



دوره‌ی ۳۳، شماره‌ی ۴، شماره‌ی پیاپی ۱۲۹، زمستان ۱۳۹۹، صفحه‌های ۴۸-۳۲
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2020.128407.1280

پژوهش‌های آبخیزداری

اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن در آبخیز چریک آباد ارومیه با استفاده از مدل آنتروپی شانون

عبدالعزیز حنیفی نیا

دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه ارومیه

حبیب نظر نژاد

(نویسنده‌ی مسئول)* دانشیار، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه ارومیه

سعید نجفی

استادیار، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه ارومیه

آیدینگ کر نژادی

دانش‌آموخته دکتری آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: h.nazarnejad@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۰ آبان ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۲۷ اسفند ۱۳۹۸

چکیده

زمین‌لغزش‌ها یکی از رخداد‌های طبیعی و برخی انسان‌ساخت هستند. ایجاد یک راهبرد برای کاهش زیان‌های ناشی از زمین‌لغزش‌ها در جهت حفظ منابع طبیعی و انسانی، امری ضروری محسوب می‌شود. هدف از این تحقیق، اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر بر زمین‌لغزش‌ها با استفاده از مدل آنتروپی شانون و روش GIS می‌باشد. برای این منظور، با استفاده از بازدهی‌های میدانی و تصاویر گوگل ارث تعداد ۹۰ نقطه‌ی لغزشی در آبخیز چریک‌آباد ارومیه شناسایی شد. لایه‌های بارش، ارتفاع، درصد شیب، جهت شیب، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی بهنجار شده (NDVI) و عناصر خطی مانند فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از روستا به‌عنوان عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش به‌کار گرفته شده و نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌ها در محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی تهیه و رقمی گردید. اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر با استفاده از روش آماری آنتروپی شانون نشان داد که به‌ترتیب لایه‌های کاربری اراضی، فاصله از آبراهه و فاصله از گسل بیش‌ترین تأثیر را بر وقوع زمین‌لغزش‌ها داشته و کم‌ترین تأثیر مربوط به لایه‌های فاصله از روستا، فاصله از جاده می‌باشد. هم‌چنین پهنه‌بندی حساسیت زمین-لغزش با مدل مذکور و ارزیابی دقت آن با استفاده منحنی عملکرد نسبی سامانه (ROC) و با سطح زیر منحنی (AUC) برابر با ۰/۸۷۹ بیان‌گر دقت خیلی خوب مدل برای منطقه بوده است. با توجه به اینکه حدود ۳۲٪ از آبخیز در مناطقی با حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است، پیشنهاد می‌شود جهت کاهش نسبی خطر لغزش در آنجا، از تغییر کاربری در مناطق مستعد زمین‌لغزش اجتناب گردد.

واژگان کلیدی: آبخیز چریک‌آباد، آنتروپی شانون، زمین‌لغزش، سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، منحنی عملکرد نسبی سامانه

مقدمه

جوامع انسانی به‌طور مداوم در معرض خطر بلایای طبیعی قرار دارند. افزایش تراکم جمعیت سبب افزایش تعرض و استفاده از منابع طبیعی شده و در صورتی که اقدامات مناسب جهت پیش‌گیری از زیان‌های بلایای طبیعی ناشی از دخالت‌های انسان صورت نگیرد، افراد بیش‌تری تحت تأثیر این زیان‌ها قرار خواهند گرفت. یکی از انواع بلایای طبیعی که سالانه زیان‌های زیادی به جان و مال مردم، تأسیسات و زیرساخت‌های حساس وارد می‌کند، زمین‌لغزش‌ها هستند (آمبروسی و همکاران ۲۰۱۸؛ ژو و همکاران ۲۰۱۸). زمین‌لغزش شامل حرکت تند یا کند مواد سنگی، حاکی یا مجموع هر دو روی دامنه به‌سمت پایین تحت تأثیر نیروی جاذبه می‌باشد (کروستا ۲۰۰۴) که در آن سرعت حرکت مواد در همه‌ی نقاط از بالا تا پایین یکسان است (احمدی ۲۰۱۲). زمین‌لغزش، یکی از مهم‌ترین خطرات زمین‌ریخت‌شناسی با زیان‌های بوم‌شناختی و اقتصادی قابل توجه است که منجر به میلیاردها دلار زیان مالی و از بین رفتن هزاران نفر در سال می‌شود. در کشورهای در حال توسعه هر ساله بیش از ۵۰٪ تولید ناخالص ملی در اثر زمین‌لغزش از بین می‌رود (چن و همکاران ۲۰۱۵). زمین‌لغزش‌ها در ایران نیز به‌عنوان یکی از شایع‌ترین مخاطرات طبیعی محسوب شده و سالانه زیان‌های جانی و هزینه‌های مالی فراوانی را برای بازسازی مناطق آسیب دیده بر بودجه کشور تحمیل می‌کنند (زارع و همکاران ۲۰۱۳). با توجه به اهمیت موضوع شناخت عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌ها، اولویت بندی این عوامل براساس میزان تأثیر، شناخت شرایط ایجادکننده و توسعه‌ی زمین‌لغزش‌ها و همچنین شناسایی مکان‌هایی با قابلیت خطرپذیری بالا ضروری به‌نظر می‌رسد (رحمان‌زندی و همکاران ۲۰۱۸؛ انتظاری و جلیلیان ۲۰۱۹). با توجه به این‌که در مورد اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌ها و مدل‌های مختلفی ارائه و استفاده شده‌اند، در این پژوهش سعی شده است تا از مدل آنتروپی شانون در اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌های آبخیز چریک‌آباد ارومیه استفاده و تأثیر عوامل مؤثر در این پدیده بررسی شود.

در این خصوص، تحقیقات زیادی در ایران و جهان انجام گرفته است دوکوتا و همکاران (۲۰۱۳) در Mugling-Narayanghat کشور نپال با استفاده از مدل‌های شاخص آنتروپی و رگرسیون لجستیک، نقشه‌ی

پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش را تهیه کردند. در این مطالعه، شیب، جهت، شیب، ارتفاع، انحنای زمین، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، شاخص توان آبراهه، شاخص حمل رسوب و شاخص رطوبت پستی‌وبلندی به‌عنوان عامل‌های مؤثر در لغزش به‌کار گرفته شدند. نتایج اعتبارسنجی نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت به‌وسیله‌ی منحنی تشخیص عملکرد نسبی و ۳۰٪ داده‌های آموزشی نشان داد که نقشه‌ی تهیه‌شده با استفاده از شاخص آنتروپی با سطح زیر منحنی ۹۰/۱۰٪، دارای دقت بالایی می‌باشد. نتایج یوسف و همکاران (۲۰۱۶) در تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی، وزن واقعه، شاخص آنتروپی و دمپستر- شیفتر نشان داد که نرخ پیش‌بینی برای تمامی مدل‌های به‌کاربرده شده بالای ۹۰٪ است. هانگ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور و مقایسه‌ی عملکرد کلی سه روش نسبت فراوانی^۱ (FR)، ضریب اطمینان^۲ (CF) و شاخص آنتروپی^۳ (IOE) در تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت‌پذیری به زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی در ناحیه‌ی چانگران چین، و ارزیابی مدل‌ها با منحنی تشخیص عملکرد نسبی سامانه^۴ (ROC)، نشان دادند که تمام مدل‌ها در هر دو روش آموزش و اعتبارسنجی خوب عمل می‌کنند. نتایج محمدخان و همکاران (۲۰۱۵) در توان‌سنجی پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی شانون در منطقه‌ی شیرپناه استان کرمانشاه نشان داد که عامل‌های فاصله از گسل، شیب، ارتفاع، سنگ‌شناسی و جهت شیب به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه داشته است. نتایج شیرانی (۲۰۱۷) در تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در آبخیز سرخون کارون با روش‌های آنتروپی شانون و تئوری بیزین، حاکی از دقت خوب مدل‌های نام برده‌شده در برآورد پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. نتایج تحقیق تیموری یانوسری و همکاران (۲۰۱۷) در اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از بیشینه‌ی آنتروپی در آبخیز چهاردانگه‌ی استان مازندران نشان داد که لایه‌های ارتفاع، درجه‌ی شیب، انحنای سطح و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را بر رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه داشته و ۵۱/۰۵٪ منطقه‌ی مورد مطالعه در طبقه‌ی حساسیت زیاد و خیلی‌زیاد نسبت

- 1-Frequency Ratio
- 2-Certainty Factor
- 3-Index Of Entropy
- 4-Receiver Operating Characteristic

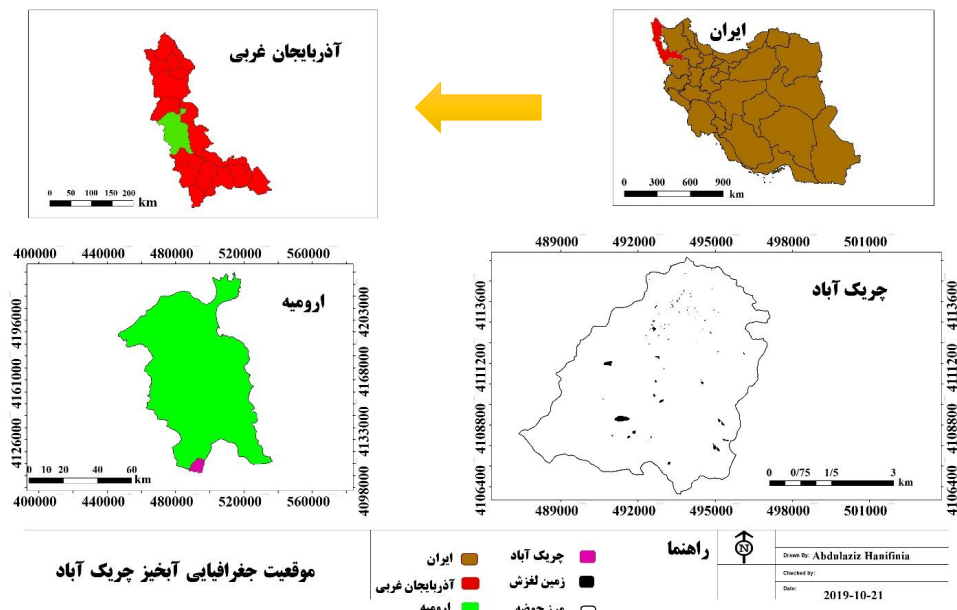
می‌باشد. حداکثر ارتفاع آبخیز از سطح دریا ۳۴۷۳ متر، حداقل ارتفاع آن ۱۶۲۸ متر است. شیب متوسط آبخیز ۱۷/۶٪ می‌باشد. براساس روش دومارتن اقلیم محدوده‌ی مطالعاتی فراسرد یا ارتفاعی نیمه‌مرطوب سرد بوده و متوسط بارندگی سالانه براساس داده‌ی ایستگاه‌های مجاور برابر ۵۳۰ میلی‌متر برآورد شده است. از نظر زمین‌شناسی آبخیز مورد مطالعه در زون سنندج-سیرجان قرار گرفته است. از مهم‌ترین سازنده‌های موجود در آبخیز، واحد سنگی آهکی پرمین، همتافت سیلوانا و سازنده‌های سلطانیه-باروت می‌باشند. تنوع واحدهای سنگی-رسوبی در منطقه بسیار زیاد است به طوری که مجموعه‌ای از سنگ‌های نفوذی، دگرگونی و رسوبی به همراه واحدهای آبرفتی در کنار هم قرار گرفته‌اند. سنگ-شناسی غالب آبخیز شامل سنگ‌های فیولیتی، بازی و فوق بازی، سنگ‌های آهکی، دولومیت‌ها، شیل‌ها، کنگلومراها و در دشت‌ها از رسوبات کواترنری تشکیل شده است که بیشتر آن‌ها مربوط به اواخر دوره‌ی کرتاسه از دوران مزوزوئیک تا عصر حاضر می‌باشد که با روند عمومی شمال‌غربی-جنوب‌شرقی رخنمون دارند. در این آبخیز ناهمواری‌ها، زمین‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناسی، فعالیت‌های انسانی و پوشش گیاهی شرایط مناسبی را برای وقوع پدیده‌های زمین‌ریخت‌شناسی مختلف ایجاد کرده است. در شکل‌گیری ساختارهای موجود در این منطقه عامل‌هایی مانند برخورد صفحه‌ی ایران و توران، عملکرد گسل‌راندگی و سرانجام عملکرد گسل‌های امتداد لغز شمال‌غربی-جنوب‌شرقی نقش بسیار مهمی را داشته‌اند. هوازدگی شدید باعث افزایش خاک در سطح سنگ‌شناسی منطقه شده است. به‌همین دلیل خاک حاصل از فرسایش این سنگ‌ها زمین‌های حاصل‌خیزی را برای کشاورزی این منطقه به ارمغان آورده است (محمدنژادآروق و اصغری‌سراسکانرود ۲۰۱۸). اغلب کاربری اراضی آبخیز مورد مطالعه مرتع بوده اما در قسمت‌های پایین‌دست آبخیز و نزدیک به روستا افزایش تغییر کاربری سبب افزایش اهمیت این عامل شده است.

به وقوع زمین‌لغزش قرار دارد. عابدینی (۲۰۱۸) از ارزیابی و مقایسه‌ی نتایج مدل‌های عامل ریسک جزئی زمین‌لغزش (LNRF)^۵، نسبت فراوانی (FR) و مدل فرآیند سلسله مراتبی (AHP) برای تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت‌پذیری به زمین‌لغزش در آبخیز نجیان استان لرستان استفاده کرد. نتایج بعد از ارزیابی با شاخص کیفیت جمع (QS) نشان داد که نسبت فراوانی و مدل فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی نسبت به LNRF دارای عملکرد بهتری بوده‌اند. به‌طور کلی جهت ارزیابی و تهیه‌ی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش‌ها با استفاده از روش‌های مختلف می‌توان نقشه‌ی حساسیت به زمین‌لغزش را تهیه کرد. در تحقیق حاضر جهت پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش از روش آنتروپی شانون استفاده شده است. ارزیابی مدل آنتروپی شانون به‌وسیله‌ی محققین مختلف از جمله (تیموری‌یانسری و همکاران ۲۰۱۷؛ عرب‌عامری و همکاران ۲۰۱۸؛ شیک و همکاران ۲۰۱۹) نشان داد که این مدل، دارای عملکرد خیلی خوب در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. تهیه‌ی نقشه‌ی خطر وقوع لغزش در آبخیز مورد مطالعه می‌تواند برای انتخاب محل و کاهش زیان‌های ناشی از زمین‌لغزش‌ها در آبخیزهای مشابه این آبخیز کارآمد باشند.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

آبخیز چریک‌آباد با مساحتی بالغ بر ۵۱۸۰ هکتار و موقعیت جغرافیایی^{۱۱} ۵۱°۴۴' تا ۵۸°۰۵' طول شرقی و ۳۷°۰۶' تا ۳۷°۱۱' عرض شمالی در جنوب‌غربی شهرستان ارومیه از توابع استان آذربایجان غربی واقع شده است (شکل ۱). آبخیز چریک‌آباد آبخیز مرزی مشترک بین سه کشور ایران عراق و ترکیه می‌باشد. رسوبات خروجی از آبخیز وارد رودخانه‌ی باراندوزچای می‌شود که از مهم‌ترین منابع تغذیه‌کننده‌ی دریاچه‌ی ارومیه می‌باشد؛ بنابراین شناخت زمین‌لغزش‌ها در این آبخیز به‌منظور ارائه‌ی مدیریت بهتر آبخیز و در نهایت مدیریت دریاچه‌ی ارومیه ضروری



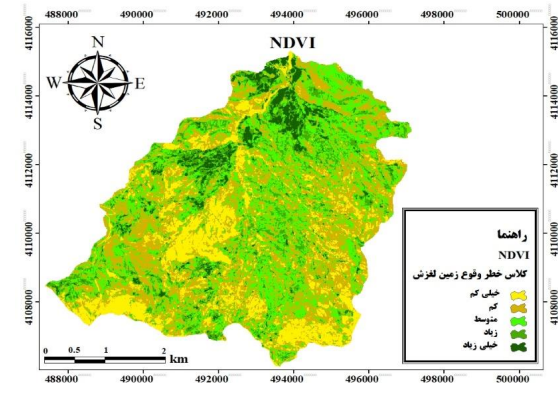
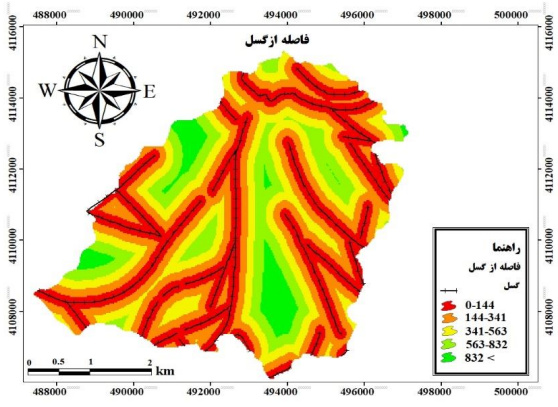
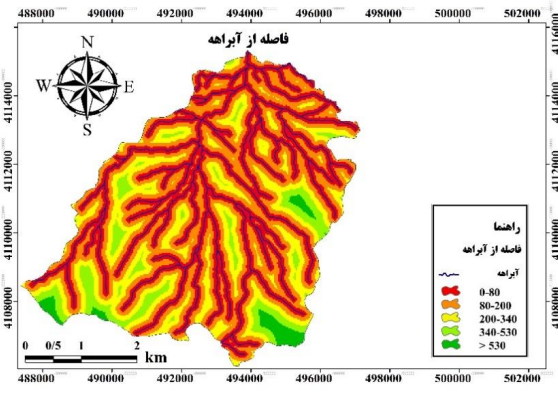
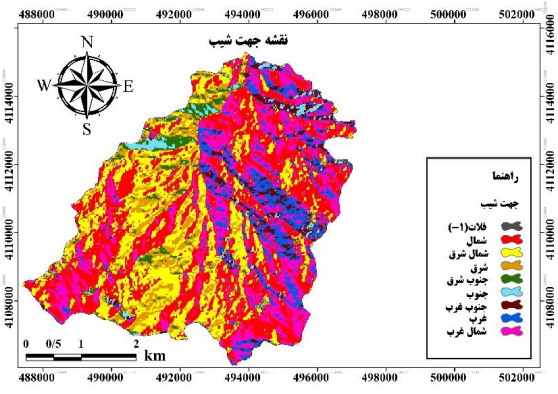
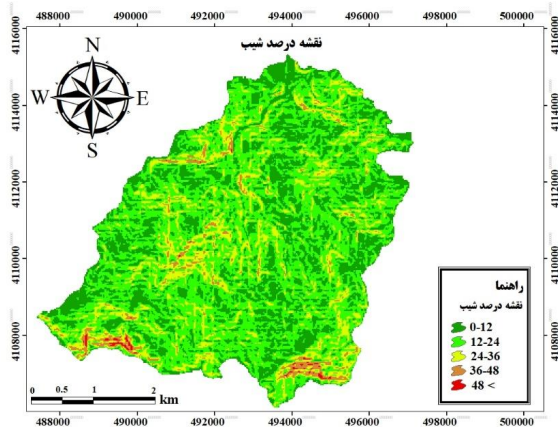
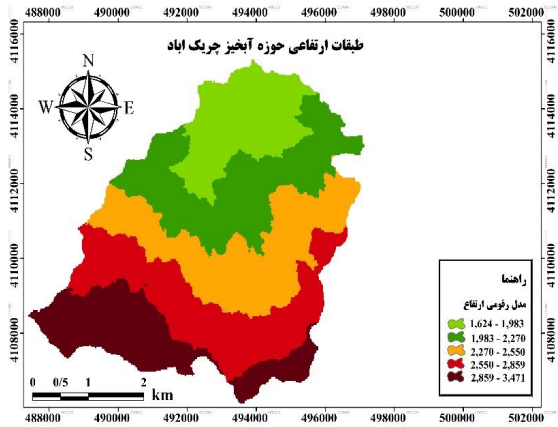
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخیز چریک آباد در ایران، استان آذربایجان غربی و شهرستان ارومیه به همراه نقشه پراکنش زمین- لغزش‌ها.

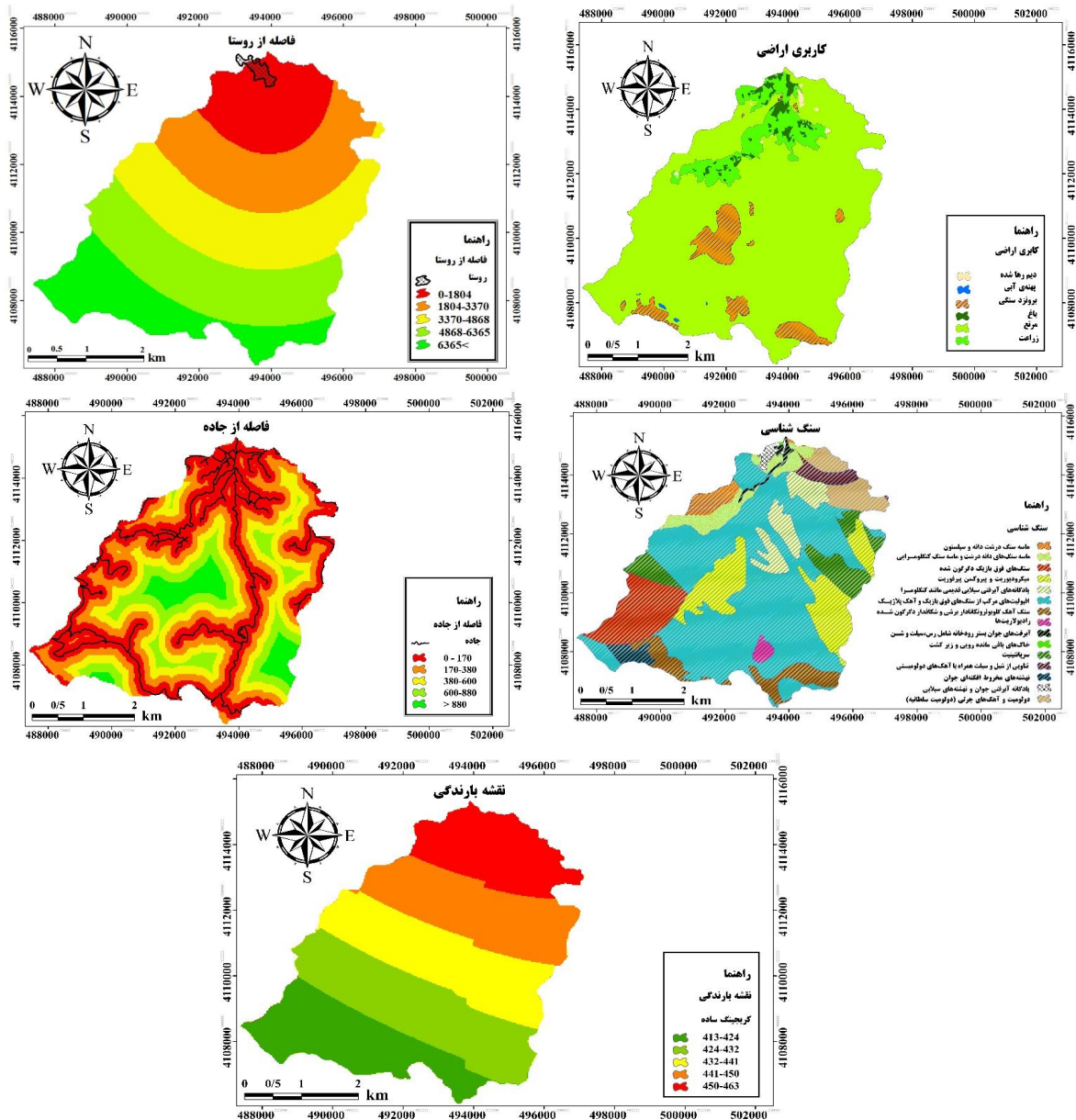
استفاده شد. پس از تهیه نقشه‌ی کاربری اراضی، با استفاده از بازدید میدانی و تصاویر گوگل ارث سال ۲۰۱۸ اصلاح و تدقیق گردید. نقشه‌ی شاخص پوشش گیاهی تفاضلی بهنجارشده (NDVI) با داندلود تصویر از ماهواره‌ی Sentinel-2 و از طریق رابطه‌ی (۱) محاسبه شد. IR باند مادون قرمز و R باند قرمز طیف الکترومغناطیسی می‌باشد. از نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه‌ی سیلوانه جهت تهیه‌ی لایه‌های فاصله از گسل و سنگ‌شناسی استفاده شد. رابطه‌ی (۱)

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

با توجه به این‌که آبخیز انتخابی فاقد هرگونه ایستگاه هواشناسی می‌باشد، بنابراین از داده‌های بارش ایستگاه‌های مجاور واقع در آبخیزهای روضه‌چای، اش‌نویه و باراندوزچای استفاده و متوسط بارندگی آبخیز برابر ۵۳۰ میلی‌متر برآورد شد.

برای گردآوری اطلاعات این پژوهش، بازدیدهای میدانی گسترده در منطقه، مطالعات کتابخانه‌ای و مراجعه به اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری و سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی انجام شد. جهت تهیه نقشه‌ی پراکنش از دستگاه موقعیت یاب جهانی (GPS) برای ثبت نقاط لغزشی در طی بازدیدهای میدانی و گوگل ارث (Google Earth) جهت بستن مرز آبخیز و ثبت نقاط لغزشی که به علت صعب‌العبور بودن منطقه‌ی دسترسی به آنان مشکل بود، استفاده شد. لایه‌های بارش، ارتفاع، درصد شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، NDVI، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از روستا به‌عنوان یازده عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های آبخیز شناسایی و نقشه‌ی لایه‌های مذکور در محیط ArcGIS تهیه و رقومی گردید. از نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک (۱۲/۵×۱۲/۵) به‌منظور تهیه‌ی لایه‌های طبقه‌های ارتفاعی، درصدشیب، جهت شیب، و عناصر خطی فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از روستا





شکل ۲- نقشه های عامل های مؤثر بر وقوع زمین لغزش ها در آبخیز چریک آباد ارومیه.

را در رخداد لغزش دارند را برای ما مشخص می نماید. از آن جایی که در پهنه بندی حساسیت زمین لغزش، بسته به شرایط منطقه معمولاً عامل های مختلفی تأثیرگذار بوده و همچنین در تعیین میزان خطر با استفاده از مدل های آماری دو متغیره و احتمالاتی نظیر بیزین (Bayesian) تمامی عامل های مؤثر بر وقوع زمین لغزش وزن یکسانی دارند از این رو چنانچه یکی از عامل های تأثیر بیش تری داشته میزان اثر آن نادیده گرفته می شود (راماکیشنا و همکاران ۲۰۰۵). بنابراین نظریه ی مذکور می تواند به عنوان یک رویکرد مدیریتی تأثیر بسزائی در شناسائی عامل های مؤثر و میزان تأثیر گذاری آن ها

مدل آنتروپی شانون

آنتروپی، یکی از رویکردهای مدیریتی است که در یک سامانه در جهت برخورد با بی نظمی، بی ثباتی، اغتشاش و عدم یقین های موجود مورد استفاده قرار می گیرد (یوفنگ و فنگ ژیانگ ۲۰۰۹). نظریه ی نام برده شده اولین بار به وسیله ی استفان بولتزمن (اصل دوم پویا یا ترمودینامیک) مطرح و نهایتاً به وسیله ی (شانون ۱۹۴۸) به صورت کمی ارائه شد. آنتروپی در حقیقت بیان گر آن است که چگونه از بین عامل های مؤثر یک هدف، می توان مهم ترین عامل های را تخمین زد یا به عبارتی دیگر متغیرهایی که بیش ترین تأثیر

در این پژوهش ابتدا یازده عامل بارش، ارتفاع، درصد شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، شاخص بهنجار شده تفاوت پوشش گیاهی، سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده و فاصله از روستا به‌عنوان مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های آبخیز شناسایی و نقشه‌ی لایه‌های مذکور تهیه و به‌حالت رستر درآمدند. براساس فراوانی وقوع زمین‌لغزش‌ها در آبخیز مطالعاتی زیرگروه‌هایی برای این عامل‌های در نظر گرفته شد. با استفاده از نسبت فراوانی و روش شاخص آنتروپی وزن‌نمایی هر یک از لایه‌های اطلاعاتی و زیرمعیارها مشخص گردید (روابط ۳ تا ۸). سپس نقشه حساسیت زمین‌لغزش تهیه و با روش شکست‌های طبیعی (Natural Break) به پنج کلاس با خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم گردید.

منحنی تشخیص عملکرد سامانه (ROC)

منحنی ROC نموداری است با نسبت پیکسل‌هایی که به اشتباه به‌وسیله‌ی مدل به‌عنوان زمین‌لغزش شناسایی شده‌اند با نقاطی که در واقعیت فاقد زمین‌لغزش بوده‌اند. روی محور افقی (حضور کاذب^۷ یا 1-Specificity) و در برابر آن نسبت پیکسل‌هایی که به درستی به‌وسیله‌ی مدل تحت عنوان دارای زمین‌لغزش شناسایی شده‌اند (حضور واقعی^۸ یا Sensitivity) روی محور عمودی ترسیم می‌گردد (کرنزادی و همکاران ۲۰۱۸). مساحت زیر این منحنی AUC نام داشته و AUC برابر با ۰/۵ معادل مدل خنثی (نتایج ناشی از شانس) بوده و هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر شود کارایی مدل افزایش می‌یابد (پونیتوس و اشنایدر ۲۰۰۱). در تحقیق حاضر، منحنی ROC با استفاده از افزونه PMT در محیط ArcGIS ۱۰٫۴ ترسیم شد. مقادیر (AUC) از ۰/۵ تا ۱ متغیر است. طبقه‌بندی و ارزیابی کیفیت یک مدل برای تعیین میزان دقت آن با استفاده از مساحت سطح زیر منحنی به صورت (۱-۰/۹، عالی؛ ۰/۹-۰/۸، خیلی خوب؛ ۰/۸-۰/۷، خوب؛ ۰/۶-۰/۵، ضعیف) قابل تعیین است (هاسمر و لمسهوف ۲۰۰۰).

نتایج و بحث

وزن عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در جدول (۱) آورده شده است که در زیر شرح داده شده است.

داشته باشد (شارما و همکاران ۲۰۱۰). در این تحقیق، از نسبت فراوانی جهت تعیین ارتباط بین زمین‌لغزش‌ها و اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌ها استفاده شده است. روش نسبت فراوانی روشی احتمالاتی است که بر پایه رابطه‌ی (۲) که رابطه بین توزیع زمین‌لغزش‌ها و هریک از عامل‌های مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش است بنا نهاده شده است (تای و همکاران ۲۰۱۴).

$$FR = \frac{A_i}{A_{ci}} \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

که در آن A_i درصد در هر طبقه از عامل‌های مؤثر، A_{ci} مساحت همان طبقه از عامل‌های مؤثر و FR نسبت فراوانی می‌باشد. سایر روابط استفاده شده در اولویت‌بندی عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های آبخیز چریک‌آباد با استفاده از مدل آنتروپی شانون شامل رابطه‌های (۳ تا ۸) می‌باشد که در آن FR: نسبت فراوانی هر طبقه، E_{ji} : ارزش آنتروپی هر عامل و گروه‌های مرتبط با آن، H_j و H_{jmax} : مقادیر آنتروپی و ماکزیمم آنتروپی، I_j : ضریب اطلاعات، V_{ji} : درجه‌ی انحراف عدم اطمینان است و سرانجام وزن نهایی V_j هر عامل از رابطه‌ی (۸) محاسبه خواهد شد.

رابطه‌ی (۳)

$$E_{ji} = \frac{FR}{\sum_{j=1}^m FR}$$

رابطه‌ی (۴)

$$H_j = - \sum_{i=1}^{S_j} E_{ji} \times \log_2 E_{ji}, j = 1 \dots n$$

رابطه‌ی (۵)

$$H_{jmax} = \log_2 S_j, S_j = \text{number of classes}$$

رابطه‌ی (۶)

$$I_j = \frac{H_{max} - H_j}{H_{max}} \quad I = (0 - 1), j = 1 \dots n$$

رابطه‌ی (۷)

$$V_{ji} = I_j FR$$

رابطه‌ی (۸)

$$V_j = \sum_{i=1}^m V_{ji}, m = \text{number of landslide}$$

7 -False positive

8 -True positive

جدول ۱- وزن عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در روش آنتروپی شانون در آبخیز چریک آباد ارومیه.

عامل	طبقه	FR	Eij	Hj	Hjmax	Ij	Vij	VJ
جهت	فلات	۰	۰				۰	
	شمال	۰/۶۶۰	۰/۱۰۱				۰/۰۹۶	
	شمال شرق	۱/۷۲۹	۰/۲۶۴				۰/۲۵۲	
	شرق	۱/۱۸۵	۰/۱۸۱				۰/۱۷۴	۰/۱۰۶
	جنوب شرق	۰/۴۳۰	۰/۰۶۶	۲/۷۰۴	۳/۱۶۹	۰/۱۴۶	۰/۰۶۳	
	جنوب	۰/۱۲۸	۰/۰۱۹				۰/۰۱۸	
	جنوب غرب	۰/۲۹۳	۰/۰۴۴				۰/۰۴۳	
	غرب	۱/۱۸۵	۰/۱۸۱				۰/۱۷۴	
ارتفاع (متر)	شمال غرب	۰/۹۲۳	۰/۱۴۱				۰/۱۳۶	
	۱۶۲۴-۱۹۸۳	۱/۱۸	۰/۲۳۵				۰/۱۰۲	
	۱۹۸۳-۲۲۷۰	۰/۲۰۶	۰/۰۴۱	۲/۱۲	۲/۳۲۱	۰/۰۸۶	۰/۰۱۷	۰/۰۸۶
	۲۲۷۰-۲۵۵۰	۱/۱۸۷	۰/۲۳۶				۰/۱۰۲	
فاصله از گسل (متر)	۲۵۵۰-۲۸۵۹	۱/۶۵۳	۰/۳۲۹				۰/۱۴۳	
	>۲۸۵۹	۰/۷۹۴	۰/۰۵۸				۰/۰۸۶	
	۰-۱۴۴	۱/۰۲۵	۰/۲۳۴				۰/۳۱۵	
	۱۴۴-۳۴۱	۱/۲۵۰	۰/۲۸۷	۶۰۷	۲/۳۲۱	۲/۳۰۷	۰/۴۰۴	۰/۰۲۷۸
فاصله از آبراهه (متر)	۳۴۱-۵۶۳	۰/۷۷۶	۰/۱۷۷	۱/			۰/۲۴۹	
	۵۶۳-۸۳۲	۱/۳۰۶	۰/۲۹۹				۰/۴۲۰	
	>۸۳۲	۰	۰				۰	
	۰-۸۰	۱/۰۳۱	۰/۲۲۶	۰/۶۰۶	۲/۳۲۱	۰/۲۸۲	۰/۳۱۹	۰/۲۸۱
فاصله از روستا (متر)	۸۰-۲۰۰	۰/۷۸۹	۰/۱۷۳				۰/۲۴۴	
	۲۰۰-۳۴۰	۱/۶۳۱	۰/۳۵۸				۰/۵۰۴	
	۳۴۰-۵۳۰	۱/۰۹۷	۰/۲۴۱				۰/۳۳۹	
	>۵۳۰	۰	۰				۰	
فاصله از جاده (متر)	۰-۱۸۰۴	۰/۷۹۴	۰/۱۶۴	۲/۲۵۶	۲/۳۲۱	۰/۰۲۸۲	۰/۰۲۲	۰/۰۲۷
	۱۸۰۴-۳۳۷۰	۰/۶۵۷	۰/۱۳۵				۰/۰۱۸	
	۳۳۷۰-۴۸۶۸	۱/۱۱۹	۰/۲۳۱				۰/۰۳۱	
	۴۸۶۸-۶۳۶۵	۱/۴۸۴	۰/۳۰۵				۰/۰۴۱	
فاصله از جاده (متر)	>۶۳۶۵	۰/۷۸۹	۰/۱۶۲				۰/۰۲۲	
	۰-۱۷۷	۰/۶۹۲	۰/۱۲۸	۲/۲۵۶	۰/۳۲۱	۰/۰۲۸۳	۰/۰۱۹	۰/۰۳۰
	۱۷۷-۳۸۰	۱/۰۵۹	۰/۱۹۷				۰/۰۲۹	
	۳۸۰-۶۰۰	۱/۱۸۱	۰/۲۱۹				۰/۰۳۳	
فاصله از جاده (متر)	۶۰۰-۸۸۰	۱/۸۰۷	۰/۱۵۰				۰/۰۲۲	
	>۸۸۰	۱/۶۳۳	۰/۳۰۳				۰/۰۴۶	

ادامه جدول ۱- وزن عوامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در روش آنتروپی شانون در آبخیز چریک‌آباد ارومیه.

عامل	طبقه	FR	Eij	Hj	Hjmax	Ij	Vij	VJ
بارش (میلی‌متر)	۴۱۳-۴۲۴	۱/۰۴۳	۰/۲۱۵	۲/۲۲۵	۲/۳۲۱	۰/۰۴۱	۰/۰۴۳	۰/۰۴۰
	۴۲۴-۴۳۲	۱/۰۸۰	۰/۲۲۳				۰/۰۴۴	
	۴۳۲-۴۴۱	۱/۵۲۱	۰/۳۱۴				۰/۰۶۳	
	۴۴۱-۴۵۰	۰/۶۹۷	۰/۱۴۳				۰/۰۲۸	
	>۴۵۰	۰/۴۹۹	۰/۱۰۳				۰/۰۲۰	
NDVI	-۰/۱۲-۰/۱۵	۶/۷۹۴	۰/۶۵۸	۲/۰۸۸	۲/۳۲۱	۰/۱۰۰	۰/۶۸۱	۰/۲۰۶
	۰/۱۵-۰/۲۵	۲/۰۶۴	۰/۲۰۰				۱/۲۰۷	
	۰/۲۵-۰/۳۲	۰/۸۴۰	۰/۰۸۱				۰/۰۸۴	
	۰/۳۲-۰/۴۵	۰/۳۸۶	۰/۰۳۷				۰/۰۳۸	
	>۰/۴۵	۰/۲۲۸	۰/۰۲۲				۰/۰۲۲	
سنگ شناسی	Ms	.	.	۲/۳۵۴	۲/۹۰۶	۰/۳۹۷	.	۰/۲۵۶
	PC-Cs	.	.					
	Cbt	۱/۸۳۸	۰/۳۹۶				۰/۵۲۵	
	Msc	۱/۴۵۸	۰/۱۵۳				۰/۵۹۰	
	Qt2	.	.				.	
	Qal	.	.				.	
	Qt	.	.				.	
	om	.	.				.	
	Qt1	.	.				.	
	I	۱/۱۳۷	۰/۱۱۷				۰/۴۵۲	
	Qf2	۱/۱۷۴	۰/۱۲۱				۰/۴۶۶	
	ubmt	.	.				.	
	sr	.	.				.	
di	.	.	.					
r	۰/۸۲۰	۰/۰۸۴	۰/۳۲۵					
.	.	.	.					
۰/۱۲۱	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۴۸۲					
شیب (/)	۰-۱۲	۰/۴۷۹	۰/۱۱۴	۱/۸۸۳	۲/۳۲۱	۰/۱۸۸	۰/۰۹۰	۰/۱۳۲
	۱۲-۲۴	۰/۱۰۳	۰/۲۶۲				۰/۲۰۸	
	۲۴-۳۶	۱/۶۳۷	۰/۳۹۰				۰/۳۰۹	
	۳۶-۴۸	۰/۹۷۶	۰/۲۳۲				۰/۱۸۴	
	>۴۸	.	.				.	
کاربری اراضی	مرتع	۱/۲۳۵	۰/۱۵۱	۱/۴۲۶	۲/۵۸۴	۰/۴۴۸	۰/۵۵۳	۰/۶۰۸
	باغ	۲/۶۲۶	۰/۳۲۲				۱/۱۷۷	
	زراعت	۴/۲۸۹	۰/۵۲۶				۱/۹۲۲	
	توده سنگی	.	.				.	
	دیم‌رها شده	.	.				.	
پهنه آبی	.	.	.					

دیواره‌ها و کف بستر می‌شوند که اختلاف ایجاد شده با افزایش شیب همراه خواهد بود. افزایش شیب در نهایت سبب برهم خوردن تعادل و ناپایداری دامنه می‌شود. بیشترین زمین لغزش‌های آبخیز در فاصله‌ی ۲۰۰-۳۴۰ متری از آبراهه رخ داده‌اند (جدول ۱ و شکل ۲). وجود شیب‌های تند و سازندهای حساس به زمین لغزش‌ها در این محدوده می‌تواند جزء عامل‌های مؤثر بوده باشد.

عامل فاصله از روستا

سازوکار وقوع لغزش‌های جدید و باز رخداد زمین لغزش‌های قدیمی در مناطق مشرف بر سکونت‌گاه‌های روستایی بسیار محتمل است. در آبخیز مورد مطالعه بیشتر منطقه در شیب‌های ملایم و متوسط قرار گرفته است. بنابراین هم از نظر ارتفاع و هم از نظر شیب برای تغییر کاربری تا فواصل دوردست روستا تقریباً محدودیتی وجود ندارد. در نتیجه تا فواصل دوردست روستا نیز می‌توان شاهد تغییر کاربری بود. نتایج بررسی لایه‌ی فاصله از روستا نشان داد که با افزایش فاصله از سکونت‌گاه از تعداد وقوع لغزش‌ها کاسته می‌شود زیرا مداخله انسان بر مناطق دوردست روستا برای آبخیزنشینی کمتر امکان‌پذیر است. اگر چه تأثیر این عامل در رخداد زمین لغزش‌های منطقه‌ی مورد مطالعه اندک بوده است (جدول ۱ و شکل ۲).

عامل فاصله از جاده

انتظار می‌رود که در محدوده‌های اطراف جاده زمین لغزش بیشتر اتفاق افتاده باشد، اما فاصله گرفتن از جاده باعث افزایش وقوع لغزش‌ها شده است؛ به طوری که در فواصل ۳۸۰-۶۰۰ متر به حداکثر وزن خود رسیده است که با نتایج (رگمی و همکاران ۲۰۱۰) هم‌راستا می‌باشد. به دلیل اینکه در محدوده‌ی مطالعاتی جاده‌ها آسفالت نبوده و بیشتر شوسه و مالرو می‌باشند؛ بنابراین جاده تأثیر زیادی در ناپایداری و وقوع زمین لغزش در آبخیز نداشته است (جدول ۱ و شکل ۲).

عامل بارش

بارش یکی از عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین لغزش‌ها می‌باشد. افزایش مقدار بارندگی یک منطقه معمولاً سبب افزایش وقوع زمین لغزش‌ها می‌شود. عامل بارش در منطقه نشان می‌دهد که پهنه‌های بارشی بیش از ۴۵۰ میلی‌متر به علت افزایش سنگینی سطح دامنه در اثر افزایش دریافت میزان رطوبت و همچنین همراه شدن با عامل‌هایی مانند نزدیکی به روستا به دلیل وجود شیب معکوس بارش و قرارگیری بارش‌های

عامل جهت شیب

جهت دامنه به عنوان یکی از عامل‌های مؤثر بر وقوع لغزش‌ها می‌تواند منجر به افزایش سرعت رخداد لغزش شود. دامنه‌های پشت به آفتاب موجب تجمع برف و رطوبت بیشتر شده و ممکن است باعث تشدید حرکات دامنه‌ای گردد. با توجه به این که آبخیز مورد مطالعه از نظر موقعیت جغرافیایی در نیمکره‌ی شمالی واقع شده است، براساس فرضیه‌های اولیه در جهت‌های شمالی باید نقاط لغزشی بیشتری رخ داده باشد. بعد از بررسی عامل جهت شیب مشاهده گردید که جهت‌های شمال شرق، شرق و غرب دارای بیشترین رخداد زمین لغزش می‌باشند (جدول ۱ و شکل ۲) که با نتایج مطالعات (ژانگ و همکاران ۲۰۱۹) همخوانی دارد.

عامل ارتفاع

محدوده‌ی مطالعاتی به لحاظ طبقه‌های ارتفاعی به پنج گروه تقسیم گردید (شکل ۲). بررسی ارتباط بین لغزش‌های رخ داده و طبقه‌های ارتفاعی نشان می‌دهد که پایین‌ترین ارتفاعات آبخیز نیز توان وقوع زمین لغزش را دارند؛ برخلاف نتایجی که در بیشتر پژوهش‌ها بیان داشتند که در ارتفاعات پایین پتانسیل وقوع زمین لغزش به صفر می‌رسد (زندى و همکاران ۲۰۱۸). در حالت کلی روند افزایش ارتفاع، نشانگر افزایش میزان لغزش‌ها می‌باشد. با افزایش ارتفاع شرایط برای عامل‌های دیگر نظیر افزایش بارش و یا حتی تغییرات در میزان درجه‌ی حرارت که با انقباض و انبساط مواد دامنه شرایط را برای رخداد زمین لغزش‌ها مهیا می‌سازد، ایجاد می‌شود. بیشترین وزن تخصیصی مربوط به طبقه‌ی ۲۲۷۰-۲۵۵۰ متر و در ارتفاعات متوسط آبخیز می‌باشد.

عامل فاصله از گسل

تراکم گسل‌ها در منطقه علاوه بر افزایش فرسایش‌پذیری و کاهش مقاومت سازندها، سبب افزایش میزان نفوذپذیری و در نهایت افزایش رطوبت در دامنه‌ها می‌شود. مقاومت برشی سنگ‌ها و خاک‌های واجد کانی‌های رسی با افزایش درصد رطوبت به شدت کاهش می‌یابد که می‌تواند توان وقوع زمین لغزش‌ها را بالا ببرد (عبادی و همکاران ۲۰۱۹). در آبخیز مورد مطالعه با وجود روند کاهش رخداد لغزش با افزایش فاصله از گسل، زیرگروه ۵۶۳-۸۳۲ متر دارای بیشترین رخداد زمین لغزش بوده است (جدول ۱ و شکل ۲).

عامل فاصله از آبراهه

فاصله از آبراهه یکی از عامل‌های مهم در ایجاد ناپایداری‌های دامنه‌ای است. وجود آبراهه‌ها سبب ایجاد اختلاف بین

زمین‌لغزش‌ها دارد. بیشترین زمین‌لغزش‌های رخ داده در آبخیز در سنگ‌های آهکی، مرنی و شیل‌ها اتفاق افتاده‌اند (جدول ۱ و شکل ۲) که عامل‌های تحریک‌کننده مانند جاده‌سازی و تغییر کاربری در حاصل‌شدن چنین نتیجه‌ای بی‌تأثیر نبوده‌اند.

عامل درصد شیب

در اغلب پژوهش‌ها شیب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در نظر گرفته می‌شود. با افزایش مقدار شیب بر مقدار نیروی جاذبه افزوده می‌شود که در نتیجه نیروی محرکه بر نیروی مقاومت غلبه کرده و بر توان وقوع زمین‌لغزش‌ها افزوده می‌گردد. در آبخیز مورد مطالعه بیشتر زمین‌لغزش‌ها در شیب بیشتر از ۱۲٪ اتفاق افتاده‌اند (شکل ۲). در شیب‌های بیشتر از ۳۶٪ از تعداد وقوع لغزش‌ها کاسته شده است زیرا در این ارتفاعات فرآیندهای فرسایشی دیگر غالب بوده و خاک کافی برای وقوع زمین‌لغزش تحت این شرایط وجود ندارد (جدول ۱). در نتیجه احتمال وقوع زمین‌لغزش‌ها کاهش می‌یابد که با نتایج (صابری‌چناری و همکاران ۲۰۱۶) مطابقت دارد.

عامل کاربری ارضی

مداخله انسان در مناطقی از آبخیز که جزء اراضی مرتعی بوده و تبدیل آن به مناطق مزرعه و باغی سبب افزایش حساسیت به وقوع لغزش‌ها شده است؛ به‌طوری‌که افزایش مقدار پوشش گیاهی باعث کاهش رخداد زمین‌لغزش شده است. پوشش گیاهی در صورتی می‌تواند نتایج مثبت (کاهش رخداد زمین‌لغزش) ارائه کند که اختلاف تأثیر سایر عامل‌های مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش زیاد نباشد. تحلیل لایه‌ی کاربری اراضی آبخیز نشان داد که مناطق زراعی و باغی دارای بیشترین حساسیت به وقوع زمین‌لغزش‌ها هستند. رخداد لغزش‌ها در اراضی باغی را می‌توان چنین استدلال کرد که وجود پوشش گیاهی درختی در مناطق پرشیب سبب سنگینی دامنه، افزایش نفوذپذیری و آبگذری کمتر در آبخیز شده است. همچنین تغییر اراضی از مرتع به زراعت که در این منطقه برخلاف بعضی از آبخیزها که به‌صورت کشت دیم می‌باشد، در این آبخیز به‌علت فراوانی آب، در اغلب مناطقی که قابلیت آبیاری دارند، تغییر کاربری ایجاد شده است. بنابراین تأثیر آب به‌همراه سایر عامل‌های نظیر حساسیت سازند و شیب مناسب سبب افزایش رخداد زمین‌لغزش‌ها در این زمین‌ها شده است (جدول ۱ و شکل ۲).

بیشتر در ارتفاعات پایین تأثیر بیشتری در وقوع زمین‌لغزش داشته است (جدول ۱). وزن نهایی عامل بارش برابر ۰/۰۴ می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیر خیلی کم این عامل در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه است. وجود گرادیان معکوس بارش روی آبخیز مورد مطالعه می‌تواند این وضعیت را توجیه کند.

عامل شاخص پوشش گیاهی تفاضلی بهنجار شده (NDVI)

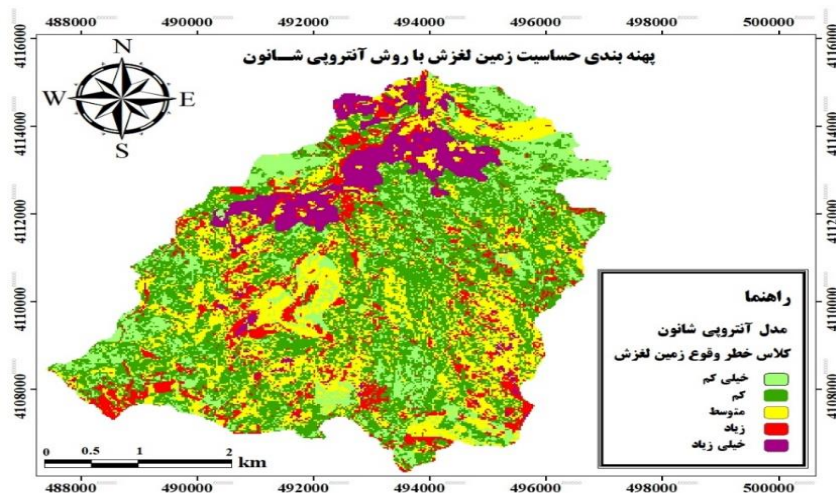
بر اساس شاخص بهنجار شده پوشش گیاهی بیشتر مناطق آبخیز دارای پوشش گیاهی تنک و پراکنده می‌باشد. کاهش فشار چرا می‌تواند سبب بهبود پوشش گیاهی و در نهایت کاهش رخداد لغزش شود. علاوه بر آن همچنین جلوگیری از مداخله‌ی آبخیز نشینان در تغییر کاربری اراضی از مرتع به دیم‌زارهای کم‌بازده، و حفاظت کناره‌های رودخانه با روش‌های اصولی می‌تواند سبب کاهش رخداد زمین‌لغزش‌ها در منطقه شود. مناطقی با پوشش گیاهی تنک و پراکنده و خاک‌های لخت دارای بیشترین احتمال رخداد لغزش و مناطق با پوشش گیاهی متراکم و جنگلی دارای کمترین احتمال وقوع زمین‌لغزش می‌باشند (سونگ و همکاران ۲۰۱۲)، که با نتایج حاصل از این تحقیق مطابقت دارد، به‌طوری‌که طبقه > 0 دارای بیشترین وزن و حساسیت به وقوع زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. (جدول ۱ و شکل ۲).

عامل سنگ‌شناسی

آهک یکی مواردی است که به‌علت مقاومت کم به فرسایش می‌تواند تشدیدکننده وقوع زمین‌لغزش‌ها باشد. از آنجایی که بخش اعظمی از آبخیز چریک‌آباد از انواع سازندهای آهکی تشکیل شده است؛ این عامل می‌تواند بر وقوع لغزش‌های آبخیز مؤثر باشد که با نتایج (لیو و همکاران ۲۰۱۹) مطابقت دارد. تنوع جنس سنگ یا خاک دامنه حالت‌های گوناگونی از لغزش را موجب می‌شود که بسته به میزان درصد شیب، رطوبت خاک، میزان بارندگی سالانه، شدت هوازگی، وضعیت زمین‌ساختی (گسل‌ها و تراکم درز و ترک‌ها) متغیر می‌باشد. ویژگی‌هایی نظیر شیب دامنه، جنس لایه‌ها، فاصله از گسل‌های جدید و قدیمی و زمین‌ریخت‌شناختی، عمق آب‌های زیرزمینی، فعالیت فرسایش آبراهه‌ها و تأسیسات انسانی نظیر بندها و سد‌های کوچک، نهرهای آبیاری و راه‌سازی نقش بسزایی را در کاهش پایداری دامنه دارند. در این بین وقوع زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یک عامل تحریک‌کننده اولیه نقش بسزایی در افزایش آمار پدیده‌ی

در محدوده‌هایی از کاربری اراضی اتفاق افتاده‌اند که در آن‌ها تغییر کاربری از حالت مرتع به زمین‌های زراعی و باغی اتفاق افتاده بود که منطبق بر نتایج (جوباری و همکاران ۲۰۱۷؛ محمدنیا و همکاران ۲۰۱۸؛ شمارا و مهاجان ۲۰۱۹) است. در حالت کلی به‌جز در طبقه ۲۰۰-۸۰ متر در آبخیز مورد مطالعه با افزایش میزان فاصله از آبراهه از تعداد لغزش‌ها کاسته شده است. در مناطق نزدیک به آبراهه به دلیل اختلاف زیادی که بین دره و ارتفاعات و برش پای دیواره‌ها وجود دارد بیشترین رخداد زمین‌لغزش‌ها وجود دارد که با نتایج (غلامی و همکاران ۲۰۱۹؛ شیرزادی و همکاران ۲۰۱۷) همخوانی دارد. در فاصله‌ی کمتر از ۶۰۰ متر از گسل‌ها بر تعداد لغزش‌ها افزوده شده است؛ با این حال، زیرگروه ۸۳۲-۵۶۳ متر دارای بیشترین رخداد زمین‌لغزش بوده است که وجود گسل‌ها در داخل لایه‌های زمین‌شناسی با ایجاد شکستگی‌ها سبب کاهش مقاومت دامنه و افزایش تعداد وقوع زمین‌لغزش‌ها می‌گردند که با نتایج پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد (شکل ۳).

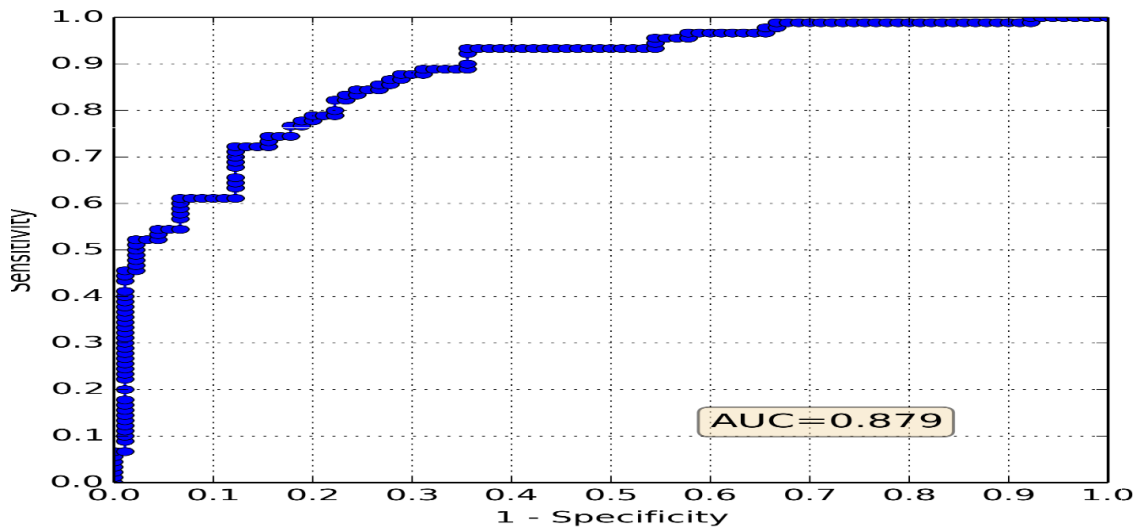
تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش
تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش، پیش‌زمینه‌ای در شناخت عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین لغزش، رخداد آن، مدیریت خطر و روش‌های پیشگیری از خطر است. به‌منظور پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش از ۱۱ عامل استفاده گردید؛ به‌این صورت که بعد از تعیین وزن نهایی هر عامل و ضرب آن در گروه‌های عامل نام برده شده، نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و نقشه‌ی نهایی حساسیت زمین لغزش به‌دست آمد (شکل ۱۳). عامل‌های کاربری اراضی، فاصله از آبراهه و فاصله از گسل به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۶۰۸، ۰/۲۸۱ و ۰/۲۷۸ بیشترین وزن را به خود اختصاص داد و به‌عنوان مؤثرترین عامل‌های در وقوع زمین لغزش منطقه شناخته شدند. نقشه‌ی تهیه شده در پنج گروه خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد مورد بررسی قرار گرفته است. در نقشه‌ی نهایی پهنه‌بندی شده با روش فوق حدود ۳۲٪ از محدوده‌ی مورد مطالعه در مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد بیشتر



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌ها با روش آنتروپی شانون در آبخیز چریک آباد (ارومیه).

از ۵۰٪ زمین‌لغزش‌ها در این عامل رخ داده‌اند. براساس نتایج مورد فوق تأیید شد که نشان دهنده‌ی عملکرد خیلی خوب مدل آنتروپی شانون در شناسایی عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌ها و پهنه‌بندی حساسیت آن در آبخیز است که با نتایج تیموری یانسی و همکاران (۲۰۱۷) مطابقت دارد.

منحنی تشخیص عملکرد سامانه (ROC)
براساس نتایج حاصل از منحنی ROC، مقدار سطح زیر منحنی (AUC) برای مدل آنتروپی شانون با استفاده از ۳۰٪ داده‌های اعتبارسنجی برابر ۰/۸۷۹ بوده است (شکل ۴). تراکم زمین‌لغزش‌های رخ داده در آبخیز قبل از استفاده از مدل نشان داد که در بخش کاربری اراضی تعداد وقوع زمین‌لغزش‌ها بسیار زیاد بوده است به‌طوری که بیش



شکل ۴- نقشه‌ی منحنی ROC با استفاده از افزونه PMT برای مدل آنتروپی شانون.

سبب افزایش رخداد لغزش می‌شوند (فام و همکاران ۲۰۱۹)، در این منطقه آبیاری به شیوه‌های مرسوم (آبیاری غرقابی) سبب زیرشویی سازندهای حساس به فرسایش به علت وجود آهک پلاژیک و آمیزه‌ی فیولیتی فراوان در این آبخیز شده و در نهایت بر رخداد زمین‌لغزش افزوده شده است. آبخیز مورد مطالعه از لحاظ شکل (خصوصیات فیزیکی آبخیزها) تقریباً یک آبخیز گرد محسوب می‌شود. در آبخیز گرد، رواناب ناشی از رگبار تقریباً به صورت همزمان از آبراهه‌های فرعی وارد آبراهه‌های اصلی می‌شود؛ به شدت بر میزان حجم و نیروی رواناب افزوده می‌گردد (بینش و سارنگ ۲۰۱۵)، از آنجاکه بیشتر لغزش‌های رخ داده در آبخیز مورد مطالعه در اطراف آبراهه‌های اصلی بوده‌اند، در نتیجه شکل آبخیز تحت تأثیر عامل بارندگی، عامل فاصله از آبراهه را به یک عامل با اهمیت بالا از لحاظ رخداد زمین‌لغزش‌ها تبدیل کرده است. علاوه بر آن قرارگیری بیشتر آبراهه‌ها در امتداد شکستگی‌ها به ویژه گسل‌ها در این آبخیز سبب هم‌سو شدن تأثیر دو عامل فاصله از آبراهه و فاصله از گسل بر رخداد لغزش‌ها شده و در نهایت بر تعداد رخداد افزوده شده است که نتایج (جعفری ۲۰۱۷) نیز این مسئله را تأیید می‌کند. مدل به کار برده شده با استفاده از منحنی ROC، سطح زیر منحنی (AUC) با افزونه‌ی PMT در محیط ArcGIS مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه‌ی ارزیابی گویای عملکرد بالای مدل با سطح زیر منحنی ۰/۸۷۹ برای هدفی است که در نظر گرفته شده است. نقشه‌های ایجاد شده در این تحقیق می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های آتی، مدیریت دامنه‌های خطرناک و آمایش سرزمین در منطقه‌ی مورد مطالعه نقش بسزایی داشته باشد.

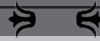
نتیجه‌گیری

شناخت عامل‌های و شرایط ایجاد و توسعه، اولویت‌بندی و تعیین مناطق حساس به زمین‌لغزش‌ها امکان دستیابی به روش‌هایی که به وسیله‌ی آن‌ها بتوان از خطرات و زیان‌های ناشی از گسترش زمین‌لغزش‌ها جلوگیری کرد را فراهم می‌کند. در این پژوهش بعد از شناسایی عامل‌های مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های آبخیز، اقدام به اولویت‌بندی این عامل‌های با استفاده از روش آنتروپی شانون و روش سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی شد. نتایج حاصل از روی هم انداختن لایه‌های عامل‌های مؤثر با نقشه‌ی لایه زمین‌لغزش‌های رخ داده نشان داد که عامل کاربری اراضی و عناصر خطی فاصله از آبراهه و فاصله از گسل دارای بیشترین تأثیر بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه بوده‌اند. در محدوده‌ی مورد مطالعه از حیث اهمیت عامل‌های نسبت به ایجاد زمین‌لغزش، کاربری اراضی دارای تأثیر زیادی بر رخداد لغزش‌های منطقه بوده است. در این آبخیز بیشتر تغییرات ایجاد شده در کاربری اراضی به صورت تغییر کاربری از حالت مرتع به زمین‌های زراعت آبی دیم و باغی بوده است. در حالت معمول افزایش مقدار پوشش گیاهی باعث کاهش رخداد زمین‌لغزش شده و پوشش گیاهی در صورتی می‌تواند نتایج مثبت (کاهش رخداد زمین‌لغزش) ارائه کند که اختلاف تأثیر سایر عامل‌های مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش زیاد نباشد (شارما و ماهاجان ۲۰۱۹)، در این آبخیز اگرچه با تغییر کاربری از مرتع به اراضی زراعی و باغی بر مقدار پوشش افزوده شده است، منتهی بیشتر مناطقی که در آن‌ها تغییر کاربری ایجاد شده در محدوده‌ی سازندهای حساس به فرسایش (انواع سنگ‌های آهکی) قرار گرفته است. وجود بعضی از سازندهای آهکی و حساس به فرسایش آبی

- Abedini M, Tulabi S. 2018. Assessing LNRF, FR, and AHP models in landslide susceptibility mapping index: A comparative study of Nojjan watershed in Lorestan province, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 77(11): 1–13.
- Ahmadi H. 2012. Applied geomorphology. University of Tehran, 688 p. (In Persian).
- Ambrosi C, Strozzi T, Scapozza C, Wegmüller, U. 2018. Landslide hazard assessment in the Himalayas (Nepal and Bhutan) based on earth-observation data. *Engineering Geology*. 237(1): 217–228.
- Arabameri A, Rezaei K, Shirani K, Mojtaba M. 2000. Identify areas susceptible to landslides using new synthetic method Shannon's entropy index-information value (Case study: Sarkhon watershed). *Journal of Watershed Management Research*. 9 (17):132–144. (In Persian).
- Binesh N, Sarang A. 2014. Effect of physiographic characteristics of flood basin on flood hydrograph; Comparison of three damavand, Verdij and Casilian basins. *Water Management*. 3(3):65 (In Persian).
- Chen HX, Zhang LM, Gao L, Zhu H, Zhang S. 2015. Presenting regional shallow landslide movement on three-dimensional digital terrain. *Engineering Geology*. 195(1): 122–134.
- Crosta G.B. 2004. Introduction to the special issue on rainfall-triggered landslides and debris flows. *Engineering Geology*. 73: 191–192.
- Devkota KC, Regmi AD, Pourghasemi HR, Yoshida K, Pradhan B, Ryu IC, Dhital MR, Althuwaynee OF. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Naryanghat road section in Nepal Himalaya. *National Hazards*. 65(1):135–165.
- Ebadi F, Ildoromi AR, Nouri H, Babaei Kh. 2019. Landslide hazard zoning at the Cheragh Veis Dam watershed of Kurdestan using the IRAT and LNRF models. *Watershed Management Researches Journal*. 32(3):37–52. (In Persian).
- Entezari M, Jalilian T. 2019. Ranking sub watersheds based on landside hazard in Kermanshah Province (Iran) using ELECTRE I. *Hydrology journal*. 5(18): 19–38. (In Persian).
- Gholami M, Ghanavati E, Ahmadabadi A. 2019. Landslide susceptibility mapping of Kan using index of entropy and LSM. *Quantitative Geomorphological Research*. 8(1):16–33 (In Persian).
- Hong H, Chen W, Xu C, Youssef A.M, Pradhan, B, Tien Bui D. 2017. Rainfall-induced landslide susceptibility assessment at the Chongren area (China) using frequency ratio, certainty factor, and index of entropy. *Geocarto International*. 32(2): 139–154.
- Hosmer DW, Lemeshow S. 2000. Applied logistic regression, 2nd edn. Wiley, New York, 373 pp
- Hung O 1997 some methods of landslides hazard intensity mapping. In: Cruden D, Fell R (eds) *Landslide risk assessment*. Balkema, Rotterdam. 215–226 p.
- jafari H. 2017. Investigating the role of faults in the morphology of the northern plains of Zanjanrood. *Geography and Environmental Planning*. 28(1): 35–48. (In Persian).
- Joybari J, Kavian A, Mosaffaie J. 2017. Effect of land use on landslide movement in the Tavan District, Qazvin. *Watershed Management Researches Journal*. 30(3):29–39. (In Persian).
- Kornejady A, Ownegh M, Rahmati O, Bahremand A. 2018. Landslide susceptibility assessment using three bivariate models considering the new topo-hydrological factor: HAND. *Geocarto International*. 33(11): 1155–1185.
- Liu X, Zhao C, Zhang Q, Peng J, Zhu W, Lu Z.

2018. Multi-Temporal loess landslide inventory mapping with C-, X-and L-Band SAR Datasets- A case study of Heifangtai loess landslides, China. *Remote Sensing*. 10(11): 1756–1765.
- Mohammadkhan Sh, Veisi A, Bagheri K. 2015. Feasibility of landslide risk using entropy model, Case study: (Shirpna mountainous region in south west Kermanshah Province). *Geographical Journal of Territory*. 11(44): 89–103. (In Persian).
- Mohammadnejad Arough V, Asghari Sereskanrood S. 2018. Landslide risk assessment using statistical methods in Barandoz Chai basin. *Quantitative Geomorphological Research*. 4(4): 181–191. (In Persian).
- Mohammadnia M, Fallah G. 2018. Landslides susceptibility mapping using fuzzy logic and AHP. *Researches in Geographical Sciences*. 18(48): 115–130. (In Persian).
- Pham, BT, Jaafari A, Prakash, I, Bui, DT. 2019. A novel hybrid intelligent model of support vector machines and the MultiBoost ensemble for landslide susceptibility modeling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 78(4): 2865–2886.
- Pontius Jr RG, Schneider LC. 2001. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 85(1–3): 239–248.
- Pourghasemi HR, Pradhan B, Gokceoglu C. 2012. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural Hazards*. 63(2): 965–996.
- RahmanZandi R, Amirahmadi A, Mohamadnia M. 2018. Use of entropy model to assess the risk of landslide in the proposed road route of Torqabeh-Dorood (Mashhad-Neyshabur). *Geography and Human Relationships*. 1(2): 37–58. (In Persian).
- Ramakrishna D, Ghose MK, Chandra RV, Jeyaram A. 2005. Probabilistic techniques, GIS and remote sensing in landslide hazard mitigation: a case study from Sikkim Himalayas, India. *Geocartography Int*. 20 (4): 53–58.
- Regmi NR, Giardino JR, Vitek JD, Dangol V. 2010. Mapping landslide hazards in Western Nepal: Comparing qualitative and quantitative approaches. *Environmental & Engineering Geoscience*. 16(2): 127–142.
- Saber Chenari K, Sheikh VB, Salmani H. 2016. Assessment of LNRF model in landslide Hazard mapping using GIS at Ziarat watershed, Gorgan. *Watershed Management Researches Journal*. 29(3): 14–23. (In Persian).
- Shaik I, Rao SK, Penta B. 2019. Detection of landslide using high resolution satellite data and analysis using entropy. In proceedings of international conference on remote sensing for disaster management. Springer, Cham. pp. 243–250.
- Shannon CE. 1948. A mathematical theory of communication. *Bulletin System Technol*. pp. 379–423.
- Sharma LP, Patel N, Ghose MK, Debnath P. 2010. Influence of Shannon's entropy on landslide-causing parameters for vulnerability study and zonation-a case study in Sikkim, India. *Arabian Journal of Geosciences*. 5(3): 421–431.
- Sharma S, Mahajan, AK. 2019. A comparative assessment of information value, frequency ratio and analytical hierarchy process models for landslide susceptibility mapping of a Himalayan watershed, India. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 78(4): 2431–2448.
- shirani K. 2017. Modelling of landslide susceptibility zonation using shannon's entropy index and weight of evidence model (Case study: Sarkhoon's Karoon). *Journal of Water and Soil Science*. 21(1): 51–68. (In Persian).
- Shirzadi A, Bui DT, Pham BT, Solaimani K, Chapi

- K, Kavian A, ... & Revhaug I. 2017. Shallow landslide susceptibility assessment using a novel hybrid intelligence approach. *Environmental Earth Sciences*. 76(2): 60–74.
- 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(1): 189–199.
- Tay LT, Latch H, Hossain MK, Kamil AA. 2014. Landslide hazard mapping using a poison distribution: a case study in Penang Island, Malaysia. In *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, Springer Cham. 521–525.
- Teimoori Yansari Z, Hosseinzadeh SR, Kavian A, Pourghasemi HR. 2017. Determination of sensitive areas to Landslide Occurrence Using Shannon Entropy Model (Case study: Chahardangeh Basin, Mazandaran Province). *Geography and Environmental Hazards*. 6(22): 183–204. (In Persian).
- Youssef A, Pourghasemi HR, El-Hadad BA, Dhahry BK. 2016. Landslide susceptibility maps using different probabilistic and bivariate statistical models and comparison of their performance at Wadi It wad Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 75(1): 63–87.
- Yufeng S, Fengxiant J. 2009. Landslide Stability Analysis Based on Generalized Information Entropy. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*. pp. 83–85.
- Zare M, Pourghasemi HR, Vafakhah M, Pradhan B. 2013. Landslide susceptibility mapping at Vaz Watershed (Iran) using an artificial neural network model: a comparison between multi-layer perceptron (MLP) and radial basic function (RBF) algorithms. *Arabian Journal of Geosciences*. 6(8): 2873–2888.
- Zho C, Yin K, Cao Y, Ahmed B, Li Y, Catani F, Pourghasemi HR. 2018. Landslide susceptibility modeling applying machine learning methods: A case study from Longju in the Three Gorges Reservoir area, China. *Computers & Geosciences*. 112(1): 23–37.



Watershed Management Research

VOL. 33, No. 4, Ser. No: 129, Winter 2021, pp. 32 - 48
DOI: 10.22092/wmej.2020.128407.1280

Prioritization of Effective Factors on Landslide Occurrence and Mapping of its Sensitivity in CherikAbad Watershed, Urmia Using Shannon Entropy Model

Abdulaziz Hanifinia

M.Sc. Student of Watershed Management, Urmia University

Habib Nazarnejad

(Corresponding Author)* Associate Professor, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Urmia University

Saeed Najafi

Assistant Professor, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Urmia University

Aiding Kornejady

Ph.D. of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources

Corresponding Author Email: h.nazarnejad@urmia.ac.ir

Received: 11 November 2019 Accepted: 17 March 2020

Abstract

Landslides are natural and incidentally man-made phenomena. Developing landslide risk reduction plans in order to preserve the natural and human resources are pivotal. This study sets out to prioritize landslide-controlling factors by using the Shannon's entropy model and the GIS techniques. A total of 90 landslides were identified using extensive field surveys and interpreting the Google Earth images. A Landslide inventory map was prepared in the GIS environment together with eleven controlling factors as inputs, namely precipitation, elevation, slope percentage, slope aspect, lithology, land use/land cover, the normalized difference vegetation index (NDVI), and the distance to streams/faults/roads/villages. The results revealed that the land use/land cover, the distance to streams, and the distance to faults were the top-ranked factors of the highest importance in landslide occurrence, while the distance to villages, and the distance to roads were of the least importance. Further, the model validation results attested to the great performance of the adopted model where the area under the receiver operating characteristic curve (AUROC) was 0.879. Considering that about 32% of the watershed is located in the high and very high sensitive area, it is recommended to avoid land use change in landslide-prone areas to reduce relative risk of landslide.

■ **Keywords:** Cherikabad Watershed, GIS, landslide, ROC curve, Shannon's entropy ■