



## Research Article

# Landslide hazard zoning using random forest and support vector machine models (Case study: Talar basin)

Negar Babarabi<sup>1</sup>, Ghasem Lorestani<sup>1\*</sup> , Reza Esmaili<sup>1</sup>

1-Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

Received: 08 Sep 2024 Accepted: 10 Feb 2025

## Extended Abstract

### Introduction

Landslide is a geomorphological phenomenon with high potential for human and financial losses that occurs due to the sudden and rapid movement of soil, rock, and other materials on low to medium slopes down the slope. This phenomenon is considered one of the most destructive natural disasters in steep areas. Given the importance and sensitivity of the subject, this article is dedicated to landslide risk zoning in the Talar Basin. Studies conducted in countries with similar climatic conditions, global experiences, and perspectives on landslide risk zoning can best help in planning for management and damage reduction. Nearly 70 percent of Iran's land area is above 1000 meters in altitude (Zomordian, 2004) and 34 percent has a slope of more than 10 percent (Jedari Eyvazi, 1995). This indicates that Iran is a mountainous country and prone to slope movements. Active neotectonics, together with young Tertiary geological formations and climatic conditions, provide the basis for facilitating slope movements, especially landslides. Meanwhile, the Talar watershed is also prone to landslides due to its foothill and mountainous conditions in the central and southern parts of the basin. The high altitudes of the central Alborz and deep valleys are the main features of the ruggedness of this region. The vegetation of the region includes Hyrcanian forests, mountain pastures, and agricultural lands. The climate of the Talar basin is temperate and humid. Annual precipitation in this region varies on average between 200 - 1000 mm, and most precipitation occurs in the autumn and winter seasons. Due to its abundant rainfall and specific topography, this region is prone to floods and landslides. The Talar watershed has significant geological diversity. Limestone and schist are among the dominant rocks in this region. Due to the presence of active faults and complex geological structures, the potential of the region for landslides is high. Land use changes, deforestation, water pollution, and Mass movements are among the main problems of this region. Conservation and management measures are necessary to reduce the negative effects of these problems. Given the diversity and complexity of the natural, climatic, and human factors of this region, accurate knowledge of environmental characteristics can help in better planning and management of natural and environmental resources. The aim of the present study is to use past landslide data and investigate the factors affecting the occurrence of this geomorphological phenomenon, to prepare a landslide zoning map using random forest and support vector methods, and to further evaluate the accuracy and efficiency of the aforementioned models in predicting and identifying landslide-prone areas using the ROC curve. Unfortunately, due to the high sensitivity of the formations of the northern Alborz range and the tendency of non-native immigrants to settle and spend their leisure time in the mountainous and summer slopes overlooking the plain in the Talar basin, conditions have been created for drastic changes in land use, which in the event of a landslide will cause high and irreparable losses in terms of life and property.

**Citation:** Babarabi, N., Lorestani, Gh. and Esmaili, R., 2025. Landslide hazard zoning using random forest and support vector machine, *Res. Earth. Sci.* 16(1), (152-168) DOI: 10.48308/esrj.2025.236839.1234

\* Corresponding author E-mail address: [gh.lorestani@umz.ac.ir](mailto:gh.lorestani@umz.ac.ir)



Therefore, investigating and identifying landslide hazard zones can be effective in raising awareness and controlling landforms in the face of slope processes in the Talar basin. On the other hand, the aforementioned models have been used separately or in combination with other models in landslide hazard zoning, but a comparison of the efficiency of the two aforementioned models to identify the best model in an area with semi-humid environmental conditions in the north of the country has not been conducted.

### Materials and Methods

The Talar watershed is one of the ten largest basins in the central part of Mazandaran Province, with an area of 3227.4 square kilometers, located in Mazandaran Province and south of the city of Qaemshahr. The minimum and maximum elevation of this basin is between -26 and 4002 meters above sea level. The average elevation of the basin is 767 meters. The ruggedness units of the basin can be divided into three classes: plain (up to 200 meters), hills (200-500 meters), and mountains (more than 500). Since various factors are effective in landslide occurrence, in this study, natural factors and variables such as topographic factors including altitude, slope, slope direction, topographic moisture index, profile and plan curvature, along with distance from rivers, distance from faults, lithology, precipitation, normalized difference vegetation index (NDVI) and human factors such as distance from road and land use have been used. To produce the altitude, slope, slope direction, topographic moisture index, profile curvature, plan curvature and distance from rivers layers, the United States Geological Survey (USGS) digital elevation model with 30-meter pixel size was used. To produce the distance from faults and lithology layers, the 1/100,000 geological map of the Geological Survey of Iran was used. To produce the precipitation contour layer, data from rain gauge stations in the Talar basin were used. To prepare the vegetation layer (NDVI), the vegetation index was used, and to prepare the land use layer, the Landsat OLI satellite images were used with the supervised maximum likelihood classification method in Envi5.6 software. Using the Global Positioning System (GPS), the distribution layer of landslide occurrence points was prepared. To do this, first, by field surveying, the location of landslides that were physically accessible was recorded by GPS. Of course, due to the topographic conditions of the study area and due to their impassability and inaccessibility, Google Earth software was used to identify some landslide points, and finally, 61 landslide points were collected and recorded in the study area. 70% of the points (43 points) were randomly selected as training points and 30% of the points (18 points) were randomly selected for model validation. Training data was used for modeling and validation data was used for accuracy. Two methods, random forest and support vector machine, were used for landslide zoning and modeling.

### Results and Discussion


In the study of natural and human variables, it was determined that 56% of landslides occurred at altitudes between 436 and 1126 meters. More than 78% of landslides are observed on slopes above 25 degrees. 49% of the landslides occurred in the east, northeast and 38% in the south and southwest directions. 75% of landslides occurred on shale, sandstone, conglomerate, and marl rocks in TRJs and Mmsl formations. Slopes with low to medium curvature with a frequency of 50% show the highest overlap with landslides. In terms of soil topographic moisture index, 80% of landslides are in values above 1.6 to 8 indices. About 64% of landslides are located within 0 to 1.3 km of rivers, and 51% of landslides in the study area occur within 0 to 600 m of roads. About 78% of landslides are located within 2.5 km of faults. Approximately 50 and 45% of recorded landslides occur in pasture and forest areas in the study basin, respectively. Due to the high rainfall in the entire basin, landslide hotspots are visible, but in terms of landslide frequency, 30% of landslides occur in areas with rainfall greater than 581 mm. According to the zoning results and the information received, in the RF model, the highest risk class belongs to very low risk with a frequency of 54%, and the high risk class in this model is 18.4%. However, in the SVM model, the very low class shows the highest spread with a frequency of 40.6%, and the very high risk class accounts for 11% of the entire basin. 70% of the 61 landslide occurrence points were randomly selected for model training and 30% for model validation to evaluate the accuracy of the model with data that were not used in the training process. The evaluation results in the study area showed that the area under the curve in the SVM and RF models is 12.87 and 27.85, respectively. According to the classification provided for the area under the curve (excellent 0.9-1, very good 0.8-0.9, good 0.7-0.8, moderate 0.6-0.7, and poor 0.5-0.6), both models have very good accuracy, but in comparison, it can be said that the landslide zoning obtained from the support vector machine model in the study area has a higher level of accuracy. It seems that the slight difference in the validity of the models under study is related to the difference in the number and weighting of the criteria, as well as the difference in the climatic conditions of the study basins.

## Conclusion

The studied area with 61 landslide zones is a very sensitive area to landslides, which has increased significantly due to increasing human activities. To evaluate landslide-prone areas, 12 factors affecting landslide occurrence (elevation, slope, slope direction, precipitation, distance from the river, distance from the fault, distance from the road, vegetation index, soil topographic moisture, curvature index, lithology and land use) were used. The overlap of landslide points and layers of effective factors showed that the lower parts of the basin due to the gentle slope and low altitude, the type of constituent rocks, are less sensitive to landslide occurrence, and in contrast, the middle and upstream parts of the Talar basin due to foothill and mountainous conditions, with high altitude and slope and sensitive formations, indicate much more favorable conditions for landslide occurrence. The results of the random forest model indicate very high and high risk areas as 18.4 and 14.9 percent, respectively. While the results of the support vector machine model indicate Listed hazard classes areas as 11 and 16.7 percent of the area, respectively. In the Talar basin, the risk classes mainly coincide in the southern and central highlands with steep slopes and on the edges of rivers and roads. Comparison of the aforementioned models showed that both models have high efficiency in landslide occurrence zoning, but the results of ROC curve evaluation showed that the area under the curve obtained for the support vector machine and random forest models are 87.1 and 85.3, respectively. According to the classification provided for the area under the curve, the support vector machine model has a higher accuracy in landslide susceptibility zoning in the study area. According to the results obtained from the two models, on average more than 40 percent of the basin is at medium to very high risk of landslide occurrence, and the need for planning for basin management and paying more attention to this phenomenon seems essential.

**Keywords:** Talar basin, Random forest, Landslide, Support vector machine, Hazard zone.

## پهنه‌بندی وقوع خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان (مطالعه موردی: حوضه آبخیز تالار)

نگار باباریع<sup>۱</sup>، قاسم لرستانی<sup>۱\*</sup> , رضا اسماعیلی<sup>۱</sup><sup>۱</sup>-گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲

### چکیده گسترده

#### مقدمه

زمین لغزش پدیده‌ای ژئومورفولوژیکی با پتانسیل بالای خسارات جانی و مالی می‌باشد که در اثر حرکت ناگهانی و سریع توده خاک، سنگ و سایر مواد در دامنه‌های با شیب کم تا متوسط به سمت پائین دامنه رخ می‌دهد. این پدیده در زمره مخرب‌ترین حوادث طبیعی در مناطق شیبدار محسوب می‌شود. با توجه به اهمیت و حساسیت موضوع، مقاله حاضر به پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در حوضه تالار اختصاص دارد. مطالعات انجام‌شده در کشورهایی با شرایط اقلیمی مشابه، تجارب و چشم‌اندازهای جهانی در خصوص پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش می‌توانند به بهترین شکل در برنامه‌ریزی برای مدیریت و کاهش خسارات کمک نمایند. نزدیک به ۷۰ درصد وسعت سرزمینی ایران ارتفاع بالای ۱۰۰۰ متر (Zomordian, 2004) و ۳۴ درصد، شیب بالای ۱۰ درصد دارند (Jedari Eyvazi, 1995). این مساله، بیانگر آن است که ایران کشوری کوهستانی و مستعد وقوع حرکات دامنه‌ای می‌باشد. نئوتکتونیک فعال به همراه سازندهای جوان دوران سوم زمین‌شناسی و شرایط آب و هوایی، زمینه را برای تسهیل وقوع حرکات دامنه به ویژه زمین لغزش مهیا می‌کند. در این میان، حوضه آبخیز تالار نیز با دارا بودن شرایط کوهپایه‌ای و کوهستانی در قسمت‌های مرکزی و جنوبی حوضه، مستعد وقوع زمین لغزش می‌باشد. ارتفاعات بلند البرز مرکزی و دره‌های عمیق از ویژگی‌های اصلی ناهمواری‌های این منطقه هستند. پوشش گیاهی منطقه شامل جنگل‌های هیرکانی، مراتع کوهستانی و زمین‌های کشاورزی است. اقلیم حوضه تالار معتدل و مرطوب است. بارش سالانه در این منطقه به طور متوسط بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر متغیر است و بیشترین بارش در فصول پاییز و زمستان رخ می‌دهد. این منطقه به دلیل بارش‌های فراوان و توپوگرافی خاص، مستعد وقوع سیلاب‌ها و زمین لغزش‌ها است. حوضه آبخیز تالار دارای تنوع زمین‌شناسی قابل توجهی است. سنگ‌های آهک و شیست از جمله سنگ‌های غالب این منطقه می‌باشند. به دلیل وجود گسل‌های فعال و ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده، پتانسیل منطقه جهت وقوع زمین لغزش‌ها و رانش‌های زمین بالا می‌باشد. تغییرات کاربری زمین، جنگل‌زدایی، آلودگی منابع آب و وقوع زمین لغزش‌ها از جمله مشکلات اصلی این منطقه هستند. اقدامات حفاظتی و مدیریتی برای کاهش اثرات منفی این مشکلات ضروری است. با توجه به تنوع و پیچیدگی‌های طبیعی، اقلیمی و انسانی این منطقه، شناخت دقیق ویژگی‌های محیطی می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر و مدیریت منابع طبیعی و زیست‌محیطی کمک کند.

استناد: باباریع، ن.، لرستانی، ق. و اسماعیلی، ر.، ۱۴۰۴. پهنه‌بندی وقوع خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار، پژوهش‌های دانش زمین: ۱۶(۱)، (۱۶۸-۱۵۲)، DOI: 10.48308/esrj.2025.236839.1234

E-mail: [gh.lorestani@umz.ac.ir](mailto:gh.lorestani@umz.ac.ir)

\* نویسنده مسئول:



هدف از پژوهش حاضر آن است تا با بهره‌گیری از داده‌های گذشته زمین لغزش و بررسی عوامل موثر بر وقوع این پدیده ژئومورفولوژیکی، با استفاده از روش‌های جنگل تصادفی و بردار پشتیبان نقشه پهنه‌بندی زمین لغزش تهیه گردد و در ادامه دقت و کارایی مدل‌های مذکور را در پیش‌بینی و شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش با استفاده از منحنی ROC ارزیابی کند. متأسفانه با توجه به حساسیت بالای سازندهای دامنه شمالی البرز و تمایل مهاجران غیر بومی جهت سکونت و گذران اوقات فراغت در دامنه‌های کوهستانی و بیلاقی مشرف به جلگه در حوضه تالار، شرایط جهت تغییرات فاحش در کاربری اراضی فراهم شده است که در صورت وقوع زمین لغزش، خسارات‌های بالای جانی و مالی غیر قابل جبرانی به همراه خواهد داشت. لذا بررسی و شناسایی پهنه‌های خطر زمین لغزش می‌تواند جهت آگاهی بخشی و کنترل لندفرم‌ها در مواجهه با فرایندهای دامنه‌ای حوضه تالار موثر واقع شود. از طرفی مدل‌های مذکور به‌طور جداگانه یا در کنار سایر مدل‌ها در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش استفاده شده‌اند اما مقایسه کارایی دو مدل مذکور جهت شناسایی بهترین مدل، در محدوده‌ای با شرایط محیطی نیمه مرطوب شمال کشور صورت نگرفته است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز تالار یکی از ده حوضه بزرگ در بخش مرکزی استان مازندران، با مساحت  $3227/4$  کیلومترمربع در استان مازندران و جنوب شهر قائمشهر واقع شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع این حوضه بین  $26$ - تا  $4002$  متر از سطح دریای آزاد و میانگین ارتفاع حوضه  $767$  متر می‌باشد. واحدهای ناهمواری حوضه در سه کلاس جلگه (تا  $200$  متر)، تپه ( $200$ - $500$  متر) و کوهستان (بیش از  $500$ ) قابل تفکیک است.

از آنجایی که در رخدادهای زمین لغزش عوامل گوناگونی موثر است لذا در این پژوهش از عوامل و متغیرهای طبیعی همچون عوامل توپوگرافی شامل ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنای پروفیل و پلان، به همراه فاصله از رودخانه ها، فاصله از گسل، سنگ‌شناسی، بارش، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و عوامل انسانی نظیر فاصله از جاده و کاربری اراضی استفاده شده است. برای تولید لایه‌های ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنای پروفیل، انحنای پلان و فاصله از رودخانه‌ها از مدل رقومی ارتفاع با پیکسل اندازه  $30$  متری سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) استفاده شده است. برای تولید لایه‌های فاصله از گسل و سنگ‌شناسی، از نقشه  $1/100000$  زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی ایران کمک گرفته شد. برای تولید لایه خطوط هم بارش از داده‌های ایستگاه‌های باران سنجی حوضه تالار استفاده شده است. برای تهیه لایه پوشش گیاهی (NDVI) از شاخص پوشش گیاهی و جهت تهیه لایه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره لندست سنجنده OLI با روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال در نرم افزار  $Envi5.6$  بهره گرفته شد. با استفاده از دستگاه سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS)، لایه پراکنش نقاط رخداد زمین لغزش تهیه شد. جهت انجام این کار ابتدا با برداشت میدانی، موقعیت مکانی زمین لغزش‌هایی که دسترسی فیزیکی به آنها میسر بود توسط GPS ثبت شد. البته به دلیل شرایط توپوگرافیکی محدوده مورد مطالعه و به دلیل صعب‌العبور بودن و عدم دسترسی، از نرم افزار گوگل ارث برای شناسایی برخی از نقاط لغزشی استفاده شد و در نهایت تعداد  $61$  نقطه لغزشی در محدوده مورد مطالعه برداشت و ثبت گردید.  $70$  درصد نقاط ( $43$  نقطه) به عنوان نقاط آموزشی و  $30$  درصد نقاط ( $18$  نقطه) برای اعتبارسنجی مدل به صورت تصادفی انتخاب شدند. از داده‌های آموزشی جهت مدل‌سازی و از داده‌های اعتبارسنجی برای صحت سنجی استفاده شد. جهت پهنه‌بندی و مدل‌سازی زمین لغزش‌ها از دو روش جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان استفاده شده است.

### نتایج و بحث

در بررسی متغیرهای طبیعی و انسانی مشخص گردید،  $56$  درصد زمین لغزش‌ها در ارتفاعات بین  $436$  تا  $1126$  متر رخ داده‌اند. بیش از  $78$  درصد زمین لغزش‌ها در شیب‌های بالای  $25$  درجه مشاهده می‌شوند.  $49$  درصد زمین لغزش‌ها در دامنه‌های با جهت شرق، شمال شرق و  $38$  درصد در جهت‌های جنوب و جنوب غرب اتفاق افتاده‌اند.  $75$  درصد زمین لغزش‌ها بر روی سنگ‌های شیل، ماسه سنگ، کنگلومرا و مارن در سازندهای TRJs و  $Mm,s,l$  رخ داده‌اند. دامنه‌های با انحنای کم تا متوسط با فراوانی  $50$  درصد بیشترین همپوشانی را با لغزش‌های رخ داده، نشان می‌دهند. از نظر شاخص رطوبت توپوگرافی خاک،  $80$  درصد زمین

لغزش‌ها در مقادیر بالای ۱/۶ تا ۸ شاخص قرار می‌گیرند. حدود ۶۴ درصد زمین لغزش‌ها در فاصله صفر تا ۱/۳ کیلومتری از رودخانه‌ها قرار دارند و ۵۱ درصد زمین لغزش‌های محدوده مورد بررسی، در فاصله صفر تا ۶۰ متری از جاده‌ها رخ داده‌اند. حدود ۷۸ درصد زمین لغزش‌ها در فاصله ۲/۵ کیلومتری از گسل‌ها واقع شده‌اند. تقریباً ۵۰ و ۴۵ درصد زمین لغزش‌های ثبت شده، به ترتیب در اراضی مرتعی و جنگلی موجود در حوضه مورد مطالعه مشاهده می‌شوند. با توجه به مقادیر بالای بارش در کل حوضه، نقاط لغزشی قابل مشاهده می‌باشد اما از نظر فراوانی زمین لغزش‌ها، ۳۰ درصد تعداد زمین لغزش‌ها در مناطق با بارش بیشتر از ۵۸۱ میلی‌متر مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج پهنه‌بندی و اطلاعات دریافتی، در مدل RF بیشترین طبقه خطر به خطر خیلی کم با ۵۴ درصد فراوانی تعلق دارد و طبقه خطر زیاد در این مدل معادل ۱۸/۴ درصد می‌باشد. اما در مدل SVM طبقه خیلی کم با فراوانی ۴۰/۶ درصد بیشترین گسترش را نشان می‌دهد و طبقه خطر خیلی زیاد معادل ۱۱ درصد کل حوضه را به خود اختصاص داده است. ۷۰ درصد از ۶۱ نقطه رخداد زمین لغزشی، جهت آموزش (Training) مدل و ۳۰ درصد نقاط جهت صحت سنجی (Validation) مدل، به صورت تصادفی انتخاب شدند تا بتوان دقت مدل را با داده‌هایی که در فرآیند آموزش استفاده نشده‌اند، ارزیابی نمود. نتایج ارزیابی در محدوده مورد مطالعه نشان داد که مقدار سطح زیرمنحنی در مدل RF و SVM به ترتیب برابر ۸۷/۱۲ و ۸۵/۲۷ است. که با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده برای سطح زیر منحنی (۰/۹-۱ عالی، ۰/۸-۰/۹ خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸ خوب، ۰/۶-۰/۷ متوسط و ۰/۵-۰/۶ ضعیف)، هر دو مدل دارای دقت خیلی خوب هستند، اما در مقایسه می‌توان گفت که پهنه‌بندی زمین لغزش حاصل از مدل ماشین بردار پشتیبان در منطقه مورد مطالعه از میزان دقت بالاتری برخوردار بوده است. به نظر می‌رسد اختلاف ناچیز در اعتبار مدل‌های مورد بررسی به تفاوت در تعداد و نحوه وزن دهی معیارها و همچنین اختلاف شرایط آب و هوایی حوضه‌های مورد مطالعه، مرتبط باشد.

### نتیجه‌گیری

محدوده مورد بررسی با ۶۱ پهنه لغزشی از مناطق بسیار حساس به زمین لغزش می‌باشد که با توجه به فعالیت‌های روز افزون انسانی، وقوع این حرکت افزایش چشمگیری داشته است. برای ارزیابی مناطق مستعد زمین لغزش از ۱۲ عامل موثر بر وقوع زمین لغزش (ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، شاخص پوشش گیاهی، رطوبت توپوگرافی خاک، شاخص انحناء، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی) بهره گرفته شد. همپوشانی نقاط لغزشی و لایه‌های عوامل موثر نشان داد که قسمت‌های پائین دست حوضه به دلیل شیب ملایم و ارتفاع کم، جنس سنگ‌های تشکیل دهنده، حساسیت کمتری به وقوع زمین لغزش دارند و در مقابل قسمت‌های میانی و بالادست حوضه تالار به دلیل شرایط کوهپایه‌ای و کوهستانی، با ارتفاع و شیب زیاد و سازندهای حساس، بر شرایط بسیار مساعدتر جهت وقوع زمین لغزش دلالت دارد. نتایج حاصل از مدل جنگل تصادفی مناطق با خطر خیلی زیاد و زیاد را به ترتیب معادل ۱۸/۴ و ۱۴/۹ درصد نشان می‌دهد. این در حالی است که نتایج حاصل از مدل ماشین بردار پشتیبان، بر مناطق با خطر زمین لغزش خیلی زیاد و زیاد، به ترتیب معادل ۱۱ و ۱۶/۷ درصد از منطقه دلالت دارد. در حوضه آبخیز تالار، کلاس‌های با خطر خیلی زیاد و زیاد عمدتاً در بخش‌های مرتفع جنوبی و مرکز منطقه با شیب زیاد و در حواشی رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و جاده‌ها منطبق می‌باشد. مقایسه مدل‌های مذکور نشان داد که هر دو مدل کارایی بالایی در پهنه‌بندی وقوع زمین لغزش دارند اما نتایج ارزیابی منحنی راک نشان داده که مقدار سطح زیرمنحنی به دست آمده برای مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی به ترتیب برابر ۸۷/۱ و ۸۵/۳ است. که با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده برای سطح زیر منحنی، مدل ماشین بردار پشتیبان از میزان دقت بالاتری در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه برخوردار می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از دو مدل، به طور میانگین بیش از ۴۰ درصد حوضه در خطر متوسط تا خیلی زیاد از لحاظ وقوع زمین لغزش قرار دارند و لزوم برنامه‌ریزی جهت مدیریت حوضه و توجه بیش از پیش به این پدیده ضروری به نظر می‌رسد.

**واژگان کلیدی:** حوضه تالار، جنگل تصادفی، زمین لغزش، ماشین بردار پشتیبان، پهنه‌بندی خطر.

## مقدمه

زمین لغزش پدیده‌ای ژئومورفولوژیکی با پتانسیل بالای خسارات جانی و مالی می‌باشد که در اثر حرکت ناگهانی و سریع توده خاک، سنگ و سایر مواد در دامنه‌های با شیب کم تا متوسط به سمت پائین دامنه رخ می‌دهد. این پدیده در زمره مخرب‌ترین حوادث طبیعی در مناطق شیبدار محسوب می‌شود که مواد در جهت شیب بر روی دامنه به سمت پایین می‌لغزند (Kanungo et al, 2006; Hussin et al, 2016). با افزایش تقاضا برای فعالیت‌های انسانی و نیاز به فضاهای بیشتر، میزان اختلال در محیط‌های طبیعی نیز در حال افزایش است (Prada-Sarmiento et al, 2019; Gao et al, 2020; Li et al, 2020; Shi et al, 2020). یکی از مصادیق اختلال در محیط‌های طبیعی وقوع زمین لغزش می‌باشد. این پدیده یکی از رایج‌ترین مخاطرات طبیعی قابل مشاهده در سراسر نقاط کوهستانی است که باعث تلفات انسانی و خسارات زیرساختی و اقتصادی می‌شود (Pourghasemi et al, 2018). همچنین زمین لغزش‌ها یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی هستند و می‌توانند مورفولوژی چشم‌انداز را به شدت تغییر دهند، سازه‌های دست ساز را تخریب کنند و زندگی مردم را به خطر بیندازند. شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش برای تضمین ایمنی انسانی، مدیریت زیست محیطی، برنامه‌ریزی شهری و به حداقل رساندن خسارات اقتصادی حیاتی است (Kavzoglu et al, 2014). با توجه به اهمیت و حساسیت موضوع، مقاله حاضر به پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش در حوضه تالار اختصاص دارد لذا بررسی پژوهش‌های داخلی و خارجی در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. مطالعات انجام شده در کشورهایی با شرایط اقلیمی مشابه، تجارب و چشم‌اندازهای جهانی در خصوص پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش می‌توانند به بهترین شکل در برنامه‌ریزی برای مدیریت و کاهش خسارات کمک نمایند. با توجه به اهمیت زمین لغزش و مخاطرات آن، مطالعات زیادی در داخل و خارج از ایران صورت گرفته است که می‌توان به تحقیقات کرنزادی و همکاران (Kornejady et al, 2019)، عمادالدین و همکاران (Emaduddin et al, 2021)، نامعی تبار و همکاران (Naimi Tabar et al, 2021)، احمدی و ویسی (Ahmadi and Veisi, 2021)، ایلدرمی و عبادی (Ilderami and Ebadi, 2021)، دسترنج و کریمی سنگ

چینی (Destranj and Karimi Sangchini, 2022)، گلی مختاری و نامعی تبار (Goli Mokhtari and Naimi, 2022)، صادقی و همکاران (Sadeghi et al, 2022)، صدیقی و قاسمی (Siddiqui and Ghasemi, 2023)، بیاتی خطیبی و همکاران (Bayati Khatibi et al, 2024) اشاره نمود. علاوه بر این، پژوهش‌های بیشماری با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین‌بردار پشتیبان در ارتباط با وقوع بلایای طبیعی از جمله زمین لغزش انجام شده است که می‌توان موارد زیر را برشمرد. طالبی و همکاران (Talebi et al, 2018) در بررسی امکان تهیه نقشه خطر زمین لغزش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی حوضه آبریز سردارآباد لرستان، بر کارایی مدل جنگل تصادفی جهت شناسایی و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش تاکید کردند. اسفندیاری درآباد و همکاران (Esfandiari Darabad et al, 2020)، در ارزیابی حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان در جاده حیران، استان اردبیل به این نتیجه رسیدند که مدل الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان نسبت به شبکه عصبی مصنوعی کارایی بالاتری دارد. کرمی و همکاران (Karami et al, 2020)، با ارزیابی کارایی الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش حوضه آبریز اهرچای دریافتند که این الگوریتم در محدوده مورد مطالعه کارایی بالایی دارد. حیدری و همکاران (Heydari et al, 2020)، در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی حساسیت زمین لغزش با الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی در آبریز سد رئیس علی دلواری بر دقت بالای الگوریتم جنگل تصادفی در مدل‌سازی زمین لغزش تاکید نمودند. پژوهش انجام شده توسط سدید و مالکی (Sadidi and Maleki, 2022) در جاده مهاباد سردشت با عنوان مقایسه الگوریتم‌های ماشین‌بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و رگرسیون لجستیک در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، بر کارایی بیشتر مدل جنگل تصادفی نسبت به مدل‌های مورد استفاده در محدوده مورد بررسی، دلالت دارد. شیرانی و نادری سامانی (Shirani and Naderi Samani, 2022)، در ارزیابی حساسیت به زمین لغزش با روش‌های جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی در منطقه دوآب صمصامی استان چهارمحال و بختیاری، با استفاده از منحنی ROC بر صحت و دقت بالاتر مدل جنگل تصادفی نسبت به

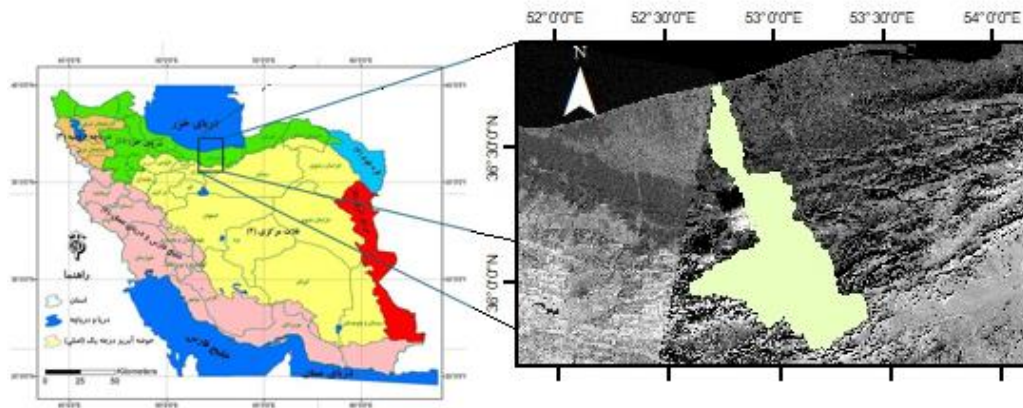
مشکلات ضروری است. با توجه به تنوع و پیچیدگی‌های طبیعی، اقلیمی و انسانی این منطقه، شناخت دقیق ویژگی‌های محیطی می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر و مدیریت منابع طبیعی و زیست‌محیطی کمک کند. هدف از پژوهش حاضر آن است تا با بهره‌گیری از داده‌های گذشته زمین لغزش و بررسی عوامل موثر بر وقوع این پدیده ژئومورفولوژیکی، با استفاده از روش‌های جنگل تصادفی و بردار پشتیبان نقشه پهنه‌بندی زمین لغزش تهیه گردد و در ادامه دقت و کارایی مدل‌های مذکور را در پیش‌بینی و شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش با استفاده از منحنی ROC ارزیابی کند. متأسفانه با توجه به حساسیت بالای سازندهای دامنه شمالی البرز و تمایل مهاجران غیر بومی جهت سکونت و گذران اوقات فراغت در دامنه‌های کوهستانی و ییلاقی مشرف به جلگه در حوضه تالار، شرایط جهت تغییرات فاحش در کاربری اراضی فراهم شده است که در صورت وقوع زمین لغزش، خسارات‌های بالای جانی و مالی غیر قابل جبرانی به همراه خواهد داشت. لذا بررسی و شناسایی پهنه‌های خطر زمین لغزش می‌تواند جهت آگاهی بخشی و کنترل لندفرم‌ها در مواجهه با فرایندهای دامنه‌ای حوضه تالار موثر واقع شود. از طرفی مدل‌های مذکور به طور جداگانه یا در کنار سایر مدل‌ها در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش استفاده شده‌اند اما مقایسه کارایی دو مدل مذکور جهت شناسایی بهترین مدل، در محدوده‌ای با شرایط محیطی نیمه مرطوب شمال کشور صورت نگرفته است.

#### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز تالار یکی از ده حوضه بزرگ در بخش مرکزی استان مازندران، با مساحت ۳۲۲۷/۴ کیلومتر مربع در استان مازندران و جنوب شهر قائمشهر واقع شده است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در عرض‌های جغرافیایی  $35^{\circ}44'07''$  تا  $36^{\circ}43'33''$  شمالی و طول‌های جغرافیایی  $52^{\circ}23'40''$  تا  $52^{\circ}35'39''$  شرقی قرار دارد. حداقل و حداکثر ارتفاع این حوضه بین ۲۶- تا ۴۰۰۲ متر از سطح دریای آزاد و میانگین ارتفاع حوضه ۷۶۷ متر می‌باشد. واحدهای ناهمواری حوضه در سه کلاس جلگه (تا ۲۰۰ متر)، تپه (۲۰۰-۵۰۰ متر) و کوهستان (بیش از ۵۰۰) قابل تفکیک است.

شبکه عصبی مصنوعی تاکید نمودند. همچنین در مطالعات انجام شده توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2017)، آکینسی و همکاران (Akinci et al, 2019)، ژائو و همکاران (Zhao et al, 2021)، در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، مدل جنگل تصادفی ارزش و اعتبار بالاتری نسبت به سایر مدل‌های مورد استفاده کسب نموده است. قیاسی و همکاران (Qiyasi et al, 2023)، با مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش دریافتند که یک روش مشخص جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش وجود ندارد و بایستی جهت دستیابی به نقشه‌ای با حداقل خطا از روش‌های مختلفی جهت تولید مدل خطر زمین لغزش استفاده نمود. نزدیک به ۷۰ درصد وسعت سرزمینی ایران ارتفاع بالای ۱۰۰۰ متر (Zomordian, 2004) و ۳۴ درصد، شیب بالای ۱۰ درصد دارند (Jedari Eyvazi, 1995). این مساله، بیانگر آن است که ایران کشوری کوهستانی و مستعد وقوع حرکات دامنه‌ای می‌باشد. نئوتکتونیک فعال به همراه سازندهای جوان دوران سوم زمین‌شناسی و شرایط آب و هوایی، زمینه را برای تسهیل وقوع حرکات دامنه به ویژه زمین لغزش مهیا می‌کند. در این میان، حوضه آبخیز تالار نیز با دارا بودن شرایط کوهپایه‌ای و کوهستانی در قسمت‌های مرکزی و جنوبی حوضه، مستعد وقوع زمین لغزش می‌باشد. ارتفاعات بلند البرز مرکزی و دره‌های عمیق از ویژگی‌های اصلی ناهمواری‌های این منطقه هستند. پوشش گیاهی منطقه شامل جنگل‌های هیرکانی، مراتع کوهستانی و زمین‌های کشاورزی است. اقلیم حوضه تالار معتدل و مرطوب است. بارش سالانه در این منطقه به طور متوسط بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر متغیر است و بیشترین بارش در فصول پاییز و زمستان رخ می‌دهد. این منطقه به دلیل بارش‌های فراوان و توپوگرافی خاص، مستعد وقوع سیلاب‌ها و زمین لغزش‌ها است. حوضه آبخیز تالار دارای تنوع زمین‌شناسی قابل توجهی است. سنگ‌های آهک و شیست از جمله سنگ‌های غالب این منطقه می‌باشند. به دلیل وجود گسل‌های فعال و ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده، پتانسیل منطقه جهت وقوع زمین لغزش‌ها و رانش‌های زمین بالا می‌باشد. تغییرات کاربری زمین، جنگل‌زدایی، آلودگی منابع آب و وقوع زمین لغزش‌ها از جمله مشکلات اصلی این منطقه هستند. اقدامات حفاظتی و مدیریتی برای کاهش اثرات منفی این





شکل ۱: موقعیت حوضه تالار (منبع نگارندگان)

Fig 1: Location of the Talar basin (Source: Authors)

برای شناسایی برخی از نقاط لغزشی استفاده شد و در نهایت تعداد ۶۱ نقطه لغزشی در محدوده مورد مطالعه برداشت و ثبت گردید. ۷۰ درصد نقاط (۴۳ نقطه) به عنوان نقاط آموزشی و ۳۰ درصد نقاط (۱۸ نقطه) برای اعتبارسنجی مدل به صورت تصادفی انتخاب شدند. از داده‌های آموزشی جهت مدل‌سازی و از داده‌های اعتبارسنجی برای صحت سنجی استفاده شد. جهت پهنه‌بندی و مدل‌سازی زمین لغزش‌ها از دو روش جنگل تصادفی (RF)<sup>۱</sup> و ماشین بردار پشتیبان (SVM)<sup>۲</sup> استفاده شده است که در ادامه به تفصیل بیان می‌شوند. اولین مدل مورد استفاده در این پژوهش، مدل جنگل تصادفی (RF) است این مدل، مجموعه‌ای از تکنیک‌های یادگیری ماشینی است که می‌تواند تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری را برای توضیح رابطه فضایی بین وقوع زمین لغزش بسازد. یک الگوریتم جنگل تصادفی می‌تواند برای پیش‌بینی بهتر موارد داده‌های جدید استفاده شود. شرایط بهینه برای متغیر پیش‌بینی‌کننده با  $\log 2$  ( $M+1$ ) نشان داده می‌شود، که در آن  $M$  تعداد ورودی‌های الگوریتم است و میانگین مربع خطا برای جنگل تصادفی به صورت رابطه ۱ داده می‌شود:

رابطه (۱)

$$\varepsilon = (v_{observed} - v_{response})^2$$

در معادله رابطه ۱،  $\varepsilon$  میانگین مربعات خطا از الگوریتم است،  $v_{observed}$  متغیر از داده‌های مشاهده شده است،  $v_{response}$  متغیر حاصل از نتیجه است. میانگین پیش‌بینی‌ها از درختان محاسبه می‌شود:

رابطه (۲)

$$S = \frac{1}{K} \sum K^{th} v_{response}$$

## مواد و روش‌ها

از آنجایی که در رخدادهای لغزش عوامل گوناگونی موثر است لذا در این پژوهش از عوامل و متغیرهای طبیعی همچون عوامل توپوگرافی شامل ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنای پروفیل و پلان، به همراه فاصله از رودخانه‌ها، فاصله از گسل، سنگ‌شناسی، بارش، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و عوامل انسانی نظیر فاصله از جاده و کاربری اراضی استفاده شده است. برای تولید لایه‌های ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنای پروفیل، انحنای پلان و فاصله از رودخانه‌ها از مدل رقومی ارتفاع با پیکسل اندازه ۳۰ متری سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS) استفاده شده است. برای تولید لایه‌های فاصله از گسل و سنگ‌شناسی، از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی ایران کمک گرفته شد. برای تولید لایه خطوط هم بارش از داده‌های ایستگاه‌های باران سنجی حوضه تالار استفاده شده است. برای تهیه لایه پوشش گیاهی (NDVI) از شاخص پوشش گیاهی و جهت تهیه لایه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره لندست سنجنده OLI با روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال در نرم افزار Envi5.6 بهره گرفته شد. با استفاده از دستگاه سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS)، لایه پراکنش نقاط رخداد زمین لغزش تهیه شد. جهت انجام این کار ابتدا با برداشت میدانی، موقعیت مکانی زمین لغزش‌هایی که دسترسی فیزیکی به آنها میسر بود توسط GPS ثبت شد. البته به دلیل شرایط توپوگرافی محدودی مورد مطالعه و به دلیل صعب‌العبور بودن و عدم دسترسی، از نرم افزار گوگل ارث

استفاده از هسته RBF برای هر متغیر اجرا می‌شود و نتیجه طبقه‌بندی به صورت نقشه نمایش داده می‌شود و در نهایت برای مشخص نمودن صحت و اعتبار سنجی مدل‌های RF و SVM از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) <sup>۴</sup> استفاده شده است. این منحنی برای تأیید کیفیت یک مدل احتمالی استفاده می‌شود. منحنی ROC توسط جفت‌های مقدار شاخص آماری، با نرخ مثبت کاذب (حساسیت) در محور x و "نرخ منفی کاذب" <sup>۱۰۰</sup> (ویژگی ۱۰۰) در محور y ترسیم می‌شود. منحنی ROC را می‌توان به عنوان منحنی میزان موفقیت یا منحنی نرخ پیش‌بینی، بسته به مجموعه داده مورد استفاده، طبقه‌بندی کرد. منحنی میزان موفقیت که با استفاده از مجموعه داده‌های آموزشی محاسبه می‌شود، نشان می‌دهد که LSM ها چقدر با داده‌ها تناسب دارند. منحنی نرخ پیش‌بینی، محاسبه‌شده با استفاده از مجموعه داده اعتبارسنجی، نشان می‌دهد که مدل و متغیرهای توضیحی لغزش چقدر خوب یک زمین لغزش را پیش‌بینی می‌کنند (Bui et al, 2011). وقتی مساحت زیر منحنی (AUC) ROC محاسبه شود، منحنی ROC را می‌توان به صورت کمی تأیید کرد. مقادیر AUC از ۰/۵ تا ۱/۰ متغیر است. مقادیر AUC نزدیک به ۱ مدل دقیق‌تری را نشان می‌دهد (Park and Kim, 2019).

### نتایج

در بررسی متغیرهای طبیعی و انسانی مشخص گردید، ۵۶ درصد زمین لغزش‌ها در ارتفاعات بین ۴۳۶ تا ۱۱۲۶ متر رخ داده‌اند. بیش از ۷۸ درصد زمین لغزش‌ها در شیب‌های بالای ۲۵ درجه مشاهده می‌شوند. ۴۹ درصد زمین لغزش‌ها در دامنه‌های با جهت شرق، شمال شرق و ۳۸ درصد در جهت‌های جنوب و جنوب غرب اتفاق افتاده‌اند. ۷۵ درصد زمین لغزش‌ها بر روی سنگ‌های شیل، ماسه سنگ، کنگلومرا و مارن در سازندهای TRJs و Mm,s,l رخ داده‌اند. دامنه‌های با انحنای کم تا متوسط با فراوانی ۵۰ درصد بیشترین همپوشانی را با لغزش‌های رخ داده، نشان می‌دهند. از نظر شاخص رطوبت توپوگرافی خاک، ۸۰ درصد زمین لغزش‌ها در مقادیر بالای ۱/۶ تا ۸ شاخص قرار می‌گیرند. حدود ۶۴ درصد زمین لغزش‌ها در فاصله صفر تا ۱/۳ کیلومتری از رودخانه‌ها قرار دارند و ۵۱ درصد زمین لغزش‌های محدوده مورد بررسی، در فاصله صفر تا ۶۰۰ متری از جاده‌ها رخ داده‌اند. حدود ۷۸ درصد زمین لغزش‌ها

که در آن S پیش‌بینی جنگل است و K برای درختان منفرد در جنگل تصادفی اعمال می‌شود. برای الگوریتم طبقه بندی، تعریف تابع حاشیه پس از تعیین مجموعه درختی ساده و متغیرهای پیش‌بینی تصادفی یافت می‌شود. دومین مدل مورد استفاده در این پژوهش، ماشین بردار پشتیبان SVM می‌باشد. این مدل، روشی مبتنی بر یادگیری تحت نظارت است که بر اساس تئوری یادگیری آماری و بر پایه به حداقل رساندن ریسک ساختاری است. با استفاده از داده‌های آموزشی، SVM به طور ضمنی فضای ورودی اصلی را بر روی یک فضای ویژگی با ابعاد بالا ترسیم می‌کند. متعاقباً، در فضای ویژگی، ابر صفحه بهینه با به حداکثر رساندن حاشیه‌های مرزهای طبقه تعیین می‌شود. SVM قصد دارد با به حداکثر رساندن حاشیه بین ابر صفحه جداکننده و داده‌ها، میزان خطای تعمیم را به حداقل برساند (Kanevski et al, 2009). هدف طبقه‌بندی SVM یافتن یک ابر صفحه جداکننده بهینه است که بتواند بین دو کلاس (یعنی زمین لغزش و بدون لغزش) و مجموعه داده‌های آموزشی تمایز قائل شود (Pradhan, 2013). طبقه‌بندی کننده SVM چهار نوع هسته را ارائه می‌دهد: خطی، چند جمله‌ای، تابع پایه شعاعی (RBF) <sup>۳</sup> و سیگموئید. نمایش‌های ریاضی هر هسته (به ترتیب خطی، چند جمله‌ای، تابع پایه شعاعی و سیگموئید) در زیر، فهرست شده است.

رابطه ۳)

$$\text{Linear: } K(x_i, y_i) = x_i^T \cdot x_j$$

رابطه ۴)

$$\text{Polynomial: } K(x_i, y_i) = (\gamma \cdot x_i^T \cdot x_j + r)^d, \gamma > 0$$

رابطه ۵)

$$\text{Radial basis function: } K(x_i, y_i) = e^{-\gamma(x_i \cdot y_i)^2}, \gamma > 0$$

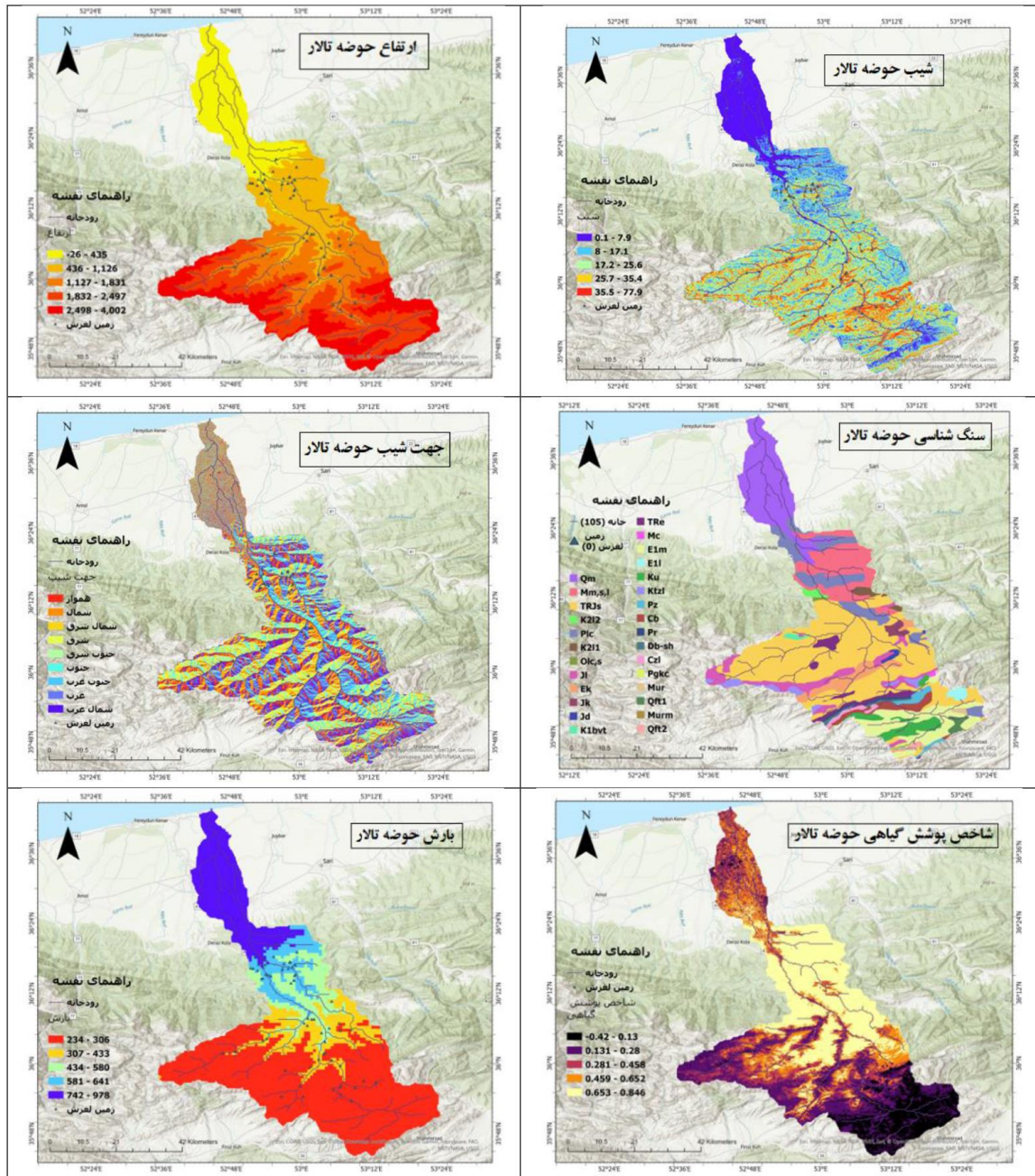
رابطه ۶)

$$\text{Sigmoid: } K(x_i, y_i) = \text{tanh}(\gamma \cdot x_i^T \cdot x_j + r)$$

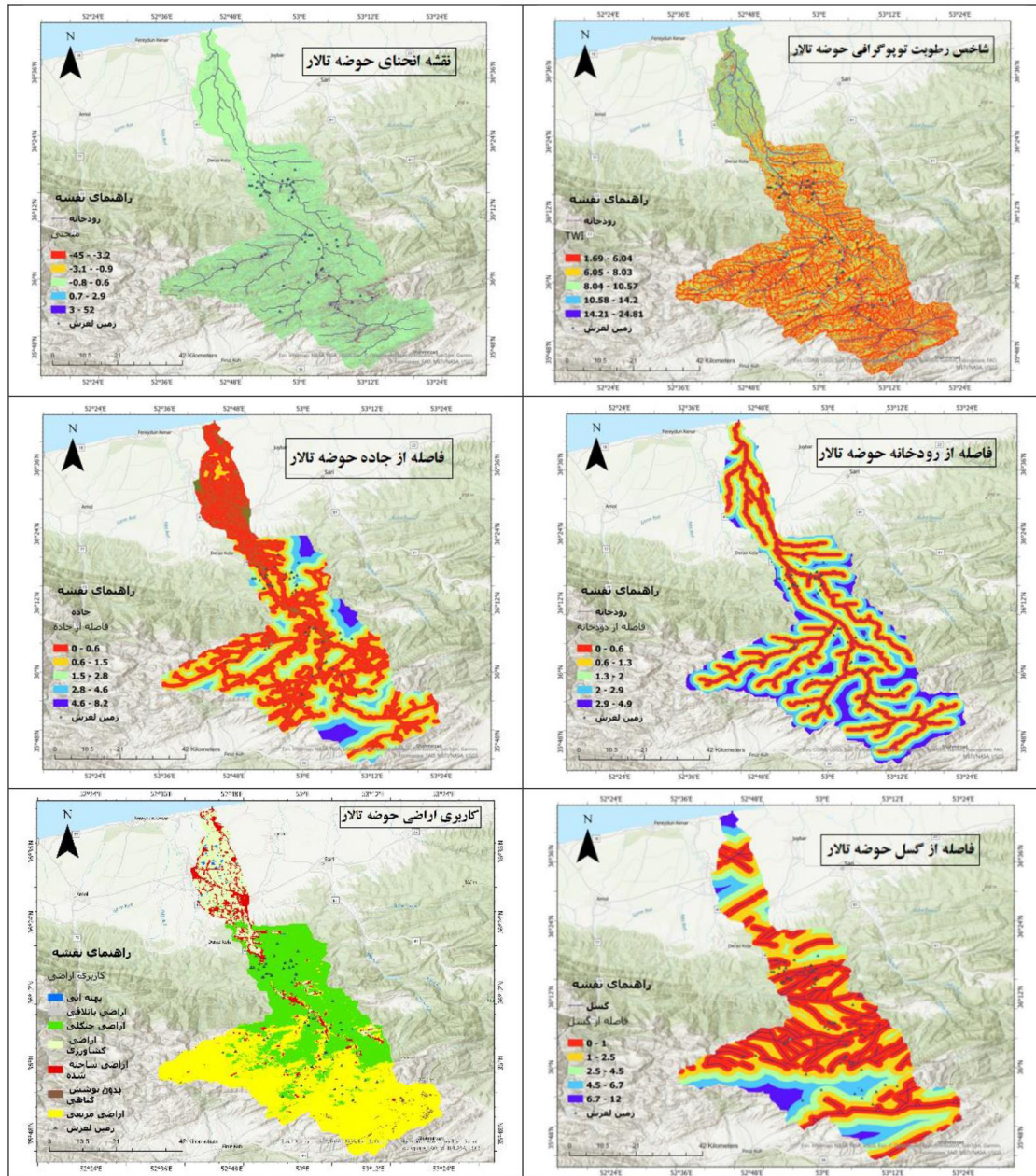
در مطالعه حاضر، از هسته RBF استفاده شده است که یکی از قوی‌ترین هسته‌ها است (Xu, et al, 2012). هسته RBF هسته پیش فرض است و در بسیاری از مطالعات به ویژه در مسائل غیر خطی این هسته، نتایج پیش‌بینی بهتری را برای تهیه نقشه زمین لغزش نسبت به سایر هسته‌ها ارائه می‌کند (Pourghasemi et al, 2013). برای تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین لغزش با استفاده از SVM، پس از تولید لایه‌های عوامل تاثیرگذار، فراخوانی آنها در نرم افزار ENVI جهت تعیین محدوده مورد مطالعه، الگوریتم طبقه‌بندی SVM با

لغزشی قابل مشاهده می‌باشد اما از نظر فراوانی زمین لغزش‌ها، ۳۰ درصد تعداد زمین لغزش‌ها در مناطق با بارش بیشتر از ۵۸۱ میلی‌متر مشاهده می‌شود. در ادامه پراکنش زمین لغزش‌ها در ارتباط با هر متغیر آمده است (شکل ۲).

در فاصله ۲/۵ کیلومتری از گسل‌ها واقع شده‌اند. تقریباً ۵۰ و ۴۵ درصد زمین لغزش‌های ثبت شده، به ترتیب در اراضی مرتعی و جنگلی موجود در حوضه مورد مطالعه مشاهده می‌شوند. با توجه به مقادیر بالای بارش در کل حوضه، نقاط





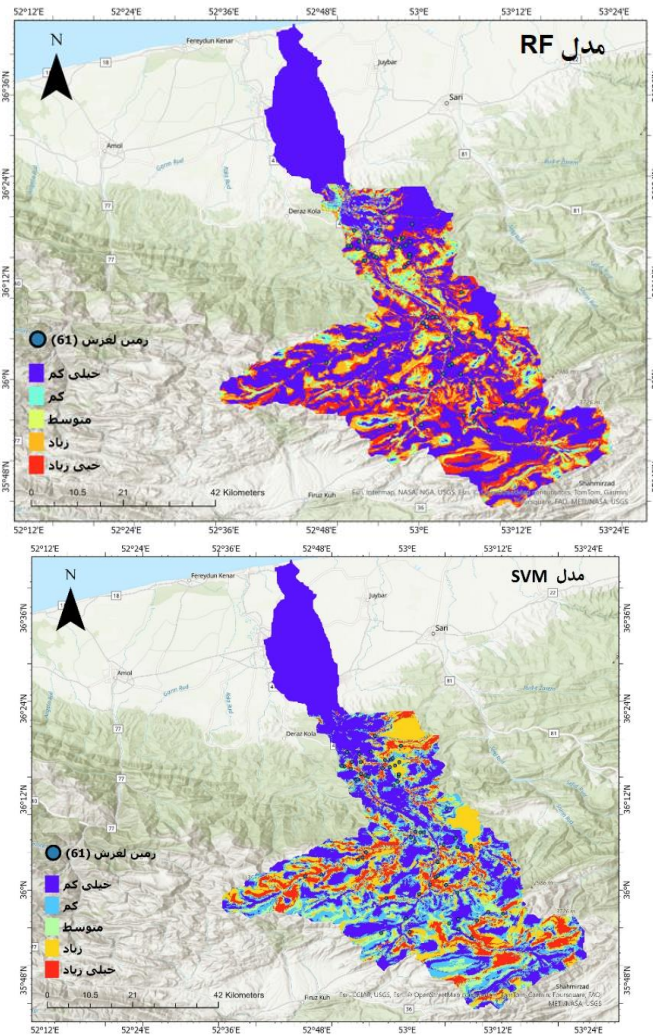


شکل ۲: پراکنش زمین لغزش‌های در متغیرهای مورد مطالعه حوضه تالار (منبع نگارندگان)

Fig 2: Distribution of landslides in the studied variables of the Talar Basin (Source: Authors)

زمین لغزش ارائه شده است (شکل ۳). این نقشه‌ها نشان‌دهنده مناطق خطر زمین لغزش در ۵ طبقه می‌باشند.

نتایج پیش‌بینی‌ها در دو مدل جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق با خطر



شکل ۳: پهنه‌بندی زمین لغزش با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) (منبع نگارندگان)  
 Fig 3: Landslide zoning using random forest (RF) and support vector machine (SVM) models (Source: Authors)

SVM طبقه خیلی کم با فراوانی ۴۰/۶ درصد بیشترین گسترش را نشان می‌دهد و طبقه خطر خیلی زیاد معادل ۱۱ درصد کل حوضه را به خود اختصاص داده است.

با توجه به نتایج پهنه‌بندی و اطلاعات دریافتی از جدول ۱ مشخص می‌شود که در مدل RF بیشترین طبقه خطر به خطر خیلی کم با ۵۴ درصد فراوانی تعلق دارد و طبقه خطر زیاد در این مدل معادل ۱۸/۴ درصد می‌باشد. اما در مدل

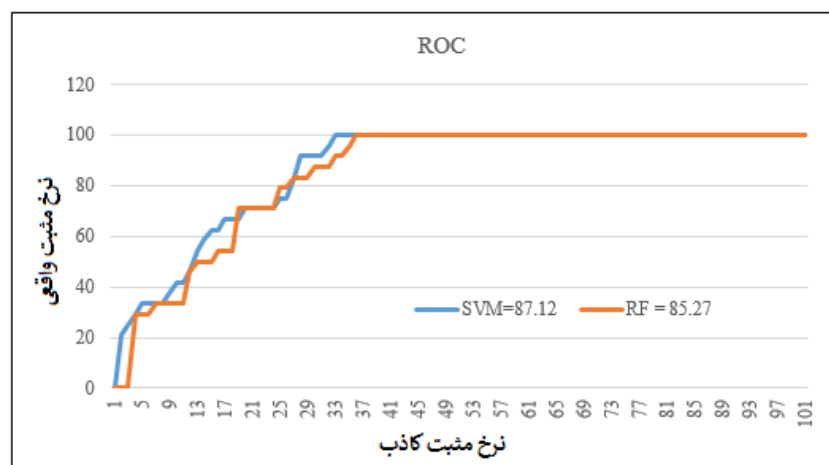
جدول ۱: اطلاعات مربوط به طبقات زمین لغزش در مدل‌های RF و SVM (منبع نگارندگان)

Table 1: Information related to landslide classes in SVM and RF models (Source: Authors)

طبقات پهنه بندی مدل RF		طبقات پهنه بندی مدل SVM		نام طبقه
درصد	مساحت به هکتار	درصد	مساحت به هکتار	
54	174533/8	40/6	130892	خیلی کم
5/2	16662/7	18/7	60350/6	کم
7/5	24168	13	42053/4	متوسط
14/9	42028/3	16/7	53979	زیاد
18/4	59350/6	11	35468/3	خیلی زیاد
100	322743/3	100	322743/3	جمع کل

خوب،  $0.07-0.06$  متوسط و  $0.06-0.05$  ضعیف)، هر دو مدل دارای دقت خیلی خوب هستند، اما در مقایسه می‌توان گفت که پهنه‌بندی زمین لغزش حاصل از مدل ماشین بردار پشتیبان در منطقه مورد مطالعه از میزان دقت بالاتری برخوردار بوده است. (شکل ۴). نتایج تحقیق حاضر با مطالعه انجام شده توسط کرمی و همکاران (Karami et al, 2020) مبنی بر عملکرد بالای مدل SVM در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش دلالت دارد. همچنین مطالعه انجام شده توسط حلاجی و همکاران (Hallaji et al, 2020) بر دقت بالای مدل بردار پشتیبان به همراه مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل‌ها، با تحقیق حاضر همخوانی دارد. اما در مطالعه صورت گرفته توسط حیدری و همکاران (Heydari et al, 2020)، ژائو و همکاران (Zhao et al, 2021)، ارزش و اعتبار مدل جنگل تصادفی کمی بیشتر از مدل بردار پشتیبان برآورد شده است. این محققان تاکید نموده‌اند که مدل جنگل تصادفی به همراه مدل بردار پشتیبان بهترین کارایی را برای بررسی پهنه‌های خطر زمین لغزش نسبت به سایر مدل‌ها دارند. به نظر می‌رسد اختلاف ناچیز در اعتبار مدل‌های مورد بررسی به تفاوت در تعداد و نحوه وزن‌دهی معیارها و همچنین اختلاف شرایط آب و هوایی حوضه‌های مورد مطالعه، مرتبط باشد. لازم به ذکر است تاکید صرف بر اعتبار و ارزش یک مدل، جهت تولید نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، صحیح و اصولی نمی‌باشد و بایستی جهت دستیابی به نقشه‌ای با حداقل خطا از روش‌های مختلفی جهت تولید مدل خطرزمین لغزش استفاده نمود (Qiyasi et al, 2023).

منحنی ROC و معیار AUC ابزارهای قدرتمندی برای ارزیابی و مقایسه مدل‌های طبقه‌بندی هستند. بعد از تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) به منظور ارزیابی نقشه‌های خروجی از مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان استفاده شد. مقادیر AUC از  $0.05$  تا  $1$  متغیر است چنانچه مدلی نتواند وقوع زمین لغزش را بهتر از دیدگاه احتمالی یا تصادفی تخمین زند مقدار سطح زیرمنحنی آن  $0.5$  و بنابراین کمترین دقت را دارد، در حالی که هر چه سطح زیرمنحنی به یک نزدیکتر باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه پهنه‌بندی تهیه شده است.  $70$  درصد از  $61$  نقطه رخداد زمین لغزشی، جهت آموزش (Training) مدل و  $30$  درصد نقاط جهت صحت سنجی (Validation) مدل، به صورت تصادفی انتخاب شدند تا بتوان دقت مدل را با داده‌هایی که در فرآیند آموزش استفاده نشده‌اند، ارزیابی نمود. استفاده از منحنی ROC و انتخاب میزان درصد  $70$  به  $30$  زمین لغزش‌ها، جهت ارزیابی عملکرد مدل‌ها، همراستا با مطالعات قبلی انجام شده نظیر پژوهش‌های شیرانی و نادری سامانی (Shirani and Naderi Samani, 2022)، کرمی و همکاران (Karami et al, 2020)، دسترنج و کریمی سنگ چینی (Destranj and Karimi Sangchini, 2022) و ژائو و همکاران (Zhao et al, 2021) صورت پذیرفته است. نتایج ارزیابی در محدوده مورد مطالعه نشان داد که مقدار سطح زیرمنحنی در مدل SVM و RF به ترتیب برابر  $87.12$  و  $85.27$  است. که با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده برای سطح زیر منحنی ( $0.9-1$  عالی،  $0.8-0.9$  خیلی خوب،  $0.7-0.8$



شکل ۴: منحنی تشخیص عملکرد نسبی و سطح زیر منحنی مربوط به نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش (منبع نگارندگان)

Fig 4: Relative Relative Operating Characteristic and area under the curve related to the landslide susceptibility zoning map (Source: Authors)



دارد. در حوضه آبخیز تالار، کلاس‌های با خطر خیلی زیاد و زیاد عمدتاً در بخش‌های مرتفع جنوبی و مرکز منطقه با شیب زیاد و در حواشی رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و جاده‌ها منطبق می‌باشد. مقایسه مدل‌های مذکور نشان داد که هر دو مدل کارایی بالایی در پهنه‌بندی وقوع زمین لغزش دارند اما نتایج ارزیابی منحنی ROC نشان داده که مقدار سطح زیرمنحنی به دست آمده برای مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی به ترتیب برابر ۸۷/۱ و ۸۵/۳ است. که با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده برای سطح زیر منحنی، مدل ماشین بردار پشتیبان از میزان دقت بالاتری در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه برخوردار می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از دو مدل، به طور میانگین بیش از ۴۰ درصد حوضه در خطر متوسط تا خیلی زیاد از لحاظ وقوع زمین لغزش قرار دارند و لزوم برنامه‌ریزی جهت مدیریت حوضه و توجه بیش از پیش به این پدیده ضروری به نظر می‌رسد.

#### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده‌اند.

#### نتیجه‌گیری

محدوده مورد بررسی با ۶۱ پهنه لغزشی از مناطق بسیار حساس به زمین لغزش می‌باشد که با توجه به فعالیت‌های روز افزون انسانی، وقوع این حرکت افزایش چشمگیری داشته است. برای ارزیابی مناطق مستعد زمین لغزش از ۱۲ عامل موثر بر وقوع زمین لغزش (ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارش، فاصله از رودخانه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، شاخص پوشش گیاهی، رطوبت توپوگرافی خاک، شاخص انحناء، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی) بهره گرفته شد. همپوشانی نقاط لغزشی و لایه‌های عوامل موثر نشان داد که قسمت‌های پائین دست حوضه به دلیل شیب ملایم و ارتفاع کم، جنس سنگ‌های تشکیل دهنده، حساسیت کمتری به وقوع زمین لغزش دارند و در مقابل قسمت‌های میانی و بالادست حوضه تالار به دلیل شرایط کوهپایه‌ای و کوهستانی، با ارتفاع و شیب زیاد و سازندهای حساس، بر شرایط بسیار مساعدتر جهت وقوع زمین لغزش دلالت دارد. نتایج حاصل از مدل جنگل تصادفی مناطق با خطر خیلی زیاد و زیاد را به ترتیب معادل ۱۸/۴ و ۱۴/۹ درصد نشان می‌دهد. این در حالی است که نتایج حاصل از مدل ماشین بردار پشتیبان، بر مناطق با خطر زمین لغزش خیلی زیاد و زیاد، به ترتیب معادل ۱۱ و ۱۶/۷ درصد از منطقه دلالت

#### پانویس

- 1-Random Forest
- 2-Support Vector Machine

- 3-Radial Basis Function
- 4-Receiver Operating Characteristic

#### References

- Ahmadi, A.M. and Veisi, A.K., 2021. Landslide risk assessment related to Paveh urban development, *Quantitative Geomorphology Research*, v. 10(1), p. 172-191.
- Akinci, H., Kilcoglu, C. and Dogan, S., 2020. Random forest – based landslide susceptibility mapping in regions of Artvin, Turkey, *ISPRS International Journal of GeoInformation*, v. 9(9), 553 p. <https://doi.org/10.3390/ijgi9090553>.
- Bayati Khatibi, M., Hasanpour, S. and Faizizadeh, B., 2024. Assessing the risk of gas pipelines passing through mountainous areas and investigating their threat from landslides using hybrid-fuzzy algorithms (case study: Tehran's third line). *Quantitative Geomorphology Research*, v. 12(4), p. 128-149.
- Bui, D.T., Lofman, O., Revhaug, I. and Dick, O., 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression, *Natural hazards*, v. 59, p. 1413-1444.
- Destranj, A. and Karimi Sangchini, I., 2022. Predicting the sensitivity of landslide occurrence with the maximum entropy machine learning algorithm (Nyshabur watershed). *Earth Science Research*, v. 13(3), p. 76-96.
- Emaduddin, S., Taheri, V., Mohammad Ghasemi, M. and Nazari Gazik, Z., 2021. Landslide susceptibility zoning using frequency ratio models and statistical index in Oghan watershed. *Quantitative Geomorphology Research*, v. 9(4), p. 75-95.
- Esfandiari Darabad, F., Rahimi, M., Navidfar, A. and Mehrovarz, A., 2020. Landslide susceptibility assessment using artificial neural network methods and support vector machine algorithm (case study: Hiran road-Ardebil province). *Quantitative Geomorphology Research*, v. 9(3), p. 18-33.

- Gao, Y., Li, B., Gao, H., Chen, L. and Wang, Y., 2020. Dynamic characteristics of high-elevation and longrunout landslides in the Emeishan basalt area: a case study of the Shuicheng "7.23" landslide in Guizhou, China. *Landslides*, v. 17, p. 1663-1677.
- Goli Mokhtari, L. and Naimi Tabar, M., 2022. Spatial modeling and prediction of landslide risk using advanced data mining algorithms (case study: Kalat city). *Quantitative Geomorphology Research*, v. 10(4), p. 116-137.
- Hallaji, M., Zanganeh Asadi, M.A. and Amir Ahmadi, A.G., 2020. Evaluating the effectiveness of landslide susceptibility prediction models in the Bar watershed of Neyshabur. *Watershed Management Research*, v. 33(2), p. 20-30.
- Heydari, N., Habibnejad, M., Kaviani, A. and Pourqasmi, H., 2020. Landslide susceptibility modeling with random forest machine learning algorithm in Rais Ali Delwari dam watershed. *Watershed Research*, v. 33(1), p. 2-13.
- Hussin, H., Zumpano, P., Reichenbach, S. and Sterlacchini, M.M., 2016. Different landslide sampling strategies in a grid-based bi-variate statistical susceptibility model. *Geomorphology*, v. 15, p. 508-523.
- Ilderami, A. and Ebadi, F., 2021. Evaluating the effectiveness of landslide risk zoning models in the Kurdistan Dam watershed. *Quantitative Geomorphology Research*, v. 10(2), p. 64-83.
- Jedari Eyvazi, J., 1995. *Geomorphology of Iran*, Payam Noor Publications, v. 1, 110 p.
- Kanevski, M., Timonin, V. and Pozdnukhov, A., 2009. *Machine learning for spatial environmental data: theory, applications, and software*. EPFL press.
- Kanungo, D.P., Arora, M.K., Sarkar, S. and Gupta, R.P., 2006. A Comparative Study of Conventional, ANN Black Box, Fuzzy and Combined Neural and Fuzzy Weighting Procedures for Landslide Susceptibility Zonation in Darjeeling Himalayas. *Engineering Geology*, v. 85, p. 347-366.
- Karami, F., Bayati Khatibi, M., Khairizadeh, M. and Mokhtari Asl, A., 2020. Evaluating the effectiveness of the support vector machine algorithm in landslide susceptibility zoning of Ahrchai catchment area. *Geography and Environmental Hazards*, v. 8(4), p. 1-17.
- Karanjadi, A., Ong, M., Pourqasmi, H., Behrmand, A. and Motamedi, M., 2020. Landslide susceptibility prediction using Mahalanobis distance and machine learning hybrid models (case study: Oghan watershed, Golestan province). *Earth Science Research*, v. 11(2), p. 1-18.
- Li, Q., Wang, Y.M., Zhang, K.B., Yu, H. and Tao, Z.Y., 2020. Field investigation and numerical study of a siltstone slope instability induced by excavation and rainfall. *Landslides*, v. 17, p. 1485-1499.
- Naimi Tabar, M., Zanganeh Asadi, M.A. and Kerami, M., 2021. Landslide risk zoning and assessment using confidence factor, surface density, and hybrid Bayes theorem models (case study: Baqi basin, Neyshabur). *Quantitative Geomorphology Research*, v. 10(1), p. 112-129.
- Park, S. and Kim, J., 2019. Landslide susceptibility mapping based on random forest and boosted regression tree models, and a comparison of their performance. *Applied Sciences*, v. 9(5), 942 p. <https://doi.org/10.3390/app9050942>.
- Pourghasemi, H.R., Jirandeh, A.G., Pradhan, B., Xu, C. and Gokceoglu, C., 2013. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran. *Journal of Earth System Science*, v. 122, p. 349-369.
- Pourghasemi, H., Yansari, Z., Panagos, P. and Pradhan, B., 2018. Analysis and evaluation of landslide susceptibility: A review on articles published during 2005-2016 (periods of 2005-2012 and 2013-2016). *Arabian Journal of Geosciences*, ISSN 1866-7511, v. 11(9), DOI: 10.1007/s12517-018-3531-5.
- Prada-Sarmiento, L.F., Cabrera, M.A., Camacho, R., Estrada, N. and Ramos-Cañón, A.M., 2019. The Mocoa Event on March 31 (2017): analysis of a series of mass movements in a tropical environment of the Andean-Amazonian Piedmont. *Landslides*, v. 16, p. 2459-2468.
- Pradhan, B., 2013. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, v. 51, p. 350-365.
- Qiyasi, V., Shirkhani Cheshme Shafi, M. and Yousefi, M., 2023. An overview of the studies done in the field of landslide risk zoning (random forest algorithm). *New approaches in civil engineering*, v. 6(4), p. 1-10.
- Sadeghi, A., Sharifi Hashtchin, S., Rahimipour Shekhaninejad, M.A. and Mahmoudi Chenari, H., 2022. Landslide behavior measurement using interferometric method of the studied area: Ardal city. *Quantitative geomorphology researches*, 11th year, v. 1, p. 133-153.
- Sadeghi, A., Talebi, A. and Zarei, P., 2022. Determining the threshold of critical precipitation in the occurrence of surface landslides based on the process-oriented model (case study: Javanroud region, Kermanshah province). *Quantitative Geomorphology Research*, v. 10(4), p. 156-177.
- Sadidi, J. and Maliki, R., 2022. Comparison of support vector machine, random forest and logistic regression algorithms in landslide risk zoning on Mahabad Sardasht road. *Journal of*



- Remote Sensing and Geographic Information System in Environmental Sciences, v. 2(4), p. 81-100.
- Shi, W., Li, Y., Zhang, W., Liu, J., He, S., Mo, P. and Guan, F., 2020. The loess landslide on 15 march 2019 in Shanxi Province, China. *Landslides*, v. 17, p. 677-686.
- Shirani, K. and Naderi Samani, R., 2022. Determining effective factors and assessing susceptibility to landslides with random forest and artificial neural network methods in the Samsami watershed area of Chaharmahal and Bakhtiari province. *Watershed Research*, v. 35(1), p. 40-60.
- Talebi, A., Goderzai, S. and Pourqasmi, H., 2018. Investigating the possibility of preparing a landslide risk map using random forest algorithm (study area: Sardarabad watershed, Lorestan province), *Natural environment hazards*, v. 7(16), p. 45-64.
- Xu, C., Dai, F., Xu, X. and Lee, Y.H., 2012. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China, *Geomorphology*, v. 145, p. 70-80.
- Zhang, K., Wu, X., Niu, R., Yang, K. and Zhao, L., 2017. the assessment of landslide susceptibility mapping using random forest and decision tree methods in the three Gorges Reservoir area, china, *Environmental Earth sciences*, v. 76(11), p. 1-20.
- Zhao, Z., Liu, Z.Y. and Xu, C., 2021. Slope unit based landslide susceptibility mapping using certainty factor, support vector machine, random forest, CF- svm and CF-RF models, *Frontiers in Earth science*, v. 9, 589630, p. 1-16.
- Zomordian, M.J., 2004. *Geomorphology of Iran (structural processes and internal dynamics)*, Ferdowsi University of Mashhad Publications, v. 1, 251 p.