

Spatial modeling of landslides in Khorasan Razavi Province using machine learning methods

Malihe Mohammadnia^{1*}, Abolqasem Amir Ahmadi² and Leila Goli Mokhtari³

¹ PhD in Geomorphology, Department of Geography, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

² Professor, Department of Geography, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

³ Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Received: 01 February 2024

Accepted: 28 May 2024

Extended abstract

Introduction

Humanity is facing many environmental challenges. Natural disasters are among these problems, causing the death and injury of hundreds of thousands of people and rendering millions homeless worldwide every year. Geomorphological hazards, particularly mass movements and landslides, are considered some of the most potentially harmful phenomena. Mass movement refers to the outward or downward movement of domain-forming materials under the influence of gravity. These movements are primarily triggered by gravity, natural factors such as heavy rainfall, earthquakes, and soil saturation with water, as well as human activities like deforestation and improper engineering operations. According to the 2012 World Natural Hazards Report, landslides were ranked among the seven most dangerous natural disasters globally. The occurrence of natural hazards, including landslides, exerts considerable pressure on the economic development of countries, especially in developing regions, with financial damages hindering economic growth and prosperity. Iran, with its mountainous terrain, high tectonic and seismic activity, and diverse geological and climatic conditions, has created natural conditions conducive to a wide range of landslides.

Materials and Methods

The aim of this study is to spatially model landslide susceptibility using machine learning techniques, including random forest, support vector machine, and enhanced regression tree, in Razavi Khorasan province. Initially, the distribution map of landslides in the region was prepared through field visits and data from the national landslides database. In the next step, 70% of the identified landslides were used for model development, while 30% were reserved for model evaluation. The information layers for altitude, slope, slope direction, distance from waterway, waterway density, distance from roads, distance from faults, land use, vegetation index, surface curvature, profile curvature, precipitation, and selected lithological units were prepared and mapped using ArcGIS.

Results and Discussion

Prioritization of the factors affecting landslide occurrence using the random forest model showed that precipitation and altitude had the greatest impact on landslides in the study area. Additionally, the evaluation of the machine learning models using the relative operating characteristic (ROC) curve indicated that the landslide potential map generated by the random forest method had the highest accuracy (0.97). Based on this map, more than 25% of the area was classified into high and very high-risk zones.

Conclusion

This map can assist environmental planners in construction projects and help prevent land-use changes and construction in high-risk areas. Additionally, public awareness campaigns can reduce harmful human activities in these zones. While controlling landslides may not always be feasible or is often very expensive, proper management can help mitigate or reduce risks. By identifying the key factors in mass movement occurrences and zoning the areas accordingly, it is hoped that this research will contribute to the development of effective risk management plans and reduce the damage caused by landslides.

* Corresponding author: malihe.mohamadnia@yahoo.com

Keywords: Geographic information system, Mass movements, Random forest model, Risk, Susceptibility map

Cite this article: Mohammadnia, M., Amir Ahmadi, A., Goli Mokhtari, L., 2024. Spatial modeling of landslides in Khorasan Razavi Province using machine learning methods. Watershed Engineering and Management 16(3), 378-393.

© 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>)



مدل سازی مکانی زمین لغزش های استان خراسان رضوی با استفاده از روش های یادگیری ماشین

ملیحه محمدنیا^{۱*}، ابوالقاسم امیر احمدی^۲ و لیلا گلی مختاری^۳

^۱ دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

^۲ استاد، گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

^۳ استادیار، گروه جغرافیا، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲

چکیده مبسوط

مقدمه

انسان با مسائل محیط زیستی فراوانی مواجه است. بلایای طبیعی جزئی از این مشکلات هستند که سالانه موجب کشته و مجروح شدن صدها هزار تن و بی خانمان شدن میلیون ها نفر در سراسر جهان می شوند. مخاطرات ژئومورفولوژیک به عنوان پدیده ای بالقوه زیان بار مطرح است که مهم ترین آنها حرکت های توده ای و زمین لغزش ها هستند. حرکت توده ای، شامل حرکت به سمت بیرون یا رو به پایین یک توده از مواد تشکیل دهنده دامنه تحت تأثیر نیروی گرانش است. این نوع حرکات عمدتاً در اثر نیروی ثقل، عوامل طبیعی مثل بارش شدید، زلزله، اشباع شدن خاک از آب و همچنین، علل انسانی مثل تخریب پوشش گیاهی و عملیات نادرست مهندسی به وقوع می پیوندد. بر طبق گزارش های جهانی مخاطرات طبیعی در سال ۲۰۱۲، لغزش در میان هفت بلایای طبیعی خطرناک جهان قرار گرفت. وقوع مخاطرات طبیعی (از جمله زمین لغزش ها) فشار جدی بر روی توسعه اقتصادی کشورها، به ویژه کشورهای جهان سوم دارد. به طوری که خسارت های مالی ناشی از مخاطرات طبیعی، رشد و شکوفایی اقتصادی را با رکود مواجه می سازد. سرزمین ایران با توپوگرافی نسبتاً کوهستانی، فعالیت زمین ساختی و لرزه خیزی زیاد و شرایط متنوع زمین شناسی و اقلیمی عمده شرایط طبیعی را برای ایجاد طیف وسیعی از زمین لغزش ها فراهم کرده است.

مواد و روش ها

هدف از این پژوهش، مدل سازی مکانی حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش های یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و درخت رگرسیون تقویت شده در استان خراسان رضوی است. در ابتدا، نقشه پراکنش زمین لغزش های منطقه در باز دیدهای صحرایی و با استفاده از بانک اطلاعات زمین لغزش های کشور تهیه شد. در مرحله بعد، ۷۰ درصد زمین لغزش های شناسایی شده برای فرایند مدل سازی و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل های یاد شده، به کار برده شد. لایه های اطلاعاتی ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، فاصله از جاده، فاصله از غسل، کاربری زمین، شاخص پوشش گیاهی، انحنای سطح، انحنای نیمرخ، بارش و واحدهای سنگ شناسی انتخاب و نقشه های آن در محیط ArcGIS تهیه شد.

* مسئول مکاتبات: malihe.mohamadnia@yahoo.com

نتایج و بحث

نتایج اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از مدل جنگل تصادفی نشان داد که عوامل بارش و ارتفاع بیشترین تأثیر را در وقوع رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه داشته است. همچنین، نتایج ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) نشان داد نقشه تهیه شده با روش جنگل تصادفی بیشترین دقت (۰/۹۷) را در تهیه نقشه پتانسیل زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه داشته است و بر این اساس، بیش از ۲۵ درصد منطقه در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد.

نتیجه‌گیری

این نقشه می‌تواند به برنامه‌ریزان محیطی جهت پروژه‌های عمرانی کمک کند و از تغییر کاربری و ساخت‌وساز در مناطق با حساسیت بالا جلوگیری شود. همچنین، می‌توان با آگاه نمودن مردم، فعالیت‌های ناصحیح انسانی در این زمینه را کاهش داد. گرچه کنترل زمین‌لغزش در حال وقوع اغلب امکان‌پذیر نبوده و یا در صورت امکان بسیار پرهزینه است ولی می‌توان با مدیریت صحیح در جهت پیشگیری و یا کاهش خطرات آن با در نظر گرفتن ویژگی‌های منطقه مطالعاتی، فعالیت‌هایی را به انجام رساند. امید است، با شناسایی عوامل مؤثر در وقوع حرکت‌های توده‌ای و پهنه‌بندی آن، بتوان کمک مؤثری در تدوین برنامه مدیریت خطر و کاهش خسارت‌های ناشی از این پدیده نمود.

واژه‌های کلیدی: حرکات توده‌ای، خطر، سامانه اطلاعات جغرافیایی، مدل جنگل تصادفی، نقشه حساسیت‌پذیری

مقدمه

برخوردار است (MirSaneie and Kardan, 1999). زمین لغزش، مهم‌ترین خطر طبیعی شناخته شده در مناطق کوهستانی به حساب می‌آید (Youssef et al., 2015) که عبارت از پایین افتادن یا حرکت یکپارچه و اغلب سریع حجمی از مواد رسوبی در امتداد دامنه‌ها است (Mahmoudi, 2008). این پدیده زمانی رخ می‌دهد که نیروی حاصل از وزن مواد بیش از نیروی مقاومت ناشی از نیروی برشی خاک باشد (Alipour and malekian, 2015). امروزه، نیاز فزاینده‌ای برای مدیریت خطر زمین لغزش به صورت کمی و پهنه‌بندی آن وجود دارد (Fell et al., 2008). تهیه نقشه خطر و حساسیت وقوع زمین‌لغزش ابزاری اساسی برای فعالیت‌های مدیریت بحران در نواحی کوهستانی است (Kumar et al., 2008). مدیریت ریسک و ارزیابی خطر زمین‌لغزش‌ها با شناسایی جامع و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری شروع می‌شود و این امر می‌تواند مبنایی برای کسب اطلاع از توزیع مکانی و زمانی آنها باشد (Guzzetti et al., 2003; Brardinoni et al., 2000).

وقایع طبیعی فرایندهای پیچیده‌ای هستند که در تمامی بخش‌های کره زمین رخ می‌دهند. در این بین، زمین‌لغزش به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی، همواره در سراسر جهان اتفاق می‌افتد و از اهمیت زیادی برخوردار است (Niazi et al., 2010). ناپایداری دامنه‌ها، یکی از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی است که در تغییر شکل سطح زمین نقش مؤثری دارد (Madadi et al., 2015; Vittorio De Blasio., 2011). زمانی که این فرایند فعالیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار دهد به پدیده‌ای خطرناک تبدیل می‌شود (FatemiAghda et al., 2003; Paoletti et al., 2013).

یکی از وظایف مهم دانش ژئومورفولوژی کاربردی، بررسی موقعیت مکان‌های خطرپذیر در برابر انواع مخاطرات ژئومورفولوژیک (Ebrahimi et al., 2015) و دوری‌جستن از مناطق خطر است (ShekariBadi et al., 2015). از میان حرکات دامنه‌ای، زمین‌لغزش‌ها با توجه به تکرار وقوع و خسارات زیان‌بار آن از اهمیت بسیار بالایی

زمین‌لغزش در حوضه الموت را تهیه نمودند که شاخص اعتبارسنجی مدل ۰/۹۵۷ برآورد شد. and Naemi, (2022) Tabar Goli Mokhtari Tabar, با استفاده از سه مدل داده‌کاوی ماشین بردار پشتیبان^۱، تابع شواهد قطعی^۲ و شواهد وزنی^۳ نقشه مخاطره زمین‌لغزش در شهرستان کلات را تهیه نمودند. متغیرهای زمین‌شناسی، ارتفاع، شیب، خاک‌شناسی و کاربری اراضی، به‌عنوان مهم‌ترین عوامل وقوع زمین‌لغزش در نظر گرفته شد.

کوه‌های بینالود و هزارمسجد، از ارتفاعات مهم استان خراسان رضوی است که فرایندهای دامنه‌ای به‌ویژه زمین‌لغزش در آن حاکم است. در زمینه حرکات دامنه‌ای، مطالعات جامعی در استان خراسان رضوی صورت نگرفته است و مطالعات به‌صورت پراکنده و حوضه‌ای انجام شده است. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی مکانی و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش در استان خراسان رضوی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و درخت رگرسیون تقویت‌شده است. به‌نظر می‌رسد که خروجی حاصل از این پژوهش می‌تواند در مدیریت محیطی مؤثر واقع شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: استان خراسان رضوی با مساحت ۱۴۳۸۶۴/۱۱۸ کیلومترمربع چهارمین استان کشور از نظر وسعت است. این استان با جمعیت ۵۲۹۹۹۹۵، در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). این استان دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک با میانگین بارش سالیانه بین ۷۵ تا ۳۹۰ میلی‌متر در مناطق مختلف متغیر است (Mosavi Baygia and Ashraf, 2011).

از آنجاکه تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش به‌طور چشمگیری برنامه‌ریزی کاربری را بهبود می‌بخشد، می‌توان از آن به‌عنوان روشی کارآمد برای کاهش خسارت‌های جانی و مالی ناشی از زمین‌لغزش‌ها استفاده کرد (Mohamadnia et al., 2016). بنابراین، برای مدیریت و کاهش خطر زمین‌لغزش شناسایی مناطق حساس ضروری به‌نظر می‌رسد (Hong et al., 2016).

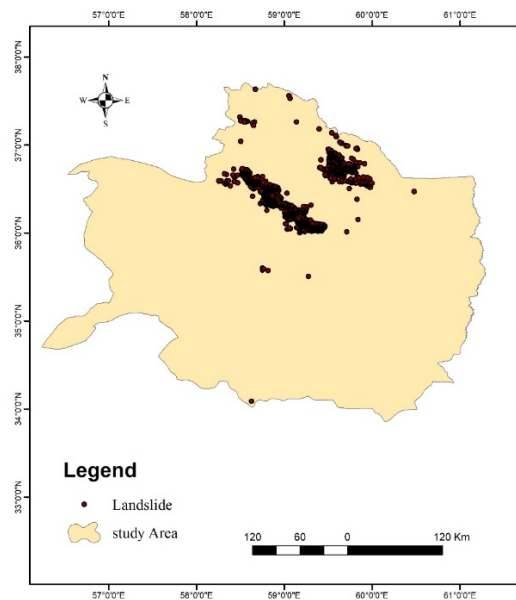
بنابراین، شناخت نواحی مستعد وقوع زمین‌لغزش، یکی از اقدامات اولیه در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای و عمرانی است (Mohamadnia et al., 2016). در زمینه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در داخل و خارج از کشور مطالعات زیادی صورت‌گرفته است. (Mohammadi and Pourghasemi, 2017) با استفاده از الگوریتم نوین جنگل تصادفی نقشه حساسیت به زمین‌لغزش بخشی از استان گلستان را تهیه نمودند. در این پژوهش، فاصله از جاده مهم‌ترین عامل در وقوع زمین‌لغزش معرفی شده است. (Kornezhadi et al., 2020) از دو مدل جنگل تصادفی و آنترپوی بیشینه برای مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز اوغان استفاده نمودند. در مرحله صحت‌سنجی مشخص شد مدل جنگل تصادفی قدرت تعمیم بالاتری دارد. (Afifi, 2021) در شهرستان لارستان استان فارس به تحلیل مکانی خطر زمین‌لغزش با تأکید بر عوامل ژئومورفولوژیک با استفاده از مدل جنگل تصادفی پرداخت. نتایج ارزیابی روش پهنه‌بندی با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی و ۳۰ درصد نقاط لغزشی استفاده نشده در فرایند مدل‌سازی، بیانگر دقت عالی مدل جنگل تصادفی در برآورد خطر زمین‌لغزش در منطقه است. (Rajabi et al., 2022) با استفاده از روش رگرسیون لجستیک نقشه خطر

³ WOE

¹ SVM

² EBF

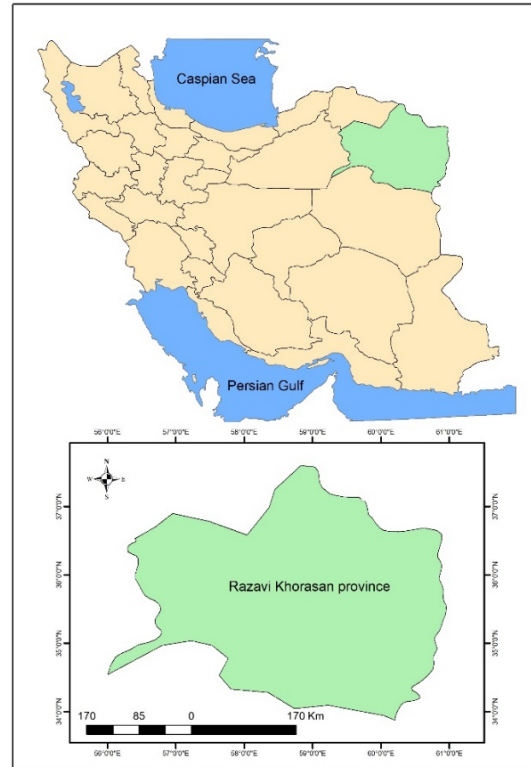
و زمین‌شناسی بر اساس مرور منابع انتخاب و نقشه‌های مربوط در محیط ArcGIS تهیه شد. عوامل مؤثر در وقوع لغزش‌های منطقه بر اساس بازدیدهای میدانی، بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای (لندست ۸-۲۰۱۹) انتخاب شدند. در شکل ۳، به‌طور خلاصه مراحل انجام پژوهش ذکر شده است.



شکل ۲- نقشه پراکنش لغزش‌ها و نمونه‌ای از لغزش‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه

Fig. 2. Landslides distribution map and a sample of landslides that occurred in the study area

لایه‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش: نقشه‌های عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحنای توپوگرافی^۱ فاصله از جاده، آبراهه و گسل، تراکم آبراهه، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی، بارش و زمین‌شناسی، بر اساس مرور منابع با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS10.3 تهیه شد (شکل ۴).



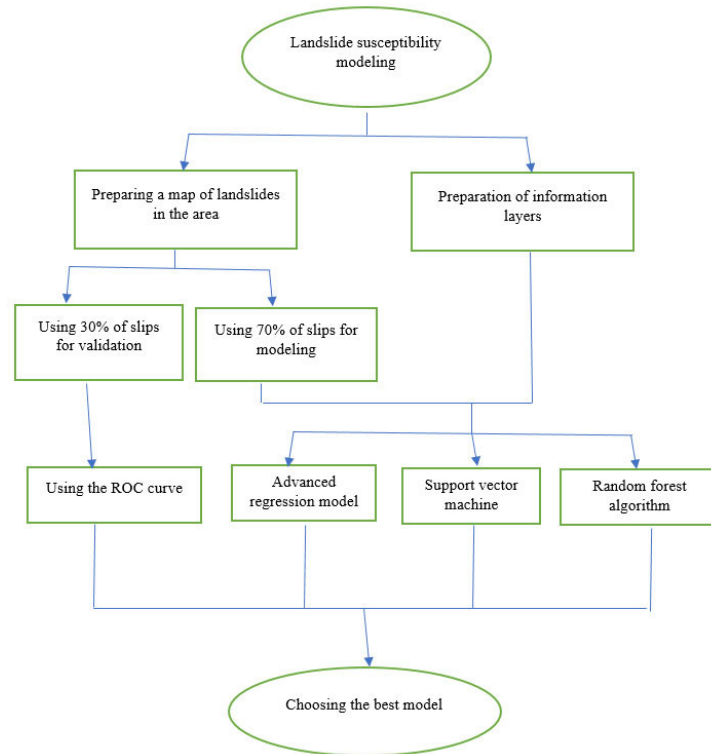
شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. The study area

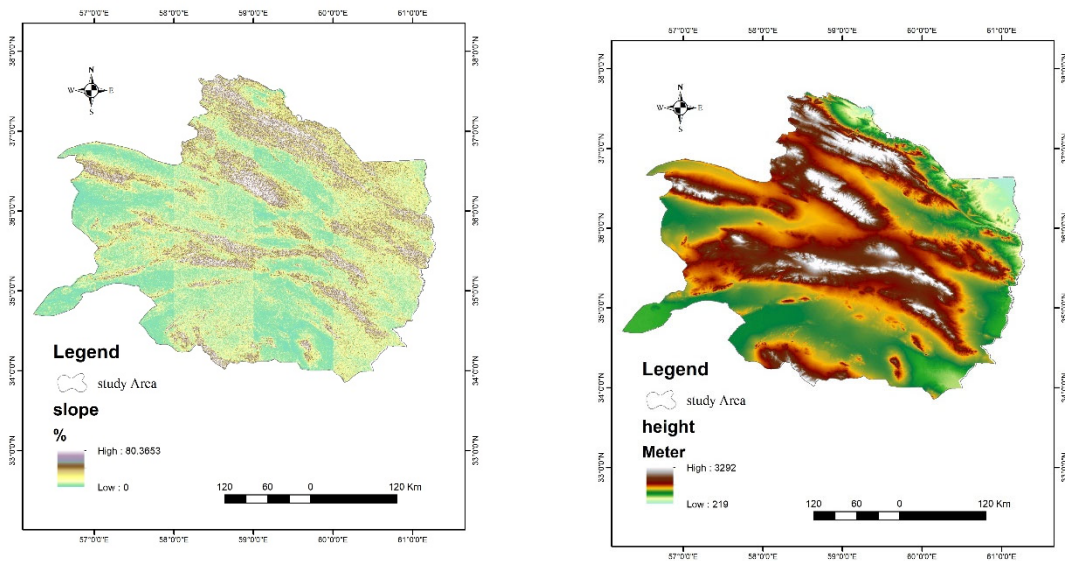
روش پژوهش: به‌منظور مدل‌سازی مکانی حساسیت زمین‌لغزش، مرحله اول شناسایی لغزش‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه در گذشته و شرایط حال است. به این منظور، اطلاعات زمین‌لغزش‌های رخ داده از اداره آبخیزداری استان خراسان رضوی تهیه و بعد از بازدیدهای میدانی، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها تهیه شد (شکل ۲). شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش، مرحله دوم از مطالعات و پهنه‌بندی حساسیت این رویداد است.

در این پژوهش، به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش، معیارهای ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، کاربری زمین، شاخص پوشش گیاهی، انحنای توپوگرافی

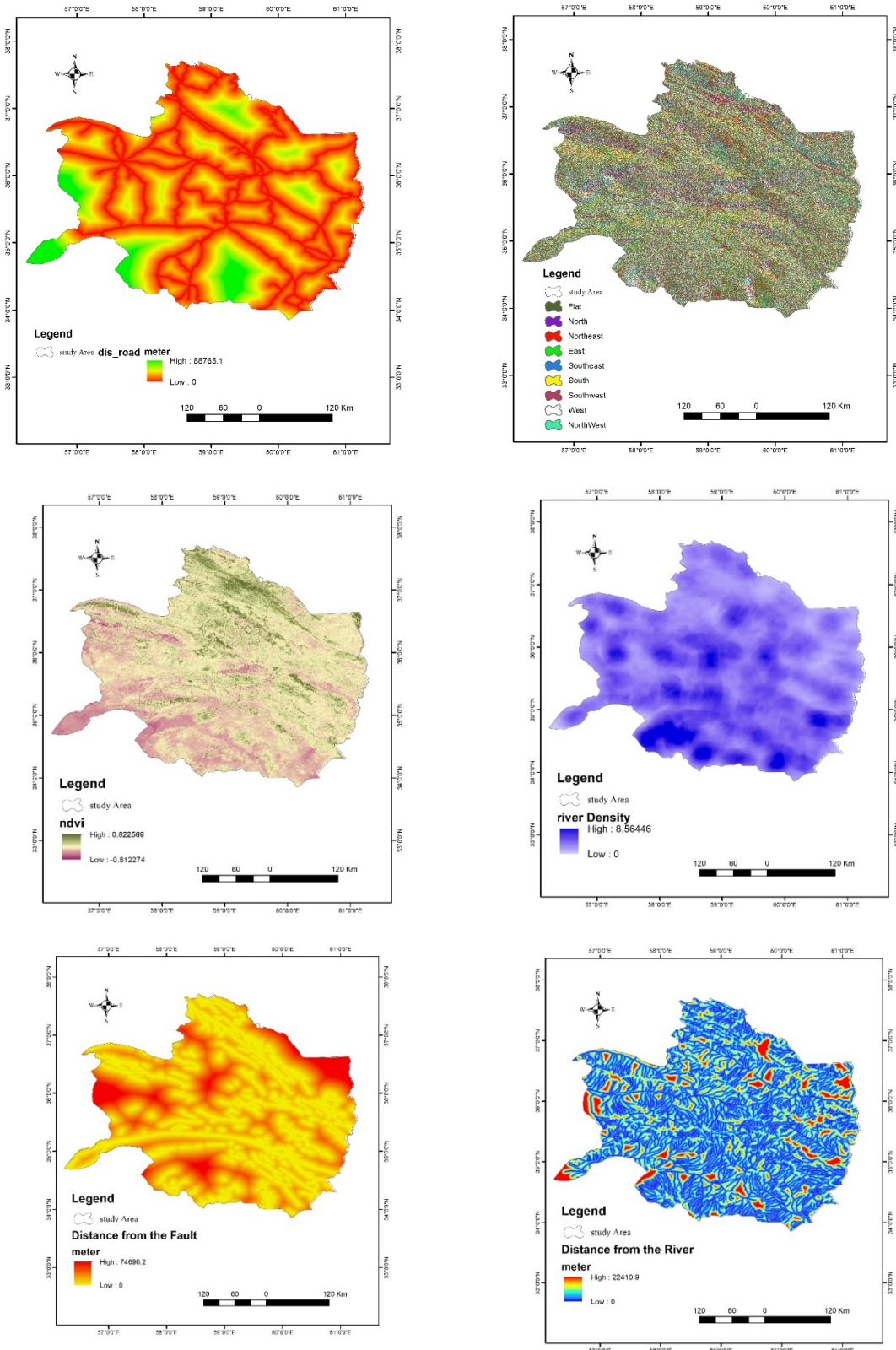
^۱ Plan profile



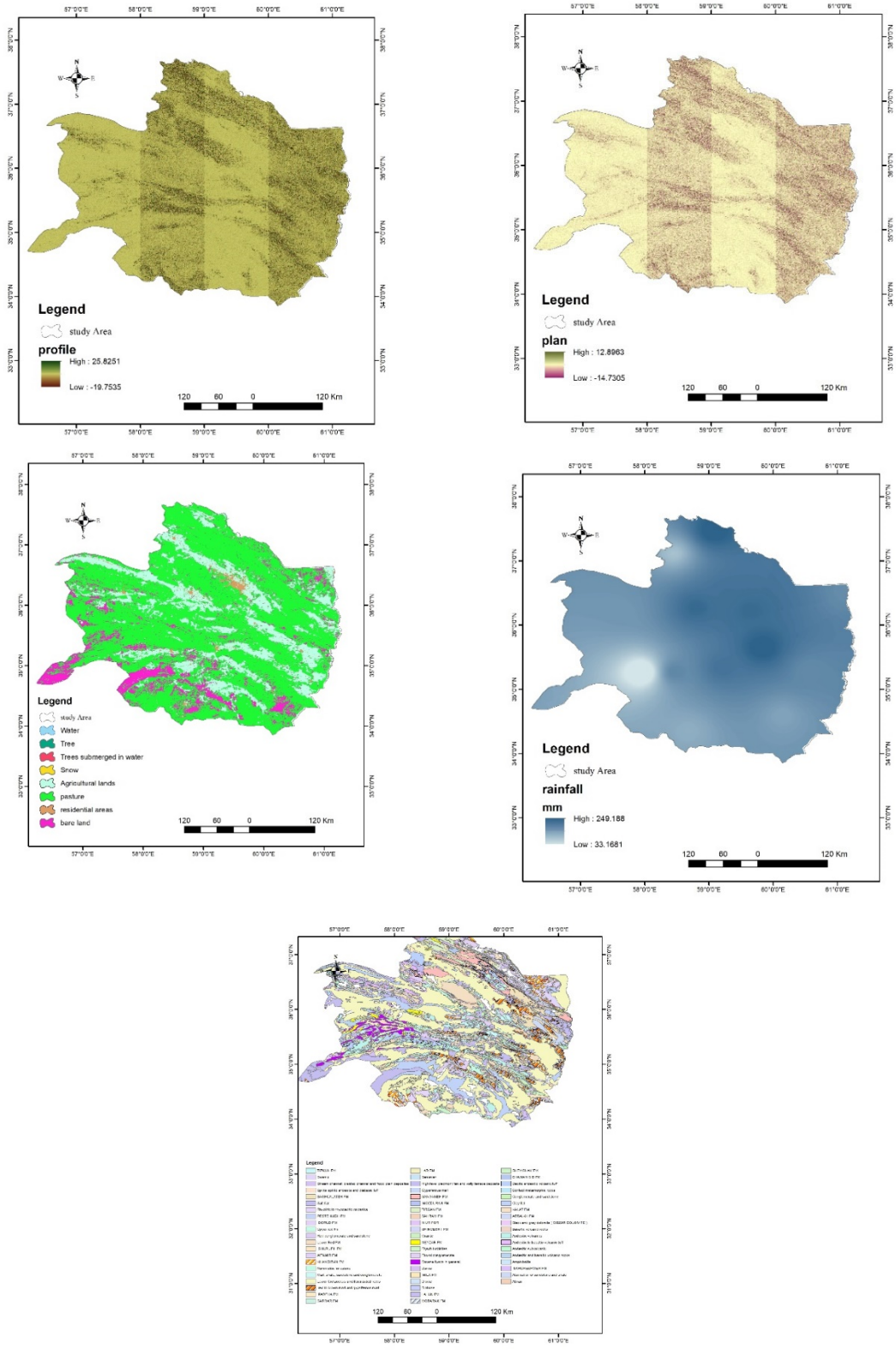
شکل ۳- نمودار جریان‌ی مراحل مختلف پژوهش
Fig. 3. Flow diagram of different stages of the research



شکل ۴- نقشه عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه
Fig. 4. Map of factors affecting the occurrence of landslides in the study area



ادامه شکل ۴
Fig. 4. Continued



ادامه شکل ۴
Fig. 4. Continued

با کمتر معمولاً به سمت مدل‌های مناسب گرایش دارند (Kint et al., 2011).

به عبارت دیگر، بهترین عامل‌ها بر اساس ارزیابی نتایج آنها با استفاده از شاخص‌های ارزیابی^۴ انتخاب می‌شوند. جزئیات پایه‌ای مدل درخت رگرسیونی تقویت شده در مطالعه Eliith et al., (2006)، قابل دسترس و بررسی است. یکی از مزیت‌های مدل درخت رگرسیونی تقویت شده، ارائه درصد تأثیرگذاری و شرکت هر یک از متغیرهای مستقل در شبیه‌سازی ژئومورفولوژیکی و پیش‌بینی مکانی لندفرم‌های سطح زمین است (Eliith et al., 2006).

ماشین بردار پشتیبان^۵: ماشین بردار پشتیبان، یکی از روش‌های یادگیری نظارت شده است که برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. این روش از جمله روش‌های نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر کارایی خوبی نسبت به روش‌های قدیمی‌تر طبقه‌بندی از جمله شبکه‌های عصبی پرسپترون نشان داده است. مبنای کاری دسته‌بندی کننده SVM، دسته‌بندی خطی داده‌ها است و در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌کند خطی را انتخاب نماید که حاشیه اطمینان بیشتری داشته باشد (Vapnik., 1995). ماشین بردار پشتیبان در اصل یک الگوریتم طبقه‌بندی دو طبقه‌ای است که طبقه‌ها را توسط یک مرز خطی از هم جدا می‌کند. در این روش، نزدیک ترین نمونه‌ها به مرز تصمیم‌گیری را بردارهای پشتیبان می‌نامند که این بردارها معادله مرز تصمیم‌گیری را مشخص می‌کنند.

روش مذکور به دلیل استفاده از اصل کمینه‌سازی ریسک ساختاری که از طریق بیشینه‌کردن فاصله بین دو ابر صفحه گذرا از بردارهای پشتیبان هر دو طبقه، اعمال می‌شود. برخلاف حالت کمینه‌سازی ریسک تجربی که سعی در کمینه کردن خطای آموزش را دارد

مدل‌های مورد بررسی: در پژوهش حاضر، سه روش یادگیری ماشین استفاده و نتایج آنها به منظور انتخاب بهترین مدل منطقه‌ای مورد مقایسه قرار گرفت که در ادامه ارائه شده است.

مدل درخت رگرسیونی تقویت شده^۱: این مدل به عنوان یک فن یادگیری ماشین بر اساس درخت‌های طبقه‌بندی و رگرسیونی همراه با الگوریتم Boosting طراحی شده است (Tien Bue et al., 2016). این مدل از روش پیش‌برنده مرحله‌ای (تجزیه و تحلیل و برازش بین متغیرها و داده‌های گروه آموزش) و آمار ناپارامتری برخلاف الگوریتم‌هایی که بر اساس میانگین به پیش‌بینی می‌پردازند، استفاده می‌کند (Naghbi et al., 2016). این مدل می‌تواند در پیش‌بینی پیامدهای کمی (درخت رگرسیونی) یا طبقه بندی شده (درخت طبقه‌بندی) مورد استفاده قرار گیرد. مدل درخت رگرسیونی تقویت شده از طریق مجموعه‌ای از شرط‌های منطقی^۲ (به جای رابطه خطی) لندفرم مورد مطالعه را پیش‌بینی یا طبقه‌بندی می‌نماید. از جمله مزیت‌های این روش، حساسیت کم آن نسبت به بیش‌برازش است (Youssef et al., 2016).

سرعت بالا در تحلیل داده‌های با حجم زیاد و عدم نیاز به پیش‌فرض‌های آماری توزیع داده‌ها اشاره کرد. این ویژگی‌ها توان مدل را در تجزیه و تحلیل و طبقه‌بندی لایه‌های بالا می‌برد. عملکرد بهتر این الگوریتم بستگی به تنظیم گزینه‌های مربوط به درختان تقویت شده و هرس درختان دارد. برای گزینه‌های مربوط به درختان تقویت‌شونده، نرخ کاهش به‌عنوان وزن خالص برای درختان انفرادی و درختان تقویت شده، عامل مهمی است. بهینه‌سازی، بهترین نرخ کاهش، نیز برای جلوگیری از برآورد بیش از حد^۳ پیش‌بینی‌ها مهم تلقی می‌شود. مطالعات قبلی نشان داده است که مدل‌های با نرخ کاهش ۰/۱

⁴ RMSE and Bias

⁵ Support Vector Machine (SVM)

¹ BRT

² Logical if-then conditions

³ Overfitting

کاهش دقت در تعیین اولویت عوامل مؤثر بر خطرات مختلف استفاده شد.

ارزیابی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش: بعد از تهیه نقشه‌های حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از سه روش یادگیری ماشین، نقشه‌های مذکور بر اساس شکستگی‌های طبیعی^۳ به چهار طبقه (حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تقسیم‌بندی شد.

از آن‌جا که نمی‌توان جهت ارزیابی کارایی و صحت نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش از نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها استفاده کرد (Emendo et al., 2003)، جهت حل این مشکل از دو سوم داده‌ها جهت پهنه‌بندی و یک سوم جهت ارزیابی مدل‌ها استفاده شد (Komac., 2006). برای این منظور، یکی از بهترین روش‌ها استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی است (Yesilnacar., 2005؛ Pradhan., 2013؛ Pourghasemi et al., 2012؛ Mohammady et al., 2012).

نمودار مشخصه عملکرد^۴، یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در ارائه ویژگی‌ها، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سامانه‌ها است که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (Yesilnacar., 2005). در حقیقت منحنی نمودار مشخصه نسبی عملکرد^۵، یک نمایش ترسیمی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌ها^۶ است.

سطح زیر منحنی، بیانگر مقدار پیش‌بینی سامانه از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین‌لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین‌لغزش) آن است. ایده آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC از ۰/۵-۱ متغیر است. چنانچه مدلی نتواند رخداد لغزشی را بهتر از دیدگاه سطح زیر منحنی^۷ احتمالی (تصادفی) تخمین بزند مقدار سطح زیر منحنی آن ۰/۵

عملکرد بهتری بر روی داده‌هایی که مدل با kها ساخته نشده است از خود نشان می‌دهد.

به‌منظور تهیه نقشه خطرات چندگانه محیط زیستی با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، اساساً چهار نوع تابع^۱ از قبیل خطی، چندجمله‌ای، سینوسی و تابع پایه شعاعی وجود دارد که در پژوهش حاضر از تابع پایه شعاعی به دلیل عملکرد بهتر آن در مقایسه با دیگر توابع (Pourghasemi et al., 2013) استفاده می‌شود.

جنگل تصادفی^۲: این الگوریتم در واقع یک الحاقی از درخت رگرسیون و طبقه‌بندی است که اولین بار توسط Breiman (2001) ایجاد و توسعه داده شد. الگوریتم جنگل تصادفی مبتنی بر دسته‌ای از درخت‌های تصمیم است و در حال حاضر، یکی از بهترین الگوریتم‌های یادگیری است. مدل پیش‌بینی‌کننده RF بر اساس میانگین‌گیری از نتایج حاصل از تمامی درخت‌های تصمیم مربوطه استوار است و برای بسیاری از مجموعه داده‌ها، طبقه‌بندی با صحت بالایی را انجام می‌دهد (Ebrahim Khani et al., 2011؛ Farshad and Sade, 2013). درختان تصادفی، بردار ورودی را دریافت، آن را با هر درخت در جنگل طبقه‌بندی کرده است و خروجی، برچسب‌های طبقه‌ای هستند که از اکثریت آراء دریافت شده است.

در این مدل، از دو عامل میانگین کاهش دقت و میانگین کاهش جینی برای تعیین اولویت تأثیر هر یک از عوامل مؤثر استفاده می‌شود. بر اساس اظهارنظر (Nicodemus, 2011)، استفاده از میانگین کاهش دقت در مقایسه با شاخص اهمیت جینی در تعیین اولویت عوامل مؤثر، بهتر و پایدارتر است، به‌ویژه در شرایطی که بین شاخص‌های محیطی ارتباط وجود دارد. به همین دلیل، در پژوهش حاضر از میانگین

⁵ Receiver Operating Characteristic

⁶ Trade off

⁷ AUC

¹ Kernel

² Random Forest (RF)

³ Natural Breaks

⁴ Receiver Operating Characteristic(ROC)

نتایج نشان داد، بارش و ارتفاع، مهم‌ترین عوامل و پس از آن، تراکم زهکشی و فاصله از جاده، از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در استان خراسان رضوی است. لازم به ذکر است که جهت شیب و انحنای نیمرخ کمترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش به خود اختصاص دادند.

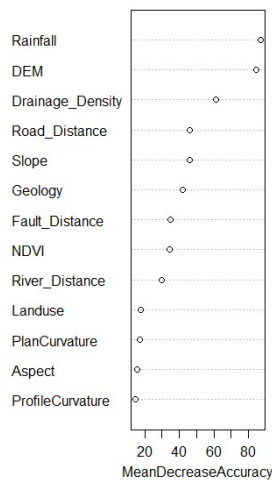
سپس، نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش در محیط نرم‌افزار R بر اساس سه روش جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و مدل درخت رگرسیونی تقویت شده تهیه و بر اساس شکستگی‌های طبیعی (Erner et al., 2012; Xio et al., 2012; Pourghasemi et al., 2012) به چهار گروه حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۵). مساحت هر یک از طبقات حساسیت زمین‌لغزش برای نقشه‌های تهیه شده به روش‌های مختلف، محاسبه و در جدول ۱، ارائه شد.

است و زمانی که سطح زیر منحنی برابر با یک داشته باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه پهنه بندی تهیه شده است. همبستگی کیفی-کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت ۱-۰/۹ عالی، ۰/۸-۰/۹ خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸ خوب، ۰/۶-۰/۷ متوسط و ۰/۵-۰/۶ ضعیف است (Yesilnacar., 2005).

نتایج و بحث

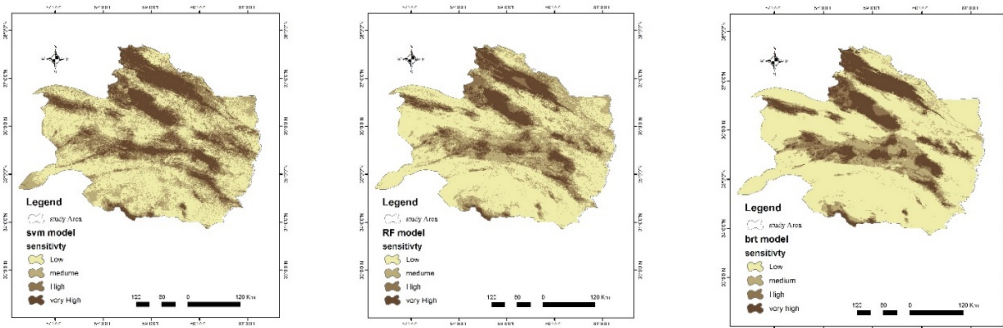
اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش:

به‌منظور اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش از روش جنگل تصادفی استفاده شد. در این روش با توجه به نوع مدل‌سازی که طبقه‌بندی (حضور و عدم حضور) است، از روش میانگین کاهش دقت استفاده شد (شکل ۵).



شکل ۵- اهمیت متغیرها به روش جنگل تصادفی با روش میانگین کاهش وزنی

Fig. 5. Importance of variables by random forest method with weighted average method



شکل ۶- نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از سه مدل ذکر شده

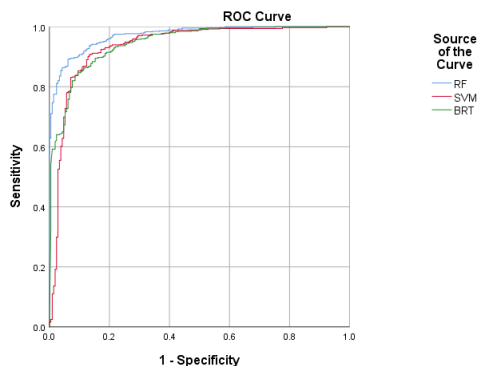
Fig. 6. Landslide susceptibility maps using the three mentioned models

جدول ۱- مساحت و درصد طبقات حساسیت در نقشه‌های تهیه شده با مدل‌های مختلف

Table 1. Area and percentage of sensitivity classes in maps prepared with different models

Model	Sensitivity class	Area	%
RF	Low	57097.24	48.74
	medume	29910.42	25.53
	High	17004.74	14.51
	Very High	13124.58	11.20
SVM	Low	45200.31	38.58
	medume	32656.75	27.87
	High	20534.28	17.53
	Very High	18745.29	16
BRT	Low	71369.73	60.92
	medume	17573.73	15
	High	11314.12	9.65
	Very High	16881.22	14.41

ریزان و سیاستگذاران در بهینه‌کردن محل ساخت وساز سازه‌ها و تغییر در طبیعت می‌کند و می‌تواند ابزاری مفید برای جلوگیری از این پدیده باشد. بنابراین، نقشه حساسیت زمین‌لغزش تهیه‌شده، نقش مؤثری در تصمیم‌گیری‌های مدیران برای آمایش سرزمین و مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز استان خراسان رضوی دارد.



شکل ۷- منحنی ROC و سطح زیر منحنی در سه نقشه حساسیت زمین‌لغزش

Fig. 7. ROC curve and area under the curve in three landslide susceptibility maps

جدول ۲- مقدارهای منحنی تشخیص عم

لکرد نسبی و سطح زیر منحنی

Table 2. Relative performance detection curve values and the area under the curve

Model	Low bank	Bottom bank	Significant level	Standard error	The surface under the curve
RF	0.982	0.963	0	0.005	0.972
SVM	0.958	0.913	0	0.012	0.936
BRT	0.962	0.929	0	0.008	0.945

دقت بالای مدل‌های ذکر شده در پیش‌بینی وقوع زمین لغزش است. (Elivira et al., Vorpalen et al., (2012), (2012), Hung et al., (2016), به کمک روش جنگل

ارزیابی دقت نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش:

برای بررسی میزان دقت مدل، از سطح زیر منحنی نمودار مشخصه عملکرد استفاده شد (شکل ۷ و جدول ۲). برای این هدف، ۳۰ درصد از زمین‌لغزش‌هایی که در فرایند مدل‌سازی استفاده نشدند، به کار برده شد. هر سه مدل دارای دقت عالی در تخمین زمین‌لغزش های منطقه مورد مطالعه هستند. مدل جنگل تصادفی با سطح زیر منحنی ۰/۹۷۲، ۲۵/۷۱ درصد از منطقه مطالعاتی را در طبقه خطر زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی کرد. بنابراین، با توجه به این شرایط لزوم توجه بیشتر به این پدیده در استان خراسان رضوی نمایان می‌شود. در پژوهشی مشابه، Karam et al., (2020)، با استفاده از این روش، نقشه زمین‌لغزش بخشی از استان گلستان را تهیه نمودند که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل در برآورد خطر زمین‌لغزش است.

زمین‌لغزش، خسارت‌های زیادی به منطقه‌های مسکونی، زمین‌های کشاورزی و زیرساخت‌ها وارد می‌کند و باعث به هدر رفتن حجم زیادی از خاک می‌شود. به کار بردن نقشه حساسیت زمین‌لغزش کمک می‌کند که تا حد امکان از منطقه‌های با حساسیت زیاد دوری شود، تا تحریک نشوند. این نقشه کمک زیادی به برنامه

در رابطه با مدل‌های یادگیری ماشین مطالعات زیادی در ایران و جهان انجام شده است که بررسی دقت این مدل‌ها به کمک منحنی تشخیص عملکرد نسبی بیانگر

طبقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد زمین لغزش قرار دارد. زمین لغزش، خسارت‌های زیادی به منطقه‌های مسکونی، زمین‌های کشاورزی و زیرساخت‌ها می‌زند و باعث به هدر رفتن حجم زیادی از خاک می‌شود. به کار بردن نقشه حساسیت زمین لغزش کمک می‌کند که تا حد امکان از منطقه‌های با حساسیت زیاد دوری شود، تا تحریک نشوند. این نقشه کمک زیادی به برنامه ریزان و سیاستگذاران در بهینه کردن محل ساخت وساز سازه‌ها و تغییر در طبیعت می‌کند و می‌تواند ابزاری مفید برای جلوگیری از این پدیده باشد. بنابراین، نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه شده نقش مؤثری در تصمیم‌گیری‌های مدیران برای آمایش سرزمین و مدیریت جامع استان خراسان رضوی دارد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از سازمان منابع طبیعی استان خراسان رضوی که داده‌های مورد نیاز این پژوهش را در اختیار نویسندگان قرار دادند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

تصادفی نقشه حساسیت زمین لغزش را با دقت بالا پیش بینی نمودند که در این پژوهش نیز این مدل بالاترین دقت را داشت.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سه مدل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و مدل درخت رگرسیونی برای اولویت بندی عوامل مؤثر و تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش در استان خراسان رضوی به کار برده شد. نتایج نشان داد، عوامل بارش و ارتفاع، بیشترین نقش را در وقوع زمین لغزش در منطقه داشته است. با افزایش ارتفاع میزان بارش نیز افزایش یافته که در نتیجه سازوکار ایجاد لغزش را تشدید می‌کند. پس از آن، تراکم زهکشی و فاصله از جاده، از عوامل تأثیرگذار بر زمین لغزش در محدوده مورد مطالعه است.

پس از صحت‌سنجی نقشه‌های حساسیت زمین لغزش، مشخص شد که روش جنگل تصادفی با بیشترین سطح زیرمنحنی (۰/۹۷۲)، بالاترین دقت را در پیش بینی رخداد زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه داشته است. نتایج این پژوهش نشان داد که در نقشه تهیه شده به روش جنگل تصادفی بیش از ۲۵ درصد منطقه در

منابع مورداستفاده

- Alipour, H., Malekian, A., 2014. Landslide risk zoning in Jahan Esfrain Watershed, North Khorasan. *Geograph. Develop. Quart.* 39, 165-180 (in Persian).
- 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. *Quart. J. Nat. Geograph.* 14, 39-53 (in Persian).
- Brardinoni, F., Slaymaker, O., Hassan, M.A., 2003. Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data. *Geomorphol.* 54, 179-196.
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine Learning* 45, 5-32.
- Ebrahimkhani, S., Afzali, M., Shokohi, A., 2018. Forecasting and investigating factors of road accidents using data mining algorithms. *Zanjan Police Sci. Quart.* 1, 111-127 (in Persian).
- Ebrahimi, M., Habibullahian, M., Amir Ahmadi, A., Zanganeh Asadi, M.A., Nejad-Solimani, A., 2014. Investigating the effect of road construction on the occurrence of surface landslides using the slope stability model. Case study: Kalat Watershed. *J. Geograph. Survey Space.* 15, 143-156 (in Persian).
- Elith, J., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecograph.*
- Emendo, J., Gonzales, A., Teran, J., Cendrero, A., Fabbri, A., Chung, A., 2003. Validation of landslide susceptibility maps, examples and applications from a case study in northern Spain. *Nat. Hazard* 14, 437-449.
- Erner, A., Sebnem, H., Duzgun, A., 2012. Improvement of statistical landslide susceptibility mapping by using spatial and global regression methods in the case of more and Romsdal (Norway). *Landslides* 7, 55-68.
- Farshad, M., Sadeh, J., 2013. Locating short circuit fault in high voltage direct current transmission lines using neural network, generalized regression and random forest algorithm. *Intelligent Syst. Electri. Engineer.* 4, 1-14 (in Persian).
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, Ch., Cascini, L., Leroi, E., Savage, Z.S., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineer. Geol.* 102, 85-98.

- Fatemi Aqda, M., Ghoumian, J., Eshqli Farahani, A., 2012, Evaluation of the efficiency of statistical methods in determining the landslide risk potential. *Earth Sci. Quart.* 7, 1-17.
- Goli Mokhtari, L., Naimi Tabar, M., 2022. Spatial modeling and prediction of landslide risk using advanced data mining algorithms, case study: Kalat City. *Quantit. Geomorphol. Res.* 40, 116-137 (in Persian).
- Guzzetti, F., 2000. Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. *Engineer. Geol.* 58, 89-107.
- Hong, H., Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., 2016. GIS-based landslide spatial modeling in Ganzhou City, China. *Arab. J. Geosci.* 9, 112.
- Karam, A., Bahramabadi, A., Pakenjad, F., 2020. Instability zoning of slopes with respect to landslide movements using random forest algorithm, case study: Tangrah basin of Golestan Province. *J. Quantit. Geomorphol. Res.* 36, 59-74 (in Persian).
- Kint, V., 2012. Forest structure and soil fertility determine internal stem morphology of Pedunculate oak: A modelling approach using boosted regression trees. *Eur. J. For. Res.* 131, 609-622 .
- Kumar Dahal, R., 2008. Predictive modeling of rainfall-induced landslide in the lesser Himalaya of Nepal based on weights of evidence. *Geomorphol.* 102, 496-510.
- Komac, M., 2006. A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphol.* 74, 17-28.
- Karimi, H., Naderi, F.A., Morshidi, A., Nik Sarasht, M., 2013. Landslide risk zoning in the Cherdavel watershed of Ilam using geographic information system. *Appl. Geol. Quart.* 4, 319-332.
- Kornejad, A., Ong, M., Pourqasmi, H.R., Behmand, A., Motamedi, M., 2019. Landslide susceptibility prediction using mahalanobis distance and machine learning, case study: Oghan Watershed, Golestan Province. *Earth Sci. Res.* 42, 1-18 (in Persian).
- Madadi, A., Ghafari Gilande, A., Pirouzi, A., 2014. Evaluation and zoning of landslide risk using Vicor model, case study: Aq Lakhani Chai Watershed. *Quantita. Geomorphol. Res.* 4, 124- 141 (in Persian).
- Mahmoudi, F.A., 2007. *Dynamic Geomorphology*, second edition. Payam Noor Publishing House, 283 pages (in Persian).
- Mohammadnia, M., Amir Ahmadi, A., Bahrami, S., 2016. Application of weighted evidence model in landslide susceptibility assessment using geographic information system technology, case study: Abkhaz-Jaghreh Basin. *Geographi. Res. Quart.* 2, 151-137 (in Persian).
- Mohammadnia, M., Amirahmadi, A., Bahrami, S., Akbari, A., 2016. Landslide risk zoning in Jagharq and Darroud basins (the new proposed route of Tarqabeh-Darroud). *Geograph. Space Quart.* 55, 217- 238 (in Persian).
- Mohammadi, M., Pourqasmi, H.R., 2016. Prioritization of factors affecting the occurrence of landslides and preparation of its sensitivity map using the new random forest algorithm, case study: a part of Golestan Province. *Watershed Manage. Res. J.* 15, 161-170 (in Persian).
- Mosavi Baigi, M., Ashraf, B., 2012. The study of synoptic patterns leading to autumn and winter droughts in Razavi Khorasan province. *J. Water Soil Conserv. Res.* 18, 167-183.
- Mirsanei, R., Kardan, R.A., 2008. Analytical view on landslide features in the country. *Proceedings of The First Conference on Environmental Engineering Geology of Iran*, Tarbiat Moalem University, Tehran (in Persian).
- Niazi, Y.M., Ekhtesasi, A., Talebi, S., Mokhtari, M.H., 2010. Performance evaluation of two multivariate statistical model to predict landslide hazard (case study: Ilam). *J. Sci. Watershed Engineer. Iran.* 10, 9-20 (in Persian).
- Naghibi, S.A., Pourghasemi, H.R., Dixon, B., 2016. GIS- based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environ. Monitor. Assess.* 44, 1-27 (in Persian).
- Tien Bui, D., Tuan, T.A., Klempe, H., Pradhan, B., Revhaug, L., 2016. Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression and logistic model tree. *Landslides* 13, 361-378.
- Paoletti, V., Tarallo, D., Matano, F., Rapolla, A., 2013. Level-2 susceptibility zoning on seismic-induced landslides: An application to Sannio and Irpinia areas. *Southern Italy. Physic. Chemist. Earth.* 63, 147-159.
- Nicodemus, K.K., 2011. Letter to the editor: on the stability and ranking of predictors from random forest variable importance measures. *Brief. Bioinform.* 12, 369-373.
- Pourghasemi, H.R., Goli Jirandeh, A., Pradhan, B., Xu, C., Gokceoglu, C., 2013. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS. *J. Earth Syst. Sci.* 122 (2), 349-369 (in Persian).
- Pourghasemi, H.R., Mohammadi, M., Pradhan, B., 2012. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran, *Catena* 97, 71-84.

- Porhashmi, S., Amir Ahmadi, A., Akbari, A., 2014. Modeling and estimating the volume of landslide zones based on area (case study: Baqi Neishabur basin). *Geograph. Environ. Plan. Year 2026*, 59, 81-98 (in Persian).
- Rajabi, M., Rezai Moghadam, M.H., Keshavarz, A., 2022. Quantitative analysis of landslide risk and its zoning in Alamut River basin using logistic regression method. *Geograph. Space Quart.* 77, 1-14 (in Persian).
- Shekari Badi, A., Motamedi Rad, M., Mohammadnia, M., 2014. Combining ANP model and shannon entropy index in estimating factors affecting the occurrence and zoning of landslide risk, case study: Faroub Roman Neishabur Basin. *Region. Geographi. Studies Quarter. Dry 22*, 89-103 (in Persian).
- Saberchanari, K., Salmani, H., Mohammadi, M., 2014. Landslide risk assessment using information value models and LNRF. *Ecohydrol.* 2(1), 105-116 (in Persian).
- Vapnik, V.N., 1995. *The nature of statistical learning theory*. New York: Springer Verlag.
- Vittorio De Blasio, F., 2011. *Introduction to the physics of landslides*. Springer.
- Xu, C., Dai, F., Xu, X., Lee, Y.H., 2012. GIS-based support vector machine modeling of earthquake triggered-landslide susceptibility in the Jianjiang River Watershed China. *Geomorphol.* 8, 146-145.
- Yesilnacar, E.K., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi, Z.S., 2005. *The application of computational intelligence to landslide susceptibility mapping in Turkey*. Ph.D Thesis, Department of Geomatics the University of Melbourne, 423 pages.
- Youssef, A.M., 2015. Landslide susceptibility delineation in the Ar-Rayth Area, Jizan, Kingdom of Saudi Arabia, by using analytical hierarchy process, frequency ratio and logistic regression models. *Environ. Earth Sci.* 8, 39-56.