

تعیین پهنه‌های حساس به وقوع لغزش با استفاده از روش آنتروپی شانون
(مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهاردانگه - استان مازندران)

زینب تیموری یانسری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
سیدرضا حسین‌زاده^۱ - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
عطاالله کاویان - دانشیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
حمیدرضا پورقاسمی - استادیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۹ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۱/۱۳

چکیده

زمین‌لغزش، یکی از مهم‌ترین خطرات ژئومورفولوژیکی با خسارات اکولوژیکی و اقتصادی قابل توجه است. منطقه مورد مطالعه به دلیل شرایط فیزیوگرافی و آب‌وهوایی از مناطق حساس و در معرض خطر زمین‌لغزش محسوب می‌گردد. پژوهش حاضر با هدف تعیین عرصه‌های حساس به وقوع زمین‌لغزش با استفاده از شاخص آنتروپی شانون در حوزه آبخیز چهاردانگه (استان مازندران) صورت پذیرفته است. به این منظور، ابتدا نقشه پراکنش زمین‌لغزش منطقه با استفاده از تصاویر گوگل ارث و بازدیدهای گسترده میدانی تهیه گردید. نقشه‌های عوامل تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش شامل درجه شیب، جهت شیب، انحنا سطح، انحنا نیم‌رخ، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص وضعیت توپوگرافی، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از شبکه آبراهه، فاصله از جاده، تراکم گسل، تراکم زهکشی و تراکم جاده در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. نتایج اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از شاخص آنتروپی نشان داد که لایه‌های ارتفاع، درجه شیب، انحنا سطح و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه، داشته‌اند و ۵۱/۰۵ درصد منطقه مورد مطالعه در طبقه حساسیت زیاد و خیلی زیاد نسبت به وقوع زمین‌لغزش قرار دارد. همچنین ارزیابی نقشه حساسیت تهیه شده با استفاده از منحنی ROC و ۳۰ درصد نقاط لغزشی بیانگر دقت خوب مدل مذکور برای منطقه مورد مطالعه است.

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی زمین‌لغزش، مدل آنتروپی شانون، منحنی تشخیص عملکرد نسبی، حوزه آبخیز چهاردانگه.

۱. مقدمه

زمین لغزش، یکی از مهم‌ترین خطرات ژئومورفولوژیکی با خسارات اکولوژیکی و اقتصادی قابل توجه است که منجر به میلیاردها دلار خسارت مالی و تلفات هزاران نفر در سال می‌شود. در کشورهای درحال توسعه هر ساله بیش از ۵/۰ درصد تولید ناخالص ملی در اثر زمین لغزش از بین می‌رود (چن^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). شرایط کوهستانی همراه با فعالیت تکتونیکی بالا، تنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، فلات ایران را مستعد انواع مختلف زمین لغزش‌ها ساخته است. رخداد زمین لغزش در شمال ایران (کمر بند کوهستانی البرز) اغلب ناشی از شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی و فعالیت تکتونیکی بالای این ناحیه می‌باشد (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲). خسارات ناشی از حرکات توده‌ای در ایران تا پایان شهریور ۱۳۸۶، ۱۲/۷ میلیارد ریال برآورد شده است (کارگروه مطالعه امور زمین لغزش، ۱۳۸۶). به منظور کاهش و یا کنترل خسارت ناشی از زمین لغزش، تهیه نقشه‌های حساسیت، خطر و ارزیابی ریسک زمین لغزش امری ضروری است (ونگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). به طور کلی حساسیت زمین لغزش به بررسی و ارزیابی زمین لغزش‌های موجود و یا مناطق دارای پتانسیل و امکان رخداد زمین لغزش، بدون توجه به زمان رویداد آن می‌پردازد (گوزتی و همکاران، ۲۰۰۵ و چن و همکاران، ۲۰۱۵). اعتبار نقشه‌های حساسیت زمین لغزش عمدتاً بستگی به مقدار و کمیّت داده‌های موجود، مقیاس کار و انتخاب روش مناسب تحلیل و مدل‌سازی دارد (بازا و کورمیناس^۳، ۲۰۰۱). برای تهیه نقشه‌های حساسیت زمین لغزش، روش‌های مختلفی ارائه شده است. بر اساس رویکرد مدل‌سازی، آن‌ها را می‌توان به ۴ گروه اصلی آماری، تحلیلی، قطعی و ابتکاری (اکتشافی) تقسیم کرد (گوزتی^۴ و همکاران، ۱۹۹۹) که هر کدام مزایا و محدودیت‌هایی دارند. از آنجایی که زمین لغزش‌ها در زمره بلایای طبیعی ویرانگر قرار دارند، محققان زیادی در سراسر جهان جهت ارزیابی حساسیت و خطر زمین لغزش از روش‌های مختلفی استفاده کرده‌اند. برخی از مطالعاتی که با استفاده از شاخص انتروپی (IoE^۵) انجام پذیرفته، به شرح ذیل می‌باشد:

(بندریک^۶ و همکاران، ۲۰۱۰؛ کنستانتین^۷ و همکاران، ۲۰۱۱؛ بندریک و همکاران، ۲۰۱۲؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲؛ دوکوتا^۸ و همکاران، ۲۰۱۳؛ جعفری و همکاران، ۲۰۱۴؛ ون^۹؛ یوسف و همکاران،

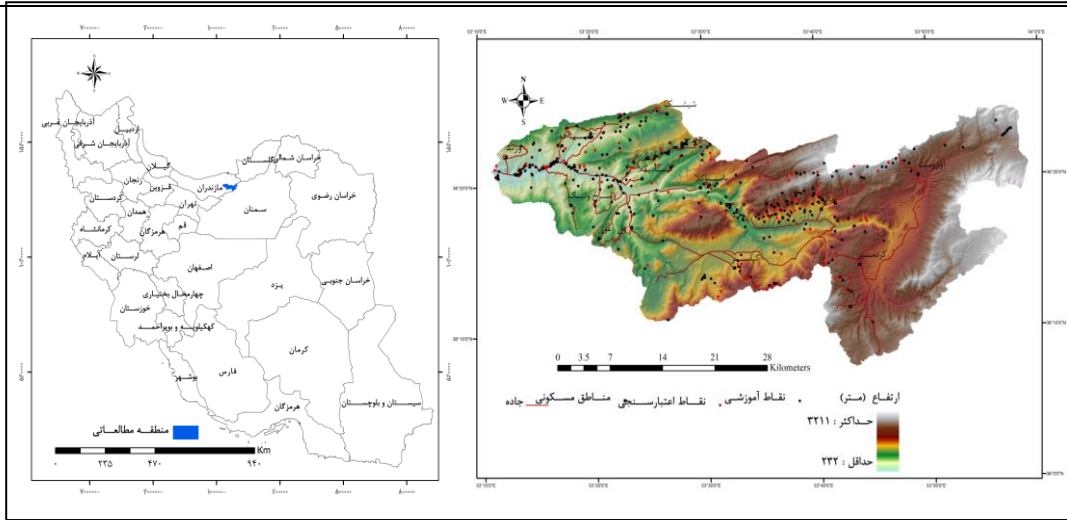
-
- 1 Chen
 - 2 Wang
 - 3 BaezaandCorominas
 - 4 Guzzetti
 - 5 Index of Entropy
 - 6 Bednarik
 - 7 Constantin
 - 8 Devkota
 - 9 Wan

۲۰۱۶؛ ونگو همکاران، ۲۰۱۵؛ چن و همکاران، ۲۰۱۶؛ ونگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ مقیمی و همکاران، ۱۳۹۱؛ پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۳ و حسین‌پور میل‌آغاردان، (۱۳۹۳).

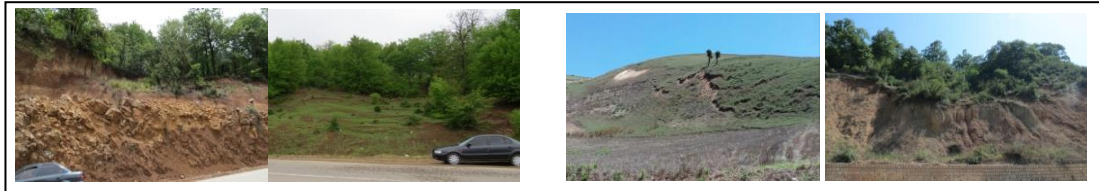
شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش، گامی مهم در ارزیابی خطرات محیطی به‌شمار می‌رود و نقش انکارناپذیری در مدیریت حوزه‌های آبخیز دارد (مقیمی و همکاران، ۱۳۹۱). در واقع می‌توان با استفاده از نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و انجام اقدامات مدیریتی مناسب در مناطق با پتانسیل خطر بالا، خسارات وارده را کمتر کرد. تاکنون مطالعه جامعی در ارتباط با تجزیه و تحلیل حساسیت زمین‌لغزش در حوزه آبخیز چهاردانگه که یکی از مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش می‌باشد، انجام نشده است؛ بنابراین انجام پژوهش حاضر برای ارزیابی و مدیریت منطقه مورد مطالعه به‌منظور پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش، ضروری است. هدف از پژوهش حاضر، تعیین عرصه‌های حساس به وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش انتروپی شانون در حوزه آبخیز چهاردانگه و ارزیابی میزان دقت مدل مذکور در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

۲. منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز چهاردانگه که یکی از زیرحوزه‌های اصلی رودخانه تجن است، قسمت‌های میانی دامنه‌های شمالی البرز را زهکشی می‌نماید. این حوزه با مساحتی بالغ بر $1210/80$ کیلومتر مربع، دارای ارتفاع متوسط 1499 متر، حداقل ارتفاع 232 متر، حداکثر ارتفاع 3211 متر و شیب متوسط $18/18$ درجه می‌باشد (شکل ۱). متوسط بارش سالانه منطقه $464/62$ میلی‌متر است. حداکثر و حداقل بارش منطقه، مربوط به ماه‌های آذر و خرداد با $84/05$ و $19/23$ میلی‌متر می‌باشد. کاربری‌های عمده منطقه شامل جنگل ($51/17$ درصد) که بیشتر بخش غربی منطقه را تحت پوشش قرار داده است، مرتع ($32/31$ درصد) که بیشتر در بخش شرقی منطقه دیده می‌شود و کشاورزی ($14/68$ درصد) می‌باشد. واحدهای سنگی که گستره منطقه را پوشانیده‌اند، شامل رسوبات پالئوزویک تا عهد حاضر می‌باشد که به علت تنوع واحدهای سنگی در 11 گروه عمده به شرح ذیل قرار گرفتند: ۱- نهشته‌های قاره‌ای. ۲- نهشته‌های رودخانه‌ای. ۳- میان لایه‌های کنگلومرا، ماسه‌سنگ و مارن. ۴- مارن. ۵- سنگ‌های آتشفشانی. ۶- میان لایه‌های ماسه‌سنگ و مارن. ۷- میان لایه‌های آهکی. ۸- سنگ‌آهک توده‌ای. ۹- سنگ‌آهک. ۱۰- ماسه‌سنگ. ۱۱- کنگلومرا. به‌طور کلی، $25/64$ درصد منطقه از گروه ۶ زمین‌شناسی حاوی میان لایه‌های ماسه‌سنگ و مارن پوشیده شده است، در حالی که $25/31$ درصد گستره منطقه مورد مطالعه، تحت پوشش گروه ۳ زمین‌شناسی، متشکل از کنگلومرا، ماسه‌سنگ با میان لایه‌های مارن است.



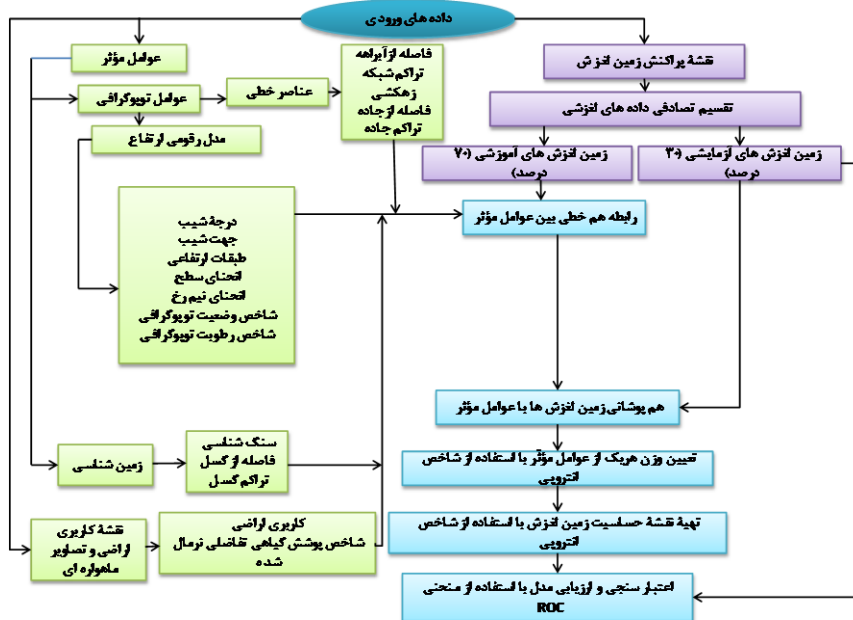
شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲ نمونه‌ای از زمین لغزش‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه

۳. مواد و روش‌ها

شکل ۲ مراحل مختلف روش تحقیق و تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش را نشان می‌دهد.



شکل ۳ نمودار مراحل مختلف تحقیق

تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش شامل ۴ مرحله به شرح ذیل است:

- ۱- آماده‌سازی لایه‌ها. ۲- تجزیه و تحلیل همبستگی لایه‌ها. ۳- مدل‌سازی حساسیت زمین لغزش. ۴- اعتبارسنجی مدل.

۱-۳. آماده‌سازی لایه‌ها

اولین گام در تهیه نقشه‌های حساسیت زمین لغزش، آماده‌سازی نقشه پراکنش زمین لغزش‌های رخ داده در گذشته است. این مرحله، به‌عنوان مهم‌ترین بخش و پیش‌نیاز مطالعات حساسیت و خطر زمین لغزش محسوب می‌گردد (رگمی^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). به این منظور، ابتدا موقعیت زمین لغزش‌های رخ داده در منطقه با استفاده از تصاویر گوگل ارث و بازدیدهای گسترده میدانی شناسایی گردید و در مجموع ۴۸۵ زمین لغزش در منطقه تشخیص داده شد. از این تعداد ۳۴۰ (۷۰ درصد) زمین لغزش به‌صورت تصادفی به‌عنوان داده‌های آموزشی انتخاب شد و ۱۴۵ (۳۰ درصد) زمین لغزش دیگر، به‌منظور اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۳. عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش

به‌منظور توسعه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش قابل اعتماد، شناسایی و انتخاب عوامل مؤثر مناسب در رخداد زمین لغزش گامی مهم و اساسی به‌شمار می‌آید (پورقاسمی و روسی، ۲۰۱۶). عوامل کنترل‌کننده ناپایداری که در این تحقیق در نظر گرفته شده است، شامل درجه شیب، جهت شیب، انحنا سطح، انحنا نیم‌رخ، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص وضعیت توپوگرافی، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از شبکه آبراهه، فاصله از جاده، تراکم گسل، تراکم زهکشی و تراکم جاده است. هر یک از نقشه‌های موضوعی به شرح ذیل تهیه گردید:

با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ منطقه، نقشه مدل رقومی ارتفاع با تفکیک مکانی ۲۰×۲۰ متر در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد و پارامترهای مورفومتریک درجه شیب، جهت شیب، انحنا سطح، انحنا نیم‌رخ، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی^۳ (رابطه ۱) و شاخص وضعیت توپوگرافی^۴ از آن به‌دست آمد (مور^۵ و همکاران، ۱۹۹۱).

$$\text{رابطه (۱)} \quad TWI = L$$

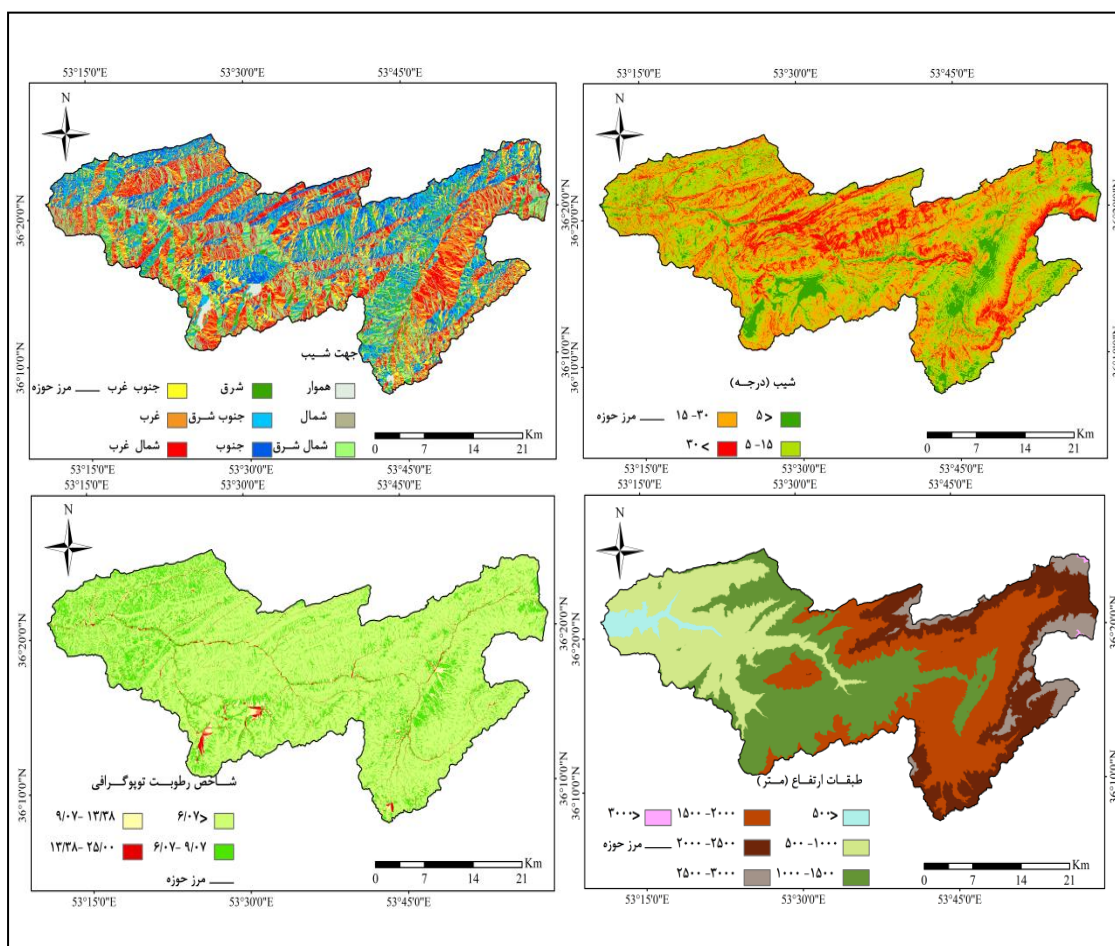
A_c : مساحت منطقه زهکشی، β : گرادیان شیب بر حسب درجه، TWI : شاخص رطوبت توپوگرافی.

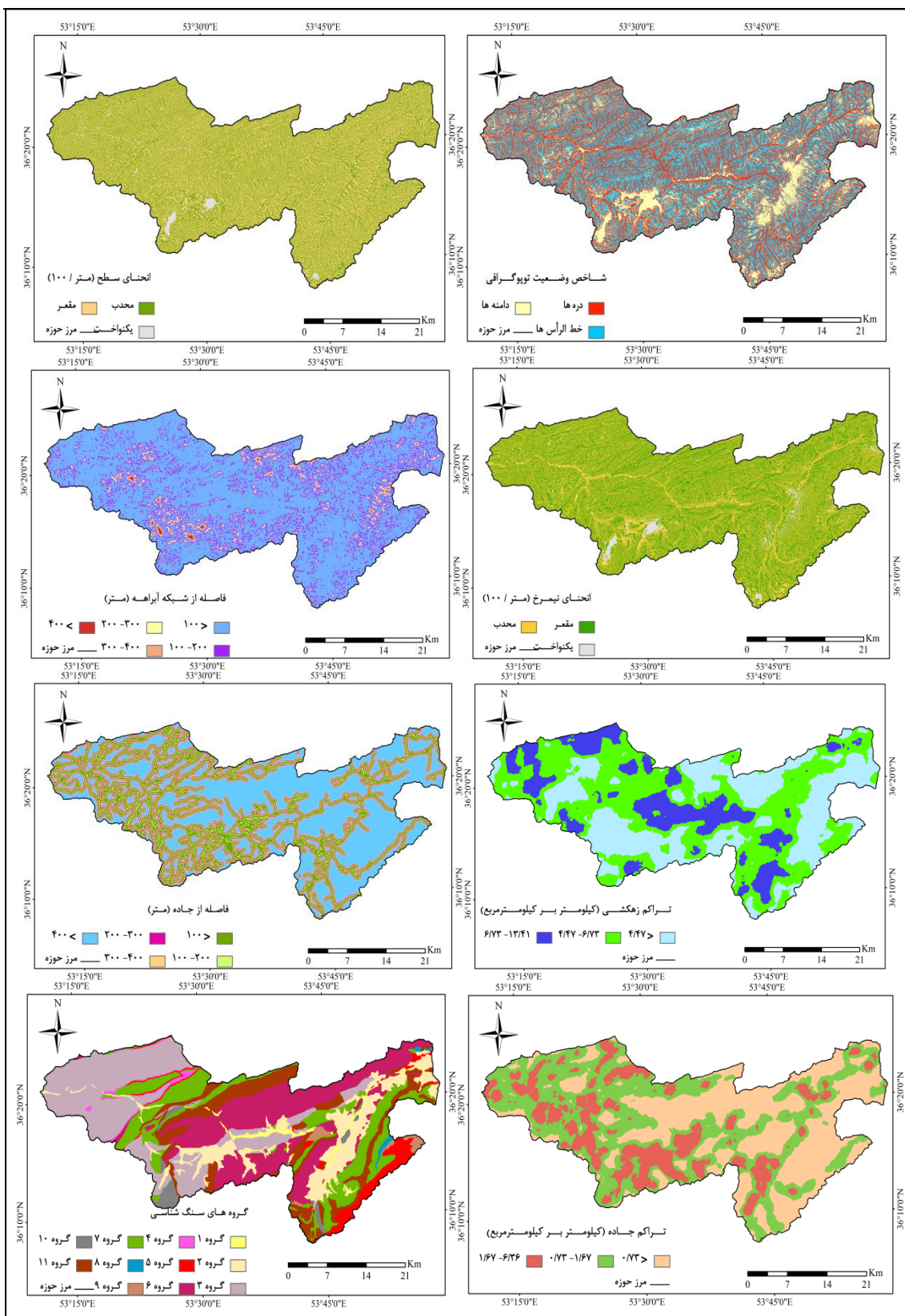
- 1 Regmi
- 2 Rossi
- 3 Topographic Wetness Index (TWI)
- 4 Topographic Position Index (TPI)
- 5 Moore

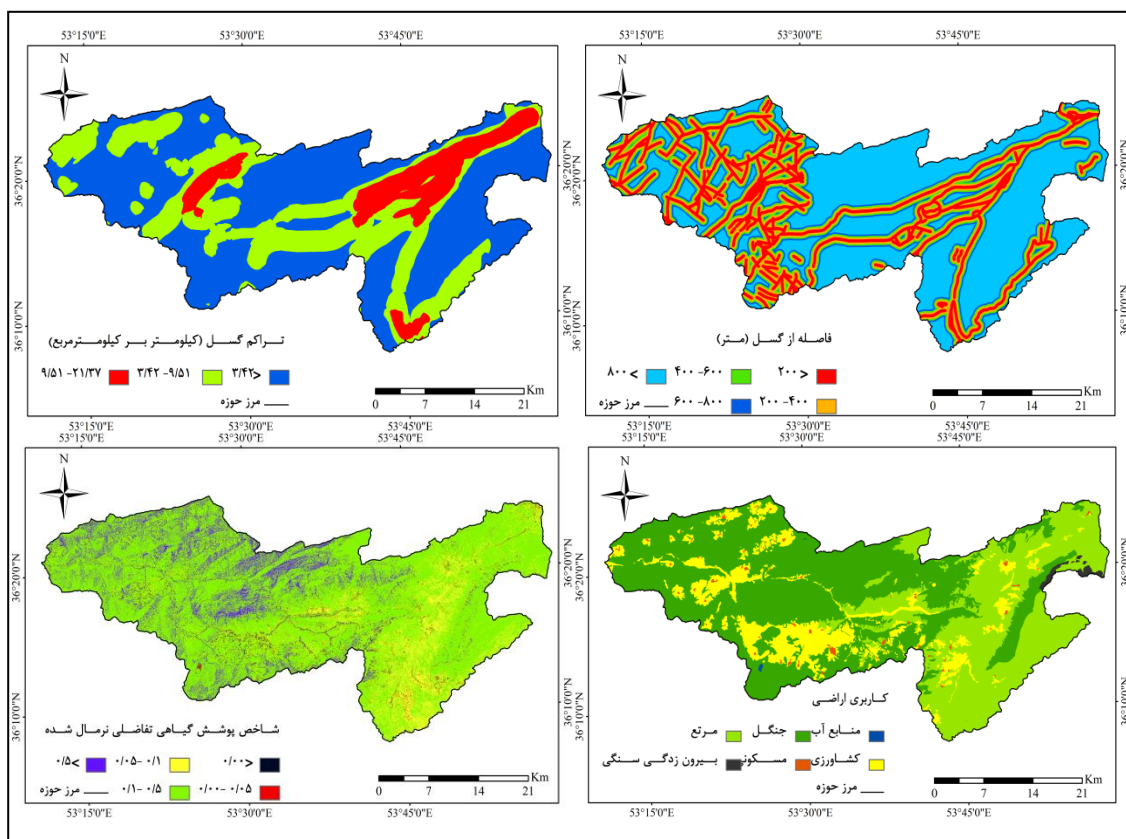
لایه کاربری اراضی از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور تهیه شد و پس از به‌روزرسانی و انجام اصلاحات با استفاده از تصاویر گوگل ارث مورد استفاده قرار گرفت. نقشه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI) نیز از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸، سنجنده OLI پس از انجام تصحیحات هندسی و رادیومتریک به‌دست آمد (رابطه ۲):

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن IR و R به ترتیب باند مادون قرمز و قرمز طیف الکترومغناطیسی می‌باشند. نقشه زمین‌شناسی منطقه از رقوم‌های زمین‌شناسی ورقه‌های کیاسر و پل سفید در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. از این نقشه‌ها همچنین برای تهیه نقشه‌های فاصله از گسل و تراکم گسل استفاده شد. نقشه‌های فاصله از شبکه آبراهه، تراکم زهکشی، فاصله از جاده، تراکم جاده نیز از نقشه‌های توپوگرافی تهیه گردید (شکل ۴).







شکل ۴ نقشه‌های عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش حوزه آبخیز چهاردانگه

۳-۳. عوامل مؤثر بر وقوع لغزش

در این تحقیق، از روش نسبت فراوانی (FR) جهت تعیین ارتباط بین زمین‌لغزش‌ها و عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها استفاده شد. روش نسبت فراوانی (FR) روشی احتمالاتی است که بر پایه رابطه بین توزیع زمین‌لغزش‌ها و هریک از عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش بنا نهاده شده است (تای^۱ و همکاران، ۲۰۱۴). روش نسبت فراوانی به‌طور گسترده‌ای در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش استفاده شده است. نسبت فراوانی با استفاده از رابطه (۳) به‌دست آمد (أزدمیر، ۲۰۱۱).

$$FR = \frac{A_i}{A_{ci}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن A_i : درصد زمین‌لغزش در هر طبقه از عوامل مؤثر، A_{ci} : درصد مساحت همان طبقه از عوامل مؤثر و FR: نسبت فراوانی است.

1 Tay
2 Ozdemir

۳-۴. بررسی هم‌خطی بین متغیرهای مستقل

یکی از عوامل مهم در تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش، بررسی رابطه هم‌خطی بین متغیرهای مستقل است. وقتی دو متغیر مستقل بسیار به یکدیگر وابسته باشند، بیانگر وجود هم‌خطی بین آن‌ها است. برای تشخیص این مسئله، از دو شاخص ضریب تحمل^۲ و عامل تورم واریانس^۳ استفاده می‌شود. مقادیر ضریب تحمل کمتر از ۰/۱ یا ۰/۲ و عامل تورم واریانس بالاتر از ۵، نشان‌دهنده مسئله هم‌خطی و همبستگی زیاد بین دو متغیر است (أبرایان^۴، ۲۰۰۷ و پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳).

۵-۳. شاخص انتروپی

عدم قطعیت، مفهومی است که تصمیم‌گیرنده، همواره در فرایند تصمیم‌گیری با آن روبه‌رو است. مدل‌های ریاضی متعددی جهت بررسی عدم قطعیت سیستم‌ها و فرایندها ارائه شده است و در آن تلاش شده تا عدم قطعیت تا جایی که امکان دارد، کاهش پیدا کند. و از طریق آن اطلاعات کیفی و کمی در مورد یک موضوع خاص کنترل شود تا خروجی مدل قابل ارزیابی و کنترل گردد (پاشا و همکاران، ۱۳۹۲). انتروپی روشی جهت اندازه‌گیری یک سیستم بی‌نظم، ناپایدار، نامتعادل و دارای عدم قطعیت است. مقدار انتروپی یک سیستم با درجه بی‌نظمی آن سیستم، مرتبط است. اندازه‌گیری مقدار انتروپی ابتدا توسط بولتزمن ارائه شد که تحت عنوان اصل بولتزمن برای توصیف وضعیت ترمودینامیکی سیستم به‌کار گرفته شد. شانون (۱۹۴۸) اصل بولتزمن را اصلاح و مدل انتروپی را در نظریه اطلاعات پایه‌گذاری کرد. انتروپی قادر به اندازه‌گیری عدم قطعیت منابع اطلاعات است (یوفنگ^۵ و فنگ‌اگزاینگ^۶، ۲۰۰۹). این شاخص نشان‌دهنده میزان بی‌نظمی در محیط است (بندریک و همکاران، ۲۰۱۰). تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از شاخص انتروپی امکان محاسبه وزن مربوط به هر یک از متغیرهای ورودی را فراهم می‌کند (دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۳). مقدار وزن هر یک از عوامل به‌طور جداگانه تحت عنوان شاخص انتروپی بیان می‌گردد، در نتیجه با استفاده از این شاخص، می‌توان عواملی که بیشترین تأثیر را در رخداد زمین‌لغزش یا هر پدیده‌ای دارند، شناسایی کرد. به‌منظور تعیین وزن مربوط به هر یک از عوامل مؤثر از روابط ۴ تا ۸ استفاده شد (بندریک و همکاران، ۲۰۱۰؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲؛ دوکوتا و همکاران، ۲۰۱۳ و وونگ و همکاران، ۲۰۱۶).

1 Multi-collinearity

2 Tolerance

3 Variance inflation factor (VIF)

4 O'Brien

5 Yufeng

6 FengXiang

$$W_f = I_c * FR \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$I_c = \frac{En_{vmax} - En}{En_{max}} \quad c = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$En_{max} = \log_2 N_c \quad \text{کلاس تعداد - } N_c \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$P_d = \frac{FR}{\sum_{c=1}^{N_c} FR} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$FR = \frac{A_l}{A_{cl}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن، A_l : درصد پیکسل‌های لغزشی در هر طبقه از عوامل مؤثر، A_{cl} : درصد پیکسل‌های (مساحت) مربوط به هر طبقه از عوامل مؤثر، FR : نسبت فراوانی لغزش هر طبقه از عوامل مؤثر، P_d : چگالی احتمال، En_v : مقدار انترویی، En_{max} : حداکثر انترویی، I_c : ضریب اطلاعات، W_f : وزن نهایی هر عامل است. در نهایت شاخص حساسیت زمین لغزش (LS) با جمع مقادیر وزن حاصل از شاخص انترویی هریک از عوامل مؤثر با استفاده از معادله ۹ به دست آمد:

$$Ls = \sum_{i=1}^n W_f * C_f \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن: C_f : عامل مؤثر در رخداد زمین لغزش است.

۳-۶. ارزیابی نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از شاخص انترویی

پس از تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از شاخص انترویی، جهت ارزیابی و تعیین دقت نقشه از ۳۰ درصد (۱۴۵) داده‌های لغزشی آزمایشی و اعتبارسنجی که به صورت تصادفی انتخاب شده بودند، استفاده گردید. سپس با استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی ROC دقت مدل تهیه شده مورد ارزیابی قرار گرفت. منحنی ROC و محاسبه سطح زیر منحنی یکی از روش‌های استاندارد اعتبارسنجی به منظور مقایسه عملکرد پیش‌بینی انواع مدل‌ها است. در این منحنی، در محور X مقدار خطای مثبت و بر روی محور Y مقدار خطای منفی نمایش داده می‌شود (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۶). این منحنی، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای نمایش کیفیت مدل است که سطح زیر منحنی مقدار (AUC) پیش‌بینی مدل را نشان می‌دهد. مقدار AUC بین ۰/۵ تا ۱ متغیر است (رومر و فرنتینو، ۲۰۱۶).

1 Receiver operating characteristics

2 Hong

3 Area Under the Curve (Auc)

4 RomerandFerentinu

۴. بحث و نتایج

نتایج حاصل از بررسی رابطه هم‌خطی بین متغیرها با استفاده از دو شاخص ضریب تحمل و عامل تورم واریانس در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین مقدار عامل تورم واریانس و کمترین مقدار ضریب تحمل به ترتیب ۲/۵۸ و ۰/۳۸۷ می‌باشد بنابراین، هیچ هم‌خطی بین متغیرهای مستقل مشاهده نشد.

جدول ۱ رابطه هم‌خطی بین متغیرهای مستقل با یکدیگر

عامل تورم واریانس (VIF)	ضریب تحمل (Tolerance)	عامل
۱/۰۱۹	۰/۹۸۱	جهت شیب
۱/۶۴۹	۰/۶۰۹	شیب (درجه)
۲/۵۸۱	۰/۳۸۷	ارتفاع از سطح دریا (متر)
۱/۳۸۵	۰/۷۲۲	انحنای نیم‌رخ (متر/۱۰۰)
۱/۶۱۴	۰/۶۲۰	انحنای سطح (متر/۱۰۰)
۱/۹۸۳	۰/۵۰۴	شاخص وضعیت توپوگرافی
۱/۸۱۸	۰/۵۵۰	شاخص رطوبت توپوگرافی
۱/۳۲۰	۰/۷۵۸	سنگ‌شناسی
۱/۳۹۹	۰/۷۱۵	شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده
۲/۰۵۰	۰/۴۸۸	فاصله از گسل (متر)
۱/۴۱۸	۰/۷۰۵	فاصله از آبراهه (متر)
۲/۳۶۳	۰/۴۲۳	فاصله از جاده (متر)
۱/۵۷۳	۰/۶۳۶	تراکم گسل (کیلومتر بر کیلومتر مربع)
۱/۴۲۰	۰/۷۰۴	تراکم آبراهه (کیلومتر بر کیلومتر مربع)
۲/۲۱۵	۰/۴۵۱	تراکم جاده (کیلومتر بر کیلومتر مربع)
۲/۰۴۳	۰/۴۸۹	کاربری اراضی

بررسی ارتباط زمین لغزش با عوامل تأثیرگذار بر رخداد زمین لغزش با استفاده از روش نسبت فراوانی (FR) در منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، بیشترین رخداد زمین لغزش در طبقه ارتفاعی کمتر از ۵۰۰ متر ($FR=۶/۷۵$) اتفاق افتاده و با افزایش ارتفاع از فراوانی لغزش‌ها کاسته شده است. هرچند انتظار می‌رود با افزایش ارتفاع، بر فراوانی لغزش‌ها افزوده شود، اما در منطقه مورد مطالعه، به علت وجود خاک‌های عمیق‌تر در ارتفاعات پایین و همچنین دخالت عوامل انسانی در پایین دست مناطق کوهستانی شرایط جهت وقوع زمین لغزش فراهم‌تر است که با نتایج جعفری و همکاران (۲۰۱۴)، پورقاسمی و روسی (۲۰۱۶) مطابقت دارد. پایداری دامنه به اثر متقابل زاویه شیب با ویژگی‌های مواد دامنه (زاویه اصطکاک، نفوذپذیری و چسبندگی) وابسته است (یوسف و همکاران، ۲۰۱۵). در منطقه مورد مطالعه با افزایش درجه شیب، فراوانی لغزش‌ها افزایش یافت. در دامنه‌های پرشیب برتری تنش برشی بر نیروی مقاوم و همچنین به علت دخالت عوامل انسانی از طریق جاده‌سازی و تغییر کاربری بر ناپایداری دامنه‌ها افزوده شده و شرایط جهت وقوع لغزش فراهم شده است که با نتایج رگمی و همکاران (۲۰۱۴) و یوسف و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. در منطقه مورد مطالعه بیشتر زمین لغزش‌ها در کاربری جنگل و کشاورزی ($FR=۱/۲۶$) اتفاق افتاده است و کاربری مرتع ($FR=۰/۵$) در رتبه بعدی قرار دارد. علت این امر، مساحت بیش از ۵۰ درصدی کاربری جنگل در منطقه مورد مطالعه و دخالت عوامل انسانی در این مناطق است. اکثر لغزش‌هایی که در منطقه مورد مطالعه در کاربری جنگل رخ داده‌اند، در حاشیه جاده‌های جنگلی دیده می‌شوند که جهت دسترسی به طرح‌های جنگل‌داری و مناطق مسکونی احداث شده‌اند که با نتایج شهابی و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد.

با افزایش شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، از فراوانی لغزش‌ها کاسته شد، این روند کاهش‌ی تا شاخص کمتر از ۰/۵ ادامه دارد و در شاخص‌های بیشتر از ۰/۵ بر تعداد لغزش‌ها افزوده گردید که عمدتاً این مقادیر نشان‌دهنده پوشش جنگلی می‌باشد. شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده با پوشش گیاهی مرتبط است. حضور یا عدم حضور پوشش گیاهی از عوامل تأثیرگذار در رخداد زمین لغزش محسوب می‌گردد و نقش بسیار پیچیده و متضادی در حساسیت زمین لغزش ایفا می‌کند (گو و همکاران، ۲۰۱۵). این نقش توسط ۴ عامل مختلف تعیین می‌شود: ثبات مکانیکی ناشی از وجود ریشه، تخلیه رطوبت خاک در اثر تعریق، بار اضافی ناشی از وزن درختان و شکست باد (سانگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۲ و پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۴). نتایج حاصل از بررسی ارتباط بین زمین لغزش‌ها با انحنا، نیم‌رخ و انحنا، سطح، بیانگر آن است که بالاترین مقدار FR به ترتیب با ۱/۲ و ۱/۳۶ متعلق به دامنه‌های محدب بوده است.

1 Guo

2 Song

این امر به علت واگرایی جریان آب در این دامنه‌ها و انبساط و انقباض خاک دامنه‌های محدب می‌باشد که شرایط را جهت فرسایش و وقوع زمین‌لغزش‌ها فراهم کرده‌است که با نظرات چن و همکاران (۲۰۱۶)، یوسف و همکاران (۲۰۱۶) و هوانگ و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. توزیع مکانی رطوبت لایه بالایی خاک، روند پیچیده‌ای دارد که به عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی بستگی دارد. از آنجایی که اندازه‌گیری میدانی رطوبت خاک، کار پرهزینه است، می‌توان از شاخص رطوبت توپوگرافی که از ترکیب مساحت حوزه بالادست و شیب به دست می‌آید و توانایی توصیف الگوی مکانی رطوبت را دارد، استفاده کرد (رحیمی فر و همکاران، ۱۳۹۰). هرچند با افزایش رطوبت توپوگرافی انتظار افزایش رخداد لغزش را داریم (گو و همکاران، ۲۰۱۵)، اما در منطقه مورد مطالعه، فراوانی رخداد زمین‌لغزش با افزایش رطوبت توپوگرافی روند کاهشی را نشان داد.

این مسئله به علت دخالت پارامترهای دیگری همچون وجود سازندهای حساس به زمین‌لغزش و برهم خوردن تعادل شیب در اثر فعالیت‌های انسانی در این مناطق است که با نتایج هوانگ و همکاران (۲۰۱۶) مطابق می‌باشد. بررسی ارتباط زمین‌لغزش با زمین‌شناسی منطقه نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی زمین‌لغزش‌ها در گروه ۳ رخ داده ($FR=1/55$) و گروه‌های ۶ و ۴ با نسبت فراوانی $1/33$ و $1/30$ در رتبه‌های بعدی قرار دارند، علت آن حساس بودن این گروه‌ها نسبت به وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. این گروه‌ها متشکل از ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سنگ‌آهک با میان‌لایه‌های شیل و مارن می‌باشند که در صورت نفوذ آب در آن‌ها شرایط برای وقوع زمین‌لغزش فراهم می‌شود. بررسی رخداد زمین‌لغزش با فاصله از آبراهه، بیانگر وقوع بیشتر زمین‌لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری از شبکه آبراهه است ($FR=1/09$) و با افزایش فاصله از آبراهه از فراوانی رخداد زمین‌لغزش کاسته شد.

علت این موضوع به جهت آن است که محدوده‌های نزدیک به شبکه زهکشی آب محتوی بیشتری نسبت به مناطق دور از شبکه زهکشی دارند (ون، ۲۰۰۹) که با نظرات چن و همکاران (۲۰۱۶)، وو^۱ و همکاران (۲۰۱۶) و جعفری و همکاران (۲۰۱۴) مطابقت دارد. با افزایش تراکم شبکه زهکشی، فراوانی رخداد زمین-لغزش در حال افزایش است. بیشتر زمین‌لغزش‌های منطقه در طبقه $13/41-6/73$ کیلومتر بر کیلومتر مربع رخ داده‌اند ($FR=1/55$). آبراهه‌ها با فرسایش و پاشویی‌های مداوم و یا اشباع نواحی پایین‌دست دامنه‌ها تأثیر منفی بر روی پایداری دامنه‌ها می‌گذارند و موجب افزایش احتمال رخداد زمین‌لغزش می‌گردند (یالکین^۲، ۲۰۰۸). نتایج حاصل از بررسی ارتباط زمین‌لغزش با شاخص وضعیت توپوگرافی، بیانگر فراوانی بیشتر

1 Wu

2 Yalcin

زمین لغزش‌های منطقه، در دره‌ها است. شاید دلیل این امر نقش آبراهه‌ها در فرسایش و پاشویی باشد که شرایط را برای وقوع زمین لغزش فراهم کرده است.

ارتباط زمین لغزش با طبقات تراکم جاده، بیانگر فراوانی بیشتر لغزش‌ها در طبقه ۶/۳۶-۱/۶۷ کیلومتر بر کیلومتر مربع ($FR=1/69$) می‌باشد و با افزایش تراکم جاده، فراوانی زمین لغزش‌ها افزایش یافته است. فعالیت‌های انسانی همچون جاده‌سازی، یکی از مهم‌ترین عوامل رخداد زمین لغزش در مناطق شیب‌دار به‌شمار می‌آید (داس و همکاران، ۲۰۱۰). جاده‌ها به‌خصوص در مناطق کوهستانی به‌علت سیستم زهکشی نامناسب و بی‌ثباتی مکانیکی در دامنه‌ها یکی از عوامل شناخته شده در افزایش وقوع زمین لغزش می‌باشند (برنینگ و همکاران، ۲۰۱۴).

فراوانی زمین لغزش‌ها در جهت‌های مختلف جنوبی توزیع نسبتاً یکسانی دارد ($SE=1/22$ و E ، $S=1/36$ ، $SW=1/23$) و اندکی حساسیت بیشتر در دامنه‌های روبه جنوب دیده می‌شود. این مسئله می‌تواند به علت دریافت و توزیع نسبتاً یکسان رطوبت در جهت‌های مختلف دامنه‌ها و همچنین اثرگذاری عوامل دیگر بر وضعیت رطوبت و پایداری جهت‌های مختلف شیب باشد (فتاحی بندپی، ۱۳۹۵) که با نتایج رگمی و همکاران (۲۰۱۴)، رومر و فرنیتینو (۲۰۱۶)، پورقاسمی و روسی (۲۰۱۶) و وونگ و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. ارتباط بین رخداد زمین لغزش با عامل فاصله از جاده، بیانگر وقوع بیشتر زمین لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۱۰۰ متری جاده‌ها است ($FR=1/92$).

این روند کاهشی تا فاصله ۳۰۰ متری از جاده‌ها ادامه دارد، اما در فاصله ۴۰۰-۳۰۰ متری از جاده‌ها نسبت فراوانی رخداد زمین لغزش افزایش قابل توجهی می‌یابد ($FR=1/06$). بیشتر زمین لغزش‌هایی که در نزدیکی جاده‌ها رخ داده‌اند (متأثر از عملیات باربرداری و بارگذاری ناشی از جاده‌سازی)، لغزش‌های جدید و کوچک می‌باشند، اما بیشتر زمین لغزش‌هایی که در فواصل دور از جاده‌ها رخ داده‌اند، زمین لغزش‌های بزرگ و قدیمی می‌باشند که متأثر از عواملی دیگر همچون حساسیت بالای سازندهای زمین‌شناسی این مناطق به همراه شیب زیاد و وجود رطوبت فراوان ناشی از بارش و ذوب برف می‌باشند که با نتایج یوسف و همکاران (۲۰۱۶) و پورقاسمی و روسی (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

نتایج ارتباط بین وقوع زمین لغزش با فاصله از گسل نشان داد که بالاترین مقدار FR (۱/۴۴) متعلق به طبقه ۸۰۰-۶۰۰ متری از گسل‌ها است. هرچند نزدیکی به گسل‌های اصلی، یکی از فاکتورهای مؤثر در بی‌ثباتی دامنه‌ها محسوب می‌گردد، اما در منطقه مورد مطالعه بین فاصله از گسل و رخداد زمین لغزش همبستگی وجود ندارد و تحت تأثیر عوامل دیگر از اهمیت این فاکتور کاسته شده است.

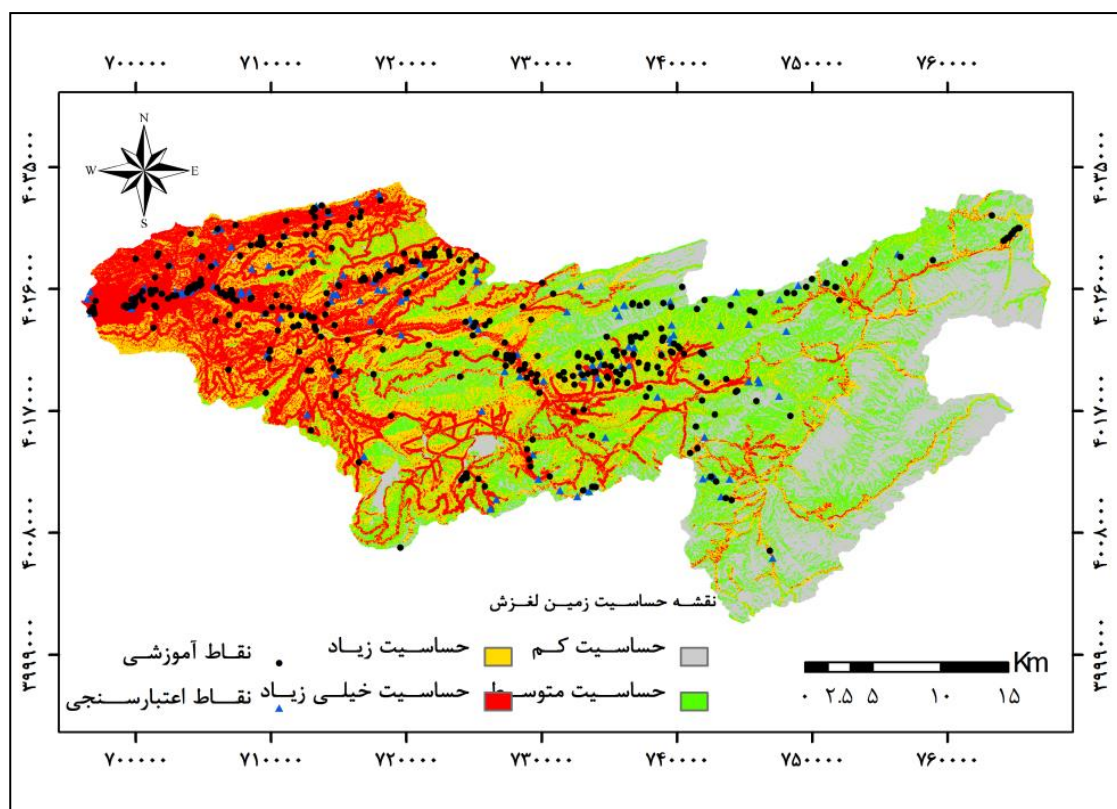
جدول ۲ ارتباط مکانی بین زمین‌لغزش و عوامل مؤثر در رخداد لغزش با استفاده از شاخص انتروپی

عامل	طبقه	درصد پیکسل لغزش (A_{Ej})	درصد لغزش (A_j)	نسبت فراوانی (FR)	چگالی احتمال (P_d)	مقدار انتروپی (En_v)	حداکثر انتروپی (En_{max})	ضریب اطلاعات (I_c)	وزن نهایی (W_f)
شیب (درجه)	۵-۰	۱۱/۵۰	۰/۳۰	۰/۰۳	۰/۰۱	۱/۱۳	۲/۰۰	۰/۴۳	۰/۵۲
	۵-۱۵	۳۳/۰۵	۱۲/۳۵	۰/۳۷	۰/۰۸				
	۳۰-۱۵	۴۱/۳۷	۳۸/۸۲	۰/۹۴	۰/۲۰				
	۳۰<	۱۴/۰۸	۴۸/۵۳	۳/۴۵	۰/۷۲				
جهت شیب	هموار	۰/۸۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۹۴	۳/۱۷	۰/۰۷	۰/۰۶۲
	شمال	۱۳/۲۵	۹/۱۲	۰/۶۹	۰/۰۹				
	شمال شرق	۹/۶۲	۶/۱۸	۰/۶۴	۰/۰۸				
	شرق	۸/۶۶	۱۰/۵۹	۱/۲۲	۰/۱۵				
	جنوب شرق	۱۱/۹۱	۱۴/۷	۱/۲۳	۰/۱۵				
	جنوب	۱۴/۹۶	۲۰/۲۹	۱/۳۶	۰/۱۷				
	جنوب غرب	۱۱/۹۹	۱۴/۷۱	۱/۲۳	۰/۱۵				
	غرب	۱۲/۴۳	۱۰/۵۹	۰/۸۵	۰/۱۱				
ارتفاع از سطح دریا (متر)	۵۰>	۲/۲۶	۱۵/۲۹	۶/۷۵	۰/۶۴	۱/۶۸	۲/۸۱	۰/۴۰	۰/۶۰۵
	۵۰۰-۱۰۰۰	۲۰/۸۹	۳۲/۶۵	۱/۵۶	۰/۱۵				
	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۲۸/۵۸	۲۷/۹۴	۰/۹۸	۰/۰۹				
	۲۵۰۰-۲۰۰۰	۲۷/۱۴	۱۵/۵۹	۰/۵۷	۰/۰۵				
	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۱۵/۸۲	۷/۳۵	۰/۴۶	۰/۰۴				
	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۵/۲۰	۱/۱۸	۰/۲۳	۰/۰۲				
	۳۰۰۰<	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰				
انحنای نیم‌رخ (متر/۱۰۰)	مقعر	۴۷/۸	۴۲/۰۶	۰/۸۸	۰/۴۰	۱/۲۵	۱/۵۸	۰/۲۱	۰/۱۵۶
	یکنواخت	۴/۴۸	۰/۵۹	۰/۱۳	۰/۰۶				
	محدب	۴۷/۷۲	۵۷/۳۵	۱/۲۰	۰/۵۴				
انحنای سطح (متر/۱۰۰)	محدب	۴۵/۱۸	۶۱/۴۷	۱/۳۶	۰/۶۵	۰/۹۳	۱/۵۸	۰/۴۱	۰/۲۸۶
	یکنواخت	۱/۶۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰				
	مقعر	۵۳/۲	۳۸/۵۳	۰/۷۲	۰/۳۵				
شاخص وضعیت توپوگرافی	دره‌ها	۳۷/۷۳	۵۹/۷۰	۱/۵۸	۰/۶۵	۱/۴۲	۱/۵۸	۰/۱۱	۰/۱۰
	دامنه‌ها	۲۲/۲۷	۱۱/۱۷	۰/۵۰	۰/۱۸				
	خط‌الرأس‌ها	۴۰/۰۰	۲۹/۱۲	۰/۷۳	۰/۲۶				
شاخص رطوبت توپوگرافی	۶/۰۷>	۷۱/۶۶	۸۰/۰۰	۱/۱۲	۰/۴۸	۱/۴	۲/۰۰	۰/۲۶	۰/۱۵۵
	۶/۰۷-۹/۰۷	۲۱/۴۷	۱۷/۹۴	۰/۸۴	۰/۳۶				
	۹/۰۷-۱۳/۳۸	۵/۳۲	۲/۰۶	۰/۳۹	۰/۱۷				
	۱۳/۳۸-۲۵	۱/۵۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰				
سنگ‌شناسی	گروه ۱	۱/۸۹	۰/۵۹	۰/۳۱	۰/۰۵	۲/۸۷	۳/۴۶	۰/۱۷	۰/۱۰۷
	گروه ۲	۱۲/۰۱	۶/۱۸	۰/۵۱	۰/۰۷				
	گروه ۳	۲۵/۲۹	۳۹/۱۲	۱/۵۵	۰/۲۲				
	گروه ۴	۱/۱۳	۱/۴۷	۱/۳۰	۰/۱۹				
	گروه ۵	۴/۲۸	۱/۷۶	۰/۴۱	۰/۰۶				
	گروه ۶	۲۲/۰۶	۲۹/۴۱	۱/۳۳	۰/۱۹				

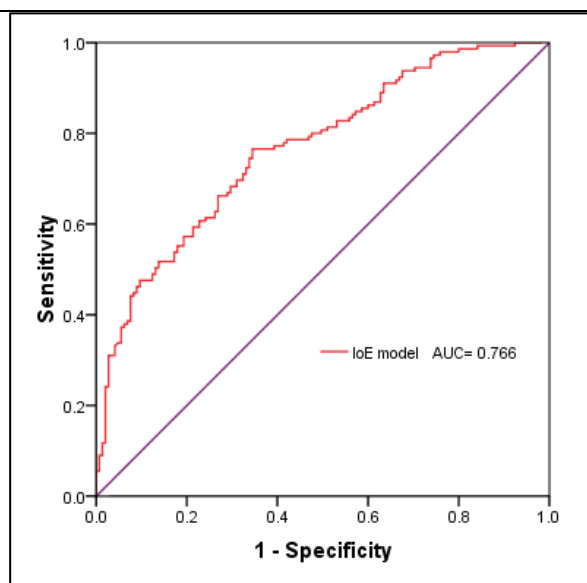
				۰/۱۳	۰/۹۳	۱۵/۵۹	۱۶/۸۲	۷	گروه
				۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۰	۸	گروه
				۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۸	۹	گروه
				۰/۰۲	۰/۱۵	۰/۲۹	۱/۹۹	۱۰	گروه
				۰/۰۶	۰/۴۳	۵/۵۹	۱۳/۰۶	۱۱	گروه
۰/۱۹۹	۰/۱۱	۲/۳۲	۲/۰۶	۰/۴۳	۳/۸۷	۲/۳۵	۰/۶۱	۰/۰۰ >	شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده
				۰/۲۱	۱/۸۸	۲/۳۵	۱/۲۵	۰/۰۰ - ۰/۰۵	
				۰/۰۸	۰/۷۰	۷/۰۶	۱۰/۰۹	۰/۰۵ - ۰/۰۱	
				۰/۱۰	۰/۹۳	۷۲/۰۶	۷۷/۷۵	۰/۰ - ۱/۵	
				۰/۱۸	۱/۵۷	۱۶/۱۸	۱۰/۳۰	۰/۵ <	
				۰/۴۲	۱/۲۶	۱۸/۵۳	۱۴/۶۸	کشاوری	
				۰/۴۲	۱/۲۶	۶۵/۲۹	۵۱/۸۷	جنگل	
				۰/۱۷	۰/۵۰	۱۶/۱۸	۳۲/۳۱	مرتع	
				۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴	منابع آب	
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۵۳	بیرون زدگی سنگی					
۰/۰۱۲	۰/۰۱۱	۲/۳۰	۲/۳۰	۰/۱۹	۱/۰۸	۲/۰۰	۱۸/۴۸	۲۰۰ >	فاصله از گسل (متر)
				۰/۲۲	۱/۲۰	۱۷/۹۴	۱۴/۹	۲۰۰ - ۴۰۰	
				۰/۱۹	۱/۰۳	۱۲/۰۶	۱۱/۷	۴۰۰ - ۶۰۰	
				۰/۲۶	۱/۴۴	۱۳/۵۳	۹/۴۲	۸۰۰ - ۶۰۰	
				۰/۱۴	۰/۸۰	۳۶/۴۷	۴۵/۵	۸۰۰ <	
۰/۰۰۶	۰/۱۸۴	۲/۳۲۲	۱/۸۹۴	۰/۳۸	۱/۰۹	۸۳/۸۳	۷۷/۰۳	۱۰۰ >	فاصله از آبراهه (متر)
				۰/۲۵	۰/۷۲	۱۲/۹۴	۱۷/۸۷	۱۰۰ - ۲۰۰	
				۰/۲۶	۰/۷۴	۲/۹۴	۳/۹۵	۳۰۰ - ۲۰۰	
				۰/۱۲	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۸۷	۳۰۰ - ۴۰۰	
۰/۰۵۷	۰/۰۵۶	۲/۳۲	۲/۱۹۳	۰/۳۷	۱/۹۲	۳۷/۹۴	۱۹/۸۰	۱۰۰ >	فاصله از جاده (متر)
				۰/۱۵	۰/۷۶	۱۱/۱۸	۱۴/۷۰	۲۰۰ - ۱۰۰	
				۰/۱۳	۰/۶۶	۷/۹۴	۱۱/۹۶	۳۰۰ - ۲۰۰	
				۰/۲۱	۱/۰۶	۱۰/۲۹	۹/۶۸	۴۰۰ - ۳۰۰	
				۰/۱۴	۰/۷۴	۳۲/۶۵	۴۳/۸۶	۴۰۰ <	
۰/۰۳	۰/۸۸	۱/۵۸	۱/۵۲	۰/۴۱	۱/۰۸	۶۲/۶۴	۵۷/۹۴	۳/۴۲ >	تراکم گسل (کیلومتر بر کیلومتر مربع)
				۰/۳۹	۱/۰۳	۳۱/۱۸	۳۰/۳۸	۳/۴۲ - ۹/۵۱	
				۰/۲۰	۰/۵۳	۶/۱۸	۱۱/۶۸	۹/۵۱ - ۲۱/۳۷	
۰/۰۸	۰/۰۸	۱/۵۸	۱/۴۶	۰/۱۶	۰/۵۳	۱۸/۵۳	۳۵/۲۴	۴/۴۷ >	تراکم آبراهه (کیلومتر بر کیلومتر مربع)
				۰/۳۵	۱/۱۳	۵۱/۴۷	۴۵/۴۵	۴/۴۷ - ۶/۷۳	
				۰/۴۸	۱/۵۵	۳۰/۰۰	۱۹/۳۱	۶/۷۳ - ۱۳/۴۱	
۰/۰۶	۰/۰۶	۱/۵۸	۱/۴۹	۰/۲۳	۰/۷۶	۳۰/۰۰	۳۹/۴	۰/۷۳ >	تراکم جاده (کیلومتر بر کیلومتر مربع)
				۰/۲۷	۰/۸۹	۳۶/۴۷	۴۰/۷۵	۰/۷۳ - ۱/۶۷	
				۰/۵۰	۱/۶۹	۳۳/۵۳	۱۹/۸۵	۱/۶۷ - ۶/۳۶	

نتایج حاصل از بررسی اهمیت هر یک از عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش با استفاده از شاخص انترپوزی (جدول ۲) نشان داد که لایه‌های ارتفاع از سطح دریا، درجه شیب، انحنای سطح، کاربری اراضی، NDVI،

انحنای نیم‌رخ، شاخص رطوبت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه و شاخص وضعیت توپوگرافی به ترتیب با ۰/۶، ۰/۵۲، ۰/۲۹، ۰/۲۱۵، ۰/۱۹۹، ۰/۱۵۶، ۰/۱۵۵، ۰/۱۰۷، ۰/۱۰۶، ۰/۱ دارای بیشترین وزن می‌باشند. بعد از بررسی اهمیت عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش، نقشه حساسیت زمین‌لغزش، بر اساس روابط مدل انتروپی، تهیه و بر اساس چارک به چهار طبقه حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم گردید. مساحت مربوط به هر یک از کلاس‌ها به ترتیب ۲۳/۳۱، ۲۵/۶۳، ۲۶/۳۹ و ۲۴/۶۶ درصد می‌باشد (شکل ۵). نتایج ارزیابی نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از ۳۰ درصد داده‌های لغزشی که جهت اعتبارسنجی مدل استفاده گردید، (شکل ۶ و جدول ۳) نشان داد که نقشه حساسیت زمین‌لغزش تهیه‌شده با استفاده از شاخص انتروپی با سطح زیر منحنی ۷۶/۶ درصد، دارای دقت مطلوب و مناسبی می‌باشد.



شکل ۵ نقشه حساسیت زمین‌لغزش منطقه مورد مطالعه با استفاده از شاخص انتروپی



شکل ۶ منحنی تشخیص عملکرد نسبی نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از شاخص انتروپی

جدول ۳ نتایج ارزیابی نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از شاخص انتروپی

فاصله اطمینان ۹۵٪		سطح معنی داری	انحراف معیار	سطح زیر منحنی
حد پایین	حد بالا			
۰/۸۲۰	۰/۷۱۳	۰/۰۰	۰/۰۲۷	۰/۷۶۶

۵. نتیجه گیری

زمین لغزش، به عنوان یکی از پرمخاطره ترین بلایای طبیعی در دنیا محسوب می شود. تحقیقات زیادی در سراسر جهان در زمینه مدل سازی حساسیت، خطر و ریسک زمین لغزش صورت گرفته است. در این تحقیق از ۱۶ عامل درجه شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، شکل شیب (انحنای سطح و انحنای نیم رخ)، شاخص وضعیت توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی، سنگ شناسی، فاصله از گسل، تراکم گسل، کاربری اراضی، NDVI، فاصل از آبراهه، تراکم زهکشی، فاصله از جاده و تراکم جاده، جهت تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از شاخص انتروپی استفاده گردید. به این منظور از ۷۰ درصد داده های لغزشی جهت مدل سازی و از ۳۰ درصد دیگر برای اعتبار سنجی مدل استفاده شد. نقشه حساسیت تهیه شده به چهار کلاس با حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه بندی گردید. مساحت مربوط به هر یک از کلاس ها در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۲۳/۳۱، ۲۵/۶۳، ۲۶/۳۹ و ۲۴/۶۶ درصد می باشد. در مجموع بیش از نیمی از مساحت منطقه دارای حساسیت بالا، نسبت به وقوع زمین لغزش می باشند. از بین عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش،

عوامل ارتفاع از سطح دریا، درجه شیب، انحناى سطح، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، انحناى نیم‌رخ، شاخص رطوبت توپوگرافی و سنگ‌شناسی دارای بیشترین وزن بوده و بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه دارند. این نتایج با یافته‌های بندریک و همکاران (۲۰۱۰)؛ کونستانتین و همکاران (۲۰۱۱)؛ بندریک و همکاران (۲۰۱۲)؛ پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۲)؛ دوکوتا و همکاران (۲۰۱۳)؛ چن و همکاران (۲۰۱۵)؛ جعفری و همکاران (۲۰۱۴)؛ یوسف و همکاران (۲۰۱۵) و وونگ و همکاران (۲۰۱۵ و ۲۰۱۶) مطابقت دارد. همچنین ارزیابی دقت مدل با استفاده از منحنی ROC با سطح زیر منحنی ۷۶/۶ درصد، بیانگر دقت مطلوب این مدل در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. از این‌رو نقشه حساسیت زمین‌لغزش مذکور، می‌تواند نقش بسزایی در برنامه‌ریزی و مدیریت منطقه به‌منظور پیشگیری و کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین‌لغزش داشته باشد.

کتابنامه

- پاشا، عین‌اله؛ مصطفایی، حمیدرضا؛ خلیج، مهران & خلیج، فرشته. (۱۳۹۲). محاسبه فاصله عدم قطعیت بر پایه تئوری دمپستر- شافر از شواهد. نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۴(۲)، ۲۲۳-۲۱۶.
- پورقاسمی، حمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا & فاطمی عقدا، سید محمود. (۱۳۹۳). اولویت‌بندی عوامل موثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن با استفاده از شاخص انتروپی شانون. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۸(۷۰)، ۱۹۱-۱۸۱.
- حسین‌پور میل‌آغاردان، امین & عباسپور، رحیم‌علی. (۱۳۹۳). بهبود نتایج پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش با استفاده از تئوری انتروپی شانون. دانش مخاطرات، ۱(۲)، ۲۶۸-۲۵۳.
- رحیمی‌فر، عطیه؛ شیخ، واحدبردی & بهره‌مند، عبدالرضا. (۱۳۹۰). معرفی و تهیه نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI). پنجمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک.
- فتاحی بندپی، مریم؛ غفوری، محمد؛ لشکری‌پور، غلامرضا & حافظی‌مقدس، ناصر. (۱۳۹۳). ارزیابی تأثیر گسل و سنگ‌شناسی بر عملکرد عامل جهت شیب در وقوع زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبریز بابلرود). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۳(۴)، ۳۵-۵۲.
- گروه مطالعه امور زمین‌لغزش، فهرست زمین‌لغزش‌های کشور. (۱۳۸۶). سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، معاونت آبخیزداری.
- مقیم، ابراهیم؛ باقری سید شکر، سجاده؛ صفراد، طاهره. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل انتروپی (مطالعه موردی: تاقدیس نثار زاگرس شمال غربی). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۴(۱)، ۷۷-۹۰.
- Baeza, C., & Corominas, J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth surface processes and landforms*, 26(12), 1251-1263.

- Bednarik, M., Magulová, B., Matys, M., & Marschalko, M., 2010. Landslide susceptibility assessment of the Kral'ovany–Liptovský Mikuláš railway case study. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(3), 162-171.
- Bednarik, M., Yilmaz, I., & Marschalko, M., 2012. Landslide hazard and risk assessment: a case study from the Hlohovec–Sered'landslide area in south-west Slovakia. *Natural hazards*, 64(1), 547-575.
- Brenning, A., Schwinn, M., Ruiz-Páez, A. P., & Muenchow, J., 2014. Landslide susceptibility near highways is increased by one order of magnitude in the Andes of southern Ecuador, Loja province. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2, 1945-1975.
- 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, T., Niu, R., & Jia, X., 2016. A comparison of information value and logistic regression models in landslide susceptibility mapping by using GIS. *Environmental Earth Sciences*, 75(10), 867.
- Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, M. C., & Vlaicu, M., 2011. Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences*, 63(2), 397-406.
- Das, I., Stein, A., Kerle, N., & Dadhwal, V. K., 2012. Landslide susceptibility mapping along road corridors in the Indian Himalayas using Bayesian logistic regression models. *Geomorphology*, 179, 116-125.
- Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., ... & Althuwaynee, O. F., 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural hazards*, 65(1), 135-165.
- 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.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1), 181-216.
- Guzzetti, F., 2005. Review and selection of optimal geological models related to spatial information available. *Risk AWARE. European Union under the INTEREG IIIB CADSES programme*.
- Hong, H., Pourghasemi, H. R., & Pourtaghi, Z. S., 2016. Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China): a comparison between a random forest data

- mining technique and bivariate and multivariate statistical models. *Geomorphology*, 259, 105-118.
- Jaafari, A., Najafi, A., Pourghasemi, H. R., Rezaeian, J., & Sattarian, A., 2014. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(4), 909-926.
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R., 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, 5(1), 3-30.
- O'Brien, R. M., 2007. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & Quantity*, 41(5), 673-690.
- Ozdemir, A., 2011. GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. *Journal of Hydrology*, 411(3), 290-308.
- Pourghasemi, H. R., Mohammady, M., & Pradhan, B., 2012. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*, 97, 71-84.
- Pourghasemi, H. R., Moradi, H. R., & Aghda, S. F., 2013. Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Natural hazards*, 69(1), 749-779.
- Pourghasemi, H. R., Moradi, H. R., Aghda, S. F., Gokceoglu, C., & Pradhan, B., 2014. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 7(5), 1857-1878.
- Pourghasemi, H. R., & Rossi, M., 2016. Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-25.
- Regmi, A. D., Devkota, K. C., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H. R., Kumamoto, T., & Akgun, A., 2014. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2), 725-742.
- Romer, C., & Ferentinou, M., 2016. Shallow landslide susceptibility assessment in a semiarid environment—A Quaternary catchment of KwaZulu-Natal, South Africa. *Engineering Geology*, 201, 29-44.
- Shahabi, H., Hashim, M., & Ahmad, B. B., 2015. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, and fuzzy

- logic methods at the central Zab basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 8647-8668.
- Song, Y., Gong, J., Gao, S., Wang, D., Cui, T., Li, Y., & Wei, B., 2012. Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides using Bayesian network: a case study in Beichuan, China. *Computers & Geosciences*, 42, 189-199.
- Tay, L. T., Lateh, H., Hossain, M. K., & Kamil, A. A., 2014. Landslide hazard mapping using a poisson distribution: a case study in Penang Island, Malaysia. In *Landslide Science for a Safer Geoenvironment* (pp. 521-525). Springer, Cham.
- Wan, S., 2009. A spatial decision support system for extracting the core factors and thresholds for landslide susceptibility map. *Engineering Geology*, 108(3), 237-251.
- Wan, S., 2013. Entropy-based particle swarm optimization with clustering analysis on landslide susceptibility mapping. *Environmental earth sciences*, 68(5), 1349-1366.
- Wang, Q., Li, W., Chen, W., & Bai, H., 2015. GIS-based assessment of landslide susceptibility using certainty factor and index of entropy models for the Qianyang County of Baoji city, China. *Journal of Earth System Science*, 124(7), 1399-1415.
- Wang, Q., Li, W., Wu, Y., Pei, Y., & Xie, P., 2016. Application of statistical index and index of entropy methods to landslide susceptibility assessment in Gongliu (Xinjiang, China). *Environmental Earth Sciences*, 75(7), 599.
- Wu, Y., Li, W., Liu, P., Bai, H., Wang, Q., He, J., ... & Sun, S., 2016. Application of analytic hierarchy process model for landslide susceptibility mapping in the Gangu County, Gansu Province, China. *Environmental Earth Sciences*, 75(5), 422.
- Yalcin, A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72(1), 1-12.
- Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pourtaghi, Z. S., & Al-Katheeri, M. M., 2016. Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Landslides*, 13(5), 839-856.
- Youssef, A. M., Al-Kathery, M., & Pradhan, B., 2015. Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models. *Geosciences Journal*, 19(1), 113-134.
- Yufeng, S., & Fengxiang, J., 2009, July. Landslide stability analysis based on generalized information entropy. In *Environmental Science and Information Application Technology, 2009. ESIAT 2009. International Conference on* (Vol. 2, pp. 83-85). IEEE.