



Application of a GIS-Based Probabilistic Model in Identifying Landslide-Prone Areas in a Semi-Arid Region of Golestan Province

Amirhosein Ghorbani^{1✉} | Saleh Arekhi²

1. Corresponding Author, Department of Survey Engineering-Geographic Information Systems, Faculty of Civil Engineering, Lamei Gorgani Institute of Higher Education, Gorgan, Iran. amirhoseynghorbani0551@gmail.com

2. Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran. s.arekhi@gu.ac.ir

Article Information

Research Paper

Vol: 17
No: 63
P: 246-265
Received: 2025-05-28
Revised: 2025-09-25
Accepted: 2025-09-26
Published: 2026-05-01

Keywords:

- Geographic Information System
- Landslide Susceptibility Map
- Spatial Modeling
- Qarnaveh Watershed
- Weight of Evidence model

Cite this Article:

Ghorbani, A.H., Arekhi, S. (2026). Application of a GIS-Based Probabilistic Model in Identifying Landslide-Prone Areas in a Semi-Arid Region of Golestan Province. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 17(63): 246-265.

Publisher: Hakim Sabzevari University

The Author(s) retain the copyright and full publishing rights.



[10.22034/jargs.2025.526664.1203](https://doi.org/10.22034/jargs.2025.526664.1203)

Abstract

Aim: This study aims to map landslide-prone areas in the Qarnaveh watershed, eastern Golestan Province, using the probabilistic Weight of Evidence (WoE) model within a GIS environment.

Materials & Methods: This study identified 179 landslides through field surveys and databases; 70% were used for modeling and 30% for validation. Fourteen conditioning factors, including elevation, slope degree, slope aspect, distance to faults, fault density, distance to roads, distance to rivers, drainage density, slope curvature, stream curvature, geology, land use, LS index, and topographic wetness index, were extracted and analyzed using ArcGIS and SAGA-GIS software. The significance of each factor was assessed through the WoE model, which was then used to generate a landslide susceptibility map for the watershed. Model accuracy was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve.

Findings: Results indicated that drainage density had the strongest influence, while fault density had the least impact on landslide occurrence in the study area. The southern and southwestern parts of the watershed were identified as zones with very high landslide susceptibility. The WoE model demonstrated an accuracy of 79.7% in predicting landslide-prone areas.

Conclusion: Based on the results, the Weight of Evidence model shows a reasonably high capability in identifying landslide-prone areas with acceptable accuracy. It can serve as an effective tool in natural resource management, watershed planning, disaster risk reduction, spatial planning, and reducing vulnerability in high-risk areas.

Innovation: This study employed the statistical Weight of Evidence (WoE) model along with a spatially explicit and comprehensive approach, incorporating key influencing factors to map landslide susceptibility in a semi-arid region. The results provide an effective tool for identifying high-risk landslide areas and prioritizing prevention, aiding natural resource, road, and disaster management agencies in damage reduction.

Extended Abstract

1. Introduction

Landslides are among the most significant geomorphological hazards in mountainous and semi-arid regions, causing substantial damage to infrastructure, natural resources, and human life every year. Applying scientific methods to identify landslide-prone areas can play a vital role in hazard management and environmental planning. Conducting such analyses using traditional methods is extremely time-consuming and costly, necessitating the use of more advanced tools. In this regard, Geographic Information Systems (GIS) play a unique role as a powerful tool for the collection, management, analysis, and visualization of spatial data, particularly in modeling natural hazards such as floods, soil erosion, and landslides. GIS enables the integration of diverse spatial layers such as slope, elevation, land use, proximity to faults, roads, and rivers, providing a suitable platform for implementing statistical and probabilistic models and generating susceptibility maps. The application of statistical and probabilistic models, especially within GIS environments, allows for quantitative analysis of the relationship between landslide occurrences and environmental variables, shifting the modeling process from a qualitative to a quantitative level. These approaches, by utilizing spatial data and leveraging the analytical capabilities of GIS, can identify complex spatial structures and potential dependencies among phenomena, contributing to more accurate predictions of high-risk areas. Using such models not only optimizes time and resource allocation but also enhances the accuracy of analyses, playing a significant role in reducing damages and improving environmental resilience. Among these models, the Weight of Evidence (WoE) model based on Bayesian theory is widely used to quantify the statistical relationship between landslide distribution and environmental factors. This study aims to delineate landslide hazard zones in the Qarnaveh watershed, located in eastern Golestan Province, using the probabilistic Weight of Evidence (WoE) model within a Geographic Information System (GIS) environment.

2. Materials and Methods

In this study, 179 landslide occurrences were identified using field surveys and available databases. Seventy percent of these events were used for modeling, while the remaining thirty percent were reserved for model validation. Fourteen conditioning factors, including elevation, slope degree, slope aspect, distance to faults, fault density, distance to roads, distance to rivers, drainage density, slope curvature, stream curvature, geology, land use, LS index, and topographic wetness index, were extracted and analyzed using ArcGIS and SAGA-GIS software. The significance of each factor was assessed through the WoE model, which was then used to generate a landslide susceptibility map for the watershed. Model accuracy was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve.

3. Results and Discussion

Results indicated that drainage density had the strongest influence, while fault density had the least impact on landslide occurrence in the study area. The southern and southwestern parts of the watershed were identified as zones with very high landslide susceptibility. The WoE model demonstrated an accuracy of 79.7% in predicting landslide-prone areas. The study identified key environmental factors linked to landslide susceptibility in the Qarnaveh watershed, Golestan Province. Areas with elevations of 148–389 m, gentle slopes (0–11.49%), and aspects facing west, south, southeast, and northeast were most prone to landslides. High-risk zones also included regions with TWI values of 14.91–22.74, flat slope curvature, concave stream curvature, forest cover, Qal geological formations, and proximity to rivers (0–600 m) and roads (0–853 m). Other influential factors were high drainage density (3.55–6.45), LS values (44–111), and distances up to 3042 m from faults. These factors contribute to slope instability by reducing soil strength, increasing moisture, and accelerating erosion. The most influential variables were drainage density, distance to river and road, elevation, TWI, and stream curvature. Southern and southeastern slopes, exposed to higher solar radiation, showed the greatest sensitivity. The WoE model, with 79.7% accuracy (ROC),

successfully identified the southern and southwestern parts of the watershed as highly susceptible to landslides.

4. Conclusions

Based on the results, the Weight of Evidence model shows a reasonably high capability in identifying landslide-prone areas with acceptable accuracy. It can serve as an effective tool in natural resource management, watershed planning, disaster risk reduction, spatial planning, and reducing vulnerability in high-risk areas. The findings of this study offer a practical tool for natural resource managers and local planners to prioritize protective actions, monitor critical areas, and guide infrastructure development and agricultural expansion in landslide-prone zones. Despite its effectiveness, the WoE model relies heavily on historical landslide data, and limited temporal precision or spatial data accuracy may affect results. Future research should consider integrating WoE with machine learning models like Random Forest or SVM, and using multitemporal satellite imagery to better capture landslide dynamics and land use changes.

5. Acknowledgment & Funding

The manuscript did not receive a grant from any organization.

6. Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

کاربست مدل احتمالاتی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی در شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در یک منطقه نیمه خشک در استان گلستان

امیرحسین قربانی^۱، صالح آرخی^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه مهندسی نقشه برداری-سیستم های اطلاعات مکانی، موسسه آموزش عالی لامعی گرگانی، گرگان، ایران. amirhoseynghorbani0551@gmail.com
۲- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران. s.arekhi@gu.ac.ir

چکیده

هدف: پژوهش حاضر با هدف پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز قرناوه واقع در شرق استان گلستان، با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شده است.

روش و داده: در این مطالعه، با استفاده از اطلاعات میدانی و بانک های اطلاعاتی موجود، موقعیت ۱۷۹ رخداد زمین لغزش برداشت شده که ۷۰ درصد آن ها برای مدل سازی و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل به کار گرفته شدند. چهارده عامل مؤثر شامل ارتفاع از سطح دریا، درجه شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، انحناء دامنه، انحناء آبراهه، زمین شناسی، کاربری اراضی، شاخص LS، شاخص رطوبت توپوگرافی در محیط های ArcGIS و SAGA-GIS استخراج و تحلیل شدند. تعیین میزان اهمیت هریک از عوامل مؤثر با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه انجام و نقشه حساسیت به وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز مطالعاتی تولید شد. ارزیابی دقت و کارایی مدل نیز با استفاده از منحنی ROC صورت پذیرفت.

یافته ها: نتایج نشان داد که عامل تراکم زهکشی و تراکم گسل به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را در وقوع خطر زمین لغزش در منطقه مطالعاتی به خود اختصاص داده اند. علاوه بر این، مناطق جنوبی و جنوب غربی حوضه به عنوان پهنه های با حساسیت بسیار بالا شناسایی برای وقوع خطر زمین لغزش شناسایی شد. دقت مدل وزن واقعه در تهیه نقشه حساسیت به وقوع زمین لغزش نیز برابر با ۷۹/۷ درصد برآورد شد.

نتیجه گیری: مدل وزن واقعه با دقت قابل قبولی، توانایی نسبتاً بالایی در شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش دارد و می تواند به عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت منابع طبیعی، طرح های آبخیزداری، کاهش ریسک بلایا، آمایش سرزمین و کاهش آسیب پذیری مناطق پرخطر مورد استفاده قرار گیرد.

نواوری، کاربرد نتایج: این پژوهش با به کارگیری مدل آماری وزن واقعه و رویکردی مکان محور و جامع با لحاظ عوامل مهم و مؤثر به پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در منطقه ای نیمه خشک پرداخته که می تواند به عنوان ابزاری مؤثر در شناسایی مناطق پرخطر و اولویت بندی اقدامات پیشگیرانه مورد استفاده قرار گیرد. این یافته ها برای نهادهای مسئول در زمینه منابع طبیعی، راه سازی و مدیریت بحران، کاربرد مستقیم در کاهش خسارات ناشی از زمین لغزش دارد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره: ۱۷

دوره: ۶۳

صفحه: ۲۴۶-۲۴۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۱

کلیدواژه ها:

- حوضه آبخیز قرناوه
- سامانه اطلاعات جغرافیایی
- مدل سازی مکانی
- مدل وزن واقعه
- نقشه حساسیت زمین لغزش

نحوه ارجاع به این مقاله:

قربانی، امیرحسین، آرخی، صالح. (۱۴۰۵). کاربرد مدل احتمالاتی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی در شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در یک منطقه نیمه خشک در استان گلستان. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۷(۶۳): ۲۴۶-۲۴۵.

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



نویسندگان حق نشر و حقوق انتشار کامل را حفظ می کنند.

۱- مقدمه

زمین لغزش‌ها از جمله مهم‌ترین حرکات توده‌ای هستند که سالانه خسارات گسترده‌ای به جوامع انسانی، زیرساخت‌ها و منابع طبیعی وارد می‌کنند و در نواحی کوهستانی و نیمه‌خشک با شدت بیش‌تری به وقوع می‌پیوندند (Pardeshi et al., 2013; Choi et al., 2013). این پدیده در اثر برهم خوردن تعادل نیروی برشی و وزن مواد دامنه و تحت تأثیر عواملی نظیر شیب، زمین‌شناسی، بارندگی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و مداخلات انسانی رخ می‌دهد (Segoni et al., 2018; Corominas et al., 2008). این مخاطره ژئومورفولوژیکی به طور ناگهانی و در مقیاس‌های مختلف رخ می‌دهد و می‌تواند پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی قابل توجهی به همراه داشته باشند (Sepahvand and Beiranvand, 2024). ماهیت پیچیده و چندعلتی این پدیده، ضرورت رویکردهای پیشگیرانه و علمی برای شناسایی و تحلیل مناطق پرخطر را دو چندان کرده است. با افزایش فشارهای انسانی بر محیط طبیعی، از جمله بهره‌برداری بی‌رویه از منابع زمینی، تغییرات کاربری اراضی و توسعه سازه‌های زیرساختی در نواحی ناپایدار، احتمال فعال شدن زمین‌لغزش‌ها افزایش یافته و مدیریت این خطر را به یکی از اولویت‌های برنامه‌ریزی محیطی تبدیل کرده است. در چنین شرایطی، تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش به منظور شناسایی نواحی مستعد وقوع لغزش، ابزاری کلیدی در ارزیابی ریسک و مدیریت کاربری سرزمین به شمار می‌آید (Mařka, 2021). این نقشه‌ها با تحلیل الگوی مکانی لغزش‌ها در ارتباط با عوامل مؤثر محیطی، زمینه‌ای مناسب برای تصمیم‌گیری آگاهانه در حوزه‌هایی نظیر برنامه‌ریزی کاربری زمین، حفاظت منابع طبیعی و توسعه پایدار برای مدیران، برنامه‌ریزان و نهادهای اجرایی فراهم می‌کنند (Shano et al., 2020; Raghuvanshi et al., 2014). با این حال، انجام چنین تحلیل‌هایی با روش‌های سنتی، بسیار زمان‌بر و پرهزینه است و مستلزم استفاده از ابزارهای پیشرفته‌تر است. در این میان، سامانه اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزاری توانمند در جمع‌آوری، مدیریت، تحلیل و نمایش داده‌های مکانی، نقش بی‌بدیلی در مدل‌سازی مکانی مخاطرات طبیعی مانند سیل، فرسایش خاک و زمین‌لغزش ایفا می‌کند (Calvello & Ciurleo, 2018). این سامانه امکان تلفیق لایه‌های اطلاعاتی متنوع نظیر شیب، ارتفاع از سطح دریا، کاربری اراضی، فاصله از گسل، جاده و رودخانه را فراهم کرده و بستری مناسب برای اجرای مدل‌های آماری و احتمالاتی و تهیه نقشه‌های حساسیت فراهم می‌آورد. کاربرد مدل‌های آماری و احتمالاتی، به ویژه در بستر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، امکان تحلیل کمی رابطه بین وقوع زمین‌لغزش و متغیرهای محیطی را فراهم کرده و فرآیند مدل‌سازی را از سطح کیفی به سطح کمی ارتقاء داده است. این رویکردها با استفاده از داده‌های مکانی و بهره‌گیری از قابلیت‌های تحلیلی GIS، قادرند ساختارهای پیچیده فضایی و وابستگی‌های احتمالی بین پدیده‌ها را شناسایی کرده و به پیش‌بینی دقیق‌تر مناطق پرخطر کمک کنند. استفاده از این مدل‌ها نه تنها به بهینه‌سازی منابع و زمان می‌انجامد؛ بلکه با افزایش دقت تحلیل‌ها، نقش مؤثری در کاهش خسارات و ارتقای تاب‌آوری محیطی ایفا می‌کند (Mohammadi & Sasanpour, 2021). از جمله مدل‌های آماری و احتمالاتی پرکاربرد در این زمینه، مدل وزن واقع است که مبتنی بر نظریه بیز^۲ بوده و رابطه آماری بین پراکنش زمین‌لغزش‌ها و عوامل محیطی را کمی‌سازی می‌کند (Ramesh et al., 2021). این مدل به ویژه در مناطقی که داده‌های پیچیده یا حجیم در دسترس نیست، به دلیل سادگی، شفافیت و قابلیت تفسیر بالا، مورد توجه قرار گرفته است.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به مدل‌سازی مکانی مخاطرات محیطی از جمله زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های مختلف مبتنی بر سامانه اطلاعات مکانی از جمله مدل وزن واقع پرداخته‌اند. در همین ارتباط، ابراهیمی و همکاران در حوضه سیاه‌بیشه عملکرد مناسب مدل WoE را در پیش‌بینی مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش گزارش نمودند (Ebrahimi et al., 2017). عرب‌عامری و همکاران در حوضه ونک اصفهان، با مقایسه مدل‌های نسبت فراوانی^۳ و وزن واقع (WoE)^۴، تفاوت عملکرد این مدل‌ها را وابسته به شرایط منطقه‌ای دانستند (Arabameri et al., 2017). گلی‌مختاری و ناعمی‌تبار در شهرستان کلات استان خراسان رضوی با استفاده از WoE و مقایسه آن با دو مدل دیگر، دقت مدل را ۸۷/۸ درصد گزارش کردند و آن را ابزاری مناسب برای مناطق نیمه‌خشک معرفی نمودند (Goli Mokhtari & Naemi Tabar, 2022). در سطح بین‌المللی رحمان و همکاران در دره شاهپور^۵ در شرق هندوکش (Rahman et al., 2020)، و همچنین مرشا و متن در منطقه سیمادا^۶ اتیوپی (Merish & Meten, 2020) نشان دادند که مدل WoE به ویژه برای محیط‌های فاقد داده‌های دقیق، عملکرد مطلوبی دارد. ازدیمیر و آلتورال در کشور ترکیه WoE را مدلی پایدار و قابل اتکا برای

1. Geographic Information System (GIS)
2. Bayes
3. Frequency Ratio (FR)

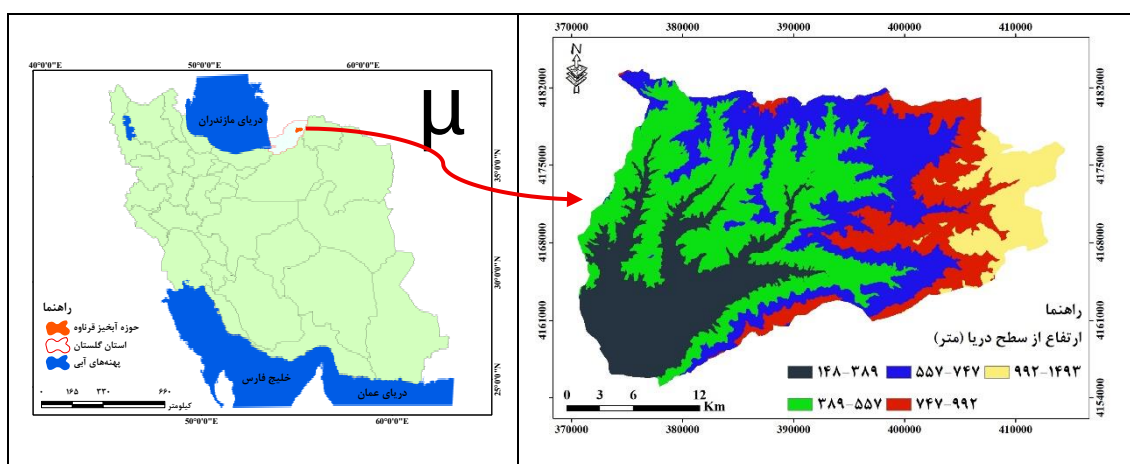
4. Weight of Evidence, WoE
5. Shahpur
6. Simada

مناطق کوهستانی معرفی کردند (Ozdemir & Altural, 2013). مطالعات بندری و همکاران در کشور نپال (Bhandari et al., 2024)، سنوسی و همکاران در کشور الجزایر (Senouci et al., 2021) و وانگ و همکاران در کشور چین (Wang et al., 2020) هم نشان می‌دهند که اگرچه مدل‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی یا ماشین بردار پشتیبان دقت بالاتری ارائه می‌دهند؛ اما مدل‌های ساده‌تر مانند وزن واقعه، به ویژه در مناطق دارای داده محدود، همچنان کارایی بالا و قابلیت کاربردی قابل توجهی دارند. خادکا و همکاران با بهره‌گیری از چهار روش آماری شامل WoE، عامل اطمینان (CF)، FR و شاخص آماری (SI)، حساسیت زمین‌لغزش را در محدوده‌ای به شعاع ۱۰ کیلومتر از مسیر پیشنهادی راه‌آهن چین-نپال ارزیابی کردند. یافته‌ها نشان داد مدل WoE با دقت ۸۲/۹ درصد، عملکرد قابل‌قبولی داشته و به عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت خطر زمین‌لغزش و برنامه‌ریزی پروژه‌های زیرساختی در مناطق کوهستانی قابل استفاده است (Khadka et al., 2025). در مطالعه‌ای توسط ژائو و همکاران، حساسیت زمین‌لغزش در شهرستان شیائوجین چین با استفاده از سه مدل شامل وزن واقعه، جنگل تصادفی بهینه‌شده و شبکه تابع پایه شعاعی بررسی شد (Zhao et al., 2025). نتایج نشان داد مدل WoE با دقت بسیار بالا برابر با ۰/۸۹۹ برای آموزش و ۰/۸۹۲ برای اعتبارسنجی نسبت به مدل‌های یادگیری ماشین عملکرد بهتری داشته است. این یافته‌ها اهمیت به کارگیری مدل WoE در نواحی کوهستانی با شرایط زمین‌شناسی پیچیده را نشان می‌دهد. با وجود این حجم از پژوهش‌ها، بیش‌تر مطالعات یاد شده در مناطقی با اقلیم مرطوب یا جنگلی صورت گرفته‌اند و کاربرد مدل WoE در مناطق نیمه‌خشک یا خاک‌های لسی که ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و اقلیمی خاصی دارند، کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته است. شدت و گستره خسارات ناشی از پدیده زمین‌لغزش، به ویژه در نواحی دارای شیب، ساختار زمین‌شناسی ناپایدار، کاربری ناپایدار زمین و فشارهای انسانی، ضرورت شناخت دقیق نواحی پرخطر را دوچندان کرده است. در چنین بستری، شناسایی و تحلیل مناطق مستعد زمین‌لغزش، نه تنها یک نیاز علمی؛ بلکه ابزاری راهبردی در مدیریت ریسک، برنامه‌ریزی کاربری سرزمین، حفاظت منابع و توسعه پایدار محسوب می‌شود (Abdullahzadeh et al., 2014). نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش به عنوان خروجی این نوع تحلیل‌ها، زمینه‌ساز تدوین سیاست‌های پیشگیرانه، اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی، ارزیابی ریسک پروژه‌های عمرانی و کاهش خسارات بالقوه می‌شوند (Esfandiary Darabad et al., 2024a). با توجه به ماهیت پیچیده، مکانی و چندعاملی زمین‌لغزش‌ها، بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته مانند مدل‌های آماری و احتمالاتی در بستر سامانه اطلاعات جغرافیایی به یکی از رویکردهای نوین و مؤثر در این حوزه تبدیل شده است. این رویکردها امکان تحلیل هم‌زمان داده‌های مکانی متنوع و استخراج روابط آماری میان وقوع زمین‌لغزش و عوامل مؤثر محیطی را فراهم می‌سازند. مدل‌های احتمالاتی از جمله ابزارهایی هستند که با تکیه بر توزیع فضایی داده‌های تاریخی زمین‌لغزش، به کمک داده‌های مکانی، روندهای پنهان را آشکار ساخته و مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم می‌کنند. تلفیق این مدل‌ها با توانمندی‌های تحلیلی GIS مسیر را برای تولید نقشه‌های دقیق و کاربردی هموار کرده است؛ نقشه‌هایی که می‌توانند به عنوان سندی کلیدی در سیاست‌گذاری توسعه منطقه‌ای، کاهش خطرپذیری و ارتقاء تاب‌آوری جوامع محلی به کار روند (Esfandiary Darabad et al., 2024b). بر همین اساس، منطقه قرناوه در شرق استان گلستان، به دلیل ویژگی‌هایی هم‌چون شیب تند، خاک‌های فرسایش‌پذیر، توسعه کشاورزی دیم و مداخلات انسانی گسترده، از جمله نواحی با حساسیت بالا برای وقوع زمین‌لغزش است که تاکنون مطالعه جامعی برای مدل‌سازی مکانی با مدل‌های آماری و احتمالاتی در آن صورت نگرفته است. با توجه به اهمیت شناسایی نواحی پرخطر در مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی و کارایی مدل‌های آماری و احتمالاتی در بستر داده‌های مکانی، پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبخیز قرناوه واقع در شرق استان گلستان، با استفاده از مدل وزن واقعه طراحی شده است. در این راستا، با بهره‌گیری از چهارده عامل مؤثر و با اتکا بر توانمندی‌های تحلیلی سامانه اطلاعات جغرافیایی، سعی شده است تا با مدل‌سازی مکانی دقیق، نقشه‌ای کاربردی از نواحی مستعد وقوع زمین‌لغزش ارائه شود. نقش محوری GIS در این پژوهش، نه تنها در تلفیق و تحلیل داده‌های متنوع محیطی؛ بلکه در تسهیل اجرای مدل آماری و نمایش نتایج در قالب نقشه‌های راهبردی، حائز اهمیت بوده و زمینه‌ساز به کارگیری نتایج در فرآیندهای مدیریت خطر، برنامه‌ریزی کاربری سرزمین و توسعه پایدار خواهد بود.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

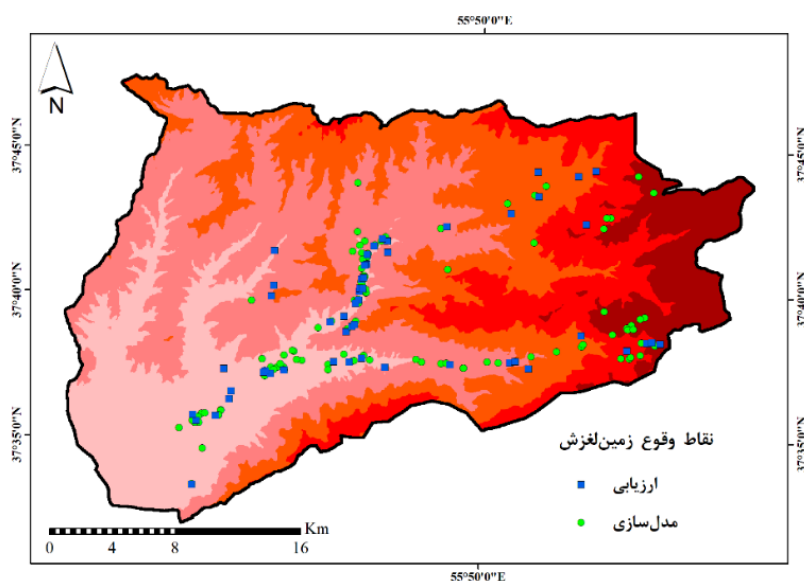
حوضه آبخیز قرناوه به عنوان یکی از زیرحوضه‌های آبخیز گرگانود در شمال شرق کشور با مساحتی حدود ۷۸۱ کیلومترمربع در شهرستان مراوه‌تپه استان گلستان به سبب وجود خاک‌های با فرسایش‌پذیری بالا، پوشش گیاهی ضعیف و پتانسیل بالای وقوع زمین‌لغزش به عنوان منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر انتخاب شد. حداقل و حداکثر ارتفاع در منطقه مورد پژوهش به ترتیب برابر با ۱۴۸ و ۱۴۹۳ متر از سطح دریا است. حوضه آبخیز قرناوه از توپوگرافی ناهموار برخوردار است که شیب متوسط آن برابر با ۲۶ درصد است و در بخش‌های پایین‌دست کاهش می‌یابد. بر اساس گزارش‌های سازمان هواشناسی، متوسط بارندگی در حوضه قرناوه حدود ۴۱۸ میلی‌متر است. کاربری اراضی غالب منطقه زراعت دیم است و بخش‌های زیادی از منطقه هم به صورت مرتع در حال بهره‌برداری است (Saber Chenari et al., 2016). خاک حوضه عمدتاً سیلتی لومی و از نظر زمین‌شناسی نیز عمدتاً به وسیله رسوبات بادی-یخچالی مثل لس و رسوبات جدید و قدیم آبرفتی پوشیده شده است. خاک‌های لسی به عنوان یکی از مهم‌ترین گروه خاک‌های رمنده، پوشش اصلی بخش شمالی شهرستان مراوه‌تپه استان گلستان را تشکیل می‌دهند (Hafezi Moghaddas et al., 2011). حوضه آبریز قرناوه به طور ذاتی دارای فرسایش‌پذیری بالایی است و در برخی مناطق دارای آبراهه‌هایی با عمق زیاد و دیواره‌های عمودی است. لازم به اشاره است که حوضه آبخیز مورد پژوهش در مختصات ۳۷ درجه و ۴۰ دقیقه و ۵۰/۵ ثانیه شمالی و ۵۵ درجه و ۵۱ دقیقه و ۵۶/۵ ثانیه شرقی واقع شده است. موقعیت حوضه آبخیز مورد پژوهش در کشور ایران و استان گلستان در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز قرناوه در ایران و استان گلستان

۲-۲- روش پژوهش

در راستای انجام پژوهش حاضر و با هدف پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز قرناوه در شرق استان گلستان، موقعیت مکانی رخدادهای زمین‌لغزش طی بازدیدهای صحرایی و اطلاعات موجود در سازمان‌ها و ادارات ذیربط از جمله اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان دریافت شد. داده‌ها و اطلاعات موجود در بانک اطلاعاتی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان و نیز بازدیدهای صحرایی به منظور تهیه نقشه پراکنش مکانی زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته در منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفت. در همین راستا، از ۱۷۹ زمین‌لغزش برداشت شده، ۱۲۵ زمین‌لغزش و معادل ۷۰ درصد کل برای مرحله مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. ۳۰ درصد باقی‌مانده که معادل ۵۴ نقطه زمین‌لغزش است برای ارزیابی مدل‌های مورد استفاده مدنظر قرار گرفت. شکل ۲ نقشه پراکنش نقاط زمین‌لغزش را در حوضه آبخیز قرناوه در استان گلستان نشان می‌دهد.



شکل ۲. نقشه پراکنش نقاط زمین لغزش را در حوضه آبخیز قرناوه در استان گلستان

۲-۲-۱ تهیه عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش

عوامل مختلفی بر وقوع زمین لغزش تأثیر می‌گذارند که با توجه به بررسی مطالعات صورت گرفته در خصوص مدل سازی مکانی خطر وقوع زمین لغزش در دنیا و ایران (Dastranj et al., 2024; Hanifinia & Abghari, 2022; Ado et al., 2022) و نیز با توجه به موجودیت داده‌های مکانی در منطقه قرناوه شهرستان مراوه‌تپه استان گلستان، ۱۴ عامل مؤثر شامل ارتفاع از سطح دریا، جهت شیب، شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنا سطح، انحنا آبراهه، کاربری اراضی، زمین شناسی، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از جاده و عامل LS در پژوهش حاضر مدنظر قرار گرفت (Rostamizad & Dastranj, 2024). ارتفاع از سطح دریا به عنوان یکی از عوامل مؤثر در بروز زمین لغزش شناخته می‌شود؛ زیرا ویژگی‌های اقلیمی، نوع پوشش گیاهی و فرسایش پذیری خاک در ارتفاعات مختلف تغییر می‌کند. در این پژوهش، نقشه مدل رقومی ارتفاعی^۱ با دقت مکانی ۳۰ متر از تصاویر ماهواره ASTER استخراج شد. عوامل مبتنی بر مدل رقومی ارتفاع شامل درجه شیب (تأثیر بر ناپایداری دامنه)، جهت شیب (تعیین میزان دریافت تابش خورشید، نوع و تراکم پوشش گیاهی و رطوبت خاک)، انحنا دامنه (نقش در پایداری شیب با تمرکز یا پخش آب) و انحنا آبراهه (مشخص نمودن مسیر جریان سطحی و مؤثر بر تمرکز یا پخش آب) در محیط ArcMap 10.8.1 و شاخص رطوبت توپوگرافی (نمایش تجمع رطوبت در زمین) و شاخص LS (ترکیبی از طول و میزان شیب است و تأثیر بر فرسایش خاک و ناپایداری زمین) در محیط SAGA-GIS تهیه شدند. فاصله از رودخانه‌ها به دلیل تأثیر فرسایش کناری رودخانه‌ها بر پایداری دامنه‌ها در پژوهش حاضر در نظر گرفته شد. تعداد رودخانه‌ها در واحد سطح در قالب تراکم زهکشی و به عنوان یک معیار مؤثر بر وقوع زمین لغزش است. تراکم گسل‌ها و فاصله از گسل‌ها (افزایش ارتفاعات زمین) باعث شکستگی و تضعیف ساختار زمین می‌شود که به افزایش احتمال زمین لغزش منجر می‌گردد. عوامل ارائه شده مرتبط با رودخانه و گسل در محیط ArcGIS تولید شد. راه‌سازی معمولاً با خاک‌برداری، قطع پوشش گیاهی و ایجاد ناپایداری در شیب‌ها همراه است که بر وقوع زمین لغزش اثر می‌گذارد. نوع کاربری زمین نقش مهمی در پایداری یا ناپایداری مناطق مختلف دارد. اراضی کشاورزی، مناطق بدون پوشش یا مناطق مسکونی معمولاً حساس‌ترند. در پژوهش حاضر از نقشه کاربری اراضی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان استفاده شد. نوع و ساختار زمین شناسی نیز تأثیر مستقیمی بر میزان مقاومت زمین در برابر لغزش دارد. نقشه زمین شناسی سازمان زمین شناسی کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در این پژوهش مدنظر قرار گرفت. لازم به توضیح است که عوامل کمی مدنظر در پژوهش حاضر با استفاده از الگوریتم شکستگی‌های طبیعی به طبقات مختلف برای تحلیل‌های بیش‌تر تقسیم شدند. در گام بعد، میزان اهمیت هریک از عوامل مؤثر و طبقات مربوط به آن‌ها با استفاده از مدل وزن واقعه و به صورت ذیل تعیین شدند.

1. Digital Elevation Model, DEM

۲-۲-۲ اجرای مدل وزن واقعه

مدل وزن واقعه یکی از روش‌های متداول در مدل‌سازی مکانی برای ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش است که بر پایه احتمالات بیزین عمل می‌کند (Getachew & Meten, 2021). این روش بر اساس ارتباط بین رخداد‌های زمین‌لغزش و عوامل مؤثر بر آن کار می‌کند. در این مدل، هدف اصلی تعیین اهمیت نسبی هر یک از این عوامل بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی خطر است. این روش از داده‌های گذشته برای ایجاد مدلی استفاده می‌کند که می‌تواند مناطق با احتمال بالای وقوع زمین‌لغزش را مشخص کند. رابطه احتمال بیز به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (Kamiński, 2020).

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \times P(A)}{P(A)} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، $P(A|B)$ احتمال رخداد A به احتمال وقوع B است این روش بر اساس وزن‌های مثبت (W^+) و منفی (W^-) محاسبه می‌شود. وزن مثبت نشان‌دهنده همبستگی مثبت عوامل مؤثر با زمین‌لغزش در منطقه مطالعه است. این روش وزن عوامل مؤثر (A) را بر اساس حضور یا عدم حضور زمین‌لغزش (B) در منطقه مطالعه محاسبه می‌کند. وزن‌های مثبت و منفی بر اساس روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند (Pourghasemi et al., 2013).

$$W_i^+ = \ln \frac{P\{B|A\}}{P\{\bar{B}|A\}} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$W_i^- = \ln \frac{P\{\bar{B}|A\}}{P\{B|\bar{A}\}} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، B و $\bar{B}$ به ترتیب حضور و عدم حضور عوامل مؤثر، A و $\bar{A}$ به ترتیب حضور و عدم حضور زمین‌لغزش هستند. اختلاف وزن که با تفاوت بین دو وزن مثبت و منفی ($C=W^+-W^-$) محاسبه می‌شود، نشان‌دهنده ارتباط فضایی بین متغیرهای قابل پیش‌بینی و زمین‌لغزش است. در گام بعد، انحراف معیار W به صورت رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$(C) = \sqrt{S^2W^+ + S^2W^-} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه، $S(W^+)$ واریانس وزن‌های مثبت و $S(W^-)$ واریانس وزن‌های منفی است. واریانس‌های وزن‌ها می‌تواند با استفاده از روابط ۵ و ۶ و وزن نهایی نیز براساس رابطه ۷ محاسبه شوند.

$$S^2W^+ = \frac{1}{N\{B \cap A\}} + \frac{1}{B \cap \bar{A}} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$S^2W^- = \frac{1}{N\{\bar{B} \cap A\}} + \frac{1}{\bar{B} \cap \bar{A}} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$W_{\text{final}} = \frac{C}{S(C)} \quad \text{رابطه ۷}$$

وزن نهایی W_{final} نشان‌دهنده اطمینان است و به عنوان نسبت اختلاف وزن مثبت و منفی به انحراف معیار آن تعریف می‌شود (Ilia et al., 2016). پس از تعیین میزان اهمیت هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز قرناوه در استان گلستان با استفاده از مدل وزن واقعه، تهیه نقشه حساسیت به زمین‌لغزش در منطقه مورد پژوهش با به‌کارگیری دستور Weighted Sum در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شد (Karimi Sangchini et al., 2024).

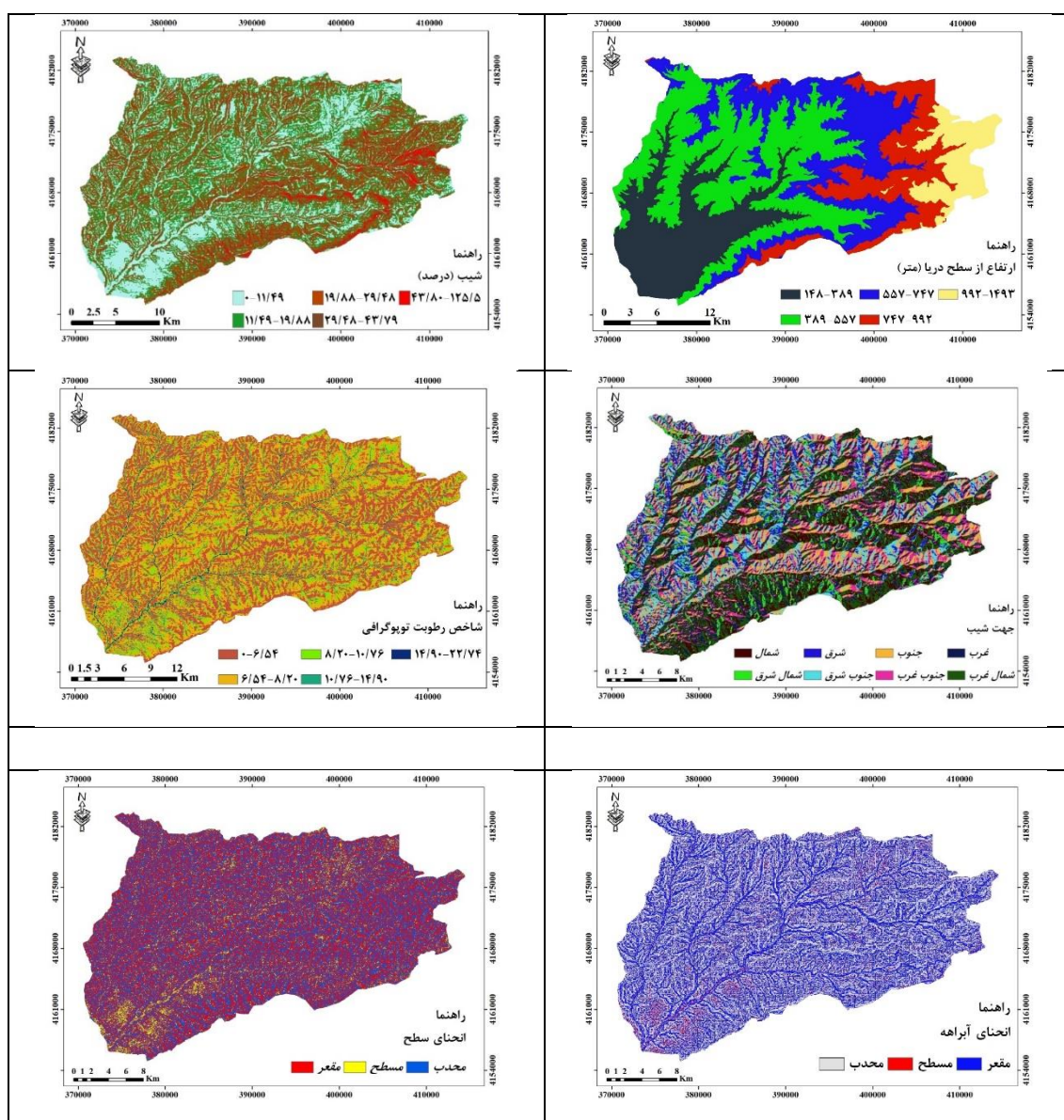
۲-۲-۳ ارزیابی نتایج مدل وزن واقعه در مدل‌سازی مکانی خطر وقوع زمین‌لغزش

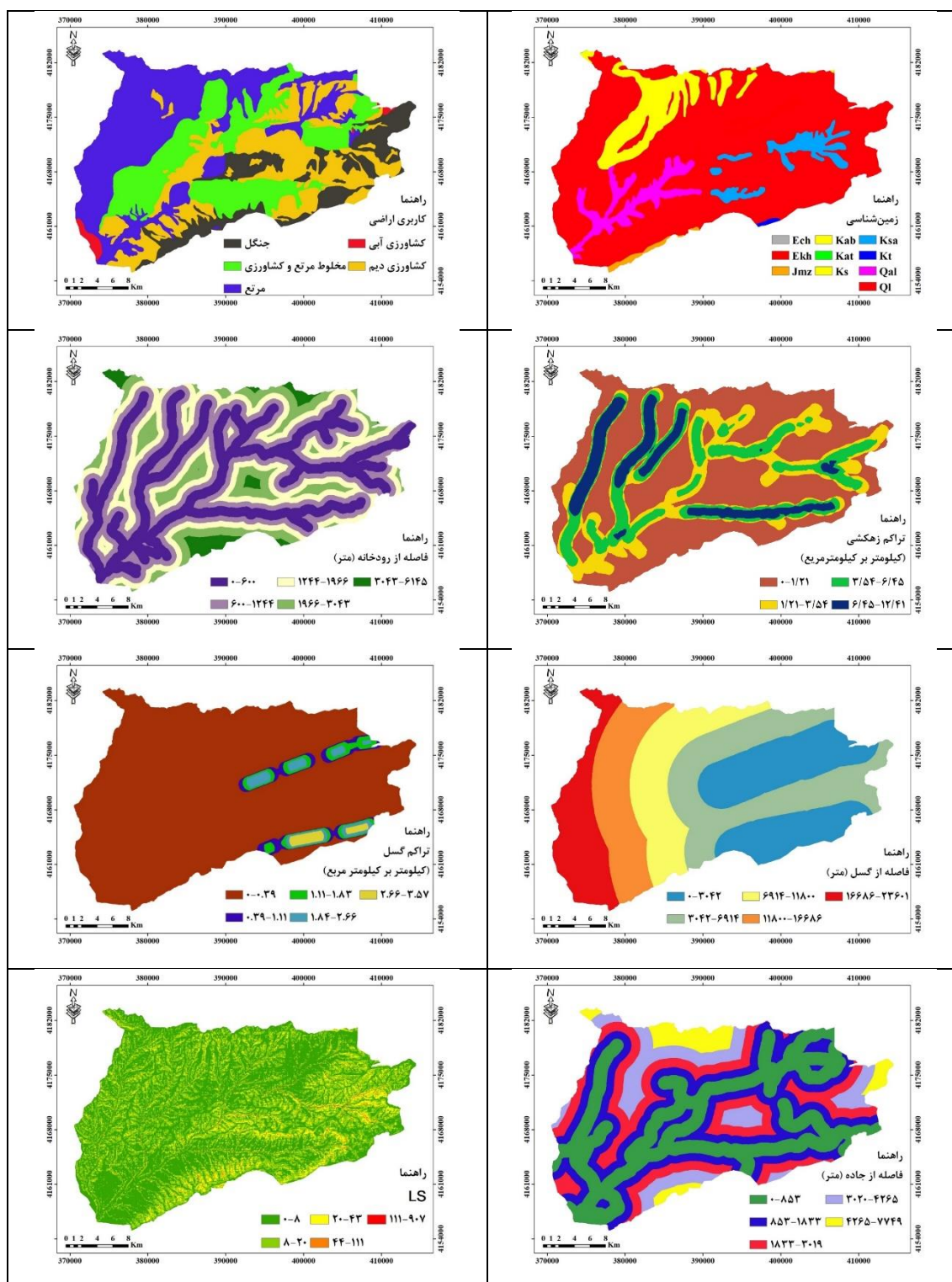
به منظور ارزیابی مدل‌های مورد استفاده در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبخیز قرناوه در استان گلستان از منحنی عملکرد نسبی استفاده شد. منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌هاست. سطح زیر منحنی تشخیص عملکرد نسبی، بیان‌گر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین‌لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین‌لغزش) آن است (Karimi Sangchini et al., 2024; Cantarino et al., 2019).

ایده‌آل‌ترین مدل، بیش‌ترین سطح زیر منحنی^۱ را دارد و مقادیر سطح زیر منحنی از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. هر چه سطح زیرمنحنی به یک نزدیک‌تر باشد، بیان‌گر بهترین دقت از نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده است (Zêzere et al., 2017). استفاده از منحنی ROC و AUC در فرآیند تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و کاهش ریسک‌های ناشی از این پدیده کمک کند (Karimi Sangchini et al., 2024).

۳- یافته‌ها

نتایج تهیه نقشه‌های عوامل مورد استفاده در مدل‌سازی زمین‌لغزش با مدل وزن واقعه به منظور شناسایی مناطق مستعد وقوع خطر زمین لغزش در آبخیز قرناوه استان گلستان در شکل ۳ ارائه شده است.





شکل ۳. عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز قرناوه استان گلستان

یافته‌های محاسبه و تعیین میزان اهمیت عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز قرناوه در شرق استان گلستان با استفاده از مدل وزن واقعه در جدول ۱ ارائه شده است.

بر اساس یافته‌های ارائه شده در جدول ۱، برخی عوامل محیطی و طبیعی در حوضه آبخیز قرناوه استان گلستان نسبت به سایر عوامل نقش برجسته‌تری در وقوع زمین‌لغزش دارند. ارتفاع از سطح دریا در طبقه ۱۴۸ تا ۳۸۹ متر با مقدار Woe برابر ۹/۵ بیش‌ترین همبستگی با

وقوع زمین لغزش‌ها (تعداد ۷۴ رخداد) را داشته است، در حالی که طبقات بالاتر از ۵۵۸ متر مقادیر منفی WoE دارند که بیانگر کاهش احتمال لغزش در ارتفاعات بالاتر است. این موضوع ممکن است با جنس زمین، پوشش گیاهی یا پایداری بیش‌تر شیب‌ها در این ارتفاعات مرتبط باشد. از نظر جهت شیب، بیش‌ترین احتمال وقوع زمین لغزش در دامنه‌های جنوب (۲۴ لغزش) و جنوب شرق (۲۱ لغزش) مشاهده شده که دارای مقدار WoE برابر ۱/۴ بوده‌اند. این جهت‌ها معمولاً دریافت‌کننده تابش بیشتر خورشید هستند که می‌تواند بر خشک شدن خاک و کاهش مقاومت برشی آن تأثیر بگذارد. در مقابل، دامنه‌های شمال شرق و غرب دارای مقادیر منفی هستند که به معنی احتمال پایین‌تر وقوع لغزش در آن‌هاست (با WoE برابر ۱/۴-). جهت شیب با تابش، رطوبت و پوشش گیاهی در ارتباط است که همگی بر پایداری شیب مؤثرند. در خصوص شیب زمین، شیب‌های کم (۰ تا ۱۱/۴۹ درصد) بیش‌ترین احتمال وقوع زمین لغزش را نشان داده‌اند (۴۹ رخداد و وزن واقعه برابر با ۳/۵)، در حالی که شیب‌های خیلی تند (بیش از ۴۳/۸ درصد) با وجود حساسیت بالقوه، تنها یک لغزش ثبت شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که در منطقه مطالعاتی، زمین لغزش‌ها بیش‌تر در شیب‌های ملایم‌تر که ممکن است با لایه‌های ضخیم‌تر خاک همراه باشند رخ داده‌اند، نه در شیب‌های تند که خاک کم‌تر و مقاومت مکانیکی بیش‌تر دارند. در بین متغیرهای هیدروژئومورفولوژیک، شاخص رطوبت توپوگرافی¹ (TWI) و تراکم زهکشی نقش مهمی دارند. شاخص TWI در بازه ۱۴/۹۱ تا ۲۲/۷۴ (۱۶ لغزش) دارای WoE برابر ۸/۳ است و نشان می‌دهد که مناطق با تجمع آب بیش‌تر مستعد لغزش‌اند. به طور مشابه، تراکم زهکشی بالا (۳/۵۵ تا ۶/۴۵) با وزن واقعه برابر با ۹/۸ و ۶۵ مورد زمین لغزش بیش‌ترین ارتباط را با وقوع زمین لغزش دارد. این متغیرها از طریق تأثیر بر میزان اشباع خاک و فرسایش، پایداری دامنه را کاهش می‌دهند. از نظر انسانی-ساختاری، فاصله از رودخانه (صفر تا ۶۰۰ متر)، فاصله از جاده (صفر تا ۸۵۳ متر) و زمین‌شناسی نهشته‌های آبرفتی Q_{al} و Q_s بیش‌ترین همبستگی مثبت را با وقوع لغزش دارند (به ترتیب با WoE برابر با ۹/۵، ۹/۴ و ۶/۶). این نتیجه نشان می‌دهد که نزدیکی به عوامل تخریبی انسانی و مناطق با نهشته‌های سست تأثیر قابل توجهی در افزایش خطر لغزش دارد. در مقابل، زمین لغزش‌ها در فاصله‌های دورتر از رودخانه و جاده یا روی سازندهای مقاوم مانند Q_i بسیار کم‌تر گزارش شده‌اند که این مسئله اهمیت شرایط زمین‌شناسی و فشارهای انسانی را در وقوع این پدیده برجسته می‌سازد.

جدول ۱. نتایج محاسبه میزان اهمیت عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل وزن واقعه در حوضه آبخیز قرناوه در استان گلستان

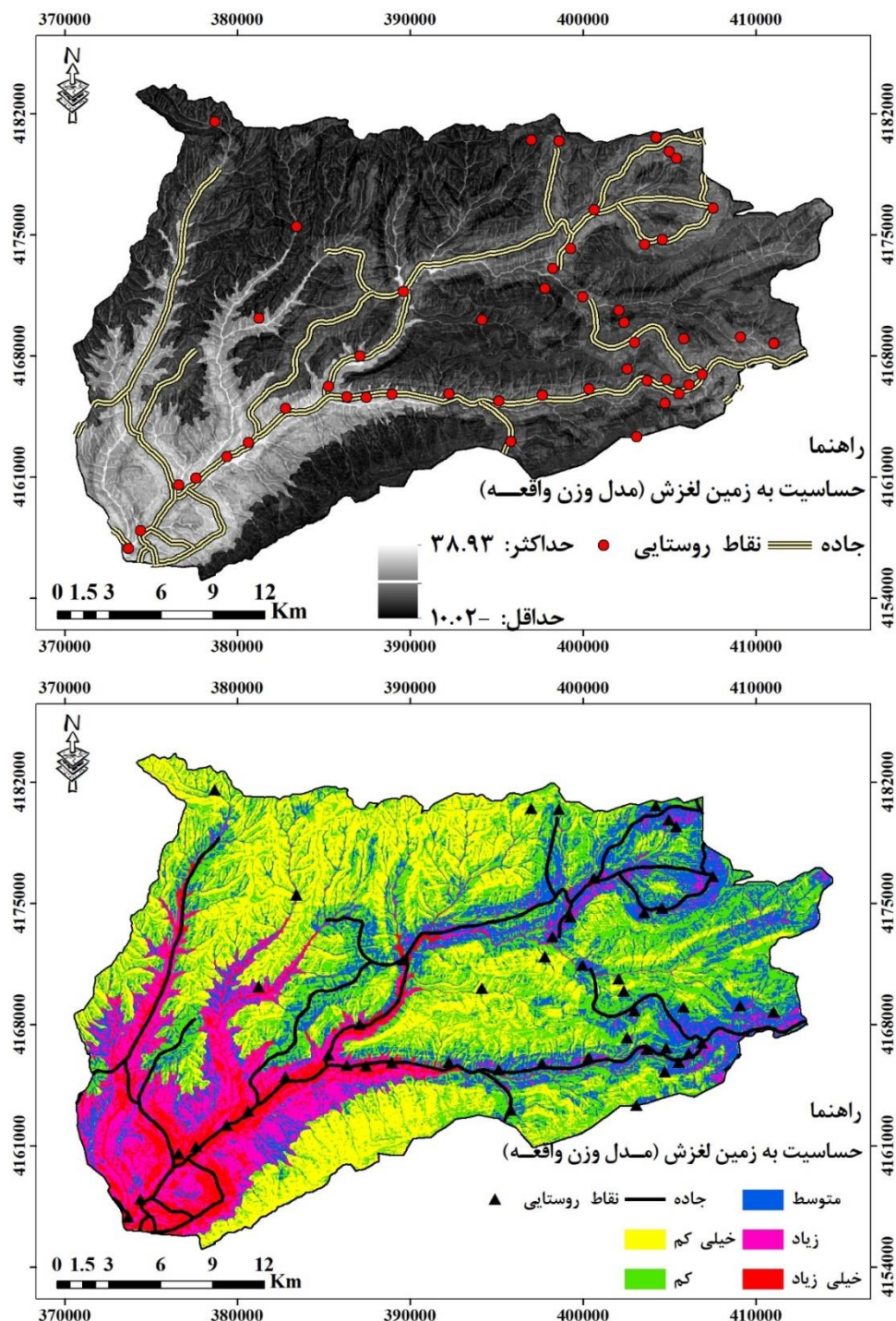
عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد زمین لغزش	W ⁺	W ⁻	U	S ² (W ⁺)	S ² (W ⁻)	S(C)	WoE
ارتفاع از سطح دریا (متر)	۱۴۸-۳۸۹	۱۷۹۹۸۹	۷۴	۱/۱	-۰/۷	۱/۷	۰/۰	۰/۰	۰/۲	۹/۵
	۳۹۰-۵۵۷	۲۸۶۸۱۷	۲۱	-	۰/۲	-	۰/۰	۰/۰	۰/۲	-
	۵۵۸-۷۴۷	۲۱۴۹۵۳	۹	-	۰/۲	-	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۳/۷
	۷۴۸-۹۹۲	۱۲۵۱۰۴	۹	-	۰/۱	-	۰/۱	۰/۰	۰/۳	-
	۹۹۳-۱۴۹۳	۷۰۲۳۲	۱۲	۰/۲	۰/۰	۰/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۲/۲
	۱۴۹۳-۱۷۹۳	۱۱۴۲۳۹	۱۳	۰/۲	۰/۰	-	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۰/۷
جهت شیب	شمال	۱۱۴۲۳۹	۱۳	۰/۲	۰/۰	-	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۰/۹
	شمال شرق	۶۳۷۳۶	۵	۰/۶	۰/۰	-	۰/۲	۰/۰	۰/۵	-
	شرق	۸۲۰۵۴	۱۰	۰/۲	۰/۰	-	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۱/۴
	جنوب شرق	۱۱۰۸۲۹	۲۱	۰/۳	۰/۰	۰/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۲	-
	جنوب	۱۲۸۸۵۰	۲۴	۰/۳	-۰/۱	-	۰/۳	۰/۰	۰/۲	۰/۵
	جنوب غرب	۱۱۱۲۴۶	۱۹	۰/۲	۰/۰	۰/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۲	۱/۴
	غرب	۱۲۹۰۹۵	۱۳	۰/۳	۰/۰	-	۰/۱	۰/۰	۰/۳	-
	شمال غرب	۱۱۱۲۴۶	۱۹	۰/۲	۰/۰	۰/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۲	۰/۸

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد زمین لغزش	W+	W-	C	S ² (W+)	S ² (W-)	S(C)	WofE
شیب (%)	شمال غرب	۱۳۷۰۴۶	۲۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۰	۰/۲	۰/۱
	۰-۱۱/۴۹	۲۲۳۶۹۲	۴۹	۰/۴	۰/۲	-	۰/۶	۰/۰	۰/۲	۳/۵
	۱۱/۵۰-۱۹/۸۸	۲۸۵۵۸۴	۴۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۲	-
	۱۹/۸۹-۲۹/۴۸	۲۲۴۲۹۷	۱۸	-	۰/۱	-	۰/۷	۰/۱	۰/۳	-
	۲۹/۴۹-۴۳/۷۹	۱۱۴۹۳۸	۱۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۳	۲/۸
	۴۳/۸۰-۱۲۵/۵	۲۸۵۸۴	۱	-	۰/۰	-	۰/۰	۱/۰	۱/۰	-
	۰-۶/۵۴	۳۷۸۲۴۲	۴۰	-	۰/۲	-	۰/۵	۰/۰	۰/۲	-
	۶/۵۵-۸/۲۰	۳۲۱۶۳۳	۳۸	-	۰/۱	-	۰/۳	۰/۰	۰/۲	-
	۸/۲۱-۱۰/۷۶	۱۲۰۹۸۸	۲۱	۰/۲	۰/۰	۰/۲	۰/۵	۰/۱	۰/۳	۱/۵
	۱۰/۷۷-۱۴/۹۰	۴۲۵۱۳	۱۰	۰/۵	۰/۰	۰/۵	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۱/۰
شاخص رطوبت توپوگرافی	۱۴/۹۱-۲۲/۷۴	۱۴۷۱۹	۱۶	۲/۱	-	۲/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۸/۳
	مقعر	۳۹۸۶۳۱	۵۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۲	۰/۰
	مسطح	۶۴۵۲۵	۱۶	۰/۶	-	۰/۶	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۲/۳
	محدب	۴۱۳۹۳۹	۵۲	۰/۱	-	۰/۱	۰/۲	۰/۰	۰/۲	-
	محدب	۴۱۷۸۹۷	۴۰	۰/۴	-	۰/۳	۰/۷	۰/۰	۰/۲	-
	مسطح	۳۳۵۱۴	۴	۰/۲	-	۰/۰	۰/۲	۰/۳	۰/۵	-
	مقعر	۴۲۵۶۸۴	۸۱	۰/۳	-	۰/۷	۰/۴	۰/۰	۰/۲	۳/۶
	جنگل	۱۱۷۷۱۶	۴	۱/۴	-	۱/۵	۰/۱	۰/۳	۰/۵	-
	مخلوط مرتع و کشاورزی	۲۲۰۲۶۲	۴۵	۰/۴	-	۰/۵	۰/۲	۰/۰	۰/۲	۲/۸
	مرتع	۳۰۶۱۵۸	۴۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۲	۰/۱
کاربری اراضی	کشاورزی آبی	۸۰۹۵	۰	-	۰/۰	-	۰/۰	-	-	-
	کشاورزی دیم	۲۲۴۸۶۴	۳۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۲	۰/۰
	Ech	۴۵	۰	-	۰/۰	-	-	-	-	-
	Ekh	۱۵۰۶۹	۱۳	۱/۸	-	۱/۹	۰/۱	۰/۰	۰/۳	۶/۵
	Jmz	۶۴۰۹	۰	-	۰/۰	-	-	-	-	-
	Kab	۱۵۹	۰	-	۰/۰	-	-	-	-	-
	Kat	۳۵	۰	-	۰/۰	-	-	-	-	-
	Ks	۸۸۷۳۴	۰	-	۰/۱	-	-	-	-	-
	Ksa	۴۱۵۲۷	۷	۰/۲	۰/۰	۰/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۴	۰/۵
	Kt	۱۷۳۴	۰	-	۰/۰	-	-	-	-	-
زمین شناسی	Q _{al}	۵۳۵۸۵	۲۷	۱/۳	-	۱/۴	۰/۲	۰/۰	۰/۲	۶/۶
	Q _l	۶۶۹۷۹۸	۷۸	۰/۲	-	۰/۷	۰/۱	۰/۰	۰/۲	-
	۰-۶۰۰	۲۸۶۸۲۲	۱۰۱	۰/۹	-	۲/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۲	۹/۵
	فاصله از رودخانه	۰-۶۰۰	۱۰۱	۰/۹	-	۲/۲	۰/۱	۰/۰	۰/۲	۹/۵

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد زمین لغزش	W+	W-	C	S ² (W+)	S ² (W-)	S(C)	WofE
(متر)	۶۰۱-۱۲۴۴	۲۴۸۴۵۲	۱۵	۰٫۹	۰٫۲	-	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۳	-
	۱۲۴۵-۱۹۶۶	۲۰۴۵۵۸	۸	۱٫۳	۰٫۲	-	۱٫۵	۰٫۱	۰٫۴	۳٫۹
	۱۹۶۷-۳۰۴۳	۱۰۹۲۷۹	۱	-	۰٫۱	-	-	۱٫۰	۱٫۰	-
	۳۰۴۴-۶۱۴۵	۲۷۹۸۴	۰	-	۰٫۰	-	-	-	-	۲٫۹
تراکم زهکشی (کیلومتر بر کیلومتر مربع)	۰-۱٫۲۱	۴۹۷۲۸۰	۱۷	۱٫۴	۰٫۷	-	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۳	-
	۱٫۲۲-۳٫۵۴	۱۵۳۵۰۶	۲۲	۰٫۰	۰٫۰	۲٫۱	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۲	۸٫۱
	۳٫۵۵-۶٫۴۵	۱۳۸۲۳۸	۶۵	۱٫۲	۰٫۶	-	۱٫۸	۰٫۰	۰٫۲	۰٫۰
	۶٫۴۶-۱۲٫۴۱	۸۸۰۷۱	۲۱	۰٫۵	۰٫۱	-	۰٫۶	۰٫۰	۰٫۲	۹٫۸
فاصله از گسل (متر)	۰-۳۰۴۲	۲۲۸۹۹۸	۶۲	۰٫۶	۰٫۴	-	۱٫۰	۰٫۰	۰٫۲	-
	۳۰۴۳-۶۹۱۴	۲۲۸۸۷۸	۲۸	۰٫۲	۰٫۰	-	۰٫۲	۰٫۰	۰٫۲	۵٫۷
	۶۹۱۵-۱۱۸۰۰	۱۴۹۰۱۷	۲۱	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۲	۰٫۹
	۱۱۸۰۱-۱۶۶۸۶	۱۴۳۶۰۹	۱۲	۰٫۵	۰٫۱	-	۰٫۶	۰٫۱	۰٫۳	-
تراکم گسل (کیلومتر بر کیلومتر مربع)	۱۶۶۸۷-۲۳۶۰۱	۱۲۶۵۹۳	۲	۲٫۲	۰٫۱	-	۲٫۳	۰٫۵	۰٫۷	-
	۰-۰٫۳۹	۸۱۲۰۲۵	۱۱۵	۰٫۰	۰٫۱	-	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۳	۳٫۳
	۰٫۴۰-۱٫۱۱	۱۷۹۳۷	۱	۰٫۹	۰٫۰	-	۱٫۰	۰٫۰	۱٫۰	۰٫۲
	۱٫۱۲-۱٫۸۳	۲۰۴۵۶	۳	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۳	۰٫۰	۰٫۶	۰٫۹
فاصله از جاده (متر)	۱٫۸۴-۲٫۶۶	۱۷۵۹۴	۲	۰٫۲	۰٫۰	-	۰٫۲	۰٫۵	۰٫۷	-
	۲٫۶۷-۳٫۵۷	۹۰۸۳	۴	۱٫۱	۰٫۰	۱٫۲	۰٫۳	۰٫۰	۰٫۵	۰٫۳
	۰-۸۵۳	۳۰۷۱۹۵	۱۱۴	۱٫۰	۲٫۰	-	۳٫۰	۰٫۰	۰٫۳	۲٫۳
	۸۵۴-۱۸۳۳	۲۳۴۸۶۸	۹	۱٫۳	۰٫۲	-	۱٫۶	۰٫۱	۰٫۳	۹٫۴
عامل LS	۱۸۳۴-۳۰۱۹	۱۷۳۵۲۴	۱	-	۰٫۲	-	-	۱٫۰	۱٫۰	-
	۳۰۲۰-۴۲۶۵	۱۱۰۹۳۶	۱	۲٫۸	۰٫۱	-	۲٫۹	۱٫۰	۱٫۰	۴٫۵
	۴۲۶۶-۷۷۴۹	۵۰۵۷۲	۰	-	۰٫۱	-	-	-	-	-
	۰-۸	۴۷۳۹۹۸	۶۴	۰٫۱	۰٫۱	-	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۲	۳٫۴
	۹-۲۰	۳۱۲۹۹۷	۴۲	۰٫۱	۰٫۱	-	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۲	-
	۲۱-۴۳	۷۹۰۹۸	۱۴	۰٫۲	۰٫۰	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۳	۰٫۵
	۴۴-۱۱۱	۱۰۳۱۳	۵	۱٫۲	۰٫۰	۱٫۳	۰٫۲	۰٫۰	۰٫۵	۰٫۸
	۱۱۲-۹۰۷	۶۸۹	۰	-	۰٫۰	-	-	-	-	۲٫۷

تحلیل نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر نشان می‌دهد که عوامل تراکم زهکشی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، ارتفاع از سطح دریا، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحناء آبراهه، فاصله از گسل، زمین‌شناسی، درجه شیب، انحناء دامنه، LS، کاربری اراضی، جهت شیب و

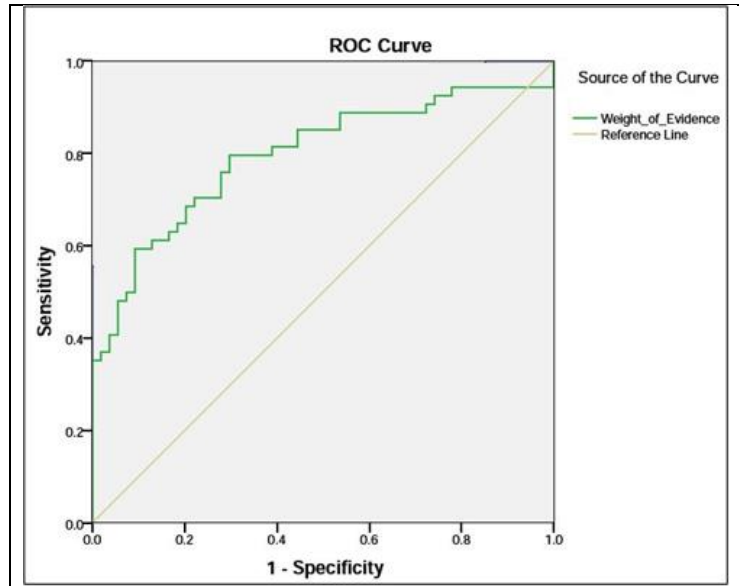
تراکم گسل به ترتیب بیش‌ترین تا کم‌ترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز قرناوه در استان گلستان به خود اختصاص داده‌اند. مقادیر وزن واقعه برای عوامل مورد اشاره از ۵/۱۰ تا ۰/۷۶ متغیر است. نتایج تهیه نقشه حساسیت به وقوع خطر زمین‌لغزش به همراه طبقات مختلف آن در حوضه آبخیز قرناوه در استان گلستان در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴. نقشه حساسیت به وقوع خطر زمین‌لغزش (بالا) و طبقات مختلف آن (پایین) در حوضه آبخیز قرناوه، استان گلستان

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴ که نواحی مختلف حوضه آبخیز قرناوه را بر اساس میزان حساسیت به وقوع زمین‌لغزش طبقه‌بندی کرده است، می‌توان اظهار داشت که حساسیت خیلی کم به وقوع زمین‌لغزش عمدتاً در بخش‌هایی از میانه حوزه که به صورت انتقالی بین

نواحی پرخطر و کم‌خطر دیده می‌شود. روند کلی تغییرات در نقشه نشان می‌دهد که حساسیت به زمین‌لغزش از شمال به جنوب افزایش می‌یابد. در همین راستا، بیشترین حساسیت به خطر وقوع زمین‌لغزش در نواحی جنوبی و جنوب‌غربی حوزه قرار دارد. ارزیابی مدل وزن واقعه در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوزه آبخیز قرناوه با استفاده از منحنی ROC نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. نتایج ارزیابی مدل وزن واقعه در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش حوزه آبخیز قرناوه با استفاده از منحنی ROC

بر اساس نتایج ارزیابی ارائه شده در شکل ۵، میزان دقت مدل وزن واقعه در تعیین مناطق با پتانسیل‌های مختلف وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز قرناوه در استان گلستان برابر با ۷۹٫۷ درصد به دست آمد. این مقدار در محدوده ۷۰ تا ۸۰ درصد قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز قرناوه در استان گلستان است. حد بالا و پایین آن نیز به ترتیب برابر با ۷۱ و ۸۸٫۳ درصد محاسبه شد. بر همین اساس، مدل مورد استفاده با دقت قابل قبولی می‌تواند وقوع زمین‌لغزش را پیش‌بینی کرده و ابزار مؤثری برای شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش باشد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با به کارگیری مدل احتمالاتی وزن واقعه و سامانه اطلاعات جغرافیایی به شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش در حوزه آبخیز قرناوه استان گلستان پرداخته است. یافته‌های پژوهش نشان داد که طبقه ۱۴۸ تا ۳۸۹ ارتفاع از سطح دریا، طبقات غرب، جنوب، جنوب شرق و شمال شرق جهت جغرافیایی، طبقه ۰ تا ۱۱/۴۹ درصد شیب، طبقه ۱۴/۹۱ تا ۲۲/۷۴ شاخص رطوبت توپوگرافی، طبقه مسطح انحنای دامنه، طبقه مقعر انحنای آبراهه، کاربری اراضی جنگل، طبقه زمین‌شناسی Qal¹، فاصله از رودخانه ۰ تا ۶۰۰ متر، تراکم زهکشی ۳/۵۵ تا ۶/۴۵، فاصله از گسل ۰ تا ۳۰۴۲، تراکم گسل ۲/۶۸ تا ۳/۵۷، فاصله از جاده ۰ تا ۸۵۳ و طبقه ۴۴ تا ۱۱۱ عامل LS بیش‌ترین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را در حوزه آبخیز قرناوه در استان گلستان به خود اختصاص دادند. این عوامل از طریق کاهش مقاومت برشی خاک، افزایش رطوبت و تشدید فرسایش، پایداری شیب را تضعیف می‌کنند. علاوه بر این، تحلیل نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر نشان می‌دهد که عوامل تراکم زهکشی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، ارتفاع از سطح دریا، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحناء آبراهه، فاصله از گسل، زمین‌شناسی، درجه شیب، انحناء دامنه، LS، کاربری اراضی، جهت شیب و تراکم گسل به ترتیب بیش‌ترین تا کم‌ترین تأثیر را در وقوع خطر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز قرناوه در استان گلستان به خود اختصاص داده‌اند. مطابق با یافته‌های پژوهش، طبقات ارتفاعی ۱۴۸ تا ۳۸۹ متر و شیب‌های ملایم به عنوان پرخطرترین عوامل در وقوع زمین‌لغزش شناسایی شدند. این نتایج با پژوهش بهرامی و همکاران در حوزه بار نیشابور تفاوت دارد که در آن، طبقات ارتفاعی بالاتر (۱۵۸۰ تا ۱۷۰۰ متر) و شیب‌های ۱۵ تا ۳۰ درجه به عنوان

1. Quaternary Alluvium (Qal)

کلیدی‌ترین عوامل گزارش شده‌اند (Bahrami et al., 2015). این اختلاف ممکن است ناشی از تفاوت در ضخامت لایه‌های خاک و فعالیت فرسایشی در مناطق مختلف باشد. دامنه‌های جنوبی و جنوب شرقی به عنوان جهت‌های با بالاترین حساسیت به زمین‌لغزش تعیین شدند که با کاهش رطوبت خاک ناشی از تابش خورشید مرتبط دانسته می‌شود. این یافته تا حدی با نتایج ابراهیمی و همکاران در سیاه بیشه مازندران همسو است که در آن، جهت‌های شمال شرقی به عنوان مناطق پرخطر معرفی شده‌اند (Ebrahimi et al., 2017). تفاوت اصلی به شرایط اقلیمی متفاوت دو منطقه نسبت داده می‌شود. نزدیکی به رودخانه (۰ تا ۶۰۰ متر) و جاده (۰ تا ۸۵۳ متر) با وزن واقعه بالا به عنوان عوامل تشدیدکننده خطر زمین‌لغزش تأیید شدند. این نتایج با یافته‌های عرب عامری و همکاران (۱۳۹۶) در حوضه ونک اصفهان مطابقت دارد که در آن، نهشته‌های آبرفتی (Qal) و فاصله از جاده به عنوان متغیرهای مؤثر شناخته شدند (Arabameri et al., 2017). با این حال، وزن بالاتر جاده در پژوهش حاضر احتمالاً به دلیل تأثیرپذیری بیش‌تر منطقه از فعالیت‌های انسانی تفسیر می‌شود. نهشته‌های آبرفتی و تراکم زهکشی بالا به عنوان عوامل کلیدی در ناپایداری شیب‌ها تعیین شدند. این نتایج با پژوهش جعفری و همکاران در منطقه خزری شمال کشور همسو است که در آن، زمین‌شناسی و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) به عنوان متغیرهای تأثیرگذار معرفی شده‌اند (Jaafari et al., 2014). این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که تعامل منحصربه‌فرد عوامل طبیعی (مانند ارتفاع و زهکشی) و انسانی (نزدیکی به جاده) در حوضه آبخیز قرناوه، الگوی حساسیت زمین‌لغزش را از سایر مناطق متمایز ساخته است. نتایج حاصل از پژوهش فعلی نشان داد که مدل مورد استفاده با دقت ۷۹/۷ درصد بر اساس معیار ارزیابی ROC، مناطق جنوبی و جنوب غربی حوضه را به عنوان پهنه‌های با حساسیت بسیار بالا شناسایی برای وقوع خطر زمین‌لغزش شناسایی کرده است. این در حالی است که مقدار دقت مدل در مطالعه مرشا و متن برابر ۸۴/۸ درصد (Mersha & Meten, 2020) و در پژوهش ازمیر و آلتورال برابر با ۹۳/۷ درصد (Ozdemir & Altural, 2013) به دست آمد. این تفاوت‌ها ممکن است ناشی از تنوع در کیفیت داده‌های زمین‌لغزش یا مقیاس مکانی باشد. با این حال، تشابه عملکرد مدل حاضر با پژوهش عرب عامری و همکاران نشان‌دهنده تبعیت از شرایط زمین‌شناسی پیچیده منطقه است (Arabameri et al., 2017). یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای مناسبی برای مدیریت وقوع خطر، تصمیم‌گیری‌های آمایش سرزمین، حفاظت از منابع طبیعی و محیط زیست و نیز کاهش آسیب‌پذیری مناطق پرخطر باشد. از محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌توان به وابستگی شدید مدل WoE به داده‌های تاریخی وقوع زمین‌لغزش و نبود اطلاعات زمانی دقیق برای برخی لغزش‌ها اشاره کرد. محدود بودن دقت برخی داده‌های مکانی مانند نقشه‌های کاربری و زمین‌شناسی نیز می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از ترکیب مدل WoE با سایر روش‌های یادگیری ماشین مانند Random Forest یا SVM به منظور افزایش دقت پیش‌بینی استفاده شود. همچنین تلفیق تصاویر ماهواره‌ای چندزمانه برای تحلیل پویایی لغزش‌ها و تغییرات کاربری اراضی می‌تواند به درک بهتر از تغییرات خطر زمین‌لغزش در گذر زمان کمک کند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری تصمیم‌یار برای مدیران منابع طبیعی و برنامه‌ریزان محلی در اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی، پایش مناطق بحرانی، مکان‌یابی پروژه‌های عمرانی، جاده‌سازی و توسعه کشاورزی در مناطق حساس به زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گیرد.

۵- سپاس‌گزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آقای امیرحسین قربانی است که با حمایت‌های معنوی موسسه آموزش عالی لامعی گرگانی انجام شده است.

۶- فهرست منابع

- ابراهیمی، احسان، سلیمانی، کریم و پورقاسمی، حمیدرضا. (۱۳۹۵). ارزیابی کارایی مدل احتمالاتی وزن واقعه در تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۷(۱۴): ۶۹-۷۷.
- اسفندیاری، فریبا، رستمی، قباد، مصطفی‌زاده، رئوف و عابدینی، موسی. (۱۴۰۳). ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبریز زمکان با استفاده از ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون لجستیک، هیدروژئومورفولوژی، ۱۱(۴۰): ۱۰۲-۱۳۳.
- اسفندیاری درآباد، فریبا، رستمی، قباد، مصطفی‌زاده، رئوف و عابدینی، موسی. (۱۴۰۳). ارزیابی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از تئوری کاتاستروف در حوضه آبریز زمکان کرمانشاه. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۳(۲): ۱۲۵-۱۰۶.

بهرامی، شهرام، امیراحمدی، ابوالقاسم، حبیب اللهیان، محمود و ابراهیمی، مجید. (۱۳۹۳). پهنه‌بندی حساسیت خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه (تئوری بیزین)، مطالعه موردی: حوضه آبخیز بار نیشابور. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۵(۴): ۱۴۴-۱۲۵.

پورقاسمی، حمید، مرادی، حمیدرضا، محمدی، مجید، مصطفی‌زاده، رئوف و گلی‌جیرنده، عباس. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین. علوم آب و خاک، ۱۶(۶۲): ۱۲۰-۱۰۹.

حافظی مقدس، ناصر، نیکودل، محمدرضا و بهرامی، کاظم. (۱۳۹۰). ارزیابی قابلیت رمبندگی خاک‌های لسی حوزه قرناوه در شمال کالاله، استان گلستان. نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۴(شماره ۱ و ۲)، ۳۹-۴۶.

دسترنج، علی، کریمی‌سنگچینی، ابراهیم و نور، حمزه. (۱۴۰۳). ارزیابی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در آبخیز بار نیشابور. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۷(۲): ۱۴۷-۱۳۳.

رستمی‌زاد، قباد و دسترنج، علی. (۱۴۰۳). ارزیابی حساسیت رخداد زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۴): ۳۱۲-۲۹۹.

سپهوند، علیرضا و بیرانوند، نسرین. (۱۴۰۳). پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (منطقه مورد مطالعه: بخشی از حوزه آبخیز هراز). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۲): ۲۷۸-۲۶۱.

صابرچناری، کاظم، بهره‌مند، عبدالرضا، شیخ، واحدبردی و کمکی، چوقی بایرام. (۱۳۹۵). پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی با استفاده از مدل دمپستر-شفر در حوضه آبخیز قرناوه، استان گلستان. مجله اکوهیدرولوژی، ۳(۲): ۲۳۱-۲۱۹.

عبدالله‌زاده، علی، اونق، مجید، سعدالدین، امیر و مصطفی‌زاده، رئوف. (۱۳۹۳). تدوین و ارائه برنامه مدیریت زمین‌لغزش در دو سناریوی عادی و بحرانی در آبخیز زیارت استان گلستان. پژوهش‌های آبخیزداری، ۲۷(۳): ۸۴-۷۵.

عرب‌عامری، علیرضا، شیرانی، کوروش و رضایی، خلیل. (۱۳۹۶). ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های احتمالاتی وزن واقعه و نسبت فراوانی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز ونک، اصفهان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۸(۱۵): ۱۶۰-۱۴۷.

کریمی‌سنگچینی، ابراهیم، دسترنج، علی، آرامی، سیدحسین، شادفر، صمد و ویسکرمی، ایرج. (۱۴۰۳). کاربرد الگوریتم یادگیری ماشین بیشینه آنتروپی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوزه آبخیز کرگانه، استان لرستان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۸(۶۴): ۶۳-۵۰.

گلی مختاری، لیلا و ناغمی‌تبار، مهناز. (۱۴۰۱). مدل‌سازی و پیش‌بینی مکانی مخاطره زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده‌کاوی (مطالعه موردی: شهرستان کلات). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۰(۴): ۱۳۷-۱۱۶.

محمدی، نیلوفر و ساسانی‌پور، فرزانه. (۱۴۰۰). تحلیل ریسک وقوع زمین‌لغزش و واریزه در جاده‌های هراز و لواسانات. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۱(۴): ۲۹-۱۴.

References

- Abdullahzadeh, A. , Ownegh, M. , Saaduddin, A. and Mostafazadeh, R. (2014). Development of a landslide management plan under normal and critical scenarios for Ziarat Watershed, Golestan Province. Watershed Management Research, 27(3), 75-84. <https://doi.org/10.22092/wmej.2014.106895> [In Persian]
- Ado, M., Amitab, K., Maji, A. K., Jasińska, E., Gono, R., Leonowicz, Z., & Jasiński, M. (2022). Landslide susceptibility mapping using machine learning: A literature survey. Remote Sensing, 14(13), 3029. <https://doi.org/10.3390/rs14133029>
- Arabameri, A., Shirani, K., Rezaei, K. (2017). A Comparative Assessment between Weights-of-Evidence and Frequency Ratio Models for Landslide Hazard Zonation in Vanak Basin. Journal of Watershed Management Research, 8(15), 147-160. <http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.8.15.147> [In Persian]
- Bahrami, S. , Amir-Ahmadi, A. , Habibolahian, M. and ebrahimi, M. (2015). Analyzing the criticality related to the landslide incidence using the probability models for the weight to evidence (Bayesian theory)(Case Study: Bar Basin of Neyshabur). Geography and Environmental Planning, 25(4), 125-144. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20085362.1393.25.4.8.6> [In Persian]
- Bhandari, B. P., Dhakal, S., & Tsou, C. Y. (2024). Assessing the Prediction Accuracy of Frequency Ratio, Weight of Evidence, Shannon Entropy, and Information Value Methods for Landslide Susceptibility in the Siwalik Hills of Nepal. Sustainability, 16(5), 2092. <https://doi.org/10.3390/su16052092>
- Calvello, M., & Ciurleo, M. (2018). Optimal use of thematic maps for landslide susceptibility assessment by means of statistical analyses: Case study of shallow landslides in fine-grained soils. In Landslides

- and engineered slopes. Experience, theory and practice (pp. 537-544). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315375007-48/optimal-use-thematic-maps-landslide-susceptibility-assessment-means-statistical-analyses-case-study-shallow-landslides-fine-grained-soils-calvello-ciurleo>
- Cantarino, I., Carrion, M. A., Goerlich, F., & Martinez Ibañez, V. (2019). A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps. *Landslides*, 16, 265-282. <https://doi.org/10.1007/S10346-018-1063-4>
- Choi, K. Y., & Cheung, R. W. (2013). Landslide disaster prevention and mitigation through works in Hong Kong. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(5), 354-365. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.07.007>
- Corominas, J., & Moya, J. (2008). A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering geology*, 102(3-4), 193-213. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.018>
- Dastranj, A., Karimi Sangchini, E. and Noor, H. (2024). Evaluating the Effectiveness of Machine Learning Models in Preparing a Landslide Risk Map in the Bar Neyshabur Watershed. *Watershed Management Research*, 37(2), 133-147. doi: 10.22092/wmrj.2023.361650.1531 **[In Persian]**
- Ebrahimi, E., Soleymani, K., & Pourghasemi, H. R. (2017). Evaluating the Efficiency of Probabilistic Weight of Evidence Model for Landslide Susceptibility Mapping (Case Study: Siyahbisheh Watershed, Mazandaran). *Journal of Watershed Management Research*, 7(14), 69-77. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22516174.1395.7.14.7.9> **[In Persian]**
- Esfandiary Darabad, F., Rostami, G., Mostafazadeh, R. and Abedini, M. (2024a). Assessment of landslide risk using catastrophe theory in Zemkan watershed, Kermanshah. *Quantitative Geomorphological Research*, 13(2), 106-125. doi: 10.22034/gmpj.2024.452001.1498 **[In Persian]**
- Esfandiyari Darabad, F., Rostami, G., Mostafazadeh, R. and Abedini, M. (2024b). Spatial assessment and zoning of landslide risk in Zamkan watershed using support vector machine and logistic regression. *Hydrogeomorphology*, 11(40), 123-102. doi: 10.22034/hyd.2024.61467.1737 **[In Persian]**
- Goli Mokhtari, L. and Naemi tabar, M. (2022). Modeling and Spatial Prediction of Landslide Risk Using Advanced Data Mining Algorithms (Case Study: Kalat County). *Quantitative Geomorphological Research*, 10(4), 116-137. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.291242.1284> **[In Persian]**
- Hafezi Moghaddas, N., Nikudel, M. and Bahrani, K. (2011). Evaluation of collapsibility of loess deposits of Gharnaveh catchment in north of Kalale, Golestan province. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 4(Number 1 & 2), 39-46. https://www.jiraeg.ir/article_68296_en.html?lang=fa **[In Persian]**
- Hanifinia, A. and Abghari, H. (2022). Investigation of affecting factors landslide occurrence in shannon entropy model with two WOE and LNRF approaches in order to zoning sensitivity landslide in Ziveh watershed of Urmia. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(2), 108-127. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.340292.1348> **[In Persian]**
- Ili, I., & Tsangaratos, P. (2016). Applying weight of evidence method and sensitivity analysis to produce a landslide susceptibility map. *Landslides*, 13, 379-397. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0576-3>
- Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H. R., Rezaeian, J., & Sattarian, A. (2014). GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 909-926. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0464-0>
- Kamiński, M. (2020). The impact of quality of digital elevation models on the result of landslide susceptibility modeling using the method of weights of evidence. *Geosciences*, 10(12), 488. <https://doi.org/10.3390/geosciences10120488>
- Karimi Sangchini E, Dastranj A, Arami S H, Shadfar S, Vayskarami I. (2024). Application of maximum entropy machine learning algorithm in landslide hazard zoning in Karganeh Watershed, Lorestan Province. *Jwmseir*, 18(64): 5. <http://jwmsei.ir/article-1-1129-en.html> **[In Persian]**
- Khadka, M. K., Timalina, N., Ali, K., Ghimire, M., & Zhang, Z. (2025). Assessing landslide susceptibility: A comparative analysis of bivariate statistical methods along the proposed China-Nepal Railway Corridor. *Journal of Mountain Science*, 22(6), 1966-1992. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2025JMouS..22.1966K/doi:10.1007/s11629-024-9294-4
- Małka, A. (2021). Landslide susceptibility mapping of Gdynia using geographic information system-based statistical models. *Natural Hazards*, 107(1), 639-674. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04599-8>
- Mersha, T., & Meten, M. (2020). GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental disasters*, 7, 1-22. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00155-x>

- Mohammadi, N. and Sasanpour, F. (2021). Landslide and debris flow risk analysis in Haraz and Lavasanat roads. *Water and Soil Management and Modelling*, 1(4), 14-29. <https://doi.org/10.22098/mmws.2021.9138.1023> **[In Persian]**
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.014>
- Pardeshi, S. D., Autade, S. E., & Pardeshi, S. S. (2013). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *SpringerPlus*, 2, 1-11. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-523>
- Pourghasemi, H. R., Moradi, H. R., Mohammdi, M., Mostafazadeh, R., Goli Jirandeh, A. (2013). Landslide Hazard Zoning Using Bayesian Theory. *Journal of Water and Soil Science*, 16(62):109-120. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24763594.1391.16.62.10.9> **[In Persian]**
- Raghuvanshi, T. K., Ibrahim, J., & Ayalew, D. (2014). Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme—an approach for landslide hazard zonation. *Journal of African Earth Sciences*, 99, 595-612. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.05.004>
- Rahman, G., Rahman, A.U., Bacha, A. S., Mahmood, S., Moazzam, M. F. U., & Lee, B. G. (2020). Assessment of landslide susceptibility using weight of evidence and frequency ratio model in Shahpur Valley, Eastern Hindu Kush. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2020, 1-19. <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-167>
- Ramesh, G. (2021). Slope and landslide stabilization: a review. *Indian J Struct Eng (IJSE)*, 1(2), 13-16. <https://doi.org/10.35940/ijse.A1304.111221>
- Rostamizad, G. and Dastranj, A. (2024). Evaluating the sensitivity of the landslide event using the support vector machine algorithm. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(4), 299-312. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.13934.1379> **[In Persian]**
- Saber Chenari, K. , Bahremand, A. , Sheikh, V. B. and Komaki, C. B. (2016). Gully Erosion Hazard Zoning Using of Dempster-Shafer Model in The Gharnaveh Watershed, Golestan Province. *Journal of Ecohydrology*, 3(2), 219-231. <https://doi.org/10.22059/ije.2016.59663> **[In Persian]**
- Segoni, S., Piciullo, L., & Gariano, S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15(8), 1483-1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- Senouci, R., Taibi, N. E., Teodoro, A. C., Duarte, L., Mansour, H., & Yahia Meddah, R. (2021). GIS-based expert knowledge for landslide susceptibility mapping (LSM): case of mostaganem coast district, west of Algeria. *Sustainability*, 13(2), 630. <https://doi.org/10.3390/su13020630>
- Sepahvand, A. and Beiranvand, N. (2024). Landslide susceptibility mapping using various soft computing techniques (Case study: A part of Haraz Watershed). *Water and Soil Management and Modelling*, 4(2), 261-278. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12678.1263> **[In Persian]**
- Shano, L., Raghuvanshi, T. K., & Meten, M. (2020). Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques—a review. *Geoenvironmental Disasters*, 7, 1-19. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0>
- Wang, Z., Liu, Q., & Liu, Y. (2020). Mapping landslide susceptibility using machine learning algorithms and GIS: A case study in Shexian County, Anhui Province, China. *Symmetry*, 12(12), 1954. <https://doi.org/10.3390/sym12121954>
- Zêzere, J. L., Pereira, S., Melo, R., Oliveira, S. C., & Garcia, R. A. (2017). Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. *Science of the total environment*, 589, 250-267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.188>
- Zhao, X., Chen, W., Tsangaratos, P., Ilia, I., & He, Q. (2025). Landslide spatial prediction using data-driven based statistical and hybrid computational intelligence algorithms. *Geocarto International*, 40(1), 2507919. <https://doi.org/10.1080/10106049.2025.2507919>