

Factors influencing and predicting roadside creeps and landslides in Golestan Province forests

Benjamin Matinnia¹, Aidin Parsakhoo^{*2}, Mohsen Hosseinalizadeh³, Jahangir Mohammadi⁴

1. Ph.D. Student, Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: benjaminmati1372@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: parsakhoo@gau.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Arid Zone Management, Faculty of Range and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mhalizadeh@gau.ac.ir
4. Associate Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mohamadi.jahangir@gau.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 08.19.2024
Revised: 11.30.2024
Accepted: 11.30.2024

Keywords:

Excavation trench,
Mass movement,
Random forest model,
Road ditch,
Soil plasticity

ABSTRACT

Background and Objectives: Creeps and landslides, although often small and shallow, occur frequently along mountain forest roads, resulting in substantial annual financial damage to infrastructure and roadways. This study aimed to identify the most significant factors influencing the occurrence of these roadside mass movements and to develop a predictive model for their locations.

Materials and Methods: A portion of road segments within the Shamushak, Chelchai, and Arab Dagh forestry projects, characterized by diverse climates and bedrock types, was surveyed. All observed creeps and landslides, along with their approximate extents, were recorded using Differential Global Positioning System (DGPS). Natural influencing factors, including slope gradient, slope shape, slope aspect, geology, elevation, and soil clay content, were determined through a combination of existing data, field surveys, and ASTEM standards. Technical influencing factors related to forest roads were also assessed, such as longitudinal slope, side ditch width and depth, excavation trench height and slope, and embankment characteristics, using inclinometers and measuring tapes. Traffic volume was determined through regional inquiries. All collected data were input into Random Forest (RF) models. Based on the model coefficients, the most important influencing factors for the occurrence of creeps and landslides were identified. Subsequently, a sensitivity map or probability of creep and landslide occurrence was generated by standardizing the obtained layers and applying the model coefficients.

Results: Fifty landslides and nineteen creeps were recorded during this study. The performance of the random forest model was evaluated using the ROC curve, demonstrating high accuracy with a Kappa of 1 for landslides and 0.95 for creeps. Therefore, the zoning results exhibited a strong correspondence with ground observations. According to the random forest model, excavation trench height and slope were the most critical factors influencing the occurrence of roadside landslides in the study areas. Side ditch width and depth were identified as the most significant factors for creep occurrence. Among the natural factors, soil clay content and regional geological conditions were found to be the most influential factors

for both landslides and roadside creeps. The landslide and creep risk maps indicated that 31% and 51% of the surveyed areas were susceptible to landslides and creeps, respectively.

Conclusion: This study demonstrated that non-standard side ditch dimensions, resulting from sediment accumulation or trench erosion, can be a main driver of soil creep. Furthermore, the design and construction of roads in steep terrain often involve the creation of high and steep trenches, increasing the risk of instability and landslides. These findings emphasize the critical need for proper road design and comprehensive, accurate planning for drainage operations, trench protection, and maintenance of forest roads.

Cite this article: Matinnia, Benjamin, Parsakhoo, Aidin, Hosseinalizadeh, Mohsen, Mohammadi, Jahangir. 2024. Factors influencing and predicting roadside creeps and landslides in Golestan Province forests. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (3), 33-52.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2024.22730.2074

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تعیین عوامل مؤثر و پیش‌بینی مکانی وقوع خزش‌ها و زمین‌لغزش‌های کنار جاده‌ای در جنگل‌های استان گلستان

بنیامین متین‌نیا^۱، آیدین پارساخو^{۲*}، محسن حسینعلی‌زاده^۳، جهانگیر محمدی^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: benjaminmati1372@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: parsakhoo@gau.ac.ir
۳. دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: mhalizadeh@gau.ac.ir
۴. دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: mohamadi.jahangir@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: خزش‌ها و زمین‌لغزش‌ها هرچند در ابعاد کوچک و سطحی اما به‌وفور در مجاورت جاده‌های جنگلی کوهستانی حادث شده و سالانه منجر به وارد آمدن خسارت مالی قابل‌ملاحظه‌ای به ابنیه فنی و راه‌ها می‌شود. هدف اصلی این پژوهش شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع این نوع حرکت‌های توده‌ای کنارجاده‌ای و پیش‌بینی مکانی وقوع آن‌ها در اطراف جاده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹	مواد و روش‌ها: ابتدا بخشی از جاده‌های طرح‌های جنگلداری شמושک و چهل‌چای و عرب داغ که دارای اقلیم‌ها و سنگ‌بسترهای متفاوت می‌باشند، پیمایش شدند و تمام خزش‌ها و زمین‌لغزش‌ها و وسعت تقریبی آن‌ها توسط (سامانه موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی) DGPS ثبت گردید. عوامل تأثیرگذار طبیعی شامل شیب دامنه، شکل شیب دامنه، جهت‌های جغرافیایی شیب، نوع سازند، ارتفاع از سطح دریا و شاخص خمیری خاک و عوامل تأثیرگذار فنی جاده‌های جنگلی شامل شیب طولی، عرض و عمق جوی، ارتفاع و شیب ترانشه‌های خاکبرداری و خاک‌ریزی به کمک دستگاه شیب‌سنج و متر برداشت شد. میزان ترافیک نیز از طریق استعلام منطقه‌ای مشخص شد. همه این اطلاعات در مدل‌های جنگل تصادفی (RF) وارد
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰	
واژه‌های کلیدی: ترانشه خاکبرداری، جوی کناری جاده، حرکت توده‌ای، خمیرایی خاک، مدل جنگل تصادفی	

شدند. سپس بر مبنای ضرایب به دست آمده از اجرای مدل‌ها مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در وقوع خزش‌ها و زمین‌لغزش شناسایی گردید. در مرحله بعد، بر مبنای استانداردهای لایه‌ها و ضرایب به دست آمده، نقشه حساسیت و یا احتمال رویداد خزش و زمین‌لغزش تولید شد.

یافته‌ها: در این پژوهش ۵۰ مورد زمین‌لغزش و ۱۹ مورد خزش ثبت شد. نتایج منحنی ROC بیانگر دقت بالای مدل جنگل تصادفی با کاپا ۱ برای زمین‌لغزش و کاپای ۰/۹۵ برای خزش است؛ بنابراین نتایج حاصل از پهنه‌بندی با درصد بالا با واقعیت زمینی مطابقت دارد. همچنین براساس مدل جنگل تصادفی، ارتفاع و شیب ترانسه خاکبرداری از میان عوامل فنی به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های کنارجاده‌ای مناطق مورد مطالعه داشته‌اند. عرض و عمق جوی کناری نیز به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را در وقوع خزش داشتند. از میان عوامل طبیعی، خمیرایی خاک و وضعیت سازندهای زمین‌شناسی منطقه، مؤثرترین عوامل در وقوع زمین‌لغزش‌ها و خزش‌های کنارجاده‌ای بودند. با توجه به نقشه‌های خطر زمین‌لغزش و خزش، ۳۱ درصد از سطح مناطق مورد مطالعه مستعد زمین‌لغزش و ۵۱ درصد آن مستعد خزش می‌باشد.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد که ابعاد غیراستاندارد جوی کناری که در اثر انباشتگی رسوب و یا فرسایش خندقی ایجاد می‌شود، می‌تواند محرک اصلی خزش خاک باشد. همچنین طراحی و ساخت جاده با ترانسه‌های مرتفع و پرشیب به‌ویژه در دامنه‌های با شیب متوسط که خاک عمیق دارند غالباً با پیامدهای ناپایداری و زمین‌لغزش همراه است. این موارد ضرورت طراحی اصولی مسیر هادی و برنامه‌ریزی جامع و دقیق برای اجرای عملیات زهکشی و حفاظت و نگهداشت ترانسه‌های جاده‌های جنگلی را نشان می‌دهد.

استناد: متین‌نیا، بنیامین، پارساخو، آیدین، حسینعلی‌زاده، محسن، محمدی، جهانگیر (۱۴۰۳). تعیین عوامل مؤثر و پیش‌بینی مکانی وقوع خزش‌ها و زمین‌لغزش‌های کنارجاده‌ای در جنگل‌های استان گلستان. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۱ (۳)، ۵۲-۳۳.

DOI: 10.22069/JWFST.2024.22730.2074



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

جاده‌های جنگلی در حمل‌ونقل چوب و استفاده از سایر خدمات جنگل نقش ویژه‌ای را ایفا می‌کنند. خزش و زمین‌لغزش دو نوع عمده حرکت‌های توده‌ای در دامنه‌های بالادست و پایین‌دست جاده‌های جنگلی می‌توانند باعث تخریب و کاهش مقاومت راه شوند. بنابراین یکی از مسائل بسیار مهم که در کاهش تخریب جاده و مدیریت بحران ناشی از این گونه حرکت‌های توده‌ای، شناسایی عوامل مؤثر بر ناپایداری‌های کنارجاده‌ای می‌باشد (۱). در سالیان اخیر، اجرای طرح تنفس و ایجاد خلأ مدیریتی در حفاظت از جاده‌های جنگلی باعث گردیده است تا وقوع خزش و زمین‌لغزش عملاً این جاده‌ها را غیرقابل استفاده نماید و این جاده‌ها به‌عنوان یک سرمایه عظیم مالی در جنگل، روزبه‌روز مستهلک‌تر و فرسوده‌تر شوند. بنابراین ضروری است تا متخصصین، فارغ از تصمیمات کلان مدیریتی با شناسایی به‌هنگام عوامل محرک خطر خزش و زمین‌لغزش و پیش‌بینی مکانی وقوع آن‌ها نسبت به مدیریت پایدار جاده‌های جنگلی، زمینه لازم را فراهم سازند و نسخه‌های مدیریتی و حفاظتی مناسب را تجویز نمایند (۲). با مرور روش‌های تجزیه‌وتحلیل مربوط به زمین‌لغزش مشخص می‌شود در دهه‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۰ میلادی بیش‌تر روش‌های آماری شامل احتمال شرطی، وزن شواهد، نسبت فراوانی و رگرسیون لجستیک برای تجزیه‌وتحلیل تأثیر عوامل ایجاد زمین‌لغزش و پیش‌بینی استفاده شد. امروزه سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری در قالب روش‌های جنگل تصادفی و شبکه‌های عصبی مصنوعی بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند (۳).

زمین‌لغزش عبارت است از جدایی خاک یا سنگ در طول سطح گسیختگی که در آن توده‌ای از مواد به‌صورت ناگهانی به سمت پایین دامنه حرکت می‌کند.

خزش حرکت بسیار آهسته خاک به سمت پایین شیب است. خزش‌ها معمولاً تا عمق خیلی کم (۱ تا ۲ متر) حادث می‌شوند (۴ و ۵). به‌طورکلی بین خزش خاک و تغییرات رطوبت خاک رابطه معنی‌داری وجود دارد (۵). یک لایه خاک ضخیم‌تر پارامترهای خزش کم‌تری دارد و بنابراین نرخ کرنش خزش کندتر است. لازم به ذکر است اگرچه لایه ضخیم‌تر خاک نرخ کرنش خزشی کم‌تری دارد، زمان لازم برای رسیدن به پایان تحکیم اولیه بسیار بیش‌تر از لایه نازک‌تر خاک است (۱۱). دانشمندان در طی چند دهه گذشته توجه خاصی به این پدیده‌های طبیعی نموده‌اند. آن‌ها با تهیه نقشه نقاط مستعد ناپایداری توانستند توزیع فضایی و مکانی مناطقی که در آینده احتمال وقوع خزش و زمین‌لغزش در آن‌جا زیاد است را به تصویر بکشند. از نظر ژئوتکنیکی، ناپایداری شیب‌های طبیعی موقعی رخ می‌دهد که نیروی چسبندگی و اصطکاک داخلی روی یک سطح، ناچیز شده و نیروی ثقل باعث جابجایی توده خاک به‌طرف پایین شود (۶، ۷ و ۸). عامل توپوگرافی مهم‌ترین عامل محدودکننده توزیع و وسعت حرکت‌های توده‌ای خاک به شمار می‌رود. بنابراین لازم است تا با بهره‌گیری از مدل رقومی ارتفاع (DEM)، برخی اطلاعات ژئومورفولوژیکی مانند ارتفاع از سطح دریا، شیب، شکل شیب و جهت شیب ارزیابی شود. آیالو و یاماگیشی (۲۰۰۵) در حوزه‌های آبخیز کاکودا یاهی‌کی در مرکز ژاپن، لایه‌های اطلاعاتی مانند زاویه شیب، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، لیتولوژی و فاصله از جاده را تهیه و وارد مدل کردند. نتایج نشان داد فاصله از جاده نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع زمین‌لغزش دارد (۹). مطالعات نشان داده است که درجه شیب، ترافیک، ارتفاع از سطح دریا و فاصله از جاده‌ها مهم‌ترین عامل در وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. فرآیند خزش معمولاً در خاک‌های رسی که کانی‌های آبدوست (مانند مونت‌موریلونیت) در آن‌ها سهم غالب

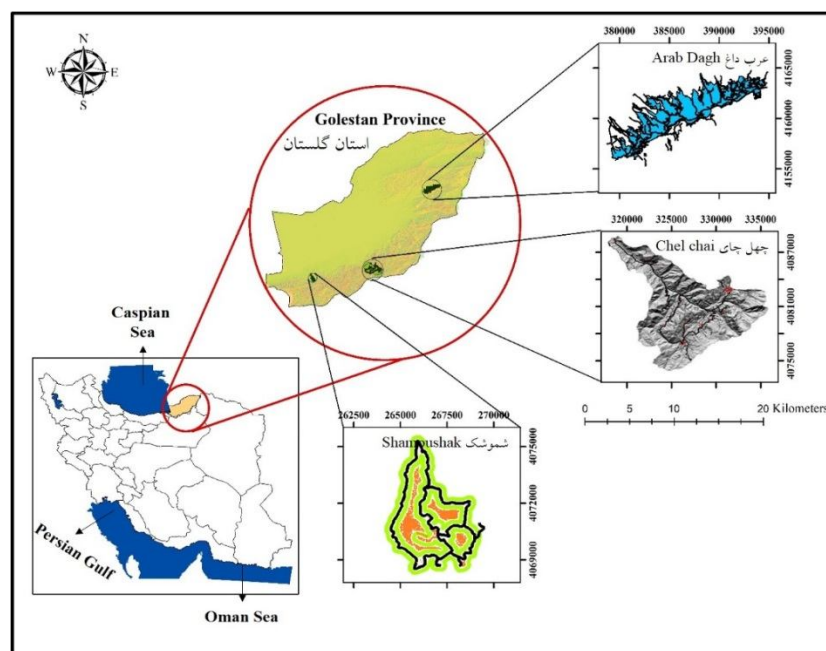
گرفتن عوامل فنی نامشخص باقی می‌ماند و در نتیجه مانع پیش‌بینی دقیق می‌شود.

مرور منابع گذشته نشان می‌دهد که شناسایی عوامل طبیعی تأثیرگذار و پهنه‌بندی نقشه‌های خطر حرکت‌های توده‌ای غالباً برای زمین‌لغزش‌ها در مقیاس کلان حوزه‌های آبخیز و نهایتاً در سطح سری‌های جنگلی انجام‌شده و در این میان، اثر جاده‌های جنگلی به‌عنوان تنها عامل انسان‌ساخت در عرصه‌های طبیعی که بر وقوع حرکت‌های توده‌ای مؤثر هستند، بدون در نظر گرفتن عوامل فنی مستتر در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. حال آن‌که در صورت شناسایی میزان اهمیت و اثرگذاری هر یک از این عوامل بر وقوع زمین‌لغزش‌ها و سایر انواع حرکت‌های توده‌ای مانند خزش‌ها می‌توان در جهت استانداردسازی، مرمت و اصلاح آن‌ها گام برداشت و بدین طریق تا حد زیادی مانع از وقوع حرکت‌های توده‌ای ناشی از عوامل انسان‌ساخت شد. هدف اصلی این پژوهش شناسایی مهم‌ترین عوامل طبیعی و فنی مؤثر در وقوع خزش‌ها و زمین‌لغزش‌های کنارجاده‌ای و پهنه‌بندی آن‌ها در جنگل‌های استان گلستان است.

مواد و روش‌ها

استان گلستان یکی از معدود استان‌های کشور می‌باشد که دارای اقلیم‌های متنوع است به‌طوری‌که در این استان به‌طور هم‌زمان و در یک فصل از سال سه نوع اقلیم نیمه‌خشک، نیمه‌مرطوب و مدیترانه‌ای را می‌توان مشاهده کرد. مناطق مورد مطالعه در این پژوهش شامل طرح‌های جنگلداری شמושک، طرح چهل‌چای و طرح جنگلداری عرب‌داغ در سه شرایط اقلیمی متفاوت از هم قرار دارند و بر این اساس می‌توان نتایج پژوهش در این مناطق را به کل جنگل‌های استان گلستان که غالباً در این سه اقلیم واقع شده‌اند تعمیم داد (شکل ۱).

دارند، به‌راحتی قابل‌مشاهده است (۱۰). یکی از چالش‌های استفاده از سیستم حمل‌ونقل جاده‌ای تأثیرات ارتعاشات ناشی از حرکت کامیون‌های حامل بار و یا سایر وسایل نقلیه در هنگام عبور از ناهمواری‌های سطح جاده‌های جنگلی بر روی ساختمان جاده و دامنه‌های شیب‌دار مجاور آن‌ها است (۱۱). این ارتعاشات در مقادیر بالا می‌تواند باعث بروز آسیب به ساختمان جاده و بروز حرکت‌های توده‌ای خاک گردد (۱۲). برخورد وسایل نقلیه سنگین با ناهمواری‌ها در سطح جاده باعث ایجاد بارهای دینامیکی می‌شوند که از طریق خاک‌های اطراف به دامنه‌های اطراف و ترانشه‌های جاده منتقل شده و باعث لرزش در آن‌ها می‌شود (۱۳). عکس‌العمل ساختمان جاده‌های جنگلی در مقابل زمین‌لغزش و خزش متأثر از مشخصات فنی راه، مقاومت مصالح، یکپارچگی اجزای راه و نحوه اتصال آن‌ها می‌باشد (۱۳). ارزیابی وضعیت موجود ساختمان جاده‌های جنگلی یکی از گام‌های مهم و اساسی در راستای مرمت و مقاوم‌سازی آن‌ها است. ساختمان جاده‌های جنگلی به‌واسطه برش دامنه هنگام عملیات خاکی، ارتعاش حاصل از تردد ماشین‌آلات سنگین، زهکشی و اختلال در چرخه هیدرولوژی می‌تواند یکی از محرک‌های ناپایداری دامنه‌های مشرف به جاده باشد (۱۴). نقشه‌برداری دقیق حساسیت خزش و زمین‌لغزش و روش‌های ارزیابی خطر آن‌ها برای کاهش آسیب احتمالی آن، توجه تحقیقاتی قابل‌توجهی را به خود جلب کرده است. با این حال، پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش با وجود تلاش‌های تحقیقاتی پایدار هم‌چنان دشوار است، زیرا تحت‌تأثیر فعل‌وانفعالات پیچیده بین عوامل بسیاری از جمله عوامل طبیعی مانند زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، آب‌وهوا، زلزله‌ها و پوشش گیاهی و عوامل فنی مانند وضعیت ترانشه‌های جاده و ترافیک قرار دارد. عوامل اصلی مؤثر بر وقوع خزش و زمین‌لغزش و روابط بین آن‌ها بدون در نظر



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه.

Figure 1. Geographical position of study areas.

جدول ۱- خلاصه مشخصات سه منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Summary of characteristics of the three study areas.

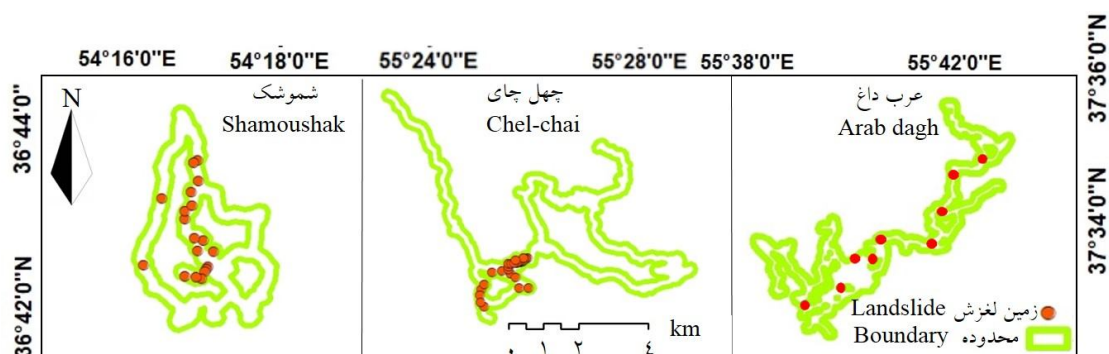
چهل چای Chel-Chai	عرب داغ Arab dagh	شموشک Shamoushak	مشخصات Characteristics
29°55'44" to 55°23'26"	37°55'04" to 55°47'07"	11°55'36" to 54°21'50"	طول جغرافیایی Longitude
13°37'56" to 37°04'17"	32°37'01" to 37°36'05"	36°46'15" to 40°36'53"	عرض جغرافیایی Latitude
3525	2240	9450	وسعت (هکتار) Area (ha)
180-1600	200-1000	150-2200	محدوده ارتفاعی (متر) Elevation (m)
نیمه مرطوب Semi-humid	نیمه خشک Semi-dry	مدیترانه‌ای گرم و مرطوب A hot and humid Mediterranean	نوع اقلیم (دومارتن) Climate
قهوه‌ای جنگلی با افق آرژلیک	رسوبی لسی	آهکی و لس و شبه لسی	نوع خاک Soil
رسوبی البرز خاوری و کپه داغ باختری	سنگ آهک خاکستری روشن و الیتی و بایوکلاستیک	سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای رخساره آمفیبولیت و نهشته‌های ماسه‌ای بادی سفت‌نشده	زمین‌شناسی Geology
437	536	480	میانگین بارندگی سالانه (mm) Rainfall (mm)
17.2	16.9	14.9	میانگین حرارت سالیانه (°C) Temperature (°C)
76	68	84	تاج پوشش حاشیه جاده (درصد) Canopy cover at road edge (%)
50	128	45.7	طول جاده (کیلومتر) Road length (km)
1996	1989	1996	سال ساخت جاده Date of road construction

روش تحقیق

شناسایی عوامل مؤثر و تهیه نقشه مناطق خطر وقوع انواع حرکت‌های توده‌ای کنارجاده‌ای: در این پژوهش ۵ قطعه ۴ کیلومتری از جاده‌های جنگلی درجه دو هر منطقه به صورت تصادفی سیستماتیک مورد پیمایش (در کل ۲۰ کیلومتر در هر منطقه) قرار گرفت. سپس طول و عرض جغرافیایی تمامی خزش‌ها و لغزش‌ها و مساحت آن‌ها توسط DGPS او از طریق پیمایش پیرامون ناحیه لغزشی یا خزش یافته ثبت و اندازه‌گیری شد. DGPS مورد استفاده محصول شرکت Raymand و دارای قدرت تفکیک مکانی مسطحاتی ۸ میلی‌متر بود. از آنجایی که این ناپایداری‌ها باید از تعداد کافی برخوردار باشند تا محرک وقوع آن‌ها در مناطق متنوع شناسایی شود، خزش‌ها (شکل ۲) و زمین‌لغزش‌های (شکل ۳) سنوات گذشته نیز ثبت شد (در مجموع ۶۹ مورد). برداشت‌های طرفین جاده تا حداکثر فاصله‌ای که حرکت‌های توده‌ای متأثر از جاده یافت می‌شود انجام شد (۱۵). این فاصله برای هر سه منطقه مورد مطالعه ۲۰۰ متر بود. شیب دامنه (۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰، ۴۰-۵۰، ۵۰-۶۰، ۶۰-۷۰ و بزرگ‌تر از ۷۰ درصد)، شکل شیب دامنه (مسطح یا یکنواخت، مقعر و محدب)، ارتفاع از سطح دریا (کمتر از ۳۰۰، ۳۰۰-۵۰۰، ۵۰۰-۷۰۰، ۷۰۰-۹۰۰ و ۹۰۰-۱۰۰۰ متر)، جهت‌های جغرافیایی (شمال، جنوب، شرق، غرب، جنوب شرق، جنوبی غرب، شمال شرق، شمال غرب و مسطح)، سازند زمین‌شناسی (تهیه‌شده از سازمان زمین‌شناسی کشور) و شاخص خمیری (برداشت ۳۰

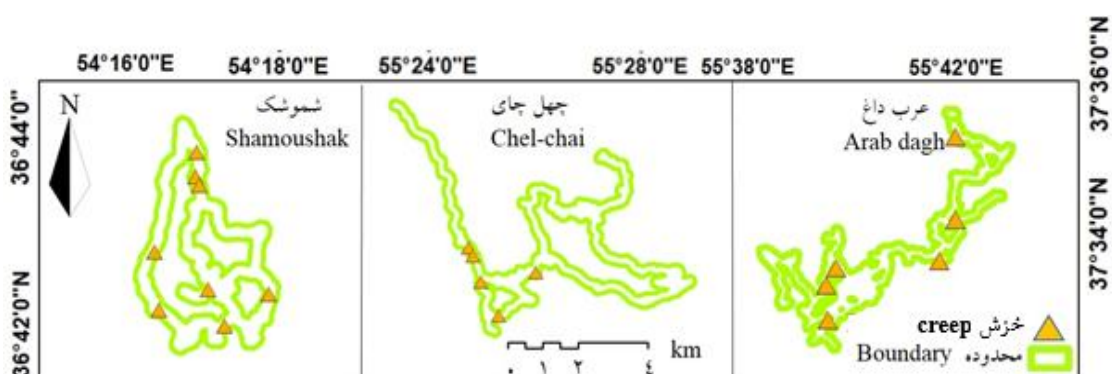
نمونه خاک از هر منطقه به شکل تصادفی ساده با توجه به بافت خاک منطقه و انجام آزمایش‌های حدود آتبرگ به روش کاساگرانده و فتیله خمیری) از جمله عوامل تأثیرگذار طبیعی مورد استفاده در پژوهش حاضر بودند. مشخصات فنی راه با اندازه‌گیری مقادیر شیب طولی جاده و شیب ترانشه‌ها با دستگاه شیب‌سنج سونتو، ابعاد جوی کناری و ارتفاع ترانشه‌ها به کمک متر تعیین شد.

در این پژوهش برای تهیه نقشه حساسیت خزش و زمین‌لغزش، علاوه بر لایه اطلاعاتی پراکنش این نوع حرکت‌های توده‌ای، از ۱۴ لایه رقومی درجه شیب دامنه، شیب ترانشه خاکبرداری، شیب ترانشه خاکریزی، ارتفاع ترانشه خاکبرداری، ارتفاع ترانشه خاکریزی، شیب طولی جاده، عرض جوی کناری، عمق جوی کناری، جهت شیب، شکل شیب، ارتفاع از سطح دریا، شاخص خمیری خاک، مقدار ترافیک و زمین‌شناسی نیز استفاده شد. مدل رقومی ارتفاع مورد استفاده در پژوهش حاضر دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر بود. طبقه‌بندی داخلی این لایه‌ها بر اساس استانداردهای نشریه ۱۳۱ و ۱۴۸ سازمان برنامه و بودجه و هم‌چنین بر اساس واقعیت‌های میدانی انجام گرفت. همه اطلاعات شامل عوامل فنی و طبیعی به‌عنوان متغیرهای مستقل در مدل جنگل تصادفی وارد شدند و سپس بر مبنای ضرایب به‌دست‌آمده از اجرای مدل مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش‌ها شناسایی شد (۱۶). نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش و خزش در پنج طبقه حساسیت (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تهیه گردید.



شکل ۲- پراکنش زمین‌لغزش‌ها در منطقه مورد مطالعه.

Figure 2. Distribution of landslides in study area.



شکل ۳- پراکنش خزش‌ها در منطقه مورد مطالعه.

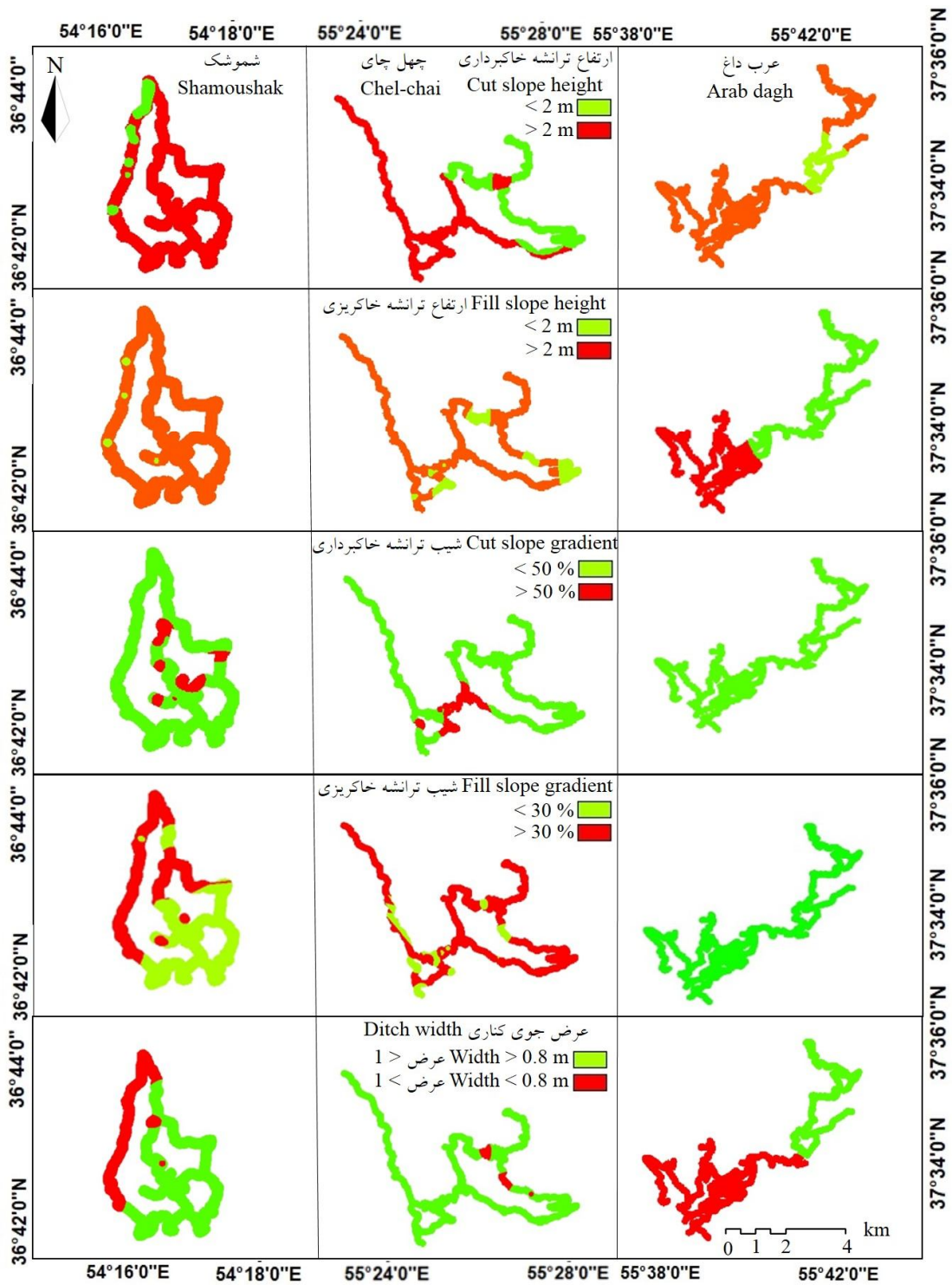
Figure 3. Distribution of creeps in study area.

زمین‌لغزش ابتدا نقشه عامل‌های مؤثر در زمین‌لغزش‌ها در قالب پرونده اکسل آماده و در نرم‌افزار R فراخوانده شد (۱۸). سپس وزن هر یک از عامل‌ها با الگوریتم جنگل تصادفی محاسبه شد. وزن‌های به‌دست‌آمده در قالب متنی آماده، در نرم و در نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰٫۸ فراخوانده شد تا نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش به‌دست‌آمده آید.

نتایج و بحث

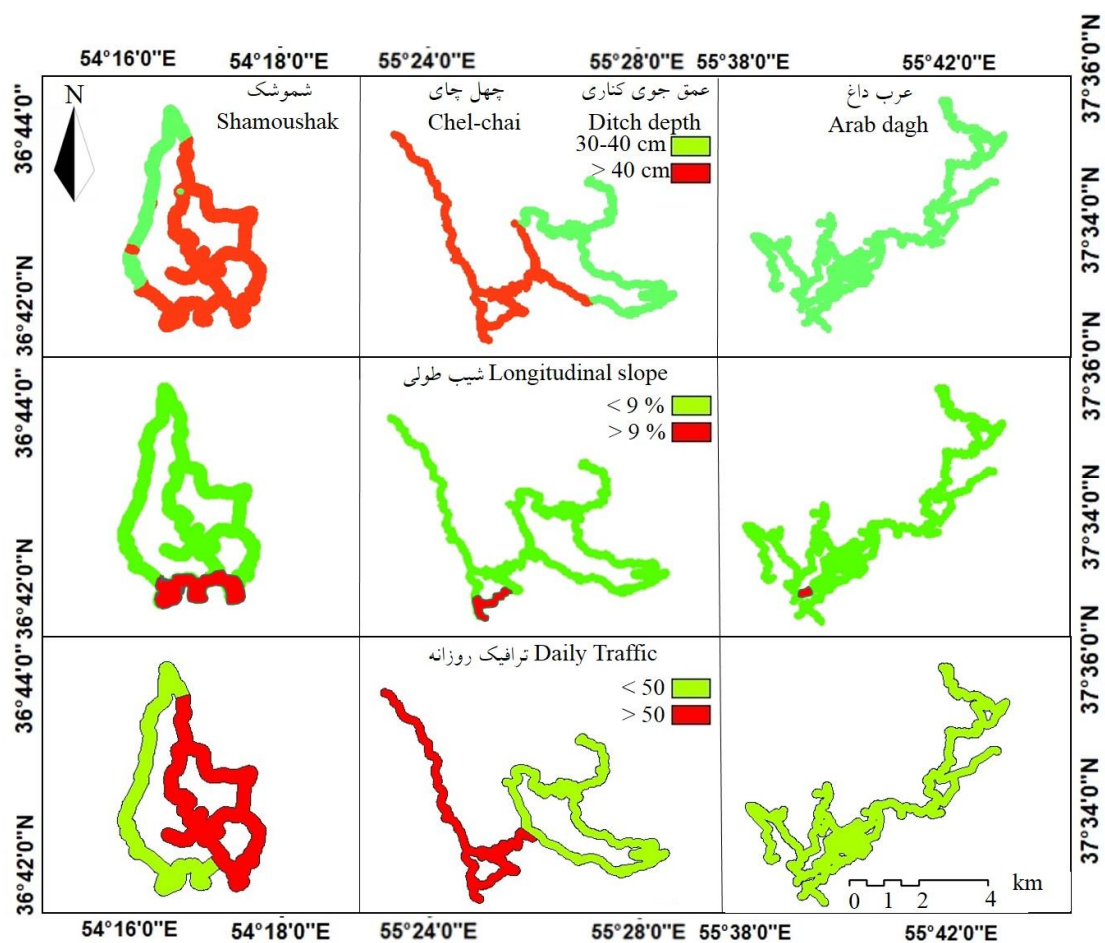
نقشه‌های عوامل تأثیرگذار فنی جاده‌های جنگلی بر وقوع زمین‌لغزش در شکل ۴ و نقشه‌های عوامل تأثیرگذار طبیعی بر وقوع زمین‌لغزش در شکل ۵ ارائه شده است.

تجزیه و تحلیل‌ها در مدل جنگل تصادفی: الگوریتم RF که یک روش یادگیری گروهی است که با ترکیب پیش‌بینی‌های درخت‌های تصمیم توسعه یافته است، برای ساخت مدل رگرسیون یا طبقه‌بندی استفاده شد. این روش مزیت‌های متعددی دارد. به‌عنوان مثال، این روش بیش‌تر در روش رگرسیون چندمتغیره یا طبقه‌بندی استفاده می‌شود. RF به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها با عملکرد عالی استفاده شده و نتایج خوبی در پیش‌بینی زمین‌لغزش و شناسایی مکان لغزش به‌دست آورده است. برای ساخت مدل پیش‌بینی RF داده‌ها برای ارزیابی دقت به دو گروه، یعنی آموزشی (۳۰ درصد) و ارزیابی (۷۰ درصد) تقسیم شدند (۱۷). برای تهیه کردن نقشه خطر



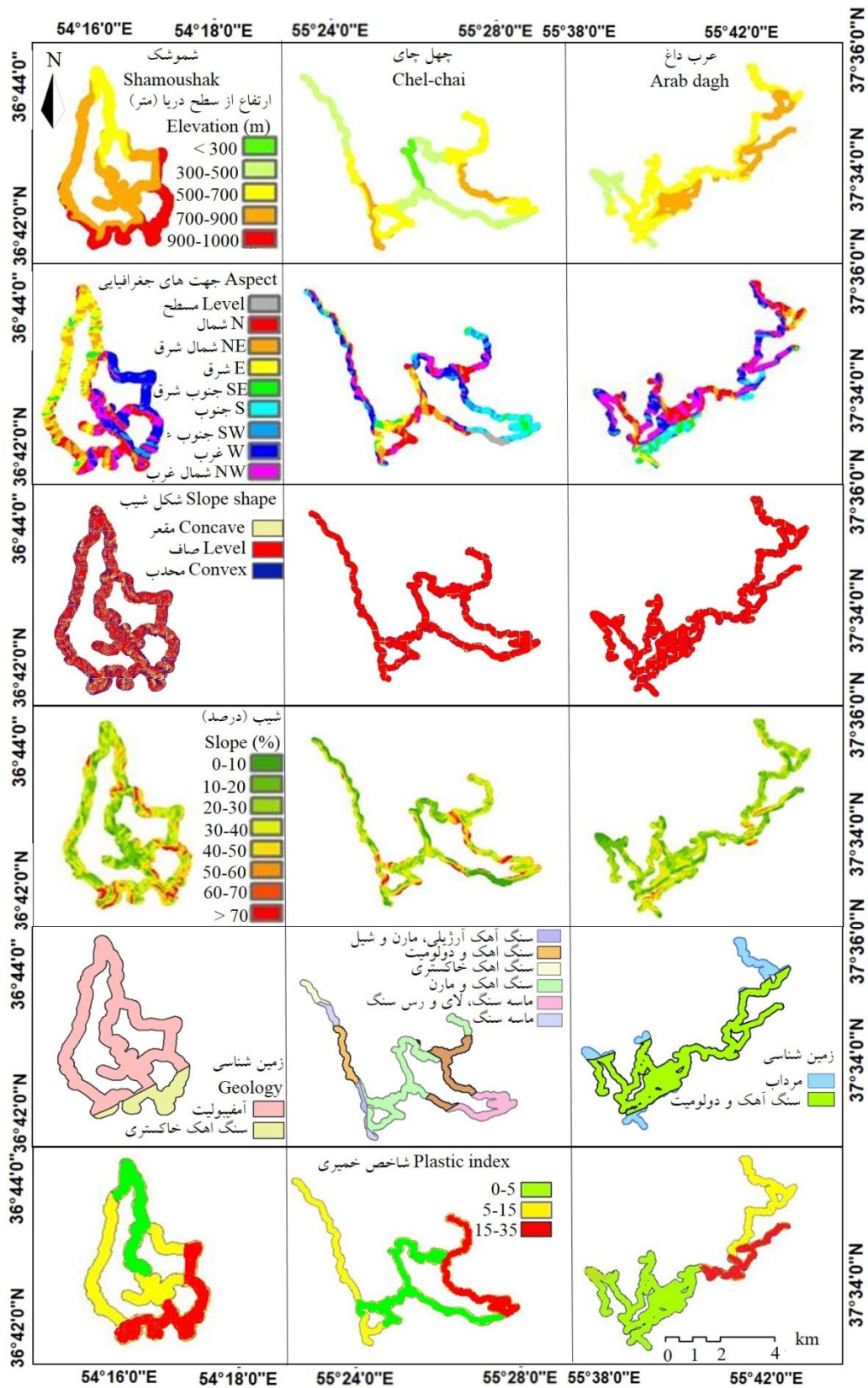
شکل ۴- نقشه عوامل تأثیرگذار فنی جاده‌های جنگلی بر وقوع خزش‌ها و زمین‌لغزش‌ها.

Figure 4. The maps of road technical effective factors on creep and landslide occurrence.



شکل ۴- ادامه نقشه عوامل تأثیرگذار فنی جاده‌ها بر وقوع خزش‌ها و زمین‌لغزش‌ها.

Figure 4. ... The maps of road technical effective factors on creep and landslide occurrence.

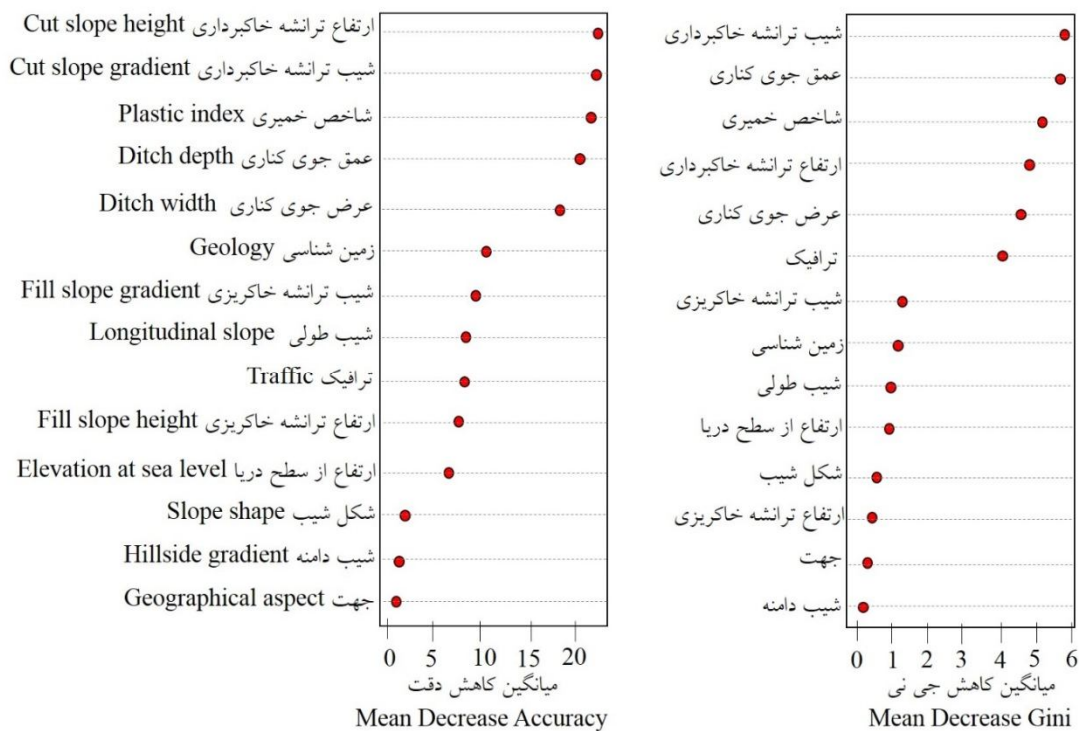


شکل ۵- نقشه عوامل تأثیرگذار طبیعی بر وقوع خزش‌ها و زمین‌لغزش‌ها.

Figure 5. The maps of natural effective factors on creep and landslide occurrence.

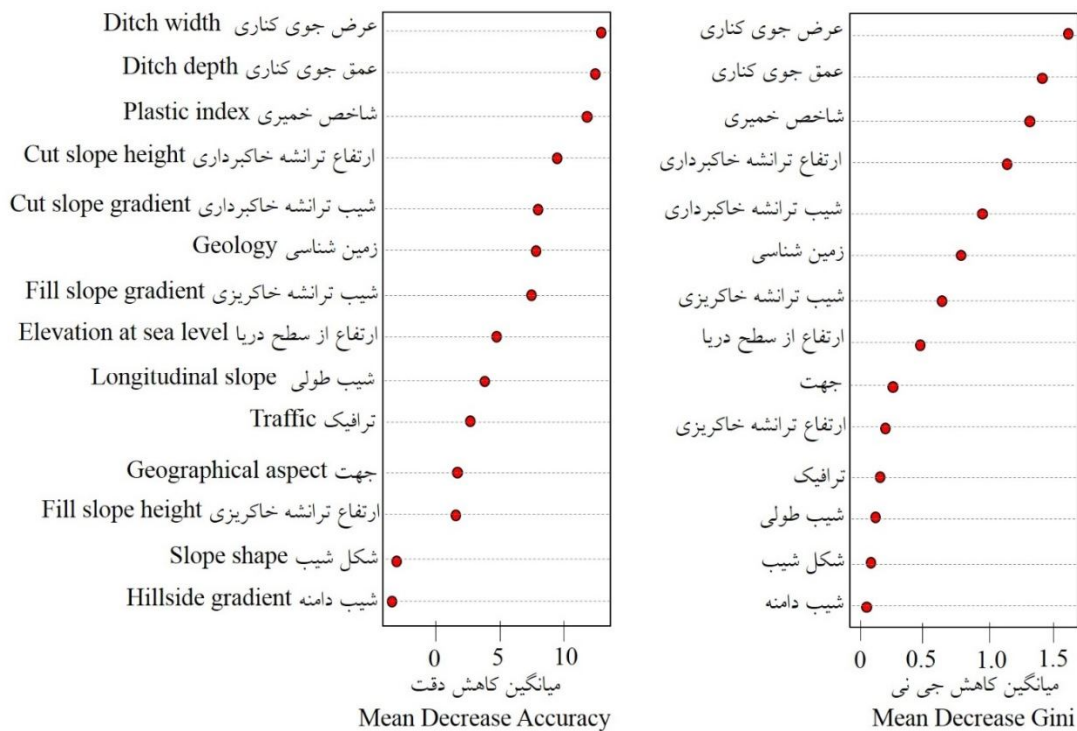
استفاده از روش آماری چندمتغیره مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش را جنس سنگ بستر، کاربری اراضی، درجه شیب، ارتفاع از سطح دریا و فاصله از جاده معرفی کرد (۱۹). کوماک (۲۰۰۶) روابط متقابل بین عوامل دخیل در زمین‌لغزش‌ها و توزیع آن‌ها را در منطقه‌ای در مرکز اسلوونی مورد آزمون قرار دادند. نتایج نشان داد که شیب، سنگ‌شناسی و نوع پوشش نقش بیش‌تری در وقوع زمین‌لغزش دارند (۲۰). عزیزی و حسینی (۲۰۱۵) با ارزیابی پتانسیل زمین‌لغزش ترانشه جاده‌های جنگلی حوزه آبخیز ۴۶ شمال ایران دریافتند که شیب طبیعی عرصه و ارتفاع بیش‌ترین تأثیر و جنس خاک و تعداد درخت تا شعاع ۱۰ متری محل اندازه‌گیری زمین‌لغزش، کم‌ترین تأثیر را در وقوع لغزش داشته‌اند (۱۴).

نتایج بررسی‌های میدانی نشان داد که در بازه زمانی ۲ سال در مناطق مورد مطالعه ۵۰ مورد زمین‌لغزش و ۱۹ مورد خزش اتفاق افتاد. بر اساس مدل جنگل تصادفی، ارتفاع و شیب ترانشه خاکبرداری به ترتیب بیش‌ترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های کنارجاده‌ای مناطق مورد مطالعه داشته‌اند (شکل ۶). عرض و عمق جوی کناری نیز به‌ترتیب بیش‌ترین تأثیر را در وقوع خزش داشتند. از میان عوامل طبیعی، شاخص خمیری خاک و وضعیت زمین‌شناسی منطقه، مؤثرترین عوامل در وقوع زمین‌لغزش‌ها و خزش‌های کنارجاده‌ای بودند (شکل ۷). استفاده از میانگین کاهش دقت در مقایسه با شاخص اهمیت میانگین کاهش جینی در تعیین اولویت عوامل مؤثر بهتر و پایدارتر است به‌ویژه در شرایطی که بین عوامل محیطی ارتباط وجود داشته باشد. گرای (۱۳۸۶) در حوزه آبخیز لاجیم رود با



شکل ۶- عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش بر اساس آنالیز RF

Figure 6. Factors Effecting on landslide occurrence based on random forest analysis.



شکل ۷- عوامل تأثیرگذار در وقوع خزش بر اساس آنالیز RF.

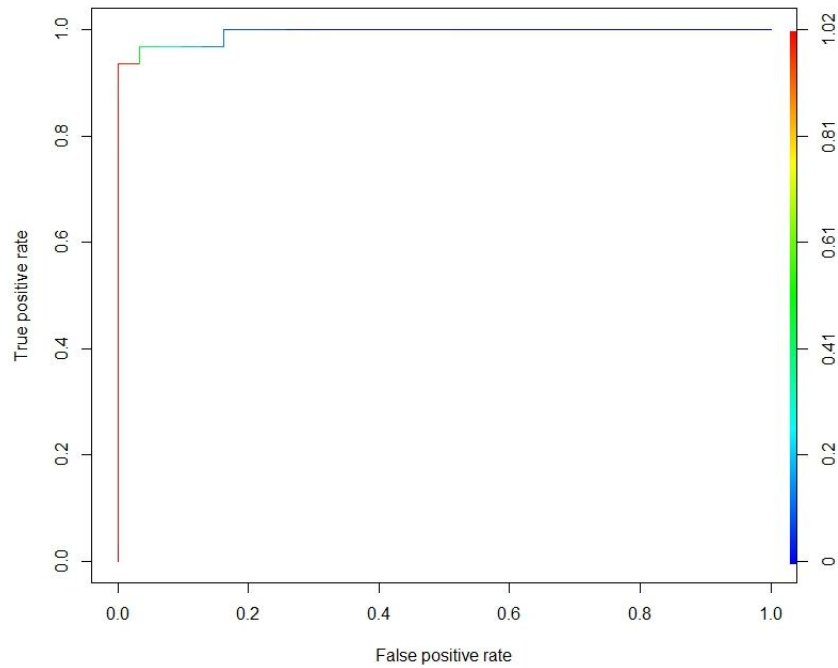
Figure 7. Factors Effecting on creep occurrence based on random forest analysis.

پیش‌بینی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در شرق چین انجام دادند. یک مجموعه داده یکپارچه متشکل از ۲۱ لایه اطلاعات جغرافیایی، از جمله سنگ‌شناسی، بارندگی، ارتفاع، شیب، فاصله تا گسل‌ها، جاده‌ها و رودخانه‌ها و ضخامت پوسته هوازگی برای دستیابی به هدف مورد استفاده قرار گرفت. لایه‌های غیردیجیتال دیجیتالی شدند و بر اساس تمایل به زمین‌لغزش وزن‌ها تعیین شدند. مکان‌های زمین‌لغزش و مناطق غیرخطر (مناطق مسطح) هر دو به صورت چندضلعی بردار شدند و به‌طور تصادفی به دو گروه برای ایجاد یک مجموعه آموزشی (۷۰ درصد) و یک مجموعه اعتبار (۳۰ درصد) تقسیم شدند. با استفاده از این مجموعه آموزشی، الگوریتم جنگل‌های تصادفی که به دلیل پیش‌بینی دقیق آن شناخته شده است، برای مدل‌سازی ریسک روی مجموعه داده‌های یکپارچه اعمال شد. نتایج بر اساس مجموعه اعتبارسنجی

نتایج منحنی ROC بیانگر دقت بالای مدل جنگل تصادفی با کاپا ۱ برای زمین‌لغزش (شکل ۸) و کاپای ۰/۹۵ برای خزش است (شکل ۹)؛ بنابراین نتایج حاصل از پهنه‌بندی با درصد بالا با واقعیت زمینی مطابقت دارد و این یافته با نتایج پژوهش‌های تالاب و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. آن‌ها به‌منظور تهیه نقشه حساسیت و طبقه‌بندی حرکت توده‌ای زمین از مدل جنگل تصادفی استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی از دقت کافی برای تولید نقشه‌های حساسیت بسیار دقیق برای یک منطقه برخوردار است (۱۷). پارک و کیم (۲۰۱۹) نیز با استفاده از مدل جنگل تصادفی و تحلیل حساسیت زمین‌لغزش در کوه ووم یئون کره جنوبی به این نتیجه رسیدند که مدل جنگل تصادفی عملکرد بهتری در تهیه نقشه حساسیت به زمین‌لغزش داشته است (۲۱). ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) مطالعه‌ای را با هدف

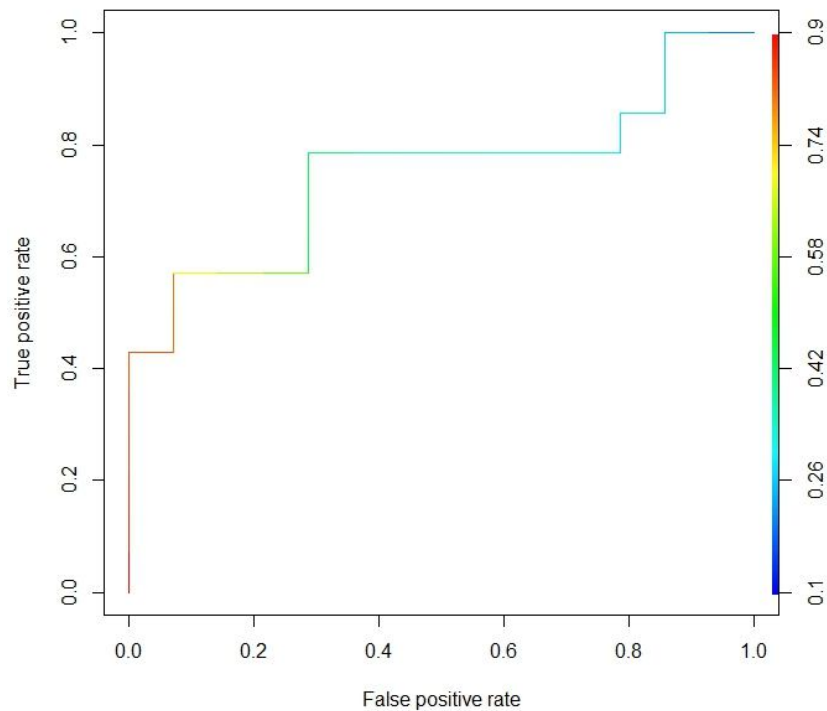
به این نتیجه رسیدند که بیش از ۹۵ درصد از مساحت کل منطقه در طبقات حساسیت بسیار کم و کم زمین‌لغزش واقع شده است، با توجه به تجزیه و تحلیل از ۳۸۰/۸ کیلومتر جاده موجود در منطقه ۱/۳ کیلومتر از جاده‌های جنگلی در داخل حساسیت بسیار بالا بوده است (۲۴). در بررسی عوامل طبیعی، شاخص خمیری مؤثرترین عامل در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد که همان‌گونه که ملاحظه می‌شود جاده پرخطر (به لحاظ استعداد لغزش) عرب داغ از منطقه با خمیرایی بالا می‌گذرد. در برخی از شاخه‌های شبکه جاده موجود در جنگل‌های عرب‌داغ، شמושک و چهل‌چای علی‌رغم مساعد بودن شیب ترانشه‌ها خطر وقوع لغزش و خزش بالا بود؛ زیرا تأثیر عوامل دیگر چون ارتفاع ترانشه، خمیرایی خاک و نوع سازند مانع از بروز اثر شیب شده باشد. ضمن آن‌که شیب ترانشه‌ها اساساً تفاوت چندانی با هم نداشتند و علی‌رغم این‌که به دو کلاسه بالای ۵۰ درصد و زیر ۵۰ درصد تقسیم شده بودند، تفاوت بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار شیب بیش‌تر از ۲۰ درصد نبود. در جنگل‌های عرب‌داغ و شמושک که تنها دو نوع سازند زمین‌شناسی وجود داشت، در منطقه با سنگ آهک خاکستری هیچ زمین‌لغزشی به ثبت نرسید هرچند که سایر عوامل طبیعی و فنی، این منطقه را به منطقه پرخطر تبدیل کردند. در منطقه چهل‌چای ۱۴ عامل طبیعی و فنی موجود در منطقه نتوانستند سبب ایجاد و کثرت خزش شوند و جاده‌های واقع در چهل‌چای به دلیل داشتن عرض و عمق جوی کناری استاندارد و در نتیجه زهکشی بهتر بردباری و پایداری بیش‌تری نسبت به این نوع حرکت توده‌ای از خود نشان دادند.

ارزیابی شد. دقت کلی ۹۱/۲۳ درصد و ضریب کاپا ۰/۸۲ به دست آمد. احتمال محاسبه شده برای هر پیکسل در نتیجه در مناطق مختلف برای نقشه‌برداری ریسک درجه‌بندی شد. از این‌رو، نتیجه می‌گیریم که پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم RF می‌تواند به‌عنوان یک مرجع مناسب برای دولت محلی در پیشگیری از بلایا و اقدامات هشدار اولیه عمل کند (۱۸). در مقابل شیرانی و عرب امری (۲۰۱۵) پژوهشی با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در حوزه دزعلیا با استفاده از روش رگرسیون لجستیک انجام دادند. نتایج نشان داد که طبقات ارتفاعی مهم‌ترین عامل در وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. مقدار شاخص ROC نیز برابر ۰/۹۱۷ به دست آمده است که دقت بالایی را نشان می‌دهد. در ارزیابی به روش منحنی راک هر چه سطح زیر منحنی بیش‌تر باشد دقت مدل بیش‌تر است که میزان آن بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است (۲۲). به‌طور کلی تقسیم‌بندی ۱-۰/۹ عالی، ۰/۶-۰/۹ خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸ خوب، ۰/۶-۰/۷ متوسط و ۰/۵-۰/۶ ضعیف می‌باشد که میزان منحنی ROC در مدل جنگل تصادفی پژوهش حاضر بیش از ۰/۹ می‌باشد که نشان‌دهنده میزان عملکرد بالای طبقه‌بندی است (۲۳). با توجه به نقشه‌های خطر زمین‌لغزش (شکل ۱۰) و خزش (شکل ۱۱)، ۳۱ درصد از سطح مناطق مورد مطالعه به شدت مستعد زمین‌لغزش (شکل ۱۲) و ۵۱ درصد به شدت مستعد خزش می‌باشد (شکل ۱۳). ایگر و آیدین (۲۰۱۶) با ارزیابی زمین‌لغزش‌های کنار جاده‌ای در مناطق جنگلی گالیکا و کاردوز ترکیه با استفاده از رگرسیون لجستیک



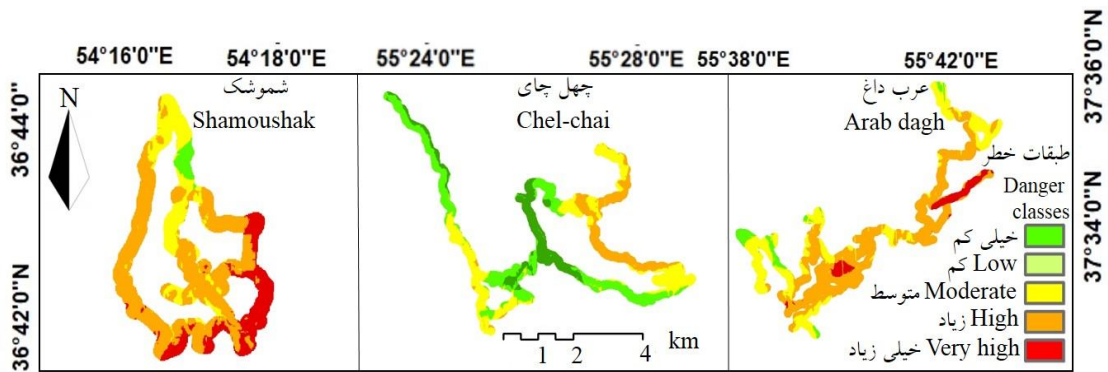
شکل ۸- منحنی ROC عملکرد طبقه‌بندی زمین‌لغزش در مدل جنگل تصادفی.

Figure 8. ROC curve of landslide classification performance in random forest model.

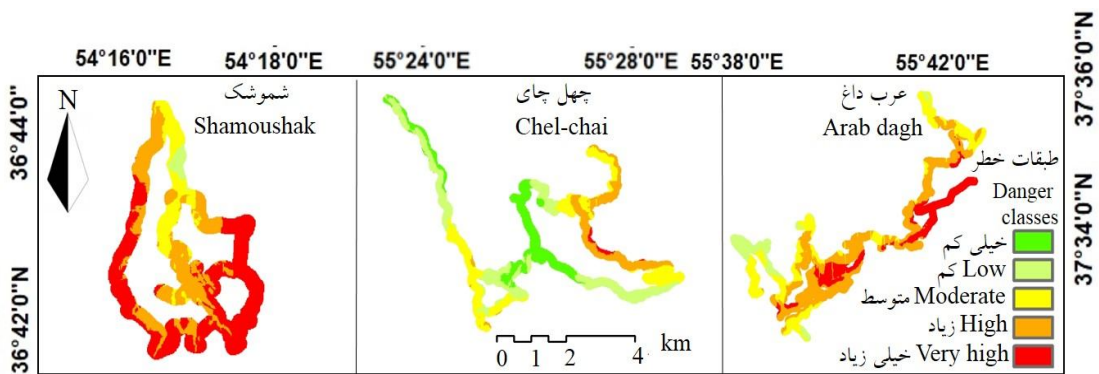


شکل ۹- منحنی ROC عملکرد طبقه‌بندی خزش در مدل جنگل تصادفی.

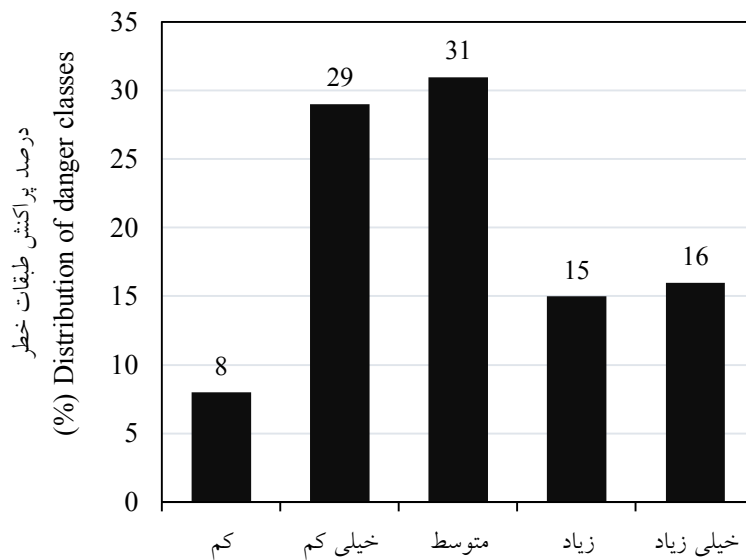
Figure 9. ROC curve of creep classification performance in random forest model.



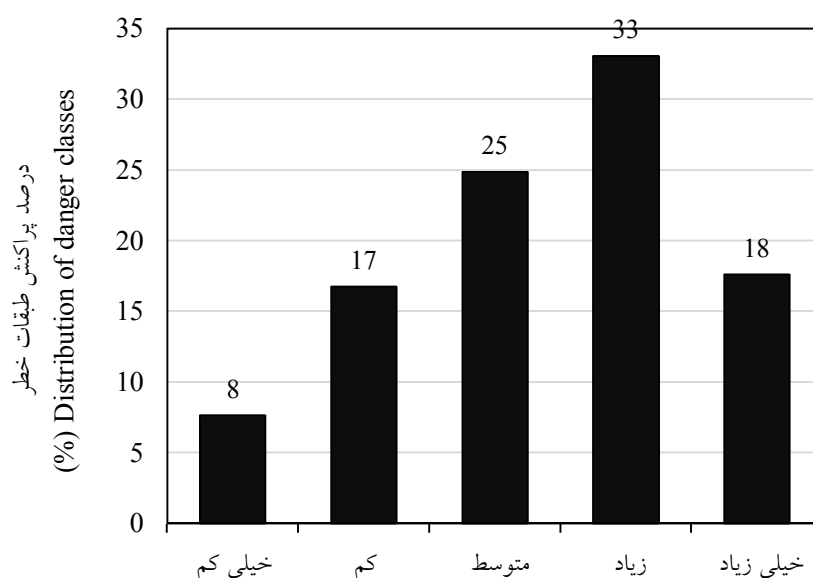
شکل ۱۰- نقشه حساسیت زمین‌لغزش در مناطق مورد مطالعه.
 Figure 10. Landslide sensitivity map for study area.



شکل ۱۱- نقشه حساسیت خزش در مناطق مورد مطالعه.
 Figure 11. Creep sensitivity map for study area.



شکل ۱۲- درصد پراکنش طبقات خطر زمین‌لغزش.
 Figure 12. Distribution of danger classes for landslide.



شکل ۱۳- درصد پراکنش طبقات خطر خزش.

Figure 13. Distribution of danger classes for creep.

و خاکریزی‌های زیاد و در نتیجه ایجاد ترانشه‌های مرتفع و پرشیب نباشد. در نهایت پیشنهاد می‌گردد از روش آماری جنگل تصادفی برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش و خزش استفاده گردد، گرچه کنترل لغزش‌ها در حال وقوع اغلب امکان‌پذیر نبوده و یا در صورت امکان بسیار پرهزینه است، ولی می‌توان با در نظر گرفتن عوامل طبیعی مؤثر بر خزش‌ها شامل مشخصات زمین‌شناسی و میزان خمیرایی خاک جهت جلوگیری از عبور جاده از مناطق نامناسب اقدام نمود. همچنین با ایجاد سازه‌های زهکشی مناسب و حفاظت جوی کناری می‌توان از حرکت توده‌ای خاک به شکل خزش پیش‌گیری نمود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی نقش تنوع سازندها و شیب دامنه در وقوع انواع حرکت‌های توده‌ای مورد بررسی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری کلی

این مطالعه نشان داد که ابعاد غیراستاندارد جوی کناری که در اثر انباشتگی رسوب و یا فرسایش خندقی ایجاد می‌شود، می‌تواند محرک اصلی خزش خاک باشد. همچنین طراحی و ساخت جاده در اراضی پرشیب منجر به ایجاد ترانشه‌های مرتفع و پرشیب می‌شود که این موضوع غالباً با پیامدهای ناپایداری و زمین‌لغزش همراه است. این موارد ضرورت طراحی اصولی مسیر هادی و برنامه‌ریزی جامع و دقیق برای اجرای عملیات زهکشی و حفاظت و نگهداشت ترانشه‌های جاده‌های جنگلی را نشان می‌دهد. در اراضی پرشیب لازم است مسیر هادی از اراضی با خاک پایدار و با خمیرایی کم‌تر عبور نماید و به لحاظ موقعیت ارتفاعی پایین‌تر از مسیر قطعی ولی نزدیک به آن طراحی شود تا نیازی به خاکبرداری

منابع

1. Evans, S. G., Roberts, N. J., Ischuk, A., Delaney, K. B., Morozova, G. S., & Tutubalina, O. (2009). Landslides triggered by the Khait earthquake, Tajikistan, and associated loss of life. *Engineering Geology*, 109, 195-212.
2. Parsakhoo, A., Rostaghi, A. A., Moghadasi, D., Ghezelsefloo, M., & Rezaee Motlagh, A. (2024). Impact of forestry project suspensions on forest road network conditions in the North of Iran (case study: Golestan Province). *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 31 (1), 23-41.
3. Li, M., Wang, H., Chen, J., & Zheng, K. (2024). Assessing landslide susceptibility based on the random forest model and multi-source heterogeneous data. *Ecological Indicators*. 158, 111-120.
4. Kaczmarek, L., & Dobak P. (2017). Contemporary overview of soil creep phenomenon. *Contemporary Trends in Geoscience*. 6 (1), 28-40.
5. Sonoda, M., & Kurashige, Y. (2017). Characteristics of surface soil creep on a forest slope in Japan. *Geomorphology*. 288, 1-11.
6. Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40 (10), 927-930.
7. Van der Geest, K. (2018). Landslide loss and damage in sindhupalchok district, Nepal: Comparing income groups with implications for compensation and relief. *International J. of Disaster Risk Science*. 58, 1-10.
8. Zumpano, V., Pisano, L., Malek, Ž., Micu, M., Aucelli, P. P., Roskopf, C. M., Belteanu, D., & Parise, M. (2018). Economic losses for rural land value due to landslides. *Frontiers in Earth Science*. 6, 85-97.
9. Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*. 65, 10-20.
10. Nefeslioglu, H. A., Gokceoglu, C., & Sonmez, H. (2008). An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology*. 97, 171-191.
11. Le, T. M., Fatahi, B., Disfani, M., & Khabbaz, H. (2015). Analyzing consolidation data to obtain elastic viscoplastic parameters of clay. *Geomechanics and Engineering*. 8 (4), 559-594.
12. Klarstagh, A., Habib Nejad, M., & Ahmadi, H. (2016). A study of the occurrence of landslides in connection with land use change and Sari road. *Geographical Researches*. 62, 81-91.
13. Moon, S. W., Noh, J., Kim, H. S., Kang, S. S., & Seo, Y. S. (2024). Comparison of factors influencing landslide risk near a forest road in Chungju-si, South Korea. *Geoenvironmental Disasters*. 11 (3), 1-17.
14. Azizi, Z., & Hosseini, A. (2015). Evaluation of slope failure potential in forest roads (Case study: 46th watershed, North of Iran). *Iranian J. of Forest and Poplar Research*. 23 (3), 573-582.
15. Jadda, M., Shafri, H. Z. M., Mansor, S. B., Sharifikia, M., & Pirasteh, S. (2009). Landslide susceptibility evaluation and factor effect Iran. *Natural Hazard*. 63 (2), 965-996.
16. Iswar, D., Sashikant, S., Cees, V. W., Alfred, S., & Robert, H. (2010). Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas, India. *Geomorphology*. 114, 627-637.
17. Taalab, Kh., Cheng, T., & Zhang, Y. (2018). Mapping landslide susceptibility and types using random forest. *Big Earth Data*. 2 (2), 159-178.
18. Zhang, Y., Wu, W., Qin, Y., Lin, Z., Zhang, G., Chen, R., Song, Y., Lang, T., Zhou, X., Huangfu, W., Ou, P., Xie, L., Huang, X., Peng, S., & Shao, C. (2020). Mapping landslide hazard risk using random forest algorithm in Guixi, Jiangxi, China. *ISPRS International J. of Geo-Information*. 9 (11), 695-702.

19. Garaee, P. (2016). Investigating mass movements in order to present a logical risk zoning model in the Lajim Road watershed, master's thesis, Mazandaran University.
20. Komak, M. (2006). A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in peri Alpine Slovenia. *Geomorphology*. 74, 17-28.
21. Park, S., & kim, J. (2019). Landslide susceptibility mapping based on random forest and boosted regression tree models, and a comparison of their performance. *Applied Sciences*. 9 (5), 942-948.
22. Shirani, K., & Arabameri, A. R. (2015). Landslide Hazard Zonation Using logistic regression method (Case study: Dez-e-Oulia Basin). *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science*, Isf. Univ. Technol. Isf. Iran. 72, 321-334.
23. Bugday, E., & Akay, E. (2023). Determination of the forest road alignment in landslide-prone areas based on landslide susceptibility map generated by machine learning approaches. *Forest Operations: A Tool for Forest Management* Flagstaff, Arizona, May 23-25, USA, 15p.
24. Eker, R., & Aydın, A. (2016). Landslide susceptibility assessment of forest roads. *European J. of Forest Engineering*. 2 (2), 54-60.