

تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل تلفیقی نسبت فراوانی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

ملیحه محمدنیا، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.
ابوالقاسم امیراحمدی*، دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.
لیلا سلگی، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

چکیده

حرکات دامنه‌ای و زمین‌لغزش‌ها از جمله مخاطرات نواحی کوهستانی است که هر ساله خسارات زیادی بر پیکره‌ی اقتصاد کشور وارد می‌کند. در سال‌های اخیر عوامل طبیعی و انسانی باعث تشدید خسارت‌های ناشی از زمین‌لغزش‌ها شده است. یکی از راه‌کارهای کاهش خسارات ناشی از زمین‌لغزش‌ها دوری جستن از مناطق خطر است. بدین منظور ضرورت ایجاد می‌کند، نقشه‌ی پهنه‌های خطر برای این مناطق تهیه گردد تا هرگونه ساخت‌وساز و توسعه بر اساس آن انجام پذیرد. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه‌ی دررود و ارزیابی مناطق دارای پتانسیل زمین‌لغزش جهت تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی با استفاده از روش نسبت فراوانی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی است. در این راستا ابتدا ده عامل مؤثر در بروز لغزش در منطقه شناسایی و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS رسترها تهیه و کلاس‌بندی گردید. اوزان معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و اوزان زیرمعیارها با استفاده از روش نسبت فراوانی تعیین و نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش تهیه گردید. نقشه‌ی تهیه‌شده با استفاده از منحنی ROC صحت سنجی و مشخص گردید که نقشه‌ی تهیه‌شده با سطح زیر منحنی ۰/۸۱ دارای قدرت پیش‌بینی خیلی خوب در برآورد خطر لغزش است. شیب ۴۰ تا ۶۰ درجه، دامنه‌های مقعر، ارتفاعات کمتر از ۲۰۰۰ متر، محدوده‌های بارشی بین ۳۳۰-۳۰۰ میلی‌متر، فواصل ۱۰۰-۲۰۰ متری از آبراهه، ۰-۱۰۰ متری از جاده، ۱۰۰-۲۰۰ متری از گسل، دامنه‌های شمال شرق و باغات بیش‌ترین وزن را به خود اختصاص داده است. همچنین عوامل جهت شیب، کاربری اراضی و فاصله از جاده به‌عنوان مؤثرترین عوامل شناسایی گردید.

واژه‌های کلیدی

زمین‌لغزش، پهنه‌بندی، نسبت فراوانی، تحلیل سلسله مراتبی، حوضه‌ی دررود.

مقدمه

حرکات توده‌ای نوعی از مخاطرات طبیعی هستند که هر ساله در نقاط مختلف جهان خسارت‌های جانی و مالی و زیست‌محیطی زیادی به بار می‌آورد (یمانی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۴۸). بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط موسسه شبکه‌ی موضوعی ژئوتکنیک اروپا، زمین‌لغزش به‌تنهایی حدود ۱۷ درصد از بلایای طبیعی جهان را به خود اختصاص داده است (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۳: ۹۰). مطالعات نشان‌گر آن است که خسارات وارده به مناطق مسکونی، زیربنای اقتصادی و همچنین تلفات انسانی ناشی از زمین‌لغزش‌ها در سراسر جهان در حال افزایش است (جوادی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۵۳). بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که تا اوایل سال ۱۳۸۷ وقوع حدود ۲۵۹۰ زمین‌لغزه در کشور موجب مرگ ۱۶۲ نفر، تخریب ۱۷۶ باب خانه، تخریب ۶۷۶۳ هکتار جنگل، تخریب ۱۷۰ کیلومتر راه ارتباطی و ایجاد رسوب سالانه به حجم ۹۶۳۸۰۷ مترمکعب شده است (سپهر و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۰). طبق بررسی‌های وزارت جهاد سازندگی تا سال ۱۳۸۵ حدود ۱۵ هزار زمین‌لغزش در ایران رخ داده است (عابدینی و همکاران، ۱۳۹۴: ۴۴). سهم خسارات ناشی از حرکات توده‌ای در ایران سالانه ۵۰۰ میلیارد ریال برآورد شده است (صدوق ونینی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۰۶).

یکی از وظایف مهم دانش ژئومورفولوژی کاربردی، بررسی موقعیت و ارزش محیط‌های انسانی خطرپذیر و آسیب‌پذیر در برابر انواع مخاطرات ژئومورفیک است (Rosenfeld, 2004: 423)، مقیمی و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۰۴). پهنه‌بندی خطر به مفهوم تقسیم‌بندی سطح زمین به بخش‌های مختلف و رده‌بندی این بخش‌ها بر اساس درجه‌ی خطر (استعداد) زمین‌لغزش‌ها به کار می‌رود. ارزیابی خطر، اولین مرحله از مدیریت و کاهش خطر است و احتمال وقوع زمین‌لغزش را در یک مکان با یک دوره‌ی برگشت برآورد می‌کند (شیرانی و عرب عامری، ۱۳۹۴: ۳۲۲)؛ لذا جهت استفاده‌ی بهینه از محیط طبیعی و منابع موجود در آن و همچنین برای ایجاد تأسیسات زیربنایی، با شناخت کامل از محیط و درک شرایط طبیعی حاکم بر محیط و با اعمال مدیریت صحیح در استفاده از آن تا حدودی می‌توان از تشدید ناپایداری دامنه‌ها وقع زمین‌لغزش ممانعت نمود (عابدینی و ستایشی نسا، ۱۳۹۳: ۱۴۰).

شناخت نواحی مستعد لغزش‌ها یکی از گام‌های اولیه در مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای و عمرانی است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۳: ۴۱). زمین‌لغزش‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی به وقوع می‌پیوندند که گستردگی در عوامل ایجاد آن و تعیین ارتباط بین این عوامل پیچیده است؛ به همین دلیل تکنیک‌های مختلفی برای شناخت و ارتباط بین عوامل مختلف وجود دارد. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش یکی از این تکنیک‌ها است (زارع و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۰۱). از آنجاکه پیش‌بینی زمان و مکان رخداد زمین‌لغزش‌ها از توان دانش فعلی بشر خارج است، لذا برای بیان حساسیت دامنه‌ها به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مناطق مختلف می‌پردازند (علی‌پور و ملکیان، ۱۳۹۴: ۱۶۶).

در زمینه‌ی پیشنهاد مدل‌ها و راه‌کارهای مناسب در زمینه‌ی حساسیت زمین‌لغزش تلاش‌های زیادی توسط محققین مختلف در سراسر دنیا صورت گرفته است، به‌طوری‌که روش‌های مختلفی برای بررسی مناطق لغزشی به‌منظور تهیه نقشه‌ی حساسیت به وقوع زمین‌لغزش مورد آزمون قرار گرفته است. دیویس و بلسیوس^۱ (۲۰۱۵)، نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش حوضه‌ی San Pedro Creek در آمریکا را با استفاده از

1- Davis and Blesius

مدل‌های ترکیبی فیزیکی و ماکزیمم آنتروپی تهیه نمودند. نتایج حاکی از آن است که نقشه‌ی شاخص پایداری از لحاظ پتانسیل حساسیت اغراق‌آمیز است. مارگارینت^۲ و همکاران (۲۰۱۳)، نقشه‌ی حساسیت خطر زمین‌لغزش در شرایط جغرافیایی متفاوت در چهار بخش از کشور رومانی را تهیه نمودند. در این پژوهش عوامل: ارتفاع، زاویه‌ی شیب، ارتفاع شیب، انحناء زمین، فاصله از آبراهه، جهت شیب، کاربری زمین و سنگ‌شناسی را به‌عنوان عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش شناسایی و نقشه‌ی خطر را برای چهار بخش تهیه نمودند. نتایج صحت سنجی نقشه‌ها بر اساس منحنی ROC نشان داد که روش رگرسیون لجستیک در محدوده‌ی مورد مطالعه جهت تهیه‌ی نقشه‌ی خطر لغزش دارای نتیجه‌ی مطلوبی است. پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۳)، به مقایسه‌ی شاخص‌های آنتروپی، رگرسیون لجستیک و مدل نسبت فراوانی در تعیین حساسیت زمین‌لغزش‌های ایران پرداختند. لایه‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل: درجه‌ی شیب، جهت شیب، ارتفاع، انحناء زمین، کاربری زمین، سنگ‌شناسی، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، شاخص توان آبراهه، شاخص حمل رسوب و شاخص رطوبت توپوگرافی است. بر اساس شاخص آنتروپی، شاخص رطوبت توپوگرافی و کاربری زمین و بر اساس رگرسیون لجستیک شاخص رطوبت توپوگرافی و انحناء زمین بیش‌ترین تأثیر را در زمین‌لغزش دارند.

فروزانفر و همکاران (۱۳۹۲)، با استفاده از مدل تلفیقی نسبت فراوانی و تحلیل سلسله مراتبی نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه‌ی تالار استان مازندران را تهیه نمودند. نتایج تحلیل نقشه‌ی و صحت سنجی آن نشان داد که حدود ۷۰ درصد لغزش‌های رخ داده در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد واقع گردیده است که بیانگر دقت مناسب مدل است.

صحت سنجی روش تحلیل سلسله مراتبی و رگرسیون چندمتغیره در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به کمک تکنیک GIS عنوان پژوهشی است که توسط شیرانی و همکاران (۱۳۹۲) در حوضه‌ی رودخانه ماربر انجام گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که روش سلسله مراتبی بر اساس شاخص صحت دارای مطلوبیت بیش‌تری در حوضه‌ی مطالعاتی است.

با توجه به پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در حوضه‌ی مطالعاتی وجود آثار و شواهد وقوع زمین‌لغزش‌های مکرر در محدوده‌ی، تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ارائه‌ی راه‌کارهایی جهت مدیریت خطر، ضروری به نظر می‌رسد. بر همین اساس، عوامل مؤثر در وقوع رخداد زمین‌لغزش در حوضه‌ی دررود شناسایی و میزان تأثیر آن با استفاده از روش AHP^۳ تعیین و نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر بر اساس تلفیق مدل تحلیل سلسله مراتبی و نسبت فراوانی^۴ برای این حوضه تهیه گردید.

منطقه‌ی مورد مطالعه

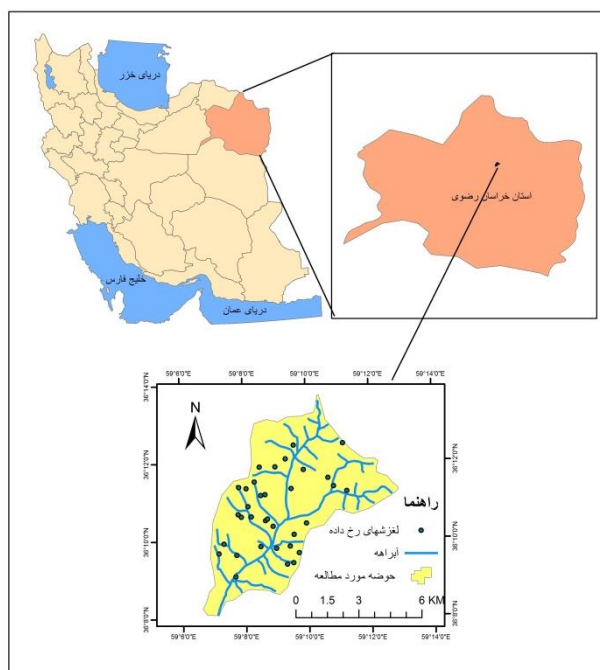
حوضه‌ی آبخیز دررود بخشی از ارتفاعات جنوبی بینالود، در استان خراسان رضوی و در شرق کشور و در محدوده‌ی مطالعاتی بین دو طول شرقی "۵۳' ۴۲° و ۴۰' ۴۹° و عرض‌های "۱۳' ۰۸' ۳۶° تا "۱۸' ۱۱' ۳۶° شمالی قرار گرفته است که وسعت آن حدود ۴۴,۴ کیلومتر مربع است (شکل ۱). حداقل ارتفاع

2- Margarint

3- Analytical Hierarchy Process

4- Frequency Ratio

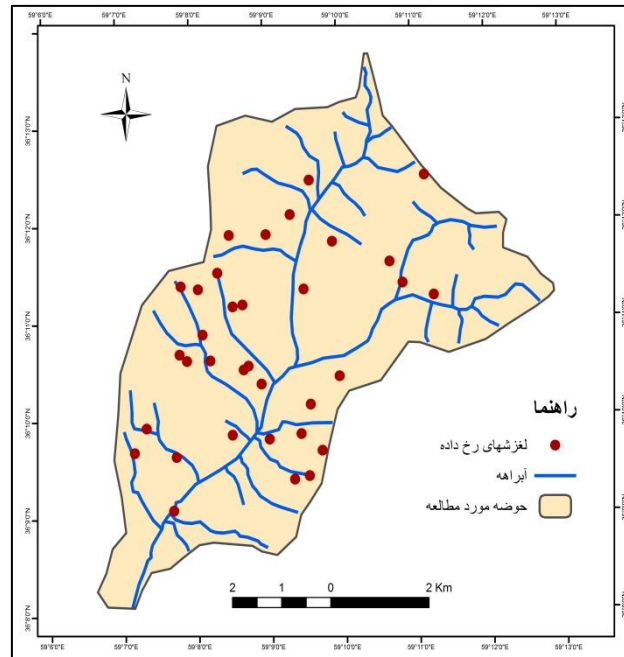
در خروجی حوضه ۱۲۵۲ متر و حداکثر آن ۳۰۱۷ متر منطبق بر خطالرأس ارتفاعات بینالود است. بارش نیز بین ۲۶۹ تا ۴۱۱ میلی‌متر در حوضه متغیر است.



شکل ۱: موقعیت محدوده‌ی مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، تصاویر IRS و آمار و اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی و همچنین اطلاعات مربوط به لغزش‌های رخ داده برگرفته از مطالعات آبخیزداری خراسان رضوی و بازدیدهای میدانی ده عامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش‌ها برای منطقه‌ی مورد مطالعه تعیین گردید که عبارت‌اند از: ارتفاع، درجه‌ی شیب، جهت شیب، نوع شیب، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده و بارش. نقشه‌های درجه، جهت و نوع شیب، ارتفاع و فاصله از آبراهه از روی نقشه‌ی توپوگرافی و مدل رقومی ارتفاع تهیه گردید. جهت تهیه لایه‌های فاصله از گسل و زمین‌شناسی نیز از نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه استفاده گردید. با استفاده از بانک اطلاعاتی لغزش‌های رخ داده‌ی موجود در اداره ی آبخیزداری استان خراسان رضوی موقعیت لغزش‌ها به دست آمد (شکل ۲). سپس با استفاده از گوگل ارث و بررسی‌های میدانی، پهنه‌های لغزشی در منطقه آماده و وارد نرم‌افزار Arc GIS گردید. از تلفیق نقشه‌ی پهنه‌های لغزشی با معیارهای موردنظر تعداد لغزش‌های رخ داده در هر کلاس از عوامل علتی به دست آمد.



شکل ۲: موقعیت لغزش‌های رخ داده

روش احتمالی نسبت فراوانی^۵

نسبت فراوانی، ارتباط کمی میان رخداد لغزش‌ها و متغیرهای مختلف تأثیرگذار در آن را تعیین می‌نماید (سلیمانی، ۱۳۹۳: ۴۱). نسبت فراوانی برای هر کلاس پارامتر برابر است با نسبت درصد لغزش‌ها در کلاس پارامتر به درصد مساحت دربرگیرنده‌ی آن کلاس؛ بنابراین طبق این تعریف، رابطه‌ی زیر برای تعیین مقدار نسبت فراوانی برای هر کلاس از هر کدام از پارامترها توسعه داده شده است:

$$\text{Fri} = \frac{Npix(Si) / \sum_{i=1}^n Npix(Si)}{Npix(Ni) / \sum_{i=1}^n Npix(Ni)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

Fri: مقدار نسبت فراوانی برای کلاس i ام از پارامتر

Npix(Si): تعداد پیکسل‌های حاوی لغزش در کلاس i از پارامتر

Npix(n): تعداد کلاس‌های پارامتر

بدیهی است که هر چه نسبت Fr بزرگ‌تر باشد، رابطه‌ی بین وقوع لغزش و آن کلاس پارامتر قوی‌تر و برعکس کوچک‌تر از واحد بودن این نسبت دلالت بر رابطه‌ی ضعیف‌تر بین وقوع لغزش و آن کلاس پارامتر خواهد داشت؛ زیرا بزرگ‌تر از واحد بودن این پارامتر نشان می‌دهد که تعداد بیش‌تری از لغزش‌ها در مناطقی با این ویژگی اتفاق افتاده است؛ به عبارت دیگر، همبستگی بین این کلاس و لغزش زیاد است.

در ادامه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی وزن‌های مربوط به هر عامل با استفاده از نظرات کارشناسی تخمین زده شد. به این صورت که ابتدا مقایسه‌های دوتایی بین عوامل انجام شد. به منظور تعیین دقت در انجام محاسبات ضریب ناسازگاری کمتر از ۰/۱ قابل قبول است (Ghodsipour, 2006: 32)؛ که ضریب ناسازگاری در تحقیق حاضر، ۰/۰۰۱ به دست آمد. سپس معادله‌ی به دست آمده با توجه به وزن‌های

5- Frequency ratio

محاسبه شده از رابطه‌ی نسبت فراوانی برای هر کلاس عامل و تحلیل سلسله مراتبی در کلیه‌ی واحدهای نقشه و نقشه‌ی پهنه‌بندی بر اساس رابطه‌ی ۲ ترسیم گردید.

$$M = 0.174 X_1 + 0.164 X_2 + 0.144 X_3 + 0.128 X_4 + 0.111 X_5 + 0.091 X_6 + 0.073 X_7 + 0.055 X_8 + 0.036 X_9 + 0.11 X_{10}$$

رابطه (۲)

که در این رابطه M عامل حساسیت و X_1 تا X_{10} به ترتیب عامل‌های جهت شیب، کاربری اراضی، فاصله از جاده، شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، بارش، زمین‌شناسی و نوع شیب است. سپس نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر بر اساس شکست‌های طبیعی (Natural Breake)، به پنج کلاس خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم گردید.

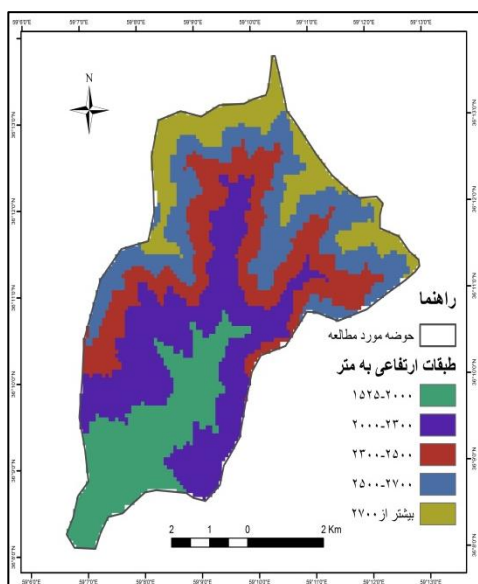
بحث و نتایج

مقادیر حاصل از ارتباط بین هر عامل و با لغزش‌های رخ داده در حوضه‌ی دررود و رابطه‌ی بین نسبت فراوانی بین هر کلاس با عامل‌های مذکور در جدول (۱) آمده است. بررسی عامل ارتفاعی در منطقه نشان داد که در کلاس ارتفاعی ۲۰۰۰-۲۳۰۰ متر بیش‌ترین لغزش‌ها به وقوع پیوسته است. هم‌چنین بیش‌ترین وزن نیز به این کلاس تعلق گرفته است. روند کلی نشان‌گر این موضوع است که با افزایش ارتفاع لغزش‌های کم‌تری به وقوع پیوسته است که برخلاف نظر پاچوری و پنت (۱۹۹۲) که معتقدند در ارتفاعات بالاتر به علت ریزش نزولات جوی به صورت برف و ماندگاری بیش‌تر آن امکان حدوث حرکات لغزشی بیش‌تر است (ایلانلو همکاران، ۱۳۸۹: ۱۳). در این پژوهش عکس این نظر به وقوع پیوسته است که این امر ممکن است به این سبب باشد که در ارتفاعات بالا خاک کم‌تری تشکیل و بنابراین لغزش کم‌تری نیز اتفاق افتاده است. شیب بین ۴۰ تا ۶۰ درجه بیش‌ترین وزن و شیب بین ۰-۲۰ درجه بیش‌ترین لغزش رخ داده را به خود اختصاص داده است. هم‌چنین بیش‌تر لغزش‌های رخ داده در شیب‌های مقعر رخ داده که ممکن است به علت همگرایی رواناب در شیب‌های مقعر و انرژی بیش‌تر آن باشد. در محدوده‌ی بارشی کم‌تر از ۳۰۰ میلی‌متر کم‌ترین درصد لغزش‌ها و در محدوده‌ی ۳۰۰-۳۳۰ میلی‌متر بیش‌ترین لغزش‌ها به وقوع پیوسته است. بررسی لایه‌ی کاربری اراضی نشان داد که بیش‌ترین درصد لغزش‌ها در اراضی جنگلی رخ داده است که این امر ممکن است به علت نفوذ بیش‌تر آب در اراضی جنگلی باشد که با نظرات پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۱) نیز مطابقت دارد. بیش‌ترین وزن اختصاص یافته نیز به باغات اختصاص یافته است. بخش اعظم تشکیلات زمین‌شناسی منطقه شامل سازندهای تریاس (فیلیت و شیل) است که قاعدتاً بیش‌ترین لغزش‌های رخ داده نیز در این لایه به وقوع پیوسته است (حدود ۷۰ درصد لغزش‌ها). بررسی لایه‌ی فاصله از آبراهه نشان داد که بیش‌ترین لغزش‌ها در فاصله ۰-۱۰۰ متری از آبراهه رخ داده است و پس از آن با فاصله گرفتن از آبراهه، درصد لغزش‌ها نیز کاهش داشته است که با نظر مزوقی و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. هم‌چنین در لایه‌ی فاصله از جاده نیز کلاس ۰-۱۰۰ متر بیش‌ترین وزن را به خود اختصاص داده است. فاصله‌ی ۱۰۰-۲۰۰ متری از کسب بیش‌ترین وزن و فاصله ۲۰۰-۵۰۰ متری بیش‌ترین درصد لغزش‌های رخ داده را داشته است. کم‌ترین لغزش وزن در دامنه‌های شمالی حوضه‌ی دررود حادث گردیده است. دامنه‌های جنوب شرق، شرق و شمال غرب نیز به ترتیب بیش‌ترین درصد وقوع لغزش را داشته‌اند.

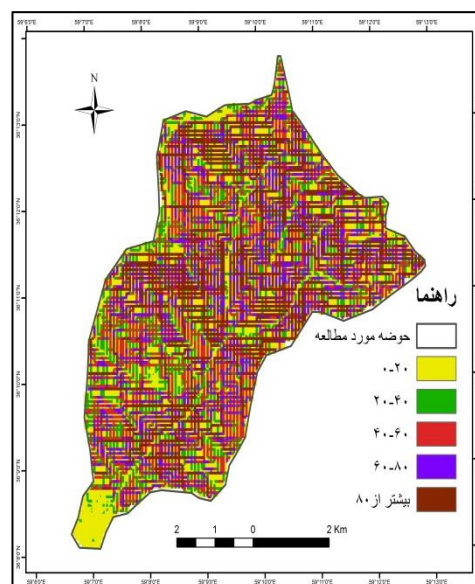
جدول ۱: مقادیر حاصل از ارتباط بین عوامل مختلف و لغزش‌های رخ داده

| عامل | کلاس | تعداد پیکسل‌های لغزشی | درصد پیکسل‌های لغزشی | تعداد پیکسل‌های فاقد لغزش | درصد پیکسل‌های فاقد لغزش | نسبت فراوانی |
|------------------------|----------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------|
| شیب به درجه | ۲۰-۰ | ۲۱۶۱ | ۲۴/۵۶ | ۱۰۵۶۰ | ۲۶/۱۱ | ۰/۹۵۰۶ |
| | ۴۰-۲۰ | ۱۳۸۳ | ۱۵/۷۲ | ۶۲۹۹ | ۱۵/۵۷ | ۱/۰۰۷ |
| | ۶۰-۴۰ | ۱۹۶۳ | ۲۲/۳۱ | ۷۶۰۱ | ۱۸/۷۹ | ۱/۱۴۸۵ |
| | ۸۰-۶۰ | ۱۳۸۴ | ۱۵/۷۳ | ۷۱۲۸ | ۱۷/۶۳ | ۰/۹۰۹۸ |
| | بیش‌تر از ۸۰ | ۱۸۶۵ | ۲۱/۲۰ | ۸۳۹۲ | ۲۰/۷۵ | ۱/۰۱۷۵ |
| نوع تبشیر | مقعر | ۴۷۱۸ | ۵۳/۶۳ | ۱۹۶۲۳ | ۴۸/۵۳ | ۱/۰۸۴۶ |
| | محدب | ۴۰۱۰ | ۴۵/۵۸ | ۲۰۲۹۰ | ۵۰/۱۸ | ۰/۹۲۳۴ |
| ارتفاع به متر | ۲۰۰-۱۵۲۵ | ۱۹۶۸ | ۲۲/۳۷ | ۷۱۴۲ | ۱۷/۶۶ | ۱/۲۰۸۹ |
| | ۲۳۰۰-۲۰۰۰ | ۳۶۶۴ | ۴۱/۴۵ | ۹۶۹۳ | ۲۳/۹۷ | ۱/۵۳۵۰ |
| | ۲۵۰۰-۲۳۰۰ | ۱۷۶۴ | ۲۰/۰۵ | ۸۲۷۴ | ۲۰/۴۶ | ۰/۹۸۳۴ |
| | ۲۷۰۰-۲۵۰۰ | ۱۱۱۹ | بیش‌تر از ۲۷۰۰ | ۸۹۸۲ | ۲۲/۲۱ | ۰/۶۱۹۹ |
| | بیش‌تر از ۲۷۰۰ | ۲۸۱ | ۳۰۰-۲۶۹ | ۶۰۱۸ | ۱۴/۸۸ | ۰/۲۴۹۶ |
| بارش | ۳۰۰-۲۶۹ | ۸۳۳ | ۹/۴۶ | ۴۰۶۷ | ۱۰/۰۵ | ۰/۹۵۱۳ |
| | ۳۳۰-۳۰۰ | ۳۳۲۱ | ۳۷/۷۵ | ۷۸۶۵ | ۱۹/۴۵ | ۱/۶۶۱۴ |
| | ۳۶۰-۳۳۰ | ۳۱۴۸ | ۳۵/۷۸ | ۱۲۳۳۰ | ۳۰/۴۹ | ۱/۱۳۸۱ |
| | بیش‌تر از ۳۶۰ | ۱۴۷۸ | ۱۶/۸۰ | ۱۵۷۴۷ | ۳۸/۹۴ | ۰/۴۸۰۱ |
| کاربری اراضی | کشاورزی | ۰ | ۰ | ۷۷۴ | ۱/۹۱ | ۰ |
| | شهر | ۰ | ۰ | ۳۴۳ | ۰/۸۴ | ۰ |
| | باغ | ۱۰۱۳ | ۱۱/۵۱ | ۱۰۲۰ | ۲/۵۲ | ۲/۷۸۸۴ |
| | مرتع | ۱۴۷۴ | ۲۸/۱۲ | ۶۳۱۱ | ۱۵/۶۰ | ۱/۵۷۵۹ |
| | اراضی جنگلی | ۵۲۷۲ | ۵۹/۹۳ | ۳۱۷۷۷ | ۷۸/۵۹ | ۰/۷۹۶۳ |
| زمین‌شناسی | تریاس | ۶۲۲۹ | ۷۰/۸۰ | ۳۱۶۸۲ | ۷۸/۳۵ | ۰/۹۱۹۴ |
| | سیلورین-دونین | ۲۳۴۶ | ۲۶/۶۶ | ۶۲۷۴ | ۱۵/۵۱ | ۱/۵۲۳۰ |
| | کواترنر | ۱۸۰ | ۲/۰۴ | ۱۰۹۹ | ۲/۷۱ | ۰/۷۸۷۵ |
| | پالئوژن | ۲۱ | ۰/۲۳ | ۶۴۰ | ۱/۵۸ | ۰/۱۷۷۷ |
| | نئوژن | ۰ | ۰ | ۵۹۰ | ۱/۴۵ | ۰ |
| فاصله از آبراهه به متر | ۱۰۰-۰ | ۲۴۹۲ | ۲۸/۳۲ | ۱۱۲۴۹ | ۲۷/۸۲ | ۱/۰۱۴۸ |
| | ۲۰۰-۱۰۰ | ۲۱۶۱ | ۲۴/۵۶ | ۸۵۳۶ | ۲۱/۱۱ | ۱/۱۳۰۵ |
| | ۳۰۰-۲۰۰ | ۱۹۲۲ | ۲۱/۸۴ | ۷۷۳۳ | ۱۹/۱۲ | ۱/۱۱۴۰ |
| | ۵۰۰-۳۰۰ | ۱۷۲۲ | ۲۰/۱۴ | ۸۳۹۱ | ۲۰/۷۵ | ۰/۹۷۵۷ |
| | بیش‌تر از ۵۰۰ | ۴۵۴ | ۵/۱۶ | ۴۴۸۴ | ۱۱/۰۹ | ۰/۵۱۴۵ |
| فاصله از جاده به متر | جاده ۱۰۰-۰ | ۱۰۰۲ | ۱۱/۳۹ | ۴۰۲۳ | ۹/۹۵ | ۱/۱۱۵۸ |
| | ۲۰۰-۱۰۰ | ۷۶۳ | ۸/۶۷ | ۳۴۴۰ | ۸/۵۰ | ۰/۰۱۵۹ |
| | ۵۰۰-۲۰۰ | ۲۳۷۲ | ۲۶/۹۶ | ۱۰۲۱۴ | ۲۵/۲۶ | ۱/۰۵۴۶ |
| | ۱۰۰۰-۵۰۰ | ۲۷۴۸ | ۳۱/۲۳ | ۱۴۲۹۹ | ۳۵/۳۶ | ۰/۹۰۲۱ |

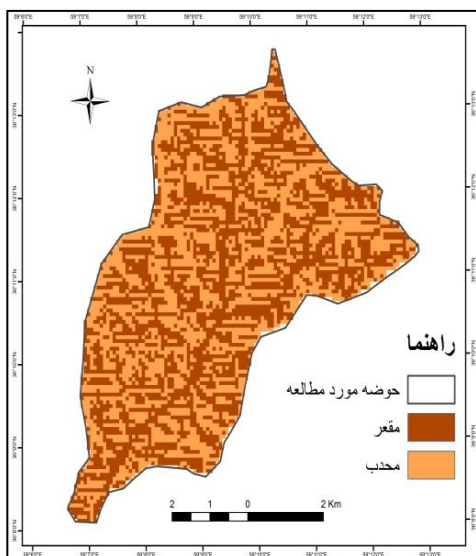
| | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|------|----------------|---------------------|
| ۱/۰۴۹۵ | ۲۰/۶۷ | ۸۳۶۱ | ۲۱/۹۳ | ۱۹۳۰ | بیش‌تر از ۱۰۰۰ | فاصله از گسل به متر |
| ۰/۹۶۵۷ | ۱۴/۳۲ | ۵۷۹۲ | ۱۳/۷۳ | ۱۲۰۸ | گسل ۱۰۰-۰ | |
| ۱/۲۱۰۸ | ۱۱/۵۱ | ۴۶۵۴ | ۱۴/۶۰ | ۱۲۸۵ | ۲۰۰-۱۰۰ | |
| ۱/۱۴۰۶ | ۳۲/۱۵ | ۱۲۹۹۹ | ۳۷/۸۳ | ۳۳۲۸ | ۵۰۰-۲۰۰ | |
| ۰/۹۳۸۱ | ۳۰/۷۲ | ۱۲۴۲۳ | ۲۸/۴۴ | ۲۵۰۲ | ۱۰۰۰-۵۰۰ | |
| ۰/۵۳۳۲ | ۱۱/۲۲ | ۴۵۳۸ | ۵/۴۳ | ۴۷۸ | بیش‌تر از ۱۰۰۰ | |
| ۰/۵۴۹۰ | ۲/۷۰ | ۱۰۹۴ | ۱/۳۵ | ۱۱۹ | شمال | جهت شیب |
| ۱/۹۱۸۷ | ۳/۶۹ | ۱۴۹۳ | ۸/۸۵ | ۷۷۹ | شمال شرق | |
| ۱/۶۶۷۵ | ۸/۵۷ | ۳۴۶۸ | ۱۶/۷۳ | ۱۴۷۲ | شرق | |
| ۰/۹۶۱۳ | ۱۹/۵۹ | ۷۹۲۱ | ۱۸/۶۷ | ۱۶۴۳ | جنوب شرق | |
| ۰/۶۵۲۷ | ۲۱/۹۷ | ۸۸۸۳ | ۱۳/۳۳ | ۱۱۷۳ | جنوب | |
| ۰/۶۵۶۴ | ۱۶/۲۴ | ۶۵۶۹ | ۹/۹۲ | ۸۷۳ | جنوب غرب | |
| ۱/۲۷۷۷ | ۱۰/۰۳ | ۴۰۵۹ | ۱۳/۶۵ | ۱۲۰۱ | غرب | |
| ۱/۰۱۱۴ | ۱۶/۳۴ | ۶۶۰۹ | ۱۶/۵۷ | ۱۴۵۸ | شمال غرب | |



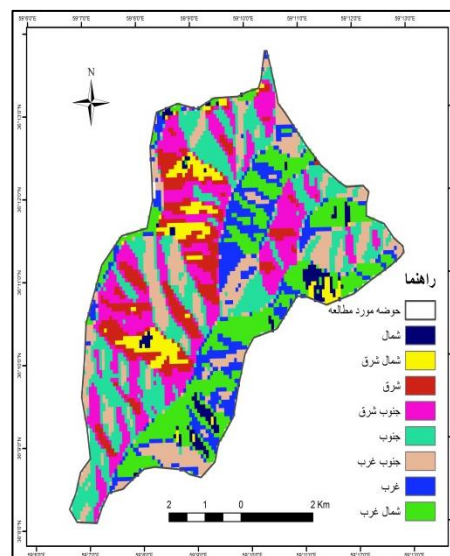
شکل ۴: نقشه‌ی ارتفاع حوضه‌ی مورد مطالعه



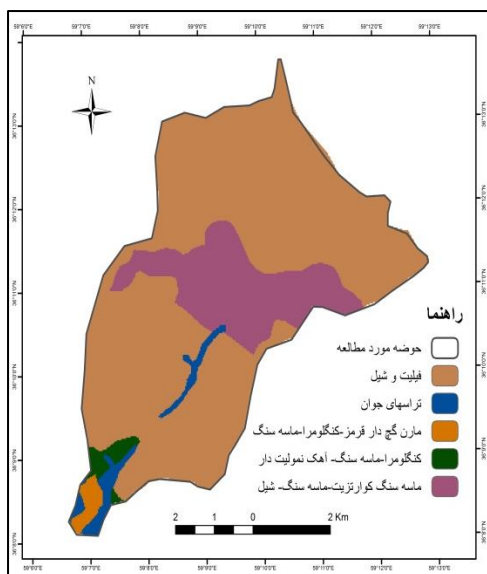
شکل ۳: نقشه‌ی شیب حوضه‌ی مورد مطالعه



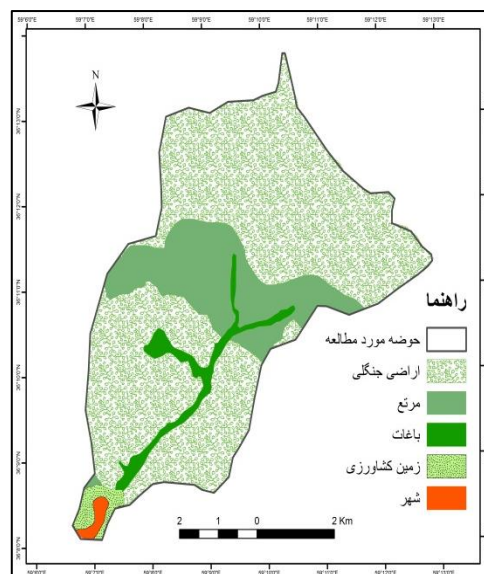
شکل ۶- نقشه‌ی نوع شیب حوضه‌ی مورد مطالعه



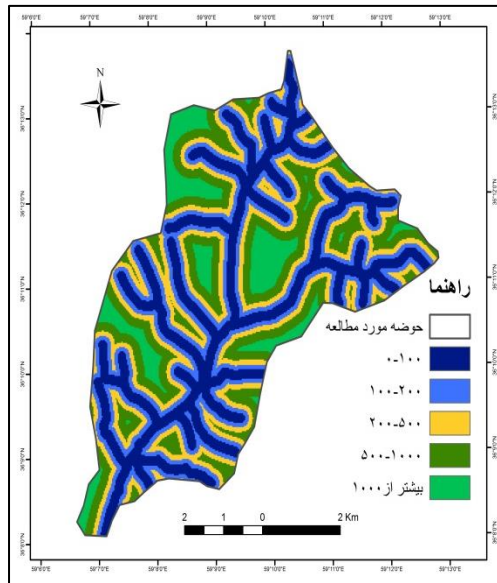
شکل ۵- نقشه‌ی نوع جهت حوضه‌ی مورد مطالعه



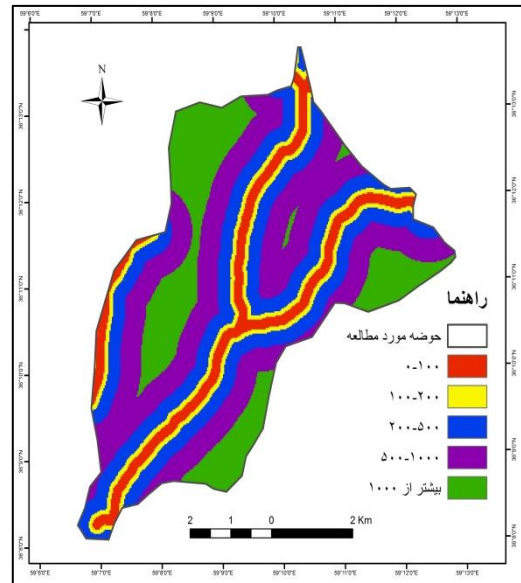
شکل ۸- نقشه‌ی زمین‌شناسی حوضه‌ی مورد مطالعه



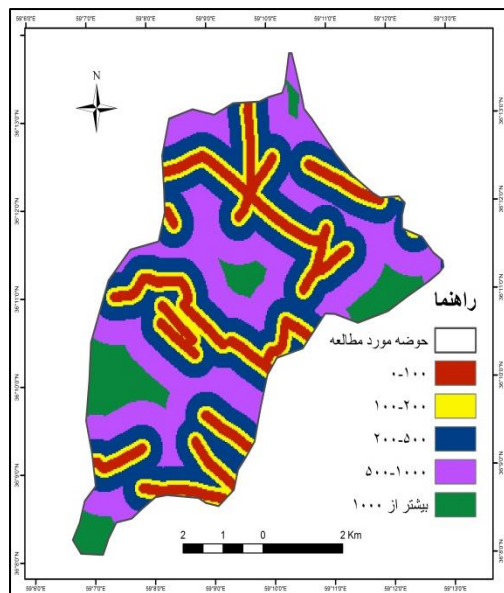
شکل ۷- نقشه‌ی کاربری اراضی حوضه‌ی مورد مطالعه



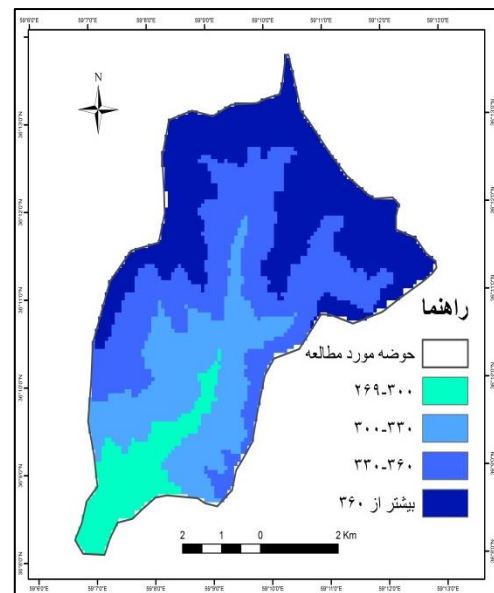
شکل ۱۰- نقشه فاصله از آبراهه حوضه مورد مطالعه



شکل ۹- نقشه فاصله از جاده حوضه مورد مطالعه



۱۲- نقشه فاصله از گسل حوضه مورد مطالعه



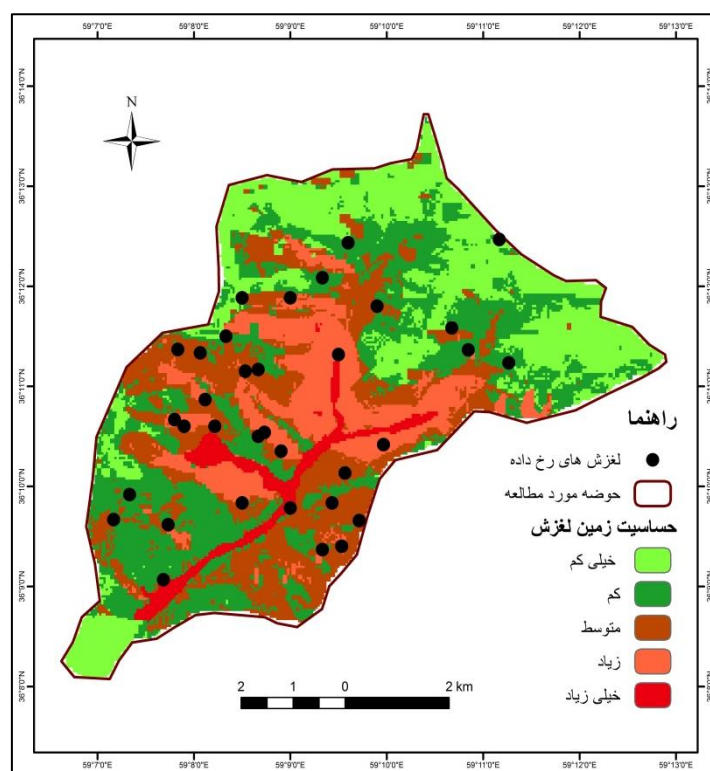
شکل ۱۱- نقشه بارش حوضه مورد مطالعه

طبق محاسبات انجام شده بیشترین تأثیر در وقوع زمین لغزشها مربوط به عامل جهت شیب و کاربری اراضی است. پس از آن لایه های فاصله از جاده، شیب، ارتفاع و فاصله از آبراهه و گسل بیشترین تأثیر را در وقوع لغزش داشته اند. عامل زمین شناسی در این پژوهش، تأثیر چندانی بر وقوع زمین لغزش نداشته است که این امر ممکن است در نتیجه ی یکنواختی نسبی منطقه از نظر سازندهای زمین شناسی باشد که بخش اعظم تشکیلات آن مربوط به تریاس شمال فیلیت و شیل است (جدول ۲).

جدول ۲: وزن عوامل محاسبه‌شده بر اساس روش AHP

| عوامل | جهت شیب | کاربری اراضی | فاصله از جاده | شیب | ارتفاع | فاصله از آبراهه | فاصله از گسل | بارش | زمین‌شناسی | نوع شیب |
|-------------------|---------|--------------|---------------|-------|--------|-----------------|--------------|-------|------------|---------|
| وزن‌های نرمال شده | ۰/۱۷۴ | ۰/۱۶۴ | ۰/۱۴۴ | ۰/۱۲۸ | ۰/۱۱۱ | ۰/۰۹۱ | ۰/۰۷۳ | ۰/۰۵۵ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۱۱ |

درنهایت با استفاده از جمع وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر کلاس، نقشه‌ی پهنه‌بندی حساسیت برای حوضه‌ی آبریز دررود تهیه گردید. کلاس‌بندی نقشه‌ی حساسیت بر اساس نقاط شکست طبیعی نمودار انجام گرفت و بازه‌ی اعداد حساسیت به پنج کلاس خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی گردید (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش حوضه‌ی دررود

ارزیابی نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از منحنی ROC^۶

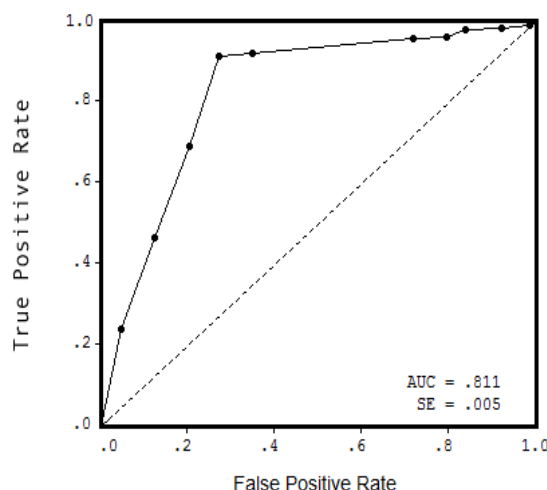
منحنی تجمعی، روشی مفید در نشان دادن کیفیت تشخیص‌های احتمالاتی و قطعی و سیستم‌های پیش‌بینی است. منحنی ROC یکی از مفیدترین و کارآمدترین روش‌ها در ارائه‌ی خصوصیات تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به‌صورت کمی برآورد می‌کند (ون وسترن^۷، ۲۰۰۲: ۸). در منحنی ROC ایده‌آل‌ترین مدل، بیش‌ترین سطح زیر منحنی را دارد و مقادیر AUC از ۰٫۵ تا ۱ متغیر است. چنانچه مدلی نتواند رخداد لغزشی را بهتر از دیدگاه احتمالی (تصادفی) تخمین زند مقدار AUC آن ۰٫۵ است و زمانی که منحنی ROC، سطح زیرمنحنی برابر با یک داشته باشد، بیانگر بهترین

6- Relative Operating Characteristics Curve

7- Van western

دقت از نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه‌شده، است. همبستگی کمی- کیفی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به‌صورت زیر است: (۰٫۹-۱، عالی، ۰٫۸-۰٫۹، خیلی خوب، ۰٫۷-۰٫۸، خوب، ۰٫۶-۰٫۷، متوسط، ۰٫۵-۰٫۶، ضعیف) (ون و سترن، ۲۰۰۲: ۹).

نتایج تحلیل منحنی ROC نشان داد که نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش تهیه‌شده در حوضه‌ی دررود با ۰٫۸۱/ اطمینان و سطح زیرمنحنی ۰٫۸۱/ دارای قدرت پیش‌بینی خیلی خوب است.



شکل ۱۴: منحنی ROC مربوط به نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش حوضه‌ی مطالعاتی

نتیجه‌گیری

حرکات دامنه‌ای و بالأخص زمین لغزش یکی از حوادث طبیعی غیرمترقبه در مناطق کوهستانی است که هرساله خسارت فراوانی بر اقتصاد کشور وارد می‌کند. هدف این پژوهش، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در بخشی از ارتفاعات جنوبی بینالود (حوضه‌ی دررود) با استفاده از روش AHP و نسبت فراوانی است. در این راستا ده عامل مؤثر (ارتفاع، درجه‌ی شیب، جهت شیب، نوع شیب، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده و بارش. نقشه‌های درجه، جهت و نوع شیب، ارتفاع و فاصله از آبراهه) در بروز لغزش‌ها در حوضه‌ی مطالعاتی شناسایی و لایه‌های اطلاعاتی مربوط به این عوامل تهیه و وارد نرم‌افزار Arc GIS گردید. وزن زیرمعیارها با استفاده از روش نسبت فراوانی وزن معیارها با استفاده از روش AHP و نظرات کارشناسی تعیین و نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش برای حوضه به دست آمد. نقشه‌ی حاصل با استفاده از شکست‌های طبیعی به پنج کلاس خطر تقسیم گردید. حدود ۳۱/۵ درصد از مساحت حوضه دارای خطر خیلی کم، ۳۳/۲ درصد در محدوده‌ی خطر کم، ۱۹/۲۲ درصد در محدوده‌ی خطر متوسط، ۱۱/۳۷ و ۴/۲۴ درصد نیز در محدوده‌ی خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. عوامل جهت شیب، کاربری اراضی و فاصله از جاده به‌عنوان مؤثرترین عوامل در محدوده‌ی مورد مطالعه شناسایی گردید. نقشه‌ی خطر تهیه‌شده با استفاده از منحنی و سطح زیرمنحنی صحت سنجی گردید و مشخص شد نقشه‌ی تهیه‌شده با ۰٫۸۱/ اطمینان دقت خیلی خوبی در پیش‌بینی لغزش‌ها دارد. جهت کاهش نسبی خطرات و افزایش پایداری دامنه‌ها و با توجه به شرایط حاکم بر حوضه پیشنهاد می‌گردد که هرگونه سرمایه‌گذاری و احداث سازه باید با توجه به شرایط

ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی انجام گیرد و از تغییر کاربری اراضی در مناطق مستعد زمین‌لغزش اجتناب گردد.

منابع

۱. ایلانلو، مریم، مقیمی، ابراهیم، ثروتی، محمدرضا، قهرودی تالی، منیژه (۱۳۸۹). پهنه‌بندی خطر حرکات توده‌ای با استفاده از روش منطق فازی (مطالعه‌ی موردی حوضه‌ی آبخیز سیرا)، مجله‌ی چشم‌انداز جغرافیایی، سال پنجم، شماره‌ی ۱۱، صص ۲۶-۱۲.
۲. پورقاسمی، حمیدرضا، مرادی، حمیدرضا، محمدی، مجید، مصطفی‌زاده، رئوف، گلی‌جیرنده، عباس (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین، مجله‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌و‌خاک، سال شانزدهم، شماره‌ی ۶۲، صص ۱۲۳-۱۰۹.
۳. جوادی، محمدرضا، صدیقی، مهدی، غلامی، شعبان‌علی (۱۳۹۳). ارزیابی کارایی مدل‌های آماری ارزش اطلاعاتی و رگرسیون لجستیک در تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در زیرحوضه‌ی پهنه‌ی کلا، مجله‌ی پژوهش‌های علوم آب‌و‌خاک، جلد ۲۸، شماره‌ی ۱، صص ۱۶۲-۱۵۳.
۴. زارع، محمد، مقدم‌نیا، علیرضا، تالی خشک، صادق، سلمان‌ی، حسین (۱۳۹۴). پهنه‌بندی حساسیت خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل نروفازی در حوضه‌ی آبخیز واز، پژوهشنامه‌ی مدیریت حوضه‌ی آبخیز، سال ششم، شماره‌ی ۱۱، صص ۱۱۰-۱۰۱.
۵. سپهر، عادل، بهنیافر، ابوالفضل، محمدیان، عباسعلی، عبداللهی، ابوالفضل (۱۳۹۲). تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت پذیری زمین‌لغزش دامنه‌های شمالی بینالود بر پایه‌ی الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکتور، فصلنامه‌ی پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دوم، شماره‌ی ۱، صص ۳۴-۱۹.
۶. سلیمانی، کریم، زندی، جلال، حبیب‌نژاد روشن، محمود (۱۳۹۳). ارزیابی کارایی روش‌های نسبت فراوانی آماری دومتغیره W_i و W_f در تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت زمین‌لغزش (مطالعه‌ی موردی حوضه‌ی آبخیز وازرود مازندران)، مجله‌ی علوم زمین-زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست، سال ۲۴، شماره‌ی ۹۴، صص ۵۰-۴۱.
۷. شیرانی، کورش، عرب عامری، علیرضا (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از روش رگرسیون لجستیک (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی دز علیا)، مجله‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌و‌خاک، سال نوزدهم، شماره‌ی هفتاد و دوم، صص ۳۳۴-۳۲۱.
۸. شیرانی، کوروش، سیف، عبدالله، علی‌مرادی، مسعود (۱۳۹۲). صحت سنجی روش تحلیل سلسله مراتبی و رگرسیون چندمتغیره در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به کمک تکنیک GIS (مطالعه‌ی موردی حوضه‌ی رودخانه ماربر)، فصلنامه‌ی مهندسی اطلاعات مکانی، سال یکم، شماره‌ی دوم، صص ۹۱-۱۰۹.
۹. صدوق ونینی، حسن، ثروتی، محمدرضا، نصرتی، کاظم، اسدی، میترا، صدیق قربانی (۱۳۹۴). پهنه‌بندی زمین‌لغزش در منطقه‌ی کاشتر کامیاران برای کاهش مخاطرات، فصلنامه‌ی دانش مخاطرات، دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۱، صص ۱۱۶-۱۰۵.
۱۰. عابدینی، موسی، بهشتی، جاوید، ابراهیم، فتحی، محمدحسین (۱۳۹۴). پهنه‌بندی حساسیت خطر وقوع زمین‌لغزش با مدل‌های آماری دومتغیره و منطق فازی (مطالعه‌ی موردی حوضه‌ی آبخیز بالخلو)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۶، پیاپی ۵۹، شماره‌ی ۳، صص ۶۰-۴۳.

۱۱. عابدینی، موسی، ستایشی نسا، حسن (۱۳۹۳). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز گلجه، جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۱۸، شماره‌ی ۴۹، صص ۱۶۵-۱۳۹.
۱۲. علی‌پور، حمید، ملکیان، آرش (۱۳۹۴). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه‌ی جهان اسفراین خراسان شمالی، فصلنامه‌ی جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۳۹، صص ۱۸۰-۱۶۵.
۱۳. فروزانفر، میلاد، وهاب‌زاده، قربان، پورقاسمی، حمیدرضا (۱۳۹۲). تهیه نقشه‌ی حساسیت زمین لغزش با استفاده از مدل تلفیقی نسبت فراوانی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، پژوهش‌های فرسایش محیطی، سال سوم، شماره‌ی ۱۲، صص ۱۹-۱۷.
۱۴. محمدخان، شیرین، ویسی، عبدالکریم، باقری، کیوان (۱۳۹۳). پتانسیل سنجی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل آنترپی (منطقه‌ی کوهستانی شیرپناه در جنوب غرب استان کرمانشاه)، فصلنامه‌ی جغرافیایی سرزمین، سال یازدهم، شماره‌ی ۴۴، صص ۱۰۲-۸۹.
۱۵. مقیمی، ابراهیم، یمانی، مجتبی، رحیمی هرآبادی، سعید (۱۳۹۲). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در شهر رودبار با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره‌ی ۴، صص ۱۱۸-۱۰۳.
۱۶. یمانی، مجتبی، گورابی، ابوالقاسم، پیرانی، پریسا، مرادی‌پور، فاطمه، شعبانی عراقی، عارفه (۱۳۹۳). ارزیابی ژئومورفولوژیکی زمین لغزش تاقدیس سیاه‌کوه غرب ایران، فصلنامه‌ی برنامه‌ریزی و آمایش فضا، دوره‌ی هجدهم، شماره‌ی ۳، صص ۱۶۹-۱۴۸.
17. Davis, J., & Blesius, L. (2015). A hybrid physical and maximum-entropy landslide susceptibility model. *Entropy*, Volume 17(6), pp 4271-4292.
18. Ghodsipour, H. (2006). Discussion about multi criteria decision and AHP, publication Amir Kabir Industry University.
19. Pourghasemi, H. R, Pradhan, B., Moradi, H. R, mohammadi, M & Bednarik M (2013). A comparative Assessment Between index of Entropy, Logistic Regression and Frequency Ratio Model for Natural Disasters- causes, effects and Mitigation.
20. Margarint, M. C., Grozavu, A., & Patriche, C. V. (2013). Assessing the spatial variability of coefficients of landslide predictors in different regions of Romania using logistic regression. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Volume 13, pp 3339-3355.
21. Mezughi, T. H., Akhir, J. M., Rafek, A. G., & Abdullah, I. (2011). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model applied to an area along the EW highway (Gerik-Jeli). *American Journal of Environmental Sciences*, Volume 7(1), pp 43-50.
22. Rosenfeld, C. L. (2004). Geomorphological Hazard, *Encyclopedia of Geomorphology*, Volume 1, pp 423-426.
23. Van Western, C.J. (2002). Use of weights of evidence modeling for Landslide susceptibility mapping, 21pp.