

ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش تلفیقی فاکتور اطمینان و رگرسیون لجستیک با بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک

حمید بابلی مؤخر - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه اصفهان

علیرضا تقیان* - استادیار گروه جغرافیای دانشگاه اصفهان

کوروش شیرانی - استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۴ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶

چکیده

تحلیل ویژگی‌های فرمی سطح زمین که می‌تواند متأثر از عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی، خصوصیات ذاتی سازندها و بویژه فعالیت‌های نئوتکتونیک باشد، نقش مهمی در شناسایی و معرفی مناطق درگیر با خطر زمین لغزش دارد. هدف این تحقیق ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک همراه با سایر عوامل مرسوم در پهنه‌بندی به منظور افزایش درستی نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش در حوضه آبخیز رودخانه فهلیان می‌باشد. در این پژوهش از ۲۰ عامل مؤثر مشتمل بر ۱۴ عامل مرسوم و ۶ عامل ژئومورفومتریک به منظور ارزیابی میزان صحت نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش استفاده شد. بدین منظور ابتدا نسبت به تعیین وزن طبقات هر یک از عوامل با استفاده از روش فاکتور اطمینان اقدام شد. سپس با استفاده از اوزان بدست آمده و اجرای روش رگرسیون لجستیک نقشه حساسیت‌پذیری نسبت به زمین لغزش با دو رویکرد بدون و با بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک در کنار سایر عوامل تهیه شد. نتایج حاصل از اجرای مدل رگرسیون لجستیک، نشان داد عامل شیب، وضعیت تراکم پوشش گیاهی، جهت شیب و فاصله از آبراهه به ترتیب بیشترین تأثیر را در رخداد زمین لغزش دارد. در نهایت با استفاده از منحنی ویژگی عملکرد نسبی (ROC) اقدام به اعتبارسنجی، ارزیابی و مقایسه نقشه‌های حاصل از دو رویکرد گردید. سطح زیر منحنی در حالت بدون و با بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۸ می‌باشد. بنابراین بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک منجر به افزایش درستی نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش شده است. براساس نتایج حاصل از طبقه‌بندی نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش با استفاده از عوامل ژئومورفومتریک، ۱۴/۷۸ درصد (۵۹۵۶۳/۹۴ هکتار) و ۱۷/۰۶ درصد (۶۸۷۶۷/۰۴ هکتار) از منطقه مورد مطالعه به ترتیب در رده حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. با توجه به نقش بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک در افزایش صحت نقشه حاصل، استفاده از این رویکرد در تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش پیشنهاد می‌گردد.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، پهنه‌بندی حساسیت، ژئومورفومتریک، رگرسیون لجستیک، حوضه آبخیز رودخانه فهلیان.

مقدمه

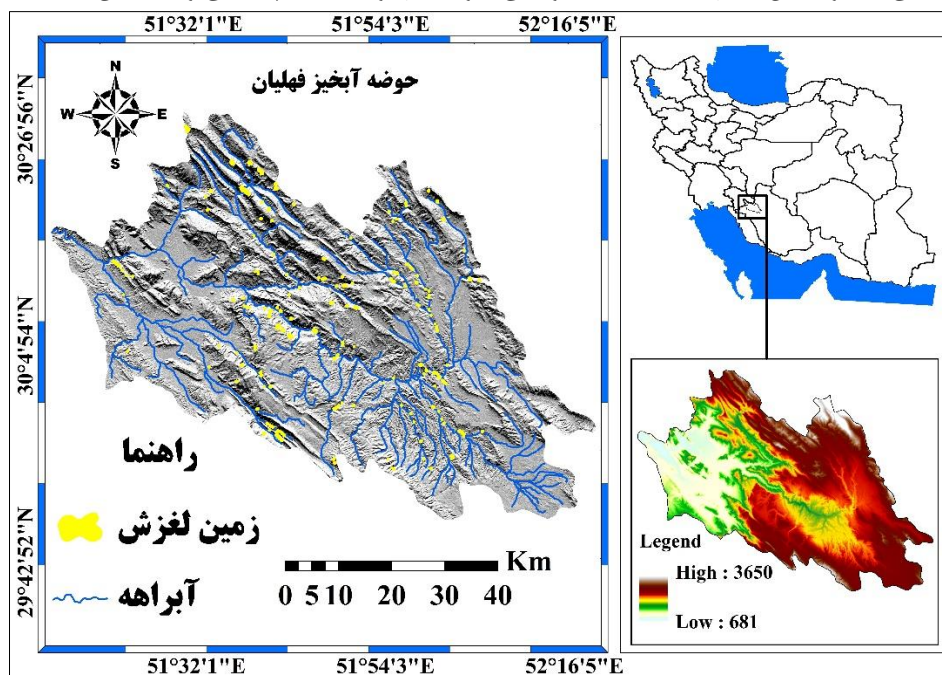
زمین‌لغزش‌ها از جمله مخاطرات ژئومورفیک می‌باشند که در اثر تعامل انواع عوامل محیطی خصوصاً در مناطق کوهستانی با ویژگی‌های خاص مورفومتریکی رخ می‌دهند (شیرانی، ۱۳۹۷: ۹۶). شکل زمین نقش اساسی در فرآیند رخداد زمین‌لغزش ایفاء می‌کند. از اینرو شناخت و نحوه پراکنش فضایی لندفرمی به منظور ارزیابی پایداری دامنه‌ای ضروری می‌باشد. ژئومورفوتری، علم کمی‌سازی عوارض توپوگرافی، با تمرکز بر استخراج پارامترهای عوارض سطح زمین براساس مدل رقومی ارتفاعی می‌باشد (صمدی و همکاران، ۱۳۹۵: ۶۸). هدف ژئومورفوتری استخراج ویژگی‌های فرمی سطح زمین و عوارض موجود در آن با استفاده از مدل‌های رقومی سطح زمین و نرم‌افزارهای پارامترسازی است. شاخص‌های ژئومورفوتریک ویژگی شکل دامنه‌هایی که مستعد لغزش هستند را به صورت کمی بیان می‌کنند. در ایران باتوجه به مناطق کوهستانی وسیع، فعالیت زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط گوناگون زمین‌شناسی و اقلیمی، شرایط برای ایجاد طیف گسترده‌ای از زمین‌لغزش‌ها فراهم است و سالیانه خسارات فراوانی به کشور وارد می‌شود (خدائی و همکاران، ۱۳۹۶: ۴۶). تهیه نقشه حساسیت مهمترین گام در کاهش و مدیریت خطرات این پدیده محسوب می‌گردد. به منظور اینکه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت با دقت بیشتری تهیه شوند لازم است از لایه‌های اطلاعاتی بیشتری که احتمال می‌رود در رخداد زمین‌لغزش مؤثر باشند استفاده و با مدل‌های مناسب اقدام به پهنه‌بندی نقشه حساسیت نسبت به زمین‌لغزش گردد. بطور کلی دستورالعمل مشخص و یکپارچه‌ای که بین همه محققین مورد قبول باشد، برای انتخاب عوامل مؤثر در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش وجود ندارد (یلین، ۲۰۰۸: ۲). مطالعات در این زمینه معمولاً با مدل‌های مختلف و عملکرد و دقت متفاوتی بوده است که برخی از این مدل‌ها به علت عدم به کارگیری معیارهای فرمی سطح زمین نتایج چندان رضایت‌بخشی نداشته و در استفاده از نتایج این تحقیقات محدودیت‌هایی وجود دارد (چانگ و فابری، ۲۰۰۳: ۴۵۴). به همین خاطر ضرورت استفاده از روش‌های جدید با معیارهای شکلی کمی برای شناسایی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش در راستای امر برنامه‌ریزی مورد نیاز است (احمدآبادی و رحمتی، ۱۳۹۴: ۱۹۸). همچنین شاخص‌های ژئومورفیک در بررسی زمین‌لغزش‌ها می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. بسیاری از حرکات توده‌ای و زمین‌لغزش‌ها در برابر حرکات تکتونیکی فعال از حساسیت بالایی برخوردار هستند. در مناطق تکتونیکی فعال، ناپایداری دامنه‌ها به صورت انواع اشکال زمین‌لغزش، مشاهده میشود. فلات ایران که یک منطقه چین‌خورده آلیپی است در حال حاضر از هر طرف تحت فشار بوده و حرکات زمین‌ساختی هنوز در آن ادامه دارد. وقوع زمین‌لرزه‌های مکرر در ایران یکی از پیامدهای فعال بودن جنبش‌های زمین‌ساختی در حال حاضر می‌باشد. آثار سطحی امواج کشسان یک زمین‌لرزه می‌تواند به صورت مختلف از جمله؛ زمین‌لغزش، گسیختگی دامنه‌ای و روانگرایی نمود یابد. عبور گسل‌های بزرگ و فعال منجر به فعالیت تکتونیکی بالا، شکستگی، لرزه‌خیزی و افزایش ناهمواری (زبری) توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه شده است. این مسئله نقش مهمی در افزایش احتمال رخداد انواع زمین‌لغزش‌ها دارد. در این ارتباط از شاخص‌های ژئومورفیک برای ارزیابی درجه فعالیت‌های تکتونیکی منطقه مورد مطالعه استفاده شده است (احسانی و همکاران، ۱۳۹۴). پژوهش‌های زیادی در ارتباط با بررسی تکتونیک فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفوتریک انجام شده که از آن جمله می‌توان به کارهای توپال و همکاران (۲۰۱۶) در آق شهر ترکیه؛ ال‌همدونی و همکارانش (۲۰۰۸) در سیرانوادا، محمدی و همکاران (۱۳۹۶)، بهیاری و همکاران (۱۳۹۵)، اشاره کرد. همچنین مطالعات زیادی در زمینه پهنه‌بندی زمین‌لغزش انجام گرفته است. در این زمینه؛ آیالیو و یاماگیشی (۲۰۰۵)، پرادهان و لی (۲۰۱۰)، اتکینسون و ماساری (۲۰۱۱)، قاسمیان و همکاران (۱۳۹۷)، خدائی و همکاران (۱۳۹۶)، شیرانی و عرب‌عامری (۱۳۹۴) با استفاده از روش رگرسیون لجستیک نسبت به پهنه‌بندی اقدام کرده‌اند. اما در خصوص بکارگیری شاخص‌های ژئومورفوتریک و تأثیر آن در میزان صحت نقشه حساسیت زمین‌لغزش تا به امروز پژوهشی انجام نشده است. تنها در این ارتباط شیرانی (۱۳۹۷) در پژوهشی به این نتیجه رسیده است که بکارگیری عوامل ژئومورفوتریک در افزایش دقت و صحت نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نقش مؤثری دارند. از معدود مطالعات مرتبط در این زمینه، پژوهشی است که با استناد به نتایج آن می‌توان

گفت که شیب‌های محدب و واگرا عموماً پایدارتر از شیب‌های مقعر و همگرا هستند؛ در این خصوص طالبی و همکاران (۲۰۰۸) با ترکیب سه نوع پروفیل طولی (مقعر، صاف و محدب) و سه نوع پلان (همگرا، موازی و واگرا) دامنه مدلی برای پایداری دامنه‌های مرکب ارائه کردند. راثو و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به بررسی ارتباط بین زمین لغزش‌ها و گسل فعال نرمال پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که زمین لغزشها عمدتاً در شیب‌های بیش از ۳۰ درجه اتفاق افتاده‌اند. وانگ و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی به مقایسه نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش حاصل از دو مدل دمپستر شفر و وزن شاهد و بهره‌گیری از شاخص‌های مورفومتری شکل دامنه پرداخته‌اند. براساس نتایج اعتبارسنجی، سطح زیر منحنی (AUC) برای مدل شفر دارای دقت ۸۰/۱۹٪ و برای وزن شاهد ۸۰/۷۵٪ می‌باشد. احمدآبادی و رحمتی (۱۳۹۴) با بکارگیری شاخص‌های کمی ژئومورفومتریک و الگوریتم SVM نسبت به شناسایی سطوح مستعد زمین لغزش اقدام کرده‌اند. نتایج نشان داد استفاده از این شاخص‌ها نقش مهمی در افزایش دقت شناسایی سطوح مستعد لغزش داشته است. همچنین حبیبی (۱۳۹۳)، شریفی و همکاران (۱۳۹۲) و ال همدونی و همکاران (۲۰۰۶) به این نتیجه رسیده‌اند که بیشترین درصد و فراوانی زمین لغزش‌ها در مناطق با فعالیت تکتونیک بسیار شدید و بالا گسترش دارند. نتایج پژوهش مکرر و شایگان (۱۳۹۷) نیز نشان داد که هر چه به لندفرم‌های مناطق کوهستانی مانند خط‌الرأس‌ها، تپه‌ها و قله‌ها نزدیک می‌شویم احتمال خطر زمین لغزش بیشتر می‌شود. هدف از این پژوهش بهره‌گیری از یک رویکرد نوین با در نظر گرفتن نقش تکتونیک فعال و ویژگی‌های فرمی سطح زمین، با بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک در کنار پارامترهای رایج در پهنه‌بندی به منظور افزایش صحت نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش می‌باشد.

موقعیت جغرافیایی و جایگاه زمین ساختی حوضه

حوضه آبریز رودخانه فهلیان با مساحت ۴۰۳۰/۹۰ کیلومترمربع در شمال غرب استان فارس و در طول جغرافیایی ۱۴' ۱۵' ۵۱° تا ۵۱' ۱۸' ۵۲° شرقی و عرض جغرافیایی ۵۳' ۴۶' ۲۹° تا ۳۸' ۲۸' ۳۰° شمالی واقع شده است. کمینه و بیشینه ارتفاعی حوضه به ترتیب از حداقل ۶۸۱ متر در نقطه خروجی تا ۳۶۵۰ متر در قله برم فیروز از ارتفاعات کوه رنج در شمال حوضه می‌باشد (شکل ۱). شهرستانهای نورآباد ممسنی، رستم (مصیری)، سپیدان (اردکان) و همچنین بخش‌های و روستاهای زیادی در این محدوده واقع شده‌اند. این محدوده از نظر تقسیمات درجه ۱ و ۲ حوضه‌های آبریز به ترتیب در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان و حوضه آبریز جراحی-زهره قرار دارد و براساس تقسیمات تماب شامل زیرحوضه‌های اردکان-چشمه سفید، کودیان-سرگاه، سرانجیلک، فهلیان و نورآباد ممسنی می‌باشد. رخنمون‌هایی از سنگ‌های ژوراسیک تا کواترن در این محدوده گسترش دارند. بخش وسیعی از سطح منطقه کوهستانی با دیواره‌های بلند و دره‌های ژرف می‌باشد و سطوح هموار و تپه ماهوری با وسعت کمتر در غرب حوضه گسترش دارد. دشت ممسنی که بخش کم‌ارتفاع منطقه را شامل می‌شود براساس طبقه‌بندی اقلیمی دوماستن جزء مناطق نیمه‌خشک می‌باشد. حداقل درجه حرارت دشت ممسنی ۲- درجه سانتیگراد و حداکثر درجه حرارت ۴۹ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. متوسط بارش دشت ۵۷۹ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است (انصاری و فتوحی، ۱۳۹۶: ۷۶). متوسط بارندگی شهرستان سپیدان با ارتفاع حدود ۲۲۵۰ متر و دهستان همایجان با ارتفاع ۲۰۵۰ متر از سطح دریا به ترتیب ۸۰۰ و ۶۸۰ میلی‌متر می‌باشد. به لحاظ ژئومورفولوژیکی بخش کمی از شرق حوضه در زاگرس مرتفع و غرب آن در زاگرس چین خورده واقع شده است. عبور گسل‌های بزرگ و فعال کارون و زاگرس، گسل فهلیان-اردکان (سپیدان)، امتداد گسل‌های کره‌بس و میشان از این محدوده، منجر به فعالیت تکتونیک و لرزه‌خیزی منطقه شده است. در این محدوده شواهد نوزمین ساختی فراوانی از جمله، ناودیس‌های بوجود آمده در راستای گسل‌ها (مانند دشت سپیدان)، حضور روندهای خطی شاخص و ممتد بر روی نگاره‌های ماهواره‌ای، حضور چشمه‌های آب گرم در زون‌های گسلی

و هستهٔ تاق‌دیس‌ها، تغییر در مورفولوژی رودخانه‌ها و مسیل‌ها، وجود پرتگاه‌های گسلی با شیب زیاد و ایجاد انواع زمین‌لغزش‌ها در سطح آنها دال بر فعالیت پوسته و پوشش رسوبی روی آن دارد. نتایج حاصل از بررسی وضعیت زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه براساس شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از آن دارای فعالیت تکتونیکی بالا می‌باشد و بخش کمتری از فعالیت تکتونیکی متوسط برخوردار است (احسانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۱۴).



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

مواد و روش تحقیق

تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش

از آنجایی که نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها مبنای وزن‌دهی عوامل و ساخت مدل می‌باشد نسبت به تهیه آن اقدام گردید. به این صورت که زمین‌لغزش‌های منطقه به کمک تصاویر ماهواره‌ای گوگل‌ارت، تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 و عکس‌های هوایی برداشت و ذخیره گردید. پردازش تصاویر ماهواره‌ای مورد نیاز در این مرحله با استفاده از نرم‌افزار ENVI4.5 انجام گرفت. بازدیدهای میدانی به منظور شناسایی و برداشت زمین‌لغزش‌های رخ داده با GPS و کنترل دقت مکانی لایه‌های اطلاعاتی با مشاهدات سطح زمین و زمین‌لغزش‌های حادث شده در حوضه انجام گرفت. در نهایت ۲۰۱ نقطه یا پهنه زمین‌لغزشی به مساحت ۶۳۵/۸۸ هکتار در سطح حوضه شناسایی و وارد محیط ArcGIS10/3 گردید و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها از این طریق تهیه گردید (شکل ۴-ع). با توجه به مشخصات زمین‌لغزش‌های مشاهده شده در منطقه (شکل ۲)، تعریف ارائه شده توسط ترزاقی (۱۹۵۰) در این پژوهش ملاک قرار گرفته است. باین توضیح که این تعریف انواع حرکات توده‌ای از قبیل ریزش، لغزش، افتان‌ها، واژگونی‌ها و سیلاب واریزه‌ای را شامل می‌گردد.



شکل ۲. انواع مختلف زمین لغزش‌های رخ داده در منطقه؛ الف: زمین لغزش چرخشی بر روی سازند گچساران، ب: افتان-واژگونی بر روی توده‌های آهکی، پ: واریزه-ریزش بر روی رسوبات آهکی، ت: زمین لغزش جریانی-ریزشی، ث: زمین لغزش انتقالی-ریزشی بر روی توده‌های آهکی، ج: زمین لغزش چرخشی مرکب بر روی سازند پابد-گورپی

تهیه و آماده‌سازی لایه‌های عوامل مؤثر بر زمین لغزش

در این پژوهش ۲۰ عامل مؤثر بر زمین لغزش مشتمل بر ۱۴ عامل مرسوم شامل؛ شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، سنگ شناسی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، بارش، کاربری ارضی، فاصله از جاده، شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی، شاخص توان آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، طول شیب و ۶ شاخص ژئومورفومتریک شامل؛ انواع انحنا (انحنای کل، انحنای سطح، انحنای نیمرخ)، شاخص موقعیت (وضعیت) توپوگرافی، شاخص ناهمواری (زبری) توپوگرافی و شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) استفاده شده است. نقشه‌های شیب (شکل ۴-الف)، وجه شیب (شکل ۴-ب)، و طبقات ارتفاعی در ۴ طبقه (شکل ۴-ت) با استفاده از نرم‌افزار GlobalMaper16 و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۳۰ متر در محیط ArcGIS10/3 تهیه شد. واحدهای سنگی براساس نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه شناسایی، تفکیک و به ۱۳ واحد تقسیم گردید (شکل ۳-خ). گسل‌های منطقه نیز از روی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه برداشت و براساس آن لایه فاصله از گسل در ۴ طبقه و با فاصله ۵۰۰ متر تهیه گردید (شکل ۴-ث). براساس ۳۰ متر و با استفاده از محیط ArcHydro نسبت به تهیه لایه رودخانه‌ها و آبراهه‌های اصلی اقدام و نقشه‌های فاصله از شبکه آبراهه در ۴ طبقه (شکل ۴-ج) و تراکم زهکشی براساس آن تهیه گردید (شکل ۴-چ). با استفاده از آمار ۳۰ ساله ایستگاه‌های موجود و همچنین مجاور حوضه و روش میان‌یابی Krigging در محیط Surfer اقدام به تهیه منحنی‌های همباران در ۴ طبقه در حوضه گردید (شکل ۴-ح). نقشه کاربری زمین با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ براساس تصاویر سنجنده ETM+2002 و در محیط نرم‌افزار ENVI4.5 تصحیح و تهیه شد (شکل ۴-د). شبکه راه‌های منطقه از تصاویر Google Earth استخراج و در محیط نرم‌افزار ArcGIS10/3 رقومی و در پنج طبقه با فاصله ۳۰۰۰ متر تهیه شد.

شاخص تراکم پوشش گیاهی ($NDVI^1$)؛ از تصاویر ماهواره‌ای LANDSAT-7 سنجنده ETM+2002 پس از انجام تصحیحات هندسی و وراثیومتریکی طبق (رابطه ۱) و در ۵ کلاس به دست آمد (شکل ۴-ژ).

¹ - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

$$\text{NDVI} = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه، IR: باند مادون قرمز و R: باند قرمز طیف الکترومغناطیسی می‌باشد. از دیدگاه نظری مقدار این شاخص در محدوده -۱ و +۱ می‌باشد. مقادیر این شاخص برای پوشش گیاهی مترکم بسوی عدد یک میل می‌کند. ولی ابرها، برف و آب با مقادیر منفی مشخص می‌شوند (فیض‌اله‌پور، ۱۳۹۷: ۱۶۷).

شاخص قدرت آبراهه (SPI^۲): نسبت بین مساحت بالادست یک نقطه و شیب زمین در بالادست آنرا بگونه‌ای نشان می‌دهد که نیمرخ عرضی و نیمرخ طولی آبراهه را منعکس می‌کند. شاخص مذکور از طریق توابع موجود در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) طبق (رابطه ۲) محاسبه و در ۴ کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۴-ص).

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI^۳): این شاخص ترکیب پستی و بلندی بوده که نسبت بین شیب‌ها را در حوضه به نمایش می‌گذارد، و به شاخص خیزی نیز معروف است. شاخص مذکور با استفاده از مدل رقومی ارتفاع طبق (رابطه ۳) و در نرم‌افزار SAGA-GIS محاسبه در چهار کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۴-ض).

شاخص طول شیب (LS^۴) یا حمل رسوب (STI^۵): (شکل ۴-پ)، بیانگر توان حمل آبراهه و یا به عبارتی عامل LS مدل AUSLE^۶ است که مدل مذکور اصلاح شده معادله جهانی تلفات خاک می‌باشد. STI شاخصی است که تأثیر توپوگرافی را بر فرسایش مشخص می‌کند. این شاخص طبق (رابطه ۴) و در ۴ کلاس محاسبه شد (ژنس، ۲۰۰۲).

$$\text{SPI} = A_s \cdot \tan \beta \quad (\text{رابطه ۲}) \quad \text{TWI} = \ln(A_s / \tan(\beta)) \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\text{STI} = \left(\frac{A_s}{22/13} \right)^{0/6} \left(\frac{\sin \beta}{0/0896} \right)^{1/3} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن؛ A_s: مساحت حوضه آبخیز و β: گرادیان شیب بر حسب درجه است.

شاخص‌های ژئومورفومتریک

در این پژوهش از شاخص‌های ژئومورفومتریک برای بررسی ویژگی‌های فرمی سطح زمین و همچنین ارزیابی درجه فعالیت تکتونیکی در سطح حوضه استفاده شد که در ادامه به روش محاسبه و تشریح روابط مربوط به آنها پرداخته می‌شود.

انحنای دامنه

انحنا نشان‌دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به عبارت دیگر محدب و مقعر بودن دامنه را نشان می‌دهد. با استفاده از مقادیر عددی و مشتقات حاصل از DEM از قبیل شیب، انحنای پروفیل، انحنای پلان، انحنای عرضی و انحنای کلی دامنه، ویژگی‌های مورفومتری لندفرم‌ها استخراج می‌گردد (فیشر و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۱۵؛ پایک، ۲۰۰۰: ۹؛ وود، ۱۹۹۶: ۱۶۶). مشتقات درجه دوم در ارتباط با تحدب و تقعر و بطور کلی شکل سطح هستند که با نام انحنای شناخته می‌شوند و می‌توان از انحنای برای اندازه‌گیری میزان ناهمواری سطح زمین استفاده نمود. محاسبه انواع انحنای در مدل رقومی ارتفاع رستری به صورت پیکسل به پیکسل محاسبه و برای هر سلول از یک معادله چندجمله‌ای درجه چهار استفاده می‌شود (روابط ۵ تا ۷). در یک پنجره با ابعاد ۳*۳ محاسبه می‌شود. باتوجه به اینکه محاسبه انحنای در یک پنجره متحرک و با استفاده از هشت همسایه یک سلول انجام می‌گیرد امکان تشخیص سلول‌ها و سطوح محدب و مقعر وجود دارد. در این تحقیق شاخصهای انحنای با استفاده از روش زونبرگر-تورن از مدل رقومی ارتفاع و در محیط Arc GIS تهیه شده‌اند.

$$\text{رابطه ۵: انحنای کلی} \quad Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$

² - Stream Power Index

³ - Topographic Wetness Index

⁴ - Length and Slope

⁵ - Sediment Transport Index

⁶ - Adapted Universal Soil Loss Equation

انحنای پروفیل معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است و بنابراین انحنای پروفیل نشان‌دهنده شدت جریان آب و فرآیندهای حمل و رسوب‌گذاری می‌شود. بطوریکه مقدار منفی این انحناء سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد (پایک، ۲۰۰۰: ۸). (شکل ۴-۴).

$$\text{رابطه ۶: انحناء پروفیل} \quad n^* g^* (a^* d^2 + b^* e^2 + c^* d^* e) / (d^2 + e^2)(1 + (d^2 + e^2))^{1.5}$$

از طرف دیگر انحنای پلان، بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی می‌باشد و بنابراین نشان‌دهنده واگرایی و همگرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحنای پلان، واگرایی جریان را نشان داده؛ که در برگرنده خط‌الرأس‌ها و ستیخ‌ها است و مقادیر منفی آن همگرایی جریان (دره‌ها) را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحناء بر حسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌گردد. (شکل ۴-۴).

$$\text{رابطه ۷: انحناء پلان} \quad n^* g^* (b^* d^2 + a^* e^2 - c^* d^* e) / (d^2 + e^2)^{1.5}$$

در کلیه این روابط g : قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاع، n : ابعاد پنجره متحرک می‌باشد (احمدآبادی و رحمتی، ۱۳۹۴).
شاخص موقعیت توپوگرافیکی (TPI): حالت گودی و برآمدگی را مورد تمایز قرار می‌دهد. این شاخص ارتفاع هر پیکسل در مدل رقومی ارتفاع را با پیکسل مشخص اطراف آن پیکسل مقایسه می‌کند. براین اساس TPI منفی نشان‌دهنده توپوگرافی کم ارتفاع (تقرها و گودال‌ها) و TPI مثبت نشان‌دهنده توپوگرافی زیاد (محدب و ستیخ‌ها) می‌باشد (مکرم و نگهبان، ۱۳۹۳: ۶۱). شاخص TPI طبق (رابطه ۸) بدست آمد و براساس آن منطقه در ۴ کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۴-۴ س).

$$\text{(رابطه ۸)} \quad TPI_i = Z_0 - \sum_{n-1} Z_{n/n}$$

که Z_0 = ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n = ارتفاع از شبکه، n = تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته شده در ارزیابی.
شاخص ناهمواری زمین (TRI^۲): در واقع به نوعی اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل اطراف خود می‌باشد. برای این کار ارتفاع هر پیکسل از پیکسل‌های اطراف خود کم شده و برای مثبت کردن این اعداد آنها را به توان ۲ رسانده، از آنها میانگین گرفته و دوباره ریشه دوم آن حساب می‌شود و به پیکسل موردنظر نسبت داده می‌شود (صمدی و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۱). در این پژوهش شاخص زبری سطح در نرم‌افزار ArcGIS و بر پایه مدل ارتفاع رقومی (DEM) با دقت ۳۰

$$\text{متر و از طریق (رابطه ۹) محاسبه و در ۴ کلاس طبقه‌بندی شد. (رابطه ۹)} \quad TRI = \sqrt{\sum_{p=1}^8 ZMd}$$

P تعداد پیکسل اطراف و ZMd میانگین تفاضل ۸ پیکسل اطراف هر پیکسل می‌باشد (شکل ۴-۴ ش).

شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat^۳): به منظور بررسی فعالیت تکتونیک در حوضه نتایج حاصل از محاسبه شش شاخص زمین‌ریختی شامل؛ انتگرال فرازسنجی (Hi)، نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن (Vf)، شکل حوضه زهکشی (Bs)، پیچ و خم پیشانی کوه (Smf)، عدم تقارن حوضه زهکشی (Af) و شاخص طول-شیب رودخانه (SL)، به‌عنوان شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) محاسبه و به‌عنوان یک پارامتر در کنار سایر پارامترها بکار گرفته شد. شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) از رابطه ۱۰ به‌دست می‌آید.

$$\text{Iat} = S / N$$

(رابطه ۱۰)

¹- Topographic Position Index

²- Terrain Ruggedness Index

³- Index of Active Tectonic

که در آن $S =$ مجموع کلاسه‌های شاخص‌های ژئومورفیک محاسبه شده و $N =$ تعداد شاخص‌های محاسبه شده می‌باشد. پس از محاسبه میانگین رده کلاسه شاخص‌ها (S/n) در هر حوضه و ارزیابی آن بنابر روش شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) به چهار رده کلاسه به شرح زیر طبقه بندی می‌شود (ال همدونی و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۷۱).

$1 < Iat < 1/5$ فعالیت‌های زمین‌ساختی شدید؛ $1/5 < Iat < 2$ فعالیت‌های تکتونیکی زیاد؛

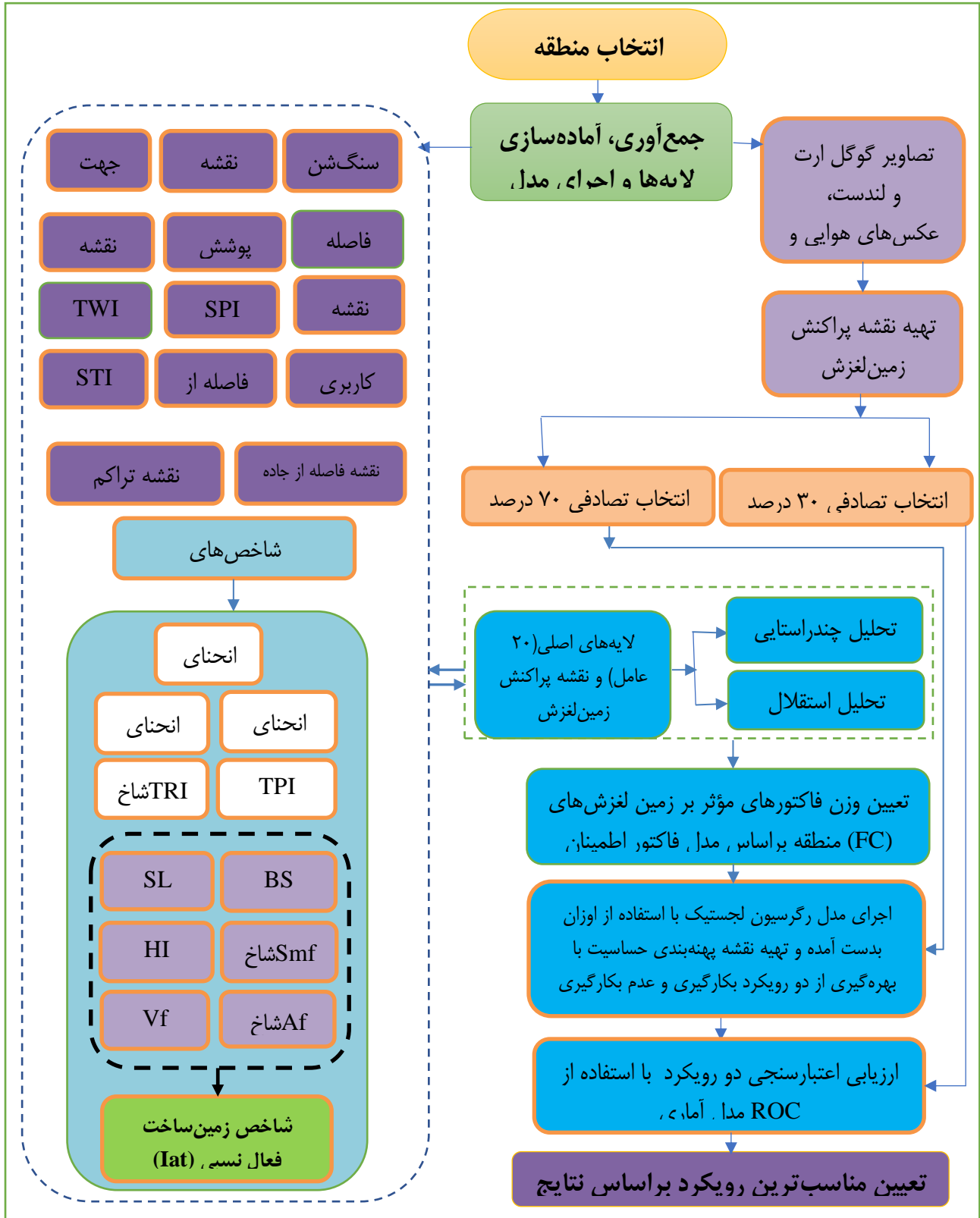
$2 < Iat < 2/5$ فعالیت‌های زمین‌ساختی متوسط؛ $Iat > 2/5$ فعالیت‌های کم و ناچیز.

بر اساس شاخص (Iat) منطقه مورد مطالعه به دو رده که شامل محدوده با فعال بالا (Iat برابر با ۲) و محدوده با فعالیت متوسط (Iat برابر با ۳) است، تقسیم‌بندی شد. میانگین شاخص‌های زمین‌ریختی (S/n) و مقادیر زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) برای پنج زیرحوضه ناحیه مورد مطالعه در جدول ۱ آمده و این نتایج به صورت مدلی از فعالیت زمین‌ساختی نسبی برای ۵ زیرحوضه محدوده مورد مطالعه در شکل (شکل ۴-ط) نشان داده شده است (احسانی و همکاران، ۱۳۹۴: ۲۱۳).

جدول ۱. تقسیم‌بندی شاخص‌های زمین‌ریختی و زمین‌ساخت فعال نسبی در زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه

Iat	S/n	SL	Af	Smf	Bs	Vf	Hi	زیر حوضه
۲	۱/۸۳۳۳۳	۳۸۹/۱۷۸	۴۵/۴۷۵۲۵	۱/۰۳۱۷	۳/۱۶۳۴	۰/۳۶	۰/۴۲۹۴	نورآباد ممسنی
۲	۱/۶۶۶۶۷	۳۳۹/۷۸۷	۶۷/۴۸۲۷	۱/۰۹۹۶	۱/۴۲۳۷	۰/۲۳	۰/۵۳۵۳	فهلیان
۲	۱/۶۶۶۶۷	۲۰۴/۹۲۷	۲۵/۲۱۴۷۴	۱/۰۳۱۷	۱/۷۷۰۷	۰/۴۱	۰/۵۸۵۲	سرانجیلک
۲	۱/۶۶۶۶۷	۴۹۷/۹۴۵	۵۷/۹۵۷۵	۱/۰۱۹۵	۱/۶۴۶۸	۰/۳۶	۰/۵۲۳۱	کودیان-سرگاه
۳	۲	۶۰/۱۹۱۱	۵۰/۶۸۰۹۳	۱/۰۲۴۹	۲/۳۸۲۳	۰/۶۹	۰/۴۸۶۵	اردکان-چشمه سفید

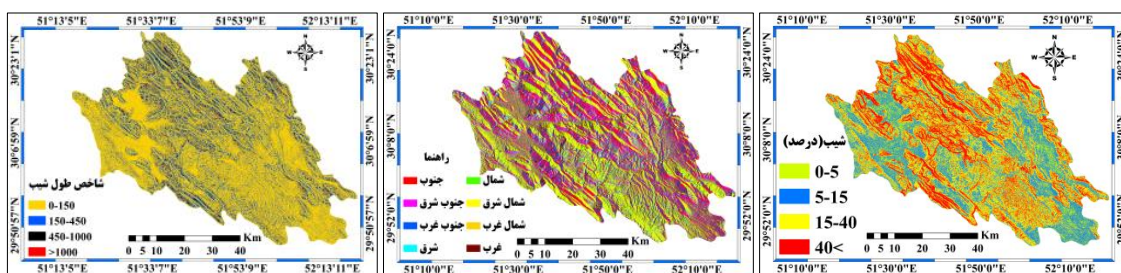
در نهایت تمامی لایه‌های اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10/3 وارد گردید و بصورت سلولی با اندازه ۳۰ در ۳۰ متر استخراج شده‌اند. در ادامه یک پایگاه داده که شامل نقشه زمین‌لغزش‌های موجود و لایه‌های عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد تهیه گردید. به منظور ارزیابی، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها با نقشه فاکتورهای مؤثر همپوشانی شد. پس از تعیین وزن طبقات عوامل مؤثر با استفاده از روش فاکتور اطمینان و اجرای مدل رگرسیون لجستیک با استفاده از اوزان بدست آمده، نقشه‌های پهنه‌بندی در دو حالت با و بدون استفاده از عوامل ژئومورفومتریک و به کمک داده‌های آموزشی (۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) تهیه گردید. سپس درستی نقشه‌های پهنه‌بندی با یکدیگر مقایسه شد. به منظور مقایسه و ارزیابی دقت و صحت نقشه‌های حاصل از دو رویکرد، با استفاده از داده‌های مکانی پراکنش لغزش‌های آزمایشی (۳۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) و منحنی ویژگی عملگر نسبی ROC اقدام به ارزیابی کمی حاصل از بکارگیری دو حالت گردید. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی، به بحث و نتیجه‌گیری در مورد بکارگیری عوامل ژئومورفومتریک نموده و نقش آن در میزان صحت نقشه پهنه‌بندی حساسیت مشخص گردید (جدول ۲ منبع، دقت پارامترها و نرم‌افزارهای مورد استفاده و شکل ۳ فلوجارت روش تحقیق را نشان می‌دهد).



شکل ۳. فلوجارت فرآیند روش تحقیق

جدول ۲. منبع، دقت پارامترها و نرم‌افزارهای مورد استفاده در پژوهش

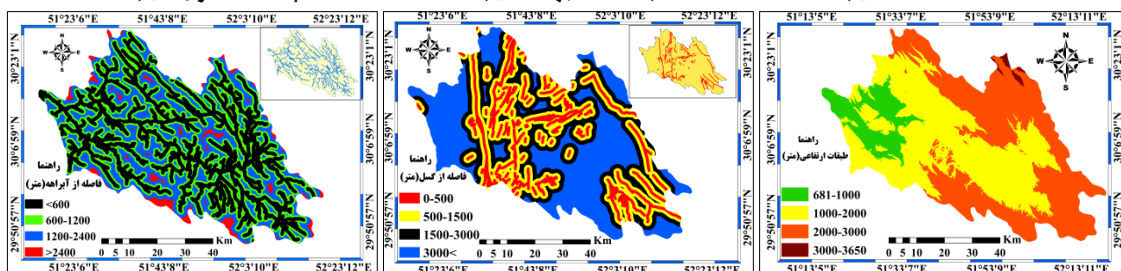
پارامترها	منبع	مقیاس	نرم‌افزار مورد استفاده	پارامترها	منبع	مقیاس	نرم‌افزار مورد استفاده
ارتفاع	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3, GlobalMaper16	فاصله از آبراهه	مدل رقومی ASTER	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3
شیب	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3, GlobalMaper16	تراکم آبراهه	مدل رقومی ASTER	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3
جهت شیب	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3, GlobalMaper16	لیتولوژی	نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی	۱:۱۰۰۰۰۰	ArcGIS10.3
فاصله از گسل	نقشه‌های زمین‌شناسی	۱:۱۰۰۰۰۰	ArcGIS10.3	کاربری اراضی	تصویر لندست ۷	۱:۱۰۰۰۰۰	ENVI5.3, ArcGIS10.3
طول شیب	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3	همبارش	ایستگاه‌های بارش و نقشه‌های توپوگرافی	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3, Surfer
شاخص رطوبت توپوگرافی	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3	NDVI	تصویر لندست ۷	۱:۱۰۰۰۰۰	ENVI5.3, ArcGIS10.3
شاخص توان آبراهه	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3	وضعیت توپوگرافی	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3
انحنای کل	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3	شاخص ناهمواری زمین	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3
انحنای سطح	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3	انحنای نیم‌رخ	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3
شاخص Iat	مدل رقومی ارتفاع حاصل از آستر	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3	فاصله از جاده	Google Earth	۱:۵۰۰۰۰	ArcGIS10.3



ب: نقشه طول شیب

ب: نقشه جهت شیب

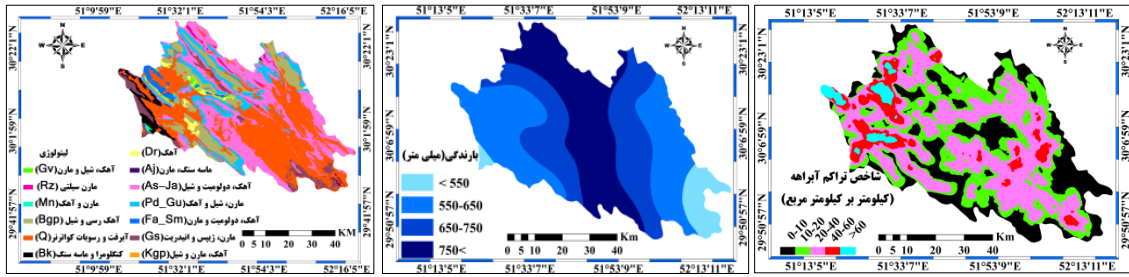
الف: نقشه شیب



ج: نقشه فاصله از آبراهه

ث: نقشه فاصله از گسل

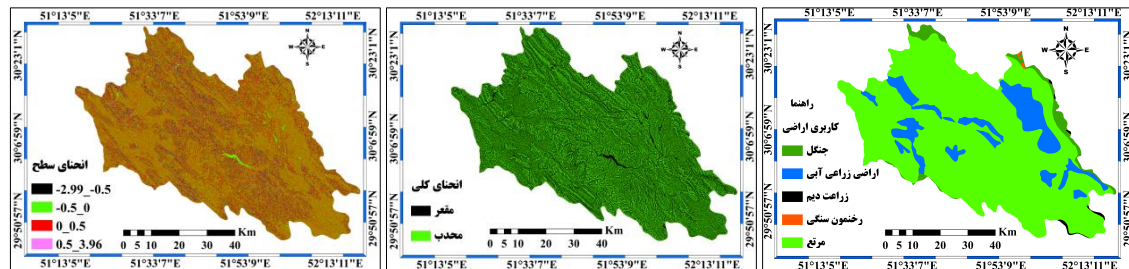
ت: نقشه طبقات ارتفاعی



خ: نقشه لیتولوژی

ح: نقشه بارش

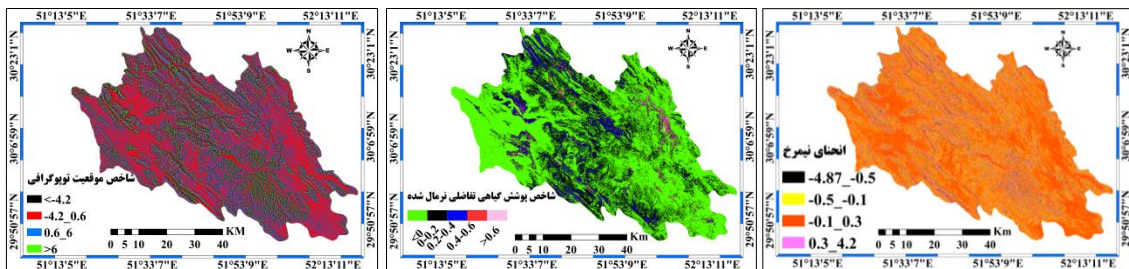
ج: نقشه تراکم آبراهه



ر: نقشه انحنای سطح

ذ: نقشه انحنای کلی زمین

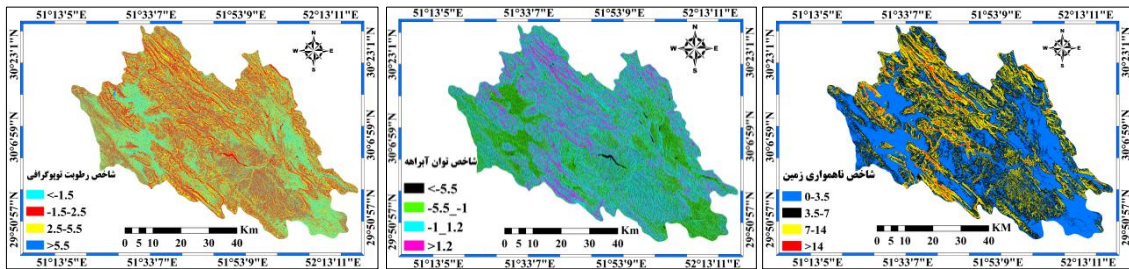
د: نقشه کاربری اراضی



س: نقشه شاخص موقعیت توپوگرافی

ز: نقشه شاخص تفاضلی پوشش گیاهی

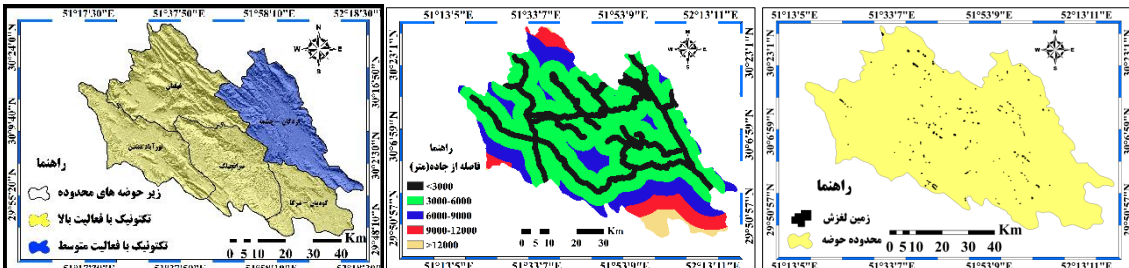
ز: نقشه انحنای نیمرخ



ض: نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی

ص: نقشه شاخص توان آبراهه

ش: نقشه شاخص ناهمواری زمین



ع: نقشه سطح فعالیت زمین ساخت نسبی (lat)

ظ: نقشه فاصله از جاده

ط: نقشه پراکنش زمین لغزش

شکل ۴. نقشه‌های فاکتورهای مورد استفاده برای تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش

تحلیل استقلال عوامل مؤثر بر زمین لغزش و آزمون چند راستایی

مجموع تحلیل چندراستایی^۱ همبستگی میان متغیرهای مستقل را برآورد می‌کند (تی‌ین بوی و همکاران، ۲۰۱۵). بدین منظور از دو شاخص مهم تولرانس (TOL^۲) و فاکتور افزونگی انحراف (VIF^۳) برای تحلیل چند راستایی استفاده می‌شود (مارکواردت، ۱۹۷۰؛ ویسبرگ و فوکس، ۲۰۱۰؛ شیرانی و همکاران، ۲۰۱۸). این دو شاخص در حین اجرای مدل‌های خطی تعمیم‌یافته برای تحلیل ارتباط میان متغیرهای مستقل یا تست چندراستایی بکار می‌رود (تسانگاراتوس و همکاران، ۲۰۱۷؛ پورقاسمی و روسی، ۲۰۱۷). اگرچه تاکنون هیچ قانون مشخصی برای تعیین آستانه این دو مقدار (TOL و VIF) در تحلیل و تخمین چندراستایی عوامل مؤثر بر زمین لغزش وجود ندارد (تسانگاراتوس و همکاران، ۲۰۱۷؛ شیرانی و همکاران، ۲۰۱۸)، اما بر اساس سابقه تحقیقی که در این زمینه انجام شده است، اگر عدد VIF کم تر از ۵ یا ۱۰ باشد و TOL بزرگتر از ۰/۱ یا ۰/۲ باشد در آنصورت مشکل چندهمبستگی وجود ندارد. به عبارت دیگر بین داده‌ها یا متغیرهای مستقل هیچ همبستگی^۴ وجود ندارد (اوبرین، ۲۰۰۷؛ گانز و واناکر، ۲۰۱۲؛ اشبیکر و مون، ۲۰۱۲؛ هانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

مدل فاکتور اطمینان

در این پژوهش به منظور ارزیابی همبستگی بین زمین لغزش و فاکتورهای انتخاب شده از مقادیر وزنی حاصل از مدل فاکتور اطمینان در قالب تحلیل‌های آماری دو متغیره استفاده شد. همچنین از اوزان محاسبه شده توسط این مدل برای آماده‌سازی و تبدیل نقشه‌های عامل به نقشه‌های باینری (طبقات با وزن منفی عدد صفر و طبقات با وزن مثبت عدد یک) برای ورود به آزمون استقلال شرطی نیز استفاده گردید. CF یکی از توابع مطلوب برای مدیریت عدم اطمینان متغیرهای ورودی در سامانه‌های قانون مدار و داده‌های نامتجانس یا ناهمگن می‌باشد (چانگ و فابری، ۱۹۹۳؛ پورقاسمی و روسی، ۲۰۱۷). از میان روش‌های آماری دو متغیره، مدل فاکتور اطمینان بررسی‌های موشکافانه‌ای را انجام می‌دهد (چانگ و فابری، ۱۹۹۳؛ لوزی و پرگالانی، ۱۹۹۹؛ شیرانی و همکاران، ۲۰۱۸). این مدل مشکل ترکیب لایه‌های اطلاعاتی ناهمگن را برطرف می‌کند. در واقع تفاوت اصلی این مدل با دیگر مدل‌های دو متغیره نحوه تلفیق نقشه‌ها در آن است. به این صورت که ابتدا نقشه‌ها کلاسه‌بندی می‌شود، سپس با استفاده از رابطه (۱۱) وزن هر یک از پیکسل‌ها به دست می‌آید.

$$CF = \left. \begin{array}{l} \frac{PPa - pps}{PPa(1 - PPs)} \text{ if } PPs \geq PPs \\ \frac{-PPa - PPs}{PPs(1 - PPa)} \text{ if } PPa < PPs \end{array} \right\} \text{ رابطه (۱۱)}$$

که در اینجا PPa: نسبت تعداد پیکسل‌های لغزشی در یک کلاس به کل پیکسل‌های آن کلاس و PPs: نسبت کل پیکسل‌های لغزشی منطقه به کل پیکسل‌های نقشه می‌باشد. با کمک این فرمول هر کلاس به صورت -۱ و +۱ ارزش گذاری می‌شود. اگر ارزش کلاس مربوطه مثبت باشد نشان‌دهنده این است که اطمینان وقوع زمین لغزش بالاست و اگر ارزش کلاس مربوطه منفی باشد یعنی اطمینان وقوع لغزش کم می‌باشد و اگر ارزش آن کلاس صفر باشد یعنی در اینجا اطلاعات کافی در مورد متغیر وجود نداشته است و بنابراین عدم اطمینان در وقوع زمین لغزش وجود دارد. لازم به ذکر است که برای بررسی همبستگی بین فاکتورهای مؤثر در لغزش با استفاده از فاکتور اطمینان ۲۰ عامل بعنوان متغیرهای مستقل وزن‌دار میشوند در ادامه بعد از ساخت مدل CF به عنوان متغیر وابسته همه آنها وارد مدل رگرسیون خطی تعمیم‌یافته می‌گردد.

1- Multicollinearity

2- Two important indices of Tolerance

3- Variance inflation factor

4- collinearity

روش رگرسیون لجستیک

یکی از مدل‌های آماری مناسب جهت اجرای پهنه‌بندی بر اساس داده‌های موجود، استفاده از مدل رگرسیون می‌باشد (لی، ۲۰۰۴). بهره‌گیری از روش رگرسیون لجستیک برای تعیین الویت و اهمیت عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به رخداد زمین‌لغزش از کارآمدی خوبی برخوردار می‌باشد. رگرسیون لجستیک از جمله روش‌های آماری پیش‌بینی‌کننده است که روند گسترش متغیر وابسته را با استفاده از متغیرهای مستقل پیش‌بینی می‌کند. متغیر وابسته، زمین‌لغزش‌های رخ داده هستند که به شکل لایه باینری (صفر و یک) و متغیرهای مستقل، عوامل مؤثر در رخ داد زمین‌لغزش هستند که به شکل لایه‌های استاندارد شده فاکتور اطمینان (+۱ و -۱) و یا طبقه‌بندی شده در نظر گرفته شده‌اند. در مدل رگرسیون براساس داده‌های موجود، معادله‌ای جهت پیش‌بینی مقادیر متغیر وابسته (Y) براساس یک یا چند متغیر پیشگوی مستقل (XI) به دست خواهد آمد. اما چنانچه مقادیر متغیر وابسته (Y) کیفی بوده و همواره دارای دو حالت باشند (وقوع و عدم وقوع) در آن بدیهی است که الگوی رگرسیون عادی جوابگو نخواهد بود. در چنین حالتی احتمال وقوع پدیده (P) برآورد می‌گردد و مدل اصطلاحاً رگرسیون لجستیک نامیده می‌شود که معادله آن مطابق رابطه (۱۲) می‌باشد.

$$Y = \text{Logit}(p) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

که در آن احتمال وقوع $Y = \text{Logit}(P) = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right)$ ، β_0 عدد ثابت، X_1 تا X_n متغیر مستقل و β_1 تا β_n نیز به ترتیب ضرایب این متغیرها می‌باشند. در واقع در رابطه (۱۲) مقادیر $\text{Logit}(P)$ برآورد شده و سپس براساس آن مقادیر P استخراج می‌گردد. برای حل معادله فوق از روش کمترین توان‌های دوم وزنی می‌توان استفاده کرد، ولی این روش مشکلاتی از قبیل نامشخص بودن مقادیر P دارد. به جای آن از روش حداکثر شباهت استفاده می‌شود. در این روش برای استخراج ضرایب مقادیر تابع حداکثر شباهت، از رابطه (۱۳) استفاده می‌شود.

$$L = \prod_{i=1}^N P_i^{y_i} \times (1 - P_i)^{(1-y_i)} \quad [\quad L = \prod_{i=1}^N P_i^{y_i} \times (1 - P_i)^{1-y_i} \quad] \quad L = \prod_{i=1}^N P_i^{y_i} \times (1 - P_i)^{(1-y_i)} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

که در آن، P_i احتمال وقوع لغزش می‌باشد و براساس رابطه ۱۲ برآورد می‌گردد، y_i مقادیر مشاهده شده حرکت توده ای است که بنا بر تعریف، مقادیر صفر یا یک خواهد بود. مدل خطی که رگرسیون لجستیک آن را ارائه می‌دهد، بسته به لغزش‌های روی داده در رابطه با متغیرهای مستقل با شرایطی که قبلاً باعث حرکات توده‌ای شده است، می‌باشد.

استانداردسازی بر روی هریک از لایه‌ها مطابق رابطه (۱۴) انجام گرفته است. رابطه ۱۴ $X_{\text{standardized}} = \frac{X - \text{Min}(x)}{\text{Max}(x) - \text{Min}(x)}$ چنانچه X به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته شود، مقادیر استاندارد شده براساس رابطه فوق به دست خواهد آمد. با استفاده از رابطه فوق به یکسان‌سازی لایه‌ها و قرارگیری دامنه مقادیر بین صفر و یک پرداخته شده است. در نهایت این لایه‌ها به عنوان متغیر پیشگو وارد مدل رگرسیون لجستیک خواهد گردید (شیرانی و عرب‌عامری، ۱۳۹۴: ۳۲۶).

اعتبارسنجی مدل رگرسیون لجستیک

در این پژوهش با استفاده از منحنی ویژگی عملگر نسبی یا گیرنده (ROC) صحت نقشه‌های تهیه‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. این منحنی از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (اسویت، ۱۹۸۸). منحنی ROC و محاسبه سطح زیرمنحنی یکی از روش‌های استاندارد اعتبارسنجی به منظور مقایسه عملکرد پیش‌بینی انواع مدل‌ها می‌باشد. در این منحنی، در محور X مقدار خطای مثبت و بر روی محور Y مقدار خطای منفی نمایش داده می‌شود. مقدار AUC بین ۰/۵-۱ متغیر است. سطح زیر منحنی ROC که AUC نامیده می‌شود، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (وقوع زمین‌لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین‌لغزش) است (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲). ایده‌آل‌ترین مدل، بیشترین سطح زیر منحنی را دارد. نرخ پیش‌بینی (منحنی ROC) بیانگر ارزیابی مدل و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده که

زمین لغزش را پیش‌بینی می‌کند، می‌باشد. همبستگی کیفی-کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت (۱-۹)، عالی، ۸-۹، خیلی خوب، ۷-۸، خوب، ۶-۷، متوسط و ۵-۶، ضعیف) است (پرادهان و لی، ۲۰۱۰). هر چه سطح زیر منحنی به یک نزدیک باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه پهنه‌بندی تهیه‌شده است.

بحث و نتایج

نتایج کاربرد آزمون چند همبستگی بین عوامل موثر بر زمین لغزش

نتایج آزمون چند همبستگی بین عوامل تعیین‌کننده زمین لغزش در سطح اطمینان ۹۹٪ در جدول ۳ آمده است. مقادیر VIF همه متغیرهای مستقل پایین‌تر از ارزش بحرانی (۵ یا ۱۰) و مقادیر TOL نیز بیشتر از مقدار محاسبه شده نظریه بحرانی می‌باشد. بیشترین و کمترین VIF به ترتیب ۳/۵۵۹ و ۱/۱۰۱ مربوط به شیب و شاخص پوشش گیاهی و کمترین TOL نیز ۰/۲۵۳ مربوط به شاخص ناهمواری زمین می‌باشد. بر این اساس هیچگونه همبستگی بین متغیرهای مستقل وجود ندارد.

جدول ۳. تجزیه و تحلیل چندهمبستگی برای عوامل مستقل

Collinearity statistics		Sig	پارامتر	Collinearity statistics		Sig	پارامتر
VF	Tolerance			VF	Tolerance		
۱/۴۰۰	۰/۷۱۵	۰/۰۰۳	انحنای کلی	۳/۵۵۹	۰/۲۸۱	۰/۰۰۰	شیب
۲/۰۲۳	۰/۴۹۴	۰/۰۰۱	انحنای نیمرخ	۱/۱۱۸	۰/۸۹۵	۰/۰۰۲	جهت شیب
۱/۵۱۰	۰/۶۶۲	۰/۰۰۴	انحنای سطح	۱/۳۷۶	۰/۷۲۷	۰/۰۰۶	بارش
۱/۴۱۵	۰/۷۰۷	۰/۰۰۰	شاخص رطوبت توپوگرافی	۱/۲۰۳	۰/۸۳۲	۰/۰۰۵	کاربری ارضی
۳/۹۴۸	۰/۲۵۳	۰/۰۰۱	شاخص ناهمواری زمین	۱/۲۲۳	۰/۸۱۸	۰/۰۰۳	ارتفاع
۲/۷۱۱	۰/۳۶۹	۰/۰۰۲	شاخص موقعیت توپوگرافی	۱/۵۰۷	۰/۶۶۴	۰/۰۰۵	لیتولوژی
۲/۶۹۷	۰/۳۷۱	۰/۰۰۳	شاخص توان آبراهه	۱/۱۷۳	۰/۸۵۲	۰/۰۰۴	فاصله از گسل
۱/۹۰۶	۰/۵۲۵	۰/۰۰۵	شاخص طول شیب	۱/۱۳۶	۰/۸۸۰	۰/۰۰۳	فاصله از جاده
۱/۱۰۱	۰/۹۰۸	۰/۰۰۲	شاخص تفاضلی پوشش گیاهی	۱/۴۲۹	۰/۷۰۰	۰/۰۰۶	تراکم آبراهه
۱/۳۵۵	۰/۷۳۸	۰/۰۰۶	شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی	۱/۵۴۸	۰/۶۴۶	۰/۰۰۱	فاصله از آبراهه

نتایج مدل فاکتور اطمینان و تحلیل همبستگی مکانی بین زمین لغزش‌ها و عوامل موثر بر زمین لغزش

در این پژوهش همبستگی مکانی بین تراکم زمین لغزش و طبقه‌های فاکتورهای انتخاب شده با استفاده از مدل فاکتور اطمینان (CF) محاسبه شد (جدول ۴). براساس این جدول میزان CF برای شاخص ناهمواری زمین < 14 و براساس تراکم زمین لغزش رخ داده برابر با ۰/۸۹ می‌باشد. از آنجا که مقدار بالای این شاخص نشان‌دهنده بالآمدگی زیاد و فعالیت نتوتکتونیک می‌باشد افزایش میزان CF را می‌توان به ناهمواری، به هم ریختگی و زبری سطوح، افزایش شیب، فعالیت نتوتکتونیک و در نتیجه تسهیل در رخداد زمین لغزش نسبت داد. همچنین شیب‌های دارای زبری (ناهمواری) زیاد به علت تغییرات شیب برای نفوذ بارندگی در خاک مساعد هستند و بنابراین افزایش آن موجب افزایش لغزش می‌شود (شیرانی، ۱۳۹۷: ۱۰۰). بنابراین بیشترین مقدار CF به بیشترین شاخص ناهمواری (< 14) تعلق دارد. در ارتباط با شیب بیشترین مقدار CF به میزان ۰/۷۰ مربوط به شیب‌های بیش از ۴۰ درصد می‌باشد که بیشترین حساسیت را نسبت به رخداد زمین لغزش دارند. در دامنه‌های پرشیب برتری تنش برشی بر نیروی مقاوم، شرایط جهت وقوع زمین لغزش فراهم شده است. این یافته با نتایج حاصل از پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۶) و راثو و همکاران (۲۰۱۷) در ارتباط با نقش شیب در رخداد زمین لغزش مطابقت دارد. از آنجا که بخش وسیعی از سطح منطقه مورد پژوهش، کوهستانی همراه با دیواره‌های بلند و دره‌های ژرف می‌باشد. بنابراین علت اینکه در منطقه مورد مطالعه با افزایش شیب حساسیت به زمین لغزش بیشتر می‌شود را می‌توان به بالابودن مقدار ریزش‌های سنگی و واژگونی در سطح منطقه نسبت داد. در ارتباط با جهت شیب، مقدار CF برای شیب‌های

شمال و شمال شرق برابر با ۰/۲۳ می‌باشد. شیرانی و عرب‌عامری در پژوهش خود در حوضه دز علیا (۱۳۹۴) اشاره دارند که شیب‌های شمال و شمال شرق بیشترین وزن را در بین طبقات شیب به خود اختصاص داده‌اند. جهات شیب مذکور به دلیل قرارگیری در دامنه‌نسا، رطوبت خود را دیرتر از دست داده و به دلیل وزن زیاد ناشی از نفوذ آب به درون لایه‌های حساس شرایط مساعدی جهت وقوع زمین لغزش پیدا می‌کنند. میزان CF با افزایش شاخص توان آبراهه رابطه مستقیم دارد بطوریکه بیشترین میزان CF به مقدار ۰/۶۷ به شاخص $>1/2$ تعلق دارد و در دیگر طبقات این میزان منفی می‌باشد. از آنجاکه این شاخص گویای میزان قدرت فرساینده‌گی جریان آب است، با افزایش آن تلاطم ناشی از جریان آب و در نتیجه زیرشویی، زمینه را جهت رخداد لغزش‌های کناری تسهیل می‌کند. در ارتباط با تراکم زمین لغزش و میزان ارتباط آن با شاخص موقعیت توپوگرافی، بیشترین CF به میزان ۰/۶۷ به شاخص کمتر از ۴/۲- که نشان‌دهنده تقعر (دره‌ها) بیشتر می‌باشد، تعلق دارد. در مورد انحنا سطح بیشترین مقدار CF برابر با ۰/۶۲ و مربوط به طبقه با انحنا منفی ۵- تا ۲/۹۹- که نشان از تقعر بیشتر است می‌باشد. مکرم و شایگان (۱۳۹۷) و احمدآبادی و رحمتی (۱۳۹۴) در پژوهش‌های خود به ترتیب، به تأثیر زیاد شاخص موقعیت توپوگرافی و انحنا سطح در وقوع زمین لغزش‌ها اشاره کرده‌اند. در ارتباط با انحنا کل میزان CF برای انحنا مقعر برابر با ۰/۱۹ و برای انحنا محدب مقدار منفی را نشان می‌دهد. سطح توپوگرافی محدب به دلیل هندسه شیب دارای لغزش کمتری می‌باشد. احمدآبادی و رحمتی (۱۳۹۴) اشاره دارند که شیب‌های محدب و واگرا عموماً پایدارتر از شیب‌های مقعر و همگرا هستند. با افزایش انحنا نیمرخ در سطح حوضه مقدار CF افزایش می‌یابد، بطوریکه بیشترین مقدار آن به میزان ۰/۶۷ مربوط به مناطق با بیشترین شاخص انحنا نیمرخ (۴/۲- تا ۰/۳) می‌باشد. مقدار مثبت این شاخص نشان‌دهنده انحنا مقعر می‌باشد. مناطق مقعر باعث افزایش رطوبت موجود در خاک می‌شوند که این عامل باعث افزایش فرسایش و کاهش ثبات خاک می‌گردد (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین در حالت مقعر فرسایش جانبی آبراهه و قدرت جریان نیز می‌تواند منجر به زیرشویی دامنه و وقوع زمین لغزش در حاشیه‌های آبراهه‌ها شود. بطور کلی در مورد شکل شیب به اشکال مختلف باید گفت که دامنه‌های مقعر استحکام کمتری نسبت به دامنه‌های محدب دارند. دامنه‌های مقعر در نگهداری و تمرکز آب‌های زیرسطحی نقش بیشتری دارند که در نتیجه باعث بوجود آمدن فشار سریع آب در داخل منافذ می‌شوند؛ بنابراین زمین لغزش‌های سطحی متناوباً در شیب‌های مقعر اتفاق می‌افتند. سازند شیلی-مارنی پابده-گورپی با CF به میزان ۰/۶۲ و باتوجه به حدروانی پایین کانی‌های رسی موجود در آنها بیشترین حساسیت را نسبت به دیگر سازندها دارد تراکم بیشتری از زمین لغزش را در خود جای داده است. عرب‌عامری و شیرانی (۱۳۹۵) در پژوهش خود سازندهای آسماری و پابده را عامل مهم بروز زمین لغزش معرفی کرده‌اند. در ارتباط با بارش، مقدار CF مناطق با بارش بیش از ۷۵۰ میلیمتر برابر با ۰/۴۹ و مقدار آن برای دیگر طبقات بارشی منفی می‌باشد. تراکم زمین لغزش در حوضه با میزان بارندگی رابطه مستقیم دارد که این مسئله نشان‌دهنده نقش بارش به واسطه وزن زیاد ناشی از نفوذ آب و در نتیجه تسهیل شرایط وقوع زمین لغزش در حوضه است. میزان CF با افزایش فاصله از جاده به سمت منفی میل پیدا می‌کند. بطوریکه بیشترین مقدار آن ۰/۴۸ و مربوط به محدوده‌ای است که در فاصله <3000 از جاده می‌باشد و در فواصل >12000 مقدار CF تا ۰/۶۸- کاهش می‌یابد. جاده‌ها شیب تعادلی یک منطقه را به هم زده، بریدگی‌های عمودی بوجود آورده و بر بخش‌های پایین جاده فشار اضافی وارد می‌کنند و باعث افزایش زمین لغزش در نزدیک‌های جاده می‌شوند. مشاهدات میدانی نشان می‌دهد مسیرهای ارتباطی واقع در حوضه مانند مسیر یاسوج به اردکان (سپیدان) به دلیل تراشه‌زنی در سازندهای حساس به لغزش (سازند پابده-گورپی) و مسیر ارتباطی در حال احداث تنگ بوان و همچنین مسیر ارتباطی دهستان فهلیان به اردکان (سپیدان) به دلیل مکان‌گزینی نامناسب و ایجاد برش در شیب‌های تند، با چالش‌های جدی از نظر انواع حرکات توده‌ای روبرو می‌باشند. در این ارتباط آیالا و یاماگیشی (۲۰۰۵) در پاهیگوی ژاپن نزدیکی به جاده را اولین و مهمترین عامل وقوع زمین لغزش معرفی و عنوان کردند، بیشتر زمین لغزش‌ها در فاصله ۱۰۰-۰ متری از جاده متمرکز شده‌اند.

در بین طبقات طول شیب بیشترین مقدار CF به میزان ۰/۴۷ مربوطه به طبقه با طول شیب ۱۵۰-۴۵۰ می‌باشد. همچنین مقدار CF برای مناطق با شاخص رطوبت توپوگرافی ۲/۵-۱ برابر با ۰/۳۹ می‌باشد. در ارتباط با فاصله از گسل بیشترین مقدار CF به میزان ۰/۴۰ به فواصل کمتر ۵۰۰ متری تعلق دارد و با افزایش فاصله این مقدار کاهش می‌یابد. مناطق گسلی بوسیله ایجاد شیب‌های تند، مناطق برشی ضعیف شده و سنگ‌های دارای شکستگی، پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را افزایش می‌دهند. مناطق با کاربری ارضی زراعت آبی با میزان CF برابر با ۰/۳۲ در بین واحدهای کاربری بیشترین پتانسیل حساسیت‌پذیری را دارند. مشاهدات میدانی نشان می‌دهد با توجه به کوهستانی بودن و ناهمواری بخش زیادی از منطقه، بارگذاری بر روی شیب از طریق گسترش محصولات جالیزی و تزریق و انتقال شبکه‌ای آب به منظور آبیاری، شرایط را جهت انتقال مواد در سطح دامنه فراهم می‌آورد. همچنین مزارع آبی که بر روی تراس‌های حاشیه رودخانه‌ها هستند در نتیجه زیرشویی رودخانه و سیلاب‌ها پتانسیل بالایی جهت سقوط ناگهانی پیدا می‌کنند. در ارتباط با تراکم زهکشی، بیشترین مقدار CF به میزان ۰/۲۱ به طبقه با تراکم زهکشی > 60 تعلق دارد. هر چه تراکم زهکشی‌ها بیشتر باشد، نفوذپذیری کاهش و سرعت جریان‌ات سطحی افزایش می‌یابد. همچنین شبکه آبراهه، با فرسایش کناری و با اشباع بخش تحتانی دامنه اثر معکوسی بر پایداری دامنه دارد (یلین، ۲۰۰۸). در ارتباط با طبقات ارتفاعی بیشترین مقدار CF به میزان ۰/۲۱ به طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰-۲۰۰۰ تعلق دارد. در طبقات ارتفاعی بالاتر مقدار CF کاهش می‌یابد که می‌تواند به علت عدم وجود خاک و فرایندهای خاک‌سازی در این ارتفاعات باشد. نتایج حاصل از جدول ۴ نشان می‌دهد که در بین طبقات فاصله از آبراهه مناطقی که در کمترین فاصله قرار دارند بیشترین مقدار CF را به خود اختصاص داده‌اند و این مقدار در فواصل کمتر از ۶۰۰ متری ۰/۱۹ و با افزایش فاصله این مقدار کاهش می‌یابد. نزدیکی شیب‌ها به شبکه‌های زهکشی به طور مستقیم بر روی درجه اشباع مواد و پایداری شیب تأثیر می‌گذارد. جریان آب می‌تواند بوسیله فرسایش دامنه و یا اشباع کردن قسمت‌های تحتانی مواد دامنه بر روی ثبات دامنه تأثیر منفی داشته باشد (دی و همکاران، ۲۰۰۱). حضور یا عدم حضور پوشش گیاهی از عوامل تأثیرگذار در رخداد زمین‌لغزش محسوب می‌گردد. بر همین اساس مقدار CF برای مناطق با شاخص کمتر از > 0 برابر ۰/۱۱ می‌باشد و با افزایش این شاخص مقدار CF کاهش و در نتیجه حساسیت به زمین‌لغزش کمتر می‌شود. بطور کلی مناطقی با پوشش گیاهی تنک و پراکنده و خاک لخت، بیشترین احتمال رخداد لغزش و مناطقی با پوشش گیاهی متراکم و جنگلی، کمترین احتمال وقوع زمین‌لغزش را دارند. در ارتباط با نقش تکتونیک فعال، بیشترین تراکم پهنه‌های لغزشی در بخش از حوضه که بر اساس شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) از فعالیت بالایی برخوردار است تعلق دارد (جدول ۴). این یافته با نتایج حاصل از پژوهش ال‌همدونی و همکاران (۲۰۰۶)، حبیبی (۱۳۹۳) و شریفی و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد. بر همین اساس مقدار CF برای محدوده با تکتونیک بالا برابر با ۰/۱۰ و برای محدوده با تکتونیک متوسط برابر ۰/۳۸- می‌باشد که نشان‌دهنده بالا بودن حساسیت به زمین‌لغزش در مناطق فعال تکتونیک می‌باشد. در مجموع؛ شاخص ناهمواری (زبری) زمین > 14 ، شیب‌های $> 40\%$ ، توان آبراهه $> 1/2$ ، انحنا $> 1/2$ - $4/2$ - $0/3$ موقعیت توپوگرافی $< 4/2$ ، سازند پابده_گورپی، انحنا $> 0/5$ - $2/99$ ، بارش > 750 mm، فواصل < 3000 متری از جاده، طول شیب ۱۵۰-۴۵۰، به ترتیب بیشترین و تراکم آبراهه ۱۰-، بارش < 550 mm، شیب‌های ۵-، سازند بختیاری، شاخص ناهمواری زمین $0/5$ - $3/5$ ، شاخص توان آبراهه 1 - $5/5$ ، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده $> 0/6$ و طبقه ارتفاعی ۱۰۰۰-۶۸۱ کمترین وزن CF را در بین طبقات فاکتورهای مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش‌های حوضه دارند.

جدول ۴. ارتباط مکانی بین زمین لغزش و هر یک از متغیرها بر اساس نگرش فاکتور اطمینان

C	P	PP	درصد مساحت زمین لغزش	مساحت زمین لغزش	درصد مساحت کلاس	مساحت کلاس (مترمربع)	طبقات	فاکتورها
F	Ps	a						
۹	۹	/۹۸	۰/۰۷	۴۴۸۴/۳۸۰۷۷	۹	۳۵۸۷۰۶/۹	۵-۰	شیب (درصد)
--/۹	--/۹	-۱۲۴	۱/۱۶	۷۳۵۴/۸۴۴۶۲	۸/۰	۳۳۸	۱۵-۵	
۹	۹	/۱۱	۲۰/۲۸	۳	۶	۱۰۳۲۴۴۸۳	۴۰-۱۵	
--/۵	--/۵	-۲۱	۷۸/۴۹	۱۲۸۹۷۰/۹۰۹	۲۵/۱	۹۹	>۴۰	
۵	۵	/۱۰		۷	۷	۱۷۲۱۴۲۵۳		
--/۲	--/۲	-۱/۱		۴۹۹۱۱۱/۷۹۷	۴۲/۱	۷۹		
۷	۴	/۷۰		۵	۷	۹۱۸۳۲۱/۵		
۰/۰	۲/۳	.			۲۲/۸	۱۱۲		
۲	۳	/۲۳	۱۵/۵۶	۹۸۹۲۵۴/۳۹۷	۹	۴۷۹۹۲۴/۴	شمال	جهت شیب
۰/۳	۰/۰	.	۲۰/۲۳	۱۲۸۶۱۲/۴۰۵	۱۱/۱	۷۶۵	شمال شرق	
۲	۳	/۲۳	۵/۶۸	۰	۴	۶۲۲۰۷۴/۷	شرق	
۰/۳	۰/۰	.	۳/۹۴	۳۶۱۴۴۱/۰۹	۱۵/۳	۴۳۶	جنوب شرق	
۴	۴	/۸۸	۹/۹۲	۲۵۰۲۲۸/۴۴۶	۷	۴۳۱۱۳۷۷۲	جنوب	
--/۶	--/۶	--	۲۲/۶۱	۶۳۰۵۰۳/۹۳۶	۱۰/۰	۱	جنوب غرب	
۵	۵	/۱۵	۱۳/۵۸	۱۴۳۷۶۹/۴۷۵	۵	۳۴۲۷۳۶۶۴	غرب	
--/۳	--/۳	-۱	۸/۴۹	۲	۸/۰	۱	شمال غرب	
۲	۲	/۲۷		۸۶۳۶۹۱/۷۳۶	۶	۵۱۰۵۶۱/۳		
--/۱	--/۱	--		۵۳۹۹۱۹/۴۴۴	۱۲/۷	۱۹۲		
۱	۲	/۱۸			۳	۷۳۸۲۴۲/۵		
۰/۸	۰/۳	.			۱۸/۱	۱۷۰		
۰	۰	/۰۵			۷	۵۱۵۱۲۲/۶		
۰/۵	۰/۶	.			۱۲/۸	۰۳۳		
۱	۱	/۱۴			۷	۳۹۱۱۰۲/۱		
--/۲	--/۲	--			۹/۰	۲۶۹		
۳	۳	/۵۵	۴۴/۹۹	۲۸۶۰۶۳/۴۵۷	۰	۲۸۲۳۹۴۴۱	۱۵۰-۰	طول شیب
--/۵	--/۵	--	۴۳/۷۶	۱	۷۰/۶	۱۴	۴۵۰-۱۵۰	
۴	۸	/۴۷	۹/۶۰	۲۷۸۲۶۱/۲۳۵	۰	۹۲۹۱۴۶/۳	۱۰۰۰-۴۵۰	
۰/۷	۰/۹	.	۱/۶۵	۴	۲۳/۵	۱۹۱	>۱۰۰۰	
۳	۶	/۳۹		۶۱۰۶۸/۵۲۷۳	۷	۲۳۳۰۳۵/۵		
۰/۹	۰/۵	.		۶	۵/۸	۳۴۲		
۳	۴	/۳۲		۱۰۴۹۱/۷۱۱۷	۱	۴۴۷۷۵/۵۳		
۰/۲	۰/۸	.		۹	۱/۱	۵۸۱		
۷	۷	/۴۰	۲/۹۳	۱۸۶۵۵۰/۲۴	۰	۴۰۳۲۸۶/۷	۱۰۰۰-۶۸۱	طبقات ارتفاعی (متر)
-/۰	--/۰	-۲	۵۹/۰۷	۳۷۵۶۱۱/۳۳۳	۱۰/۰	۴۲۳	۲۰۰۰-۱۰۰۰	
۲	۲	/۲۱	۳۷/۵۵	۷	۱	۱۸۶۱۲۵۷۲	۳۰۰۰-۲۰۰۰	
۰/۱	۰/۷	.	۰/۴۵	۲۳۸۱۷۴۸/۳۲۲	۴۶/۷	۶۱	۳۶۵۰-۳۰۰۰	
۱	۱	/۱۴		۴	۱	۱۷۳۹۶۰۸۴		
--/۲	--/۲	--		۲۸۷۰۰/۰۳۶۹	۴۳/۶	۱۳		
۳	۳	/۴۶			۶	۲۶۷۴۹/۴۴		
--/۱	--/۱	--			۰/۶	۱۳۱		

۷	۷	/۴۰	۲۶/۵۱	۱۶۸۵۸۸/۳۸۵	۶	۶۳۱۰۶۲/۸	۵۰-۰۰	فاصله از گسل (متر)
--/۰	--/۰	-۲	۲۹/۶۳	۹	۱۵/۶	۶۸۶	۱۵۰۰-۵۰۰	
۲	۲	/۲۱	۲۷/۱۳	۱۸۸۴۰۷/۰۶۳	۸	۱۰۰۱۹۰۶۰	۳۰۰۰-۱۵۰۰	
۰/۷	۰/۷	.	۱۶/۷۳	۱	۲۴/۶	۳۶	>۳۰۰۰	
۱	۱	/۱۴		۱۷۲۵۳۴/۳۷۱	۳	۹۳۹۸۲۹/۳		
--/۲	--/۲	--		۶	۲۳/۲	۶۰۲		
۳	۳	/۴۶		۱۰۶۳۵۴/۱۱۲	۱	۱۴۵۸۱۰۲۹		
--/۱	--/۱	--		۵	۳۶/۷	۰۵		
۴	۹	/۴۸	۱۶/۰۲	۱۰۱۸۷۰۷/۶۲	۱	۳۲۹۵۹۸/۱	<۳۰۰۰	فاصله از جاده
۰/۸	۰/۵	.	۲۷/۶۱	۱۷۵۵۸۳۵/۸۵	۸/۷	۱۹۰	۶۰۰۰-۳۰۰۰	
.	.	/۰۷	۵۱/۰۲	۳۲۴۴۴۴۰/۳۱	۴	۱۰۲۳۹۷۵۲	۹۰۰۰-۶۰۰۰	
۰/۷	۰/۸	.	۳/۲۷	۲۰۸۰۴۵/۹۲	۲۵/۰	۱۹	۱۲۰۰۰-	
.	.	/۰۷	۲/۰۷	۱۳۱۸۲۲/۲۰	۷	۲۲۰۶۱۸۴۹	۹۰۰۰	
-/۶	--/۶	--			۵۴/۳	۳۷	>۱۲۰۰۰	
۳	۳	/۵۶			۱	۲۰۶۲۹۷/۷		
--/۶	--/۶	--			۵/۱	۳۵۱		
۶	۶	/۱۶			۵	۲۶۴۸۴۵/۴		
--/۸	--/۸	-۲			۶/۷	۵۳۱		
۱	۲	/۱۹	۴۶/۵۴	۲۹۵۹۲۷/۹۲۱	۵	۱۷۱۵۸۰۲۶	<۶۰۰	فاصله از آبراهه
۰/۹	۰/۴	.	۲۸/۷۳	۳	۴۲/۷	۹۶	۱۲۰۰-۶۰۰	
.	.	/۰۸	۲۰/۴۲	۱۸۲۶۶۷/۰۸۴	۳	۱۱۸۲۳۶۰۲	۲۴۰۰-۱۲۰۰	
۰/۸	۰/۹	.	۴/۳۲	۹	۲۹/۳	۹۰	>۲۴۰۰	
.	.	/۰۲		۱۳۹۸۴۹/۵۳۷	۶	۹۹۳۱۷۲/۹		
--/۲	--/۲	--		۳	۲۴/۴	۶۳۵		
۱	۱	/۲۰		۲۷۴۴/۳۹۹۹۹	۴	۱۳۹۵۶۵/۳		
--/۷	--/۷	--		۰۵	۳/۶	۶۰۷		
۱	۱	.	۱۶/۱۳	۱۰۲۵۸۸/۶۲۶	۱	۹۷۴۲۲۳/۷	۱۰-۰۰	تراکم آبراهه
-	-	/۲۶	۲۸/۷۳	۱	۲۴/۷	۲۷۰	۲۰-۱۰	
۲	۲	--	۴۸/۷۵	۱۸۲۶۶۷/۰۸۴	۶	۱۰۷۲۸۵۰۸	۴۰-۲۰	
--/۰	--/۰	/۴۹	۶/۳۹	۹	۲۶/۲	۶۹	۶۰-۴۰	
۳	۳	--	۰/۰۰	۳۱۰۰۰۶۳/۶۲	۴	۱۵۵۱۲۸۱۱	>۶۰	
--/۳	--/۳	/۰۷		۴۰۶۲۲/۶۰۱۹	۳۸/۸	۶۶		
.	.	.		۷	.	۳۲۵۷۳۳/۲		
۰/۷	۰/۷	/۲۱		.	۸/۸	۷۸۳		
۲	۲	.			۶	۱۰۶۸۱۲/۳		
۰/۱	۰/۶				۲/۵	۱۴۰		
۶	۶	/۶۷	۲/۰۴	۱۳۰۰۲/۷۰۲۶	۴	۲۲۰۷۲۳/۴	Gs	سنگ شناسی
--/۲	--/۲	-۱	۴۰/۱۸		۸	۵/۸	۲۵۶	
۳	۴	/۳۰	۰/۰۷	۲۵۵۴۸۳/۸۱۸	.	۱۱۳۱۲۰۲۱	As-Ja	
۰/۰	۰/۳	.	۱۸/۵۶		۹	۲۸/۶	۸۹	
۶	۶	/۵۶	۰/۰۰	۴۴۸۳/۴۸۳۶۵	۱	۷۲۹۹/۸۶۴	۹۰۱	
--/۱	--/۱	-۱	۰/۴۷	۱۱۸۰۱۲۲/۵۷	۰/۸			
۳	۴	/۳۱	۰/۰۰	.	۷	۵۱۲۶۵۶/۹	Kgp Bgp	
۰/۱	۰/۵	.	۰/۲۰	۲۹۵۹/۷۳۹۲۱	۱۲/۲	۳۳۰	Gv	
۱	۱	.	۰/۰۰		۲	۲۶۳۴۵/۷۳		
-	-	/۷۲	۰/۰۰	.	۰/۵	۷۰۶	Dr	
۶	۶	-۱	۲۷/۵۶	۱۲۵۵/۴۹۵۴۲	۲	۵۱۱۲۸/۰۶		

۱	۱	۰	۰/۲۳	۰	۴	۱/۷	۱۱۳		
-	-	۱۳۵	۱۰/۷۰	۰	۶	۲۵۳۷۵/۴۸	۵۰۶	Rz	
۹	۹	۰		۱۷۵۲۲۴/۸۶۱	۸	۱۱۶۱۳۹/۷	۶۲۹	Bk	
-	-	-۱۳			۷	۹۴۸۶/۴۲۳	۹۰۲	Aj	
۱	۱	۰		۱۴۳۴/۹۹۴۷۷	۲	۵۲۲۲/۳۳۴	۷۰۱	Mn	
-	-	۱۶۲		۶۸۰۶۳/۰۰۱۸	۱	۴۱۹۳۱۹/۱	۱۰۷	Pd_Gu	
۱	۱	۰		۳	۴	۶۴۴۳۷/۴۶	۳۱۶	Fa_Sm	
-	-	۱/۳			۳۵/۶	۱۴۴۱۵۶۴۵	۶۸	Q	
۶	۶	-۲			۹	۲۷۸۶۰۴/۵	<۵۵۰		
۰/۲	۱/۴				۶/۱	۲۶۶	۶۵۰-۵۵۰		
۸	۸			۱۱۲۸۱۱/۰۸۹	۰	۱۳۷۱۳۱۴۶	۷۵۰-۶۵۰		
-	-	۱۷/۲۴		۱۵۸۹۰۴/۴۲۱	۳۴/۲	۹۲	۷۵۰<		
۷	۷			۰	۲	۱۲۱۸۳۹۳۲			
-	-	۲۴/۹۹		۳۶۴۱۷۰/۴۲۲	۳۰/۳	۴۴			
۰/۷	۰/۷	۱/۲۰		۰	۸	۱۱۶۲۵۸۹۰			
۱	۱			۰	۲۸/۴	۲۸			
-	-	۱/۹۱		۰	۱	۴۹۲۰/۰۰۴			
۴	۴			۰	۰/۲	۲۶۵			
-	-	۱۵۶		۳۴۲۵۵/۳۷۵۱	۴	۱۶۱۹۸/۷۹			
۳	۳			۸۶/۱۵	۸	۰۸۴			
-	-	۱۰/۴		۵۴۷۸۲۴/۷۵۲	۶	۱۴۵۳۸۹/۹			
۰	۰			۸/۴۶	۳	۳/۱	۴۶۵		
۰/۴	۰/۴	۱/۳۲		۵۳۸۰۴/۸۰۳۸	۵	۳۳۲۹۳۱۳۹			
۳	۴			۰	۹	۸۲/۹	۲۰		
۰/۲	۰/۹			۰	۲	۵۳۵۰۷۹/۲	۴۹۴		
۱	۲			۰	۵	۲۱۱۶۳۰۸۸			
۰/۹	۰/۴	۱/۱۹		۶۵/۳۸	۱	۵۲/۰	۴۷		
۲	۲			۳۴/۶۲	۵	۱۹۱۴۵۹۲۳			
-	-	۱/۳۷		۲۲۰۱۵۲/۴۴۷	۰	۴۷/۰	۸۲		
۶	۶			۰	۲	۳۳۲۸۰۶/۲	-۲/۹۹		
۰/۲	۱/۵			۲۱/۹۷	۵	۸/۶	۹۰۷		
۰	۰			۳۷/۰۹	۱	۱۶۱۷۸۳۵۱	۰		
-	-	۱/۰۸		۲۶/۱۳	۴۰/۴	۵۴	۰/۵		
۲	۲			۴/۸۱	۰	۱۹۳۷۸۶۵۷	۰/۵_۳/۹۶		
-	-	۱/۳۳		۰	۲	۴۸/۸	۴۹		
۲	۳			۳۰۵۷۹/۶۳۸۵	۱	۱۴۲۳۹۳۴۱			
۰/۶	۰/۶	۱/۲۶		۰	۳/۳	۹			

بارش

کاربری زمین

انحطای کل

انحطای سطح

بیرون زدگی
سنگی
اراضی دیم
جنگل
مرتع
زراعت آبی

کاو
کوز

۴	۷	۱/۴۳	۷/۵۹	۴۸۲۴۵/۳۲۴۱	۲	۱۷۱۹۸۳/۱	-۴/۸۷_ -۰/۵	انجمن نیمخ
۰/۳	۰/۷	.	۱۸/۵۴	۱	۴/۷	۴۱۵	-۰/۵_ -۰/۱	
۲	۲	۱/۲۶	۳۶/۶۸	۱۱۷۹۲۲۵/۸۲	۴	۹۴۴۷۰۹/۵	-۰/۱_ ۰/۳	
-۰/۰	-۰/۰	--	۳۷/۱۹	۲۳۳۲۴۴۵/۹	۲۳/۴	۹۹۱	۰/۳_ ۴/۲	
۳	۳	۱/۶۴		۲۳۶۴۷۲/۸۸۸	۲	۲۴۳۰۲۵۵۰		
-۰/۹	-۰/۹	--		۸	۶۰/۹	۵۷		
۶	.	۱/۶۷			.	۴۸۳۹۵۲/۹		
۰/۷	۲/۸	.			۱۲/۱	۷۶۵		
۱	۱	۱/۱۱	۷۹/۰۹	۵۰۲۹۴۱/۶۲۴	۵	۳۰۰۶۰۰۴۲	<.	شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی
۰/۱	۰/۲	.	۲۰/۳۸	۲	۷۴/۷	۸۷	۰--۰/۲	
۲	۲	۱/۳۰	۰/۳۵	۱۲۹۶۲۰/۳۲۵	۷	۹۵۵۶۱۸/۲	۰/۰_ ۲/۴	
-۰/۳	-۰/۳	--	۰/۰۱۴	۳	۲۳/۱	۶۸۱	۰/۰_ ۴/۶	
.	.	۱/۰۵	۰/۱۵	۲۲۴۵/۷۴۵۰۶	۳	۵۰۹۲۸۲/۸	>۰/۶	
-۰/۵	-۰/۵	--		۶	۱/۲	۸		
۴	۴	۱/۹۳		۸۹۸/۲۶۹۸	.	۳۵۲۲/۷۲۸		
-۰/۸	-۰/۸	--		۹۸۸۰/۹۶۷۸	-۰/۹	۴۰۹		
۷	۷	۱/۷۶			۳	۱۲۶۶۳/۴۴		
-۰/۳	-۰/۳	-۲			-۰/۱	۰۲۲		
۶	۱	۱/۶۷	۴۲/۱۵	۲۶۸۰۳۸/۷۷۳	۴	۵۴۳۲۷۴/۹	<-۴/۲	شاخص موقعیت توپوگرافی
۰/۷	۲/۱	.	۲۹/۲۵	۴	۱۳/۸	۸۳۵	-۴/۲_ ۰/۶	
۳	۳	۱/۶۱	۱۹/۹۵	۱۸۵۹۸۵/۸۲۲	۲	۱۹۰۵۷۹۸۵	۰/۶_ ۶	
-۰/۸	-۰/۸	--	۸/۶۴	۸	۴۷/۸	۴۵	>۶	
۳	۳	۱/۵۶		۱۲۶۸۹۰/۷۸۷	۱	۱۲۵۶۰۷۲۴		
-۰/۵	-۰/۵	--		.	۳۱/۶	۶۶		
.	.	۱/۰۶		۵۴۹۷۰/۵۴۹۶	.	۳۲۵۷۵۵۳۸		
۰/۶	۰/۶	.		۷	۸/۸	۳		
۱	۱	۱/۱۰	۸۵/۱۸	۵۴۱۶۳۶۸	.	۳۰۶۵۷۳۹۱	فعالیت بالا	فعال نسبی (IaI) زمین ساخت
۰/۰	۰/۱	.	۱۴/۸۲	۹۴۲۴۸۴	۷۶/۵	۰۲	فعالیت متوسط	
۳	۳	۱/۶۱			۹	۹۶۵۱۶۲/۸		
-۰/۸	-۰/۸	--			۲۳/۵	۱۲۷		
۹	۹	۱/۸۴	۳/۹۳	۲۵۰۱۹/۱۵۸۸	۷	۱۷۲۱۹۹۲۸	۳-۰/۵	شاخص ناهمواری (زبری) زمین
-۰/۰	-۰/۰	-۹	۱۴/۲۶	۳	۴۲/۲	۵۲	۳/۷-۵	
۵	۵	۱/۲۸	۵۳/۹۱	۹۰۶۶۱/۹۱۹۴	۶	۱۳۱۴۲۳۰۰	۱۴-۷	
-۰/۶	-۰/۶	-۱	۲۷/۸۹	۳	۳۲/۰	۵۲	>۱۴	
۵	۴	۱/۵۹		۳۴۲۸۲۷۴	۸	۸۸۰۳۹۱/۱		
۰/۹	۱/۶	.		۱۷۷۳۷۷/۸۵۳	۲۱/۴	۷۳۸		
۸	۷	۱/۸۹			.	۱۱۴۲۸۶/۱		
۰/۹	۸/۰	.			۲/۴	۵۸۷		
۶	۶	۱/۵۶	۸/۳۳	۵۲۹۹۷۹/۰۵۶	۴	۸۶۲۷۴۰/۶	<-۵/۵	شاخص توان آبراهه
-۰/۱	-۰/۱	-۱	۱/۹۷	۱۲۵۵۴۴/۹۵۴	۲۱/۰	۱۶۳	-۵/۵_ -۱	
۹	۹	۱/۸۷	۴۰/۷۰	۲۵۸۸۰۱/۵۵۶	۵	۸۶۶۶۲۲۷۳	-۱_ ۱/۲	
-۰/۰	-۰/۰	-۹	۴۸/۹۹	۳۱۱۵۳۰/۳۶۴	۹	۶	>۱/۲	
.	.	۱/۰۰			.	۱۶۵۳۶۷۹۷		
-۰/۰	-۰/۰	--			۸	۴۱/۳		
۶	.	۱/۶۷			.	۶۴۷۸۵۸۵۹		
۰/۷	۲/۳	.			۱۶/۷	۲		

۶	۶	۱/۹۱	۷/۱۵	۴۵۴۶۵/۰۸۴۲	۸	۸۴۰۷۶۳/۹	<-۱/۵	شاخص رطوبت توپوگرافی
-۰/۵	-۰/۵	-۱	۵۲/۶۴		۲	۲۰/۶	-۱/۵_۲/۵	
۳	۶	۱/۳۹	۳۶/۲۷	۳۳۴۷۵۶/۵۲۹	۶	۱۲۷۷۱۶۲۹	۲/۵-۵/۵	
۰/۹	۰/۵	.	۳/۹۳		۶	۳۱/۸	>۵/۵	
۰	۰	۱/۰۶		۲۳۰۶۴۴/۱۵۹	۵	۱۵۵۵۰۱۷۹		
-۰/۵	-۰/۵	--			۰	۳۸/۸	۴۰	
۵	۵	۱/۲۵		۲۵۰۱۹/۱۵۸۸	۸	۳۵۷۹۵۷۱۵		
-۰/۵	-۰/۵	-۱			۳	۸/۸	۴	

نتایج اجرای مدل رگرسیون لجستیک و تهیه نقشه حساسیت نسبت به زمین لغزش

پس از ورود وزن‌های حاصل از فاکتور اطمینان به مدل رگرسیون لجستیک، با استفاده امکانات موجود در نرم‌افزار SPSS، ضرایب مدل استخراج شد. برای رسیدن به ضرایب بهینه رگرسیون در این پژوهش، لایه حرکات توده‌ای به‌عنوان متغیر پاسخ (Y) انتخاب گردیده است. بطوریکه به رویداد وقوع زمین لغزش عدد یک و به رویداد عدم وقوع آن عدد صفر اختصاص داده شده است و سایر لایه‌های استخراج شده (۲۰ عامل مذکور) به عنوان متغیر پیش‌گو (X) در نظر گرفته شده است. جدول ۵ ضرایب و انحراف از معیار حاصل از اجرای مدل رگرسیون لجستیک با ۲۰ متغیر را نشان می‌دهد. در نهایت معادله رگرسیون حاصله مطابق رابطه ۱۵ ارائه می‌گردد. (رابطه ۱۵)

$$\text{Logit(Lanslide)} = 0/571 \times \text{Slope} + 0/184 \times \text{Aspect} + 0/024 \times \text{Rain} - 0/116 \times \text{Landuse} + 0/087 \times \text{DEM} - 0/003 \times \text{Litology} - 0/047 \times \text{Distance to Fault} - 0/050 \times \text{Distance to Road} + 0/005 \times \text{River density} + 0/174 \times \text{Distance to River} + 0/038 \times \text{Curvature} + 0/164 \times \text{Profile curvature} - 0/059 \times \text{Plan curvature} + 0/061 \times \text{TWI} + 0/128 \times \text{TRI} + 0/139 \times \text{TPI} + 0/164 \times \text{SPI} - 0/076 \times \text{LS} + 0/189 \times \text{NDVI} - 0/089 \times \text{Iat}$$

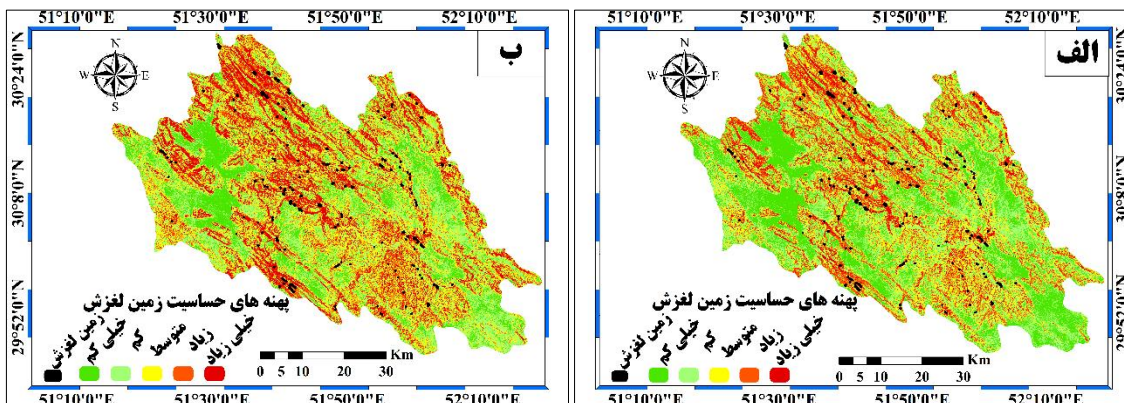
بر اساس نتایج حاصل از مدل رگرسیون لجستیک، عامل شیب، شاخص NDVI، جهت شیب و فاصله از آبراهه به‌ترتیب با بیشترین ضریب، بهترین متغیر پیش‌بینی‌کننده احتمال وقوع زمین لغزش در منطقه می‌باشند.

جهت پهنه‌بندی نقشه حساسیت زمین لغزش از ترکیبی از نظرات کارشناسی و روش‌های معمول طبقه‌بندی استفاده گردیده است. به‌منظور پهنه‌بندی این لایه‌ها، روش‌های مختلفی از جمله شکست طبیعی، فاصله برابر، مقادیر صفت، انحراف استاندارد و فاصله ژئومتریکی مورد آزمون قرار گرفت. در نهایت باتوجه به اینکه فراوانی تجمعی داده‌های مقادیر حساسیت مربوط به پیکسل‌های نقشه پهنه‌بندی از نظر آماری نرمال می‌باشند لذا بر اساس الگوریتم شکست طبیعی (Natural Break) به پنج رده حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم گردید.

با ترکیب نقشه‌های وزنی، نقشه‌های پهنه‌بندی براساس دو روش بدون بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریکی (شکل ۵-الف) و با اعمال نقش این عوامل در کنار سایر پارامترها (شکل ۵-ب) تهیه شده است. بر این اساس در حالت بدون بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریکی ۲۴/۱۴، ۳۰/۴۵، ۱۹/۲۴، ۱۷/۸۹، ۸/۲۸ و در حالت دوم ۲۷/۳۷، ۱۵/۵۹، ۲۵/۲۰، ۱۴/۷۸، ۱۷/۰۶ درصد از منطقه به‌ترتیب در رده‌های حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد واقع شده است. مساحت زمین لغزش‌ها و رده‌های مختلف حساسیت در جدول ۶ آمده است.

جدول ۵. ضرایب و انحراف از معیار حاصل از رابطه رگرسیون لجستیک

Sig.	ضرایب استاندارد		متغیرهای مستقل	Sig.	ضرایب غیر استاندارد		متغیرهای مستقل	
	Beta	B			Beta	B		
۰/۰۰۰	۰/۰۱۷	۰/۰۹۴	۰/۰۳۸	۰/۰۰۰	-	۰/۰۵۰	۰/۴۵۹	عدد ثابت
۰/۰۳۴	۰/۰۸۰	۰/۰۷۷	۰/۱۶۴	۰/۰۱۱	۰/۱۱۳	۰/۲۲۳	۰/۵۷۱	شیب
۰/۰۰۰	-۰/۰۳۲	۰/۰۸۰	-۰/۰۵۹	۰/۰۰۱	۰/۱۷۳	۰/۰۵۴	۰/۱۸۴	جهت شیب
۰/۰۰۰	۰/۰۴۵	۰/۰۵۸	۰/۰۶۱	۰/۰۰۰	۰/۰۲۰	۰/۰۵۱	۰/۰۲۴	بارش
۰/۰۱۰	۰/۱۸۴	۰/۰۴۹	۰/۱۲۸	۰/۰۰۰	-۰/۰۳۱	۰/۱۴۸	-۰/۱۱۶	کاربری ارضی
۰/۰۲۳	۰/۱۳۳	۰/۰۶۱	۰/۱۳۹	۰/۰۰۰	۰/۰۴۶	۰/۰۷۴	۰/۰۸۷	ارتفاع
۰/۰۰۳	۰/۱۷۵	۰/۰۵۵	۰/۱۶۴	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۳	۰/۰۳۹	-۰/۰۰۳	لیتولوژی
۰/۰۰۰	-۰/۰۶۱	۰/۰۶۱	-۰/۰۷۶	۰/۰۰۰	-۰/۰۳۴	۰/۰۵۳	-۰/۰۴۷	فاصله از گسل
۰/۰۸۱	۰/۰۶۵	۰/۱۰۸	۰/۱۸۹	۰/۰۰۰	-۰/۰۲۲	۰/۰۸۵	-۰/۰۵۰	فاصله از جاده
۰/۰۰۰	-۰/۰۳۹	۰/۰۹۵	-۰/۰۸۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۳	۰/۰۶۷	۰/۰۰۵	تراکم آبراهه
				۰/۰۰۰	۰/۲۵۰	۰/۰۴۷	۰/۱۷۴	فاصله از آبراهه



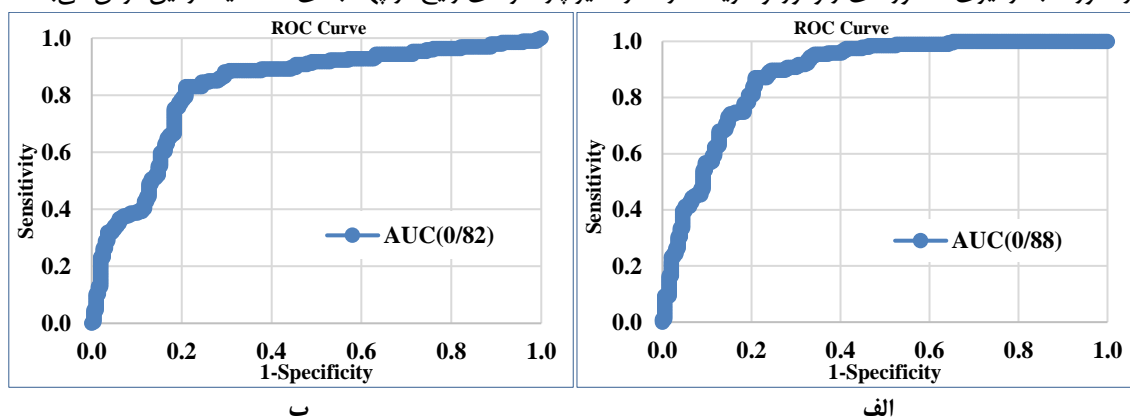
شکل ۵. نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش الف: بدون شاخص‌های ژئومورفومتریک ب: با شاخص‌های ژئومورفومتریک

جدول ۶. درصد مساحت زمین لغزش و رده‌های مختلف حساسیت برای دو روش بدون و با شاخص‌های ژئومورفومتریک

روش	رده‌های حساسیت زمین لغزش	مساحت زمین لغزش (هکتار)	درصد مساحت زمین لغزش	مساحت رده حساسیت (هکتار)	درصد مساحت رده
ژئومورفومتریک بدون شاخص‌های	خیلی کم	۲/۳۳	۰/۳۷	۹۷۳۰۸/۱۶	۲۴/۱۴
	کم	۲۷/۰۱	۴/۲۵	۱۲۲۷۳۸/۱۵	۳۰/۴۵
	متوسط	۷۰/۸۰	۱۱/۱۳	۷۷۵۶۳/۴۷	۱۹/۲۴
	زیاد	۲۱۷/۴۳	۳۴/۱۹	۷۲۱۱۴/۵۳	۱۷/۸۹
	خیلی زیاد	۳۱۸/۳۰	۵۰/۰۶	۳۳۳۶۵/۸۱	۸/۲۸
ژئومورفومتریک با شاخص‌های	خیلی کم	۱/۲۵	۰/۲۰	۶۲۸۵۲/۴۳	۱۵/۵۹
	کم	۱۶/۶۰	۲/۶۱	۱۱۰۳۳۸/۶۲	۲۷/۳۷
	متوسط	۶۰/۹۳	۹/۵۸	۱۰۱۵۶۸/۰۷	۲۵/۲۰
	زیاد	۱۲۲/۲۲	۱۹/۲۲	۵۹۵۶۳/۹۴	۱۴/۷۸
	خیلی زیاد	۴۳۴/۴۸	۶۸/۳۹	۶۸۱۷۶۷/۰۴	۱۷/۰۶

نتایج اعتبارسنجی مدل رگرسیون لجستیک

براساس نتایج ROC (جدول ۷ و شکل ۶) سطح زیر منحنی برای دو حالت (بدون و با در نظرگیری نقش فاکتورهای ژئومورفومتریک) به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۸ برآورد گردیده است. بر همین اساس سطوح طبقه‌بندی دقت براساس منحنی ROC برای هر دو حالت در طبقه خیلی خوب (۰/۸-۰/۹) قرار دارند. لیکن در مقایسه با همدیگر، مقادیر AUC در حالت بکارگیری و اعمال نقش عوامل ژئومورفومتریک نسبت به حالتی که این عوامل در نظر گرفته نشوند بهتر است. این نتیجه بیانگر همبستگی بالا بین نقشه حساسیت نسبت به زمین لغزش تهیه شده و نقشه پراکنش زمین لغزش و ارزیابی بهتر مدل در صورت بکارگیری فاکتورهای ژئومورفومتریک در کنار سایر پارامترهای رایج در پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش می‌باشد.



شکل ۶. مساحت زیر منحنی ROC الف: بدون پارامترهای ژئومورفومتریک ب: با پارامترهای ژئومورفومتریک

جدول ۷. مساحت زیر منحنی ROC به همراه انحراف استاندارد و سطح اطمینان آن

فواصل اطمینان در سطح ۹۵٪		سطح اطمینان	خطای استاندارد	سطح زیر منحنی	روش‌ها
حد بالا	حد پایین				
۰/۸۶۸	۰/۷۸۲	۰/۰۰۰	۰/۰۲۲	۰/۸۲۵	بدون پارامترهای ژئومورفومتریک
۰/۹۱۶	۰/۸۴۸	۰/۰۰۰	۰/۰۱۷	۰/۸۸۲	با پارامترهای ژئومورفومتریک

نتیجه‌گیری

در این پژوهش کارایی بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک در افزایش دقت نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت مورد ارزیابی قرار گرفت. بر همین اساس از ۱۴ عامل مرسوم و شش شاخص ژئومورفومتریک استفاده و با دو رویکرد، با بکارگیری و بدون بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش تهیه و میزان صحت دو نقشه مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش از دو شاخص مهم تولرانس (TOL) و فاکتور افزونگی انحراف (VIF) برای تحلیل چندراستایی به منظور برآورد همبستگی بین متغیرهای مستقل استفاده شد. کمترین TOL و بیشترین VIF در بین متغیرهای مستقل به ترتیب ۰/۲۵۳ و ۳/۵۵۹ می‌باشد. بر این اساس هیچ‌گونه همبستگی بین متغیرهای مستقل وجود ندارد. همچنین به منظور ارزیابی وزن طبقات عوامل مؤثر بر زمین لغزش از مدل فاکتور اطمینان استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص ناهمواری زمین 14 و شیب‌های 40 درصد به ترتیب با CF معادل ۰/۸۹ و ۰/۷۰ نسبت به طبقات دیگر عوامل بیشترین وزن را در بین رده‌های مربوطه به خود اختصاص داده‌اند. در ادامه پس از ورود وزن‌های حاصل از فاکتور اطمینان به مدل رگرسیون لجستیک، با استفاده امکانات موجود در نرم‌افزار SPSS، ضرایب مدل استخراج شد. بر اساس نتایج حاصل، عامل شیب، شاخص NDVI و جهت شیب با بیشترین ضریب، بهترین متغیر پیش‌بینی کننده احتمال وقوع زمین لغزش در منطقه می‌باشند. نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش با دو رویکرد بدون و با در نظرگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک تهیه گردید. براساس نتایج منحنی ویژگی عملگر گیرنده (ROC) سطح زیر منحنی (AUC)

برای هر دو حالت رویکرد (بدون و با در نظرگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک) به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۸ برآورد گردیده است. بنابراین بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک منجر به افزایش دقت نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش شده است. همچنین براساس نتایج نقشه پهنه‌بندی حاصل از بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک در کنار سایر عوامل، ۱۵/۵۹ درصد (۶۲۸۵۲/۴۳ هکتار) و ۲۷/۳۷ درصد (۱۱۰۳۳۸/۶۲ هکتار) از منطقه به ترتیب در رده حساسیت خیلی کم و کم، ۱۴/۷۸ درصد (۵۹۵۶۳/۹۴ هکتار) و ۱۷/۰۶ درصد (۶۸۷۶۷/۰۴ هکتار) از آن به ترتیب در رده حساسیت زیاد و خیلی زیاد و ۲۵/۲۰ درصد (۱۰۱۵۶۸/۰۷ هکتار) از منطقه در رده حساسیت متوسط قرار گرفته است. نظر به نقش بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک در افزایش صحت نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش بهره‌گیری از این رویکرد به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد.

منابع

- احمدآبادی، علی؛ رحمتی، مریم، ۱۳۹۴، کاربرد شاخص‌های کمی ژئومورفومتریک در شناسایی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش با استفاده از مدل *SVM*، (مطالعه موردی: آزادراه خرم‌آباد-پل‌زال)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۳، صص ۲۱۳-۱۹۷.
- احسانی، جهانبخش؛ آرین، مهران؛ قرشی، منوچهر، ۱۳۹۴، نشانه‌های زمین‌ریختی زمین‌ساخت فعال حوضه آبریز جراحی - هنديجان (رودخانه های مارون - زهره) در جنوب باختر ایران، فصلنامه علوم زمین، سال بیست و چهارم، شماره ۹۵، صص ۲۱۱-۲۱۸.
- انصاری؛ مریم؛ فتوحی، صمد، ۱۳۹۶، بررسی دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی و اثرات آن بر منابع آب زیرزمینی دشت ممسنی، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال دهم، شماره ۳۶، صص ۸۷-۷۳.
- بهیاری، مهدی؛ محجل، محمد؛ مؤید، محسن؛ رضائیان، مهناز، ۱۳۹۵، بررسی تأثیر تغییرات منطقه‌ای برافرازش بر شاخص‌های ژئومورفیک: کمپلکس میشو در شمال باختر ایران، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال دهم، شماره ۳۸، صص ۵۳-۳۹.
- حبیبی، علیرضا، ۱۳۹۳، بررسی زمین‌لغزش‌ها با استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیک، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، سال هفتم، شماره ۱، صص ۹۸-۱۰۸.
- خدائی، لیلیا؛ روستائی، شهرام؛ حجازی، سید اسدالله، ۱۳۹۶، ارزیابی روش رگرسیون لجستیک در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه حاجیلرچای، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال دهم، شماره ۳۷، صص ۵۷-۴۵.
- شریفی، رحمان؛ پورکرمانی، محسن؛ سلگی، علی؛ جمالیان، نازنین، ۱۳۹۲، بررسی ارتباط تکتونیک فعال و پهنه‌های لغزشی بر مبنای شاخص‌های تکتونیک فعال، همایش ملی زمین‌ساخت ایران، تهران.
- شیرانی، کورش، ۱۳۹۷، ارزیابی کارایی عوامل ژئومورفومتریک در افزایش درستی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه دزعلیا)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی دانشگاه اصفهان، سال بیست و نهم، شماره ۱، صص ۱۱۴-۹۵.
- شیرانی، کورش؛ عرب‌عامری، علی‌رضا، ۱۳۹۴، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: حوضه دزعلیا)، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال نوزدهم، شماره ۷۲، صص ۳۳۴-۳۲۱.
- صمدی، میثم؛ جلالی، سعیده؛ کرنزادی، آیدینگ؛ صمدی قشلاقچائی، محمود، ۱۳۹۵، بررسی شاخص‌های مورفومتری در حوضه آبخیز چهل چای استان گلستان با استفاده از *GIS*، مجله علمی ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دوره هفتم، شماره ۴، صص ۷۴-۶۷.

- فیض‌اله‌پور، مهدی، ۱۳۹۷، پهنه‌بندی مناطق مستعد به زمین‌لغزش با استفاده از سیستم استنتاجی فازی عصبی (ANFIS) (مطالعه موردی: حوضه رودخانه سنگورچای) مجله مخاطرات محیطی، دوره هفتم، شماره ۱۷، صص ۱۷۴-۱۵۵.
- قاسمیان، بهاره؛ عابدینی، موسی؛ روستایی، شهرام؛ شیرزادی، عطاالله، ۱۳۹۷، بررسی مقایسه‌ای مدل‌های ماشین پشتیبان بردار و لجستیک درختی برای ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش، مطالعه موردی: شهرستان کامیاران، استان کردستان، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال یازدهم، شماره ۳۹، صص ۶۸-۴۷.
- محمدی، سید داود؛ جلالی، سید حسین؛ ساعدی، بهمن، ۱۳۹۶، ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی در حوضه آبخیز آبشینه همدان با استفاده از شاخصه‌های زمین‌ریختی و لرزه‌خیزی منطقه، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۴، صص ۲۰۷-۱۹۰.
- مکرم، مرضیه؛ شایگان، مهران، ۱۳۹۷، ارزیابی خطر زمین‌لغزش و ارتباط آن با نوع لندفرم در محیط GIS، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ششم، شماره ۴، صص ۳۱-۱۷.
- مکرم، مرضیه؛ نگهبان، سعید، ۱۳۹۳، طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) (مطالعه موردی: منطقه جنوبی شهرستان داراب)، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۳، شماره ۹۲، صص ۶۵-۵۷.
- Atkinson, P., Massari, R., 2011. Logistic modeling susceptibility to land sliding in the Apennines, Italy *Geomorphology*. Vol.130.
- Ayalew, L. and Ymagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakud-Yahiko Mountains of Japan. *Geomorphology*, 65: pp.15-31.
- Chung, C. F. and Fabbri, A. G., 1993. The representation of geoscience information for data integration. *Non Renew Resour* 2(2):pp.122-139.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Xu, Z.W., 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environ Geol*, No. 40, pp. 381-391.
- EL Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J. and Keller, E. A., 2008. Assessment of Relative active tectonic, Southwest border of sierra Nevada (Southern Spain). *Geomorphology*, 96, pp. 150-173.
- -EL Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Fernández, P., Jiménez, J. and Chacón, J., 2006.
- Active tectonics as determinant factor in GIS landslides susceptibility mapping: application to the SW border of Sierra Nevada (Granada, Spain). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 03154.
- -Fisher, P., Wood, J. and Cheng, T., 2004. Where is Helvellyn? Fuzziness of Multiscalar Landscape Morphometry, *Transactions of the Institute of British Geographer*, No. 29, pp, 106-128.
- -Guns, M. and Vanacker, V., 2012. Logistic regression applied to natural hazards: rare event logistic regression with replications. *Natur Hazards Earth Syst Sci* 12:pp. 1937-1947.
- -Hong, H., Chen, W., Xua, C., Youssef, A. M., Pradhan, B. and Bui, D. T., 2017. Rainfall-induced landslide susceptibility assessment at the Chongren area (China) using frequency ratio, certainty factor, and index of entropy. *Geocarto Int* 32(2):pp. 139-154.
- -Jenness, J. (2002). Surface Areas and Ratios from Elevation Grid, Jenness Enterprises, http://www.jennessent.com/arcview/surface_areas.htm (connected: 10.08.2003).
- -Lee, S. A., 2004. Verification of spatial logistic regression for landslide susceptibility analysis: A case study of Korea. *J. Geomorphology* 44:pp. 15-18.
- -Luzi, L. and Pergalani, F., 1999. Slope instability in static and dynamic conditions for urban planning: the 'Oltre Po Pavese' case history (Regione Lombardia-Italy). *Nat Hazards* 20:57-82.
- -Marquardt, D., 1970. Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation. *Technometrics* 12: pp. 605-607.

- -O'Brien, R. M., 2007. *A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. Qual Quant 41(5):pp.673–690.*
- -Pike, R. J., 2000. *Geomorphology - Diversity in quantitative surface analysis, Progress in Physical Geography, No. 24, Pp. 1-20.*
- -Pourghasemi, H. R. and Rossi, M., 2017. *Landslide susceptibility modeling in a landslide prone area in Mazandarn Province, north of Iran: a comparison between GLM, GAM, MARS, and M-AHP methods. Theor Appl Climatol 130: pp. 609–633.*
- -Pourghasemi, H. R., Mohammady, M. and Pradhan, B., 2012. *Landslide Susceptibility mapping using index of entropy and Conditional probability models in GIS. Safarood Basin, Iran, Catena 97, pp. 71-84.*
- -Pradhan, B., and Lee. S., 2010. *Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models, Environmental Earth Sciences, 60, pp.1037–1054.*
- -Rao, G., Cheng, Y., Lin, A., and Yan, B., 2017. *Relationship between Landslides and Active Normal Faulting in the Epicentral Area of the AD 1556 M~8.5 Huaxian Earthquake, SE Weihe Graben (Central China). Journal of Earth Science, Vol. 28, No. 3, pp. 545–554.*
- -Swets, J. A., 1988. *Measuring the accuracy of diagnostic systems. Sci.240: pp. 1285-1293.*
- -Schicker, R. and Moon, V., 2012. *Comparison of bivariate and multivariate statistical approaches in landslide susceptibility mapping at a regional scale. Geomorphology 161:pp.40–57.*
- -Shirani, K., Pasandi, M. and Arabameri, A., 2018. *Landslide susceptibility assessment by Dempster-Shafer and Index of Entropy models, Sarkhoun basin, Southwestern Iran. Natural Hazards, DOI: 10.1007/s11069-018-3356-2.*
- -Talebi, A., Troch, P. A., Uijlenhoet, R., 2008. *A steady state analytical slope stability model for complex hillslope, Hydrological Processes, No. 22, Pp. 546-553.*
- -Terzaghi, K., 1955. *Mechanisms of Landslides, Geotechnical Society of America, Berkeley, pp. 83-125.*
- -Tien Bui, D., Pradhan, B., Revhaug, I., Nguyen, D. B., Pham, H. V. and Bui, Q. N., 2015. *A novel hybrid evidential belief function-based fuzzy logic model in spatial prediction of rainfall-induced shallow landslides in the Lang Son city area (Vietnam). Geomat Nat Hazards Risk 6:pp.243–271.*
- -Topal, S., Keller, E., Bufe, A. and Koçyiğit, A., 2016. *Tectonic geomorphology of a large normal fault: Akşehir fault, SW Turkey, Geomorphology, 259, pp. 55-69.*
- -Tsangaratos, P., Ilia, I., Hong, H., Chen, W. and Xu, C., 2017. *Applying information theory and GIS-based quantitative methods to produce landslide susceptibility maps in Nancheng County, China. Landslides 14:1091–1111. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0769-4>.*
- -Wang, Q.; Li, W.; Wu, Y.; Pei, Y.; Xing, M. and Yang, D., 2016. *A comparative study on the landslide susceptibility mapping using evidential belief function and weight of evidence models, J. Earth Syst. Sci. 125, No. 3, pp. 646-662.*
- -Weisberg, S. and Fox, J., 2010. *An R companion to applied regression. Sage, Los Angeles.*
- -Wood, J., 1996. *Scale-based characterization of digital elevation models. In: Parker, D. Innovations in GIS, Taylor and Francis, London, pp. 163-175.*
- -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), pp.1-12.*