



Research Article

Landslide susceptibility zoning using support vector machine (SVM) model (From Goujebel pass to Ahar City)

Masoud Rahimi^{1*} , Seyed Reza Hosseinzadeh¹

1-Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad,
Mashhad, Iran

Received: 14 Feb 2026 Accepted: 31 May 2026

Extended Abstract

Introduction

Landslide is one of the most frequent natural hazards, capable of threatening human lives and negatively impacting the natural ecosystem on a larger scale (Tien Bui et al, 2012; Balamurugan et al, 2016; Dey et al, 2024). In terms of severity, landslides rank as the seventh most catastrophic event among the various geohazards occurring on the Earth's crust (Nadim et al, 2006). Landslides, as common natural geological processes in mountainous areas, present serious threats to human safety, transportation infrastructure, economic growth, and ecological environments. Currently, landslides are increasing worldwide, and countries around the globe are experiencing the threat of landslide disasters. In general, landslide susceptibility evaluation can offer a basic foundation for landslide prevention and control, enabling comprehensive management with targeted emphasis (He et al, 2025). Since the 1960s, numerous methods have been developed by researchers worldwide. These methods are generally classified into two main categories: knowledge-driven models, such as expert scoring, analytic hierarchy process (AHP), fuzzy logic, and fuzzy comprehensive evaluation; and data-driven models, which include traditional approaches like information value, frequency ratio (FR), and logistic regression, as well as machine learning techniques such as artificial neural networks (ANN), support vector machines (SVM), random forests (RF), and decision tree models (He et al, 2025, Zhao et al, 2024). The Goujebel pass in East Azerbaijan Province is prone to numerous and large-scale landslides due to its specific topographic, geological, and climatic conditions. The frequent occurrence of landslides has not only caused the destruction of natural resources but has also become a serious threat to human settlements, infrastructure, and particularly the key Tabriz–Ahar transportation corridor. Therefore, accurately identifying high-risk areas and producing reliable landslide susceptibility maps can play a crucial role in reducing human and economic losses and improving the safety of transportation routes in this region. The objective of this research is to assess and map landslide susceptibility in the area from the Goujebel Pass to Ahar City using the Support Vector Machine (SVM) model and to analyze the role of influencing factors.

Materials and Methods

The study area is located in northwestern Iran, within East Azerbaijan Province. Geographically, it lies between 38°21' and 38°29' north latitude and 46°50' to 47°02' east longitude. Covering an area of approximately 193 square kilometers, it encompasses sections of the mountains surrounding the Goujebel Pass and extends to the western of the city of Ahar.

Citation: Rahimi, M. and Hosseinzadeh, S.R., 2026. Landslide susceptibility zoning using support vector machine, *Res. Earth. Sci.* 17(2), (66-92) DOI: 10.48308/esrj.2026.107033

* Corresponding author E-mail address: masoudrahimi@um.ac.ir



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The primary data used in this study include 1:50,000 topographic maps, 1:100,000 geological maps, a digital elevation model (DEM) with a resolution of 12.5 meters from the ALOS-PALSAR satellite, as well as Sentinel-2 satellite imagery and Google Earth images. For spatial analyses and data processing, ArcGIS, ENVI, and SPSS Modeler software were used. The main method for landslide modeling in this study is the use of the Support Vector Machine (SVM) model. This method was developed in the 1990s and, due to its high efficacy in various algorithms, is recognized as one of the most widely used approaches (Riaz et al, 2024). This model learns the complex relationship between effective factors and landslide occurrence by being trained on a dataset consisting of historical landslide locations and contributing factor layers. The learned relationship is then extrapolated to the entire study region to create a susceptibility map (Kavzoglu et al, 2014). A landslide inventory is recognized for providing a comprehensive record of historical landslide events currently present in the study area. The landslide inventory map (LIM) can be developed using high-resolution satellite imagery, aerial photographs, previous literature documenting landslides, and extensive field surveys (Ali et al, 2022). In this method, a historical landslide distribution map of the study area was first prepared and then divided into two datasets: 70% for training and 30% for testing, while non-landslide points were also randomly selected. Subsequently, the landslide conditioning factors including variables such as elevation, slope, aspect, lithology, distance to faults and drainage networks, the Topographic Wetness Index (TWI), land use, and vegetation cover were prepared in raster format. In the next step, the values of these layers at the locations of the training points were extracted in the ArcGIS environment to construct the data matrix. The SVM model was trained using this matrix with the application of the radial basis function (RBF) kernel, and its parameters were optimized. The performance of the final model was evaluated using the testing data and metrics such as overall accuracy and the ROC curve. Finally, the model was applied to the entire study area, and the final landslide hazard zonation map was produced in five classes: very low, low, moderate, high, and very high.

Results and Discussion

This study aimed to produce a landslide susceptibility map of the Goujebel pass using a Support Vector Machine (SVM) model. Analysis of geomorphological indices showed that more than 98% of the landslides occurred at elevations between 1,450 and 1,750 m, with 42% of them specifically concentrated in the 1,640–1,740 m elevation class. Approximately 88% of the landslides occurred on slopes of less than 30%, and the north aspect, accounting for 63%, was the most significant slope direction for landslide occurrence. The study of geological indicators showed the determining role of lithology, such that the PLQ-c unit (discontinuous conglomerate with marly interlayers) covers only 44% of the area but hosts 95% of the landslides. From a hydrological perspective, a significant overlap was observed between high values of the Topographic Wetness Index (TWI) and the spatial distribution of landslides, with 66% of the landslides occurring within 100 m of drainage networks. Regarding land cover, approximately 70% of the landslides occurred in rangeland areas; however, the NDVI did not exhibit a clear pattern. Evaluation of the Support Vector Machine (SVM) model with a radial basis function (RBF) kernel demonstrated very good performance, with an AUC value of 0.933 for the testing dataset. Based on the results of this model, lithology, with an importance coefficient of 0.268, was identified as the most influential factor, followed by elevation (0.141) and slope (0.138) as the next most significant factors controlling landslide occurrence in the study area. The final hazard zonation map showed that the majority of the area (approximately 54%) is classified as very low and low hazard, about 21.3% of the area is classified as moderate hazard, and 24.4% falls within the high hazard class. High-hazard zones are primarily located on the sensitive PLQ-c formation on moderate slopes (10–30%), which represent the main centers of large and active landslides in the area. Therefore, it can be concluded that a strong and significant relationship exists between the spatial distribution of the PLQ-c formation and the occurrence of major landslides in the region. Water infiltration into conglomerate layers with marl and silt interbeds leads to an increase in pore water pressure, a reduction in internal friction, and ultimately weakens the cohesion of the layers. Under such conditions, the slope gradient plays a significant role as a facilitating factor. For example, some of the large and prominent landslides in the study area, including the one located east of Pireh-Yousefian village, have occurred precisely in areas where the PLQ-c Formation has a significant outcrop and where favorable hydrological conditions have prevailed. Notably, landslides within this formation are not only more frequent but also larger in area and volume. In general, zones with high and very high landslide susceptibility can be identified as

the primary centers of instability within the study area. The accurate identification of these hazard zones can serve as a basis for restricting construction development, monitoring slopes, and implementing preventive measures to reduce future landslide damage.

Conclusion

The present study employed the SVM model with an RBF kernel to perform landslide hazard zonation in the Goujebel area, demonstrating high performance (training AUC = 0.943 and testing AUC = 0.933). Lithology, with a coefficient of 0.268, was the most important factor, and the PLQ-c formation accounted for over 95% of the landslides. Next, elevation and slope were influential factors, with coefficients of 0.141 and 0.138, respectively. Landslides mainly occurred at mid-elevations (1450–1750 m) and on moderate slopes (10–30%). Land cover and land use factors played a lesser role. The landslide hazard zonation of the Goujebel area indicates that structural and lithological controls have a dominant influence on slope instability. The zonation map of the area showed five hazard classes, with approximately 54% of the area classified as low and very low hazard, and 24% as high hazard. High hazard areas are primarily located on the PLQ-c formation and on moderate slopes, requiring continuous monitoring and management. The results demonstrated that combining SVM with spatial data is an effective tool for producing landslide susceptibility maps and supporting disaster management, environmental planning, and infrastructure design. Special attention to susceptible formations (particularly the PLQ-c formation), control of hydrological factors, and monitoring of areas with moderate slopes are among the key strategies for reducing landslide risk in this region. The findings of this research can serve as a basis for environmental planning, disaster risk management, infrastructure design, and land-use planning in the study area. Although the study demonstrates strong performance, future research is encouraged to explore alternative models to further enhance landslide susceptibility predictions.

Keywords: Slope hazard, Landslide, Support vector machine (SVM) model, Goujebel pass.

پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) (مطالعه موردی: گردنه گویجه‌بل تا شهر اهر)

مسعود رحیمی^{*۱}، سیدرضا حسین زاده^۲

۱- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۱۰

چکیده گسترده

مقدمه

زمین لغزش یکی از رایج‌ترین بلایای طبیعی است که می‌تواند جان انسان‌ها را تهدید کرده و به طور گسترده بر اکوسیستم طبیعی تأثیر منفی بگذارد (Tien Bui et al, 2012; Balamurugan et al, 2016; Dey et al, 2024). از نظر شدت، زمین لغزش‌ها هفتمین رخداد فاجعه‌آمیز در میان انواع خطرات زمین‌شناسی اتفاق افتاده در پوسته زمین محسوب می‌شوند (Nadim et al, 2006). زمین لغزش‌ها، به عنوان فرآیندهای طبیعی و رایج زمین‌شناسی در مناطق کوهستانی، تهدید جدی برای ایمنی انسان، زیرساخت‌های حمل‌ونقل، رشد اقتصادی و محیط‌های اکولوژیکی ایجاد می‌کنند. در حال حاضر، فراوانی زمین لغزش‌ها در سراسر جهان در حال افزایش است و کشورها با تهدید این بلایا روبه‌رو می‌باشند. به‌طور کلی، ارزیابی حساسیت زمین لغزش می‌تواند مبنایی برای پیشگیری و کنترل این پدیده فراهم کرده و مدیریت جامع و هدفمند را امکان‌پذیر سازد (He et al, 2025). از دهه ۱۹۶۰ تاکنون، روش‌های متعددی توسط پژوهشگران جهان توسعه یافته است. این روش‌ها معمولاً به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: مدل‌های دانش‌محور، مانند امتیازدهی کارشناسان، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، منطق فازی، ارزیابی جامع فازی و مدل‌های داده‌محور که شامل روش‌های سنتی مانند ارزش اطلاعاتی، نسبت فراوانی (FR)، رگرسیون لجستیک و همچنین تکنیک‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، جنگل‌های تصادفی (RF) و درخت تصمیم هستند (He et al, 2025, Zhao et al, 2024). گردنه گویجه‌بل در استان آذربایجان شرقی به دلیل شرایط خاص توپوگرافی، زمین‌شناسی و اقلیمی خود مستعد وقوع زمین لغزش‌های متعدد و گسترده است. تکرار زمین لغزش‌ها نه تنها باعث تخریب منابع طبیعی شده بلکه تهدید جدی برای سکونتگاه‌های انسانی، زیرساخت‌ها و به ویژه مسیر مهم حمل‌ونقل تبریز-اهر ایجاد کرده است. بنابراین، شناسایی دقیق مناطق پرخطر و تهیه نقشه‌های قابل اعتماد حساسیت زمین لغزش می‌تواند نقش مهمی در کاهش خسارات انسانی و اقتصادی و افزایش ایمنی مسیرهای حمل‌ونقل، در این منطقه ایفا کند. این پژوهش با هدف ارزیابی و تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش در مسیر گردنه گویجه‌بل تا شهر اهر، با بهره‌گیری از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) و تحلیل نقش عوامل مؤثر انجام شده است.

استناد: رحیمی، م. و حسین زاده، س.ر.، ۱۴۰۵. پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان، پژوهشهای دانش زمین: ۱۷(۲)، (۹۲-۶۶)، DOI: 10.48308/esrj.2026.107033

E-mail: masoudrahimi@um.ac.ir

* نویسنده مسئول:



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در شمال غرب ایران و در محدوده سیاسی استان آذربایجان شرقی قرار دارد و از نظر موقعیت جغرافیایی، بین $38^{\circ}21'$ تا $38^{\circ}29'$ عرض شمالی و $46^{\circ}50'$ تا $47^{\circ}02'$ طول شرقی واقع شده است. این محدوده با وسعتی در حدود ۱۹۳ کیلومترمربع، بخش‌هایی از کوهستان‌های پیرامون گردنه گویجه‌بل را در بر می‌گیرد و تا نواحی غربی شهر اهر امتداد می‌یابد. داده‌های اصلی استفاده شده در این مطالعه شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰,۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر ماهواره ALOS-PALSAR، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و تصاویر Google Earth هستند. برای تحلیل‌های مکانی و پردازش داده‌ها، نرم‌افزارهای ArcGIS، ENVI و SPSS Modeler به کار گرفته شد. روش اصلی مدل‌سازی زمین‌لغزش در این مطالعه استفاده از مدل ماشین‌بردار پشتیبان (SVM) می‌باشد. این روش در دهه ۱۹۹۰ توسعه یافت و به دلیل کارایی بالا در الگوریتم‌های مختلف، به یکی از پرکاربردترین رویکردها در مدل‌سازی تبدیل شده است (Riaz et al, 2024). این مدل با دریافت داده‌های آموزشی شامل موقعیت زمین‌لغزش‌های گذشته و لایه‌های مؤثر، رابطه پیچیده بین عوامل مؤثر و وقوع زمین‌لغزش را می‌آموزد. سپس این رابطه به کل منطقه مطالعاتی تعمیم داده می‌شود تا نقشه پهنه‌بندی حساسیت تولید شود (Kavzoglu et al, 2014). سیاهه زمین‌لغزش به عنوان منبعی برای ارائه ثبت جامع رخدادهای تاریخی زمین‌لغزش موجود در محدوده مورد مطالعه شناخته می‌شود. نقشه سیاهه زمین‌لغزش (LIM) را می‌توان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا، عکس‌های هوایی، منابع و مطالعات پیشین و بررسی‌های میدانی گسترده تهیه کرد (Ali et al, 2022). در این روش، ابتدا نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های تاریخی منطقه تهیه شد و سپس به دو مجموعه داده تقسیم گردید: ۷۰ درصد از داده‌ها به منظور آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش استفاده شدند، در حالی که نقاط غیر زمین‌لغزش به طور تصادفی انتخاب گردیدند. سپس عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل‌ها و شبکه‌های زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، کاربری زمین و پوشش گیاهی در قالب داده‌های رستری آماده شدند. در مرحله بعد، مقادیر این لایه‌ها در محل نقاط آموزشی در محیط ArcGIS استخراج شد تا ماتریس داده‌ها تشکیل شود. مدل SVM با استفاده از این ماتریس و به کارگیری هسته تابع پایه شعاعی (RBF) آموزش دید و پارامترهای آن بهینه‌سازی شد. عملکرد مدل نهایی با داده‌های آزمون و معیارهایی مانند دقت کلی و منحنی ROC ارزیابی گردید. در پایان، مدل بر کل منطقه اعمال شد و نقشه نهایی پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در پنج کلاس بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تولید گردید.

نتایج و بحث

این مطالعه با هدف تولید نقشه حساسیت زمین‌لغزش گردنه گویجه‌بل تا شهر اهر با استفاده از مدل SVM انجام شد. تحلیل شاخص‌های زمین‌شناسی نشان داد بیش از ۹۸ درصد زمین‌لغزش‌ها در ارتفاع بین ۱۴۵۰ تا ۱۷۵۰ متر رخ داده‌اند که ۴۲ درصد از آن‌ها به طور ویژه در کلاس ارتفاع ۱۶۴۰ تا ۱۷۴۰ متر متمرکز شده‌اند. تقریباً ۸۸ درصد از زمین‌لغزش‌ها در شیب‌های کمتر از ۳۰ درصد رخ داده‌اند و جهت شمال با سهم ۶۳ درصد بیشترین میزان وقوع زمین‌لغزش را به خود اختصاص داده است. بررسی شاخص‌های زمین‌شناسی نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده سنگ‌شناسی در وقوع زمین‌لغزش است، به طوری که واحد PLQ-C (کنگولمرای غیر پیوسته با لایه‌های مارنی) تنها ۴۴ درصد منطقه را پوشش می‌دهد اما ۹۵ درصد زمین‌لغزش‌ها در آن رخ داده‌اند. از نظر هیدرولوژیکی، همپوشانی قابل توجهی بین مقادیر بالای شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و توزیع مکانی زمین‌لغزش‌ها مشاهده شد، به طوری که ۶۶ درصد زمین‌لغزش‌ها در فاصله ۱۰۰ متری از شبکه‌های زهکشی رخ داده‌اند. در رابطه با کاربری زمین، حدود ۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها در مناطق مرتعی اتفاق افتاده‌اند، اما NDVI الگوی واضحی نشان نداد. ارزیابی مدل SVM با هسته تابع پایه شعاعی (RBF) عملکرد بسیار خوبی را نشان داد، به طوری که مقدار AUC برای داده‌های آزمایشی برابر با ۰/۹۴۳ بود. بر اساس نتایج این مدل، سنگ‌شناسی با شاخص اهمیت نسبی ۰/۲۶۸ مهم‌ترین عامل شناسایی شد و پس از آن ارتفاع (۰/۱۴۱) و شیب (۰/۱۳۸) به ترتیب عوامل مهم بعدی کنترل‌کننده وقوع زمین‌لغزش در منطقه مطالعه بودند. نقشه نهایی مناطق حساسیت نشان داد که اکثریت منطقه (حدود ۵۴ درصد) در دسته حساسیت بسیار کم و کم قرار دارند. همچنین حدود ۲۱/۳ درصد منطقه در دسته حساسیت متوسط و ۲۴/۴ درصد در دسته حساسیت زیاد هستند. مناطق با حساسیت بالا عمدتاً بر روی سازند حساس PLQ-C در شیب‌های متوسط (۱۰-۳۰ درصد) قرار دارند که مراکز اصلی زمین‌لغزش‌های بزرگ و فعال

در منطقه محسوب می‌شوند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که رابطه قوی و معنی‌داری بین توزیع مکانی سازند PLQ-C و وقوع زمین‌لغزش‌های بزرگ منطقه وجود دارد. نفوذ آب به لایه‌های کنگلومرایی با میان لایه مارن و سیلت باعث افزایش فشار آب منفذی، کاهش اصطکاک داخلی و در نهایت تضعیف انسجام لایه‌ها می‌شود. در چنین شرایطی، شیب نقش قابل توجهی به عنوان عامل تسهیل‌کننده ایفا می‌کند. برخی از زمین‌لغزش‌های بزرگ و برجسته منطقه، از جمله زمین‌لغزش شرق روستای پیره‌یوسفیان، دقیقاً در مناطقی رخ داده‌اند که سازند PLQ-C دارای رخنمون قابل توجهی بوده و شرایط هیدرولوژیکی مساعد حاکم بوده است. شایان ذکر است، زمین‌لغزش‌ها در این سازند نه تنها بیشتر هستند بلکه وسعت و حجم بیشتری نیز دارند. به طور کلی، مناطق با حساسیت زیاد و بسیار زیاد می‌توانند به عنوان کانون‌های اصلی ناپایداری در منطقه مطالعه شناسایی شوند. شناسایی دقیق این مناطق حساس می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای محدود کردن ساخت‌وساز، پایش شیب‌ها و اجرای اقدامات پیشگیرانه جهت کاهش خسارات زمین‌لغزش در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) با هسته تابع پایه شعاعی (RBF) برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در گردنه گویچه‌بل استفاده شد که عملکرد بالایی را نشان داد (میزان AUC داده‌های آموزش ۰/۹۴۳ و داده‌های آزمون ۰/۹۳۳). سنگ‌شناسی با شاخص اهمیت نسبی وزنی ۰/۲۶۸ مهم‌ترین عامل مؤثر است و سازند PLQ-C بیش از ۹۵ درصد از رخدادهای زمین‌لغزش را شامل می‌شود. سپس عوامل ارتفاع و شیب به ترتیب با ضرایب وزنی ۰/۱۴۱ و ۰/۱۳۸ تأثیرگذار بودند. زمین‌لغزش‌ها عمدتاً در ارتفاعات میانی (۱۴۵۰-۱۷۵۰ متر) و بر روی شیب‌های متوسط (۳۰-۱۰ درصد) رخ داده‌اند. عوامل پوشش زمین و کاربری اراضی نقش کم‌تری داشتند. پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش گردنه گویچه‌بل نشان می‌دهد که فرایندهای ساختاری و سنگ‌شناسی تأثیر غالب بر ناپایداری شیب‌ها دارند. نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش منطقه، پنج کلاس حساسیت را نشان داد که حدود ۵۴ درصد از منطقه در کلاس‌های حساسیت کم و بسیار کم و ۲۴ درصد در کلاس حساسیت بالا قرار گرفت. مناطق با حساسیت بالا عمدتاً بر روی سازند PLQ-C و در شیب‌های متوسط واقع شده‌اند و نیازمند پایش و مدیریت مستمر هستند. نتایج نشان داد ترکیب SVM با داده‌های مکانی ابزاری مؤثر برای تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش و مدیریت بحران، برنامه‌ریزی محیطی و طراحی زیرساخت‌هاست. توجه ویژه به سازندهای مستعد (به‌ویژه سازند PLQ-C)، کنترل عوامل هیدرولوژیکی و پایش مناطق با شیب‌های متوسط از راهبردهای کلیدی کاهش حساسیت زمین‌لغزش در این منطقه به شمار می‌رود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی محیطی، مدیریت ریسک بلایا، طراحی زیرساخت‌ها و برنامه‌ریزی کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه باشد. اگرچه نتایج این پژوهش نشان‌دهنده عملکرد قوی مدل است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، مدل‌های جایگزین به‌منظور بهبود دقت پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش مورد بررسی قرار گیرند.

واژگان کلیدی: مخاطرات دامنه‌ای، زمین‌لغزش، مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM)، گردنه گویچه‌بل.

مقدمه

مخاطرات طبیعی در ابعاد گوناگون اثرات نامطلوبی بر زندگی انسان دارند. این پدیده‌ها در دوره‌های زمانی متفاوت رخ می‌دهند، از نظر مدت وقوع یکسان نیستند و پیامدهای اجتماعی و اقتصادی قابل‌توجهی بر جای می‌گذارند. راهبردهای مدیریت مخاطرات نه تنها باید بر کانون‌های خطر موجود تمرکز داشته باشند، بلکه لازم است با پیش‌بینی رفتار، گستره و شدت رخدادها پیش از وقوع، کانون‌های بالقوه جدید را نیز مدنظر قرار دهند. در این

میان، زمین‌لغزش‌ها اگرچه در مقایسه با مخاطراتی مانند سیلاب، زمین‌لرزه، آتشفشان و طوفان غالباً کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند، اما به‌نظر می‌رسد که در زمره هفت مخاطره طبیعی مهم جای دارند (Marjanović et al, 2011; Nadim et al, 2006). در سال‌های اخیر، به‌دلیل گسترش شهرنشینی و افزایش بهره‌برداری از اراضی در شرایط اقلیمی ناپایدار، توجه به ارزیابی زمین‌لغزش‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یافته است؛ به‌گونه‌ای که این امر به انجام مطالعات موردی چندرشته‌ای متعدد و افزایش شمار پژوهشگران در

هر پژوهش انجامیده است (Gokceoglu and Sezer, 2009). زمین لغزش‌ها یکی از گسترده‌ترین مخاطرات زمین‌شناختی در بسیاری از مناطق جهان به شمار می‌روند و می‌توان آن‌ها را به عنوان حرکت توده‌ای خاک و سنگ به سمت پایین‌دست تحت تأثیر نیروی گرانش تعریف کرد (Malamud et al, 2004). در سطح جهانی، حدود ۱۷ درصد از تلفات جانی، ناشی از زمین‌لغزش‌ها رخ داده و تقریباً ۶۶ میلیون نفر در مناطق با خطر بالای زمین‌لغزش زندگی می‌کنند (Sassa and Canuti, 2008). با توسعه اقتصادی، شهرنشینی در مناطق کوهستانی ادامه یافته و این امر منجر به ناپایداری شیب‌ها و در نتیجه افزایش پتانسیل وقوع زمین‌لغزش می‌شود. بنابراین، درک سازوکارهای زمین‌لغزش و پیشگیری از رخداد‌های آینده آن به‌عنوان وظیفه‌ای مهم تلقی می‌شود که می‌تواند به دولت‌ها، تصمیم‌گیرندگان و مهندسان در مدیریت شیب‌ها و برنامه‌ریزی کاربری زمین کمک کند (Hong et al, 2015). خطر زمین‌لغزش به‌عنوان احتمال وقوع یک نوع از حرکت توده‌ای در یک ناحیه مشخص و در یک بازه زمانی معین تعریف می‌شود. این تعریف نشان می‌دهد که فرایند پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شامل پیش‌بینی‌های مکانی و زمانی زمین‌لغزش‌ها است، در حالی که پیش‌بینی صرفاً مکانی خطر زمین‌لغزش که عوامل محرک در آن لحاظ نمی‌شوند، به عنوان تحلیل حساسیت شناخته می‌شود. اگرچه نقشه حساسیت زمین‌لغزش نخستین گام در ارزیابی خطر و ریسک محسوب می‌شود، اما این نقشه به‌عنوان یک محصول نهایی نیز پذیرفته شده است که می‌توان از آن در پهنه‌بندی کاربری زمین و برنامه‌ریزی محیط‌زیست استفاده کرد (Manzo et al, 2012). بدین ترتیب، نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از ابزارهای اساسی در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای شناخته می‌شوند (Melchiorre et al, 2008). ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش بر پایه دانش نسبتاً پیچیده‌ای از حرکات دامنه‌ای و عوامل مؤثر بر آن‌ها استوار است. میزان اعتبار این نقشه‌ها تا حد زیادی به کمیت و کیفیت داده‌های در دسترس، مقیاس مطالعه و انتخاب روش‌های مناسب برای تحلیل و مدل‌سازی وابسته است. فرآیند تهیه چنین نقشه‌هایی از رویکردهای متنوع کیفی و کمی بهره می‌گیرد (Ayalew and Yamagishi, 2005). رویکردهای کیفی عمدتاً بر قضاوت و نظر متخصص یا

متخصصانی متکی هستند که ارزیابی حساسیت یا خطر را انجام می‌دهند (Aleotti and Chowdhury, 1999). این روش‌ها به‌طور کلی به دو دسته تحلیل سیاهه یا پراکندگی لغزش و رویکرد اکتشافی تقسیم می‌شوند. ساده‌ترین شیوه برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، استفاده از سیاهه زمین-لغزش است که بر تفسیر تصاویر هوایی، مطالعات میدانی و یا پایگاه‌های داده مربوط به رخداد‌های گذشته زمین‌لغزش در منطقه استوار می‌باشد. نقشه‌های سیاهه حرکات توده‌ای، زیربنای بسیاری از روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را تشکیل می‌دهند (Van Westen and Soeters, 1998). در رویکردهای اکتشافی، قضاوت کارشناسی ژئومورفولوژیست‌ها برای طبقه‌بندی میزان خطر به‌کار گرفته می‌شود (Aleotti and Chowdhury, 1999). برخی از روش‌های کیفی با ترکیب مفاهیم رتبه‌بندی و وزن‌دهی، ماهیتی نیمه‌کمی پیدا می‌کنند. از جمله این روش‌ها می‌توان به فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و روش ترکیب خطی وزنی (WLC) اشاره کرد. این رویکردها تا حدی ذهنی بوده و نتایج آن‌ها به سطح دانش و تجربه کارشناسان وابسته است. بر همین اساس، روش‌های کیفی و نیمه‌کمی عمدتاً برای مطالعات در مقیاس‌های منطقه‌ای مناسب و کاربردی هستند (Ayalew and Yamagishi, 2005). روش‌های کمی بر بیان عددی روابط میان عوامل کنترل‌کننده و رخداد زمین‌لغزش استوار هستند (Ayalew and Yamagishi, 2005) و به‌طور کلی به دو دسته رویکردهای آماری و جبری تقسیم می‌شوند. در تحلیل‌های آماری، ترکیب عواملی که در گذشته موجب وقوع زمین‌لغزش شده‌اند، به صورت آماری شناسایی می‌شود و سپس پیش‌بینی‌های کمی برای نواحی فاقد زمین‌لغزش اما دارای شرایط مشابه انجام می‌گیرد. این تحلیل‌ها می‌توانند به شکل دومتغیره یا چندمتغیره اجرا شوند (Gupta and Joshi, 1990; Adhikari, 2011). رویکرد جبری تنها در شرایطی قابل استفاده است که وضعیت‌های ژئومورفولوژیکی و لیتولوژیکی در کل منطقه مورد مطالعه تقریباً یکنواخت بوده و انواع زمین‌لغزش‌ها از نوع ساده باشند (Van Westen and Soeters, 1998). به دلیل نیاز این روش به داده‌های دقیق و جامع، کاربرد آن غالباً به مناطق کوچک محدود می‌شود (Guzzetti et al, 1999). موفقیت این رویکردها تا حد زیادی تحت تأثیر تعداد،

دامنه‌ها، امکان شناسایی نواحی مستعد وقوع زمین لغزش و طبقه‌بندی سطوح مختلف حساسیت را فراهم می‌سازد. زمین لغزش‌ها از جمله مهم‌ترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی در محدوده مورد مطالعه به شمار می‌آیند و به دلیل شرایط خاص توپوگرافی، زمین‌شناسی و اقلیمی منطقه، فراوانی و شدت قابل توجهی دارند. وقوع مکرر این پدیده نه تنها موجب تخریب اراضی و منابع طبیعی شده، بلکه به تهدیدی جدی برای سکونتگاه‌های انسانی، زیرساخت‌های عمرانی و به‌ویژه محور ارتباطی مهم تبریز - اهر تبدیل شده است. از این‌رو، شناسایی دقیق مناطق پرخطر و ارائه نقشه‌های قابل اعتماد حساسیت زمین لغزش می‌تواند نقش مؤثری در کاهش خسارات جانی و مالی، مدیریت بحران، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و افزایش ایمنی راه‌های ارتباطی در این منطقه ایفا کند.

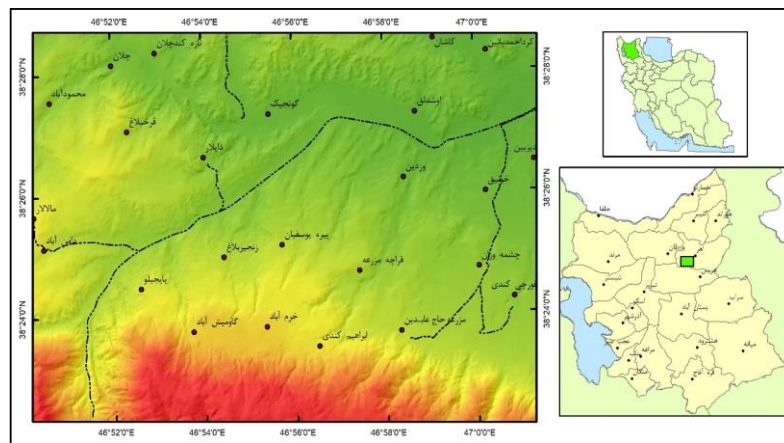
منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال غرب ایران و در محدوده سیاسی استان آذربایجان شرقی قرار دارد و از نظر موقعیت جغرافیایی، بین $38^{\circ}21'$ تا $38^{\circ}29'$ عرض شمالی و $46^{\circ}50'$ تا $47^{\circ}02'$ طول شرقی واقع شده است. این محدوده با وسعتی در حدود ۱۹۳ کیلومتر مربع، بخش‌هایی از کوهستان‌های پیرامون گردنه گویجه‌بل را در بر می‌گیرد و تا نواحی غربی شهر اهر امتداد می‌یابد (شکل ۱). از نظر توپوگرافی، منطقه دارای ناهمواری‌های قابل توجه است، حداقل ارتفاع ۱۳۳۰ و حداکثر ۲۴۰۰ متر با میانگین ۱۶۳۰ متر می‌باشد. میانگین شیب منطقه ۱۸ درصد است و جهت شیب غالب در دامنه‌های شمالی، شمال غربی و شمال شرقی متمرکز می‌باشد. از نظر اقلیمی، میانگین بارندگی سالانه ۲۸۷ میلی‌متر است که بیشتر آن در فصل بهار (۴۰ درصد) و کمترین در تابستان (۹ درصد) رخ می‌دهد. میانگین سالانه دما ۱۱/۱ درجه سانتیگراد بوده و چرخه یخبندان-ذوب یخ در فصل سرد سال (به ویژه در ارتفاعات بالای ۱۵۰۰ متر) از ویژگی‌های مهم اقلیمی منطقه است. از نظر زمین‌شناسی، ارتفاعات منطقه عمدتاً از سنگ‌های مقاوم آتشفشانی (آندزیت، داسیت، تراکیت و لاتیت) تشکیل شده است. در مقابل، حدود ۴۴ درصد از سطح منطقه را سازند PLQ-C (کنگلومراهای کمتر تحکیم یافته با میان‌لایه‌های ماری، ماسه‌ای و سیلتی) پوشانده که

کیفیت و میزان اعتبار داده‌های مورد استفاده است. از این‌رو، برای غلبه بر این محدودیت‌ها، بهره‌گیری از رویکردهای نوین نظیر منطق فازی، شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین‌های بردار پشتیبان و سایر روش‌های هوشمند، به‌ویژه در تهیه نقشه‌های حساسیت زمین لغزش در مقیاس‌های منطقه‌ای، مورد توجه قرار گرفته است (Kanungo et al, 2009). در سال‌های اخیر، طیف گسترده‌ای از داده‌های مکانی به صورت رقومی در دسترس قرار گرفته است که امکان استفاده از روش‌های جدید داده‌محور را در پردازش و تحلیل‌ها فراهم می‌کند. حوزه نوظهور علوم رایانه که به مطالعه الگوریتم‌هایی می‌پردازد که از داده‌های موجود یاد می‌گیرند تا وظایفی مانند طبقه‌بندی، پیش‌بینی یا خوشه‌بندی را انجام دهند، یادگیری ماشین نامیده می‌شود (Marjanović et al, 2011). در این رابطه ماشین‌های بردار پشتیبان^۱ به طور گسترده‌ای توسط محققان مختلف برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفته است (Gasemyan et al, 2017; Karami et al, 2019; Rostamizad and Dastaranj, 2024; Esfandiyari et al, 2024; Karimi Sangchini et al, 2024; Sepahvand and Beiranvand, Lee et al, 2024; Sadati et al, 2025; Zhou et al, 2015; Ghiasi et al, 2021; Xie et al, 2021; Kumar et al, 2017; 2017; Xu et al, 2024; al, 2023). در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در محدوده گردنه گویجه‌بل تا شهر اهر، از رویکرد مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان (SVM) با هسته تابع پایه شعاعی (RBF) استفاده شده است. انتخاب این روش با توجه به توانایی بالای آن در مدل‌سازی روابط غیرخطی، دقت مناسب در تفکیک کلاس‌ها و کارایی مطلوب در تحلیل داده‌های پیچیده محیطی صورت گرفته است. بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات پیشین از روش‌های دانش‌محور و آماری دومتغیره مانند AHP، نسبت فراوانی و رگرسیون لجستیک استفاده کرده‌اند که یا به قضاوت کارشناسی وابسته هستند یا توانایی مدل‌سازی روابط غیرخطی را ندارند. در حالی که SVM قادر به مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی میان عوامل مؤثر است، ثانیاً بر مبنای اصل کمینه‌سازی حساسیت ساختاری عمل می‌کند که در شرایط داده‌های محدود، تعمیم‌پذیری بالایی دارد و از بیش‌برازش جلوگیری می‌نماید. این رویکرد با بهره‌گیری از داده‌های مکانی و عوامل مؤثر بر ناپایداری

کشاورزی دیم تشکیل می‌دهند. شبکه زهکشی منطقه توسط رودخانه اهرچای و شاخه‌های مرتبط با گویجه‌بل چای شکل گرفته است.

حساس‌ترین واحد سنگی در برابر زمین‌لغزش می‌باشد. گسل‌هایی با روند شمال غرب- جنوب شرق نیز در منطقه گسترش دارند. از نظر پوشش سطح زمین، بخش عمده منطقه را مراتع (با پوشش متوسط تا خوب) و اراضی



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در شمال غرب کشور

Fig. 1: Location of the study area in the northwest of the country

در زمینه زمین‌لغزش، این مدل با دریافت داده‌های آموزشی شامل موقعیت زمین‌لغزش‌های گذشته (کلاس حساسیت) و لایه‌های مؤثر (متغیرهای مستقل)، رابطه پیچیده بین عوامل مؤثر و وقوع زمین‌لغزش را می‌آموزد. سپس این رابطه به کل منطقه مطالعاتی تعمیم داده می‌شود تا نقشه پهنه‌بندی حساسیت تولید شود (Kavzoglu et al, 2014). SVM بر مبنای مفهوم بهینه‌سازی شکل گرفته و اساس آن نظریه‌های یادگیری آماری است. این روش معمولاً برای دستیابی به بیشترین قابلیت تعمیم‌پذیری ممکن در روابط تجربی یادگیری ماشین و بازه‌های اطمینان به کار می‌رود. رابطه ۱ این مفهوم را توصیف می‌کند (Riaz et al, 2024).

رابطه ۱)

$$K(x_a, x_a) = \exp\left(-\lambda \sum_{b=1}^n (x_{ab} - x_{ab})^2\right)$$

در این معادله، x_{ab} و $x_a^T b$ زوج λ ام از مشاهدات متغیرهای پیش‌بین هستند، n تعداد متغیرهای پیش‌بین را نشان می‌دهد، λ یک پارامتر تنظیمی است که میزان هموار بودن^۲ مرز تصمیم‌گیری را در نظر می‌گیرد و K بیانگر تابع کرنل است. تنظیم ابرپارامترها^۳ گامی حیاتی در یادگیری ماشین محسوب می‌شود که شامل آزمون و بهینه‌سازی سیستماتیک برای بهبود عملکرد مدل است. مراحل اجرای مدل SVM در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش به شرح زیر است:

مواد و روش‌ها

مهم‌ترین داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ منتشر شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر ماهواره ALOS-PALSAR، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 مربوط به تاریخ ۲۶ ژوئن ۲۰۲۵ و تصاویر ماهواره‌ای Google Earth است. به منظور انجام تحلیل‌های مکانی و پردازش داده‌ها از نرم‌افزارهای ArcGIS، ENVI و SPSS Modeler استفاده شد. همچنین، به منظور ارزیابی و پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی، مدل ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) به کار گرفته شد. یکی از رویکردهای پرکاربرد در طبقه‌بندی که بر پایه نظریه یادگیری آماری است، ماشین بردار پشتیبان (SVM) می‌باشد که گاهی با عنوان طبقه‌بندی با حاشیه بیشینه نیز شناخته می‌شود. این روش در دهه ۱۹۹۰ توسعه یافت و به دلیل کارایی بالا در الگوریتم‌های مختلف، به عنوان یکی از پرکاربردترین رویکردها شناخته می‌شود (Riaz et al, 2024). SVM یک الگوریتم یادگیری نظارت شده است که با استفاده از ابرصفحه‌ای بهینه، داده‌ها را در فضای ویژگی‌ها جدا می‌کند.

تهیه داده‌های آموزشی و آزمون

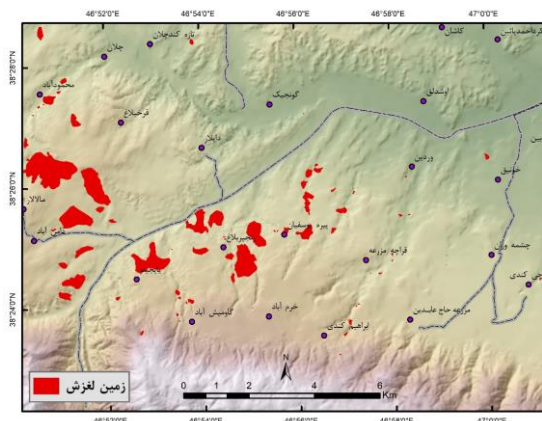
در منطقه مطالعاتی بالغ بر ۷۸ زمین لغزش شناسایی شد که زمین لغزش‌های بزرگ آن عمدتاً با روند شمال غرب - جنوب شرق گسترش یافته و از شرق روستای پیره یوسفیان تا شمال شرق روستاهای ملال و دامن آباد مشاهده می‌شوند (شکل ۲). بر روی برخی از اسکارپ‌ها و توده‌های لغزشی، حضور چندین چشمه فعال و همچنین شواهدی از چشمه‌های خشک شده قابل تشخیص است. در برخی موارد، بافت آشفته و درهم توده‌های لغزشی موجب تجمع آب و شکل‌گیری برکه‌های کوچک در سطح این توده‌ها شده است، بارزترین نمونه این پدیده در شرق روستای پیره یوسفیان مشاهده می‌شود، جایی که توده لغزشی علاوه بر انحراف مسیر رودخانه، شرایط لازم برای تشکیل چندین برکه کوچک را فراهم کرده است. در پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش، تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش‌های موجود (سیاهه زمین لغزش) به عنوان مهم‌ترین مرحله پژوهش تلقی می‌شود، زیرا دقت و قابلیت اعتماد نتایج تا حد زیادی به کیفیت و صحت این نقشه وابسته است. برای تهیه مجموعه داده‌های آموزشی و آزمون، ابتدا ۷۸ نقطه لغزشی بر اساس سیاهه زمین لغزش شناسایی گردید. برای کاهش اثر خوشه‌شدگی^۴، نقاط لغزشی با فاصله کمتر از ۱۰۰ متر از یکدیگر حذف شدند و تنها یک نقطه به عنوان نماینده هر خوشه باقی ماند. برای انتخاب نقاط غیر لغزشی

از روش نمونه‌برداری متوازن^۵ با نسبت ۱:۱ استفاده شد. بدین منظور، بافری به شعاع ۵۰۰ متر پیرامون تمام توده‌های لغزشی ایجاد گردید و مناطق پایدار خارج از این بافر و با شیب کمتر از ۵ درصد تعریف شدند. سپس با استفاده از تابع ایجاد نقاط تصادفی^۶ در نرم‌افزار ArcGIS، ۷۸ نقطه غیر لغزشی به صورت تصادفی در مناطق پایدار تولید شد. در نهایت، ۷۰ درصد از رخدادهای زمین لغزش و نقاط غیر لغزشی متناظر به منظور آموزش مدل و ۳۰ درصد باقیمانده برای اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد مدل مورد استفاده قرار گرفت. برای کنترل خودهمبستگی مکانی، افزون بر حذف نقاط هم‌موقعیت و فاصله‌گذاری نقاط غیر لغزشی، آزمون موران^۷ بر روی باقیمانده‌های مدل (باقیمانده - مقدار واقعی - مقدار پیش‌بینی شده) انجام شد. نتایج این آزمون نشان داد که Moran's I برابر ۰/۰۳- (نزدیک به صفر و بیانگر الگوی تصادفی)، z-score برابر ۰/۷۶- (در محدوده $\pm 1/96$ و نشان‌دهنده عدم معناداری) و p-value برابر ۰/۴۵ (بزرگتر از ۰/۰۵) می‌باشد که تأییدکننده عدم وجود خودهمبستگی معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد است (جدول ۱). این یافته نشان می‌دهد که مدل توانسته است الگوی مکانی زمین لغزش را به خوبی یاد بگیرد و ساختار مکانی معناداری در خطاها باقی نمانده است.

جدول ۱: نتایج آزمون موران

Table 1: Results of Moran's I Test

Index	Value	Description
Moran's I	-0.03	Close to zero (random pattern)
z-score	-0.76	Within the range of ± 1.96 (not significant)
p-value	0.45	> 0.05 (no significant spatial autocorrelation)



شکل ۲: نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه

Fig. 2: Spatial distribution of landslides in the study area

تهیه لایه‌های شرطی (عوامل مؤثر)

در این پژوهش، با توجه به داده‌های در دسترس، بالغ بر ۱۰ لایه مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا، شاخص‌های ژئومورفولوژیکی شامل لایه‌های ارتفاع، شیب، جهت شیب و طول دامنه؛ شاخص‌های زمین‌شناسی مشتمل بر لایه‌های لیتولوژی و فاصله از گسل‌ها؛ شاخص‌های هیدرولوژیکی شامل فاصله از آبراهه‌ها و شاخص رطوبت توپوگرافیک^۴ (TWI) و شاخص‌های پوشش زمین شامل لایه‌های کاربری اراضی و پوشش گیاهی در فرآیند مدل‌سازی لحاظ شدند. به منظور اطمینان از عدم وجود همبستگی شدید میان متغیرهای مستقل و جلوگیری از برآورد نادرست شاخص‌ها، دو آزمون آماری ماتریس همبستگی پیرسون و شاخص تورم واریانس^۹ انجام شد. این آزمون‌ها به ویژه برای متغیرهای توپوگرافیک مانند ارتفاع، شیب و TWI که احتمال همبستگی بین آنها وجود

دارد، ضروری می‌باشند. در این رابطه، ابتدا ضرایب همبستگی پیرسون میان تمامی ۱۰ متغیر مؤثر محاسبه گردید. نتایج نشان داد که هیچ جفتی از متغیرها دارای ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۷ (آستانه همبستگی شدید) نیست. بالاترین همبستگی مربوط به ارتفاع و TWI با ضریب ۰/۶۲- (همبستگی متوسط منفی) بود که نشان می‌دهد با افزایش ارتفاع، مقادیر TWI به طور متوسط کاهش می‌یابد. همچنین همبستگی TWI و فاصله از آبراهه با ضریب ۰/۵۳- (همبستگی متوسط منفی) به این معناست که هر چه فاصله از آبراهه کاهش می‌یابد (نزدیکی به آبراهه)، مقادیر TWI افزایش می‌یابد که از نظر هیدرولوژیکی قابل انتظار است. سایر جفت متغیرها دارای ضرایب همبستگی کمتر از ۰/۳ بودند که نشان‌دهنده همبستگی ناچیز یا قابل چشم‌پوشی است (جدول ۲).

جدول ۲: ماتریس همبستگی پیرسون میان متغیرهای مؤثر (ضرایب بالای ۰/۳)

Table 2: Pearson Correlation Matrix of Effective Factors (Coefficients > 0.3)				
Variable	Elevation	Slope	TWI	Distance to Drainage
Elevation	1			
Slope	0.35	1		
TWI	0.62	-0.28	1	
Distance to Drainage	-0.41	-0.19	-0.53	1

در ادامه، شاخص VIF برای هر یک از ۱۰ متغیر محاسبه شد (جدول ۳). این شاخص نشان می‌دهد که تا چه حد واریانس یک متغیر توسط سایر متغیرهای مستقل تبیین می‌شود. آستانه‌های مرسوم به این شرح است: VIF کمتر از ۵ نشان‌دهنده همبستگی قابل قبول و عدم نیاز به حذف متغیر، VIF بین ۵ تا ۱۰ نشان‌دهنده همبستگی متوسط و

نیاز به بررسی بیشتر و VIF بالاتر از ۱۰ نشان‌دهنده همبستگی شدید و ضرورت حذف متغیر می‌باشد. نتایج نشان داد که مقادیر VIF برای همه متغیرها بین ۱/۳ (برای NDVI) تا ۴/۸ (برای ارتفاع) قرار دارد که همگی کمتر از آستانه ۵ هستند (جدول ۳). بنابراین، نیاز به حذف هیچ متغیری از مدل وجود ندارد.

جدول ۳: مقادیر شاخص تورم واریانس (VIF) برای متغیرهای مؤثر

Table 3: Variance Inflation Factor (VIF) Values for Effective Factors					
Variable	VIF	Status	Variable	VIF	Status
Elevation	4.8	Acceptable (Caution Threshold)	Lithology	2.1	Acceptable
TWI	4.2	Acceptable (Caution Threshold)	Distance to Fault	1.9	Acceptable
Slope	3.9	Acceptable	Aspect	1.8	Acceptable
Distance to Drainage	3.2	Acceptable	Land Use	1.5	Acceptable
Slope Length	2.5	Acceptable	NDVI	1.3	Acceptable

استخراج مقادیر متغیرها از محل زمین‌لغزش‌ها و مناطق پایدار

در این مرحله، مقادیر هر یک از لایه‌های شرطی در موقعیت نقاط آموزشی شامل نقاط لغزشی و غیرلغزشی استخراج شد

تا ماتریس ویژگی‌ها به همراه برجسب‌های کلاسی تشکیل گردد. در پژوهش حاضر، این فرآیند با استفاده از لایه‌های موضوعی و لایه سیاهه زمین‌لغزش‌های منطقه و با

هسته RBF، معمولاً با بهره‌گیری از روش‌هایی نظیر جستجوی شبکه‌ای^{۱۲} بهینه‌سازی می‌شوند.

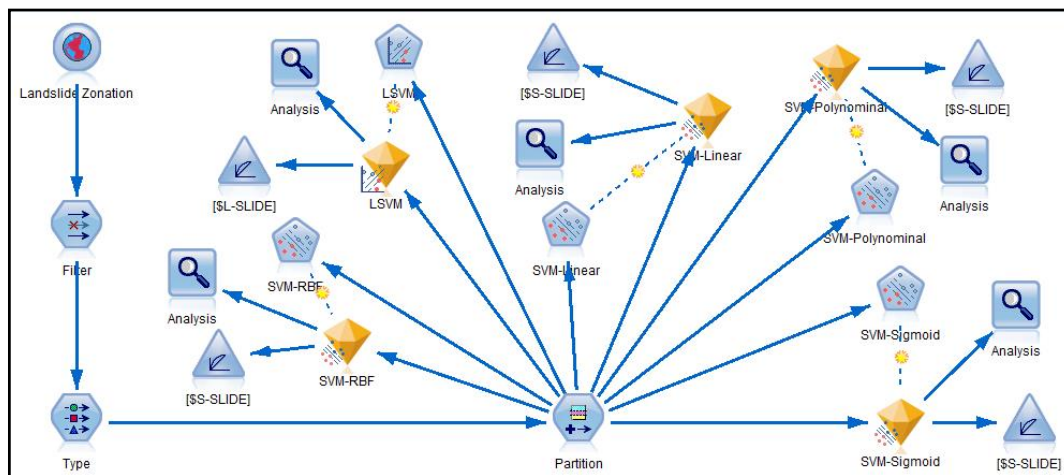
ارزیابی و تولید نقشه حساسیت

مدل آموزش‌دیده بر روی مجموعه داده‌های آزمون اعمال و عملکرد آن با استفاده از معیارهایی نظیر صحت کلی، دقت، حساسیت و شاخص مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت، مدل بر روی تمامی پیکسل‌های محدوده مطالعاتی اعمال شده و نقشه احتمال وقوع زمین لغزش در قالب پنج کلاس حساسیت شامل بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تولید شد. در شکل ۳ فرایند مدل‌سازی حساسیت زمین لغزش با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) در محیط نرم‌افزار SPSS Modeler ارائه شده است.

بهره‌گیری از توابع و ابزارهای مختلف نرم‌افزار ArcGIS انجام شد.

آموزش مدل SVM

در فرایند مدل‌سازی، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان با استفاده از ماتریس داده‌های آموزشی اقدام به تعیین ابرصفحه بهینه می‌کند. انتخاب تابع هسته^{۱۰} مناسب، از جمله هسته‌های تابع پایه شعاعی (RBF)، خطی یا چندجمله‌ای، نقش بسزایی در توانایی مدل برای تفکیک داده‌های با الگوهای غیرخطی دارد (Huang and Zhao, 2018). در این پژوهش، از هسته تابع پایه شعاعی^{۱۱} (RBF) استفاده شد که به‌طور ویژه برای مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون با روابط پیچیده و غیرخطی کارایی بالایی دارد. همچنین، پارامترهای هسته، از جمله پارامترهای C و γ در



شکل ۳: فرایند مدل‌سازی حساسیت زمین لغزش منطقه گویجه‌بل با استفاده از SPSS Modeler

Fig. 3: Landslide Susceptibility Modeling Process for the Goujebel Region Using SPSS Modeler

بحث و نتایج

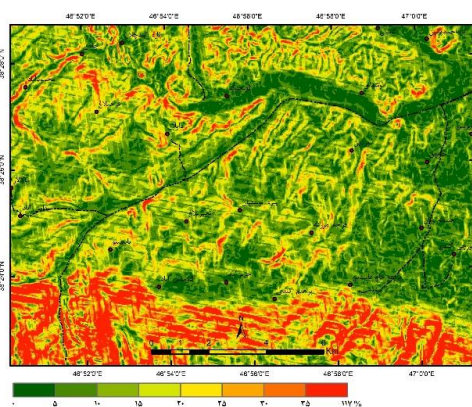
عوامل موثر بر وقوع زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه

شاخص‌های توپوگرافیک: در تحقیق حاضر، چهار فاکتور اصلی توپوگرافیک شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب و طول دامنه به عنوان شاخص‌های کلیدی در بررسی وقوع زمین لغزش‌ها در منطقه گویجه‌بل مد نظر قرار گرفته‌اند. این شاخص‌ها با استفاده از داده‌های پیکسل‌پایه مورد تحلیل قرار گرفتند تا ارتباط کمی و مکانی آن‌ها با پراکنش زمین لغزش‌ها شناسایی شود. براساس تحلیل ارتفاع، حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه به ترتیب ۱۳۳۰ و ۲۴۰۰ متر و میانگین ارتفاع منطقه ۱۶۳۰ متر از سطح دریا می‌باشد (شکل ۴). نتایج نشان می‌دهد که بیش از ۹۸ درصد

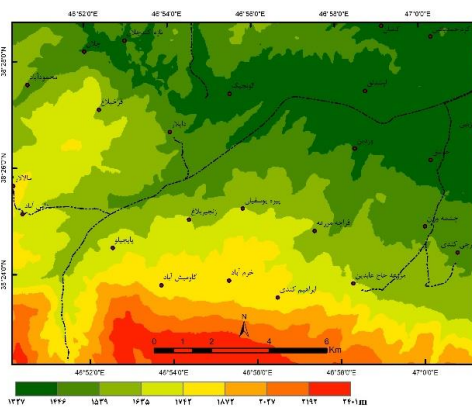
توده‌های لغزشی در طبقات ارتفاعی ۱۴۵۰ تا ۱۷۵۰ متر قرار دارند. جالب توجه است که طبقه ارتفاعی ۱۶۴۰ تا ۱۷۴۰ متر، با وجود پوشش حدود هشت درصدی از کل ارتفاعات منطقه، بالغ بر ۴۲ درصد از توده‌های لغزشی را در خود جای داده است. این امر نشان‌دهنده تمرکز بالای زمین لغزش‌ها در ارتفاعات میانی و نقش برجسته شرایط ارتفاعی در پایداری دامنه‌ها می‌باشد. در مورد شاخص شیب (شکل ۵)، متوسط شیب منطقه ۱۸ درصد است که بیانگر ناهمواری قابل توجه سطح زمین می‌باشد. تقریباً ۸۸ درصد توده‌های لغزشی در شیب‌های کمتر از ۳۰ درصد رخ داده‌اند. الگوی توزیع زمین لغزش‌ها بر اساس شیب نشان می‌دهد که

احتمال وقوع زمین لغزش همراه است، زیرا طولانی بودن دامنه می‌تواند زمینه‌ای برای تجمع آب و افزایش وزن خاک را فراهم کند. با این حال، در منطقه مورد مطالعه، مشاهده شد که در سطوح با طول دامنه بیشتر، فراوانی و وسعت زمین لغزش‌ها محدودتر است. این نکته نشان می‌دهد که طول دامنه به تنهایی فاکتور تعیین‌کننده نیست و اثر آن در صورتی نمایان می‌شود که سایر شرایط مساعد مانند لیتولوژی و شیب دامنه نیز وجود داشته باشند. به عبارت دیگر، طول دامنه به عنوان یک عامل تسهیل‌کننده عمل می‌کند، اما در نبود شرایط زمین‌شناسی و شیب مناسب، توانایی ایجاد زمین لغزش را ندارد. در مجموع، تحلیل شاخص‌های ژئومورفولوژیکی نشان می‌دهد که ارتفاع و شیب نقش تعیین‌کننده در وقوع زمین لغزش‌ها دارند، جهت شیب اثرات محلی و میکروکلیمایی بر رطوبت و پوشش خاک را منعکس می‌کند و طول دامنه تنها در تعامل با سایر فاکتورها تأثیرگذار است.

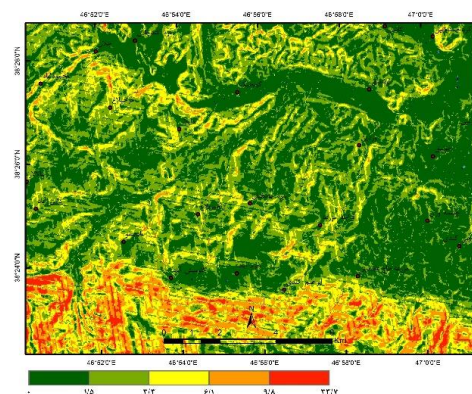
از شیب‌های ۵ درصد تا شیب‌های ۲۵ درصد، روند وقوع زمین لغزش‌ها افزایشی است، در حالی که از شیب‌های ۲۵ درصد تا بیش از ۵۵ درصد، یک روند کاهشی مشاهده می‌شود. جهت شیب (شکل ۶) یکی دیگر از شاخص‌های مهم در تحلیل زمین لغزش‌هاست. نتایج نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از زمین لغزش‌ها (حدود ۶۳ درصد) در دامنه‌های شمالی رخ داده‌اند. به تفکیک، ۲۹/۳ درصد پیکسل‌های لغزشی در جهات شمالی، ۲۲ درصد در جهات شمال غربی و ۱۱/۴ درصد در جهات شمال شرقی توزیع شده‌اند. این توزیع می‌تواند به ضخامت بیشتر مواد هوازده، ماندگاری طولانی‌تر برف، و افزایش رطوبت در دامنه‌های شمالی نسبت داده شود. در واقع، جهت‌گیری دامنه‌ها نسبت به تابش خورشید و جریان‌های آبی نقش مهمی در افزایش یا کاهش اشباع خاک و در نتیجه پایداری دامنه دارد. طول دامنه (شکل ۷) به عنوان شاخص چهارم ژئومورفولوژیکی نیز در این مطالعه بررسی شده است. به طور کلی، در شرایط یکسان، افزایش طول دامنه با افزایش



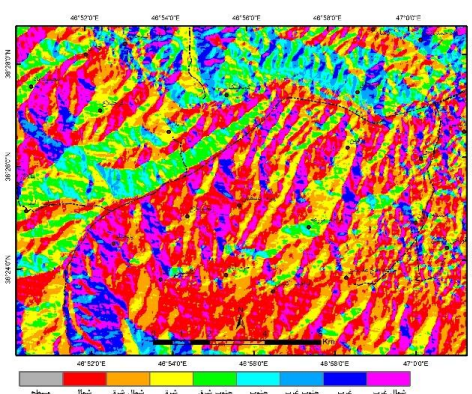
شکل ۵: توزیع شیب در منطقه
Fig. 5: Slope distribution in the region



شکل ۴: توزیع ارتفاعات در منطقه
Fig. 4: Elevation distribution in the region



شکل ۷: توزیع طول دامنه در منطقه
Fig. 7: Hillslope length distribution in the region



شکل ۶: توزیع جهت شیب در منطقه
Fig. 6: Aspect distribution in the region

شاخص‌های زمین‌شناسی: در پژوهش حاضر، دو فاکتور اصلی زمین‌شناسی شامل لیتولوژی و فاصله از گسل‌ها به عنوان شاخص‌های مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها در منطقه اهر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحلیل این شاخص‌ها با هدف شناسایی عوامل زمین‌شناسی مؤثر در پراکنش و شدت زمین‌لغزش‌ها انجام شده است. منطقه مورد مطالعه شامل سازندهایی از دوره کرتاسه تا دوره کواترنری می‌باشد (جدول ۱ و شکل ۸). ارتفاعات منطقه عمدتاً منطبق بر واحدهای سنگی مقاوم مربوط به پالتوسن و ائوسن هستند. مقاومت بالای این واحدها باعث شده است که توده‌های لغزشی در این نواحی مشاهده نشوند. بدنه سد ستارخان اهر نیز بر روی این واحدها مستقر شده‌اند و از پایداری مناسبی برخوردارند. بررسی تفصیلی واحدهای سنگی نشان می‌دهد که برخی از سنگ‌ها مانند آندزیت، داسیت، تراکیت و لاتیت به دلیل مقاومت مکانیکی بالا، نفوذپذیری کم و تغییرشکل‌پذیری محدود، تقریباً فاقد توده‌های لغزشی هستند (جدول ۴). این موضوع نشان‌دهنده نقش مهم خواص مکانیکی سنگ‌ها در کنترل وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه است. در مقابل، حدود ۴۴ درصد از سطح منطقه را

واحد PLQ-C تشکیل می‌دهد که شامل کنگلومراهای کمتر تحکیم یافته، بد طبقه‌بندی شده، دارای میان‌لایه‌های مارنی، ماسه‌ای و سیلتی است. این واحد به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای کم‌رنگ دیده می‌شود و بیش از ۹۵ درصد از توده‌های لغزشی منطقه بر روی آن قرار دارند. بزرگترین زمین‌لغزش‌ها نیز عمدتاً در این واحد رخ داده‌اند. علت این امر، نفوذپذیری بالای کنگلومراها، واکنش سریع آن‌ها به فرآیندهای هوازدگی و یخبندان- ذوب یخ و تجمع مواد سطحی قابل حرکت است. کنگلومراهای منطقه عمدتاً از مواد تخریبی سنگ‌های آذرین تشکیل شده‌اند و سیمان آن‌ها می‌تواند آهکی، رسی یا مارنی باشد. این ترکیب سبب می‌شود که نه تنها نسبت به عوامل هوازدگی حساس باشند، بلکه در اثر فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی، شن، ماسه و قلوه‌سنگ‌های آزاد زیادی تولید شود که در دامنه‌ها تجمع یافته و شرایط مناسب برای وقوع زمین‌لغزش را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، وسیع‌ترین نهشته‌های کنگلومرایی مربوط به پلیوسن و پلیستوسن هستند که با تشکیل دریاچه در حوضه اهرچای همزمان بوده و سبب ایجاد رسوبات عمیق و ناپایدار سطحی شده‌اند.

جدول ۴: واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه و درصد مساحت توده‌های لغزش‌یافته بر روی این واحدها

Table 4: Lithological units of the study area and the area of landslide masses occurring on these units

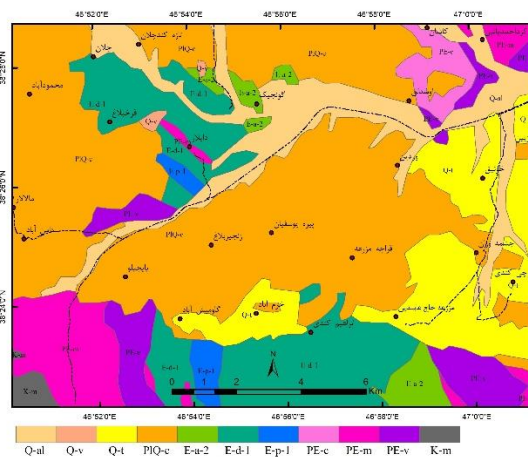
Symbol	Lithological Formation	Area (%)	Landslide Area (%)
Q-al	Recent Alluvium	11.3	2.6
Q-t	Silt, Conglomerate, and Travertine	12.7	0.4
Q-v	Andesite and Basalt	0.2	0
PIQ-c	Conglomerate with Interbeds of Sandy Marl and Silt	43.6	95.9
E-a-2	Latite and Andesite	2.3	0
E-d-1	Dacite, Trachyandesite, and Ignimbrite	13.9	0.4
E-p-1	Latite	1.3	0
PE-v	Submarine Volcanic Rocks	5.5	0.4
PE-c	Purple Conglomerate and Breccia	1.8	0
PE-m	Marl, Limestone, and Sandstone	6.7	0.4
K-m	Marl, Molasse, and Sandstone	0.7	0

گسل‌های منطقه بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی استخراج شده و منطقه مورد مطالعه بر حسب فاصله از گسل‌ها به شش طبقه تقسیم شده است (شکل ۹). مشاهده شد که برخی از زمین‌لغزش‌های بزرگ در نزدیکی گسل‌ها و به ویژه در امتداد گسل‌هایی با روند شمال غرب - جنوب شرق رخ داده‌اند. این امر نشان می‌دهد که وجود گسل می‌تواند به عنوان یک عامل تسهیل‌کننده برای وقوع زمین‌لغزش عمل کند، هرچند تعیین سهم دقیق گسل‌ها در هر مورد نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر ژئومکانیکی و میدانی است. با این حال،

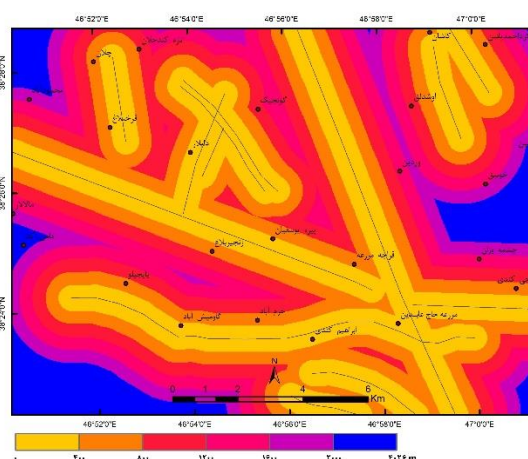
تحلیل مساحت توده‌های لغزشی نسبت به فاصله از گسل‌ها نشان می‌دهد که هرچند نزدیکی به گسل‌ها می‌تواند به افزایش احتمال زمین‌لغزش کمک کند، اما سایر عوامل زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی نظیر نوع سنگ، شیب و طول دامنه نیز در ایجاد یا محدود کردن زمین‌لغزش نقش تعیین‌کننده دارند. این نتایج در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش لحاظ شده و می‌تواند به شناسایی نواحی حساس کمک کند. در کل، بررسی شاخص‌های زمین‌شناسی در منطقه اهر نشان می‌دهد که لیتولوژی

زمانی محسوس است که شرایط زمین‌شناسی و شیب دامنه مساعد باشد. در نهایت باید گفت که تعامل میان خصوصیات سنگ، هوازدگی، نفوذپذیری، و ساختار زمین اهمیت بالایی در وقوع و گستردگی زمین‌لغزش‌های منطقه دارد.

نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل مکان وقوع زمین‌لغزش‌ها دارد و واحدهای نرم و کمتر تحکیم یافته مانند PLQ-c مستعد بیشترین زمین‌لغزش هستند. فاصله از گسل‌ها به عنوان یک عامل تسهیل‌کننده عمل می‌کند، اما اثر آن



شکل ۸: توزیع سازندهای زمین‌شناسی در منطقه
Fig. 8: Distribution of geological formation in the region



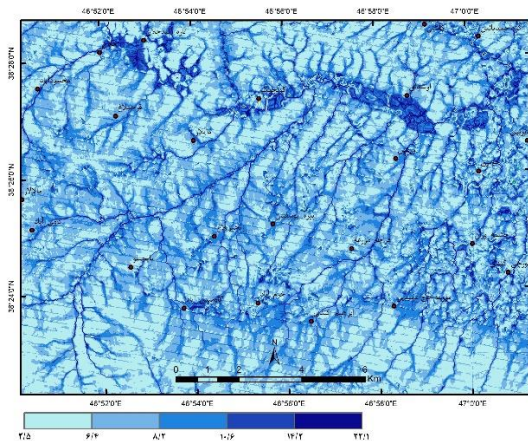
شکل ۹: توزیع گسل‌ها و فاصله از آنها در منطقه
Fig. 9: Distribution of faults and distance to faults in the region

انتقالی دامنه‌های شیب‌دار به سطوح هموار متمرکز است. این نواحی به دلیل تجمع رواناب و تمرکز جریان‌های سطحی و زیرسطحی، مستعد افزایش رطوبت و ناپایداری دامنه‌ها هستند. هم‌پوشانی قابل‌توجهی بین مقادیر بالای TWI و پراکنش زمین‌لغزش‌ها مشاهده شد که نشان‌دهنده نقش رطوبت تجمع یافته در کاهش مقاومت برشی و افزایش احتمال لغزش، به‌ویژه در دامنه‌های با شیب متوسط تا زیاد است. شبکه آبراهه‌ای نیز از عوامل هیدرولوژیکی مؤثر بر زمین‌لغزش‌ها محسوب می‌شود. بسیاری از لغزش‌ها در مجاورت آبراهه‌ها رخ داده‌اند که

شاخص‌های هیدرولوژیکی: در این پژوهش، شاخص‌های هیدرولوژیکی شامل شاخص رطوبت توپوگرافیک^{۱۳} (TWI) و فاصله از آبراهه به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش بررسی شدند. شاخص TWI با تکیه بر نقش توپوگرافی در هدایت و تجمع آب، اثر شرایط محلی زمین بر فرآیندهای هیدرولوژیکی را به صورت کمی نشان می‌دهد و از متغیرهای مهم در تبیین الگوی رطوبت خاک، اشباع و افزایش فشار آب منفذی به شمار می‌رود. نتایج نشان داد مقادیر TWI در منطقه بین ۲/۵ تا ۲۲/۱ متغیر بوده (شکل ۱۰) و بیشترین مقادیر آن در پای‌کوه‌ها، پای‌تپه‌ها و نواحی

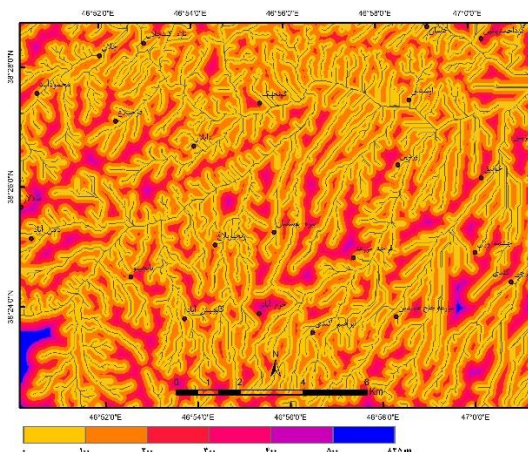
عمدتاً به دلیل فرسایش، زیرشویی و تضعیف پای دامنه‌ها توسط جریان‌های سطحی است. نفوذ آب در حاشیه آبراهه‌ها با افزایش فشار آب منفذی و کاهش مقاومت برشی، شرایط ناپایداری را تشدید می‌کند. در این تحقیق، آبراهه‌ها با استفاده از مدل ارتفاع رقومی و ابزار ArchHydro

محیط ArcGIS استخراج و حریم‌هایی با فاصله ۱۰۰ متری پیرامون آن‌ها ترسیم شد (شکل ۱۱). نتایج نشان داد حدود ۶۶ درصد زمین‌لغزش‌ها در فاصله صفر تا ۱۰۰ متری آبراهه‌ها قرار دارند که بیانگر نقش مهم نزدیکی به آبراهه در وقوع زمین‌لغزش است.



شکل ۱۰: توزیع رطوبت توپوگرافیک در منطقه

Fig. 10: Topographic Wetness Index (TWI) distribution in the region



شکل ۱۱: توزیع آبراهه‌ها و فاصله از آنها در منطقه

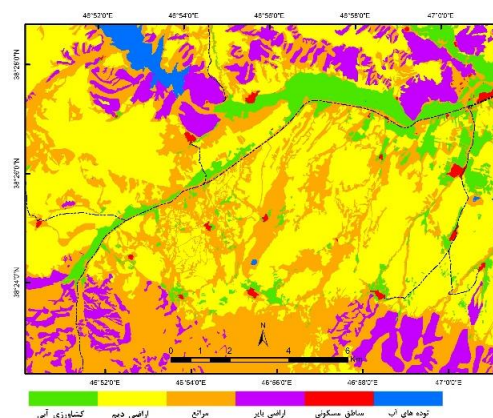
Fig. 11: Distribution of drainage network and distance to streams in the region

شاخص‌های پوشش زمین: در این پژوهش، کاربری اراضی و پوشش گیاهی به عنوان مهم‌ترین شاخص‌های پوشش زمین مورد بررسی قرار گرفتند. هر دو لایه اطلاعاتی با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 تهیه و پردازش شدند که به دلیل قدرت تفکیک مکانی و طیفی مناسب، امکان شناسایی مطلوب واحدهای کاربری و وضعیت پوشش گیاهی منطقه را فراهم می‌سازند. نتایج حاصل از نقشه کاربری اراضی (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که بخش عمده منطقه را اراضی کشاورزی دیم و مراتع با پوشش متوسط تا

خوب تشکیل می‌دهند. توده‌های آبی موجود در منطقه عمدتاً شامل دریاچه پشت سد ستارخان اهر و همچنین بندها، برکه‌ها و آبگیرهای کوچک مرتبط با چشمه‌های محلی می‌باشند که نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی و پایداری اکوسیستم منطقه ایفا می‌کنند. کشاورزی آبی منطقه غالباً به صورت اراضی باغی عمدتاً در مجاورت آبراهه‌های اصلی و چشمه‌های پرآب توسعه یافته‌اند. موضوعی که بیانگر تأثیر مستقیم دسترسی به منابع آب بر الگوی استقرار فعالیت‌های کشاورزی است. در مقابل، اراضی

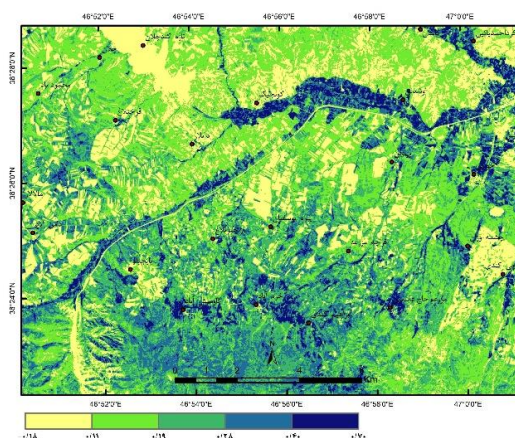
است. بر اساس نتایج محاسبه NDVI، منطقه مورد مطالعه به پنج طبقه پوشش گیاهی تقسیم شد (شکل ۱۳). پهنه‌هایی با مقادیر بیش از ۰/۴ عمدتاً شامل اراضی کشاورزی آبی و باغات بوده و به طور قابل توجهی با دشت‌های سیلابی منطقه انطباق دارند. تحلیل توزیع مکانی زمین‌لغزش‌ها نسبت به طبقات مختلف NDVI نشان می‌دهد که لغزش‌ها در تمامی طبقات این شاخص پراکنده‌اند و تمرکز مشخصی در پهنه‌های با پوشش گیاهی متراکم مشاهده نمی‌شود. این الگو بیانگر آن است که پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه، به‌رغم نقش بالقوه آن در افزایش پایداری دامنه‌ها از طریق تقویت خاک و کاهش رواناب سطحی، اثر حفاظتی قابل توجهی در کاهش حساسیت وقوع زمین‌لغزش‌ها نداشته است. به نظر می‌رسد عوامل دیگری نظیر شیب، ویژگی‌های لیتولوژیکی، شرایط هیدرولوژیکی و فعالیت‌های انسانی نقش غالب‌تری در کنترل و تحریک زمین‌لغزش‌های منطقه ایفا می‌کنند.

فاقد پوشش گیاهی یا دارای پوشش بسیار ضعیف عمدتاً در ارتفاعات شمالی و جنوبی منطقه پراکنش دارند که این امر می‌تواند ناشی از شرایط توپوگرافی، شیب زیاد، فرسایش شدید و محدودیت‌های اقلیمی باشد. بررسی پراکنش زمین‌لغزش‌ها نسبت به کاربری اراضی نشان می‌دهد که حدود ۷۰ درصد توده‌های لغزشی در محدوده مراتع رخ داده‌اند. این موضوع می‌تواند به عواملی نظیر چرای مفرط، تخریب پوشش گیاهی، فشردگی خاک و کاهش انسجام لایه‌های سطحی در این کاربری‌ها مرتبط باشد و نقش کاربری مرتعی را در افزایش حساسیت دامنه‌ها به ناپایداری برجسته سازد. نقشه پوشش گیاهی منطقه با استفاده از شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) تهیه گردید. این شاخص که مقادیر آن در بازه -۱ تا +۱ قرار دارد، معیاری مناسب برای ارزیابی تراکم و وضعیت سلامت پوشش گیاهی محسوب می‌شود، به گونه‌ای که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده پوشش گیاهی متراکم‌تر و سرسبزی بیشتر



شکل ۱۲: توزیع انواع کاربری‌ها در منطقه

Fig. 12: Land Use distribution in the region

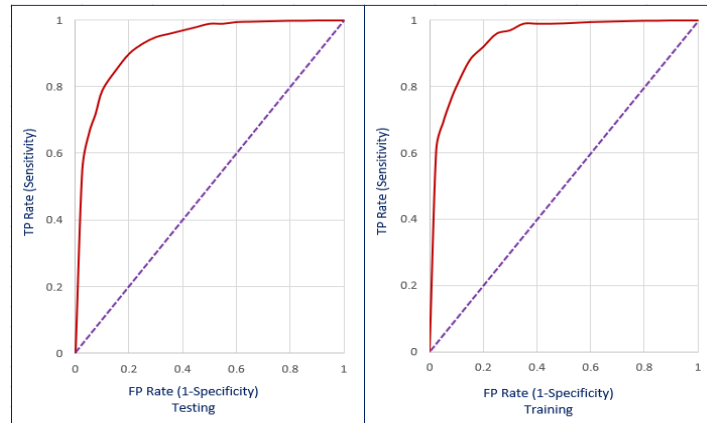


شکل ۱۳: توزیع پوشش گیاهی (NDVI) در منطقه

Fig. 13: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Distribution in the region

هسته شعاعی (RBF) در میان روش‌های مختلف SVM بهترین عملکرد را دارد. مقدار AUC برای مرحله آموزش مدل حدود ۰/۹۴۳ و برای مرحله آزمون حدود ۰/۹۳۳ به دست آمد که بیانگر دقت بالای مدل در شناسایی و پیش‌بینی مناطق مستعد زمین لغزش است (شکل ۱۴). همچنین ضریب جینی (GC) به ترتیب برابر با ۰/۸۸۶ برای آموزش و ۰/۸۶۶ برای آزمون محاسبه شد.

تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با کاربست مدل SVM در این پژوهش، اهمیت نسبی ده متغیر مؤثر بر وقوع زمین لغزش در منطقه گویچه بل اهر با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی عملکرد مدل بر اساس منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) و شاخص مساحت زیر منحنی (AUC) انجام گرفت. نتایج حاصل از تحلیل ROC نشان داد که تابع



شکل ۱۴: منحنی ROC برای آموزش و آزمون با استفاده از تابع هسته شعاعی (RBF)

Fig. 14: ROC curves for the training and testing using the Radial Basis Function (RBF) kernel

بر اساس این ماتریس، شاخص دقت برابر ۰/۸۷۵، یادآوری برابر ۰/۹۱۳، امتیاز F1 برابر ۰/۸۹۴ و صحت کلی برابر ۰/۸۹۴ محاسبه گردید (جدول ۵). مقادیر یادآوری و F1-score بیانگر توانایی بالای مدل در شناسایی صحیح نقاط لغزشی و تعادل مناسب بین دقت و یادآوری است. صحت کلی ۸۹/۴ درصد نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش مدل در طبقه‌بندی کل منطقه بوده و شاخص AUC با مقدار ۰/۹۳۳ تأییدکننده قابلیت تفکیک عالی مدل می‌باشد.

برای ارزیابی جامع‌تر عملکرد مدل، افزون بر AUC، از ماتریس درهم‌ریختگی^{۱۴} و شاخص‌های مشتق شده از آن شامل دقت^{۱۵}، یادآوری^{۱۶}، امتیاز F1^{۱۷} و صحت کلی^{۱۸} استفاده گردید. ارزیابی بر روی مجموعه داده‌های آزمون (۳۰ درصد داده‌ها، شامل ۴۷ نقطه با نسبت ۱:۱) انجام گرفت. ماتریس درهم‌ریختگی نشان داد که از ۲۳ نقطه لغزشی واقعی، ۲۱ نقطه به درستی و ۲ نقطه به اشتباه پیش‌بینی شده‌اند و از ۲۴ نقطه غیرلغزشی واقعی، ۲۱ نقطه به درستی و ۳ نقطه به اشتباه پیش‌بینی شده‌اند (جدول ۵).

جدول ۵: ماتریس درهم‌ریختگی مدل SVM-RBF بر اساس داده‌های آزمون

Table 5: Confusion matrix of the SVM-RBF model based on test data

Actual / Predicted	Landslide: Predicted (Correct)	Non-Landslide: Predicted (Incorrect)	Total
Landslide: Actual (Correct)	TP = 21	FN = 2	23
Non-Landslide: Actual (Incorrect)	FP = 3	TN = 21	24
Total	24	23	47

جدول ۶: شاخص‌های عملکرد مدل SVM-RBF

Table 6: Performance Metrics of the SVM-RBF Model

Metric	Equation	Value	Interpretation
Precision	$TP / (TP + FP)$	0.875	87.5% of the model's landslide predictions are correct
Recall (Sensitivity)	$TP / (TP + FN)$	0.913	91.3% of actual landslides have been identified
F1-Score	$2 \times (P \times R) / (P + R)$	0.894	Good balance between precision and recall
Overall Accuracy	$(TP + TN) / \text{Total}$	0.894	89.4% of all predictions are correct
AUC	—	0.933	Excellent (outstanding discrimination)

مجدداً ارزیابی شده و کاهش صحت ناشی از این جایگشت محاسبه می‌شود. این فرآیند ۱۰ بار تکرار شده و میانگین کاهش صحت برای هر متغیر به دست می‌آید. در نهایت، مقادیر میانگین کاهش صحت به صورت نرمالیزه (با مجموع برابر ۱) تبدیل شده و به عنوان شاخص اهمیت نسبی^{۲۲} گزارش می‌شوند. تغییری که جایگشت مقادیر آن باعث کاهش بیشتری در صحت مدل شود، از اهمیت بیشتری برخوردار است. خلاصه عملکرد مدل در جدول ۷ و نتایج اهمیت متغیرها در شکل ۱۵ ارائه شده است. بر اساس خروجی نرم‌افزار، صحت آموزش مدل ۹۴/۵ درصد، صحت آزمون ۸۹/۴ درصد و AUC برابر ۰/۹۳۳ می‌باشد.

از آنجا که مدل SVM با هسته RBF به طور مستقیم ضرایبی برای متغیرهای ورودی ارائه نمی‌دهد، برای تعیین میزان تأثیر هر یک از ۱۰ عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش از قابلیت اهمیت متغیر^{۱۹} نرم‌افزار SPSS Modeler استفاده گردید. الگوریتم داخلی این نرم‌افزار بر اساس روش متوسط کاهش دقت بر اساس جایگشت^{۲۰} عمل می‌کند. در این روش، مدل SVM-RBF ابتدا بر روی داده‌های آموزشی (۷۰ درصد داده‌ها) آموزش داده می‌شود و صحت پایه^{۲۱} بر روی داده‌های آزمون (۳۰ درصد داده‌ها) محاسبه می‌گردد. سپس برای هر متغیر، مقادیر آن متغیر در مجموعه داده‌های آزمون به صورت تصادفی جایگشت داده می‌شود در حالی که سایر متغیرها بدون تغییر باقی می‌مانند. مدل

جدول ۷: خلاصه عملکرد مدل SVM در SPSS Modeler

Table 7: Summary of SVM Model Performance in SPSS Modeler

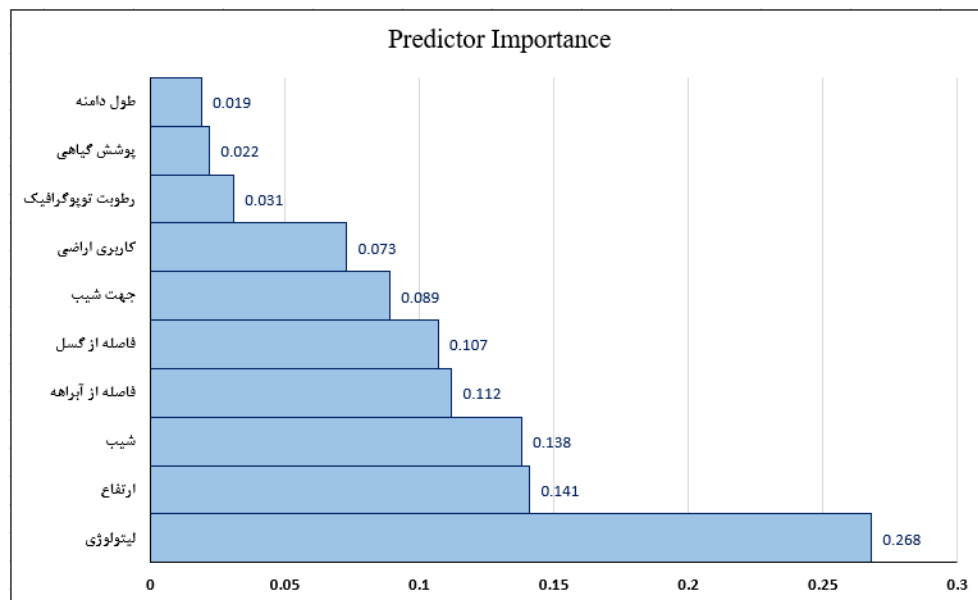
Parameter / Metric	Value
Parameter C (Cost)	10
Parameter γ (Gamma)	0.1
Number of Support Vectors	87
Training Time (seconds)	2.3
Training Accuracy	94.5%
Testing Accuracy	89.4%
Testing (AUC)	0.933

عامل ارتفاع و شیب نیز به ترتیب با ضرایب وزنی ۰/۱۴۱ و ۰/۱۳۸ به عنوان عوامل مهم و تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی شناسایی شده‌اند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از زمین‌لغزش‌ها در ترازهای ارتفاعی میانی و بر روی دامنه‌هایی با شیب متوسط (بین ۱۰ تا ۳۰ درصد) رخ داده‌اند. این موضوع بیانگر آن است که در این بازه‌های ارتفاعی و شیبی، تعادل میان نیروهای محرک و مقاوم دامنه‌ها به راحتی برهم خورده و شرایط برای ناپایداری فراهم می‌شود، به‌ویژه زمانی که این عوامل با لیتولوژی حساس سازند PLQ-C هم‌زمان شوند. در مجموع می‌توان گفت که زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی در مقیاس کلان و منطقه‌ای عمدتاً تحت کنترل سه فاکتور اصلی لیتولوژی، ارتفاع و شیب قرار دارند. سایر فاکتورها نظیر پوشش گیاهی، کاربری اراضی و فاصله از آبراه‌ها بیشتر نقش محلی داشته و بسته به شرایط محیطی می‌توانند به عنوان عوامل تشدیدکننده یا کاهش‌دهنده حساسیت زمین‌لغزش عمل کنند. یکی از دلایل کاهش وزن و اهمیت نسبی متغیرهایی مانند پوشش گیاهی و کاربری اراضی، همگنی نسبی و توزیع فضایی یکنواخت این متغیرها

با توجه به نتایج حاصل از به کارگیری مدل ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) در ارزیابی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، می‌توان بیان کرد که عامل لیتولوژی با شاخص اهمیت نسبی وزنی ۰/۲۶۸ به عنوان مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر در بروز زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه شناخته می‌شود (شکل ۱۵). این موضوع نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده ویژگی‌های زمین‌شناسی و نوع سازندها در کنترل پایداری دامنه‌ها است. بررسی توزیع مکانی زمین‌لغزش‌ها بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از رخدادهای لغزشی در ارتباط مستقیم با سازند PLQ-C قرار دارند. از سوی دیگر، آبرفت‌های کواترنری نیز به دلیل ویژگی‌های فیزیکی خاص خود، از جمله تخلخل بالا و قابلیت جذب و نگهداری مناسب آب، از پتانسیل وقوع زمین‌لغزش برخوردار می‌باشند. با این حال، پهنه‌های منطبق بر آبرفت‌های کواترنری عمدتاً در مناطق با شیب کم گسترش یافته‌اند. به همین دلیل، علی‌رغم استعداد ذاتی این واحدها برای لغزش، تعداد و شدت زمین‌لغزش‌ها در آن‌ها محدود بوده و نقش آن‌ها در مقیاس منطقه‌ای کمتر از سازند PLQ-C ارزیابی می‌شود. علاوه بر لیتولوژی، دو

تعامل آن با شرایط توپوگرافی و هیدرولوژیکی در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی، کاربری زمین و کاهش حساسیت زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه تأکید می‌نماید.

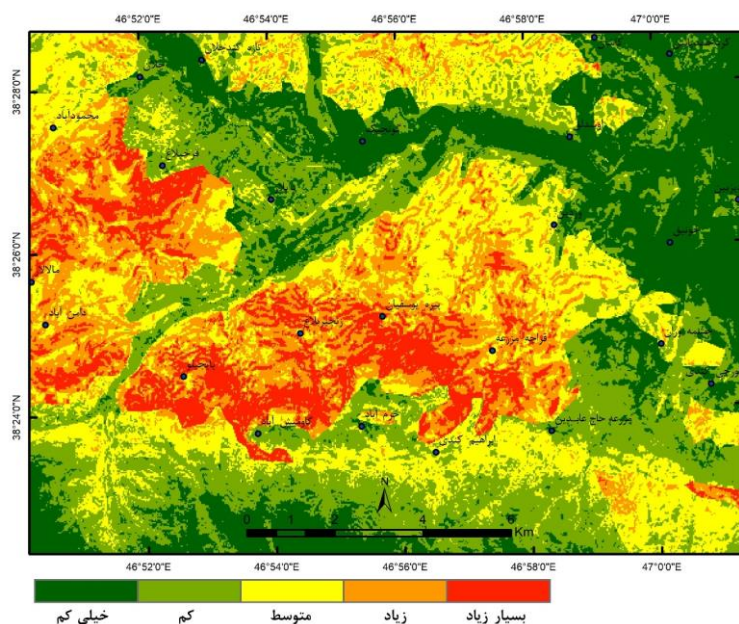
در سطح منطقه مورد مطالعه است، به طوری که تغییرات آن‌ها به اندازه‌ای نبوده که بتواند تأثیر قابل توجهی در مدل‌سازی مکانی زمین لغزش‌ها ایجاد کند. در نهایت، نتایج این پژوهش بر ضرورت توجه ویژه به عامل لیتولوژی و



شکل ۱۵: میزان اهمیت فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های منطقه گویجه‌بل
Fig. 15: Factor importance ranking for landslide occurrence in the Goujebel Region

عمده آن‌ها منطبق بر اراضی هموار و کم‌شیب بوده و از نظر توپوگرافی شرایط مناسبی برای وقوع لغزش ندارند. در چنین مناطقی، نیروی محرک ناشی از شیب دامنه ناچیز بوده و تعادل میان نیروهای مقاوم و محرک دامنه‌ها حفظ می‌شود. علاوه بر این، بخشی از این پهنه‌ها بر روی سازندهای آذرین گسترش یافته‌اند که به دلیل ماهیت سخت، پیوسته و مقاومت مکانیکی بالا، از حساسیت بسیار کمی نسبت به وقوع زمین لغزش برخوردار می‌باشند. این ویژگی‌ها موجب شده است که احتمال ناپایداری دامنه‌ها در این واحدهای زمین‌شناسی به حداقل برسد. از نظر پراکندگی مکانی، نوار جنوبی منطقه مطالعاتی عمدتاً در محدوده پهنه‌های با حساسیت بسیار کم و کم قرار می‌گیرد. این ناحیه به دلیل حضور سازندهای مقاوم، شرایط ژئومورفولوژیکی پایدارتری نسبت به سایر بخش‌های منطقه دارد. در نتیجه، وقوع زمین لغزش در این بخش‌ها محدود بوده و اغلب به صورت رخداد‌های کوچک و پراکنده مشاهده می‌شود.

در نهایت، با توجه به شاخص اهمیت نسبی به دست آمده از مدل ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM)، کلیه لایه‌های موضوعی مؤثر بر وقوع زمین لغزش پس از استانداردسازی، به صورت تلفیقی و یکپارچه با یکدیگر ترکیب شدند و نقشه نهایی حساسیت وقوع زمین لغزش برای منطقه مورد مطالعه تهیه گردید (شکل ۱۶). این نقشه به عنوان یکی از مهم‌ترین خروجی‌های پژوهش، بیانگر الگوی مکانی پهنه‌های مختلف و میزان حساسیت آن‌ها نسبت به وقوع این پدیده می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از پهنه‌بندی حساسیت، حدود ۲۳ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی در طبقه با حساسیت بسیار کم قرار گرفته است. افزون بر این، نزدیک به ۳۱/۲ درصد از سطح منطقه نیز در طبقه با حساسیت کم طبقه‌بندی شده است. در مجموع، بیش از نیمی از منطقه مورد مطالعه در پهنه‌هایی با حساسیت کم تا بسیار کم وقوع زمین لغزش قرار دارند که نشان‌دهنده پایداری نسبی دامنه‌ها در این بخش‌ها می‌باشد. تحلیل ویژگی‌های محیطی این پهنه‌ها نشان می‌دهد که بخش



شکل ۱۶: پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش منطقه گویجه‌بل با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان

Fig. 16: Landslide susceptibility zonation map of the Goujebel region using Support Vector Machines (SVM)

پهنه‌ها از نظر مدیریتی اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا در صورت تغییر شرایط محیطی یا مداخلات انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی، احداث راه و افزایش بارگذاری بر دامنه‌ها، می‌توانند به راحتی به پهنه‌های با حساسیت بالا تبدیل شوند. از این رو، شناسایی و پایش مستمر این مناطق برای پیشگیری از تشدید حساسیت زمین لغزش ضروری به نظر می‌رسد. بالغ بر ۱۶ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در طبقه با حساسیت زیاد وقوع زمین لغزش قرار گرفته و حدود ۸/۴ درصد نیز در طبقه با حساسیت بسیار زیاد طبقه‌بندی شده است. این پهنه‌ها حساس‌ترین و ناپایدارترین بخش‌های منطقه مطالعاتی را شامل می‌شوند و از دیدگاه مدیریت خطر و برنامه‌ریزی فضایی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. بررسی الگوی مکانی این پهنه‌ها نشان می‌دهد که این مناطق عمدتاً به صورت پیوسته و با روند غالب شمال غرب - جنوب شرق گسترش یافته‌اند. این پهنه‌های حساس عمدتاً منطبق بر گسترش سازند PLQ-C بوده و در ترازهای ارتفاعی میانی و بر روی دامنه‌هایی با شیب متوسط، در بازه حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد، قرار گرفته‌اند. این ترکیب از شرایط توپوگرافی و زمین‌شناسی، محیطی بسیار مستعد برای ناپایداری دامنه‌ها فراهم آورده است. شیب‌های متوسط از یک سو نیروی محرک کافی برای حرکت توده‌های دامنه‌ای ایجاد می‌کنند و از سوی دیگر، در مقایسه با شیب‌های بسیار تند، امکان تجمع و نفوذ

حدود ۲۱/۳ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی در طبقه با حساسیت متوسط وقوع زمین لغزش قرار گرفته است. این پهنه‌ها بیانگر شرایط حد واسط از نظر پایداری دامنه‌ها بوده و از نظر میزان حساسیت، بین مناطق پایدار و ناپایدار قرار می‌گیرند. بررسی ویژگی‌های محیطی این نواحی نشان می‌دهد که برخی از متغیرهای مؤثر بر وقوع زمین لغزش، به‌ویژه شیب و ارتفاع، در محدوده‌های مستعد قرار دارند و می‌توانند به عنوان عوامل محرک در بروز ناپایداری عمل کنند. در این پهنه‌ها معمولاً دامنه‌هایی با شیب‌های متوسط و ترازهای ارتفاعی میانی مشاهده می‌شود که از نظر ژئومورفولوژیکی استعداد نسبی برای وقوع زمین لغزش دارند. با این حال، سایر عوامل کنترلی، به‌ویژه لیتولوژی و نوع سازندهای زمین‌شناسی، در بسیاری از این مناطق از حساسیت بالایی نسبت به لغزش برخوردار نبوده و نقش بازدارنده‌ای در برابر ناپایداری دامنه‌ها ایفا می‌کنند. به بیان دیگر، مقاومت مکانیکی مناسب سازندها یا نبود لایه‌های ضعیف و ریزدانه سبب شده است که علی‌رغم وجود شرایط توپوگرافی نسبتاً مستعد، وقوع زمین لغزش به طور گسترده در این پهنه‌ها مشاهده نشود. در نتیجه، زمین لغزش‌های رخ داده در محدوده‌های با حساسیت متوسط اغلب به صورت موضعی، با ابعاد محدود و در واکنش به عوامل محرک موقتی مانند بارش‌های شدید، افزایش رطوبت خاک یا تغییرات ناگهانی در شرایط هیدرولوژیکی رخ می‌دهند. این

این سازند مستعد ناپایداری بوده و پتانسیل بالایی برای وقوع زمین لغزش از خود نشان می‌دهد. بدین ترتیب، در این پهنه‌ها، هم‌زمانی لیتولوژی حساس سازند PLQ-C با شرایط مناسب شیب و ارتفاع، موجب شده است که زمین لغزش‌ها نه تنها از نظر تعداد، بلکه از نظر وسعت و حجم نیز قابل توجه باشند. بسیاری از زمین لغزش‌های بزرگ و فعال منطقه در همین پهنه‌ها متمرکز شده‌اند که این امر نشان‌دهنده نقش کلیدی این واحد زمین‌شناسی در کنترل ناپایداری‌های دامنه‌ای است (شکل‌های ۱۹ و ۲۰). مطالعات میدانی انجام شده در منطقه نشان می‌دهد که فراوانی چشمه‌ها و آبراهه‌ها در محدوده گسترش این سازند، یکی از عوامل کلیدی در تسریع فرآیند لغزش به شمار می‌رود (شکل‌های ۱۷ و ۱۸).



شکل ۱۷: زمین لغزش‌های صورت گرفته در گردنه گویجه‌بیل (مختصات: $38^{\circ}25'33''N$, $46^{\circ}54'18''E$)

Fig. 17: Landslide occurrences in the Goujebel Pass (Coordinates: $38^{\circ}25'33''N$, $46^{\circ}54'18''E$)



شکل ۱۸: زمین لغزش بزرگ صورت گرفته در نزدیکی روستای ملالار (مختصات: $38^{\circ}26'03''N$, $46^{\circ}49'45''E$)

Fig. 18: The large landslide near Mollalar Village (Coordinates: $38^{\circ}26'03''N$, $46^{\circ}49'45''E$)

به عنوان نمونه، برخی از زمین لغزش‌های بزرگ و شاخص منطقه مورد مطالعه، از جمله زمین لغزش واقع در شرق روستای پیره‌یوسفیان، دقیقاً در مناطقی رخ داده‌اند که سازند PLQ-C گسترش قابل توجهی داشته و از نظر هیدرولوژیکی نیز شرایط مناسبی بر آن‌ها حاکم بوده است.

بیشتر آب را فراهم می‌سازند که خود عامل مهمی در تشدید لغزش محسوب می‌شود. سازند PLQ-C عمدتاً از کنگلومرا تشکیل شده است، اما وجود میان‌لایه‌هایی از مارن، ماسه‌سنگ و سیلت‌سنگ در ساختار آن، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش پایداری این واحد زمین‌شناسی ایفا می‌کند. این میان‌لایه‌های ریزدانه، به‌ویژه مارن‌ها و سیلت‌سنگ‌ها، در برابر نفوذ آب حساس بوده و در شرایط اشباع‌شدگی دچار کاهش مقاومت برشی می‌شوند. نفوذ آب به درون این لایه‌ها باعث افزایش فشار آب منفذی و تضعیف پیوستگی بین اجزای کنگلومرا می‌گردد که در نهایت زمینه را برای گسیختگی و لغزش توده‌های دامنه‌ای فراهم می‌سازد. در شرایطی که عوامل مساعدکننده‌ای نظیر حضور آب، افزایش رطوبت خاک و وجود شیب مناسب فراهم شود،

نفوذ آب به درون لایه‌های کنگلومرای دارای میان‌لایه‌های مارنی و سیلتی، باعث افزایش فشار آب منفذی، کاهش اصطکاک داخلی و در نهایت تضعیف پیوستگی لایه‌ها می‌شود. در چنین شرایطی، نقش شیب دامنه به عنوان یک عامل تسهیل‌کننده اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

زمین لغزش‌ها، مساحت و حجم این لغزش‌ها نیز در محدوده این سازند نسبتاً زیاد بوده که خود بیانگر نقش تعیین‌کننده این واحد زمین‌شناسی در ناپایداری دامنه‌ها است. به طور کلی، پهنه‌های با حساسیت زیاد و بسیار زیاد وقوع زمین لغزش را می‌توان به عنوان کانون‌های اصلی ناپایداری در منطقه مطالعاتی معرفی کرد. شناسایی دقیق این پهنه‌ها می‌تواند مبنای مناسبی برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی، محدودسازی توسعه‌های عمرانی، پایش مستمر دامنه‌ها و اجرای اقدامات پیشگیرانه به منظور کاهش خسارات ناشی از زمین لغزش در آینده فراهم آورد.

در این مناطق، وجود چشمه‌های متعدد سبب اشباع شدن لایه‌های زیرسطحی شده و در نتیجه، لایه کنگلومرای همراه با میان‌لایه‌های مارنی و سیلتی، با کمک شیب‌های متوسط (حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد)، به صورت انتقالی و تدریجی به سمت پایین‌دست دامنه حرکت کرده است. این فرآیند در نهایت منجر به شکل‌گیری زمین لغزش‌هایی با ابعاد و حجم قابل توجه شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که رابطه‌ای قوی و معنادار میان پراکندگی سازند PLQ-c و وقوع زمین لغزش‌های بزرگ منطقه وجود دارد. نکته قابل توجه آن است که علاوه بر فراوانی تعداد



شکل ۱۹: زمین لغزش‌های اطراف روستای ملالار (مختصات: $38^{\circ}26'14''N$, $46^{\circ}51'12''E$)

Fig. 19: Landslides occurring near Mollalar village (Coordinates: $38^{\circ}26'14''N$, $46^{\circ}51'12''E$)



شکل ۲۰: زمین لغزش‌های گردنه گویجه بل (مختصات: $38^{\circ}24'34''N$, $46^{\circ}51'23''E$)

Fig. 20: Landslides in the Goujebel Pass (Coordinates: $38^{\circ}24'34''N$, $46^{\circ}51'23''E$)

ناپایداری دامنه‌ها می‌باشد. علت حساسیت بالای این سازند به چهار عامل مکانیسمی بازمی‌گردد: نخست، ساختار دوگانه نفوذپذیر- نفوذناپذیر که کنگلومراها دارای تخلخل بالا بوده و آب به راحتی در آنها نفوذ می‌کند، اما میان‌لایه‌های مارنی خاصیت آب‌بندی دارند و این تضاد

یافته‌های این پژوهش نشان داد که سازند PLQ-c (کنگلومرا با میان‌لایه‌های مارنی، ماسه‌ای و سیلتی) با وجود پوشش ۴۴ درصدی از سطح منطقه، میزبان بیش از ۹۵ درصد زمین لغزش‌ها است و شاخص اهمیت نسبی $0/268$ آن تأیید می‌کند که لیتولوژی اصلی‌ترین عامل کنترل‌کننده

باعث تجمع آب در مرز لایه‌ها و افزایش فشار آب منفذی می‌شود. دوم، بر اساس معادله مور-کولمب، افزایش فشار آب منفذی باعث کاهش تنش مؤثر و در نتیجه کاهش مقاومت برشی می‌گردد. سوم، کانی‌های رسی موجود در مارن‌ها در تماس با آب متورم شده و مقاومت خود را از دست می‌دهند (نرم‌شدگی). چهارم، اثر یخبندان- ذوب یخ در ارتفاعات میانی باعث خردشدگی تدریجی سنگ و کاهش پیوستگی دانه‌ها می‌شود. در نتیجه، سازند PLQ-C یک سیستم آماده برای لغزش را تشکیل می‌دهد که با هر محرکی مانند بارش سنگین یا ذوب برف می‌تواند به نقطه گسیختگی برسد. در مورد تمرکز بیش از ۹۸ درصد زمین‌لغزش‌ها در بازه ارتفاعی ۱۴۵۰ تا ۱۷۵۰ متر، ارتفاعات میانی نقطه تلاقی سه شرط حیاتی هستند. نخست، سازند حساس PLQ-C در این بازه گسترش دارد، در حالی که در ارتفاعات پایین‌تر آبرفت‌ها با شیب کم و در ارتفاعات بالاتر سنگ‌های آتشفشانی مقاوم قرار گرفته‌اند. دوم، شیب متوسط (۱۰ تا ۳۰ درصد) در این ارتفاعات هم نیروی محرک کافی ایجاد می‌کند و هم اجازه تجمع آب را می‌دهد. سوم، دریافت رواناب از ارتفاعات بالاتر منبع آبی پایدار برای اشباع لایه‌ها فراهم می‌کند. این سه شرط به همراه چرخه یخبندان- ذوب یخ که در ارتفاعات میانی شدیدتر است، سبب شده است که این بازه ارتفاعی به کانون اصلی ناپایداری تبدیل شود. یکی از یافته‌های جالب توجه، تمرکز حدود ۸۸ درصد زمین‌لغزش‌ها در شیب‌های کمتر از ۳۰ درصد است، در حالی که در شیب‌های تندتر روند وقوع لغزش کاهشی دارد. برای تبیین این پارادوکس، نظریه آستانه تعادل مطرح می‌شود. در شیب‌های بسیار تند (بیش از ۳۰ درصد)، هرچند نیروی محرک گرانج زیاد است، اما آب به سرعت خارج شده و فرصت نفوذ و اشباع لایه‌ها را پیدا نمی‌کند و عمدتاً سنگ‌های مقاوم رخنمون دارند. در شیب‌های متوسط (۱۰ تا ۳۰ درصد)، نیروی محرک کافی بوده و آب در لایه‌ها نفوذ کرده، فشار آب منفذی افزایش و مقاومت کاهش می‌یابد. در شیب‌های کم (کمتر از ۱۰ درصد)، نیروی محرک برای غلبه بر مقاومت کافی نیست. بنابراین رابطه شیب و زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه خطی نیست، بلکه سهمی (معکوس زنگوله‌ای) است و حداکثر حساسیت در شیب‌های متوسط رخ می‌دهد. این یافته تأکید می‌کند که در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش،

توجه صرف به شیب‌های تند کافی نیست و شیب‌های متوسط نیز نیازمند پایش هستند. در مورد غلبه جهت شمال (۶۳ درصد لغزش‌ها)، دامنه‌های شمالی به دلیل دریافت تابش کمتر، دمای پایین‌تر و برف‌ماندگی بیشتر، همواره رطوبت بالاتری دارند. ذوب تدریجی برف در بهار منبع آبی پایدار و طولانی‌مدت ایجاد می‌کند که لایه‌های زیرسطحی را در حالت اشباع نگه می‌دارد. این رطوبت بالا از یک سو باعث هوازگی عمیق‌تر سنگ‌ها (به‌ویژه سازند PLQ-C) می‌شود و از سوی دیگر فشار آب منفذی را افزایش می‌دهد. در مقابل، دامنه‌های جنوبی خشک‌تر بوده و شرایط برای تجمع آب مساعد نیست. نکته قابل توجه آن است که اگرچه پوشش گیاهی در دامنه‌های شمالی متراکم‌تر است، اما عوامل اقلیمی- هیدرولوژیکی بر اثر تثبیت‌کننده آن غلبه دارند. در خصوص نقش فرعی پوشش گیاهی و کاربری اراضی، شاخص اهمیت پایین NDVI (۰/۱۳) و کاربری اراضی (۰/۲۰) نشان می‌دهد که عوامل زمین‌شناسی و توپوگرافی به قدری قوی هستند که اثر محافظتی پوشش گیاهی را خنثی می‌کنند. همچنین پوشش غالب منطقه مراتع با ریشه‌های کوتاه است که توانایی اتصال لایه‌های عمیق را ندارند و چرای مفرط دام نیز اثر تثبیت‌کنندگی پوشش گیاهی را کاهش می‌دهد. بنابراین در مناطقی با سازندهای بسیار حساس، تکیه بر پوشش گیاهی به عنوان راهکار کنترل زمین‌لغزش کافی نیست و اقدامات مهندسی ضروری است. بدین ترتیب، سازند حساس PLQ-C در ارتفاعات میانی و دامنه‌های شمالی با شیب متوسط، همراه با چرخه یخبندان- ذوب یخ، یک سیستم ناپایدار ایجاد کرده است. آب حاصل از ذوب برف و بارش به داخل کنگلومراها نفوذ کرده، بر روی میان‌لایه‌های مارنی تجمع می‌یابد، فشار آب منفذی را افزایش می‌دهد، مقاومت برشی را کاهش می‌دهد و در نهایت باعث گسیختگی و حرکت توده‌ها می‌شود. پوشش گیاهی نقش تعدیل‌کننده اما نه تعیین‌کننده دارد. این سیستم با هر محرکی (بارش سنگین، ذوب سریع برف، دستکاری انسانی) می‌تواند فعال شود. از این رو، هرگونه اقدام مدیریتی باید بر کنترل عوامل هیدرولوژیکی، پایش دامنه‌های شمالی با شیب متوسط در ارتفاعات میانی و محدودیت ساخت‌وساز بر روی سازند PLQ-C متمرکز باشد.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در منطقه گویجه‌بل با استفاده از مدل ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) انجام شد. نتایج نشان داد که مدل SVM با تابع هسته شعاعی (RBF) عملکرد بسیار مطلوبی در پیش‌بینی مناطق مستعد زمین‌لغزش دارد، به طوری که مقادیر AUC به دست آمده برای مراحل آموزش و آزمون به ترتیب ۰/۹۴۳ و ۰/۹۳۳ بود. این امر بیانگر دقت و قابلیت اعتماد بالای مدل در شناسایی نواحی حساس است. برای ارزیابی جامع‌تر عملکرد مدل، شاخص‌های دقت برابر ۰/۸۷۵، یادآوری برابر ۰/۹۱۳، امتیاز F1 برابر ۰/۸۹۴ و صحت کلی برابر ۰/۸۹۴ محاسبه گردید که تأییدکننده تعادل مناسب بین دقت و یادآوری و عملکرد رضایت‌بخش مدل می‌باشد. بررسی عوامل مؤثر نشان داد که لیتولوژی با شاخص اهمیت نسبی وزنی ۰/۲۶۸ مهم‌ترین عامل در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه است. سازند PLQ-C (کنگلومرای با میان‌لایه‌های ماری، ماسه‌ای و سیلتی) به عنوان واحد زمین‌شناسی اصلی، بیشترین سهم را در رخداد زمین‌لغزش‌ها داشته و بیش از ۹۵ درصد از توده‌های لغزشی بر روی آن قرار دارند. پس از لیتولوژی، ارتفاع و شیب به ترتیب با ضرایب وزنی ۰/۱۴۱ و ۰/۱۳۸ به عنوان عوامل تأثیرگذار شناسایی شدند. زمین‌لغزش‌ها عمدتاً در ارتفاعات میانی (بین ۱۴۵۰ تا ۱۷۵۰ متر) و شیب‌های متوسط (۱۰ تا ۳۰ درصد) متمرکز هستند. در مقابل، عوامل پوشش زمین شامل کاربری اراضی و پوشش گیاهی در مقیاس منطقه‌ای نقش کم‌رنگ‌تری داشتند که به دلیل همگنی نسبی و توزیع یکنواخت آنها در سطح منطقه است. پژوهش حاضر از نظر روش‌شناختی دارای نقاط قوت متعددی است که آن را از مطالعات پیشین متمایز می‌سازد. از جمله این مزایا می‌توان به نخستین کاربرد مدل SVM با هسته تابع پایه شعاعی (RBF) در محدوده مورد مطالعه، کنترل خودهمبستگی مکانی (با استفاده از آزمون موران) و همبستگی چندگانه میان متغیرها (با استفاده از شاخص

VIF)، شفافیت در فرآیند انتخاب نقاط غیرلغزشی (از جمله ایجاد بافر به شعاع ۵۰۰ متری پیرامون توده‌های لغزشی و محدودیت شیب کمتر از ۵ درصد) و همچنین تحلیل سیستمی مکانیسم‌های فیزیکی حاکم بر وقوع زمین‌لغزش شامل نفوذ آب، افزایش فشار آب منفذی، کاهش مقاومت برشی و اثر چرخه یخبندان- ذوب یخ اشاره کرد. نقشه نهایی پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش منطقه را به پنج کلاس حساسیت بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم کرد. حدود ۵۴ درصد از مساحت منطقه در کلاس‌های حساسیت کم و بسیار کم قرار دارد که عمدتاً منطبق بر اراضی هموار، شیب‌های ملایم و سازندهای مقاوم آذرین است. در مقابل، حدود ۲۴ درصد از مساحت منطقه در کلاس‌های حساسیت زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته که عمدتاً بر روی سازند PLQ-C و در شیب‌های متوسط متمرکز هستند. این پهنه‌ها به عنوان کانون‌های اصلی ناپایداری شناسایی شدند و نیازمند مداخلات مدیریتی و پایش مستمر می‌باشند. پژوهش حاضر نشان داد که تلفیق روش‌های یادگیری ماشین مانند SVM با داده‌های مکانی مؤثر بر زمین‌لغزش می‌تواند ابزار کارآمدی برای تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش با دقت بالا باشد. نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های محیطی، مدیریت بحران، طراحی زیرساخت‌ها و تعیین کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه و مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد. توجه ویژه به سازندهای حساس (مخصوصاً سازند PLQ-C)، کنترل عوامل هیدرولوژیکی و پایش نواحی با شیب متوسط در ارتفاعات میانی، از جمله راهبردهای کلیدی برای کاهش خطر زمین‌لغزش در این منطقه است.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه فردوسی مشهد که انجام این پژوهش را امکان‌پذیر ساخت، صمیمانه قدردانی می‌شود.

پانویس

- 1-Support Vector Machines
- 2-Smoothness
- 3-Hyper-parameter tuning
- 4-Clustering
- 5-Equal Sampling

- 6-Create Random Points
- 7-Moran's I
- 8-Topographic Wetness Index
- 9-Variance Inflation Factor - VIF
- 10-Kernel

11-Radial Basis Function
 12-Grid Search
 13-Topographic Wetness Index
 14-Confusion Matrix
 15-Precision
 16-Recall

17-F1-score
 18-Overall Accuracy
 19-Variable Importance
 20-Permutation-based Mean Decrease Accuracy
 21-Baseline Accuracy
 22-Relative Importance Index

References

- Adhikari, M., 2011. Bivariate statistical analysis of landslide susceptibility in western Nepal. Master thesis in geosciences. University of Oslo, p. 1-88. <http://hdl.handle.net/10852/12557>
- Aleotti, P. and Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, v. 58(1), p. 21-44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Ali, S.A., Parvin, F., Pham, Q.B., Khedher, K.M., Dehbozorgi, M., Rabby, Y.W. and Nguyen, D.H., 2022. An ensemble random forest tree with SVM, ANN, NBT, and LMT for landslide susceptibility mapping in the Rangit River watershed, India. *Natural Hazards*, v. 113(3), p. 1601-1633. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05360-5>
- Ayalew, L. and Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, v. 65(1-2), p. 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Balamurugan, G., Ramesh, V. and Touthang, M., 2016. Landslide susceptibility zonation mapping using frequency ratio and fuzzy gamma operator models in part of NH-39, Manipur. *India Natural Hazards*, v. 84(1), p. 465-488. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2434-6>
- Dey, S., Das, S. and Roy, S.K., 2024. Landslide susceptibility assessment in Eastern Himalayas, India: a comprehensive exploration of four novel hybrid ensemble data driven techniques integrating explainable artificial intelligence approach. *Environmental Earth Sciences*, v. 83(22), 641 p. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11945-z>
- Esfandyari Darabad, F., Rostami, G., Mostafazadeh, R. and Abedini, M., 2024. Spatial assessment and zoning of landslide risk in Zamkan watershed using support vector machine and logistic regression. *Journal of Hydrogeomorphology*, v. 11(40), p. 102-123. <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.61467.1737> (In Persian).
- Gasemyan, B., Abedini, M., Roostai, S. and Shirzadi, A., 2021. Landslide susceptibility assessment using a novel ensemble algorithm-based model (Case Study: Kamyaran city, Kurdistan province). *Quantitative Geomorphological Research*, v. 9(4), p. 130-146. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2021.131015> (In Persian).
- Ghiasi, V., Mohd Pauzi, N.I., Karimi, S. and Yousefi, M., 2023. *Geomechanics and Engineering*, v. 34(3), p. 267-284. <https://doi.org/10.12989/gae.2023.34.3.267>
- Gokceoglu, C. and Sezer, E., 2009. A statistical assessment on international landslide literature (1945–2008). *Landslides*, v. 6(4), p. 345-351. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0166-3>
- Gupta, R.P. and Joshi, B.C., 1990. Landslide hazard zoning using the GIS approach—a case study from the Ramganga catchment, Himalayas. *Engineering geology*, v. 28(1-2), p. 119-131. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(90\)90037-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(90)90037-2)
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, v. 31, p. 181-216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, v. 31(1-4), p. 181-216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Hong, H., Pradhan, B., Xu, C. and Bui, D.T., 2015. Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two-class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines. *Catena*, v. 133, p. 266-281. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.019>
- Huang, Y. and Zhao, L., 2018. Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines. *Catena*, v. 165, p. 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.003>
- Kanungo, D.P., Arora, M.K., Sakar, S. and Gupta, R.P., 2009. Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping – a review. *Journal of south Asia disaster studies*, v. 2(1), p. 81-105. <http://hdl.handle.net/123456789/786>
- Karami, F., Bayati Khatibi, M., Kheirizadeh, M. and Mokhtari Asl, A., 2020. Evaluation of Performance of Support Vector Machine Algorithm in Landslide Susceptibility Zoning in Ahar-chai Basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, p. 8(4), v. 1-17. <https://doi.org/10.22067/geo.v8i4.83263> (In Persian).
- Karimi Sangchini, E., Arami, S.H. and Dastranj, A., 2024. Accuracy assessment of GLM and SVM

- models in preparing a landslide susceptibility map (Case study: Karganeh watershed, Lorestan province). *Researches in Earth Sciences*, v. 15(3), p. 119-136. <https://doi.org/10.48308/esrj.2024.104720> (In Persian).
- Kavzoglu, T., Sahin, E.K. and Colkesen, I., 2014. Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides*, v. 11(3), p. 425-439. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0391-7>
- Kumar, D., Thakur, M., Dubey, C.S. and Shukla, D.P., 2017. Landslide susceptibility mapping & prediction using support vector machine for Mandakini River Basin, Garhwal Himalaya, India. *Geomorphology*, v. 295, p. 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.06.013>
- Lee, S., Hong, S.M. and Jung, H.S., 2017. A Support Vector Machine for Landslide Susceptibility Mapping in Gangwon Province, Korea. *Sustainability*, v. 9(1). <https://doi.org/10.3390/su9010048>
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F. and Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 29(6), p. 687-711. <https://doi.org/10.1002/esp.1064>
- Manzo, G., Tofani, V., Segoni, S., Battistini, A. and Catani, F., 2013. GIS techniques for regional-scale landslide susceptibility assessment: the Sicily (Italy) case study. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 27(7), p. 1433-1452. <https://doi.org/10.1080/13658816.2012.693614>
- Marjanović, M., Kovačević, M., Bajat, B. and Voženilek, V., 2011. Landslide susceptibility assessment using SVM machine learning algorithm. *Engineering geology*, v. 123(3), p. 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.006>
- Melchiorre, C., Matteucci, M., Azzoni, A. and Zanchi, A., 2008. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation. *Geomorphology*, v. 94(3-4), p. 379-400. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.035>
- Nadim F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C. and Jaedicke, C., 2006. Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides*, v. 3(2), p. 159-173. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>
- Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C. and Jaedicke, C., 2006. Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides*, v. 3(2), p. 159-173. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>
- Riaz, M.T., Riaz, M.T., Rehman, A., Bindajam, A.A., Mallick, J. and Abdo, H.G., 2024. An integrated approach of support vector machine (SVM) and weight of evidence (WOE) techniques to map groundwater potential and assess water quality. *Scientific reports*, v. 14(1), 26186. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76607-3>
- 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*, v. 4(4), p. 299-312. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.13934.1379> (In Persian).
- Sadati, S.H., Mousavi, S.R., Vahabzadeh Kebria, G. and Roshun, S.H., 2025. Evaluation of Random Forest and Support Vector Machine Models in Landslide Risk Mapping (Case study: Tajan Basin, Mazandaran Province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, v. 14(45), p. 133-154. <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.50031.2071> (In Persian).
- Sassa, K. and Canuti, P., 2008. *Landslides-Disaster Risk Reduction*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5>
- 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*, v. 4(2), p. 261-278. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12678.1263> (In Persian).
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I. and Dick, O.B., 2012. Land slide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro-fuzzy inference system and GIS. *Comput Geosci*, v. 45, p. 199-211. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.031>
- Bui, D.T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I. and Dick, O.B., 2012. Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro-fuzzy inference system and GIS. *Computers & Geosciences*, v. 45, p. 199-211. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.031>
- Van Westen, C.J. and Soeters, R., 1998. Geographic information systems in slope instability zonation (GISSIZ). *ITC*. 156 p.
- Xie, W., Nie, W., Saffari, P., Robledo, L.F., Descote, P.Y. and Jian, W., 2021. Landslide hazard assessment based on Bayesian optimization-support vector machine in Nanping City, China. *Natural Hazards*, v. 109(1), p. 931-948. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04862-y>
- Xu, Z., Che, A. and Zhou, H., 2024. Seismic landslide susceptibility assessment using principal component analysis and support vector machine. *Scientific reports*, v. 14(1), 3734 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48196-0>
- Zhou, S. and Fang, L., 2015. Support vector machine modeling of earthquake-induced landslides susceptibility in central part of Sichuan province, China. *Geoenvironmental disasters*, v. 2(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-014-0006-1>