

ارزیابی حساسیت پذیری وقوع زمین لغزش و همبستگی آن با شبکه جاده‌های جنگلی (مطالعه موردی: شهرستان رامسر)

نیما شفیع کیگاسری^۱، سید عطا اله حسینی^۲ و حمید رضا پورقاسمی^۳

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی جنگل، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل دانشگاه تهران
۲- استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل دانشگاه تهران، (نویسنده مسوول: at.hosseini@ut.ac.ir)
۳- استاد بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۱۸
صفحه: ۴

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: زمین لغزش‌ها از جمله مخاطرات محیطی است که هرساله موجب خسارات زیاد جانی و مالی در قسمت‌های وسیعی از نواحی کوهستانی کشورمان می‌شود، از این رو شناسایی عوامل مهم و موثر بر وقوع این پدیده، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی در کاهش زیان احتمالی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین شناخت عوامل محیطی تأثیرگذار در شکل‌گیری وقوع زمین‌لغزش در شبکه‌های ارتباطی جنگلی از اهمیت زیادی برخوردار است. شهرستان رامسر به دلیل توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، و فعالیت زمین‌ساختی زیاد، پتانسیل طبیعی برای زمین‌لغزش‌های گسترده در حریم شبکه‌های ارتباطی را دارد. هدف از این پژوهش، پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری وقوع زمین‌لغزش در محدوده شهرستان رامسر با در نظر گرفتن عوامل موثر به‌خصوص شبکه جاده‌های جنگلی و استفاده از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌باشد.

مواد و روش‌ها: بدین منظور در ابتدا موقعیت زمین‌لغزش‌ها با استفاده از مطالعات میدانی، گزارش‌های تاریخی و تصاویر گوگل ارث مشخص شد. در مجموع ۹۵ زمین‌لغزش در منطقه شناسایی، که به دو گروه برای مدل‌سازی (۷۰ درصد) و ارزیابی (۳۰ درصد) تقسیم شد. جهت تحلیل مکانی حساسیت‌پذیری وقوع زمین‌لغزش معیارهایی از قبیل: شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، فاصله از مراکز سکونت، انحنای زمین، بارش، دما، فرسایش، ارتفاع، تراکم پوشش گیاهی، واحدهای سنگ‌شناسی، بافت خاک، تراکم آبراهه، فاصله از جاده، و شاخص رطوبت توپوگرافی مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور محاسبه تراکم و میزان سبزی پوشش گیاهی از پروداکت ۱۶ روزه ماهواره لندست ۸ در محیط سامانه گوگل ارث انجین استفاده گردید و خروجی نهایی با روش‌های رگرسیون وزنی در GIS محاسبه شد. تمامی فرآیندها و تجزیه تحلیل داده‌ها در محیط Excel و نرم‌افزار ArcMap انجام شد. همچنین به منظور ارزیابی و اعتبار سنجی مدل‌ها از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد.

یافته‌ها: مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در حساسیت‌پذیری زمین لغزش شامل نوع خاک، شیب زمین، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی، جریان‌های هیدروژئولوژیکی، توپوگرافی، میزان بارندگی و خطوط ارتباطی هستند. پهنه‌های با حساسیت‌پذیری وقوع زمین‌لغزش و تراکم زمین‌لغزش‌ها در مناطقی نمایان شده است که عمدتاً مناطق حاشیه محورهای مواصلاتی را شامل می‌شود. به دلیل احداث گسترده ساختمان‌ها و تأثیرات جانبی جاده‌سازی، و همچنین به دلیل تخریب شیب طبیعی زمین برای ایجاد جاده و گسترش آن، در این مناطق به وقوع پیوسته است. تطبیق پارامترهای مؤثر بر وقوع زمین لغزش با لایه پراکنش زمین-لغزش‌ها نشان داد حدود ۷۶ درصد از زمین‌لغزش‌ها در محدوده شیب ۱۱ - ۳۸ درجه رخ داده‌اند. فرسایش دامنه‌ها به‌وسیله جریان‌های پرسرعت سیلابی، باعث بروز بیش از ۶۳ درصد از زمین‌لغزش‌ها تا فاصله ۵۰۰ متری از آبراهه‌ها شده است. در کنار سه عامل اصلی نوع خاک، شیب طبیعی زمین، فرسایش دامنه‌ها وقوع خطر زمین‌لغزش، بازسازی و توسعه جاده بدون در نظر گرفتن اصول پایداری شیب باعث از بین رفتن تکیه‌گاه در شیب‌های تند شده و در صورت مساعد بودن سایر شرایط، بروز زمین لغزش را سبب شده است. بیش از نیمی از زمین‌لغزش رخ داده در منطقه در تناوبی از سنگ، شیل، ماسه سنگ، سنگ جوش، همراه با لایه‌هایی از زغال رخ داده‌اند. قطع لایه زمین لغزش رخ داده با طبقات فاصله از جاده نشان داده رخ داد زمین‌لغزش تا فاصله ۴۰۰ متری از جاده به دلیل تأثیر مستقیم عملیات راهسازی و ترانشه‌زنی در به هم زدن تعادل دامنه‌های مشرف به جاده بوده است، به گونه‌ای که با دور شدن از جاده اصلی مساحت زمین لغزش‌ها به تدریج کم‌تر می‌شود. نتایج نشان داد مدل نسبت فراوانی (Frequency ratio models) با سطح زیر منحنی ۰/۷۶۰ دقت قابل قبولی برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش ارائه کرده است. نتایج به‌دست آمده نقشه نهایی حساسیت‌پذیری وقوع زمین لغزش نشان‌دهنده آن است که طبقه ۵ با ضریب حساسیت‌پذیری خیلی زیاد ۱۳/۰۶ درصد از کل مساحت منطقه، طبقه ۴ با ضریب حساسیت‌پذیری زیاد ۱۶/۳۵ درصد، طبقه ۳ با ضریب حساسیت‌پذیری متوسط ۲۲/۳۲ درصد، طبقه ۲ با ضریب حساسیت‌پذیری کم ۲۷/۴۶ درصد، طبقه ۱ با ضریب حساسیت‌پذیری خیلی کم ۲۰/۷۹ درصد را به خود اختصاص داده‌اند در نتیجه ۳۱/۷۹ درصد از کل منطقه در معرض لغزش شدید قرار دارد. با توجه به نقشه نهایی و ارتباط نزدیک بین حضور جاده و وقوع زمین لغزش میتوان بیان داشت که جاده‌های شمال غربی و شرقی شهرستان رامسر بیش‌تر در معرض وقوع زمین لغزش هستند.

نتیجه‌گیری: به نظر می‌رسد حذف پوشش گیاهی، تغییر مسیر آبراهه، تغییر شیب طبیعی زمین، برداشت خاک‌ها و سنگها برای ساخت جاده در منطقه باعث بروز زمین زلغزش‌ها در اطراف جاده‌های جنگلی شده است. محدوده‌های حاشیه محورهای مواصلاتی افتراق زیادی بین ضرایب حساسیت‌پذیری نشان داده‌اند، که این امر نشان‌دهنده اهمیت بالقوه وقوع زمین‌لغزش در این مناطق است. می‌توان نتیجه گرفت که ارائه توصیه‌ها و راهکارهای مناسب برای کاهش ریسک‌های زمین‌لغزش‌ها، بهبود مدیریت مناطق و اجرای استراتژی‌های پیشگیرانه در این منطقه بسیار ضروری است. این تحقیق نشان می‌دهد که با انجام تحلیل‌های دقیق و انطباق با وضعیت محیطی، می‌توان تدابیر مؤثری را به منظور کاهش آثار زمین‌لغزش‌ها و افزایش پایداری مناطق اجرایی کرد. از این‌رو، ترکیبی از تحلیل‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، توپوگرافی و اطلاعات جغرافیایی می‌تواند به عنوان یک ابزار موثر برای مطالعه، پیش‌بینی و مدیریت ریسک زمین‌لغزش‌ها در مناطق کوهستانی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، جاده، لغزش، روش‌های آماری، مدل‌سازی

مقدمه

زمین لغزش یکی از پدیده‌های مخرب منابع طبیعی بوده و پایداری جاده‌های جنگلی را تهدید می‌کند (Jarjani et al., 2019). جنگل‌ها به دلیل تأثیرات مثبتی که در تولید و حفاظت از آب و خاک، حفظ تنوع زیستی، تصفیه هوا و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های طبیعی شناخته می‌شوند (Nasiri et al., 2019; Aznar-Sánchez et al., 2023). یکی از عوامل مهم تهدیدکننده جنگل‌ها و خدمات اکوسیستمی آن‌ها، مخاطرات محیط زیستی یا مخاطرات طبیعی است (Yaghoubzadeh et al., 2021). زمین لغزش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی، همواره توجه محققین و سیاست‌گذاران را به خود جلب کرده است (Nasiri et al., 2022). زمین لغزش یکی از پدیده‌های مورفودینامیکی است که بیش‌تر در مناطق کوهستانی تحت تأثیر عوامل مختلف ایجاد می‌شود و با حرکت توده‌ای سطح زمین در اشکال مختلف همراه است (Kouhpeima and Feiznia, 2019). همچنین، با تغییرات شدید در سطح زمین و حرکت خاک، حاصل‌خیزی کاهش می‌یابد و استقرار مجدد جنگل با چالش‌های جدی روبرو می‌شود (Chalise et al., 2020; Huang et al., 2019). پیامدهای دیگر زمین لغزش شامل وقوع سیلاب و آلودگی آب است که به درختان و حیات وحش جنگل آسیب می‌رساند (Fazeli Shahrodi and Hosseini, 2012).

در جنگل‌های هیرکانی شمال، زمین لغزش بیش‌ترین فراوانی را در میان سایر مخاطرات محیط زیستی دارد که در اکثر مواقع جبران خسارت‌های ناشی از آن به‌صرف هزینه و زمان زیادی نیازمند است (Hayati et al., 2012). نصیری و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی با استفاده از عوامل مؤثر بر زمین لغزش شامل: شیب، جهت شیب، شبکه جاده‌ها، نوع خاک، خطوط گسل و آبراهه‌ها به همراه اطلاعات میدانی مناطق حساس به زمین لغزش را شناسایی کردند. اولویت‌بندی متغیرها بر اساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی انجام و بر اساس وزن‌های حاصل پهنه‌بندی زمین لغزش انجام شد. نتایج نشان داد که ۱۰/۸۹ و ۲/۳۷ درصد از منطقه به‌ترتیب خطر زیاد و خیلی زیاد به وقوع زمین لغزش دارد. در مطالعه دیگر، رفت نیا و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی علل وقوع پدیده زمین لغزش و پهنه‌بندی خطر وقوع آن در جنگل‌های گلندرود پرداخته و عنوان کردند که علاوه بر عوامل محیطی مانند شیب، جهت دامنه، ارتفاع از سطح دریا، شبکه آبراهه‌ها، نوع خاکشناسی، دما و بارندگی، عوامل انسانی نیز تأثیر به‌سزایی در وقوع زمین لغزش‌ها دارند. حیاتی و همکاران (۱۳۹۱) به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به منظور استفاده کاربردی در طراحی شبکه جاده جنگلی در بخش بهاربن جنگل خیرود پرداختند. در این مطالعه ب‌منظور تعیین اهمیت نسبی معیارها از روش AHP استفاده شد و با استفاده از مدل آماری دو متغیره (روش تراکم سطح) وزن طبقه‌های هر معیار محاسبه گردید. خان و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای به ارزیابی حساسیت خطر زمین لغزش با استفاده از مدل نسبت فراوانی در شمال

پاکستان پرداختند. در این مطالعه تأثیر عواملی از جمله زمین‌شناسی، شیب، جهت جغرافیایی، کاربری پوشش، مسافت از گسل و جاده و آبراهه در توزیع مکانی لغزش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج نشان داد که فاصله از جاده، شیب و زمین‌شناسی تأثیر معنی‌داری در توزیع مکانی زمین لغزش‌ها دارند. ادیتیان و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای در منطقه آمبون اندونزی به مقایسه حساسیت‌پذیری زمین لغزش با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک و شبکه عصبی مصنوعی پرداختند و هشت عامل مؤثر از جمله ارتفاع، درجه شیب، شکل شیب، نزدیکی به شبکه جریان، سنگ‌شناسی، زمین‌شناسی، نزدیکی به گسل‌ها و فاصله از جاده را مورد بررسی قرار دادند. براساس پهنه‌بندی نقشه‌های حساسیت-پذیری، منطقه به پنج طبقه بسیار کم تا بسیار بالا طبقه‌بندی شد.

دوینی و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای به تجزیه و تحلیل آماری تأثیر لغزش‌ها بر روی شبکه جاده‌ها در کشور ایتالیا پرداختند و جاده‌های دو منطقه سیسیل (جاده‌های اصلی) و مارچه (جاده‌های فرعی و کوهستانی) را از لحاظ میزان هزینه بازسازی جاده‌ها در اثر زمین لغزش مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مناطق سیسیل و مارچه به‌ترتیب متوسط هزینه مناطق لغزشی برای هر مترمربع ۴۹ و ۱۱۰ دلار برآورد و متوسط هزینه برای هر متر جاده آسیب دیده از لغزش ۱۹۵۸ و ۱۶۲۸۷ دلار می‌باشد.

بر اساس مطالعات بررسی‌شده، عوامل متعددی در احتمال وقوع زمین لغزش مؤثر هستند که می‌توانند در مناطق مختلف، تأثیرگذاری متفاوتی داشته باشند. همچنین مرور منابع نشان داد که سامانه اطلاعات مکانی بر پایه داده‌های دقیق می‌تواند ابزار مناسبی در این راستا محسوب شود. یکی از عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش به‌خصوص در جنگل‌های شمال، طراحی و ساخت غیر اصولی جاده‌های جنگلی است که همواره باعث افزایش حرکات توده‌ای خاک در این مناطق می‌شود (Hayati et al., 2012). شبکه جاده‌های جنگلی به‌عنوان یکی از ارکان مهم سازماندهی زمین در مدیریت منابع جنگلی نقش کلیدی دارند، از سوی دیگر جاده‌ها، بیش‌ترین میزان هزینه‌های اجرایی و محیط زیستی را نیز به‌دنبال دارند. جاده‌سازی بر روی خاک‌های ناپایدار جنگلی عامل افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری جاده در آینده و همچنین خسارت جبران‌ناپذیر محیط زیستی از جمله فرسایش خاک است (Khetkeh et al., 2021).

براین اساس توجه به استفاده از روش‌هایی با معیارهای کمی منطبق با شرایط جغرافیایی مناطق، برای شناسایی پهنه‌های مستعد خطر وقوع زمین لغزش در توسعه جاده‌های جنگلی شهرستان رامسر امری اجتناب‌ناپذیر قلمداد می‌شود. در این تحقیق، با بهره‌گیری از روش‌های علمی و تحلیل دقیق، نوآوری‌های زیر معرفی و بررسی شده‌اند:

۱- شناسایی و تحلیل چندین عامل مؤثر: در این تحقیق، تعدادی از عوامل مهم و مؤثر بر وقوع زمین لغزش، از جمله فاصله از رودخانه‌ها، ارتفاع، شیب، بارندگی، خصوصیات خاک‌شناسی و زمین‌شناسی، با دقت بررسی و تحلیل شده‌اند.

ابزارهای مؤثر در کاهش احتمال و خسارت‌های وقوع زمین لغزش در منطقه مورد نظر مورد استفاده قرار گیرند.

به طور کلی هدف نهایی از بررسی و مطالعه زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه، شناسایی پهنه‌های با حساسیت وقوع زمین لغزش و ارتباط این مناطق با شبکه جاده‌های جنگلی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

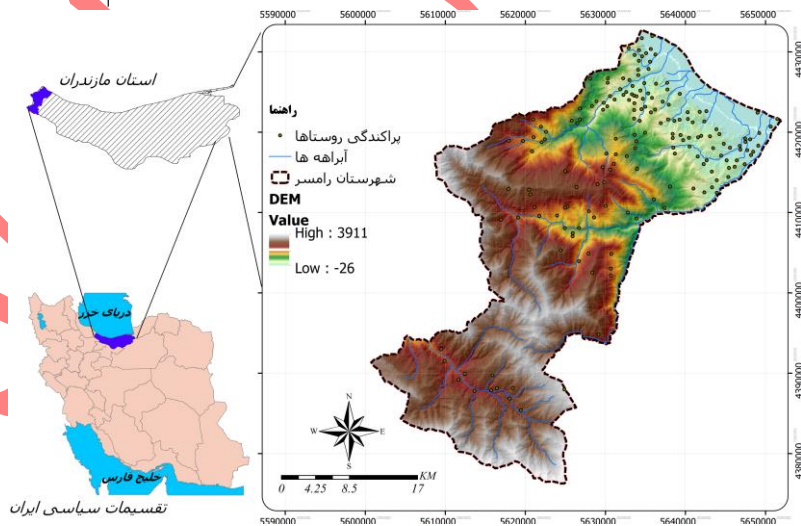
شهرستان رامسر دارای ۲ شهر به نام‌های رامسر با مساحت ۲۳/۲ کیلومترمربع و کتالم و سادات شهر با مساحت ۱۸/۷ کیلومترمربع است. منطقه رامسر از نظر موقعیت جغرافیایی در ۵۰ درجه و ۴۴ دقیقه ۴۸ ثانیه الی ۵۰ درجه و ۲۵ دقیقه و ۳۴ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۷ دقیقه ۴۰ ثانیه الی ۳۶ درجه و ۴۷ دقیقه ۴۶ ثانیه عرض شمالی و در غرب استان مازندران، شمال غرب شهرستان رامسر واقع شده است (Mazandaran Population Statistics Yearbook, 2017). این شهرستان از دو بخش ساحلی و کوهستانی شکل گرفته به طوری که حد ارتفاعی آن از ۲۷- تا ۳۶۰۰ متر از سطح دریا متغیر است. از کل مساحت شهرستان ۹۰/۴ درصد را مناطق کوهستانی و ۹/۶ درصد را مناطق جلگه‌ای در بر گرفته است (Mazandaran province research program, analysis of the state of natural resources and environment, 2018). در همین راستا نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در پهنه تقسیمات سیاسی کشور در شکل ۱ ارائه شده است.

این نوآوری در این است که تحلیل چندین عامل مهم به صورت همزمان و با توجه به تاثیر ترکیبی آن‌ها بر وقوع زمین لغزش انجام شده است.

۲- استفاده از روش‌های آماری و مدل‌سازی دقیق: در این تحقیق، از روش‌های آماری و مدل‌سازی دقیق برای تحلیل ارتباطات بین متغیرهای مختلف و تاثیر آن‌ها بر وقوع زمین لغزش استفاده شده است. این نوآوری نه تنها به شناخت بهتر اثرات هر عامل بر وقوع زمین لغزش کمک کرده، بلکه امکان پیش‌بینی و مدیریت بهتر خطرات زمین لغزش را نیز فراهم می‌کند.

۳- ترکیب نقشه‌های رستری و داده‌های میدانی: در این تحقیق، از ترکیب دقیق نقشه‌های رستری با داده‌های میدانی به دست آمده از مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها استفاده شده است. این نوآوری به تحلیل دقیق‌تر و به تصویر کشیدن الگوهای وقوع زمین لغزش کمک کرده و به دقت بیشتری در تشخیص مناطق حساس به زمین لغزش منجر شده است. به طور خلاصه، این تحقیق با شناسایی مناطق با حساسیت زیاد به زمین لغزش و ارتباط آن با شبکه جاده‌های جنگلی، به مسئولان و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا در مدیریت منابع جنگلی، توسعه جاده‌ها و حفاظت از محیط زیست بهبودی داشته باشند و خسارت ناشی از زمین لغزش را کاهش دهند.

۴- ارائه راهکارهای مدیریت خطر: از نتایج این تحقیق، راهکارهای مناسب برای مدیریت خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. این راهکارها می‌توانند به عنوان



شکل ۱- موقعیت شهرستان رامسر در استان مازندران
Figure 1. Location of Ramsar city in Mazandaran province

اطلاعات جغرافیایی بردارد. ۱۸ متغیر اصلی جهت شناسایی مکان‌های دارای پتانسیل زمین لغزش و بر اساس مرور منابع استخراج که شامل (شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، فاصله از مراکز سکونت، انحنای سطح، بارش، ارتفاع، تراکم پوشش گیاهی، زمین‌شناسی، بافت خاک، تراکم آبراهه، فاصله از جاده، شاخص رطوبت توپوگرافیک، دما، فرسایش، تیپ اقلیمی،

تحقیق حاضر، با توجه به ماهیت مسئله و موضوع مورد بررسی، از نوع تحقیقی است و از نوع مطالعات کاربردی است. این پژوهش تلاش دارد به ارزیابی مناطق با حساسیت‌پذیری وقوع زمین لغزش در محدوده شهرستان رامسر با در نظر گرفتن عوامل مؤثر و ارتباط شبکه جاده‌های جنگلی با زمین لغزش‌ها با استفاده از قابلیت‌های سامانه

فرآیندها و تجزیه تحلیل داده‌ها در محیط Excel و نرم‌افزار ArcMap) انجام شد.

روش نسبت فراوانی (FR): نسبت احتمال رخداد یک پدیده به عدم رخداد آن پدیده را نسبت فراوانی می‌نامند. اگر تعداد زمین لغزش‌های رخ داده در یک منطقه را A معرفی کنیم و عوامل مؤثر در پدیده زمین‌لغزش را B، نسبت فراوانی برای B همان احتمال وقوع معرفی می‌شود. حال اگر این نسبت بزرگ‌تر از ۱ باشد ارتباط بزرگ‌تری میان وقوع زمین لغزش با عوامل مؤثر در وقوع آن داشته و اگر کوچک‌تر از ۱ باشد این ارتباط کم‌تر است. برای محاسبه نسبت فراوانی هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش مشخص، با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی درصد پیکسل‌های لغزشی و فاقد لغزش منطقه مورد مطالعه تعیین و نهایتاً نسبت فراوانی برای هر یک از عوامل و کلاس‌های مرتبط با آن از تقسیم نسبت مناطق لغزش (درصد پیکسل‌هایی که در آن لغزش رخ داده) به مناطق فاقد لغزش (درصد پیکسل‌های فاقد لغزش) محاسبه گردید. سپس شاخص حساسیت به خطر لغزش بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد.

$$FR=A/B$$

رابطه (۱)

به‌منظور سنجش تأثیرگذاری عوامل مؤثر برای لغزش زمین از نرم‌افزارهای تحلیلی ذکرشده در قسمت روش پژوهش استفاده گردید و همچنین برای تعیین شاخص‌های مؤثر در تعیین عرصه‌های با خطر کم و بالا در جهت شناسایی درجه لغزش و ارزش‌گذاری زمین‌ها برای انواع فعالیت‌ها و میزان اهمیت هر یک از این معیارها (جدول ۱) نسبت به هم با توجه به وضعیت موجود و اطلاعات گردآوری شده، همچنین با بررسی و مرور منابع، طرح‌های پیشین و نظر کارشناسان این امر انجام گرفته است که در نهایت به‌صورت لایه‌های اطلاعاتی وارد محیط GIS شد. در مرحله بعدی، به لایه‌های اطلاعاتی وزن‌هایی متناسب با درجه اهمیت و تأثیر آن‌ها در انتخاب عرصه مناسب داده می‌شود جهت دستیابی به این شاخص‌ها، نیاز به یک سری نقشه‌ها و پایگاه اطلاعاتی بود که این‌ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی آماده و پس از آماده‌سازی این نقشه‌ها، جهت تحلیل آن‌ها از روش‌های هم‌پوشانی استفاده گردید. در اینجا، معیارهای مورد نظر به ۵ کلاس رتبه بندی گردید که کلاس ۱ کمترین ارزش و رتبه ۵ دارای بیشترین ارزش است. سپس جهت تلفیق جمعی آن‌ها از ابزار Raster Calculator استفاده شد و خروجی نهایی در غالب نقشه نهایی حساسیت‌پذیری وقوع زمین لغزش تولید گردید.

مرحله‌ی نهایی اعتبارسنجی مدل مورد استفاده است. یکی از گام‌های اساسی در ارزیابی حساسیت‌پذیری وقوع زمین‌لغزش، استفاده از منحنی ROC یا تشخیص عملکرد نسبی می‌باشد. برای ایجاد منحنی ROC در SPSS برای این مجموعه داده، از تب Analyze، سپس Classify و سپس ROC Curve استفاده گردید، بدین صورت که پیش‌نویس متغیر به کادر با عنوان State Variable جاگذاری گردید. ابتدا مقدار متغیر "State" را به ۱ تنظیم و سپس مقادیر این متغیر را در کادر مشخصی با عنوان "Test Variable" وارد نموده و در نهایت، مدل را اجرا کرده و خروجی گرفته‌ایم. در ارزیابی به روش ROC

نیمرخ ارتفاعی و تراکم زمین لغزش‌ها) می‌باشد. به‌منظور محاسبه تراکم و میزان سبزی پوشش گیاهی از پروداکت ۱۶ روزه ماهواره لندست ۸ در محیط سامانه گوگل ارث انجین استفاده گردید. اطلاعاتی هم‌چون (شیب، انحنای زمین، ارتفاع، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافیک و تراکم آبراهه‌ها) از لایه پروداکت DEMALOS PALSAR در محیط سامانه گوگل ارث انجین و سپس با استفاده از ابزارهای موجود در ArcMap به‌دست آمد. انحنای پروفیل موازی با جهت حداکثر شیب است. یک مقدار منفی نشان می‌دهد که سطح در آن سلول به سمت بالا محدب است. نمایه مثبت نشان می‌دهد که سطح در آن سلول به سمت بالا مقعر است. مقدار صفر نشان می‌دهد که سطح خطی است. انحنای پروفیل بر شتاب یا کاهش سرعت جریان در سراسر سطح تأثیر می‌گذارد. TWI^۱ یا همان شاخص رطوبت توپوگرافی می‌تواند در شناسایی توزیع مکانی رطوبت ارائه دهد در واقع تأثیر توپوگرافی را بر موقعیت و اندازه نواحی تجمع آب در خاک‌ها تعیین می‌کند. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) با استفاده از نرم‌افزار SAGA-GIS و لایه DEM محاسبه شد. اطلاعاتی نظیر (زمین‌شناسی، فاصله از جاده، فاصله از مراکز سکونت، بارش، دما و خاک‌شناسی) به ترتیب از سازمان زمین‌شناسی، سامانه <https://www.openstreetmap.org>، سازمان هواشناسی تهیه گردید. میزان جاده‌های موجود در طرح‌های جنگلداری ۴۸۱ کیلومتر است. همچنین نقشه فرسایش نیز که بر اساس روش تجربی EPM^۲ توسط اداره کل مناطق طبیعی و آبخیزداری استان مازندران محاسبه شده است تهیه گردید. در همین راستا اطلاعات تراکم زمین‌لغزش‌ها حاصل از برداشت‌های میدانی و داده‌های تاریخی ثبت‌شده و تصاویر گوگل ارث به‌دست آمد.

لازم به ذکر است بنا به اینکه قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاعی به صورت ۳۰ متری میباشد و بیشتر متغیرها حاصله هم‌چون جهت شیب، شیب، آبراهه، انحنای سطح، انحنای نیمرخ و رطوبت توپوگرافیک از این متغیر بدست می‌آید در ثانی قدرت تفکیک متغیرهای دیگر هم‌چون فاصله از جاده و فاصله از روستا، فاصله از آبراهه‌ها و دیگر پارامترها در هنگام تبدیل به نقشه رستر به صورت ۳۰ متری در نظر گرفته شد.

به‌منظور تعیین همبستگی بین نقاط لغزشی و هر یک از عوامل مؤثر بر لغزش، از مدل احتمالی نسبت فراوانی استفاده شده است (جدول ۲). برای تعیین نسبت فراوانی ابتدا با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، درصد مساحت نقاط لغزشی و فاقد لغزش در منطقه مورد مطالعه تعیین و سپس نسبت فراوانی برای هر یک از طبقه‌های عوامل، از تقسیم نسبت درصد مساحت نقاط لغزشی به درصد مساحت مناطق غیر لغزشی محاسبه گردید. پس از تعیین وسعت و درصد زمین‌لغزش‌ها در طبقات مختلف، کمی‌کردن عوامل مؤثر و وزن‌دهی به طبقات با توجه به عوامل مدل‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح صورت پذیرفت (جدول ۲). در نهایت نقشه‌های عوامل براساس مقادیر وزنی تهیه که تمامی

هر چه سطح زیر منحنی بیشتر باشد دقت مدل بیشتر است که میزان آن بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است. به طور کلی تقسیم‌بندی ۰/۹-، ۱، ۰/۹، ۰/۸-، ۰/۸، ۰/۷-، ۰/۷، ۰/۶-، ۰/۶، متوسط و ۰/۶-، ۰/۵-، ۰/۵، ضعیف را برای آن ارائه کرده‌اند. به منظور بررسی رابطه هم خطی (همبستگی زیاد یا کم) بین متغیرهای مستقل ابتدا لایه‌های رستری طبقه بندی نشده با زمین لغزش‌های Terrain ارزش گذاری شده، سپس مقادیر ارزش گذاری شده به صورت فایل اکسل وارد محیط نرم افزار SPSS شده و با استفاده از ابزار Linear Regression نسبت به آنالیز همبستگی پرداخته و در ادامه بر همین اساس معیارهای میزان تحمل (Tolerance) و یا عامل تورم واریانس (Variance Inflation Factor) بررسی

شد با توجه به اینکه هیچ یک از متغیرها مقدار عامل تورم واریانس آنها بیشتر از ۵ و ضریب تحمل کمتر از ۰/۱ یا ۰/۲ نبوده لذا تمام متغیرها در فرآیند مدلسازی موثر واقع گردید. استفاده از روش رگرسیون خطی در این تحقیق به دلیل سادگی و قابلیت تفسیر، قابلیت تحلیل تأثیر چندین متغیر مستقل، تشخیص رابطه خطی در داده‌ها و امکان بررسی اطلاعات کامل از متغیرها انتخاب گردید. این روش به محققان امکان مطالعه و تحلیل تأثیرات به طور دقیق و دقیق تری را فراهم می‌کند و در عین حال با معیارهای تحمل و عامل تورم واریانس سازگاری دارد، بدین ترتیب تضمین‌کننده‌ی اعتبار و موثریت نتایج به دست آمده از مدلسازی می‌باشد.

جدول ۱- معیارهای انتخابی جهت پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری و وقوع زمین لغزش با روش وزنی

Table 1. Selection criteria for zoning landslide susceptibility and probability by weight method

معیار اصلی Main Criterion	معیار اصلی Main Criterion	معیار اصلی Main Criterion	معیار اصلی Main Criterion
توپوگرافی Topography	کاربری و تراکم پوشش Land use and Vegetation Density	زیر معیار Sub-criteria	زیر معیار Sub-criteria
		شیب Slope	کاربری اراضی Land use
		انحنای زمین Curvature	تراکم پوشش گیاهی Vegetation Density
		جهت شیب Slope direction	تراکم رودخانه River density
	هیدروگرافی و اقلیم Hydrography and climate	ارتفاع و شاخص رطوبت توپوگرافیک Elevation and topographic moisture index	بارندگی و دما Rainfall and temperature
تأسیسات زیر بنایی Subterranean Infrastructure	زمین و خاک Soil and land structure	فاصله از جاده Distance from roads	زمین شناسی Geology
		فاصله از سکونتگاه Distance from settlements	خاک Soil

نتایج و بحث

در منطقه مورد مطالعه، اغلب رخداد های زمین لغزش در نزدیک رودخانه ها مشاهده شد که رابطه معکوسی بافاصله گرفتن از آن‌ها وجود دارد. نتایج حاصل از به‌کارگیری روش هم‌پوشانی مطابق با جدول شماره ۲ نیز مبین این واقعیت است که واحدهایی با فاصله کم تر از ۲۵۰ متری از رودخانه بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند.

نتایج حاصل از این مطالعه، در مورد رابطه متغیر ارتفاع و رخداد زمین لغزش نشان داد مناطق مرتفع و کوهستانی عموماً دچار این نوع از حرکات می‌باشند.

تحلیل عوامل مؤثر بر حساسیت زمین لغزش نشان می‌دهد که نوع خاک، شیب زمین، پوشش گیاهی، زمین شناسی، جریان‌های هیدروژئولوژیکی، توپوگرافی، میزان بارندگی و خطوط ارتباطی از اهمیت بالایی برخوردارند. نوع خاک با تأثیر بر مکانیک خاک و پلاستیسیته آن، شیب زمین با افزایش نیرو و کاهش مقاومت خاک، پوشش گیاهی با ایجاد ثبات و جلوگیری از جریان آب، زمین شناسی با نوع لایه‌ها و سنگ‌ها، جریان‌های هیدروژئولوژیکی با تغییر مشخصات خاک، توپوگرافی با تأثیر بر شیب زمین، میزان بارندگی با تأثیر بر نرمی خاک و خطوط ارتباطی با تغییر توپوگرافی و آبرسانی منطقه، عواملی هستند که در ارتباط با زمین لغزش تأثیرگذارند. بررسی و تحلیل نتایج نقشه‌های رستری (شکل-های ۲ تا ۴) که عوامل مؤثر در حساسیت‌پذیری زمین لغزش‌های منطقه را با استفاده از مدل نسبت فراوانی

نشان می‌دهند، که به دلیل عدم تفاوت پذیری جهت شیب در زمین لغزش‌های ثبت شده، تأثیر این عامل نسبت به سایر عوامل کمتر است. عامل بعدی که میزان بیشتری از تأثیر گذاری را به خود اختصاص داده است، عامل فاصله از گسل می‌باشد؛ در منطقه مورد مطالعه چندین گسل فرعی وجود دارد که به دلیل فاصله‌ی نسبتاً کم از موقعیت زمین لغزش‌ها و نیز از ارتفاعات و طبعاً دامنه‌های لغزش پذیر، تأثیر نسبتاً بیشتری از این عامل در زمین لغزش در مقایسه با سایر عوامل دیده می‌شود. با توجه به تراکم لغزش‌ها در هر طبقه و درصد تعلق گرفته نسبت به هر طبقه مطابق با جدول ۲ بیشترین میزان تأثیر بر زمین لغزش منطقه رامسر، به ترتیب مربوط به عوامل لیتولوژی، فاصله از رود، ارتفاع، شیب، گسل، بارش و کاربری اراضی و کمترین میزان تأثیر نیز مربوط به پارامترهای جهت شیب و فاصله از جاده است. همچنین مناطقی با پوشش گیاهی کم (جدول ۲)، بر طبق (جدول ۲) و شکل‌های ۲ الی ۴، دامنه‌های رو به شرق و شمال شرق به دلیل اینکه امکان یخبندان طولانی مدت و ذوب در آن‌ها بیشتر است. در بلندمدت یخبندان طولانی مدت نسبت به دامنه‌های دیگر مواد هوازده بیشتر فراهم می‌کند (جدول ۲) و شکل‌های ۲ تا ۴، و کاربری زمین به صورت باغات به طریق افزایش وزن ناشی از رشد درختان در باغات و افزایش تنش برشی دامنه‌ها مناطق مستعد برای زمین لغزش است. واحدهای سنگی مرکب از سنگ‌های ولکانیکی و توفی (جدول ۲) و شکل‌های ۲ تا ۴، طبقات شیب ۳۸-۲۰ درصد (جدول ۲)، و دیگر

عوامل به ترتیب بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش داشته‌اند.

بر طبق نتایج خطوط ارتباطی و جاده‌های موجود در جدول ۲ و نقشه نهایی (شکل ۶) میتوان چنین برداشت کرد که با تغییر هندسه شیب دامنه‌ها، حذف تکیه‌گاه جانبی بر اثر تنش‌های انتقالی زمین در رخدادهای زمین لغزش‌های منطقه مؤثر است. بررسی نقشه بارندگی منطقه و نتایج حاصل از وزن‌های به‌دست‌آمده (جدول ۲) در هر طبقه از بارش نشان می‌دهد، که نقاط با بارش بیشتر، کمتر دچار لغزش شده‌اند. یعنی رابطه بارش با حرکات لغزش یک نوع رابطه معکوس است، و دلیل آن نحوه توزیع مکانی بارش است و می‌توان آن را با رابطه

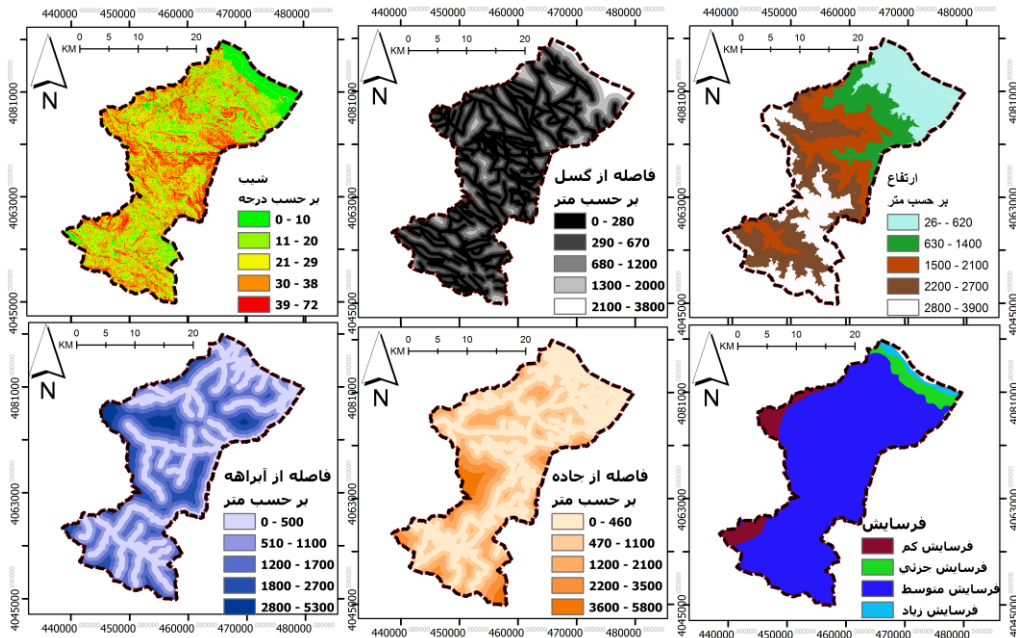
بارش و ارتفاع توجیه کرد. بدین معنی با افزایش ارتفاع منطقه، متوسط بارش سالانه آن نیز افزایش می‌یابد اما دیگر شرایط لازم برای وقوع زمین لغزش با افزایش ارتفاع و شیب از بین می‌رود. یعنی در ارتفاعات و شیب‌های تند جنس سازندها سخت شده و حرکات از حالت لغزشی به ریزش تغییر می‌یابد (جدول ۲). نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که خاک‌های با نفوذپذیری زیاد بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. چنانچه اگر نفوذپذیری خاک زیاد باشد باعث کاهش مقاومت برشی و افزایش تنش برشی مواد روی دامنه می‌شود و سبب ناپایداری دامنه‌ها می‌گردد.

Table 2. Ranking units below the criteria of the main variables

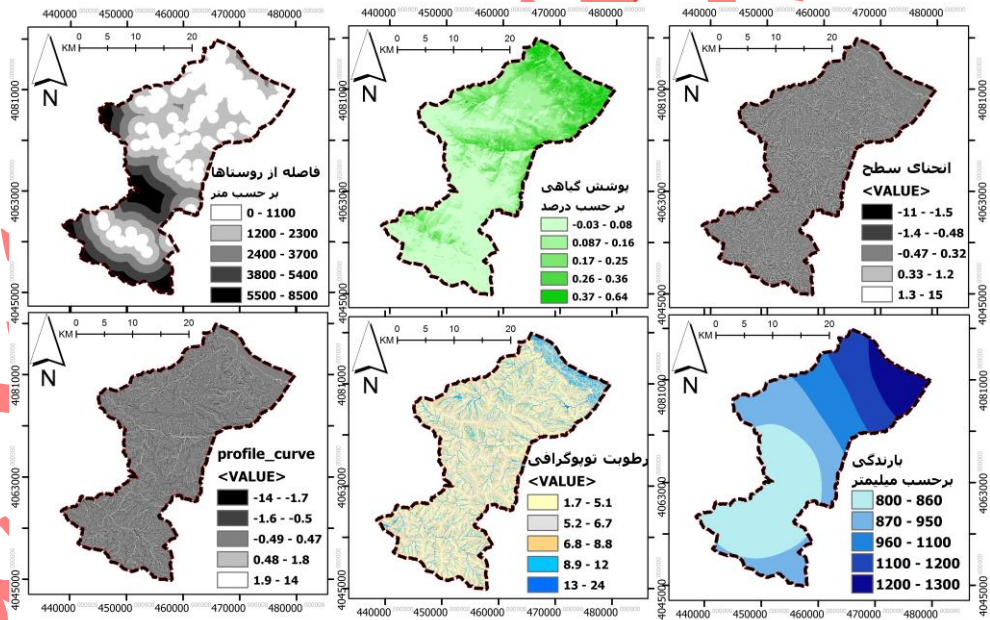
متغیرها Variables	طبقات classes	تعداد پیکسل‌ها هر طبقه number of pixels	درصد پیکسل‌های هر طبقه percentage of pixels	تعداد پیکسل‌ها لغزشی number of sliding pixels	درصد پیکسل‌های لغزشی percentage of sliding pixels	نسبت FR FR ratio
فاصله از رودخانه Distance from the river	0 - 500	645583	63.72	42	62.69	0.98
	510 - 1,100	291495	28.77	11	16.42	0.57
	1,200 - 1,700	62113	6.13	14	20.90	3.41
	1,800 - 2,700	10998	1.09	0	0	0
	2,800 - 5,300	2938	0.29	0	0	0
خاک شناسی Soil	Regosel sands خاکهای رگوسل	91640	9.02	24	35.82	3.97
	Moist Litosel sands خاکهای لیتوسل مرطوب	160409	15.80	31	46.27	2.93
	Semi-Moist Litosel sands خاکهای لیتوسل نیمه مرطوب	763433	75.18	12	17.91	0.24
پوشش زمین Land Cover	ارقام مربوط به هر کلاس کاربری اراضی					
	Garden اراضی باغی	1	2112	0.21	0	0.00
	Land with dense forest جنگل با تاج پوشش انبوه	2	21737	2.15	1	1.49
	Land with moderate forest cover جنگل با تاج پوشش متوسط	3	371963	36.72	62	92.54
	Lake, dam and reservoir دریاچه، مخزن سد و آب‌اندان	4	75	0.01	0	0.00
	Irrigated agriculture زراعت آبی	5	45028	4.45	1	1.49
	Urban area محدوده شهر	6	37689	3.72	2	2.99
	Good pastureland مراتع خوب	7	180153	17.79	0	0.00
	Poorly forested pastureland مرتع با تاج پوشش فقیر	8	84	0.01	0	0.00
Poorly forested pastureland مرتع با تاج پوشش متوسط	9	354103	34.96	1	1.49	
فرسایش Erosion	Lands with low erosion اراضی با فرسایش کم	63409	6.31	0	0	0.00
	Lands with partial soil erosion اراضی با فرسایش جزئی خاک	45458	4.52	2	2.99	0.66
	Lands with moderate erosion اراضی با فرسایش متوسط	875863	87.09	65	97.01	1.11
	Lands with high erosion اراضی با فرسایش زیاد	20956	2.08	0	0	0.00
NDVI Normalized Difference Vegetation Index	-0.0320 - 0.0861	447228	43.76	1	1.49	0.03
	0.0862 - 0.165	249197	24.38	26	38.81	1.59
	0.166 - 0.254	161885	15.84	18	26.87	1.70
	0.255 - 0.361	116992	11.45	16	23.88	2.09
	0.362 - 0.637	46658	4.57	6	8.96	1.96
زمین شناسی Geology	Developed land اراضی ساخته شده	1	1959	0.19	0	0.00
	Undifferentiated deltaic deposits آبرفت‌های دلتائی تفکیک نشده	2	21532	2.13	0	0.00
	Unstable present deltaic deposits آبرفت‌های سست عهد حاضر	3	5086	0.50	0	0.00
	Basalt بازالت	4	4208	0.42	0	0.00
	Old sandy beach ridges پادگانه شنی قدیمی	5	24053	2.37	1	1.49
	Red to gray, fine to medium sand, conglomerate and limestone تناوب قرمز به خاکستری، ماسه سنگ نازک تا متوسط، کنگلومرا و سنگ آهک	6	2175	0.21	0	0.00
	Alternation of sandstone, shale, grayish red sandy limestone تناوبی از سنگ ماسه، شیل، آهک ماسه‌ای خاکستری مایل به قرمز	7	3383	0.33	0	0.00
	Alternation of rock, limestone, shale, sandstone, igneous rock, with lenses and layers of coal تناوبی از سنگ، فورس، شیل، ماسه سنگ، سنگ جوش، همراه با عدسی‌ها و لایه‌هایی از زغال	8	366220	36.15	54	80.60
	Deposit fan and talus دامنه واریزه‌ای و سنگ ریزش	9	2683	0.26	0	0.00
	Light gray to cream dolomite دولومیت خاکستری روشن تا کرم	10	127792	12.61	9	13.43
	Well-layered grayish limestone سنگ آهک بودار خاکستری، همراه با یک عضو سنگ آهک مارنی تیره	11	39650	3.91	0	0.00
	Calcarene with a dark gray limestone member سنگ آهک چرت دار خوب لایه بندی شده خاکستری تیره همراه با میانلایه‌هایی از شیل و آهک	12	17105	1.69	0	0.00
	Gray to cream limestone, thin to thick layers, with nodules and cherts to some extent سنگ آهک خاکستری تا کرم لایه نازک تا ضخیم، تا حدی با گره‌ها و لایه‌های چرت	13	23371	2.31	0	0.00
	Greenish gray marly limestone سنگ آهک و آهک گلی لایه بندی شده خاکستری مایل به سبز	14	3080	0.30	0	0.00
	Layered gray limestone with clay سنگ آهک و آهک گلی لایه بندی شده خاکستری روشن تا کرم	15	36446	3.60	0	0.00
	Layered gray limestone and dolomite, medium to thick layers, light gray to cream in color سنگ آهک و دولومیت متوسط تا ضخیم لایه به رنگ خاکستری روشن تا کرم	16	9642	0.95	0	0.00
	Dark gray to black limestone, marl, sandy shale سنگ آهک، آهک مارنی و ماسه‌ای و شیل خاکستری تیره تا سیاه	17	839	0.08	1	1.49
	Dark gray to black limestone, marl, sandy shale with a thick mass member سنگ آهک، آهک مارنی و ماسه‌ای و شیل خاکستری تیره تا سیاه همراه با یک عضو ضخیم توده‌ای	18	10480	1.03	0	0.00
	Thick poly-mictic igneous rock سنگ جوش پلی میکتیک کمپکت ضخیم	19	198402	19.58	0	0.00
	Gray to purplish volcanic rocks سنگ‌های آتشفشانی خاکستری مایل به ارغوانی	20	4819	0.48	2	2.99
	Dark gray to black glassy and tuffaceous rocks with basaltic to intermediate composition سنگ‌های گدازه‌ای و آذرآواری خاکستری تیره تا سیاه با ترکیب بازیک تا میانه	21	89891	8.87	0	0.00
	Latakrit and boehmite لاکریت و بوکسیت	22	238	0.02	0	0.00
	Marine sedimentary rocks نهشته‌های دریایی	23	18658	1.84	0	0.00
	Young coastal sedimentary rocks نهشته‌های ساحلی جوان	24	185	0.02	0	0.00
	Old coastal sedimentary rocks نهشته‌های ساحلی قدیمی	25	867	0.09	0	0.00

	Alluvium and rock debris واريزه و سنگ ريزش	26	363	0.04	0	0	0.00
فاصله از جاده Distance from the road	0 - 460		792610	78.23	65	97.01	1.24
	470 - 1.100		150416	14.85	2	2.99	0.20
	1.200 - 2.100		43213	4.27	0	0	0.00
	2.200 - 3.500		19307	1.91	0	0	0.00
	3.600 - 5.800		7581	0.75	0	0	0.00
رطوبت توبوگرافي TWI	1.7 - 5.5		401033	39.58	26	38.81	0.98
	5.6 - 7.5		410825	40.54	30	44.78	1.10
	7.6 - 11		161901	15.98	8	11.94	0.75
	12 - 24		39584	3.91	3	4.48	1.15
شيب Slope	0 - 10		129509	12.75	13	19.40	1.52
	11 - 20		243721	24.00	25	37.31	1.55
	21 - 29		284771	28.04	18	26.87	0.96
	30 - 38		247998	24.42	9	13.43	0.55
	39 - 72		109553	10.79	2	2.99	0.28
جهت شيب Aspect	Flat هموار		6078	0.60	0	0	0.00
	North شمال		181131	17.84	12	17.91	1.00
	Northeast شمال شرق		175274	17.26	16	23.88	1.38
	East شرق		140921	13.88	14	20.90	1.51
	Southeast جنوب شرقی		122147	12.03	11	16.42	1.37
	South جنوب		104354	10.28	3	4.48	0.44
	Southwest جنوب غربی		80689	7.95	2	2.99	0.38
	West غرب		88936	8.76	4	5.97	0.68
فاصله از روستا Distance from the village	0 - 1100		586689	57.91	66	98.51	1.70
	1200 - 2300		210594	20.79	0	0	0.00
	2400 - 3700		122957	12.14	1	1.49	0.12
	3800 - 5400		78990	7.80	0	0	0.00
	5500 - 8500		13897	1.37	0	0	0.00
فاصله از گسل Distance from the fault	0 - 280		817130	80.65	55	82.09	1.02
	290 - 670		149898	14.80	12	17.91	1.21
	680 - 1.200		32059	3.16	0	0	0.00
	1.200 - 2.000		10811	1.07	0	0	0.00
	2.000 - 3.800		3229	0.32	0	0	0.00
انحنای سطح Surface curvature	-11 - -0.68 Upwardly Convex محذب رو به بالا		471596	46.44	28	41.79	0.90
	-0.67 - 0.52 Upwardly Convex to Upwardly Concave رو به بالا محذب تا رو به بالا مقعر		47732	4.70	3	4.48	0.95
	0.53 - 15 Upwardly Concave رو به بالا مقعر		496224	48.86	36	53.73	1.10
انحنای نيمرخ Profile curvature	-14 - -0.83 Upwardly Convex محذب رو به بالا		496253	48.87	34	50.75	1.04
	-0.83 - 0.79 Upwardly Convex to Upwardly Concave رو به بالا محذب تا رو به بالا مقعر		25152	2.48	0	0	0.00
	0.8 - 14 Upwardly Concave رو به بالا مقعر		494147	48.66	33	49.25	1.01
بارندگی Precepitation	800 - 860		529714	52.16	1	1.49	0.03
	870 - 950		177229	17.45	3	4.48	0.26
	960 - 1100		116741	11.50	37	55.22	4.80
	1100-1200		118529	11.67	25	37.31	3.20
	1200-1300		73264	7.21	1	1.49	0.21

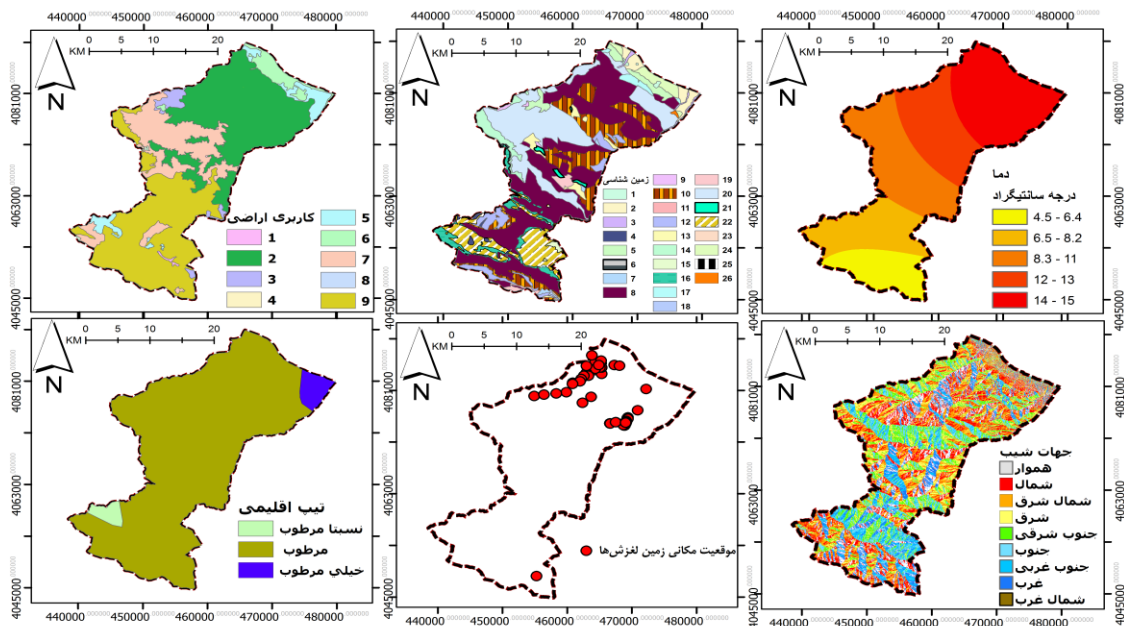
نشر



شکل ۲- طبقه‌بندی معیارهای انتخابی ارتفاع، فاصله از گسل، شیب، فرسایش، فاصله از جاده و فاصله از آبراهه
 Figure 2. Classification of the selection criteria of height, distance from the fault, slope, erosion, distance from the road and distance



شکل ۳- طبقه‌بندی معیارهای انتخابی انحنا سطح، پوشش گیاهی، فاصله از روستا، بارندگی، شاخص رطوبت توپوگرافی و نیمرخ ارتفاعی
 Figure 3. Classification of the selection criteria of surface curvature, vegetation, distance from the village, rainfall, topographic humidity index and height profile



شکل ۴- طبقه بندی معیارهای انتخابی دما، زمین شناسی، جهت شیب، کاربری اراضی، موقعیت مکانی زمین لغزش‌ها و تپ اقلیمی
Figure 4. Classification of the selection criteria of temperature, geology, Aspect, land use, landslide and climate type

به نقشه پهنه بندی حساسیت‌پذیری (شکل ۶) رویداد حرکات دامنه‌ای شهرستان رامسر، مشاهده می‌شود که بخش‌های مرتفع که منطبق بر دامنه‌های شمالی رشته کوه‌های البرز می‌باشد، به دلیل شیب زیاد، بارندگی قابل توجه، وجود شبکه هیدروگرافی متعدد که بستر خود را عمیقاً در دامنه‌های شمالی البرز برده‌اند و خزان کننده بودن رویش‌های جنگلی شهرستان رامسر، همراه با فقر پوشش گیاهی در ارتفاعات بیش از ۲۵۰۰ متر و وجود گسل و فرار گیری جاده‌های با اصول مهندسی و زیست مهندسی در ساخت و نگهداری مهمترین عوامل مؤثر در احتمال حرکات دامنه‌ای می‌باشند. همچنین در جلگه ساحلی به دلیل بافت دانه‌ای همراه با وجود گسل‌های فعال و لرزه خیزی گستره (شکل ۲)، به عنوان پهنه احتمال وقوع زمین لغزش تعیین گردیده است. ارزیابی مدل‌های پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری زمین لغزش:

برای اعتبار سنجی نقشه تهیه شده از منحنی ROC و تخمین سطح زیرمنحنی از ۳۰ درصد زمین لغزش‌های استفاده شده در مدل سازی استفاده گردید. نتایج نشان داد مدل FR با سطح زیر منحنی ۰/۷۶۰ دقت قابل قبولی برای تهیه نقشه حساسیت-پذیری زمین لغزش ارائه کرده است (جدول شماره ۳). بر اساس خروجی بدست آمده از وضعیت حساسیت وقوع زمین لغزش، بیشترین درصد مساحت بدست آمده به ترتیب مربوط به طبقه حساسیت‌پذیری طبقه کم با میانگین ۲۷/۴۷ درصد، طبقه متوسط با میانگین ۲۲/۳۲ درصد، خیلی کم با میانگین ۲۰/۷۹، طبقه زیاد با میانگین ۱۶/۳۶ درصد، درصد و طبقه خیلی زیاد ۱۳/۰۷ درصد را به خود اختصاص داده است.

در منطقه مورد مطالعه مطابق با جدول شماره ۲ بیشترین وزن به‌دست آمده مربوط به شیب با میانگین (۵ تا ۳۰ درجه) است. دامنه‌های غربی و دامنه‌های میانی بیشترین رخداد زمین لغزش را در منطقه رامسر نشان داده‌اند، این شرایط به دلیل رطوبت و بارندگی است. دامنه‌های با بارندگی زیاد سریع‌تر به حالت اشباع می‌رسند و در نتیجه فشار منفذی دامنه‌ها افزایش می‌یابد. با این وجود این مسئله به ظرفیت نفوذ دامنه بستگی دارد، که توسط متغیرهای مختلفی مانند شیب و توپوگرافی، نوع خاک، نفوذپذیری، تخلخل، مواد آلی تشکیل دهنده، پوشش گیاهی و غیره کنترل می‌شود. نتایج به‌دست آمده در بررسی عامل زمین شناسی نشان می‌دهد که لیتولوژی پی‌سنگ در منطقه مورد مطالعه عمدتاً از شیل‌های رسی و سیلتی، سیلتستون، ماسه سنگ، مارن، سنگ‌های کربناته و گچ و آهک تشکیل شده است و با توجه به اینکه این سنگ‌ها از کانی‌های رسی و لایه‌های گچی و مارنی غیر قابل نفوذ تشکیل شده است پس از طبقه‌بندی نقشه حساسیت‌پذیری وقوع زمین لغزش با توجه به این که معیارهای مؤثر در پتانسیل لغزش در چند گروه طبقه‌بندی شده‌اند بنابراین نقشه نهایی نیز با توجه به مقادیر هر معیار به ۵ طبقه با حساسیت لغزشی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد پهنه‌بندی شده است. بر طبق این نقشه (شکل ۶) میتوان نتیجه گرفت که دامنه‌های شمال شرق و غرب که از طریق بزرگراه از شهر رامسر با استان گیلان و منطقه آذربایجان دارای ارتباط جاده‌ای می‌باشد و قسمت‌های میانی شهرستان رامسر که بیشتر تراکم زمین لغزش‌ها در آن مناطق واقع شده است دارای حساسیت‌پذیری زیاد نسبت به وقوع زمین لغزش‌های هستند، بر همین اساس شبکه‌های ارتباطی در این مناطق بیشترین آسیب‌پذیری را از لحاظ وقوع زمین متحمل شده و خواهند شد. با توجه

جدول ۳- خروجی محاسبه منحنی ROC در مدل

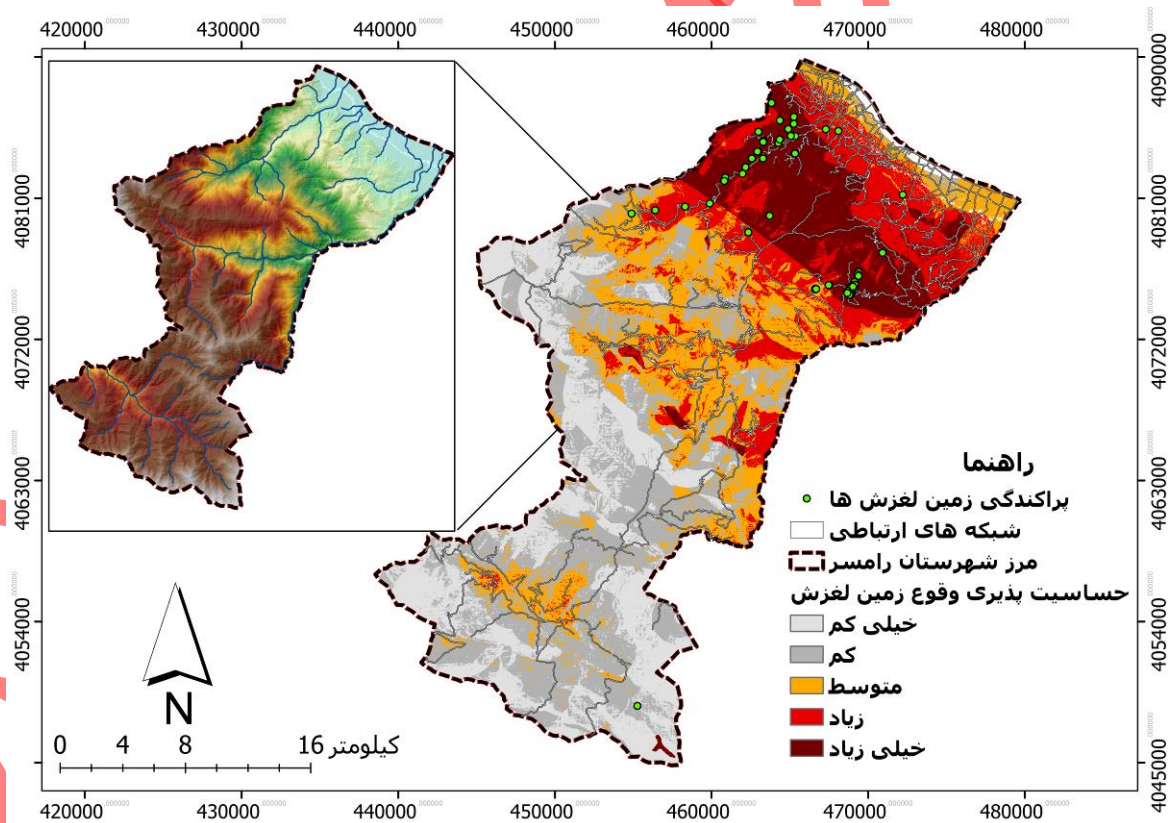
Table 3. ROC curve calculation output in the model

مساحت زیر منحنی Area under the curve	انحراف معیار ^a Standard deviation	درجه اهمیت مجانبی ^b Degree of asymptotic significance	فواصل اطمینان مجانبی ۹۵٪ asymptotic confidence intervals	
			حد پایینی lower limit	حد بالایی upper limit
۰/۷۶۰	۰/۱۰۸	۰/۳۹	۰/۵۴۸	۰/۹۷۳
فرض غیر پارامتریک بودن داده‌ها a. The assumption of non-parametric data				
فرض صفر: صحت مساحت زیر منحنی = ۰/۵ b. Zero assumption: the accuracy of the area under the curve = 0.5				

جدول ۴- مساحت (هکتار) طبقات در خروجی نهایی

Table 4- Floor area in the final output

درصد PERCENT	مساحت/هکتار AREA CLASS/HECTARE	کلاس CLASS
20.79	15115.71374	خیلی کم very low
27.47	19967.82452	کم Low
22.32	16227.2156	متوسط MODERATE
16.36	11890.84807	زیاد HIGH
13.07	9500.044451	خیلی زیاد VERY HIGH



شکل ۵- نقشه نهایی پتانسیل حساسیت‌پذیری وقوع زمین لغزش
Figure 6. The final map of landslide sensitivity potential

پراکنندگی لغزش‌ها بسته به نوع حساسیت‌پذیری مولفه‌های طبیعی منطقه از لحاظ خاک، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، شیب، شرایط رطوبتی و عوامل درگیر می‌تواند متفاوت باشد.

بر اساس نتایج مطالعه و تحلیل انجام شده، تأثیر جاده‌های جنگلی بر وقوع زمین لغزش در منطقه به عنوان یک عامل مهم و تأثیرگذار مشخص شده است.

ارتباط زمین لغزش با شبکه جاده‌های جنگلی در این منطقه به عوامل مختلفی برمی‌گردد که به‌طور خلاصه با توجه به تغییرات شیب زمین در اطراف جاده‌ها شیب‌های بالایی که به طور طبیعی حساسیت بیشتری به زمین لغزش دارند، در اثر فعالیت انسانی و عبور و مرور از جاده‌ها به نوعی تغییر کرده‌اند. وجود این جاده‌های جنگلی باعث ایجاد فرسایش در مناطق اطراف خود شده است. این فرسایش می‌تواند منجر به جریان آب‌ها و جابجایی مصالح زمین و در نهایت باعث ایجاد زمین لغزش شود. بر همین اساس بعضاً این جاده‌های جنگلی الگوی جریان آب‌ها در منطقه را تغییر داده و باعث اشباع زمین در برخی نقاط شده‌اند این اشباع زمین منجر به کاهش استحکام سازندهای زمین‌شناسی و افزایش آسیب‌پذیری مناطق نسبت به زمین لغزش‌ها گردیده‌اند ترکیب سنگ‌ها و خاک‌ها در منطقه نقش مهمی در وقوع زمین لغزش‌ها ایفا کرده‌اند، وجود لایه‌های بی‌نفوذ مانند شیل‌ها و مارن‌ها باعث انباشت آب و افزایش حساسیت مناطق به زمین لغزش شده است. عبور و مرور خودروها از جاده‌های جنگلی در منطقه مورد مطالعه زمین‌ها را به صورت مکانیکی تحت فشار قرار داده و باعث تغییر شیب و استحکام زمین‌ها شده است.

با توجه به عوامل ذکر شده، تا حدودی مشخص است که جاده‌های جنگلی ارتباط معنادار زیادی در فرآیند وقوع و تأثیر زمین لغزش‌ها در منطقه داشته است با این حال این نیاز به تحلیل‌های دقیق‌تر و مشاهدات میدانی بیشتر را برجسته می‌کند تا به‌طور دقیق‌تر این ارتباط‌ها را تحلیل کرد.

با توجه به نقشه نهایی (شکل ۵) حساسیت‌پذیری وقوع زمین لغزش می‌توان پی‌برد که این مناطق عمدتاً مناطق حاشیه‌ی محورهای مواصلاتی را شامل می‌شود. به خاطر حجم زیاد ساخت و سازهای حاشیه جاده، همچنین به خاطر به هم زدن شیب طبیعی زمین برای جاده سازی و عریض کردن آن، اکثر زمین لغزش‌ها نیز در این مناطق رخ داده است.

این تحقیق نشان می‌دهد که مناطق با شیب بالاتر در منطقه مورد مطالعه از حساسیت بیشتری به زمین لغزش برخوردار هستند. افزایش شیب زمین باعث افزایش احتمال زمین لغزش می‌شود. لایه‌های بی‌نفوذ مانند شیل و مارن باعث انباشت آب و افزایش حساسیت مناطق به زمین لغزش می‌شوند. مناطق با بارندگی زیاد سریع‌تر به حالت اشباع می‌رسند و فشار منفذی در خاک افزایش می‌یابد. این شرایط نیز می‌توانند منجر به وقوع زمین لغزش در منطقه گردد. دامنه‌های غربی و میانی منطقه مورد مطالعه بیشترین رخداد زمین لغزش را نشان می‌دهند که به نوعی به دلیل رطوبت و بارندگی در این منطقه ایجاد شده است. نیمرخ ارتفاعی و انحناهای زمین دو عامل مهم در شکل‌گیری زمین لغزش در منطقه بوده‌اند. این پارامترها به

نوعی شیب‌های بالایی را ایجاد نموده که به طور طبیعی حساسیت بیشتری به زمین لغزش دارند. با توجه به نتایج تحقیق، مناطق با شیب‌های بالا و نیمرخ‌های ارتفاعی بیشتر احتمال زمین لغزش بیشتری دارند. رطوبت با توپوگرافی و خاک نیز به‌عنوان پارامترهای مهم در وقوع زمین لغزش مطالعه شده‌اند. مناطق با رطوبت بیشتر ممکن است به شکل‌گیری شرایط اشباع زمین و افزایش فشار منفذی در خاک منجر شوند، که این موضوع نیز باعث افزایش احتمال وقوع زمین لغزش می‌شود. به طور کلی، برای مدیریت و پیش‌گیری از زمین لغزش‌ها در منطقه، لازم است این ارتباطات میان پارامترها به‌طور دقیق‌تر مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد.

نتیجه‌گیری کلی

منطقه مورد مطالعه با توجه به ژئومورفولوژی عموماً کوهستانی، فعالیت زمین‌ساختی، و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، شرایط طبیعی را برای ایجاد بخش وسیعی از زمین لغزش‌ها داراست و این حرکت دامنه‌ها سالیانه تبعات مالی فراوانی به محدوده مورد مطالعه وارد می‌سازند اما متأسفانه تا به امروز، به نظر می‌رسد تا حدودی بررسی‌ها مقطعی و بدون برنامه‌ریزی منسجم و کارآمد از سوی مسئولان ذی ربط انجام گرفته است. با توجه به توان بالای پارامترهای ژئومورفومتریک در تشخیص مناطق حساس به زمین لغزش استفاده از این پارامترها در پهنه بندی خطر زمین لغزش توصیه می‌گردد (Arabameri et al., 2019). بسیاری از زمین لغزش‌ها کاملاً طبیعی هستند که به علت مسائل طبیعی از جمله شرایط خاک و آب و هوا ایجاد می‌شوند وقتی پایداری یک شیب کاهش می‌یابد یا تغییر می‌کند، حتی اگر تغییر خیلی کمی باشد، ممکن است سطح شیب‌دار ناپایدار شود. بنابراین تغییرات بزرگ یا حتی کوچک می‌تواند زمین لغزش ایجاد کند.

تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بعضی از عوامل از جمله لیتولوژی (جنس سنگ‌ها)، فرسایش دامنه‌ها، و فاصله از جاده‌ها با رخداد زمین لغزش رابطه و وابستگی مثبت دارند، به این معنا که وقوع زمین لغزش به این عوامل وابسته است و همراه با آنها افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، با توجه به مطالعه‌ها، مشاهده می‌شود که عوامل مانند لیتولوژی (جنس سنگ‌ها) پی‌سنگ، فورس، شیل، ماسه‌سنگ، سنگ‌جوش، همراه با عدسی‌ها و لایه‌هایی از زغال، همچنین فرسایش دامنه‌ها به عنوان دو عامل اصلی وقوع خطر زمین لغزش شناخته شده‌اند. همچنین فاصله از جاده نیز از اهمیت زیادی برخوردار است، به طوری که نزدیکی به جاده‌های جنگلی باعث افزایش زمین لغزش‌ها در مناطق حاشیه‌ای این جاده‌ها شده است.

همچنین، مشاهده می‌شود که شیب دامنه‌ها و انحناهای سطح و نیمرخ دیگر عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش هستند. شیب دامنه‌ها با مقدار بین ۵ تا ۳۰ درجه و انحناهای سطح و نیمرخ در بازه‌های خاص می‌توانند به وقوع زمین لغزش ارتباط داشته باشند. در مقابل، برخی از عوامل نیز از اهمیت کمتری برخوردار هستند و به‌طور مثال، رطوبت توپوگرافیک، فاصله از روستا و فاصله از گسل تأثیر کمتری بر رخداد زمین لغزش

دارند. به طور کلی، این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه به علت ترکیب متنوعی از عوامل زمین‌شناسی و اقلیمی به وقوع می‌پیوندد و تأثیر مستقیم و غیرمستقیم بسیاری از عوامل را در وقوع آن نمایان می‌سازد. این اطلاعات می‌تواند به مدیران منطقه کمک کند تا برنامه‌ریزی مناسبی برای کنترل و پیش‌بینی زمین لغزش‌ها در نظر بگیرند و از احتمال وقوع آسیب‌ها و خسارات به حداقل برسانند.

بر اساس این نتایج، ترکیبی از هندسه شیب، دامنه کوه، پوشش گیاهی، خاک و خصوصیات سنگ، ساختار توده سنگی، بارش و شرایط رطوبتی اثرات مستقیمی بر بی ثباتی دامنه‌ها به جای می‌گذارد.

پیشنهادات:

۱- بررسی آخرین وضعیت تمام مسیرها و جاده‌های ساخته شده و مورد بهره برداری با استفاده از تصاویر و عکس‌های هوایی موجود جهت مطالعه دقیق‌تر تخریب‌های محیط زیستی در منطقه مورد مطالعه

۲- افزایش کارایی و توان علمی کارشناسان اجرایی و تصمیم‌گیران در مورد پدیده زمین لغزش و مسائل اجرایی ۳- استفاده از سامانه سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به منظور شناسایی و کاهش هزینه‌های اجرایی ۴- آهک‌دهی در رس‌ها جهت کاهش خاصیت خمیری مناطق لغزشی ۵- استفاده از روش بارپاکان جهت تخلیه آب به منظور پایداری نسبی دامنه‌ها

۶- ایجاد سیستم‌های زهکشی سطحی و عمیق و احداث دیواره‌های مصنوعی در دو طرف رودخانه و همچنین آموزش روستائیان در مورد نوع استفاده از خاک، نوع کشت و آبیاری از جمله عواملی هستند که می‌تواند به پایداری دامنه‌هایی که دارای پتانسیل لغزش هستند، کمک کند. ۷- در مناطقی که

با خطر خیلی زیاد و زیاد مشخص شده‌اند، باید مطالعات پایداری شیب‌ها برای احداث سازه‌ها صورت گیرد و سازه‌های متمرکز باید در محل‌های کم‌خطر تر احداث شوند. ۸- انجام ارزیابی‌های کامل سایت و مشورت با مهندسان ژئوتکنیک برای تعیین مناسب‌ترین اقدامات زهکشی و پوشش گیاهی برای یک منطقه خاص مهم است. با اجرای این اقدامات در ارتباط با دیوارهای حائل یا تکنیک‌های تراس، می‌توان پایداری کلی شیب‌ها را تا حد زیادی بهبود بخشید و وقوع و تأثیر زمین لغزش را به حداقل رساند ۹- برای جلوگیری از این گونه حوادث از یک روش مناسب برای پایداری سازی توده‌های لغزنده لازم و ضروری است، با شکست‌ها و لغزش‌های کوچک بر روی دامنه شیب‌دار این پلکان‌ها بدون خطر بر روی سکوها فرود می‌آیند.

۱۰- انجام عملیات مربوط به کاهش آب زیرزمینی، زهکشی، جلوگیری از نفوذ آب، مقاوم سازی سکوه‌های دامنه‌ای، احداث دیواره حائل، جلوگیری از تخریب گونه‌های گیاهی و کاشت گیاهان محلی، جلوگیری از فعالیت‌های نادرست انسانی، جلوگیری از گسترش مناطق مسکونی و یا مراکز عمومی در مناطق مستعد مخصوصاً مناطق با پهنه‌های خطر بالا قبل از پایدارسازی آن‌ها جلوگیری شود، در نهایت ارائه‌ی یک الگوی مناسب برنامه‌ریزی برای مقابله با بحران‌های ناشی از بلایای طبیعی که می‌تواند اثرات قابل توجهی داشته باشد.

سیاسگزاری:

بدینوسیله از دانشگاه تهران برای در اختیار گذاشتن گزنت طرح نوع ششم، از همه کارگران، کارشناسان و متخصصین ارجمند که در انجام امور اجرایی این مطالعه و دورانی که با ارزیابی خود در راستای بهبود آن به ما یاری رساندند سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- Adition, A., Kubota, T., Shinohara, Y. (2018). Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia", *Geomorphology*, Vol. 318, pp 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.06.006>
- Arabameri A, rezaei K, sohrabi M, shirani K. (2019). Evaluating of Quantitative Geomorphometric Parameters Efficiency in Increasing the Accuracy of Landslide Sensitivity Maps (Case Study: Fereydoun Shahr Basin, Isfahan Province) . *Journal of Watershed Management Research*, 9 (18) :220-232 (In Persian). <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-821-fa.html>
- Aznar-Sánchez, José A., Luis J. Belmonte-Ureña, María J. López-Serrano, and Juan F. Velasco-Muñoz. 2018. Forest Ecosystem Services: An Analysis of Worldwide Research. *Forests*, 9(8): 453. <https://doi.org/10.3390/f9080453>
- Chalise, D., Kumar, L., Kristiansen, P. (2019). Land Degradation by Soil Erosion in Nepal: A Review. *Soil Syst*, 3, 12. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3010012>
- Donnini, M., Napolitano, E., Salvati, P., Ardizzone, F., Bucci, F., Fiorucci, F., Santangelo, M., Cardinali, M., Guzzetti, F. (2017), "Impact of event landslides on road networks: a statistical analysis of two Italian case studies", *Landslides*, Vol. 14, pp 1521-1535. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0829-4>
- Fazeli Shahrodi, E., Hosseini, S. A. (2012). The study of the factors of landslide occurrence in forest watershed, Conference of the Engineering Geological and Environmental Society of Iran. (In Persian) <https://civilica.com/doc/232908/>
- Gourabi B., Ramadan E. and Hoda E. (2009). Landslide and ways to stabilize it. *Amash Mohit Journal*, Vol 2, NO 7, pp. 129-139. (In Persian) <https://sid.ir/paper/130428/fa>
- Hayati, E., Majnounian, B., Abdi, E., Dastranj, A. and A. Nazari Samani. (2012). Applying Landslide Hazard Zonation in Forest Road Network Design. *Journal of Forest and Wood Products (JFWP) (Iranian Journal of Natural Resources)*, 65(1), 19-32. (In Persian) <https://sid.ir/paper/162927/en>
- Huang, F., Chen, J., Du, Z., Yao, C., Huang, J., Jiang, Q., Chang, Z., Li, S. 2022. Landslide Susceptibility Prediction Considering Regional Soil Erosion Based on Machine-Learning Models. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, 9, 377. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060377>.

- Jarjani A, akbari H, Hosseini S A, Abdi O. Investigation of Landslide Ranger Zoning using Analytical Hierarchy Process in GIS Environment (Case Study: Azadshahr Kohmian Forestry Design). *Journal of Watershed Management Research*, 9 (18) :197-207. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-883-fa.html>
- Khan, H., Shafique, M., Khan, MA., Bacha, MA., Shah, SU., Calligaris, C., (2019), "Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan", *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, Vol. 22(1), pp 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.004>
- Khetkeh A, hosseini S A, abdie E, ahmadauli K, koochi S. (2021). Landslide Hazard Zoning by Density Area Model and Hierarchical Analysis to Assess the Pathway Designed for the Chellir District in the Khayrud Forest. *Journal of Watershed Management Research*, 12 (23) :273-284. (In Persian) <http://dx.doi.org/10.52547/jwmr.12.23.273>
- Kouhpeima, A., & Feiznia, S. (2019). Investigation of factors affecting landslide and their susceptibility zoning in Latyan catchment. *Journal of Range and Watershed Management*, 71(4), 1073-1083. (In Persian) <https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.235737.1141>
- Lin, L., Chen, G., Shi, W., Jin, J., Wu, J., Huang, F., Chong, Y., Meng, Y., Li, Y., Zhang, Y. 2022. Spatiotemporal Evolution Pattern and Driving Mechanisms of Landslides in the Wenchuan Earthquake-Affected Region: A Case Study in the Bailong River Basin, China. *Remote Sens*, 14, 2339. <https://doi.org/10.3390/rs14102339>
- Nasiri, V., Belou, M., Darvishsefat, A.A., Griess, V.C., Maftai, C., Waser, L.T. 2023. Mapping tree species composition in a Caspian temperate mixed forest based on spectral-temporal metrics and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geofomation*, 116: 103154. (In Persian) <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103154>
- Nasiri, V., Sadeghi, S.M.M., Bagherabadi, R. et al. 2022. Modeling wildfire risk in western Iran based on the integration of AHP and GIS. *Environ Monit Assess* 194, 644 (2022). (In Persian) <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10318-y>
- Raftnia, N., Mohammad Kazem, K., Tawfiq, A. (2009). Investigating the causes of landslides in Glendrud forest: a case study series 3 of watershed 48. *Quarterly Journal of Natural Resources Sciences and Techniques*, 6th Saas, No. 1. (In Persian) https://1jstnr.chalous.iau.ir/article_544351.html
- Yaghoubzadeh, M., Salmanmahiny, A., Mikaeili Tabrizi, A., Danehkar, A., & Moslehi, M. (2021). Prioritizing Environmental Hazards of Mangrove Forests in Hormozgan Province. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(30), 69-82. (In Persian) <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.34699.1675>

Spatial Assessment of The Sensitivity of Landslides Occurrence and Their Correlation With The Forest Road Network (Case study: Ramsar County)

Nima Shafiee kigasari¹, Seyed Ata O. Hosseini² and Hamid Reza Pourghasemi³

1 - Ph.D. Candidate of Forest Engineering, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran

2 - Professor, Forest Engineering, Forestry and Forest Economics Dept., Natural Resources Faculty, University of Tehran (Corresponding author: at.hosseini@ut.ac.ir)

3 - Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University

Received: June, Accepted: August,

Extended Abstract

Introduction and Objective: Landslides are among the environmental hazards that annually cause significant human and financial losses in extensive mountainous regions of our country. Therefore, identifying the important and influential factors in the occurrence of this phenomenon can be used as a practical tool to reduce potential damages. Consequently, recognizing the environmental factors affecting the occurrence of landslides in forest road networks is of great importance. Due to its mainly mountainous topography and extensive tectonic activity, Ramsar County has a natural potential for widespread landslides within the communication network area. The objective of this study is to assess the susceptibility of landslide occurrence in the Ramsar County area by considering influential factors, especially forest road networks, and utilizing Geographic Information System (GIS) capabilities.

Materials and Methods: To achieve this goal, the locations of landslides were determined using field studies, historical reports, and Google Earth images. A total of 95 landslides were identified in the region, which were divided into two groups for modeling (70%) and validation (30%). Sensitivity analysis of landslide occurrence was carried out based on criteria such as slope, slope direction, land use, distance from residential centers, terrain curvature, precipitation, temperature, erodibility, elevation, vegetation cover density, lithological units, soil texture, drainage density, distance from roads, and topographic wetness index. Land cover density and vegetation greenness were calculated using 16-day products from Landsat 8 satellite in Google Earth Engine, and the final output was calculated using weighted regression methods in GIS and Excel software. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves were employed for model evaluation and validation.

Results: The most significant factors affecting landslide susceptibility include soil type, slope of the terrain, vegetation cover, geology, hydrogeological flows, topography, precipitation, and communication lines. Susceptibility zones and landslide density are more pronounced in peripheral areas of transportation corridors. The construction of extensive structures, side effects of road construction, and the disruption of natural terrain balance for road construction and expansion have led to continuous occurrences in these areas. The correlation of parameters influencing landslide occurrence with the landslide distribution layer indicates that approximately 76% of landslides have occurred in slopes ranging from 11 to 38 degrees. Erosion of slopes by high-velocity runoff flows has caused more than 63% of landslides to occur within 500 meters of watercourses. Alongside the three main factors of soil type, natural slope, and slope erosion, landslide occurrence is influenced by road reconstruction and development without considering slope stability principles. More than half of the observed landslides in the area have occurred in a sequence of rock, shale, sandstone, volcanic rock, accompanied by coal layers. The discontinuity of the landslide layer with the distance from the road indicates that landslide occurrence up to a distance of 400 meters from the road has been due to direct effects of road construction and embankment activities, disrupting the balance of slopes adjacent to the road, gradually decreasing with the distance from the main road. The results show that the Frequency Ratio model provides an acceptable accuracy with an area under the curve (AUC) of 0.76 for landslide susceptibility mapping. The final susceptibility map indicates that class 5 with very high susceptibility covers 13.06% of the total area, class 4 with high susceptibility covers 16.35%, class 3 with moderate susceptibility covers 22.32%, class 2 with low susceptibility covers 27.46%, and class 1 with very low susceptibility covers 20.79%. Consequently, 31.79% of the total area is at risk of severe landslides. Considering the final map and the close relationship between road presence and landslide occurrence, it can be stated that the northwestern and eastern forest roads of Ramsar County are more exposed to landslide occurrence.

Conclusion: It appears that removal of vegetation cover, alteration of watercourse routes, modification of natural terrain slopes, and excavation of soils and rocks for road construction in the area have led to landslide occurrences around forest roads. The marginal areas of transportation corridors show a significant discrepancy in susceptibility coefficients, highlighting the potential importance of landslide occurrence in these regions. It can be concluded that providing appropriate recommendations and strategies to reduce landslide risks, improving area management, and implementing preventive measures in this region are highly necessary. This study demonstrates that through accurate analyses and alignment with environmental conditions, effective measures can be taken to reduce the effects of landslides and enhance the stability of operational areas. Therefore, a combination of geological, hydrogeological, topographic, and geographical information analyses can be used as an effective tool for studying, predicting, and managing landslide risks in mountainous regions.

Keywords: Zoning, Road, Landslide, Statistical Methods, Modeling.