

پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز-ANP (مطالعه موردی: کرانه جنوبی حوضه آبریز اهر چای از روستای نصیرآباد تا سد ستارخان)

موسی عابدینی- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
شهرام روستائی- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز
محمدحسین فتحی*- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۶/۲۶

چکیده

نقشه‌های حساسیت وقوع زمین‌لغزش یکی از مهم‌ترین ابزارهای لازم برای برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران محیطی به‌ویژه در مناطق کوهستانی است. در این پژوهش، پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در کرانه جنوبی حوضه آبریز اهر چای از روستای نصیرآباد تا سد ستارخان با استفاده از روش تحلیل شبکه‌ای بر پایه زمین‌لغزش‌های رخ داده در گذشته که به‌وسیله روش شی گرا استخراج و شناسایی گردیده است، و تئوری احتمالات شرطی (قضیه بیز)، مورد مطالعه قرار گرفته است. تئوری بیز، به‌عنوان مدلی سودمند و آزمایش‌شده در زمینه‌های مختلف، همچون مطالعه حرکات توده‌ای، تحقیقات معدنی و نقشه‌کشی چشمه‌های آب زیرزمینی می‌باشد. جهت وزن دهی به لایه‌ها در این روش‌ها، از ۱۰ پارامتر شیب زمین (به درجه)، جهت شیب، کاربری زمین، سنگ‌شناسی، بارش، شاخص تراکم پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص طول شیب (LS)، شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)، شاخص قدرت آبراهه (SPI)، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه استفاده شده است. تعداد ۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها (۲۵ عدد) برای اجرای مدل و ۳۰ درصد (۱۰ عدد) دیگر برای اعتبارسنجی به‌کاررفته است. نتایج حاصله از روش مذکور و اعتبارسنجی میدانی مؤید دقت شناسایی ۷۱.۱۱٪ و دقت کلاس‌بندی ۹۱.۴٪ می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده ۳۴/۰۲ درصد از اراضی محدوده مورد مطالعه از پتانسیل بسیار بالایی برای وقوع زمین‌لغزش برخوردار می‌باشند. همچنین، درصد قابل‌توجهی از زمین‌لغزش‌ها در طبقه با حساسیت زیاد (۵۷/۰۵) قرار دارند. لذا می‌توان گفت دقت مدل‌های بکار رفته در پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش قابل‌قبول و خوب است.

واژگان کلیدی: پهنه‌بندی، زمین‌لغزش، قضیه بیز، فرآیند تحلیل شبکه، اهر چای

مقدمه

ایران با توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت‌های زمین ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، شرایط متنوع زمین‌شناسی و اقلیمی، عمده شرایط طبیعی برای ایجاد طیف وسیعی از زمین‌لغزش‌ها را داراست. زمین‌لغزش در ایران به‌عنوان یک سانحه طبیعی، سالانه ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت مالی به کشور وارد می‌سازد (یمانی و همکاران، ۱۳۹۱). از این رو، کاهش اثرات بلایای طبیعی به‌ویژه زمین‌لغزش به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم پیشروی برنامه‌ریزان کاربری زمین و سیاست‌گذاران این عرصه باقی‌مانده است (گوئتز^۱ و همکاران ۲۰۱۵: ۱). لذا لازم است تا تصمیمات جدی در این زمینه اتخاذ شود. از راهکارهای مناسب در جهت کاهش زیان‌های مالی و جانی مخاطراتی نظیر زمین‌لغزش، شناسایی و پهنه‌بندی زمین بر اساس قابلیت وقوع آن است. در یک عبارت ساده می‌توان گفت که حساسیت وقوع زمین‌لغزش (LS)^۲ در واقع احتمال رخداد زمین‌لغزش در یک ناحیه بر اساس وضعیت محلی زمین است (براب^۳، ۱۹۸۴: ۳۰۸). مدل‌هایی که برای تهیه نقشه‌های حساسیت وقوع زمین‌لغزش استفاده می‌شوند می‌توانند با تمرکز بر روی کاهش خطر وقوع زمین‌لغزش سطح تصمیمات برنامه ریزان فضایی را بالا برده و از آن پشتیبانی کنند. در حال حاضر برای مدل‌سازی فضایی و پیش‌بینی وقوع زمین‌لغزش سطح گسترده‌ای از روش‌های کمی وجود دارد که توسط افراد مختلفی صورت گرفته و از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

یمانی و همکاران (۱۳۸۴)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را با استفاده از روش سلسله‌مراتبی انجام دادند. نیک‌اندیش بررسی نقش عوامل هیدرو اقلیم در وقوع حرکات توده‌ای در حوزة کارون میانی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در این حوزه را ارائه داده است. انطباق نقشه رسوب زایی و نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ارتباط نزدیک میان رتبه خطر و میزان رسوب زایی از نتایج مهم این تحقیق بوده است. نیازی و همکاران (۱۳۸۹)، حوضه سد ایلام را با استفاده از مدل آماری دومتغیره پهنه‌بندی کردند نتایج کار نشان داد که روش تراکم سطح، وزن متغیرها و ارزش اطلاعاتی به ترتیب بیش‌ترین دقت را در تفکیک کلاس‌های خطر زمین‌لغزش داشته‌اند. قرهی و همکاران (۱۳۹۰)، زمین‌لغزش مخزن سد البرز را با استفاده از مدل‌های دومتغیره آماری و AHP بررسی کردند، نتایج کار نشان داد که روش شاخص آماری تصویر واقعی‌تری از پراکندگی حساسیت زمین‌لغزش نسبت به روش وزن دهی به عامل‌ها دارد. روستایی و احمدزاده در سال (۱۳۹۱)، مناطق متأثر از خطر زمین‌لغزش را در جاده تبریز- مرند با استفاده از سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی پهنه‌بندی کردند و به این نتیجه رسیدند که ساختار خاص زمین‌شناختی، شرایط اقلیم محلی و نیز تراکم نهشته‌های کواترنری (در هر دو طرف جاده) در کنار عامل گرادیان شیب، از عوامل اصلی بروز زمین‌لغزش است که ساخت‌وسازهای انسانی آن را تشدید می‌کند. اسفندیاری و همکاران (۱۳۹۳)، در پژوهشی با استفاده از زمین‌لغزش‌های ثبت‌شده، پارامترهای طبیعی و مدل قضیه بیز پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را برای حوضه سیاهرود انجام دادند. با توجه به نقشه به‌دست‌آمده و نیز وزن کلاس‌های هر یک از پارامترها، کلاس تراس‌های آبرفتی قدیمی و مخروط افکنه‌های مرتفع در لایه سازند، مرتع متوسط در بین کلاس‌های کاربری زمین، جهات شمالی و شمال غربی، شیب‌های ۲۰-۵ درجه و نیز فاصله ۱۰۰-۰ متر از رودخانه بیشترین وزن و تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه دارند. دقت نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از یک سوم (۳۰ نقطه لغزشی) مناطق لغزشی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه ارزیابی نشان داد که مدل با قابلیت پیش‌بینی ۸۳/۳ درصد زمین‌لغزش‌ها در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد، دقت قابل قبولی در ارزیابی و تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش دارد. عابدینی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل‌های آماری دومتغیره و منطق فازی پهنه‌بندی پتانسیل

^۱ - goetz

^۲ - landslide Susceptibility

^۳ - Brabb

زمین‌لغزش را برای حوضه رودخانه بالخلو انجام دادند. در این پژوهش نقشه‌های بدست آمده از مدل‌ها با شاخص زمین‌لغزش مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت مشخص شد که مدل‌های ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح و منطق فازی به ترتیب بیشترین قابلیت را برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش در منطقه دارند. اکسوی و ارکانگلو^۱ (۲۰۱۲) با استفاده از منطق فازی و تصاویر ماهواره‌ای تشخیص و شناسایی زمین‌لغزش‌های غرب دریای سیاه را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج کار نشان داد که عملکرد گامی فازی از نظر دقت نسبت به سایر توابع عضویت فازی با وضع موجود تطابق بیشتری دارد. پیاسنتینیا^۲ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل تئوری بیزین پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش را برای جنوب منطقه تیرو^۳ در کشور ایتالیا انجام دادند. نتایج پژوهش نشان داد که نقشه حساسیت زمین‌لغزش برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها با درصد بالایی (۷۵٪) قابل اطمینان است. گوئتر و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی توانایی مدل‌های الگوریتم SVM و آماری را در مدل‌سازی زمین‌لغزش مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج کار نشان داد که به‌طور کلی، چارچوب این نوع ارزیابی مدل را می‌توان برای کمک به انتخاب یک روش مدل‌سازی مناسب برای زمین‌لغزش اعمال کرد. از دیگر کارهای صورت گرفته در این زمینه می‌توان به کارهای پژوهشی امیر احمدی و همکاران (۱۳۸۹)، یمانی و همکاران (۱۳۹۱)، میرنظری و همکاران (۱۳۹۳)، رحیم‌زاده و علایی طالقانی (۱۳۹۴)، متو^۴ و همکاران (۲۰۰۷) و محمدی و همکاران (۲۰۱۲) اشاره کرد. در این پژوهش، کرانه جنوبی حوضه آبریز اهر چای از روستای نصیرآباد تا سد ستارخان، از نظر احتمال وقوع زمین‌لغزش مورد ارزیابی قرار گرفته است. این منطقه به دلیل دستکاری‌های گسترده صورت گرفته در آن و نیز شرایط طبیعی حاکم، از نظر وقوع زمین‌لغزش بسیار مستعد می‌باشد. وقوع زمین‌لغزش‌های سطحی گسترده (۳۵ زمین‌لغزش بزرگ) در این منطقه نشانگر همین موضوع است. با توجه به این امر ضرورت دارد که منطقه فوق با استفاده از یکی از روش‌های مناسب از نظر قابلیت وقوع زمین‌لغزش پهنه‌بندی شود. مدل در نظر گرفته‌شده برای انجام این کار یک مدل ترکیبی از روش‌های آماری (قضیه بیز) و مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (فرآیند تحلیل شبکه ANP) می‌باشد که از این نظر نگرشی نو در امر پهنه‌بندی پتانسیل زمین‌لغزش است، چرا که تاکنون این دو مدل به‌صورت ترکیبی برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش استفاده نشده‌اند.

منطقه مورد مطالعه

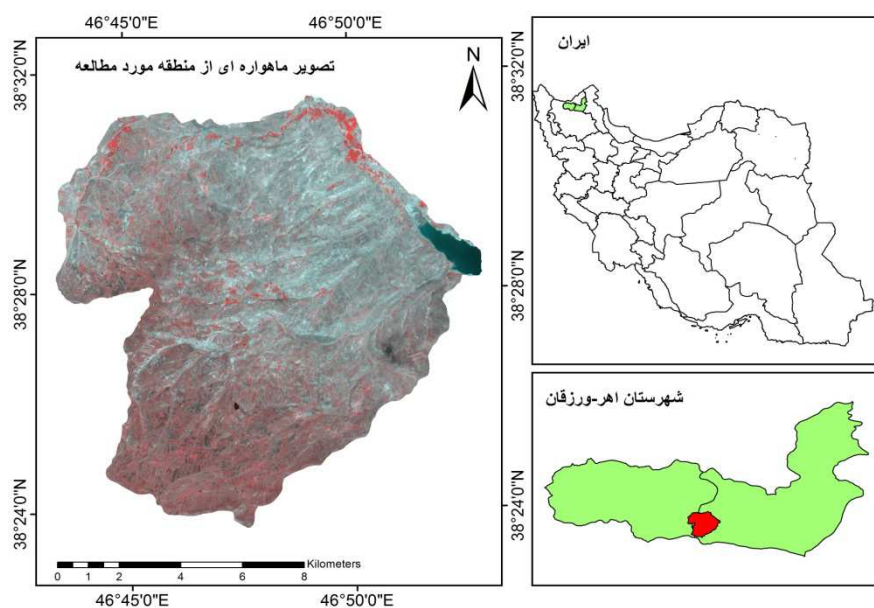
محدوده مورد مطالعه بخشی از کناره‌های جنوبی رودخانه اهر چای از روستای نصیرآباد ورزقان تا سد ستارخان در موقعیت جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). محدوده مورد مطالعه، واحد کوهستان شمالی که رشته‌کوه‌های قره داغ را شامل می‌شود. این واحد ارتفاع ۱۹۰۰ متر به بالا را شامل می‌شود، و کوه قاباخ قیه به ارتفاع ۲۸۱۴ متر بلندترین نقطه‌ی ارتفاعی این واحد است. واحد کوهستان جنوبی که رشته‌کوه‌های ارسباران را شامل می‌شود. واحد فلات نیز از ارتفاع ۱۹۰۰ تا ۱۴۰۰ متر ادامه دارد. میانگین دمای سالانه در ایستگاه اهر ۱۰/۲ درجه‌ی سانتی‌گراد است و بر اساس آمار ۲۴ ساله‌ی باران‌سنجی ایستگاه اهر، مجموع متوسط بارندگی منطقه حدود ۳۲۷ میلی‌متر می‌باشد. منطقه‌ی اهر از نظر اقلیمی شرایط بری دارد. نتایج نشان می‌دهد که این منطقه از نظر شاخص رطوبت دارای تیپ اقلیمی نیمه مرطوب تا خشک است، از نظر حرارت دارای شرایط معتدل و از لحاظ شرایط خشکی دارای مازاد متوسط آب در زمستان است. قدیمی‌ترین واحد سنگی این منطقه، مارن، ماسه سنگ و آهک‌های کرتاسه بالایی است. این سنگ‌ها توسط گدازه‌های آندزیتی کواترنر آغازین پوشیده شده‌اند.

^۱ - Aksoy and Ercanoglu

^۲ - Piacentinia

^۳ - Tyrol

^۴ - Mathew



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

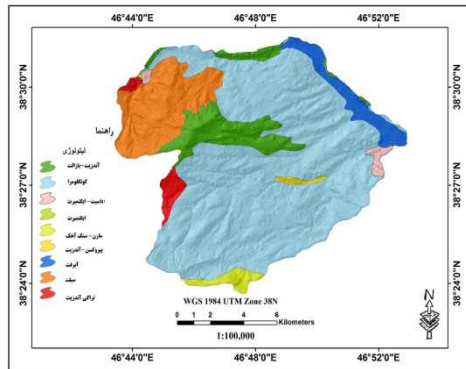
این منطقه به دلیل داشتن وضعیت خاص لیتولوژیکی، اقلیمی و کاربری اراضی، ناهمواری‌های جوان و دامنه‌های پرشیب از حساسیت بالایی برخوردار است. از طرفی امروزه دخالت انسان در این حوضه افزایش یافته است (فعالیت‌هایی همچون کشاورزی، تغییرات کاربری، دامداری و چرای بیش از حد مراتع، راه‌سازی)، لذا مطالعات بیشتر در منطقه ضروری به نظر می‌رسد.

داده‌ها و روش تحقیق

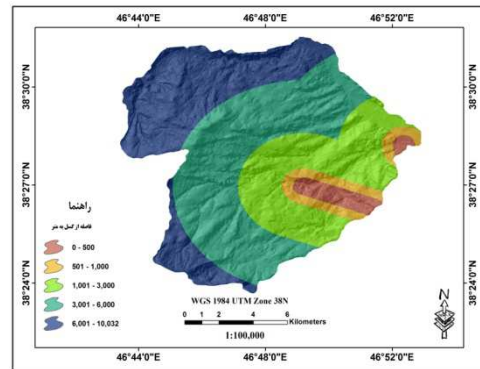
وقوع زمین لغزش حاصل عملکرد مجموعه‌ای از عوامل محیطی است که در ارتباط باهم باعث فراهم شدن شرایط مساعد برای وقوع این نوع مخاطره می‌شوند. عوامل ایجادکننده زمین لغزش را در دو گروه کلی می‌توان دسته‌بندی کرد. دسته اول عواملی که باعث ایجاد زمین لغزش می‌شوند و دسته دوم عوامل تشدیدکننده زمین لغزش (وارنز^۱، ۱۹۷۸). در این پژوهش از میان عوامل تأثیرگذار در وقوع زمین لغزش ۱۰ پارامتر مختلف انتخاب شده و در مدل‌سازی پهنه‌بندی پتانسیل زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفته است که عبارت‌اند از: شیب زمین (به درجه)، جهت شیب، کاربری زمین، سنگ‌شناسی، بارش، شاخص تراکم پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص طول شیب (LS)، شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)، شاخص قدرت آبراهه (SPI)، شاخص حمل رسوب (STI) و فاصله از آبراهه.

برای تهیه این لایه‌ها از منابع داده مختلفی استفاده شده است. برای تهیه لایه سنگ‌شناسی (شکل ۲) و فاصله از گسل (شکل ۳) از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان و خواجه، برای تهیه نقشه شیب (شکل ۴) و جهت شیب (شکل ۵) از لایه DEM منطقه با دقت مکانی ۱۰ متر و همچنین برای تهیه لایه فاصله آبراهه (شکل ۶) و شاخص حمل رسوب (شکل ۷) نیز از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه استفاده شده است.

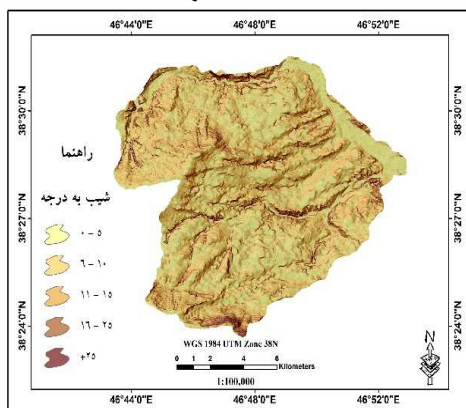
^۱ - Varnes



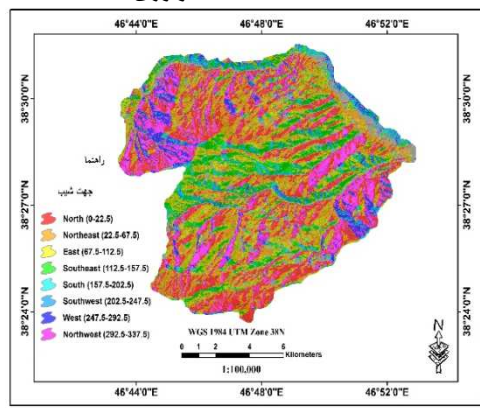
شکل ۳: نقشه فاصله از گسل



شکل ۲: نقشه لیتولوژی



شکل ۵: نقشه جهت شیب



شکل ۴: نقشه شیب زمین

شاخص حمل رسوب STI^1

از جمله شاخص‌های هیدرولوژیکی که در این مطالعه استفاده شده شاخص حمل رسوب است. این شاخص قدرت فرساینده‌گری جریان‌ها را در روی زمین نشان می‌دهد. رابطه تجربی (رابطه ۱) که برای بدست آوردن این شاخص وجود دارد شبیه معادله جهانی فرسایش خاک است از این رو می‌تواند در نشان دادن موقعیت مناطق با خطر فرسایش مورد استفاده قرار گیرد (مور^۲ و بورچ^۳، ۱۹۸۶).

$$STI = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^{0.62} \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^{1.3} \quad \text{رابطه (۱)}$$

این پارامتر بر اساس مساحت حوضه (A_s) و سینوس گرادیان شیب ($\sin\beta$) قابلیت حمل رسوب در حوضه را کنترل می‌کند. بر همین اساس ممکن است سیستم زهکشی را آشفته کند و دامنه‌هایی با گرادیان شیب کم به ایجاد زمین‌لغزش تمایل پیدا کنند (نفسلی اوغلو^۴ و همکاران، ۲۰۰۸).

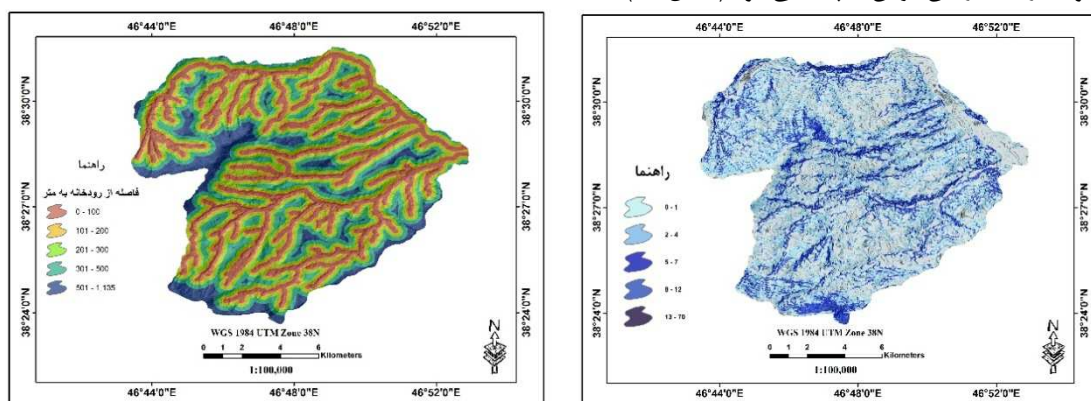
شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI^5)

شاخص رطوبت توپوگرافیک (شاخص ترکیب توپوگرافیک (CTI)) که برای توصیف الگوی فضایی رطوبت خاک استفاده می‌شود (ویلسون^۲ و گالانت^۳، ۲۰۰۰) به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

- 1 Sediment Transport Index
- 2 Moore
- 3 Burch
- 4 Nefeslioglu
- 5 Topographic Wetness Index

$$TWI = LN\left(\frac{A_s}{\tan\beta}\right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن (A_s)، مساحت ویژه بالادست یک پیکسل (مترمربع بر متر) و (β)، شیب پیکسل به رادیان می‌باشد از شاخص رطوبت توپوگرافیک می‌توان برای ارزیابی الگوی فضایی رطوبت خاک و تغییراتی که به دلیل فرسایش در بافت خاک رخ داده استفاده کرد (اسمیت^۴ و پرسون^۵، ۲۰۰۳، گریس^۶ و همکاران، ۲۰۰۷). این شاخص عموماً برای تعیین کنترل توپوگرافیک بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (سورنسون^۷ و همکاران، ۲۰۰۶) و مقادیر بالای آن معمولاً در بدنه زمین لغزش‌ها پیدا می‌شود (شکل ۱۱).



شکل ۷: شاخص حمل رسوب STI

شکل ۶: نقشه فاصله از آبراهه

برای تهیه نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه از محیط نرم‌افزار پردازش تصویر Ecogintion و روش طبقه‌بندی نظارت‌شده (الگوریتم حداکثر مشابهت^۸ (MLC)) و تصاویر رنگی ماهواره IRS مربوط به آگوست سال ۲۰۱۱ استفاده شد (شکل ۹). برای بدست آوردن لایه پهنه‌های بارشی حوضه از آمار ایستگاه‌های هواشناسی منطقه (شامل ایستگاه‌های اهر، تبریز، کلیبر، مرند و جلفا در بازه زمانی ۱۳۹۳ - ۱۳۶۹) استفاده شد و لایه بارش به صورت پهنه‌های بارشی بدست آمد (شکل ۸). همچنین برای تهیه لایه تراکم پوشش گیاهی از تصاویر باندهای ۳ و ۴ ماهواره لندست استفاده شده است (شکل ۱۰).

شاخص قدرت آبراهه (SPI)^۹

مور و همکاران (۱۹۹۱) معادله (۳) را برای محاسبه شاخص قدرت رودخانه (SPI) پیشنهاد نمودند که در این معادله اندازه قدرت فرسایش جریان آب بر این فرض استوار است که عمل تخلیه متناسب با وسعت حوضه صورت می‌گیرد. به طور کلی این شاخص در نواحی که نیمرخ و مماسی^{۱۰} محدب دارند (مناطق همگرا و تند) فرسایش ویژه و در نواحی که نیمرخ مقعر دارند (مناطق با کاهش ظرفیت جریان) رسوب ویژه را پیش‌بینی می‌کند.

$$SPI = A_s \cdot \tan\beta$$

$$SPI = A_s \cdot \tan\beta \quad \text{رابطه ۳}$$

1 Compound Topographic Index

2 Wilson

3 Gallant

4 Schmidt

5 Persson

6 Grabs

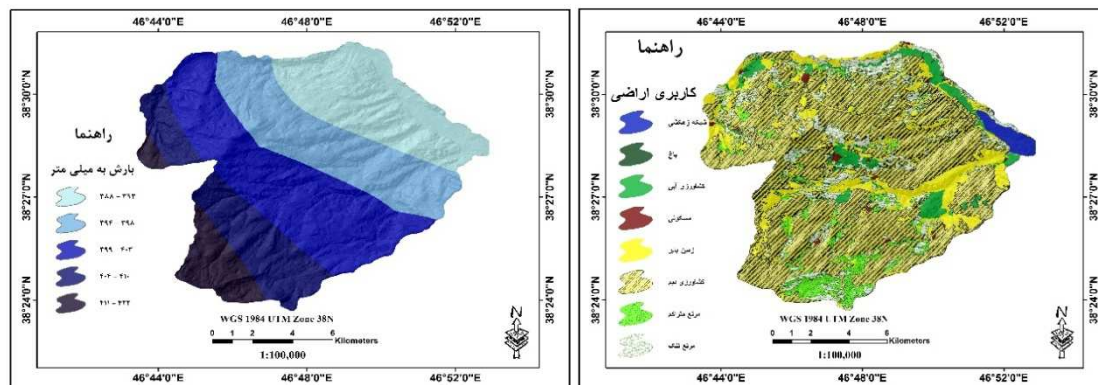
7 Sorensen

7 Maximum likelihood classifier

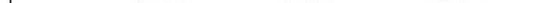
8 Stream Power Index

9 Tangential

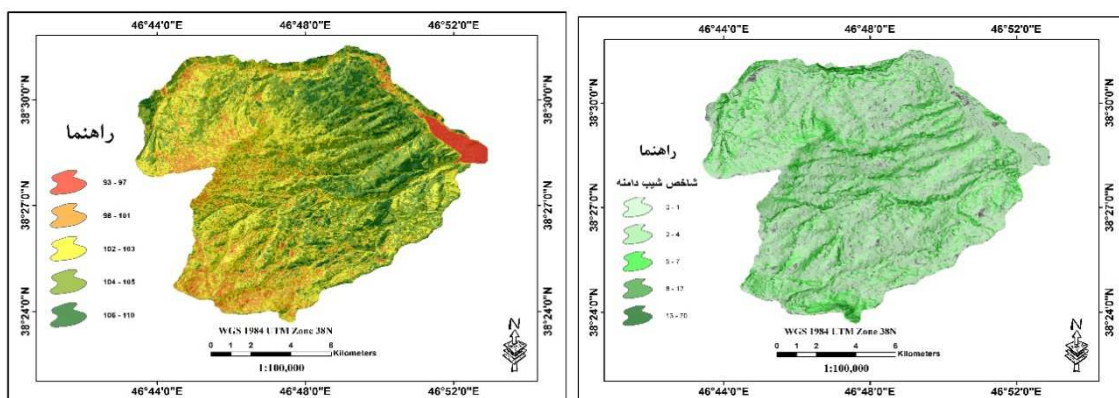
که در آن A_s مساحت حوضه آبخیز و β گرادیان شیب برحسب درجه است (شکل ۱۳).



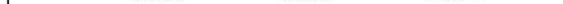
شکل ۸: نقشه بارش



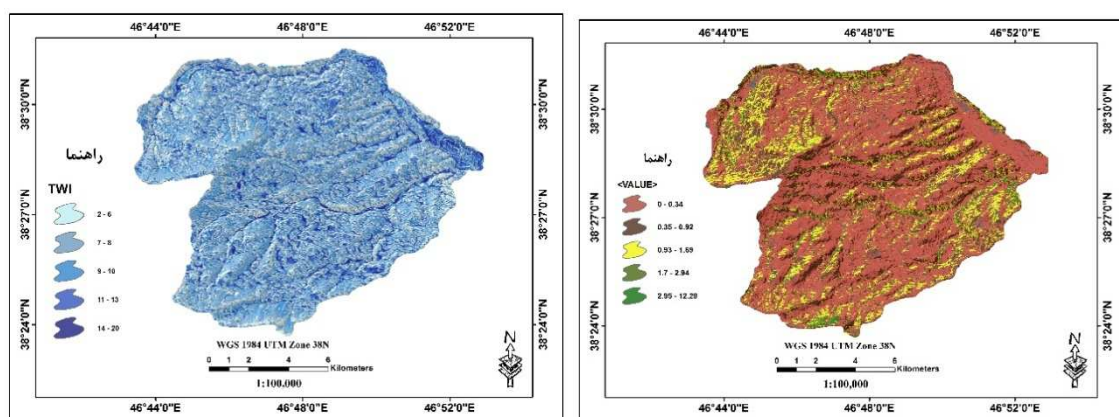
شکل ۹: نقشه کاربری زمین



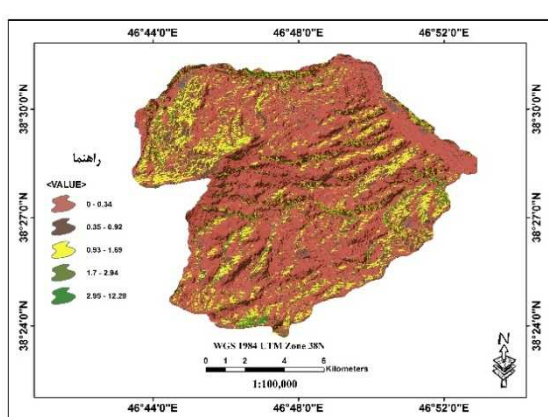
شکل ۱۰: نقشه تراکم پوشش گیاهی (NDVI)



شکل ۱۱: نقشه تندی دامنه (شاخص توپوگرافی)



شکل ۱۳: نقشه قدرت آبراهه (شاخص SPI)



شکل ۱۱: نقشه رطوبت توپوگرافیک (شاخص TWI)

روش‌شناسی

برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش محدوده مورد پژوهش ۱۰ پارامتر طبیعی در نظر گرفته شده است به صورت تفصیلی به آن‌ها پرداخته شد. برای اجرای پهنه‌بندی دو مدل فرآیند تحلیل شبکه و قضیه بیز مورد استفاده قرار گرفته که با توجه به ماهیت مدل‌ها هر کدام در مرحله‌ای از پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای مقایسه و رتبه‌بندی پارامترها از مدل فرآیند تحلیل

شبکه و برای تعیین وزن کلاس‌های هر پارامتر نیز از مدل قضیه بیز کمک گرفته شده که در ادامه تشریح آن‌ها می‌پردازیم.

فرآیند تحلیل شبکه (ANP)

فرآیند تحلیل شبکه‌ای یکی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است و در مجموعه مدل‌های جبرانی قرار می‌گیرد. این مدل بر مبنای فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی طراحی شده است و شبکه را جایگزین سلسله‌مراتب کرده است (فرجی سبکیار و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۳۱). توماس ساعتی در مواردی که رابطه سلسله‌مراتبی بین عناصر نقص می‌شود و ساختار مسئله به شکل شبکه‌ای تبدیل می‌شود، روش ANP را معرفی می‌کند (عمل‌نیک و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۰۲). این مدل از سلسله‌مراتب کنترل، خوشه‌ها، عناصر، روابط متقابل بین خوشه‌ها و عناصر تشکیل می‌شود. در حالت کلی اجرای مدل فرآیند تحلیل شبکه را می‌توان در چهار مرحله به صورت زیر تشریح کرد.

۱- ساخت مدل و ایجاد یک ساختار شبکه‌ای ۲- مقایسه دودویی و تعیین بردارهای اولویت که در واقع مشابه آنچه در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی در مقایسه معیارها صورت می‌گیرد در فرآیند تحلیل شبکه نیز تکرار می‌شود. ۳- تشکیل سوپر ماتریس اولیه و ناموزون^۱. ۴- تشکیل سوپر ماتریس موزون^۲ ۵- در نهایت تشکیل سوپر ماتریس حد^۳، در این مرحله از مدل، تمامی عناصر سوپر ماتریس موزون به حدی به توان می‌رسند تا همگرا شده و مقادیر آن باهم برابر شوند. با تشکیل سوپر ماتریس حد بردار وزن عمومی بدست می‌آید (لی^۴ و همکاران: ۲۰۰۹: ۱-۲).

مدل قضیه بیز یا وزن شواهد

مدل وزن شواهد^۵ به عنوان مدلی سودمند و آزمایش شده در زمینه‌های مختلف، همچون مطالعه حرکات توده‌ای، تحقیقات معدنی و نقشه‌کشی چشمه‌های آب زیرزمینی است (پولی^۶ و استرلاچینی^۷، ۲۰۰۷. باربیری^۸ و کامبولی^۹، ۲۰۰۹). ۲۰۰۹. مدل وزن شواهد (WofE) یک روش آماری مبتنی بر تئوری احتمالات بیز است (دنيسون^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۲). این مدل برای ارزیابی حساسیت وقوع زمین لغزش، اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط ون وسترن^{۱۱} مورد استفاده قرار گرفته است.

مدل وزن شواهد بر پایه یک سری فرمول‌های آماری پایه‌ریزی شده است. در این مدل بر اساس دو دسته اطلاعات کار مدل‌سازی و پیش‌بینی صورت می‌گیرد. پارامترهای مؤثر در وقوع یک پدیده (زمین لغزش) یا عامل‌های سببی (فاکتورهای مستعد کننده زمین لغزش) (۲) سطح وقوع پدیده در گذشته (زمین لغزش‌های رخ داده). در این حالت احتمال وقوع زمین لغزش در آینده بستگی به شرایطی دارد که هنگام وقوع آن در گذشته وجود داشته است. در این پژوهش از مدل قضیه بیز برای پیدا کردن سطح تأثیر و وزن هر کدام از کلاس‌های پارامترهای مستعد کننده زمین لغزش استفاده شده است. با توجه به مطالب فوق فرمول قضیه بیز بر اساس رابطه زیر (رابطه ۴) تعریف می‌شود. در این رابطه اگر ما

¹ - Unweighted super matrix

² - weighted super matrix

³ - Limit super matrix

⁴ - Lee

⁵ - weight of evidence (WofE)

⁶ - Poli

⁷ - Sterlacchini

⁸ - Barbieri

⁹ - Cambuli

¹⁰ - Denison

¹¹ - Van Western

عامل‌های سببی (فاکتورهای مستعد کننده زمین‌لغزش) را B ، کلاس‌های هر پارامتر را B_i و زمین‌لغزش رخ داده را S در نظر بگیریم، در این صورت تئوری بیز را برای محاسبه احتمال شرطی وقوع زمین‌لغزش (S) در کلاس معین (B_i)، می‌توان به صورت زیر بکار برد:

$$P(S|B_i) = \frac{P(B_i|S) \times P(S)}{P(B_i)} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه فوق $P(S)$ احتمال اولیه وقوع پیشامد S در محدوده مورد مطالعه (AS)، $P(B_i)$: احتمال وقوع کلاس B_i در محدوده مورد مطالعه (AS)، $P(B_i|S)$ احتمال وقوع پیشامد B_i به شرطی که پیشامد S اتفاق افتاده باشد، $P(S|B_i)$: احتمال وقوع پیشامد S به شرطی که پیشامد B_i اتفاق افتاده باشد (پیاستنتینی و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۹۹).
احتمال شرطی وقوع زمین‌لغزش زمانی که کلاس B_i اتفاق نیفتاده باشد نیز به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$P(S|B_i^{\wedge}) = \frac{P(B_i^{\wedge}|S) \times P(S)}{P(B_i^{\wedge})} \quad \text{رابطه ۵}$$

در معادله فوق $P(S)$ احتمال اولیه وقوع پیشامد S در محدوده مورد مطالعه (AS)، $P(B_i^{\wedge}|S)$ احتمال شرطی نبود کلاس B_i به شرطی که S اتفاق افتاده باشد، احتمال اولیه نبود کلاس B_i در محدوده مورد مطالعه (AS). در این مدل، وزن کلاس‌های هر پارامتر به وسیله ترکیبی از ارزش‌های مثبت و منفی (W^+ و W^-) از طریق تئوری بیز و نیز اختلاف تفاضل بین آن‌ها محاسبه می‌شود و در نهایت با استفاده از رابطه ۶ تا ۹ وزن نهایی کلاس‌ها حاصل می‌شود.

$$W^+ = LN(P(B_i|S)/P(B_i)) \quad \text{رابطه ۶}$$

$$W^- = LN(P(B_i^{\wedge}|S)/P(B_i^{\wedge})) \quad \text{رابطه ۷}$$

$$C = W^+ - W^- \quad \text{رابطه ۸}$$

$$W_{final} = C/S_c \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن LN لگاریتم بر مبنی عدد نپر، C تفاضل وزن‌های مثبت و منفی، W_{final} وزن نهایی استاندارد شده و S_c انحراف استاندارد است که برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است (پور قاسمی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۱۷).

یافته‌های تحقیق

در پهنه‌بندی زمین‌لغزش دو عامل بسیار اهمیت دارد. (۱) رتبه‌بندی و تعیین ضریب تأثیر پارامترهای مستعد کننده وقوع زمین‌لغزش (۲) تعیین سطح تأثیر کلاس‌های هر پارامتر در وقوع زمین‌لغزش. برای رسیدن به هدف فوق از دو مدل متفاوت بهره گرفته‌ایم. برای مقایسه زوجی و تعیین ضریب پارامترها از مدل فرآیند تحلیل شبکه و برای تعیین سطح تأثیر کلاس‌های هر پارامتر از مدل قضیه بیز استفاده شده است. برای اجرای مدل ANP ابتدا بر اساس ماهیت داده‌ها و ارتباطات موجود بین آن‌ها، پارامترها در چهار خوشه اصلی (۱) پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی (۲) پارامترهای زمین‌شناسی (۳) پارامترهای انسانی و پوشش زمین و در نهایت (۴) پارامترهای ژئومورفولوژیکی دسته‌بندی شدند. در ادامه با مشخص شدن خوشه‌ها، ساختار شبکه‌ای بین خوشه‌ها و پارامترهای در نظر گرفته شده تشکیل شد.

تمامی مراحل مربوط به مقایسات زوجی بین خوشه‌ها معیارها و روابط درونی آن‌ها در محیط نرم افزار Super Decision صورت گرفته و نتایج کار به صورت جدول سوپر ماتریس اولیه، سوپر ماتریس موزون و سوپر ماتریس حد در جداول شماره ۱ تا ۳ به ترتیب نمایش داده شده است.

جدول ۳: سوپر ماتریس حد(خروجی نرم‌افزار Super Decision)

Limit\ super matrix	Goal	criteria					Alternative									
	landslide	climate & hydro	geology	geomorphology	human & land cover	aspect	distance to river	landuse	lithology	ndvi	rainfall	slope	SPI	STI	TWI	
Goal	landslide	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
criteria	climate & hydro	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
	geology	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
	geomorphology	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
	human & land cover	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰
Alternative	aspect	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۷
	distance to river	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۷	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۷
	land use	۰٫۱۱۳	۰٫۱۱۳	۰٫۱۱۳	۰٫۱۱۳	۰٫۱۱۳	۰٫۰۰۰	۰٫۱۱۳	۰٫۱۱۳	۰٫۱۱۳	۰٫۱۱۳	۰٫۱۱۳	۰٫۱۱۳	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۱۱۳
	lithology	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۴
	ndvi	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۱۴	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۴
	rainfall	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۹
	slope	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۱۸	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۸
	SPI	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۶
	STI	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۲
	TWI	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۱۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۰	۰٫۰۱۰

با تهیه سوپر ماتریس حد وزن نهایی هر یک از پارامترها بدست می‌آید. بر اساس جدول شماره ۳، لایه شیب زمین با ۰/۱۸۴ و لیتولوژی با ۰/۱۴۳ بیشترین ضریب تأثیر را در پهنه‌بندی پتانسیل زمین‌لغزش دارند. در مقابل لایه‌های شاخص حمل رسوب با ۰/۰۲۱ و فاصله از رودخانه با ۰/۰۵۹ کمترین ضریب تأثیر را دارا هستند.

جدول ۴: جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاس‌ها بر اساس تحلیل شبکه

Alternatives	Total	Normal	Ideal	Ranking
aspect	-/۰۶۷	-/۰۶۷	۰/۳۶	۷
distance to river	-/۰۵۹	-/۰۵۹	۰/۳۲	۹
land use	-/۰۹۸	-/۰۹۸	۰/۵۳	۵
lithology	-/۱۴۳	-/۱۴۳	۰/۷۷	۲
ndvi	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۴۲	۶
rainfall	-/۱۲۷	-/۱۲۷	۰/۶۸	۴
slope	-/۱۸۴	-/۱۸۴	۱	۱
SPI	-/۱۴۳	-/۱۴۳	۰/۷۷	۳
STI	-/۰۲۹	-/۰۲۹	۰/۱۱	۱۰
TWI	-/۰۶۶	-/۰۶۶	۰/۳۶	۸

با بدست آمدن ضریب تأثیر پارامترها نوبت به محاسبه وزن کلاس‌های هر پارامتر می‌رسد. برای بدست آوردن این ضرایب از مدل قضیه بیز استفاده شده است. دو دسته اطلاعات برای این مرحله موردنیاز بود: (۱) زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه که در مدل‌سازی ۷۰ درصد آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته و ۳۰ درصد زمین‌لغزش‌ها برای ارزیابی مدل در نظر گرفته شده است و (۲) پارامترهای کلاسه‌بندی شده. با داشتن داده‌های فوق اطلاعات موردنیاز برای مدل‌سازی در محیط

نرم‌افزار ArcMap استخراج شده و از طریق فرمول نویسی روابط مدل در نرم‌افزار excel وزن کلاس‌های هر طبقه بدست آمد. جدول شماره ۵ وزن بدست آمده از مدل قضیه بیز را برای کلاس‌های هر پارامتر نمایش می‌دهد.

جدول ۵: جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاس‌ها بر اساس روابط تئوری بیز

Weight	Sc	s2(w-)	s2(w+)	C	w-	w+	class	پارامترها
۱۰/۲۷	۰/۰۲۳	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۰۴۴	۰/۲۳۷۶	-۰/۰۴۸	-۰/۱۸۹	۱/۷-۵	شاخص TWI
۱/۳۵	۰/۰۱۹۵	۰/۰۰۰۰۹۹	۰/۰۰۰۰۲۸	۰/۰۲۶۴	-۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۱۷	۵-۸	
۲۷/۴	۰/۰۱۷۸	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۴۸۹	-۰/۱۹۲	-۰/۳۹۸	۸-۱۱	
۳۴/۳	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۰۴۲	۰/۷۷۳	-۰/۱۳۸	-۰/۶۳۶	۱۱-۱۶	
۱۲/۳	۰/۰۴۴	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۱۸۸	۰/۵۴۳	-۰/۰۲۰۴	-۰/۵۲۳	۱۶>	
۴۵/۰۲	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۲۱	۰/۸۱۲	-۰/۲۸۹	-۰/۵۲۳	۰-۲	شاخص STI
۳۰/۷	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۲۲	۰/۵۶۲	-۰/۱۹۹	-۰/۳۶۳	۲-۴	
۱/۵	۰/۰۲۲	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۰۰۰۰۳۸۹	۰/۰۳۳	-۰/۰۰۷۶	-۰/۰۲۵	۴-۷	
-۷/۵	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰۰۶۸	-۰/۲۰۸	۰/۰۲۹	-۰/۱۷۸	۷-۱۱	
-۱۰/۲	۰/۰۴۹	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۲۳۵	-۰/۵۰۲	۰/۰۲۳۷	-۰/۴۷۸	+۱۱	
۱۰/۲۱	۰/۰۲۳	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۰۴۴	۰/۲۳۶	۰/۰۴۷۸	-۰/۱۸۸	-۰/۳۳۷ ۰/۰۰۰۰۰۶	شاخص SPI
۲۰/۹۴	۰/۰۱۹۸	۰/۰۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۰۲۹	۰/۴۱۵	-۰/۱۲۰۶	-۰/۲۹۴	-۰/۳۳۷۴-۰/۹۱۵۸	
۲۰/۰۶	۰/۰۱۷۶	۰/۰۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۱۸	۰/۳۵۲	-۰/۱۵۳	-۰/۱۹۹	۰/۹۱۵-۱/۶۸۷	
۱۲/۵۷	۰/۰۲۵۴	۰/۰۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۰۵۶	۰/۳۹۶	-۰/۰۶۲	-۰/۳۳۴	۱/۶۸۷-۲/۹۴	
۱۴/۵۹	۰/۰۳۵۱	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۰۰۱۱۵	۰/۵۱۲	-۰/۰۲۹۷	-۰/۴۸۲	۲/۹۴>	
۴/۸۴۳	۰/۰۲۱۸	-۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۳۶	۰/۱۰۵۶	-۰/۰۳۲	-۰/۰۷۴	۹۳-۹۷	تراکم پوشش گیاهی
۳۶/۴۸	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۰۱۳	-۰/۰۰۰۰۲۴۷	۰/۷۰۵۹	-۰/۲۵	-۰/۴۵۴	۹۷-۱۰۱	
۲۳/۸۷	۰/۰۲۴	-۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰۵	۰/۵۸۵۵	-۰/۱۰۸	-۰/۴۷۷	۱۰۱-۱۰۳	
۲/۷۳	۰/۰۲۰۸	۰/۰۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۰۵۶۹	-۰/۰۱۶۶	-۰/۰۴	۱۰۳-۱۰۵	
۲/۶۴	۰/۲۳۵۹	۰/۰۰۰۰۸۴	۰/۰۵۵۵۵	۰/۶۲۲۵	-۰/۰۰۰۰۶	-۰/۶۲۲	۱۰۵-۱۱۰	
-۷/۷۷	۰/۰۱۹	-۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲۶	-۰/۱۴۹	۰/۰۴۸۸	-۰/۱	۰-۲۰۰	فاصله از گسل
۱۳/۴۵	۰/۰۲۲	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۰۰۰۰۳۷	۰/۲۹۸	-۰/۰۷۴۲	-۰/۲۱۷	۲۰۰-۳۸۰	
۲۸/۴۸	۰/۰۲۳	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۰۴۴	۰/۶۵۷	-۰/۱۲۸۱	-۰/۵۲۹	۳۸۰-۵۶۰	
۲۸/۹۸	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۰۰۰۰۶۵	۰/۸۱	-۰/۰۹۷	-۰/۷۱۵	۵۶۰-۷۴۰	
۳۰/۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۰۲۹	۰/۵۹۸	-۰/۱۵۱	-۰/۴۴۷	۷۴۰+	
-۲۴/۳۲	۰/۰۲۲۹	۰/۰۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۰۰۵	-۰/۵۵۷	۰/۰۲۹۵	-۰/۵۲۷	مسطح	جهت شیب
۴۱/۴۴	۰/۰۱	۰/۰۰۰۰۲۷۹	۷/۳۱۵	۰/۴۱۶۶	-۰/۰۹۸۸	-۰/۳۱۷	شمال	
۲۳/۱۱	۰/۰۱۰۴	۰/۰۰۰۰۲۶۷	۸/۲۵۴	۰/۲۴۱۶	-۰/۰۵۳۹	-۰/۱۸۷	شمال شرقی	
-۳۰/۳۳	۰/۰۱۵	۰/۰۰۰۰۲۲۴	۰/۰۰۰۰۰۲	-۰/۴۵۶۹	۰/۰۵۵۶	-۰/۴۰۱	شرق	
-۴۹/۵۸	۰/۰۲۱	۰/۰۰۰۰۲۱۲	۰/۰۰۰۰۴۲	-۱/۰۴۴	۰/۰۸۴۴	-۰/۰۹۵۹	جنوب شرقی	
-۲۷/۶۴	۰/۰۳۱۹	۰/۰۰۰۰۲۰۶	۰/۰۰۰۰۹۹	-۰/۸۸۱۷	۰/۰۲۸۲	-۰/۸۵۳	جنوب	
-۹/۰۹۹	۰/۰۲۸۶	۰/۰۰۰۰۲۰۷	۰/۰۰۰۰۸۰۱	-۰/۲۶۰۸	۰/۰۰۷۴۹	-۰/۲۵۳	جنوب غربی	
۴۴/۶۷	۰/۰۱۶۲	۰/۰۰۰۰۲۲۰	۰/۰۰۰۰۲۴۳	۰/۷۲۷۶	-۰/۰۴۳۹	-۰/۶۸۳	غرب	
۱۹/۷۰۸	۰/۰۱۲۱	۰/۰۰۰۰۲۴۱	۰/۰۰۰۰۱۲۳	۰/۲۳۹۷	-۰/۰۳۵۴	-۰/۲۰۴	شمال غرب	

مأخذ: نگارندگان

ادامه جدول ۵: جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاس‌ها بر اساس روابط تئوری بیز

Weight	Sc	s2(w-)	s2(w+)	C	-W	W+	class	پارامترها
۵۵/۵۶۲۵	۰/۰۲۳۵	۰/۰۰۰۰۸۷	۰/۰۰۰۰۴۶۶	۱/۳۰۴	-۰/۱۷۳	۱/۱۳۱	۳۸۷/۷۶-۳۹۰	میزان بارش
۳/۹۳۵	۰/۰۲۰۴	۰/۰۰۰۰۹۵	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۰۸۰۴	-۰/۰۲۸	۰/۰۵۲	۳۹۰-۳۹۸	
۱۲/۶۱۵	۰/۰۱۷۴	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۲۱۹	-۰/۰۹۶	۰/۱۲۳	۳۹۸-۴۰۵	
۲۴/۸۱	۰/۰۲۴۲	۰/۰۰۰۰۸۶	۰/۰۰۰۰۵	۰/۶۰۰۹	-۰/۰۸۷	۰/۵۱۴	۴۰۵-۴۱۰	
۲/۰۲۲	۰/۰۴۱	۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۰۱	۰/۰۸۲۹	-۰/۰۰۵۷	۰/۰۷۷	+۴۱۰	
-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳	-	-	۰/۰۱۸۳۵	-	آب	کاربری زمین
-۱/۵۷۰۸	۱/۰۰۰۰۲۷	۰/۰۰۰۰۵۵	۱	-۱/۵۷۱	۰/۰۰۲۱	-۱/۵۶۹	باغ	
۳۰/۹۳۳	۰/۰۴۷۱	۰/۰۰۰۰۱۰۳	۰/۰۰۱۱	۱/۴۵۸	-۰/۴۴۳	۱/۰۱۵۴	بایر	
-۳/۵۶۷۴	۰/۱۱۲۸۲	۰/۰۰۰۰۵۷۳	۰/۰۱۵۸۷	-۰/۴۵۷۴	۰/۰۲۰۰۲	-۰/۴۳۷	کشاورزی آبی	
-	۰	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵	-	-	مسکونی	
۱۹/۴۳۴	۰/۰۶۳۵۶	۰/۰۰۰۰۶۶۱۸	۰/۰۰۰۰۳۳۷	۱/۲۳۵۳	-۰/۱۲۳۵	۱/۱۱۱۸	کشاورزی دیم	
-	۰/۰۵۷۲۸۹	۰/۰۰۰۰۷۰۴	۰/۰۰۰۰۲۵۷۷	-	-۰/۲۴۴۶۷	-	مرتع تنک	
-۲۹/۷۶۲۲	۰/۱۱۴۳۶	۰/۰۰۰۰۵۷۹	۰/۰۱۲۵	-۳/۴۰۳۷۱	۰/۸۲۷۳	-۲/۵۷۶۳	مرتع متراکم	
۱۵/۷۸	۰/۰۳۷۲	۰/۰۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۱۳	۰/۵۸۶	-۰/۰۳۷	۰/۵۴۹	۰-۵	درجه شیب
۳۸/۵۸	۰/۰۲۰۸	۰/۰۰۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۰۳۴	۰/۸۰۵	-۰/۱۸۰۷	۰/۶۲۴	۵-۱۵	
۳۹/۳۳	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۱۶	۰/۵۷۵	-۰/۲۷۵۹	۰/۲۹۹	۱۵-۲۵	
-۴/۰۷۶۶	۰/۰۲۱۱	۰/۰۰۰۰۰۹۳	۰/۰۰۰۰۳۵	-۰/۰۸۶	۰/۰۲۲۳	-۰/۰۶۴	۲۵-۴۰	
-۱/۰۶۲	۰/۰۳۶۵	۰/۰۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۱۲	-۰/۳۸۷۵	۰/۰۳۱۹	-۰/۳۵۵	۴۰<	

مأخذ: نگارندگان

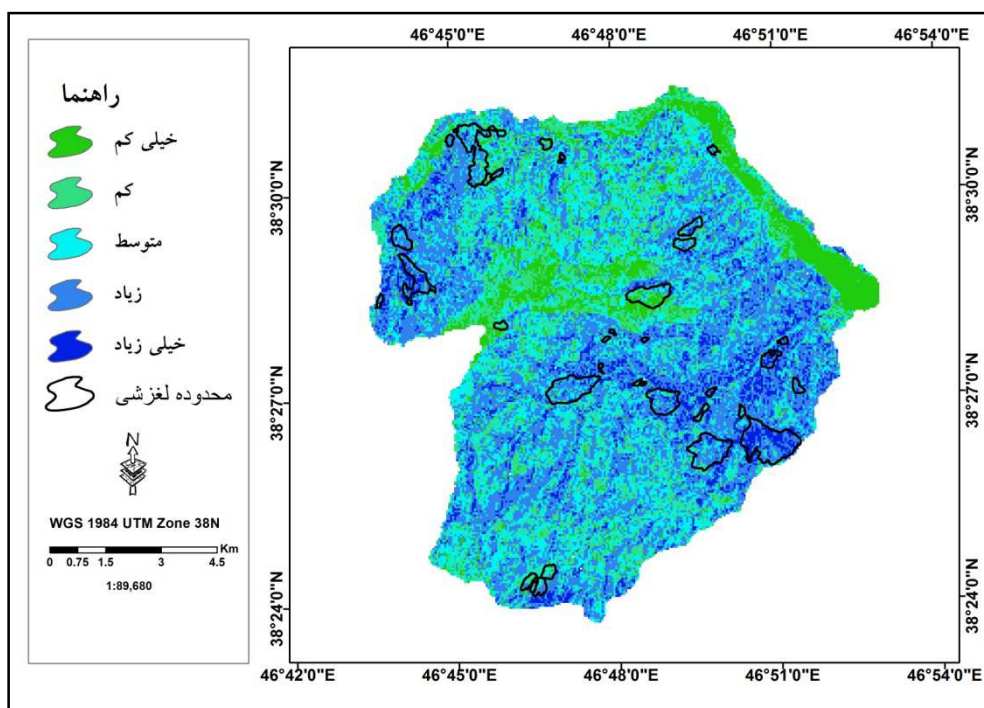
ادامه جدول ۵: جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاس‌ها بر اساس روابط تئوری بیز

Weight	Sc	s2(w-)	s2(w+)	C	w-	w+	class	پارامترها
۸۹/۴۵۲	۲۳/۸۲۱	۰/۶۲۱	۰/۰۰۰۸۶۵	۰/۰۴۳۵	۰/۹۸۸۶	۰/۲۶۷	کنگومرا- آبرفت	نوع سازند
۷۵/۱۶۴۷	۱۲/۱۶۴۸	۰/۰۵۶۶۱	۰/۰۰۰۰۷۱۱	۰/۰۰۰۲۴۹	۰/۶۸۸۶	-۰/۱۱۷	سیلت- ایگمبرت	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳	-	-	۰/۰۰۰۰۳۳۲۲	ایگمبرت	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳	-	-	۰/۰۱۶۰۹	کنگومرا- آتشفشانی	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳۴	-	-	۰/۰۱۱۰۴	دازیت- ایگمبرت	
۶۵/۹۹۷۰۹	۰/۹۹۷۰۹	۰/۲۸۹۶۳	۰/۰۰۰۰۵۵۷	۰/۰۸۳۳۳	۰/۲۸۸۷۹	-۰/۰۰۱۶۶	پیروکسین- اندزیت	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳	-	-	۰/۰۱۸۲۱۵	مارن- لیمیستون	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳۴	-	-	۰	l	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳۴	-	-	۰	m	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳۴	-	-	۰	n	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳۴	-	-	۰	o	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳۴	-	-	۰	p	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳۴	-	-	-	q	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳۴	-	-	-	r	
-	-	-	۰/۰۰۰۰۵۵۳۴	-	-	-	s	
۳۶/۴۵	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲۳	۰/۶۷۳	-۰/۲۰۱	۰/۴۷۲	۰-۱۲۵	فاصله از

۳۷/۰۹۵	۰/۰۱۸۹	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲۵	۰/۷	-۰/۲۰۲	۰/۴۹۸	۱۲۵-۲۷۰	رودخانه
۲۰/۶۵	۰/۰۲۲۶	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۰۴۲	۰/۴۷	-۰/۰۹۵	۰/۳۷۳	۲۷۰-۴۲۰	
۴/۵۲	۰/۰۲۲۴	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۰۴۱	۰/۱۰۱	-۰/۰۲۵	۰/۰۷۶	۴۲۰-۶۳۰	
-۱۷/۵	۰/۰۴۲۱	۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۰۰۱۷	-۰/۷۳۶	۰/۰۷۵	-۰/۶۶۲	۶۳۰<	

مأخذ: نگارندگان

با بدست آمدن وزن پارامترها و وزن کلاس‌های هر طبقه نوبت به پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین لغزش می‌رسد. به این صورت که وزن‌های بدست آمده از مدل قضیه بیز از طریق عملگر Reclassify بر روی پارامترها اعمال شده و در نهایت پارامترهای بدست آمده از این مرحله با ضرایب مدل ANP ترکیب شدند. نتیجه این فرآیند یک لایه رستری است که وضعیت منطقه را از نظر پتانسیل وقوع زمین لغزش نمایش می‌دهد. نقشه بدست آمده، با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی^۱ در پنج کلاس حساسیت طبقه‌بندی شد (شکل شماره ۱۴).



شکل ۱۴: نقشه پهنه‌بندی پتانسیل زمین لغزش

در این طبقه‌بندی نقشه بدست آمده در پنج کلاس حساسیت وقوع زمین لغزش طبقه‌بندی شده است (طبقه با پتانسیل وقوع زمین لغزش خیلی کم، پتانسیل کم، پتانسیل متوسط، پتانسیل زیاد و پتانسیل خیلی زیاد).

ارزیابی مدل

برای اینکه بتوانیم نقشه بدست آمده از مدل را از نظر دقت پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار دهیم ۳۰ درصد از زمین لغزش استفاده نشده در مدل‌سازی را با نقشه طبقه‌بندی زمین لغزش روی هم‌گذاری کرده و درصد پراکنش فضایی آن‌ها را در هر کدام از طبقات بدست آورده‌ایم. نتیجه این هم‌گذاری به صورت جدول شماره ۶ به دست آمد. بر اساس اطلاعات جدول با اینکه تنها ۱۷/۲۹ درصد از کل منطقه در کلاس با حساسیت خیلی زیاد قرار گرفته ولی با اینحال در حدود ۳۱/۸۱

^۱ - Natural breaks

از زمین‌لغزش‌های در نظر گرفته‌شده برای ارزیابی در این طبقه قرار گرفته است. در حالت کلی حدود ۵۷/۰۵ درصد از این زمین‌لغزش‌ها در دو کلاس با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است که این امر نشان‌دهنده دقت قابل قبول نقشه پیش-بینی شده برای زمین‌لغزش می‌باشد. جدول شماره ۶ وضعیت آماری حاصل از این ارزیابی را نشان می‌دهد.

جدول ۶: مساحت کلاس‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و درصد زمین‌لغزه‌های رخ داده

کلاس حساسیت	مساحت هر کلاس به درصد	مساحت زمین‌لغزش‌های رخ داده به درصد
حساسیت خیلی کم	۹/۶۳	۱۰/۶۳
حساسیت کم	۱۶/۸۹	۹/۴۸
حساسیت متوسط	۳۹/۴۴	۲۲/۸۱
حساسیت زیاد	۱۶/۷۳	۲۵/۳۴
حساسیت خیلی زیاد	۱۷/۲۹	۳۱/۸۱

بحث و نتیجه‌گیری

حرکات توده‌ای از نوع زمین‌لغزش‌ها بر روی دامنه‌ها شکلی از فرایندهای دامنه‌ای و نوعی از مخاطرات طبیعی هستند که هر ساله در نقاط مختلف جهان خسارات مالی، جانی و زیست‌محیطی زیادی به بار می‌آورند. شناسایی و پهنه‌بندی نواحی مستعد زمین‌لغزش گامی مهم در ارزیابی خطرهای محیطی به شمار می‌رود و در مدیریت حوضه‌ی آبخیز نقش انکارنشدنی دارد. در این پژوهش پهنه‌بندی پتانسیل زمین‌لغزش کرانه جنوبی حوضه آبریز اهر چای از روستای نصیرآباد تا سد ستارخان، مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت انجام این کار از مجموعه‌ای از پارامتر طبیعی و انسانی و زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه (۷۰ درصد زمین‌لغزش‌ها) و ترکیب دو مدل ANP و قضیه بیز استفاده شده است. بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، عوامل متعددی سبب بروز این پدیده می‌شود که از جمله‌ی مهم‌ترین این عوامل می‌توان به تناوب لایه‌های سنگ‌آهک و مارن، وجود درز و شکاف‌های فراوان بر روی لایه‌ها، شیب زیاد ساختمانی، نفوذ آب، دخالت تکتونیک و بالاخره نیروی ثقل در کنار سایر عوامل، اشاره نمود. تلفیق پارامترها واقعیت‌هایی از نحوه‌ی تأثیرگذاری هر پارامتر بر وقوع پهنه‌های زمین‌لغزشی منطقه آشکار ساخت. در مورد پارامترهایی همچون ارتفاع و شیب می‌توان گفت که با افزایش مقدار آن‌ها تا حد مشخصی، احتمال وقوع زمین‌لغزش نیز بالاتر می‌رود. اما این ارتباط مستقیم از یک ارتفاع و شیب مشخص به بعد، دیگر برقرار نیست. به‌طوریکه با افزایش ارتفاع، نوع بارش از باران به برف تغییر می‌یابد و نیز از میزان بسترهای سست کم شده و بر میزان بسترهای مقاوم، افزوده می‌گردد؛ این کم شدن بسترهای سست در شیب‌های بالا نیز حاکم است که به تبع آن احتمال وقوع زمین‌لغزش نیز کاهش پیدا می‌کند. نقشه بدست آمده از مدل در پنج کلاس، حساسیت وقوع زمین‌لغزش را طبقه‌بندی کرده است که به ترتیب عبارت‌اند از: حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد. بر اساس نقشه تهیه‌شده بخش‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه از نظر وقوع زمین‌لغزش بیشترین پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را دارد. با توجه به اطلاعات جدول شماره ۳، ۱۷/۲۹ درصد از اراضی محدوده مورد مطالعه به‌عنوان منطقه‌ای با پتانسیل خیلی زیاد برای وقوع زمین‌لغزش در نظر گرفته‌شده‌اند. این مناطق عمدتاً مناطق حاشیه سد ستارخان و بخش‌های شرقی شامل روستای نصیرآباد را شامل می‌شوند. به خاطر به هم زدن شیب طبیعی زمین برای ساخت‌وساز و کشاورزی اکثر زمین‌لغزش‌ها نیز در این مناطق رخ داده است. کاربری زمین در این مناطق عمدتاً از نوع مرتع تنک، باغ و زمین‌های کشاورزی بر روی دامنه‌ها می‌باشد. جنس سنگ‌های این مناطق عمدتاً از نوع کنگلومرای پلی‌ژنیک و برش‌های مارنی و ماسه‌ای است. همچنین تعدادی از زمین‌لغزش‌های در اطراف گسل‌های موجود در منطقه واقع شده‌اند که از این نظر قابل توجه است (نقشه زمین‌شناسی منطقه). برای مثال در بخش جنوبی منطقه مورد مطالعه ما شاهد تراکم بالایی از زمین‌لغزش‌ها و همچنین گسل‌های فعال با جهت‌گیری مختلف و متقاطع هستیم این منطقه در نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش به‌عنوان منطقه‌ای با پتانسیل

خیلی زیاد و زیاد معرفی شده است. عمدتاً مناطق با پتانسیل کم و خیلی کم در بخش‌های مرتفع منطقه (غرب و کناره‌های شرقی منطقه مورد مطالعه) و نواحی پست شمال شرق آن واقع شده است. کاربری از نوع مرتع متراکم و مرتع خوب، داشتن فاصله دورتر از مناطق مسکونی و فاصله از رودخانه و دست‌کاری کمتر توسط انسان، دریافت بارش کمتر نسبت به مناطق جنوبی و غربی و شیب کم از مجموعه عواملی هستند که باعث شده مقدار وقوع زمین لغزش در این مناطق کمتر باشد و به‌عنوان مناطقی با پتانسیل کم و خیلی کم معرفی شوند.

برای بررسی میزان صحت، موقعیت ۳۵ نقطه از نقاط دارای زمین لغزش در بررسی میدانی با استفاده از دستگاه GPS مشخص گردید و در مرحله بعد با استفاده از توابع تحلیلی این نقاط با نقشه نهایی زمین لغزش انطباق داده شد. بر اساس نتایج بدست آمده از این ارزیابی و قرارگیری درصد قابل توجهی از زمین لغزش‌ها در طبقه با حساسیت زیاد و خیلی زیاد (۵۷/۰۵) دقت مدل‌های بکار رفته در پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش قابل قبول و خوب است. استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و تلفیق آن با روش‌های آماری در مقایسه با سایر روش‌های مورد استفاده توسط سایر پژوهشگران به دلیل انعطاف‌پذیری و محاسبات ریاضی از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. نتایج حاصله نشان‌دهنده دقت روش ترکیبی ANP و قضیه بیز، در بررسی زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. از آنجاکه روش ANP و تئوری احتمالات شرطی (قضیه بیز)، سامانمند با وابستگی‌ها برخورد می‌کند یعنی تمام وابستگی‌های بیرونی و درونی میان عناصر و خوشه‌ها را برای تحلیل در نظر می‌گیرد، اما سایر روش‌ها این روابط را کمتر در نظر می‌گیرند. بنابراین با توجه به وابستگی‌های مسائل زمین لغزش این روش جهت شناسایی مناطق مستعد زمین لغزش می‌تواند بسیار سودمند باشد. همان‌گونه که مطرح شد این روش‌ها، نتایج قابل قبولی را در تحلیل حساسیت به وقوع زمین لغزش داشته است. پیشنهادات اجرایی برای کنترل توده و یا کاهش میزان آسیب‌پذیری به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- جلوگیری از ساخت اماکن مسکونی و اداری و هرگونه تأسیسات در این مناطق
 - کاشت درختان بومی دارای ریشه عمیق و نیاز رویشگاهی کم
 - کاهش دخالت انسان
 - ایجاد شبکه زهکشی در لایه‌های زیرین توده با استفاده از لوله‌های مشبک استاندارد.
 - جلوگیری از اقداماتی که منجر به افزایش نفوذ آب در توده می‌گردد از جمله تراس‌بندی و احداث سدهای اصلاحی
- ...

منابع

- اسفندیاری درآباد فریبا، بهشتی جاوید، ابراهیم، فتحی محمدحسین، ۱۳۹۳، پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از تئوری بیزین، مطالعه موردی: حوضه آبخیز سیاهرود، جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال ۳، شماره ۱۳۹۳، ۱۲، صص ۱-۱۸.
- امیر احمدی، ابوالقاسم، کامرانی دلیر، حمید، صادقی، محسن. ۱۳۸۹، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، AHP، مطالعه موردی حوضه آبخیز چلاو آمل، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، شماره ۲۷، صص ۲۰۳-۱۸۱.
- حسین زاده، محمدحسین. محمدرضا ثروتی، عادل منصوری، بابک میرباقری، سعید خضری، ۱۳۸۸، پهنه‌بندی ریسک وقوع حرکات توده‌ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، سال سوم، شماره یازدهم، پاییز، صفحات ۲۷-۳۷.

- رحیم زاده زهرا، علایی طالقانی محمود، ۱۳۹۴، ارزیابی پتانسیل ناپایداری دامنه‌ای به کمک مدل منطقه‌ای در بخش شمال غرب زاگرس با توجه به زمین‌لغزش‌های حوضه لیله، جغرافیا و توسعه: تابستان ۱۳۹۴، دوره ۱۳، شماره پیاپی ۳۹؛ از صفحه ۱۸۱ تا صفحه ۱۹۴.
- رضایی پیمان، فریدی پروانه، قربانی منصور، کاظمی محمد، ۱۳۹۳، برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل *RUSLE* و شناسایی مؤثرترین عامل در حوضه آبخیز گابریک- جنوب خاوری استان هرمزگان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال سوم، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۳، صص. ۹۷-۱۱۳.
- روستایی، شهرام. احمدزاده، حسن، ۱۳۹۱، پهنه‌بندی مناطق متأثر از خطر زمین‌لغزش در جاده‌ی تبریز- مرند با استفاده از سنجش‌ازدور و *GIS*، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، صص ۴۷-۵۸.
- عابدینی موسی، بهشتی جاوید ابراهیم، فتحی محمدحسین، ۱۳۹۴، پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با مدل‌های آماری دومتغیره و منطق فازی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۶، شماره ۳-، پاییز ۱۳۹۴، صفحات ۴۹-۶۰.
- عمل نیک، محسن. انصاری‌نژاد، ایوب. انصاری‌نژاد، صمد. میری نرگسی، سینا، ۱۳۸۹، یافتن رابطه علی معلولی و رتبه‌بندی عوامل بحرانی موفقیت و شکست پروژه‌های پیاده‌سازی سیستم‌های اطلاعاتی به کمک ترکیب روش‌های *ANP* و *DEMATEL* فازی گروهی. نشریه تخصصی مهندسی صنایع، دوره ۴۴، شماره ۲، مهر ۱۳۸۹، صص ۲۱۲-۱۹۵.
- فرجی سبکبار حسنعلی، سلمانی محمد، فریدونی فاطمه، کریم زاده حسین، رحیمی حسن، ۱۳۸۹، مکان‌یابی محل دفن بهداشتی زباله روستایی با استفاده از مدل فرایند شبکه‌ای تحلیل، *ANP*: مطالعه موردی نواحی روستایی شهرستان قوچان، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، مدرس علوم انسانی، بهار ۱۳۸۹، دوره ۱۴، شماره ۱، پیاپی ۶۵؛ از صفحه ۱۲۷ تا صفحه ۱۴۹.
- قرهی، حمیدرضا. بهمن بهلولی، امیر سیار، محسن شریعت جعفری، ۱۳۹۰، تهیه نقشه حساسیت پدیده زمین‌لغزش با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی و مدل آماری دومتغیره در مخزن سد البرز. مجله علوم زمین، پاییز، سال ۲۱ شماره ۸۱، صفحات ۹۳-۱۰۰.
- میرنظری جواد، شهبابی هیمن، خضری سعید، ۱۳۹۳، ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل *AHP* و عملگرهای منطق فازی در حوضه آبریز پشت تنگ سرپل ذهاب، استان کرمانشاه، جغرافیا و توسعه: زمستان ۱۳۹۳، دوره ۱۲، شماره ۳۷؛ از صفحه ۵۳ تا صفحه ۷۰.
- نیازی یعقوب، اختصاصی محمدرضا، طالبی علی، آرخی صالح، مختاری محمدحسین، ۱۳۸۹، ارزیابی کارایی مدل آماری دومتغیره در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش در حوضه سدایلام. مجله علوم مهندسی آبخیزداری ایران. سال ۴ شماره ۱۰. صص ۲۰-۹.
- یمانی مجتبی، احمدآبادی علی، زارع غلامرضا، ۱۳۹۱، ارزیابی کارایی فنون هوش مصنوعی در مطالعات زمین‌لغزش با تأکید بر الگوریتم *SVM*، مطالعه موردی: حوضه آبریز درکه، فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال ۱، شماره ۳.
- Aksoy, B., Ercanoglu, M (2012). *Landslide identification and classification by object-based image analysis and fuzzy logic: An example from the Azdavay region (Kastamonu, Turkey)*, Computers & Geosciences, Vol 38, 92-97.
- Barbieri, G., Cambuli, P., 2009. *The weight of evidence statistical method in landslide susceptibility mapping of the Rio Pardu Valley (Sardinia, Italy)*. In: Anderssen, R.S., Braddock, R.D., Newham, L.T.H. (Eds.), 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation, July 2009, pp.2658-2664.
- Brabb, E.E., (1984) *Innovative approaches to landslide hazard mapping: Proceedings 4th International Symposium on Landslides, Toronto, vol.1, pp.307-324.*
- Denison, D.G.T., Holmes, C.C., Mallick, B.K., Smith, A.F.M., 2002. *Bayesian Methods for Nonlinear Classification and Regression*. John Wiley & Sons, Chichester, west Sussex.

- Grabs, T., Seibert, J., Laudon, H., 2007. **Modelling spatial patterns of saturated areas: a comparison of the topographic wetness index and a distributed model.** *Journal of Hydrology*, vol (373), no.1. pp. 15-23.
- Lee, H. et al. (2009). **Selection of technology acquisition mode using the analytic network process,** *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 49, pp. 1274-1282.
- modelling J.N. Goetz, A. Brenning, H. Petschko, P. Leopold(2015), **Evaluating machine learning and statistical prediction techniques for landslide susceptibility,** *Computers & Geosciences*, Volume 81, August 2015, Pages 1-11.
- Mathew, J., Jha, V.K., Rawat, G.S., 2007. **Weights of evidence modeling for landslide hazard zonation mapping in part of Bhagirathi valley, Uttarakhand.** *Current Sci.* vol (92), no.5. pp. 628-638.
- Mohammady, M., Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., 2012. **Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: Acomparision Between frequency ratio, Dempster-Shafer, and weights-of-evidence models,** *Journal of Asian Earth Sciences* 61. pp. 221–236.
- Moore, I.D., Burch, G.J., 1986. **Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory.** *Water Resource*, no.22. pp. 1350–1360.
- Piacentini, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., Strada, C., 2012. **Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy),** *Geomorphology* vol (151), pp. 196–206.
- Poli, S., Sterlacchini, S., 2007. **Landslide representation strategies in susceptibility Studies using weights-of-evidence modeling technique.** *Natural Resources Research*, vol (16), 121–134.
- Sorensen, R., Zinko, U., Seibert, J., 2006. **On the calculation of the topographic wetnessindex: evaluation of different methods based on field observations.** *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* vol (2), 1807–1834.
- Schmidt, F., Persson, A., 2003. **Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices.** *Precision Agriculture* vol (4), pp. 179–192.
- Van Westen, C.J., 2002. **Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping.** *International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), Enschede, the Netherlands.*
- Wilson, J.P., Gallant, J.C., 2000, **Digital terrain analysis.** In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain Analysis.* John Wiley & Sons, NewYork, pp.1–27.
- Varnes, D.J., 1978. **Slope movements types and processes.** In: Schuster, R.L., Krizek, R.L. (Eds.), *Landslides: Analysis and Control. Special Report 176.* Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C, pp. 11–33.