



Evaluating the role of geomorphic characteristics in landslide vulnerability and sensitivity

(Case study: Kakasharaf Drainage Basin, Lorestan Province)

Reza Fathi Ganji¹ | Aliakbar Nazari Samani^{2✉} | Sadat Feiznia³ | Abdolreza Nourizdan⁴

1. Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: fathiganji.reza@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: aknazari@ut.ac.ir

3. Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: sfeiz@ut.ac.ir

4. Department of Engineering and Studies of the General Department of Natural Resources and Watershed of Lorestan, Iran. E-mail: reza_nooryazdan@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Landslides, as a natural hazard and geomorphic disturbance, have numerous direct and indirect impacts on human communities, the natural environment, and landscape transformation, and can lead to significant human and financial losses. Therefore, identifying the factors influencing vulnerability to this hazard is essential for effective management. The aim of this study is to identify the factors affecting land susceptibility to landslides and to prepare a susceptibility map by integrating machine learning methods and statistical modeling. In this research, the Random Forest algorithm was used to determine the weight and importance of influencing factors including slope, aspect, topographic position index, topographic wetness index, Plan curvature, lithology, distance from faults, distance from stream, distance from roads, and land use. Subsequently, Artificial Neural Networks (ANN) and Maximum Entropy (MaxEnt) models were applied to model and predict landslide-prone areas. To evaluate model performance, validation was conducted in an adjacent area to the Kakasharaf watershed, and relevant evaluation indices were calculated. The results indicated that distance from faults and slope were the most significant factors influencing landslide susceptibility. According to the Area Under the Curve (AUC), the ANN model (0.92) had higher predictive accuracy than the MaxEnt model (0.801). The most vulnerable areas were found within 200 meters of stream, near fault lines, and with slopes between 20% and 40%. Therefore, land use management in such areas should be prioritized. These findings can contribute to improved land planning, natural resource protection, and effective landslide risk management.
Article history: Received 21 June 2024 Received in revised form 27 October 2024 Accepted 29 November 2024 Published online 28 June 2025	
Keywords: <i>MaxEnt,</i> <i>Neural network,</i> <i>Random forest,</i> <i>Sensitivity.</i>	

Cite this article: Fathi Ganji, R., Nazari Samani, A., Feiznia, S., & Nourizdan, A. (2025). Evaluating the role of geomorphic characteristics in landslide vulnerability and sensitivity (Case study: Kakasharaf Drainage Basin, Lorestan Province). *Journal of Natural Environment*, 77 (4), 731-747. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.376982.2675>



ارزیابی نقش ویژگی های ژئومورفیک مؤثر بر آسیب پذیری و حساسیت اراضی به زمین لغزش با استفاده از روش های یادگیری ماشین (مطالعه حوزه آبخیز کاکاشرف استان لرستان)

رضا فتحی گنجی^۱ | علی اکبر نظری سامانی^۲ | سادات فیض نیا^۳ | عبدالرضا نوری یزدان^۴

۱. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، کرج، ایران. رایانامه: fathiganji.reza@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: aknazari@ut.ac.ir
۳. گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: sfeiz@ut.ac.ir
۴. اداره مهندسی و مطالعات اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری لرستان، لرستان، ایران. رایانامه: reza_nooryazdan@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	زمین لغزش ها به عنوان یک مخاطره و اختلال زمینی، اثرات مستقیم و غیر مستقیم زیادی بر شرایط جوامع انسانی، محیط طبیعی و تغییر سیمای سرزمین دارند و می توانند موجب خسارت های جانی و مالی گسترده ای شود. بنابراین تعیین عوامل مؤثر بر آسیب پذیری به آن برای مدیریت این مخاطره ضروری است. هدف این پژوهش، شناخت عوامل مؤثر بر حساسیت اراضی به زمین لغزش و تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش با پایه تلفیق روش های یادگیری ماشین و مدل سازی آماری است. در این بررسی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، از بین عوامل مؤثر (شیب، جهت شیب، موقعیت توپوگرافی، رطوبت توپوگرافی، انحنای سطحی، سنگ شناسی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و کاربری اراضی) وزن و درجه اهمیت مشخص شد. سپس با تکنیک های شبکه عصبی مصنوعی و MaxEnt برای مدل سازی و پیش بینی مناطق مستعد زمین لغزش استفاده شد. برای ارزیابی دقت مدل ها، با انجام اعتبارسنجی در محدوده مجاور حوزه آبخیز کاکاشرف، شاخص های ارزیابی محاسبه شد. نتایج نشان داد که عوامل فاصله از گسل و شیب، به ترتیب بیشترین اهمیت را در حساسیت اراضی به زمین لغزش دارند. بر پایه شاخص سطح زیر منحنی (AUC) مدل شبکه عصبی ۰/۹۲ نسبت به مدل MaxEnt با مقدار ۰/۸۰۱ دقت بیشتری در پیش بینی مناطق مستعد به زمین لغزش را نشان داد. بیشترین آسیب پذیری متعلق به اراضی مجاور آبراهه فاصله کمتر از ۲۰۰ متر با خطوط گسلش و شیب ۴۰-۲۰٪ است؛ بنابراین مدیریت و پوشش کاربری اراضی در این اراضی از اولویت بیشتری برخوردار است. این نتایج می تواند در بهبود مدیریت و برنامه ریزی اراضی در مناطق مستعد زمین لغزش، حفاظت از منابع طبیعی و مدیریت ریسک مؤثر باشد.
کلیدواژه ها: جنگل تصادفی، حساسیت اراضی، شبکه عصبی، MaxEnt	

استناد: فتحی گنجی، رضا؛ نظری سامانی، علی اکبر؛ فیض نیا، سادات؛ و نوری یزدان، عبدالرضا (۱۴۰۳). ارزیابی نقش ویژگی های ژئومورفیک مؤثر بر آسیب پذیری و حساسیت اراضی به زمین لغزش با استفاده از روش های یادگیری ماشین (مطالعه حوزه آبخیز کاکاشرف استان لرستان). محیط زیست طبیعی، ۷۷ (۴)، ۷۳۱-۷۴۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2024.376982.2675>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

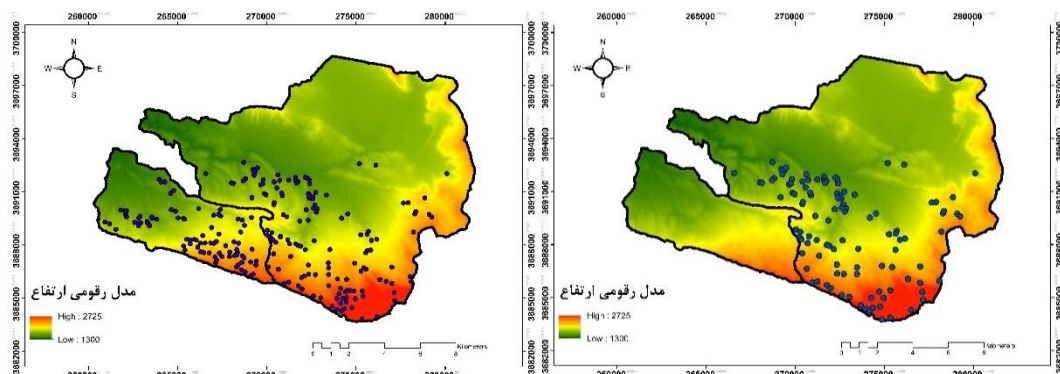
زمین لغزش به عنوان یک مخاطره زمینی، حرکت زمین (خاک، سنگ و واریزه) در امتداد شیب طبیعی و ناشی از نیروی ثقل است (Varens, 1978). زمین لغزش ها براساس نوع مصالح و نحوه حرکت تقسیم بندی می شوند. زمین لغزش به عنوان یک پدیده ژئومورفیک علاوه بر ایجاد مخاطره برای انسان، موجب ایجاد اشکال ناهمواری در سطح زمین و افزایش تولید رسوب در مقیاس حوزه آبخیز می گردد. همچنین این پدیده می تواند به عنوان یک اختلال در سیمای سرزمین مورد توجه قرار بگیرد. شیب از اولین ویژگی های مؤثر بر وقوع زمین لغزش است (Meng, 2022). زمین لغزش ها تهدیدهای ژئومحیطی بسیار رایجی هستند که تأثیرات مستقیم و غیرمستقیمی بر محیط زیست دارند (Guzzetti et al., 2012). به طور متوسط از ژانویه ۲۰۰۴ تا دسامبر ۲۰۱۶ حدود ۴۰۰ زمین لغزش مرگبار در سراسر جهان رخ داده است که در مجموع باعث مرگ ۵۵۹۹۷ نفر شده اند و این روند به تدریج در حال افزایش است که بیش تر آنها متأثر از فعالیت های انسان است (Froude and Petley, 2018). زمین لغزش و آسیب رسانی به زیر ساخت ها و ابنیه ها در تمام نقاط جهان در حال وقوع است این موضوع باعث افزایش درجه حساسیت اراضی نسبت به ناپایداری های شیبی به خصوص در مناطق توسعه یافته یا در حال توسعه می باشد. خسارات ناشی از زمین لغزش را می توان به دو شکل ملموس و غیر ملموس تقسیم بندی کرد. خسارات ملموس غالباً به شکل تخریب سازه ها و ابنیه ها از جمله راه ها، راه آهن، مناطق شهری و روستایی است که گاهی با خسارات جانی نیز همراه است و از نظر ارزش ریالی و برآورد ریسک قابل برآورد می باشد. اما بخش زیادی از خسارات ناشی از زمین لغزش به علت نبود معیار مشخص به منظور برآورد ریالی خسارات، همواره از نظرها پنهان می ماند. فرسایش خاک و تولید حجم زیاد رسوب در مکان و زمان محدود و ورود آن به شبکه رودخانه ها و انباشت آن در مخازن سدها یا مناطق دیگر یکی از مهم ترین تبعات منفی وقوع زمین لغزش ها می باشد که خسارات آن و جبران این خسارات در برخی مواقع بسیار بیشتر از سایر مخاطرات طبیعی می باشد. زمین لغزش ها می توانند مقدار زیادی رسوب را وارد سیستم رودخانه کنند و در یک منطقه تپه ای یا کوهستانی سیل ناگهانی ایجاد کنند (Fang et al., 2020). تخریب جنگل ها، ایجاد سدهای زمین لغزشی (Fan et al., 2020) و وقوع سیل در مناطق واقع در محدوده این سدها نیز بخشی دیگر از خسارات غیر ملموس وقوع زمین لغزش ها می باشد. حساسیت اراضی به زمین لغزش از اجزای کلیدی خطر زمین لغزش و ارزیابی ریسک است (Guzzetti et al., 2006). وقوع زمین لغزش باعث تغییر کاربری اراضی می شود. تغییر در شیب، ضخامت خاک، به هم ریختگی مصالح ناشی از لغزش، تغییر در شبکه زهکشی، تغییر در نوع و درصد پوشش گیاهی باعث می شود تا اراضی به واسطه لغزش به شدت آسیب پذیر باشند. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه زمین لغزش و نقش عوامل محیطی در وقوع آن در ایران و جهان انجام شده است که از مطالعات اخیر می توان به مطالعه Karimi Sangchini و همکاران (۲۰۲۴)، کاربرد الگوریتم یادگیری ماشین پیشینه آنتروپی در پهنه بندی خطر زمین لغزش حوزه آبخیز کرگانه، استان لرستان، Gazali و همکاران (۲۰۲۴)، پهنه بندی خطر زمین لغزش با روش های یادگیری ماشین و جغرافیایی، Sadidi و همکاران (۲۰۲۲) پهنه بندی خطر زمین لغزش در جاده مهاباد با مدل های یادگیری ماشین (ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و رگرسیون لجستیک)، Zakeri Nejad و همکاران (۲۰۲۲) پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی، Saha و همکاران (۲۰۲۳) بررسی حساسیت به زمین لغزش منطقه گراهول هندوستان با روش های یادگیری ماشین و Boussouf و همکاران (۲۰۲۳) پهنه بندی حساسیت به زمین لغزش با مدل حداکثر آنتروپی و رگرسیون لجستیک در شهر آلمریا اسپانیا اشاره کرد. استان لرستان با توجه به شرایط ژئومورفولوژی، لیتوژی و اقلیمی، حساسیت زیادی به زمین لغزش دارد. بنابراین مهم ترین مسئله مورد توجه در این پژوهش درک و شناخت عوامل مؤثر بر حساسیت اراضی و آسیب پذیری به زمین لغزش در حوزه های آبخیز دارای اراضی کشاورزی می باشد. صحت نقشه های حساسیت به زمین لغزش بستگی به مقادیر و کیفیت داده ها، مقیاس کار و انتخاب روش تحقیق مناسب برای تجزیه و تحلیل مدل دارد. اهداف اصلی این پژوهش شامل تعیین نقش ویژگی های ژئومورفومتری بر پتانسیل وقوع لغزش و تعیین نقش نوع سازندهای زمین شناسی بر آسیب پذیری اراضی به لغزش است. بررسی و نقش این ویژگی ها می تواند به بهبود مدل های پیش بینی و کاهش مخاطرات محیطی ناشی از زمین لغزش کمک کند. حوزه آبخیز کاکاشرف از لحاظ ساختاری بخشی از زون ساختمانی زاگرس چین خورده می باشد. گسل ها از مهم ترین عناصر ساختاری حوضه هستند که در سطح منطقه به شدت فعالیت نموده اند که باعث می شود سالیانه حجم زیادی رسوب وارد شبکه زهکشی منطقه می گردد. در سال های اخیر، استفاده از روش های یادگیری ماشین برای مدل سازی زمین لغزش به دلیل دقت بالا و توانایی در پردازش حجم

زیادی از داده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق با مراجعه به مطالعات قبلی و همچنین استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در زبان برنامه‌نویسی پایتون و محیط Jupyter notebook، عوامل محیطی و درصد اهمیت هر متغیر مشخص گردید. سپس با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی (توانایی شبکه‌های عصبی در یادگیری روابط پیچیده بین متغیرها) در زبان برنامه‌نویسی پایتون و محیط Jupyter notebook و مدل حداکثر آنتروپی (مبتنی بر توزیع‌های احتمالی) مدل‌سازی صورت پذیرفت. هر دو مدل در پژوهش‌های پیشین کارایی بالایی در شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش از خود نشان داده بودند. نکته قابل توجه در این تحقیق انتخاب حوزه آبخیز پیرجد چسبیده به حوزه آبخیز کاکاشرف با ویژگی‌های مشابه (زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و...) جهت ارزیابی مدل بدون استفاده از داده‌های آموزشی آن (نقاط لغزشی) در مدل‌سازی است تا دقت و کارایی مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد.

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر دارای ماهیت پیمایش میدانی و تبیین اصول تئوری مدل‌سازی بر پایه روش‌های داده‌منا می‌باشد. برای اجرای آن پس از بررسی و واکاوی متون، عوامل و متغیرهای مؤثر بر زمین لغزش استخراج شد و سپس بر پایه بازدیدهای میدانی، استفاده از عکس‌های هوایی منطقه و بانک زمین لغزش‌های اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان، نقشه مناطق رخداد زمین لغزش تهیه گردید. سپس عوامل محیطی مؤثر بر زمین لغزش‌های حوزه آبخیز کاکاشرف و میزان اهمیت هر متغیر به وسیله الگوریتم جنگل تصادفی (زبان برنامه‌نویسی پایتون) شناسایی شدند. الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest) مبتنی بر روش درخت تصمیم می‌باشد، در واقع در این روش یادگیری گروهی (Ensemble learning) از ترکیبی از درخت‌های تصمیم‌گیری و الگوی یادگیری ماشینی نظارت شده، استفاده می‌شود. این الگوریتم برای طبقه‌بندی و رگرسیون قابل استفاده می‌باشد. از خصوصیات ممتاز این الگوریتم، انتخاب متغیرها و محاسبه اهمیت آنها است. از جمله دلایل انتخاب الگوریتم جنگل تصادفی برای انتخاب متغیرها، دقت زیاد، قدرت و سهولت استفاده از آن، قابلیت مدیریت متغیرهای زیاد (این الگوریتم به راحتی می‌تواند با مجموعه داده‌های بزرگ و متغیرهای زیاد کار کند) و عملکرد مناسب در مواقع ناقص بودن داده‌ها و کاهش تأثیر متغیرهای گم‌شده می‌باشد. این الگوریتم می‌تواند به خوبی داده‌های محیطی پیچیده را مدیریت و متغیرهایی را که بیشترین تأثیر را بر پراکندگی رخدادها دارند، شناسایی کند (Evans et al., 2009). الگوریتم جنگل تصادفی با ساختن تعداد زیادی درخت تصمیم‌گیری و ترکیب نتایج آنها کار می‌شود، و هر یک از درخت‌ها به طور مستقل با استفاده از یک زیرمجموعه تصادفی از داده‌ها و متغیرها ساخته می‌شود. در واقع در مرحله آموزش یا برازش مدل، داده‌های ورودی به خروجی نگاشت می‌شوند. در این الگوریتم، در آغاز برای هر درخت، به طور تصادفی تعدادی از داده‌های آموزشی را با جایگذاری (bootstrap) انتخاب می‌کند و سپس ساختار درخت تصمیم مناسب تهیه می‌شود. در هر گره از درخت تصمیم به جای استفاده از تمام ویژگی‌ها، برخی از آنها انتخاب می‌شود که این کار به منظور کاهش همبستگی بین درخت‌ها انجام می‌شود. در ادامه براساس داده‌های نمونه‌گیری شده و ویژگی‌های انتخاب شده درخت تصمیم ساخته می‌شود. برای پیش‌بینی نهایی، خروجی همه درخت‌های تصمیم‌گیری با هم ترکیب می‌شود. الگوریتم جنگل تصادفی برای محاسبه اهمیت متغیرها براساس روش کاهش ناهمگونی (impurity) که به اهمیت جینی هم معروف است، عمل می‌کند. در الگوریتم جنگل تصادفی برای هر متغیر، مقدار کلی کاهش ناهمگونی در طول درخت‌ها محاسبه می‌شود. هر چه این میزان بیش‌تر باشد آن متغیر اهمیت بیشتری دارد. در واقع اهمیت یک متغیر براساس تعداد گره‌های درختی که از آن ویژگی استفاده می‌کنند، اندازه‌گیری می‌شود. این معیار براساس میزان کاهش معیارهای ناهمگونی مانند معیار جینی (Gini Index) یا آنتروپی محاسبه می‌شود (Haste et al., 2009). الگوریتم جنگل تصادفی ابتدا برای ساخت مجموعه داده‌های آموزشی از الگوریتم انتخاب متغیر استفاده می‌کند. سپس با تقسیم داده‌ها به مجموعه آموزش و ارزیابی، مدل‌های تصمیم درختی ایجاد و آموزش داده می‌شود، سپس به کمک داده‌های آموزش دیده متغیرهای که دارای بیشترین اهمیت در تفکیک کلاس‌ها هستند تشخیص داده می‌شوند و براساس آن مدل نهایی ساخته می‌شود. متغیرها شامل شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، بارش، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص موقعیت توپوگرافی و انحنای عرضی هستند. همه متغیرها توپوگرافی بر مبنای مدل رقومی ارتفاع (DEM) ۱۰ متری، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان در نرم افزارهای GIS و Saga-

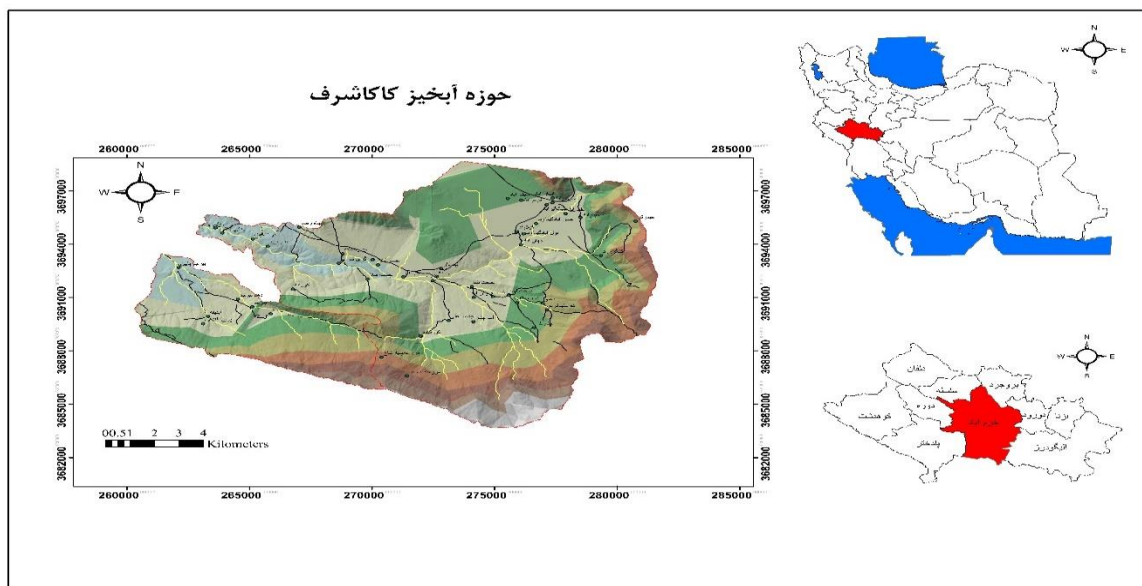
GIS تهیه شد. نقشه کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی استان لرستان اخذ و نقشه آن در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه شد. نقشه زمین‌شناسی حوضه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. جهت تهیه نقشه بارش منطقه مورد مطالعه، ابتدا داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی دهنو، کشور، چم انجیر و چم چیت از اداره هواشناسی استان لرستان اخذ گردید و سپس در نرم‌افزار اکسل با بازه‌های زمانی مشابه ۳۰ ساله مرتب شده و سپس وارد نرم‌افزار Arc GIS 10.8 شد و در ادامه از طریق درون‌یابی و با استفاده از دستور kriging نقشه بارش حوزه آبخیز کاکاشرف تهیه گردید. برای مدل‌سازی داده‌های وقوع (۱۱۲ نقطه) و عدم وقوع (۷۵ نقطه) زمین لغزش با استفاده از منابع مختلف (بانک لغزش‌های اداره کل منابع طبیعی لرستان، عکس‌های هوایی منطقه و حضور میدانی و برداشت مختصات با GPS) آماده شد (مدل مکسنت نیازی به داده‌های عدم وقوع ندارد). در هر دو مدل ۷۰ درصد داده‌ها برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد جهت ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت که این انتخاب براساس مطالعات و پژوهش‌های پیشین بوده است. سپس نقشه عوامل محیطی در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزار Saga-GIS تهیه و همراه مختصات نقاط لغزشی برای مدل‌سازی در نرم‌افزار مکسنت آماده شد. برای تهیه نقشه حساسیت اراضی به زمین لغزش در الگوریتم شبکه عصبی، بعد از آماده‌سازی نقشه‌های محیطی و مختصات نقاط لغزشی و غیر لغزشی در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی، از طریق کتابخانه geopandas داده‌ها برای مدل‌سازی با زبان برنامه‌نویسی پایتون وارد محیط jupyter notebook شد. سپس نرمال‌سازی داده‌ها و تقسیم داده‌ها به دو بخش آموزش و تست و در نهایت مدل‌سازی و خروجی مدل به صورت فایل csv که در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی با تبدیل نقاط به فایل رستری و طبقه‌بندی آن، نقشه حساسیت اراضی به زمین لغزش تهیه گردید. نکته قابل توجه در این تحقیق وجود یک حوزه آبخیز کوچک به نام پیرجد چسبیده به حوزه آبخیز کاکاشرف با ویژگی‌های مشابه (زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و...) بود که جهت ارزیابی دقت مدل داده‌های آموزشی آن (نقاط لغزشی) از مدل‌سازی حذف گردید (شکل ۱).



شکل ۱- الف) زمین لغزش‌های حوزه آبخیز کاکاشرف و پیرجد ب) زمین لغزش‌های حوزه بدون نقاط لغزشی منطقه پیرجد

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز کاکاشرف با مساحت ۱۹۴۷۵ هکتار در استان لرستان و در جنوب شرقی شهرستان خرم‌آباد قرار گرفته است. از نظر موقعیت جغرافیایی این حوضه بین $48^{\circ}27'29''$ تا $48^{\circ}39'50''$ طول شرقی و $33^{\circ}16'5/28''$ تا $33^{\circ}23'37''$ عرض شمالی واقع شده است. این حوزه در مسیر جاده خرم‌آباد به پلدختر و در ۲۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر خرم‌آباد واقع شده است. این حوزه از شرق به کوه سفید، از غرب به کوه هشتاد پهلوی و از جنوب به حوزه آبخیز سزار منتهی می‌شود. حداکثر ارتفاع حوزه ۳۲۸۷ متر و حداقل ارتفاع در خروجی برابر ۲۱۲۱ متر از سطح دریا می‌باشد (شکل ۲). مساحت حوزه آبخیز کاکاشرف ۱۵۷۰۱ هکتار و مشرف به ایستگاه هیدرومتری چنار خشکه است. این منطقه از نظر پوشش گیاهی دارای عرصه‌های جنگلی و مراتع؛ خصوصاً کوهستان‌های بلند بوده که در مواردی با تأثیر عامل انسانی قسمتی از این عرصه‌ها به کشاورزی به (دیم و آبی) و نیز کشاورزی در زیر اشکوب جنگل تغییر کاربری داده است. اقلیم حوزه آبخیز کاکاشرف مدیترانه‌ای معتدل و نیمه‌مرطوب می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه در حوزه حدود ۶۰۰ میلی‌متر است. میانگین دمای سالانه $11/7$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین حداقل دمای سالانه $2/8$ و میانگین حداکثر دمای سالانه نیز $39/2$ درجه سانتی‌گراد است. از نظر زمین‌شناسی ساختمانی، این حوزه بخشی کوچک از زون زاگرس چین خورده بوده و در سطح آن واحدهای سنگی-رسوبی سنوزوئیک و کواترنر در لیتولوژی و رسوبات

متفاوت از هم‌دیگر قابل تفکیک شده‌اند. برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها، یک حوزه آبخیز کوچک به نام پیرجد به مساحت ۳۷۷۴ هکتار چسبیده به حوزه آبخیز کاکاشرف و با ویژگی‌های مشابه این حوزه (زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و...) انتخاب گردید ولی در زمان مدل‌سازی داده‌های آموزشی این حوزه کوچک در مدل‌سازی استفاده نشد.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز کاکاشرف (Fathiganji et al., 2022)

متغیرهای مؤثر بر آسیب‌پذیری به زمین‌لغزش: براساس بررسی‌های انجام شده، متغیرهای محیطی در قالب شاخص‌های توپوهایدرولوژیک، پوشش زمین، ژئومورفومتری و شاخص متأثر از فعالیت انسانی (فاصله از جاده) در نظر گرفته شدند. نحوه محاسبه و نقشه‌سازی این متغیرها به شرح زیر می‌باشد (شکل ۳).

شیب: شدت زمین‌لغزش و توزیع فضایی آن را مشخص می‌کند می‌کند (Shafique et al., 2016). نقشه شیب در نرم‌افزار Arc GIS10.8 از نقشه DEM ۱۰ متری حوزه استخراج شد. نقشه شیب تولید شده به ۵ طبقه شامل طبقات ۰-۷، ۷-۱۵، ۱۵-۲۴، ۲۴-۳۶ و ۳۶-۷۴ طبقه‌بندی شده است.

رطوبت توپوگرافی: با فرض برابر بودن شیب آب‌های زیرزمینی با شیب سطح زمین مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک در حوزه‌ها را محاسبه می‌کند و می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر روی تولید رواناب به‌صورت کمی بیان کند (Azimpour et al., 2014).

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

نقشه رطوبت توپوگرافی حوزه آبخیز کاکاشرف در نرم‌افزار Saga-GIS از نقشه DEM ۱۰ متری حوزه تهیه گردید. **موقعیت توپوگرافی:** این شاخص ارتفاع هر پیکسل در مدل رقومی ارتفاع را با پیکسل‌های مشخص اطراف آن پیکسل متمایز می‌کند که بر همین اساس TPI منفی نشان‌دهنده توپوگرافی کم ارتفاع (تعرها و گودال‌ها) و TPI مثبت نشان‌دهنده توپوگرافی بالا (محدب و ستیخ‌ها) می‌باشد (Makram and Negahban, 2013).

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

$Z0$ = ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n = ارتفاع از شبکه و n = ارتفاع کل نقاط اطراف در مدل است. نقشه موقعیت توپوگرافی حوزه آبخیز کاکاشرف در نرم‌افزار Saga-GIS و از نقشه DEM ۱۰ متری حوزه استخراج شده است.

جهت شیب: جهت شیب یکی از عوامل مورفومتری مؤثر بر ناپایداری‌های دامنه‌ای است و معمولاً بین این ناپایداری‌ها و جهت دامنه رابطه ملموسی وجود دارد (Nojavan et al., 2018). نقشه جهت شیب منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار Arc GIS10.8 از نقشه DEM ۱۰ متری استخراج شده است.

انحنای سطحی: محدب یا مقعر بودن دامنه را نشان می دهد. فرسایش شیب و نفوذ آب ممکن است به انحنای سطحی مربوط باشد به همین دلیل در توسعه مدل های پیش بینی حساسیت زمین لغزش استفاده می شود (Ercanoglu 2002). در حوزه آبخیز کاکاشرف نقشه انحنای سطحی در نرم افزار Saga GIS و از DEM ۱۰ متری استخراج شده است.

سنگ شناسی: با استفاده از نقشه های زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خرم آباد و تنگ هفت شرکت ملی نفت همچنین با حضور در منطقه مورد مطالعه و تدقیق و اصلاح خطاها، نقشه سنگ شناسی در نرم افزار Arc GIS 10.8 تدقیق شد. سازندهای حوزه آبخیز کاکاشرف به ترتیب بر مبنای سن زمین شناسی شامل سازند ایلام-سورگاه، سازند گورپی، سازند امیران، سازند کشکان، سازند آسماری-شهبازان، سازند کنگلومرای بختیاری و واحدهای کواترنر شامل نهشته های کواترنر و رسوبات لغزشی است. حرکات تکتونیکی یا زمین ساخت نقش تشدید و تسریع در حرکات توده ای دارند (Ahmadi and Faiz Nia, 2012).

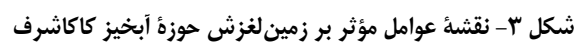
گسل های منطقه: نقشه گسل های منطقه با استفاده از نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ خرم آباد و تنگ هفت شرکت ملی نفت ایران و همچنین حضور در منطقه و تدقیق و اصلاح خطاها، تهیه گردید و سپس، نقشه فاصله از گسل در نرم افزار Arc GIS 10.8 به وسیله تابع اقلیدوسی استخراج شده است.

بارش: برای تهیه نقشه بارش منطقه مورد مطالعه، ابتدا داده های ایستگاه های هواشناسی دهنو، کشور، چم انجیر و چم چیت از اداره هواشناسی استان لرستان اخذ شد. سپس این داده ها در نرم افزار Excel با بازه زمانی ۳۰ ساله مرتب و با استفاده از روش کرایجینگ در نرم افزار ArcGIS 10.8 به نقشه بارش تبدیل شد. این نقشه به صورت درون یابی شده و با وضوحی مناسب برای تحلیل در سطح حوزه آبخیز کاکاشرف تهیه گردید.

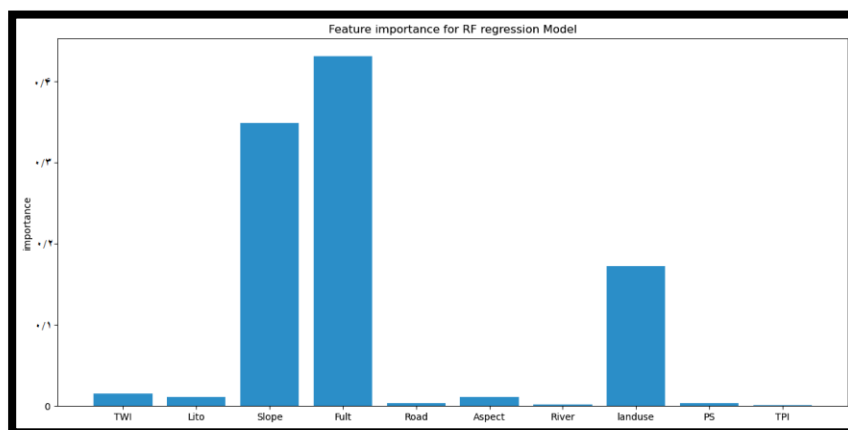
فاصله از جاده: انسان ها از طریق مختلف چه به صورت مستقیم و چه به صورت غیر مستقیم نقش مهمی در ایجاد زمین لغزش ها دارند. احداث راه خصوصاً در مناطق با شیب بالا باعث بر هم خوردن تعادل و به تبع آن تشدید ناپایداری در دامنه ها می شود. در حوزه مورد مطالعه جاده های زیادی در مناطق پرشیب و مناطق نزدیک به لغزش ها مشاهده می شود. این جاده ها عمدتاً راه ارتباطی بین آبخیز نشینان با حوزه های مجاور هستند. برای تهیه نقشه فاصله از جاده در ابتدا نقشه راه های منطقه از استانداری لرستان تهیه شد و سپس در نرم افزار Arc GIS 10.8 به وسیله تابع فاصله اقلیدوسی نقشه مورد نظر استخراج شد.

فاصله از آبراهه: رودخانه یکی از منابع اصلی تأمین رطوبت می باشد و از سوی دیگر جریان آب باعث فرسایش خاک و کاهش پایداری شیب می شود. برای تهیه نقشه فاصله از آبراهه با استفاده از نقشه های ۱/۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور در نرم افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی و به وسیله تابع فاصله اقلیدوسی نقشه فاصله از آبراهه استخراج گردید.

کاربری اراضی: یکی از عوامل مهم پایداری شیب می باشد و استفاده زیاد از زمین بر نفوذ، رواناب سطحی و پوشش گیاهی تأثیر می گذارد (Barlow, 2003). اگرچه حوزه آبخیز کاکاشرف از نظر پوشش جنگلی و مرتعی دارای پوشش نسبتاً مناسبی می باشد، اما عوامل تخریب و روند کاهش در این حوزه به خوبی قابل مشاهده است. تغییر کاربری، شخم در جهت شیب، احداث راه، چرای بی رویه دام و تغییر پوشش از عوامل کاهش دهنده می باشد. علاوه بر موارد فوق ناپایداری های دامنه ای باعث تخریب زیادی از عرصه های جنگلی و مرتعی حوضه شده است. نقشه کاربری اراضی و پوشش اراضی (۱۳۹۶) با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ از اداره کل منابع طبیعی استان لرستان اخذ و آماده سازی مربوطه در نرم افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شد (شکل ۳).



انتخاب مهمترین متغیرها با الگوریتم جنگل تصادفی: در این تحقیق برای تعیین مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر آسیب‌پذیری اراضی به زمین‌لغزش، ابتدا با استفاده از کتابخانه geopandas در محیط jupyter notebook به زبان برنامه‌نویسی پایتون، داده‌ها بارگزاری و پس از نرمال‌سازی به دو دسته داده‌های آموزش و ارزیابی تقسیم شدند (۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش). سپس با استفاده از کتابخانه Sklearn و الگوریتم جنگل تصادفی درجه اهمیت هر متغیر با feature_importances محاسبه شد (شکل ۴).

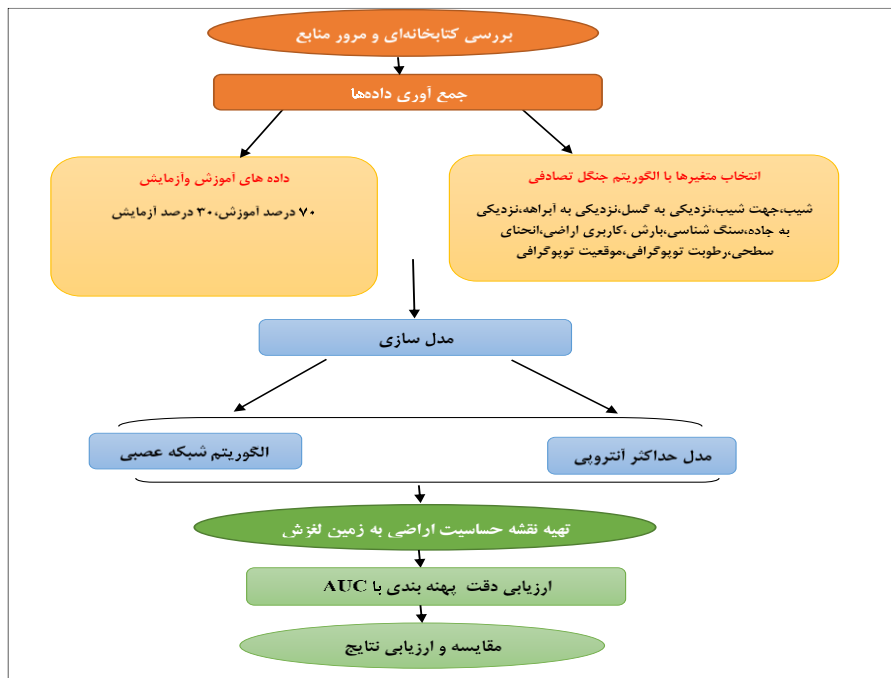


شکل ۴- اهمیت متغیرها با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی

مدل بیشینه آنتروپی: حداکثر آنتروپی یا حداکثر بی‌نظمی، مفهومی در علم اطلاعات است که نشان می‌دهد کدام فرم پیام حاوی حداکثر مقدار اطلاعات یا بی‌نظمی است. به عبارت دیگر، بیشینه آنتروپی معادل پیامی است که در آن اطلاعاتی به گونه‌ای پخش شده است که بیش‌ترین مقدار بی‌نظمی را دارند (Shannon, 1948). از مزایای این روش دقت زیاد (اگر چندین بار هم مدل‌سازی انجام شود یا داده‌ها ناقص و در حد کوچک باشد، تغییر چندانی در دقت مدل رخ نمی‌دهد)، عدم نیاز به داده‌های عدم وقوع زمین‌لغزش و کاربرپسند و رایگان بودن آن از دیگر مزایای این مدل است. خروجی‌های متنوعی در مدل وجود دارد که اطلاعات بسیار مهمی را منتقل می‌کنند. از جمله خروجی‌های مهم مدل مکسنت منحنی ROC برای ارزیابی مدل است، منحنی‌های پاسخ برای نشان دادن محدوده تأثیرگذاری متغیرهای محیطی مختلف بر امکان وقوع لغزش، جدول سهم مشارکت متغیرها در وقوع زمین لغزش و در پایان آزمون مهم جک‌نایف است که کاربرد آن برای بررسی نقش هر یک از عوامل محیطی در حساسیت اراضی به زمین‌لغزش در غیاب دیگر عوامل است. داده‌های آموزشی (نقاط لغزش) بعد از مرتب‌سازی در نرم‌افزار اکسل با فرمت CSV به همراه نقشه‌های محیطی که در نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزار Saga GIS با فرمت ASCII آماده شده بودند وارد فرآیند مدل‌سازی شدند. در هر مرحله از اجرای مدل ۷۰ درصد داده‌ها به عنوان آموزش و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل استفاده شد.

شبکه عصبی: شبکه‌های عصبی مصنوعی، یک تکنیک شناخته شده یادگیری ماشین برای پردازش داده از طریق لایه‌های تحلیلی است. شبکه‌های عصبی از نورون‌های به هم پیوسته مشابه مغز انسان تشکیل شده است. این مدل از لایه‌هایی از گره‌ها تشکیل شده است که شامل یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی است. شبکه عصبی به دلیل توانایی در یادگیری الگوهای پیچیده و تعاملات میان متغیرها و همچنین شناخت روابط خطی بین متغیرها دقت بالایی در پیش‌بینی اراضی حساس به زمین‌لغزش دارد. برای تهیه نقشه حساسیت اراضی به زمین لغزش با استفاده مدل شبکه عصبی، ابتدا نقاط وقوع و عدم وقوع زمین‌لغزش با استفاده از بانک لغزش‌های استان، تصاویر گوگل ارث، عکس‌های هوایی، حضور میدانی و برداشت مختصات نقاط با استفاده از دستگاه GPS صورت پذیرفت. برای مدل‌سازی از مدل پرسپترون (MLP) چند لایه شبکه عصبی با استفاده از کتابخانه‌های مربوطه در زبان برنامه‌نویسی پایتون استفاده شد. براساس مطالعات پیشین ۷۰ درصد داده‌ها به عنوان آموزشی و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت. همانند روش قبلی نیز در این مدل کلیه داده‌های آموزشی در حوزه مجاور کاکاشرف

(منطقه پیرجد) از مدل سازی حذف شد و در نهایت نقشه حساسیت زمین لغزش بعد از پردازش و طبقه بندی در نرم افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی آماده شد. لازم به ذکر است که چون در این مدل سازی از الگوریتم طبقه بندی برای پهنه بندی استفاده می شود، بنابراین شاخص ارزیابی مدل تنها می تواند براساس سطح زیر منحنی انجام شود. مراحل روندنمای کلی انجام پژوهش مطابق شکل ۵ می باشد.

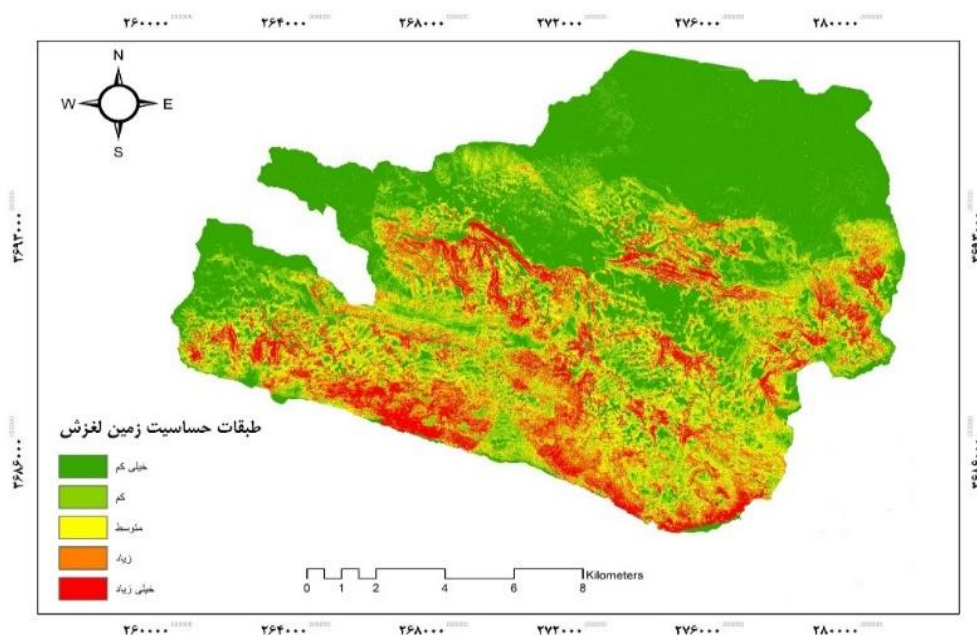


شکل ۵- فرآیند کلی انجام تحقیق

یافته های پژوهش

درجه اهمیت متغیرها بر پایه جنگل تصادفی: در این تحقیق با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی از بین متغیرهای مختلف عوامل، شیب، جهت شیب، موقعیت توپوگرافی، رطوبت توپوگرافی، انحنای سطحی، سنگ شناسی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و کاربری اراضی انتخاب و وزن و درجه اهمیت آنها مشخص شد. نتایج نشان داد که عوامل فاصله از گسل و شیب، به ترتیب بیشترین اهمیت را در حساسیت اراضی به زمین لغزش دارند.

مدل MaxEnt: از مزایای مدل مکسنت عدم نیاز به داده های عدم وقوع زمین لغزش، کاهش ریسک بیش برآزش (overfitting) و نتایج پایدار و قابل قبول در زمینه مطالعات مربوط به زمین لغزش است و به همین منظور مطالعات زیادی در زمینه زمین لغزش در سراسر جهان با این مدل انجام شده است. نقشه حساسیت به زمین لغزش با استفاده از مدل مکسنت در حوزه آبخیز کاکاشرف به پنج طبقه خطر، خیلی کم (۰-۰/۲)، کم (۰/۲-۰/۴)، متوسط (۰/۴-۰/۶)، زیاد (۰/۶-۰/۸) و خیلی زیاد (۰/۸-۰/۹۶) تقسیم می شود (شکل ۶) و درصد و مساحت هر کدام از طبقات خطر مشخص شده است (جدول ۱). ۶۷ درصد لغزش های حوزه در مناطق جنگلی اتفاق افتاده است که علت آن می تواند شیب زیاد، بارندگی بالا، شرایط زمین شناختی و نقش عوامل انسانی در تخریب جنگل و تغییر کاربری اراضی باشد. طبقه های خطر بالا بیشتر در نواحی پرشیب و از نظر زمین شناسی سازندهای مارنی و ریزدانه همراه با فعالیت های تکتونیکی اتفاق می افتد. با توجه به نتایج این مطالعه، لیتولوژی غالب لغزش های حوزه، سازند کشکان می باشد که از سیلت، ماسه سنگ و کنگلومرا با میان لایه های مارنی تشکیل شده است.



شکل ۶- نقشه حساسیت زمین لغزش حوزه آبخیز کاکاشرف با استفاده از مدل مکسنت

جدول ۱- مساحت و درصد هریک از طبقه های حساسیت به زمین لغزش حوزه آبخیز کاکاشرف به روش مکسنت

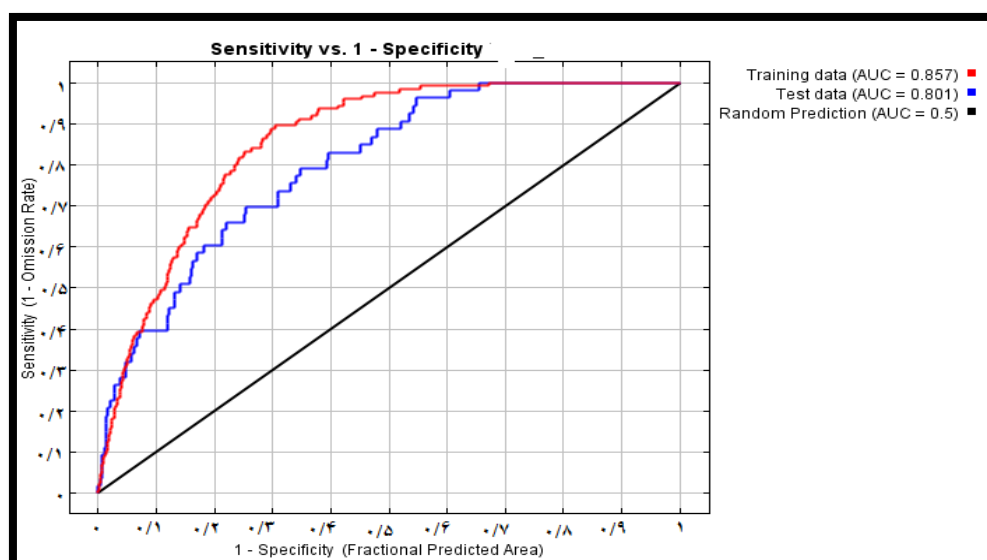
طبقه خطر	توصیف	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
I	خیلی کم	۹۴۱۲/۶۴	۴۸/۳۳
II	کم	۳۴۶۶/۷۸	۱۷/۸
III	متوسط	۴۲۱۹/۷۷	۲۱/۶۶
IV	زیاد	۲۰۴۸/۷۱	۱۰/۲
V	خیلی زیاد	۳۲۷/۸	۱/۶۸
	جمع کل	۱۹۴۷۵/۷	۱۰۰

درصد مشارکت عوامل مؤثر بر زمین لغزش: نتایج نشان می دهد عوامل شیب با ۴۴ درصد و گسل با ۲۳/۵ درصد دارای بیشترین سهم مشارکت در وقوع زمین لغزش هستند و عوامل بارش، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه و زمین شناسی در رده های بعدی هستند (جدول ۲).

جدول ۲. سهم مشارکت متغیرها در وقوع زمین لغزش

عوامل	سهم مشارکت	جایگشت
شیب	۴۴	۳۱/۸
فاصله از گسل	۲۳/۵	۲۴/۷
بارش	۸	۲/۱
فاصله از جاده	۶/۱	۱۵/۲
فاصله از آبراهه	۴/۵	۱۰/۵
لیتولوژی	۴/۲	۳/۲
موقعیت توپوگرافی	۲/۴	۳
جهت شیب	۲/۲	۳
کاربری اراضی	۲/۲	۲/۴
انحنای عرضی	۱/۴	۲
رطوبت توپوگرافی	۱/۴	۲

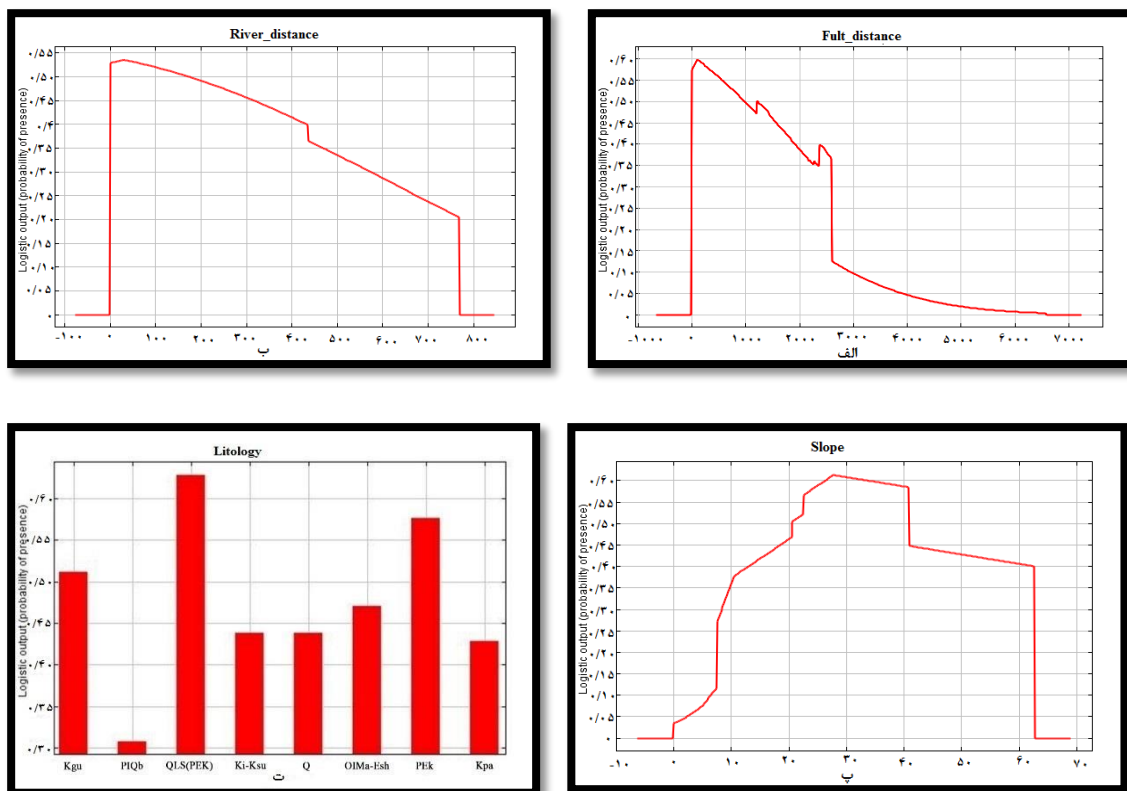
ارزیابی اعتبار مدل MaxEnt: در مدل مکسنت برای ارزیابی اعتبار مدل از منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC^1) استفاده می‌شود. چنانچه سطح زیر منحنی بین ۰/۷ تا ۰/۸ باشد مدل را می‌توان خوب و اگر بین ۰/۸ تا ۰/۹ باشد عالی و اگر از ۰/۹ بیشتر باشد مدل دارای دقت بسیار عالی می‌باشد (Pearson, 2007). سطح زیر منحنی (AUC) مدل مکسنت در حوزه آبخیز کاکاشرف برای داده‌های آموزشی ۰/۸۵۷ و برای داده‌های آزمایشی ۰/۸۰۱ می‌باشد که نشان‌دهنده دقت عالی مدل می‌باشد (شکل ۷). طبق پیش‌بینی مدل، حدود ۱۲ درصد از مساحت حوزه در مناطق با خطر زیاد و پرخطر هستند که با زمین‌لغزش رخ داده در حوزه مطابقت دارد.



شکل ۷- منحنی ROC برای ارزیابی اعتبار مدل MaxEnt در حوزه آبخیز کاکاشرف

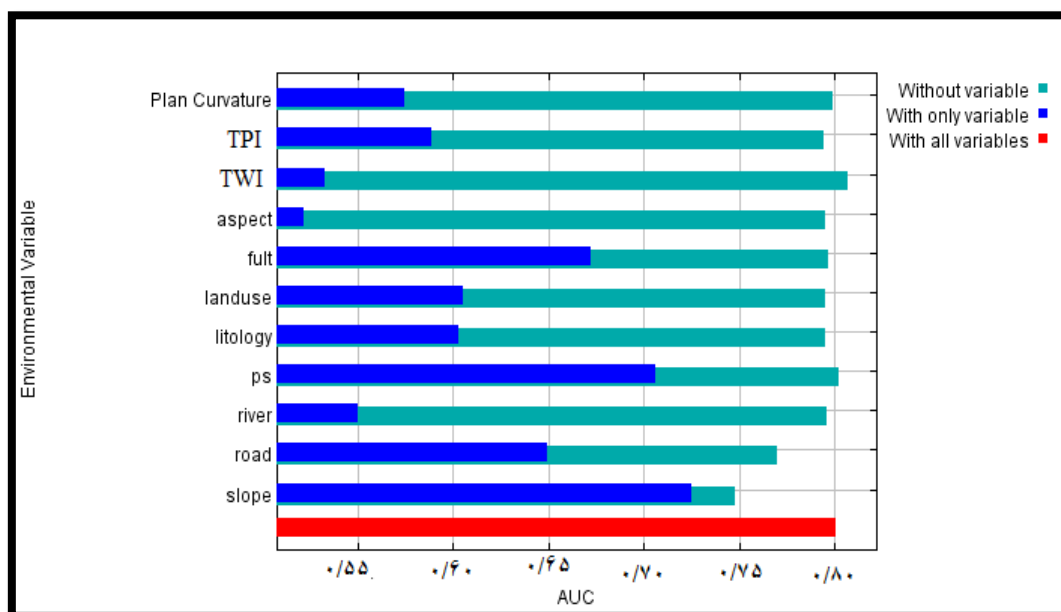
منحنی‌های پاسخ: نقش متغیرهای محیطی مختلف بر امکان وقوع لغزش را مشخص می‌کنند. اگر منحنی‌ها رو به بالا و صعودی باشند نشان‌دهنده رابطه مثبت بین متغیر و لغزش و اگر نزولی باشند نشان‌دهنده رابطه منفی است (Baldwin, 2009). با افزایش شیب میزان پراکنش زمین‌لغزش افزایش می‌یابد. همچنین منحنی پاسخ نشان‌دهنده این است که دامنه شیب ۳۵-۲۵٪ بیشترین نقش در افزایش حساسیت دارد. حوزه آبخیز کاکاشرف دارای چندین سیستم گسلی می‌باشد که نقش به‌سزایی در لغزش‌های منطقه دارند. با افزایش فاصله از گسل میزان حساسیت به زمین‌لغزش کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله از آبراهه حساسیت به زمین‌لغزش کاهش می‌یابد و در فاصله کمتر از ۱۰۰ متر بیشترین احتمال رخداد زمین‌لغزش وجود دارد (شکل ۸) رخساره‌های لغزشی که خود حاصل فرسایش و ناپایداری سازند کشکان در حوزه آبخیز کاکاشرف هستند، دارای بیشترین حساسیت به زمین‌لغزش هستند این رخساره‌ها در حوزه آبخیز کاکاشرف در بیشتر مناطق دچار لغزش مجدد شده‌اند، به‌طوری‌که در اطراف زمین‌های کشاورزی روستای چنارکل خندق‌های بزرگی در رسوبات لغزش یافته ایجاد شده است. سازند کشکان به‌واسطه لیتولوژی این سازند که از سیلتستون، ماسه‌سنگ و کنگلومرا با قلوه‌های قرمز رادیولاریتی به‌همراه میان‌لایه‌های ماری تشکیل شده است دارای حساسیت بالایی به زمین‌لغزش می‌باشد.

¹Area Under the Curve



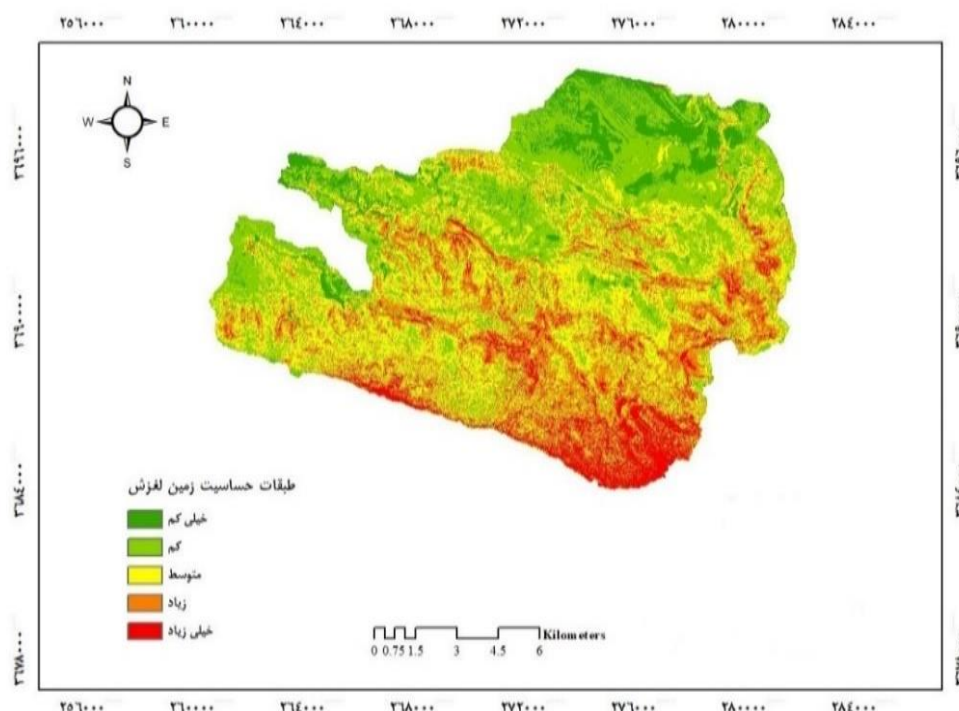
شکل ۸- منحنی‌های پاسخ (الف) فاصله از گسل، (ب) فاصله از آبراهه، (پ) شیب، (ت) سنگ‌شناسی

نمودار جک‌نایف (Jackknife): نتایج نمودار جک‌نایف برای بررسی نقش هر یک از عوامل محیطی در حساسیت اراضی به زمین‌لغزش است. این نمودار نشان می‌دهد در صورتی که فقط از شیب در مدل‌سازی استفاده شود و سایر عوامل حذف شوند میزان AUC مدل ۷۳ درصد می‌باشد. در صورتی که فقط از بارش در مدل‌سازی استفاده شود، میزان AUC مدل حدود ۷۱ درصد می‌باشد و این میزان برای فاصله از گسل حدود ۶۷ درصد است و کمترین میزان آن برای جهت شیب است (شکل ۹).



شکل ۹- نتایج نمودار جک‌نایف در مورد سهم متغیرهای محیطی

مدل شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP): نقشه حساسیت به زمین لغزش با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی به پنج طبقه خطر، خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم می شود (شکل ۱۰). حدود ۱۹۰۰ هکتار از مساحت حوزه در مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد که این مناطق عمدتاً در شیب های ۲۵ تا ۴۰ درصد و خطوط گسل و در فاصله نزدیک به آبراهه قرار دارند (جدول ۳).

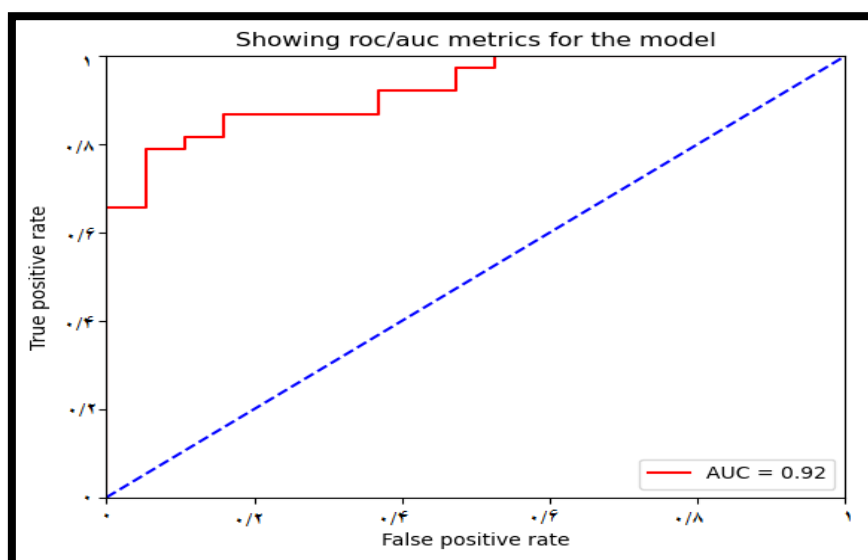


شکل ۱۰- نقشه حساسیت به زمین لغزش به روش شبکه عصبی چند لایه (MLP)

جدول ۳- مساحت و درصد هریک از طبقه های حساسیت به زمین لغزش به روش شبکه عصبی

کلاس خطر	توصیف	مساحت (هکتار)
I	خیلی کم	۵۹/۲۰
II	کم	۶۴۵۵/۰۷
III	متوسط	۱۱۰۶۶/۷۹
IV	زیاد	۱۸۸۷/۱۹
V	خیلی زیاد	۷/۶۳
	جمع کل	۱۹۴۷۵/۷

ارزیابی مدل شبکه عصبی: در الگوریتم شبکه عصبی برای ارزیابی اعتبار مدل از منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده می شود. سطح زیر نمودار در مدل شبکه عصبی ۰/۹۲ می باشد که نشان دهنده دقت عالی مدل است (شکل ۱۱)، از طرفی، با تطابق نقشه پهنه بندی خطر مدل با داده های وقوع زمین لغزش حوزه آبخیز کاکاشرف و همچنین منطقه پیرجد دقت بالای مدل شبکه عصبی تأیید گردید.



شکل ۱۱- منحنی ROC برای ارزیابی اعتبار مدل شبکه عصبی (MLP) در حوزه آبخیز کاکاشرف

بحث و نتیجه‌گیری

در زمینه نقش ویژگی‌های ژئومورفیک مؤثر بر حساسیت اراضی به زمین لغزش با روش‌های یادگیری ماشین و روش‌های آماری تاکنون مطالعات زیادی انجام شده است که می‌توان به بررسی‌های Demir و همکاران (۲۰۱۵)، Yu X و همکاران (۲۰۲۰)، Shano و همکاران (۲۰۲۱)، Sadidi و همکاران (۲۰۲۲)، Siadati و همکاران (۲۰۲۲)، Mokhtari و همکاران (۲۰۲۳)، Ganesh و همکاران (۲۰۲۳)، Boussof و همکاران (۲۰۲۳)، اشاره کرد. Sangchini و همکاران (۲۰۲۴) و Zakeri Nejad و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی، حوزه آبخیز کمه در جنوب اصفهان را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد مهم‌ترین عوامل مؤثر بر احتمال خطر زمین لغزش به ترتیب فاصله از آبراهه، زمین‌شناسی و فاصله از جاده هستند و حدود ۲۷ درصد از مساحت حوزه در طبقه پرخطر، خطر زمین لغزش است. Pandey و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان و حداکثر آنتروپی اقدام به تهیه نقشه حساسیت به زمین لغزش در در بزرگراه گرھوال هیمالا یا نمودند. Taimouri و همکاران (۲۰۱۹) پهنه‌بندی حساسیت و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در استان لرستان را بررسی نمودند. نتایج نشان داد سطح زیر منحنی (AUC) براساس منحنی تشخیص عملکرد نسبی، روش حداکثر آنتروپی نشان‌دهنده دقت ۰/۹۰ در مرحله آموزش و ۰/۸۳ در مرحله اعتبارسنجی برای تعیین مناطق دارای حساسیت وقوع زمین لغزش است. این پژوهش به بررسی و ارزیابی نقش ویژگی‌های ژئومورفیک مؤثر بر حساسیت اراضی به زمین لغزش با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین (شبکه عصبی و مدل مکسنت) پرداخته است. در این مطالعه با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی مهم‌ترین متغیرهای و درصد اهمیت هر کدام در محیط زبان برنامه‌نویسی پایتون مشخص گردید که براساس آن عامل فاصله از گسل و شیب دارای بیشترین اهمیت هستند. سپس حساسیت اراضی به زمین لغزش با استفاده از دو مدل مکسنت و شبکه عصبی (MLP) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از هر دو مدل نشان‌دهنده توانایی بالای آنها در شناسایی مناطق حساس به زمین لغزش است. در مدل مکسنت سهم مشارکت عوامل محیطی در وقوع زمین لغزش‌های حوزه مشخص شد که براساس آن عامل شیب دارای بیشترین سهم (۴۴ درصد) و عامل بعدی فاصله از گسل (۲۳/۵ درصد) می‌باشد. برای ارزیابی مدل از منحنی راک استفاده شد که نشان‌دهنده دقت خوب مدل می‌باشد ($AUC=0.801$). مدل‌سازی در الگوریتم شبکه عصبی در محیط زبان برنامه‌نویسی پایتون و با استفاده از کتابخانه‌های مربوطه صورت پذیرفت و نقشه خروجی این مدل در نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی تهیه گردید. برای ارزیابی مدل شبکه عصبی از سطح زیر نمودار منحنی راک استفاده شد. نتایج بیانگر دقت بسیار عالی مدل می‌باشد ($AUC=0.92$). نتایج هر دو مدل نشان می‌دهد بیشتر زمین لغزش‌ها در مناطق پرشیب و در نزدیک‌ترین فاصله به گسل هستند زیرا تکنیک فعال در حوزه‌های آبخیز باعث جابجایی لایه‌های زمین و ایجاد ناپایداری در دامنه شده است. یکی از گسل‌های مهم حوزه آبخیز کاکاشرف، گسل

چشمه‌علی است. این گسل در منطقه پیرجد باعث ایجاد یک پهنه بزرگ لغزشی شده است که همین فرآیند در جنوب چشمه‌علی و به طرف شرق چشمه‌علی تا منطقه ترس سپید دشت قابل مشاهده است. با توجه به نتایج این مطالعه، لیتولوژی غالب لغزش‌های حوزه، سازند کشکان می‌باشد که از سیلت، ماسه‌سنگ و کنگلومرا با میان‌لایه‌های مارنی تشکیل شده است. در مدل حداکثر آنتروپی حدود ۱۲ درصد از مساحت حوزه در مناطق با خطر زیاد و پر خطر است در حالی که در مدل شبکه عصبی حدود ۱۰٪ از مساحت حوزه در مناطق با خطر زیاد و پرخطر قرار دارد. بیشتر زمین‌لغزش‌های حوزه در شیب‌های ۲۵ تا ۳۵ درصد است که می‌تواند به علت زیاد شدن مؤلفه نیروی تنش نسبت به پایداری باشد. هر دو مدل شبکه عصبی و مدل مکسنت به خوبی قادر به مدل‌سازی حساسیت اراضی به زمین‌لغزش بودند اما مدل شبکه عصبی MLP به دلیل وجود لایه‌های مخفی و تعداد زیادی از پارامترهای یادگیری پیچیده‌تر از مدل مکسنت است. مدل شبکه عصبی به واسطه توانایی در یادگیری الگوهای پیچیده و تعاملات میان متغیرها دقت بالاتری در پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش را نشان داد. این نقشه‌ها می‌توانند به عنوان ابزار ارزشمند برای برنامه‌ریزی و مدیریت اراضی در نواحی مستعد زمین‌لغزش جهت کاهش خطرات و خسارات احتمالی استفاده شوند. مهم‌ترین کاربرد این نقشه‌ها در مدیریت ریسک، برنامه‌ریزی شهری و عمرانی، حفاظت از منابع طبیعی و مدیریت بلایای طبیعی می‌باشد. این نقشه‌ها در مناطق روستایی کمک می‌کند تا مناطق امن برای ساخت منازل، مدارس، مراکز درمانی و سایر تأسیسات عمومی شناسایی شود همچنین این نقشه‌ها می‌توانند برای پروژه‌های راه‌سازی بسیار حیاتی باشد. این نقشه‌ها کمک می‌کند تا جاده‌ها در مناطق با ریسک بالایی لغزش احداث نشود و یا در مناطقی که قبلاً راه احداث شده است، نقاط مستعد لغزش، به طور مداوم تحت نظارت قرار بگیرند.

References

- Agboola, G., Hashemi Beni, L., Elbayoumi, T., Thompson G., 2024. Optimizing landslide susceptibility mapping using machine learning and geospatial techniques. *Ecological Informatics* 81, 102583.
- Ahmadi, H., Faiz Nia, S., 2012. Formations of the Quaternary Period (Theoretical and Practical Basis in Natural Resources) Tehran University Publications, Third Edition. (In Persian)
- Azimpour Moghadam, V., Vahabzadeh, Gh., 2014. Landslide risk zoning using the Dempster-Schiffer method (case study: a part of Babolrud watershed), the third national conference of environmental and agricultural researches of Iran, Hamedan. (In Persian)
- Barlow, J., Martin, Y., Franklin, S.E., 2003. Detecting translational landslide scars using segmentation of Landsat ETM+ and DEM data in the northern Cascade Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(4), 510-517.
- Boussouf, S., Fernández, T., Hart, A.B., 2023. Landslide susceptibility mapping using maximum entropy (MaxEnt) and geographically weighted logistic regression (GWLR) models in the Río Aguas catchment (Almería, SE Spain). *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, Springer; International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards 117(1), 207-235
- Demir, G., Aytekin Akgun, A., 2015. Landslide susceptibility mapping by frequency ratio and logistic regression methods: an example from Niksar-Resadiye (Tokat, Turkey). *Arabian Journal of Geosciences* 8, 1801-1812.
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental Geology* 41, 720-730
- Evans, J.S., Cushman, S.A., 2009. Gradient modeling of conifer species using random forests. *Landscape Ecology* 24, 673-683.
- Froude, M., Petley, D., 2018. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2161-2181. ISSN 1561-8623
- Ganesh, B., Vincent, S., Pathan, S., Benitez, S.R.G., 2023. Integration of GIS and Machine Learning Techniques for Mapping the Landslide-Prone Areas in the State of Goa, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 51(7), 1479-1491

- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K.T., 2012. Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, *Earth-Science Reviews* 112, 42-66.
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., 2009. *the Element of Statistical learning: Data Mining, inference, and Prediction*. 2nd Edition. Springer.
- Karimi Sangchini, E., Dastranj, A., Arami, S.H., Shadfar, S., Vayskarami, I., 2024. Application of maximum entropy machine learning algorithm in landslide hazard zoning in Karganeh Watershed, Lorestan Province. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 18(64), 5. (In Persian)
- KohPeima, A., 2016. *Susceptibility Zoning, Landslide Risk Assessment and Management (Case Study: Letyan Watershed)* Doctoral Dissertation in Watershed Engineering, Tehran University, 149 p. (In Persian)
- Makram, M., Negahban, S., 2013. Classification of landforms using topographic position index (TPI) case study: southern region of Darab city. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Information "Sepehr"* 23(92), 57-65. (In Persian)
- Meng, Xingmin., 2022. landslide". *Encyclopedia Britannica*, 3 Feb.
- Mokhtari, D., Rahmati, F., Rouhanizadeh, S., 2023. Landslide Risk Zoning Using Fuzzy Hierarchy Process (AHP) (Case Study: Mehr Kian Housing District, Saqqah), 12th International Conference on Agriculture, Environment, urban and rural development.
- Nojavan, M.R., Sadat Shahzaide, S., Davoudi, M., Amin Al-Raai, A., 2018. Landslide risk zoning using the combination of two hierarchical and fuzzy process models (Case study: Kameh watershed of Isfahan province). *Quantitative Geomorphology* 7(28), 159-142. (In Persian)
- 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 International* 35(2), 168-187.
- Pearson, R.G., 2007. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners. *Synthesis. American Museum of Natural History* 50, 54-89.
- Sadidi, J., Maleki, R., 2022. Comparison of support vector machine, random forest and logistic regression algorithms in landslide risk zoning in Mahabad Sardasht road. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences* 10(15), 5047. (In Persian)
- Saha, S., Majumdar, P., Bera, B., 2023. Deep learning and benchmark machine learning based landslide susceptibility investigation, Garhwal Himalaya (India). *Quaternary Science Advances* 10, 100075.
- Shafique, M., van der Meijde, M., Asif Khan, M., 2005. A review of the Kashmir earthquake-induced landslides; from a remote sensing prospective. *Journal of Asian Earth Sciences* 118, 68-80.
- Shannon, C.E., 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* 27(3), 379-423.
- Shano, L., Raghuvanshi, T.K., Meten, M., 2022. Landslide Hazard Zonation using Logistic Regression Model: The Case of Shafe and Baso Catchments, Gamo Highland, Southern Ethiopia. *Geotechnical and Geological Engineering* 40, 83-101
- Siadati Far, M.H., Tajbakhsh Fakhrabadi, M., Jazgi, J., Ahmadi, K., 2022. Evaluation of Landslide Sensitivity and Zoning Using Support Vector Machine Algorithm - Case Study: Khosef City-Ailki Watershed, 17th National Science Conference and watershed engineering of Iran, focusing on watershed management and sustainable food security, Jiroft. (In Persian)
- Taimouri, M., Asadi Nalivan, O., 2019. Zoning susceptibility and prioritizing factors affecting landslide occurrence using the maximum entropy model (Case study: Lorestan Province). *Hydrogeomorphology* 6(21), 155-179. (In Persian)
- Varens, D.J., 1978. slope movement types and processes *Special Report* 176, 33-11.
- Yu, X., Gao, H., 2020 A landslide susceptibility map based on spatial scale segmentation: A case study at Zigui-Badong in the Three Gorges Reservoir Area, China. *PLoS ONE* 15(3), e0229818.
- Zakeri Nejad, R., Amooshahi, N., 2022. Landslide hazard assessment using remote sensing data and the maximum entropy model (Case study: Kameh Watershed, southern Isfahan Province). *Quantitative Geomorphological Research* 11(2), 128-149. (In Persian)