

Prioritization of factors and zoning susceptibility of landslide in Karaj Dam Watershed

Omid Asadi Nalivan^{1*}, Majid Rahmani², Farzaneh Vakili Tajreh³ and Asghar Bayat⁴

¹ PhD Graduated Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

² Watershed Management Expert of Alborz Province Natural Resources and Watershed Management Department, Alborz, Iran

³ Ph.D student in Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

⁴ Deputy of Watershed Management of Alborz Province Natural Resources and Watershed Management, Alborz, Iran

Received: 10 May 2023

Accepted: 23 July 2023

Extended abstract

Introduction

Identification of the areas prone to landslides and the risks arising from them is one of the primary measures in natural resource management and development and construction planning. Considering the loss of lives, financial losses and environmental effects, landslides have been one of the most important natural disasters in the world and especially in our country, which every year plays an increasing role in the destruction of communication roads, pastures, gardens, residential areas, cause erosion and produces a high volume of sediment in the watersheds of the country. These issues have led to the use of data mining models in geological and geotechnical studies. In recent years, the use of geographic information systems and remote sensing along with machine learning methods has created a new step in landslide occurrence zoning and landslide susceptibility maps with appropriate accuracy. The watershed of Karaj Dam is one of the areas prone to landslides due to mountainous and rainy conditions and many construction due to suitable weather conditions and non-standard road construction. The purpose of this research is to prioritize the factors affecting landslides using the maximum entropy model (MaxEnt model) and to determine areas with landslide susceptibility potential.

Materials and methods

The Karaj Dam watershed is located in the east of Alborz Province. The highest and lowest average annual rainfall is calculated as 1099 and 608 mm, respectively. In this research, in order to determine the areas with landslide susceptibility, among 11 factors affecting the landslide potential of the area, including height, slope, slope direction, distance from waterway, lithology, rainfall, land use, topographic moisture index, surface curvature, distance from the waterway and the distance from the road, the factors were selected and tested for collinearity with the Variance Inflation Factor (VIF) test in SPSS software. From the total of 477 landslides, 70% were randomly classified as test data (334 points) and 30% as validation data (143 points). In this research, the maximum entropy model is used. To determine the most important parameters, the jackknife diagram and the Relative Performance Detection Curve (ROC) were used to determine the predictive power of the model. Landslide points of the studied area were prepared from the database of the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Alborz Province and field visits.

Results and discussion

The results showed that there is no co-linearity between the used factors. According to the Jackknife diagram, rainfall layers, distance from the road, lithology and land use were respectively the most important factors influencing the occurrence of landslides in the study area. The relative performance detection curve showed the accuracy of 90% (excellent) of the maximum entropy method in the training phase and 83% (very good) in the validation phase. According to the final landslide susceptibility map, more than 35% of the study area has high and very high landslide susceptibility potential.

* Corresponding author: omd.asadi@ut.ac.ir

Conclusion

According to the obtained results, it can be said that the MaxEnt model has a high ability to determine landslide-susceptible areas, and due to the high speed and accuracy of the model, it is suggested that it be used in similar research, especially in developing countries. The reason for the lack of facilities and financial resources, as well as the time-consuming nature of identifying landslide sensitive areas, should be used. In addition to natural factors, some human factors such as road construction play an important role in the occurrence of landslides, and in order to reduce the relative risks, it is necessary to avoid changing the ecosystem as a driver of natural disasters. In general, it can be stated that the watershed of Karaj Dam has a high potential for landslide susceptibility, that most of the susceptible areas are located near roads, and because there are many human interventions in these areas. Landslide sensitivity has increased. It is suggested to combine geographic information systems with maximum entropy method in order to determine areas with landslide susceptibility, especially in developing countries like Iran, where access to landslide information and data is limited by time and cost. The results of this research can be used in decision-making and preparation of provincial land as well as urban planning and will play a significant role in preventing and reducing damage caused by landslides.

Keywords: Amir Kabir Dam, Machine learning, Mass movement, Maximum entropy, ROC

Cite this article: Asadi Nalivan, O., Rahmani, M., Vakili Tajreh, F., Bayat, A., 2024. Prioritization of factors and zoning susceptibility of landslide in Karaj Dam Watershed. *Watershed Engineering and Management* 16(1), 1-15.

© 2024, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



اولویت‌بندی عوامل و پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز سد کرج

امید اسدی نلیوان^{۱*}، مجید رحمانی^۲، فرزانه وکیلی تجربه^۲ و اصغر بیات^۴

^۱ دانش‌آموخته دکتری آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان،

ایران

^۲ کارشناس آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز، البرز، ایران

^۳ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، کرج، ایران

^۴ معاون آبخیزداری اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز، البرز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰

چکیده مبسوط

مقدمه

شناخت نواحی مستعد وقوع زمین‌لغزش و خطرات ناشی از آن، یکی از اقدامات اولیه در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای و عمرانی است. با توجه به تلفات جانی، خسارات مالی و تأثیرات محیط زیستی، زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی در جهان و به‌ویژه در ایران بوده است که هر ساله نقش به‌سزایی در تخریب جاده‌های ارتباطی، تخریب مراتع، باغ‌ها، مناطق مسکونی، ایجاد فرسایش و تولید حجم بالای رسوب در حوزه‌های آبخیز کشور دارد. این مسایل منجر به استفاده از مدل‌های داده‌کاوی در مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک شده است. در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، همراه با روش‌های یادگیری ماشینی گامی نو در پهنه‌بندی وقوع زمین‌لغزش ایجاد کرده است و نقشه‌های حساسیت وقوع زمین‌لغزش با دقت مناسب و قابل قبولی تهیه می‌شوند. حوزه آبخیز سد کرج، به دلیل شرایط کوهستانی و پرباران و ساخت‌وسازهای فراوان به دلیل شرایط آب و هوایی مناسب و جاده‌سازی‌های غیراصولی از جمله مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش است. هدف از این پژوهش، اولویت‌بندی عوامل موثر بر زمین‌لغزش با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی (مدل MaxEnt) و تعیین مناطق دارای پتانسیل حساسیت زمین‌لغزش است.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز سد کرج، در شرق استان البرز و بین مختصات جغرافیایی بین ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی، واقع شده است. بیشترین و کمترین مقدار بارندگی متوسط سالانه به ترتیب در معادل ۱۰۹۹ و ۶۰۸ میلی‌متر محاسبه شده است. در پژوهش حاضر، برای تعیین مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش از ۱۱ عامل موثر بر پتانسیل زمین‌لغزش منطقه شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، سنگ‌شناسی، بارندگی، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنا سطح، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده انتخاب و آزمون هم‌خطی عوامل با آزمون عامل تورم واریانس (VIF) در نرم‌افزار SPSS بررسی شد. از مجموع ۴۷۷ زمین‌لغزش، به صورت تصادفی، ۷۰ درصد به عنوان داده‌های آزمون (۳۳۴ نقطه) و ۳۰ درصد به عنوان داده‌های اعتبارسنجی (۱۴۳ نقطه) طبقه‌بندی شدند. در این پژوهش، از مدل بیشینه آنتروپی استفاده شده است. برای تعیین مهم‌ترین پارامترها از نمودار جک‌نایف و از منحنی تشخیص عملکرد

نسبی (ROC) برای قدرت پیش‌بینی مدل استفاده شد. نقاط زمین‌لغزش حوضه مورد مطالعه از بانک اطلاعاتی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز و بازدیدهای میدانی تهیه شده است.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که هم‌خطی بین عوامل مورد استفاده وجود ندارد. بر اساس نمودار جکنایف لایه‌های بارندگی، فاصله از جاده، لیتولوژی و کاربری اراضی، به ترتیب مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه بودند. منحنی تشخیص عملکرد نسبی، نشان‌دهنده دقت ۹۰ درصد (عالی) روش بیشینه آنتروپی در مرحله آموزش و ۸۳ درصد (خیلی خوب) در مرحله اعتبارسنجی بود. بر اساس نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش بیش از ۳۵ درصد از پهنه حوضه مورد مطالعه دارای پتانسیل حساسیت زمین‌لغزش زیاد و خیلی زیاد است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که مدل MaxEnt، توانایی بالایی در تعیین مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش دارد و با توجه به سرعت و دقت بالای مدل پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات مشابه به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه به‌دلیل کمبود امکانات و منابع مالی و همچنین، زمان‌بر بودن شناسایی مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش مورد استفاده قرار بگیرد. علاوه بر عوامل طبیعی برخی عوامل انسانی نظیر جاده‌سازی، نقش مهمی بر وقوع زمین‌لغزش دارد که برای کاهش نسبی خطرات لازم است از تغییر اکوسیستم به‌عنوان محرک بلایای طبیعی اجتناب کرد. به‌طور کلی، می‌توان بیان کرد که حوزه آبخیز سد کرج دارای پتانسیل حساسیت زمین‌لغزش بالایی است که بیشتر مناطق دارای حساسیت در نزدیکی جاده‌ها واقع شده‌اند و به دلیل اینکه در این مناطق دخالت‌های انسانی فراوانی صورت گرفته است، حساسیت زمین‌لغزش افزایش پیدا کرده است. ترکیب سامانه اطلاعات جغرافیایی با روش بیشینه آنتروپی به‌منظور تعیین مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه مثل ایران که دسترسی به اطلاعات و داده‌های زمین‌لغزش با محدودیت زمان و هزینه مواجه هستند، پیشنهاد می‌شود. نتایج این پژوهش در تصمیم‌گیری و آمایش سرزمین استانی و همچنین برنامه‌ریزی شهری قابل استفاده خواهد بود و نقش به‌سزایی در پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: حداکثر آنتروپی، حرکت توده‌ای، سد امیرکبیر، عملکرد نسبی، یادگیری ماشینی

مقدمه

مسایل منجر به استفاده از مدل‌های داده‌کاوی در مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک شده است (Toll et al., 1996). این مدل‌ها نه تنها منجر به افزایش دقت در برخورد با مسایل پیچیده و عدم قطعیت‌ها می‌شوند، بلکه خود منجر به ایجاد و توسعه تئوری‌ها و روش‌های نوین در مسایل مختلف می‌شوند. حرکت‌های توده‌ای، از جمله زمین‌لغزش از مهم‌ترین مباحث در زمینه مخاطرات طبیعی است، چراکه وقوع آن می‌تواند خسارات انسانی و اقتصادی فراوانی را به‌ویژه در مناطق کوهستانی در پی داشته باشد (Zhang et al., 2019). با توجه به تاثیرات مخرب وقوع زمین‌لغزش‌ها بر روی منابع طبیعی و سکونت‌گاه‌های انسانی و فرسایش حجم قابل توجه خاک‌های با ارزش، شناسایی مناطق مستعد و پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش بسیار ضروری و مهم است.

شناخت نواحی مستعد وقوع زمین‌لغزش و خطرات ناشی از آن یکی از اقدامات اولیه در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای و عمرانی است. بر اساس مطالعات انجام شده در طی سال‌های ۲۰۰۴-۱۹۰۳، زمین‌لغزش به تنهایی ۱۷ درصد از بلایای طبیعی جهان را به خود اختصاص داده است (Koehorst et al., 2005). با توجه به تلفات جانی، خسارات مالی و تاثیرات زیست‌محیطی، زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی در جهان و به ویژه در ایران بوده است که هر ساله نقش به‌سزایی در تخریب جاده‌های ارتباطی، تخریب مراتع، باغ‌ها، مناطق مسکونی، ایجاد فرسایش و تولید حجم بالای رسوب در حوزه‌های آبخیز کشور دارد (Kornejady et al., 2017). این

است. همچنین با توجه به مقدار ROC^۱ معادل ۰/۸۴ عملکرد مدل بسیار خوب ارزیابی شد. شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، گامی مهم و ضروری در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، به ویژه در مناطق دارای بارندگی زیاد و کوهستانی است. حوزه آبخیز سد کرج، به دلیل شرایط کوهستانی و پرباران و ساخت‌وسازهای فراوان به دلیل شرایط آب و هوایی مناسب و جاده‌سازی‌های غیراصولی، از جمله مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش است. با توجه به مرور منابع انجام گرفته تا کنون مطالعه جامعی در ارتباط با پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش در حوزه آبخیز سد کرج که با توجه به بارندگی زیاد و کوهستانی بودن این حوضه یکی از مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش است، انجام نشده است. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند برای برنامه‌ریزی در جهت کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش مورد استفاده سیاست‌گذاران و مسئولان قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز سد کرج در شرق استان البرز و بین مختصات جغرافیایی بین ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). حوضه مورد مطالعه از نظر توپوگرافی، کوهستانی بوده، از دامنه‌های پرشیب و قله مرتفع تشکیل شده است. ارتفاع از سطح دریا از بلندترین نقطه با ارتفاع ۴۳۶۷ متر تا خروجی حوضه با ارتفاع ۱۶۳۶ متر، متغیر است. بیشترین و کمترین مقدار بارندگی متوسط سالانه به ترتیب در ایستگاه‌های نسا و امیرکبیر با ارتفاعات ۲۸۰۰ و ۱۵۸۸ متر از سطح دریا، معادل ۱۰۹۹ و ۶۰۸ میلی‌متر محاسبه شده است. در شکل ۱، نقاط زمین‌لغزش و تقسیم بندی آن‌ها به دو بخش آموزشی و اعتبارسنجی برای مدلسازی و پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش نشان داده شده است.

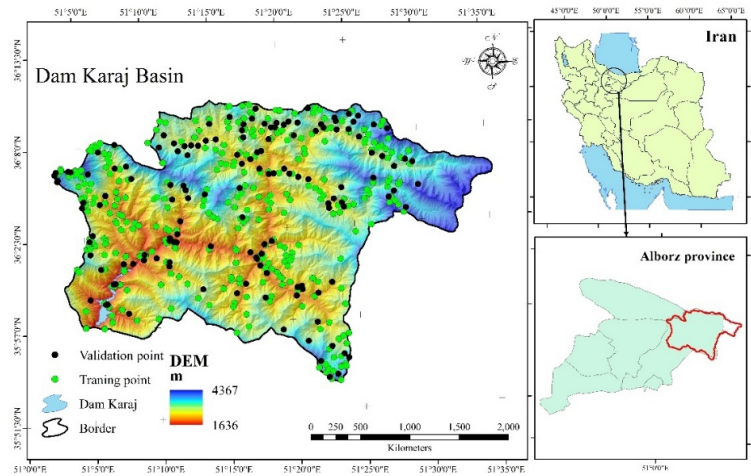
حساسیت زمین‌لغزش به بررسی و ارزیابی زمین‌لغزش‌های موجود و یا مناطق دارای پتانسیل وقوع زمین‌لغزش، بدون توجه به زمان رویداد آن می‌پردازد (Chen et al., 2018).

در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور همراه با روش‌های یادگیری ماشینی گامی نو در پهنه‌بندی وقوع زمین‌لغزش ایجاد کرده است (Bui et al., 2018) و نقشه‌های حساسیت وقوع زمین‌لغزش با دقت مناسب و قابل قبولی تهیه می‌شوند. Teimouri et al., (2020) در پژوهشی به اولویت‌بندی عوامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن در استان لرستان با استفاده از روش بیشینه آنتروپی پرداختند.

آن‌ها برای انجام پژوهش، از ۱۱ عامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش استفاده کردند. نتایج نشان داد که بر اساس نمودار چکنایف لایه‌های بارندگی، فاصله از جاده، لیتولوژی و کاربری اراضی، به ترتیب مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش بودند. آن‌ها بر اساس منحنی تشخیص عملکرد نسبی مدل را در مرحله آموزش عالی (۹۰ درصد) و در مرحله اعتبارسنجی خیلی خوب (۸۳ درصد) ارزیابی کردند.

Nguyen et al., (2019) با استفاده از مدل‌های هوش محاسباتی ترکیبی جدید مبتنی بر GIS (B-ADT, D-) (ADT, MBAB-ADT, RAB-ADT) و با کمک ۱۱ عامل در استان دالات ویتنام نسبت به تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش اقدام کردند. اعتبارسنجی و مقایسه مدل‌ها نشان داد که مدل B-ADT بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها دارد و نقشه نهایی را وسیله مهمی برای استفاده تصمیم‌گیران در برنامه‌های آمایش سرزمین عنوان کردند. Kerekes et al., (2018)، با استفاده از روش بیشینه آنتروپی به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در رومانی پرداختند. در این مطالعه از هفت عامل استفاده شد که نتایج آن‌ها نشان داد تاثیرگذارترین عوامل کاربری اراضی و درجه شیب بوده

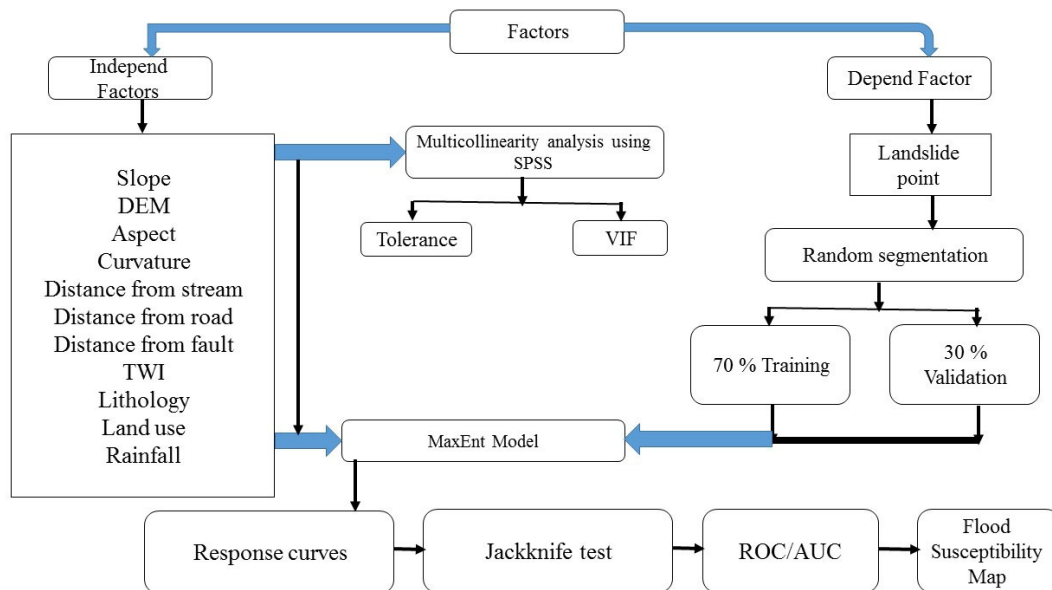
¹ Receiver Operating Characteristic



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز سد کرج در ایران و استان البرز و نقاط زمین لغزش آموزشی و اعتبارسنجی
 Fig. 1. Location of Karaj Dam Watershed in Alborz Province, Iran and training and validation landslides

مرحله بعد، آزمون هم‌خطی بین پارامترها با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. با استفاده از شاخص‌های ضریب تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (VIF) در صورت وجود هم‌خطی بین پارامترها ($VIF > 5$ و $Tolerance < 0.1$) از روند مدلسازی حذف خواهند شد (Hong et al., 2019؛ Pandey et al., 2018؛ Kornejady et al., 2017). لازم به ذکر است که نقاط زمین لغزش حوضه مورد مطالعه از بانک اطلاعاتی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز و بازدیدهای میدانی تهیه شده است. شکل ۲، نمودار جریانی مراحل پژوهش را نشان می‌دهد.

در پژوهش حاضر، برای تعیین مناطق دارای حساسیت زمین لغزش از ۱۱ شاخص موثر بر وقوع زمین لغزش شامل ارتفاع (متر)، شیب (درصد)، جهت شیب، انحنای سطح، فاصله از آبراهه (متر)، لیتولوژی، بارندگی (میلی‌متر)، کاربری اراضی، فاصله از جاده (متر)، فاصله از گسل (متر) و شاخص رطوبت توپوگرافیک استفاده شده است. در این پژوهش، از مجموع ۴۷۷ زمین لغزش، به صورت تصادفی، ۱۴۳ زمین لغزش (۳۰ درصد) به عنوان داده‌های اعتبارسنجی و ۳۳۴ زمین لغزش (۷۰ درصد) به عنوان داده‌های آزمون (آموزش) طبقه‌بندی شدند (شکل ۱) و در



شکل ۲- نمودار جریانی مراحل پژوهش
 Fig. 2. Flowchart of the methodology

نظر گرفته می‌شود (Miller et al., 1990). واحدهای زمین‌شناسی از طریق افزایش و کاهش نفوذپذیری بر وقوع زمین‌لغزش اثر می‌گذارند.

لایه کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز دریافت شده است. کاربری اراضی، جز شاخص‌های اکولوژیک دسته‌بندی می‌شود و به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر روی فرایندهای هیدرولوژیک تاثیرگذار است (Nachappa et al., 2020). کاربری اراضی بر روی رواناب سطحی، تبخیر و تعرق و میزان نفوذ آب اثرگذار است و از طریق مقدار نفوذ بر وقوع زمین‌لغزش تاثیرگذار است و پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری دامنه دارد (Nachappa et al., 2020). شاخص TWI، تاثیر توپوگرافی بر تولید رواناب را به‌صورت کمی نشان می‌دهد و توزیع مکانی رطوبت خاک را نیز برآورد می‌کند (Arulbalaji et al., 2019).

افزایش TWI، به معنی افزایش حجم آب در دسترس برای نفوذ است که می‌تواند باعث تشدید زمین‌لغزش شود (Chen et al., 2018). لایه‌های فاصله از جاده بر اساس جاده‌های موجود (نقشه وزارت راه و شهرسازی کشور) و فاصله از گسل بر اساس گسل‌های موجود در منطقه (نقشه زمین‌شناسی) و با استفاده از تابع Euclidean distance در نرم افزار ArcGIS تهیه شدند. فاصله از جاده و فاصله از گسل نقش بسیار مهمی در حساسیت وقوع زمین‌لغزش ایفا می‌کنند. جاده‌ها وضعیت طبیعی و شیب تعادل منطقه را به هم زده و باعث افزایش فشار به دامنه پایین جاده و زمین‌لغزش در نزدیکی جاده‌ها می‌شوند (Aghdam et al., 2016). جابجایی و فعالیت گسل‌ها اثرات مهمی دارد که یکی از اثرات چشم‌گیر آن زمین‌لغزش است (Chen et al., 2018). در واقع مناطقی که دارای رطوبت بالا و شیب مناسب هستند در اثر فعالیت گسل‌ها امکان وقوع زمین‌لغزش را دارند (Chen et al., 2018). نقشه بارندگی با استفاده از اطلاعات ۱۳۸ ایستگاه باران‌سنجی تهیه شده است. ابتدا میانگین بارندگی ۲۰ ساله (۱۳۷۸-۱۳۹۸) برای هر ایستگاه محاسبه شد و سپس با استفاده از روش کریجینگ جهانی (به‌دلیل کم‌ترین میزان RMSE) در نرم افزار ArcGIS پهنه‌بندی بارندگی انجام گرفت.

مدل پیشینه آنروپی، یکی از روش‌های یادگیری ماشینی است که به‌صورت گسترده در سال‌های اخیر از

ابتدا، لایه مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از نقاط ارتفاعی و خطوط تراز در ابعاد 10×10 متر تهیه شد. تغییرات ارتفاع، موجب تغییرات بارندگی می‌شود و در نتیجه، بر میزان پوشش گیاهی، تغییرات دمایی، هوازگی و میزان نفوذ آب تاثیرگذار خواهد بود (Kadavi et al., 2018). در مناطق مرتفع با شیب بالا، میزان بارندگی بیشتر است، ولی به‌دلیل شیب بالا و شرایط زمین‌شناسی (عدم وجود خاک مناسب برای نفوذ آب و حالت صخره‌ای در حوضه مورد مطالعه)، بارندگی تبدیل به رواناب شده و نفوذ بسیار کم است و لذا، در مناطق با ارتفاع بالا و شیب زیاد احتمال وقوع زمین‌لغزش کمتر است. لایه‌های شیب، جهت شیب و انحنای سطح با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و به‌ترتیب از توابع Aspect، Slope، Plan curvature تهیه شده‌اند. افزایش شیب زمین باعث افزایش رواناب می‌شود و در نتیجه آب در دسترس را خارج می‌کند (Deng et al., 2016) و در نتیجه باعث کاهش حساسیت زمین‌لغزش می‌شود.

جهت شیب بر میزان دریافت بارندگی اثرگذار است و بر همین اساس، نوع پوشش گیاهی را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Muniraj et al., 2019). انحنای سطح در حقیقت انحنای مورفولوژیکی و توپوگرافیکی منطقه را نشان می‌دهد و در شیب‌های مقعر باعث تجمع آب و در شیب‌های محدب باعث افزایش رواناب می‌شود (Naghbi et al., 2017). شیب‌های مقعر، به‌دلیل افزایش نفوذ باعث تشدید زمین‌لغزش می‌شوند (Teimouri et al., 2020). لایه فاصله از آبراهه بر اساس نقشه آبراهه‌ها (استخراج از نرم‌افزار SAGA GIS) و با استفاده از تابع Euclidean distance در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. زهکشی یک منطقه، به ساختار سازندهای زمین‌شناسی، نرخ نفوذپذیری و شیب بستگی دارد. تراکم زهکشی بالا باعث کاهش نفوذ و افزایش رواناب سطحی می‌شود و لذا، مناطق دارای تراکم زهکشی بالاتر از پتانسیل کمتری برای ایجاد زمین‌لغزش برخوردار هستند (Teimouri et al., 2020).

به‌طور کلی، زمین‌شناسی نقش مهمی در مطالعات حساسیت زمین‌لغزش به‌دلیل حساسیت‌های مختلف واحدهای سنگ‌شناسی به فرایندهای هیدرولوژیکی دارد. سنگ‌شناسی، به‌عنوان یک عامل مهم در تغییرات مکانی و زمانی زهکشی، هیدرولوژی و تولید رسوب حوزه آبخیز در

انجام شده مقدار AUC دامنه ۰/۵ تا ۱ را دارد که به ترتیب نشان از دقت ضعیف تا عالی مدل برای پیش‌بینی و آموزش است (Chen et al., 2018). همچنین، یکی از مهمترین مزایای به‌کارگیری بیشینه آنتروپی به کمک نرم‌افزار MaxEnt، قابلیت این مدل در شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تاثیرگذار و تعیین اهمیت نسبی هر یک از عوامل موثر بر شناسایی مناطق زمین‌لغزش و تحلیل حساسیت مدل به روش Jackknife است (Phillips et al., 2006).

نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، ابتدا آزمون هم‌خطی بین پارامترها انجام گرفت (جدول ۱). نتایج نشان داد که بین پارامترها هم‌خطی وجود ندارد و لذا، کلیه پارامترها در روند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

جنبه‌های مختلف منابع طبیعی به‌خصوص زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفته است. مدل بیشینه آنتروپی فقط بر اساس موقعیت زمین‌لغزش‌ها مدل‌سازی را انجام می‌دهد، درحالی‌که مدل‌های آماری و سایر روش‌ها علاوه بر موقعیت های وقوع زمین‌لغزش، نیازمند موقعیت‌های عدم وقوع زمین‌لغزش نیز هستند. از آنجا که یافتن نقاط عدم وقوع زمین‌لغزش و اطمینان از این عدم استعداد مشکلات زیادی در مطالعات در پی خواهد داشت، استفاده از مدل بیشینه آنتروپی، به‌عنوان یک روشی که فقط وابسته به نقاطی هستند که مستعد زمین‌لغزش هستند، می‌تواند منجر به حذف بسیاری از ناکارآمدی‌ها و عدم قطعیت ناشی از نقاط عدم حضور شود.

ارزیابی نقشه نهایی با استفاده از منحنی ROC امکان پذیر است و سطح زیر نمودار AUC به‌دست آمده، به‌عنوان معیاری از قدرت تفکیک مدل در تشخیص نقاط حضور و عدم حضور مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به مرور منابع

جدول ۱- نتایج تجزیه و تحلیل آزمون هم‌خطی بین پارامترها

Table 1. Results of linear test analysis between the parameters

VIF	Tolerance	Parameters
1.112	0.971	Land use
1.145	0.922	Distance to stream
1.291	0.834	TWI
1.323	0.709	Lithology
1.514	0.678	Rainfall
1.629	0.556	Distance to road
1.984	0.501	Distance to Fault
2.245	0.457	Slope angle
2.386	0.412	Aspect
2.541	0.376	Plan curvature
2.874	0.314	Elevation

کاهش دخالت‌های انسانی، از دلایل کاهش وقوع زمین لغزش در ارتفاعات بالادست است که با نتایج Park (2015) و Salarian et al., (2014) همخوانی دارد.

نتایج نشان داد که با افزایش شیب تا حدود ۳۰ درصد، حساسیت وقوع زمین‌لغزش نیز افزایش پیدا کرده است و از شیب ۳۰ درصد به بالا روند ثابت نزولی حساسیت وقوع زمین‌لغزش اتفاق افتاده است که به دلیل کاهش فعالیت‌های انسانی است و با نتایج Park (2015) همخوانی دارد. این در حالی است که Youssef et al., (2016) به دلیل برتری نیروی برشی در مقابل نیروی مقاوم شیب‌های بیشتر را در وقوع زمین‌لغزش موثر می‌دانند.

منحنی پاسخ تغییرات پارامترها برای تعیین مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش و نحوه اثر آن بر روی پیش‌بینی مدل بیشینه آنتروپی در شکل ۳، نشان داده شده است. بر اساس این شکل، با افزایش ارتفاع تا ۱۸۰۰ متر، حساسیت وقوع زمین‌لغزش افزایش و از ۱۸۰۰ متر به بالا حساسیت کاهش پیدا کرده است. از دلایل افزایش حساسیت زمین‌لغزش در ارتفاع پایین خاک‌های عمیق و وجود دره‌ها و دامنه‌های مقعر با شرایط اشباع در این مناطق است (Pourghasemi et al., 2016). در ارتفاعات بالا به علت این‌که نوع نزولات بیشتر به‌صورت برف است و در این مناطق خاک‌زایی به‌کندی صورت می‌گیرد و همچنین،

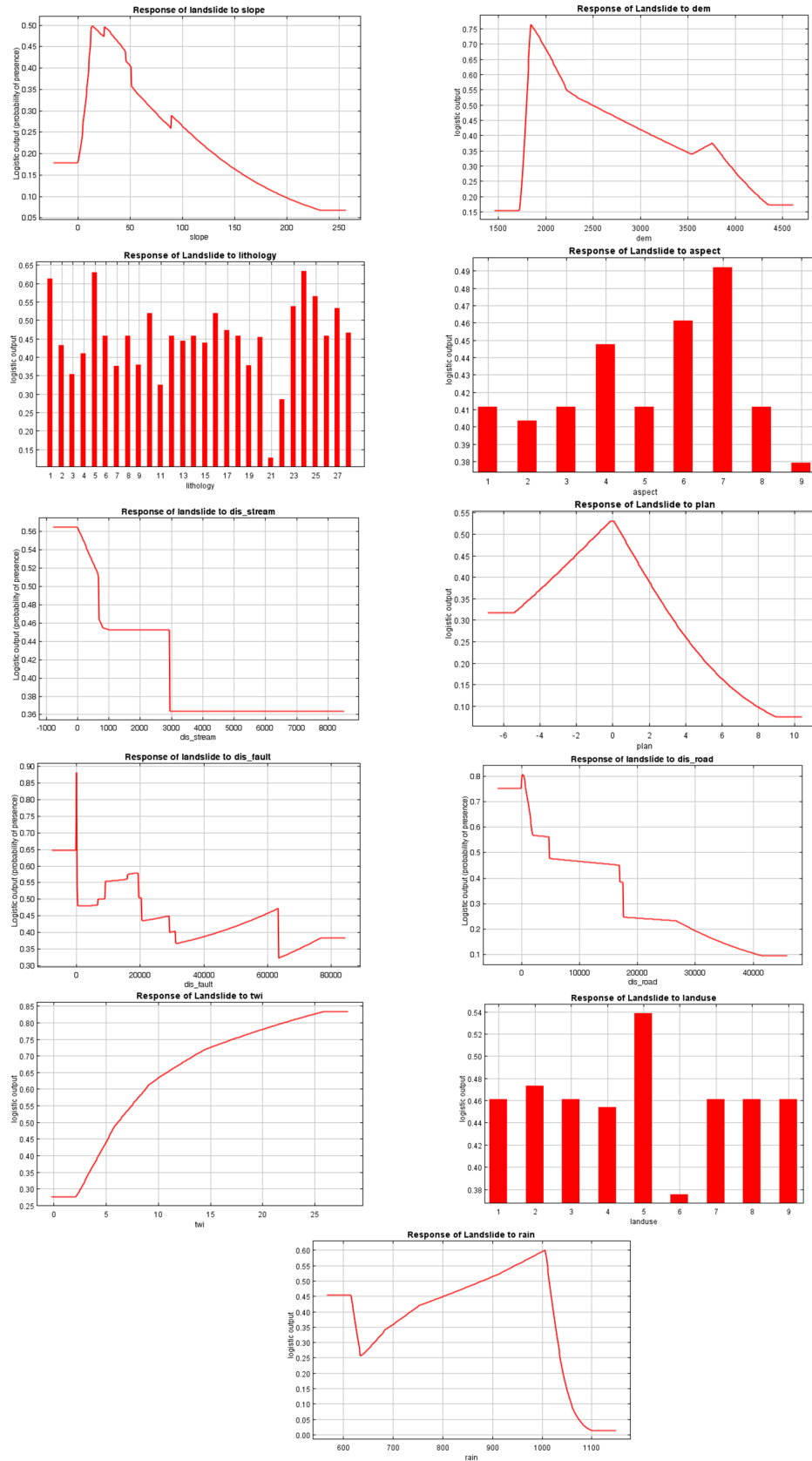
از دلایل دیگر می‌توان به وجود سازندهای حساس به زمین‌لغزش و برهم خوردن تعادل شیب در اثر فعالیت‌های انسانی اشاره کرد. بر اساس نتایج واحدهای سنگی کنگلومرا، ماسه سنگ، شیل و رسوبات آبرفتی کواترن با ضخامت زیاد به ترتیب بیشترین میزان تاثیر را بر حساسیت وقوع زمین‌لغزش داشته‌اند که از دلایل آن می‌توان به جذب آب در این واحدها اشاره کرد (Kornejady et al., 2017). همچنین، درز و شکاف‌ها و شکستگی‌هایی که در این مناطق وجود دارد بیشتر سازندها را مستعد زمین‌لغزش کرده است. منحنی پاسخ کاربری اراضی نشان داد که بیشترین میزان حساسیت زمین‌لغزش در کاربری مراتع فقیر اتفاق افتاده است. از دلایل افزایش میزان حساسیت زمین‌لغزش در مراتع فقیر می‌توان به از هم گسیختگی خاک در اثر فعالیت چرای دام‌ها اشاره کرد. منحنی پاسخ شاخص رطوبت توپوگرافیک نشان داد که با افزایش TWI میزان حساسیت زمین‌لغزش افزایش پیدا می‌کند. یکی از دلایل این امر این است که با افزایش TWI میزان رطوبت خاک افزایش پیدا می‌کند و یکی از عوامل اصلی ایجاد زمین لغزش وجود آب و رطوبت است.

فاصله از گسل در حساسیت وقوع زمین‌لغزش نقشی دوگانه داشته است و در برخی موارد با افزایش فاصله از گسل، کاهش و افزایش حساسیت وقوع زمین‌لغزش رخ داده است. ولی در حالت کلی، روند نزولی کاهش حساسیت وقوع زمین‌لغزش اتفاق افتاده است که (Park et al., 2015) و (Amir Ahmadi et al., 2017) به نتایج مشابه دست یافته اند. منحنی پاسخ میزان بارندگی نشان داد که با افزایش میزان بارندگی تا ۱۰۰۰ میلی‌متر میزان احتمال وقوع زمین لغزش افزایش پیدا کرده است و از ۱۰۰۰ میلی‌متر به بالا با کاهش احتمال وقوع زمین‌لغزش همراه بوده است که از دلایل این امر می‌توان به افزایش میزان پوشش گیاهی در اثر افزایش میزان بارندگی و تثبیت خاک‌ها اشاره کرد.

لازم به ذکر است که در شیب‌های زیاد به دلیل افزایش رواناب و کاهش نفوذ آب احتمال وقوع زمین‌لغزش کمتر است. به علت دریافت بارش بیشتر دامنه‌های رو به شرق، جنوب غربی و جنوب بیشترین حساسیت وقوع زمین‌لغزش را دارند. در حالت کلی با افزایش بارندگی میزان حساسیت وقوع زمین‌لغزش نیز افزایش پیدا کرده است که از دلایل آن می‌توان به افزایش نفوذ و در نتیجه افزایش آب زیرزمینی و فشار هوا اشاره کرد (Mirzaei et al., 2018).

انحنای سطح در بازه ۵/۵- تا صفر باعث افزایش حساسیت وقوع زمین‌لغزش شده است و در خارج از این دامنه با افزایش مقدار عددی انحنای سطح، حساسیت زمین لغزش با کاهش همراه بوده است. بیشتر مناطق حساس به زمین‌لغزش در شیب‌های محدب واقع شده است که این امر به علت واگرایی جریان آب در این دامنه‌ها و انبساط و انقباض خاک، دامنه‌های محدب است که با نتایج Chen et al., (2018) در یک راستا است. نتایج نشان‌دهنده روند نزولی کاهش حساسیت وقوع زمین‌لغزش با افزایش فاصله از آبراهه بود که از دلایل آن می‌توان به ناپایداری دامنه‌های مشرف به آبراهه بر اثر فرسایش کنار رودخانه‌ای اشاره کرد که با نتایج (Chen et al., 2018) و (Kornejady et al., 2017) و (Amir Ahmadi et al., 2017) مطابقت دارد.

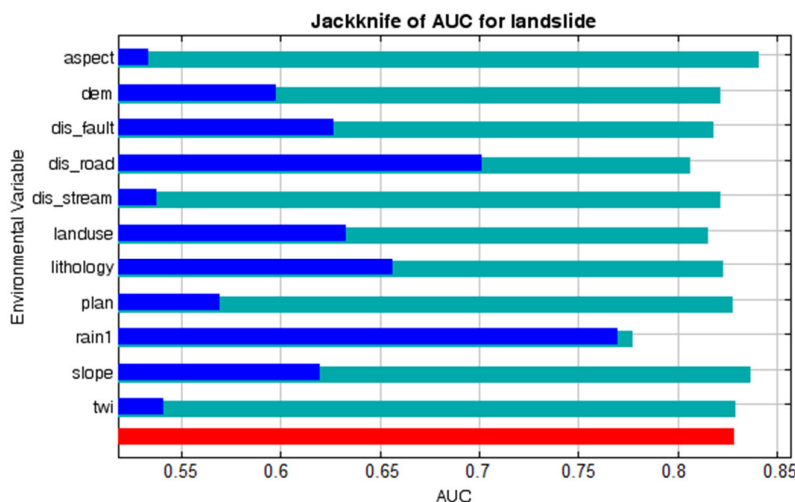
لازم به ذکر است که در مناطق نزدیک به آبراهه‌ها میزان نفوذپذیری بیشتر است و به همین منظور احتمال وقوع زمین‌لغزش افزایش پیدا می‌کند. عامل فاصله از جاده بیانگر کاهش حساسیت وقوع زمین‌لغزش با افزایش فاصله از جاده بوده است. این روند کاملاً نزولی بوده است که با نتایج (Amir Ahmadi et al., 2017) همخوانی دارد. از دلایل افزایش حساسیت در مناطق نزدیک به جاده تغییر شیب دامنه‌ها، جاده‌های فرعی و خاک‌برداری هستند (Pourghasemi et al., 2016).



شکل ۳- منحنی پاسخ عوامل مورد استفاده و تاثیر آن بر مدل سازی حساسیت زمین لغزش
 Fig. 3. Response curve of the factors used and its effect on landslide susceptibility modeling

گسل ۶۲ درصد، شیب ۶۰ درصد، ارتفاع ۵۸ درصد، انحنای سطح ۵۶ درصد، شاخص رطوبت توپوگرافی ۴۶ درصد، فاصله از آبراهه ۴۷ درصد و جهت شیب ۴۳ درصد در پیش بینی مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش تاثیرگذار بوده‌اند.

شکل ۴، نتایج حاصل از نمودار جک‌نایف برای تعیین مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار و سهم هر یک از پارامترها را در پیش‌بینی مدل MaxEnt نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴، بارندگی ۷۸ درصد، فاصله از جاده ۷۱ درصد، لیتولوژی ۶۵ درصد، کاربری اراضی ۶۴ درصد، فاصله از



شکل ۴- نتایج حاصل از آزمون جک‌نایف جهت تعیین مهم‌ترین پارامترها
 Fig. 4. Results of the Jackknife test to determine the most important factors

نزدیک می‌شود، پتانسیل وقوع زمین‌لغزش بیشتر است. همچنین، جدول ۲، مساحت و درصد مساحت هر یک از طبقات حساسیت زمین‌لغزش را نشان می‌دهد. طبقه حساسیت زمین‌لغزش خیلی کم، کم‌ترین مساحت معادل ۱۱ درصد سطح حوضه و طبقه متوسط بیشترین میزان مساحت معادل ۳۱ درصد سطح حوضه را شامل می‌شوند.

شکل ۵، نقشه مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش را در حوزه آبخیز سد کرج نشان می‌دهد. بر اساس این نقشه بیش از ۳۵ درصد از پهنه حوضه مورد مطالعه دارای پتانسیل حساسیت زمین‌لغزش زیاد و خیلی زیاد است که نشان‌دهنده حساسیت بالای حوضه مذکور نسبت به زمین لغزش است. در این نقشه هر چقدر اعداد به سمت عدد یک

جدول ۲- مساحت و درصد مساحت طبقات حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز سد کرج

Table 2. Area and percentage of landslide susceptibility classes in the watershed of Karaj Dam Watershed

Percentage of area	Area (hectares)	Sensitivity class
11.13	9468.9	Very low
21.68	18444.6	Low
31.28	26609.5	Moderate
23.32	19839	High
12.59	10706.2	Very High
100	85068.3	Total

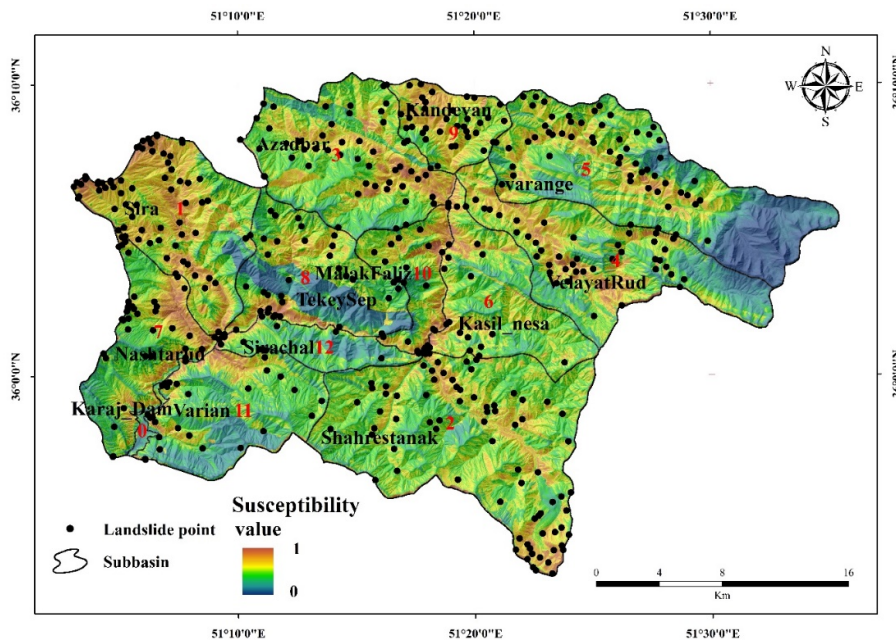
لغزش هستند. شکل ۵، موقعیت زیرحوضه‌ها و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها را نسبت به میزان حساسیت زمین‌لغزش نشان می‌دهد.

بر اساس جدول ۳، میزان مساحت حساسیت زمین لغزش طبقه زیاد و خیلی زیاد، به ترتیب زیرحوضه‌های سیرا، شهرستانک و آزادبر، در اولویت میزان حساسیت زمین

جدول ۳- مساحت و درصد مساحت حساسیت زمین لغزش به تفکیک زیرحوضه‌ها

Table 3. Area and percentage of landslide susceptibility area by sub-basins

Priority	Very high		High		Moderate		Low		Very low		Landslide classes
	Percentage	Area	Percentage	Area	Percentage	Area	Percentage	Area	Percentage	Area	
3	1.39	1182	2.66	2263	3.76	3194	2.22	1887	0.18	154	Azadbar
9	0.71	604	1.41	1201	1.04	886	0.26	225	0.02	15	Kandovan
5	0.90	764	2.72	2313	3.29	2801	3.06	2600	4.33	3686	Varangeh
1	2.59	2207	3.32	2822	1.89	1612	0.79	673	0.30	252	Sira
4	1.47	1246	2.58	2198	2.80	2384	2.28	1936	1.26	1069	Velaia river
6	0.75	641	1.67	1423	2.91	2473	1.63	1388	0.12	101	Kasil and Nessa
8	0.72	615	1.41	1203	1.87	1587	1.38	1172	2.09	1774	Tekiesepahsalar
10	0.73	622	0.93	790	1.13	964	0.62	528	0.11	94	Malik Faliz
7	1.10	940	1.26	1074	1.87	1593	1.72	1464	0.21	179	Nashtrood
12	0.12	103	0.23	195	0.76	645	1.14	967	0.58	495	Sirachal
11	0.58	498	1.01	856	2.10	1787	2.67	2273	1.50	1273	Varian
2	1.49	1268	4.13	3510	7.91	6726	3.71	3154	0.23	195	Shahrestanak
	12.6	10690.5	23.3	19849.3	31.3	26651.9	21.5	18267.5	10.9	9288.2	Total



شکل ۵- موقعیت و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها نسبت به پهنه‌بندی و مدل‌سازی میزان حساسیت زمین لغزش

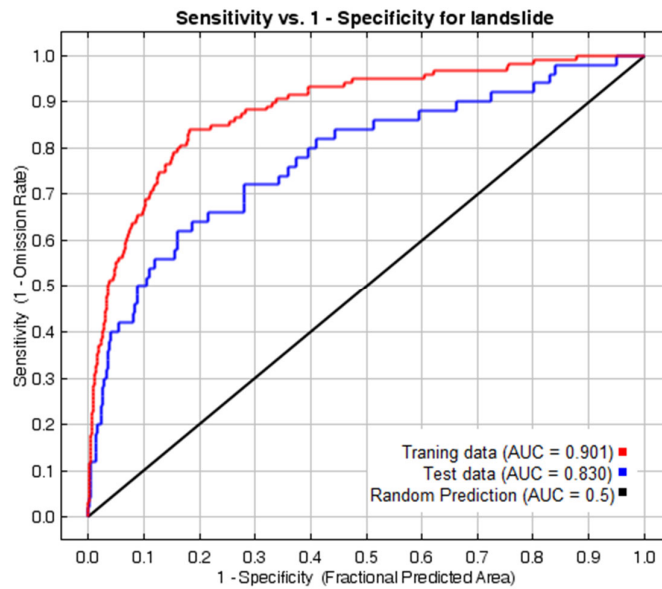
Fig.5. Position and prioritization of sub-watersheds to landslide susceptibility mapping

داده شده است. بر این اساس مدل، در مرحله آموزش دقت ۹۰ درصد (عالی) و در مرحله اعتبارسنجی دقت ۸۳ درصد (خیلی خوب) را داشت که بر اساس نظر Phillips et al.,

بعد از تعیین مهم‌ترین عوامل موثر بر زمین لغزش و تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش، اعتبارسنجی مدل با استفاده از منحنی ROC انجام گرفت که نتایج آن در شکل ۶ نشان

Kornejady et al., (2017) نیز توانایی مدل MaxEnt را تایید کرده‌اند.

(2006) به معنای عملکرد عالی مدل است. محققان دیگر از جمله، (2018) Mirzaei et al., (2018) Pandey et al. و



شکل ۶- نتایج مقادیر ROC در بخش آموزش و اعتبارسنجی مدل
Fig. 6. Results of ROC values in training and validation model

کرج تهیه شد. عوامل مختلفی از طیف وسیعی از سنج‌های محیطی از قبیل عوامل انسانی (جاده‌سازی)، عوامل آب‌شناختی (شاخص قدرت جریان، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی)، عوامل اقلیمی (بارندگی)، توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب و انحنای توپوگرافی)، بوم‌شناختی (کاربری اراضی، بافت خاک و نوع خاک) و عوامل زمین‌شناختی (سنگ‌شناسی، فاصله از گسل و تراکم گسل) بر حساسیت زمین‌لغزش تاثیرگذار هستند. تعیین مهم‌ترین و موثرترین عوامل تاثیرگذار بر زمین‌لغزش برای انجام مدل‌سازی بسیار ضروری است.

نتایج نشان داد که عوامل بارندگی، فاصله از جاده، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از گسل و شیب، از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر حساسیت زمین‌لغزش با مشارکت بالای ۶۰ درصد هستند که مدیریت کاربری اراضی و رعایت اصول جاده‌سازی به‌عنوان فعالیت‌های انسانی را می‌طلبد. منحنی ROC رسم شده نشان داد که دقت مدل در برآورد مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش هم در مرحله آزمون و هم در مرحله اعتبارسنجی به‌ترتیب عالی و خیلی خوب بوده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که مدل MaxEnt توانایی بالایی در تعیین مناطق دارای

نتیجه‌گیری

افزایش دقت در برخورد با مسایل پیچیده و عدم قطعیت‌های موجود در ارزیابی حساسیت و خطر زمین‌لغزش منجر به استفاده از روش‌های مختلف داده‌کاوی در مطالعات زمین‌لغزش شده است. زمین‌لغزش، به‌عنوان یکی از پرمخاطره‌ترین بلایای طبیعی در جهان محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر روش‌های سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی و یادگیری ماشینی در مقایسه با روش‌های زمان‌بر و پرهزینه سنتی در تشخیص مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش، کارایی زیادی داشته‌اند و باعث افزایش یافتن دقت و سرعت در ارزیابی حساسیت و احتمال وقوع زمین‌لغزش با کمک گرفتن از داده‌های محیطی، توپوگرافی و اقلیمی شده‌اند. با توجه به این‌که شناسایی مناطق دارای حساسیت زمین‌لغزش مبتنی بر روش‌های سنتی و نظرات کارشناسی از دقت قابل قبولی برخوردار نیست، استفاده از روش‌های نوین یادگیری ماشینی مثل بیشینه آنتروپی امری ضروری است.

در این پژوهش، با در نظر گرفتن عوامل محیطی و انسانی تاثیرگذار (۱۱ عامل) و با استفاده از روش بیشینه آنتروپی نقشه حساسیت وقوع زمین‌لغزش حوزه آبخیز سد

به دلیل این که در این مناطق دخالت‌های انسانی فراوانی صورت گرفته است، حساسیت زمین لغزش افزایش پیدا کرده است. ترکیب سامانه اطلاعات جغرافیایی با روش حداکثر آنتروپی، به منظور تعیین مناطق دارای حساسیت زمین لغزش مخصوصاً در کشورهای در حال توسعه مانند ایران که دسترسی به اطلاعات و داده‌های زمین لغزش با محدودیت زمان و هزینه مواجه هستند پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از کلیه افرادی که در ارتقای کیفیت مقاله نقش موثری ایفا کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسندگان است.

حساسیت زمین لغزش دارد و با توجه به سرعت و دقت بالای مدل پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات مشابه به خصوص در کشورهای در حال توسعه به دلیل کمبود امکانات و منابع مالی و همچنین زمان بر بودن شناسایی مناطق دارای حساسیت زمین لغزش مورد استفاده قرار بگیرد.

علاوه بر عوامل طبیعی برخی عوامل انسانی نظیر جاده سازی، نقش مهمی بر وقوع زمین لغزش دارد که برای کاهش نسبی خطرات لازم است از تغییر اکوسیستم به عنوان محرک بلایای طبیعی اجتناب کرد. نتایج این پژوهش، در تصمیم‌گیری و آمایش سرزمین استانی و همچنین برنامه‌ریزی شهری قابل استفاده خواهد بود و نقش به‌سزایی در پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین لغزش خواهد داشت.

به‌طور کلی، می‌توان بیان کرد که حوزه آبخیز سد کرج دارای پتانسیل حساسیت زمین لغزش بالایی است که بیشتر مناطق دارای حساسیت در نزدیکی جاده‌ها واقع شده‌اند و

منابع مورد استفاده

- Aghdam, I.N., Varzandeh, M.H.M., Pradhan, B. 2016. Landslide susceptibility mapping using an ensemble statistical index (Wi) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) model at Alborz Mountains (Iran). *Environ. Earth Sci.* 75(7), 553-563.
- Amir Ahmadi, A., Naemi Tabar, M., Gholkar, B. 2017. Prioritize and zoning factors affecting the landslide model entropy, case study: Bajgiran, Ghochan. *Hydrogeomorphol.* 3(11), 105-125 (In Persian).
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., Sreelash, K. 2019. GIS and AHP techniques based delineation of groundwater potential zones: a case study from southern Western Ghats, India. *J. Sci. Rep.* 9, 2082.
- Bui, T.D., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chapi, K., Alizadeh, M., Chen, W., Mohammadi, A., Ahmad, B., Panahi, M., Hong, H., 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 Sens.* 10(1527), 1-32.
- Chen, W., Zhang, S., Li, R., 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. *Sci. Total Environ.* 644, 1006-1018.
- Deng, F., Deng, Z., Lv, D., Wang, D., Duan, H., Xing, Z. 2016. Application of remote sensing and GIS analysis in groundwater potential estimation in west Liaoning Province, China. *J. Eng. Res.* 43, 1-17.
- Hong, H., Shahabi, H., Shirzadi, A., Chen, W., Chapi, K., Ahmad, B., Shadman, M., Yari, A., Tian, Y., Bui, D. 2019. Landslide susceptibility assessment at the Wuning area, China: a comparison between multi-criteria decision making, bivariate statistical and machine learning methods. *Nat. Hazards* 96, 173-212.
- Kadavi, P., Lee, C.W., Lee, S. 2018. Application of ensemble-based machine learning models to landslide susceptibility mapping. *Remote Sens.* 10(8), 1252.
- Kerekes, A.H., Poszet, S.L., Gal, A. 2018. Landslide susceptibility assessment using the maximum entropy model in a sector of the Cluj-Napoca Municipality, Romania. *Rev. Geomorphol.* 20, 130-146.
- Koehorst, B.A.N., Kjekstad, O., Patel, D., Lubkowski, Z., Knoeff, J.G., Akkerman, G.J. 2005. Workpackage 6 determination of socio-economic impact of natural disasters. *Assessing socioeconomic Impact in Europe*, 173 pages.
- Kornejady, A., Ownegh, M., Bahremand, A. 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena* 152, 144-162.
- Miller, J.R., Ritter, D.F., Kochel, R.C. 1990. Morphometric assessment of lithologic controls on drainage basin evolution in the Crawford Upland, south-central Indiana. *Am. J. Sci.* 290, 569-599.

- Mirzaei, G., Soltani, A., Soltani, M., 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. *Environ. Earth Sci.* 77, 581.
- Muniraj, K., Jesudhas, C.J., Chinnasamy, A. 2019. Delineating the groundwater potential zone in Tirunelveli Taluk, South Tamil Nadu, India, using remote sensing, Geographical Information System (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) techniques. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sci.*
- Nachappa, T.G., Tavakkoli, S., Gholamnia, Kh. Ghorbanzadeh, O., Rahmati, O., Blaschke, T. 2020. Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. *J. Hydrol.* 590, 125275.
- Naghibi, S.A., Moghaddam, D., Kalantari, B., Pradhan, B., Kisi, O. 2017. A comparative assessment of GIS-based data mining models and a novel ensemble model in groundwater well potential mapping. *J. Hydrol.* 548, 471-483.
- Nguyen, V.T., Tran, T.H., Ha, N.A., Ngo, V.L., Nadhir, A.A., Tran, V.P., Nuyen, D.H., Malek, M.A., Amini, A., Prakash, I., Ho, L.S., Pham, B.T. 2019. GIS based novel hybrid computational intelligence models for mapping landslide susceptibility: a case study at Da Lat City, Vietnam. *Sustainability* 11, 7118.
- Pandey, V.K., Pourghasemi, H.R., Sharma, M.C. 2018. Landslide susceptibility mapping using maximum entropy and support vector machine models along the Highway Corridor, Garhwal Himalaya. *Geocarto Int.* 35(2), 168-187.
- Park, N.W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environ. Earth Sci.* 73, 937-949.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Model.* 190, 231-259.
- Pourghasemi, H.R., Rossi, M. 2016. Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods. *Theor. Appl. Climatol.* 1-25.
- Salarian, T., Zare, M., Jouri, M.H., Miarrostami, S., Mahmoudi, M. 2014. Evaluation of shallow landslides hazard using artificial neural network of multi-layer perceptron method in Subalpine Grassland, case study: Glandrood Watershed Mazandaran. *Int. J. Agric. Sci.* 7(11), 795-804.
- Teimouri, M., Asadi Naivan, O. 2020. Susceptibility zoning and prioritization of the factors affecting landslide using MaxEnt, geographic information system and remote sensing models, case study: Lorestan Province. *Hydrogeomorphology* 6(21), 155-179.
- Toll, D.G. 1996. Artificial intelligence applications in geotechnical engineering. *Electron. J. Geotech. Eng.* 27 pages.
- Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z., Al-Katheeri, M.M. 2016. Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Landslides* 13(5), 839-856.
- Zhang, T., Han, L., Han, J., Li, X., Zhang, H., Wang, H. 2019. Assessment of landslide susceptibility using integrated ensemble fractal dimension with kernel logistic regression model. *Entropy* 21(218), 1-23.