



Landslide Susceptibility Zonation in a 1:100,000 Geological Map (Case Study: Kiasar, Mazandaran Province)

Ruhollah Taghavi¹

M.A., Environmental Geology, Faculty of Environment and Energy, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

Alireza Jafarirad

Ph.D Geographical Information System, Faculty of Environment and Energy, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

Mohammad Sadegh Zangeneh

M.A., GIS, Agricultural Engineering System and Natural Resources Organization, Khuzestan Province

Ahmad KhaliliAvati

M.A., Hydrology, Payam Noor University, Abhar, Iran.

Saeb Taghavi

B.A., Geology, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran

Abstract

Landslides represent a significant natural hazard, causing substantial damage and economic losses worldwide. Accurate landslide susceptibility assessment is crucial for mitigating these risks. This study employs a Geographic Information System (GIS) and the Analytical Hierarchy Process (AHP) to investigate and map landslide susceptibility in the Kiasar 1:100,000 quadrangle, Iran. This study employed a comprehensive set of influencing factors to assess landslide susceptibility including geology, slope, aspect, precipitation, seismicity, faults and folds, distance to roads, distance to rivers, erosion, and land use. Among the selected criteria, precipitation and slope were assigned the highest weights of 0.27 and 0.22, respectively, reflecting their significant influence on landslide occurrence. Conversely, drainage and land use received the lowest weights of 0.034, indicating their relatively lesser impact. The study findings revealed that approximately 6% (151.68 square kilometers) of the total study area (2500 square kilometers) is classified as susceptible to landslides. This corresponds to 22% of the total area occupied by villages within the investigated region. Furthermore, field verifications confirmed that the main power transmission lines and primary oil pipelines are not exposed to landslide hazards. However, some mines within the study area were identified as being at risk. Within the study area, two industrial facilities – a bakery and a fruit preservation plant – were identified as being located within landslide-prone zones. The high correlation between historical landslide occurrences and the methodology employed in this research suggests that the adopted approach is well-suited for landslide susceptibility mapping in mountainous regions characterized by climatic and vegetation diversity.

Key words: Zonation, Landslide, Overlay, Kiasar, GIS, AHP

1. Corresponding Author: sajjadtaghavi821@gmail.com



پهنه‌بندی رخدادهای زمین‌لغزش در محدوده چهارگوش نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ (نمونه موردی: کیاسر، استان مازندران)

روح‌الله تقوی^۱

کارشناس ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

علیرضا جعفری راد

دکتری تخصصی سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

محمدصادق زنگنه

کارشناس GIS، سازمان نظام مهندسی کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، خوزستان، ایران

احمد خلیلی اواتی

کارشناس ارشد آب‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ابهر، ایران

صائب تقوی

کارشناسی زمین‌شناسی، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

چکیده

زمین‌لغزش یکی از انواع خطرناک پدیده‌های طبیعی است. این مخاطره طبیعی هر ساله در بسیاری از کشورها خساراتی به بار می‌آورد. ارزیابی دقیق خطر زمین‌لغزش جهت کاهش خسارات ضروری است. در این پژوهش به بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در نقشه چهارگوش ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر با استفاده از GIS و رویکرد AHP پرداخته شده است. در این مطالعه از لایه‌های اطلاعاتی که در وقوع زمین‌لغزش مؤثر هستند شامل زمین‌شناسی، شیب، جهت شیب، متوسط بارش سالیانه، زمین‌لرزه، گسل و محورچین، فاصله از راه، فاصله از رودخانه، فرسایش و کاربری اراضی استفاده شده است. از میان معیارهای انتخاب شده لایه متوسط بارش سالیانه و شیب به ترتیب با وزن ۰٫۲۷ و ۰٫۲۲ بیشترین امتیاز و اهمیت را در این پژوهش داشته و معیار کاربری اراضی با وزن ۰٫۰۳۴ کمترین امتیاز و اهمیت را داشته است. نتایج تحقیق نشان داد که ۶ درصد (۱۵۱٫۶۸ کیلومتر مربع) از مساحت کل منطقه (۲۵۰۰ کیلومتر مربع) در معرض خطر زمین‌لغزش قرار دارند که ۲۲ درصد از کل مساحت روستاهای منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود. همچنین با بررسی‌های میدانی انجام شده مشخص شد که خطوط اصلی انتقال نیرو و خطوط اصلی نفت در معرض خطر نبوده و تنها برخی معادن منطقه مورد مطالعه در خطر هستند. از کل کارخانه‌های صنعتی در منطقه دو کارخانه تولیدی خبازی و کارخانه حفاظت از فساد میوه در محدوده خطر زمین‌لغزش قرار دارند. با توجه به مطابقت زیاد زمین‌لغزش‌های به‌وقوع پیوسته در گذشته و روش استفاده شده در این تحقیق، نتایج نشان داده که این روش در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در نواحی کوهستانی و یا نواحی که تنوع اقلیمی و پوشش گیاهی دارند مناسب است.

کلمات کلیدی: پهنه‌بندی، زمین‌لغزش، هم‌پوشانی، کیاسر، GIS، AHP

مقدمه

زمین‌لغزش یکی از مخرب‌ترین و مخاطره‌آمیزترین پدیده‌های طبیعی موجود است (Das et al., 2022). این پدیده در سطح جهان هر ساله خسارات اقتصادی و اجتماعی عظیمی را به دنبال دارد (Haque et al., 2019; Arjmandzadeh et al., 2020). از آغاز قرن بیست و یک حدود ۱,۵ میلیون نفر تحت تأثیر رانش‌زمین و زمین‌لغزش قرار گرفته‌اند (Vakhshoori et al., 2019). در سطح جهان، زمین‌لغزش سالانه باعث مرگ حدود هزار نفر و خسارت مالی حدود چهار میلیارد دلار می‌شود (Chen et al., 2016a). زمین‌لغزش شامل حرکت انبوه خاک و سنگ در طول شیب است (Moresi et al., 2020). این پدیده نتیجه طیف گسترده‌ای از فرآیندهای ژئو-محیطی بوده که شامل عواملی نظیر: زمین‌شناسی، هواشناسی و انسانی است. زمین‌لغزش غالباً در دامنه‌های کوهستانی که تحت تأثیر پارامترهای مختلف و ناشی از بارندگی و زلزله است، رخ می‌دهد (Baharvand et al., 2020).

زمین‌لغزش‌های کم عمق توأم با جریان‌های آواری یکی از علل عمده تخریب سازه‌ها و زیرساخت‌ها و تلفات در مناطق کوهستانی و تپه ماهوری است که معمولاً توسط بارندگی‌های کوتاه مدت ولی شدید ایجاد می‌شوند (Roccati et al., 2021). در سال‌های اخیر تغییرات اقلیمی جهانی باعث رویدادهای شدید آب و هوایی شده که احتمال رخداد زمین‌لغزش را افزایش داده است (Zou et al., 2021). همچنین در برخی موارد فعالیت‌های انسانی می‌توانند با تغییر در آستانه تحمل دامنه‌ها در وقوع زمین‌لغزش، پویایی فرآیندهای طبیعی را تسریع کرده و خطرات بالقوه‌ای را برای مردم بوجود آورد (Moresi et al., 2020). تغییرات کاربری اراضی و مدیریت نادرست زمین می‌توانند خطر رخ داد زمین‌لغزش را افزایش دهد (Trigila et al., 2015).

بلایای هیدرولوژیکی نظیر سیل بیشترین سهم را از حوادث طبیعی (۵۱,۷ درصد) داشته و بلایای ژئوفیزیکی نظیر زلزله و زمین‌لغزش ۹,۱ درصد را شامل می‌شوند (Guha-Sapir et al., 2017). تهیه نقشه پهنه‌بندی رخداد زمین‌لغزش برای مدیریت صحیح کاربری و ارزیابی ریسک ضروری است (Roccati et al., 2021). همچنین با توجه به اینکه زمین‌لغزش می‌تواند مشکلات جدی را برای رفاه اجتماعی و اقتصادی ایجاد کند، لذا به منظور کاهش خطرات زمین‌لغزش در مناطق بخصوص کوهستانی تهیه نقشه‌های دقیق زمین‌لغزش به منظور اجرای برنامه‌های مدیریت ریسک هدفمند امری ضروری است (Psomiadis et al., 2020). طی سال‌ها اخیر بسیاری از سازمان‌های دولتی دنیا تلاش کرده‌اند با آموزش مردم برای درک بهتر اثرات شدید زمین‌لغزش و توسعه ابزارهای مناسب برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری، راه‌حلی برای کاهش پیامدهای فاجعه‌بار زمین‌لغزش بیابند (Chen et al., 2018). با توسعه سریع سیستم اطلاعات جغرافیایی در سه دهه گذشته، روش‌های مدل‌سازی مختلفی برای تحلیل فضایی زمین‌لغزش و نقشه‌برداری حساسیت زمین نسبت به رخداد زمین‌لغزش در سراسر جهان به کار گرفته شده است (Chen & Li, 2020).

در این پژوهش با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل تحلیل سلسله مراتبی به پهنه‌بندی زمین‌لغزش در محدوده چهارگوش نقشه زمین‌شناسی ورقه کیاسر پرداخته شد. منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود پدیده مخاطره‌آمیز زمین‌لغزش در وسعت بسیار زیاد که باعث رانش زمین‌های مسکونی و زراعی، مسدود شدن جاده‌ها، تخریب خطوط انتقال نیرو، گاز، آب، فاضلاب، معادن، کارگاه‌ها و کارخانه‌ها و به تبع آن ورود آلاینده‌های مختلف به محیط زیست می‌شود، مطالعه شد.

در این تحقیق سعی می‌شود تا مناطق مستعد زمین‌لغزش شناسایی گردد. بدین منظور از سیستم اطلاعات جغرافیایی به دلیل دقت و سرعت عمل بالا استفاده و مناطق شناسایی شده براساس درجه مخاطره‌آمیز بودن پهنه‌بندی می‌شوند.

پیشینه تحقیق

در سال‌های اخیر در مناطق مختلف جهان با توجه به اهمیت پدیده زمین‌لغزش مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است. ززولی و همکاران (۱۳۹۸) به مطالعه پهنه‌بندی احتمال وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات در محیط GIS در بخش رودبار الموت شرقی - استان قزوین پرداختند. ارزیابی نتایج با استفاده از شاخص احتمال تجربی نشان داد که هر دو مدل آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات در برآورد پهنه‌های خطر متوسط، زیاد و خیلی زیاد می‌توانند به خوبی با مقدار شاخص احتمال تجربی در شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه عملکرد مناسبی داشته باشند. در برآورد پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد مدل ارزش اطلاعات با مقدار شاخص احتمال تجربی در مقایسه با مدل آنتروپی شانون با مقدار شاخص احتمال تجربی ۷۲٪ از قابلیت بهتری برخوردار بوده است. انتظاری و کردوانی در سال ۱۴۰۱ به مطالعه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های مبتنی بر GIS و داده‌های راداری در شهرستان فریدون شهر پرداختند. محققین در این پژوهش از روش‌های آماری و تحلیل کارشناسی بر پایه GIS با استفاده از روش تداخل سنجی تصاویر راداری سنتینل ۱ استفاده کردند. نتایج علاوه بر نقشه مناطق حساس و پرخطر منطقه فریدون شهر، همپوشانی ۶۷ درصد از سلول‌های مناطق با خطر خیلی زیاد و زیاد در نقشه‌های پهنه‌بندی خطر با سلول‌هایی از نقشه جابجایی سطحی بدست آمده از پردازش تصاویر راداری سنتینل با بیشترین جابجایی را نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر احتمال زمین‌لغزش و یا خطر زمین‌لغزش در این مناطق باشد.

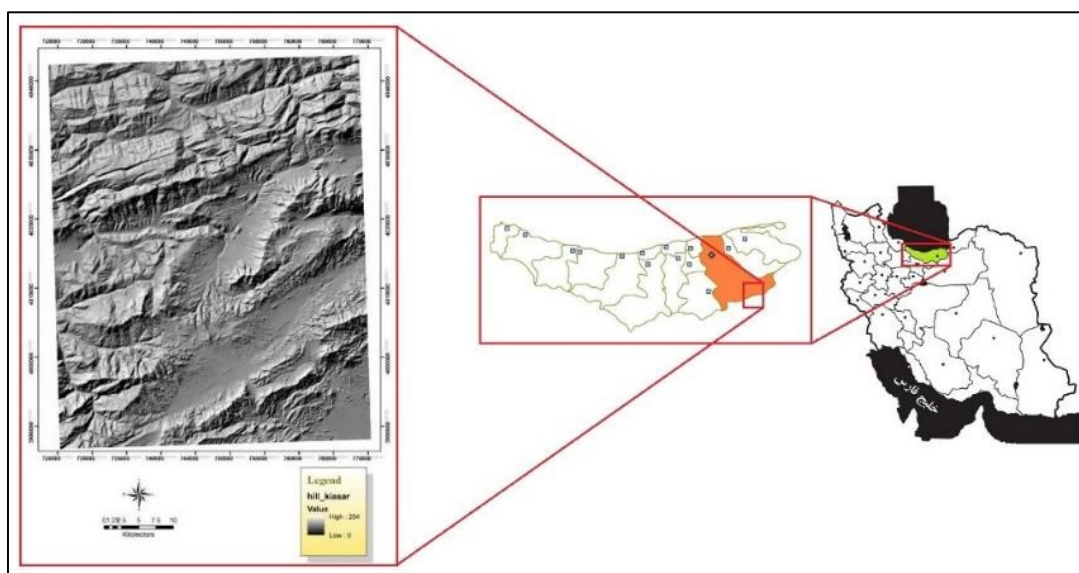
لجم اورک و پیری (۱۴۰۲) به مطالعه و بررسی رخدادهای زمین‌لغزش به کمک مدل AHP و GIS در شهرستان باغملک، استان خوزستان پرداختند. این محققین ۹ معیار مهم در رخدادهای زمین‌لغزش را در نظر گرفته و به کمک روش هم‌پوشانی نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش را تولید نمودند. نتایج نشان داد که مناطق با خطر زیاد ۴۰٫۱ درصد از منطقه را شامل می‌شود و همچنین حساس‌ترین قسمت‌های منطقه نیز جنوب غرب و قسمت‌هایی از شرق و غرب منطقه بوده و مقاوم‌ترین قسمت منطقه قسمت‌های شمال غرب و بخش‌هایی از شرق منطقه است. سجاتی و همکاران (Sejati et al., 2020) در پژوهشی به مطالعه پهنه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش در منطقه کندی شهر سولالوسی جنوب شرقی اندونزی پرداختند. این محققین منطقه مورد مطالعه را به گروه خطر بسیار کم، کم، متوسط و پرخطر و خطر بسیار زیاد تقسیم کردند. نتایج نشان داد میزان سازگاری نقشه زمین‌لغزش شهر کندی در مقایسه با شرایط واقعی ۷۵ درصد می‌باشد.

روکاتی و همکاران (Roccati et al., 2021) در پژوهشی دیگر به نقشه‌برداری حساسیت زمین‌لغزش مبتنی بر GIS در شمال ایتالیا پرداختند. محققین در این پژوهش براساس فهرست بیش از ۱۱۰ سال زمین‌لغزش‌های منطقه و قضاوت کارشناسان، از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده کردند. یافته‌ها نشان داد که اراضی در خطر زمین‌لغزش‌های احتمالی در آینده بخش بزرگی از مناطق در محدوده مورد مطالعه را شامل می‌شود. کوهنو و هیگوچی (Kohno, & Higuchi, 2023) به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در مجمع‌الجزایر ژاپن پرداختند. در این پژوهش محققین از روش

تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده کردند. نتایج نشان داد نقشه حساسیت به دست آمده مطابقت خوبی با توزیع زمین لغزش‌های رخ داده منطقه دارد و با همبستگی خوبی دارد.

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه ورقه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر با مختصات ۵۳ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۴ درجه طول خاوری و ۳۶ درجه تا ۳۷ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی می‌باشد، که در جنوب خاوری شهر ساری قرار داشته و بخشی از دو استان مازندران و سمنان را دربر می‌گیرد. بخش‌های شمالی پوشیده از جنگل بوده درحالی‌که بخش جنوبی آن کاملاً خشک و در حاشیه کویر قرار دارد. منطقه مورد مطالعه سراسر پوشیده از کوه‌های موازی با روند خاوری-باختری می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱: نقشه محدوده مورد مطالعه

ماخذ: نگارندگان

روش تحقیق

در این پژوهش ابتدا مطالعات دفتری و جمع‌آوری داده شامل گردآوری منابع و اطلاعات پایه نظیر گزارش‌های زمین‌شناسی، پایان‌نامه، وب‌سایت‌ها و غیره که در طول سال‌های گذشته توسط سازمان‌ها و ادارات مختلف در محدوده مورد مطالعه به انجام رسیده است، صورت گرفت. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل: نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه کیاسر، داده‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، داده‌های لرزه‌ای (سازمان زمین‌شناسی کشور)، اطلاعات بارش و نقشه پوشش گیاهی (سازمان هواشناسی و سازمان آبخیزداری استان مازندران) است. پس از تهیه داده‌های مورد نیاز رقومی سازی نقشه‌های پایه شامل نقشه توپوگرافی، زمین‌شناسی، نقشه هم‌بارش و زلزله صورت گرفت. سپس بعد از تهیه لایه‌های معیار امتیازبندی و وزن‌دهی عوامل مؤثر در زمین لغزش براساس نظرات کارشناسی و تحلیل سلسله مراتبی صورت گرفت. نهایتاً مناطق مستعد رخداد زمین لغزش با بازدید صحرایی در منطقه تطبیق داده شد.

بحث

روش پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به وسیله هم‌پوشانی شاخص

مهمترین مرحله در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، شناسایی عوامل مؤثر در وقوع آن می‌باشد که می‌تواند به روش‌های مختلفی صورت گیرد. یکی از این روش‌ها استفاده از تجربه یا قضاوت مهندسی است. در این روش فرد با استفاده از تجربه خود در زمینه مورد نظر مبادرت به تعیین عوامل می‌نماید. این روش کاملاً متکی بر قضاوت شخص بوده و چنانچه توسط افراد مجرب انجام بگیرد، می‌تواند نتایج مناسبی را نیز در بر داشته باشد. روش دیگر برای تعیین لایه‌های اطلاعاتی روش بینا است. در این روش با استفاده از نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها و مقایسه آن با نقشه عواملی که گمان می‌رود در ایجاد زمین‌لغزش سهمیم بوده‌اند، نقش آنها تعیین می‌شود. با توجه به موارد مذکور، در این پژوهش هر دو روش فوق در نظر گرفته شده است. یکی از کارآمدترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری مکانی مدل AHP بوده که اولین بار توسط الساعتی مطرح شده است. یکی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری‌های چند معیاره است. خصوصیت اصلی مدل AHP، مقایسه زوجی است. پس شناسایی هر کدام از معیارها براساس اهمیت نسبی و میزان تاثیر هریک از آنها در تعیین پدیده مورد نظر باید وزن خاصی داده شود. لازم به ذکر است که برای تایید صحت تعیین وزن معیارها از نرخ ناسازگاری استفاده خواهد شد. زمانی که نرخ ناسازگاری برابر یا بزرگتر از مقدار $0/1$ باشد، نشان از قضاوت‌های ناسازگار دارد و یا اگر کمتر از این مقدار باشد نشان دهنده سازگاری مناسب دارد (حجازی زاده و همکاران، ۱۴۰۰).

در این روش، عوامل مؤثر برای پهنه‌بندی با توجه به شرایط کلی منطقه، مشخصات زمین‌شناسی و هواشناسی و اقلیم شناسایی شده و به کمک نرم‌افزار ArcGIS این مشخصات به صورت لایه‌های مدل‌سازی شدند. بعد از مدل‌سازی لایه‌ها، با استفاده از استانداردهای موجود در منابع مختلف، لایه‌ها کلاسه‌بندی شد و در نهایت با تلفیق و ترکیب لایه‌ها و با وزن‌دهی به آنها، نقشه پهنه‌بندی ترسیم گردید. وزن‌دهی در روش هم‌پوشانی شاخص، وزن‌دهی نسبی می‌باشد. در این پژوهش، برای وزن‌دهی لایه‌های مؤثر از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (روش مقایسه زوجی) استفاده شده که مجموع وزن معیارها برابر ۱ می‌باشد. در روش مقایسه زوجی که توسط پروفیسور ساعتی ارائه گردیده شده، معیارها دوبه‌دو با هم مقایسه شده و میزان ارجحیت معیارها تعیین می‌شود. پس از آن با قراردادن معیارها در یک ماتریس با روش‌های مختلف (در این تحقیق از روش میانگین حسابی استفاده شده است) وزن معیارها محاسبه شده و نرخ ناسازگاری تعیین گردید. پس از محاسبه وزن نسبی لایه‌های مؤثر هم‌پوشانی لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS به کمک ابزار Weighted Sum انجام گرفت.



جدول ۱: مقایسه زوجی لایه‌های مؤثر به شکل ماتریسی

اراضی	کاربری	زمین لرزه	محور چین	گسل	رودخانه	جاده	شیب	فرسایش	شناسی	بارش
۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۱
۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۵	۴	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۴	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۳	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

جدول ۲: مقدار وزن نسبی لایه‌های مؤثر

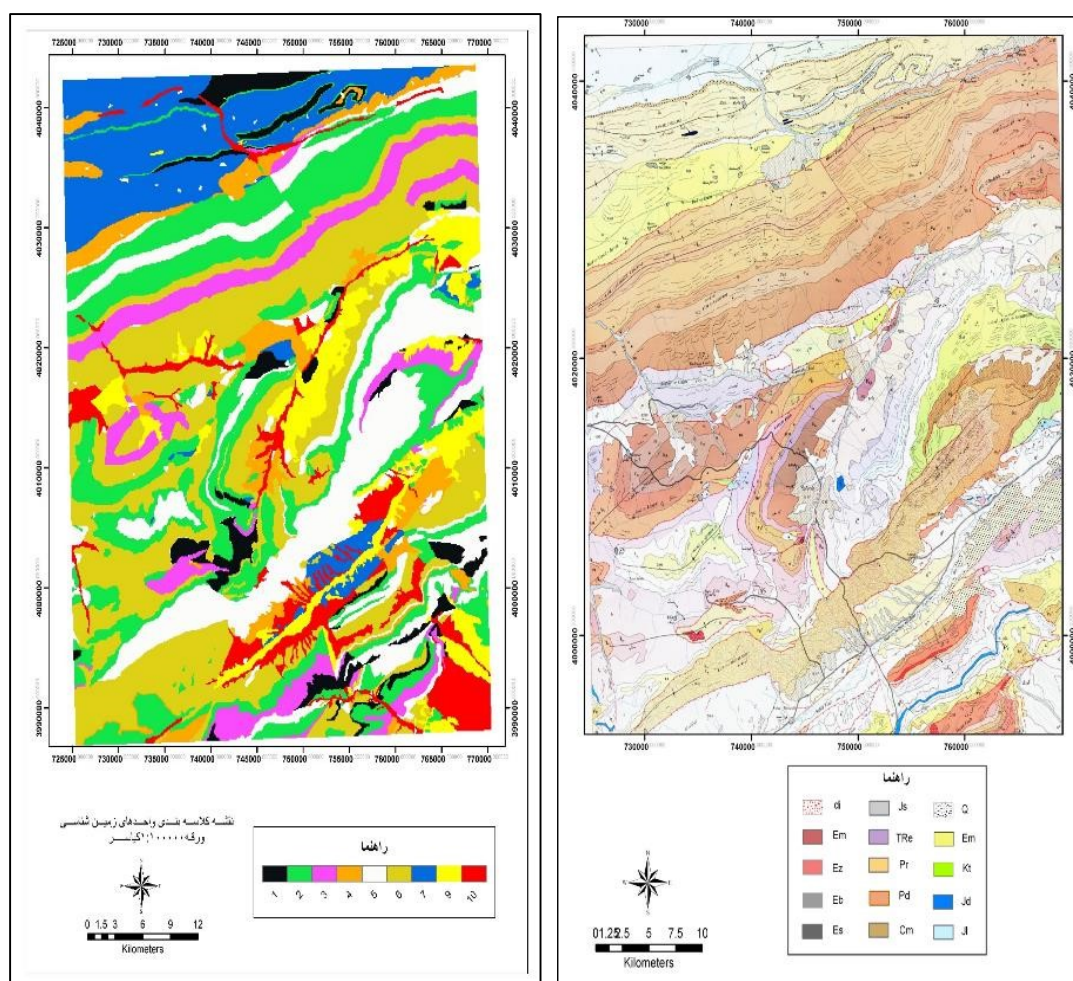
وزن نسبی	معیار (لایه‌های مؤثر)
۰/۲۷	بارش (میلیمتر)
۰/۲۲۳	شیب (درجه)
۰/۱۶۴	زمین‌شناسی
۰/۱۲۳	فرسایش
۰/۰۸۳	جهت شیب
۰/۰۵۹	جاده - رودخانه
۰/۰۴۳	گسل - محور چین - زمین لرزه
۰/۰۳۴	کاربری اراضی

بررسی معیارها

زمین‌شناسی

به عنوان بخشی از مطالعات ژئومورفولوژیکی، پدیده زمین لغزش با سنگ‌شناسی منطقه مرتبط است (Chen et al., 2016b). زیرا واحدهای سنگ‌شناسی درجات مختلفی از حساسیت دارند (Yazdadi & Ghanavati, 2016). از این رو در ارائه داده‌ها برای مطالعات حساسیت زمین لغزش مهم بوده و گروه‌بندی مناسب خواص سنگ‌شناسی ضروری است (Chen et al., 2016b). در منطقه مورد مطالعه کهنسال‌ترین سنگ‌های رخنمون‌یافته را سازند کهر تشکیل می‌دهد که متعلق به

پرکامبرین بوده و در جنوب روستای اورست بیرون‌زدگی دارد. رخساره این سازند عبارت از اسلیت و شیل‌های میکادار صورتی و سبز همراه با تکه‌های کوچکی از سنگ‌های بایک می‌باشد. رخنمون‌های مزوزوئیک در ورقه کیاسر گسترش فراوانی دارند. در جنوبی‌ترین بخش خاوری ورقه کیاسر، سنگ‌ها و نهشته‌های رشته‌کوه‌های البرز با یک‌راندگی روی سنگ‌ها و نهشته‌های زون ایران مرکزی رانده شده‌اند. سازند شمشک به دلیل دارا بودن منابع ذغال سنگ، شناخته‌شده‌ترین سازند در رشته‌کوه البرز هستند. سازند لار و شمشک گسترده‌ترین رخنمون را در منطقه دارند. نهشته‌های سنوزوئیک گسترش و ضخامت قابل توجهی داشته و رخساره‌های آن از قاره‌ای و تخریبی تا دریایی متغیر است. در شکل ۲ و جدول ۳ نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی و طبقه‌بندی سازندها جهت زمین‌لغزش ارائه گردیده است.



شکل ۲: نقشه لایه معیار زمین‌شناسی و نقشه طبقه‌بندی شده آن در محدوده مورد مطالعه

ماخذ: نگارندگان

جدول ۳: طبقه‌بندی لیتولوژی از نظر مقاومت در برابر زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه

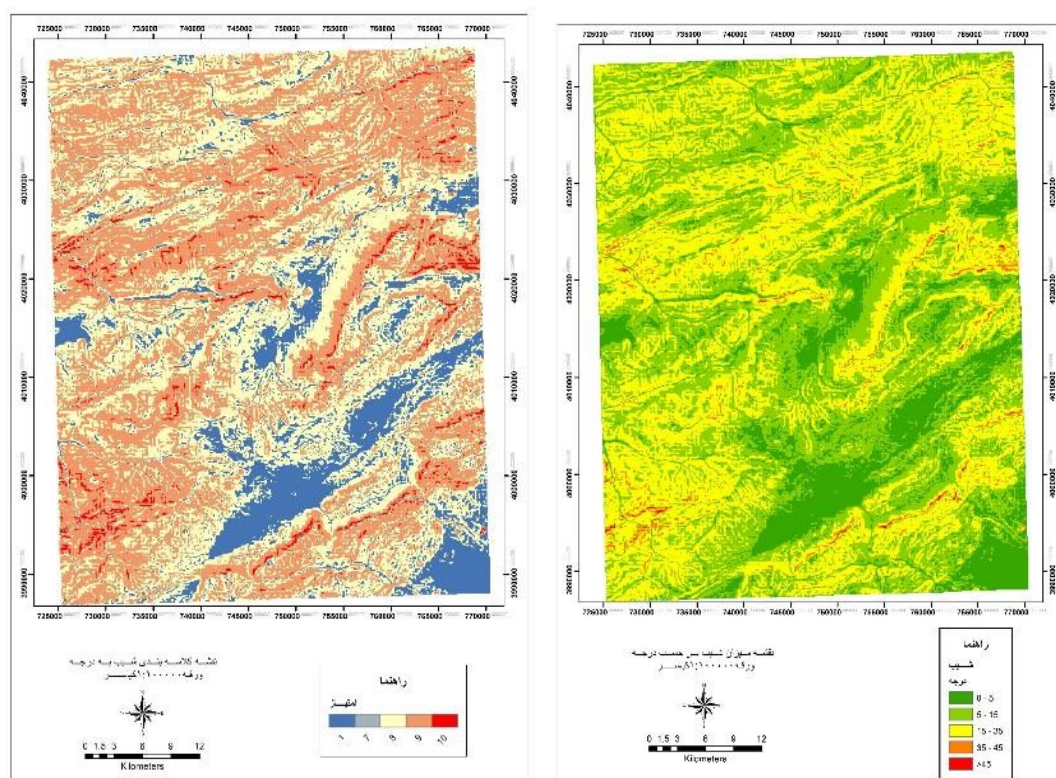
لیتولوژی	طبقه
سنگ آهک توده ایی - سنگ آهک ضخیم لایه - دولومیت توده ایی - سنگ آهک دولومیتی ضخیم لایه - ماسه سنگ - ماسه سنگ کوارتزی ضخیم لایه با سیمان سیلیسی و درزه های کم - کنگلومرا با سیمان سیلیسی - مرمریت توده ایی - مرمر ضخیم با درزه کم - کوارتزیت	I
سنگ آهک بالایه بندی متوسط - ماسه سنگ با ماسه کوارتزیتی بالایه بندی متوسط و سیمان آهکی - سنگ آهک دولومیتی با لایه بندی متوسط - سنگ آهک ماسه ایی با لایه بندی متوسط - دولومیت - کوارتزیت سنگ های اذین	II
سنگ آهک مارنی با لایه بندی متوسط - سنگ آهک دولومیتی نازک لایه - ماسه سنگ کوارتزیتی با لایه بندی متوسط	III
بازالت و اندزیت با درزه های انقباضی و هوازده - ماسه سنگ نازک لایه تا متوسط لایه دارای درزه - توف آهکی - ماسه سنگ و کنگلو مرا با سیمان ضعیف - سنگ آهک ماسه ایی نازک لایه با درزه - شیبست و سنگ های دگرگونی درزه دار	IV
توف اندزیتی - توف آهکی هوازده - شیل آهکی	V
مارن زغال دار - شیل آهکی هوازده تناوب شیل و ماسه سنگ - تناوب شیل ولای سنگ - مارن گچ دار	VI
مارن - توف هوازده - گل سنگ ماسه سنگ تکتونیزه و هوازده ذغال و شیل	VII
شیل و مارن هوازده	VIII
آبرفت های قدیمی مشتمل بر پادگانه و مخروط افکنه های قدیمی - رسوبات پر کننده دره های مشتمل بر مارن و گچ	IX
آبرفت های جوان مشتمل بر پادگانه و مخروط افکنه های جوان - خاک های برجا - خاکهای حاصل از فرسایش سنگ بستر که بر اثر نیروی ثقل و عوامل جوی از ارتفاعات بر روی شیب حمل شده و بر روی هم انباشته شده اند .	X

شیب

شیب یک پارامتر مهم برای در نظر گرفتن پایداری دامنه است. با افزایش زاویه شیب تنش برشی در خاک یا سایر مواد تحکیم نشده به طور کلی افزایش می‌یابد. در شیب‌های تند وزن مواد متحرک احتمالی تحت گرانش زمین در مقایسه با شیب‌های متوسط بیشتر خواهد بود (Bera et al., 2019). در این تحقیق با توجه به زمین‌لغزش‌های به‌وقوع‌پیوسته در منطقه، بیشترین امتیاز به شیب‌های بین ۲۰ تا ۴۵ درجه داده شده است.

جدول ۴: رده‌بندی شیب جهت استفاده در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه

رده هر شیب	امتیاز هر رده
$5 >$	فیلتر می‌شود
۱۵-۵	۷
۳۵-۱۶	۸
۴۵-۳۶	۱۰
$45 <$	۹



شکل ۳: نقشه شیب و کلاسه‌بندی شده منطقه مورد مطالعه

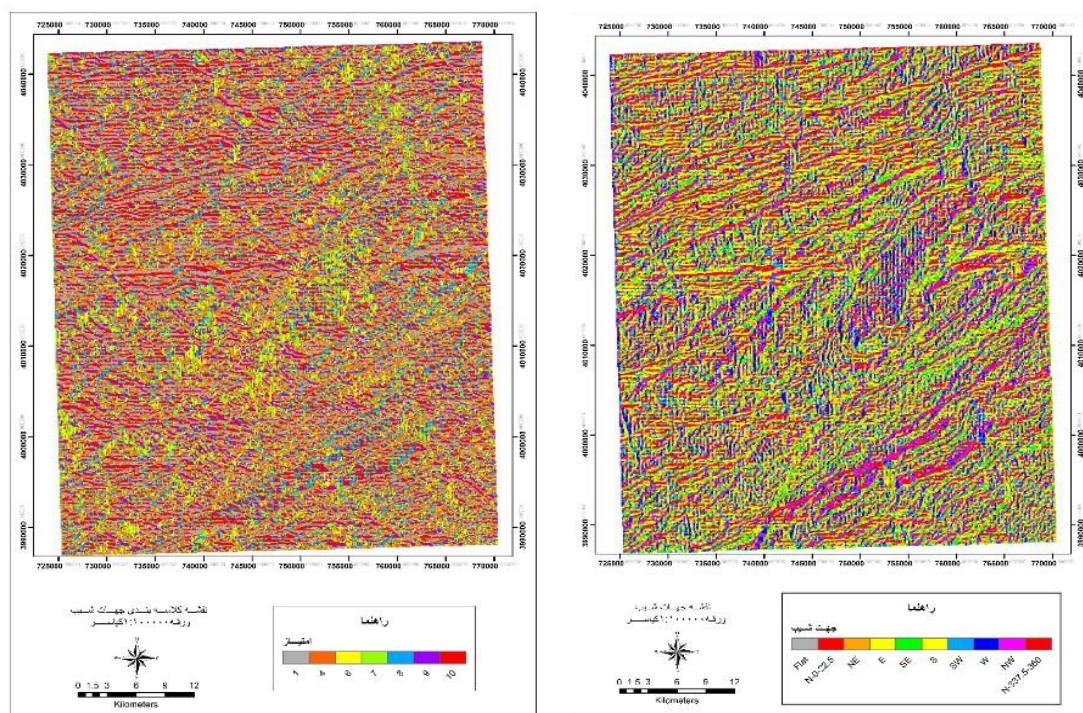
ماخذ: نگارندگان

جهت شیب

جهت شیب نیز عامل مهمی در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش محسوب می‌شود (Yazdadi & Ghanavati, 2016; Nohani et al., 2019). در این پژوهش به دلیل اینکه نواحی با جهت شیب شمالی و غربی بیشتر از نواحی دیگر در معرض سایه و رطوبت قرار دارند، بیشترین امتیاز داده شده است. برای دست‌یابی به این لایه، از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) استفاده شده است بر همین اساس از محیط ArcToolbox و نوار ابزار Spatial Analyst tools و ابزار Surface و دستور Aspect، لایه جهت شیب حاصل گردد (شکل ۴). لایه جهت شیب براساس جدول (۵) کلاسه‌بندی شود.

جدول ۵: رده‌بندی جهات شیب در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه

جهت جغرافیایی	امتیاز
N	۱۰
NW	۸
W	۷
NE	۶
E	۵
SW	۴
SE	۳
S	۱



شکل ۴: نقشه جهت شیب و طبقه‌بندی شده آن در محدوده مورد مطالعه

ماخذ: نگارندگان

گسل و محور چین

زمین‌لغزش‌ها در امتداد گسل‌های کوچک و بزرگ فراوان‌ترند. پهنه‌های گسلی با ایجاد شیب‌های تند و پهنه‌های برش خورده سنگ‌های ضعیف شده و شکسته شده، پتانسیل زمین‌لغزش را افزایش می‌دهند (Yazdadi & Ghanavati, 2016). به طور کلی، شکست‌های زمین‌ساختی باعث کاهش استحکام سنگ و آغاز بسیاری از زمین‌لغزش‌ها می‌شود (Nohani et al., 2019). مطالعات گسل‌های منطقه ممکن است به آشکار کردن کلیاتی کمک کند که به درک علت زمین‌لغزش در

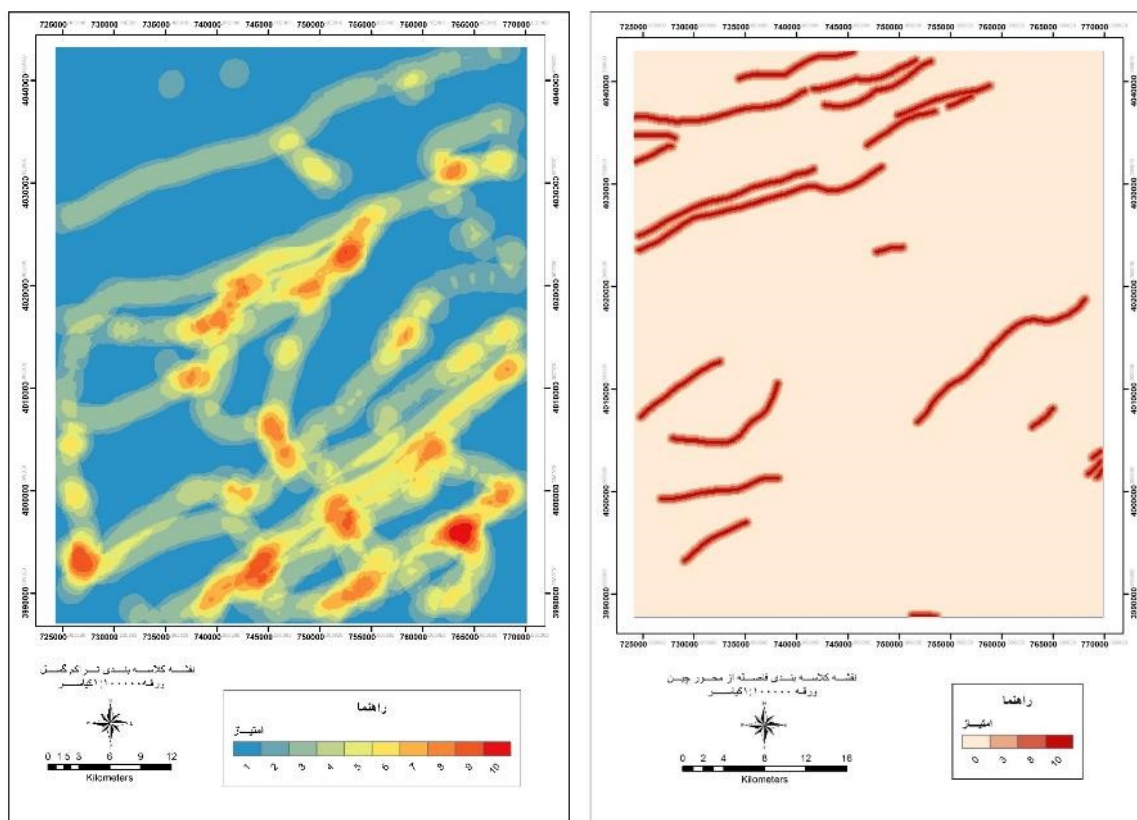
منطقه منجر شود (Ramli et al., 2010). محور چین نیز مانند گسل‌ها با ایجاد کشش و خردشدگی در سنگ‌ها نقش ضعیف‌کننده‌ای را در واحدهای سنگی ایجاد می‌کند. در این پژوهش، تأثیر گسل در ناپایداری به‌صورت تراکمی محاسبه شده است، ولی محور چین به دلیل اینکه همدیگر را قطع نمی‌کنند، به‌صورت فاصله از محور چین امتیازبندی شده‌اند. نقشه این دو معیار از رقومی کردن گسل‌ها و محورچین موجود نقشه زمین‌شناسی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر حاصل شده است. نقشه گسل به صورت تراکمی و نقشه محور چین به صورت فاصله‌ایی از محور چین طبقه‌بندی شده‌اند و به هر کدام از آنها امتیاز لازم داده شده است (جدول ۶ و ۷).

جدول ۶: تأثیر تراکم گسل بر روی ناپایداری دامنه‌ای در محدوده مورد مطالعه

امتیاز	تراکم گسل (km/km ²)
۱	۰-۰/۱
۲	۰/۰-۱/۳
۳	۰/۰-۳/۴۵
۴	۰/۰-۴۵/۶
۵	۰/۰-۶/۸
۶	۰/۰-۸/۹۷
۷	۰/۱-۷۹/۲
۸	۱/۱-۲/۴۸
۹	۱/۱-۴/۸
۱۰	۱/۲-۸/۴

جدول ۷: تأثیر فاصله از محور چین بر روی ناپایداری دامنه‌ای در محدوده مورد مطالعه

امتیاز	فاصله از محور چین
۱۰	۱۰۰-۰
۹	۲۰۰-۱۰۰
۸	۳۰۰-۲۰۰
۷	۴۰۰-۳۰۰
۶	۵۰۰-۴۰۰
۵	۶۰۰-۵۰۰
۴	۷۰۰-۶۰۰
۳	۸۰۰-۷۰۰
۲	۹۰۰-۸۰۰
۱	۹۰۰<



شکل ۵: نقشه تراکم گسل‌های و فاصله از محورهای چین منطقه در محدوده مورد مطالعه

ماخذ: نگارندگان

متوسط بارندگی سالیانه

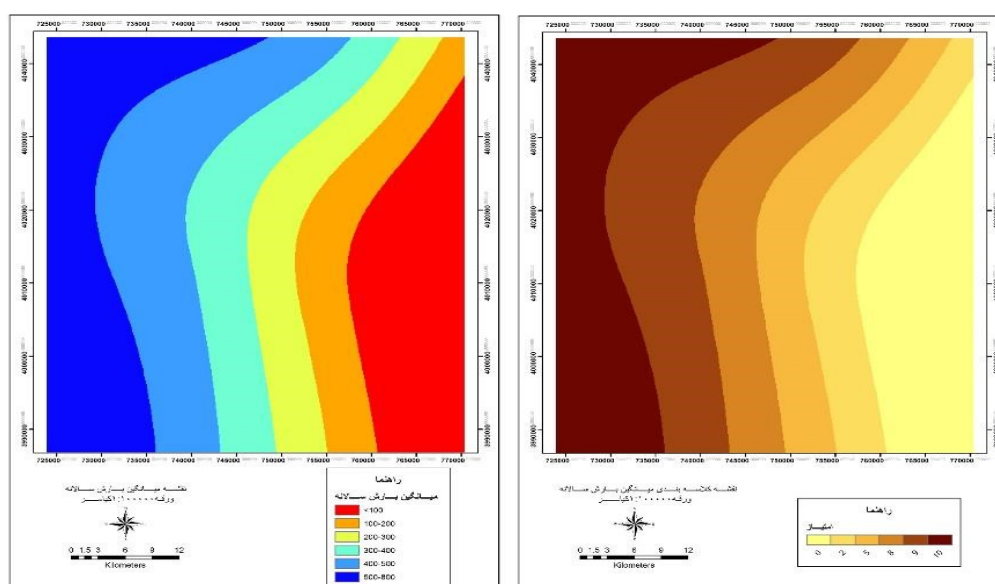
بیشتر زمین‌لغزش‌ها پس از بارش باران شدید رخ می‌دهد، بنابراین بارش یکی از پارامترهای اصلی در تهیه نقشه‌های زمین‌لغزش است. آب در هنگام بارندگی شدید به سرعت نفوذ کرده و درجه اشباع و احتمال وقوع زمین‌لغزش را افزایش می‌دهد (Yazdadi & Ghanavati, 2016). به‌طور کلی، در محدوده مطالعاتی هرچه از جنوب منطقه به طرف شمال برویم، بر حجم بارندگی‌ها افزوده می‌شود که علت آن را می‌توان جلوگیری از توده‌های باران‌زا به وسیله رشته‌کوه البرز دانست. جهت تهیه نقشه متوسط بارندگی سالیانه برای ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه از داده‌های سازمان هواشناسی استان مازندران استفاده شده است. در ابتدا نقشه هم باران با استفاده از داده‌های مذکور ترسیم گردیده و سپس با توجه به تاثیر میزان بارش بر شدت خطر زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی براساس منابع موجود و نظر کارشناسی امتیاز دهی و کلاسه‌بندی صورت گرفته است.

جدول ۸: تاثیر میانگین بارندگی سالیانه در خطر زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه

امتیاز	میانگین بارندگی سالیانه
۱	$100 >$
۲	۲۰۰-۱۰۰
۵	۳۰۰-۲۰۰
۸	۴۰۰-۳۰۰
۹	۵۰۰-۴۰۰
۱۰	۸۰۰-۵۰۰

جدول ۹: درصد گسترش میانگین بارندگی در محدوده مورد مطالعه

درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	میانگین بارندگی سالانه
۱۸	۴۸۷/۷	$100 >$
۱۳	۳۱۹/۴	۲۰۰-۱۰۰
۱۲	۳۲۶/۲	۳۰۰-۲۰۰
۱۴	۳۸۴/۱	۴۰۰-۳۰۰
۲۱	۵۶۹/۳	۵۰۰-۴۰۰
۲۲	۵۵۳/۷	۸۰۰-۵۰۰
۱۰۰	۲۵۰۰	جمع



شکل ۶: نقشه میانگین بارش سالانه و نقشه کلاسه‌بندی شده آن در محدوده مورد مطالعه

مأخذ: نگارندگان

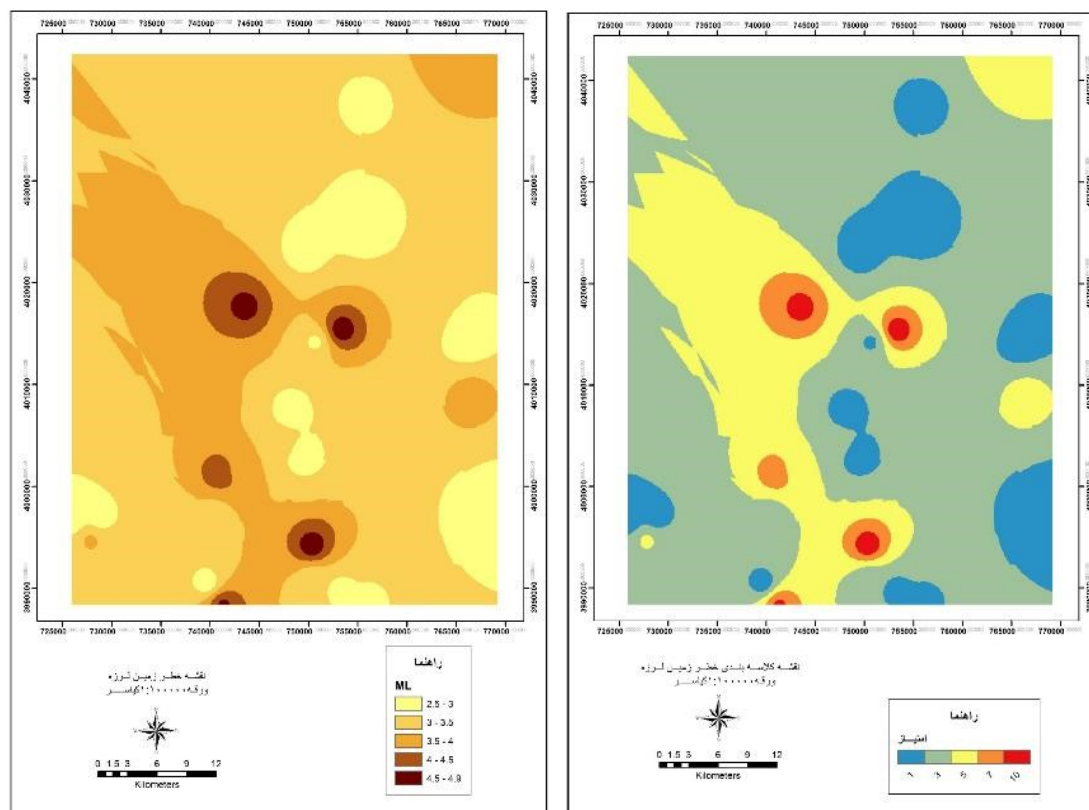


زلزله

مناطق کوهستانی تپه‌ای پتانسیل بیشتری برای وقوع زلزله دارند، به ویژه زمانی که منطقه از نظر لرزه ای فعال باشد (Ahmad et al., 2017). در این پژوهش نقاطی که در واقع مرکز یا کانون زمین‌لرزه بوده‌اند، به کمک نرم افزار ArcGIS به صورت داده‌های رقومی استخراج و با بکار گرفتن ابزار Spline نقشه آنها ترسیم گردید. در واقع به کمک این ابزار محدوده‌هایی که از کانون زمین‌لرزه فاصله‌ی بیشتری دارند از ارزش کمتری برخوردار هستند. در جدول ۱۰ تاثیر شدت زمین‌لرزه و همچنین در شکل ۷ نقشه شدت زمین‌لغزش و نقشه کلاسه‌بندی شده شدت زمین‌لغزش نشان داده شده است.

جدول ۱۰: تاثیر شدت زمین‌لرزه در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محدوده مورد مطالعه

امتیاز	شدت زمین لرزه (ML)
۱	۲/۳-۵
۳	۳-۳/۵
۵	۳/۴-۵
۷	۴-۴/۵
۱۰	۴/۴-۵/۹



شکل ۷: نقشه شدت زمین‌لرزه و نقشه کلاسه‌بندی شده آن در محدوده مورد مطالعه

ماخذ: نگارندگان

فاصله از راه و رودخانه

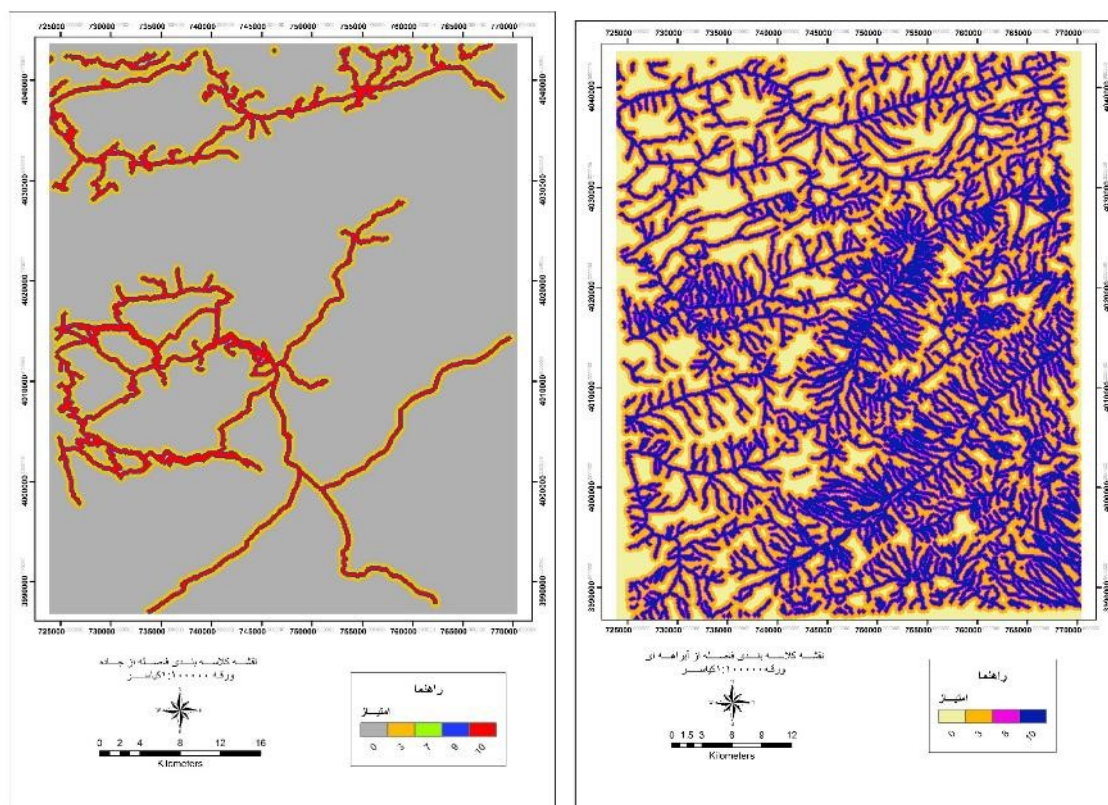
فاصله از رودخانه‌ها یکی از عوامل کنترل‌کننده پایداری شیب است. درجه اشباع مواد به طور مستقیم بر پایداری شیب تأثیر می‌گذارد. نزدیکی شیب‌ها به سازه‌های زهکشی نیز از نظر پایداری عامل مهمی است. رودخانه‌ها ممکن است با فرسایش شیب‌ها یا با اشباع قسمت پایینی مواد تا زمانی که سطح آب افزایش یابد، بر پایداری دامنه تأثیر منفی بگذارند (Yazdadi & Ghanavati, 2016). همچنین فاصله تا جاده یکی از پارامترهای اصلی در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش است. جاده‌ها می‌توانند یکی از دلایل وقوع زمین‌لغزش باشند (Ayalew, & Yamagishi, 2005). زمین‌لغزش و رانش زمین بیشتر در نزدیکی جاده‌ها رخ می‌دهد. با برش شیب تپه‌ها برای احداث راه در شیب‌های بیش از ۱۰ درجه، ناپیوستگی در خاک و سنگ ایجاد می‌شود در نتیجه احتمال رخداد زمین‌لغزش بالا می‌رود (Nohani et al., 2019). این معیارها از نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی استخراج شده‌اند و به کمک نرم افزار ArcGIS، بصورت خطی رقمی شدند. معیاری که برای تأثیر این عوامل برای خطرپذیری زمین‌لغزش بکار رفته است، بصورت فاصله از راه و رودخانه بوده که بوسیله ابزار Distance اجرا گردید. سپس طبقه‌بندی با توجه به نظر کارشناسی روی لایه‌ها اعمال شد.

جدول ۱۱: تأثیر فاصله از جاده در پهنه‌بندی خطر لغزش در محدوده مورد مطالعه

امتیاز	فاصله از جاده
۱۰	۱۰۰-۰
۹	۲۰۰-۱۰۰
۷	۳۰۰-۲۰۰
۳	۵۰۰-۳۰۰
۰	۵۰۰<

جدول ۱۲: تأثیر فاصله از رودخانه در پهنه‌بندی خطر لغزش در محدوده مورد مطالعه

امتیاز	فاصله از رودخانه
۱۰	۱۰۰-۰
۸	۲۰۰-۱۰۰
۳	۵۰۰-۲۰۰
۰	۵۰۰<



شکل ۸: نقشه کلاسه‌بندی فاصله از جاده و نقشه کلاسه‌بندی فاصله از آبراهه در محدوده مورد مطالعه

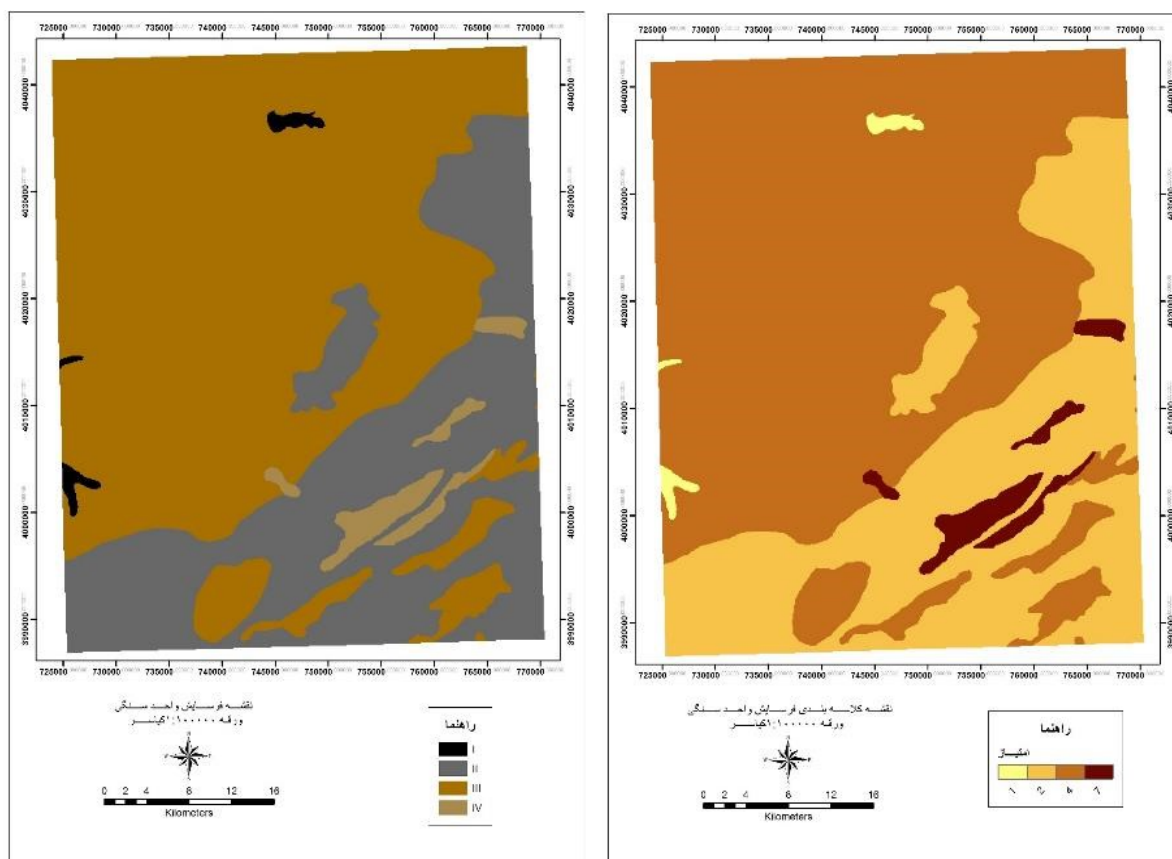
ماخذ: نگارندگان

فرسایش

ویژگی‌های ذاتی واحدهای سنگ‌شناسی عموماً تابع ترکیب کانی‌شناسی و بافت است که عمده عوامل مؤثر و تعیین‌کننده در ترکیب هوازدهی و فرسایش‌پذیری سازندها می‌باشد. بنابراین عامل فرسایش یکی از عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. در این پژوهش این لایه این معیار بصورت پلیگون تهیه و در محیط نرم افزار ArcGIS تبدیل به لایه رستری شد و سپس به کمک ابزار Reclassify براساس منابع موجود و نظر کارشناسی امتیاز لازم بر روی آن اعمال گردید.

جدول ۱۳: تأثیر فرسایش در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و درصد گسترش انواع آن در محدوده مورد مطالعه

نوع فرسایش	رده فرسایش	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	امتیاز
I	فوق العاده مقاوم	۱۵/۲	۱	۱
II	بسیار مقاوم	۸۰۷/۹	۳۲	۲
III	مقاوم	۱۶۰۹/۹	۶۴	۴
IV	متوسط	۶۲	۲	۷
جمع	*	۲۵۰۰	۱۰۰	*

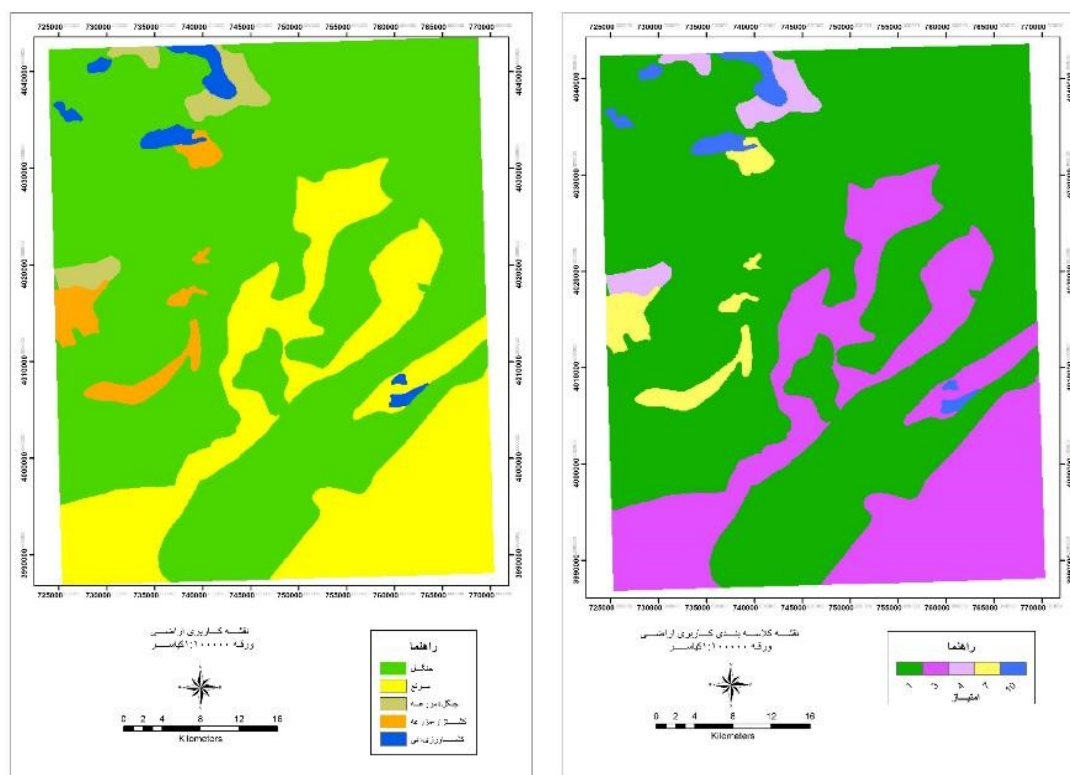


شکل ۹: نقشه فرسایش واحدهای سنگی و کلاسه‌بندی شده فرسایش در محدوده مورد مطالعه

ماخذ: نگارندگان

کاربری اراضی

تأثیر پوشش زمین و کاربری اراضی بر پایداری شیب از دهه ۱۹۶۰ مورد مطالعه قرار گرفته است (Moradi et al., 2012). پوشش زمین به عنوان یک پناهگاه عمل کرده و حساسیت به فرسایش خاک را کاهش می‌دهد (Yazdadi & Ghanavati, 2016). محققین مختلفی بر اهمیت پوشش زمین در پایداری شیب تأکید کرده‌اند. پوشش زمین آب موجود در خاک را جذب کرده و پتانسیل زمین‌لغزش را کاهش می‌دهد (Moradi et al., 2012). مناطقی که دارای پوشش گیاهی ضعیف و کاربری بایر هستند، برای لغزش مستعدتر هستند. برخلاف آن، مناطق زراعی و باغی که در آن پوشش گیاهی انبوه است، لغزش کمتری رخ می‌دهد. مناطق مرتفعی که دارای پوشش بوته‌ای و علفزار است دارای لغزش بیشتر و مناطقی که به صورت باغ و زراعی هستند، دارای لغزش کمتری خواهند بود (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱). بر این اساس در شکل ۱۰ لایه کاربری اراضی تهیه و جهت زمین‌لغزش طبقه‌بندی گردید.



شکل ۱۰: نقشه کاربری اراضی و کلاسه‌بندی شده آن در محدوده مورد مطالعه

ماخذ: نگارندگان

اندکس پتانسیل لغزش

هر لایه اطلاعاتی شامل زیرگروه‌هایی است که هر کدام وزن‌ها و امتیازهای خاص خود را دارا هستند. این وزن‌ها تنها برای مقایسه آنها از نظر اهمیت نسبی‌شان در ایجاد زمین‌لغزش است و مستقیماً قابل قیاس با یکدیگر نمی‌باشند. پس از محاسبه ارزش اطلاعاتی زیرگروه‌های مربوط به تمامی نقشه‌های عوامل در هر واحد و جمع جبری کلیه این ارزش‌ها، امتیاز نهایی یا اندکس پتانسیل لغزش حاصل می‌شود. فرمول محاسبه اندکس پتانسیل لغزش به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$LPI = \frac{\sum(R \cdot W)}{\sum(W)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

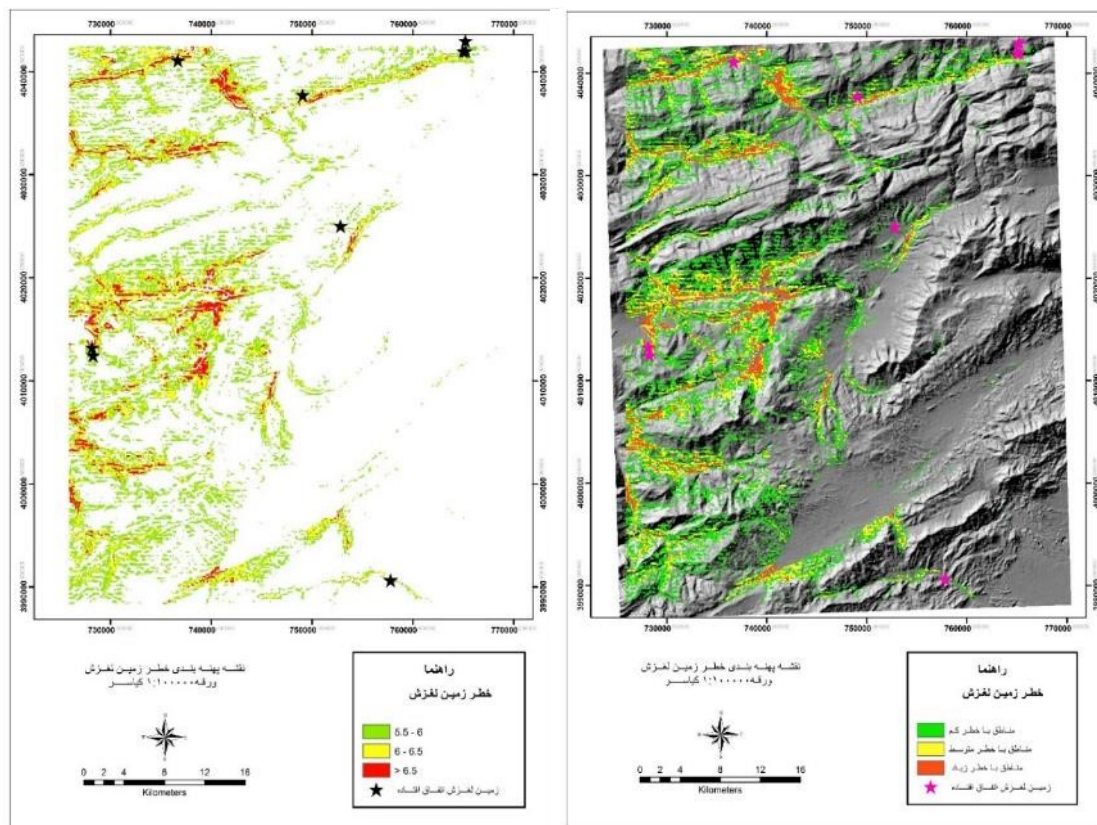
که در آن اندکس پتانسیل لغزش، R امتیاز هر زیر گروه و W وزن هر لایه می‌باشد.

طبق روش تحلیل و وزن‌های پیشنهادی در راهنمای پهنه‌بندی زمین‌لغزش، امتیاز نهایی LPI در هر واحد می‌تواند در بازه‌هایی از ۵/۵ تا ۸ تغییر کند (جدول ۱۴).

جدول ۱۴: دسته‌بندی خطر زمین‌لغزش بر اساس مقدار LPI

مقدار LPI	معادل توصیفی خطر
۵/۵ - ۶	مناطق با خطر کم
۶ - ۶/۵	مناطق با خطر متوسط

بعد از اختصاص یافتن این معادلات توصیفی به پلی‌گون‌های منطقه، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با سه گروه خطر در طیف‌های رنگی متفاوت و مشخص حاصل گردید. در شکل ۱۱ نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به همراه زمین‌لغزش‌های به‌وقوع پیوسته در گذشته نشان داده شده است.



شکل ۱۱: نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و موقعیت زمین‌لغزش‌های به‌وقوع پیوسته در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ کیاسر

ماخذ: نگارندگان

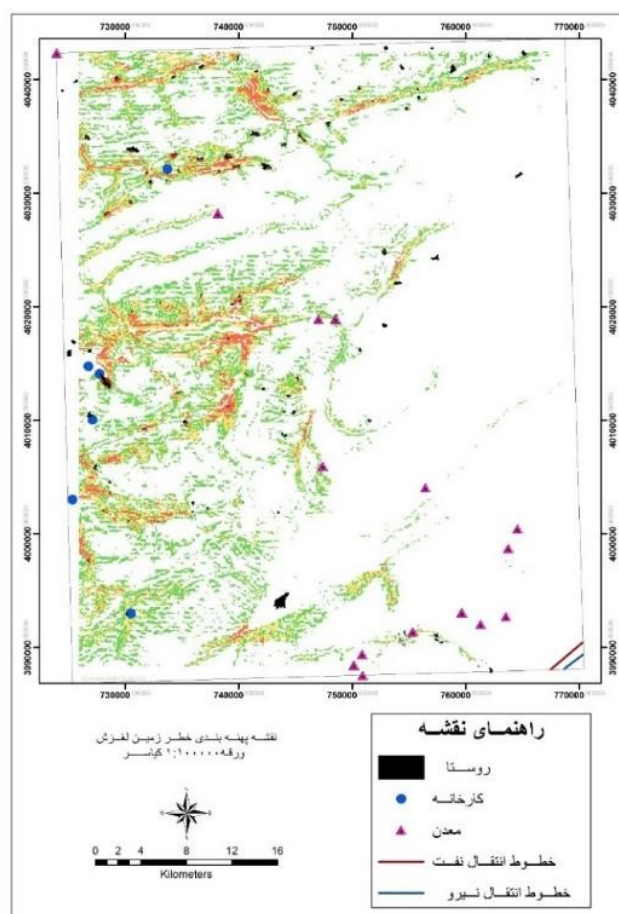
نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات صورت گرفته و زمین‌لرزه‌های رخ داده مشخص شد که در محدوده مطالعاتی مهمترین عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش عوامل زمین‌شناسی، شیب و بارندگی است. در محدوده مطالعاتی بیشتر زمین‌لغزش‌ها در شیب‌های ۱۵ تا ۳۵ درجه به‌وقوع پیوسته است که تأثیر بارندگی را در وقوع لغزش بیشتر نشان می‌دهد. در اثر بارندگی آب فرصت بیشتری را برای نفوذ در این شیب‌ها پیدا کرده و با کاهش اصطحاک و یا افزایش وزن طبقات (لایه‌های شیلی، رسی، مارنی و رسوبات سست کواترنری) باعث وقوع زمین‌لغزش در جهت شیب می‌شود. در مورد تأثیر جهت شیب در وقوع زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی می‌توان گفت که دامنه‌های شمالی و غربی بیشتر در معرض زمین‌لغزش قرار دارند، زیرا با توجه به روند عمومی لایه‌های زمین‌شناسی (شرقی-غربی) و جهت حرکت خورشید، دامنه‌های شمالی و غربی بیشتر از دامنه‌های دیگر در سایه قرار می‌گیرند و در نتیجه رطوبت بیشتری را در خود حفظ کرده که این باعث نفوذ بیشتر آب

در خاک شده و به وقوع پدیده زمین‌لغزش کمک می‌کند. در بازدید صحرایی از منطقه مشخص شد که عامل اصلی زمین‌لغزش در منطقه جنس زمین (رسی، مارنی، ژپس و شیل)، شیب و بارندگی می‌باشد. با تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش هم‌پوشانی شاخص در محیط ArcGIS و وزن‌دهی عوامل به روش تحلیلی سلسله‌مراتبی توسط نرم‌افزار Expert Choice نشان داده شد که این روش در پهنه‌بندی زمین‌لغزش در نواحی کوهستانی و مناطقی که دارای تغییرات قابل ملاحظه ارتفاع و تنوع پوشش گیاهی است، مناسب بوده است. زیرا نتایج به‌دست‌آمده با زمین‌لغزش‌های به‌وقوع‌پیوسته مطابقت زیادی دارد. با توجه به محاسبات انجام شده مساحت محدوده‌های در معرض خطر زمین‌لغزش ۶ درصد ($151/68 \text{ km}^2$) از مساحت کل (2500 km^2) محدوده مطالعاتی می‌باشد. مساحت روستاهای در معرض خطر زمین‌لغزش ۲۴ درصد یعنی $2/04 \text{ km}^2$ از کل مساحت روستاها ($8/53 \text{ km}^2$) را شامل می‌شود. با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که خطوط اصلی انتقال نیرو و خطوط اصلی نفت در معرض خطر نمی‌باشند. از کل معادن موجود در این محدوده مطالعاتی، فقط معدن روی در معرض خطر بوده و از کل کارخانه‌های صنعتی در این محدوده دو کارخانه تولیدی خبازی و کارخانه حفاظت از فساد میوه در محدوده خطر زمین‌لغزش قرار دارند (جدول ۱۵ و شکل ۱۲).

جدول ۱۵: مشخصات عوارض در معرض خطر زمین‌لغزش در محدوده مطالعاتی

شاخص	پاسخ
مساحت کل محدوده	۲۵۰۰ کیلومتر مربع
مساحت محدوده‌های در معرض خطر زمین‌لغزش	۱۵۱/۶۸ کیلومتر مربع
مساحت کل روستاها	۸/۵۳ کیلومتر مربع
مساحت روستاهای در معرض خطر	۲/۰۴ کیلومتر مربع
معادن در معرض خطر زمین‌لغزش	معدن روی
کارخانه‌های صنعتی در معرض خطر زمین‌لغزش	کارخانه تولید محصولات خبازی و کارخانه حفاظت از فساد میوه
خطوط اصلی انتقال نیرو و نفت در معرض خطر زمین‌لغزش	در معرض خطر زمین‌لغزش نمی‌باشند



شکل ۱۲: موقعیت روستاها، معادن، کارخانه‌ها و سایر عوارض در مناطق با خطر زمین‌لغزش
ماخذ: نگارندگان



شکل ۱۳: زمین‌لغزش رخ داده در منطقه مورد مطالعه
ماخذ: نگارندگان

منابع و مآخذ

- ۱) انتظاری، مژگان، و کردوانی، موسی (۱۴۰۱). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های مبتنی بر GIS و داده‌های راداری (مطالعه موردی: فریدون شهر). *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۳)، ۱۷۷-۱۹۶.
- ۲) حجازی زاده، زهرا، خسروی، آراس، حسینی، سید اسعد، رحیمی، علیرضا، و کربلایی، علیرضا (۱۴۰۰). پتانسیل‌سنجی مناطق کویری، بیابانی و سواحل مکران به منظور کسب انرژی از خورشید با استفاده از منطق فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۱(۶۳)، ۱-۱۸.
- ۳) ززولی، محمد، فلاح، وفایی نژاد، علیرضا، آل شیخ، علی اصغر، و مدیری، مهدی (۱۳۹۸). پهنه‌بندی احتمال وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آنتروپی شانون و ارزش اطلاعات در محیط GIS مطالعه موردی بخش رودبار الموت شرقی - استان قزوین. *فصلنامه اطلاعات جغرافیایی*، ۲۸(۱۱۲)، ۱۲۳-۱۳۶.
- ۴) لجم اورک، مرتضی، وپیری، زهرا (۱۴۰۲). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و فن GIS (مطالعه موردی: شهرستان باغملک). *مجله جغرافیا و مخاطرات طبیعی*، ۱۲(۴۷)، ۱۹۳-۲۱۵.
- ۵) یمانی، مجتبی، حسن پور، سیروس، مصطفایی، ابوالفضل، و شادمان رودپشتی، مجید (۱۳۹۱). نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز کارون بزرگ با استفاده از مدل AHP در محیط GIS. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۲۳(۴) (پیاپی ۴۸)، ۳۹-۵۶.
- 6) Ahmad, R. A., Singh, R. P., & Adris, A. (2017). Seismic hazard assessment of Syria using seismicity, DEM, slope, active faults and GIS. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 6, 59-70.
- 7) Arjmandzadeh, R., Sharifi Teshnizi, E., Rastegarnia, A., Golian, M., Jabbari, P., Shamsi, H., & Tavasoli, S. (2020). GIS-based landslide susceptibility mapping in Qazvin province of Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44, 619-647.
- 8) Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15-31.
- 9) Baharvand, S., Rahnamarad, J., Soori, S., & Saadatkhah, N. (2020). Landslide susceptibility zoning in a catchment of Zagros Mountains using fuzzy logic and GIS. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-10.
- 10) Bera, A., Mukhopadhyay, B. P., & Das, D. (2019). Landslide hazard zonation mapping using multi-criteria analysis with the help of GIS techniques: a case study from Eastern Himalayas, Namchi, South Sikkim. *Natural Hazards*, 96, 935-959.
- 11) Chen, W., Chai, H., Zhao, Z., Wang, Q., & Hong, H. (2016a). Landslide susceptibility mapping based on GIS and support vector machine models for the Qianyang County, China. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-13.



- 12) Chen, T., Niu, R., & Jia, X. (2016b). A comparison of information value and logistic regression models in landslide susceptibility mapping by using GIS. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-16.
- 13) Chen, W., Peng, J., Hong, H., Shahabi, H., Pradhan, B., Liu, J., ... & Duan, Z. (2018). Landslide susceptibility modelling using GIS-based machine learning techniques for Chongren County, Jiangxi Province, China. *Science of the total environment*, 626, 1121-1135.
- 14) Chen, W., & Li, Y. (2020). GIS-based evaluation of landslide susceptibility using hybrid computational intelligence models. *Catena*, 195, 104777.
- 15) Das, S., Sarkar, S., & Kanungo, D. P. (2022). GIS-based landslide susceptibility zonation mapping using the analytic hierarchy process (AHP) method in parts of Kalimpong Region of Darjeeling Himalaya. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(4), 234.
- 16) Guha-Sapir, D., Hoyois, P., Wallemacq, P., & Below, R. (2017). Annual disaster statistical review 2016. *The numbers and trends*, 1-91.
- 17) Haque, U., Da Silva, P. F., Devoli, G., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., ... & Glass, G. E. (2019). The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995–2014). *Science of the Total Environment*, 682, 673-684.
- 18) Kohno, M., & Higuchi, Y. (2023). Landslide susceptibility assessment in the Japanese archipelago based on a landslide distribution map. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(2), 37.
- 19) Moradi, M., Bazyar, M. H., & Mohammadi, Z. (2012). GIS-based landslide susceptibility mapping by AHP method, a case study, Dena City, Iran. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(7), 6715-6723.
- 20) Moresi, F. V., Maesano, M., Collalti, A., Sidle, R. C., Matteucci, G., & Scarascia Mugnozza, G. (2020). Mapping landslide prediction through a GIS-based model: A case study in a catchment in southern Italy. *Geosciences*, 10(8), 309.
- 21) Nohani, E., Moharrami, M., Sharafi, S., Khosravi, K., Pradhan, B., Pham, B. T., ... & M. Melesse, A. (2019). Landslide susceptibility mapping using different GIS-based bivariate models. *Water*, 11(7), 1402.
- 22) Psomiadis, E., Charizopoulos, N., Efthimiou, N., Soulis, K. X., & Charalampopoulos, I. (2020). Earth observation and GIS-based analysis for landslide susceptibility and risk assessment. *ISPRS international journal of geo-information*, 9(9), 552.
- 23) Ramli, M. F., Yusof, N., Yusoff, M. K., Juahir, H., & Shafri, H. Z. M. (2010). Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: a review. *Bulletin of engineering Geology and the Environment*, 69, 215-233.
- 24) Roccati, A., Paliaga, G., Luino, F., Faccini, F., & Turconi, L. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment. *Land*, 10(2), 162.
- 25) Sejati, A. E., Karim, A. T. A., & Tanjung, A. (2020). The compatibility of a GIS map of landslide-prone areas in Kendari City Southeast Sulawesi with actual site conditions. In *Forum Geografi* (Vol. 34, No. 1, pp. 41-50).
- 26) Trigila, A., Iadanza, C., Esposito, C., & Scarascia-Mugnozza, G. (2015). Comparison of Logistic Regression and Random Forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampilieri (NE Sicily, Italy). *Geomorphology*, 249, 119-136.

- 27) Vakhshoori, V., Pourghasemi, H. R., Zare, M., & Blaschke, T. (2019). Landslide susceptibility mapping using GIS-based data mining algorithms. *Water*, 11(11), 2292.
- 28) Yazdadi, E. A. & Ghanavati, E. (2016). Landslide hazard zonation by using AHP (analytical hierarchy process) model in GIS (geographic information system) environment (case study: Kordan watershed). *Int J Sci High Technol*, 2, 24-39.
- 29) Zou, S., Abuduwaili, J., Duan, W., Ding, J., De Maeyer, P., Van De Voorde, T., & Ma, L. (2021). Attribution of changes in the trend and temporal non-uniformity of extreme precipitation events in Central Asia. *Scientific reports*, 11(1), 15032.