



Research Article

Accuracy assessment of GLM and SVM models in preparing a landslide susceptibility map (Case study: Karganeh watershed, Lorestan province)

Ebrahim Karimi Sangchini^{*1} , Seyed Hossein Arami², Ali Dastranj³

1-Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Khorramabad, Iran

2-Forests and Rangelands Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran

3-Soil Conservation and Watershed Management Department, khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (AREEO), Mashhad, Iran

Received: 20 Nov 2023 Accepted: 15 Jun 2024

Extended Abstract

Introduction

Landslide is one of the natural hazards that causes a lot of human and financial damage every year in mountainous, rainy and seismic areas. Mass movements play an effective role in destroying communication roads, pastures, mountainous areas and causing erosion and sedimentation in watersheds. Identifying landslide-prone areas through risk zoning with appropriate models is unique of the main methods in reducing potential damage and hazard managing. Landslide susceptibility map preparation is known as the cornerstone of landslide research and is used as a management tool in times of crisis. Considering that the identification of landslide sensitive areas based on traditional methods and expert opinions is not accurate enough, the use of modern machine learning methods such as the support vector machine method seems to be necessary and necessary. The purpose of this research is to spatially model landslide susceptibility using two methods: generalized linear model (GLM) and support vector machine (SVM) and compare the efficiency of these models in zoning landslide susceptibility in Karganeh Watershed, Lorestan Province.

Materials and Methods

Karganeh Watershed is one of the large sub-watersheds of Khorramabad with an area of 294.2 square kilometers. The minimum height of the this watershed is 1300 and the maximum is 2700 meters, and 60% of the area of this watershed has a slope of more than 12% (relatively high slope and more). The research method in this study is applied in terms of purpose and in terms of descriptive-analytical nature, library methods, field visits and modeling are used. On behalf of this goal, the distribution map layer of landslides in the watershed including 95 cases of landslides was prepared and separated into two sets for model training (70%) and model validation (30%) randomly.

Citation: Karimi Sangchini, E., Arami, S.H. and Dastranj, A., 2024. Accuracy Assessment of GLM and SVM models in preparing a landslide susceptibility map, *Res. Earth. Sci.* 15(3), (119-136) DOI: 10.48308/esrj.2024.104720

* Corresponding author E-mail address: E.karimi64@gmail.com





Also, 16 causes disturbing the happening of landslides in this watershed were selected permitting to the review of sources and the usage of principal component analysis (PCA), Tolerance and VIF tests. Digital layers of effective factors in geographic information system were equipped. Slope factors, slope direction, elevation classes, geology, drainage network (distance from the river), road (distance from the road), fault (distance from the fault), topographic indicators (river power index (SPI), topographic moisture index (TWI) and Slope length index (LS)), geomorphological indices (topographic position index (TPI), topographic roughness index (TRI) and power vector index or surface roughness measurement (VRM) of land use, distance from the village, and rain lines as the most effective factors Landslide occurrences in Karganeh Watershed were known. Then, the landslide hazard map was prepared based on the two mentioned methods in the ModEco software environment. Next, in order to evaluate the accuracy of the modeling and compare the efficiency of the models, the relative performance recognition index (ROC) was used.

Results and Discussion

By correcting the landslide data provided by the General Directorate of Natural Resources with the help of Google Earth satellite images and field visits, 95 landslides were identified, which cover an area of 1483.24 hectares of this watershed. Established on the fallouts of the maximum likelihood diagram, geological, land use, slope, topographic roughness index (TRI), slope length and slope direction are the best significant factors inducing the event of landslides in Karganeh Watershed. The results showed that the support vector machine (SVM) method with ROC equal to 0.913 was chosen as the best model for the basin. The generalized linear model with ROC equal to 0.803 also showed high efficiency in terms of landslide susceptibility evaluation. Permitting to the results of the support vector machine, about 19.3% of the Karganeh Watershed is in the high and very high hazard class of landslide happening. Based on the landslide susceptibility map with the support vector machine model, the villages of Jamshidabad Haider, Milmlilk, Garmabala Bala, Bene Soura, Mahmoudabad Bala, Skin Bala, Cheshme Papi, Dareh Qasim Ali and Sheikh Haider are at high and very high hazard of landslides. It were located About 117 kilometers of communication roads in this area were classified as high and very high hazard.

Conclusion

Established on the fallouts of this study, the maximum entropy algorithm provides practical results in order to zone the hazard of landslides in the Karganeh Watershed; By matching the obtained results by the existing real conditions, there is a very high agreement between the fallouts of the landslide hazard zoning map using this model and the real indication in this watershed. Assuming the concentration of management operations in high-sensitivity classes, about 70% of the area of the region will be removed from the management process and will cause the allocation of financial resources and less time. The implementation of landslide management programs based on the results of this research on a local and regional scale can explain the difficulties of domain instability and lead to the development of watershed management actions and the sustainability of the development of the Karganeh Watershed.

Keywords: Support vector machine algorithm, Sensitivity, Karganeh Watershed, Landslide, Generalized linear model.



بررسی دقت مدل‌های GLM و SVM در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کرگانه، استان لرستان)

ابراهیم کریمی سنگچینی^{۱*} ID، سیدحسین آرامی^۲، علی دسترنج^۳

۱- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران

۲- بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

۳- بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۶

چکیده گسترده

مقدمه

زمین لغزش یکی از خطرات طبیعی است که همه ساله خسارت جانی و مالی فراوانی در مناطق کوهستانی، پر باران و لرزه‌خیز به همراه دارد. حرکت‌های توده‌ای نقش موثری در تخریب جاده‌های ارتباطی، مراتع، مناطق کوهستانی و ایجاد فرسایش و رسوب در حوزه‌های آبخیز دارند. شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش با استفاده از پهنه‌بندی خطر با مدل‌های مناسب، یکی از اقدامات اولیه در کاهش خسارت احتمالی و مدیریت خطر است. تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش به عنوان سنگ بنای تحقیقات زمین لغزش شناخته شده و در مواقع بحرانی به عنوان یک ابزار مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه شناسایی مناطق دارای حساسیت زمین لغزش براساس روش‌های سنتی و نظرات کارشناسی از دقت مناسبی برخوردار نیست، استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشین مانند روش ماشین بردار پشتیبان امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این تحقیق، مدل‌سازی مکانی حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از دو روش مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) و الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) و مقایسه کارایی این مدل‌ها در پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه، استان لرستان است.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز کرگانه یکی از زیر حوزه‌های بزرگ آبخیز خرم‌آباد با مساحت ۲۹۴/۲ کیلومتر مربع است. حداقل ارتفاع حوزه آبخیز کرگانه ۱۳۰۰ و حداکثر آن ۲۷۰۰ متر است و ۶۰ درصد از مساحت این آبخیز دارای شیب بیش از ۱۲ درصد (شیب نسبتاً بالا و بیشتر) است. روش پژوهش در این مطالعه از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی-تحلیلی است که از روش‌های کتابخانه‌ای، بازدیدهای میدانی و مدل‌سازی استفاده شده است.

استناد: کریمی سنگچینی، ا.، آرامی، س.ح. و دسترنج، ع.، ۱۴۰۳. بررسی دقت مدل‌های GLM و SVM در تهیه نقشه، پژوهشهای

دانش زمین: ۱۵(۳)، (۱۳۶-۱۱۹)، DOI: 10.48308/esrj.2024.104720

E-mail: E.karimi64@gmail.com

* نویسنده مسئول:



برای این منظور، لایه نقشه پراکنش زمین لغزش‌های منطقه شامل ۹۵ مورد زمین لغزش به صورت پهنه‌ای تهیه و به دو دسته برای آموزش مدل (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی مدل (۳۰ درصد) به صورت تصادفی تقسیم شدند. همچنین، ۱۶ عامل موثر بر وقوع زمین لغزش در آبخیز مورد بررسی با توجه به مرور منابع و استفاده از آزمون‌های تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA)، Tolerance و VIF^۲ انتخاب و لایه‌های رقومی در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. عوامل شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، زمین‌شناسی، شبکه زه‌کشی (فاصله از رودخانه)، جاده (فاصله از جاده)، گسل (فاصله از گسل)، شاخص‌های توپوگرافیک (شاخص توان رودخانه (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و شاخص طول شیب (LS))، شاخص‌های ژئومورفولوژیک (شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) و شاخص قدرت بردار یا اندازه‌گیری زبری سطح (VRM) کاربری اراضی، فاصله از روستا، و خطوط هم بارش به عنوان موثرترین عوامل وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه شناخته شدند. سپس نقشه خطر (استعداد) زمین لغزش براساس دو روش یاد شده در محیط نرم‌افزار ModEco تهیه شد. در ادامه به منظور ارزیابی صحت مدل‌سازی و مقایسه کارایی مدل‌ها از شاخص تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده گردید.

نتایج و بحث

با اصلاح داده‌های زمین لغزش تهیه شده از اداره کل منابع طبیعی به کمک تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و بازدیدهای میدانی تعداد ۹۵ زمین لغزش شناسایی شد که که سطحی حدود ۱۴۸۳/۲۴ هکتار از حوضه را در بر گرفته‌اند. براساس نتایج نمودار حداکثر احتمال^۳، شاخص‌های زمین‌شناسی، کاربری اراضی، شیب، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI)، طول شیب و جهت شیب مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه هستند. نتایج نشان داد که روش الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) با ROC برابر با ۰/۹۱۳ به عنوان مدل برتر برای حوضه برگزیده شد. مدل خطی تعمیم یافته با ROC برابر با ۰/۸۰۳ نیز کارایی بالایی را از نظر ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین لغزش از خود نشان داد. براساس نتایج مدل الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، حدود ۱۹/۳ درصد از حوزه آبخیز کرگانه در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین لغزش قرار گرفته است. براساس نقشه شدت حساسیت‌پذیری زمین لغزش با مدل ماشین بردار پشتیبان، روستاهای جمشیدآباد حیدر، میلملیک، گرمبله بالا، بنه سوره، محمودآباد بالا، اسکین بالا، چشمه پابی، دره قاسمعلی و شیخ حیدر در خطر زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین لغزش واقع شدند. حدود ۱۱۷ کیلومتر از راه‌های ارتباطی این حوزه در کلاس خطر بالا و خیلی بالا قرار گرفتند.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این تحقیق، الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نتایج کاربردی را به منظور پهنه‌بندی وقوع خطر زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه ارائه می‌دهد؛ به طوری که با تطبیق نتایج بدست آمده با شرایط واقعی موجود، تطبیق بسیار بالای بین نتایج نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از این مدل و شواهد واقعی موجود در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. با فرض تمرکز عملیات مدیریتی در کلاس‌های با حساسیت بالا، حدود ۷۰ درصد از مساحت منطقه از روند مدیریتی خارج شده و سبب تخصیص منابع مالی و زمان کم‌تری نیز خواهد شد. اجرای برنامه‌های مدیریت زمین لغزش بر پایه نتایج این تحقیق در مقیاس محلی و منطقه‌ای می‌تواند مشکلات ناپایداری دامنه را حل کرده و منجر به بهبود فعالیت‌های مدیریت آبخیز و پایداری توسعه حوضه کرگانه شود.

واژگان کلیدی: الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، حساسیت‌پذیری، حوزه آبخیز کرگانه، زمین لغزش، مدل خطی تعمیم یافته.

مقدمه

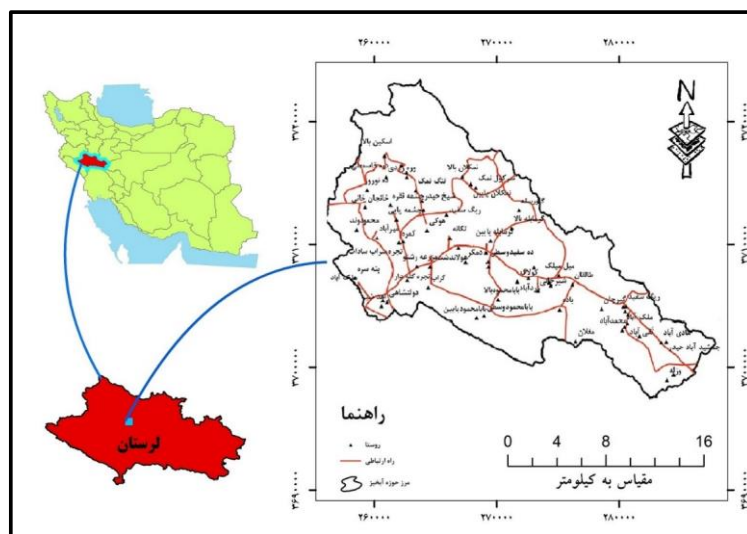
زمین‌لغزش یکی از خطرات طبیعی است که همه ساله خسارت جانی و مالی فراوانی در مناطق کوهستانی، پرباران و لرزه‌خیز به همراه دارد. حرکت‌های توده‌ای نقش موثری در تخریب جاده‌های ارتباطی، مراعات، مناطق کوهستانی و ایجاد فرسایش و رسوب در حوزه‌های آبخیز دارند (Karimi et al, 2014). زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از حرکات توده‌ای، حرکت یک توده سنگ، آوار، خاک دررویی دامنه به سمت پایین تحت‌تأثیر نیروی جاذبه است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که نیروی حاصل از وزن مواد بیش از نیروی مقاومت ناشی از نیروی برشی خاک باشد (Alipour and Malekiyan, 2015). براساس یک برآورد اولیه، سالیانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت‌های مالی از طریق این پدیده بر کشور تحمیل می‌شود (Gasemyan et al, 2021). طبق گزارش جهانی مخاطرات طبیعی سه در سال ۲۰۱۲، لغزش در میان هفت بلاای طبیعی خطرناک جهان قرار گرفت (Roustaie et al, 2020; Afifi, 2021). تا سال ۱۳۸۶ حدود ۴۳۰۰ زمین‌لغزش در کشور ثبت و نقشه‌بندی شده که خسارت معادل آن ۱۳۰۰۰۰ میلیارد ریال برآورد شده است. کشور ایران به دلیل مساعد بودن شرایط جغرافیایی، ضعف مدیریت جامع و عدم رعایت آستانه‌های محیطی، به‌عنوان یک کشور پرمخاطره به شمار می‌رود (Yarahamdi, 2015). با توجه به طیف گسترده وقوع پدیده زمین‌لغزش روش واحدی برای شناسایی و تهیه نقشه پهنه‌بندی جهت ارزیابی خطر وجود ندارد. با به‌کارگیری روش‌های علمی، مجموعه‌ای از ابزارهای دقیق برای آماده‌سازی و استفاده بهینه از نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش و همچنین استفاده از مدل‌های پیش‌بینی لغزش فراهم می‌آید که مشکل شناسایی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را کاهش می‌دهد. نقشه حساسیت زمین‌لغزش سنگ بنایی برای تصمیم‌گیران به منظور پیشنهاد اقدامات فنی، نظارتی و یا ترکیبی می‌باشد (Meten, 2015). این نقشه‌ها همچنین ابزار مهمی برای مهندسان، دانشمندان علوم زمین، برنامه‌ریزان و مدیران به‌منظور انتخاب مکان‌های مناسب برای کشاورزی، ساخت‌وساز و سایر فعالیت‌های توسعه‌ای محسوب می‌شوند (Ercanoglu et al, 2002; Kornejady et al, 2020). تهیه نقشه وقوع زمین‌لغزش، ابزاری اساسی برای فعالیت‌های مدیریت در نواحی کوهستانی است

(Dahal et al, 2008; Gasemyan et al, 2021). نقشه حساسیت زمین‌لغزش سنگ بنایی برای تصمیم‌گیران برای پیشنهاد اقدامات فنی، نظارتی و یا ترکیبی هست (Meten, 2015). اخیراً استفاده از روش‌های داده کاوی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش گسترش پیدا کرده است، در این تحقیق دو مدل از این روش‌ها شامل ماشین بردار پشتیبان (Kornejady et al, 2019; Balogun et al, 2021; Panahi et al, 2020; Chen et al, 2017; Lee et al, 2017; Pham et al, 2016; Hong et al, 2015; Peng et al, 2014) و خطی تعمیم‌یافته (Prajisha et al, 2023; Chen et al, 2017; Camilo et al, 2019) مورد ارزیابی قرار گرفت و نقشه‌های حساسیت وقوع زمین‌لغزش با دقت قابل‌قبولی تهیه شدند. روش‌های داده کاوری به لحاظ به‌کارگیری الگوریتم‌های تخمین توزیع، طبیعت داده محور و تکرار بالای فرایند مدل‌سازی، توانایی بالایی در شناسایی رفتار وقوع پدیده زمین‌لغزش دارند (Lee et al, 2017; Trigila et al, 2013; Kornejady et al, 2020). یکی از روش‌های یادگیری ماشین الگوریتم بردار پشتیبان (SVM) می‌باشد که در این مطالعه از این الگوریتم به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت به زمین‌لغزش استفاده شد. برخی محققین در مطالعات خود با استفاده از الگوریتم بردار پشتیبان به پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش اقدام نمودند. نتایج مطالعات این محققین کارایی الگوریتم بردار پشتیبان را در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را تایید کردند (Pham et al, 2016; Esfandiary Darabad et al, 2020; Pandey, 2020). پانندی و همکاران (Kornejady et al, 2020) دو روش حداکثر آنتروپی و ماشین بردار پشتیبان را به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در هیمالیا به کار گرفتند. برای این منظور از ۱۱ پارامتر مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش استفاده کردند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که هر دو مدل کارایی خوبی در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش دارند. پاراجیسا و همکاران (Prajisha et al, 2023) نقشه حساسیت زمین‌لغزش حوضه رودخانه استوایی (حوضه رودخانه پامبا) در هند را با استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) تهیه کردند. ۱۴ متغیر ژئومحیطی شامل سنگ‌شناسی، کاربری‌اراضی/پوشش زمین، بافت خاک، زاویه شیب، جهت شیب، فاصله از جاده‌ها، فاصله از آبراهه‌ها، فاصله از خطوط‌راه‌ها، NDVI، شاخص ناهمواری زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی،

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کرگانه یکی از زیر حوزه‌های بزرگ آبخیز خرم‌آباد با مساحت ۲۹۴/۲ کیلومترمربع است. حداقل ارتفاع حوزه آبخیز کرگانه ۱۳۰۰ و حداکثر آن ۲۷۰۰ متر است و ۶۰ درصد از مساحت این آبخیز دارای شیب بیش از ۱۲ درصد (شیب نسبتاً بالا و بیشتر) است. این شرایط بیان‌کننده کوهستانی بودن حوزه آبخیز مورد بررسی است. حوزه آبخیز کرگانه بین طول جغرافیایی $59^{\circ} 23' 48''$ تا $24^{\circ} 44' 48''$ شرقی و عرض جغرافیایی $12^{\circ} 25' 33''$ تا $12^{\circ} 37' 33''$ شمالی واقع شده است. این حوزه آبخیز به دلیل کوهستانی بودن و شیب زیاد، سازندهای مستعد، جاده‌سازی و همچنین تغییر کاربری‌های متعدد از جنگل و مرتع به زراعت دیم از نظر وقوع زمین لغزش از اهمیت بالایی برخوردار است. متوسط بارندگی آن ۴۶۹ میلی‌متر است. براساس نقشه کاربری اراضی وضع موجود تهیه شده برای حوزه آبخیز مورد مطالعه از کل مساحت حوزه، ۴۰/۹ درصد مرتع، ۶/۲ درصد جنگل که بیشتر آن تخریب شده، ۲۶/۵ درصد زراعت دیم، ۱/۲ درصد زراعت دیم در زیر اشکوب جنگل، ۱۳/۲ درصد زراعت آبی و ۸/۳ درصد اراضی صخره-ای است. این حوزه، دارای ۶۶ روستا می‌باشد، جمعیت روستاهای واقع در حوزه براساس آمارگیری سال ۱۳۹۵، برابر با ۱۱۹۰۹ نفر است. پرجمعیت‌ترین روستا، ملک‌آباد با جمعیتی برابر با ۱۰۳۷ نفر می‌باشد.

شاخص توان جریان، انحناى پروفیل و انحناى پلان توسعه یافته انتخاب شدند. در ابتدا، یک آزمون چندخطی برای حذف متغیرهای بسیار همبسته انجام شد. پس از آن، مدل خطی تعمیم یافته، یک نسخه انعطاف‌پذیر اصلاح‌شده از رگرسیون معمولی برای مدل‌سازی نهایی حساسیت زمین لغزش استفاده شد. مدل پیش‌بینی شده دقت ۸۴٪/۷ را در مرحله تمرین و ۸۹٪/۲ را در مرحله اعتبار سنجی نشان داد. با توجه به مرور منابع انجام شده تاکنون مطالعات جامعی در ارتباط با پهنه‌بندی وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه استان لرستان انجام نشده است. این حوزه به دلیل شرایط زمین‌شناسی، اقلیمی و فعالیت‌های انسانی دارای پتانسیل وقوع زمین لغزش است. براساس داده‌های تهیه شده از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان رضوی تعداد زیادی زمین لغزش در این منطقه رخ داده است که موجب تخریب جاده‌های عشایری و باغات منطقه شده است. با اصلاح داده‌های زمین لغزش تهیه شده از اداره کل منابع طبیعی به کمک تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و بازدیدهای میدانی تعداد ۹۵ زمین لغزش شناسایی شد که حاکی از پتانسیل بالای پتانسیل وقوع زمین لغزش در حوزه مورد مطالعه است. لذا هدف این مطالعه بررسی دقت مدل‌های GLM و SVM در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه، استان لرستان است. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند جهت برنامه‌ریزی در جهت کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین لغزش و برنامه‌های توسعه‌ای منطقه مورد استفاده مسئولان و تصمیم‌گیران قرار بگیرد.



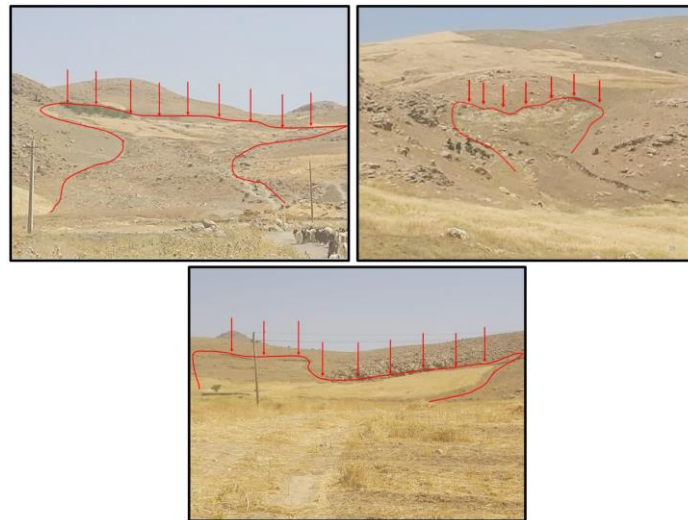
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز کرگانه

مواد و روش‌ها

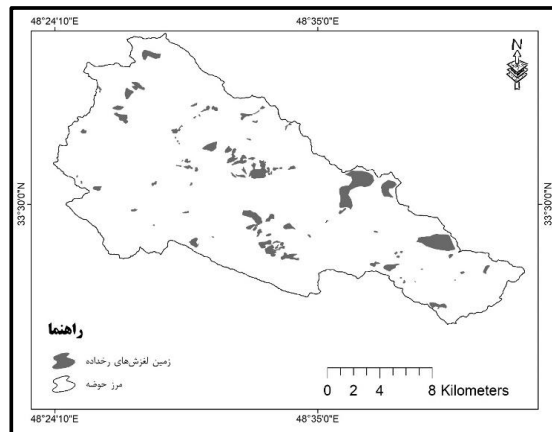
تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش

یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی خطر زمین لغزش، شناسایی و تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش‌های موجود حوضه است. بدین منظور ابتدا با استفاده از نقشه زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه که توسط اداره کل منابع طبیعی استان لرستان که با استفاده از تفسیر عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ تهیه شده بود، استخراج شد. سپس از طریق

انجام بازدید میدانی در حوضه و همچنین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth این نقشه اصلاح و به‌روز شد و در نهایت نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها تهیه گردید. در نهایت ۹۵ مورد زمین لغزش در حوضه مورد مطالعه شناسایی شد که سطحی حدود ۱۴۸۳/۲۴ هکتار از حوضه را دربر گرفته‌اند. جهت مدل‌سازی خطر زمین لغزش از ۷۰ درصد نقاط لغزشی برای آموزش مدل و ۳۰ داده‌های لغزشی به منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شد.



شکل ۲: تصاویر زمین لغزش‌های رخ داده در حوزه آبخیز کرگانه



شکل ۳: نقشه پراکنش زمین لغزش‌های رخ داده در حوزه آبخیز کرگانه

تهیه لایه عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش

برای تعیین رابطه بین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در آبخیز کرگانه و تعیین موثرترین عوامل در قالب مولفه‌های اصلی از آزمون تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA)، Tolerance و VIF در نرم افزار SPSS نسخه ۲۰ استفاده شد. در تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA)، بیشترین ارزش

ویژه متعلق به مولفه نخست (PC1) است و به تدریج با افزایش رده مولفه‌ها این مقدار کاهش می‌یابد. برای به کارگیری این آزمون باید با استفاده از ضریب KMO^4 اقدام به تعیین مناسب بودن داده‌ها برای تجزیه به مولفه‌های اصلی شود. مقدار این آزمون همواره بین صفر و یک متغیر است. اگر مقدار این ضریب کمتر از ۰/۵ باشد، داده‌ها برای

-0.391River PC1=0.322DEM+0.421 LS
 -0.468Fault +0.601 TPI Geo -0.557 +0.597Slope
 +0.306 SPI- Road 0.263
 0.289Aspect+0.66Landuse+0.474Rainfall
 +0.065 Soil Village +0.183 -0.501 PC2=0.249 TWI
 Curvature +238 TRI +0.159 NDVI +0.362 VRM

نتایج حاصل از تست هم‌خطی با استفاده از شاخص‌های Tolerance و VIF در جدول ۲ بیان شده است. با توجه به نتایج بررسی عوامل موثر با شاخص‌های مورد ذکر، عوامل شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، زمین‌شناسی، شبکه زهکشی (فاصله از رودخانه)، جاده (فاصله از جاده)، گسل (فاصله از گسل)، شاخص‌های توپوگرافیک (شاخص توان رودخانه (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و شاخص طول شیب (LS))، شاخص‌های ژئومورفولوژیک (شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) و شاخص قدرت بردار یا اندازه‌گیری زبری سطح (VRM) کاربری اراضی، فاصله از روستا، و خطوط هم‌بارش به عنوان موثرترین عوامل وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه شناخته شدند. نقشه کاربری منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه کاربری اراضی استان لرستان که از اداره کل منابع طبیعی لرستان تهیه شد، استخراج شد. از طریق بازدید میدانی و به خصوص از طریق تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، اصلاح گردید. لایه‌های شیب، جهت شیب و طبقات ارتفاعی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر و نرم‌افزار Arc GIS 10.8 تهیه گردید. برای تهیه لایه‌های زمین‌شناسی و گسل‌های منطقه مورد مطالعه براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. از تابع فاصله اقلیدسی برای تهیه و آماده‌سازی فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از آبراهه در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.8، استفاده شد. نقشه بارش با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی که داخل و نزدیک به منطقه مورد مطالعه واقع شدند، استخراج شد. شاخص NDVI با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ در سال ۲۰۱۹ و در فصل رشد در محیط Google Earth engine، تهیه شد. نقشه جاده‌های منطقه مورد با استفاده از نقشه جاده‌های استان که از اداره منابع طبیعی استان لرستان تهیه شد، استخراج گردید و از طریق بازدیدهای میدانی و تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، اصلاح شد. شاخص توان آبراهه (SPI) از رابطه ۳ و با توجه به دستور Raster

تحلیل عاملی مناسب نیستند و اگر مقدار این ضریب بین ۰/۵ تا ۰/۶۹ باشد، با قطعیت بالاتر به تجزیه مولفه‌های اصلی پرداخت. در صورتی که ضریب بیشتر از ۰/۷ باشد، تجزیه مولفه‌های اصلی در کاهش داده‌ها موثر خواهد بود. در این روش هر مولفه مستقل از مولفه‌های دیگر است. هر مولفه ترکیب خطی از متغیرها است که می‌توان رابطه آن را به صورت معادله رابطه ۱ نمایش داد (Ghiasi et al, 2017):

رابطه ۱)

$$PC1=a11X1+ a12X2+...+ aijXj$$

که در آن PC مولفه اصلی، a_{ij} ضریب یا بردار ویژه و X_j متغیر مورد نظر است. به منظور انتخاب تعداد مولفه‌های موثر، مولفه‌هایی انتخاب شدند که عدد ارزش ویژه آن‌ها از یک بالاتر بود. برای تفسیر ویژگی‌های موثر در یک مولفه که بیشترین تغییرات را کنترل می‌کند از شاخص انتخاب^۶ استفاده شد (رابطه ۲) (Ghiasi et al, 2017):

رابطه ۲)

$$SC = \frac{0.5}{(PCEigenvalue)^{0.5}}$$

که در آن، SC شاخص انتخاب، PC مولفه اصلی و Eigenvalue همان ارزش ویژه است. از آنجایی که تمامی متغیرهای مورد بررسی یکسان نبوده‌اند، برای محاسبه مولفه‌های اصلی از ماتریس همبستگی استفاده شد. Tolerance و VIF از شاخص‌های بسیار پرکاربرد در بررسی هم‌خطی بین عوامل می‌باشند. مقادیر Tolerance کمتر از ۰/۱ و مقادیر VIF بزرگتر از ۱۰ بیانگر هم‌خطی بین عوامل است. وجود هم‌خطی بین عوامل باعث کاهش دقت نقشه حساسیت زمین لغزش می‌شود (Arab Ameri et al, 2018). براساس نتایج بدست آمده شاخص PCA، ضریب KMO مقدار ۰/۶۱ محاسبه شد که این مقدار همبستگی لازم بین متغیرهای ورودی برای انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی را تأیید می‌کند. از بین ۱۹ مولفه به تعداد متغیرهای مورد بررسی در ارزیابی خطر زمین لغزش با نظر گرفتن ارزش ویژه بالاتر از یک، تعداد دو مؤلفه اصلی اول مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، این دو مؤلفه اصلی نزدیک به ۶۷ درصد تغییرات را بیان می‌کنند. در این مطالعه به منظور تعیین متغیرهای مؤثر در هر مؤلفه از شاخص معیار انتخاب (SC) استفاده شد. معیار انتخاب برای مولفه اول ۰/۱۷ و برای مولفه دوم ۰/۲۱۱ محاسبه شد.

ارزیابی. شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

رابطه ۶)

$$TRI = \sqrt{\sum 8p} = 1ZMd$$

P=تعداد پیکسل اطراف، ZMd= میانگین تفاضل ۸ پیکسل اطراف هر پیکسل

نقشه‌های عوامل شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، زمین‌شناسی، شبکه زهکشی (فاصله از رودخانه)، جاده (فاصله از جاده)، گسل (فاصله از گسل)، شاخص‌های توپوگرافیک (شاخص توان رودخانه (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و شاخص طول شیب (LS))، شاخص‌های ژئومورفولوژیک (شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) و شاخص قدرت بردار یا اندازه‌گیری زبری سطح (VRM) کاربری اراضی، فاصله از روستا، و خطوط هم بارش به عنوان موثرترین عوامل وقوع زمین لغزش در شکل ۴ آورده شده‌اند.

calculator در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.8 محاسبه می‌شود.

رابطه ۳)

$$SPI = \text{Astan}\beta$$

در این رابطه AS: مساحت حوزه و $\tan\beta$: مقدار شیب منطقه در هر پیکسل هست. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) از رابطه ۴ در محیط نرم‌افزار SAGA GIS، تهیه شد.

رابطه ۴)

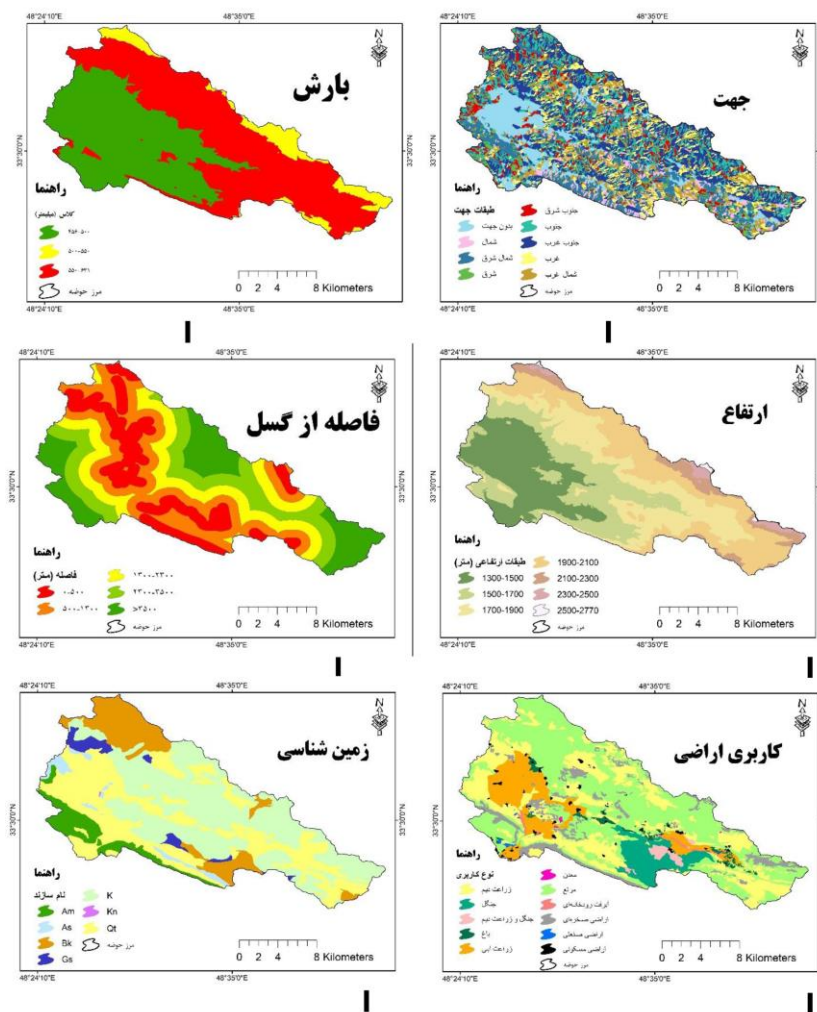
$$TWI = \ln \alpha / \tan\beta$$

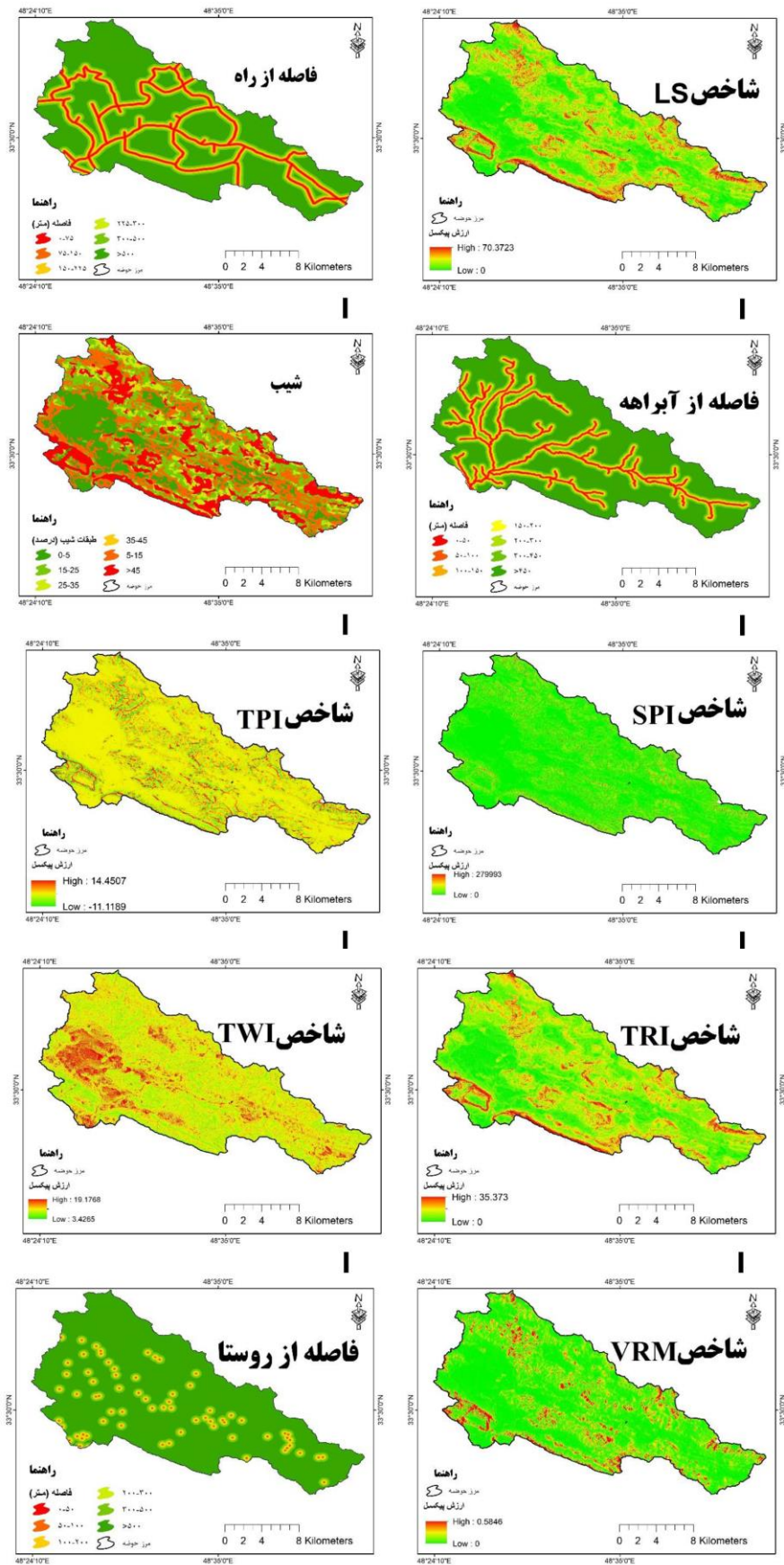
در این رابطه α : زهکش شیب بالاست در واحد طول و β : شیب منطقه‌ای است. شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) طبق رابطه ۵ به دست می‌آید:

رابطه ۵)

$$TPI = Z0 - \sum n - 1Zn/n$$

که $Z0$ = ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Zn = ارتفاع از شبکه و n = تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته شده در





پیش‌بینی کننده خطی و میانگین توزیع عملکرد تشکیل شده است (Prajisha et al, 2023). متغیرها در مدل GLM ممکن است پیوسته، گسسته و یا ترکیبی از هر دو باشد. در پژوهش حاضر متغیر وابسته یک متغیر دودویی است که محل وقوع لغزش را نشان می‌دهد. این مدل به صورت رابطه ۷ بیان می‌شود (Prajisha et al, 2023):

رابطه ۷)

$$\text{logit}(P) = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = +\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i$$

در این رابطه P احتمال خروجی، β_0 فاکتور جداکننده، β_i ضریب λ ام و x_i ضریب مستقل λ ام است. P هم‌چنین به صورت رابطه ۸ بیان می‌شود:

رابطه ۸)

$$P = \frac{\exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i)}{1 + \exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i)}$$

در این مطالعه به منظور استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته از نرم‌افزار ModEco استفاده شده است.

ارزیابی کارایی مدل‌های مورد استفاده

در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی کارایی مدل‌های خطی تعمیم‌یافته و ماشین بردار پشتیبان از منحنی ROC استفاده شد. این منحنی نموداری است که در آن نسبت پیکسل‌های که به اشتباه توسط مدل به‌عنوان زمین لغزش شناسایی شده‌اند و در واقعیت فاقد زمین لغزش بوده‌اند روی محور افقی و در برابر آن نسبت پیکسل‌هایی که به درستی توسط مدل تحت عنوان دارای زمین لغزش شناسایی شده‌اند روی محور عمودی ترسیم می‌گردد. در منحنی ROC بهترین مدل، دارای بیشترین سطح زیر منحنی است و مقادیر AUC از ۰/۵ تا یک متغیر است. هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر شود کارایی مدل افزایش می‌یابد. همبستگی کمی - کیفی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین در جدول ۲ ارائه شده است.

تهیه نقشه حساسیت‌پذیری به زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه

مدل الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)

این مدل یکی از مدل‌های یادگیری ماشین نظارت شده است که به منظور طبقه‌بندی و تفکیک داده‌ها به کار می‌رود. به بیان دیگر، پس از مشخص شدن داده‌های ورودی مدل (متغیرهای مستقل) و داده‌های هدف (متغیرهای وابسته)، مدل ماشین بردار پشتیبان پس از تجزیه و تحلیل بین متغیرهای مستقل و وابسته (واسنجی)، داده‌ها را به گروه‌های متمایزی تقسیم می‌کند. در الگوریتم SVM، هر نمونه داده را به‌عنوان یک نقطه در فضای n بعدی روی نمودار پراکنندگی داده‌ها ترسیم کرده (n تعداد ویژگی‌هایی است که یک نمونه داده دارد) و مقدار هر ویژگی مربوط به داده‌ها، یکی از مؤلفه‌های مختصات نقطه روی نمودار را مشخص می‌کند. ایده اصلی این الگوریتم به صورت یک طبقه‌بندی دوتایی با استفاده از نقاط آموزشی است که فضای ورودی اصلی را به یک فضای با ابعاد بالاتر، جهت یافتن یک ابر صفحه مطلوب تبدیل می‌کند. نقاط آموزشی که نزدیک به صفحه مطلوب است، پشتیبان بردار نامیده می‌شود. هنگامی که سطح تصمیم به دست آمد، می‌توان از آن جهت برآورد داده‌های جدید استفاده کرد (Rabet et al, 2020). در این مطالعه به منظور استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان از نرم‌افزار ModEco و الگوریتم SVR استفاده شده است.

مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)

مدل خطی تعمیم‌یافته با گسترش مدل‌های خطی حاصل می‌شود. این مدل به منظور تهیه یک چهارچوب رگرسیونی برای توزیع‌های غیرنرمال ارائه شده است. این مدل از سه بخش شامل توزیع احتمال برای متغیرهای پاسخ، پیش‌بینی کننده خطی و تابع ارتباطی برای برقراری ارتباط بین

جدول ۱: همبستگی کمی - کیفی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین

۰/۹ - ۱	۰/۸ - ۰/۹	۰/۷ - ۰/۸	۰/۶ - ۰/۷	۰/۵ - ۰/۶	سطح زیر منحنی
عالی	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف	ارزش کیفی

نتایج حاصل از تست هم‌خطی با استفاده از شاخص‌های Tolerance و VIF در جدول ۲ بیان شده است.

بحث و نتایج

انتخاب عوامل موثر بر زمین لغزش

جدول ۲: تست هم خطی بین عوامل مؤثر در زمین لغزش

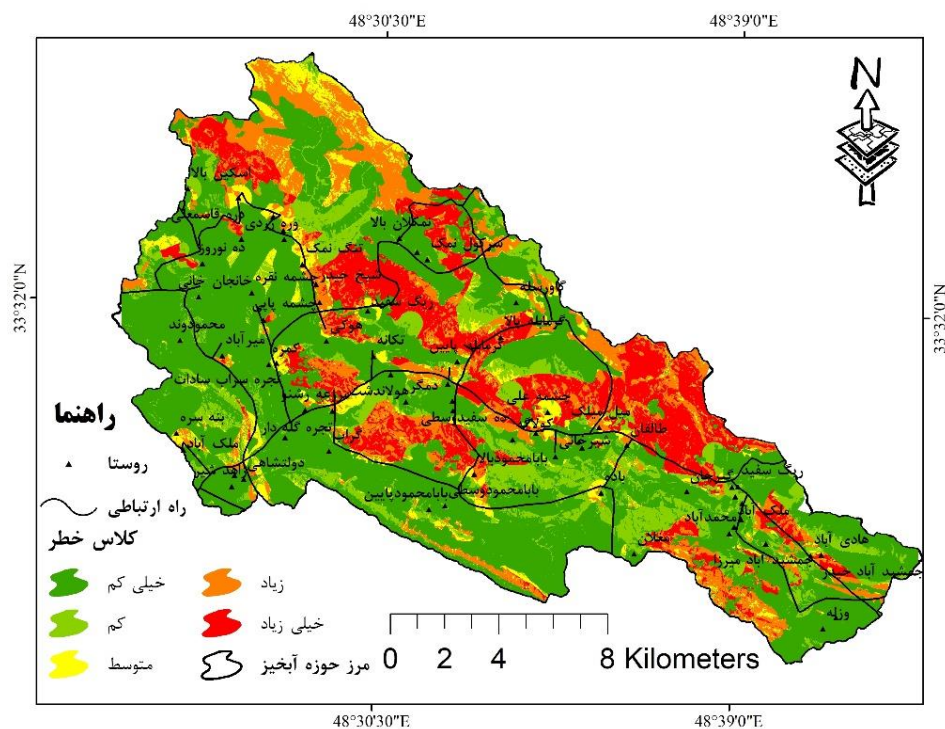
VIF	Tolerance	عامل	VIF	Tolerance	عامل
۱/۰۶	۰/۱۸	موقعیت توپوگرافی (TPI)،	۱/۶	۰/۶۲	شیب
۱/۵۳	۰/۷۳	ناهمواری توپوگرافی (TRI)	۱/۸	۰/۵۸	جهت شیب
۲/۶	۰/۳۲	اندازه‌گیری زبری سطح (VRM)	۲/۳	۰/۵۴	طبقات ارتفاعی
۱۳/۱	۰/۰۱۲	بافت خاک	۲/۳	۰/۶۷	زمین‌شناسی
۱/۶۱	۰/۸۲	فاصله از روستا،	۱/۰۲	۰/۷۸	فاصله از رودخانه
۱۶/۱	۰/۰۳۵	شاخص NDVI	۳/۱	۰/۳۹	فاصله از جاده
۱۸/۴	۰/۰۶۳	انحنای سطح	۳/۹	۰/۲۶	فاصله از گسل
۴/۱	۰/۲۹	کاربری اراضی	۲/۷	۰/۴۴	توان رودخانه (SPI)،
۲/۱	۰/۴۸	میزان بارش	۳/۵	۰/۵۱	رطوبت توپوگرافی (TWI)
			۲/۵	۰/۲۶	طول شیب (LS)

اراضی، فاصله از روستا، و خطوط هم بارش به عنوان موثرترین عوامل وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه شناخته شدند.

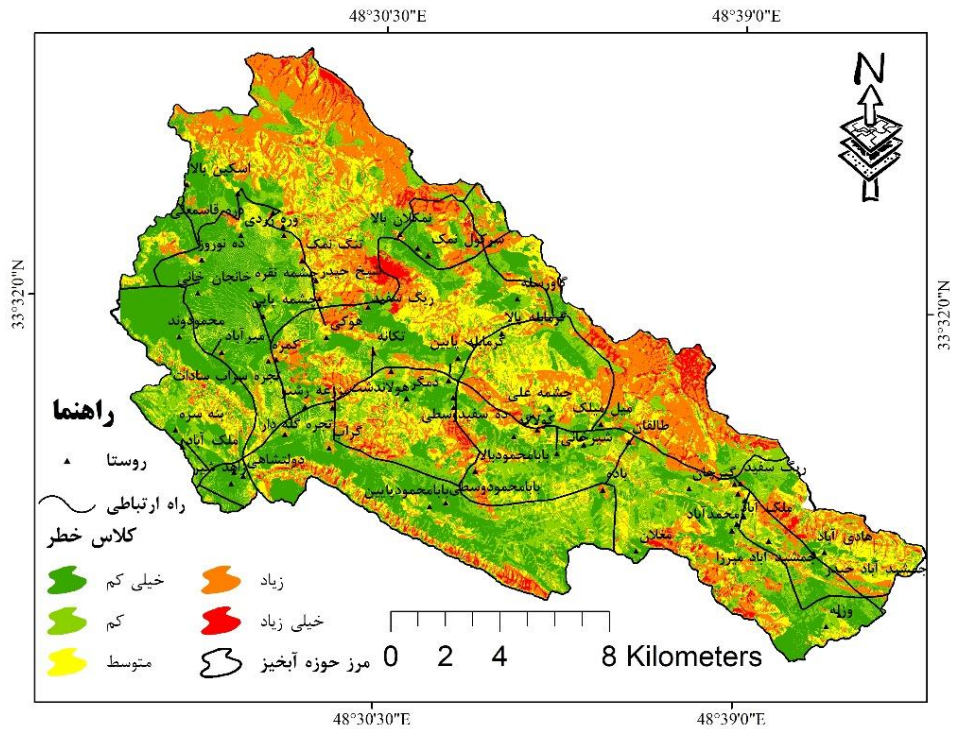
نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش

پس از تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و خطی تعمیم‌یافته، نقشه حاصله با استفاده از طبقه‌بندی برابر به پنج کلاس خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۵ و ۶).

با توجه به نتایج بررسی عوامل مؤثر با شاخص‌های مورد نظر عوامل انحنای سطح و NDVI به دلیل هم‌راستایی حذف شدند و عوامل شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، زمین‌شناسی، شبکه زه‌کشی (فاصله از رودخانه)، جاده (فاصله از جاده)، گسل (فاصله از گسل)، شاخص‌های توپوگرافیک (شاخص توان رودخانه (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و شاخص طول شیب (LS))، شاخص‌های ژئومورفولوژیک (شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) و شاخص قدرت بردار یا اندازه‌گیری زبری سطح (VRM) کاربری



شکل ۵: نقشه شدت حساسیت‌پذیری زمین لغزش با مدل ماشین بردار پشتیبان حوزه آبخیز کرگانه



شکل ۶: نقشه شدت حساسیت پذیری زمین لغزش با مدل خطی تعمیم یافته حوزه آبخیز کرگانه

خطر زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین لغزش واقع شدند. حدود ۱۱۷ کیلومتر از راه‌های ارتباطی این حوزه در کلاس خطر بالا و خیلی بالا قرار گرفتند.

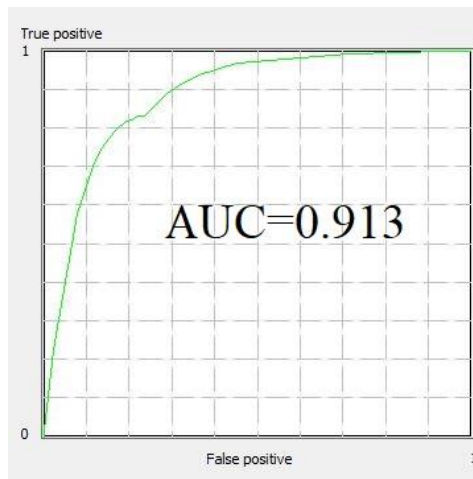
براساس نقشه شدت حساسیت پذیری زمین لغزش با مدل ماشین بردار پشتیبان (شکل ۵)، روستاهای جمشیدآباد حیدر، میلمیک، گرمابله بالا، بنه سوره، محمودآباد بالا، اسکین بالا، چشمه پاپی، دره قاسمعلی و شیخ حیدر در

جدول ۳: توزیع فراوانی کلاس‌های حساسیت پذیری زمین لغزش با مدل ماشین بردار پشتیبان و خطی تعمیم یافته آبخیز کرگانه

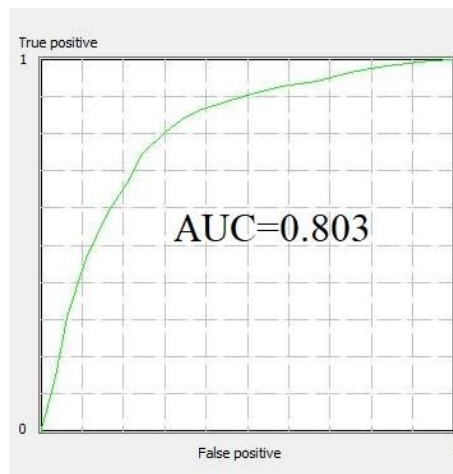
کلاس خطر	طبقات نقشه خطر	صفات بیانی	ماشین بردار پشتیبان		خطی تعمیم یافته	
			درصد مساحت	مساحت طبقه (ha)	درصد مساحت	مساحت طبقه (ha)
۱	۰-۰/۲	خیلی کم	۵۱/۸	۱۵۲۴۰/۴۸	۲۸/۷	۸۴۵۷/۲۵
۲	۰/۲-۰/۴	کم	۱۲/۸	۳۷۷۲/۶۳	۲۴/۱	۷۰۹۴/۷۶
۳	۰/۴-۰/۶	متوسط	۶/۱	۱۷۷۴/۷۵	۲۰/۵	۶۰۳۳/۷۹
۴	۰/۶-۰/۸	زیاد	۱۵/۳	۴۵۰۱/۶۴	۲۲/۷	۶۶۶۵/۴۳
۵	۰/۸-۱	خیلی زیاد	۱۴	۴۱۲۶/۷۴	۴	۱۱۶۵/۰۱
	مجموع		۱۰۰	۲۹۴۱۶/۲۴	۱۰۰	۲۹۴۱۶/۲۴

تحقیق ۷۰ درصد نقاط زمین لغزش برای مدل سازی و ۳۰ درصد باقیمانده به منظور اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد. (شکل ۷).

ارزیابی کارایی مدل‌ها در حساسیت زمین لغزش همان‌طور که در روش کار نیز اشاره شد، مقدار AUROC به منظور ارزیابی نتایج مدل استفاده شد (شکل ۱۰). در این



شکل ۷: منحنی ROC و مقدار AUC برای ارزیابی عملکرد مدل SVM



شکل ۸: منحنی ROC و مقدار AUC برای ارزیابی عملکرد مدل GLM

شاخص قدرت بردار یا اندازه‌گیری زبری سطح (VRM) کاربری اراضی، فاصله از روستا، و خطوط هم بارش به عنوان موثرترین عوامل وقوع زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه شناخته شدند. انتخاب این عوامل حاصل نظرات کارشناسی و انجام مروری بر منابع در زمینه مدل‌های مختلف و در نهایت با کاربرد شاخص‌های مولفه‌های اصلی (PCA)، Tolerance و VIF بوده است. به عنوان نمونه عیفی (Afifi, 2021) پارامترهای درجه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، شکل شیب، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، بارندگی، لیتولوژی و کاربری اراضی، عمادالدین و همکاران (Emadodin et al, 2021) عوامل درجه شیب، جهت شیب، انحنای سطح، انحنای نیم‌رخ، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص وضعیت توپوگرافی، بارش، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از شبکه آبراهه، فاصله از جاده

در این پژوهش به منظور ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین لغزش در حوزه آبخیز کرگانه در استان لرستان از دو روش داده‌کاوی ماشین بردار پشتیبان و خطی تعمیم‌یافته استفاده شد. هدف این تحقیق ارزیابی دو مدل مورد ذکر به منظور انتخاب بهترین روش جهت مدیریت خطر زمین لغزش بوده است. ابتدا از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و بازدید صحرایی اقدام به شناخت و جمع‌آوری عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش شد و سپس با توجه به نتایج بررسی عوامل مؤثر با شاخص‌های مورد ذکر، عوامل شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، زمین‌شناسی، شبکه زهکشی (فاصله از رودخانه)، جاده (فاصله از جاده)، گسل (فاصله از گسل)، شاخص‌های توپوگرافیک (شاخص توان رودخانه (SPI)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و شاخص طول شیب (LS))، شاخص‌های ژئومورفولوژیک (شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) و

حساسیت زمین‌لغزش استفاده کرده‌اند. براساس نتایج به دست آمده از این مدل حدود ۶۴ درصد مساحت سطح حوضه در کلاس حساسیت خیلی کم و کم، حدود ۷ درصد در کلاس حساسیت متوسط و حدود ۱۹ درصد از سطح منطقه‌داری حساسیت زیاد و خیلی زیاد، قرار گرفته است (Peng et al, 2014; Esfandiary Darabad et al, 2020). (Pham et al, 2014; Lee et al, 2014; Hong et al, 2014; به منظور مقایسه عملکرد این دو مدل از شاخص نمودار شاخص ROC استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل ماشین بردار پشتیبان با سطح زیرمنحنی برابر با ۰/۹۱۳ به عنوان مدل برتر برای حوضه برگزیده شد. مدل خطی تعمیم‌یافته با سطح زیرمنحنی برابر با ۰/۸۰۳ در اولویت بعدی قرار دارد. نتایج ارزیابی کارایی مدل‌های مورد بررسی در این تحقیق نشان داد که هر دو مدل (به عنوان مدل‌های داده‌کاوی) کارایی بالایی را در زمینه حساسیت پذیری زمین‌لغزش در حوضه آبخیز کرگانه از خود نشان دادند. نتایج این پژوهش با نتایج تحقیقات کرزادی و همکاران (Kornejady et al, 2020)، حیدری و همکاران (Heydari et al, 2020)، چن و همکاران (Chen et al, 2014)، رحمتی و همکاران (Rahmati et al, 2018) و پورقاسمی و رحمتی (Pourghasemi and Rahmati, 2018) همخوانی دارد. مدل ماشین بردار پشتیبان نه تنها نتایج بهتری، بلکه نتایج کاربردی‌تری نیز ارائه می‌دهد؛ به طوری که با تطبیق نتایج بدست آمده با شرایط واقعی موجود از طریق بازدیدهای میدانی، تطبیق بسیار بالای بین نتایج نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از این مدل و شواهد واقعی موجود در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. به طوری که با فرض تمرکز عملیات مدیریتی در کلاس‌های با حساسیت بالا و همچنین انتخاب مدل ماشین بردار پشتیبان به عنوان مدل برتر، حدود ۷۰ درصد از مساحت منطقه از روند مدیریتی خارج شده و سبب تخصیص منابع مالی و زمان کم‌تری نیز خواهد شد. با تطبیق نقشه‌های زمین‌شناسی و خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز کرگانه نتیجه‌گیری شد که آهک خورده شده کرتاسه (K) بیشترین مساحت خطر زیاد و خیلی زیاد (حدود ۷۴ درصد) وقوع زمین‌لغزش را به خود اختصاص داده است. و سازندهای کنگلومرای بختیاری (Bk) و کوآترنری (Qt) به ترتیب با حدود ۱۴ و ۴ درصد در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در مدیریت آینده این حوضه

(Shano et al, 2021) فاکتورهای لیتولوژی، شرایط آب زیرزمینی، فاصله از گسل، پارامترهای مورفومتریک (شیب، جهت و انحنا)، کاربری و بارش شانو و همکاران (Shano et al, 2021)، پارامترهای داده‌های زمین‌لرزه، بارش، DEM، TWI، SPI، شبکه زهکشی، شیب، جهت و مخازن آب را به عنوان عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش انتخاب کرده‌اند. شرایط طبیعی حوزه آبخیز کرگانه مانند زمین‌شناسی، شرایط ناهمواری‌ها، ژئومورفولوژی و تکتونیک و همچنین عوامل تشدیدکننده انسانی مانند تغییر کاربری و راه‌های روستایی بستر مناسبی را برای وقوع زمین‌لغزش به وجود آورده که در مجموع ۹۵ مورد در حوزه آبخیز کرگانه شناسایی شد. شیب یکی از پارامترهای تأثیرگذار در ناپایداری‌های دامنه‌ای محسوب می‌شود. به طور کلی میزان شیب نقش مهمی را در عواملی همچون نفوذ آب در دامنه‌ها، زاویه شکست و چسبندگی خاک می‌گذارد. در عامل شیب، با افزایش شیب حساسیت زمین‌لغزش افزایش یافته است که نماینده افزایش نیروی گرانش در شیب‌های بالا هست. لذا عامل شیب نسبت به ارتفاع یک عامل بهتر و کامل‌تر (به لحاظ اطلاعات گرانشی موجود) برای مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش معرفی می‌شود. در ارتباط با شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) و ارتباط این شاخص با وقوع زمین‌لغزش می‌توان گفت که از آنجایی که میزان بالای این شاخص نشان‌دهنده بالآمدگی و فعالیت نئوتکتونیک است در نتیجه ناهمواری، به هم‌ریختگی و زبری سطوح و افزایش شیب بیشتری رخ می‌دهد، که باعث مساعد شدن شرایط وقوع زمین‌لغزش می‌شود. ترکیب نتایج این تحقیق نشان داد که عوامل محیطی و انسانی در ترکیب با هم سبب شده‌اند که احتمال وقوع رخداد زمین‌لغزش در حوزه آبخیز کرگانه بالا باشد. مدل خطی تعمیم یافته با گسترش مدل‌های خطی حاصل می‌شود. این مدل در تحقیقات کامیلو و همکاران (Camilo et al, 2017)، چن و همکاران (Chen et al, 2019)، پراجیشا و همکاران (Prajisha et al, 2023) مورد ارزیابی قرار گرفت و طبق نتایج این تحقیقات مدلی نسبتاً کارایی در زمینه ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین لغزش بوده است. مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) یکی از مدل‌های یادگیری ماشین نظارت شده است که به منظور طبقه‌بندی و تفکیک داده‌ها به کار می‌رود. برخی محققین در مطالعات خود از الگوریتم SVM به منظور پهنه‌بندی

به معنای عملکرد عالی مدل است. نقشه‌ای که صحت بالا و معقول در شناسایی و تفکیک مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش دارد، به تصمیم‌گیران و مهندسان جهت معرفی مناطق با حساسیت‌های مختلف وقوع زمین‌لغزش به منظور احداث مکان مناسب برای جلوگیری از تخریب سازه‌های رسوب‌گیر، مدیریت دامنه‌ها، زهکشی و انتقال آب از مناطق حساس و نزدیک به اجرای سازه، توسعه شبکه جاده‌ای و برنامه‌های آمایش سرزمین کمک شایانی می‌نماید. با توجه به اینکه روستاهای جمشیدآباد حیدر، میل‌میلک، گرمابه بالا، بنه سوره، محمودآباد بالا، اسکین بالا، چشمه پاپی، دره قاسمعلی و شیخ حیدر در خطر زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین‌لغزش واقع شدند، پیشنهاد می‌شود که مقاوم‌سازی یا انتقال روستاها به مناطق ایمن در دستور کار مدیریتی قرار گیرد. حدود ۱۱۷ کیلومتر از راه‌های ارتباطی این حوزه در کلاس خطر بالا و خیلی بالا قرار گرفتند، پیشنهاد می‌شود که ایمن‌سازی و جابه‌جایی این راه‌ها در برنامه‌های مدیریتی این حوزه آبخیز مدنظر قرار گیرند.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

آبخیز این موارد بایستی مدنظر قرار گیرد. از نظر ژئومورفولوژی در آبخیز کرگانه، بیشترین مساحت خطر زیاد و خیلی زیاد در تپه کوهستان و تپه واقع شده است.

نتیجه‌گیری

تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش به‌عنوان سنگ بنای تحقیقات زمین‌لغزش شناخته شده و در مواقع بحرانی به‌عنوان یک ابزار مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه شناسایی مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش براساس روش‌های سنتی و نظرات کارشناسی از دقت مناسبی برخوردار نیست، استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشین مانند روش ماشین بردار پشتیبان امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. نقشه حساسیت می‌تواند گام ابتدایی و مقدماتی به‌منظور ارزیابی خطر زمین‌لغزش‌های آتی محسوب می‌شود. برای تولید یک نقشه قابل اطمینان و کاربردی به منظور حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش، داشتن یک چهارچوب تلفیقی از عوامل مؤثر محرک و شرایط محیطی مورد نیاز است. تفسیر نتایج حاصل از ترسیم منحنی ROC نشان داد که دقت مدل در برآورد مناطق دارای حساسیت هم در مرحله آموزش و هم در مرحله اعتبار سنجی به ترتیب عالی و خیلی خوب بوده است که براساس نتایج فیلیپس و همکاران (Phillips et al, 2006)

پانویس

- 1-Principal Component Analysis
- 2-Variance Inflation Factor
- 3-Maximum likelihood diagram

- 4-Kaiser-Meyer-Olkinmeasure of Sampling
- 5-Eigenvalue
- 6-Selection Criteria

References

- Afifi, M.A., 2021. Spatial analysis of landslide risk with emphasis on geomorphological factors using random forest model (case study: Larestan city in Fars province). *Natural Geography Quarterly*, v. 14(51), p. 53-39 (In Persian).
- Alipour, H. and Malekiyan, A., 2015. Zoning the Landslide Hazard in Jahan Watershed in the North Khorasan Province, *Geography and Development*, V. 13(39), P. 165-180 (In Persian).
- Arab Ameri, A.R., Rezaei, K., Yamani, M. and Shirani, K., 2018. Landslide spatial modeling: performance assessment of integrated model of data driven EBF model and knowledge driven AHP model (Case study: ferydoun shahr watershed), *Journal of Water and Soil Conservation*, v. 25(5), p. 47-67 (In Persian).
- Balogun, A.L., Rezaie, F., Pham, Q.B., Gigović, L., Drobnjak, S., Aina, Y.A., Panahi, M., Temitope, S. and Yekeen, S.L., 2021. Spatial prediction of landslide susceptibility in western Serbia using hybrid support vector regression (SVR) with GWO, BAT and COA algorithms. *Geoscience Frontiers*, v. 12(3), Doi: 10.1016/j.gsf.2020.10.009.
- Castro Camilo, D., Lombardo, L., Mai, P.M., Castro Camilo, D., Lombardo, L., Mai, P.M., Dou, J. and Huser, R., 2017. Handling high predictor dimensionality in slope-unit-based landslide susceptibility models through LASSO-penalized Generalized Linear Model, *Environmental Modelling & Software*, v. 97, p. 145-156. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.08.003>.
- Chen, W., Pourghasemi, H.R., Kornejady, A. and Zhang, N., 2017. Landslide spatial modeling:

- Introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques, *Geoderma*, v. 305, p. 314-327.
- Chen, W., Pourghasemi, H.R., Zhang, S. and Wang, J., 2019. A Comparative Study of Functional Data Analysis and Generalized Linear Model Data-Mining Techniques for Landslide Spatial Modeling, *Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences*, p. 467-484.
- Dahal, R.K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S. and Paudyal, P., 2008. Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, v. 102(3-4), p. 496-510.
- Emadodin, S., Taheri, V., Mohammad ghasemi, M. and Nazari, Z., 2021. Landslide Susceptibility Zonation applying frequency ratio models and statistical index in Oghan watershed, *Quantitative Geomorphological Research*, v. 9(4), p. 75-95 (In Persian).
- Ercanoglu, M. and Gokceoglu, C., 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental geology*, v. 41(6), p. 720-730.
- Esfandiary Darabad, F., rahimi, M., navidfar, A. and Arsalan, M., 2020. Assessment of landslide sensitivity by neural network method and Vector machine algorithm (Case study: Heyran Road - Ardebil province). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 18-33 (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 (In Persian).
- Ghiassi, S.S., Rajabzadeh, F., Najirda, S., Feiznia, S. and Nazari Samani, A., 2017. A determination of effective factors on shallow landslide occurrence in Khiov-Chai watershed, *Watershed Engineering and Management*, v. 9(2), p. 140-154 (In Persian).
- Heydari, N., Habibnejad, M., Kavian, A. and Pourghasemi, H.R., 2020. Landslide Susceptibility Modelling Using the Random Forest Machine Learning Algorithm in the Watershed of Rais-Ali Delvari Reservoir, *Watershed Management Research*, v. 33(1), p. 2-13 (In Persian).
- 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.
- Karimi Sangchini, E., Arami, S., Rezaii Moghadam, H., Khodabakhshi, Z. and Jafari, R., 2014. Landslide Risk Assessment for Baba Heydar Watershed, Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran, *Iranian journal of earth sciences*, v. 6(2), p.121-132.
- Kornejady, A., Ownegh, M., Pourghasemi, H.R., Bahremand, A. and Motamedi, M., 2020. (Landslide susceptibility prediction using the coupled Mahalanobis distance and machine learning models (case study: Owghan watershed, Golestan province. *Researches in Earth Sciences*, v. 11(2), p. 1-18 (In Persian).
- Kornejady, A., Pourghasemi, H.R. and Afzali, S.F., 2019. Presentation of RFFR new ensemble model for landslide susceptibility assessment in Iran, In *Landslides: theory, practice and modelling*, p. 123-143.
- 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), p. 48-54.
- Meten, M., PrakashBhandary, N. and Yatabe, R., 2015. Effect of landslide factor combinations on the prediction accuracy of landslide susceptibility maps in the Blue Nile Gorge of Central Ethiopia, *Geoenvironmental Disasters*, v. 2(1), p. 1-17.
- Panahi, M., Gayen, A., Pourghasemi, H.R., Rezaie, F. and Lee, S., 2020. Spatial prediction of landslide susceptibility using hybrid support vector regression (SVR) and the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with various metaheuristic algorithms. *Science of the Total Environment*, v. 741, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139937.
- Pandey, V.K., Pourghasemi, H.R. and Sharma, M.C., 2020. Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor, Garhwal Himalaya, *Geocarto International*, v. 35(2), p. 168-187.
- Peng, L., Niu, R., Huang, B., Wu, X., Zhao, Y. and Ye, R., 2014. Landslide susceptibility mapping based on rough set theory and support vector machines: A case of the Three Gorges area, China, *Geomorphology*, v. 204, p. 287-301.
- Pham, B.T., Pradhan, B., Bui, D.T., Prakash, I. and Dholakia, M.B., 2016. A comparative study of different machine learning methods for landslide susceptibility assessment: A case study of Uttarakhand area (India), *Environmental Modelling & Software*, v. 84, p. 240-250.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions, *Ecological modelling*, v. 190(3), p. 231-259.
- Pourghasemi, H.R. and Rahmati, O., 2018. Prediction of the landslide susceptibility: Which

- algorithm, which precision? *Catena*, v. 162, p. 177-192.
- Prajisha, C.K., Achu, A.L. and Joseph, S., 2023. Landslide susceptibility modeling using a generalized linear model in a tropical river basin of the Southern Western Ghats, India, *Water, Land, and Forest Susceptibility and Sustainability*, v. 1, p. 237-266.
- Rabet, A., Dastranj, A., Asadi, S. and Asadi Nalivan, O., 2020. Determination of Groundwater Potential Using Artificial Neural Network, Random Forest, Support Vector Machine and Linear Regression Models (Case Study: Lake Urmia Watershed), *Iranian journal of Ecohydrology*, v. 7(4), p. 1047-1060 (In Persian).
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H. and Feizizadeh, B., 2018. Assessing the effectiveness of the maximum entropy model to gully erosion susceptibility prediction in the Kashkan-Poldokhtar Watershed, *Watershed Engineering and Management*, v. 10(4), p. 727-738 (In Persian).
- Roustaie, S., Mokhtari, D. and Ashrafi Fini, Z., 2020. Landslide hazard zonation in Taleghan watershed using Shannon entropy index, *Journal of Geography and Planning*, v. 24(71), p. 125-150 (In Persian).
- Shano, L., Raghuvanshi, T.K. and Meten, M., 2021. Landslide Hazard Zonation using Logistic Regression Model: The Case of Shafe and Baso Catchments, Gamo Highland, Southern Ethiopia, *Geotechnical and Geological Engineering*, p. 1-19.
- Trigila, A., Frattini, P., Casagli, N., Catani, F., Crosta, G., Esposito, C. and Lari, S., 2013. Landslide susceptibility mapping at national scale: the Italian case study, In *Landslide science and practice*, p. 287-295. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Yarahamdi, J., Raushiti, Sh., Sharifikia, M. and Raushiti, M., 2015. Identification and monitoring of domain instability by differential interferometric method (case study: Garmi Chaymianeh Watershed), *Quantitative Geomorphology Research*, v. 3(4), p. 44-59 (In Persian).