



پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، آنتروپی و روش تصمیم‌گیری تاپسیس (مطالعه موردی: حوزه فهلیان، فارس)

سید وحید رضوی ترمه^۱، کورش شیرانی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
۲. استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

| مشخصات مقاله | چکیده |
|--|---|
| پیشینه مقاله: دریافت: ۲۵ آذر ۱۳۹۶ پذیرش: ۳ آذر ۱۳۹۷ دسترسی اینترنتی: ۳۰ بهمن ۱۳۹۷ | شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش از طریق پهنه‌بندی خطر با مدل‌های مناسب، یکی از اقدامات اولیه در کاهش خسارات احتمالی و مدیریت خطر در حوزه‌های آبخیز کشور محسوب می‌شود. در این تحقیق، ۱۳ عامل شامل: ارتفاع، شیب، جهت شیب، بارندگی، انحنا، سطح، انحنا، آبراهه، شاخص توان آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص توان آبراهه (SPI)، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی به‌عنوان عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه تشخیص داده شدند. نقشه پراکنش زمین‌لغزش حوزه آبخیز با استفاده تصاویر ماهواره‌ای لندست ۲۰۱۷ و مطالعات میدانی (سال ۱۳۹۶) تهیه گردید. سپس پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی، آنتروپی و تاپسیس صورت گرفت. جهت ارزیابی نتایج از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. سطح زیر منحنی (AUC) به‌دست‌آمده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی، نشان‌دهنده دقت ۸۴٪ و ۸۷٪ و ۹۱ درصد به ترتیب برای مدل‌های آنتروپی، نسبت فراوانی و مدل تاپسیس است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌های آماری در مقایسه با مدل‌های تصمیم‌گیری و مبتنی بر کارشناسی است. نتایج این مطالعه می‌تواند به‌منظور مدیریت مناطق آسیب‌پذیر و کاهش خسارات آن استفاده گردد. |
| واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی زمین‌لغزش مدل نسبت فراوانی مدل آنتروپی مدل تاپسیس حوزه فهلیان- فارس | |

* پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: K_sh424@yahoo.com

مقدمه

تاکنون روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در کشور ارائه شده است.

حاتمی فرد و همکاران (۶) با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در شهرستان خرم‌آباد پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که معیارهای فاصله از جاده، فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه بیشترین تأثیر را بر وقوع زمین‌لغزش در این منطقه داشته‌اند و همچنین نتایج ارزیابی روش تحلیل سلسله مراتبی نشان‌دهنده روند صعودی شاخص زمین‌لغزش از پهنه‌های خیلی کم تا خیلی زیاد و دقت لازم مدل مذکور است.

عرب عامری و همکاران (۱۳) به ارزیابی روش‌های دمپسترشفر و نسبت فراوانی در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در منطقه سرخون کارون پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که معیارهای لیتولوژی، فاصله از جاده و ارتفاع بیشترین اهمیت در وقوع زمین‌لغزش در این منطقه را داشته‌اند و همچنین روش نسبت فراوانی با سطح زیر منحنی ۰/۹۲۷ دقت بالاتری نسبت به مدل دمپسترشفر (۰/۸۵۸) از خود نشان داده است.

جوادی و همکاران (۵) به مقایسه روش‌های مورا و وارسون و رگرسیون در پهنه بندی خطر زمین لغزش حوزه آبخیز کن پرداخت و نتایج نشان‌دهنده دقت بالاتر روش رگرسیون نسبت به روش‌های مورا و سوران می‌باشد. شیرانی (۱۰) به مدل‌سازی و ارزیابی مدل‌های احتمالاتی آنتروپی شانون و وزن شاهد تئوری بیزین در حوزه سرخون کارون پرداخت. بر طبق نتایج حاصل از تحقیق ایشان، معیار کاربری اراضی در هر دو روش دارای بیشترین تأثیر بر وقوع زمین‌لغزش می‌باشند و همچنین با توجه به منحنی تشخیص عملکرد نسبی، مدل آنتروپی با دقت ۰/۸۹ عملکرد بهتری نسبت به مدل وزن شاهد (۰/۸۲) داشته است.

بهشتی راد و همکاران (۳) به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل فاکتور اطمینان در حوزه آبخیز معلم کلایه پرداختند و نتایج ارزیابی مدل با دو روش ضریب همبستگی و روند توزیع کلاس‌های خطر نشان داد مدل فاکتور اطمینان برای حوزه آبخیز معلم کلایه مناسب می‌باشد.

مخاطرات طبیعی به‌عنوان پدیده‌ای بالقوه زیان‌بار مطرح است که مهم‌ترین آن‌ها حرکت‌های توده‌ای و زمین‌لغزش‌ها هستند (۱۶). این حرکت‌ها تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی رخ می‌دهند که شناخت این عوامل در بررسی پتانسیل، پیش‌بینی و پهنه‌بندی زمین‌لغزش نقش اساسی دارد. بخش بزرگی از کشور ایران را مناطق کوهستانی تشکیل می‌دهد، لذا زمین‌لغزش یکی از حوادث طبیعی است که سالانه خسارت جانی و مالی فراوانی به کشور وارد می‌سازد (۱۷). زمین‌لغزش موجب خسارت به انواع سازه‌های مهندسی، مناطق مسکونی، شریان‌های حیاتی، خطوط انتقال نیرو، جنگل‌ها، مراتع، زمین‌های کشاورزی، معادن و در پی آن ایجاد رسوب و سیلاب‌های گل‌آلود و در نهایت پر شدن مخازن سدها می‌گردد، افزون بر آن اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی ناشی از وقوع این پدیده، مانند مهاجرت و بیکاری را نباید نادیده گرفت (۹) و (۱۱). پدیده زمین‌لغزش سالانه در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران اتفاق می‌افتد. در ایران نیز در مورد خسارت ناشی از حرکات توده‌ای مطالعاتی صورت گرفته که طبق گزارش جمع‌بندی اطلاعات و خسارات مربوط به ۴۹۰۰ زمین‌لغزش از بانک اطلاعاتی تا پایان شهریورماه ۱۳۸۶، میزان خسارت ناشی از زمین‌لغزش ۱۲۶۸۹۳ میلیارد ریال برآورد گردیده است (۴). نظر به تأثیرات سویی که وقوع زمین‌لغزش‌ها بر روی منابع طبیعی، سکونتگاه‌های روستایی و شهری و تأسیسات و تجهیزات دارند و از سویی دیگر باعث فرسایش حجم قابل توجهی از خاک‌های با ارزش می‌شوند، لذا شناسایی اراضی مستعد و پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش، جهت اجتناب از این‌گونه اراضی و اجرای روش‌های کنترل‌کننده و پیشگیری‌کننده بسیار ضروری و با اهمیت است (۱ و ۲۹). بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان ابزار تحلیلی پایه در پهنه‌بندی وقوع زمین‌لغزش همراه با مدل‌های مناسب بسیار مؤثر است. یکی از اصلی‌ترین اقدامات در این رابطه تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش است (۳۰ و ۳۱).

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبریز رودخانه فهلیان با مساحت ۱۰۴۰ کیلومتر مربع در شمال غرب استان فارس و در طول جغرافیایی $51^{\circ}21'00''$ تا $51^{\circ}53'00''$ و عرض جغرافیایی $30^{\circ}28'00''$ و $30^{\circ}07'00''$ واقع شده است. طیف ارتفاعی حوزه از حداقل ۷۵۹ متر در نقطه خروجی تا ۲۹۰۳ متر در قله برم فیروز از ارتفاعات کوه رنج در شمال حوزه است. شهرستان‌های نورآباد ممسنی، رستم (مصیری)، سپیدان (اردکان) و همچنین بخش‌ها و روستاهای زیادی در این محدوده واقع شده‌اند. این منطقه در تقسیمات شش‌گانه و سی‌گانه حوزه‌های آبریز ایران به ترتیب در حوزه آبریز خلیج فارس و دریای عمان و همچنین در حوزه آبریز جراحی-زهره واقع شده است و بر اساس تقسیمات تماب شامل زیر حوزه‌های اردکان-چشمه سفید، کودیان-سرگاه، سرانجیلک، فهلیان و نورآباد ممسنی است. این حوزه از نظر زمین‌شناسی در زون زاگرس چین‌خورده-گسلیده (چین‌خورده ساده) واقع شده و گسل‌های کازرون، زاگرس، فهلیان-اردکان (سپیدان) از آن عبور می‌کنند. رخنمون‌هایی از سنگ‌های ژوراسیک تا کواترنر در این حوزه گسترش دارد که از قدیم به جدید شامل: آهک دولومیتی سورمه (ژوراسیک)، کربناتی فهلیان، شیلی گدوان، کربناتی داریان (به سن کرتاسه زیرین) و همچنین گروه بنگستان شامل سازندهای: شیلی کژدمی، آهکی سروک و ایلام (کرتاسه) می‌باشند. علاوه بر آن سازندهای شیلی-مارنی گورپی، آهک جهرم، شیلی-مارنی پابده، آهک آسماری و واحد شیلی و مارنی همراه با ترکیبات گچی سازند رازک و گروه فارس شامل سازندهای؛ واحد شیلی و مارنی همراه با ترکیبات گچی ژپس یا انیدریت‌دار سازند گچساران و ماسه‌سنگ همراه با مارن آغاچاری در حوزه گسترش دارند. سازندهای جوان‌تر حوزه نیز شامل کنگلومرای بختیاری و رسوبات کواترنر می‌باشند. منطقه مورد مطالعه به همراه نقاط لغزشی در شکل ۱ نشان داده شده است.

سوری و همکاران (۸) به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی در حوزه چم سنگر پرداختند و نتایج شاخص جمع مطلوبیت نشان داد که روش گاما فازی از دقت بالاتری نسبت به دیگر عملگرهای فازی برخوردار است.

بهاروند و سوری (۲) به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی در حوزه سپیددشت پرداختند و بر اساس نتایج حدود ۵۴ درصد از مساحت منطقه در طبقه حساسیت خیلی زیاد قرار گرفته است.

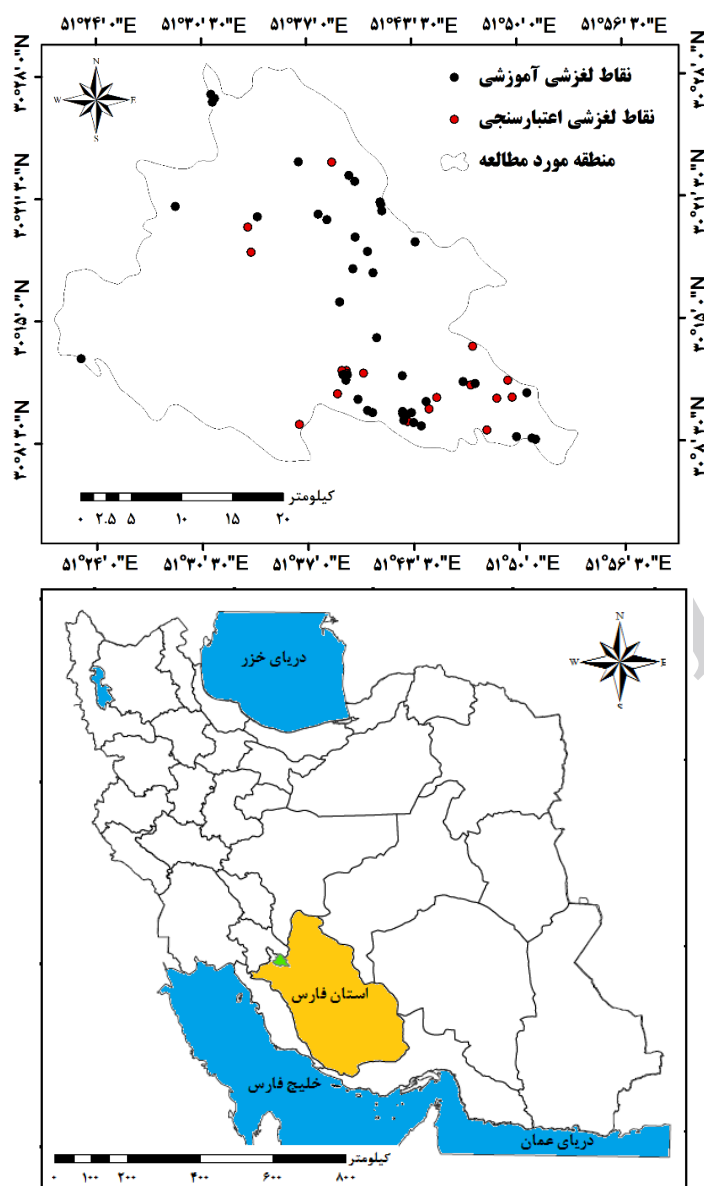
طالب و همکاران (۳۸) به تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل جنگل تصادفی در منطقه‌ای در کشور ایتالیا پرداختند. بر طبق نتایج ایشان مدل جنگل تصادفی با دقت ۰/۸۵ عملکرد خوبی در تهیه نقشه زمین‌لغزش از خود نشان داده است.

لی و همکاران (۲۶) با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان به تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در منطقه‌ای در کشور کره جنوبی پرداختند و نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی با دقت ۰/۷۸ دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان (۰/۷۲) است.

چن و همکاران (۱۸) به ارزیابی روش‌های جنگل تصادفی، درخت تصمیم و درخت بیزین در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در منطقه‌ای از کشور چین پرداختند و بر طبق نتایج مدل جنگل تصادفی از دقت بالاتری نسبت به دو مدل دیگر برخوردار است.

کداوی و همکاران (۲۴) با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین بگینگ، لوگیت باست و ادااست به تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در منطقه‌ای در کره جنوبی پرداختند و بر طبق نتایج به‌دست‌آمده مدل بگینگ با دقت ۰/۸۵ دارای دقت بالاتری نسبت به دو مدل دیگر می‌باشد.

هدف از تحقیق حاضر تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در حوزه آبریز رودخانه فهلیان در استان فارس با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس (TOPSIS) و مقایسه آن با مدل آماری نسبت فراوانی و آنتروپی است.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه به همراه نقاط لغزشی

مواد و روش‌ها

نقشه پراکنش زمین لغزش

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، لغزش‌های منطقه مشخص و پس از مطابقت با تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی رقومی و ذخیره گردید. بازدیدهای میدانی یکی از مهم‌ترین مراحل کار است که در فرآیند پژوهش و به منظور کنترل دقت مکانی لایه‌های اطلاعاتی

با مشاهدات سطح زمین و لغزش‌های حادث شده در حوزه بدان پرداخته شد. با استفاده از شناسنامه زمین لغزش‌های تهیه شده توسط مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، و مراجعه به سازمان زمین‌شناسی و سایت سازمان زمین‌شناسی اطلاعات موجود مربوط به زمین لغزش-های کل کشور جمع‌آوری و آن دسته از زمین لغزش‌های که بر اساس لایه اطلاعاتی سازمان زمین‌شناسی در محدوده حوزه مورد نظر قرار می‌گیرد با برداشت‌های میدانی و به کمک

فرساینده‌گی جریان بوده که با درجه شیب و مساحت حوزه آبخیز رابطه مستقیم دارد. بنابراین وقتی سرعت جریان سطحی افزایش یافته، در نتیجه شاخص توان آبراهه و ریسک فرسایش افزایش می‌یابد، در نتیجه حساسیت منطقه به وقوع حرکات توده‌ای بیشتر می‌شود (۲۵). شاخص توان آبراهه مطابق رابطه ۱ محاسبه گردید (۲۸).

$$SPI = A_s \times \tan \beta \quad [1]$$

در این رابطه؛ A_s و β به ترتیب نشان‌دهنده مساحت یک حوزه مشخص (m^2/m) و زاویه شیب (برحسب درجه) است. شاخص توان آبراهه در پنج کلاس کمتر از ۱۰۰، ۱۰۰-۲۰۰، ۲۰۰-۳۰۰، ۳۰۰-۴۰۰ و بیشتر از ۴۰۰ طبقه‌بندی گردید. رطوبت خاک و اشباع سطح نشان‌دهنده شاخص رطوبت توپوگرافی است که می‌تواند توپوگرافی محلی بر روی یک فرآیند هیدرولوژی را کنترل کند (۳۹ و ۴۰). شاخص رطوبت توپوگرافی مطابق رابطه ۲ محاسبه گردید (۲۸).

$$TWI = \ln \left(\frac{A_s}{\beta} \right) \quad [2]$$

در این رابطه؛ A_s و β به ترتیب نشان‌دهنده مساحت یک حوزه مشخص (m^2/m) و زاویه شیب (برحسب درجه) است. این معیار به پنج کلاس کمتر از ۳/۲۸، ۳/۲۸-۳/۹۹، ۳/۹۹-۴/۷۴، ۴/۷۴-۷۴/۶۷ و بیشتر از ۷۴/۶۷ طبقه‌بندی گردید. فاصله از رودخانه یکی از فاکتورهای کنترل‌کننده در پایداری شیب است. لایه فاصله از رودخانه با استفاده از لایه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ تهیه گردید. جاده‌ها وضعیت طبیعی و به‌عبارت‌دیگر شیب تعادل منطقه را به هم زده و بریدگی‌های عمودی به وجود می‌آورند همچنین بر بخش پایین جاده فشار اضافی وارد کرده و باعث افزایش زمین لغزش در نزدیکی جاده‌ها می‌شوند (۱۴ و ۲۹). لایه فاصله از جاده با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ تهیه گردید. گسل‌ها شکست‌های تکنونیک هستند که معمولاً باعث کاهش فشار بر روی سنگ می‌شوند. اما جابه‌جایی آن‌ها و افزایش فعالیت‌های آن‌ها اثرات مهمی را در پی دارد که زمین لغزش یکی از اثرات آن است (۱۷)

دستگاه GPS ثبت، مطابقت و تدقیق شده است. با استفاده از دستگاه GPS، ۶۱ نقطه یا پهنه لغزشی در سطح حوزه ثبت و وارد محیط ArcGIS®10.3 گردید و نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها از این طریق تهیه گردید که ۴۳ محل وقوع زمین لغزش (۷۰ درصد) جهت تهیه نقشه خطر زمین لغزش و ۱۸ محل وقوع زمین لغزش (۳۰ درصد) برای اعتبارسنجی مدل‌های مذکور مورداستفاده قرار گرفت (شکل ۱).

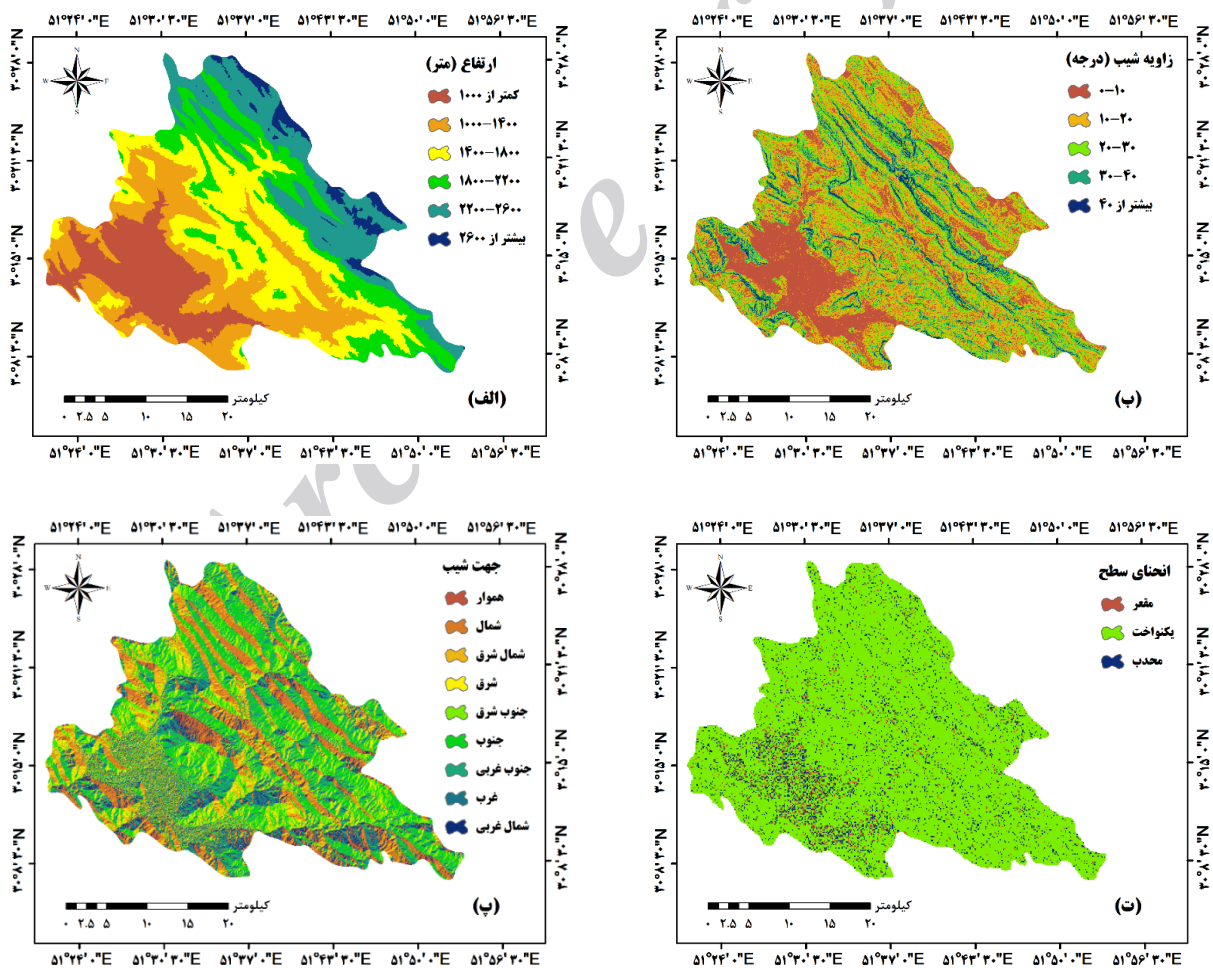
معیارهای تأثیرگذار بر زمین لغزش

شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش، مهم‌ترین مرحله پهنه‌بندی رویداد این خطر است (۵ و ۱۰). در این پژوهش به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، معیارهای ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، واحدهای سنگ‌شناسی، فاصله از آبراهه‌ها، فاصله از جاده، نوع کاربری اراضی، پوشش گیاهی، خاک و بارش مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا مدل ارتفاعی رقومی با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر با استفاده از تصاویر سنجنده LANDSAT-8 تهیه گردید و لایه‌های اطلاعاتی شیب، جهت شیب، شاخص توان آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنا سطح و انحنا آبراهه با استفاده از نرم‌افزار Global Mapper®16 و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۱۵ متری در محیط ArcGIS®10.3 تهیه شده است. ارتفاع عاملی است که به‌طور غیرمستقیم نقش تعیین‌کننده در عوامل وقوع زمین لغزش دارد، که از جمله این عوامل می‌توان به مقدار بارندگی، تغییرات دمایی، یخبندان و ذوب یخ، هوازگی فیزیکی و شیمیایی نام برد (۲۰ و ۴۲). زاویه شیب یکی از پارامترهای توپوگرافیکی خیلی مهم در کنترل رخداد زمین لغزش است و به این دلیل، این داده تقریباً در همه مطالعات حساسیت زمین لغزش و ارزیابی حساسیت و ریسک استفاده شده است (۳ و ۵).

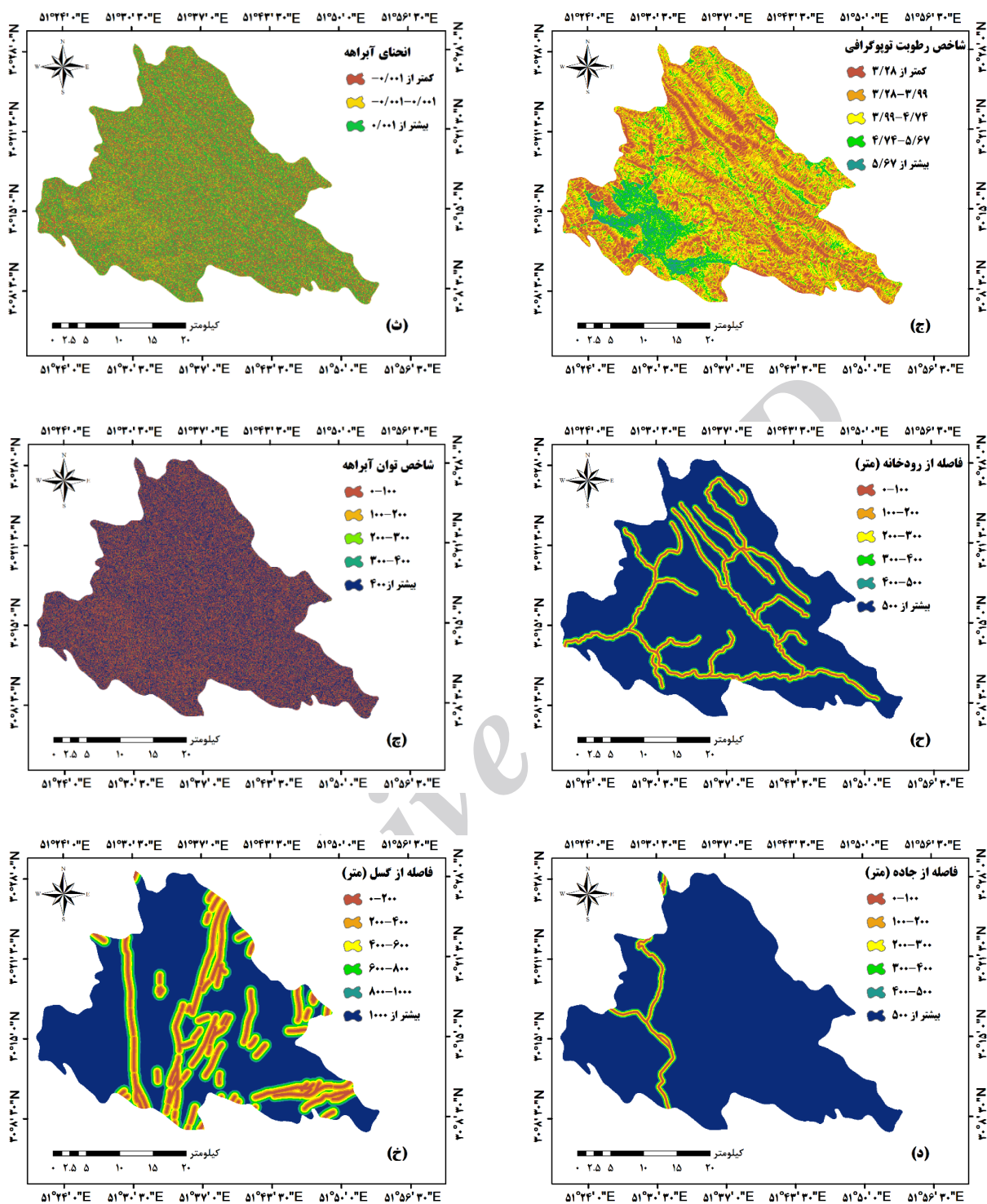
نقشه تهیه شده انحنا، در حقیقت انحنا مورفولوژیکی و توپوگرافیکی منطقه را نمایش می‌دهد. جهت شیب با توجه به سیستم باران‌زا و همچنین هم‌جهتی شیب دامنه با شیب لایه‌بندی دارای اهمیت است (۷). نقشه توان آبراهه بیانگر توان

جذر میانگین مربعات استفاده شد که روش کریجینگ از مقدار کمتر این شاخص نسبت به بقیه روش‌ها به منظور درون‌یابی بارندگی برخوردار بود. کاربری اراضی و پوشش گیاهی نقش مهمی در پایداری دامنه داشته و چندین تحقیق تأکید بر نقش مهم آن در بررسی خطر زمین‌لغزش داشته‌اند (۲۷ و ۳۴). نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از طریق تصویر Landsat-8 (OLI) تهیه گردید. به منظور طبقه‌بندی پوشش سطحی از الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر شباهت در نرم‌افزار Envi®4.5 استفاده گردید. معیارهای تأثیرگذار بر زمین‌لغزش در شکل ۲ نشان داده شده است.

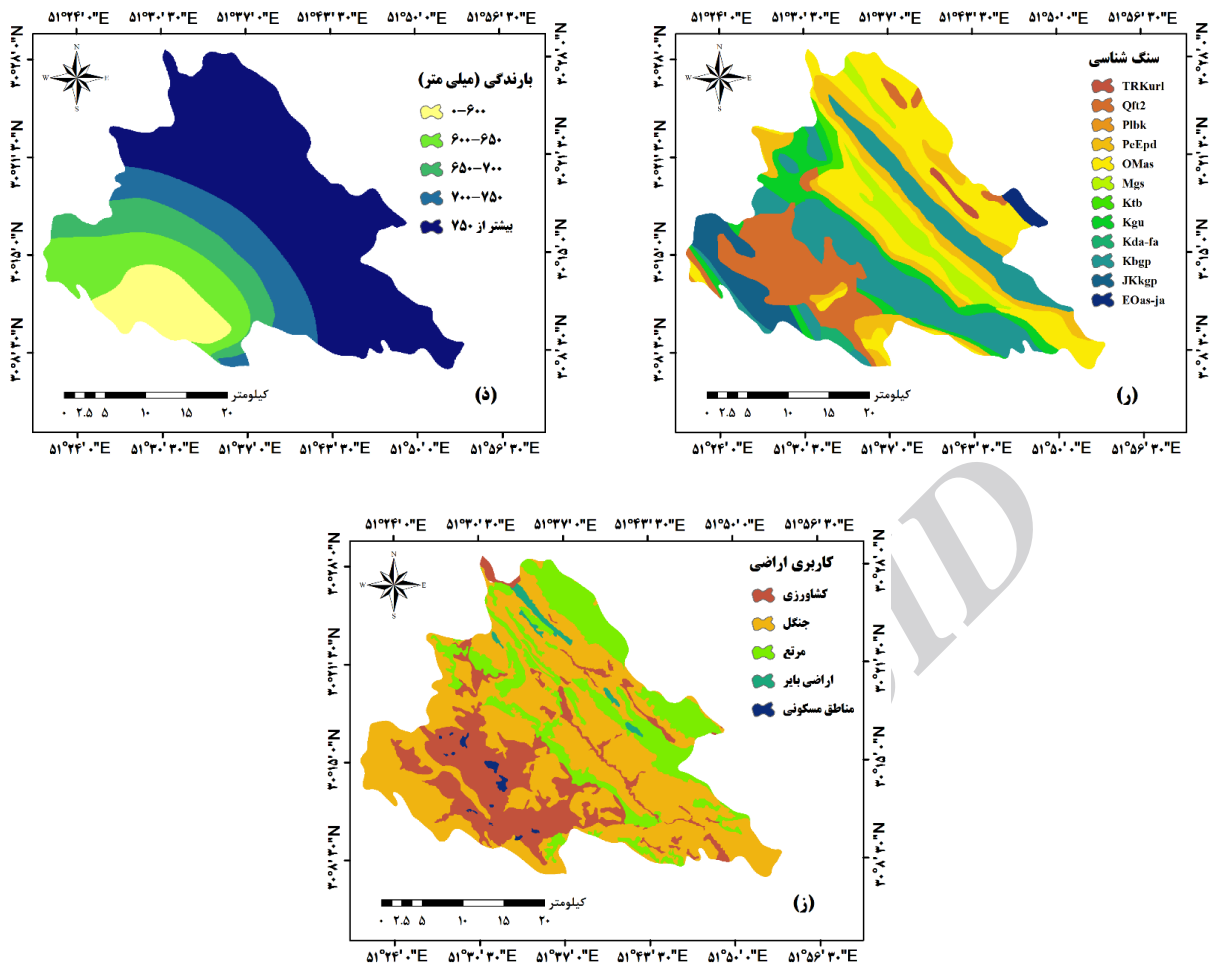
و ۱۹). لایه فاصله از گسل از نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه و استخراج گردید. سنگ‌شناسی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در مطالعه زمین‌لغزش‌ها است زیرا واحدهای سنگی مختلف دارای درجات حساسیت گوناگونی در بروز این پدیده هستند (۱۴ و ۲۲). نقشه سنگ‌شناسی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ایران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ به دست آمد. نقشه بارندگی با استفاده از آمار ۳۰ ساله ایستگاه‌های واقع و همچنین هم‌جوار حوزه مورد مطالعه و روش میانگینی کریجینگ در محیط نرم‌افزار Surfer اقدام به تهیه منحنی‌های هم‌باران سالیانه در حوزه مورد مطالعه گردید. به منظور انتخاب بهترین روش درون‌یابی، از شاخص خطای



شکل ۲. معیارهای تأثیرگذار بر زمین‌لغزش



ادامه شکل ۲. معیارهای تأثیرگذار بر زمین لغزش



ادامه شکل ۲. معیارهای تأثیرگذار بر زمین لغزش

در این رابطه؛ $Npix(SX_i)$ تعداد پیکسل‌هایی با زمین لغزش در کلاس i از معیار X است. $Npix(X_j)$ تعداد پیکسل‌های واقع در معیار X_j ، m تعداد کلاس‌های واقع در معیار X_i و n تعداد معیارها در منطقه مورد مطالعه است (۳۳).

مدل آنتروپی

آنتروپی یکی از رویکردهای مدیریتی است که به منظور برخورد با بی‌نظمی، بی‌ثباتی، اغتشاش و عدم یقین‌های موجود در یک سیستم ورد استفاده قرار می‌گیرد. رابطه یک‌به‌یکی بین کمیت و مقدار آنتروپی سیستم و درجه بی‌نظمی وجود دارد که اصول بولتزمن نامیده می‌شود که برای نمایش وضعیت ترمودینامیک یک سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنتروپی در حقیقت بیان‌گر آن است که چگونه از بین عوامل مؤثر یک

مدل نسبت فراوانی

برای محاسبه نسبت فراوانی هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، نقشه هر متغیر با نقشه فهرست زمین لغزش جهت محاسبه درصد پیکسل‌های لغزشی و فاقد لغزش منطقه مورد مطالعه قطع داده شد و نهایتاً نسبت فراوانی برای هر یک از عوامل و کلاس‌های مرتبط با آن از تقسیم نسبت مناطق لغزش (پیکسل‌هایی که در آن لغزش رخ داده) به مناطق فاقد لغزش (درصد پیکسل‌های فاقد لغزش) محاسبه و شاخص حساسیت لغزشی بر اساس رابطه ۳ انجام می‌گردد.

$$FR = \frac{Npix(SX_i)}{\sum_{i=1}^m SX_i} \div \frac{Npix(X_j)}{\sum_{j=1}^n Npix(X_j)} \quad [۳]$$

در گام دوم، ماتریس تصمیم با استفاده از روش های نرمال سازی، بی مقیاس می گردد. به این ترتیب هر کدام از مقادیر بر اندازه بردار مربوط به همان شاخص تقسیم می شود. نحوه بی مقیاس سازی ماتریس تصمیم بر اساس رابطه ۱۰ انجام می گردد.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad [10]$$

در گام سوم، یک بردار وزن به مقادیر ماتریس تصمیم بی مقیاس شده اختصاص می یابد که در رابطه ۱۱ نشان داده شده است.

$$v_{ij} = w_i r_{ij}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad [11]$$

در گام چهارم، راه حل ایده آل مثبت (A^*) و راه حل ایده آل منفی (A^-) به ترتیب طبق رابطه های ۱۲ و ۱۳ محاسبه گردید.

$$A^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\}, v^* = \{\max(v_{ij}), j \in J; \min(v_{ij}), j \in J'\} \quad [12]$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\}, v^- = \{\min(v_{ij}), j \in J; \max(v_{ij}), j \in J'\} \quad [13]$$

در گام پنجم، فاصله بین هر گزینه n بعدی را می توان به روش اقلیدسی سنجید. فاصله از راه حل مثبت و راه حل منفی به ترتیب در رابطه های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است.

$$s_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, i = 1, \dots, m \quad [14]$$

$$s_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, \dots, m \quad [15]$$

در گام ششم، نزدیکی نسبی به راه حل های ایده آل محاسبه گردید (رابطه ۱۶).

$$c_i^* = \frac{s_i^-}{(s_i^* + s_i^-)}, 0 < c_i^* < 1 \quad [16]$$

در نهایت بین وزن های به دست آمده رتبه بندی انجام می دهیم. مقادیر بزرگ تر نشان دهنده عملکرد بهتر و اولویت بالاتر می باشند (۲۱).

هدف، می توان مهم ترین عوامل را تخمین زد و یا به عبارتی متغیرهایی که بیشترین تأثیر را در رخداد یک واقعه دارند برای ما مشخص می نماید (۴۱). بنابراین تئوری مذکور می تواند به عنوان یک رویکرد مدیریتی تأثیر بسزایی در شناسایی عوامل مؤثر و میزان تأثیرگذاری آنها داشته باشد (۳۶). به منظور ارزیابی معیارها با استفاده از مدل آنتروپی از رابطه های ۴ تا ۸ استفاده شد (۱۵).

$$E_{ij} = \frac{FR}{\sum_{j=1}^n M_j} \quad [4]$$

$$H_j = -\sum_{i=1}^{S_j} (E_{ij}) \log_2(E_{ij}), j = 1, 2, \dots, n \quad [5]$$

$$H_{jmax} = \log_2 M_j \quad [6]$$

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}} \quad I = (0, 1), j = 1, 2, \dots, n \quad [7]$$

$$W_j = I_j \times FR \quad [8]$$

در این رابطه ها؛ FR نسبت فراوانی، E_{ij} احتمال تراکم، H_j و H_{jmax} مقادیر آنتروپی و ماکزیمم آنتروپی، I_j ضریب اطلاعات و M_j تعداد طبقه ها، W_j وزن نهایی هر معیار است. از مزایای روش آنتروپی در نظر گرفتن رابطه بین متغیرهای شرکت کننده در تهیه نقشه خطر زمین لغزش است. از معایب این روش بررسی نکردن وزن برای هر طبقه از معیارهای تأثیرگذار است.

روش تصمیم گیری تاپسیس

روش تاپسیس، یک روش تصمیم سازی بسیار تکنیکی و قوی برای اولویت بندی گزینه ها از طریق شبیه نمودن به جواب ایده آل است. در این روش، گزینه انتخاب شده بایستی کوتاه ترین فاصله را از جواب ایده آل و دورترین فاصله را از ناکارآمدترین جواب داشته باشد (۲۱).

در گام اول، ماتریس ارزیابی که شامل m گزینه و n شاخص است ساخته می شود. در این ماتریس x_{ij} مقدار عددی به دست آمده از تقاطع گزینه ها و شاخص هاست. ساختار این ماتریس به صورت رابطه ۹ ارائه شده است.

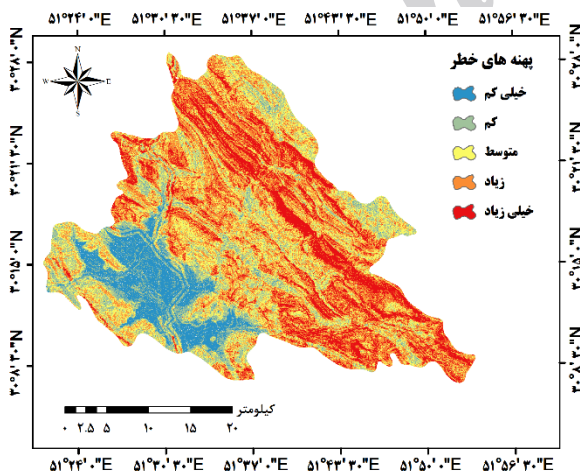
$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad [9]$$

نتایج

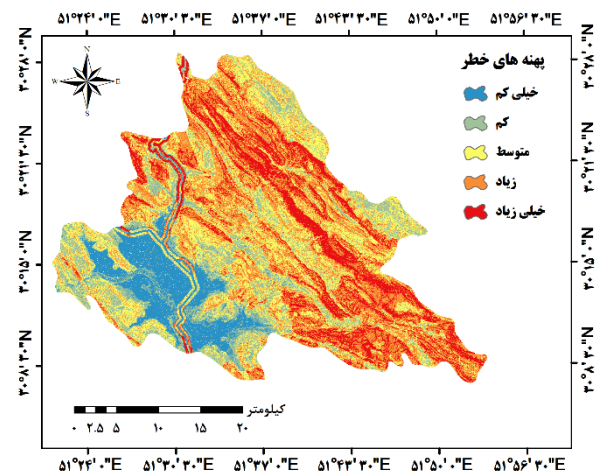
مدل نسبت فراوانی و مدل آنتروپی

نتایج رابطه مکانی بین وقوع زمین لغزش و عوامل مؤثر با استفاده از روش نسبت فراوانی و ضرایب روش آنتروپی در جدول ۱ نشان داده شده است. آنالیزهایی از نسبت فراوانی بین وقوع زمین لغزش و زاویه شیب نشان می‌دهد که بالاترین مقدار مربوط به طبقه شیب بیشتر از ۴۰ درجه (۲/۳۴) است. بر طبق رابطه‌ای که بین وقوع زمین لغزش و جهت شیب وجود دارد، اکثر زمین لغزش‌ها در مناطق جنوب قرار دارد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده، برای معیار ارتفاع بیشترین مقدار نسبت فراوانی (۱/۵۸) در ارتفاع ۱۴۰۰-۱۰۰۰ متر است. در شاخص رطوبت توپوگرافی طبقه ۳/۲۸-۳/۹۹ دارای بالاترین مقدار (۱/۳۳۹) و در شاخص توان آبراهه طبقه بیشتر از ۴۰۰-۳۰۰ متر دارای بیشترین مقدار نسبت فراوانی (۲/۶۴) است. در رابطه با عامل بارندگی بیشترین مقدار نسبت فراوانی مربوط به طبقه بیشتر از ۷۵۰ میلی‌متر با مقدار نسبت فراوانی (۱/۵۳۷) است. در رابطه با وقوع زمین لغزش و فاصله از رودخانه، بیشترین وقوع زمین لغزش مربوط به طبقه ۳۰۰-۲۰۰ متر با مقدار نسبت فراوانی (۱/۹۱) است و برای فاصله از جاده و

گسل به ترتیب بیشترین وقوع زمین لغزش مربوط به طبقه‌های بین ۸۰۰-۱۰۰۰ و ۴۰۰-۳۰۰ متر با نسبت فراوانی ۱/۹۱ و ۳/۲۵ است. بیشترین مقدار نسبت فراوانی مربوط به انحنا سطح مربوط به طبقه یکنواخت با مقدار ۱/۱۱ است و همچنین طبقه کمتر از ۰/۰۰۱- از عامل انحنا آبراهه دارای بیشترین مقدار نسبت فراوانی است. بیشترین مقدار مربوط به معیارهای سنگ‌شناسی و کاربری اراضی به ترتیب مربوط به طبقه‌های Kbgp و پهنه‌های اراضی بایر با مقادیر ۱/۹۱ و ۱/۸۷ است. بر طبق نتایج روش آنتروپی بیشترین تأثیرگذاری مربوط به معیارهای فاصله از جاده (۰/۴۳۶)، شاخص توان آبراهه (۰/۳۶۸) و بارندگی (۰/۲۵۹) است و پس‌از آن معیارهای کاربری اراضی (۰/۲۳۹)، زاویه شیب (۰/۲۲۷)، فاصله از رودخانه (۰/۲۰۵)، سنگ‌شناسی (۰/۲۰۷)، انحنا سطح (۰/۱۷۵)، ارتفاع (۰/۱۲۳)، شاخص رطوبت توپوگرافی (۰/۱۰۱)، فاصله از گسل (۰/۰۷۹)، انحنا آبراهه (۰/۰۵) و جهت شیب (۰/۰۴۱۶) قرار دارد. نقشه خطر زمین لغزش با استفاده از روش نسبت فراوانی و آنتروپی به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. نقشه خطر زمین لغزش با استفاده از روش نسبت فراوانی



شکل ۴. نقشه خطر زمین لغزش با استفاده از روش آنتروپی

جدول ۱. رابطه مکانی بین هر معیار مؤثر و محل زمین لغزش با استفاده از روش های نسبت فراوانی و آنتروپی

| معیار | طبقه | تعداد پیکسل | تعداد زمین لغزش | نسبت فراوانی | E_{ij} | H_j | H_{jmax} | I_j | W_j |
|---------------|--------------|-------------|-----------------|--------------|----------|-------|------------|-------|--------|
| ارتفاع | کمتر از ۱۰۰۰ | ۱۸۴۳۴۷ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲/۲۴۱ | ۲/۵۸۵ | ۰/۱۳۳ | ۰/۱۲۳ |
| | ۱۴۰۰-۱۰۰۰ | ۲۷۲۲۰۱ | ۱۶ | ۱/۵۸ | ۰/۲۸۴ | | | | |
| | ۱۸۰۰-۱۴۰۰ | ۲۷۸۷۷۲ | ۹ | ۰/۸۶۷ | ۰/۱۵۶ | | | | |
| | ۲۲۰۰-۱۸۰۰ | ۱۹۱۹۳۰ | ۶ | ۰/۸۴ | ۰/۱۵۱ | | | | |
| | ۲۶۰۰-۲۲۰۰ | ۱۹۱۴۵۰ | ۱۱ | ۱/۵۴ | ۰/۲۷۸ | | | | |
| بیشتر از ۲۶۰۰ | ۳۷۲۱۷ | ۱ | ۰/۷۲۲ | ۰/۱۳ | | | | | |
| شیب | ۱۰-۰ | ۳۱۰۴۶۱ | ۳ | ۰/۲۵۹ | ۰/۰۳۸ | ۱/۹۶۳ | ۲/۳۲۱ | ۰/۱۶۶ | ۰/۲۲۷ |
| | ۲۰-۱۰ | ۳۶۶۸۳۹ | ۵ | ۰/۳۶۶ | ۰/۰۵۳ | | | | |
| | ۳۰-۲۰ | ۲۸۵۴۸۹ | ۲۰ | ۱/۸۸ | ۰/۲۷۵ | | | | |
| | ۴۰-۳۰ | ۱۳۵۷۴۲ | ۱۰ | ۱/۹۸ | ۰/۲۸۹ | | | | |
| | بیشتر از ۴۰ | ۵۷۳۸۶ | ۵ | ۲/۳۴ | ۰/۳۴۲ | | | | |
| انحنای سطح | مقعر | ۴۴۹۸۲ | ۱ | ۰/۵۹۷ | ۰/۳۴۹ | ۰/۹۳۴ | ۱/۵۸۵ | ۰/۴۱ | ۰/۱۷۵ |
| | یکنواخت | ۱۰۱۶۳۵ | ۴۲ | ۱/۱۱ | ۰/۶۵ | | | | |
| | محدب | ۹۴۵۸۳ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | |
| جهت شیب | هموار | ۵۸۳۵۰ | ۳ | ۱/۳۷ | ۰/۱۷۱ | ۳/۰۲۲ | ۳/۱۶۹ | ۰/۰۴۶ | ۰/۰۴۱۶ |
| | شمال | ۱۶۷۹۱۷ | ۶ | ۰/۹۵ | ۰/۱۱۸ | | | | |
| | شمال شرق | ۱۰۶۰۰۲ | ۱ | ۰/۲۵ | ۰/۰۳۱ | | | | |
| | شرق | ۹۱۵۲۸ | ۳ | ۰/۸۷ | ۰/۱۰۹ | | | | |
| | جنوب شرق | ۱۷۰۳۰۴ | ۷ | ۱/۱۰۲ | ۰/۱۳۶ | | | | |
| | جنوب | ۲۵۰۱۱۱ | ۱۵ | ۱/۶ | ۰/۱۹۹ | | | | |
| | جنوب غرب | ۱۴۴۵۴۹ | ۵ | ۰/۹۲ | ۰/۱۱۵ | | | | |
| | غرب | ۱۰۱۵۱۵ | ۲ | ۰/۵۲ | ۰/۰۶۵۵ | | | | |
| | شمال غرب | ۶۲۷۸۷ | ۱ | ۰/۴۲ | ۰/۰۵۲۹ | | | | |
| بارندگی | ۶۰۰-۰ | ۳۸۹۹۷ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱/۲۵۳ | ۲/۳۲۱ | ۰/۴۵۹ | ۰/۲۵۹ |
| | ۶۵۰-۶۰۰ | ۵۵۹۵۶ | ۱ | ۰/۱۷۲ | ۰/۰۶۱۲ | | | | |
| | ۷۰۰-۶۵۰ | ۴۲۴۰۰ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | |
| | ۷۵۰-۷۰۰ | ۵۱۲۶۰ | ۶ | ۱/۱۱۳ | ۰/۳۹۴ | | | | |
| | بیشتر از ۷۵۰ | ۲۲۶۶۱۹ | ۳۶ | ۱/۵۳۷ | ۰/۵۴۴ | | | | |

ادامه جدول ۱. رابطه مکانی بین هر معیار مؤثر و محل زمین لغزش با استفاده از روش های نسبت فراوانی و آنتروپی

| W _j | I _j | H _{jmax} | H _j | E _{ij} | نسبت فراوانی | تعداد زمین لغزش | تعداد پیکسل | طبقه | معیار |
|----------------|----------------|-------------------|----------------|-----------------|--------------|-----------------|-------------|----------------|------------------|
| ۰/۰۷۹ | ۰/۰۸ | ۲/۵۸۵ | ۲/۳۷۵ | ۰/۱۳۹ | ۰/۸۳۵ | ۳ | ۹۶۵۰۳ | ۲۰۰-۰ | فاصله از گسل |
| | | | | ۰/۰۴۵ | ۰/۲۷۴ | ۱ | ۹۷۷۸۴ | ۴۰۰-۲۰۰ | |
| | | | | ۰/۰۹۸ | ۰/۵۹ | ۲ | ۹۱۰۴۳ | ۶۰۰-۴۰۰ | |
| | | | | ۰/۲۳ | ۱/۳۷ | ۴ | ۷۸۱۴۱ | ۸۰۰-۶۰۰ | |
| | | | | ۰/۳۱ | ۱/۸۵ | ۵ | ۷۲۳۱۴ | ۱۰۰۰-۸۰۰ | |
| ۰/۱۷۴ | ۱/۰۴۵ | ۲۸ | ۷۲۰۱۳۲ | بیشتر از ۱۰۰۰ | | | | | |
| ۰/۲۰۵ | ۰/۲۴۲ | ۲/۵۸۵ | ۱/۹۵۹ | ۰/۸۹۸ | ۰/۴۵۶ | ۱ | ۵۸۸۶۳ | ۱۰۰-۰ | فاصله از رودخانه |
| | | | | ۰/۱۰۲ | ۰/۵۲ | ۱ | ۵۱۶۵۳ | ۲۰۰-۱۰۰ | |
| | | | | ۰/۳۷۶ | ۱/۹۱ | ۴ | ۵۶۱۵۱ | ۳۰۰-۲۰۰ | |
| | | | | ۰/۲۲۲ | ۱/۱۳۱ | ۲ | ۴۷۵۱۹ | ۴۰۰-۳۰۰ | |
| | | | | ۰ | ۰ | ۰ | ۵۲۹۶۲ | ۵۰۰-۴۰۰ | |
| ۰/۲۰۸ | ۱/۰۵۸ | ۳۵ | ۸۸۸۷۷۱ | بیشتر از ۵۰۰ | | | | | |
| ۰/۰۵ | ۰/۰۷۲۶ | ۱/۵۸۵ | ۱/۴۶۹ | ۰/۵۲۷ | ۱/۴۶۹ | ۲۷ | ۴۹۳۸۶۰ | کمتر از ۰/۰۰۱ | انحنای آبراهه |
| | | | | ۰/۲۴۴ | ۰/۶۸۱ | ۵ | ۱۹۷۱۹۳ | -۰/۰-۰۰۱/۰۰۱ | |
| | | | | ۰/۲۲۸ | ۰/۶۳۶ | ۱۱ | ۴۶۴۸۶۳ | بیشتر از ۰/۰۰۱ | |
| ۰/۴۳۶ | ۰/۲۶۸ | ۲/۵۸۵ | ۱/۸۹ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۱۳۰۸ | ۱۰۰-۰ | فاصله از جاده |
| | | | | ۰/۲۸۹ | ۲/۸۲ | ۱ | ۹۵۱۸ | ۲۰۰-۱۰۰ | |
| | | | | ۰/۲۷۷ | ۲/۷ | ۱ | ۹۹۳۴ | ۳۰۰-۲۰۰ | |
| | | | | ۰/۳۳۳ | ۳/۲۵ | ۱ | ۸۲۶۶ | ۴۰۰-۳۰۰ | |
| | | | | ۰ | ۰ | ۰ | ۹۰۲۴ | ۵۰۰-۴۰۰ | |
| ۰/۰۹۹۵ | ۰/۹۷ | ۴۰ | ۱۱۰۷۸۶ | بیشتر از ۵۰۰ | | | | | |
| ۰/۳۶۸ | ۰/۳۹۳ | ۲/۳۲۱ | ۱/۴۰۸ | ۰/۱۷۳ | ۰/۸۱۲ | ۱۸ | ۵۹۵۵۶۱ | ۱۰۰-۰ | شاخص توان آبراهه |
| | | | | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۰۲۷۷ | ۲۰۰-۱۰۰ | |
| | | | | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۰۹۲۸ | ۳۰۰-۲۰۰ | |
| | | | | ۰/۵۶۵ | ۲/۶۴ | ۱ | ۱۰۱۴۸ | ۴۰۰-۳۰۰ | |
| | | | | ۰/۲۶ | ۱/۲۱۹ | ۲۴ | ۵۲۹۰۰۳ | بیشتر از ۴۰۰ | |

ادامه جدول ۱. رابطه مکانی بین هر معیار مؤثر و محل زمین لغزش با استفاده از روش های نسبت فراوانی و آنتروپی

| معیار | طبقه | تعداد پیکسل | تعداد زمین لغزش | نسبت فراوانی | E_{ij} | H_j | H_{jmax} | I_j | W_j |
|----------------------|----------------|-------------|-----------------|--------------|----------|-------|------------|--------|--------|
| کاربری اراضی | کشاورزی | ۲۵۰۶۶۷ | ۳ | ۰/۳۲۱ | ۰/۰۷۹ | ۱/۶۲۷ | ۲/۳۲۱ | ۰/۲۹۸ | ۰/۲۳۹ |
| | جنگل | ۶۳۸۶۷۱ | ۳۶ | ۱/۵۱۵ | ۰/۳۷۴ | | | | |
| | مناطق مسکونی | ۶۸۷۹ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | |
| | مرتع | ۲۴۵۸۹۵ | ۳ | ۰/۳۲۸ | ۰/۰۸۱ | | | | |
| شاخص رطوبت توپوگرافی | اراضی بایر | ۱۴۳۱۶ | ۱ | ۱/۸۷ | ۰/۴۶۴ | | | | |
| | کمتر از ۳/۲۸ | ۲۶۵۱۰۳ | ۱۰ | ۱/۰۱۴ | ۰/۲۵۲ | ۱/۹۶۹ | ۲/۳۲۱ | ۰/۱۵۱ | ۰/۱۰۱ |
| | ۳/۳-۲۸/۹۹ | ۳۸۱۲۵۷ | ۱۹ | ۱/۳۳۹ | ۰/۳۳۱ | | | | |
| | ۳/۴-۹۹/۷۴ | ۲۹۰۳۴۲ | ۹ | ۰/۸۳۳ | ۰/۲۰۷ | | | | |
| | ۴/۵-۷۴/۶۷ | ۱۶۱۱۹۲ | ۵ | ۰/۸۳۳ | ۰/۲۰۷ | | | | |
| بیشتر از ۵/۶۷ | ۵۸۰۲۳ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | | |
| انحنای آبراهه | کمتر از ۰/۰۰۱ | ۴۹۳۸۶۰ | ۲۷ | ۱/۴۶۹ | ۰/۵۲۷ | ۱/۴۶۹ | ۱/۵۸۵ | ۰/۰۷۲۶ | ۰/۰۵ |
| | ۰/۰-۰۰۱/۰۰۱ | ۱۹۷۱۹۳ | ۵ | ۰/۶۸۱ | ۰/۲۴۴ | | | | |
| | بیشتر از ۰/۰۰۱ | ۴۶۴۸۶۳ | ۱۱ | ۰/۶۳۶ | ۰/۲۲۸ | | | | |
| سنگ شناسی | OMas | ۲۸۹۴۸۳ | ۱۰ | ۰/۹۲۹ | ۰/۱۶۵ | ۲/۰۴۴ | ۳/۵۸۵ | ۰/۴۲۹ | ۰/۲۰۰۷ |
| | EOas-ja | ۱۱۶۴۵ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | |
| | peEpd | ۱۵۷۴۲۶ | ۱۰ | ۱/۷ | ۰/۳۰۴ | | | | |
| | Qft2 | ۱۷۶۱۸۲ | ۱ | ۰/۱۵۲ | ۰/۰۲۷ | | | | |
| | Kgu | ۹۶۱۲۸ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | |
| | Mgs | ۵۹۵۲۳ | ۲ | ۰/۹۰۳ | ۰/۱۶ | | | | |
| | Kbgp | ۲۸۰۱۱۸ | ۲۰ | ۱/۹۲ | ۰/۳۴۲ | | | | |
| | Ktb | ۱۱۸۴۴ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | |
| | JKkqp | ۶۰۰۳۸ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | |
| | TRKurl | ۶۴۲۷ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | |
| Plbk | ۴۳۰ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | | |
| Kda-fa | ۷۲۶۷ | ۰ | ۰ | ۰ | | | | | |

مدل تاپسیس

در این تحقیق از وزن های به دست آمده از ۱۳ معیار اصلی در روش آنتروپی جهت حل تاپسیس و رتبه بندی گزینه ها استفاده گردید. پردازش داده ها در محیط ArcGIS انجام گردید و برای اجرای مدل تاپسیس از نرم افزار Matlab استفاده گردید. به دلیل اینکه خروجی این مدل دارای ۱۸۹۵۶۴ سطر است،

جهت نشان دادن مقادیر مربوط به این معیارها و دیگر پارامترهای محاسبه شده با این روش، ۱۰ نقطه به طور تصادفی انتخاب می گردد. مقادیر اولیه این ۱۰ نقطه در جدول ۲ نشان داده شده است. در گام بعد بی مقیاس سازی بین مقادیر معیارها و ضرب این مقادیر در وزن های به دست آمده از روش آنتروپی انجام گردید. مرحله بی مقیاس سازی با استفاده از رابطه های ۱۰

محاسبه شد (جدول ۵). نهایتاً با استفاده از رابطه ۱۶، نزدیکی نسبی به راه‌حل ایده‌آل (C_i^*) محاسبه و رتبه‌بندی بین گزینه‌ها انجام گردید (جدول ۵). وزن‌های به‌دست‌آمده از این روش به جدول توصیفی از لایه ترکیبی الحاق می‌گردد و نقشه خطر زمین‌لغزش در محیط GIS ترسیم گردید (شکل ۵).

و ۱۱ انجام و نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۳ نشان داده‌شده است. در گام بعد با توجه به رابطه‌های ۱۲ و ۱۳، راه‌حل ایده‌آل مثبت (A^*) و راه‌حل ایده‌آل منفی (A^-) محاسبه گردید (جدول ۴). سپس با استفاده از رابطه‌های ۱۴ و ۱۵، مقادیر فاصله از راه‌حل مثبت (S_i^*) و فاصله از راه‌حل منفی (S_i^-)

جدول ۲. مقادیر اولیه عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش

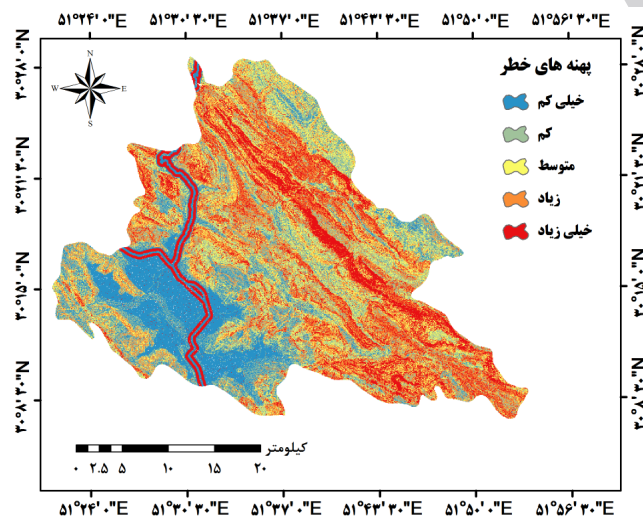
| شماره | بارندگی | ارتفاع | انحنای آبراهه | انحنای سطح | کاربری اراضی | سنگ-شناسی | فاصله از گسل | فاصله از رودخانه | زاویه شیب | شاخص توان آبراهه | شاخص رطوبت توپوگرافی | جهت شیب | فاصله از جاده |
|-------|---------|--------|---------------|------------|--------------|-----------|--------------|------------------|-----------|------------------|----------------------|---------|---------------|
| ۱ | ۹۹ | ۵۵ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۳۵ | ۹۷ | ۵ | ۴۶ | ۹۹ | ۱۰۰ | ۲۹ |
| ۲ | ۹۹ | ۵۵ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۰ | ۹۷ | ۷۷ | ۴۶ | ۹۹ | ۴۹ | ۲۹ |
| ۳ | ۹۹ | ۵۵ | ۴۳ | ۱۰۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۳۵ | ۹۷ | ۵ | ۳۰ | ۹۹ | ۱۰۰ | ۲۹ |
| ۴ | ۹۹ | ۵۵ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۳۵ | ۹۷ | ۵ | ۴۶ | ۹۹ | ۶۲ | ۲۹ |
| ۵ | ۹۹ | ۵۵ | ۴۶ | ۱۰۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۰ | ۵۳ | ۵ | ۳۰ | ۶۲ | ۴۹ | ۲۹ |
| ۶ | ۹۹ | ۵۵ | ۴۶ | ۱۰۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۳۵ | ۹۷ | ۵ | ۳۰ | ۶۲ | ۴۹ | ۲۹ |
| ۷ | ۹۹ | ۵۵ | ۴۳ | ۱۰۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۳۵ | ۹۷ | ۵ | ۴۶ | ۶۲ | ۲۰ | ۲۹ |
| ۸ | ۹۹ | ۵۵ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۳۵ | ۹۷ | ۰ | ۴۶ | ۶۲ | ۴۹ | ۲۹ |
| ۹ | ۹۹ | ۵۵ | ۴۶ | ۱۰۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۳۵ | ۹۷ | ۰ | ۴۶ | ۶۲ | ۲۰ | ۲۹ |
| ۱۰ | ۹۹ | ۵۵ | ۴۳ | ۰ | ۲۴ | ۴۸ | ۳۵ | ۹۷ | ۰ | ۳۰ | ۶۲ | ۲۰ | ۲۹ |

جدول ۳. مقادیر بی‌مقیاس شده معیارها و راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی (۱۰ نقطه از ۱۸۹۵۶۴ نقطه)

| شماره | بارندگی | ارتفاع | انحنای آبراهه | انحنای سطح | کاربری اراضی | سنگ‌شناسی | فاصله از گسل | فاصله از رودخانه | زاویه شیب | شاخص توان آبراهه | شاخص رطوبت توپوگرافی | جهت شیب | فاصله از جاده |
|-------|---------|---------|---------------|------------|--------------|-----------|--------------|------------------|-----------|------------------|----------------------|----------|---------------|
| ۱ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۶ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۸ |
| ۲ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۶ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۸ |
| ۳ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۸ |
| ۴ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۶ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۸ |
| ۵ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۱۱ | ۰/۰۰۰۸ |
| ۶ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۸ |
| ۷ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۸ |
| ۸ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۶ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۸ |
| ۹ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۸ |
| ۱۰ | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۱۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۸ |
| A* | ۰/۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۰۷ | ۰/۰۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۰۲۱ | ۰/۰۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۰۱۸ | ۰/۰۰۰۰۳ |
| A- | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |

جدول ۴. مقادیر مربوط به S_i^* ، S_i^- و C_i^* (۱۰ نقطه از ۱۸۹۵۶۴ نقطه)

| شماره | S_i^* | S_i^- | C_i^* |
|-------|---------|---------|---------|
| ۱ | ۰/۰۰۲۶۹ | ۰/۰۰۱۷۷ | ۰/۳۹۷ |
| ۲ | ۰/۰۰۲۵۶ | ۰/۰۰۱۹۱ | ۰/۴۲۷ |
| ۳ | ۰/۰۰۲۸۵ | ۰/۰۰۱۶ | ۰/۳۵۹ |
| ۴ | ۰/۰۰۲۶۹ | ۰/۰۰۱۷۵ | ۰/۳۹۳ |
| ۵ | ۰/۰۰۲۸۸ | ۰/۰۰۱۵۲ | ۰/۳۴۶ |
| ۶ | ۰/۰۰۲۸۶ | ۰/۰۰۱۵۸ | ۰/۳۵۶ |
| ۷ | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۰۰۱۷۴ | ۰/۳۹۲ |
| ۸ | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۰۰۱۷۵ | ۰/۳۹۲ |
| ۹ | ۰/۰۰۲۷ | ۰/۰۰۱۷۴ | ۰/۳۹ |
| ۱۰ | ۰/۰۰۲۹ | ۰/۰۰۱۵۱ | ۰/۳۴۲ |



شکل ۵. نقشه خطر زمین لغزش با استفاده از روش تاپسیس

صحت سنجی

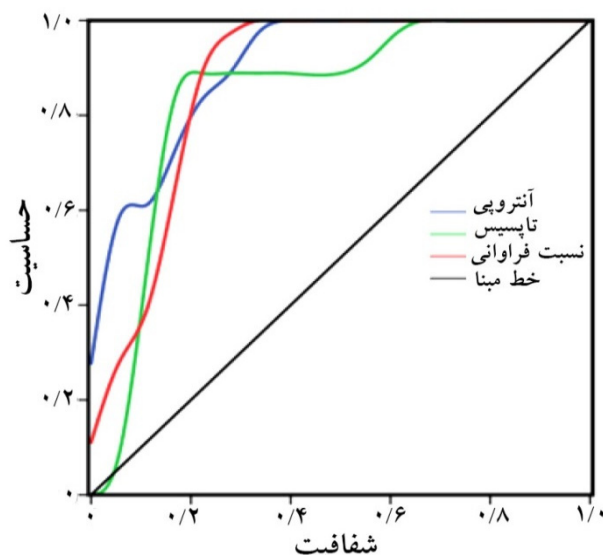
به منظور ارزیابی مدل های تهیه شده، از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شده است (۳۱). منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش هاست (۳۷ و ۴۰). شاخص عملکرد نسبی، منحنی است که مؤلفه قائم و افقی آن به ترتیب از رابطه های ۱۷ و ۱۸ محاسبه گردید که از ماتریس مقایسه با تعریف حد آستانه بین صفر و یک به دست می آیند. مقادیر مربوط به درصد واقعیت صحیح و درصد واقعیت کذب نمودار بر طبق رابطه های ۱۷ و ۱۸ محاسبه گردید (۲۳).

$$X = 1 - \left[\frac{TN}{TN+FP} \right] \quad [17]$$

$$Y = \left[\frac{TP}{TP+FN} \right] \quad [18]$$

منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) بیانگر مقدار پیش بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقوع رخداد (وقوع زمین لغزش) و عدم وقوع رخداد (عدم وقوع زمین لغزش) آن است. نتایج به دست آمده نشان دهنده دقت ۹۱ درصد برای مدل آنتروپی، دقت ۸۷/۷ درصد برای مدل نسبت فراوانی و دقت ۸۴ درصد برای روش تاپسیس است. نتایج به دست آمده نشان دهنده دقت

خیلی خوب (۰/۹-۰/۰) این سه مدل در تهیه نقشه خطر زمین لغزش است. نمودار ROC مربوط به مدل‌ها در شکل ۶ و مساحت زیر منحنی به همراه انحراف استاندارد و سطح اطمینان مدل‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۶. منحنی نرخ پیش‌بینی ROC نقشه‌های خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های آنتروپی، نسبت فراوانی و تاپسیس

جدول ۵. مساحت زیر منحنی به همراه استاندارد و سطح اطمینان آن

| فواصل اطمینان در سطح ۰/۹۵ | | سطح اطمینان | خطای استاندارد | سطح زیر منحنی | روش احتمالاتی |
|---------------------------|----------|-------------|----------------|---------------|---------------|
| حد بالا | حد پایین | | | | |
| ۱/۰۰۱ | ۰/۸۲ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۴۶ | ۰/۹۱۰ | آنتروپی |
| ۰/۹۸۷ | ۰/۶۹۲ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۷۵ | ۰/۸۴ | تاپسیس |
| ۱ | ۰/۷۵۳ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۶۳ | ۰/۸۷۷ | نسبت فراوانی |

جهت شیب، بارندگی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، انحنای سطح، انحنای آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی انتخاب و در محیط GIS آماده گردید. اولویت‌بندی عوامل مؤثر با استفاده از مدل آنتروپی نشان داد که لایه‌های فاصله از جاده، شاخص توان آبراهه و بارندگی بیشترین تأثیر؛ و عوامل جهت شیب، انحنای آبراهه و فاصله از گسل کمترین تأثیر را بر وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند. جهت ارزیابی مدل‌های مورد نظر از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده گردید. دقت‌های به‌دست آمده از روش‌های آنتروپی، نسبت فراوانی و تاپسیس به

بحث و نتیجه‌گیری

زمین لغزش به‌عنوان یکی از بلایای طبیعی، می‌تواند باعث اثرات فاجعه‌انگیزی بر رو زیرساخت‌های شهری داشته باشد. در حقیقت، زمین لغزش می‌تواند اثراتی بر روی چشم‌اندازهای طبیعی در یک منطقه، مانند تغییر جهت رودخانه و تنوع اقلیمی داشته باشد. زمین لغزش یک مسئله اساسی است که باید به‌طور دقیق مطالعه و مفاهیم آن بررسی گردد. در این تحقیق، از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس و مدل‌های نسبت فراوانی و آنتروپی به‌منظور تهیه نقشه خطر زمین لغزش در حوضه آبریز رودخانه فهلیان در استان فارس استفاده گردید. بدین منظور معیارهای تأثیرگذار بر زمین لغزش، از جمله ارتفاع، زاویه شیب،

بارندگی در وقوع زمین لغزش است زیرا با افزایش ارتفاع میزان بارندگی بیشتر شده و حساسیت وقوع لغزش ها بیشتر می شود اما این روند در ارتفاعات بالا به علت اینکه بارندگی معمولاً به صورت برف بوده و غالب بودن پدیده یخبندان در بخش بزرگی از سال باعث کندی پدیده خاکزایی شده و همچنین عدم وجود آب کافی برای اشباع سازندها و کاهش دخالت های انسانی در طبیعت و در ارتفاعات بالا، از دلایل کاهش زمین لغزش در ارتفاعات است که مطابق تحقیقات سالریان و همکاران (۳۵) است. بررسی جهت شیب نشان می دهد که بیشترین مقدار نسبت فراوانی در منطقه در جهت جنوب رخ داده که دلیل آن جهت وزش بادهای باران آور منطقه است. نتایج تحلیل کاربری اراضی نشان داده که بیشترین زمین لغزش در مناطق جنگلی اتفاق افتاده است که می توان این موضوع را به نفوذ بیشتر آب در مناطق جنگلی و عدم توجه به اصول جاده سازی در کاربری های جنگلی نسبت داد (۲۷ و ۳۴). نتایج به دست آمده نشان دهنده دقت بالاتر مدل آنتروپی نسبت به مدل های نسبت فراوانی و تاپسیس است. علت بالا بودن دقت در روش آنتروپی نسبت به دو روش دیگر، استفاده از مقادیر روش نسبت فراوانی و ترکیبی بودن این روش نسبت به روش دیگر است. نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از تحقیقات جعفری و همکاران (۲۳) و شیرانی (۱۰) مطابقت دارد. همچنین دقت بالاتر روش های آماری نسبت به روش های تصمیم گیری از دیگر نتایج این تحقیق است.

منابع مورد استفاده

۱. اکبری، ا.، ع. درویشی بلورانی و ن. نیسانی سامانی. ۱۳۹۶. تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل تلفیقی فازی- فرآیند تحلیل شبکه ای. سنجش ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۸(۳): ۷۳-۸۸.
۲. بهاروند، س. و س. سوری. ۱۳۹۴. پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوزه سپیددشت، لرستان). سنجش ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۶(۴): ۳۱-۱۵.

ترتیب ۹۱ درصد، ۸۷/۷ درصد و ۸۴ درصد است. بر اساس نتایج به دست آمده، روش آنتروپی جهت پهنه بندی خطر زمین لغزش این منطقه مناسب است.

در بررسی ارتباط بین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش ها با استفاده از مدل نسبت فراوانی، عامل شیب نشان داد بیشترین ارتباط لغزش ها با کلاس بیشتر از ۴۰ درجه شیب را نشان داده است و طبقه شیب ۰ تا ۱۰ درجه کمترین اثر را داشته است. در شیب های کم به علت اینکه معمولاً نیروهای مقاوم مانند اصطکاک خاک بیشتر از نیروهای محرک مانند نیروی ثقل است ناپایداری دامنه ای اتفاق نمی افتد اما در شیب های بالا به علت ویژگی های اقلیمی و پوشش گیاهی شرایط خاک سازی در این درجه از شیب کاملاً مهیا بوده که به بالا بودن نیروی ثقل و دخالت عوامل انسانی شرایط برای وقوع لغزش های بیشتر را فراهم می آورد که با نظرات پورقاسمی و همکاران (۴) مطابقت دارد. نتایج حاصل از انطباق نقشه فاصله از آبراه ها با وقوع زمین لغزش ها نشان داد بیشترین مقدار نسبت فراوانی مربوط به طبقه فواصل ۲۰۰ تا ۳۰۰ متر از آبراه ها اتفاق افتاده است زیرا آبراه ها بر اثر فرسایش رودخانه ای و سایش دیواره کنار رودخانه باعث به هم خوردن تعادل شیب و در نتیجه ناپایداری دامنه های مشرف به رودخانه می گردد. شاخص توان آبراهه نیز گویای این بحث است زیرا در مناطقی که توان آبراهه بیشتر می گردد تأثیر آن بر وقوع زمین لغزش ها بیشتر می شود که با نتایج پرادهان و همکاران (۳۲) مطابقت دارد. نتایج حاصل از معیار فاصله از جاده نشان می دهد که بیشترین مقدار نسبت فراوانی مربوط به طبقه ۴۰۰-۳۰۰ متر است که مطابق نظرات زارع و همکاران (۴۲) است.

در بررسی نقش عامل بارندگی با وقوع لغزش ها، نتایج نشان داد بیشترین همبستگی بین طبقه بارندگی بیشتر از ۷۰۰ میلی متر بوده و از طرفی ارتباط تنگاتنگی بین میزان بارندگی و ارتفاع وجود دارد به طوری که هرچه ارتفاع حوضه بیشتر می گردد میزان لغزش ها افزایش پیدا می کند که بیشترین مقدار نسبت فراوانی در ارتفاع ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰ متر قرار داشته است. این روند همان طور که در نتایج نشان داده شده نشان دهنده نقش

- توانمندی زمین لغزش مطالعه موردی حوزه آبخیز شیروود. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱(۲): ۳۹-۵۲.
۱۲. عرب عامری، ع و ک. شیرانی. ۱۳۹۵. اولویت بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه بندی خطر آن با استفاده از تئوری احتمالاتی دمپستر شفر، مطالعه موردی: حوزه ونک سمیرم، استان اصفهان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۸(۱): ۱۰۶-۹۳.
۱۳. عرب عامری، ع، ک. شیرانی و خ. رضایی. ۱۳۹۶. پهنه بندی استعداد اراضی نسبت به وقوع زمین لغزش با روش های دمپستر-شیفر و نسبت فراوانی در حوزه سرخون کارون. مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۴(۳): ۵۷-۴۱.
14. Aghdam IN, Varzandeh MHM, Pradhan B. 2016. Landslide susceptibility mapping using an ensemble statistical index (Wi) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model at Alborz Mountains (Iran). *Environmental Earth Sciences*, 75(7): 553-563.
15. Bednarik M, Magulová B, Matys M, Marschalko M. 2010. Landslide susceptibility assessment of the Kral'ovany-Liptovský Mikuláš railway case study. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(3-5): 162-171.
16. Burton I, Kates RW. 2004. The perception of natural hazards in resource management. *International Library of Critical Writing in Economics*, 178: 53-82.
17. Chen W, Pourghasemi HR, Zhao Z. 2017. A GIS-based comparative study of Dempster-Shafer, logistic regression and artificial neural network models for landslide susceptibility mapping. *Geocarto International*, 32(4): 367-385.
18. Chen W, Zhang S, Li R, Shahabi H. 2018. Performance evaluation of the gis-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve bayes tree for landslide susceptibility modeling. *Science of the Total Environment*, 644: 1006-1018.
19. Devkota KC, Regmi AD, Pourghasemi HR, Yoshida K, Pradhan B, Ryu IC, Dhital MR, Althuwaynee OF. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural Hazards*, 65(1): 135-165.
20. Ding Q, Chen W, Hong H. 2017. Application of frequency ratio, weights of evidence and evidential belief function models in landslide susceptibility mapping. *Geocarto International*, 32(6): 619-639.
21. Dong S. 2016. Comparisons between different multi-criteria decision analysis techniques for
۳. بهشتی راد، م، س. فیض نیا، ع. سلاجقه و ع. احمدی. ۱۳۸۸. بررسی کارایی مدل پهنه بندی خطر زمین لغزش فاکتور اطمینان (CF) (مطالعه موردی: حوزه آبخیز معلم کلایه). فصلنامه جغرافیایی طبیعی، ۲(۵): ۲۸-۱۹.
۴. پورقاسمی، ح. ر. ح. ر. مرادی، س. م. فاطمی عقدا، م. ر. مهدوی فر و م. محمدی. ۱۳۸۸. ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از روش تصمیم گیری چندمعیاره فازی. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۳(۸): ۶۳-۵۱.
۵. جوادی، م. ر. ه. پهرانی پور، ش. غ. غلامی و م. ع. فتاحی اردکانی. ۱۳۹۱. مقایسه روش های مورا و وارسون و رگرسیون چند متغیره در پهنه بندی خطر زمین لغزش حوزه آبخیز کن. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۳(۵): ۱۰۵-۹۲.
۶. حاتمی فرد، ا. س. ح. موسوی و ع. علی مرادی. ۱۳۹۱. پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل AHP و GIS در شهرستان خرم آباد. نشریه جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۳(۳): ۶۰-۴۳.
۷. سوری، س. غ. لشکری پور، م. غفوری و ط. فرهادی نژاد. ۱۳۹۰. پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوزه کشوری نوزیان). مجله زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت معلم، ۲۵(۲): ۱۲۶۹-۱۲۸۶.
۸. سوری، س. س. بهاروند و ط. فرهادی نژاد. ۱۳۹۲. پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: حوزه چم سنگر). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۴(۴): ۶۰-۴۷.
۹. شیرانی، ک. س. چاووشی و ج. غیومیان. ۱۳۸۵. بررسی و ارزیابی روش های پهنه بندی خطر زمین لغزش در پادنا علیا سمیرم. مجله پژوهش علوم دانشگاه اصفهان، ۲۳(۱): ۳۸-۲۷.
۱۰. شیرانی، ک. ۱۳۹۶. مدل سازی و ارزیابی پتانسیل حساسیت اراضی نسبت به لغزش با استفاده از مدل های احتمالاتی آنتروپی شانون و وزن شاهد تئوری بیزین (مطالعه موردی: حوزه سرخون کارون). نشریه علوم آب و خاک، ۲۱(۱): ۵۱-۶۸.
۱۱. عبادی نژاد، س. ع. م. یمانی، م. مقصودی و ص. شادفر. ۱۳۸۶. ارزیابی کارایی عملگرهای منطق فازی در تعیین

33. Regmi AD, Devkota KC, Yoshida K, Pradhan B, Pourghasemi HR, Kumamoto T, Akgun A. 2014. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2): 725-742.
34. Reichenbach P, Mondini A, Rossi M. 2014. The influence of land use change on landslide susceptibility zonation: the Briga catchment test site (Messina, Italy). *Environmental Management*, 54(6): 1372-1384.
35. Salarian T, Zare M, Jouri MH, Miarrostami S, Mahmoudi M. 2014. Evaluation of shallow landslides hazard using artificial neural network of Multi-Layer Perceptron method in Subalpine Grassland (Case study: Glandrood watershed-Mazandaran). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 7(11): 795-804.
36. Sharma L, Patel N, Ghose M, Debnath P. 2012. Influence of Shannon's entropy on landslide-causing parameters for vulnerability study and zonation-a case study in Sikkim, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(3): 421-431.
37. Su C, Wang L, Wang X, Huang Z, Zhang X. 2015. Mapping of rainfall-induced landslide susceptibility in Wencheng, China, using support vector machine. *Natural Hazards*, 76(3): 1759-1779.
38. Taalab K, Cheng T, Zhang Y. 2018. Mapping landslide susceptibility and types using Random Forest. *Big Earth Data*: 1-20.
39. Tien Bui D, Tuan TA, Hoang N-D, Thanh NQ, Nguyen DB, Van Liem N, Pradhan B. 2017. Spatial prediction of rainfall-induced landslides for the Lao Cai area (Vietnam) using a hybrid intelligent approach of least squares support vector machines inference model and artificial bee colony optimization. *Landslides*, 14(2): 447-458.
40. Xu C, Xu X, Dai F, Xiao J, Tan X, Yuan R. 2012. Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui river watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region. *Journal of Earth Science*, 23(1): 97-120.
41. Yufeng S, Fengxiang J. 2009. Landslide stability analysis based on generalized information entropy. In: *Environmental Science and Information Application Technology, 2009. ESIAT 2009. International Conference on. IEEE*, pp 83-85.
42. Zare M, Pourghasemi HR, Vafakhah M, Pradhan B. 2013. Landslide susceptibility mapping at Vaz Watershed (Iran) using an artificial neural network model: a comparison between multilayer perceptron (MLP) and radial basic function (RBF) algorithms. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(8): 2873-2888.
- disease susceptibility mapping. Student thesis series INES. 145 pp.
22. García-Rodríguez MJ, Malpica J, Benito B, Díaz M. 2008. Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression. *Geomorphology*, 95(3-4): 172-191.
23. Jaafari A, Najafi A, Pourghasemi H, Rezaeian J, Sattarian A. 2014. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(4): 909-926.
24. Kadavi P, Lee C-W, Lee S. 2018. Application of ensemble-based machine learning models to landslide susceptibility mapping. *Remote Sensing*, 10(8): 1252.
25. Lanni C, Borga M, Rigon R, Tarolli P. 2012. Modelling shallow landslide susceptibility by means of a subsurface flow path connectivity index and estimates of soil depth spatial distribution. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11): 3959-3971.
26. Lee S, Lee M-J, Jung H-S. 2017. Data mining approaches for landslide susceptibility mapping in Umyeonsan, Seoul, South Korea. *Applied Sciences*, 7(7): 683.
27. Leventhal AR, Kotze GP. 2008. Landslide susceptibility and hazard mapping in Australia for land-use planning-with reference to challenges in metropolitan suburbia. *Engineering Geology*, 102(3-4): 238-250.
28. Moore ID, Grayson RB. 1991. Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. *Water Resources Research*, 27(6): 1177-1191.
29. Ngadisih, Bhandary NP, Yatabe R, Dahal RK. 2016. Logistic regression and artificial neural network models for mapping of regional-scale landslide susceptibility in volcanic mountains of West Java (Indonesia). In: *AIP Conference Proceedings*, vol 1. AIP Publishing, p 060001.
30. Pourghasemi HR, Jirandeh AG, Pradhan B, Xu C, Gokceoglu C. 2013. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan province, Iran. *Journal of Earth System Science*, 122(2):349-69.
31. Pourghasemi HR, Mohammady M, Pradhan B. 2012. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*, 97: 71-84.
32. Pradhan B. 2013. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, 51: 350-365.



Landslide hazard zoning using frequency ratio, entropy methods and TOPSIS decision making methods (Case study: Fahliyan basin, Fars)

S. V. Razavi¹, K. Shirani^{2*}

1. PhD Student of GIS, Department of Geodesy & Geomatics, Khajeh Nasir Toosi University of Technology

2. Assist. Prof. Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Agricultural Research, Education & Extension Organization (AREEO)

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 December 2017

Accepted 24 November 2018

Available online 19 February 2019

Keywords:

Landslide zoning

Frequency ratio model

Entropy model

Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method

Fahliyan basin-Fars

ABSTRACT

Distinguishing the susceptible areas to landslide using appropriate experimental models of landslide susceptibility mapping is one of the primitive and basic works to reduce probable damages and reduce risk in country's watersheds. In this research, thirteen factors, including altitude, slope, aspect, rainfall, plan curvature, profile curvature, Topographic Wetness Index (TWI), Stream power index (SPI), distance from the river, distance from road, distance from the fault, lithology, and land use are identified as effective parameters in landslide occurrence in the studied area. The landslide distribution map was prepared using Landsat 2017 satellite imagery and Field studies (2017). Then, the landslide susceptibility mapping was performed with three methods, including frequency ratio, entropy and TOPSIS. The results were evaluated using receiver operating characteristic (ROC) curve. The area under the curve (AUC) of applied models shows the accuracy of 84, 87.7, and 91 percent for entropy frequency ratio and TOPSIS models, respectively. The results are indicative statistical models have a better accuracy in comparison with MCDM models and expert approaches. The results of the present study could be useful for better managing the flood affected areas and to reduce its damage.

* Corresponding author e-mail address: K_sh424@yahoo.com