

ارزیابی مقایسه‌ای استفاده از مدل‌های آماری نسبت فراوانی و آنتروپی شانون به منظور پهنه‌بندی نواحی حساس به زمین لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز تجن میانی)

دانیال صیاد - دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری - آب، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.
ابراهیم امیدوار* - استادیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.
زهرا ناصریان اصل - دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۱۱/۱۴

چکیده

زمین لغزش به عنوان یک پدیده ژئومورفولوژیک طبیعی، در زمره بلایای طبیعی محسوب می‌شود که می‌تواند خسارات جانی و مالی فراوانی را به زندگی انسان‌ها تحمیل می‌کند؛ بنابراین شناسایی مناطق حساس به وقوع زمین لغزش جهت کاهش خسارات امری ضروری است. هدف پژوهش حاضر ارزیابی و ناحیه‌بندی حساسیت‌پذیری زمین لغزش در زیر حوزه آبخیز تجن میانی با به‌کارگیری مدل‌های آماری نسبت فراوانی و آنتروپی شانون است. بدین منظور ابتدا ۶۸ نقطه زمین لغزش برای منطقه شناسایی و این نقاط به صورت تصادفی به دو گروه آموزش مدل (۷۰ درصد) و اعتبار مدل (۳۰ درصد) تقسیم شدند. همچنین بر اساس مرور منابع، ۱۰ عامل شیب، جهت شیب، فاصله تا آبراهه، ارتفاع، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، انحنای سطح، انحنای طولی، باران و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) به عنوان عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. در ادامه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و آنتروپی شانون و بر اساس روش شکست طبیعی برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد. در نهایت به منظور ارزیابی نرخ موفقیت و پیش‌بینی مدل از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) استفاده شد. نتایج حاصل از تأثیر عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش در مدل آنتروپی شانون نشان داد که به ترتیب معیارهای رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی و انحنای طولی با مقادیر وزن W_j به ترتیب برابر با ۰/۷۳، ۰/۶۶ و ۰/۶۵ بیش‌ترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش در منطقه دارند. نتایج ارزیابی نرخ موفقیت و پیش‌بینی مدل با توجه به منحنی ROC و سطح زیر منحنی (AUC) برای آموزش و اعتبار دو مدل نسبت فراوانی و آنتروپی شانون به ترتیب برابر با ۰/۷۶، ۰/۷۲ و ۰/۶۲، ۰/۵۹ به دست آمد که بیانگر عملکرد نسبتاً خوب مدل نسبت فراوانی و عملکرد ضعیف تا مردود مدل آنتروپی شانون برای ارزیابی و تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش در حوزه مورد مطالعه است. همچنین نتایج حاصل از ناحیه‌بندی حساسیت‌پذیری زمین لغزش در حوزه تجن میانی با استفاده از مدل نسبت فراوانی نشان داد که به ترتیب ۳۰/۱۵۶، ۱۷/۰۶۶ و ۵/۲۰۶ درصد از مساحت حوزه در محدوده حساسیت متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند جهت مدیریت و آمایش سرزمین توسط مدیران و برنامه‌ریزان به کار گرفته شود.

واژگان کلیدی: حرکت‌های توده‌ای زمین، حوزه تجن میانی، حساسیت‌پذیری، مدل‌های دومتغیره، منحنی مشخصه عملکرد.

مقدمه

به حرکت کامل یا جزئی سنگ یا خاک ناشی از نیروی ثقل، به سمت پایین دامنه زمین لغزش گفته می‌شود (چن و چن^۱، ۲۰۲۱، ۱۰۴۸۳۳). عواملی از جمله شرایط و زاویه شیب زمین، سنگ‌شناسی، نوع خاک، شرایط هیدرولوژیکی، اقلیمی و فعالیت‌های انسانی از جمله جنگل‌زدایی، احداث سازه‌ها بر روی شیب و جاده‌سازی نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش‌ها دارند (سیلالهی و همکاران^۲، ۲۰۱۹، ۱-۱۷). زمین‌لغزش‌ها را به عنوان یک سری اشکال و فرایندهای زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی محسوب نموده که می‌توانند به عنوان منبع خطر برای حیات بشر در نظر گرفته شوند (مورینو و همکاران^۳، ۲۰۲۲)؛ بنابراین گام اول در کاهش خسارات زمین لغزش، شناسایی رفتار، مکانیزم و نواحی حساس زمین لغزش است و این مهم در حال حاضر به کمک به روش‌های مختلف از جمله روش‌های آماری امکان پذیر است (برهان و همکاران^۴، ۲۰۲۱، ۲۸۵-۳۰۱). از سال ۱۹۷۰ چندین نوع روش و رویکرد برای ارزیابی زمین‌لغزش‌ها پیشنهاد شده است که می‌توان این روش‌ها را به چندین گروه از جمله روش‌های مبتنی بر شاخص‌ها^۵، آمار کلاسیک^۶ و یادگیری ماشین^۷ طبقه‌بندی کرد؛ در این بین روش نسبت فراوانی یک مدل تجزیه و تحلیل آماری و از محبوب‌ترین رویکردها برای تجزیه و تحلیل زمین‌لغزش‌ها است که هنوز به‌طور گسترده توسط بسیاری از محققان استفاده می‌شود (ژانگ و همکاران^۸، ۲۰۲۰، ۳۴۰-۳۵۷). همچنین پژوهشگرانی (اوزدمیر و آلتورال^۹، ۲۰۱۳، ۱۸۰-۱۹۷؛ گوو و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۵، ۹۳-۱۱۰؛ وخشوری و زارع^{۱۱}، ۲۰۱۶، ۱۷۵۲-۱۷۳۱؛ دینگ و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۷، ۶۳۹-۶۱۹؛ هوانگ و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۸، ۹۳۸-۹۱۹) در پژوهش خود بیان داشتند مدل نسبت فراوانی (FR) دقت قابل توجهی نسبت به سایر روش‌ها دارد. در مقابل پژوهشگران دیگری (وانگ و همکاران^{۱۴}، ۲۰۱۶، ۱۳۶-۱۱۷؛ آدیتیان و همکاران^{۱۵}، ۲۰۱۸، ۱۱۱-۱۰۱) نیز بیان داشته‌اند که روش‌های یادگیری ماشین بهتر از مدل نسبت فراوانی عمل می‌کند. تا به امروز هیچ اتفاق نظری در مورد روش بهینه برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش‌ها برای یک منطقه وجود ندارد، بنابراین به‌دست آوردن نتیجه بهینه از یک مدل می‌تواند مقایسه عینی با روش‌های دیگر مانند یادگیری ماشین ارائه کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰، ۳۴۰-۳۵۷). یکی دیگر از مدل‌های آماری دومتغیره در مطالعات حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش، مدل آنتروپی شانون می‌باشد. آنتروپی یک رویکرد مدیریتی است که پراکندگی و بی‌نظمی در پدیده‌های طبیعی را تخمین می‌زند و به‌طور گسترده در علوم مرتبط با محیط‌زیست استفاده می‌شود که این نظریه اولین بار توسط شانون کمی‌سازی شد (دام و همکاران^{۱۶}، ۲۰۲۲، ۱-۱۶). با توجه به مطالب بیان‌شده هدف اصلی یادگیری آماری^{۱۷} ارائه چهارچوبی برای مطالعه مسئله، کسب دانش، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری یا ساخت مدل از مجموعه‌ای از داده‌ها است (بوسکت و همکاران^{۱۸}، ۲۰۰۴).

1. Chen and Chen
2. Silalahi et al.
3. Morino et al.
4. Berhane et al.
5. Index Based
6. Classical Statistical
7. Machine Learning
8. Zhang et al.
9. Ozdemir and Altural
10. Guo et al.
11. Vakhshoori and Zare
12. Ding et al.
13. Huang et al.
14. Wang et al.
15. Aditian et al.
16. Dam et al
17. Statistical Learning
18. Bousquet et al

پیشینه پژوهش

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه تحلیل حساسیت زمین‌لغزش‌ها با استفاده از مدل‌های آماری نسبت فراوانی و آنتروپی شانون انجام شده است که در این راستا مطالعاتی در ذیل آمده است: (محمدنیا و همکاران، ۱۳۹۳، ۴۵-۵۸)، در پژوهشی به شناسایی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و ارزیابی مناطق دارای پتانسیل زمین‌لغزش با استفاده از روش نسبت فراوانی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نقشه حساسیت زمین‌لغزش تهیه شده با سطح زیر منحنی (AUC) ۰/۸۱ از پیش‌بینی خیلی خوب در برآورد خطر زمین‌لغزش دارد. (غلامی و همکاران، ۱۳۹۶، ۷۳۵-۷۵۰)، به تهیه نقشه حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در محدوده ساری-کیاسر با استفاده از مدل‌های وزن شواهد، نسبت فراوانی و دمپستر-شیفر پرداختند و به این نتایج دست یافتند که نرخ موفقیت مدل‌های وزن شواهد، نسبت فراوانی و دمپستر-شیفر از نظر دقت مدل به کاررفته بر اساس نرخ موفقیت یک مدل در گروه عالی قرار دارد. همچنین این محققین بیان داشتند که نرخ پیش‌بینی دو مدل وزن شواهد و نسبت فراوانی در گروه عالی قرار دارند. (عرب عامری و همکاران، ۱۳۹۶، ۱۶۰-۱۴۷)، طی پژوهشی در حوضه آبخیز ونک اصفهان به ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های احتمالاتی وزن واقعه و نسبت فراوانی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که مدل نسبت فراوانی با مقدار AUC برابر با ۰/۷۳۴ از مدل وزن واقعه با مقدار AUC برابر با ۰/۶۲۳ مناسب‌تر است. (رضوی ترمه و شیرانی، ۱۳۹۷، ۱۱۹-۱۳۸)، در پژوهش خود به تهیه نقشه خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، آنتروپی و مدل تاپسیس پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل‌های آماری از دقت بالاتری نسبت به مدل‌های تصمیم‌گیری و مبتنی بر کارشناسی برخوردارند. (آرین تبار و همکاران، ۱۳۹۹، ۸۷-۷۰)، طی پژوهشی باهدف پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حدفاصل جنگل توسکستان تا گرگان با عملگر فازی گاما و روش نسبت فراوانی (FR) به این نتیجه دست یافتند که احتمال وقوع زمین‌لغزش در پهنه‌های با سازه‌های سست و نزدیک به راه‌های ارتباطی و در پهنه‌های با بارش فراوان‌تر بیش‌تر است. (چن و همکاران، ۲۰۱۶، ۱-۱۶)، با مطالعه مقایسه‌ای نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش بر پایه سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های نسبت فراوانی (FR)، شاخص آماری و وزن شاهد در چین به این نتیجه رسیدند که نقشه زمین‌لغزش حاصل از مدل نسبت فراوانی با سطح زیر منحنی ۸۳/۶۲ درصد بالاترین دقت آموزش در بین روش‌های شاخص آماری و وزن شاهد به خود اختصاص داد. همچنین این محققین بیان داشتند که مدل نسبت فراوانی با توجه به نتایج اعتبار سنجی نقشه تولیدشده، نتایج رضایت بخشی به همراه دارد. (خان و همکاران، ۲۰۱۹، ۱۱-۲۴)، طی پژوهشی به ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل آماری نسبت فراوانی (FR) در شمال پاکستان پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد مناطق واقع در جنوب شرقی، شرق و غرب و مناطق با واحدهای زمین‌شناسی کواترنری از بالاترین مقدار نسبت فراوانی زمین‌لغزش برخوردارند. (برهان و همکاران، ۲۰۲۱، ۲۸۵-۳۰۱)، با استفاده از مدل نسبت فراوانی (FR) مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی و مجموعه داده فضایی اقدام به پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در شمال اتیوپی کردند و بیان داشتند مدل نسبت فراوانی از برازش خوبی برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه دارد و این مدل را می‌توان به‌طور قابل ملاحظه‌ای در سایر مناطق مشابه استفاده کرد. (عبدو، ۲۰۲۱، ۲۶۱۸-۲۵۹۹)، در پژوهش خود به ارزیابی پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از روش نسبت فراوانی و شاخص آماری در سوریه پرداخت و به این نتیجه رسید که مدل نسبت فراوانی در مقایسه با مدل شاخص آماری بیش‌ترین دقت پیش‌بینی حساسیت زمین‌لغزش را در منطقه مورد مطالعه دارد. (اس-سمایری، ۲۰۲۲، ۳۰-۱)، طی پژوهشی باهدف تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و آنتروپی شانون پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که مدل نسبت فراوانی حدود ۳ درصد دقیق‌تر از مدل آنتروپی شانون است. حوزه آبخیز تجن میانی

1. Chen et al

2. Khan et al

3. Abdo

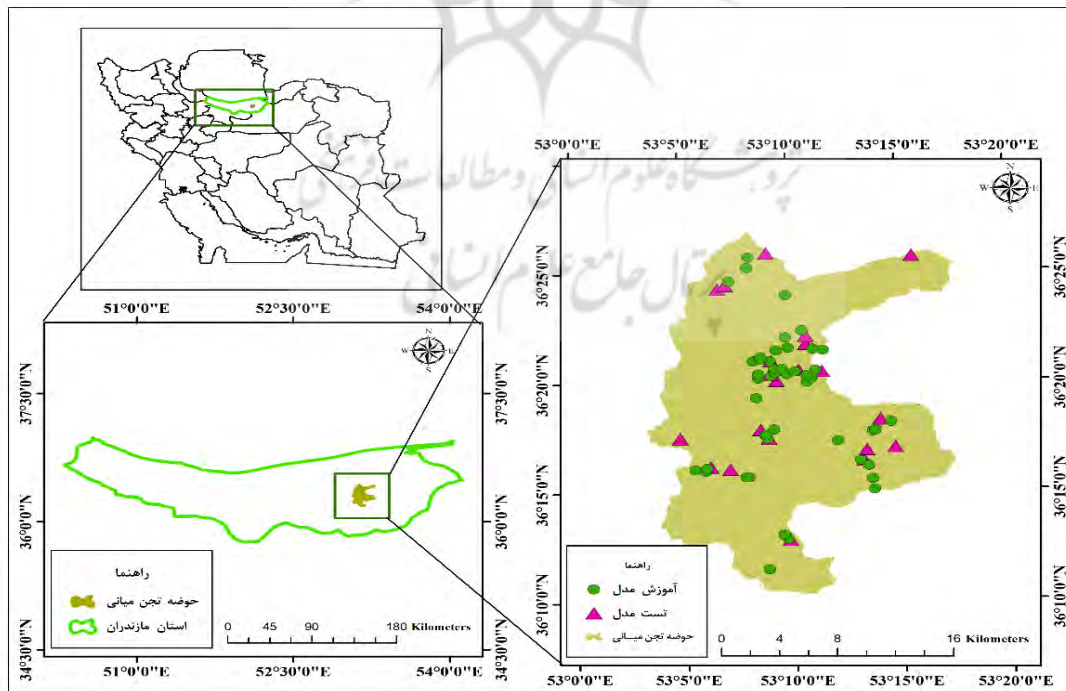
4. Es-smairi

یکی از زیر حوضه‌های حوضه تجن در استان مازندران محسوب شده و به دلیل شرایط خاص اقلیمی، کاربری اراضی، خاک و ... مستعد حرکات توده‌ای بوده و در بخش‌های مختلف آن زمین‌لغزش‌هایی طی دوره‌های پیشین به وقوع پیوسته است. از آنجایی که بخش قابل توجهی از این حوضه دارای کاربری اراضی جنگلی و همچنین اراضی کوهستانی پرشیب بوده، لذا دسترسی به این مناطق مشکل و اطلاعات در مورد حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش آن ناچیز است؛ بنابراین تهیه یک نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با دقت قابل قبول برای این منطقه ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به مطالب مطرح شده فوق، هدف از پژوهش حاضر ارزیابی مقایسه دو مدل آماری نسبت فراوانی و آنتروپی شانون برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش در حوضه آبخیز تجن میانی است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز تجن میانی با مساحت حدود ۳۵۸/۶۴ کیلومتر مربع در شرق استان مازندران و در محدوده بین طول جغرافیایی ۳۹° ۳۱' ۲۹" تا ۵۳° ۱۷' ۲۰" شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶° ۱۰' ۹" تا ۳۶° ۲۷' ۱" شمالی قرار دارد (شکل ۱). این حوضه از بالادست تلاقی ظالم رود (گرم رود) تا محل سد شهید رجایی به جزء حوضه رودخانه چهاردانگه تشکیل شده است. سازندهای سنگی حوزه آبخیز تجن میانی شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ، شیل، آهک، مارن و سنگ‌های شنی به همراه بقایای گیاهی است. بیش‌ترین واحد سنگی مربوط به واحد زمین‌شناسی Mmsl (مارن، ماسه‌سنگ و مارن سیلتی و به‌طور جزئی سنگ‌آهک) در دوران سنوزوئیک و کم‌ترین واحد سنگی در حوضه مربوط به واحد زمین‌شناسی J1 (خاکستری روشن با بستر نازک تا سنگ‌آهک عظیم) در دوران مزوزوئیک است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه (منبع نویسندگان)

روش تحقیق

به منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش با مدل‌های آماری نسبت فراوانی و آنتروپی شانون، ابتدا ۶۸ نقاط زمین‌لغزش برای منطقه شناسایی شد. مکان‌های زمین‌لغزشی واقعی شامل یک مجموعه آموزشی و اعتبار مدل هستند که برای ساخت و تأیید مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند (چن و همکاران^۱، ۲۰۱۷، ۶۹-۸۵). بدین منظور از این مجموعه زمین‌لغزش‌های ثبت‌شده، به طور تصادفی ۷۰ درصد برای آموزش مدل (۴۷ نقطه لغزشی) و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی مدل (۲۱ نقطه لغزشی) (ملیس و همکاران^۲، ۲۰۲۲، ۱-۲۱) انتخاب شدند.

تهیه نقشه عوامل مؤثر

با توجه به مشاهدات میدانی از شرایط زمین‌لغزش‌های ثبت‌شده در منطقه و همچنین مرور منابع بررسی تعداد ده فاکتور مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش شامل شیب، جهت شیب، فاصله تا آبراهه، ارتفاع، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی^۳، انحنا سطح، انحنا طولی، باران و شاخص رطوبت توپوگرافی^۴ شناسایی و با استفاده از این عوامل مدل‌سازی انجام شد. در پژوهش حاضر نقشه طبقات ارتفاعی با اندازه سلولی $12/5 \times 12/5$ از سایت <https://search.asf.alaska.edu> تهیه شد و با استفاده از نقشه طبقات ارتفاعی تهیه‌شده، نقشه شیب و جهت شیب در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد. جهت‌های مختلف شیب تابش‌های خورشیدی متفاوتی دریافت می‌کنند، بنابراین پوشش گیاهی، هوازگی سطحی و تبخیر سطحی در حوضه را تحت تأثیر قرار داده و بر وقوع زمین‌لغزش اثر می‌گذارد (لی و همکاران^۵، ۲۰۲۱، ۱-۱۴). نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ برای سال ۲۰۲۰ با اندازه سلولی 10×10 از سایت Esri 2020 Land Cover تهیه و کاربری‌های منطقه در هشت طبقه (bare ground, built area, scrub/shrub, flooded vegetation, crops, grass, tree, water) طبقه‌بندی شدند. نقشه سنگ‌شناسی منطقه با استفاده از نقشه سازمان زمین‌شناسی کشور با مقیاس $1/100000$ تهیه و به تعداد نه طبقه (جدول ۱) طبقه‌بندی شد. همچنین بارندگی منطقه با استفاده از آمار بارندگی ۴۰ ساله ایستگاه‌های (بازیار خیل، ورکی، ریگ چشمه و کیاسر) با روش درون‌یابی^۶ IDW در ArcGIS 10.5 تهیه شد. در شکل ۲ روند نمای انجام پژوهش نشان داده شده است. انحنا پروفیل سرعت تغییر شیب را توصیف می‌کند و مقادیر مثبت و منفی در انحنا پروفیل به ترتیب بیانگر مقعر و محدب است در حالی که انحنا سطح بیان‌کننده تغییر شیب در جهت است و مقادیر مثبت و منفی در انحنا سطح به ترتیب بیانگر محدب و مقعر است (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۸، ۹۱۹-۹۳۸). به طور کلی انحنا دامنه نقش مهمی بر روی فرسایش و تجمع آب زیرزمینی در منطقه دارد (ووبالم^۷، ۲۰۲۱، ۱-۲۱؛ ریاض و همکاران^۸، ۲۰۱۸، ۱-۲۰). نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) رابطه ۱ (لیو و همکاران^۹، ۲۰۲۰، ۱-۱۹)، انحنا سطح^{۱۰} و انحنا طولی^{۱۱} با استفاده از نقشه طبقات ارتفاعی منطقه در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد. فاصله تا آبراهه نقش مهمی در درجه اشباع خاک از آب ایفا می‌کند که در ارتباط مستقیم با فشار آب منفذی قرار دارد که پایداری شیب را تحت تأثیر قرار می‌دهد (جنیفر و همکاران^{۱۲}، ۲۰۲۱، ۷۷۳-۷۸۷). نقشه فاصله تا آبراهه با استفاده از ابزار Euclidean Distance در

1. Chen et al.

2. Melese et al.

3. Lithology

4. Topographic Wetness Index

5. Li et al.

6. Inverse Distance Weighting

7. Wubalem

8. Riaz et al.

9. Liu et al.

10. Plan Curvature

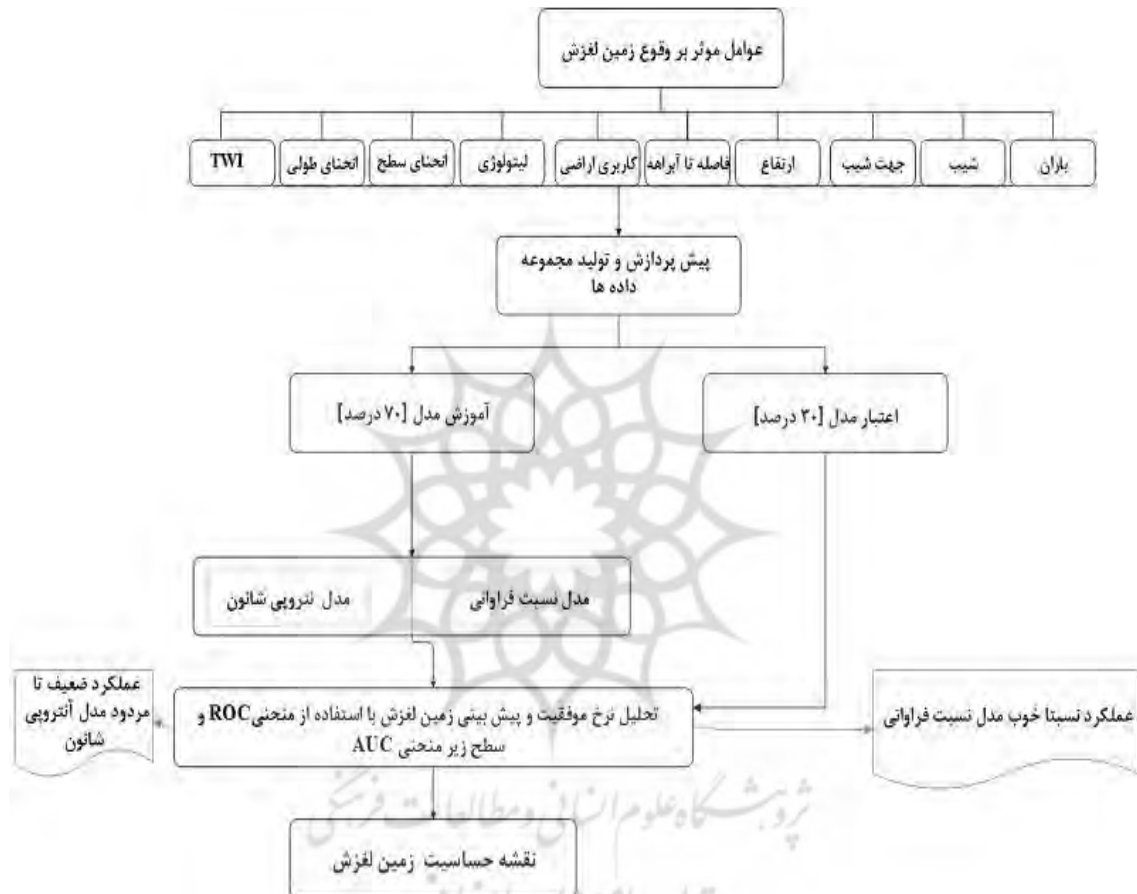
11. Profile Curvature

12. Jennifer et al.

نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد. در نهایت نقشه ناحیه‌بندی و ارزیابی وقوع زمین لغزش (حساسیت زمین لغزش) تهیه شد و نقشه نهایی زمین لغزش منطقه بر اساس شکست طبیعی^۱ (ساراناثان و همکاران^۲، ۲۰۲۱، ۲۷۵-۲۹۱) به ۵ طبقه خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شد.

$$TWI = \ln(AS / \tan \beta) \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه ۱، AS مساحت حوزه آبخیز و β شیب برحسب درجه است.



شکل ۲: مراحل انجام پژوهش

جدول ۱: مشخصات سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

واحد سنگی	سن	مشخصه	درصد مساحت
JK	ژوراسیک میانه	کنگومرا، ماسه‌سنگ و شیل همراه با بقایای گیاهی و درزهای ذغال سنگ	۳/۹۰
Jl	ژوراسیک - کرتاسه	خاکستری روشن با بستر نازک تا سنگ‌آهک عظیم	۱/۱۸
k2II	کرتاسه	سنگ‌آهک همراه با طبقات مارن و آهک مارنی	۹/۴۲
k2I2	کرتاسه	سنگ‌آهک با بستر ضخیم	۲/۲۹

¹. Natural Break

². Saranaathan et al.

۶۴/۴۰	مارن، ماسه‌سنگ و مارن سیلتی و به‌طور جزئی سنگ‌آهک	میوسن	Mmsl
۱۲/۱۸	سنگ‌آهک با بستر متوسط تا ضخیم	پالئوسن - آئوسن	pel
۳/۸۹	کنگلوما با میان لایه‌های ماسه‌سنگ و رس	پلیوسن	plc
۱/۴۹	مرداب (رسوبات دریایی کهن)	کواترنر	Qm
۱/۲۵	شیل و ماسه‌سنگ خاکستری تیره	تریاس - ژوراسیک	TRjs

نسبت فراوانی

نسبت فراوانی، یک روش آماری دومتغیره ساده و قابل فهم برای پیش‌بینی مناطق مستعد زمین لغزش است که از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد (جنیفر و همکاران، ۲۰۲۱، ۷۷۳-۷۸۷). مدل آماری نسبت فراوانی یک مدل احتمالاتی ساده و قابل درک است که همبستگی بین زمین لغزش‌های منطقه با عوامل ایجادکننده آن‌ها را در منطقه نشان می‌دهد (لیو و همکاران، ۲۰۲۰، ۱-۱۹). در مدل آماری نسبت فراوانی مقادیر یک، کم‌تر از یک و بیش‌تر از یک به ترتیب بیانگر همبستگی متوسط، پایین و بالا بین زمین لغزش با عوامل ایجادکننده آن‌ها در منطقه است (لیو و همکاران، ۲۰۲۰، ۱-۱۹).

$$FR = \frac{N_i^P / N}{N_i^{TP} / N^T} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه ۲ N_i^P بیانگر تعداد پیکسل‌ها در هر طبقه، N بیانگر تعداد کل پیکسل‌ها، N_i^{TP} بیانگر تعداد پیکسل‌های زمین لغزش در هر طبقه و N^T بیانگر تعداد کل پیکسل‌های زمین لغزش است (فایز و همکاران، ۲۰۱۸، ۶۸۵۴-۶۸۴۶).

آنتروپی شانون^۲

آنتروپی رفتار غیرعادی، تغییرپذیری، ناپایداری، درجه بی‌نظمی و عدم قطعیت یک سیستم را نسبت به حالت اولیه احتمالی آن اندازه‌گیری می‌کند. به‌طور کلی مفهوم آنتروپی توصیف ناهنجاری بین علل و پیامدها یا درجه ناهنجاری است؛ بنابراین مدل آنتروپی شانون برای نشان دادن شرایط ترمودینامیکی یک سیستم استفاده می‌شود (الویس و همکاران، ۲۰۲۲، ۱-۲۴). برای محاسبه معیار حساسیت‌پذیری در این روش این روش از روابط ۳ تا ۸ استفاده می‌گردد.

$$P_{ij} = \frac{b}{a} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$(p_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^s P_{ij}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

¹. Fayez et al.

². Shannon Entropy

³. Elvis et al.

$$H_j = -\sum_{i=1}^{S_j} (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}), j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$H_{jmax} = \log_2 S_j \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}}, I = (0, 1), j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$W_j = I_j P_{ij} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در روابط ۸ تا ۳؛ P_{ij} نسبت فراوانی هر طبقه، (P_{ij}) چگالی احتمال هر طبقه، و S_j تعداد طبقه هر معیار، H_j و H_{jmax} به ترتیب بیانگر مقدار آنتروپی و حداکثر آنتروپی، I_j ضریب اطلاعات، W_j وزن نهایی هر پارامتر است (وانگ و همکاران^۱، ۲۰۱۶)

ارزیابی دقت نقشه‌های حساسیت‌پذیری

در نقشه‌های تهیه‌شده زمین‌لغزش مهم‌ترین سوآلی که مطرح است، بحث دقت و صحت مدل تهیه‌شده است بنابراین فرایند اعتبار سنجی مدل‌های ساخته‌شده دارای اهمیت است که این اعتبار سنجی اغلب با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد^۲ (ROC) و سطح زیر منحنی^۳ (AUC) استفاده می‌شود (آکینچی و اوزالپ^۴، ۲۰۲۱، ۷۲۵-۷۴۵). منحنی مشخصه عملکرد (ROC) یک نمایش گرافیکی است که از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌ها است (رضویترمه و شیرانی، ۱۳۹۷). به‌طور کلی ارزش‌های حاصله از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) در محدوده‌های ۱-۰/۹، ۰/۸-۰/۹، ۰/۷-۰/۸، ۰/۶-۰/۷ و ۰/۵-۰/۶ بیانگر شاخصی از کیفیت مدل به ترتیب عالی، خوب، نسبتاً خوب، ضعیف و عدم موفقیت (مردود) است (وخشوری و زارع، ۲۰۱۶، ۱۷۳۱-۱۷۵۲). در پژوهش حاضر برای ترسیم منحنی مشخصه عملکرد و سطح زیر منحنی AUC از افزونه SDM در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 استفاده شد؛ بنابراین در پژوهش حاضر برای آموزش (۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) و اعتبار سنجی (۳۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) مدل ساخته‌شده از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده شد.

بحث و یافته‌ها

وزن‌های محاسبه‌شده زیر عامل‌ها

زمین‌لغزش یکی از دلایل اصلی تلفات انسانی، خسارات زیست‌محیطی و زیان اقتصادی در سراسر جهان است (شو و همکاران^۵، ۲۰۲۱، ۳۲-۱). در این مطالعه مقادیر وزن هر طبقه از عوامل مؤثر با استفاده از روابط مربوط به مدل‌های نسبت

1. Wang et al.

2. Receiver Operating Characteristics

3. Area Under the Curve

4. Akinchi and Ozalp

5. Shu et al.

فراوانی و آنتروپی شانون و بر اساس همپوشانی نقاط زمین‌لغزش با نقشه هرکدام از عوامل مؤثر محاسبه گردید. در جدول ۲ نحوه محاسبه این وزن‌ها و همچنین مقادیر آنها برای هر طبقه از عوامل مؤثر برای دو مدل نسبت فراوانی و ضرایب آنتروپی شانون ارائه شده است.

جدول ۲: مقادیر محاسبه شده وزن هر یک از طبقات عوامل مؤثر با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و آنتروپی شانون

W _j	I _j	H _{jmax}	H _j	(P _{ij})	p _{ij}	N L	Npixel	طبقه	لایه
۰/۱۷۲	۰/۱۷۴	۳	۲/۴۸	۰/۰۹۲	۰/۷۳	۴	۱۰۳۲۰	شمال	جهت
				۰/۰۲۱	۰/۱۷	۱	۱۱۰۴۳	شمال شرق	
				۰/۱۳۵	۱/۰۷	۶	۱۰۵۱۲	شرق	
				۰/۲۲۱	۱/۷۵	۱۱	۱۱۸۳۴	جنوب شرق	
				۰/۲۰۷	۱/۶۴	۱۰	۱۱۴۴۰	جنوب	
				۰/۱۷۵	۱/۳۹	۸	۱۰۷۸۸	جنوب غرب	
				۰/۰۶۵	۰/۵۲	۳	۱۰۶۹۵	غرب	
				۰/۰۷۹	۰/۶۳	۴	۱۱۹۵۱	شمال غرب	
۰/۰۷۵	۰/۰۸۳	۲/۳۳	۲/۱۳	۰/۳۴۲	۱/۵۵	۱۴	۱۷۴۶۳	۰-۸	شیب
				۰/۲۶۹	۱/۲۲	۱۸	۲۷۶۴۵	۸-۱۴	
				۰/۱۳۴	۰/۶۱	۷	۲۱۶۰۰	۱۴-۲۱	
				۰/۱۹۲	۰/۸۷	۷	۱۵۰۳۳	۲۱-۲۸	
				۰/۰۵۹	۰/۲۷	۱	۶۸۴۲	۲۸-۶۲	
۰/۱۵۱	۰/۱۷۸	۲/۳۳	۱/۹۱	۰/۳۲۷	۱/۳۹	۲۴	۳۲۴۴۵	۰-۷۰۳	فاصله تا آبراهه
				۰/۱۱	۰/۴۷	۷	۲۷۷۶۶	۷۰۳-۱۵۱۲	
				۰/۲۸۷	۱/۲۲	۱۲	۱۸۴۹۰	۱۵۱۲-۲۵۰۳	
				۰/۲۷۵	۱/۱۷	۴	۶۴۳۶	۲۵۰۳-۴۰۴۱	
				۰	۰	۰	۳۴۶۴	۴۰۴۱-۶۶۴۸	
۰/۳	۰/۳	۲/۳۳	۱/۶۲	۰/۴۸۷	۲/۴۴	۱۹	۱۴۶۲۹	۱۲۶-۴۱۹	ارتفاع
				۰/۲۶۱	۱/۳۱	۱۶	۲۳۰۱۲	۴۱۹-۶۳۰	
				۰/۱۱۱	۰/۵۶	۷	۲۳۴۷۴	۶۳۰-۸۳۴	
				۰/۰۶۳	۰/۳۲	۳	۱۷۶۳۰	۸۳۴-۱۰۹۳	
۰/۱۶۶	۰/۴۴	۳	۱/۶۹	۰	۰	۰	۱	Water	کاربری اراضی
				۰	۰	۰	۶۹	Tree	
				۰/۰۴	۰/۴۹	۱۸	۶۸۵۸۱	Grass	
				۰/۲۴۲	۲/۹۴	۱	۶۴۰	Flooded vegetation	
				۰	۰	۰	۱۹۵	Crops	
				۰/۲۲۲	۲/۶۹	۲۰	۱۳۹۷۲	Scrub/Shru b	
				۰/۲۸۳	۳/۴۴	۴	۲۱۹۰	Built Area	
				۰/۲۱۱	۲/۵۷	۴	۲۹۴۱	Bare Ground	

ادامه جدول ۲: مقادیر محاسبه‌شده وزن هر یک از طبقات عوامل مؤثر با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و آنتروپی شانون

W _j	I _j	H _{jmax}	H _j	P _{ij}	FR	NL	Npixel	طبقه	لایه
				۰	۰	۰	۶	JK	
				۰/۰۹۴	۰/۵۶	۱	۳۳۲۱	Jl	
				۰/۰۶۷	۰/۴۰	۲	۹۴۱۶	k2ll	
				۰	۰	۰	۲۱۶۸	k2l2	
۰/۲۸	۰/۴۳	۳/۱۷	۱/۸۳	۰/۱۹۴	۱/۱۵	۳۵	۵۷۰۰۱	Mmsl	لیتولوژی
				۰/۰۸۶	۰/۵۱	۳	۱۱۰۱۹	pel	
				۰/۵۵۶	۳/۲۹	۶	۳۴۳۵	plc	
				۰	۰	۰	۱۲۵۶	Qm	
				۰	۰	۰	۱۰۲۴	TRjs	
				۰	۰	۰	۴۱۸	-۶۷/۲-۱۰/۶۳	
				۰/۴۸۵	۱/۸۳	۸	۸۱۷۳	-۱۰/۶۳-۲/۴	
۰/۴۳	۰/۵۸	۲/۳۳	۱	۰/۲۱۲	۰/۸۰	۲۲	۵۱۰۹۴	-۲/۴-۰/۶۸	انحنای سطح
				۰/۳۰۲	۱/۱۴	۱۷	۲۷۷۷۱	۰/۶۸-۷/۸۹	
				۰	۰	۰	۶۰۶	۷/۸۹-۶۴	
				۰/۰۳۷	۰/۲۰	۱	۹۱۲۹	-۲/۶-۰/۵۳	
				۰/۱۹۹	۱/۰۶	۱۴	۲۴۶۶۱	-۰/۵۳-۰/۱	
۰/۶۵	۰/۶۲	۲/۳۳	۰/۹	۰/۲	۱/۰۷	۱۸	۳۱۲۶۰	-۰/۱-۰/۲۵	انحنای طولی
				۰/۱۷۱	۰/۹۱	۹	۱۸۵۲۷	۰/۲۵-۰/۷	
				۰/۳۹	۲/۰۸	۵	۴۴۸۵	۰/۷-۴/۰۸	
				۰/۰۹۳	۰/۳۶	۱	۵۱۶۸	۲۹۱-۳۲۵	
				۰	۰	۰	۶۳۵۰	۳۲۵-۳۵۰	
۰/۴۴	۰/۵۸	۲/۳۳	۰/۹۸	۰/۳۹۶	۱/۵۲	۶	۷۴۰۱	۳۵۰-۳۷۳	باران
				۰/۱۸۲	۰/۷۰	۸	۲۱۴۳۱	۳۷۳-۳۹۰	
				۰/۳۲۶	۱/۲۵	۳۲	۴۸۲۵۱	۳۹۰-۴۰۴	
				۰/۱۷۵	۱/۰۶	۱۵	۲۶۵۱۰	۲/۵۷-۵	
				۰/۱۴۲	۰/۸۶	۱۷	۳۶۸۶۱	۵-۶/۴	
۰/۷۳	۰/۶	۲/۳۳	۰/۹۳	۰/۱۵۲	۰/۹۲	۹	۱۸۲۶۹	۶/۴-۸/۳	TWI
				۰/۲۷۱	۱/۶۴	۵	۵۷۴۴	۸/۳-۱۱/۵	
				۰/۲۵۹	۱/۵۷	۱	۱۱۹۹	۱۱/۵-۲۲/۵	

نتایج حاصل از جدول ۲ نشان داد که طبقه شیب ۰-۸ و ۸-۱۴ درجه به ترتیب با مقادیر نسبت فراوانی ۱/۵۵ و ۱/۲۲ بالاترین همبستگی با زمین‌لغزش‌های منطقه دارد و با افزایش درجه شیب حوضه از تعداد زمین‌لغزش‌ها و نسبت فراوانی کم می‌شود که با پژوهش (آدیتیان و همکاران، ۲۰۱۸، ۱۰۱-۱۱۱) مطابقت دارد. علت این امر می‌تواند ناشی از تحت تأثیر قرار گرفتن ویژگی‌های رواناب در شیب‌های کم‌تر باشد، به طوری که در شیب‌های کم نرخ نفوذ بالا رفته و یک حالت ایستایی رخ می‌دهد و در پی آن سطح آب بالا می‌آید و باعث افزایش فشار منفذی شده که باعث افزایش تنش برشی می‌شود (جنیفر و همکاران، ۲۰۲۱، ۷۷۳-۷۸۷).

زمین‌لغزش‌های موجود در منطقه مورد مطالعه با جهت شیب‌های شرقی، جنوب شرقی، جنوب و جنوب غرب همبستگی بالایی ($FR > 1$) دارند. همچنین جهت شیب جنوب شرقی با نسبت فراوانی (۱/۷۵) ۲۳/۴ درصد از زمین‌لغزش‌های منطقه

را به خود اختصاص داده است که دلیل این امر می‌تواند ناشی از دریافت بیشتر بارندگی و در معرض فرسایش قرار گرفتن باشد (پانچال و شریواستاوا، ۲۰۲۱، ۱-۲۰). نفوذ بارندگی باعث افزایش وزن شیب شده و باعث کاهش مقاومت برشی و کثیفی خاک می‌شود (یان و همکاران^۱، ۲۰۱۹، ۱۸۷-۱۷۰).

در منطقه مورد مطالعه در طبقات بارندگی ۳۹۰-۳۷۳ و ۴۰۴-۳۹۰ میلی‌متر به ترتیب با تعداد ۸ و ۳۲ زمین‌لغزش بیش‌ترین وقوع زمین‌لغزش‌ها مشاهده شده است. همچنین با افزایش بارندگی روند آشکاری در افزایش تعداد وقوع زمین‌لغزش‌ها در منطقه مطالعاتی مشاهده نشده است این یافته (چن و همکاران^۲، ۲۰۱۵، ۱۸۴۱-۱۸۲۹) مطابقت دارد. بررسی ارتباط بین وقوع زمین‌لغزش با معیار ارتفاع در منطقه مورد مطالعه نشان داد که طبقه ارتفاعی ۱۲۶-۴۱۹ با میزان وقوع ۱۹ زمین‌لغزش و بیشترین نسبت فراوانی (۲/۴۴) را داشته است. دیگر نتایج این عامل حاکی از آن بوده که با افزایش ارتفاع از وقوع زمین‌لغزش‌ها کم می‌شود. این یافته با نتایج پژوهش (عمادالدین و همکاران، ۱۴۰۰، ۷۵-۹۵) مطابقت دارد. (چن و همکاران^۳، ۲۰۱۶، ۱۰-۱) دلیل این امر را ناشی از حضور صخره‌ها با سنگ‌های مقاوم به هوازگی در ارتفاعات بالاتر دانسته‌اند. در پژوهش حاضر تعداد ۲۴ زمین‌لغزش در فاصله ۰-۷۰۳ متری تا آبراهه مشاهده شده است. در بین سایر طبقات فاصله از آبراهه این طبقه از بالاترین مقدار نسبت فراوانی ۱/۳۹ برخوردار است. ساختارهای زهکشی نزدیک به دامنه از طریق اشباع کردن مواد در قسمت پایین دامنه و فرسایش روی دامنه به واسطه افزایش سطح آب پایداری دامنه‌ها را تحت تأثیر قرار دهند (چن و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۸۲۹-۱۸۴۱).

بررسی ارتباط زمین‌لغزش‌های منطقه با انحنای سطح و طولی نشان داد که بالاترین نسبت فراوانی بین زمین‌لغزش با معیار انحنای سطح و طولی به ترتیب در طبقه ۴/۲-۱۰/۶۳-۱ دامنه مقعر و طبقه ۰/۷-۴/۰۸-۰ دامنه مقعر مشاهده شده است که با پژوهش (لی و همکاران، ۲۰۲۱، ۱-۱۴) مطابقت داد، اما به‌طور کلی روند آشکاری بین فراوانی زمین‌لغزش‌ها با معیار انحنای سطح و طولی مشاهده نشده است. در پژوهش (شانو و همکاران^۴، ۲۰۲۱، ۱۸-۱) علت ناپایداری شیب در انحنای مقعر و محدب، به ترتیب بالا بودن احتمال وقوع آب زیرزمینی و فرسایش گزارش شده است. نتایج حاصل از هم‌پوشانی بین عامل سنگ‌شناسی منطقه با زمین‌لغزش‌های منطقه حاکی از آن بود که واحدهای زمین‌شناسی plc و Mmsl به ترتیب با نسبت فراوانی ۳/۲ و ۱/۱ از همبستگی بالایی برخوردارند که این امر می‌تواند به دلیل وجود میان لایه‌های رسی در واحد زمین‌شناسی plc و مارن و ماسه‌سنگ سیلتی در واحد Mmsl باشد. مقدار نسبت فراوانی در واحدهای سنگی از جنس ماسه، شن و رس و دگرگونی‌های نرم بالاتر از سنگ‌های سخت است (چن و همکاران، ۲۰۱۵، ۱۸۲۹-۱۸۴۱). شاخص رطوبت توپوگرافی (TWD) منعکس‌کننده شرایط آب در خاک است (دوو و همکاران^۵، ۲۰۱۹، ۳۴۶-۳۳۲). نتایج حاصل از روند شاخص رطوبت توپوگرافی با زمین‌لغزش در منطقه از نوع کاهشی-افزایشی است بدین‌صورت که ابتدا با افزایش شاخص رطوبت توپوگرافی نسبت فراوانی زمین‌لغزش کاهش و سپس افزایش می‌یابد که در طبقه ۱۱/۵-۸/۳ بالاترین مقدار نسبت فراوانی (۱/۶۴) را به خود اختصاص داد که از لحاظ روند با نتایج (پانچال و شریواستاوا، ۲۰۲۱، ۱-۲۰) مطابقت دارد. نتایج حاصل از هم‌پوشانی زمین‌لغزش‌های منطقه با کاربری اراضی نشان داد که در کاربری‌های پهنه آبی (Water) و درخت (tree) زمین‌لغزشی مشاهده نشد و نسبت فراوانی (FR) در این کاربری‌ها صفر به دست آمد که علت این امر می‌تواند ناشی از حفظ پایداری خاک از هوازگی و هدر رفت خاک از طریق ریشه درختان در منطقه باشد که با پژوهش (رحمان و همکاران^۶، ۲۰۲۰، ۱۹-۱) مطابقت دارد، درحالی‌که در اراضی ساخت‌وساز شده (Built Area) بالاترین نسبت

1. Yan et al.

2. Chen et al.

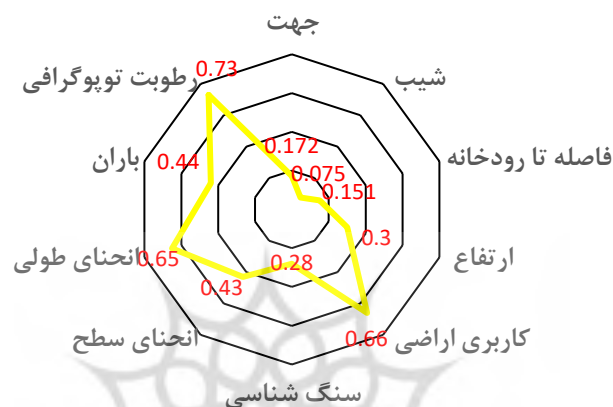
3. Chen et al.

4. Shano et al.

5. Duo et al.

6. Rahman et al.

فراوانی (۳/۴) با زمین‌لغزش‌ها در منطقه دارد و بالا بودن نسبت فراوانی در اراضی ساخت‌وساز شده می‌تواند ناشی از ماشه‌ای عمل کردن فعالیت‌های انسانی در منطقه باشد (ناندا و همکاران^۱، ۲۰۲۱، ۲۹۵۶-۲۹۴۵). شکل ۳ اهمیت هر یک از معیارهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه توجه به عامل وزن هر معیار را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از وزن‌های (Wj) به‌دست‌آمده از روش آنتروپی شانون حاکی از آن است که معیارهای رطوبت توپوگرافی (۰/۷۳)، کاربری اراضی (۰/۶۶) و انحنای طولی (۰/۶۵) به ترتیب بیش‌ترین تأثیر در وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه دارد.



شکل ۳: اهمیت معیارهای مورد استفاده در نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش بر اساس روش آنتروپی شانون

نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش

شکل‌های ۴ و ۵ ناحیه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با روش نسبت فراوانی (FR) و آنتروپی شانون را نشان می‌دهد. کیفیت موفقیت و پیش‌بینی مدل‌ها با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد ROC و سطح زیر منحنی آن (AUC) بیان می‌شود بنابراین مقدار یک برای سطح زیر منحنی AUC بیانگر مدل ایده آل و مقدار ۰/۵ بیانگر مدل بی‌اهمیت است (هداسووا و بدناریک^۲، ۲۰۲۱، ۴۸۱-۴۹۹). در پژوهش حاضر برای موفقیت (آموزش) و پیش‌بینی (آزمون) مدل‌های نسبت فراوانی و آنتروپی شانون برای ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش‌های منطقه از منحنی تشخیص عملکرد (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده شد (شکل ۶ و ۷). در پژوهش‌های (برهان و همکاران^۳، ۲۰۲۰، ۱-۱۵؛ نیکو^۴، ۲۰۱۸، ۱۶-۱؛ وو و همکاران^۵، ۲۰۱۶، ۱-۱۶) برای ارزیابی نرخ موفقیت و پیش‌بینی مدل از منحنی ROC و سطح زیر منحنی AUC استفاده شده است. نتایج ارزیابی نرخ موفقیت و پیش‌بینی مدل با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) و سطح زیر منحنی آن (AUC) نشان داد که سطح زیر منحنی نرخ موفقیت و پیش‌بینی برای مدل نسبت فراوانی و مدل آنتروپی شانون برای ۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها (آموزش) و ۳۰ درصد زمین‌لغزش‌ها (آزمون) به ترتیب برابر با ۰/۷۶، ۰/۷۲ و ۰/۶۲ و ۰/۵۹ به دست آمد که بیانگر عملکرد نسبتاً خوب مدل نسبت فراوانی جهت ناحیه‌بندی حساسیت و پیش‌بینی زمین‌لغزش و عملکرد ضعیف و مردود مدل آنتروپی شانون به ترتیب برای نرخ موفقیت دوره آموزش و پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها در

¹. Nanda et al.

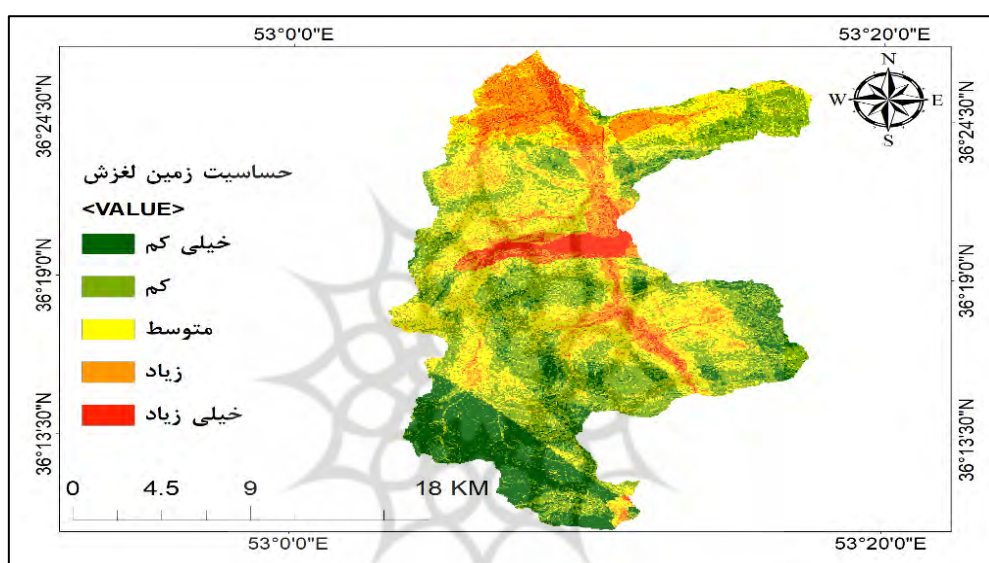
². Hodasová and Bednarik

³. Berhane et al.

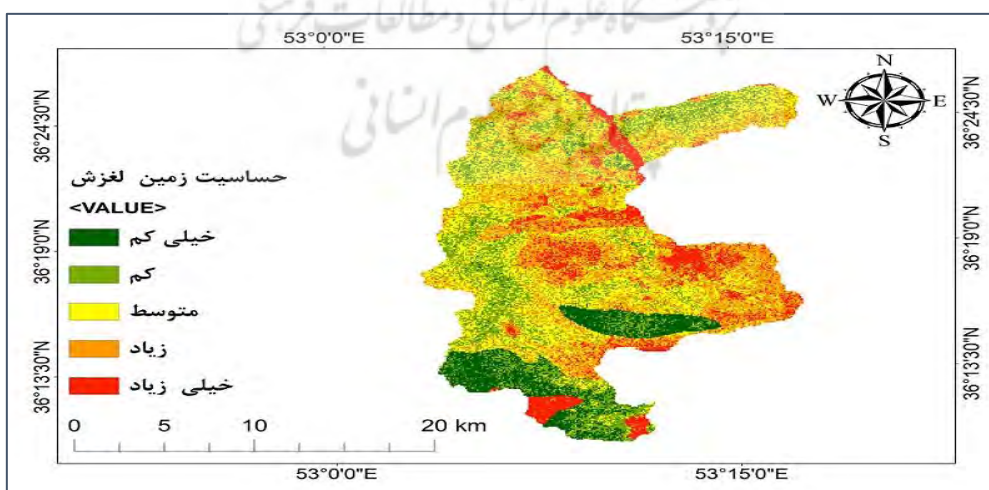
⁴. Nicu

⁵. Wu et al.

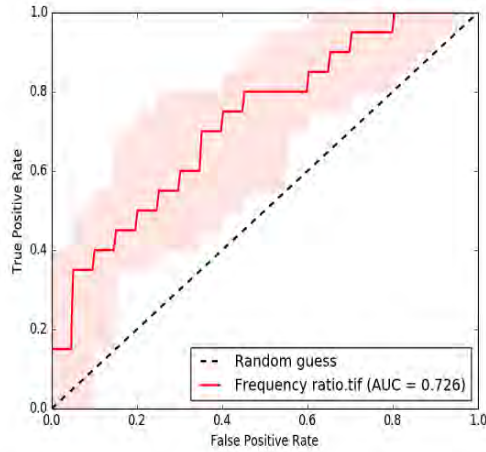
حوضه تجن میانی است. نتایج حاصل از نقشه حساسیت زمین لغزش شکل (۴) با روش نسبت فراوانی نشان می‌دهد که حدود ۱۱۶/۵ و ۱۰۸/۱۵ کیلومترمربع از مساحت حوضه به ترتیب در محدوده حساسیت زمین لغزش کم و متوسط قرار دارد که به ترتیب ۳۲/۴۸۶ و ۳۰/۱۵۶ درصد از کل مساحت حوضه را شامل می‌شود. همچنین ۵۴/۱۰ (درصد)، ۶۱/۲۲ (درصد)، ۱۷/۰۶۶ (درصد) و ۱۸/۶۷ (درصد) کیلومترمربع در محدوده حساسیت به ترتیب خیلی کم، زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. با توجه به نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل نسبت فراوانی می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌تر محدوده حساسیت زمین لغزش زیاد و خیلی زیاد در منطقه مورد مطالعه در امتداد نواحی شمال، شرق، مرکزی و جنوب شرقی قرار دارند. در جدول ۳ مساحت و درصد مساحت محدوده‌های حساسیت به زمین لغزش آمده است.



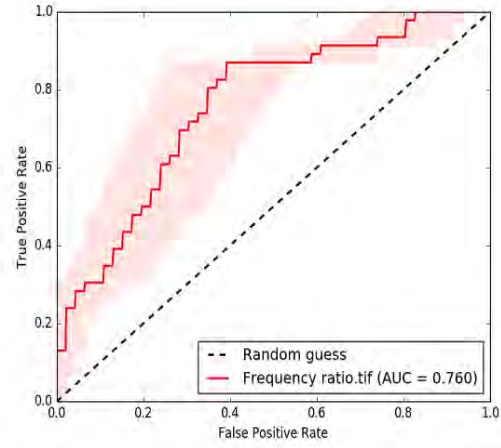
شکل ۴: نقشه ناحیه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل نسبت فراوانی



شکل ۵: نقشه ناحیه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل آنترابی شانون

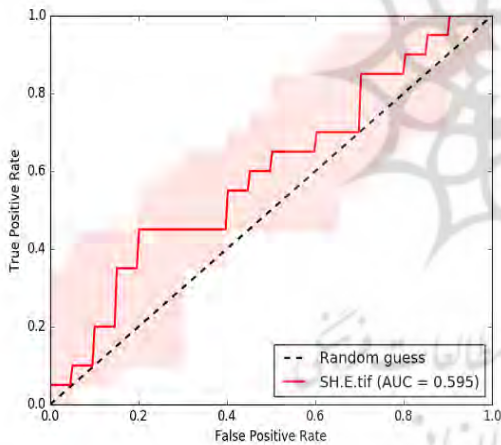


ب

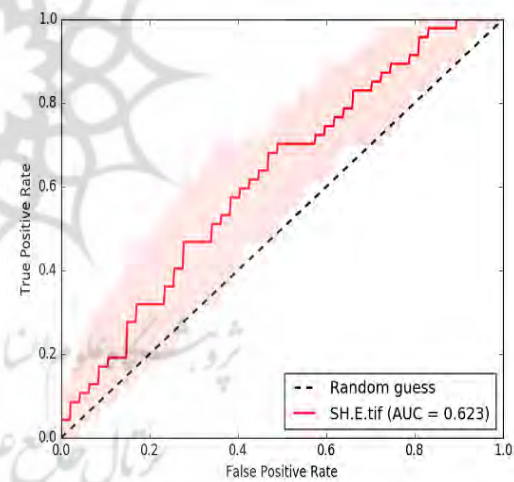


الف

شکل ۶: منحنی مشخصه عملکرد و سطح زیر منحنی AUC برای مدل نسبت فراوانی (الف) آموزش (ب) پیش‌بینی



ت



پ

شکل ۷: منحنی مشخصه عملکرد و سطح زیر منحنی AUC برای مدل آنترופی شانون (پ) آموزش (ت) پیش‌بینی

جدول ۳: مساحت و درصد مساحت حساسیت زمین لغزش حوضه در هر طبقه

درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	طبقه
۱۵/۰۸۶	۵۴/۱۰	خیلی کم
۳۲/۴۸۶	۱۱۶/۵	کم
۳۰/۱۵۶	۱۰۸/۱۵	متوسط
۱۷/۰۶۶	۶۱/۲۲	زیاد
۵/۲۰۶	۱۸/۶۷	خیلی زیاد

نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش یکی از مخاطرات طبیعی است که تلفات جانی و مالی فراوانی تحمیل می‌کند. ناحیه‌بندی مناطق مستعد زمین‌لغزش ضمن شناسایی مناطق حساس و پرخطر، می‌تواند زمینه را برای اجرای طرح‌های مدیریت صحیح در دامنه‌ها به‌منظور کاهش خسارات فراهم سازد. در پژوهش حاضر مدل‌های نسبت فراوانی و آنتروپی شانون جهت ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز تجن میانی واقع در استان مازندران به کار گرفته شد. بدین منظور از تعداد ۶۸ زمین‌لغزش ثبت‌شده در حوضه مورد مطالعه، ۷۰ درصد برای مدل‌سازی و ۳۰ درصد جهت ارزیابی مدل استفاده گردید. همچنین تعداد ۱۰ عامل مهم شیب، جهت شیب، فاصله تا آبراهه، ارتفاع، کاربری اراضی، لیتولوژی، باران، انحناى سطح، انحناى طولی و شاخص رطوبت توپوگرافی در فرایند مدل‌سازی استفاده شد. با توجه به نتایج نسبت فراوانی (مقادیر FR) می‌توان نتیجه گرفت که زمین‌لغزش‌های موجود در منطقه با معیارهای جهت جنوب شرقی (۱/۷۵)، شیب ۸-۰ درصد (۱/۵۵)، فاصله تا آبراهه ۰-۷۰۳ متر (۱/۳۹)، ارتفاع ۱۲۶-۴۱۹ متر (۲/۴۴)، کاربری اراضی ساخت‌وساز شده (۳/۴۴)، لیتولوژی plc (۳/۲۹)، انحناى سطح مقعر (۱/۸۳)، انحناى طولی مقعر (۲/۰۸)، باران ۳۵۰-۳۷۳ میلی‌متر (۱/۵۲)، شاخص رطوبت توپوگرافی ۸/۳-۱۱/۵ (۱/۶۴) بالاترین همبستگی را دارند. نتایج به‌دست‌آمده از وزن‌های به‌دست‌آمده هر یک از عوامل با زمین‌لغزش‌های ثبت‌شده در منطقه مورد مطالعه نشان داد، معیار رطوبت توپوگرافی با وزن ۰/۷۳ بیش‌ترین تأثیر و اهمیت در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش منطقه دارد. همچنین نتایج حاصل از نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه نشان داد بیش از نیمی از مساحت حوضه (۵۲/۴۲۸ درصد) در محدوده حساسیت زمین‌لغزش متوسط تا خیلی زیاد قرار دارد. در پژوهش حاضر برای ارزیابی نرخ موفقیت و پیش‌بینی دو مدل نسبت فراوانی و آنتروپی شانون از سطح زیر منحنی ROC استفاده شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از منحنی ROC، مدل نسبت فراوانی با توجه به مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) به ترتیب با نرخ موفقیت (۰/۷۶) و نرخ پیش‌بینی (۰/۷۲) نسبت به مدل آنتروپی شانون با نرخ موفقیت و پیش‌بینی به ترتیب برابر ۰/۶۲ و ۰/۵۹ عملکرد نسبتاً خوبی جهت ناحیه‌بندی نقشه حساسیت به زمین‌لغزش در منطقه مطالعه حوضه تجن میانی دارد. برای منطقه مورد مطالعه دو نوع سازکار مدیریتی پیشگیری و درمان می‌توان اتخاذ کرد به طوری که در ساز و کار مدیریتی پیشگیری باید تمرکز بر روی مناطقی باشد که از لحاظ حساسیت زمین‌لغزش در طبقه متوسط قرار دارند و از جمله اقدامات مدیریتی پیشگیری می‌توان به (حذف آب از روی دامنه به واسطه زهکشی مناسب اراضی و جلوگیری از تغییرات غیرمجاز اراضی و جلوگیری از ساخت و ساز بیش از حد اراضی مسکونی در این مناطق اشاره کرد در حالی که در ساز و کار درمانی اقداماتی از قبیل تثبیت توده‌های لغزشی در مناطق پرخطر که می‌تواند با روش‌های بیولوژیکی و مکانیکی همراه باشد. از آنجایی که در چند دهه‌ی اخیر به دلیل تغییر کاربری و تخریب منابع طبیعی، زمین‌لغزش به یک خطری جدی و بزرگ در بسیاری از مناطق دنیا تبدیل شده است، بنابراین تهیه نقشه ناحیه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش جهت مدیریت دامنه‌های پرخطر و آمایش سرزمین نقش مهمی ایفا می‌کند.

منابع

- آرین تبار، ح، شرفی، س، و نگهبان، س، ۱۳۹۹. ارزیابی روش جمع کیفی (QS) جهت تعیین گامای بهینه در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: جنگل توسکستان تا گرگان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۳، صص ۷۰-۸۷.
- رضوی ترمه، س و، و شیرانی، ک، ۱۳۹۷. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، آنتروپی و روش تصمیم‌گیری تاپسیس (مطالعه موردی: حوزه فهلیمان، فارس)، سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۹، شماره ۴، صص ۱۱۹-۱۳۸.

- عرب عامری، ع، شیرانی، ک، و رضایی، خ، ۱۳۹۶. ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های احتمالاتی وزن واقعه و نسبت فراوانی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز ونک، اصفهان)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، دوره ۸، شماره ۱۵، صص ۱۴۷-۱۶۰.
- عمادالدین، س، طاهری، و، محمدقاسمی، م، و نظری گزیک، ز، ۱۴۰۰. پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و شاخص آماری در حوضه آبخیز اوغان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۴، صص ۷۵-۹۵.
- غلامی، م، سلیمانی، ک، و نکویی قاچکانلو، ا، ۱۳۹۶. تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت به وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های وزن شواهد (WofE)، نسبت فراوانی (FR) و دمپستر-شیفر (DSH) مطالعه ی موردی: محدوده ی ساری-کیاسر، مرتع و آبخیزداری (منابع طبیعی ایران)، دوره ۷۰، شماره ۳، صص ۷۳۵-۷۵۰.
- محمدنیا، م، امیراحمدی، ا، و سلگی، ل، ۱۳۹۳. تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل تلفیقی نسبت فراوانی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، ژئومورفولوژی کاربردی ایران، دوره ۳، شماره ۵، صص ۴۵-۵۸.
- *Abdo, H. G. (2021). Assessment of landslide susceptibility zonation using frequency ratio and statistical index: a case study of Al-Fawar basin, Tartous, Syria, International Journal of Environmental Science and Technology, 19(4), 2599-2618.*
- *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.*
- *Akinci, H., & Yavuz Ozalp, A. (2021). Landslide susceptibility mapping and hazard assessment in Artvin (Turkey) using frequency ratio and modified information value model. Acta Geophysica, 69(3), 725-745.*
- *Berhane, G., Kebede, M., & Alfarrah, N. (2021). Landslide susceptibility mapping and rock slope stability assessment using frequency ratio and kinematic analysis in the mountains of Mgulat area, Northern Ethiopia. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 80(1), 285-301.*
- *Berhane, G., Kebede, M., Alfarah, N., Hagos, E., Grum, B., Giday, A., & Abera, T. (2020). Landslide susceptibility zonation mapping using GIS-based frequency ratio model with multi-class spatial data-sets in the Adwa-Adigrat mountain chains, northern Ethiopia. Journal of African Earth Sciences, 164, 1-15.*
- *Bousquet, O., von Luxburg, U., & Rätsch, G. (Eds.). (2011). Advanced Lectures on Machine Learning: ML Summer Schools 2003, Canberra, Australia, February 2-14, 2003, Tübingen, Germany, August 4-16, 2003, Revised Lectures (Vol. 3176). Springer.*
- *Chen, W., Chai, H., Sun, X., Wang, Q., Ding, X., & Hong, H. (2016). A GIS-based comparative study of frequency ratio, statistical index and weights-of-evidence models in landslide susceptibility mapping. Arabian Journal of Geosciences, 9(3), 1-16.*
- *Chen, W., Ding, X., Zhao, R., & Shi, S. (2016). Application of frequency ratio and weights of evidence models in landslide susceptibility mapping for the Shangzhou District of Shangluo City, China. Environmental Earth Sciences, 75(1), 1-10.*
- *Chen, W., Li, W., Hou, E., Bai, H., Chai, H., Wang, D., ... & Wang, Q. (2015). Application of frequency ratio, statistical index, and index of entropy models and their comparison in landslide susceptibility mapping for the Baozhong Region of Baoji, China. Arabian Journal of Geosciences, 8(4), 1829-1841.*
- *Chen, W., Pourghasemi, H. R., Panahi, M., Kornejady, A., Wang, J., Xie, X., & Cao, S. (2017). Spatial prediction of landslide susceptibility using an adaptive neuro-fuzzy inference system combined with frequency ratio, generalized additive model, and support vector machine techniques. Geomorphology, 297, 69-85.*

- Chen, X., & Chen, W. (2021). GIS-based landslide susceptibility assessment using optimized hybrid machine learning methods. *Catena*, 196, 104833.
- Dam, N. D., Amiri, M., Al-Ansari, N., Prakash, I., Le, H. V., Nguyen, H. B. T., & Pham, B. T. (2022). Evaluation of Shannon Entropy and Weights of Evidence Models in Landslide Susceptibility Mapping for the Pithoragarh District of Uttarakhand State, India. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 1-16.
- Ding, Q., Chen, W., & Hong, H. (2017). Application of frequency ratio, weights of evidence and evidential belief function models in landslide susceptibility mapping. *Geocarto international*, 32(6), 619-639.
- Dou, J., Yunus, A. P., Bui, D. T., Merghadi, A., Sahana, M., Zhu, Z., ... & Pham, B. T. (2019). Assessment of advanced random forest and decision tree algorithms for modeling rainfall-induced landslide susceptibility in the Izu-Oshima Volcanic Island, Japan. *Science of the total environment*, 662, 332-346.
- Elvis, B. W. W., Arsène, M., Théophile, N. M., Bruno, K. M. E., & Olivier, O. A. (2022). Integration of shannon entropy (SE), frequency ratio (FR) and analytical hierarchy process (AHP) in GIS for suitable groundwater potential zones targeting in the Yoyo river basin, Méiganga area, Adamawa Cameroon. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 39, 100997, 1-24.
- Es-smairi, A., Elmoutchou, B., Mir, R. A., Touhami, A. E. O., & Namous, M. (2022). Spatial prediction of landslide susceptibility using Frequency Ration (FR) and Shannon Entropy (SE) models: a case study from northern Rif, Morocco, 1-30.
- Fayez, L., Pazhman, D., Pham, B. T., Dholakia, M. B., Solanki, H. A., Khalid, M., & Prakash, I. (2018). Application of frequency ratio model for the development of landslide susceptibility mapping at part of Uttarakhand State, India. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 13(9), 6846-6854.
- Guo, C., Montgomery, D. R., Zhang, Y., Wang, K., & Yang, Z. (2015). Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China. *Geomorphology*, 248, 93-110.
- Hodasová, K., & Bednarik, M. (2021). Effect of using various weighting methods in the process of landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 105(1), 481-499.
- Huang, F., Yao, C., Liu, W., Li, Y., & Liu, X. (2018). Landslide susceptibility assessment in the Nantian area of China: a comparison of frequency ratio model and support vector machine. *Geomatics, Natural Hazards and Disaster*, 9(1), 919-938.
- Jennifer, J. J., Saravanan, S., & Abijith, D. (2021). Application of Frequency Ratio and Logistic Regression Model in the Assessment of Landslide Susceptibility Mapping for Nilgiris District, Tamilnadu, India. *Indian Geotechnical Journal*, 51(4), 773-787.
- 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.
- Li, B., Wang, N., & Chen, J. (2021). GIS-based landslide susceptibility mapping using information, frequency ratio, and artificial neural network methods in Qinghai Province, Northwestern China. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-14.
- Liu, H., Li, X., Meng, T., & Liu, Y. (2020). Susceptibility mapping of damming landslide based on slope unit using frequency ratio model. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(16), 1-19.
- Melese, T., Belay, T., & Andemo, A. (2022). Application of analytical hierarchal process, frequency ratio, and Shannon entropy approaches for landslide susceptibility mapping

- using geospatial technology: The case of Dejen district, Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 1-21.
- Morino, C., Coratza, P., & Soldati, M. (2022). Landslides, a Key Landform in the Global Geological Heritage. 1-20.
 - Nanda, A. M., Ahmed, P., & Kanth, T. A. (2021). Landslide susceptibility assessment of national highway 1D from Sonamarg to Kargil, Jammu and Kashmir, India using frequency ratio method. *GeoJournal*, 86(6), 2945-2956.
 - Nicu, I. C. (2018). Application of analytic hierarchy process, frequency ratio, and statistical index to landslide susceptibility: an approach to endangered cultural heritage. *Environmental earth sciences*, 77(3), 1-16.
 - Ozdemir, A., & Altural, T. (2013). A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 180-197.
 - Panchal, S., & Shrivastava, A. K. (2021). A comparative study of frequency ratio, Shannon's entropy and analytic hierarchy process (AHP) models for landslide susceptibility assessment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(9), 603.
 - Rahman, G., Rahman, A. U., Bacha, A. S., Mahmood, S., Moazzam, M. F. U., & Lee, B. G. (2020). Assessment of landslide susceptibility using weight of evidence and frequency ratio model in Shahpur Valley, Eastern Hindu Kush. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-19.
 - Riaz, M. T., Basharat, M., Hameed, N., Shafique, M., & Luo, J. (2018). A data-driven approach to landslide-susceptibility mapping in mountainous terrain: case study from the Northwest Himalayas, Pakistan. *Natural Hazards Review*, 19(4), 05018007, 1-20.
 - Saranaathan, S. E., Mani, S., Ramesh, V., & Prasanna Venkatesh, S. (2021). Landslide susceptibility zonation mapping using bivariate statistical frequency ratio method and GIS: a case study in part of SH 37 Ghat Road, Nadugani, Panthalur Taluk, The Nilgiris. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(2), 275-291.
 - Shano, L., Raghuvanshi, T. K., & Meten, Mt (2021). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio model: the case of Gamo highland, South Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(7), 1-18.
 - Shu, H., Guo, Z., Qi, S., Song, D., Pourghasemi, H. R., & Ma, J. (2021). Integrating Landslide Typology with Weighted Frequency Ratio Model for Landslide Susceptibility Mapping: A Case Study from Lanzhou City of Northwestern China. *Remote Sensing*, 13(18), 3623, 1-32.
 - Silalahi, F. E. S., Arifianti, Y., & Hidayat, F. (2019). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia. *Geoscience Letters*, 6(1), 1-17.
 - Vakhshoori, V., & Zare, M. (2016). Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(5), 1731-1752.
 - Wang, L. J., Guo, M., Sawada, K., Lin, J. C., & Zhang, J. (2016). A comparative study of landslide susceptibility maps using logistic regression, frequency ratio, decision tree, weights of evidence and artificial neural network. *Geosciences Journal*, 20(1), 117-136.
 - Wang, Q., Li, W., Yan, S., Wu, Y., & Pei, Y. (2016). GIS based frequency ratio and index of entropy models to landslide susceptibility mapping (Daguan, China). *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 1-16.

- Wu, Y., Li, W., Wang, Q., Liu, Q., Yang, D., Xing, M., ... & Yan, S. (2016). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio, statistical index and certainty factor models for the Gangu County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 1-16.
- Wubalem, A. (2021). Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uatzau catchment area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 1-21.
- Yan, F., Zhang, Q., Ye, S., & Ren, B. (2019). A novel hybrid approach for landslide susceptibility mapping integrating analytical hierarchy process and normalized frequency ratio methods with the cloud model. *Geomorphology*, 327, 170-187.
- Zhang, Y. X., Lan, H. X., Li, L. P., Wu, Y. M., Chen, J. H., & Tian, N. M. (2020). Optimizing the frequency ratio method for landslide susceptibility assessment: A case study of the Caiyuan Basin in the southeast mountainous area of China. *Journal of Mountain Science*, 17(2), 340-357.

