

Research Paper

Spatial Assessment of the Sensitivity of Landslide 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. Student of Forest Engineering, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

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

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

Received: 1 August, 2023

Accepted: 9 December, 2023

Extended Abstract

Background: 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 damage. 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.

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, and 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 the 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: Landslide, Modeling, Road, Statistical Methods, Zoning

How to Cite This Article: Shafiee kigasari, N., Hosseini, S. A., & Pourghasemi, H. R. (2024). Spatial Assessment of the Sensitivity of Landslide Occurrence and their Correlation with the Forest Road Network (Case study: Ramsar County). *J Watershed Manage Res*, 15(1), 63-77. DOI: [10.61186/jwmr.15.1.63](https://doi.org/10.61186/jwmr.15.1.63)

مقاله پژوهشی

ارزیابی حساسیت پذیری وقوع زمین لغزش و همبستگی آن با شبکه جاده‌های جنگلی
(مطالعه موردی: شهرستان رامسر)نیما شفیعی 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، تهران، ایران
۲- استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل دانشگاه تهران، تهران، ایران، (نویسنده مسوول: at.hosseini@ut.ac.ir)
۳- استاد بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۵/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۱۸
صفحه: ۶۳ تا ۷۷

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: زمین لغزش‌ها از جمله مخاطرات محیطی است که هر ساله موجب خسارات زیاد جانی و مالی در قسمت‌های وسیعی از نواحی کوهستانی کشورمان می‌شود، از این رو شناسایی عوامل مهم و مؤثر 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 مؤثر 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 فرایندها و تجزیه تحلیل داده‌ها در محیط Excel و نرم‌افزار ArcMap انجام شد. همچنین به‌منظور ارزیابی و اعتبارسنجی 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 به‌وقوع پیوسته است. تطبیق پارامترهای مؤثر بر وقوع زمین لغزش با لایه پراکنش زمین‌لغزش‌ها 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 زمین لغزش، 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 زمین لغزش رخ داده در منطقه در تناوبی از سنگ، شیل، ماسه سنگ، سنگ چوش، همراه با لایه‌هایی از زغال رخ داده‌اند. قطع لایه زمین‌لغزش رخ داده با طبقات فاصله از جاده نشان داده رخ داد زمین‌لغزش تا فاصله ۴۰۰ متری از جاده به‌دلیل تأثیر مستقیم عملیات راهسازی و ترانشه‌زنی در به هم زدن تعادل دامنه‌های مشرف به جاده بوده است، به‌گونه‌ای که با دور شدن از جاده اصلی مساحت زمین لغزش‌ها به‌تدریج 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 به‌خود 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 زمین‌لغزش هستند.

نتیجه‌گیری: به‌نظر می‌رسد حذف پوشش گیاهی، تغییر مسیر آبراهه، تغییر شیب طبیعی زمین، برداشت خاک‌ها و سنگ‌ها برای ساخت جاده در منطقه باعث بروز زمین لغزش‌ها 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 به‌منظور کاهش آثار زمین‌لغزش‌ها و افزایش پایداری مناطق اجرایی کرد. از این رو، ترکیبی از تحلیل‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، توپوگرافی و اطلاعات جغرافیایی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای مطالعه، پیش‌بینی و مدیریت ریسک زمین‌لغزش‌ها در مناطق کوهستانی استفاده شود.

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

مقدمه

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

زمین‌لغزش 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

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 حساسیت‌پذیری، منطقه به پنج طبقه بسیار کم تا بسیار بالا طبقه‌بندی شد (Adition et al., 2018).

دونینی و همکاران (Donnini et al., 2017) 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 زمین‌لغزش 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 بررسی شده، عوامل متعددی در احتمال وقوع زمین‌لغزش مؤثر هستند که می‌تواند 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 زمین‌لغزش 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 خسارات 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 زمین‌لغزش 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 زمین‌لغزش، از جمله فاصله از رودخانه‌ها، ارتفاع، شیب، بارندگی، خصوصیات خاک‌شناسی و زمین‌شناسی، با دقت بررسی و تحلیل شده‌اند. این نوآوری در این است که تحلیل چندین عامل مهم به‌صورت همزمان و با توجه به تأثیر ترکیبی آن‌ها بر وقوع زمین‌لغزش 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 تأثیر آن‌ها بر وقوع زمین‌لغزش استفاده شده است. این نوآوری نه‌تنها به شناخت بهتر اثرات

(Yaghoubzadeh et al., 2021). زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی، همواره توجه محققین و سیاست‌گذاران را به‌خود جلب کرده است (Nasiri et al., 2022). زمین‌لغزش یکی از پدیده‌های مورفودینامیکی است که بیش‌تر در مناطق کوهستانی تحت‌تأثیر 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., 2019; Huang et al., 2020). پیامدهای دیگر زمین‌لغزش شامل وقوع سیلاب و آلودگی آب است که به درختان و حیات‌وحش جنگل آسیب می‌رساند (Fazeli Shahrodi and Hosseini, 2012).

در جنگل‌های هیرکانی شمال، زمین‌لغزش 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 (Nasiri et al., 2022) در پژوهشی با استفاده از عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش شامل: شیب، جهت شیب، شبکه جاده‌ها، نوع خاک، خطوط گسل و آبراهه‌ها به‌همراه اطلاعات میدانی مناطق حساس به زمین‌لغزش را شناسایی کردند. اولویت‌بندی متغیرها بر اساس روش تحلیل سلسله‌مراتبی انجام و بر اساس وزن‌های حاصل پهنه‌بندی زمین‌لغزش انجام شد. نتایج نشان داد که ۱۰/۸۹ و ۲/۳۷ درصد از منطقه به‌ترتیب خطر زیاد و خیلی زیاد به وقوع زمین‌لغزش دارد. در مطالعه دیگر، رافت‌نیا و همکاران (Raftnia et al., 2009) به بررسی علل وقوع پدیده زمین‌لغزش و پهنه‌بندی خطر وقوع آن در جنگل‌های گلندرد 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 زمین‌لغزش‌ها دارند. حیاتی و همکاران (Hayati et al., 2012) به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به‌منظور استفاده کاربردی در طراحی شبکه جاده جنگلی در بخش بهارین جنگل خیرود پرداختند. در این مطالعه به‌منظور 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 (Khan et al., 2019) در مطالعه‌ای به ارزیابی حساسیت خطر زمین‌لغزش 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 زمین‌لغزش‌ها دارند.

ادیتیان و همکاران در مطالعه‌ای در منطقه آمبون اندونزی به مقایسه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک و شبکه عصبی مصنوعی

زمین لغزش و ارتباط این مناطق با شبکه جاده‌های جنگلی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

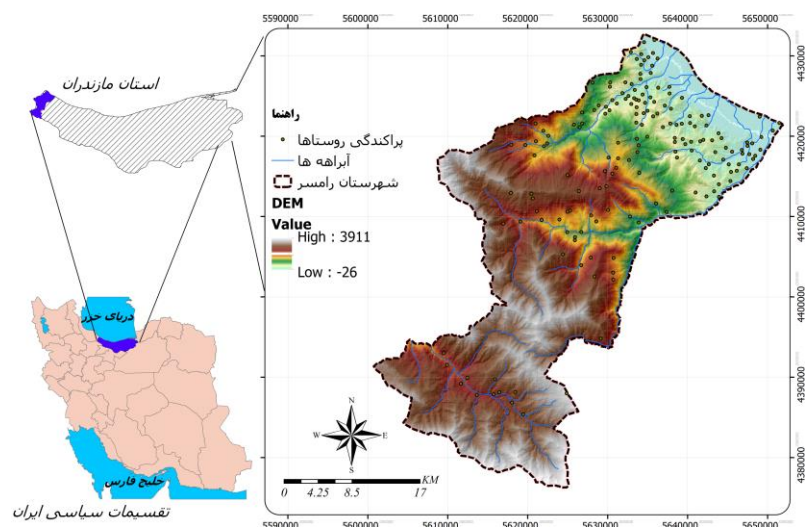
شهرستان رامسر دارای ۲ شهر به نام‌های رامسر با مساحت ۲۳/۲ کیلومترمربع و کتالم و سادات شهر با مساحت ۱۸/۷ کیلومترمربع است. منطقه رامسر از نظر موقعیت جغرافیایی در ۵۰ درجه و ۴۴ دقیقه ۴۸ ثانیه الی ۵۰ درجه و ۲۵ دقیقه و ۳۴ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۷ دقیقه ۴۰ ثانیه الی ۳۶ درجه و ۴۷ دقیقه ۴۶ ثانیه عرض شمالی 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.

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 خسارات 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 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



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

توپوگرافیک، دما، فرسایش، تپ اقلیمی، نیمرخ ارتفاعی و تراکم زمین لغزش‌ها) می‌باشد. به منظور محاسبه تراکم و میزان سبزی پوشش گیاهی از پروداکت ۱۶ روزه ماهواره لندست ۸ در محیط سامانه گوگل ارث انجین استفاده گردید. اطلاعاتی هم چون (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 به دست 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

تحقیق حاضر، با توجه به ماهیت مسئله و موضوع مورد بررسی، از نوع تحقیقی و 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 اطلاعات جغرافیایی بپردازد. 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

فاقد لغزش منطقه مورد مطالعه تعیین و نهایتاً نسبت فراوانی برای هریک 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 موردنظر به ۵ کلاس رتبه‌بندی 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 قالب 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 Curve ROC استفاده گردید، بدین‌صورت 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 به‌روش ROC هرچه سطح زیر منحنی بیشتر باشد دقت مدل بیشتر است که میزان آن بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است. به‌طورکلی تقسیم‌بندی ۰/۹-، ۱، عالی، ۰/۹-۰/۸، خیلی خوب، ۰/۸-۰/۷، خوب، ۰/۷-۰/۶، متوسط و ۰/۶-۰/۵، ضعیف را برای آن ارائه کرده‌اند. به‌منظور بررسی رابطه هم‌خطی (همبستگی زیاد یا کم) بین متغیرهای مستقل ابتدا لایه‌های رستری طبقه‌بندی نشده با زمین لغزش‌های Terrain ارزش‌گذاری شد، سپس مقادیر ارزش‌گذاری شده به‌صورت فایل اکسل وارد محیط نرم‌افزار SPSS شده و با استفاده از ابزار Linear Regression نسبت به آنالیز همبستگی پرداخته و در ادامه بر همین اساس معیارهای میزان

در آن سلول به‌سمت بالا مقعر است. مقدار صفر نشان می‌دهد که سطح خطی است. انحنا ی 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 و 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) به‌ترتیب از سازمان زمین‌شناسی، سامانه اوپن استریت مپ (<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 به‌صورت ۳۰ متری می‌باشد و بیشتر متغیرهای حاصله همچون جهت شیب، شیب، آبراهه، انحنا ی سطح، انحنا ی نیمرخ و رطوبت توپوگرافیک از این متغیر به‌دست 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 به‌صورت ۳۰ متری در نظر گرفته شد.

به‌منظور تعیین همبستگی بین نقاط لغزشی و هریک 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 هریک 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، کمی کردن 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 فرآیندها و تجزیه تحلیل داده‌ها در محیط Excel و نرم‌افزار (ArcMap) انجام شد.

روش نسبت فراوانی (FR)^۳: 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

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 می کند و در عین حال با معیارهای تحمل و عامل تورم واریانس سازگاری دارد، بدین ترتیب تضمین کننده اعتبار و مؤثریت نتایج به دست آمده از مدل سازی می باشد.

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 فرایند مدل سازی مؤثر 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 داده ها و

جدول ۱- معیارهای انتخابی جهت پهنه بندی حساسیت پذیری و وقوع زمین لغزش با روش وزنی

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

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

نتایج و بحث

در منطقه مورد مطالعه، اغلب رخدادهای زمین لغزش در نزدیک رودخانه ها مشاهده شد که رابطه معکوسی با فاصله گرفتن از آنها وجود دارد. نتایج حاصل از به کارگیری روش هم پوشانی مطابق با جدول شماره ۲ نیز مبین این واقعیت است که واحدهایی با فاصله کمتر از ۲۵۰ متری از رودخانه بیشترین وزن را به خود اختصاص داده اند.

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 می باشند.

تحلیل عوامل مؤثر بر حساسیت زمین لغزش نشان می دهد که نوع خاک، شیب زمین، پوشش گیاهی، زمین شناسی، جریان های 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 لایه ها و سنگ ها، جریان های 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 آب رسانی منطقه، عواملی هستند که در ارتباط با زمین لغزش تأثیر گذارند. بررسی و تحلیل نتایج نقشه های رستری (شکل های ۲ تا ۴) که عوامل مؤثر در حساسیت پذیری زمین لغزش های منطقه را با استفاده از مدل نسبت فراوانی نشان می دهند، که به دلیل عدم تفاوت پذیری جهت شیب در زمین لغزش های 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 می باشد؛ در منطقه مورد مطالعه چندین گسل فرعی وجود دارد که به دلیل فاصله نسبتاً کم از موقعیت زمین لغزش ها و نیز از ارتفاعات و طبعاً دامنه های لغزش پذیر، تأثیر نسبتاً بیشتری از این عامل در زمین لغزش در مقایسه با سایر

عوامل دیده می شود. با توجه به تراکم لغزش ها 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 شکل های ۲ الی ۴)، دامنه های 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 دامنه های دیگر مواد هوازده بیشتر فراهم می کند (جدول ۲ و شکل های ۲ تا ۴)، و کاربری زمین به صورت باغات به طریق افزایش وزن ناشی از رشد درختان در باغات و افزایش تنش برشی دامنه ها مناطق مستعد برای زمین لغزش است. واحدهای سنگی مرکب از سنگ های ولکانیکی و توفی (جدول ۲ و شکل های ۲ تا ۴)، طبقات شیب ۳۸-۲۰ درصد (جدول ۲)، و دیگر عوامل به ترتیب بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش داشته اند.

بر طبق نتایج خطوط ارتباطی و جاده های موجود در جدول ۲ و نقشه نهایی (شکل ۶) می توان چنین برداشت کرد که با تغییر هندسه شیب دامنه ها، حذف تکیه گاه جانبی بر اثر تنش های انتقالی زمین در رخداد زمین لغزش های منطقه مؤثر است. بررسی نقشه بارندگی منطقه و نتایج حاصل از وزن های به دست آمده (جدول ۲) در هر طبقه از بارش نشان می دهد، که نقاط با بارش بیشتر، کمتر دچار لغزش شده اند. یعنی رابطه بارش با حرکات لغزش یک نوع رابطه معکوس است، و دلیل آن نحوه توزیع مکانی بارش است و می توان آن را با رابطه بارش و ارتفاع توجیه کرد. بدین معنی با افزایش ارتفاع منطقه، متوسط بارش سالانه آن نیز افزایش می یابد اما دیگر شرایط لازم برای وقوع زمین لغزش با افزایش ارتفاع و شیب از بین می رود. یعنی در ارتفاعات و شیب های تند جنس سازندها سخت شده و حرکات از حالت لغزشی به ریزش تغییر می یابد

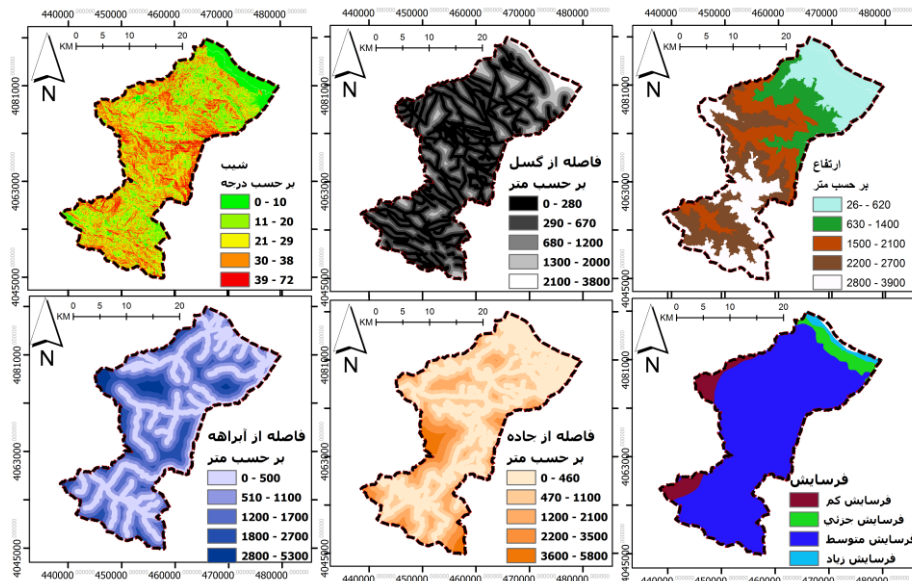
1- Topographic wetness index

2- Erosion Potential Model

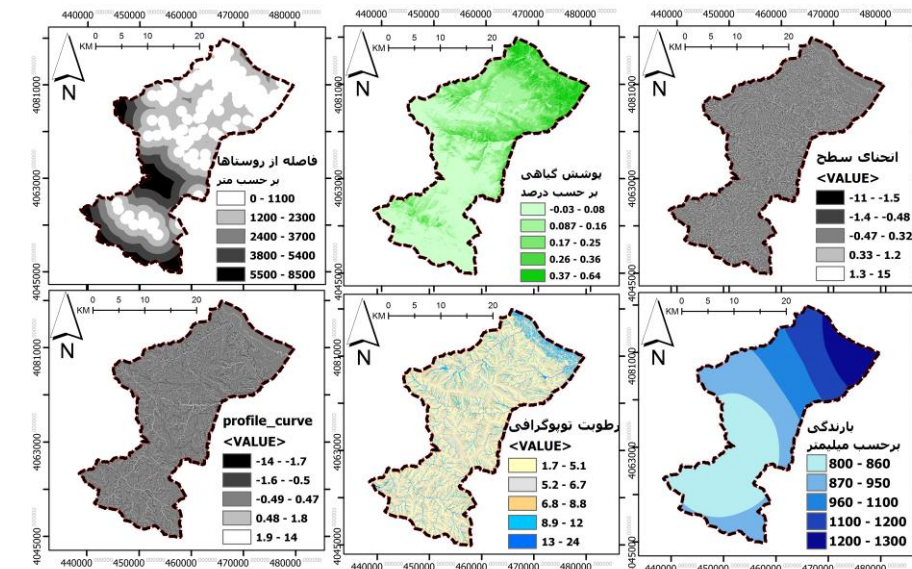
3- Frequency ratio models

(جدول ۲). نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که خاک‌های با نفوذپذیری زیاد بیشترین وزن را به‌خود اختصاص داده‌اند. چنانچه اگر نفوذپذیری خاک زیاد باشد باعث کاهش مقاومت

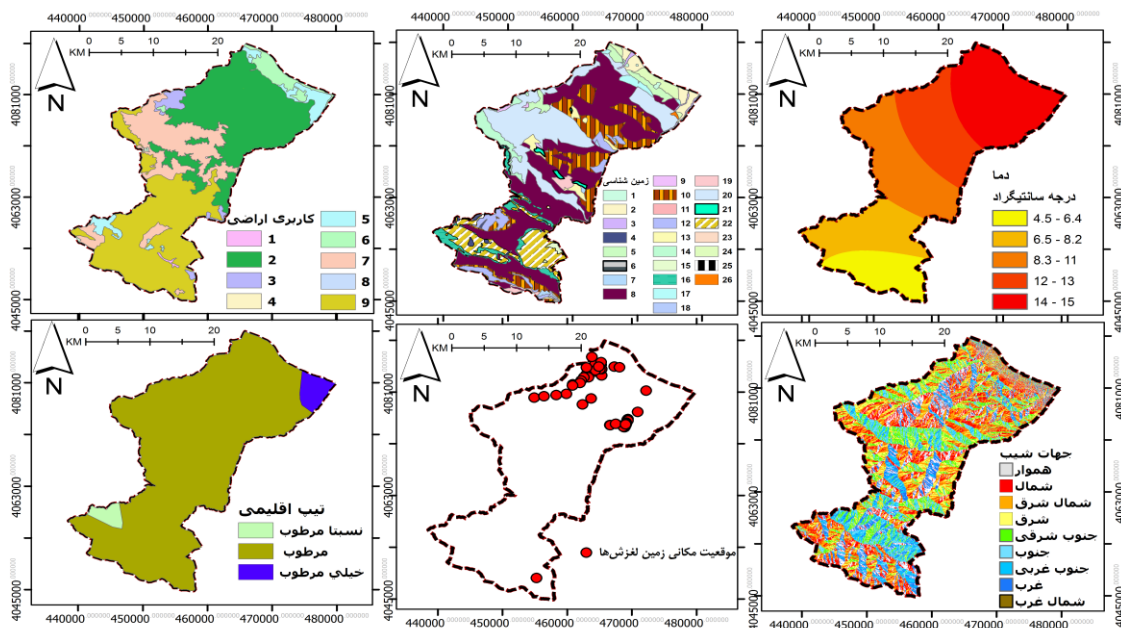
برشی و افزایش تنش برشی مواد روی دامنه می‌شود و سبب ناپایداری دامنه‌ها می‌گردد.



شکل ۲- طبقه‌بندی معیارهای انتخابی ارتفاع، فاصله از گسل، شیب، فرسایش، فاصله از جاده و فاصله از ابراهه
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 انحنای 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- طبقه‌بندی معیارهای انتخابی دما، زمین‌شناسی، 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

که بخش‌های مرتفع که متعلق 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 بریده‌اند و خزان کننده بودن رویش‌های جنگلی شهرستان رامسر، همراه با فقر پوشش گیاهی در ارتفاعات بیش از ۲۵۰۰ متر و وجود گسل و فرارگیری جاده‌های با اصول مهندسی و زیست مهندسی در ساخت و نگهداری مهم‌ترین عوامل مؤثر در احتمال حرکات دامنه‌ای می‌باشد. همچنین در جلگه ساحلی به دلیل بافت دانه‌ای همراه با وجود گسل‌های فعال و لرزه‌خیزی 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 مدل‌سازی استفاده گردید. نتایج نشان داد مدل FR با سطح زیر منحنی ۰/۷۶۰ دقت قابل قبولی برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش ارائه کرده است (جدول شماره ۳). بر اساس خروجی به‌دست آمده از وضعیت حساسیت وقوع زمین لغزش، بیشترین درصد مساحت به‌دست آمده به‌ترتیب 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 به‌خود اختصاص داده است.

در منطقه مورد مطالعه مطابق با جدول شماره ۲ بیشترین وزن به‌دست‌آمده 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 تشکیل‌دهنده، پوشش گیاهی و غیره کنترل می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در بررسی عامل زمین‌شناسی 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 لغزش‌ها هستند، بر همین اساس شبکه‌های ارتباطی در این مناطق بیشترین آسیب‌پذیری را از لحاظ وقوع زمین متحمل شده و خواهند شد. با توجه به نقشه پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری (شکل ۶) رویداد حرکات دامنه‌ای شهرستان رامسر، مشاهده می‌شود

جدول ۲- رتبه بندی واحدهای زیر معیارها از متغیرهای اصلی

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

متغیرهاVariables	طبقه‌بندی‌هاClasses	تعداد پیکسل‌های هر طبقه number of pixels	درصد پیکسل‌های هر طبقه percentage of pixels	تعداد پیکسل‌های لغزشی number of sliding pixels	درصد پیکسل‌های لغزشی percentage of sliding pixels	نسبت R 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	Regosol sands خاکهای رگوسل	91640	9.02	24	35.82	3.97
	Moist Litosol sands خاکهای لیتوسل مرطوب	160409	15.80	31	46.27	2.93
	Semi-Moist Litosol 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 باغی اراضی	1	2112	0.21	0	0.00
	Land with dense forest جنگل با تاج پوشش انبوه	2	21737	2.15	1	0.70
	Land with moderate forest cover جنگل با تاج پوشش متوسط	3	371963	36.72	62	2.52
	Lake, dam and reservoir دریاچه، مخزن سد و آب بندان	4	75	0.01	0	0.00
	Irrigated agriculture زراعت آبی	5	45028	4.45	1	0.34
	Urban area محدوده شهر	6	37689	3.72	2	0.80
	Good pastureland مراتع خوب	7	180153	17.79	0	0.00
	Poorly forested pastureland مراتع با تاج پوشش فقیر	8	84	0.01	0	0.00
فرسایش Erosion	Poorly forested pastureland مراتع با تاج پوشش متوسط	9	354103	34.96	1	0.04
	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
NDVI Normalized Difference Vegetation Index	Lands with high erosion اراضی با فرسایش زیاد	20956	2.08	0	0	0.00
	-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
زمین شناسی Geology	0.362 - 0.637	46658	4.57	6	8.96	1.96
	Developed land اراضی ساخته شده	1	1959	0.19	0	0.00
	Undifferentiated deltaic deposits آبرفت های دلتائی تفکیک نشده	2	21532	2.13	0	0.00
	Unstable present deltaic deposits آبرفت های سست عهد حاضر	3	5086	0.50	0	0.00

ادامه جدول ۲- رتبه‌بندی واحدهای زیر معیارها از متغیرهای اصلی

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

	0.00	0	0.42	4208	4	بازالتیت Basalt
	0.63	1.49	2.37	24053	5	پادگانه شنی قدیمی Old sandy beach ridges
	0.00	0	0.21	2175	6	تناوب قرمز به خاکستری، ماسه سنگ نازک تا متوسط، کنگلومرا و سنگ آهک Red to gray, fine to medium sand, conglomerate and limestone
	0.00	0	0.33	3383	7	تناوبی از سنگ ماسه، شیل، آهک ماسه ای خاکستری مایل به قرمز Alternation of sandstone, shale, grayish red sandy limestone
	2.23	80.60	36.15	366220	8	تناوبی از سنگ، فورش، شیل، ماسه سنگ، سنگ جوش، همراه با عدسی ها و لایه هایی از زغال، sandstone, igneous rock, with lenses and layers of coal
	0.00	0	0.26	2683	9	دامنه واریزه ای و سنگ ریزش Deposit fan and talus
	1.06	13.43	12.61	127792	10	دولومیت خاکستری روشن تا کرم Light gray to cream dolomite
	0.00	0	3.91	39650	11	سنگ آهک بودار خاکستری، همراه با یک عضو سنگ آهک مارنی تیره Well-layered grayish limestone
	0.00	0	1.69	17105	12	سنگ آهک چرت دار خوب لایه بندی شده خاکستری تیره همراه با میانلایه هایی از شیل و آهک Calcarenitic with a dark gray limestone member
	0.00	0	2.31	23371	13	سنگ آهک خاکستری تا کرم لایه نازک تا ضخیم، تا حدی با گره ها و لایه های چرت Gray to cream limestone, thin to thick layers, with nodules and cherts to some extent
	0.00	0	0.30	3080	14	سنگ آهک مارنی خاکستری مایل به سبز Greenish gray marly limestone
	0.00	0	3.60	36446	15	سنگ آهک و آهک گلی لایه بندی شده خاکستری Layered gray limestone with clay
	0.00	0	0.95	9642	16	سنگ آهک و دولومیت متوسط تا ضخیم لایه به رنگ خاکستری روشن تا کرم Layered gray limestone and dolomite, medium to thick layers, light gray to cream in color
	18.02	1.49	0.08	839	17	سنگ آهک، آهک مارنی و ماسه ای و شیل خاکستری تیره تا سیاه Dark gray to black limestone, marl, sandy shale
	0.00	0	1.03	10480	18	سنگ آهک، آهک مارنی و ماسه ای و شیل خاکستری تیره تا سیاه همراه با یک عضو ضخیم توده ای Dark gray to black limestone, marl, sandy shale with a thick mass member
	0.00	0	19.58	198402	19	سنگ جوش پلی میکتیک کمپکت ضخیم Thick poly-mictic igneous rock
	6.28	2.99	0.48	4819	20	سنگ های آتشفشانی خاکستری مایل به ارغوانی Gray to purplish volcanic rocks
	0.00	0	8.87	89891	21	سنگ های گدازه ای و آذرآواری خاکستری تیره تا سیاه با ترکیب بازیک تا میانه Dark gray to black glassy and tuffaceous rocks with basaltic to intermediate composition
	0.00	0	0.02	238	22	لاتکریت و بوکسیت Latakrit and boehmite
	0.00	0	1.84	18658	23	نهبشته های دریایی Marine sedimentary rocks
	0.00	0	0.02	185	24	نهبشته های ساحلی جوان Young coastal sedimentary rocks
	0.00	0	0.09	867	25	نهبشته های ساحلی قدیمی Old coastal sedimentary rocks
	0.00	0	0.04	363	26	واریزه و سنگ ریزش Alluvium and rock debris
فاصله از جاده Distance from the road	1.24	97.01	78.23	792610		0 - 460
	0.20	2.99	14.85	150416		470 - 1.100
	0.00	0	4.27	43213		1.200 - 2.100
	0.00	0	1.91	19307		2.200 - 3.500
	0.00	0	0.75	7581		3.600 - 5.800
رطوبت توپوگرافی TWI	0.98	38.81	39.58	401033		1.7 - 5.5
	1.10	44.78	40.54	410825		5.6 - 7.5
	0.75	11.94	15.98	161901		7.6 - 11
	1.15	4.48	3.91	39584		12_24
	1.52	19.40	12.75	129509		0 - 10
شیب Slope	1.55	37.31	24.00	243721		11_20
	0.96	26.87	28.04	284771		21 - 29
	0.55	13.43	24.42	247998		30 - 38
	0.28	2.99	10.79	109553		39 - 72
	0.00	0	0.60	6078		هموار Flat
جهت شیب Aspect	1.00	17.91	17.84	181131		شمال North
	1.38	23.88	17.26	175274		شمال شرق Northeast

ادامه جدول ۲- رتبه‌بندی واحدهای زیر معیارها از متغیرهای اصلی

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

	شرق East	140921	13.88	14	20.90	1.51
	جنوب شرقی Southeast	122147	12.03	11	16.42	1.37
	جنوب South	104354	10.28	3	4.48	0.44
	جنوب غربی Southwest	80689	7.95	2	2.99	0.38
	غرب West	88936	8.76	4	5.97	0.68
	شمال غرب Northwest	116022	11.42	5	7.46	0.65
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
	0 – 280	817130	80.65	55	82.09	1.02
فاصله از گسل Distance from the fault	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
	-11 - -0.68	471596	46.44	28	41.79	0.90
	Upwardly Convex					
انحنای سطح Surface curvature	-0.67 - 0.52	47732	4.70	3	4.48	0.95
	Upwardly Convex to Upwardly Concave					
	0.53 – 15	496224	48.86	36	53.73	1.10
	Upwardly Concave					
انحنای نیمرخ Profile curvature	-14 - -0.83	496253	48.87	34	50.75	1.04
	Upwardly Convex					
	-0.83 - 0.79	25152	2.48	0	0	0.00
	Upwardly Convex to Upwardly Concave					
بارندگی Precipitation	0.8 – 14	494147	48.66	33	49.25	1.01
	Upwardly Concave					
	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

جدول شماره 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	فاصله اطمینان مجانبی ۹۵٪ asymptotic confidence intervals	
			حد پایینی lower limit	حد بالایی upper limit
۰/۷۶۰	۰/۱۰۸	۰/۳۹	۰/۵۴۸	۰/۹۷۳

a. The assumption of non-parametric data

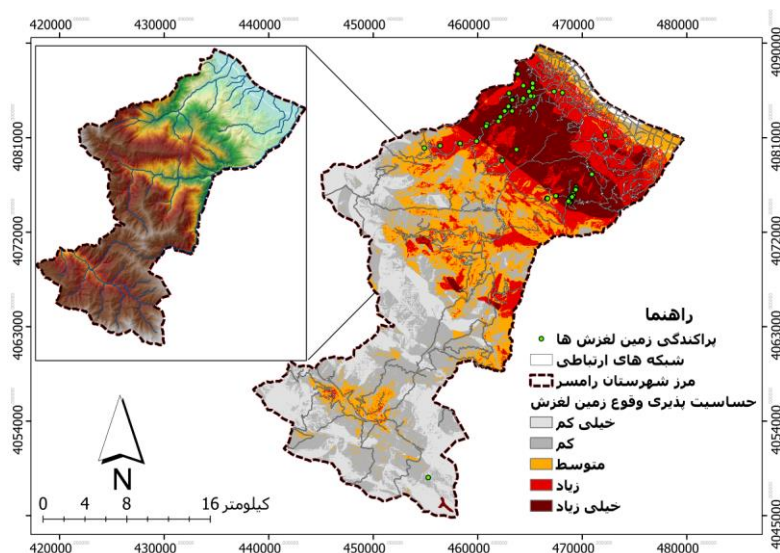
b. Zero assumption: the accuracy of the area under the curve = 0.5

^a. فرض غیر پارامتریک بودن داده‌ها^b. فرض صفر: صحت مساحت زیر منحنی = ۰/۵

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	9500.04451	خیلی زیاد Very High

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

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 به‌صورت 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 این‌حال این نیاز به تحلیل‌های دقیق‌تر و مشاهدات میدانی بیشتر را برجسته می‌کند تا به‌طور دقیق‌تر این ارتباط‌ها را تحلیل کرد.

نتایج و بحث

پراکندگی لغزش‌ها بسته به نوع حساسیت‌پذیری مولفه‌های طبیعی منطقه از لحاظ خاک، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، شیب، شرایط رطوبتی و عوامل دیگر می‌تواند متفاوت باشد. بر اساس نتایج مطالعه و تحلیل انجام شده، تأثیر جاده‌های جنگلی بر وقوع زمین لغزش در منطقه به‌عنوان 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 به‌طور 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

جاده‌ها با رخداد زمین‌لغزش رابطه و وابستگی مثبت دارند، به این معنا که وقوع زمین‌لغزش 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، فورش، شیل، ماسه‌سنگ، سنگ‌جوش، همراه با عدسی‌ها و لایه‌هایی از زغال، همچنین فرسایش دامنه‌ها به‌عنوان دو عامل اصلی وقوع خطر زمین‌لغزش شناخته شده‌اند. همچنین فاصله از جاده نیز از اهمیت زیادی برخوردار است، به‌طوری‌که نزدیکی به جاده‌های جنگلی باعث افزایش زمین‌لغزش‌ها در مناطق حاشیه‌ای این جاده‌ها شده است.

همچنین، مشاهده می‌شود که شیب دامنه‌ها و انحنای سطح و نیمرخ دیگر عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش هستند. شیب دامنه‌ها با مقدار بین ۵ تا ۳۰ درجه و انحنای سطح و نیمرخ در بازه‌های خاص می‌توانند به وقوع زمین‌لغزش 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 زمین‌لغزش دارند. به‌طور کلی، این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه به‌علت ترکیب متنوعی از عوامل زمین‌شناسی و اقلیمی به‌وقوع 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 زمین‌لغزش‌ها 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 توده‌سنگی، بارش و شرایط رطوبتی اثرات مستقیمی بر بی‌ثباتی دامنه‌ها به‌جای می‌گذارند.

پیشنهادهای

- ۱- بررسی آخرین وضعیت تمام مسیرها و جاده‌های ساخته شده و مورد بهره‌برداری با استفاده از تصاویر و عکس‌های هوایی موجود جهت مطالعه دقیق‌تر تخریب‌های محیط‌زیستی در منطقه مورد مطالعه
- ۲- افزایش کارایی و توان علمی کارشناسان اجرایی و تصمیم‌گیران در مورد پدیده زمین‌لغزش و مسائل اجرایی ۳- استفاده از سامانه سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به‌منظور شناسایی و کاهش هزینه‌های اجرایی ۴- آهک‌دهی در رس‌ها جهت کاهش خاصیت خمیری مناطق لغزشی ۵- استفاده از روش بارباکان جهت تخلیه آب به‌منظور پایداری نسبی دامنه‌های مؤثر 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.

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

این تحقیق نشان می‌دهد که مناطق با شیب بالاتر در منطقه مورد مطالعه از حساسیت بیشتری به زمین‌لغزش برخوردار هستند. افزایش شیب زمین باعث افزایش احتمال زمین‌لغزش می‌شود. لایه‌های بی‌نفوذ مانند شیل و مارن باعث انباشت آب و افزایش حساسیت مناطق به زمین‌لغزش می‌شوند. مناطق با بارندگی زیاد سریع‌تر به حالت اشباع می‌رسند و فشار منفذی در خاک افزایش می‌یابد. این شرایط نیز می‌توانند منجر به وقوع زمین‌لغزش در منطقه گردد. دامنه‌های غربی و میانی منطقه مورد مطالعه بیشترین رخداد زمین‌لغزش را نشان می‌دهند که به‌نوعی به‌دلیل رطوبت و بارندگی در این منطقه ایجاد شده است. نیمرخ ارتفاعی و انحنای زمین دو عامل مهم در شکل‌گیری زمین‌لغزش در منطقه بوده‌اند. این پارامترها به‌نوعی شیب‌های بالایی را ایجاد نموده که به‌طور طبیعی حساسیت بیشتری به زمین‌لغزش دارند. با توجه به نتایج تحقیق، مناطق با شیب‌های بالا و نیمرخ‌های ارتفاعی بیشتر احتمال زمین‌لغزش بیشتری دارند. رطوبت با توپوگرافی و خاک نیز به‌عنوان پارامترهای مهم در وقوع زمین‌لغزش 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 زمین‌لغزش می‌شود. به‌طور کلی، برای مدیریت و پیش‌گیری از زمین‌لغزش‌ها 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 زمین‌لغزش‌ها داراست و این حرکت دامنه‌ها سالیانه تبعات مالی فراوانی به محدوده مورد مطالعه وارد می‌سازند اما متأسفانه تا به امروز، به‌نظر می‌رسد تا حدودی بررسی‌ها مقطعی و بدون برنامه‌ریزی منسجم و کارآمد از سوی مسئولان ذی‌ربط انجام گرفته است. با توجه به توان بالای پارامترهای ژئومورفومتریک در تشخیص مناطق حساس به زمین‌لغزش استفاده از این پارامترها در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش توصیه می‌گردد (Arabameri et al., 2019). بسیاری از زمین‌لغزش‌ها کاملاً طبیعی هستند که به‌علت 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 زمین‌لغزش ایجاد کند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بعضی از عوامل از جمله لیتولوژی (جنس سنگ‌ها)، فرسایش دامنه‌ها، و فاصله از

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.

سپاسگزاری

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 داورانی که با ارزیابی خود در راستای بهبود آن به ما یاری رساندند سپاسگزاری می‌شود.

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 زمین‌لغزش را به حداقل رساند ۹- برای جلوگیری از این گونه حوادث از یک روش مناسب برای پایدارسازی توده‌ای 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، مقاوم‌سازی سکوها، دامنه‌ای، احداث دیواره حائل، جلوگیری از تخریب گونه‌های گیاهی و کاشت

References

- 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*, 318, 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: Fereydown 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, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., López-Serrano, M. J., & Velasco-Muñoz, J. F. (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*, 14, 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., & Hoda, E. (2009). Landslide and ways to stabilize it. *Amash Mohit Journal*, 2(7), 129-139 (In Persian). <https://sid.ir/paper/130428/fa>
- Hayati, E., Majnounian, B., Abdi, E., Dastranj, A., & Nazari Samani, A. (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., Hosseini, S. A., & Abdi, O. (2019). 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 (In Persian) <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-883-fa.html>
- Khan, H., Shafique, M., Khan, M. A., Bacha, M. A., Shah, S. U., & Calligaris, C. (2019). "Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan". *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 11-24. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.03.004>
- Khetkeh, A., Hosseini, S. A., Abdie, E., Ahmadauli, K., & Koohi, 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 Layan catchment. *Journal of Range and Watershed Managment*, 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, 23-39. <https://doi.org/10.3390/rs14102339>
- Nasiri, V., Beloiu, 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 Geoformation*, 116, 103154 (In Persian). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103154>
- Nasiri, V., Sadeghi, S. M. M., Bagherabadi, R., Moradi, F., Deljouei, A., & Borz, S. A. (2022). Modeling wildfire risk in western Iran based on the integration of AHP and GIS. *Environmental monitoring and assessment*, 194(9), 644 (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>