



Research Article

Landslide Susceptibility Predicting Using the Maximum Entropy Machine Learning Algorithm

ALi Dastranj^{1*} , Ebrahim Karimi²

1-Department of Soil Conservation and Watershed Management, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

2-Department of Soil Conservation and Watershed Management, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Khoramabad, Iran

Received: 13 Jun 2022 Accepted: 06 Dec 2022

Extended Abstract

Introduction

Landslides are one of the most destructive natural disasters. Landslides cause damage to a variety of engineering structures, residential areas, vital arteries such as roads, water and gas pipelines, power lines, forests and pastures, agricultural lands, sediments and muddy floods. When landslides occur not much work can be done, but damage can be reduced with pre-determined planning. Therefore, it is necessary to prepare a comprehensive landslide susceptibility map to reduce possible damage to people and infrastructure. In recent years, the use of machine learning methods and geographic information systems (GIS) in landslide sensitivity zoning has expanded and landslide sensitivity maps are prepared with acceptable accuracy. The purpose of this study is to prioritize the factors affecting the occurrence of landslides and zoning the sensitivity of its occurrence using the maximum entropy method in the Neishabour watershed, located in Khorasan Razavi province.

Materials and Methods

Bar watershed is one of the sub-basins of Bar River, which is located in the north of Neishabour city. This basin is limited from the northeast, east and south to the heights of Lar limestone ridge, from the west to Jurassic shales and from the northwest to the marls of Delichai Formation. In this study, landslide zoning was performed using the maximum entropy model. First, the landslides in the basin were extracted through the landslide map in the General Department of Natural Resources of Khorasan Razavi Province. Then, by conducting field visits in the basin, using local information and GPS devices, as well as using Google Earth satellite images, this map was corrected, and finally, the landslide inventory map was prepared as a point. The most important factors affecting landslides in the region include slope, slope direction, elevation classes, geology, drainage network (distance from river), road (distance from road), fault (distance from fault), topographic indexes (Stream Power Index (SPI)), Topographic Wetness Index (TWI) and Slope Length index (LS)), geomorphological indexes (Topographic Position Index (TPI)), Topographic Roughness Index (TRI) and Curvature Index, land use, Normalized Vegetation Difference Index (NDVI) Co-precipitation lines were identified and analyzed as effective factors in landslide occurrence in the study area. In order to model the sensitivity of landslides, 70% of landslides were randomly selected for training (calibration) of the model and 30% for validation of model results. The maximum entropy model was modeled as a dependent model of the presence of potential regions in MaxEnt software.

Citation: Dastranj, A. and Karimi, E., 2022. Landslide Susceptibility Predicting Using the Maximum Entropy Machine Learning Algorithm, *Res. Earth. Sci.* 13(3), (76-96) DOI: 10.48308/esrj.2022.102965

* Corresponding author E-mail address: Dastranj66@gmail.com





The final landslide susceptibility map was zoned in five talent classes (very low, low, medium, high and very high) based on the turning points of the cumulative frequency of the pixels. In order to evaluate the results of the model, ROC curve was used using two sets of training and validation data.

Results and Discussion

Using information provided by the General Department of Natural Resources of Khorasan Razavi Province, extensive field studies, and the use of Google Earth images, a total of 74 landslides were identified in the Bar Watershed. The sensitivity of landslides has decreased with increasing altitude up to 1650 meters and has increased from 1650 to 3200 meters. The highest susceptibility to landslides is in the northern and eastern slopes of the study area. The results of the slope study showed that with increasing the slope to 40 degrees, the sensitivity to landslides has increased and after 40 degrees the sensitivity has decreased. Landslide susceptibility has decreased with increasing distance from the fault. Regarding the effect of distance from the road on the occurrence of landslides, with increasing distance from the road to a distance of 4000 meters from the road, there is a decreasing sensitivity trend, but after this distance, this trend has increased, which is probably due to other factors. Among the different uses of the study area, weak pasture uses and rocky outcrops have the highest susceptibility to landslides, respectively. Q2 and PLQm rock units have the greatest impact on landslide susceptibility. With increasing TPI index, the sensitivity of landslide is also increasing. With increasing TRI index, the sensitivity of landslide occurrence has decreased. Slip sensitivity has also increased with increasing slope length. With increasing Stream Power Index (SPI), landslide sensitivity has increased and then decreased. According to the results of Jackknife diagram, among the selected parameters in the modeling process, the slope length (LS) layers, respectively, slope direction and slope have the most participation and impact in the occurrence of landslide landslides. According to the results, 13% of the area has high and very high sensitivity, 73% has low and very low sensitivity and 14% of the area has medium sensitivity. The area under the curve (AUC) based on the relative performance detection curve indicates excellent accuracy (AUC = 0.92) in the training phase and very good (AUC = 0.87) in the validation phase. Based on the results of the maximum entropy model, about 13% of the Neishabour load field is located in the high and very high sensitivity zones.

Conclusion

Distribution factor analysis showed that the slope length (LS) factors for slope and slope direction have the highest participation and impact in the occurrence of landslide landslides and distance from the fault, NDVI index and TWI index have the least impact on landslide occurrence. Interpretation of the results of ROC curve mapping showed that the accuracy of the model in estimating sensitive areas in both training and validation stages was excellent and very good, respectively, which according to the results of Phillips et al. (2006) means excellent performance of the model. is. Based on the obtained results, it can be said that the maximum entropy model has high speed and accuracy in determining landslide-sensitive areas due to the unlimited ability of the maximum entropy algorithm to measure complex linear and other linear relationships. Identifying sensitive areas, using this model can be considered as a solution. The results of this study also showed that the maximum entropy model is a promising approach for modeling landslide sensitivity. Because the plan has a high accuracy in identifying and separating landslide sensitive areas, decision makers and engineers to introduce areas with different landslide sensitivities in order to build a suitable place to prevent the destruction of sediment structures, slope management, drainage and transfer Water from sensitive areas close to the implementation of structures, road network development and land use planning programs will help. The resultant landslide susceptibility maps can be useful in appropriate watershed management practices and for sustainable development in the region.

Keywords: Prioritization, zoning, landslide, sensitivity, maximum entropy model.



پیش‌بینی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با الگوریتم یادگیری ماشین بیشینه آنتروپی (حوزه آبخیز بار نیشابور)

علی دسترنج*، ابراهیم کریمی سنگچینی^۲

۱-بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان

رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

۲-بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی لرستان،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران

(پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۳ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۱/۹/۱۵

چکیده

زمین‌لغزش یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی محسوب می‌شود. در مواجهه با زمین‌لغزش در لحظه وقوع، کار چندان نمی‌توان انجام داد، درحالی که می‌توان با برنامه‌ریزی مناسب و پیش‌بینی شده، خسارات و تلفات احتمالی را کاهش داد. بنابراین تهیه نقشه جامع حساسیت وقوع زمین‌لغزش برای کاهش آسیب‌های احتمالی به افراد و زیرساخت‌ها لازم و ضروری است. هدف پژوهش حاضر، اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت وقوع آن با استفاده از روش حداکثر آنتروپی در حوزه آبخیز بار نیشابور، واقع در استان خراسان رضوی 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. بدین منظور با توجه به مرور منابع گسترده، ۱۶ عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه انتخاب و لایه رقومی عوامل مؤثر در سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شدند. سپس لایه زمین‌لغزش‌های موجود تهیه و به‌منظور مدل‌سازی حساسیت وقوع زمین‌لغزش به صورت تصادفی ۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها به‌منظور آموزش (واسنجی) مدل و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی نتایج مدل انتخاب شدند. سپس با استفاده از الگوریتم بیشینه آنتروپی، ارتباط بین عوامل مؤثر و موقعیت زمین‌لغزش‌ها در نرم‌افزار MaxENT، محاسبه و به‌منظور طبقه‌بندی نقشه حساسیت زمین‌لغزش به محیط GIS منتقل شد. در ادامه به‌منظور ارزیابی نتایج مدل از مقدار مساحت زیر منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) با استفاده از دودسته داده آموزش و اعتبارسنجی استفاده شد. براساس نتایج نمودار Jackknife، از بین پارامترهای انتخاب شده در فرایند مدل‌سازی به ترتیب لایه‌های طول شیب (LS)، جهت شیب و شیب بیشترین مشارکت و تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های حوزه بار را دارند. سطح زیر منحنی (AUC) براساس منحنی تشخیص عملکرد نسبی، نشان‌دهنده دقت عالی (AUC=۰/۹۲) در مرحله آموزش و خیلی خوب (AUC=۰/۸۷) در مرحله اعتبارسنجی هست. براساس نتایج مدل حداکثر آنتروپی، حدود ۱۳ درصد از حوزه بار نیشابور در پهنه حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، حداکثر آنتروپی، حساسیت، حوزه آبخیز بار، زمین‌لغزش.

مقدمه

رویدادهای ناگوار طبیعی از بزرگ‌ترین دشمنان طبیعی انسان‌ها است و هر ساله موجب کشته و مجروح شدن هزاران نفر و بی‌خانمان شدن میلیون‌ها انسان در کل دنیا می‌شود. زمین‌لغزش از جمله مهم‌ترین آنان است که بر زندگی انسان‌ها تأثیرگذار هست (حیدری و همکاران، ۱۳۹۹). زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از حرکات توده‌ای، حرکت یک توده سنگ، آوار، خاک درروی دامنه به سمت پایین تحت تأثیر نیروی جاذبه است (قاسمیان و همکاران، ۱۳۹۶). این پدیده زمانی رخ می‌دهد که نیروی حاصل از وزن مواد بیش از نیروی مقاومت ناشی از نیروی برشی خاک باشد (علی پور و ملکیان، ۱۳۹۴). زمین‌لغزش موجب خسارت به انواع سازه‌های مهندسی، مناطق مسکونی، شریان‌های حیاتی مانند راه‌ها، لوله‌های انتقال آب، گاز، خطوط انتقال نیرو، جنگل‌ها و مراتع، زمین‌های کشاورزی، ایجاد رسوب و سیلاب‌های گل‌آلود می‌شود (Liu and Duan, 2018; Wang et al, 2018). کشور ایران با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناسی و اقلیمی همواره تحت تأثیر پدیده زمین‌لغزش قرار گرفته و موارد متعددی از خسارت‌های ناشی از این پدیده در کشور گزارش شده است (کوه‌پیمای، ۱۳۹۶). براساس یک برآورد اولیه، سالانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت‌های مالی از طریق این پدیده بر کشور تحمیل می‌شود (قاسمیان و همکاران، ۱۴۰۰). طبق گزارش جهانی مخاطرات طبیعی سه در سال ۲۰۱۲، لغزش در میان هفت بلاای طبیعی خطرناک جهان قرار گرفت (فتیحی و همکاران، ۲۰۱۵؛ روستایی و همکاران، ۱۳۹۹). امروزه با توجه به تأثیرات مخرب وقوع زمین‌لغزش نیاز فزاینده‌ای جهت مدیریت زمین‌لغزش به‌صورت کمی و پهنه‌بندی آن وجود دارد (felletal et al, 2018) و

شناسایی مناطق مستعد و پهنه‌بندی پتانسیل وقوع یا حساسیت زمین‌لغزش بسیار ضروری و مهم هست (تیموری و همکاران، ۱۳۹۸). حساسیت زمین‌لغزش به بررسی و ارزیابی زمین‌لغزش‌های موجود در یک منطقه، بدون توجه به زمان رویداد آن می‌پردازد (Chen et al, 2018). تهیه نقشه وقوع زمین‌لغزش، ابزاری اساسی برای فعالیت‌های مدیریت در نواحی کوهستانی است (Dahal et al, 2008؛ قاسمیان و همکاران، ۱۴۰۰). نقشه حساسیت زمین‌لغزش سنگ بنای برای تصمیم‌گیران برای پیشنهاد اقدامات فنی، نظارتی و یا ترکیبی هست (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 (کرنژادی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Ercanoglu et al, 2002). در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش گسترش پیدا کرده است و نقشه‌های حساسیت وقوع زمین‌لغزش با دقت قابل‌قبولی تهیه می‌شوند. مدل‌های یادگیری ماشین 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, 2013 Trigila et al, 21013؛ کرنژادی، ۱۳۹۹). مدل حداکثر آنتروپی یکی از روش‌های یادگیری ماشین است که در سال‌های اخیر به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. تیموری و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از روش حداکثر آنتروپی در استان لرستان و با کمک ۱۱ عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، اقدام به پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش کردند. نتایج حاصل سطح

زمین‌شناسی، اقلیمی و فعالیت‌های انسانی دارای پتانسیل وقوع زمین‌لغزش است. براساس داده‌های تهیه شده از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی تعداد زیادی زمین‌لغزش در این منطقه رخ داده است که موجب تخریب جاده‌های عشایری و باغات منطقه شده است. براساس مطالعه انجام شده توسط حلاجی و همکاران (۱۳۹۹)، تعداد ۶۸ زمین‌لغزش در منطقه شناسایی شده است. همچنین با اصلاح داده‌های زمین‌لغزش تهیه شده از اداره کل منابع طبیعی به کمک تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و بازدیدهای میدانی تعداد ۷۳ زمین‌لغزش شناسایی شد که حاکی از پتانسیل بالای پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه است. لذا هدف این مطالعه تعیین مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز نیشابور با استفاده از مجموعه‌ای از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و با کمک روش حداکثر آنتروپی، اولویت‌بندی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در این منطقه و ارزیابی عملکرد مدل حداکثر آنتروپی هست. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند جهت برنامه‌ریزی در جهت کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش و برنامه‌های توسعه‌ای منطقه مورد استفاده مسئولان و تصمیم‌گیران قرار بگیرد.

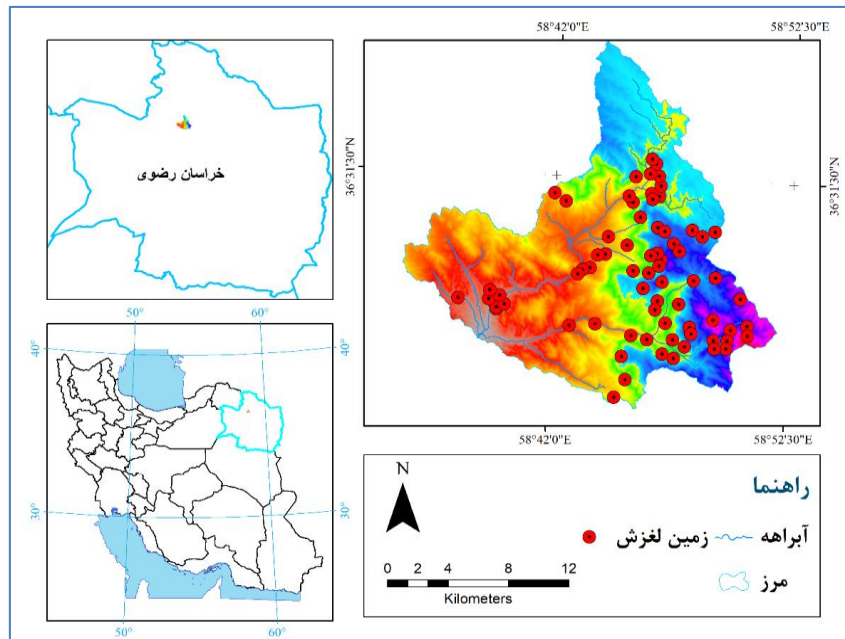
منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز بار نیشابور یکی از زیر حوزه‌های حوزه آبریز رودخانه بار است که در شمال شهرستان نیشابور قرار دارد. این حوزه از شمال شرق و شرق و جنوب به ارتفاعات ستیغ ساز آهکی لار، از غرب به شیل‌های ژوراسیک و از شمال غرب به مارن‌های سازند دلیچای محدود می‌شود. از نظر موقعیت جغرافیایی، حوزه آبخیز بار در محدوده طول جغرافیایی $58^{\circ} 23' 23''$ تا $58^{\circ} 52' 4''$ شرقی و

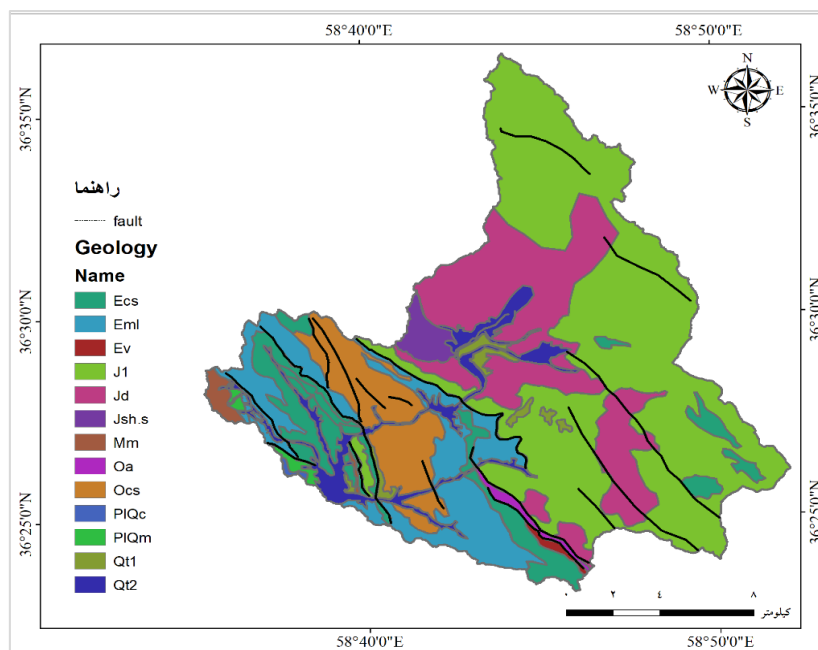
زیر منحنی (AUC) براساس منحنی ROC نشان‌دهنده دقت عالی ($AUC=0/9$) در مرحله آموزش و خیلی خوب ($AUC=0/83$) در مرحله اعتبارسنجی مدل بود. رجب‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) کارایی الگوریتم حداکثر آنتروپی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در ارزیابی حساسیت پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق در حوزه آبخیز خیاوچای در استان اردبیل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی عملکرد مدل‌سازی با الگوریتم حداکثر آنتروپی بسیار بهتر از دیگر مدل‌ها مانند رگرسیون لجستیک است. کرکس (Kerekes, 2018) با استفاده از روش حداکثر آنتروپی و هفت پارامتر مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در رومانی پرداختند. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از منحنی ROC نشان داد که ب $AUC=0/84$ ، مدل عملکرد بسیار خوبی در ارزیابی حساسیت وقوع زمین‌لغزش دارد. کرنژادی و همکاران (Kornejadi, 2017)، به منظور ارزیابی حساسیت به زمین‌لغزش در حوزه زیارت در استان گلستان از مدل حداکثر آنتروپی استفاده کردند. با تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، نتیجه را خوب ارزیابی نمودند. پاندی و همکاران (Pandey, 2018) دو روش حداکثر آنتروپی و ماشین بردار پشتیبان را به منظور 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. با توجه به مرور منابع انجام شده تاکنون مطالعات جامعی در ارتباط با پهنه‌بندی وقوع زمین‌لغزش در حوزه نیشابور استان خراسان رضوی با توجه به کوهستانی بودن و اهمیت این منطقه در کشاورزی و تولیدات دامی و باغی، انجام نشده است. این حوزه به دلیل شرایط

رسوبی دوران دوم و سوم زمین‌شناسی بر روی آن گسترش یافته است. نقشه زمین‌شناسی حوزه آبخیز بار در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین مساحت و درصد مساحت سازندهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ نمایش داده شده است.

عرض جغرافیایی $36^{\circ} 28' 9''$ تا $36^{\circ} 26' 7''$ شمالی قرار دارد و در دامنه‌های جنوبی بینالود واقع شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. حوزه آبخیز بار بخشی از زیر زون ساختاری بینالود-آلداغ است که در نتیجه تحولات زمین‌ساختی واقع در آن، انواع واحدهای سنگی و



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز بار



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی حوزه آبخیز بار

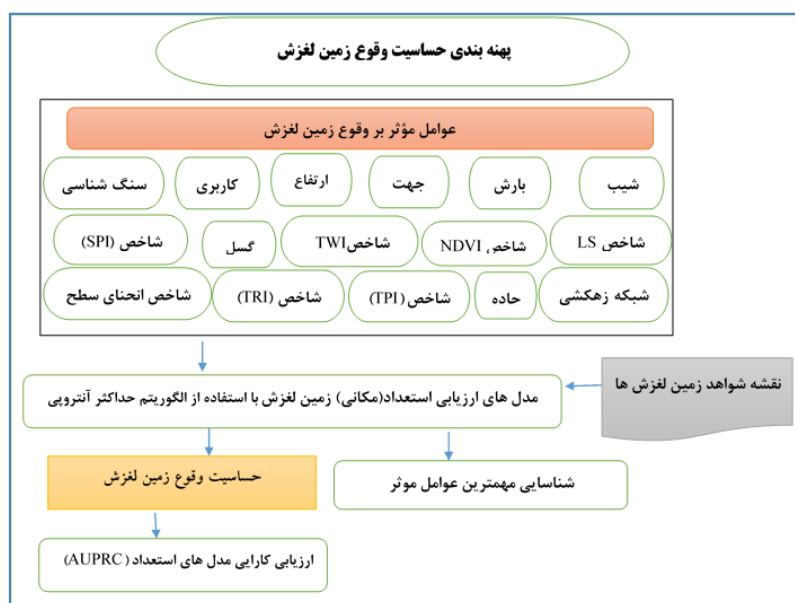
جدول ۱: جدول مساحت و درصد مساحت سازندهای زمین‌شناسی حوزه آبخیز بار

نام سازند	علائم اختصاری	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
کنگلومرای ائوسن زیرین	ECs	۱۴۴۶/۰۳	۵/۲۴
واحد آهکی و مارنی ائوسن	Eml	۲۳۸/۷۲	۰/۸۷
سنگ‌های آتشفشانی ائوسن	Ev	۱۴۲/۲۳	۰/۵۲
سازند آهکی لار	J1	۳۲/۱۴	۰/۱۲
سازند دلیچای	Jd	۲۲۳۱/۴۲	۸/۰۹
شیل و ماسه ژوراسیک	Jsh.s	۱۶۶/۹۲	۰/۶۱
کنگلومرای و ماسه سنگ الیگوسن	Ocs	۴۱۳۳/۰۶	۱۴/۹۸
کنگلومرای پلیوکواترن	PIQc	۱۳۴۴۴/۶۱	۴۸/۷۳
کنگلومرای	PIQm	۸۶/۳۹	۰/۳۱
رسوبات آبرفتی قدیمی	Qt1	۳۱۰۷/۴۵	۱۱/۲۶
رسوبات آبرفتی جدید	Qt2	۱۹۳۹/۲۸	۷/۰۳
مجموع		۲۷۵۸۸/۵	۱۰۰

مواد و روش‌ها

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. در این تحقیق با

استفاده از مدل بیشینه آنتروپی و ارزیابی ۱۶ عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبخیز بار نیشابور پهنه‌بندی و در نهایت براساس شاخص AUC ارزیابی کارایی مدل انجام گرفت. نمودار جریانی انجام مطالعه در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳: نمودار جریانی مراحل انجام تحقیق

تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش

یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی خطر زمین‌لغزش، شناسایی و تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های

موجود حوضه است. در این تحقیق، ابتدا زمین‌لغزش‌های موجود در حوضه از طریق نقشه زمین‌لغزش‌های موجود در اداره کل منابع طبیعی

رخ داده بودند شناسایی شد. این لغزش‌ها بیشتر در کنار جاده‌ها و جاهایی که توسط انسان دستکاری شده بود و همچنین در کناره دیواره آبراهه واقع شده بودند. تصاویری از این لغزش‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. در نهایت ۷۳ عدد زمین‌لغزش به منظور مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش شناسایی شد. نقشه زمین‌لغزش‌های مشاهده‌ای در حوزه آبخیز بار شکل ۱ قابل مشاهده است. به منظور مدل‌سازی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی، ۷۰ درصد زمین‌لغزش‌های شناسایی شده به منظور آموزش و ۳۰ درصد باقی‌مانده به منظور اعتبارسنجی مدل استفاده گردید.

استان خراسان رضوی (حاصل از تفسیر عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ در سال ۱۳۸۲)، استخراج شد. سپس از طریق انجام بازدید میدانی در حوضه، استفاده از اطلاعات محلی و دستگاه GPS و همچنین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth اقدام به اصلاح این نقشه شد و در نهایت نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها به صورت نقطه‌ای تهیه گردید. براساس داده‌های منابع طبیعی ۵۹ زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه رخ داده است. که از طریق بازدید میدانی مشخص شد که ۲۴ عدد از این زمین‌لغزش‌ها وجود ندارد. همچنین از طریق بازدیدهای میدانی ۳۸ عدد زمین‌لغزش جدید که اغلب در سال‌های اخیر



شکل ۴: نمایی از زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه

به عواملی است که در وقوع زمین‌لغزش‌ها نقش مؤثری دارند. براساس مرور منابع گسترده، بازدیدهای میدانی و بررسی عوامل مؤثر در وقوع

تهیه لایه عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش اولین مرحله مطالعه پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش شناخت و جمع‌آوری اطلاعات مربوط

۱:۱۰۰۰۰۰ نیشابور و اخلمد با شماره شیت ۷۷۶۲ و ۷۷۶۳ (تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی) استخراج گردید. معمولاً در شروع زمین‌لغزش تنها یک محرک خارجی یا عامل ماشه‌ای نقش محوری دارد. بارندگی را به‌عنوان متداول‌ترین عامل ماشه‌ای وقوع زمین‌لغزش بر شمرده‌اند (طالبی و همکاران، ۱۳۸۹). نقشه بارش با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی (نیشابور، محمد نیشابور، بار و بوژان) که داخل و نزدیک به منطقه مورد مطالعه واقع شدند، با استفاده از روش میانابایی IDW استخراج شد. کاربری اراضی و پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری دامنه داشته و مطالعات مختلف تأکید بر نقش مهم آن در بررسی خطر زمین‌لغزش داشته‌اند. نقشه کاربری منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه کاربری اراضی استان خراسان رضوی که از اداره کل منابع طبیعی خراسان رضوی تهیه شد، استخراج گردید. سپس از طریق بازدید میدانی و بخصوص از طریق تصاویر ماهواره‌ای Google Earth، اصلاح گردید. شاخص NDVI با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ در محیط Google Earth engine، با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (محمدیاری و همکاران، ۱۳۹۷). رابطه ۱)

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED})$$

که در این رابطه برای سنجنده TM باند مادون قرمز (ρ_{NIR}) باند چهار و باند قرمز (ρ_{RED}) باند سه است. نقشه آبراهه‌های منطقه مورد مطالعه از نقشه توپوگرافی منطقه استخراج شد. نقشه جاده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Google Earth تهیه شده و سپس با استفاده از الگوریتم Euclidean Distance در محیط ArcGIS 10.8، نقشه فاصله از جاده و آبراهه تهیه شدند. فاصله از گسل یا به عبارتی شکستگی‌ها و خردشدگی نقش مؤثری در افزایش پتانسیل ناپایداری دامنه‌ها دارد.

زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه مهم‌ترین عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌های منطقه شامل 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 انحنای سطح (Curvature Index))، کاربری اراضی، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و خطوط هم بارش به‌عنوان عوامل مؤثر در رخداد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه، شناسایی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. لایه اطلاعاتی مربوط به این عوامل در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه گردید که در ادامه توضیحات مرتبط ارائه شده است. ارتفاع عاملی است که به‌طور غیرمستقیم نقش تعیین‌کننده در عوامل وقوع زمین‌لغزش دارد که از جمله این عوامل می‌توان به مقدار بارندگی، تغییرات دمایی، یخبندان و ذوب یخ، هوازگی فیزیکی و شیمیایی نام برد (Zare et al, 2012). نقشه مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای ALOS POLSAR تهیه گردید. نقشه عوامل شیب، درجه شیب، انحنای دامنه از نقشه DEM منطقه در محیط ArcGIS 10.8 و SAGA-GIS استخراج و تهیه شدند. زمین‌شناسی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در مطالعه زمین‌لغزش‌ها است زیرا واحدهای سنگی مختلف دارای درجات حساسیت گوناگونی در بروز این پدیده هستند. لذا در تمامی مطالعات مربوط به زمین‌لغزش‌ها، استفاده از این عامل اجتناب‌ناپذیر است. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه براساس نقشه زمین‌شناسی

که در آن α : زهکش شیب بالاست در واحد طول و β : شیب منطقه‌ای هست. شاخص طول شیب (LS) یا حمل رسوب (STI)^۲ بیانگر توان حمل آبراهه و یا به عبارتی عامل LS در مدل AUSLE است که مدل مذکور اصلاح شده معادله جهانی تلفات خاک هست. شاخص طول شیب (LS) یا حمل رسوب (STI) بیانگر توان حمل آبراهه است. در واقع تأثیر توپوگرافی را بر فرسایش مشخص می‌کند. هر چه طول شیب بیشتر باشد توان حمل رسوب بالاتری دارد در نتیجه شرایط فرسایش کناری بیشتر شده و زمین‌لغزش‌های کناری بیشتر می‌شود (بابلی مؤخر، ۱۳۹۷). این شاخص از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد:

رابطه ۴)

$$STI = \left(\frac{As}{22/13} \right)^{0/6} \left(\frac{\sin\beta}{0/0896} \right)^{1/3}$$

که در آن As : مساحت حوضه آبخیز و β : گرادیان شیب بر حسب درجه است. نقشه این لایه در محیط SAGA-GIS، تهیه شد. شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) حالت گودی و برآمدگی را مورد تمایز قرار می‌دهد. این شاخص ارتفاع هر پیکسل در مدل رقومی ارتفاع را با پیکسل مشخص اطراف آن پیکسل مقایسه می‌کند. بر این اساس شاخص TPI منفی نشان‌دهنده توپوگرافی کم ارتفاع (تقعر و گودال‌ها) و TPI مثبت نشان‌دهنده توپوگرافی زیاد (محدب و ستیغ‌ها) است (مکرم و نگهبان، ۱۳۹۳ و بابلی مؤخر، ۱۳۹۷). شاخص TPI طبق رابطه ۵ به دست می‌آید:

رابطه ۵)

$$TPI = Z_0 - \sum_{n-1} Z_{n/n}$$

که Z_0 = ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n = ارتفاع از شبکه و n = تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته شده در ارزیابی. شاخص ناهمواری توپوگرافی (TRI) نشان‌دهنده بالآمدگی و فعالیت نئوتکتونیک است در نتیجه ناهمواری، به هم

نقشه گسل منطقه مورد مطالعه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، شیت نیشابور و اخلمد استخراج گردید. سپس با استفاده سپس با استفاده از الگوریتم Euclidean Distance در محیط ArcGIS 10.8، نقشه فاصله از گسل تهیه شد. شاخص توان آبراهه گوپای میزان قدرت فرساینده‌گی جریان آب است، با افزایش آن تلاطم ناشی از جریان آب و در نتیجه زیر شویی، زمینه را جهت رخ داد لغزش‌های کناری تسهیل می‌کند. این شاخص نسبت بین مساحت بالادست یک نقطه و شیب زمین بالادست آن را به گونه‌ای نشان می‌دهد که نیمرخ عرضی و طولی آبراهه را منعکس می‌کند (بابلی مؤخر و همکاران، ۱۳۹۷). شاخص توان آبراهه (SPI) از رابطه زیر و با استفاده از دستور Stream Power در محیط نرم‌افزار SAGA، تهیه شد. (عظیم پور مقدم، ۱۳۹۴).

رابطه ۲)

$$SPI = As \tan\beta$$

که در آن As : مساحت حوزه و $\tan\beta$: مقدار شیب منطقه در هر پیکسل هست. شاخص رطوبت توپوگرافی کی ابزاری مفید و رایج برای توصیف شرایط رطوبتی در مقیاس حوضه است و مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک در حوضه‌ها را با فرض برابر بودن شیب آب زیرزمینی با شیب سطح زمین، تقریب می‌زند. که می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر روی تولید رواناب به صورت کمی بیان کند (عظیم پور مقدم، ۱۳۹۴). اگر مقادیر TWI را کلاس‌بندی کنیم، مناطقی که در یک کلاس قرار می‌گیرند به لحاظ شرایط رطوبتی تقریباً یکسان هستند و بنابراین با این شاخص می‌توان مناطقی را که احتمال اشباع شدن آن‌ها در طول وقایع بارندگی وجود دارد را در کلاس‌های مختلف پهنه‌بندی کرد. از رابطه ۳ به دست می‌آید:

رابطه ۳)

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

سه‌بعدی از سطح دوبعدی تعریف می‌شود و نشان‌دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به عبارت دیگر دیگر محدب یا مقعر بودن دامنه را نشان می‌دهد. انحنای شیب یکی از عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش می‌باشد. در انحنای شیب، خمیدگی منفی نشان‌دهنده مقعر بودن دامنه، انحنای شیب صفر نشان‌دهنده مسطح بودن دامنه و خمیدگی مثبت نشان‌دهنده محدب بودن دامنه می‌باشد (Pradhan و همکاران، ۲۰۱۰). نقشه عوامل مؤثر بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز بار در شکل ۵ نشان داده شده است.

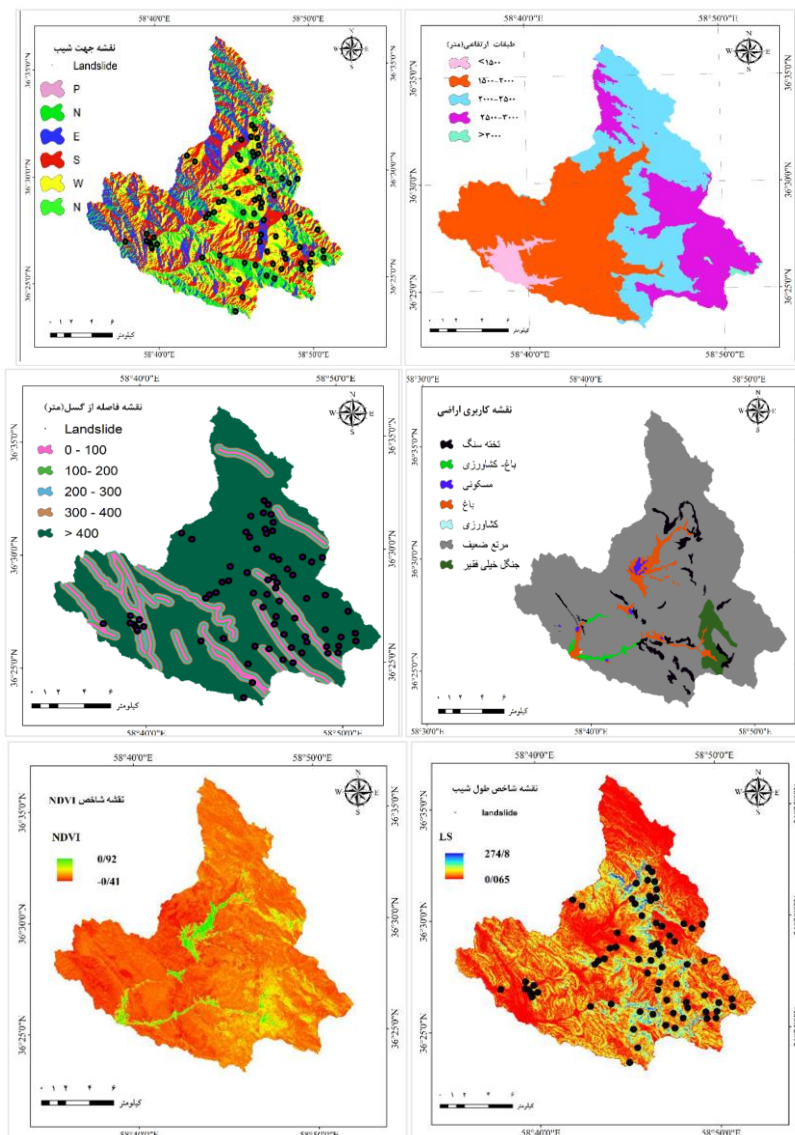
ریختگی و زبری سطوح و افزایش شیب بیشتری رخ می‌دهد، که باعث مساعد شدن شرایط وقوع زمین‌لغزش می‌شود. از رابطه ۶ محاسبه می‌گردد:

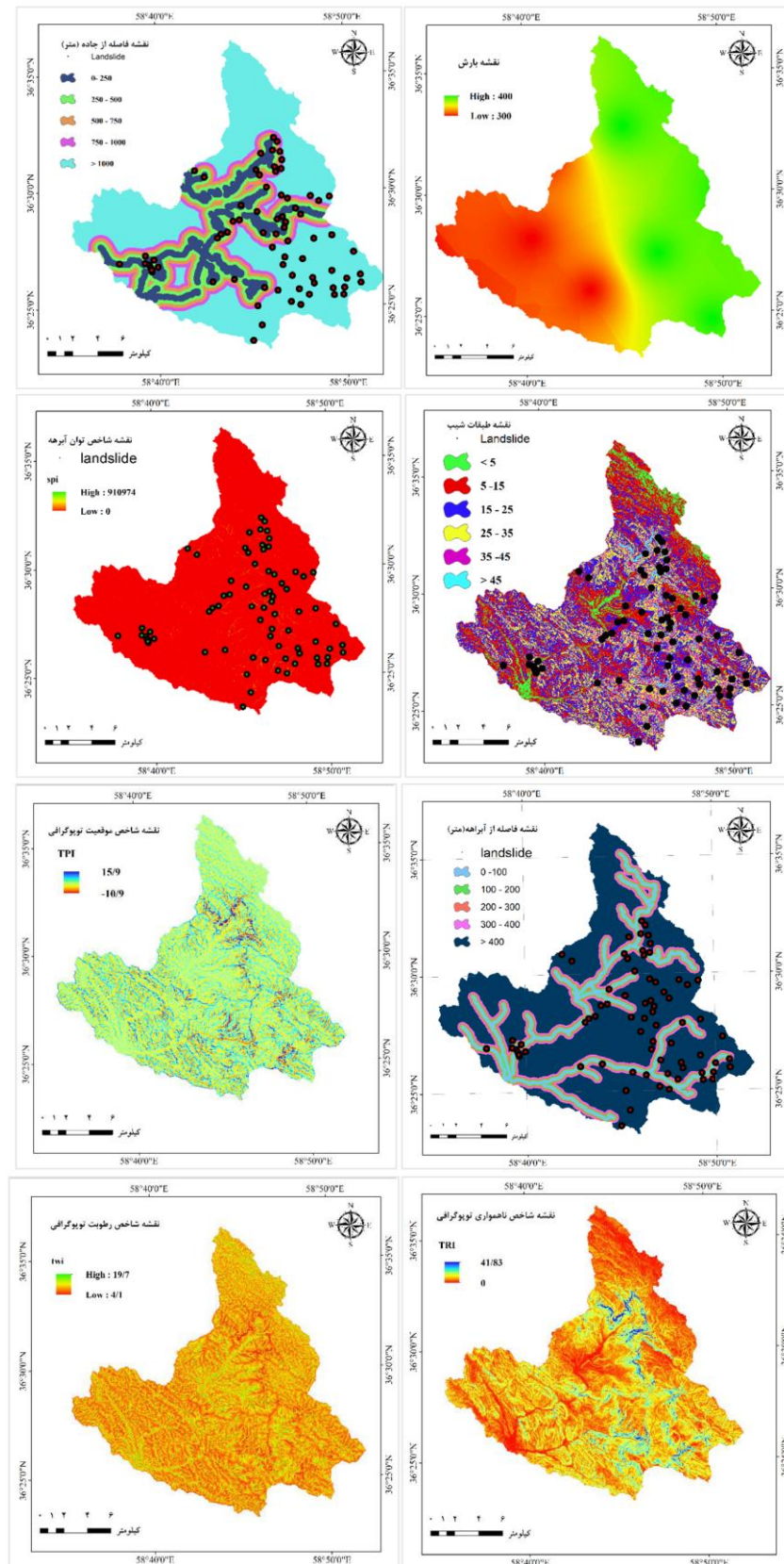
رابطه ۶)

$$TRI = \sqrt{\sum_{p=1}^8 ZMd}$$

P = تعداد پیکسل اطراف، ZMd = میانگین تفاضل ۸ پیکسل اطراف هر پیکسل است. این شاخص در محیط SAGA-GIS تهیه شد.

شاخص انحنای دامنه: دامنه‌ها نه تنها بخش اعظم مناظر طبیعی را شامل می‌شوند، بلکه قسمت کاملی از سیستم زهکشی، آب و رسوبات را برای رودخانه تأمین می‌کنند. انحنای به منزله یک خاصیت





شکل ۵: نقشه عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش

مدل بیشینه آنتروپی

روش حداکثر آنتروپی یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که قابلیت پیش‌بینی مکانی بالایی در زمینه‌های مختلف محیطی دارد (Park, 2015). برخلاف مدل‌های آماری که قبل از مدل‌سازی تعدادی فرضیات آماری تعریف می‌کنند، مدل بیشینه آنتروپی از ابتدا سعی در یافتن روابط متغیره‌ای مستقل و وابسته دارد تا براساس آن پیش‌بینی مبتنی بر واقعیت را ارائه دهد (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۷). برای استفاده از این مدل برای پیش‌بینی رفتار یک‌گونه یا پدیده نیاز به نقاط عدم حضور آن‌گونه یا پدیده نیست بلکه از یک سری عوامل تأثیرگذار (عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش) و همچنین نقاط حضور آن پدیده (نقاط لغزشی برای مدل‌سازی) استفاده می‌کند (کرنژادی، ۱۳۹۷). در این تحقیق به منظور پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش از مدل بیشینه آنتروپی در نرم‌افزار MaxEnt استفاده شد. به منظور استفاده از این مدل ابتدا متغیره‌ای مستقل (عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش) و متغیره‌ای وابسته (نقاط وقوع زمین‌لغزش)، به فرمت مورد نظر تبدیل و وارد محیط نرم‌افزار MaxEnt، شد. سپس داده‌های زمین‌لغزش برای آموزش مدل (۷۰ درصد نقاط

لغزشی برداشت شده)، به منظور واسنجی مدل استفاده می‌شود. این مدل براساس اصل آنتروپی شبکه ارتباط بین متغیره‌ای مستقل و وابسته را تشکیل می‌دهد. در نهایت نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش براساس نقاط عطف منحنی فراوانی تجمعی پیکسل‌ها در پنج کلاس استعداد (خیلی-کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) پهنه‌بندی گردید (Kornejady et al, 2019).

ارزیابی کارایی مدل

در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی کارایی مدل از منحنی ROC استفاده شد. این منحنی نموداری است که در آن نسبت پیکسل‌های که به اشتباه توسط مدل به عنوان زمین‌لغزش شناسایی شده‌اند و در واقعیت فاقد زمین‌لغزش بوده‌اند روی محور افقی و در برابر آن نسبت پیکسل‌هایی که به درستی توسط مدل تحت عنوان دارای زمین‌لغزش شناسایی شده‌اند روی محور عمودی ترسیم می‌گردد. در منحنی ROC ایدئال‌ترین 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.

جدول ۲: همبستگی کمی- کیفی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین (محمديا، ۱۳۹۷)

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

بحث و نتایج

منحنی‌های پاسخ برای فاکتورهای مؤثر (فاکتور توزیع)

تأثیر پارامترهای مورد استفاده جهت تعیین مناطق دارای حساسیت به وقوع زمین‌لغزش و تأثیر آن‌ها بر روی مدل‌سازی مدل MaxEnt در شکل ۶ نشان داده شده است. براساس شکل ۶، حساسیت وقوع

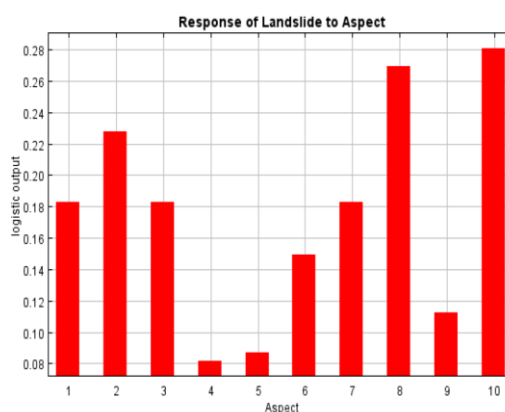
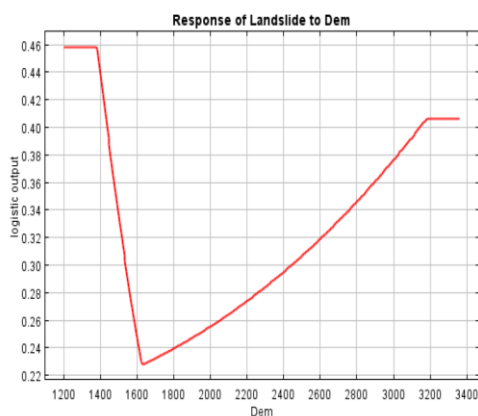
زمین‌لغزش با افزایش ارتفاع تا ۱۶۵۰ متر، کاهش و از ۱۶۵۰ تا ۳۲۰۰ متر حساسیت افزایش پیدا کرده است. با توجه به اینکه اغلب زمین‌لغزش‌های که در منطقه رخ داده از نوع ریزش هست و شیب و ارتفاع نقش اساسی در وقوع ریزش دارد، که در منطقه مورد مطالعه از ارتفاع ۱۶۵۰ به بالا شدت شیب زیادتر شده از سوی دیگر در ارتفاعات بالاتر

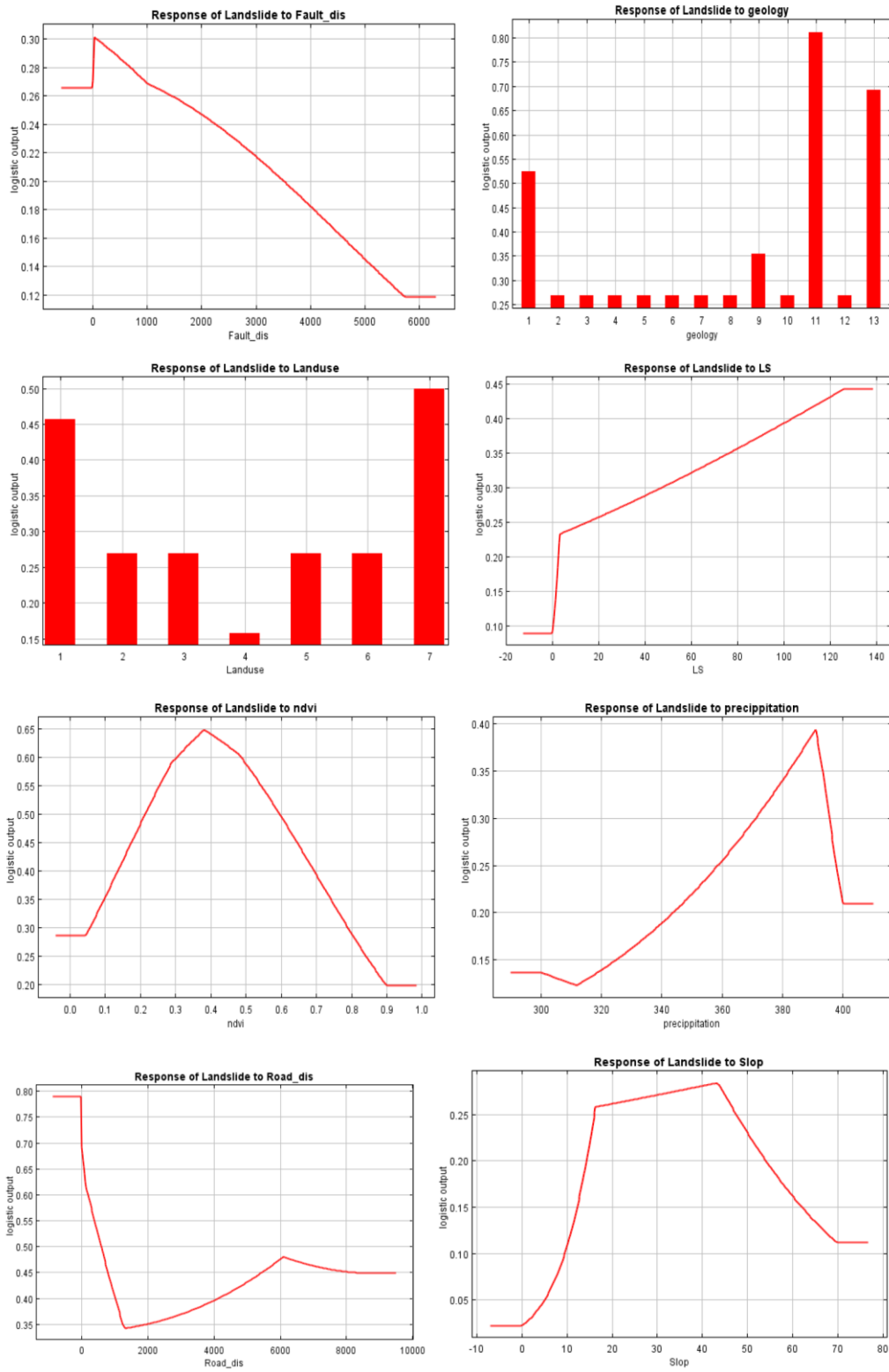
است. علت این امر در منطقه مورد وجود پی‌سنگ‌ها و رخساره‌های سنگی محکم در شیب‌های بالا هست که در ارتفاعات بالاتر واقع شده‌اند. از سوی دیگر با افزایش شیب شرایط خاک‌زایی محدود شده و همچنین دخالت‌های انسانی کمتر شده است، در نتیجه در شیب‌های بیشتر از ۴۰ درجه حساسیت وقوع کاهش یافته است که این نتایج با نتایج پارک (Park, 2015) هم‌راستا هست. در حالی که براساس مطالعات رجب‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) با افزایش حتی در شیب‌های بالاتر از ۳۰ درجه به دلیل افزایش نیروی‌های برشی در برابر نیروی مقاومت، حساسیت با افزایش شیب افزایش یافته است. براساس تفسیر نمودار مربوط به فاصله از گسل با افزایش فاصله از گسل حساسیت وقوع زمین‌لغزش کاهش یافته است که مورد در نمودار به وضوح قابل‌دیدن هست که با نتایج پارک (Park, 2015)، هم‌راستا هست. در رابطه با تأثیر فاصله از جاده در وقوع زمین‌لغزش با افزایش فاصله از جاده تا فاصله ۱۸۰۰ متر از جاده روند حساسیت نزولی بوده (با نتایج زارع (Zare, 2013) هم‌راستا هست) ولی بعد از این فاصله این روند افزایشی شده است که احتمال به دلیل تأثیر عوامل دیگر هست. در بین کاربری‌های مختلف منطقه مورد مطالعه به ترتیب کاربری‌های مراتع ضعیف دارای بیشترین حساسیت به لغزش هست. ریشه درختان و پوشش گیاهی باعث افزایش مقاومت برشی خاک و در نتیجه تقویت خاک می‌شود در نتیجه تخریب پوشش گیاهی باعث افزایش حساسیت به لغزش می‌شود و کاربری مراتع ضعیف دارای حساسیت بالایی در وقوع زمین‌لغزش است. نتایج بیانگر روند کاهش حساسیت وقوع زمین‌لغزش با افزایش فاصله از آبراهه است که از دلایل آن می‌توان به ناپایداری دامنه‌های مشرف به آبراهه بر اثر فرسایش کنار رودخانه‌ای اشاره کرد که با نتایج تیموری و

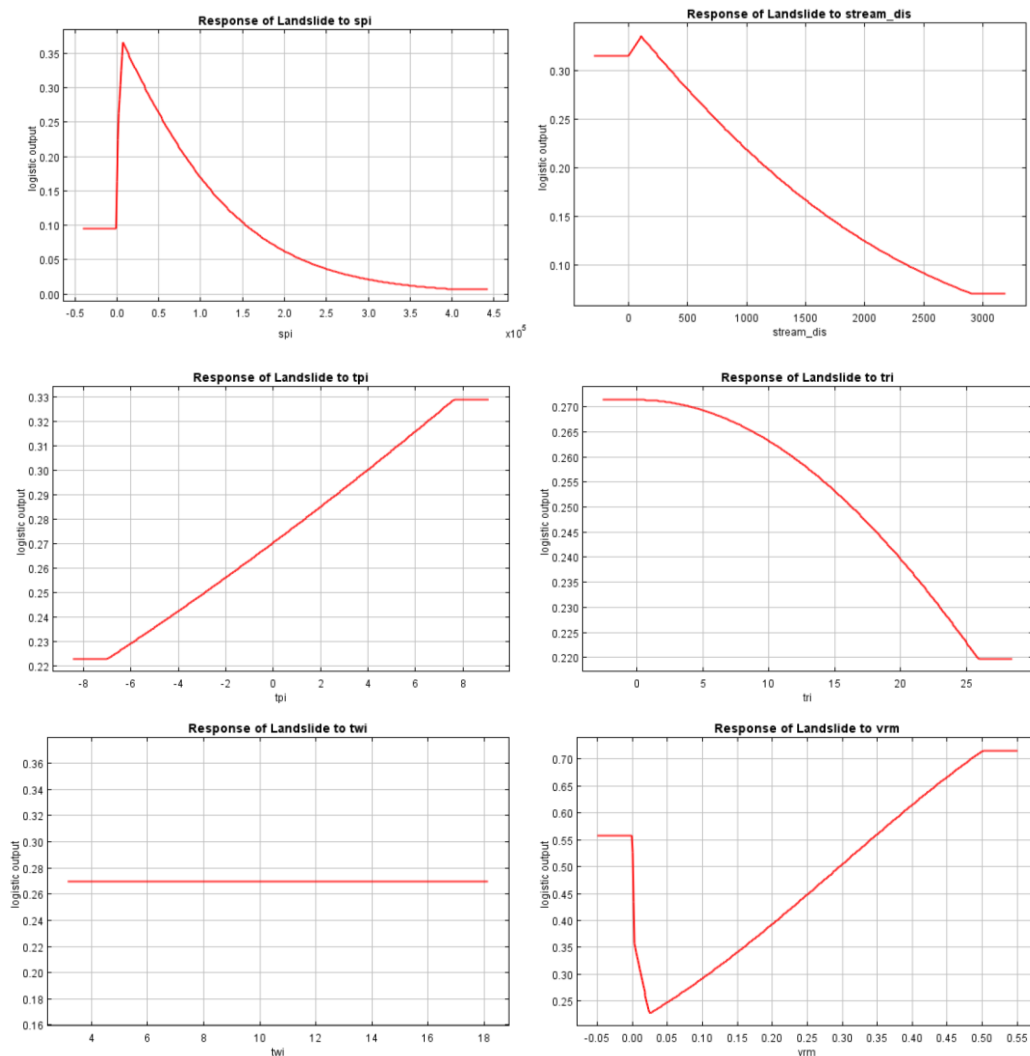
با افزایش تغییرات دمایی تخریب و هوازگی سنگ‌ها بیشتر شده و همچنین وجود صخره‌های سنگی فراوان با شیب تند در ارتفاعات بالاتر باعث افزایش ریزش‌ها با افزایش ارتفاع شده است. در محدوده ارتفاعی ۳۲۰۰ تا ۳۴۰۰ متر در منطقه مورد مطالعه به دلیل افزایش لایه‌های سنگی مقاوم و کاهش شیب و همچنین دخالت‌های کمتر انسان، حساسیت به وقوع زمین‌لغزش کاهش یافته است. انحنای سطح در بازه ۰/۰۴ تا ۰/۵۵ باعث افزایش وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه شده است. بیانگر این است که بیشتر مناطق حساس به لغزش در شیب‌های محدب قرار گرفته‌اند که این امر به دلیل واگرایی جریان آب در دامنه‌ها و انبساط و انقباض خاک در دامنه‌های محدب هست. که با نتایج تیموری و همکاران (۱۳۹۸) و چن و همکاران (Chen et al, 2018)، همخوانی دارد. به‌طور کلی با افزایش بارندگی میزان حساسیت به وقوع زمین‌لغزش افزایش پیدا می‌کند که از دلایل آن می‌توان به افزایش نفوذ و در نتیجه افزایش آب زیرزمینی و فشار هوا اشاره کرد (تیموری و همکاران، ۱۳۹۸؛ میرزایی و همکاران، ۲۰۱۸). در منطقه مورد مطالعه نیز تا ارتفاع ۳۲۰۰ متر با افزایش بارش حساسیت وقوع زمین‌لغزش افزایش یافته اما در محدوده ارتفاعی ۳۲۰۰ تا ۳۴۰۰ متر با وجود اینکه بیشترین بارش را دریافت می‌کند اما به دلیل کاهش شدت شیب و خاک‌زایی و افزایش بستر سنگی محکم در این محدوده ارتفاعی حساسیت کاهش یافته است. بیشترین حساسیت به وقوع لغزش در دامنه‌های شمالی و شرقی در منطقه مورد مطالعه واقع شده است. دلیل این امر رطوبت بیشتر دامنه‌های شمالی و شرقی است. نتایج حاصل از بررسی شیب نشان داد که با افزایش شیب تا ۴۰ درجه، حساسیت وقوع زمین‌لغزش افزایش یافته است و بعد از ۴۰ درجه حساسیت کاهش یافته

زمین لغزش کاهش یافته است. با افزایش شاخص TRI ناهموازی سطح زمین بیشتر شده و احتمال نفوذ نزولات بیشتر شده و رطوبت افزایش می‌یابد که به وقوع زمین لغزش کمک می‌کند. نتایج حاصل از بررسی طول شیب (LS) بیانگر این است که با افزایش طول شیب نیز حساسیت به لغزش افزایش یافته است. شاخص طول شیب (LS) یا حمل رسوب (STI) بیانگر توان حمل آبراهه است. در واقع تأثیر توپوگرافی را بر فرسایش مشخص می‌کند. در واقع هر چه طول شیب بیشتر باشد توان حمل رسوب بالاتری دارد در نتیجه شرایط فرسایش کناری بیشتر شده و زمین لغزش‌های کناری بیشتر می‌شود. در این مطالعه با افزایش شاخص توان آبراهه (SPI) حساسیت زمین لغزش افزایش یافته و سپس کاهش یافته است. شاخص توان آبراهه (SPI) گویای میزان قدرت فرسایش‌دهی جریان آب است، با افزایش آن تلاطم ناشی از جریان آب و در نتیجه زیر شویی، زمینه را جهت رخ داد لغزش‌های کناری تسهیل می‌کند. در مجموع شاخص توان آبراهه گویای این بحث است در مناطقی که قدرت رودخانه بیشتر می‌گردد تأثیر آن بر وقوع زمین لغزش بیشتر است.

همکاران (۱۳۹۷) و چن و همکاران (Chen et al, 2018) همخوانی دارد. براساس نتایج واحدهای سنگی Q₂ و PLQm بیشترین میزان تأثیر را بر حساست وقوع زمین لغزش دارند، از دلایل آن می‌توان به جذب آب توسط این واحدها (Kornejadi, 2017) و وجود لایه‌های رس و مارن در این واحدها اشاره کرد. واحد سنگی PLQm (کنگومرای پلی مکتیت) با ویژگی چون عدم جورشدگی و نیز دارا بودن رس دارای درز و شکاف-های زیاد می‌باشد. همچنین واحد Q₂ شامل نهشته-های از ذرات رسی تا سیلتی و ذرات درشت در حد گراول و به صورت منفصل و فاقد سیمان می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده برای شاخص TPI، با افزایش این شاخص حساسیت وقوع زمین لغزش نیز افزایش می‌باشد. دلیل این کار این است که TPI منفی نشان‌دهنده توپوگرافی کم (تعرها و گودال‌ها) است با اینکه جریان همگرا بوده و احتمال نفوذ آب بیشتر است ولی به دلیل شیب کم احتمال لغزش کاهش یافته است در حالی که TPI مثبت نشان‌دهنده توپوگرافی زیاد (محدب و ستیغ‌ها) می‌باشد و جریان به صورت واگرا بوده اما به دلیل شیب زیاد ناپایداری دامنه در این دامنه‌ها بیشتر شده است. با افزایش شاخص TRI حساسیت وقوع







شکل ۶: تأثیر پارامترهای مورد استفاده بر پیش‌بینی مدل MaxEnt

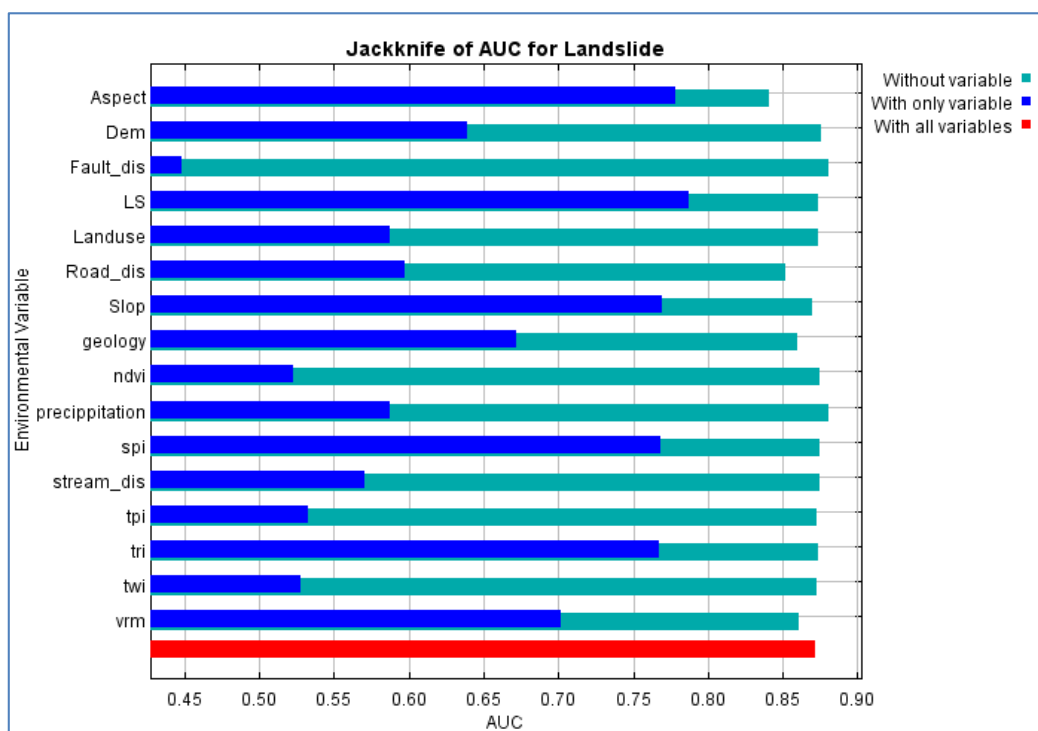
مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش

نتایج نمودار Jackknife به منظور تعیین مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها در پیش‌بینی مدل MaxEnt، در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق شکل از بین پارامترهای انتخاب شده در فرایند مدل‌سازی به ترتیب عوامل طول شیب (LS) با ۷۹ درصد، جهت دامنه ۷۸ درصد، شیب ۷۷ درصد و شاخص توان آبراهه (SPI) با ۷۶ درصد بیشترین مشارکت و تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های حوزه بار داشته و عوامل فاصله از گسل ۳۹ درصد، شاخص NDVI با ۵۵ درصد و

شاخص TWI با ۵۶ درصد کمترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش را دارند. این نتایج بیانگر این است که تمامی عوامل بر حساسیت زمین‌لغزش تأثیرگذار بوده‌اند و در هر منطقه‌ای بسته به شرایط محیطی یک یا چند عوامل نقش مهم‌تری در حساسیت وقوع زمین‌لغزش ایفا می‌کنند که نشانگر پیچیدگی حساسیت وقوع زمین‌لغزش و تأثیر عوامل مختلف است. در شکل ۷ میزان شاخص جکنایف در شرایط وجود و عدم وجود هر یک از پارامترها به خوبی مشخص شده است. در این شکل نمودار آبی‌رنگ میزان شاخص جکنایف را در شرایطی که فقط یک پارامتر (هر پارامتر به صورت جداگانه) در

قرمز رنگ تأثیر مشارکت همه پارامترها را در مدل‌سازی به صورت یکجا نشان می‌دهد. که با وجود مشارکت همه پارامترها شاخص جکنایف ۰/۸۷ می‌باشد که نشانگر تأثیر بالای همه پارامترها در مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه است.

مدل‌سازی مشارکت کند را نشان می‌دهد و نمودار سبز میزان شاخص جکنایف را در صورت عدم مشارکت یک پارامتر (پارامتر مدنظر) در فرایند مدل‌سازی را نشان می‌دهد. مثلاً اگر شاخص جهت دامنه را در نظر بگیریم، نمودار سبز رنگ نقش همه پارامترها در مدل‌سازی را در نظر می‌گیرد ولی نقش پارامتر جهت دامنه را مشارکت نمی‌دهد. نمودار



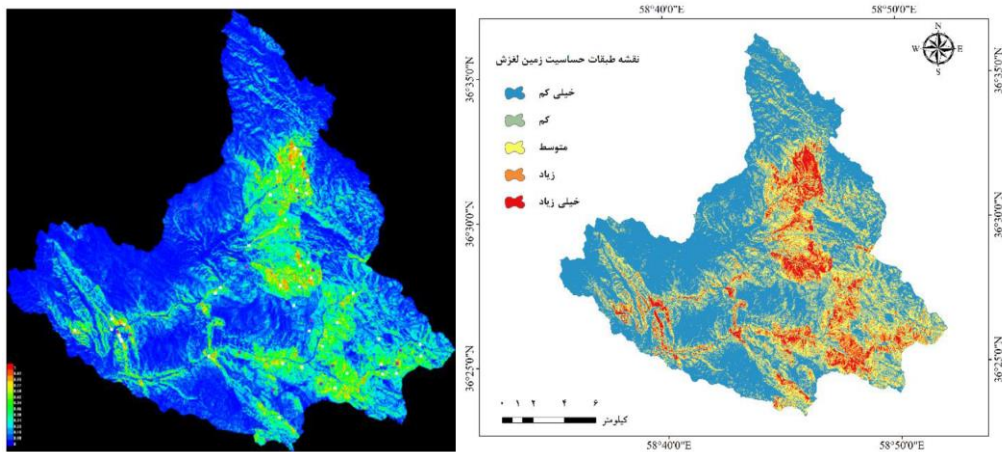
شکل ۷: نتایج آزمون جک‌نایف

حساسیت زیاد و خیلی زیاد و ۷۳ درصد دارای حساسیت کم و خیلی کم و ۱۴ درصد منطقه دارای حساسیت متوسط است. همان‌طور که در روش کار نیز اشاره شد، مقدار AUROC به‌منظور ارزیابی نتایج مدل استفاده شد (شکل ۱۰). در این تحقیق ۷۰ درصد نقاط زمین‌لغزش برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد باقیمانده به‌منظور اعتبارسنجی مدل استفاده شد. بر این اساس مدل در مرحله آموزش دقت ۹۰/۳ درصد (عالی) و در مرحله اعتبارسنجی دقت ۸۷/۲ درصد (خیلی خوب) را داشت (شکل ۱۰).

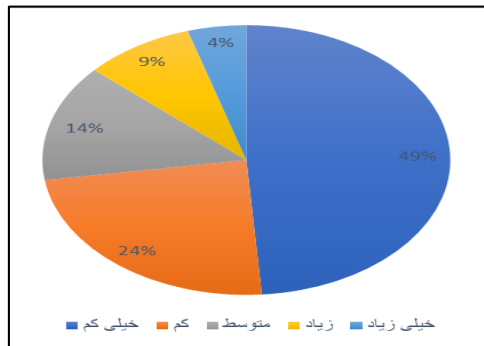
ارزیابی کارایی نقشه نهایی حساسیت

زمین‌لغزش

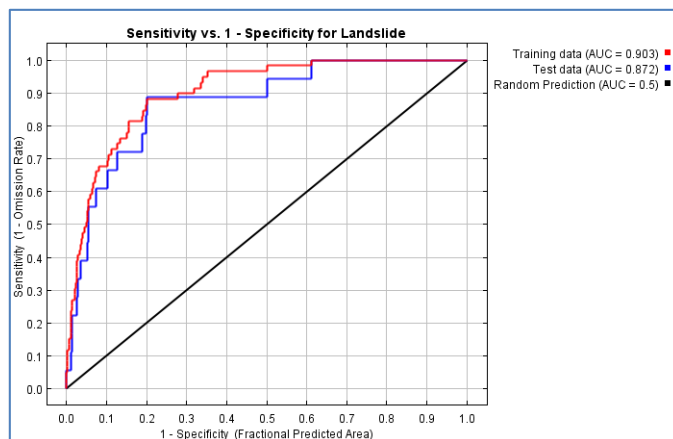
پس از تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی، نقشه حاصله با استفاده از شکست طبیعی نقاط عطف منحنی تجمعی فراوانی پیکسل‌ها به پنج کلاس کم، خیلی کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۸). همچنین درصد مساحت طبقات حساسیت زمین‌لغزش در شکل ۹ نشان داده شده است. براساس نتایج ۱۳ درصد مساحت منطقه دارای



شکل ۸: نقشه حساسیت وقوع زمین لغزش حوزه آبخیز بار



شکل ۹: مساحت طبقات حساست زمین لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی



شکل ۱۰: منحنی ROC و مقدار AUC برای ارزیابی عملکرد مدل

نتیجه‌گیری

زمین لغزش به‌عنوان یکی از پرمخاطره‌ترین بلایای طبیعی در جهان محسوب می‌شود. تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش به‌عنوان سنگ بنای تحقیقات زمین لغزش شناخته شده و در مواقع

بحرانی به‌عنوان یک ابزار مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه با اینکه شناسایی مناطق دارای حساسیت زمین لغزش براساس روش‌های سنتی و نظرات کارشناسی از دقت مناسبی برخوردار نیست، استفاده از روش‌های نوین

به دلیل توانایی نامحدود الگوریتم حداکثر آنتروپی در سنجش روابط پیچیده خطی و غیره خطی، سرعت و دقت بالایی در تعیین مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش دارد که با توجه به کمبود منابع مالی و امکانات و همچنین زمان‌بر بودن شناسایی مناطق دارای حساسیت، استفاده از این مدل می‌تواند به‌عنوان راهکاری در نظر گرفته شود. خیلی از محققان دیگر از جمله تیموری و همکاران (۱۳۹۸)، رجب‌زاده و همکاران (۱۳۹۷)، کرنژادی و همکاران (۱۳۹۹)، میرزایی و همکاران (Mirzaie et al, 2018)، پندی و همکاران (Pandey et al, 2018) و پارک و همکاران (Park et al, 2015) نیز در مطالعات خود به توانایی بالای این مدل در پیش‌بینی حساسیت وقوع زمین‌لغزش تأکید کردند. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که مدل حداکثر آنتروپی، یک رویکرد امیدوارکننده برای مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش است. چون که نقشه‌ای که صحت بالا و معقول در شناسایی و تفکیک مناطق حساس به وقوع زمین‌لغزش دارد، به تصمیم‌گیران و مهندسی‌ها 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.

یادگیری ماشین مانند روش حداکثر آنتروپی 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 به‌منظور حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش، داشتن یک چهارچوب تلفیقی از عوامل مؤثر محرک و شرایط محیطی مورد نیاز است. از این‌رو در این تحقیق، با در نظر گرفتن ۱۶ پارامتر تأثیرگذار و با استفاده از روش حداکثر آنتروپی اقدام به تهیه نقشه حساسیت وقوع زمین‌لغزش در حوزه بار نیشابور، شد. بررسی نتایج مدل حداکثر آنتروپی نشان داد که تمام پارامترها اعم از عوامل محیطی و عوامل انسانی به شکل هم‌افزایی در وقوع زمین‌لغزش‌های حوزه بار نیشابور تأثیرگذار هستند. تجزیه و تحلیل فاکتور توزیع، نشان داد که عوامل طول شیب (LS)، جهت شیب و شیب بیشترین مشارکت و تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های حوزه بار داشته و عوامل فاصله از گسل، شاخص NDVI و شاخص TWI کمترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش را دارند. 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) به معنای عملکرد عالی مدل است. براساس نتایج به دست آمده می‌توانم گفت که مدل حداکثر آنتروپی

پانوشته

1-Sediment Transport Index

رگرسیون لجستیک با به کارگیری شاخص‌های ژئو مورفومتریک، فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۷(۳)، ص ۹۱-۱۱۶.

منابع

-بابلی مؤخر، ح.، شیرانی، ک. و تقیان، ع.ر.، ۱۳۹۷. ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از روش تلفیقی فاکتور اطمینان و

- تیموری، م. و اسدی نلیوان، ا.، ۱۳۹۸. پهنه‌بندی حساسیت و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: استان لرستان)، نشریه هیدروژئومورفولوژی، شماره ۶(۲۱)، ص ۱۵۵-۱۷۹.
- حیدری، ن.، حبیب نژاد، م.، کاویان، ع. و پورقاسمی، ح.، ۱۳۹۹. مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش با الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی در آبخیز سد رئیسعلی دلواری، فصلنامه پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، شماره ۱۲۶، ص ۲-۱۳.
- رجب‌زاده، ف.، غیاثی، س. و رحمتی، ا.، ۱۳۹۷. کارایی الگوریتم حداکثر آنتروپی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در ارزیابی حساسیت پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق، فصلنامه حفاظت منابع آب و خاک، شماره ۸(۲)، ص ۷۴-۵۷.
- روستایی، ش.، مختاری، د. و اشرفی فینی، ز.، ۱۳۹۹. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز طالقان با استفاده از شاخص آنتروپی شانون، نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۲۴(۷۱)، ص ۱۲۵-۱۵۰.
- رحمتی، ا.، طهماسبی پور، ن.، حقی زاده، ع.، پورقاسمی، ح. و فیضی زاده، ب.، ۱۳۹۷. ارزیابی کارایی مدل بیشینه آنتروپی در پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش آبکندی حوضه آبخیز کشکان-پل دختر، مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۱۰(۴)، ص ۷۲۷-۷۳۸.
- طالبی، ع.، نفرزادگان، ع. و ملکی نژاد، ح.، ۱۳۸۹. مروری بر مدل‌سازی تجربی و فیزیکی زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۴۱(۷۰)، ص ۴۵-۶۳.
- عظیم پورمقدم، و.، ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین و دمپستر-شیفر (مطالعه موردی: بخش از حوضه آبخیز بابلرود)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ساری.
- علی پور، ح. و ملکیان، آ.، ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز جهان اسفراین خراسان شمالی، فصلنامه جغرافیا و توسعه، شماره ۱۳(۳۹)، ص ۱۶۵-۱۸۰.
- قاسمیان، ب.، عابدینی، م.، روستایی، ش. و شیرزادی، ع.، ۱۴۰۰. ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل جدید ترکیبی الگوریتم مینا (مطالعه موردی: شهرستان کامیاران، استان کردستان)، فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۹(۴)، ص ۱۳۰-۱۴۶.
- قاسمیان، ب.، عابدینی، م.، روستایی، ش. و شیرزادی، ع.، ۱۳۹۶. ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم ماشین پشتیبان بردار (مطالعه موردی: شهرستان کامیاران، استان کردستان)، فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۶(۳)، ص ۱۵-۳۶.
- کرنزادی، آ.، اونق، م.، پورقاسمی، ح.، بهره‌مند، ع. و معتمدی، م.، ۱۳۹۹. پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ترکیبی فاصله ماهالانویس و یادگیری ماشین (مطالعه موردی: حوضه آبخیز اوغان، استان گلستان)، مجله پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۱۱(۴۲)، ص ۱-۱۸.
- کرنزادی، آ. و پورقاسمی، ح.، ۱۳۹۸. ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های داده-کاوی، مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهل‌چای، مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۱۱(۱)، ص ۲۸-۴۲.

-محمدیاری، ف.، میرسنجری، م. و زرندیان، ا.، ۱۳۹۷. پایش تغییرات پوشش گیاهی حوزه آبخیز کرج با استفاده از شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی و تحلیل گرادیان، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، شماره ۹(۴)، ص ۵۵-۷۲.

-ملکی، ا.، مارابی، ه. و رحیمی، ح.، ۱۳۹۵. ارزیابی شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در زون سندج - سیرجان و زاگرس شکسته، فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۵(۱)، ص ۱۲۹-۱۴۱.

-Chen, W., Zhang, S., Li, R. and Shahabi, H., 2018. Performance evaluation of the GIS-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve Bayes tree for landslide susceptibility modeling, *Science of the total environment*, v. 644, p. 1006-1018.

-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.

-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.

-Fathi, M.H., Khohdel, K., Shoreh Kandi, A., Ashrafifeini, Z. and Khaliji, M.A., 2015. The combination of spectral and spatial data in zoning of landslide susceptibility (Case study: Sangorchay reservoir) *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)*, p. 515-527.

-Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. and Savage, W.Z., 2008. Guidelines for landslide

-کوه پیمان، ا.، ۱۳۹۶. پهنه‌بندی حساسیت، ارزیابی و مدیریت ریسک زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز لتیان)، رساله دکتری، دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، تهران، ایران.

-محمدنیا، م. و فلاح قاهره، غ.، ۱۳۹۷. شبیه‌سازی احتمال وقوع زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله مراتبی، فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۱۸(۴۸)، ص ۱۱۵-۱۳۰.

susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering geology*, v. 102(3-4), p. 99-111.

-Kerekes, A.H., Poszet, S.L. and Andrea, G.Á.L., 2018. Landslide susceptibility assessment using the maximum entropy model in a sector of the Cluj-Napoca Municipality, Romania. *Revista de Geomorfologie*, v. 20(1), p. 130-146.

-Kornejady, A., Ownegh, M. and Bahremand, A., 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*, v. 152, p. 144-162.

-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*, Springer, Cham., p. 123-143.

-Lee, S., Hwang, J. and Park, I., 2013. Application of data-driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jinbu, Korea. *Catena*, v. 100, p. 15-30.

-Liu, J. and Duan, Z., 2018. Quantitative assessment of landslide susceptibility comparing statistical index, index of entropy, and weights of evidence in the Shangnan area, China. *Entropy*, v. 20(11), p. 868-884.

- 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.
- Mirzaei, G., Soltani, A., Soltani, M. and Darabi, M., 2018. An integrated data-mining and multi-criteria decision-making approach for hazard-based object ranking with a focus on landslides and floods. *Environmental Earth Sciences*, v. 77(16), p. 1-23.
- 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.
- Park, N.W., 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*, v. 73(3), p. 937-949.
- Pradhan, B., 2011. Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in Malaysia, *Environmental Earth Sciences*, v. 63, p. 329-349.
- 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.
- Tien Bui, D., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Alizadeh, M., Chen, W. and Tian, Y., 2018. Landslide detection and susceptibility mapping by airsar data using support vector machine and index of entropy models in cameron highlands, Malaysia, *Remote Sensing*, v. 10(10), p. 15-27.
- Wang, P., Bai, X., Wu, X., Yu, H., Hao, Y. and Hu, B.X., 2018. GIS-based random forest weight for rainfall-induced landslide susceptibility assessment at a humid region in Southern China. *Water*, v. 10(8), p. 1019-1034.
- Zare, M., Pourghasemi, H.R., Vafakhah, M. and Pradhan, B., 2013. Landslide susceptibility mapping at Vaz Watershed (Iran) using an artificial neural network model: a comparison between multilayer perceptron (MLP) and radial basic function (RBF) algorithms, *Arabian Journal of Geosciences*, v. 6(8), p. 2873-2888.