



Landslide Susceptibility Modeling and Zoning on Transportation Routes Using Artificial Neural Networks (ANN), Case Study: Marivan-Saqez Road

Yegane Karchani¹, Ramin Atash Bahar², Ghasem Keikhosravi^{3*},
Hoshyar Zabihi Qoldareh⁴

¹ Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

² Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

⁴ Department of Remote Sensing, Faculty of Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 10 June 2026

Revised: 12 October 2026

Accepted: 16 October 2026

Available Online:

16 October 2026

Keywords:

Landslide

Artificial Neural Network

Marivan-Saqez Road

Model Spatial Planning

Geographic Information System

ABSTRACT

Landslides cause significant damage to transportation routes every year. The Marivan-Saqez axis in Kurdistan province is one of the critical areas in terms of landslide occurrence. The aim of this study is to model and zonate landslide susceptibility along this communication route using an artificial neural network and to determine the most important factors controlling slope instability. After preprocessing, the data were divided into three sets: training (70%), validation (15%), and testing (15%). The architecture of the artificial neural network model was a multi-layer perceptron with one hidden layer containing 10 neurons and the Levenberg-Marquardt learning algorithm, and it was trained after 1500 iterations. The results of the modeling in the testing phase showed that the designed model has an overall accuracy of 92.5%, a Kappa coefficient of 0.85, and an area under the ROC curve of 0.9905, indicating the excellent ability of the model to distinguish landslide areas from non-landslide areas. Feature importance analysis using the Random Forest method showed that annual mean precipitation, distance from faults, vegetation cover, geology, fault density, distance from rivers, slope, elevation, land use, surface curvature, aspect, profile curvature, drainage density, and curvature, respectively, have the greatest influence on controlling the spatial distribution pattern of landslides in the study area. High and very high landslide risk zones are mainly concentrated in the southern parts of the Marivan-Saqez axis.

* Corresponding author: Ghasem Keikhosravi

E-mail address: Gh_keikhosravi@sbu.ac.ir

How to cite this article: Karchani, Y., Atash Bahar, R., Keikhosravi, G., & Zabihi Qoldareh, H. (2026). Landslide Susceptibility Modeling and Zoning on Transportation Routes Using Artificial Neural Networks (ANN), Case Study: Marivan-Saqez Road. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoeH.2026.99287.1675>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Landslides are among the most frequent and significant natural hazards worldwide. During this geomorphic process, soil and surface materials become unstable and move downslope under the influence of gravity. This instability is often triggered by factors such as heavy or prolonged rainfall, earthquakes, water saturation of the soil, and human activities including vegetation removal and improper engineering practices. This issue becomes particularly critical along transportation and communication corridors, such as roads, railways, power transmission lines, and energy pipelines. The occurrence of landslides along these routes can lead to traffic disruptions lasting days or even weeks, human casualties, damage to vehicles and equipment, and severe destruction of infrastructure, including asphalt surfaces, retaining walls, bridges, and technical structures. Additionally, landslides can delay emergency response efforts and significantly increase maintenance and repair costs. The landslide hazard zonation map produced in this study can serve as a practical tool for infrastructure planning, natural hazard management, and the safe design of transportation routes. By identifying high-risk areas, the map can facilitate the implementation of preventive measures and help reduce losses caused by landslides. The resulting landslide susceptibility map can also be used to identify and prioritize landslide-prone areas, manage and monitor critical locations along the Marivan–Saqqez road, and plan preventive and protective measures. Furthermore, the use of up-to-date temporal data, particularly precipitation data and landslide occurrence records, can enable continuous temporal monitoring of areas with high and very high susceptibility and support the prioritization of risk-management measures along the study corridor.

Material and Methods

In this study, aimed at preparing a landslide susceptibility map for the Saqqez–Marivan corridor, a comprehensive set of spatial data—including raster layers and landslide point data—was first collected and integrated. The raster layers represented factors commonly used in landslide susceptibility analyses, such as elevation, slope, aspect, curvature, landuse, geology, profile and plan curvature, distance to watercourses, fault distance and density, drainage density, precipitation, and other morphometric variables. Before processing, all raster layers were standardized in terms of coordinate system, resolution, dimensions, and spatial extent. The elevation layer was selected as the reference raster to ensure that all sampling and analytical operations were performed consistently based on its coordinate grid and cell structure. In addition to raster data, a vector layer containing landslide and non-landslide points was used, with each point assigned a target class value (1 for landslide, 0 for non-landslide). To ensure accurate sampling from the raster layers, the coordinate system of this vector dataset was transformed to match that of the rasters, after which the corresponding values of all raster layers were extracted for each point. This sampling process was performed using Rasterio functions, resulting in a complete feature vector for every point. Following feature extraction, the dataset was examined for invalid values, including NaN, Inf, and out-of-range values. Rows containing missing or invalid data were identified and removed during the initial cleaning stage. For remaining missing values that did not require row deletion, the mean of the corresponding training-set column was used for imputation. This approach prevented information leakage from the test set into the model and ensured the integrity of the modeling process. After confirming that the feature table was complete, all variables were standardized to have a mean of zero and a variance of one, due to the substantial differences in measurement scales among the predictors. Standardization facilitated neural network convergence and prevented disproportionate influence of variables with larger numeric ranges. The processed dataset was then divided into three subsets to enable proper model training and reliable performance evaluation. Seventy percent of the data was allocated to the training set, while the remaining 30% was split equally between the validation and test sets, each comprising 15% of the total data. The training set was used to learn model parameters, the validation set to tune model architecture and control overfitting, and the test set to provide an independent and unbiased assessment of model performance.

Results and Discussion

The results of this study demonstrate that the Artificial Neural Network (ANN) model possesses a strong capability for identifying and mapping landslide susceptibility along the Marivan–Saqqez corridor. The model successfully predicts the spatial distribution pattern of landslides with considerable accuracy. Analysis of the contributing variables indicates that landslide occurrence in the region is governed by a combination of environmental and geomorphological factors, and its spatial distribution is highly structured and dependent on natural conditions.

According to the findings, the highest concentration of landslides occurs in the southern parts of the study area which exhibit greater susceptibility due to higher rainfall, proximity to faults and rivers, and specific topographic and morphological characteristics. In contrast, the northern parts of the region show the lowest landslide frequency, reflecting more stable environmental conditions. The assessment of variable importance further revealed that annual rainfall is the most influential factor, playing a decisive role in increasing landslide susceptibility. This is followed by distance to faults, elevation, slope, and other topographic parameters. These results highlight the dominant role of hydrological and structural processes in driving slope instability within the region. Morphological analysis also showed that slopes with intermediate elevations, gentle to moderate gradients, and southern to southwestern aspects exhibit the greatest overlap with landslide occurrences. Slopes with near-zero surface curvature or positive cross-sectional curvature were also more susceptible—conditions that promote surface flow concentration and increased soil moisture, ultimately reducing slope stability. In terms of model performance, the statistical indicators obtained from the training, validation, and testing phases confirm the high efficiency of the ANN model in landslide prediction. Elevated values of metrics such as AUC, Accuracy, F1-score, and Cohen's Kappa indicate not only strong predictive accuracy but also model stability and generalizability. The model effectively reconstructed the actual landslide pattern without significant overfitting.

Conclusion

The test-phase modeling results indicate that the developed ANN model achieved an overall accuracy of 92.5%, a Kappa coefficient of 0.85, and an AUC value of 0.9905. These metrics collectively confirm the model's exceptional capability in discriminating landslide from non-landslide areas and demonstrate the absence of overfitting. The feature-importance analysis, conducted using the weighted neural network approach, revealed that mean annual rainfall (importance coefficient = 0.55) constitutes the most influential factor governing landslide occurrence in the study area. This variable is followed, in descending order of importance, by distance to faults, elevation, fault density, and slope. These findings underscore the dominant role of hydrological and structural controls in shaping the spatial distribution of landslides. The final landslide susceptibility map was classified into five hazard categories: very low, low, moderate, high, and very high. Spatial analysis of this map demonstrated that the high and very high susceptibility zones are predominantly concentrated in the southern portion of the Marivan–Saqqez corridor. These areas correspond closely with regions characterized by steep slopes, elevated drainage density, proximity to major fault structures, and higher precipitation levels. Conversely, the northern parts of the region fall within the low to very low hazard classes, primarily due to their greater distance from fault lines, lower drainage density, and reduced rainfall. A comparison of the present findings with previous research reveals a high degree of consistency between the ANN-based results and field observations, as well as a relative advantage of the ANN model over traditional statistical techniques such as logistic regression and frequency ratio.



مدل سازی و پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در مسیرهای مواصلاتی با بهره گیری از شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، مطالعه موردی: (جاده مریوان - سقز)

^۱یگانه کارچانی، ^۲رامین آتش بهار ^۳قاسم کیخسروی ^۴هوشیار ذبیحی قلدره

^۱ گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲گروه سنجش از دور، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۴گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۴	زمین لغزش هر ساله خسارات قابل توجهی به راه های مواصلاتی وارد می کند. محور مریوان - سقز در استان کردستان از نقاط بحرانی از نظر وقوع زمین لغزش محسوب می شود. هدف از این تحقیق مدل سازی و پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در این مسیر ارتباطی با بهره گیری از شبکه عصبی مصنوعی و تعیین مهم ترین عوامل کنترل کننده ناپایداری دامنه ها می باشد. داده ها پس از پیش پردازش به سه مجموعه آموزش (۷۰ درصد)، اعتبار سنجی (۱۵ درصد) و آزمون (۱۵ درصد) تقسیم شدند. معماری مدل شبکه عصبی مصنوعی از نوع پرسپترون چند لایه با یک لایه پنهان حاوی ۱۰ نرون و الگوریتم یادگیری لونیگ-مارکوارت طراحی و پس از ۱۵۰۰ بار تکرار آموزش داده شد. نتایج حاصل از مدل سازی در مرحله آزمون نشان داد که مدل طراحی شده از دقت کلی ۹۴/۴ درصد، ضریب کاپای ۰/۸۸۸ و سطح زیر منحنی ROC برابر ۰/۹۹۰ برخوردار است که بیانگر توانایی عالی مدل در تفکیک مناطق لغزشی از غیر لغزشی می باشد. تحلیل اهمیت ویژگی ها با استفاده از روش جنگل تصادفی نشان داد که به ترتیب پارامتر میانگین بارندگی سالانه، فاصله از گسل، پوشش گیاهی، زمین شناسی، تراکم گسل، فاصله از رودخانه، شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، انحنا سطح، جهت شیب، انحنا مقطع، تراکم رودخانه و انحنا به ترتیب بیشترین نقش را در کنترل الگوی مکانی زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه دارند. پهنه های خطر زیاد و بسیار زیاد در برابر زمین لغزش، عمدتاً در بخش های جنوبی محور مریوان - سقز متمرکز شده اند.
کلمات کلیدی: زمین لغزش شبکه عصبی مصنوعی جاده مریوان - سقز مدل سازی مکانی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)	

مقدمه

یکی از پدیده های مهم طبیعی که از دیر باز با آن مواجه بوده ایم زمین لغزش است. که عامل مخرب منابع طبیعی بوده و پایداری جاده ها را تهدید می کند (Jarjani, Akbari, Hosseini & Abdi, 2019). زمین لغزش یکی از پدیده های مورفودینامیکی است که بیش تر در مناطق کوهستانی تحت تاثیر عوامل مختلف ایجاد می شود و با حرکت توده های سطح زمین در اشکال مختلف همراه است (Kouhpeima & Feiznia, 2019). همچنین، با تغییرات شدید در سطح زمین و حرکت خاک، استحکام لایه کاهش می یابد و استقرار مجدد جاده با چالش جدی روبرو می شود (Huang et al., 2020). پیامدهای زمین لغزش صرفاً محدود به تخریب کالبدی نیست (Negahban, Peysoozi, Ganjaeian & Norozi, 2021)، بلکه آثار مخرب اقتصادی و اجتماعی، زمین لغزش ها دارای تبعات منفی زیست محیطی از جمله تخریب پوشش گیاهی، ایجاد آلودگی رسوبی در منابع آبی و از بین رفتن زیستگاه های حیات وحش می باشند (Geertsema, Highland & Vaugeouis, 2009). این مخاطره طبیعی، همواره در سراسر جهان در حال رخ دادن بوده و از اهمیت زیادی برخوردار است (Niazi, Ekhtesasi, Talebi, Arkhi & Mokhtari, 2010). این مسئله به ویژه در مسیرهای ارتباطی (جاده ها، راه آهن، خطوط انتقال نیرو و خطوط لوله انتقال انرژی) اهمیت حیاتی پیدا می کند. مسیرهای ارتباطی به عنوان شریان های حیاتی هر کشور، نقش کلیدی در جابجایی کالا، خدمات، رفت و آمد روزمره و به ویژه امداد رسانی در هنگام بلایا ایفا می کنند (Chalise, Kumar & Kristiansen, 2019). وقوع زمین لغزش در این مسیرها می تواند منجر به قطع ترافیک به مدت چند روز یا چند هفته، تلفات انسانی، نابودی خودروها و تجهیزات، خسارات سنگین زیرساختی (از جمله تخریب آسفالت، دیوارهای حائل، پل ها و ابنیه فنی)، تأخیر در امداد رسانی به مناطق آسیب دیده و افزایش هزینه های تعمیر و نگهداری گردد. بنابراین، پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش در مسیرهای ارتباطی یک گام اساسی در مدیریت و کاهش مخاطرات، برنامه ریزی برای احداث جاده های جدید، اولویت بندی اقدامات حفاظتی و بهسازی مسیرهای موجود محسوب می شود. بدون داشتن نقشه های دقیق پهنه بندی، هرگونه اقدام مهندسی در این حوزه با ریسک بالایی همراه خواهد بود. در سال های اخیر، روش های یادگیری ماشین به دلیل قابلیت کمی سازی رابطه غیر خطی بین زمین لغزش ها و عوامل مؤثر بر وقوع آنها و همچنین محاسبه خودکار پارامترهای مدل های ارزیابی حساسیت وقوع زمین لغزش مورد توجه محققان قرار گرفته است (Liu, Wang, Zhang, He & Pijush, 2023). این روش ها را می توان به دو دسته کلی روش های آماری (مانند نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک، تحلیل تشخیصی) و روش های غیر آماری (مانند مدل های مبتنی بر شبکه عصبی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم و سیستم استنتاج فازی) تقسیم بندی کرد. در این میان، روش شبکه عصبی مکانیسمی محاسباتی است که قادر است با گرفتن اطلاعات در محاسبه کردن آنها، مجموعه ای اطلاعات جدید ارائه دهد (Lee & Pradhan, 2006). در این شبکه سعی بر این می شود که ساختار مشابه ساختار بیولوژیکی مغز انسان و شبکه اعصاب بدن ساخته تا همانند مغز قدرت یادگیری، تعمیم دهی و تصمیم گیری داشته باشد (Gomez & Kavzoglu, 2005). این روش نسبت به سایر روش ها از مزایای متعددی برخوردار است، از جمله اینکه شبکه عصبی مصنوعی از توزیع آماری داده ها مستقل است و به متغیرهای آماری مخصوصی نیاز ندارد و برای آنالیز صحت داده ها به بررسی کم تری در قیاس با روش های آماری نیاز دارد (Pradhan & Lee, 2010). به عبارت دیگر، شبکه عصبی پس از آموزش با داده های زمین لغزش های گذشته، قادر است برای نقاطی که بیشتر زمین لغزشی در آنها رخ نداده، احتمال وقوع را پیش بینی کند. این قابلیت، شبکه عصبی را به ابزاری قدرتمند برای پهنه بندی خطر در مناطق فاقد داده های تاریخی تبدیل می کند. با وجود مطالعات گسترده ای که در زمینه پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی و سایر مدل های هوشمند در داخل و خارج از کشور انجام شده است، نتایج این مطالعات به دلیل تفاوت در شرایط زمین شناسی، ژئومورفولوژی، اقلیمی و عوامل انسانی، قابلیت تعمیم مستقیم به سایر مناطق را ندارند. محور ارتباطی مریوان- سقز به دلیل قرارگیری در زاگرس چین خورده، وجود شیب های تند، لیتولوژی متنوع، تراکم گسل ها، بارش های نسبتاً زیاد و همچنین اهمیت آن به عنوان یکی از محورهای اصلی ارتباطی غرب کشور، از جمله مناطق مستعد وقوع زمین لغزش به شمار می رود و وقوع لغزش های متعدد در سال های اخیر، ضرورت انجام مطالعات اختصاصی در این محدوده را دو

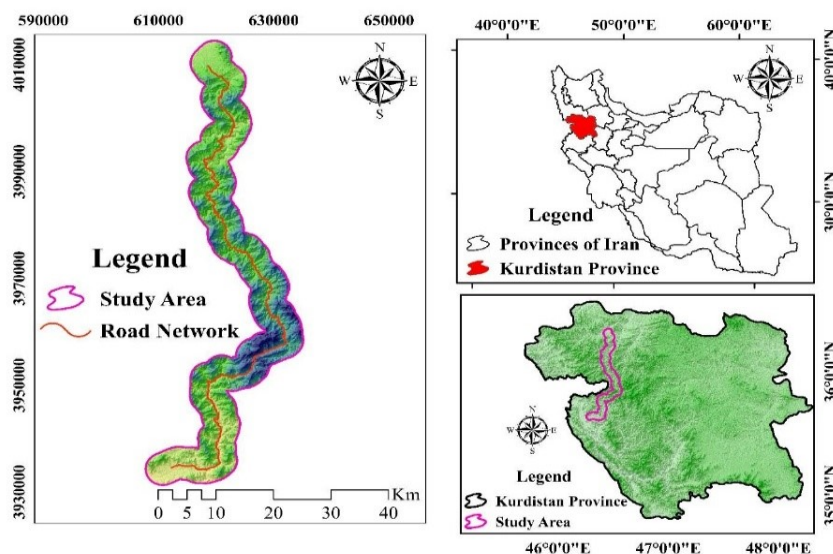
چندان کرده است. از این رو، وجه تمایز پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین، ارزیابی حساسیت زمین لغزش در این محور با بهره گیری از مدل شبکه عصبی مصنوعی و تلفیق هم زمان مهم ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی است. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی و تحلیل میزان تأثیر عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و تهیه نقشه پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در محور مریوان- سقز به منظور فراهم کردن بستری مناسب برای مدیریت مخاطرات، برنامه ریزی توسعه زیرساخت های حمل و نقل و کاهش خسارات ناشی از این پدیده در منطقه مورد مطالعه است. با توجه به اهمیت پدیده زمین لغزش مطالعات فراوانی در متون علمی جهانی و ایران انجام شده است. راکعی و همکاران (Rakei, Khamechian, Abdolmaleki & Giahehi, 2007) در منطقه سفیدار گله (سمنان) با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) با یک لایه پنهان ۱۰ نورونی و ۷ عامل مؤثر (شیب، جهت شیب، لیتولوژی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی و پوشش گیاهی) به پهنه بندی خطر زمین لغزش پرداختند. داده های ۱۲۰ نقطه لغزش به نسبت ۷۵ به ۲۵ بین آموزش و آزمایش تقسیم شد و دقت مدل بیش از ۸۹ درصد به دست آمد که نسبت به روش های تجربی برتری داشت. کانیان و همکاران (Caniani, Pascale, Sdao & Sole, 2008) در منطقه شهری پیتنزا (ایتالیا) با شبکه عصبی پیش خور و الگوریتم گرادینان مزدوج (معماری ۶-۱۰-۱) و ۲۵۰ نقطه لغزش، اثبات کردند که ANN بر خلاف روش های پارامتریک، مستقل از توزیع آماری داده می باشد و نیازی به نرمال سازی ندارد. ملکی و همکاران (Melchiorre, Matteucci, Azzoni & Zanchi, 2008) با ترکیب تحلیل خوشه ای (K-Means) و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) نشان دادند که گروه بندی واحد های همگن زمین شناسی، توپوگرافی و هیدرولوژی قبل از آموزش شبکه، دقت پهنه بندی زمین لغزش را افزایش می دهد. روش ترکیبی آنها با دقت ۹۴/۲ درصد و ضریب کاپای ۰/۸۸ نسبت به روش استاندارد (۸۹/۷ درصد و کاپای ۰/۸۱) عملکرد بهتری داشت. جوکار سرهنگی (Jokar Sarhangi, 2007) در حوضه صفا رود رامسر با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به بررسی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش پرداخت. در این پژوهش، ۱۱ عامل شامل سنگ شناسی، فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، جهت دامنه، بارش، فاصله از آبراهه، نوع خاک، پوشش گیاهی، فاصله از راه های ارتباطی و فاصله از آبادی ها پس از وزن دهی به روش AHP در محیط GIS تلفیق شدند. نتایج نشان داد که وقوع زمین لغزش حاصل اثر هم زمان عوامل طبیعی و انسانی است و در مناطقی که مداخلات انسانی بیشتر بوده و شرایط زمین شناسی و توپوگرافی حساس تری وجود دارد، خطر وقوع زمین لغزش به طور قابل توجهی افزایش می یابد. پرادهان و همکاران (Pradhan & Lee, 2010) در جزیره پنانگ (مالزی) با تلفیق شبکه عصبی انتشار برگشتی (BPNN)، GIS و استفاده از ۳۱۵ نقطه لغزش و ۱۰ عامل مؤثر، نقشه پهنه بندی زمین لغزش تهیه کردند. معماری ۱۰-۱۸-۱ با الگوریتم پس انتشار خطا، دقت ۹۱/۸ درصد و سطح زیر منحنی ۰/۹۴ را نشان داد که نسبت به روش های نسبت فراوانی (۸۴/۵٪) و رگرسیون لجستیک (۸۷/۳٪) برتری داشت. رضایی مقدم و همکاران (Rezaei Moghaddam et al., 2017)، در مطالعه ای در حوضه آبریز دوآب الشتر واقع در استان لرستان، به پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. در این مطالعه هدف ارزیابی قابلیت شبکه عصبی در پیش بینی مناطق مستعد لغزش و مقایسه آن با روش های آماری سنتی بود. روش های پژوهش شامل شناسایی هفت عامل مؤثر بر لغزش شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، لیتولوژی و کاربری اراضی بود، و یک شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (MLP) با ساختار ۷-۱۱-۱ طراحی کردند: ۷ نورون در لایه ورودی (متناظر با عوامل هفت گانه)، یک لایه پنهان با ۱۱ نورون، و یک نورون خروجی برای کلاس خطر. الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا با تابع فعال سازی سیگموئید به کار گرفته شد. داده های ۲۵۴ نقطه لغزش به دو دسته ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش تقسیم شدند. نتایج نشان داد که دقت شبکه در مرحله آزمایش برابر با ۹۳/۸ درصد بود. نقشه نهایی پهنه بندی نشان داد که ۳۲/۴ درصد از مساحت منطقه در کلاس خطر زیاد و ۶/۷ درصد در کلاس خطر خیلی زیاد قرار دارد. محققان نتیجه گرفتند که شبکه عصبی مصنوعی ابزاری بسیار توانمند برای پهنه بندی خطر لغزش در مناطق کوهستانی ایران است. رجبی و همکاران (Rajabi et al., 2020) در حوزه آبریز الموت رود (قزوین)

با استفاده از مدل پرسپترون چندلایه (MLP) و الگوریتم لونبرگ-مارکوارت به پهنه بندی خطر زمین لغزش پرداختند. ضریب کاپای ۰/۷۲ و کاهش شاخص SCAI از ۱/۵۰ به ۰/۲۶ نشان دهنده دقت قابل قبول مدل بود. محققان نتیجه گرفتند که MLP با انتخاب دقیق لایه های اطلاعاتی، ابزاری مؤثر برای پهنه بندی در حوضه های کوهستانی است. اسفندیاری و همکاران (Esfandiyari, Rahimi, Navidfar & Mehrvarz, 2020) در محور ارتباطی حیران (اردبیل) با استفاده از مدل های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) به ارزیابی حساسیت زمین لغزش پرداختند. با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ و بازدیدهای میدانی، ۴۲ نقطه لغزش ثبت شد. سپس ۷ عامل مؤثر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل و فاصله از جاده در GIS آماده سازی شدند. داده ها به صورت ۷۰ درصد آموزش و ۳۰ درصد آزمایش وارد مدل ها شدند. نتایج نشان داد که عوامل زمین شناسی، ارتفاع، جهت شیب و کاربری اراضی بیشترین ارزش را در ناپایداری دامنه داشتند. بر اساس منحنی های ROC، مدل SVM با تابع حلقوی به عنوان مناسب ترین مدل معرفی شد. در این مدل، بیشترین ارزش برای عامل زمین شناسی (۰/۲۱) و کمترین برای ارتفاع و جهت شیب (۰/۰۷) بود. کاربری های مرتع، کشاورزی و جاده های بالای ۱۴۰۰ متر در طبقه حساسیت زیاد قرار داشتند. محققان نتیجه گرفتند که در کنار شرایط محیطی، فعالیت های انسانی مانند جاده سازی و تغییر کاربری اراضی نقش مؤثری در تشدید ناپایداری دامنه ها دارند. حلاجی و همکاران (Hallaji, Zanganeh Asadi & Amirahmadi, 2020)، در پژوهشی به بررسی مدل های پیش بینی حساسیت زمین لغزش در حوضه بار (نیشابور) با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل حداکثر آنتروپی پرداختند. در این مطالعه بررسی شد که کدام یک از دو مدل مذکور دقت بالاتری در پهنه بندی خطر زمین لغزش در منطقه ای کوهستانی با شرایط اقلیمی نیمه خشک دارد. ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره ای لندست ۸، عکس های هوایی و بازدید های میدانی، موقعیت ۱۵۷ نقطه زمین لغزش در حوضه بار شناسایی و ثبت گردید. سپس ۹ عامل مؤثر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، بارش و پوشش گیاهی به عنوان لایه های اطلاعاتی در محیط GIS آماده سازی شدند. داده ها به صورت ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای اعتبار سنجی تفکیک گردیدند. نتایج نشان داد که به ترتیب عوامل لیتولوژی، شیب و فاصله از گسل بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش حوضه بار داشتند. بر اساس شاخص سطح زیر منحنی ROC، مدل شبکه عصبی مصنوعی با ضریب ۰/۸۴ نسبت به مدل حداکثر آنتروپی با ضریب ۰/۷۹، از عملکرد بهتری برخوردار بود. محققان نتیجه گرفتند که مدل شبکه عصبی مصنوعی به دلیل توانایی در یادگیری روابط غیر خطی بین عوامل مؤثر و وقوع زمین لغزش، ابزار دقیق تری برای پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در حوضه بار (نیشابور) محسوب می شود و می تواند در برنامه ریزی های محیطی و کاهش خطرات ناشی از لغزش مورد استفاده قرار گیرد. حنیفی نیا و همکاران (Hanifinia, Nazarnnejad & Najafi Kornejady, 2021)، به بررسی اولویت بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و تهیه نقشه حساسیت آن در حوضه چریک آباد (ارومیه) با استفاده از مدل آنتروپی شانون پرداختند. در این مطالعه بررسی شد که کدام یک از عوامل محیطی و انسانی بیشترین نقش را در ناپایداری دامنه های حوضه چریک آباد ایفا می کنند. ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره ای، عکس های هوایی ۱:۲۰۰۰ و بازدید های میدانی، موقعیت ۸۴ نقطه زمین لغزش در حوضه شناسایی و با GPS ثبت گردید. سپس ۱۰ عامل مؤثر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، بارش و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) به عنوان لایه های اطلاعاتی در محیط GIS آماده سازی شدند. برای اجرای مدل آنتروپی شانون، ابتدا وزن هر یک از طبقات عوامل مختلف محاسبه و سپس نقشه نهایی حساسیت زمین لغزش در پنج کلاس (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تهیه گردید. نتایج نشان داد که به ترتیب عوامل لیتولوژی (با وزن ۰/۲۱)، شیب (۰/۱۹)، فاصله از گسل (۰/۱۶) و کاربری اراضی (۰/۱۴) بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش حوضه چریک آباد داشتند. هابومویشا و همکاران (Habumugisha et al., 2022) با استفاده از مدل های ماشین یادگیری عمیق شامل، CNN, DNN, LSTM, RNN به تهیه نقشه خطر زمین لغزش در شهرستان مائو شان در چین پرداخته اند. شیب، بارش باران و فاصله تا گسل ها موثرترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش بوده و نقشه های مستعد زمین لغزش نشان داد، که بیشترین مناطق مستعد در امتداد رودخانه مینگ جیانگ و در برخی نقاط بخش جنوب شرقی

منطقه مورد مطالعه بوده اند. ارزیابی نتایج نیز با شاخص سطح زیر منحنی نشان داد که مدل DNN در شناسایی زمین لغزش نتایج بهتری را نشان می دهد. ذاکری نژاد و کهرانی (Zakerinejad & Kahrani, 2023)، در مقاله ای به ارزیابی و مقایسه دو مدل داده کاوی CART و Tree Net در پهنه بندی حساسیت زمین لغزش حوضه آبخیز کمه در جنوب استان اصفهان پرداختند. در این مطالعه بررسی شد که کدام یک از دو مدل مذکور دقت بالاتری در شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش دارد. ابتدا با استفاده از عکس های هوایی، تصاویر ماهواره ای و بازدید های میدانی، تعداد ۳۱۱ زمین لغزش (به صورت چند ضلعی) در حوضه شناسایی و به عنوان متغیر وابسته ثبت شد. داده ها به صورت ۷۰ درصد (برای آموزش مدل) و ۳۰ درصد (برای اعتبارسنجی) تفکیک گردیدند. نتایج مدل CART نشان داد که چهار شاخص NDVI (با اهمیت نسبی ۱۰۰)، مقدار بارش (۹۴/۵)، فاصله از آبراهه (۵۰) و ارتفاع (۴۴/۳) بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش دارند. در مدل Tree Net نیز به ترتیب مقدار بارش، NDVI، زمین شناسی و کاربری اراضی به عنوان مهم ترین عوامل شناسایی شدند. بر اساس شاخص های آماری RMSE، MSE، R^2 و سطح زیر منحنی ROC، مدل CART با مساحت ۷۹/۳ کیلومتر مربع در کلاس حساسیت خیلی زیاد (۹ درصد حوضه) نسبت به مدل Tree Net با ۳۰/۹ کیلومتر مربع (۳ درصد حوضه)، عملکرد بهتری در شناسایی مناطق پرخطر داشت. همچنین پهنه های با حساسیت کم و خیلی کم در مدل CART حدود ۷۵ درصد و در مدل Tree Net حدود ۸۷ درصد از کل حوضه را شامل می شدند.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، بخش هایی از محور ارتباطی سقز-مریوان در استان کردستان را شامل می شود. این محور یکی از مسیرهای اصلی شمال غرب کشور بوده و نقش مهمی در ارتباط میان شهرهای داخلی استان و همچنین دسترسی به مرز بین المللی باشماق ایفا می کند. مسیر مورد بررسی با امتداد کلی شمال غربی- جنوب شرقی، شهر سقز را به مریوان متصل کرده و از نواحی کوهستانی زاگرس عبور می کند. از نظر ویژگی های طبیعی، محدوده مسیر عمدتاً دارای توپوگرافی کوهستانی، دره های عمیق، شیب های نسبتاً تند و تراز بندهای متغیر است. پوشش گیاهی غالب شامل مرتع های کوهستانی و جنگل های پراکنده بلوط بوده و شبکه ای از آبراهه ها و رودخانه های فصلی و دائمی در طول مسیر مشاهده می شود. این شرایط سبب ایجاد محدودیت ها و چالش هایی در فرآیند توسعه و نگهداری محور جاده ای شده است. با توجه به موقعیت راهبردی مسیر و اهمیت آن در حمل و نقل منطقه ای، بررسی دقیق نقشه منطقه مورد مطالعه، تحلیل ساختار طبیعی، و شناخت عوامل محیطی اثرگذار، برای طراحی، اصلاح و بهبود عملکرد محور سقز-مریوان ضروری است. این شناخت پایه ای برای ارزیابی ریسک های مرتبط با پایداری شیب ها، رواناب سطحی، فرسایش، و ایمنی راه فراهم می سازد. شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.



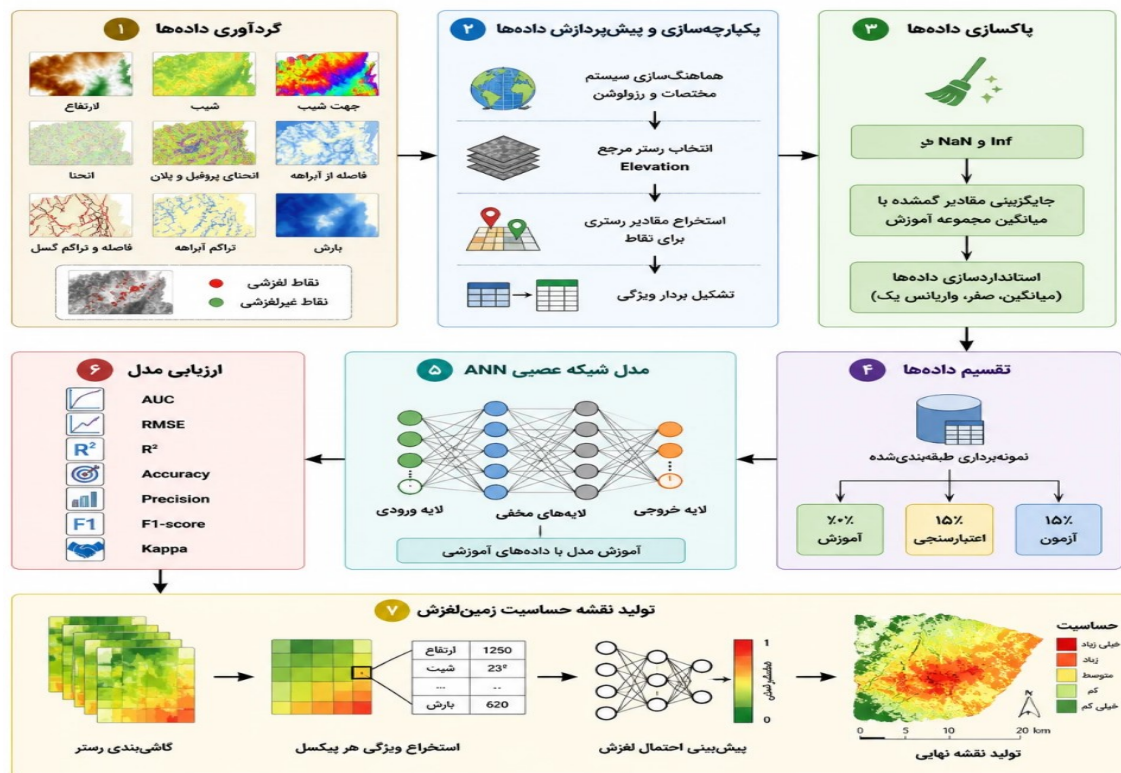
شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی جاده مریوان- سقز

Fig.1. Geographical location map of the Marivan-Saqez road

مواد و روش ها

در این پژوهش با هدف تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش در محدوده محور سقز- مریوان، ابتدا مجموعه ای از داده های مکانی شامل لایه های رستری و داده های نقطه ای زمین لغزش گردآوری و یکپارچه سازی شد. لایه های رستری شامل عواملی بودند که در وقوع زمین لغزش نقش دارند و معمولاً در مطالعات مشابه نیز کاربرد وسیعی دارند: از جمله ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، زمین شناسی، انحنا، انحنای پروفیل و پلان، فاصله از آبراهه ها، فاصله و تراکم گسل ها، تراکم آبراهه، بارش و سایر فاکتورهای مورفومتریک. این لایه ها پیش از ورود به مراحل پردازش، از نظر سیستم مختصات، رزولوشن، ابعاد و گستره مکانی هماهنگ شده و لایه ارتفاع^۱ به عنوان رستر مرجع انتخاب شد تا تمام عملیات نمونه برداری و پردازش بر اساس مختصات و ماتریس سلولی این لایه انجام گیرد. مدل رقومی ارتفاع (DEM) مورد استفاده از مجموعه داده USGS/SRTMGL1_003، حاصل مأموریت SRTM با تفکیک مکانی ۳۰ متر، در محیط گوگل ارث انجین استخراج شد. در کنار داده های رستری، یک لایه برداری شامل نقاط لغزشی و غیر لغزشی نیز مورد استفاده قرار گرفت. این لایه شامل موقعیت مکانی نقاط و مقدار کلاس هدف (۱ برای لغزش و ۰ برای عدم لغزش) بود. در مجموع، ۳۰۰ نقطه نمونه شامل ۱۵۰ نقطه لغزش و ۱۵۰ نقطه فاقد لغزش به صورت متوازن ایجاد شد. نقاط لغزشی و غیر لغزشی با استفاده از نتایج تداخل سنجی راداری (InSAR) تصاویر Sentinel-1 و در نرم افزار SNAP استخراج شدند، بدین منظور از دو تصویر SLC مربوط به تاریخ های ۳ و ۲۷ دسامبر ۲۰۱۹ استفاده شد. برای اطمینان از صحت نمونه برداری از لایه های رستری، ابتدا سیستم مختصات این وکتور به سیستم مختصات لایه های رستری تبدیل شد و سپس برای هر نقطه، مقادیر متناظر تمام لایه های رستری استخراج گردید. این مرحله به کمک توابع نمونه برداری از Rasterio انجام شد و برای هر نقطه، یک بردار ویژگی کامل تشکیل شد که مجموعه ای از مقادیر لایه های مورد استفاده را در بر می گرفت. پس از استخراج ویژگی ها، داده ها از نظر وجود مقادیر نا معتبر شامل NaN، Inf و مقادیر خارج از دامنه کنترل شدند. ردیف هایی که دارای داده های گمشده بودند در گام نخست شناسایی شده و سپس در فرآیند پاکسازی ابتدا حذف شده و در ادامه برای مقادیری که حذف آن ها ضروری نبود، از میانگین

ستون‌های متناظر در مجموعه آموزش برای جایگزینی داده‌های گمشده استفاده شد. علت استفاده از میانگین مجموعه آموزش، جلوگیری از نشت اطلاعات از داده‌های آزمون به مدل و تضمین اعتبار فرآیند مدل‌سازی بود. پس از اطمینان از کامل بودن جدول ویژگی‌ها، به دلیل تفاوت زیاد در مقیاس اندازه‌گیری متغیرها، تمامی داده‌ها با استفاده از روش استانداردسازی نرمال شدند تا میانگین آن‌ها به صفر و واریانس آن‌ها به یک تبدیل شود. این کار برای تسهیل همگرایی مدل شبکه عصبی و جلوگیری از تأثیر نامتوازن ویژگی‌ها انجام شد. داده‌های کامل شده و استاندارد شده سپس به سه بخش مجزا تقسیم شدند تا امکان آموزش مناسب مدل و ارزیابی دقیق عملکرد آن فراهم شود. بر این اساس، ۷۰ درصد از کل داده‌ها به مجموعه آموزش اختصاص یافت و ۳۰ درصد باقیمانده به طور مساوی میان دو بخش آزمون و اعتبار سنجی توزیع شد، به گونه‌ای که هر یک ۱۵ درصد از کل داده‌ها را شامل شدند. مجموعه آموزش برای یادگیری پارامترهای مدل مورد استفاده قرار گرفت، مجموعه اعتبار سنجی به منظور تنظیم بهینه ساختار مدل و کنترل بیش‌برازش در طول فرآیند آموزش به کار رفت، و مجموعه آزمون نیز به عنوان داده‌های مستقل و دیده‌نشده برای ارزیابی نهایی عملکرد مدل استفاده شد. این تقسیم‌بندی به صورت طبقه‌بندی شده انجام شد تا نسبت نقاط لغزشی و غیر لغزشی در هر سه مجموعه حفظ شود و از ایجاد عدم تعادل کلاسی جلوگیری گردد. به منظور ارزیابی مدل، مجموعه‌ای متنوع از شاخص‌های آماری محاسبه گردید تا دقت، توان تفکیک و عملکرد کلی مدل بررسی شود. این شاخص‌ها شامل Accuracy، AUC، Precision، F1-score و ضریب کاپا بودند. در نهایت، نقشه حساسیت زمین لغزش با رویکرد پردازش پیکسل مبنا تولید شد. بدین صورت که مقادیر تمامی لایه‌های رستری برای هر پیکسل استخراج و به مدل آموزش دیده وارد شد تا احتمال وقوع زمین لغزش برای هر سلول رستری محاسبه شود (شکل ۲).



شکل ۲- مواد و روش‌ها مراحل تحقیق

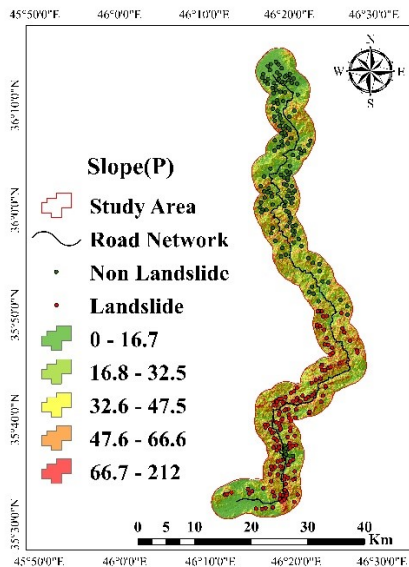
Fig. 2. Materials and methods: Research steps

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج مدل سازی حساسیت به زمین لغزش در امتداد جاده مریوان- سقز با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) ارائه و بررسی می شود. لایه های مؤثر شامل توپوگرافی، زمین شناسی، هیدرولوژیکی و کاربری اراضی به عنوان ورودی مدل استفاده شدند. عملکرد مدل با شاخص های آماری ارزیابی و نقشه نهایی حساسیت، پهنه های مستعد وقوع زمین لغزش در محدوده مورد مطالعه را مشخص می کند.

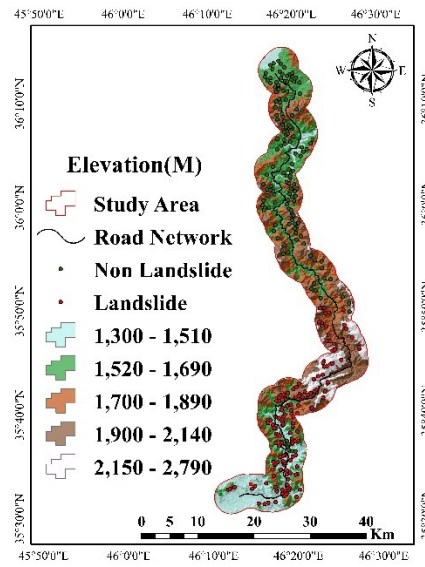
بررسی نقش ارتفاع (شکل ۳) در توزیع مکانی لغزش های زمین در محور مریوان- سقز نشان می دهد که این متغیر توپوگرافی یکی از عوامل تعیین کننده در الگوی فضایی ناپایداری دامنه ها می باشد. تحلیل نقشه ارتفاع و انطباق آن با پراکنش نقاط لغزش موجود و فاقد لغزش، بیانگر وجود یک الگوی ارتفاعی مشخص در وقوع لغزش ها در محدوده مورد مطالعه است. بر اساس طبقه بندی انجام شده، محدوده ارتفاعی منطقه بین حدود ۱۳۰۰ تا ۲۷۹۰ متر از سطح دریا قرار دارد و در پنج طبقه ارتفاعی تفکیک شده است. نتایج نشان می دهد که بیشترین تراکم لغزش ها در طبقات ارتفاعی میانی تا نسبتاً بالا، به ویژه در بازه تقریبی ۱۷۰۰ تا ۲۱۶۰ متر، مشاهده می شود. در این طبقات، تمرکز نقاط قرمز (لغزش موجود) به طور قابل توجهی بیشتر از سایر طبقات است و خوشه های متراکم لغزش عمدتاً در بخش های میانی و جنوبی مسیر دیده می شوند. در مقابل، در ارتفاعات پایین تر (حدود ۱۳۰۰ تا ۱۵۵۰ متر) و همچنین در ارتفاعات بسیار بالا (بیش از ۲۴۰۰ متر)، تعداد لغزش ها کاهش می یابد و سهم نقاط فاقد لغزش افزایش پیدا می کند. این الگو نشان می دهد که رابطه بین ارتفاع و وقوع لغزش خطی ساده نیست، بلکه یک رابطه غیر خطی و وابسته به شرایط ژئومورفولوژیکی حاکم بر هر طبقه ارتفاعی است. تمرکز لغزش ها در ارتفاعات میانی را می توان به چند عامل نسبت داد. نخست آنکه این محدوده های ارتفاعی غالباً با شیب های تندتر و دامنه های پر انرژی تر همراه اند که مستعد ناپایداری هستند. دوم آنکه در این ترازهای ارتفاعی، فرآیندهای هوازدگی فیزیکی و شیمیایی فعال تر بوده و ضخامت خاک و پوشش آبرفتی مناسب تری برای لغزش های دامنه ای فراهم می شود. علاوه بر این، در این ارتفاعات، ترکیب بارش نسبتاً زیاد و شیب های قابل توجه می تواند موجب افزایش رواناب سطحی، نفوذ آب و در نتیجه افزایش فشار آب منفذی در دامنه ها شود که این امر می تواند پایداری خاک را کاهش دهد. در ارتفاعات پایین تر، اگرچه ممکن است میزان اشباع بیشتر باشد، اما شیب دامنه ها در بسیاری از نقاط ملایم تر است و در نتیجه انرژی پتانسیل برای حرکت توده ای کمتر می شود. از سوی دیگر، در ارتفاعات بسیار بالا، با وجود شیب های زیاد، ضخامت خاک معمولاً کم تر و رخنمون سنگ بستر بیشتر است که می تواند مانع از شکل گیری لغزش های گسترده دامنه ای شود. الگوی فضایی مشاهده شده نشان می دهد که بیشترین حساسیت ارتفاعی نسبت به لغزش در محدوده ارتفاعی میانی متمرکز است و با فاصله گرفتن از این بازه، چه به سمت ارتفاعات پایین و چه به سمت ارتفاعات بالا، فراوانی لغزش کاهش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که ارتفاع در منطقه مورد مطالعه یک عامل کنترل کننده مهم است، اما اثر آن به صورت مستقل عمل نمی کند و احتمالاً در تعامل با سایر عوامل نظیر شیب، لیتولوژی، فاصله از گسل و فاصله از رودخانه، نقش خود را ایفا می کند. شیب دامنه ها (شکل ۴) در محدوده محور مریوان- سقز در پنج طبقه شامل ۱۶/۷-۰، ۱۶/۸-۳۲/۵، ۳۲/۶-۴۷/۵، ۴۷/۶-۶۶/۶ و ۶۶/۷-۲۱۲ درصد تفکیک شده و پراکنش نقاط لغزش (قرمز) و فاقد لغزش (سبز) بر روی آن نمایش داده شده است. بررسی همپوشانی این نقاط با طبقات شیب نشان می دهد که رابطه ای مستقیم و معنادار میان افزایش شیب و فراوانی لغزش ها وجود دارد. در بخش های شمالی و برخی نواحی میانی مسیر که عمدتاً در طبقه شیب های پایین تر (۷-۱۶/۰ درصد) و تا حدودی ۱۶/۸-۳۲/۵ درصد قرار می گیرند، تعداد لغزش ها محدود بوده و غالب نقاط به صورت فاقد لغزش مشاهده می شوند. با ورود به طبقه ۳۲/۶-۴۷/۵ درصد، به ویژه در بخش های میانی و جنوبی، تعداد نقاط لغزش افزایش می یابد و تمرکز آن ها بیشتر می شود که نشان دهنده افزایش فعالیت فرسایشی و ناپایداری بیشتر دامنه ها می باشد. بیشترین تراکم لغزش ها در طبقات شیب ۴۷/۶-۶۶/۶ و به ویژه ۶۶/۷-۲۱۲ درصد مشاهده می شود که عمدتاً در نیمه جنوبی محدوده گسترش دارند. در این نواحی، همپوشانی قابل توجهی بین رنگ های نارنجی و قرمز نقشه با نقاط لغزش دیده می شود. این امر بیانگر آن است که در شیب های زیاد و بسیار زیاد، وزن مصالح نیروی بیشتری به

دامنه وارد می کند و کوچک ترین تغییر در رطوبت یا ساختار خاک می تواند باعث ناپایداری دامنه شود. تمرکز لغزش ها در جنوب منطقه، که پیش تر نیز در پارامترهایی مانند بارندگی، تراکم گسل و تراکم رودخانه مشاهده شد، نشان می دهد که شیب در تعامل با سایر عوامل محیطی، نقش تشدید کننده ای در وقوع حرکات توده ای ایفا می کند. به طور کلی، الگوی فضایی نقشه نشان می دهد که با افزایش درصد شیب، فراوانی و تراکم لغزش ها نیز افزایش می یابد و شیب های بالاتر از حدود ۴۷ درصد در این محدوده بیشترین حساسیت را نسبت به وقوع لغزش دارند.



شکل ۴- نقشه شیب جاده مریوان- سقز

Fig. 4. Slope map of the Marivan-Saqez road

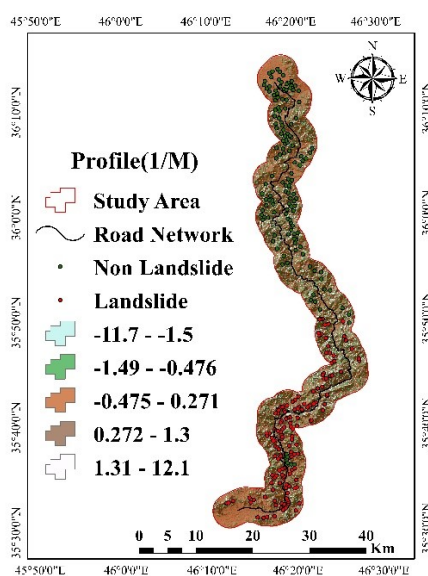


شکل ۳- نقشه ارتفاع جاده مریوان- سقز

Fig.3. Elevation map of the Marivan-Saqez road

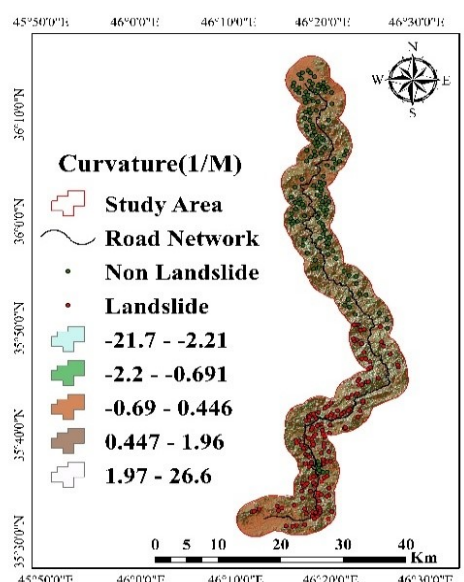
نتایج حاصل از بررسی نقشه انحنا (شکل ۵) نشان می دهد که تمرکز اصلی لغزش ها در طبقات با انحنا مثبت و نزدیک به صفر (به ویژه در محدوده ۱/۹۷ تا ۲۶/۶ و تا حدودی ۰/۶۹- تا ۰/۴۶) مشاهده می شود. در این بخش ها، نقاط قرمز نشان دهنده لغزش موجود به شکل خوشه ای در ناحیه جنوبی مسیر، جایی که ارتفاع متوسط تا نسبتاً بالا و شیب های تند حاکم اند، تجمع یافته اند. این نواحی از نظر شکل زمین به دلیل ترکیب شیب زیاد و انحنا محذب، پایداری کمتری دارند، زیرا تخلیه سریع آب و تغییرات فشار آب در خاک می تواند پایداری دامنه را کاهش داده و احتمال ایجاد لغزش را افزایش دهد. در مقابل، در نواحی با انحنا منفی (تر (مقعر)، تعداد لغزش ها به طور محسوسی کاهش یافته و عمدتاً نقاط فاقد لغزش (نقاط سبز) دیده می شوند. دامنه های مقعر معمولاً با تمرکز رواناب و تجمع رسوبات همراه اند، لذا با وجود رطوبت بیشتر خاک، اغلب از پایداری نسبی برخوردارند مگر اینکه عواملی مانند جنس سنگ، بارندگی شدید یا فعالیت های زمین ساختی بر پایداری آنها تاثیر بگذارد. از تحلیل بصری نقشه چنین بر می آید که در بخش های میانی و جنوبی محور مریوان- سقز، که از لحاظ هندسی ترکیبی از انحنا محدود مثبت و شیب های نسبتاً زیاد را دارند، پتانسیل وقوع لغزش ها به بیشترین میزان می رسد. این نتیجه نشان می دهد که انحنا محذب سطح می تواند پایداری دامنه را کاهش داده و احتمال لغزش را افزایش دهد. در مقابل، در نواحی شمالی مسیر سطح زمین بیشتر منفی و مقعر است، لغزش ها کمتر و گستره نقاط سبز غالب است. انحنا مقطع (شکل ۶) بیانگر تغییرات خمیدگی سطح زمین در امتداد جهت شیب است. مقادیر مثبت انحنا مقطع معمولاً نشان دهنده سطوح محذب در امتداد شیب و مقادیر منفی بیانگر سطوح مقعر در امتداد شیب هستند. بر اساس طبقه بندی انجام شده در نقشه، محدوده انحنا مقطع در چند طبقه از مقادیر منفی تا مثبت تقسیم

شده است. تحلیل پراکنش نقاط لغزش موجود و فاقد لغزش نشان می دهد که بخش قابل توجهی از لغزش ها در طبقات با مقادیر مثبت انحنای مقطع متمرکز شده اند. این طبقات که بیانگر دامنه های محدب در راستای شیب هستند، عمدتاً در بخش های میانی و به ویژه جنوبی منطقه مورد مطالعه گسترش یافته اند، جایی که تراکم نقاط قرمز (لغزش های موجود) به شکل خوشه ای قابل مشاهده است. در دامنه هایی با انحنای مقطع مثبت، به دلیل محدب بودن سطح در امتداد شیب، جریان آب سطحی شتاب بیشتری پیدا می کند و فرآیند های فرسایشی تشدید می شوند. در مقابل، در طبقات با مقادیر منفی انحنای مقطع که نشان دهنده سطوح مقعر در امتداد شیب هستند، تعداد لغزش ها کمتر مشاهده می شود و غالباً نقاط فاقد لغزش در این محدوده ها پراکنده اند. دامنه های مقعر معمولاً محل تجمع رسوبات و کاهش سرعت جریان آب هستند و در نتیجه انرژی فرسایشی کمتری در آن ها اعمال می شود. این وضعیت می تواند تا حدی موجب افزایش پایداری نسبی دامنه ها در این نواحی گردد، هرچند در شرایط خاص مانند بارش های شدید یا تغییرات هیدرولوژیکی، این مناطق نیز ممکن است مستعد ناپایداری شوند. از نظر توزیع مکانی، تمرکز اصلی لغزش ها در بخش جنوبی محور مورد مطالعه دیده می شود که علاوه بر مقادیر بالاتر انحنای مقطع مثبت، دارای شیب های نسبتاً زیاد و شرایط ژئومورفولوژیکی فعال تری نیز هستند. در مقابل، در بخش های شمالی منطقه که مقادیر انحنای مقطع بیشتر در محدوده های منفی یا نزدیک به صفر قرار دارند، تعداد لغزش ها کاهش یافته و نقاط فاقد لغزش غالب هستند.



شکل ۶- نقشه انحنای مقطع جاده مریوان - سقز

Fig. 6. Profile curvature map of the Marivan-Saqez road

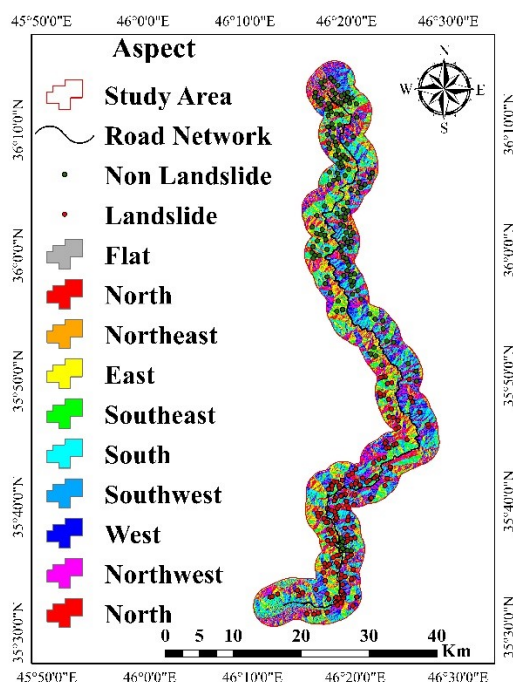


شکل ۵- نقشه انحنای جاده مریوان - سقز

Fig. 5. Curvature map of the Marivan-Saqez road

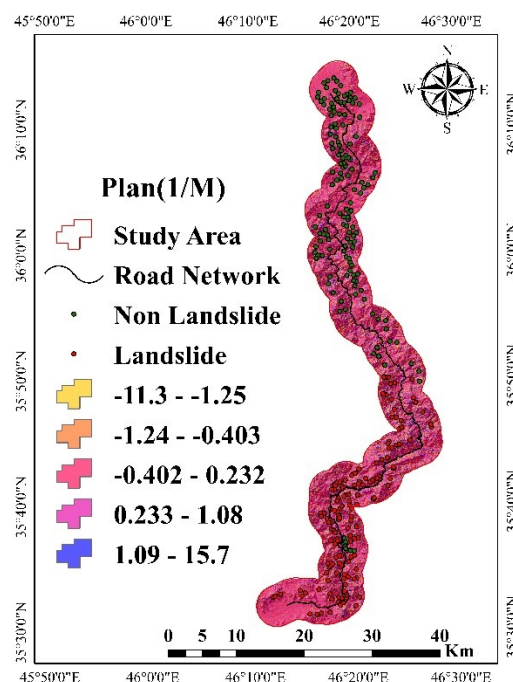
انحنای سطح (شکل ۷) بیانگر شکل هندسی دامنه ها از نظر محدب بودن یا مقعر بودن آن ها است و از طریق کنترل تمرکز یا پراکندگی جریان آب، می تواند بر پایداری یا ناپایداری دامنه ها اثر گذار باشد. تحلیل نقشه انحنای سطح و انطباق آن با نقاط لغزش موجود و فاقد لغزش، الگوی مشخصی از ارتباط بین این عامل و وقوع لغزش ها را در منطقه مورد مطالعه آشکار می کند. بر اساس طبقه بندی انجام شده، مقادیر انحنای سطح در منطقه در چندین طبقه از مقادیر منفی تا مثبت دسته بندی شده است. مقادیر منفی بیانگر دامنه های مقعر و مقادیر مثبت نشان دهنده دامنه های محدب هستند، در حالی که مقادیر نزدیک به صفر نمایانگر سطوح نسبتاً مستقیم یا تخت می باشند. بررسی پراکنش نقاط لغزش نشان می دهد که بخش قابل توجهی از لغزش ها در محدوده هایی با مقادیر انحنای نزدیک به صفر تا کمی منفی و مثبت تمرکز یافته اند. این وضعیت نشان دهنده آن است که دامنه هایی با شکل نسبتاً

مستقیم یا با انحنای ملایم بیش از سایر نواحی مستعد وقوع لغزش هستند. در بخش های جنوبی مسیر که تراکم لغزش ها بیشتر مشاهده می شود، بسیاری از نقاط لغزش در مناطقی قرار دارند که انحنای سطح در محدوده های میانی طبقات قرار گرفته است. این مناطق معمولاً محل تمرکز جریان های سطحی و تجمع رطوبت هستند و در نتیجه افزایش رطوبت و فشار آب در خاک می تواند پایداری دامنه را کاهش داده و احتمال وقوع لغزش را افزایش دهد. در مقابل، در نواحی با انحنای بسیار زیاد، چه در حالت مقعر شدید و چه محدب شدید، تعداد لغزش ها کمتر مشاهده می شود که می تواند ناشی از تمرکز کمتر مواد سست یا تخلیه سریع تر آب سطحی در این نواحی باشد. از سوی دیگر، دامنه های محدب معمولاً با پراکندگی جریان آب و کاهش تجمع رطوبت همراه هستند که می تواند تا حدی به پایداری بیشتر آن ها کمک کند، در حالی که دامنه های مقعر به دلیل تمرکز رواناب و رسوبات، مستعد افزایش ضخامت خاک و در نتیجه افزایش احتمال لغزش می شوند. با این حال، در منطقه مورد مطالعه به نظر می رسد که بیشترین لغزش ها در نواحی با انحنای ملایم رخ داده اند، نواحی ای که از نظر ژئومورفولوژیکی اغلب به عنوان مسیرهای انتقال مواد و محل تغییرات تدریجی شیب شناخته می شوند. بررسی فضایی نقشه جهت شیب (شکل ۸) نشان می دهد که دامنه ها در محدوده مورد مطالعه از تنوع جهتی بالایی برخوردارند و تقریباً تمامی جهات جغرافیایی در طول مسیر مشاهده می شوند. با این حال، توزیع نقاط لغزش در تمامی جهات یکنواخت نیست و تمرکز آن ها در برخی جهات بیشتر دیده می شود. در بخش های جنوبی محدوده، که بیشترین تراکم لغزش ها مشاهده می شود، بخش قابل توجهی از لغزش ها بر روی دامنه های با جهت جنوبی، جنوب غربی و جنوب شرقی رخ داده اند. این دامنه ها معمولاً تابش مستقیم بیشتری دریافت می کنند که می تواند باعث افزایش تغییرات دمایی، تشدید هوازدگی فیزیکی و کاهش انسجام مصالح سطحی شود. علاوه بر این، در اقلیم منطقه، دامنه های رو به جنوب ممکن است در دوره های بارندگی شدید، به دلیل کاهش پوشش گیاهی و افزایش رواناب سطحی، مستعد ناپایداری بیشتری باشند. در مقابل، دامنه های با جهت شمالی و شمال شرقی در بخش های شمالی و میانی منطقه بیشتر با نقاط فاقد لغزش (سبز) همراه هستند. این دامنه ها به دلیل دریافت تابش کمتر، معمولاً رطوبت بیشتری حفظ کرده و از پوشش گیاهی متراکم تری برخوردارند که می تواند به افزایش انسجام خاک و کاهش فرسایش کمک کند. به همین دلیل، در این جهات میزان وقوع لغزش نسبتاً کمتر است. همچنین در برخی نواحی میانی، لغزش ها بر روی دامنه های غربی و جنوب غربی نیز تمرکز دارند. این موضوع می تواند به نقش بادهای غالب و جهت بارش های منطقه مرتبط باشد، به گونه ای که دامنه های رو به مسیرهای اصلی سامانه های بارشی، رطوبت بیشتری دریافت کرده و در نتیجه احتمال اشباع خاک و افزایش فشار آب منفذی در آن ها بیشتر است. دامنه های تخت (Flat) کمترین میزان لغزش را نشان می دهند که امری طبیعی است، زیرا نبود شیب کافی، نیروی ناشی از وزن مصالح را کاهش داده و احتمال حرکت و وقوع لغزش را کمتر می کند.



شکل ۸- نقشه جهت شیب جاده مریوان- سقز

Fig. 8. Aspect map of the Marivan-Saqez road

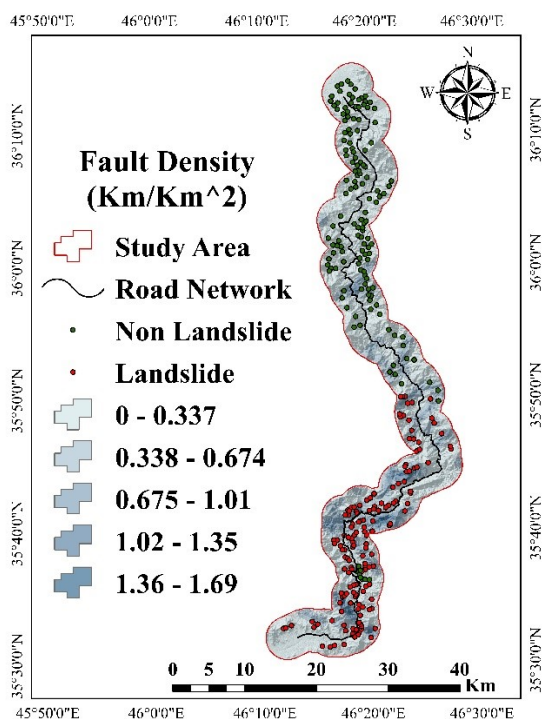


شکل ۷- نقشه انحنا سطح جاده مریوان- سقز

Fig.7. Plan curvature map of the Marivan-Saqez road

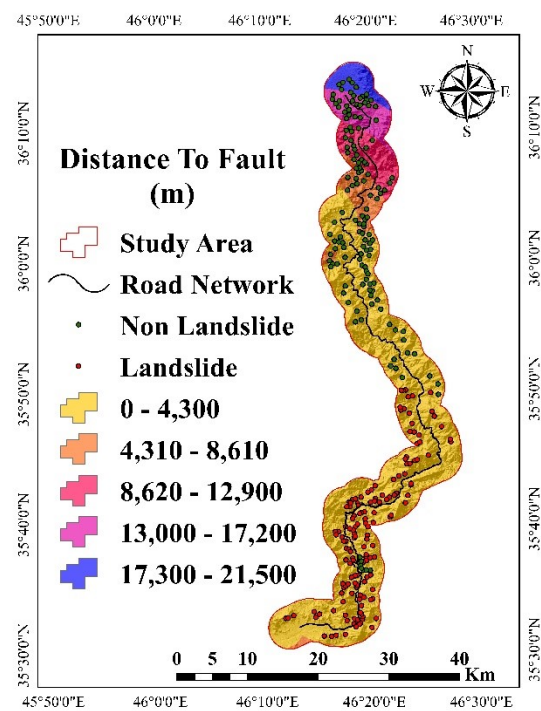
بررسی الگوی مکانی لغزش های زمین در محدوده جاده مریوان- سقز نشان می دهد که فاصله از گسل (شکل ۹) یکی از مهم ترین متغیرهای کنترل کننده پایداری دامنه ها در این مسیر کوهستانی است. بیشترین تراکم لغزش ها در طبقات فاصله کمتر از ۸۶۰۰ متر رخ داده است، به طوری که بخش قابل توجهی از نقاط لغزش در دو کلاس نخست یعنی ۰-۴۳۱۰ متر و ۴۳۱۰-۸۶۱۰ متر متمرکز شده اند. این موضوع بیانگر حساسیت بسیار زیاد دامنه های نزدیک به گسل نسبت به ناپایداری است. علاوه بر این، مقایسه نقاط لغزش و نقاط فاقد لغزش نشان می دهد که در طبقات نزدیک به گسل، تعداد نقاط لغزش به طور محسوسی بیش از نقاط پایدار است و با افزایش فاصله از گسل، این روند معکوس می شود، یعنی در نواحی دورتر از گسل، پراکندگی نقاط فاقد لغزش افزایش یافته و رخداد لغزش ها به حداقل رسیده است. در بخش های جنوبی و میانی مسیر که عمدتاً در محدوده فاصله کمتر از ۸۶۰۰ متر قرار می گیرند، لغزش ها بیشترین تراکم را دارند. این بخش ها علاوه بر فاصله کم از گسل، دارای توپوگرافی تندتر هستند که احتمالاً اثرات همزمان آن ها سبب افزایش فراوانی لغزش شده است. در مقابل، بخش شمالی مسیر که در طبقات فاصله بیشتر از ۱۳۰۰۰ متر قرار دارد، تعداد بسیار کمی لغزش را نشان می دهد و اغلب نقاط برداشت شده در این ناحیه فاقد لغزش بوده اند. این موضوع نشان می دهد که با افزایش فاصله از گسل ها و ساختارهای تکتونیکی، تاثیر آنها بر ناپایداری دامنه ها کاهش می یابد. روند مشاهده شده نشان می دهد که رابطه ای معکوس بین فاصله از گسل و احتمال وقوع لغزش وجود دارد، به این معنا که با افزایش فاصله از گسل، خطر لغزش به صورت پیوسته کاهش می یابد. این الگو با یافته های پژوهش های پیشین نیز همخوانی دارد و نشان می دهد که گسل ها به دلیل ایجاد شکستگی های ریزدانه، هوازگی شدیدتر، ضعف مکانیکی سنگ ها و امکان جریان یابی آب در امتداد سطوح گسلی، نقش قابل توجهی در کاهش مقاومت دامنه ها و ایجاد شرایط مساعد برای لغزش دارند. نقشه تراکم گسل (شکل ۱۰) در محدوده جاده مریوان- سقز میزان توسعه و تمرکز ساختارهای گسلی را در منطقه نشان می دهد. در این نقشه تراکم گسل در پنج طبقه از حدود ۰ تا ۱/۶۹ کیلومتر بر کیلومتر مربع طبقه بندی شده است که با طیفی از رنگ های روشن تا تیره نمایش داده

شده اند. بررسی توزیع مکانی این طبقات نشان می دهد که تراکم گسل در بخش های مختلف محدوده مطالعه یکسان نیست و از بخش های شمالی به سمت قسمت های جنوبی تغییرات قابل توجهی دارد. در بخش های شمالی محدوده، مقادیر تراکم گسل عمدتاً در طبقات پایین تر قرار دارند (حدود ۰ تا ۰/۶۷ کیلومتر بر کیلومتر مربع). در این قسمت ها بیشتر نقاط مشاهده شده مربوط به نقاط فاقد لغزش (نقاط سبز) است و رخداد لغزش ها بسیار محدود و پراکنده است. این موضوع نشان می دهد که در مناطقی که تراکم گسل کمتر است، ساختار سنگ ها نسبتاً یکپارچه تر بوده و در نتیجه دامنه ها از پایداری بیشتری برخوردارند. با حرکت به سمت بخش های میانی منطقه، مقادیر تراکم گسل به تدریج افزایش یافته و در طبقات متوسط (حدود ۰/۶۷ تا ۱/۰۱ کیلومتر بر کیلومتر مربع) قرار می گیرد. در این نواحی تعداد نقاط لغزش افزایش یافته و پراکنش آن ها نسبت به بخش های شمالی بیشتر می شود. وجود گسل ها در این بخش ها باعث ایجاد شکستگی ها و درزه های متعدد در سنگ ها شده و این امر موجب کاهش مقاومت مکانیکی و افزایش حساسیت دامنه ها نسبت به عوامل محرک مانند بارندگی و فرسایش می شود. بیشترین مقادیر تراکم گسل در بخش های جنوبی محدوده مشاهده می شود که در طبقات ۱/۰۲ تا ۱/۶۹ کیلومتر بر کیلومتر مربع قرار دارند. در این مناطق تمرکز بالایی از نقاط لغزش (نقاط قرمز) مشاهده می شود که نشان دهنده ارتباط مستقیم میان افزایش تراکم گسل و افزایش وقوع لغزش ها است. وجود شبکه متراکم گسل ها در این بخش باعث خرد شدگی و ضعف ساختاری سنگ ها شده و نفوذ پذیری و هوازدگی آن ها را افزایش می دهد. این شرایط در کنار عوامل دیگری مانند شیب زیاد و بارندگی بیشتر در بخش جنوبی منطقه، باعث کاهش پایداری دامنه ها و افزایش احتمال وقوع لغزش می شود.



شکل ۱۰- نقشه تراکم گسل جاده مریوان- سقز

Fig. 10. Fault density map of the Marivan-Saqez road

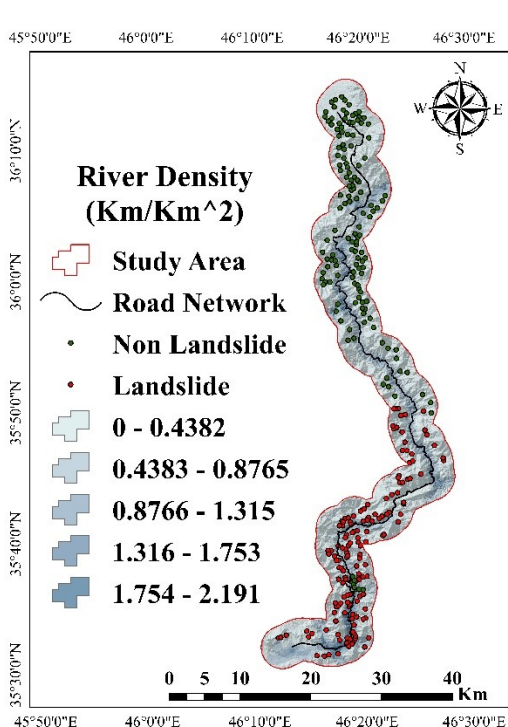


شکل ۹- نقشه فاصله از گسل جاده مریوان- سقز

Fig. 9. Distance to fault map of the Marivan-Saqez road

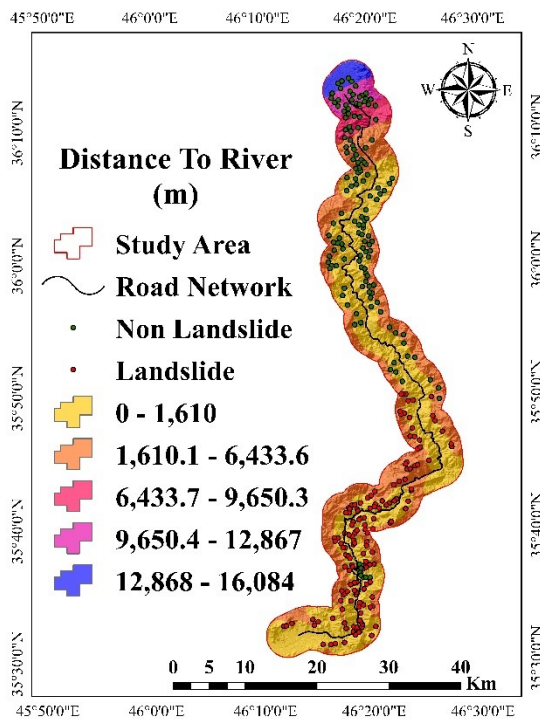
بررسی نقش فاصله از رودخانه (شکل ۱۱) در رخداد لغزش های زمین در محور مریوان- سقز نشان می دهد که آبراه ها به عنوان یکی از مهم ترین عوامل مؤثر بر ناپایداری دامنه ها عمل می کنند. تحلیل نقشه فاصله از رودخانه و توزیع نقاط لغزش موجود

و فاقد لغزش، الگوی مشخص و معنی داری از ارتباط میان فاصله از شبکه زهکشی و رخداد لغزش ها را آشکار می سازد. نتایج نشان می دهد که بیشترین تراکم لغزش ها در طبقات فاصله کم تا متوسط از رودخانه قرار گرفته اند، به گونه ای که تعداد قابل توجهی از نقاط لغزش در دو طبقه نخست نقشه، یعنی فاصله ۰ تا ۱۶۱۰ متر و ۱۶۱۰ تا ۶۳۳۳ متر متمرکز شده اند. این الگو بیانگر آن است که دامنه های نزدیک به رودخانه بیش از سایر نواحی در معرض فرایند های تخریبی ناشی از جریان آب قرار دارند. در بخش های جنوبی مسیر که مسیر جاده بیشتر از سایر نواحی به آبراهه ها نزدیک می شود، تراکم لغزش ها بسیار بالاست. این بخش ها علاوه بر فاصله کم از رودخانه، در معرض شیب های تندتر و ساختارهای ناپایدارتر زمین شناسی نیز قرار دارند و همین هم زمانی عوامل، شدت لغزش ها را در این ناحیه افزایش داده است. در مقابل، در نواحی شمالی مسیر که فاصله از رودخانه به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد و طبقات فاصله بیشتر از حدود ۹۰۰۰ متر غالب است، تعداد لغزش ها به حداقل می رسد و بیشتر نقاط برداشت شده در این محدوده به عنوان نقاط فاقد لغزش ثبت شده اند. این الگوی فضایی نشان می دهد که با افزایش فاصله از رودخانه، تأثیر فرآیند های هیدرولوژیک و فرسایشی بر پایداری دامنه ها کاهش می یابد و دامنه ها وضعیت پایدارتر و مقاوم تری پیدا می کنند. از این رو می توان گفت که رابطه ای معکوس و تدریجی بین فاصله از رودخانه و احتمال وقوع لغزش در منطقه وجود دارد.



شکل ۱۲- نقشه تراکم رودخانه جاده مریوان- سقز

Fig.12. River density map of the Marivan-Saqez road



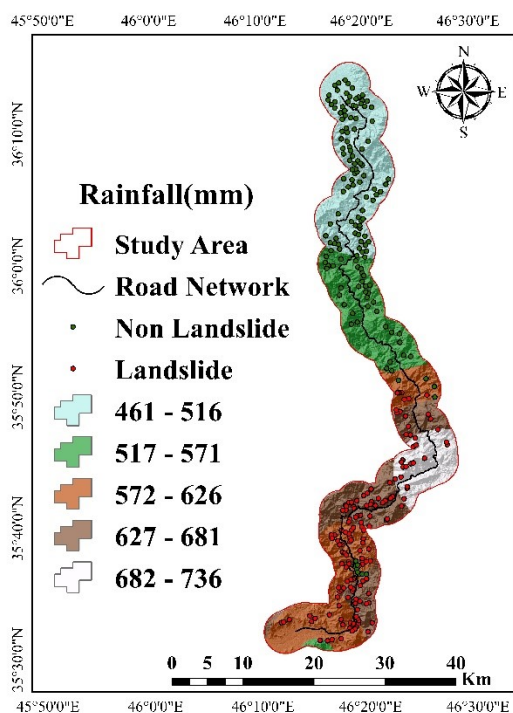
شکل ۱۱- نقشه فاصله از رودخانه جاده مریوان- سقز

Fig.11. Distance to river map of the Marivan-Saqez road

نقشه تراکم رودخانه (شکل ۱۲) نشان دهنده میزان توسعه شبکه زهکشی در واحد سطح است که خود بازتابی از شرایط توپوگرافی، لیتولوژی و ویژگی های هیدرولوژیک منطقه محسوب می شود. در این نقشه، مقادیر تراکم رودخانه از کمترین مقدار در شمال منطقه تا بیشترین مقدار در جنوب، روندی افزایشی دارند. طبقات پایین تر (۰/۰۴ تا ۰/۸۷ کیلومتر/کیلومتر مربع) عمدتاً در بخش های شمالی و میانی محدوده مشاهده می شود، در حالی که طبقات بالاتر (۱/۳۱ تا ۲/۱۹ کیلومتر/کیلومتر مربع) در بخش های جنوبی و جنوب غربی گسترده شده اند. با انطباق نقاط لغزش بر روی این طبقات، مشخص می شود که بیشترین تراکم لغزش ها

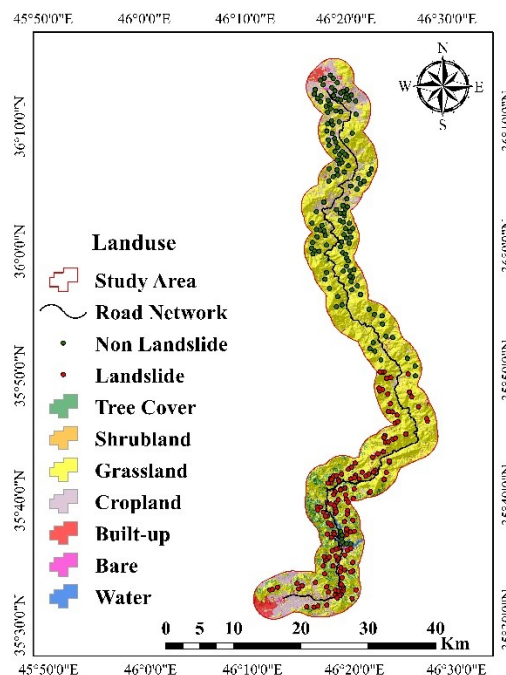
دقیقاً در مناطقی رخ داده است که بیشترین مقدار تراکم رودخانه را نیز دارند. بخش های جنوبی که دارای شبکه زهکشی متراکم تری هستند، تجمع قابل توجهی از نقاط قرمز را نشان می دهند. در مقابل، مناطق شمالی با تراکم رودخانه کمتر، عمدتاً دارای نقاط سبز (فاقد لغزش) هستند و لغزش ها در این بخش به صورت پراکنده و محدود مشاهده می شوند. این الگو از آن جهت قابل انتظار است که تراکم بالای رودخانه معمولاً نشانه ای از شیب های تند، بارش بیشتر، هوازگی قویتر و فرسایش شدیدتر است، عواملی که همگی به عنوان محرک های اصلی وقوع لغزش شناخته می شوند. به طور کلی، نتایج نشان می دهد که تراکم رودخانه یکی از مهم ترین شاخص های موثر بر وقوع لغزش ها در محدوده مطالعه است، به ویژه در بخش های جنوبی مسیر که ترکیبی از زهکشی متراکم، شیب زیاد، و احتمالاً بارندگی بالاتر وجود دارد. این عوامل در کنار هم باعث افزایش ناپایداری و بروز لغزش های متعدد در این منطقه شده اند. بنابراین، طبقات با تراکم رودخانه بالا باید در پهنه بندی خطر لغزش به عنوان زون های با ریسک بسیار زیاد در نظر گرفته شوند.

نقشه میانگین بارش سالانه (شکل ۱۳) در محدوده جاده مریوان- سقز نشان دهنده تغییرات مکانی بارندگی در منطقه است که در پنج طبقه بارشی از حدود ۴۶۱ تا ۷۳۶ میلیمتر در سال طبقه بندی شده است. بررسی الگوی توزیع این طبقات نشان می دهد که میزان بارش از بخش های شمالی منطقه به سمت بخش های جنوبی به تدریج افزایش می یابد، به طوری که کمترین مقادیر بارش در طبقات آبی و سبز (حدود ۴۶۱ تا ۵۷۱ میلیمتر) در بخش های شمالی مشاهده می شود، در حالی که بیشترین مقادیر بارش در طبقات قهوه ای و سفید (حدود ۶۲۷ تا ۷۳۶ میلیمتر) در بخش های میانی تا جنوبی محدوده گسترش یافته اند. این الگوی افزایشی بارش با شرایط توپوگرافی و ارتفاعی منطقه نیز هماهنگی دارد. با تطبیق موقعیت نقاط لغزش (قرمز) و نقاط فاقد لغزش (سبز) با طبقات بارشی، مشخص می شود که بیشترین تراکم لغزش ها در نواحی با بارش متوسط تا زیاد، به ویژه در طبقات قهوه ای و سفید، متمرکز شده است. در این بخش ها که عمدتاً در قسمت های میانی و جنوبی محور قرار دارند، تعداد زیادی از نقاط قرمز مشاهده می شود که نشان دهنده افزایش قابل توجه رخداد لغزش در مناطقی با بارندگی بیشتر است. در مقابل، در بخش های شمالی که میزان بارش کمتر بوده و در طبقات آبی و سبز قرار دارند، بیشتر نقاط فاقد لغزش در آن قسمت ها قرار گرفته اند. نقشه پوشش اراضی و پراکنش نقاط زمین لغزش (شکل ۱۴)، نشان دهنده تنوع کاربری ها و پوشش های سطح زمین در منطقه مورد مطالعه است که شامل طبقات بوته زار، علفزار، اراضی کشاورزی، پوشش درختی مناطق ساخته شده، پهنه های آبی و اراضی بایر می باشد. الگوی توزیع این طبقات نشان می دهد که علفزار بخش قابل توجهی از محدوده مورد مطالعه را به خود اختصاص داده و در قسمت های مختلف امتداد محور گسترش یافته است، اراضی کشاورزی، مناطق ساخته شده و اراضی بایر بیشتر در بخش های میانی و جنوبی محدوده قابل مشاهده هستند. در حالی که پوشش درختی و بوته زار نیز بیشتر به صورت لکه هایی پراکنده در بخش های مختلف منطقه مشاهده می شوند. با تطبیق موقعیت نقاط لغزش (قرمز) و نقاط فاقد لغزش (سبز) با طبقات کاربری و پوشش اراضی، مشخص می شود که نقاط فاقد لغزش تراکم بیشتری در بخش های شمالی محدوده دارند و در این بخش ها پوشش درختی، بوته زار و علفزار سهم بیشتری از سطح منطقه را شامل می شوند. در مقابل، تراکم نقاط لغزش در بخش های میانی و جنوبی بیشتر بوده و در این قسمت ها نقاط قرمز در مجاورت و داخل پهنه های مربوط به علفزار، اراضی کشاورزی، مناطق ساخته شده و اراضی بایر مشاهده می شوند. بنابراین، پراکنش مکانی نقاط لغزش و غیر لغزش در نقشه با الگوی توزیع طبقات مختلف کاربری و پوشش اراضی قابل مقایسه است.



شکل ۱۳- نقشه میانگین بارش سالانه جاده مریوان- سقز

Fig.13. Mean annual precipitation map of the Marivan-Saqez road



شکل ۱۴- نقشه پوشش اراضی و پراکنش نقاط زمین لغزش در

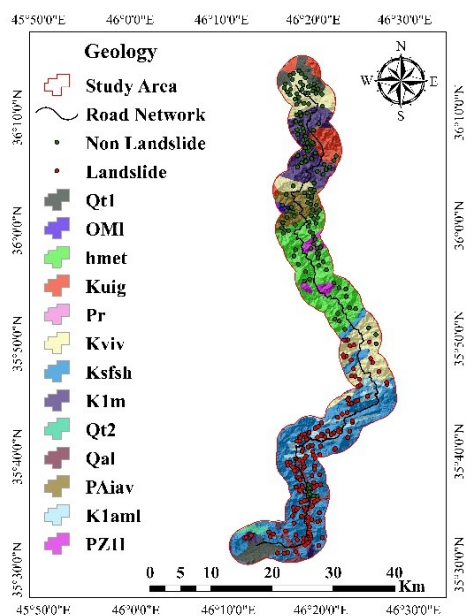
محور مریوان- سقز

Fig. 14. Land use map and spatial distribution of landslide points along the Marivan-Saqez road

نقشه شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (شکل ۱۵)، تغییرات مکانی پوشش گیاهی را در پنج طبقه از ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۲۹ نشان می دهد. بررسی الگوی توزیع این طبقات نشان می دهد که مقادیر پایین با رنگ های قرمز و نارنجی و مقادیر بالاتر با رنگ های زرد و طیف های مختلف سبز نمایش داده شده اند. طبقات با مقادیر پایین تر، به ویژه محدوده های ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۰۷۷ و ۰/۰۷۸ تا ۰/۱، در بخش های مختلف محدوده مشاهده می شوند، در حالی که طبقات دارای مقادیر بالاتر، به ویژه ۰/۱۴ تا ۰/۱۶ و ۰/۱۷ تا ۰/۲۹، بیشتر به صورت لکه هایی در بخش های مختلف محدوده، به ویژه در قسمت های جنوبی، گسترش یافته اند. با تطبیق موقعیت نقاط لغزش (قرمز) و نقاط فاقد لغزش (سبز) با طبقات NDVI، مشخص می شود که تراکم بیشتری از نقاط لغزش در پهنه های دارای مقادیر پایین تا متوسط، به ویژه طبقات قرمز، نارنجی و زرد، مشاهده می شود. در مقابل، در پهنه های دارای مقادیر بالاتر و رنگ های سبز، تعداد نقاط لغزش در مقایسه با طبقات پایین تر کمتر مشاهده می شود و نقاط فاقد لغزش در بخش های مختلف این پهنه ها پراکنده اند. همچنین در قسمت های میانی و جنوبی محدوده که لکه های با مقادیر بالاتر مشاهده می شود، نقاط لغزش همچنان در بخش هایی از طبقات پایین تر تمرکز بیشتری دارند. در مجموع، پراکنش نقاط لغزش در نقشه نشان می دهد که بخش قابل توجهی از این نقاط در پهنه های دارای مقادیر پایین تر شاخص NDVI قرار گرفته اند.

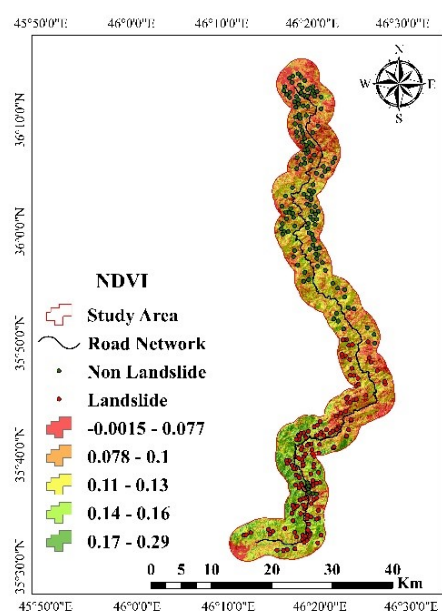
نقشه زمین شناسی (شکل ۱۶) پراکنش واحد های مختلف زمین شناسی و موقعیت مکانی نقاط لغزش و فاقد لغزش را نشان می دهد. بررسی الگوی توزیع واحدهای زمین شناسی نشان می دهد که در بخش های شمالی محدوده، واحد hmet بخش قابل توجهی از منطقه را پوشش داده و واحدهای Qtl، Qml و Kuig نیز به صورت لکه هایی در این بخش مشاهده می شوند. در قسمت های

میانی محدوده، واحد hmet همچنان گسترش قابل توجهی دارد و در کنار آن واحدهای Pr، Kv iv و Ksfsh نیز مشاهده می شوند. در بخش های میانی تا جنوبی، واحدهای Ksfsh، K1m، Qt2، Qal، PAiav، K1aml و PZ11 بخش عمده ای از محدوده را دربر گرفته اند. با تطبیق موقعیت نقاط لغزش (قرمز) و نقاط فاقد لغزش (سبز) با واحد های زمین شناسی، مشخص می شود که نقاط فاقد لغزش تراکم بیشتری در بخش های شمالی و میانی، به ویژه در محدوده واحد hmet، دارند. در مقابل، نقاط لغزش در بخش های میانی تا جنوبی محدوده تراکم بیشتری نشان می دهند و تعداد زیادی از آن ها در واحد های Ksfsh، K1m، Qt2 و Qal مشاهده می شوند. همچنین در قسمت جنوبی محدوده، که واحد های زمین شناسی متنوعی از جمله Ksfsh، K1aml و PZ11 گسترش یافته اند، تراکم نقاط لغزش بیشتر از بخش های شمالی مشاهده می شود. در مجموع، پراکنش نقاط لغزش و فاقد لغزش در نقشه با الگوی مکانی واحد های زمین شناسی در امتداد محور مریوان- سقز قابل مقایسه است و تمرکز بیشتر نقاط لغزش در برخی واحد های زمین شناسی بخش های میانی و جنوبی محدوده به وضوح مشاهده می شود.



شکل ۱۶- نقشه زمین شناسی و پراکنش نقاط لغزش در محور مریوان- سقز

Fig. 16. Geological map and spatial distribution of landslide points along the Marivan-Saqez road



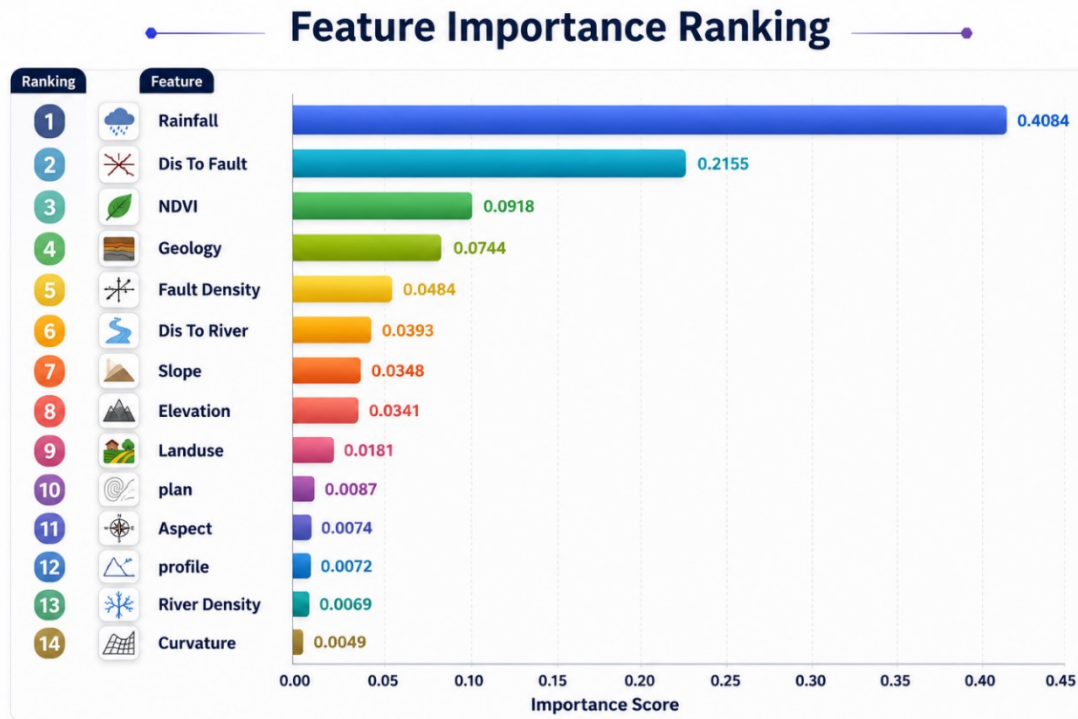
شکل ۱۵- نقشه شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) در محور مریوان- سقز

Fig 15. Vegetation Index (NDVI) map of the Marivan-Saqez road

نمودار اهمیت ویژگی ها (شکل ۱۷) نشان دهنده میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مورد استفاده در مدل بر پیش بینی و شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در محدوده جاده مریوان- سقز است. مقادیر ارائه شده بیانگر سهم نسبی هر متغیر در عملکرد مدل بوده و هرچه مقدار اهمیت یک پارامتر بیشتر باشد، نقش آن در کنترل و شکل گیری لغزش ها در منطقه مورد مطالعه بیشتر است. بر اساس نتایج به دست آمده، بارندگی سالانه با مقدار اهمیت ۰/۴۰۸۴ بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش ها در منطقه دارد و فاصله قابل توجهی با سایر پارامتر ها نشان می دهد. این موضوع بیانگر آن است که شرایط هیدرولوژیکی و میزان بارش مهم ترین عامل کنترل کننده ناپایداری دامنه ها در این محدوده محسوب می شود. افزایش بارندگی می تواند باعث اشباع خاک و سنگ های هوازده و افزایش فشار آب در خاک شود و در نتیجه، پایداری دامنه را کاهش داده و احتمال وقوع حرکات توده ای را افزایش دهد. همچنین بارندگی شدید می تواند باعث افزایش رواناب سطحی، تشدید فرسایش و تضعیف ساختار دامنه ها شود که همگی در

تحریک زمین لغزش نقش مؤثری دارند. پس از آن، فاصله از گسل ها با مقدار 0.2155 دومین پارامتر مهم در مدل محسوب می شود. این نتیجه نشان می دهد که ساختارهای زمین ساختی نقش قابل توجهی در کنترل ناپایداری دامنه ها در منطقه دارند. نزدیکی به گسل ها معمولاً با افزایش شکستگی ها و درزه ها در توده سنگی همراه است که باعث کاهش انسجام و مقاومت مکانیکی سنگ ها می شود. علاوه بر این، این شکستگی ها مسیر مناسبی برای نفوذ آب فراهم می کنند و در نتیجه فرایند هوازدگی و تضعیف مصالح دامنه تشدید می شود که زمینه را برای وقوع لغزش فراهم می سازد. NDVI با اهمیت 0.0918 در رتبه سوم قرار گرفته است. اهمیت نسبتاً بالای این شاخص نشان می دهد که وضعیت پوشش گیاهی در تفکیک مناطق لغزشی و غیر لغزشی در محدوده مورد مطالعه نقش قابل توجهی داشته است. پوشش گیاهی می تواند از طریق افزایش چسبندگی ریشه ای، کاهش سرعت رواناب، افزایش نفوذ تدریجی آب و کاهش فرسایش سطحی بر پایداری دامنه ها اثرگذار باشد. از سوی دیگر، مقادیر پایین NDVI می تواند در برخی مناطق بیانگر کاهش پوشش گیاهی، تخریب سطح زمین یا شرایط نامساعد محیطی باشد که با افزایش آسیب پذیری دامنه ارتباط دارد. بنابراین، اهمیت NDVI در این مدل بیانگر نقش شرایط پوشش سطح زمین در کنترل مکانی ناپایداری ها است. در رتبه چهارم، زمین شناسی با مقدار اهمیت 0.0744 قرار دارد. این نتیجه بیانگر نقش شرایط لیتولوژیکی و ساختاری در شکل گیری و پراکنش زمین لغزش ها در محور مریوان- سقز است. تفاوت در جنس و مقاومت واحدهای سنگی، میزان هوازدگی، نفوذ پذیری و ویژگی های ناپیوستگی ها می تواند موجب تفاوت در میزان حساسیت دامنه ها نسبت به ناپایداری شود. بنابراین، قرار گرفتن زمین شناسی در میان چهار متغیر نخست نشان می دهد که ویژگی های ذاتی مواد تشکیل دهنده دامنه، در کنار عوامل محرک مانند بارندگی، در کنترل استعداد وقوع لغزش نقش دارند. تراکم گسل با اهمیت 0.0484 در رتبه پنجم قرار گرفته است. این پارامتر مکمل فاصله از گسل بوده و اطلاعاتی درباره شدت و تراکم ساختارهای گسلی در محدوده ارائه می کند. تراکم بالاتر گسل ها می تواند نشان دهنده افزایش خرد شدگی و ناپیوستگی در توده سنگی باشد و در نتیجه مقاومت و یکپارچگی دامنه را کاهش دهد. قرار گرفتن هم زمان فاصله از گسل و تراکم گسل در میان متغیرهای با اهمیت بالاتر، اهمیت شرایط زمین ساختی را در کنترل ناپایداری های محور مورد مطالعه تأیید می کند. در رتبه ششم، فاصله از رودخانه با مقدار 0.0393 قرار دارد. نزدیکی به شبکه رودخانه ای می تواند از طریق فرسایش پای دامنه، حذف تکیه گاه طبیعی و افزایش رطوبت مصالح، شرایط پایداری دامنه را تحت تأثیر قرار دهد. این اثر به ویژه در دره های کوهستانی و بخش هایی از محور مریوان- سقز که دامنه ها در مجاورت آبراهه ها قرار گرفته اند، می تواند اهمیت بیشتری داشته باشد. شیب با مقدار 0.0348 در رتبه ۸ قرار دارد اگرچه شیب از نظر مکانیک دامنه یکی از عوامل بنیادی کنترل کننده پایداری است، اهمیت نسبی آن در این مدل کمتر از عواملی مانند بارندگی، فاصله از گسل، NDVI و زمین شناسی به دست آمده است. این نتیجه به معنای بی اهمیت بودن شیب نیست، بلکه نشان دهنده سهم نسبی آن در ساختار داده های مورد استفاده و شرایط خاص محدوده مطالعه است. همچنین، در این پژوهش شیب استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع، شیب عمومی سطح زمین را بیان می کند و لزوماً شیب موضعی برش های ایجاد شده در مسیر جاده، زاویه دیوارهای جاده یا هندسه دیواره های ایجاد شده در اثر عملیات راه سازی نیست. از آنجا که محدوده مطالعه یک محور جاده ای با بافر ۲ کیلومتری است، این تفاوت می تواند در میزان اهمیت مشاهده شده برای متغیر شیب مؤثر باشد. در رتبه هشتم، ارتفاع با مقدار 0.0341 قرار دارد که نشان دهنده نقش نسبتاً مهم شرایط توپوگرافی در توزیع لغزش ها است. ارتفاع می تواند به طور غیرمستقیم با عواملی مانند تغییرات اقلیمی محلی، میزان بارندگی، نوع پوشش گیاهی و شدت فرایندهای فرسایشی ارتباط داشته باشد. در بسیاری از مناطق کوهستانی، دامنه های واقع در ارتفاعات میانی معمولاً شرایط مناسبی برای تجمع رطوبت، توسعه خاک و وقوع ناپایداری های دامنه ای دارند که می تواند علت اهمیت این پارامتر در مدل باشد. کاربری اراضی با اهمیت 0.0181 در رتبه نهم قرار گرفته است. کاربری اراضی می تواند از طریق تغییر در پوشش سطح زمین، میزان نفوذ آب، شدت رواناب، فعالیت های انسانی و میزان حفاظت دامنه بر پایداری اثرگذار باشد. با این حال، اهمیت نسبتاً پایین آن در مدل نشان می دهد که در محدوده مورد مطالعه، اثر آن در مقایسه با عوامل بارشی، زمین ساختی، پوشش گیاهی و شرایط زمین شناسی محدودتر بوده است. در رتبه های پایین تر، انحنای پلان با اهمیت 0.0087 ، جهت شیب با 0.0074 ،

انحنای پروفیل با ۰/۰۰۷۲، تراکم رودخانه با ۰/۰۰۶۹ و انحنای کلی با ۰/۰۰۴۹ قرار گرفته اند. اهمیت پایین تر این متغیرها به این معنا نیست که این عوامل هیچ نقشی در فرایند های ژئومورفولوژیکی ندارند، بلکه نشان می دهد در ساختار داده و محدوده مورد مطالعه، قدرت تفکیک آنها برای پیش بینی وقوع زمین لغزش کمتر از سایر متغیرها بوده است. انحناهای سطح می توانند بر تمرکز یا پراکنش جریان آب و توزیع رطوبت اثر بگذارند، در حالی که جهت شیب نیز از طریق دریافت تابش، تبخیر و تفاوت های رطوبتی می تواند به صورت غیرمستقیم بر پایداری اثرگذار باشد. در مجموع، نتایج نشان می دهد که عوامل اقلیمی، زمین ساختی و شرایط سطح زمین بیشترین سهم را در مدل ANN داشته اند. برتری بارندگی (۰/۴۰۸۴) و فاصله از گسل (۰/۵۱۵۵) نسبت به سایر متغیرها نشان می دهد که در محور مریوان-سقز، ترکیب عوامل محرک ناپایداری و عوامل زمینه ای کنترل کننده مقاومت دامنه نقش مهمی در توزیع مکانی زمین لغزش ها دارد. همچنین، قرار گرفتن NDVI و زمین شناسی در رتبه های سوم و چهارم نشان می دهد که وضعیت پوشش گیاهی و ویژگی های مواد زمین شناسی نیز در کنار عوامل بارشی و ساختاری، در تفکیک مناطق مستعد زمین لغزش اهمیت قابل توجهی دارند. بنابراین، نتایج اهمیت ویژگی ها باید به عنوان اهمیت نسبی متغیرها در ساختار مدل ANN و محدوده مورد مطالعه تفسیر شود، نه به عنوان یک رتبه بندی مطلق از اهمیت ژئومورفولوژیکی عوامل زمین لغزش.



شکل ۱۷- نمودار اهمیت ویژگی پارامترها

Fig.17. Feature importance plot of the parameters

نقشه پهنه بندی نهایی خطر وقوع زمین لغزش (شکل ۱۸) در محدوده جاده مریوان- سقز، نتیجه تلفیق و همپوشانی تمامی پارامترهای مؤثر در وقوع لغزش است که بر اساس آن منطقه مورد مطالعه در پنج طبقه خطر شامل خطر بسیار کم، خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر بسیار زیاد طبقه بندی شده است. در این نقشه علاوه بر پهنه های خطر، موقعیت جاده، محدوده منطقه مورد مطالعه و همچنین پراکنش نقاط لغزش موجود (نقاط قرمز) و نقاط فاقد لغزش (نقاط سبز) نیز نمایش داده شده که امکان ارزیابی دقت و اعتبار مدل پهنه بندی را فراهم می کند. بررسی الگوی فضایی پهنه های خطر نشان می دهد که بخش های شمالی

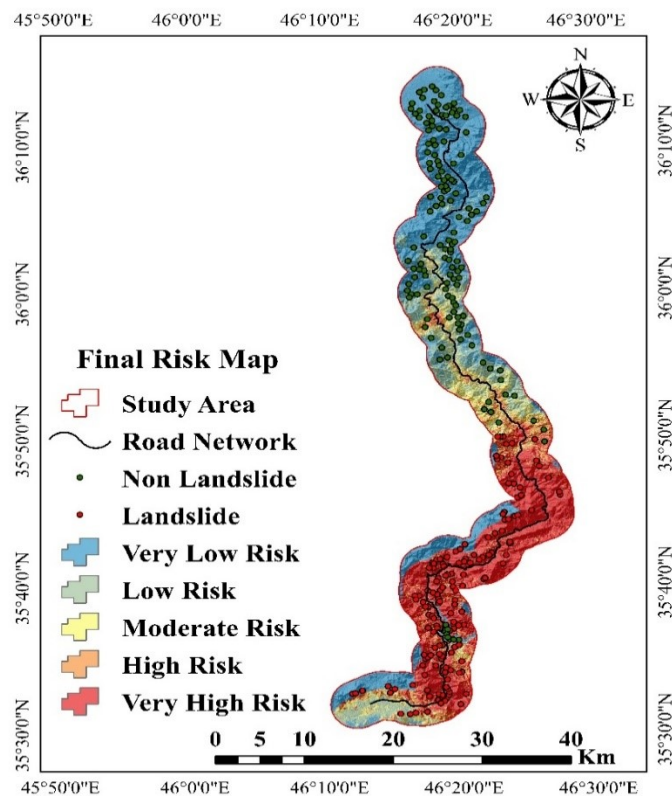
منطقه عمدتاً در طبقات خطر بسیار کم و خطر کم قرار دارند که با رنگ های آبی و سبز روشن مشخص شده اند. در این قسمت ها تراکم نقاط لغزش بسیار محدود است و بیشتر نقاط مشاهده شده مربوط به نقاط فاقد لغزش می باشند. این موضوع بیانگر آن است که شرایط ژئومورفولوژیکی و محیطی در این بخش ها از پایداری بیشتری برخوردار است. شیب های نسبتاً ملایم تر، فاصله بیشتر از گسل ها، تراکم کمتر شبکه زهکشی و همچنین میزان بارندگی پایین تر از جمله عواملی هستند که موجب کاهش حساسیت دامنه ها به وقوع زمین لغزش در این نواحی شده اند. در بخش های میانی محدوده، پهنه های خطر متوسط که با رنگ زرد مشخص شده اند گسترش بیشتری دارند. در این مناطق تعداد نقاط لغزش نسبت به بخش شمالی افزایش یافته و همزمان تعدادی از نقاط فاقد لغزش نیز دیده می شود. این الگوی پراکنش نشان می دهد که شرایط محیطی در این بخش ها در وضعیت حد واسط قرار دارد و برخی عوامل ناپایداری مانند افزایش شیب دامنه، نزدیک تر شدن به شبکه آبراهه ها و یا تغییرات لیتولوژیکی می توانند احتمال وقوع لغزش را افزایش دهند، هرچند که هنوز این نواحی به طور کامل در وضعیت بحرانی قرار ندارند. در ادامه و با حرکت به سمت بخش های جنوبی منطقه، پهنه های خطر زیاد و بسیار زیاد به طور قابل توجهی گسترش پیدا می کنند که به ترتیب با رنگ های نارنجی و قرمز نمایش داده شده اند. تمرکز اصلی نقاط لغزش موجود در همین محدوده ها مشاهده می شود و بخش عمده نقاط قرمز دقیقاً در پهنه های با خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته اند. این همپوشانی مناسب میان نقاط لغزش و پهنه های پرخطر نشان دهنده کارایی مناسب مدل پهنه بندی و صحت نسبی نتایج به دست آمده است. در این بخش ها مجموعه ای از شرایط ناپایدار به طور همزمان وجود دارد، از جمله شیب های زیاد تا بسیار زیاد، تراکم بالای گسل ها، نزدیکی به شبکه آبراهه ها، تراکم بالای رودخانه ها و همچنین میزان بارندگی بیشتر که همگی در افزایش احتمال وقوع لغزش نقش مهمی دارند. به طور کلی الگوی فضایی نقشه نشان می دهد که خطر وقوع زمین لغزش از شمال به جنوب منطقه افزایش می یابد و بیشترین تمرکز پهنه های با خطر زیاد و بسیار زیاد در بخش های جنوبی مسیر جاده مریوان - سقز قرار دارد. همچنین انطباق قابل توجه نقاط لغزش ثبت شده با این پهنه ها بیانگر آن است که مدل نهایی توانسته است مناطق مستعد وقوع لغزش را به خوبی شناسایی کند. بر این اساس، بخش های جنوبی منطقه به ویژه نواحی مجاور مسیر جاده که در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته اند، نیازمند توجه بیشتر در برنامه ریزی های عمرانی، مدیریت خطر و اجرای اقدامات پایدار سازی دامنه ها هستند تا از خسارات احتمالی ناشی از زمین لغزش جلوگیری شود.

در جدول ۱، عملکرد مدل پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در سه مرحله آموزش^۱، اعتبار سنجی^۲ و آزمون (Test) بر اساس شاخص های آماری مختلف ارزیابی شده است. تحلیل این جدول نشان می دهد که مدل نه تنها در مرحله آموزش عملکرد بسیار خوبی دارد، بلکه توانسته است در دو مرحله اعتبار سنجی و آزمون نیز نتایج پایدار، دقیق و قابل اتکایی ارائه دهد. نتایج حاصل از جدول پارامترهای آماری نشان می دهد که مدل سازی انجام شده برای پهنه بندی خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه از دقت و پایداری بسیار بالایی برخوردار است. مقدار AUC که یکی از معتبرترین شاخص های ارزیابی مدل های طبقه بندی محسوب می شود، در مرحله آموزش برابر با ۱ بوده و در مراحل اعتبار سنجی و آزمون به ترتیب برابر با ۰/۹۸۸ و ۰/۹۹۰ به دست آمده است. این مقادیر نشان می دهند که مدل توانایی بسیار بالایی در تفکیک صحیح مناطق لغزشی و غیر لغزشی دارد و دچار کاهش چشمگیر دقت در داده های جدید نشده است. در شاخص Accuracy نیز عملکرد مدل بسیار مطلوب است. مقدار دقت در مرحله آموزش برابر ۰/۹۹۴ بوده و در مراحل اعتبار سنجی ۰/۹۵۲ و آزمون ۰/۹۴۴ تنها اندکی کاهش داشته است. این کاهش اندک معمولاً نشانه تعمیم پذیری مناسب مدل و نبود بیش برآزش است. به بیان دیگر، مدل در مواجهه با داده های جدید نیز توانسته عملکردی مشابه داده های آموزش داشته باشد. شاخص Precision نیز یکی از معیارهای کلیدی در مدل های حساسیت زمین لغزش است، زیرا نشان می دهد چند درصد از نقاطی که مدل به عنوان لغزش پیش بینی کرده، واقعاً لغزش هستند. مقدار Precision در مرحله آموزش برابر با ۰/۹۸۸ بوده و در اعتبار سنجی نیز این مقدار برابر با ۰/۹۱۳ شده است. در مرحله آزمون مقدار Precision نیز ۰/۹۱۶ است، که نشان

1- Train

2- Validation

دهنده عملکرد بسیار خوب و قابل قبول است. این مقادیر نشان می دهند که مدل خطای مثبت کاذب نسبتاً کمی تولید کرده و در شناسایی نقاط لغزشی عملکرد مطمئنی داشته است. شاخص F1 Score که ترکیبی از Precision و Recall است و عملکرد کلی مدل را ارزیابی می کند، در مرحله آموزش برابر ۰/۹۹۴ بوده است. در مراحل اعتبار سنجی ۰/۹۵۴ و آزمون ۰/۹۴۶ این مقدار همچنان بالا و نزدیک به یک باقی مانده است، که نشان دهنده توازن مناسب میان شناسایی صحیح نقاط لغزشی و جلوگیری از تشخیص اشتباه است. در نهایت، مقدار Cohen's Kappa که معیاری برای ارزیابی توافق میان پیش بینی مدل و داده های واقعی است، در مرحله آموزش مقدار بسیار بالایی ۰/۹۸۸ دارد. در اعتبار سنجی و آزمون نیز مقادیر ۰/۹۰۴ و ۰/۸۸۸ به دست آمده اند. این مقادیر که همگی بالاتر از ۰/۸۰ هستند، نشان دهنده توافق بسیار قوی میان مدل و واقعیت می باشند و نشان می دهند که عملکرد مدل بسیار قابل اتکا است.



شکل ۱۸- نقشه اهمیت ویژگی پارامترها

Fig.18. Feature importance plot of the parameters

جدول ۱- دقت مدل شبکه عصبی (ANN) استفاده شده در پژوهش

Table 1- Accuracy of the artificial neural network (ANN) model used in the research

پارامتر آماری	Train	Validation	Test
AUC	1	0.988	0.990
Accuracy	0.994	0.952	0.944
Precision	0.988	0.913	0.916
F1 Score	0.994	0.954	0.946
Cohen's Kappa	0.988	0.904	0.888

نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) توانایی بالایی در شناسایی و پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در محور مریوان- سقز دارد و می تواند الگوی پراکنش مکانی این پدیده را با دقت قابل توجهی پیش بینی کند. تحلیل متغیرهای مؤثر نشان داد که وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر مجموعه ای از عوامل محیطی و ژئومورفولوژیکی قرار دارد و توزیع آن در سطح منطقه کاملاً هدفمند و وابسته به شرایط طبیعی است. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین تراکم زمین لغزش ها در بخش های جنوبی منطقه مشاهده شد، ناحیه ای که از نظر شرایط بارندگی، نزدیکی به گسل ها و رودخانه ها و همچنین ویژگی های توپوگرافی و مورفولوژی دامنه ها، مستعد ناپایداری بیشتری است. در مقابل، بخش های شمالی منطقه به دلیل شرایط پایدارتر محیطی، کمترین میزان رخداد لغزش را نشان دادند. بررسی اهمیت نسبی متغیرهای ورودی نیز نشان داد که بارندگی سالانه با بالاترین مقدار اهمیت، نقش تعیین کننده ای در افزایش حساسیت زمین لغزش در منطقه دارد و پس از آن فاصله از گسل، پوشش گیاهی، زمین شناسی و سایر عوامل در مراتب بعدی قرار می گیرند. همچنین بررسی ویژگی های مورفولوژیکی نشان داد که دامنه های با ارتفاعات میانی، شیب های متوسط تا شدید و جهت های جنوبی و جنوب غربی بیشترین همپوشانی را با نقاط لغزش دارند و دامنه هایی که دارای انحنای سطح نزدیک به صفر یا انحنای مقطع مثبت هستند نیز از حساسیت بیشتری برخوردارند، شرایطی که می تواند باعث تمرکز جریان های سطحی و افزایش رطوبت خاک شده و در نهایت به کاهش پایداری دامنه ها منجر شود. از نظر ارزیابی عملکرد مدل نیز شاخص های آماری به دست آمده در مراحل آموزش، اعتبار سنجی و آزمون بیانگر کارایی بسیار مطلوب مدل شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی زمین لغزش است و مقادیر بالای شاخص هایی مانند Accuracy، AUC، F1 Score و Cohen's Kappa نشان می دهد که مدل علاوه بر دقت بالا از پایداری و قابلیت تعمیم مناسبی برخوردار است و توانسته است بدون بیش برآزش قابل توجه، الگوی واقعی زمین لغزش ها را بازسازی کند. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نیز بیانگر همخوانی قابل توجه آن ها است. به عنوان مثال، رضائی مقدم و همکاران (Rezaei Moghaddam et al., 2017) در پژوهشی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در حوضه دوآب الشتر به دقتی در حدود ۹۳/۸۵ درصد دست یافتند و نتیجه گرفتند که ANN ابزاری کارآمد برای پهنه بندی خطر زمین لغزش در مناطق کوهستانی است، نتیجه ای که با یافته های این پژوهش نیز مطابقت دارد. همچنین مالچیور و همکاران (Melchiorre et al., 2008) نشان دادند که استفاده از شبکه های عصبی می تواند دقت پهنه بندی زمین لغزش را تا حدود ۹۴ درصد افزایش دهد که این موضوع نیز مؤید توان بالای این روش در مدل سازی روابط پیچیده میان عوامل محیطی است. نتایج پژوهش راکعی و همکاران (Rakei et al., 2007) در منطقه سفیدار گله سمنان نیز نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی توانسته است بیش از ۸۹ درصد تطابق میان مناطق پیش بینی شده و زمین لغزش های واقعی ایجاد کند که این امر با دقت بالای مدل در پژوهش حاضر همسو است. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می دهد که شبکه عصبی مصنوعی ابزاری مؤثر و قابل اعتماد برای تحلیل و پهنه بندی حساسیت زمین لغزش در مناطق کوهستانی است و می تواند با دقت بالا مناطق مستعد وقوع این پدیده را شناسایی کند. نقشه پهنه بندی حاصل از این پژوهش می تواند به عنوان ابزاری کاربردی در برنامه ریزی های عمرانی، مدیریت مخاطرات طبیعی و طراحی ایمن مسیرهای ارتباطی مورد استفاده قرار گیرد و با شناسایی مناطق پرخطر، زمینه را برای اتخاذ اقدامات پیشگیرانه و کاهش خسارات ناشی از زمین لغزش فراهم سازد. با استفاده از نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه شده می تواند در شناسایی و اولویت بندی مناطق مستعد لغزش، مدیریت و پایش نقاط بحرانی محور مریوان- سقز و برنامه ریزی اقدامات پیشگیرانه و حفاظتی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، با استفاده از داده های زمانی و به روز، به ویژه اطلاعات بارش و رخداد های زمین لغزش، امکان پایش زمانی پایش مستمر مناطق با حساسیت زیاد و بسیار زیاد و اولویت بندی اقدامات مدیریت خطر در محور مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

References

- Caniani, D., Pascale, S., Sdao, F., & Sole, A. (2008). Neural networks and landslide susceptibility: A case study of the urban area of Potenza. *Natural Hazards*, 45(1), 55–72. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9169-3>
- Chalise, D., Kumar, L., & Kristiansen, P. (2019). Land degradation by soil erosion in Nepal: A review. *Soil Systems*, 3(1), 12. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3010012>
- Esfandyari Darabad, F., Rahimi, M., Navidfar, A., & Mehrvarz, A. (2020). Assessment of landslide susceptibility using artificial neural network and support vector machine algorithms (Case study: Heyran road, Ardabil province). *Paper presented in Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 18-33. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_122210.html
- Geertsema, M., Highland, L., & Vaugeouis, L. (2009). Environmental impact of landslides. In K. Sassa & P. Canuti (Eds.), *Landslides – Disaster Risk Reduction* (pp. 589–607). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_31
- Gomez, H., & Kavzoglu, T. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*, 78(1-2), 11-27. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.004>
- Habumugisha, J. M., Chen, N., Rahman, M., Islam, M. M., Ahmad, H., Elbeltagi, A., ... & Dewan, A. (2022). Landslide susceptibility mapping with deep learning algorithms. *Sustainability*, 14(3), 1734. <https://doi.org/10.3390/su14031734>
- Hallaji, M., Zangane Asadi, M. A., & Amir Ahmadi, A. (2020). An assessment of the landslide susceptibility prediction models in the Bar Watershed-Neyshabur. *Watershed Management Researchers*, 33(127), 20–30. [In Persian] https://wmrj.areeo.ac.ir/article_120880_793dee959e84d783d7c255aaa8bebd74.pdf
- Hanifinia, A., Nazanrnejad, H., & Najafi Kornejady, A. (2021). Prioritization of Effective Factors on Landslide Occurrence and Mapping of its Sensitivity in CherekAbad Waterched, Urmia Using Shannon Entropy Model, *Watershed Management Research*, 33(4), 30-46. [In Persian] <https://www.magiran.com/p2224026>
- Huang, F., Chen, J., Du, Z., Yao, C., Huang, J., Jiang, Q., ... & Li, S. (2020). Landslide susceptibility prediction considering regional soil erosion based on machine-learning models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 377. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060377>
- Jarjani, A., Akbari, H., Hosseini, S. A., & Abdi, O. (2019). Investigation of Landslide Ranger Zoning using Analytical Hierarchy Process in GIS Environment (Case Study: Azadshahr Kohmian Forestry Design). *Journal of Watershed Management Research*, 9(18), 197–207. [In Persian] <https://doi.org/10.29252/jwmr.9.18.197>
- Jokar Sarhangi, E. (2007). Investigating the effective factors on landslide occurrence using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Geographic Information System (GIS): A case study of the Safarood watershed. *Sarzamin (Land)*, 4(1). [In Persian] <https://sanad.iau.ir/Journal/sarzamin/Article/823906>
- Kouhpeima, A., & Feiznia, S. (2019). Investigation of factors affecting landslide and their susceptibility zoning in Latyan catchment. *Journal of Range and Watershed Managment*, 71(4), 1073-1083. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.235737.1141>
- Lee, S., & Pradhan, B. (2006). Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia. *Journal of Earth System Science*, 115(6), 661–672. <https://doi.org/10.1007/s12040-006-0004-0>
- Liu, S., Wang, L., Zhang, W., He, Y., & Samui, P. (2023). A comprehensive review of machine learning-based methods in landslide susceptibility mapping. *Geological Journal*, 58(6), 2283–2301. <https://doi.org/10.1002/gj.4666>
- Melchiorre, C., Matteucci, M., Azzoni, A., & Zanchi, A. (2008). Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation. *Geomorphology*, 94(3–4), 379–400. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.035>

- Negahban, S., Peysoozi, T., Ganjaeian, H., & Norozi, M. (2021). Identify areas prone to landslide and vertical displacement using Radar images (Case study: Lavasan urban area and urban margin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(3), 1–18. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoe.h.2021.71728.1094>
- Niazi, Y., Ekhtesasi, M. R., Talebi, A., Arkhi, S., & Mokhtari, M. H. (2010). Assessment of the bivariate statistical model efficiency in prediction of landslide hazard (Case study: Ilam Dam Basin). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 4(10), 9. [In Persian] <https://www.magiran.com/p853158>
- Pradhan, B. (2010). Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. *Advances in Space Research*, 45(10), 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.006>
- Pradhan, B., & Lee, S. (2010). Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environmental Earth Sciences*, 60(5), 1037–1054. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0245-8>
- Rajabi, M., Rezaei Moghaddam, M. H., & Tak Zare, A. (2020). Landslide hazard potential zoning using the neural network method (Case study: Alamut watershed in Qazvin Province). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 171–185. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.122223>
- Rakei, B., Khamechian, M., Abdolmaleki, P., & Giahchi, P. (2007). Application of artificial neural network system for landslide hazard zonation (Case study: Sefidargaleh area in Semnan Province). *Journal of Science, University of Tehran*, 33(1), 57–64. [In Persian]
- Rezaei Moghaddam, M. H., Nikjou, M. R., Khalilvalizadeh, K., Belvasi, I., & Belvasi, M. (2017). Application of artificial neural network in the evaluation and landslide hazard zonation. *Journal of Geography and Planning*, 21(59), 89–111. [In Persian] https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_6126.html
- Zakerinejad, R., & Kahrani, A. (2023). Assessment and comparison of CART and TreeNet models to landslide susceptibility mapping using SPM software and geographic information system (GIS) (Case study: Kameh watershed, southern Isfahan Province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(37), 17–38. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.42304.1904>