

به کارگیری شاخص‌های مورفومتری در بهینه‌سازی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل‌های احتمالاتی

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 استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش، و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۱۹

چکیده

شکل زمین نقش اساسی در فرایند رخداد زمین لغزش ایفا می‌کند. هدف اصلی از این پژوهش، ارزیابی و مقایسه دو مدل احتمالاتی دمپسترشفر و وزن شاهد با تأکید بر شاخص‌های مورفومتری در پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش در حوضه آبخیز رودخانه فهلپان است. بدین منظور، هجده عامل مؤثر در وقوع زمین لغزش شناسایی و ارزیابی شد. سپس، نقشه‌های این عوامل در محیط GIS تهیه و با لایه پراکنش زمین لغزش‌های منطقه همپوشانی و براساس دو مدل فوق وزن‌دهی شد. نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت براساس دو مدل تهیه شد. نتایج نشان داد که در هر دو مدل شیب‌های بیش از ۴۰ درصد و شاخص ناهمواری زمین بیش از ۱۴ بیشترین وزن را به خود اختصاص داده و مهم‌ترین نقش را در وقوع زمین لغزش‌های منطقه داشته‌اند. به‌منظور ارزیابی دقت و صحت مدل‌ها، از منحنی ویژگی عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی حاصل از سطح زیر منحنی برای مدل دمپسترشفر و وزن شاهد به ترتیب ۷۹/۰ و ۷۶/۰ به دست آمد. بنابراین، اعتبار هر دو مدل خوب برآورد شد. همچنین، نتایج حاصل از محاسبه نسبت FR و شاخص SCAI مبین طبقه‌بندی مناسب در پنج طبقه حساسیت است. با توجه به نتایج کمی اعتبارسنجی، مدل دمپسترشفر، با بهره‌گیری از شاخص‌های مورفومتریک، مدل مناسبی برای پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین لغزش معرفی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: حوضه آبخیز رودخانه فهلپان، زمین لغزش، مدل دمپسترشفر، مدل وزن شاهد، مورفومتری.

مقدمه

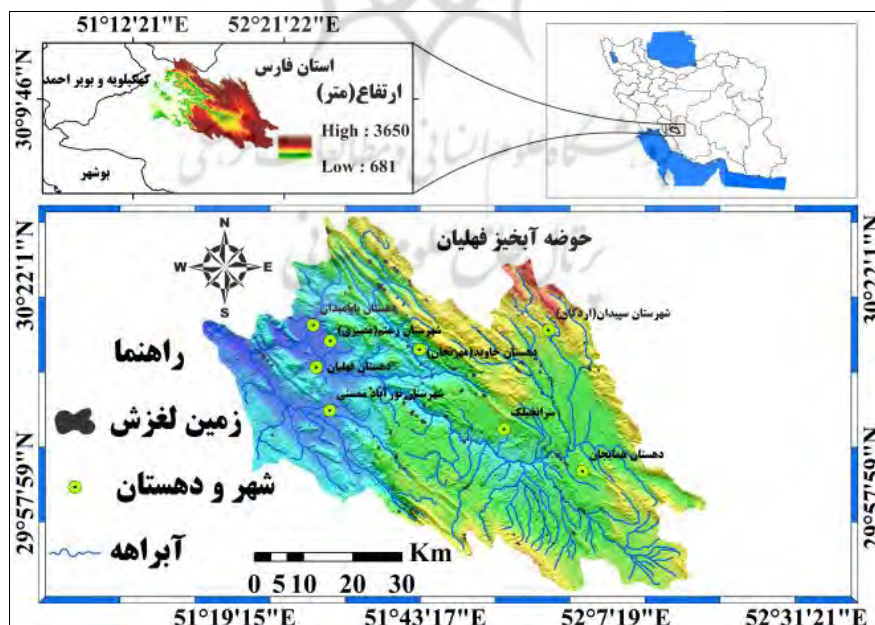
زمین لغزش از جمله مخاطرات طبیعی است که در اثر تعامل انواع عوامل محیطی، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، با ویژگی‌های خاص مورفومتریکی رخ می‌دهد (شیرانی، ۱۳۹۷: ۹۶). این پدیده به‌عنوان یکی از مخاطرات ژئومورفیک هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی را به‌وجود می‌آورد و مستقیم یا غیرمستقیم هزینه‌های اقتصادی زیادی را در عرصه‌های مختلف به‌دنبال دارد. آمار انتشار یافته از سوی مرکز تحقیقات آسیب‌شناسی مخاطرات طبیعی نشان می‌دهد ۱۷ درصد از مرگ‌ومیر ناشی از بلایای طبیعی در دنیا مربوط به زمین لغزش است (لاکاس و نامید، ۲۰۰۹).

ایران - با داشتن مناطق کوهستانی وسیع، دارا بودن مورفولوژی بر خاسته از تکتونیک فعال، لرزه‌خیزی، شکستگی‌ها و خردشدگی‌های فراوان، وجود لیتولوژی حساس، و شرایط اقلیمی در کنار بهره‌برداری‌های غیراصولی - از جمله کشورهای

آسیب‌پذیر از نظر وقوع زمین‌لغزش‌هاست (مختاری اصل و رنجبریان شادباد، ۱۳۹۵: ۱۲۰). فلات ایران، که یک منطقه چین‌خورده آلی است، در حال حاضر نیز از هر طرف تحت فشار بوده و حرکات زمین‌ساختی هنوز در آن ادامه دارد (جداری عبوسی، ۱۳۸۱: ۷). وقوع زمین‌لرزه‌های مکرر در ایران یکی از پیامدهای فعال‌بودن جنبش‌های زمین‌ساختی در حال حاضر است. آثار سطحی امواج کشسان یک زمین‌لرزه می‌تواند به صورت مختلف از جمله زمین‌لغزش، گسیختگی دامنه‌ای، و روان‌گرایی نمود یابد (یوسفی، ۱۳۸۹: ۱). تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش به عنوان یکی از مهم‌ترین گام‌ها به منظور کاهش و مدیریت خطرهای این پدیده به شمار می‌رود (وان و چانگ، ۲۰۱۴). از آنجا که در وقوع زمین‌لغزش عوامل متعددی دخالت دارد، برای اینکه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت با دقت بیشتری تهیه شود، لازم است از لایه‌های اطلاعاتی بیشتری استفاده شود و عوامل مؤثر متنوعی که احتمال می‌رود در وقوع آن دخیل باشند ارزیابی شوند و با استفاده از مدل‌های موجود به پهنه‌بندی نقشه حساسیت اقدام شود. به طور کلی، دستورالعمل مشخص و یک‌پارچه، که بین همه محققان مورد قبول باشد، برای انتخاب عوامل مؤثر در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش وجود ندارد (یلسین، ۲۰۰۸: ۲). مطالعات در این زمینه معمولاً با مدل‌های مختلف و عملکرد و دقت متفاوتی بوده است (گوزتی و همکاران، ۲۰۰۶: ۱۷۰؛ فراتینی و همکاران، ۲۰۱۰: ۶۵). برخی از این مدل‌ها، به علت عدم به کارگیری معیارهای فرمی سطح زمین، نتایج چندان رضایت‌بخشی نداشته‌اند و در استفاده از نتایج این تحقیقات محدودیت‌هایی وجود دارد (چانگ و فابری، ۲۰۰۳: ۴۵۴). به همین دلیل، ضرورت استفاده از روش‌های جدید با در نظر گرفتن معیارهای شکلی کمی برای شناسایی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش در راستای امر برنامه‌ریزی مورد نیاز است. زمین‌لغزش از جمله مخاطرات طبیعی است که می‌تواند متأثر از شکل سطح زمین باشد. از این رو، به منظور ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش‌های یک منطقه، علاوه بر بررسی عوامل رایج و متداول در پهنه‌بندی، ارزیابی ویژگی‌های مورفومتری سطح زمین نیز حائز اهمیت است. پارامترهای ژئومورفومتریک در این راستا می‌تواند بیانگر مشخصات فرم دامنه‌ها و فرایندهای تغییردهنده شکل آن‌ها باشد. بخش مهمی از این فرایندها شامل زمین‌لغزش‌هاست. شاخص‌های ژئومورفومتریک ویژگی شکل دامنه‌هایی را که مستعد زمین‌لغزش هستند به صورت کمی بیان می‌کند (شیرانی، ۱۳۹۷؛ احمدآبادی و رحمتی، ۱۳۹۴: ۲۰۲).

تاکنون مطالعات ارزشمندی در زمینه پهنه‌بندی و تعیین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش انجام شده است. شیرانی و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از دو مدل احتمالاتی دمپسترشفر و شاخص آنتروپی شانون و ۱۰ عامل مؤثر در لغزش، به پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین‌لغزش در حوضه سرخون زاگرس اقدام کردند. نتایج نشان داد که عامل کاربری اراضی از بین عوامل مورد استفاده مهم‌ترین عامل و مدل شاخص آنتروپی شانون نسبت به مدل دمپسترشفر از کارآمدی مناسب‌تری در پهنه‌بندی حساسیت نسبت به لغزش برخوردار است. یوسف و همکاران (۲۰۱۶)، برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش، از مدل‌های نسبت فراوانی، وزن واقعه، شاخص آنتروپی، و دمپسترشفر استفاده کردند. نرخ پیش‌بینی به ترتیب ۰/۹۵۲، ۰/۹۴۶، و ۰/۹۳۴ به دست آمد. وانگ و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی به مقایسه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش حاصل از دو مدل دمپسترشفر و وزن شاهد پرداختند. براساس نتایج اعتبارسنجی، سطح زیر منحنی (AUC) برای مدل شفر دارای دقت ۸۰/۱۹ درصد و برای وزن شاهد ۸۰/۷۵ درصد است. بر همین اساس، نقشه حساسیت‌پذیری مدل شفر و وزن شاهد به ترتیب دارای دقت پیش‌بینی ۸۰/۰۹ درصد و ۷۹/۷۹ درصد است. بر همین اساس، میزان دقت موفقیت منحنی برای هر دو مدل به ترتیب ۸۰/۱۹ درصد و ۸۰/۷۵ درصد است. چن و همکاران (۲۰۱۶) به مقایسه روش‌های دمپستر شيفر، رگرسیون لجستیک، و شبکه عصبی مصنوعی برای پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در استان شانکسی چین پرداختند و به این نتیجه

شمال حوضه است (شکل ۱). شهرستان‌های نورآباد ممسنی، رستم (مصیری)، سپیدان (اردکان)، و همچنین بخش‌ها 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 بر اساس تقسیمات تماب شامل زیرحوضه‌های اردکان- چشمه سفید، کودیان- سرگاه، سرانچیلک، فهلیان، و نورآباد ممسنی است. رخنمون‌هایی از سنگ‌های ژوراسیک تا کواترنر در این محدوده گسترش دارند. بخش وسیعی از سطح منطقه کوهستانی با دیواره‌های بلند و دره‌های ژرف است و سطوح هموار و تپه‌ماهوری با وسعت کمتر در غرب حوضه گسترش دارد. دشت ممسنی، که بخش کم‌ارتفاع منطقه را شامل می‌شود، بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزو مناطق نیمه‌خشک است. حداقل درجه حرارت دشت ممسنی ۲- سانتی‌گراد و حداکثر درجه حرارت ۴۹ درجه سانتی‌گراد است. 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 است. به لحاظ ژئومورفولوژیکی، بخش کمی از شرق حوضه در زاگرس مرتفع و غرب آن در زاگرس چین‌خورده واقع شده است. بخش اعظم حوضه در زیرپهنه ساختاری فروافتادگی فارس و بخش کمی از غرب آن در زیرپهنه ایزده واقع شده است. عبور گسل‌های بزرگ و فعال کازرون و زاگرس، گسل فهلیان- اردکان (سپیدان)، امتداد گسل کره‌بس و بازوهای منشعب از آن‌ها از این محدوده به فعالیت تکتونیکی و لرزه‌خیزی منطقه منجر شده است. در این محدوده شواهد نوزمین‌ساختی فراوانی از جمله ناودیس‌های به‌وجودآمده در راستای گسل‌ها (مانند دشت سپیدان)، حضور روندهای خطی شاخص و ممتد بر روی نگاره‌های ماهواره‌ای، حضور چشمه‌های آب گرم در زون‌های گسلی و هسته تأقدیس‌ها، 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.



شکل ۱. نقشه موقعیت حوضه مورد مطالعه

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، که حاصل فعالیتی توصیفی-تحلیلی و برداشت میدانی است، از روش‌های متنوعی استفاده شد. از آنجاکه شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش مهم‌ترین مرحله پهنه‌بندی رویداد این خطر است، بر اساس سابقه تحقیق و منابع موجود، هجده عامل، که احتمال می‌رفت در وقوع زمین‌لغزش مؤثر باشد، در منطقه شناسایی و به‌کار گرفته شد. سپس، لایه‌های اطلاعاتی موردنیاز از جمله نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، عکس‌های هوایی و تصاویر سنجنده LANDSAT-8 به‌عنوان لایه‌های اصلی و پایه جمع‌آوری شد. برای آنالیز خطر احتمالی زمین‌لغزش، شناسایی صحیح نقاط لغزشی امری ضروری به‌شمار می‌آید. بنابراین، زمین‌لغزش‌های منطقه به کمک تصاویر ماهواره‌ای گوگل‌ارث، تصاویر ماهواره‌ای LANDSAT-8، و عکس‌های هوایی برداشت و ذخیره شد. پردازش تصاویر ماهواره‌ای موردنیاز با استفاده از نرم‌افزار ENVI4.5 انجام گرفت. بازدیدهای میدانی به منظور شناسایی و برداشت زمین‌لغزش‌های رخ داده با GPS یکی از مهم‌ترین مراحل کار است که در فرایند پژوهش و به‌منظور کنترل دقت مکانی لایه‌های اطلاعاتی با مشاهدات سطح زمین و زمین‌لغزش‌های حادث‌شده در حوضه به آن پرداخته شد. در نهایت، ۲۰۱ نقطه یا پهنه زمین‌لغزشی در سطح حوضه شناسایی و وارد محیط ArcGIS10/3 شد و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها از این طریق تهیه شد.

باتوجه به مشخصات زمین‌لغزش‌های مشاهده‌شده در منطقه (شکل ۳)، تعریف ارائه‌شده توسط ترزاقی (۱۹۵۰) در این پژوهش ملاک قرار گرفته است. با این توضیح که این تعریف انواع حرکات توده‌ای از قبیل ریزش، لغزش، واژگونی، و جریان‌های گلی و واریزه‌ای را شامل می‌شود. در ادامه، به تهیه و رقومی‌سازی سایر لایه‌ها اقدام شد. واحدهای سنگی براساس نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه شناسایی، تفکیک، و به ۱۳ واحد تقسیم شد (شکل ۲-خ). گسل‌های منطقه نیز از روی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه برداشت و بر اساس آن لایه فاصله از گسل مشخص شد (شکل ۲-ث). براساس مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر و با استفاده از محیط ArcHydro به تهیه لایه رودخانه‌ها و آبراهه‌های اصلی اقدام شد و نقشه‌های فاصله از شبکه آبراهه (شکل ۲-ج) و تراکم زهکشی براساس آن تهیه شد (شکل ۲-چ). نقشه‌های شیب (شکل ۲-الف)، وجه شیب (شکل ۲-ب)، و طبقات ارتفاعی (شکل ۲-ت) حوضه با استفاده از نرم‌افزار Global Mapper و مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری در محیط ArcGIS10/3 تهیه شد. با استفاده از آمار سی‌ساله ایستگاه‌های واقع و همچنین مجاور حوضه و روش میان‌یابی Krigging در محیط Surfer به تهیه منحنی‌های هم‌باران سالیانه در حوضه اقدام شد (شکل ۲-ح). براساس پردازش تصاویر سنجنده ETM+2002 در محیط نرم‌افزار ENVI4.5، نقشه کاربری زمین تهیه شد. این نقشه با نقشه تهیه‌شده توسط مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، که با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده است، مقایسه و تکمیل شد (شکل ۲-د). همچنین، نقشه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI) از تصاویر ماهواره‌ای LANDSAT-7 سنجنده ETM+2002 پس از اجرای تصحیحات هندسی و رادیومتریکی طبق رابطه ۱ به‌دست آمد.

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (1)$$

در رابطه ۱، IR باند مادون قرمز و R باند قرمز طیف الکترومغناطیسی است (شکل ۲-ژ). از دیدگاه نظری، مقدار این شاخص در محدوده -۱ و +۱ است. مقادیر این شاخص برای پوشش گیاهی متراکم به سوی عدد یک میل می‌کند.

همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش به منظور ارزیابی وضعیت سطح زمین از پارامترهای مورفومتریکی نیز استفاده شده است که در ادامه به روش محاسبه و تشریح روابط مربوط به هر یک از این پارامترها پرداخته می‌شود.

انحنای دامنه

انحنا یک خاصیت سه‌بعدی از سطح دوبعدی تعریف می‌شود و نشان‌دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن یا به عبارت دیگر محدب و مقعر بودن دامنه است. با افزایش انحنا، نیروی کششی در طول سطح افزایش می‌یابد و باعث تولید شکستگی‌ها می‌شود. در این تحقیق شاخص‌های انحنا با استفاده از روش زونبرگر- تورن از مدل رقومی ارتفاع و در محیط Arc GIS تهیه شد. با استفاده از مقادیر عددی و مشتقات حاصل از DEM از قبیل شیب، انحنا، پروفیل، انحنا، پلان، انحنا عرضی، و انحنا کلی دامنه، ویژگی‌های مورفومتری لندفرم‌ها استخراج می‌شود (فیشر و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۱۵؛ پایک، ۲۰۰۰: ۹؛ وود، ۱۹۹۶: ۱۶۶). مشتقات درجه دوم در ارتباط با تحدب و تقعر و به‌طور کلی شکل سطح هستند که با نام انحنا شناخته می‌شوند و می‌توان از انحنا برای اندازه‌گیری میزان ناهمواری سطح زمین استفاده کرد. محاسبه انواع انحنا در مدل رقومی ارتفاع رستری به صورت پیکسل به پیکسل محاسبه و برای هر سلول از یک معادله چندجمله‌ای درجه چهار استفاده می‌شود (رابطه‌های ۲ تا ۴) و در یک پنجره با ابعاد ۳×۳ محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه محاسبه انحنا در یک پنجره متحرک و با استفاده از هشت همسایه یک سلول انجام می‌گیرد، امکان تشخیص سلول‌ها و سطوح محدب و مقعر وجود دارد.

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

از بین انواع انحنا می‌توان به انحنا پروفیل و پلان به عنوان دو شاخص ژئومورفومتریکی اشاره کرد. انحنا پروفیل معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان در طول مسیر جریان است و بنابراین انحنا پروفیل نشان‌دهنده شدت جریان آب و فرایندهای حمل و رسوب‌گذاری می‌شود؛ به طوری که مقدار منفی این انحنا سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد (پایک، ۲۰۰۰: ۸) (شکل ۲-ذ).

$$n * g * (a * d^2 + b * e^2 + c * d * e) / (d^2 + e^2) (1 + (d^2 + e^2)^{1.5}) \quad (3) \quad \text{انحنای پروفیل}$$

از طرف دیگر، انحنا پلان بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی است. بنابراین، نشان‌دهنده واگرایی و همگرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحنا پلان واگرایی جریان را نشان می‌دهد که دربرگیرنده خط‌الرأس‌ها و ستیخ‌هاست و مقادیر منفی آن همگرایی جریان (دره‌ها) را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که سطوح صاف دارای انحنا صفر می‌باشند. واحد اندازه‌گیری انحنا بر حسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌شود (شکل ۲-ز).

$$n * g * (b * d^2 + a * e^2 - c * d * e) / (d^2 + e^2) (1..5) \quad (4) \quad \text{انحنای پلان}$$

در کلیه این رابطه‌ها، g قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاع و n ابعاد پنجره متحرک است (احمدآبادی و رحمتی، ۱۳۹۴).

شاخص موقعیت توپوگرافیکی (TPI): که حالت گودی و برآمدگی را متمایز می‌کند به‌عنوان یکی از شاخص‌های ژئومورفومتریکی در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲-س). این شاخص ارتفاع هر پیکسل در مدل رقومی ارتفاع را

با پیکسل مشخص اطراف آن پیکسل مقایسه می‌کند. بر این اساس، TPI منفی نشان‌دهنده توپوگرافی کم‌ارتفاع (کم) (تعرفه‌ها و گودال‌ها) و TPI مثبت نشان‌دهنده توپوگرافی زیاد (محدب و ستیخ‌ها) است. به منظور محاسبه TPI طبق رابطه عمل می‌شود:

$$TPI_i = Z_i - \sum_{n=1} Z_{n/n} \quad (5)$$

که Z_0 = ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n = ارتفاع از شبکه، n = تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته شده در ارزیابی. ترکیب TPI در مقیاس کوچک و بزرگ اجازه می‌دهد تا انواع اشکال در سطح ایجاد شود (مکرر و نهمان، ۱۳۹۳: ۶۱).

شاخص ناهمواری (زبری) زمین (TRI^۱): ریلی و همکاران (۱۹۹۹) آن را ارائه کردند و در واقع به نوعی اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت پیکسل اطراف خود است. برای این کار، ارتفاع هر پیکسل از پیکسل‌های اطراف خود کم می‌شود، برای مثبت کردن این اعداد آن‌ها را به توان ۲ می‌رساند، از آن‌ها میانگین گرفته می‌شود و دوباره ریشه دوم آن حساب می‌شود و به پیکسل مورد نظر نسبت داده می‌شود (صمدی و همکاران، ۱۳۹۵: ۷۱). برای هر پیکسل از نقشه DEM و از طریق رابطه ۶ محاسبه می‌شود. تغییرات این شاخص با نتوتکتونیک و فرسایش در ارتباط است. دارای بالآمدگی زیاد مقدار شاخص بالایی را نشان می‌دهند.

$$TRI = \sqrt{\sum_{p=1}^8 ZMd} \quad (6)$$

p تعداد پیکسل اطراف و ZMd میانگین تفاضل ۸ پیکسل اطراف هر پیکسل است (شکل ۲-ش).

شاخص قدرت جریان یا توان آبراهه (SPI^۲): نسبت بین مساحت بالادست یک نقطه و شیب زمین در بالادست آن را به گونه‌ای نشان می‌دهد که نیمرخ عرضی و نیمرخ طولی آبراهه را منعکس می‌کند (وان، ۲۰۰۲: ۱۷؛ رگمی و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۷۵). از سوی دیگر، مناطق دارای تجمع رسوب را نشان می‌دهد (ملکی و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۷). شاخص مذکور از طریق توابع موجود در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و با داشتن نقشه خطای انباشتگی با توجه به رابطه ۷ محاسبه شد (شکل ۲-ص).

$$SPI = A_s \cdot \tan \beta \quad (7)$$

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI^۳): این شاخص ترکیب پستی و بلندی است که نسبت بین شیب‌ها را در حوضه به‌نمایش می‌گذارد و به شاخص خیزی نیز معروف است. در بین خصوصیات توپوگرافی، شاخص رطوبت توپوگرافی ابزار مفیدی برای تعیین وضعیت رطوبت خاک به‌شمار می‌آید و ارتباط زیادی با میزان سطح آب زیرزمینی در یک منطقه دارد. این شاخص برای مطالعه حساسیت زمین‌لغزش استفاده می‌شود (گوروم و همکاران، ۲۰۰۸). شاخص مذکور با استفاده از مدل رقومی ارتفاع طبق رابطه ۸ و در نرم‌افزار SAGA-GIS محاسبه شد (شکل ۲-ص).

شاخص طول شیب یا حمل رسوب (STI^۴): (شکل ۲-پ) بیانگر توان حمل آبراهه یا به عبارتی عامل LS^5 مدل $AUSLE^6$ است که مدل مذکور اصلاح‌شده معادله جهانی تلفات خاک است. STI شاخصی است که تأثیر توپوگرافی را بر فرسایش مشخص می‌کند و به وسیله رابطه ۹ محاسبه می‌شود (مور و همکاران، ۱۹۹۳: ژنس، ۲۰۰۲).

1. Terrain Ruggedness Index
2. Stream Power Index
3. Topographic Wetness Index
4. Sediment Transport Index
5. Length and Slope
6. Adapted Universal Soil Loss Equation

$$TWI=1n(A_s \tan(\beta)) \quad (۸)$$

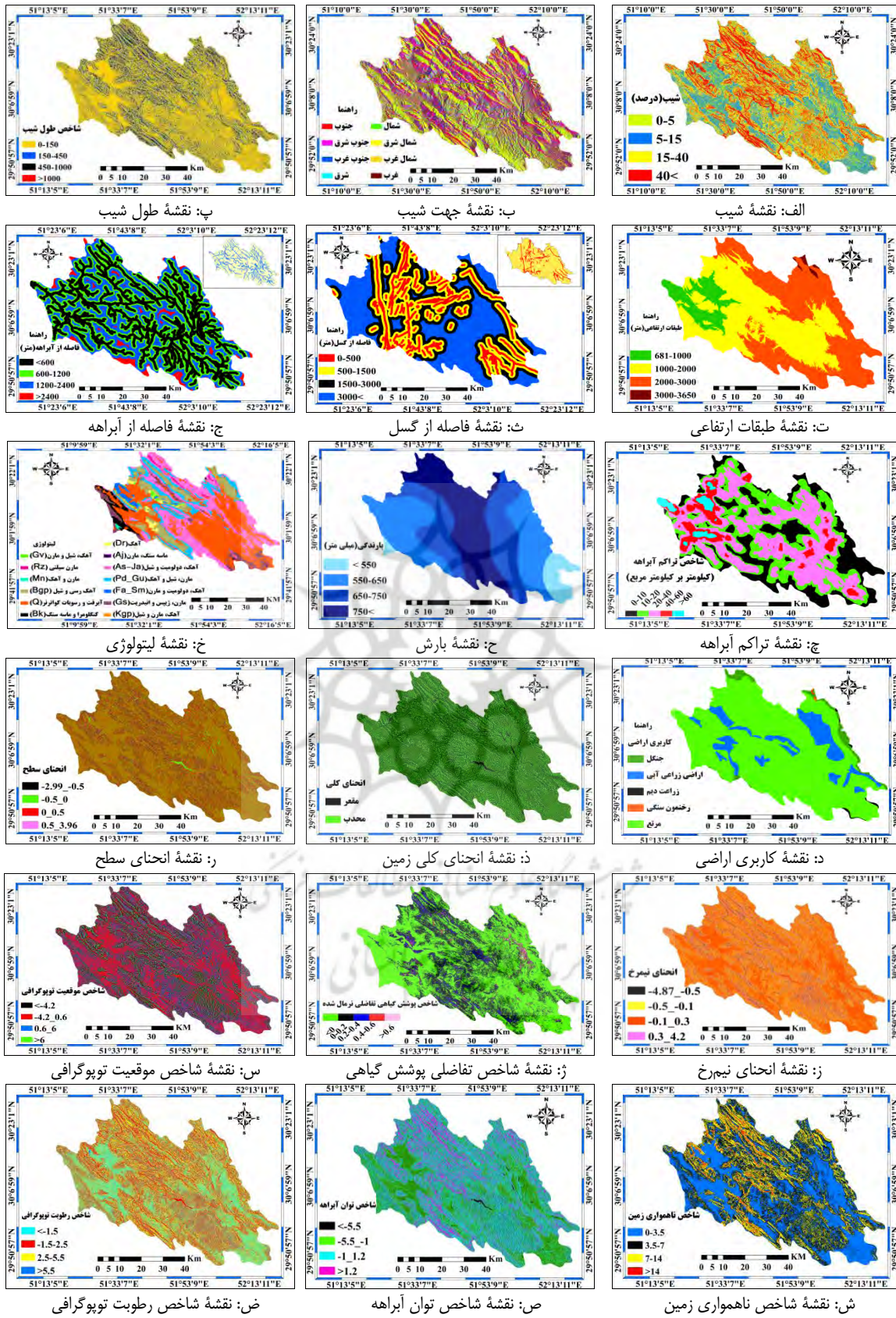
$$STI = \left(\frac{A_s}{22/13} \right)^{0.6} \left(\frac{\sin}{0.0896} \right)^{1/3} \quad (۹)$$

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

در نهایت، همه لایه‌های اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.3 وارد شد و به صورت سلولی با اندازه ۳۰ در ۳۰ متر استخراج شد. از آنجا که لایه یا نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها مبنای وزن‌دهی عوامل و ساخت مدل است، به منظور افزایش دقت داده‌های مکانی پراکنش زمین‌لغزش به صورت تصادفی به دو دسته آموزشی (۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) و آزمایشی (۳۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) تقسیم شد. پس از پردازش و تجزیه و تحلیل و انجام دادن محاسبات آماری و کمی به اجرای مدل وزن شاهد و دمپسترشفر به کمک داده‌های آموزشی (۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) اقدام شد. به منظور مقایسه و ارزیابی دقت و صحت نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش از داده‌های مکانی پراکنش زمین‌لغزش آزمایشی (۳۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) و منحنی ویژگی عملگر نسبی (ROC) استفاده شد. همچنین، برای ارزیابی و مقایسه دقت بین پهنه‌ها یا رده‌های حساسیت نسبت به زمین‌لغزش از نسبت فراوانی (FR)، شاخص سطح سلول هسته (SCAI)، و نسبت عددی (NR_i) استفاده شد. در نهایت، با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی به بحث و نتیجه‌گیری درمورد به‌کارگیری مدل‌های مورد استفاده پرداخته شد و نقش آن‌ها در تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش مشخص شد. در جدول ۱ منبع، دقت پارامترها، و نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول ۱. منبع، دقت پارامترها، و نرم‌افزارهای مورد استفاده در پژوهش

نرم‌افزار مورد استفاده	مقیاس	مقیاس	پارامترها	نرم‌افزار مورد استفاده	مقیاس	منبع	پارامترها
ArcGIS10.3	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ASTER	فاصله از آبراهه	ArcGIS10.3, GlobalMaper16	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	ارتفاع
ArcGIS10.3	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ASTER	تراکم آبراهه	ArcGIS10.3, GlobalMaper16	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	شیب
ArcGIS10.3	۱:۱۰۰۰۰۰	نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی	لیتولوژی	ArcGIS10.3, GlobalMaper16	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	جهت شیب
ENVI4.5, ArcGIS10.3	۱:۱۰۰۰۰۰	تصویر لندست ۷	کاربری اراضی	ArcGIS10.3	۱:۱۰۰۰۰۰	نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی	فاصله از گسل
ArcGIS10.3, Surfer	۱:۵۰۰۰۰	ایستگاه‌های بارش و نقشه‌های توپوگرافی	همبارش	ArcGIS10.3	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	طول شیب
ENVI4.5, ArcGIS10.3	۱:۱۰۰۰۰۰	تصویر لندست ۷	NDVI	ArcGIS10.3	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	شاخص رطوبت توپوگرافی
ArcGIS10.3	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	وضعیت توپوگرافی	ArcGIS10.3	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	شاخص توان آبراهه
ArcGIS10.3	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	شاخص ناهمواری زمین	ArcGIS10.3	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	انحنای کل
ArcGIS10.3	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	انحنای نیم‌رخ	ArcGIS10.3	۱:۵۰۰۰۰	مدل رقومی ارتفاع ASTER	انحنای سطح



شکل ۲. نقشه های عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش در حوضه آبخیز رودخانه فهلیان

روش‌ها

کاربرد مدل‌های احتمالاتی

در سال‌های اخیر بسیاری از پژوهشگران از روش‌های تجربی، که کم و بیش بر پایه نظریه احتمال وابسته هستند، برای تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش استفاده می‌کنند. در این چارچوب، احتمال وابسته اندازه‌گیری درست یا اشتباه بودن یک فرضیه با توجه به شواهد موجود است. شبکه‌های بی‌زین به نام شبکه‌های تصمیم، شبکه‌های تصادفی، و نمودارهای تأثیر نیز شناخته می‌شوند (منصوری و شیرانی، ۱۳۹۵: ۲۶۸). به‌طور کلی، تئوری بی‌زین را می‌توان به صورت رابطه ۱۰ نوشت:

$$P(A|B) = (P(B|A) \times P(A)) / P(B) \quad (10)$$

که در آن $P(A)$ احتمال رخداد پیشامد A ، $P(B)$ احتمال رخداد پیشامد B ، $P(B|A)$ احتمال رخداد پیشامد B به شرطی که پیشامد A رخ داده باشد، و $P(A|B)$ احتمال رخداد پیشامد A به شرطی که پیشامد B رخ داده باشد (وان وسترن، ۲۰۰۲).

مدل وزن شاهد بی‌زین: از این روش زمانی که داده‌های کافی به‌منظور برآورد اهمیت نسبی موضوعات مستدل از

طریق میانگین‌های آماری مدنظر باشد استفاده می‌شود (لی و چوی، ۲۰۰۴). روش وزن شاهد روابط مکانی میان عوارض و نقشه‌های موضوعی مؤثر در رخداد ناپایداری‌ها را ترکیب می‌کند. برای هر نقشه موضوعی وزن برای هر رده (واحد) به‌دست می‌آید و براین اساس نقشه وزنی و سپس با جمع جبری همه نقشه‌های وزنی، نقشه حساسیت زمین لغزش تهیه می‌شود.

W_i^+ و W_i^- که احتمالات شرطی را ترکیب می‌کنند به صورت رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ تعریف می‌شود:

$$W_i^+ = \text{Log}_e \left[\frac{P(B_i | S)}{P(B_i | \bar{S})} \right] \quad (11)$$

$$W_i^- = \text{Log}_e \left[\frac{P(\bar{B}_i | S)}{P(\bar{B}_i | \bar{S})} \right] \quad (12)$$

که در آن W_i^+ و W_i^- به ترتیب وزن مثبت و منفی، S احتمال ثانویه رخداد زمین لغزش، و B_i بود یا نبود زمین لغزش در یک پیکسل از نقشه عامل است. به‌طور کلی، $[P(B_i | S) / P(B_i | \bar{S})]$ را نرخ کیفیت (LS) و $[P(\bar{B}_i | S) / P(\bar{B}_i | \bar{S})]$ را نرخ ضرورت (LN) می‌نامند. به‌منظور درک هر چه بهتر رابطه‌های بالا و آسانی کار، به‌ویژه در محیط GIS، مدل بر پایه جدول ۲ و به صورت رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه می‌شود (وان وسترن، ۲۰۰۲: ۱۳؛ رگمی و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۷۴).

$$W_i^+ = \text{Log}_e \left[\frac{(N_{pix1} / (N_{pix1} + N_{pix2}))}{(N_{pix3} / (N_{pix3} + N_{pix4}))} \right] \quad (13)$$

$$W_i^- = \text{Log}_e \left[\frac{(N_{pix2} / (N_{pix1} + N_{pix2}))}{(N_{pix4} / (N_{pix3} + N_{pix4}))} \right] \quad (14)$$

که در آن هر یک از متغیرها به شرح زیر است:

N_{pix1} : مساحت زمین لغزش در یک رده؛

N_{pix2} : مساحت کل زمین لغزش در یک نقشه - مساحت زمین لغزش در یک رده؛

N_{pix3} : مساحت یک رده - مساحت زمین لغزش در یک رده؛

N_{pix4} : مساحت کل یک نقشه - مساحت کل زمین لغزش یک نقشه - مساحت یک رده + مساحت لغزش در یک رده.

جدول ۲. حالت‌های مختلف پتانسیل ایجاد زمین لغزش

عوامل ایجاد زمین لغزش		
زمین لغزش	حضور	عدم حضور
حضور	N_{pix1}	N_{pix2}
عدم حضور	N_{pix3}	N_{pix4}

(وان وسترن، ۲۰۰۲؛ رگمی و همکاران، ۲۰۱۰)

در نهایت، وزن نهایی بر پایه رابطه‌های ۱۵ و ۱۶ برای هر عامل به منظور پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش استفاده می‌شود (وان وسترن، ۲۰۰۲: ۱۴؛ رگمی و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۷۴)

$$C = [(W^+) + (W^-)] \quad (15)$$

$$W_{final} = C / S_C \quad (16)$$

که در آن C برآیند وزن‌های مثبت و منفی، W_{final} وزن نهایی استاندارد شده، و S_C انحراف معیار برآیند وزن‌های شاهد مثبت و منفی است که برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است (شیرانی، ۱۳۹۷: ۵۸).

مدل دمپسترشفر: نظریه شواهد در سال ۱۹۶۷ توسط دمپسترشفر با نظریه حدود بالا و پایین احتمال ارائه شد. دمپستر در واقع نوعی عدم قطعیت درباره اندازه احتمال پیشامدها را مدل‌سازی کرد (دمپستر، ۱۹۶۷). پس از آن شافر در سال ۱۹۶۷ این نظریه را به عنوان نظریه شواهد به عنوان ساختاری برای نمایش اطلاعات ناکامل و استدلال تحت عدم قطعیت فرمول‌بندی کرد (شفر، ۱۹۷۶). تئوری دمپسترشفر به عنوان تئوری تابع اعتقادات شناخته می‌شود که خود تعمیمی است از تئوری بیزین که مبتنی بر احتمالات است.

از تئوری دمپسترشفر (DSET) در تحلیل حساسیت زمین‌لغزش استفاده می‌شود که ساختار آن به صورت رابطه ۱۷ تعریف می‌شود (دمپستر ۱۹۶۷؛ شفر ۱۹۷۶):

$$m: 2 = \{\theta, T_P, \overline{T_P}\} \quad \text{با} \quad = \{T_P, \overline{T_P}\} \quad (17)$$

در رابطه ۱۷ T_P به مفهوم گزاره هدف و مبین پیکسل‌ها یا سلول‌های متأثر از زمین‌لغزش‌های محتمل است. $\overline{T_P}$ به مفهوم متضاد گزاره هدف مبین پیکسل‌ها یا سلول‌هایی است که تحت تأثیر زمین‌لغزش‌های محتمل نیست (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۰۱). اگر لایه‌های داده‌های مکانی چندگانه L در یک منطقه، که حساسیت زمین‌لغزش آن مورد مطالعه است، موجود باشد، هر لایه داده مکانی به عنوان شاهد E_i ($i=1, 2, \dots, L$) برای گزاره هدف T_P در نظر گرفته می‌شود. داده معلوم E_{ij} ، که ویژگی رده زام شاهد E_i و توابع توزیع فراوانی گزاره‌های مثبت و مخالف است، نسبت احتمال $\lambda(\overline{T_P})E_{ij}$ گزاره هدف مثبت را پشتیبانی می‌کند و در قالب رابطه ۱۸ تعریف می‌شود که در آن $N(L \cap E_{ij})$ تعداد پیکسل‌های زمین‌لغزشی واقع در هر رده E_{ij} است، $N(L)$ تعداد کل پیکسل‌های زمین‌لغزشی رخ داده در منطقه مورد مطالعه است، $N(E_{ij})$ تعداد پیکسل‌ها در هر رده E_{ij} و $N(A)$ تعداد کل پیکسل‌ها در منطقه مورد مطالعه است. صورت و مخرج کسر رابطه ۱۸ به ترتیب نسبت زمین‌لغزش‌های رخ داده و نسبت مناطق غیرلغزشی در طبقه معین E_{ij} است. در مدل وزن شاهد، وزن مثبت معمولاً با لگاریتم طبیعی نسبت احتمال در رابطه ۱۸ تعریف می‌شود. همچنین، نسبت احتمال برای پشتیبانی گزاره هدف مخالف در قالب رابطه ۱۹ تعریف می‌شود. صورت کسر مبین نسبت زمین‌لغزش‌هایی است که در طبقه معین E_{ij} اتفاق نیفتاده است. مخرج کسر نماینده نسبت مناطق فاقد زمین‌لغزش در خارج طبقات دیگر E_{ij} است. وزن منفی در مدل وزن شاهد به وسیله لگاریتم طبیعی نسبت احتمال در رابطه ۱۹ حاصل می‌شود. به طور کلی، مقدار دامنه نسبت احتمال از صفر تا بی‌نهایت متغیر است. بنابراین، گام استانداردسازی به توابع جرم از دو تابع نسبت احتمال نیازمند است. نسبت‌های احتمال بر مجموع مقادیر نسبت احتمال ویژگی‌های تمام رده‌ها در شاهد معین E_i تقسیم می‌شود.

$$(TP)E_{ij} = \frac{N(L \cap E_{ij})}{N(L)} \quad (18)$$

$$= \frac{N(L \cap E_{ij})}{N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})}$$

$$= \frac{N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L)}$$

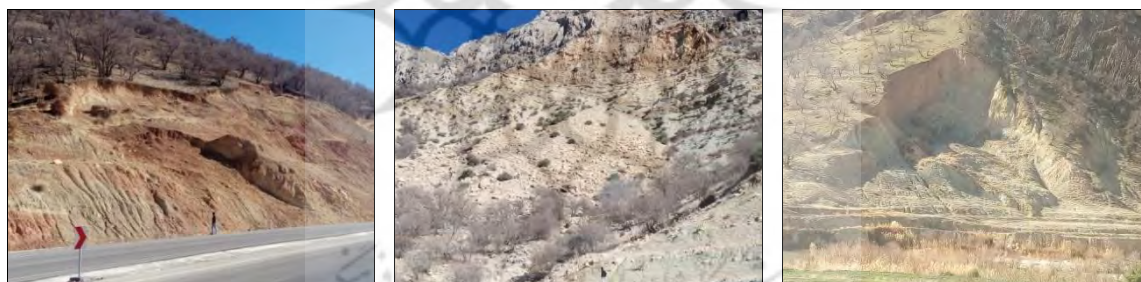
$$\bar{T}_p = \frac{N(L) - N(L \cap E_{ij})}{N(A) - N(L) - N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})} \quad (19)$$

$$m(T_p)_{E_{ij}} = \frac{(T_p)_{E_{ij}}}{\sum (T_p)_{E_{ij}}} \quad (20)$$

$$m(\bar{T}_p)_{E_{ij}} = \frac{(\bar{T}_p)_{E_{ij}}}{\sum (\bar{T}_p)_{E_{ij}}} \quad (21)$$

$$m(\theta) = 1 - m(T_p)_{E_{ij}} - m(\bar{T}_p)_{E_{ij}} \quad (22)$$

با توجه به چارچوب تشخیص تحلیل‌های حساسیت زمین لغزش، تابع باور $m(T_p)_{E_{ij}}$ برای پشتیبانی گزاره هدف مثبت $\lambda E_{ij}(T_p)$ به طور مستقیم از تابع جرم بازیابی می‌شود. همچنین، تابع ناباوری $m(\bar{T}_p)_{E_{ij}}$ برای پشتیبانی گزاره هدف مخالف $\lambda E_{ij}(\bar{T}_p)$ از تابع جرم بازیابی می‌شود. تابع مقبولیت $m(\theta)$ حاصل تفاضل توابع باور و ناباوری از مقدار یک با رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود (عرب‌عامری و شیرانی، ۱۳۹۵: ۱۰۰). در این مدل طبقه‌هایی که از وزن تابع باور بیشتر و ناباوری کمتری برخوردارند دارای حساسیت بیشتری نسبت به زمین لغزش‌اند. در نهایت، نقشه‌های حاصل از هر دو مدل بر اساس شکست‌های طبیعی فراوانی پیکسل‌ها به پنج کلاس حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، و خیلی کم تقسیم شدند (شکل‌های ۴ و ۵). اطلاعات هر یک از طبقه‌ها و زیرطبقه‌های آن‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است.



پ

ب

الف

شکل ۳. انواع زمین لغزش‌های رخ داده در حوضه: الف: زمین لغزش چرخشی بر روی آبرفت کواترنری؛ ب: زمین لغزش انتقالی - ریزشی بر روی رسوبات آهکی؛ پ: زمین لغزش چرخشی مرکب بر روی سازند گوری

یافته‌های پژوهش

روش دمپسترشفر

بر اساس مقادیر وزنی در ارتباط با نقش مؤثر هر یک از واحدهای لایه‌های عاملی و ترتیب اولویت و اهمیت آن‌ها در وقوع زمین لغزش و از تلفیق نقشه‌های عامل و پراکنش زمین لغزش‌ها و محاسبه وزن هر طبقه براساس اجرای روابط مربوط به مدل دمپسترشفر در محیط GIS، شیب $< 40\%$ درصد با وزن تابع باور $0/87$ و کمترین وزن ناباوری بیشترین تأثیر را در وقوع زمین لغزش‌های حوضه دارد که با نتایج حاصل از پژوهش شیرانی و همکاران (۲۰۱۸)، وانگ و همکاران (۲۰۱۶)، عرب‌عامری و شیرانی (۱۳۹۵)، و همچنین محمدنژاد آروق و اصغری سراسکانرود (۱۳۹۵) مطابقت دارد. در شیب‌های کم معمولاً نیروهایی مانند اصطکاک خاک و دیگر مواد دامنه‌ای بیشتر از نیروهای محرک مانند نیروی ثقل

است. در مقابل در دامنه‌های پُرشیب به‌دلیل برتری تنش برشی بر نیروی مقاوم وقوع زمین‌لغزش افزایش می‌یابد. همچنین، براساس نتایج حاصل از اجرای مدل، شاخص ناهمواری (زبری) زمین < 14 با وزن باور $0/77$ دومین عامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه است. از آنجا که مقدار بالای این شاخص نشان‌دهندهٔ بالآمدگی زیاد و فعالیت نئوتکتونیک است، وزن زیاد این طبقه در بین کلاس‌های دیگر این شاخص را می‌توان به ناهمواری، به‌هم‌ریختگی و زبری سطوح، افزایش شیب، فعالیت نئوتکتونیک، و در نتیجه تسهیل در رخداد زمین‌لغزش نسبت داد. بر اساس نتایج حاصل از مدل دمپسترشرف شاخص توان آبراهه $< 1/2$ با وزن تابع باور $0/68$ سومین عامل مهم شناخته شده است. از آنجا که این شاخص گویای میزان قدرت فرساینده‌گری جریان آب است، با افزایش آن تلاطم ناشی از جریان آب و در نتیجه زیرشویی زمینه را برای رخداد لغزش‌های کناری تسهیل می‌کند. انحنای مقعر، بارش < 750 میلی‌متر، شاخص موقعیت توپوگرافی $> 4/2$ ، انحنای نیمرخ $0/3-4/2$ ، شاخص رطوبت توپوگرافی $1/5-2/5$ ، اراضی جنگلی، انحنای سطح $5-2/99$ ، فاصله $500-$ از گسل، و سازند پابده-گورپی به‌ترتیب با تابع باور $0/63$ ، $0/60$ ، $0/57$ ، $0/49$ ، $0/49$ ، $0/47$ ، $0/46$ ، $0/38$ ، و $0/37$ تأثیر و حساسیت بالایی را در زمین‌لغزش‌های منطقهٔ مورد مطالعه دارا می‌باشند (جدول ۳).

روش وزن شاهد

با توجه به اطلاعات جدول ۳، بر اساس مدل وزن شاهد، کلاس شاخص ناهمواری (زبری) زمین < 14 با وزن نهایی $2939/32$ مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه است که به نقش آن اشاره شد. علاوه بر آن، باید اشاره کرد که شیب‌های دارای زبری زیاد به علت تغییرات شیب برای نفوذ بارندگی در خاک مساعدند و بنابراین افزایش آن موجب افزایش لغزش می‌شود (شیرانی، ۱۳۹۷: ۱۰۰). کلاس شیب < 40 درصد با وزن نهایی $2611/21$ در مرتبهٔ دوم اهمیت قرار دارد که با نتایج حاصل از پژوهش جوادی و همکاران (۱۳۹۳) و تیموری یانسری و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. یمانی و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهش خود اشاره کرده‌اند که کلاس شیب بیشتر از 40 درجه دارای بیشترین احتمال وقوع زمین‌لغزش است. همچنین، پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهش خود شیب را دومین عامل مهم در وقوع زمین‌لغزش معرفی کردند. در این مدل شاخص تفاضلی نرمال‌شدهٔ پوشش گیاهی $< 0/6$ با وزن نهایی $400/60$ در مرتبهٔ سوم قرار دارد. علت این امر این است که جنگل‌های نیمه‌مترکم منطقه در چند سال اخیر به تدریج در حال تبدیل شدن به زمین‌های کشاورزی هستند. از طرفی، دستکاری‌های انسانی در مناطق جنگلی به‌خصوص به‌منظور گسترش راه‌های ارتباطی از عوامل تأثیرگذار به‌شمار می‌رود. این مسئله نشان‌دهندهٔ اهمیت تخریب جنگل و تغییر کاربری در وقوع زمین‌لغزش است. شاخص توان آبراهه $< 1/2$ با وزن $2037/60$ چهارمین عامل مؤثر است که به نقش آن اشاره شد. شاخص موقعیت توپوگرافی کمتر از $4/2-$ با وزن 1926 و به دلیل تقعر بیشتر در رتبهٔ پنجم عوامل اصلی رخداد زمین‌لغزش بر اساس مدل وزن شاهد است. احمدآبادی و رحمتی (۱۳۹۴) اشاره کردند که شیب‌های محدب و واگرا عموماً پایدارتر از شیب‌های مقعر و همگرا هستند. مناطق مقعر باعث افزایش رطوبت موجود در خاک می‌شود که این عامل باعث افزایش فرسایش و کاهش ثبات خاک می‌شود. شاخص ناهمواری زمین $14-7$ ، انحنای نیمرخ $0/3-0/1$ ، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده $0/6-0/4$ ، بارش < 750 میلی‌متر، و سازند پابده-گورپی به‌ترتیب با وزن نهایی $1793/34$ ، $1722/40$ ، $1494/60$ ، و $1340/28$ در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

ادامهٔ جدول ۳. ارتباط بین هر یک از پارامترهای مؤثر در زمین‌لغزش با پهنه‌های زمین‌لغزشی با استفاده از مدل‌های دمپسترشفر و وزن شاهد

فاکتورها	رده	درصد مساحت کلاس	درصد زمین‌لغزش	دمپسترشفر							وزن شاهد			
				تابع ناواری Dk	عدم قطعیت Uner	تابع مطلوبیت Plan	وزن مثبت W+	وزن منفی W-	برایند وزن C	وزنایی S _(W)	وزنایی S _(W)	انحراف استاندارد S(O)	وزن پهنای S(O)	
آبنا	مقر	۵۲.۵۰	۶۵.۳۸	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
	محدب	۴۷.۵۰	۳۴.۶۲	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
انحای سطح	-۲.۸۹-۵	۸.۲۶	۲۱.۹۷	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
	-۰.۵-۰	۴۰.۱۴	۳۷.۰۹	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
انحای نهر	-۴.۸۷-۰.۵	۴.۲۷	۷.۵۹	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
	-۰.۵-۱	۳۳.۴۴	۱۸.۵۴	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
شاخص تقاضای نرمال شده پوشش گیاهی	<۰	۷۴.۵۷	۱۹.۰۹	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
	۰-۰.۲	۳۳.۷۱	۲۰.۳۸	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
شاخص تقاضای نرمال شده توپوگرافیکی	۰.۲-۰.۴	۱.۳۳	۰.۳۵	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
	۰.۴-۰.۶	۰.۰۹	۰.۰۹	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
شاخص وضوئیت توپوگرافیکی	<۰.۲	۱۳.۴۸	۳۱.۱۵	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
	۰.۲-۰.۶	۳۷.۱۸	۱۹.۲۵	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
شاخص ناهمواری توپوگرافیکی	۰.۲-۰.۵	۳۲.۶۰	۱۴.۲۶	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
	۰.۵-۱	۲۱.۸۴	۵۲.۹۱	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
شاخص توان آبراهه	<۰.۵	۲۱.۴۰	۱۸.۳۳	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
	۰.۵-۱	۲۱.۵۰	۱۹.۷	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
شاخص طوبوغرافی	۰.۱-۱.۵	۳۰.۸۶	۷.۱۵	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰
	۱.۵-۲.۵	۳۱.۶۸	۵۲.۶۴	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰

جمع‌بندی نتایج دو مدل

نتایج نشان می‌دهد که در هر دو مدل عامل شیب 40% درصد و شاخص ناهمواری زمین 14 بیشترین تأثیر را در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه دارند. در دامنه‌های پُرشیب برتری تنش برشی بر نیروی مقاوم شرایط جهت وقوع زمین‌لغزش فراهم شده است. همان‌طور که اشاره شد، بخش وسیعی از سطح منطقه کوهستانی همراه دیواره‌های بلند و دره‌های ژرف است. بنابراین، علت اینکه در منطقه مورد مطالعه با افزایش شیب حساسیت به زمین‌لغزش بیشتر می‌شود می‌توان به بالا بودن مقدار ریزش‌های سنگی و واژگونی در سطح منطقه نسبت داد. در پژوهش عابدینی و همکاران (۱۳۹۵) شیب به‌عنوان یک متغیر بیشترین ارزش و ضریب تأثیر را در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش دارد. در پژوهش و خشوری و زارع (۲۰۱۶) نیز درجهٔ شیب مهم‌ترین فاکتور در بین همهٔ فاکتورها معرفی شده است. اگکان و ترک (۲۰۱۰) در منطقهٔ غرب ترکیه، روزس و همکاران (۲۰۱۱) در منطقهٔ شرق آچایا در یونان شیب را به‌عنوان مهم‌ترین عامل معرفی کردند. نتایج پژوهش سپهر و همکاران (۱۳۹۲) و عابدینی و فتحی (۱۳۹۳) نشان می‌دهد که شیب بیشترین ضریب اهمیت و تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارد. بهاروند و سوری (۱۳۹۴) شیب را مهم‌ترین عامل می‌دانند که بیشترین همبستگی را با زمین‌لغزش‌های منطقهٔ مورد مطالعهٔ خود داشته است. بیشترین زمین‌لغزش‌های حوضه به مساحت $547/82$ هکتار در زمین‌های مرتعی منطقه رخ

داده است. علاوه بر اینکه وسعت زیاد اراضی مرتعی در منطقه عامل فراوانی زمین‌لغزش‌ها در این واحد است، در این مناطق به دلایل مختلف، از جمله تبدیل اراضی به زراعت دیم و مرتع توسط روستاییان، جامعه جنگلی بومی و چندساله جای خود را به گونه‌های یک‌ساله، که دارای ریشه‌های سطحی هستند، داده است. بنابراین، این گونه‌ها به علت عدم ریشه‌دوانی عمیق و گسترده نمی‌توانند تأثیری در تثبیت و پایداری دامنه‌های حساس به حرکات توده‌ای داشته باشند؛ در نتیجه، لیتولوژی سطحی و خاک حساس منطقه به سطوح لغزشی گرایش پیدا کرده است. علاوه بر این، شیب زیاد در مناطقی که در محدوده اراضی مرتعی واقع شده باعث شده که انواع زمین‌لغزش به صورت سنگ‌افت (جریان تکه‌های سنگ)، ریزش و واژگونی در این مناطق گسترش زیادی داشته باشد. مناطق دارای شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده < 0 با پهنه‌های لغزشی به مساحت $502/94$ هکتار در مقام دوم قرار دارد. با افزایش شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده از وسعت زمین‌لغزش‌ها کاسته می‌شود. این روند کاهش تا شاخص $0/6$ ادامه دارد و فقط در شاخص بیش از $0/6$ بر وسعت زمین‌لغزش‌ها اندکی افزوده شد که این افزایش اندک را می‌توان به فعالیت‌های انسانی از جمله راه‌سازی و کشت دیم و در نتیجه به هم‌زدن تعادل دامنه‌ها در این مناطق نسبت داد؛ این موضوع با نتایج حاصل از پژوهش تیموری یانسری و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. حضور یا عدم حضور پوشش گیاهی از عوامل تأثیرگذار در رخداد زمین‌لغزش محسوب می‌شود و نقش بسیار پیچیده و متضادی در حساسیت زمین‌لغزش ایفا می‌کند (گو و همکاران، ۲۰۱۵). این نقش توسط چهار عامل مختلف تعیین می‌شود: ثبات مکانیکی ناشی از وجود ریشه، تخلیه رطوبت خاک در اثر تعرق، بار اضافی ناشی از وزن درختان و شکست باد (سانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۴). به‌طور 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 که با آرای سونگ و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد. سومین محدوده با وسعت زمین‌لغزش زیاد مناطق با شیب بیش از ۴۰ درصد است که $499/11$ هکتار از وسعت پهنه‌های زمین‌لغزشی را داراست. تیموری یانسری و همکاران (۱۳۹۶) و پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهش خود نشان دادند که بیشترین درصد زمین‌لغزش‌ها به ترتیب در شیب‌های < 30 درجه و $30-50$ درصد اتفاق افتاده است. همچنین، رگمی و همکاران (۲۰۱۴) اشاره می‌کنند که با افزایش شیب فراوانی زمین‌لغزش‌ها افزایش می‌یابد. در ارتباط با انحناهای کل، واحدهایی با انحناهای مقعر $415/73$ هکتار از وسعت پهنه‌های لغزشی را در خود جای داده‌اند و از این حیث در رتبه چهارم قرار دارد. احمدآبادی و رحمتی (۱۳۹۴) اشاره دارند که شیب‌های محدب و واگرا عموماً پایدارتر از شیب‌های مقعر و همگرا هستند. همچنین، یمانی و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهش خود نشان دادند که مناطق مقعر دارای نسبت فراوانی بالاتری نسبت به مناطق محدب هستند. مناطق مقعر باعث افزایش رطوبت موجود در خاک می‌شوند که این عامل باعث افزایش فرسایش و کاهش ثبات خاک می‌شود. دامنه‌های مقعر در نگه‌داری و تمرکز آب‌های زیرسطحی نقش بیشتری دارند که در نتیجه باعث به‌وجود آمدن فشار سریع آب در داخل منافذ می‌شود. بنابراین، زمین‌لغزش‌های سطحی متناوباً در شیب‌های مقعر اتفاق می‌افتند. در مجموع، دامنه‌های مقعر استحکام کمتری نسبت به دامنه‌های محدب دارند. در ارتباط با طبقات ارتفاعی بیشترین درصد زمین‌لغزش‌ها ($375/61$ هکتار) به طبقه ارتفاعی $1000-2000$ تعلق دارد. در طبقات ارتفاعی بالاتر درصد زمین‌لغزش‌ها کاهش می‌یابد که می‌تواند به علت فقدان خاک و فرایندهای خاک‌سازی در این ارتفاعات باشد. همچنین، کمترین درصد زمین‌لغزش مربوط به طبقه ارتفاعی $681-1000$ متر است. به‌طور کلی، در دو دامنه مشابه و با مقدار شیب ثابت دامنه‌ای که مرتفع‌تر است از پتانسیل ناپایداری بیشتری برخوردار است (مختاری اصل و رنجبریان شادباد، ۱۳۹۵: ۱۲۵). در مجموع، براساس مقادیر وزنی حاصل در بین واحدهای هفت عامل مهم تأثیرگذار بر اساس هر دو مدل در رخداد زمین‌لغزش‌های حوضه واحدهای پنج عامل- شیب، شاخص ناهمواری زمین، شاخص توان آبراهه، شاخص موقعیت

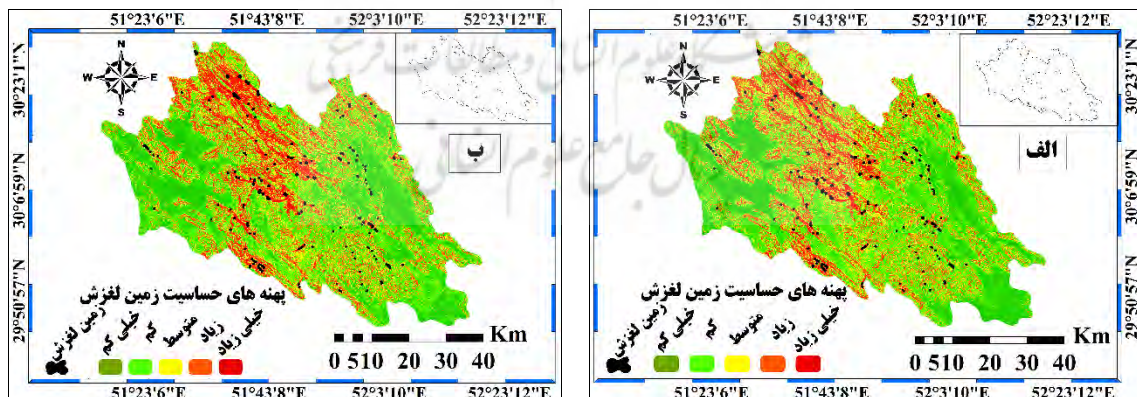
توپوگرافی، و شاخص انحناى نیمرخ- مشترک‌اند و واحدهای این پنج عامل به‌طور مشترک بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش در منطقه مورد پژوهش دارند.

در نهایت، برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از روش دمپسترشفر از رابطه‌های ۱۸ تا ۲۲ استفاده می‌شود. در محیط GIS بر اساس روابط فوق همه رده‌های هر عامل وزن‌دهی و نقشه وزنی هر عامل به‌دست آمد. در مرحله بعد، نقشه‌های وزنی با هم‌دیگر جمع جبری و نقشه نهایی حاصل شد (شکل ۴- الف). در این نقشه وزن هر پیکسل از مجموع وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر عامل محاسبه شد. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که ۲۳/۸۵ درصد از کل منطقه (۹۶۱/۳۴ کیلومتر مربع) در پهنه با حساسیت خیلی کم است. پهنه‌های حساسیت کم و متوسط به ترتیب ۳۱/۸۲ درصد (۱۲۸۲/۴۹ کیلومتر مربع) و ۲۱/۷۲ درصد (۸۷۵/۶۳ کیلومتر مربع) و پهنه‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۱۶/۴۱ درصد (۶۶۱/۴۵ کیلومتر مربع) و ۶/۲۰ درصد (۲۴۹/۹۷ کیلومتر مربع) از کل نقشه پهنه‌بندی حساسیت را تشکیل می‌دهند (جدول ۴ و شکل ۸).

همچنین، نقشه نهایی حساسیت زمین‌لغزش Y_{woe} با استفاده از مدل وزن شاهد از مجموع حاصل ضرب وزن استاندارد شده هر رده پارامتر C/Sc در وزن خود رده پارامتر C طبق رابطه ۲۳ بر اساس نتایج موجود در جدول ۳ محاسبه شده است. i تا n همان پارامترها یا عوامل مؤثر در زمین‌لغزش‌اند.

$$Y_{woe} = \sum_{i=1}^n C / sc * C \quad (23)$$

بدین ترتیب، با اعمال رابطه ۲۳ نقشه پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین‌لغزش طبق مدل وزن شاهد بی‌زین (WoE) نیز محاسبه شده است (شکل ۴- ب). نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که ۲۵/۲۹ درصد از کل منطقه (۱۰۱۹/۵۹ کیلومتر مربع) در پهنه با حساسیت خیلی کم است. پهنه‌های حساسیت کم و متوسط به ترتیب ۳۰/۹۸ درصد (۱۲۴۸/۸۲ کیلومتر مربع) و ۲۱/۲۸ درصد (۸۵۷/۶۴ کیلومتر مربع) و پهنه‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۱۵/۶۸ درصد (۶۳۱/۹۳ کیلومتر مربع) و ۶/۷۷ درصد (۲۷۲/۹۰) از کل نقشه پهنه‌بندی حساسیت را تشکیل می‌دهند.



شکل ۴. نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش: الف: روش دمپسترشفر؛ ب: روش وزن شاهد

ارزیابی و صحت‌سنجی روش‌ها

ارزیابی یک گام اساسی در توسعه و تعیین کیفیت نقشه یا مدل پهنه‌بندی حساسیت نسبت به زمین‌لغزش است. در این پژوهش برای ارزیابی و مقایسه دقت بین پهنه‌ها یا رده‌های حساسیت نسبت به زمین‌لغزش از نسبت فراوانی (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) استفاده شد. با استفاده از نسبت فراوانی (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) دقت طبقه‌بندی هر

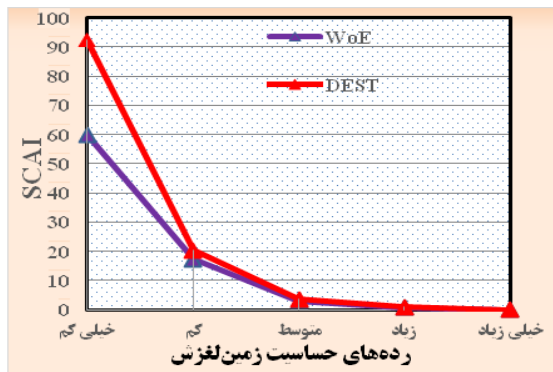
مدل تعیین می‌شود (دمیر و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، لازم است برای برآورد بهتر دقت تفکیک‌پذیری رده‌های مدل‌ها از نمودار هر دو شاخص استفاده شود. بر اساس رابطه منطقی و نسبی موجود بین سطح زمین‌لغزش و پهنه‌های حساسیت به‌ترتیب برای پهنه‌هایی با حساسیت خیلی کم تا خیلی زیاد مقدار FR افزایش و شاخص SCAI به‌صورت قرینه معکوس کاهش می‌یابد. همچنین، با استفاده از منحنی ویژگی عملگر نسبی یا گیرنده (ROC) صحت نقشه‌های تهیه‌شده ارزیابی شد. این منحنی از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیت تعیینی، شناسایی احتمالی، و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به‌صورت کمی برآورد می‌کند (اسویت، ۱۹۸۸). منحنی ROC و محاسبه سطح زیرمنحنی یکی از روش‌های استاندارد اعتبارسنجی به‌منظور مقایسه عملکرد پیش‌بینی انواع مدل‌هاست. در این منحنی، در محور X مقدار خطای مثبت و بر روی محور Y مقدار خطای منفی نمایش داده می‌شود. این منحنی یکی از کارآمدترین روش‌ها برای نمایش کیفیت مدل است. مقدار AUC بین ۰/۵-۱ متغیر است (رومر و فرنتینو، ۲۰۱۶). 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). ایدئال‌ترین مدل بیشترین سطح زیر منحنی را دارد. نرخ پیش‌بینی منحنی ROC بیانگر ارزیابی مدل و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده است که زمین‌لغزش را پیش‌بینی می‌کند.

نتایج ارزیابی مدل‌ها

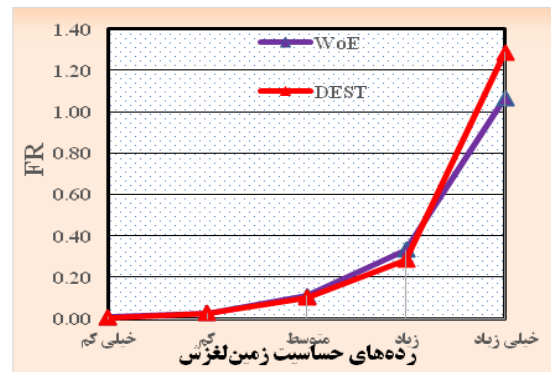
نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی مدل‌ها با استفاده از شاخص SCAI و FR در جدول ۴ نشان داده شده است. در هر دو مدل با افزایش حساسیت از خیلی کم به خیلی زیاد مقادیر نسبت فراوانی (FR) روند صعودی و شاخص SCAI روند نزولی پیدا می‌کند که نشان‌دهنده همبستگی بالای رده‌های حساسیت زمین‌لغزش با مناطق زمین‌لغزشی موجود و برداشت‌های میدانی منطقه مورد مطالعه است (شکل‌های ۵ و ۶). روند صعودی نسبت فراوانی (FR) و نزولی شاخص SCAI برای مدل دمپسترشفر اندکی بیشتر است که نشان‌دهنده پهنه‌بندی مناسب‌تر طبقات حساسیت با این مدل است. بر اساس سطوح طبقه‌بندی دقت براساس منحنی ROC هر دو مدل در طبقه خوب (۰/۷-۰/۸) قرار دارند؛ لیکن، در مقایسه با همدیگر، نتایج مقادیر (AUC) مدل دمپسترشفر نشان‌دهنده دقت امتیاز بالاتر (۰/۷۹) نسبت به روش وزن شاهد (۰/۷۶) است که بیانگر همبستگی بالا بین نقشه حساسیت نسبت به زمین‌لغزش تهیه‌شده و نقشه پراکنش زمین‌لغزش و ارزیابی بهتر مدل دمپسترشفر نسبت به مدل وزن شاهد است (جدول ۵ و شکل ۷). نتایج حاصل از منحنی ROC نشان می‌دهد که در این پژوهش به دلیل در نظر گرفتن نقش عوامل متعدد و با اعمال نقش شاخص‌های مورفومتری صحت و اعتبار دو مدل به همدیگر نزدیک شده است.

جدول ۴. نسبت فراوانی (FR) و شاخص SCAI پهنه‌های حساسیت زمین‌لغزش به روش احتمالاتی وزن شاهد و دمپسترشفر

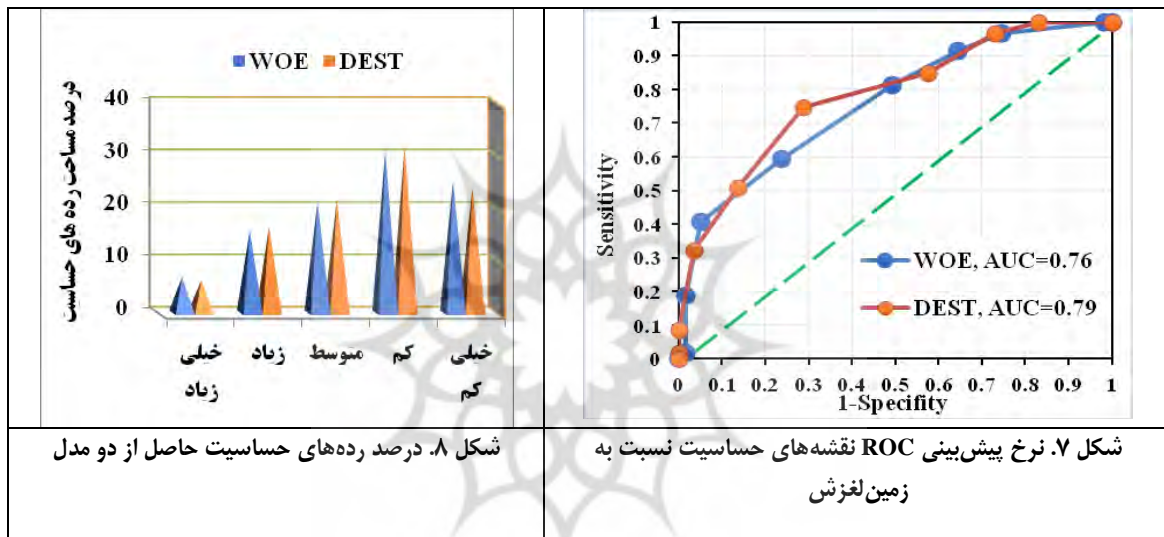
SCAI		درصد Seed		درصد نسبت فراوانی (FR)		درصد مساحت رده‌های حساسیت		درصد مساحت زمین‌لغزش		رده‌های حساسیت
DEST	WOE	DEST	WOE	DEST	WOE	DEST	WOE	DEST	WOE	زمین‌لغزش
۹۲/۴۳	۵۹/۸۸	۰/۲۶	۰/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۲۳/۸۵	۲۵/۲۹	۰/۶۶	۱/۰۵	خیلی کم
۲۰/۳۵	۱۷/۳۶	۱/۵۶	۱/۷۹	۰/۰۳	۰/۰۳	۳۱/۸۲	۳۰/۹۸	۵/۳۷	۵/۴۱	کم
۳/۶۷	۳/۰۳	۵/۹۲	۷/۰۲	۰/۱۰	۰/۱۱	۲۱/۷۲	۲۱/۲۸	۱۳/۸۹	۱۴/۶۲	متوسط
۰/۹۸	۰/۷۳	۱۶/۶۷	۲۱/۵۸	۰/۲۸	۰/۳۳	۱۶/۴۱	۱۵/۶۸	۲۹/۵۱	۳۳/۱۰	زیاد
۰/۰۸	۰/۱۰	۷۵/۵۸	۶۹/۱۹	۱/۲۹	۱/۰۷	۶/۲۰	۶/۷۷	۵۰/۵۷	۴۵/۸۳	خیلی زیاد



شکل ۶. شاخص SCAI رده‌های حساسیت زمین‌لغزش مدل‌های دمپسترشفر و وزن شاهد



شکل ۵. نسبت فراوانی (FR)



شکل ۸. درصد رده‌های حساسیت حاصل از دو مدل

شکل ۷. نرخ پیش‌بینی ROC نقشه‌های حساسیت نسبت به زمین‌لغزش

جدول ۵. مساحت زیر منحنی ROC به‌همراه انحراف استاندارد و سطح اطمینان آن

فواصل اطمینان در سطح ۹۵٪		سطح اطمینان	خطای استاندارد	سطح زیر منحنی	روش‌های احتمالاتی
حد بالا	حد پایین				
۰٫۸۷۰	۰٫۷۰۹	۰٫۰۰۰	۰٫۰۴۱	۰٫۷۹	روش دمپسترشفر
۰٫۸۴۹	۰٫۶۷۹	۰٫۰۰۰	۰٫۰۳۳	۰٫۷۶	روش وزن شاهد

تحلیل و تفسیر نتایج با استفاده از نسبت عددی

پس از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی، نسبت به تفسیر و بررسی اعتبار و میزان دقت و درستی نتایج حاصل از دو روش و نیز مقایسه روش‌ها اقدام شد. برای هر نقشه پنج پهنه حساسیت (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، و خیلی زیاد) تعریف و با تقسیم مساحت هر یک از این پهنه‌ها به مساحت کل حوضه سهم هر یک از پهنه‌ها در حوضه بر حسب درصد به دست آمد ($S_i\%$). در مرحله بعد، درصد زمین‌لغزش‌های موجود در هر پهنه نیز محاسبه شد ($L_i\%$) (جدول ۴). برای مقایسه نتایج حاصل از دو روش، با تقسیم $L_i\%$ به $S_i\%$ در هر پهنه نسبت عددی (NR_i) بر اساس رابطه ۲۴ به‌دست آمد (جدول ۶).

$$NR_i = L_i\% / S_i\%$$

(۲۴)

بنابراین، برای هر یک از پهنه‌ها، این نسبت عددی با تقسیم درصد زمین‌لغزش هر پهنه به درصد مساحت آن به‌دست آمد. هدف از پهنه‌بندی این است که پخش‌هایی با حساسیت زیاد و خیلی زیاد از مناطق دیگر با دقت متمایز شوند. از این رو، محدوده خطرناک نقشه به‌صورت مجموع پهنه‌های حساسیت زیاد و خیلی زیاد در نظر گرفته شد و به‌منظور تعیین دقت هر روش در برآورد نسبت عددی NR_i برای این محدوده خطرناک به‌دست آمد. هر چه این نسبت عددی بزرگ‌تر باشد نشان‌دهنده آن است که وسعت بیشتری از پهنه‌های زمین‌لغزشی در محدوده کوچک‌تری از نقشه پوشش داده شده است. نتایج نشان داد در روش دمپسترشفر $80/08$ از زمین‌لغزش‌ها در محدوده خطرناک با مساحت $91143/31$ هکتار ($22/61$ از مساحت کل حوضه) و در روش وزن شاهد $78/93$ از زمین‌لغزش‌ها در این محدوده با مساحت $90483/70$ هکتار قرار گرفته‌اند که این مساحت $22/45$ از مساحت حوضه را دربر می‌گیرد. بنابراین، نسبت عددی در روش دمپسترشفر $3/54$ و در روش وزن شاهد $3/51$ به‌دست آمد. مقایسه این دو نسبت عددی نشان می‌دهد که دقت و درستی روش دمپسترشفر در ارائه نتایج از روش وزن شاهد بیشتر است. زیرا روش دمپسترشفر، در مقایسه با روش وزن شاهد، درصد بیشتری از زمین‌لغزش‌ها را در محدوده خطرناک پوشش داده است. از آنجا که در پهنه‌بندی بخش‌های با حساسیت زیاد و خیلی زیاد باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که از نظر مهندسی اختصاص هزینه به این مناطق مقرون به‌صرفه باشد، تقسیم‌بندی منطقه از نظر پهنه‌های حساسیت (جدول ۴) در این پژوهش نشان داد که نتایج حاصل از مدل دمپسترشفر از این نظر مناسب‌تر است.

جدول ۶. نسبت عددی $S_i/L_i = NR_i$ برای هر پهنه برای دو روش WOE و DEST

روشی DEST	روشی WOE	ناحیه
۰/۰۲	۰/۰۴	پهنه حساسیت خیلی کم
۰/۱۷	۰/۱۷	پهنه حساسیت کم
۰/۶۴	۰/۶۹	پهنه حساسیت متوسط
۱/۸۰	۲/۱۱	پهنه حساسیت زیاد
۸/۱۶	۶/۷۷	پهنه حساسیت خیلی زیاد
۳/۵۴	۳/۵۱	ناحیه خطرناک (حساسیت زیاد و خیلی زیاد)

نتیجه‌گیری

وجود نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش برای تعیین پتانسیل نواحی از لحاظ خسارت زمین‌لغزش‌ها و کاهش اثرهای زیان‌بار اجتماعی و اقتصادی آن بسیار ضروری است. از آنجا که در وقوع زمین‌لغزش عوامل متعددی دخالت دارد، به‌منظور اینکه نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت با دقت بیشتری تهیه شود، لازم است از لایه‌های اطلاعاتی بیشتری استفاده شود و عوامل مؤثر متنوعی که احتمال می‌رود در وقوع آن دخیل باشد ارزیابی شود. در این پژوهش، به‌منظور افزایش دقت نقشه حساسیت زمین‌لغزش، از ۱۸ پارامتر مختلف با تأکید بر شاخص‌های مورفومتری استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که، به دلیل در نظر گرفتن این رویکرد، دقت و صحت نقشه‌های پهنه‌بندی افزایش یافته است که این یافته با نتایج حاصل از پژوهش شیرانی (۱۳۹۷) و وانگ و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. بر اساس نتایج مدل‌ها، شیب‌های < 40 درصد و شاخص ناهمواری زمین < 14 بیشترین وزن را به خود اختصاص داده و مهم‌ترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه داشته‌اند. به‌منظور بررسی دقت پیش‌بینی، مدل‌های اجرا شده با استفاده از شاخص ROC مقایسه شدند. نتایج حاصل از آن نشان داد که، برخلاف نتایج پژوهش پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۳)، مدل دمپسترشفر

دارای دقت پیش‌بینی بیشتری (۰/۷۹) نسبت به مدل وزن شاهد (۰/۷۶) است. برای برآورد بهتر دقت تفکیک‌پذیری رده‌ها در مدل‌ها از نمودارهای دو شاخص SCAI و FR استفاده شد. نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی مدل‌ها با استفاده از دو شاخص یادشده نیز نشان داد که در هر دو مدل با افزایش حساسیت از خیلی کم به خیلی زیاد مقادیر نسبت فراوانی روند صعودی و شاخص SCAI روند نزولی پیدا می‌کند که نشان‌دهنده همبستگی زیاد رده‌های حساسیت زمین‌لغزش با مناطق زمین‌لغزشی موجود و برداشت‌های میدانی منطقه مورد مطالعه است. روند صعودی نسبت فراوانی (FR) و نزولی شاخص SCAI برای مدل دمپسترشفر اندکی بیشتر است که بیان‌کننده پهنه‌بندی مناسب‌تر طبقات حساسیت با این مدل است. همچنین، مقادیر نسبت عددی دو مدل نشان داد که روش دمپسترشفر با نسبت عددی بزرگ‌تر (۳/۵۴) در مقایسه با روش وزن شاهد (۳/۵۱) جواب بهتری داشته است؛ زیرا درصد بالایی از زمین‌لغزش‌ها را در مساحت کوچک‌تری به‌عنوان پهنه خطرناک پوشش داده که از نظر مهندسی اختصاص هزینه به این مناطق مقرون‌به‌صرفه است و در تعیین پهنه خطرناک نسبت به روش وزن شاهد دقت بیشتری داشته است. براساس نتایج ۸۲/۵۹ درصد زمین‌لغزش‌های حوضه به مساحت ۵۴۷/۸۲ هکتار در کاربری مرتع رخ داده است. مشاهدات میدانی نشان می‌دهد در این مناطق به دلایل مختلف از جمله بهره‌برداری‌های غیراصولی و قطع درختان جنگلی توسط روستاییان جامعه جنگلی بومی و چندساله جای خود را به گونه‌های یک‌ساله، که دارای ریشه‌های سطحی‌اند، داده است. از این رو، این گونه‌ها نمی‌توانند تأثیری در تثبیت و پایداری دامنه‌های حساس به حرکات توده‌ای داشته باشند. در نهایت، با توجه به نتایج کمی اعتبارسنجی، مدل دمپسترشفر مدل مناسب‌تر برای پهنه‌بندی معرفی می‌شود. براساس نتایج حاصل از این مدل، کلاس حساسیت خیلی کم ۲۳/۸۵ درصد (۹۶۱/۳۴ کیلومتر مربع)، کلاس حساسیت کم و متوسط به ترتیب ۳۱/۸۲ درصد (۱۲۸۲/۴۹ کیلومتر مربع) و ۲۱/۷۲ درصد (۸۷۵/۶۳ کیلومتر مربع) و کلاس حساسیت زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۱۶/۴۱ درصد (۶۶۱/۴۵ کیلومتر مربع) و ۶/۲۰ درصد (۲۴۹/۹۷ کیلومتر مربع) از کل منطقه را شامل می‌شود. به‌کارگیری و مقایسه دو مدل احتمالاتی بیزین به‌همراه بهره‌گیری از شاخص‌های مورفومتری مهم‌ترین ویژگی این پژوهش است که تاکنون در پژوهش‌های داخلی مشاهده نشد. با توجه به نتایج بسیار خوب حاصل از مقایسه دو مدل، که به‌دلیل استفاده از شاخص‌های متعدد مورفومتری در کنار عوامل مختلف محیطی است، بهره‌گیری از این رویکرد در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش توصیه می‌شود.

منابع

- احمدآبادی، ع. و رحمتی، م. (۱۳۹۴). کاربرد شاخص‌های کمی ژئومورفومتریک در شناسایی پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش با استفاده از مدل SVM (مطالعه موردی: آزادراه خرم‌آباد- پل زال)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴(۳): ۱۹۷-۲۱۳.
- انصاری، م. و فتوحی، ص. (۱۳۹۶). بررسی دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی و اثرات آن بر منابع آب زیرزمینی دشت ممسنی، فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، ۱۰(۳۶): ۷۳-۸۷.
- بابلی مؤخر، ح.؛ شیرانی، ک. و تقیان، ع. (۱۳۹۷). کارایی تئوری بی‌نظمی سامانه‌های طبیعی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز رودخانه فهلیان)، فصل‌نامه علوم زمین، ۲۸(۱۰۹): ۱۸۷-۲۰۰.
- بهاروند، س. و سوری، س. (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه سپیددشت، لرستان)، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۴): ۱۵-۳۱.
- پورقاسمی، ح.ر.؛ مرادی، م.؛ فاطمی عقدا، س.م.؛ مهدوی فر، م.ر. و محمدی، م. (۱۳۹۰). ارزیابی عوامل ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی (مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبخیز هراز)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۸(۴): ۱-۲۰.
- تیاموری یانسری، ز.؛ حسین‌زاده، ر.؛ کاویان، ع. و پورقاسمی، ح.ر. (۱۳۹۶). تعیین پهنه‌های حساس به وقوع لغزش با استفاده از روش آنالیز شانون (مطالعه موردی: حوضه چهاردانگه- استان مازندران)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۲(۲): ۱۸۳-۲۰۴.
- جداری عیوضی، ج. (۱۳۸۱). ژئومورفولوژی ایران، تهران: انتشارات دانشگاه پیام نور.
- جوادی، م.؛ صدیقی، م. و شعبان‌علی، غ. (۱۳۹۳). ارزیابی کارایی مدل‌های آماری ارزش اطلاعاتی و رگرسیون لجستیک در تهیه نقشه حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در زیرحوضه پهنه کلا، مجله پژوهش‌های خاک (علوم آب و خاک)، ۲۸(۱): ۱۵۳-۱۶۲.
- روستایی، ش.؛ خدایی قشلاق، ل. و خدایی قشلاق، ف. (۱۳۹۳). ارزیابی روش‌های تحلیل شبکه (ANP) و تحلیل چندمعیاره مکانی در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدوده محور و مخزن سدها (مطالعه موردی: سد قلعه‌چای)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴(۴): ۴۹۵-۵۰۸.
- شیرانی، ک. (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی عوامل ژئومورفومتریک در افزایش درستی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه دزعلیا، استان اصفهان)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی دانشگاه اصفهان، ۲۹(۳): ۱۱۱-۱۳۰.
- سپهر، ع.؛ بهنیا، ا.؛ محمدیان، ع. و عبدلهی، ا. (۱۳۹۲). تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش دامنه‌های شمالی بینالود بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافق ویکور، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲(۱): ۱۹-۳۶.
- صمدی، م.؛ جلالی، س.؛ کرنژادی، آ. و صمدی قشلاق‌چایی، م. (۱۳۹۵). بررسی شاخص‌های مورفومتری در حوضه آبخیز چهل‌چای استان گلستان با استفاده از GIS، مجله علمی- ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، ۷(۴): ۶۷-۷۴.
- عابدینی، م.؛ روستایی، ش. و فتحی، م. (۱۳۹۵). پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز- ANP (مطالعه موردی: کرانه جنوبی حوضه آبریز اهرچای از روستای نصیرآباد تا سد ستارخان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۵(۱): ۱۴۲-۱۵۹.
- عابدینی، م. و فتحی، م. (۱۳۹۳). پهنه‌بندی حساسیت خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز خلخال‌چای با استفاده از مدل‌های چندمعیاره، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲(۴): ۷۱-۸۵.

- عرب عامری، ع.؛ شیرانی، ک. و رضایی، خ. (۱۳۹۶). پهنه بندی استعداد اراضی نسبت به وقوع زمین لغزش با روش های دمپسترشیرف و نسبت فراوانی در حوضه سرخون کارون، نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۴(۳): ۴۱-۵۷.
- عرب عامری، ع. و شیرانی، ک. (۱۳۹۵). اولویت بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه بندی خطر آن با استفاده از تئوری احتمالاتی دمپسترشیرف، مطالعه موردی: حوضه ونک سمیرم، استان اصفهان، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۸(۱): ۹۳-۱۰۶.
- محمدنژاد آروق، و. و اصغری سراسکانرود، ص. (۱۳۹۵). ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از روش های آماری در حوضه آبریز باراندوزچای، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۴(۴): ۱۸۱-۱۹۱.
- مختاری اصل، ا. و رنجریان شادباد، م. (۱۳۹۵). ارزیابی و پهنه بندی احتمال خطر زمین لغزش در حوضه آبریز یاجیلو با مدل AHP، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۴(۴): ۱۱۹-۱۳۳.
- مقیم، ا.؛ باقری سیدشکری، س. و صفراد، ط. (۱۳۹۱). پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی: تقادیس نسا زاگرس شمال غربی)، پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۷۷(۷۹): ۷۷-۹۰.
- مکرم، م. و نگهبان، س. (۱۳۹۳). طبقه بندی لندفرم ها با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) (مطالعه موردی: منطقه جنوبی شهرستان داراب)، فصل نامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، ۲۳(۹۲): ۵۷-۶۵.
- ملکی، ا.؛ احمدی، م. و میلادی، ب. (۱۳۹۱). شبیه سازی مناطق مستعد خندق زایی با استفاده از روش SPI در حوضه رودخانه میرگ، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۳(۳): ۲۳-۳۸.
- منصوری، م. و شیرانی، ک. (۱۳۹۵). پهنه بندی خطر زمین لغزش به روش های آنتروپی و وزن شاهد (مطالعه موردی: منطقه دوآب صمصامی استان چهارمحال و بختیاری)، علوم زمین، ۲۶(۱۰۲): ۲۶۷-۲۸۰.
- یمانی، م.؛ مقامی مقیم، غ.؛ عرب عامری، ع. و شیرانی، ک. (۱۳۹۶). ارزیابی مدل ترکیبی نوین به منظور افزایش دقت تهیه نقشه های حساسیت زمین لغزش با تأکید بر مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) (مطالعه موردی: حوضه دز علیا، استان اصفهان)، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، ۲۶(۱۰۲): ۱۹-۴۰.
- یوسفی، ط. (۱۳۸۹). معرفی گسل عامل زلزله های دی ماه ۱۳۸۹ منطقه نورآباد ممسنی، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، مدیریت زمین شناسی و اکتشافات معدنی منطقه جنوب (شیراز).
- Abedini, M, Roustaei, S.H and Fathi, M. (2016). Landslide susceptibility zoning using the hybrid-based Bayesian-ANP (Case study: Southern Cone of Aharchay catchment area from Naseerabad Village to Sattarkhan Dam), , Journal of Quantitative geomorphology research, 5(1): 142-159. (in Persian).
- Abedini, M, and Fathi, M. (2014). Landslide hazard sensitivity zoning in Khalkhal tea basin using multi-criteria models, , Journal of Quantitative geomorphology research, 2(4): 71-85. (in Persian).
- Ahmadabadi, A., A. Rahmati. (2015). Application of geomorphometric quantity indices for prone to landslide and its susceptibility zonation using SVM model, case study khoramabad- Zal freeway, Journal of Quantitative geomorphology research, 4(3): 197-213. (in Persian).
- Ansari, M and Fotohi, S. (2017). Study of wet and dry periods and its effects on groundwater resources of Mamsani plain, Natural Geography Quarterly, 10(36): 73-87. (in Persian).
- Arabameri, A, Shirani, K and Rezaei, Kh. (2017). Landslide land capability zonation using Dempster-shafer and frequency ratio models, Journal of Water and Soil Conservation Research, 24(3): 41-57. (in Persian).

- Arabameri, A, and Shirani, K. (2016). Prioritization of Factors Affecting Landslide occurrence and its hazard zonation using Dempsterscher's probabilistic theory, Case Study: Vanak Semirom Basin, Isfahan province, *Journal of Engineering and Watershed Management*, 8(1): 93-106. (in Persian).
- Akgun, A. and Turk, N. (2010). Landslide susceptibility mapping for Ayvalik (Western Turkey) and its vicinity by multicriteria decision analysis, *Environ. Earth. Sci.*, 61: 595-611.
- Babolimoakher, H, Shirani, K and Taghian, A.(2018). Performance of Chaos theory on natural systems in landslide Susceptibility zonation (case study: Fahlian river basin, *Geosciences Quarterly*, 28(109): 187-200. (in Persian).
- Baharvand, S and souri, S. (2016). Landslide hazard zonation using Artificial Neural Network (Case Study: Sepid Dasht Basin, Lorestan), *Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 6(4): 15-31. (in Persian).
- Chen, W.; Pourghasemi, H.R. and Zhao, Z. (2016). A GIS-based comparative study of Dempster-Shafer, Logistic regression and artificial neural network models for landslide susceptibility mapping, *Geocarto International*, 32: 367-385. DOI: 10.1080/10106049.2016.1140824.
- Chung, C. and Fabbri, A. (2003). Validation of Spatial prediction models for Landslide hazard mapping, *Natural Hazards*, 30: 451-472.
- Demir, G.; Aytakin, M.; Akgun, A.; Ikizler, S.B. and Tatar, O. (2012). A comparison of Landslide Susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) by Likelihood-frequency ratio and analytic hierarchy process method, *Natural Hazards*, Published online, DOI 10.1007/s11069-012-0418-8.
- Dempster, A.P. (1967). Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping, *Annals of Mathematical Statistics*, 38: 325-339.
- Fisher, P.; Wood, J. and Cheng, T. (2004). Where is Helvellyn? Fuzziness of Multiscalar Landscape Morphometry, *Transactions of the Institute of British Geographer*, 29: 106-128.
- Frattini, P.; Crosta, G. and Carrara, A. (2010). Techniques for evaluating the Performance of Landslide susceptibility models, *Engineering Geology*, 111: 62-72.
- Gorum, T.; Gonencgil, B.; Gokceoglu, C. and Nefeslioglu, H.A. (2008). Implementation of reconstructed geomorphologic units in landslide susceptibility mapping: the Melen Gorge (NW Turkey), *Natural Hazards*, 46: 323-351.
- Guo, C.; Montgomery, D.R.; Zhang, Y.; Wang, K. and Yang, Z. (2015). Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China, *Geomorphology*, 248: 93-110.
- Guzzetti, F.; Reichenbach, P.; Ardizzone, F.; Cardinali, M. and Galli, M. (2006). Estimating the quality of Landslide susceptibility models, *Geomorphology*, 81: 166-184.
- Hoseinpour Milaghardan, A.; Delavar, M. and Chehreghan, A. (2016). Uncertainty in landslide occurrence prediction using Dempster-Shafer theory, *Model. Earth Syst. Environ*, DOI 10.1007/s40808-016-0240-5
- Hong, H.; Haghbi, S.A. and Pourghasemi, H.R. (2016). GIS-based landslide Spatial Modeling in Ganzhou City, China, *Arab J. Geosci Journal*, 9: 112.
- Javadi, M, Seddighi, M and Shaabanali, G. (2014). Evaluation of the Efficiency of Statistical Models of Information Values and Logistic Regression in the Preparation of Landslide Sensitivity Map in the Subbasin of Kala Area, *Soil Science Journal (Water and Soil Science)*, 28(1): 153-162. (in Persian).
- Jedari eyvazi, J. (2002). *Geomorphology of Iran*, Tehran, Payame Noor University Press. (in Persian).

- Jenness, J. (2002). Surface Areas and Ratios from Elevation Grid, Jenness Enterprises, [http:// www.Jennessent. Com,arcview,surface_areas. Htm](http://www.Jennessent.Com/arcview/surface_areas.Htm)(connected: 10.08.2003).
- Lacasee, S. and Nadim, F. (2009). Landslide risk assessment and mitigation strategy, *Landslide-Disaster risk reduction, Springer*, 12, 31-61.
- Lee, S. and Choi, J. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS and the Weight-of-evidenc model, *Intl. J. Geography. Information. Science.*, 18(8): 789-814.
- Maleki, A, Ahmadi, M and Miladi, B. (2012). Simulation of Gally areas using the SPI method in the Merg river basin, *Journal of Quantitative geomorphology research*, (3): 23-38. (in Persian).
- Mansori, M and Shirani, K. (2016). Landslide hazard zonation by entropy and control weight (Case study: DoAb Smassi area of Chaharmahal and Bakhtiari province), *Geosciences Quarterly*, 26(102): 267-280. (in Persian).
- Moghimi, E, Bagheri Sayedshokri, S and Safar Rad, T. (2012) Landslide hazard zonation using Entropy model (Case study: Nessar anticlinal northern Zagros), *Journal of Natural Geography Researches*. 79:77-90. (in Persian).
- Mohammadnegad Arogh, V and Asghari Serascanroud, S. (2016). Landslide hazard assessment using statistical methods in Barandozchiye catchment basin, , *Journal of Quantitative geomorphology research*, 4(4): 181-191. (in Persian).
- Mokarram, M and Negahban, S. (2014). Classification of Landforms Using the Topographic Position Index (TPI) (Case Study: Southern District of Darab City), *Quarterly Journal of Geographic Information*. 23(92): 57-65. (In Persian).
- Mokhtariasl, A and Ranjbariyan Shadbad, M. (2016). Landslide risk zonation and assessment using AHP Model in Bajillo basin, *Journal of Quantitative geomorphology research*, 4 (4): 119-133. (in Persian).
- Moore, I.D.; Gessler, P.E. and Peterson, G.A. (1993). Soil attributes prediction using terrain analysis, *Soil Sci. Society American J.*, 57(2): 443-452.
- Pourghasemi, H. R., H. R. Moradi, S. M. Fatemi Aghda, MahdaviFar, M.R and Mohammadi, M. (2012). Assessment of geomorphologic and geological factors in the preparation of a landslide risk map using fuzzy logic and hierarchical analysis method(Case Study: Part of the watershed of Haraz), *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 18(4): 1-20. (in Persian).
- Pourghasemi, H.; Pradhan, B.; Gokceoglu, C. and Deylami Moezzi, K. (2013). A comparative Assessment of prediction Capabilities of Dempster-Shafer and Weights-of-Evidence Models in Landslide Susceptibility Mapping Using GIS, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 4(2): 93-118.
- Pourghasemi, H.R.; Mohammady, M. and Pradhan, B. (2012). Lanslide Susceptibility mapping using index of entropy and Conditional probability models in GIS. Safarood Basin, Iran, *Catena*, 97: 71-84.
- Pourghasemi, H.R.; Moradi, H.R.; Fatemiaghda, S.; Gokceoglu, C. and Pradhan, B. (2014). GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran), *Arabian Journal of Geosciences*, 7(5): 1857-1878.
- Pike, R.J. (2000). Geomorphology-Diversity in quantitative surface analysis, *Progress in Physical Geography*, 24: 1-20.
- Regmi, N.R.; Giardion, J.R. and Vitek, J.D. (2010). Modeling Susceptibility to Landslides using the Weight of evidence approach: Western Colorado, USA, *Geomorphology*, 115: 172-187.
- Regmi, A.D.; Devkota, K.C.; Yoshida, K.; Pradhan, B.; Pourghasemi, H.R.; Kumamoto, T. and Akgun, A. (2014). Application of frequency ratio, statistical index, and weight-of-evidence models and

- their comparison in landslide susceptibility mapping in central Nepal Himalaya, *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2): 725-742.
- Riley, S. J., S. D. DeGloria, and R. Elliot. 1999. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences* 5:1° 4.
- Romer, C. and Ferentinou, M. (2016). Shallow landslide susceptibility assessment in a semiarid environment-A Quaternary catchment of KwaZulu-Natal, *South Africa. Engineering Geology*, 201: 29-44.
- Roustaei, S.H, Kodaiegheshlagh, L and Kodaiegheshlagh, F.(2014). Evaluation of Network Analysis (ANP) and Multi-criteria Localization Analysis in the Study of Land Landing Potential in the Damage Axis and Retention Area (Case Study: Qaleh Chay Dam), *Natural Geography Research*, 46(4): 495-508. (in Persian).
- Rozos, D.G.; Bathrellos, D. and Skillodimou, H.D. (2011). Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: a case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, *Greece. Environmental. Earth Science*, 63: 49-63.
- Samadi, M, Galali, S, Kornezadi, I, and Samadi Gheshlaghchaei, M. (2016). Investigation of morphometric indices in Chehelchay watershed in Golestan province using GIS, *Scientific Journal of Promotion Geodetic Engineering and Spatial Information*. 67-74. (In Persian).
- Shafer, G. (1976). *A mathematical theory of evidence*, Princeton University Press, 254 P.
- Sepehr, A, behniafar, A, Mohamadiyan, A and Abdolahi, A. (2013). Preparation of Landslide Susceptibility Scheme for Binalood North Slopes Based on Vicover's Aggregation Optimization Algorithm, *Journal of Quantitative geomorphology research*, 2(1): 19-36. (in Persian).
- 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.
- Shirani, K. (2018). Evaluation of the efficiency of geomorphometric factors in increasing the accuracy of landslide susceptibility zoning maps (Case study: Dezaliya basin, Isfahan province), *Journal of Geography and Environmental Planning*, University of Isfahan, 29(3): 111-130. (in Persian).
- Song, Y.; Gong, J.; Gao, S.; Wang, D.; Cui, T.; Li, Y. and Wei, B. (2012). Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides using Bayesian network: a case study in Beichuan, China, *Computers & Geosciences*, 42: 189-199.
- Swets, J.A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems, *Sci.*, 240: 1285-1293.
- Taymori yansari, Z, Hosainzadeh, R, Kaviyan, A and Pourghasemi, H.R. (2017). RDetermination of landslide sensitive zones using Shannon entropy method (Case study: Chardandange basin - Mazandaran province), *Geography and environmental hazards*, (22): 183-204. (in Persian).
- Terzaghi, K. (1950). *Mechanisms of Landslides*, Geotechnical Society of America, Berkeley, pp. 83-125.
- Yamani, M, Maghamimoghim, g, Arabameri, A and Shirani, K. (2017). Evaluation of the new hybrid model to increase the accuracy of landslide susceptibility mapping with an emphasis on GWR (Case study: Daz Olya Basin, Isfahan Province), *Journal of Quantitative geomorphology research*, 26(102): 19-40. (in Persian).
- Yosefi, T.(2010). The introduction of the Operating fault of the earthquake in the area of Norabad Mamasani, Geological Survey of Iran, Geological Survey and Mineral Exploration of the Southern Region (Shiraz). (in Persian).

- Vakhshoori, V. and Zare, M. (2016). Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzylogic, and frequency ratio methods, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(5): 1731-1752. <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2016.1144655>.
- Van Western, C.J. (2002). *Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping*, [lecture notes], Retrieved from [www. Adpe. Net,casita,casestudies](http://www.Adpe.Net/casita/casestudies), 21p.
- Wan, S. and Chang, S.H. (2014). Combined Particle swarm optimization and linear discriminant analysis for landslide image classification: Application to a case study in Taiwan Environ, *Earth Sci*, 72: 1453-1464. Doi: 10. 1007/s12665-014-3050-y.
- 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(3): 646-662.
- Wood, J. (1996). Scale-based characterization of digital elevation models, In: Parker, D. *Innovations in GIS*, Tayler and Francis, London, 163-175.
- Yelcin, A. (2008). GIS-based Landslide susceptibility mapping using analytical process and bivariate statistics in Ardesen(Turkey): comparisons of results and confirmations, *Catena*, 72: 1-12.
- Youssef, A. M.; Pourghasemi, H. R.; EI-Haddad, B.A. and Dhahry, B.K. (2016). Landslide susceptibility maps using different probabilistic and bivariate statistical models and comparison of their performance at Wadi Itwad Basin, Asir Region, Saudi Arabia, *Bull Eng Geol Environmental*, 75: 63-87.

