2019). Comparative evaluation of GIS based landslide hazard zonation maps using different approaches. *Geological Society of India*, 93(6), 684-692. doi: 10.1007/s12594-019-1142-7
- Vieira, B. C., Fernandes, N. F., Augusto Filho, O., Martins, T. D., & Montgomery, D. R. (2018). Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 77(6), 1-15. doi: 10.1007/s12665-018-7429-6
- Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., El-Haddad, B. A., & Dhahry, B. K. (2016). Landslide susceptibility maps using different probabilistic and bivariate statistical models and comparison of their performance at Wadi Itwad Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), 63-87. doi: 10.1007/s10064-015-0780-0
- Zhang, Y., Deng, L., Han, Y., Sun, Y., Zang, Y., & Zhou, M. (2023). Landslide hazard assessment in highway areas of Guangxi Using Remote Sensing Data and a Pre-Trained XGBoost Model. *Remote Sensing*, 15(13), 3350. doi: 10.3390/rs15133350