

ارزیابی کارایی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه آبخیز سد کردستان

علیرضا ایلدرمی* - دانشیار، گروه مهندسی طبیعت دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر.
فؤاد عبادی - دانش آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۲۳ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸

چکیده

پهنه‌بندی و ارزیابی خطر زمین لغزش به عنوان اولین مرحله مدیریت صحیح محیطی به منظور کاهش اثرات آن ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این پژوهش، ارزیابی مدل‌های آماری پهنه‌بندی خطر لغزش در حوضه سد کردستان است. ابتدا محدوده مورد مطالعه تعیین و با مشاهدات میدانی تعداد ۹ لغزش ثبت و نقشه پراکنش زمین لغزش تهیه گردید. سپس نقشه هر یک از لایه‌های اطلاعاتی عوامل موثر تهیه و با نقشه پراکنش زمین لغزش تلفیق و با استفاده از مدل‌های آماری نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه تهیه شد. بعلاوه به منظور ارزیابی صحت و دقت مدل‌ها و انتخاب مدل برتر از شاخص زمین لغزش، ویژگی دقت نتایج پیش‌بینی شده و نسبت تراکم استفاده گردید. نتایج نشان داد که در مدل ارزش اطلاعاتی سطحی معادل $20/1$ ، تراکم سطح $7/11$ ، $LNRF$ $21/5$ و در نسبت فراوانی $68/52$ در صد در طبقه خطر زیاد قرار دارد. نتایج شاخص Qs نشان می‌دهد که مدل‌های ارزش اطلاعاتی و $LNRF$ به ترتیب با مقدار $2/41$ و $2/89$ از عملکرد بهتر و دقیق‌تری برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه برخوردارند. همچنین مقدار شاخص Li بیانگر این است که مدل‌های $LNRF$ و ارزش اطلاعاتی در تفکیک بین رده‌های خطر بیشترین مطلوبیت و دقت را از نظر روش در حوضه دارند. مقدار شاخص P نشان می‌دهد که مدل‌های ارزش اطلاعاتی با مقدار $0/81$ $LNRF$ به مقدار $0/89$ مدل‌های مناسب و منطبق با منطقه بررسی شده می‌باشند و مدل‌های نسبت فراوانی و تراکم سطح از دقت کمتری برخوردارند. پیشنهاد می‌شود به منظور افزایش دقت و مقایسه نتایج مدل‌های ارزیابی خطر پهنه‌بندی زمین لغزش از شاخص‌های ژئومورفومتریک همچون تأثیر انحنا، انحنا متقاطع، انحنا سطح و گوسی و تکتونیک استفاده شود.

واژگان کلیدی: زمین لغزش، نسبت فراوانی، ارزش اطلاعات، تراکم سطح و $LNRF$ کردستان.

مقدمه

ارزیابی پتانسیل خطر زمین لغزش از راه تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش امکان پذیر است (وانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۵: ۶۴۶). طی دو دهه گذشته، تهیه نقشه‌های حساسیت زمین لغزش برای ارزیابی خطر لغزش بسیار مهم بوده و به روش موثری تبدیل شده است (رائو^۲ و همکاران، ۲۰۱۷: ۵۴۵). به طوری که در حال حاضر نتایج نقشه‌های تهیه شده برای مدیریت زمین لغزش و کاهش خطرهای آن به شکل گسترده در دنیا استفاده و کاربرد پیدا کرده است (هونگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۲۶). بررسی‌ها نشان می‌دهد که عمده زمین لغزش‌ها در مناطق کوهستانی شایع بوده و بیشتر هم رخ می‌دهد (چوسیناتی^۴ و همکاران، ۲۰۱۶: ۶)، و باعث خسارت‌های جدی به انسان و اقتصاد بشر می‌شوند (هونگ و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۲۳). اخیراً بر اساس گزارش وقایع زلزله‌خیز جهانی به طور متوسط زمین لغزش‌ها باعث میلیاردها دلار خسارت اقتصادی در کشورهای چون ژاپن، هند، ایتالیا و آمریکا می‌شود (باسو^۵ و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۲۵۳). بررسی‌ها در خصوص زمین لغزش حاکی از این است که زمین لغزش مخاطره‌ای است که اغلب به فراوانی روی می‌دهد و در همه دنیا به عنوان یک تهدید جهانی برای انسان و زیرساخت‌ها مورد توجه قرار گرفته است (بروئکس^۶ و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۲). اما مطالعات معدودی در زمینه استفاده از روش‌های تطبیقی در رابطه با ارزیابی زمین لغزش‌ها، پهنه‌بندی و افزایش دقت نقشه‌های خطر زمین لغزش انجام شده است (کوتانزو^۷ و همکاران، ۲۰۱۲: ۳۲۷). تاکنون روش‌ها و مدل‌های متعددی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش پیشنهاد شده است، که در واقع روش‌های تعیینی غیرمستقیم تحلیل خطر به شمار می‌آیند و زمانی که شرایط زمین‌شناسی و ژئومورفیکی به نسبت همگنی در کل منطقه برقرار باشد و زمین لغزش‌ها ساده و کم‌تنوع باشند، کاربرد دارند. این مسئله از معایب عمده این روش‌ها بوده و علاوه، ساده‌سازی زیادی در آن‌ها وجود دارد که موجب کاهش دقت آن‌ها می‌شود ایلدرمی و همکاران (۱۳۹۶). نتایج تحقیقات انجام شده در ایران و خارج از کشور حاکی از آن است که هر یک از روش‌های تجربی و تعیینی برای منطقه خاصی ابداع شده‌اند و از دقت و صحت قابل قبولی برای ارزیابی خطر زمین لغزش برخوردار نیستند. از طرف دیگر مدل‌های آماری ارزیابی خطر زمین لغزش علی‌رغم دقت و صحت در اکثر موارد به علت تفاوت شرایط محیطی و روش کار نتایج متفاوتی ارائه می‌نمایند. لذا به کارگیری مدل‌های مناسب، مستلزم اثبات صحت، دقت و مقایسه نتایج حاصله در ارزیابی خطر زمین لغزش است. بدین منظور هدف از این بررسی مقایسه تطبیقی دقت و صحت نتایج مدل‌های ارزیابی خطر زمین لغزش در حوضه کردستان است.

محققین از روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش استفاده می‌کنند که کارایی هر کدام از این روش‌ها در مناطق مختلف متفاوت است (اصغری و همکاران، ۱۳۹۷). در سال‌های اخیر موضوع توسعه و گسترش روش‌ها و مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به همراه اصلاح آن‌ها، ارزیابی و مقایسه تطبیقی صحت و دقت مدل‌های آماری بسیار مورد توجه محققین در ایران و دنیا قرار گرفته است. که از آن جمله بختیاری و همکاران (۱۳۹۷) در مقایسه سه روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، شبکه عصبی مصنوعی و تراکم سطح در حوضه آبخیز سیمره هومیان نشان دادند که روش شبکه عصبی بر اساس آماره‌های صحت سنجی از دقت قابل قبولی برخوردار است. زارع و همکاران (۱۳۹۷) در ارزیابی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز خارستان اقلید فارس با استفاده از مدل‌های LNR و WINF به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش پرداختند. نتایج نشان داد که با توجه به مقادیر شاخص زمین لغزش، نسبت تراکم مجموع کیفیت، مدل LNR از عملکرد بهتری در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش برخوردار است. نوجوان و همکاران (۱۳۹۸) در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

1. Wang

2. Rao

3. Hong

4. Chousianitis

5. Basu

6. Broeckx

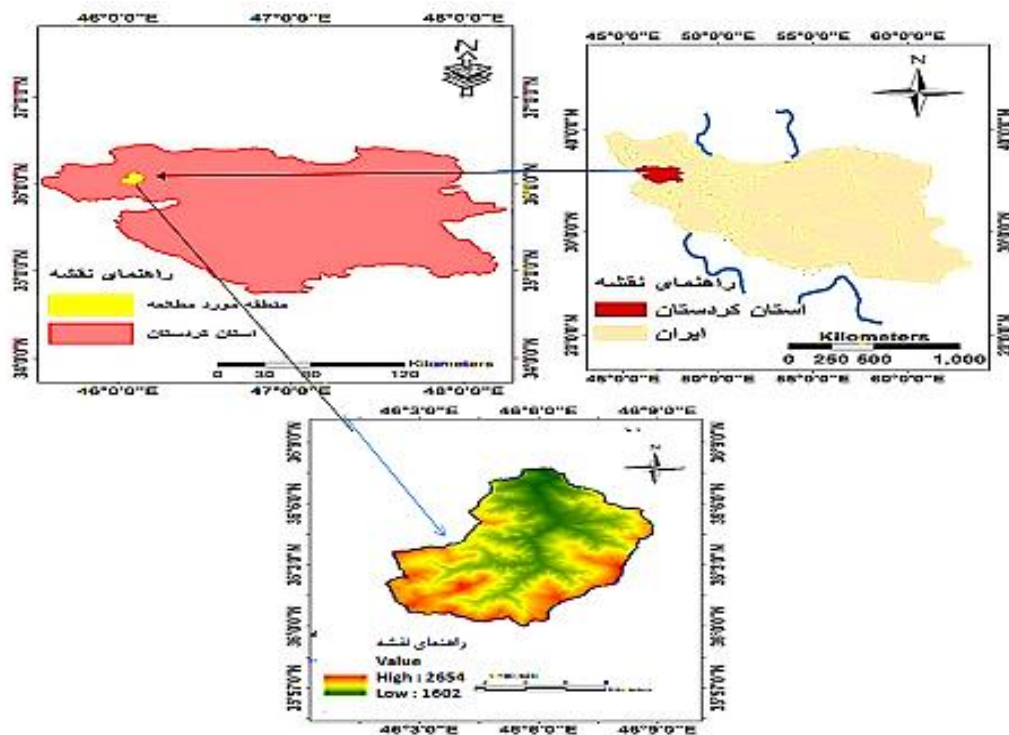
7. Cotaanzo

با استفاده از تلفیق دو مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فازی در حوضه آبخیز کمه، استان اصفهان به این نتیجه رسیدند که اپراتور فازی گامای ۰/۸ با ۶/۴۴ بالاترین مقدار QS را در میان سایر اپراتورهای فازی دارد. آرمین و همکاران (۱۳۹۸) در پهنه‌بندی زمین‌لغزش و برنامه مدیریتی کنترل خطر آن در استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از مدل حائری-سمیعی نشان دادند که مدل توانسته است پهنه‌های خطر زمین‌لغزش را به خوبی از هم تفکیک کند و در کلاس خطر بسیار کم از دقت بیشتری برخوردار است. وانگ^۱ و همکاران (۲۰۱۶) در یک بررسی با مقایسه نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش حاصل از دو مدل دمپستر شفر و وزن شاهد با بهره‌گیری از شاخص‌های مورفومتری شکل دامنه نشان دادند که مدل شفر دارای دقت و کارایی بیشتری است. شارما^۲ و همکاران (۲۰۱۷) با تحلیل مورفوتکتونیک‌های قسمت‌هایی از شمال هندوستان با استفاده از شاخص‌های گرادیان طولی رودخانه، عدم تقارن حوضه زهکشی و نسبت پهنای کف دره به ارتفاع نشان دادند که منطقه از نظر تکتونیک‌های نسبتاً فعال و موجب افزایش رخداد زمین‌لغزش‌ها شده است. خان^۳ و همکاران (۲۰۱۸) در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ماشین بردار و آنتروپی، در شمال پاکستان، به این نتیجه رسیدند که روش‌های کمی در شناسایی و ارزیابی عوامل موثر در رخداد لغزش دارای دقت قابل قبولی می‌باشند. براو^۴ و همکاران (۲۰۱۹) در ارزیابی زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های حساسیت و مقایسه آن‌ها در منطقه غرب قاره هند، بیان داشتند که یک زمین‌لغزش تحت تاثیر مجموعه‌ای از شرایط و عوامل مانند ارتفاع، شیب، لیتولوژی و ژئومورفولوژی و غیره رخ می‌دهد. بعلاوه تا کنون تحقیقات زیادی در رابطه با پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش صورت گرفته که می‌توان به رجی و همکاران (۱۳۹۵)، ایلانلو و همکاران (۱۳۹۵)، تیموری و همکاران (۱۳۹۶)، قبادی و همکاران (۱۳۹۶)، پرتابیان و همکاران (۱۳۹۶)، عابدینی و همکاران (۱۳۹۶)، ایلدرمی و همکاران (۱۳۹۶)، گودرزی و همکاران (۱۳۹۷)، مقصودی و همکاران (۱۳۹۷)، شیرانی (۱۳۹۷)، قاسمیان و همکاران (۱۳۹۷)، عابدینی و همکاران (۱۳۹۸)، رائو^۵ و همکاران (۲۰۱۷) اشاره نمود. هدف از این پژوهش، مقایسه تطبیقی دقت و صحت مدل‌های آماری ارزش اطلاعاتی، نسبت فراوانی، تراکم سطح و LNRF جهت ارزیابی خطر زمین‌لغزش در حوضه سد کردستان است. تا بتوان با انتخاب مدل مناسب و اتخاذ روش‌های مناسب حفاظتی، دامنه‌های لغزشی را تثبیت و رسوب ورودی حاصل از لغزش‌ها به مخزن سد را کاهش داد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد کردستان با مساحت ۱۲۰۱۵ هکتار در شمال شرقی شهرستان سقز استان کردستان و در محدوده طول جغرافیایی "۱۴° ۴۰' تا "۴۲° ۰۹' و عرض جغرافیایی "۰۴° ۳۶' تا "۰۸° ۰۰' واقع شده است. حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه به ترتیب ۲۶۵۴ و ۱۶۰۲ متر از سطح دریا می‌باشد (شکل ۱). میزان بارندگی حوضه به طور متوسط ۷۰۰ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت آن ۱۱ درجه سانتی‌گراد است. حوضه مورد مطالعه در زون دگرگونی سنج-سیرجان قرار گرفته و از واحدهای سنگی دگرگونی، آذرین و رسوبی شامل شیست، گرانیت، شیل، آهک، دلمیت و ماسه‌سنگ با گسل‌ها و شکستگی‌های فراوان تشکیل شده و دارای اقلیم سرد مرطوب کوهستانی است.

1. Wang
2. Sharma
3. Khan
4. Bera
5. Rao



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه

روش تحقیق

پژوهش حاضر در ۵ مرحله شامل، بررسی پیشینه تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها، تهیه لایه‌های اطلاعاتی، اجرای مدل‌های آماری پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه مورد مطالعه و آزمون صحت سنجی مدل‌ها انجام شده است. در این بررسی به منظور پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، اقلیمی و عوامل محیط زیستی و انسانی تعداد ۷ عامل موثر در رخداد زمین لغزش شامل زمین‌شناسی، بارش، کاربری اراضی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، شیب، ارتفاع شناسایی و مورد بررسی قرار گرفتند. سپس لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در محیط نرم‌افزار Arc/GIS 10.3 تهیه شدند. به این منظور از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، زمین‌شناسی، ۱:۱۰۰۰۰۰، عکس‌های هوایی ۱:۴۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای + ETM و DEM (۵۰ متر) حوضه استفاده گردید. نقشه‌های شیب، جهت شیب و طبقات ارتفاعی به وسیله نقشه رقومی ارتفاعی (DEM) تهیه شد. همچنین نقشه گسل از نقشه زمین‌شناسی و نقشه آبراه‌ها از نقشه‌های توپوگرافی تهیه شدند. نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای + ETM و Landsat 8 سال ۲۰۱۸ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و براساس داده‌های موجود در اداره کل منابع طبیعی استان کردستان تهیه شد. همچنین نقشه بارش حوضه با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه طی دوره ۱۳۵۰-۱۳۹۶ و روش درون‌یابی کریجینگ حاصل شد. پس از تهیه لایه‌های عوامل موثر در رخداد زمین لغزش‌های حوضه، اقدام به شناسایی زمین لغزش‌های رخ داده در محیط Arc/GIS 10.3 شد. در این مرحله با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای + ETM و Landsat 8 سال ۲۰۱۸ و نرم افزار Google Earth، مشاهدات میدانی و اسناد و مدارک موجود در اداره کل منابع طبیعی استان کردستان تعداد ۹ لغزش مشخص گردید. سپس با استفاده از دستگاه GPS مختصات نقاط لغزشی مشخص و به نرم افزار Arc/GIS منتقل و نقشه پراکنش زمین لغزش‌های حوضه تهیه شد. سپس با امتیاز دهی به عوامل موثر و با استفاده از هر یک از مدل‌های آماری ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح، نسبت فراوانی و LNRF تمامی لایه‌ها جداگانه وزن‌دهی و نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با روی هم‌گذاری لایه‌ها به وسیله نرم Arc/map و

Arc/GIS10.3 در حوضه سد کردستان تهیه گردید. همچنین به منظور ارزیابی صحت و مقایسه تطبیقی برای پیش‌بینی خطر زمین لغزش حوضه در مدل‌ها، از سه معیار، شاخص زمین لغزش، ویژگی دقت نتایج پیش‌بینی شده و نسبت تراکمی استفاده و مناسب‌ترین مدل برای حوضه معرفی و انتخاب شد.

مدل‌های آماری دو متغیره

در روش‌های آماری دو متغیره لایه‌های اطلاعاتی تهیه شده شامل زمین‌شناسی، بارش، کاربری اراضی، فاصله از جاده، فاصله از گسل، شیب، ارتفاع می‌باشند که در نرم افزار Arc/GIS10.3 هر کدام به عنوان متغیر مستقل (عوامل) و وابسته (نقشه پراکنش لغزش) به صورت دوتایی در نظر گرفته شدند. بعد از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، به منظور تعیین نقش هر یک از عوامل موثر در رخداد زمین لغزش، لایه‌های مختلف اطلاعاتی، طبقه‌بندی و وزن‌دهی شدند. به عبارت دیگر هر عامل محیطی، به عنوان لایه اطلاعاتی جداگانه نسبت به رخداد لغزش برای حوضه، بررسی و تحلیل شد. سپس با جمع جبری، وزن لایه‌های اطلاعاتی احتمال رخداد زمین لغزش کلی محاسبه و نقشه پهنه‌بندی خطر برای هر یک از مدل‌ها تهیه شد. در این بررسی برای محاسبه وزن هر عامل و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش از چهار روش ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح، نسبت فراوانی و LNRF استفاده شده است. اساس این روش‌ها بر این فرض استوار است که زمین لغزش‌های آینده، در شرایطی مشابه با شرایط زمین لغزش‌های رخ داده روی می‌دهند و در صورتی که تعداد عوامل موثر در رخداد زمین لغزش محدود باشد ولی اطلاعات کامل از نقش این عوامل در رخداد زمین لغزش‌ها وجود داشته باشد، این روش‌ها می‌توانند به عنوان ابزاری سودمند و کارا در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش استفاده شوند. لذا در این بررسی از این مدل‌ها استفاده شده است (نیازی و همکاران، ۱۳۸۹: ۹). پس از مقایسه و تجزیه و تحلیل عوامل و تهیه نقشه‌های وزنی، بهترین روش بر اساس بیشترین دقت و درستی معرفی شد. در ادامه به تشریح این روش‌ها پرداخته شده است:

مدل ارزش اطلاعاتی (Winf)

مدل ارزش اطلاعاتی، یک روش آماری برای پیش‌بینی فضایی یک رویداد بر اساس رابطه پارمتر و رویداد است که برای بررسی حساسیت زمین لغزش به واسطه تعیین تاثیر پارامترهای کنترل کننده رخداد زمین لغزش در یک منطقه استفاده می‌شود. ون وستن (۱۹۷۷) در این مدل، ارزش وزنی برای هر کلاس عاملی با لگاریتم طبیعی تراکم زمین لغزش در کلاس، تقسیم بر تراکم زمین لغزش در کل نقشه تعریف می‌شود. این روش مبتنی بر همبستگی آماری (هم‌پوشانی نقشه) نقشه زمین لغزش با نقشه‌های عاملی مختلف است. در این بررسی نقشه‌های موضوعی مختلف برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش استفاده شد. سپس با کمی کردن متغیرهای کیفی و با تغییر متغیرها یعنی گرفتن لگاریتم طبیعی (Ln) وزن متغیرهای دارای وزن بسیار کم، زیاد وارد محاسبات شدند. در روش ارزش اطلاعاتی ابتدا باید میزان یا وزن هر طبقه از عوامل موثر را بدست آورد که میزان مربوط به هر یک از طبقه‌های عوامل مختلف از رابطه (۱) به دست آمده است:

$$\text{Winf} = \text{Ln} [A/B / C/D]$$

رابطه (۱)

که در آن :

Winf : وزن ارزش اطلاعاتی، Ln : لگاریتم طبیعی، A : مساحت زمین لغزش‌های رخ داده در هر کلاس (ha) ، B :

مساحت هر کلاس (ha) ، C : مساحت زمین لغزش‌های حوضه (ha) ، D : مساحت حوضه مورد بررسی (ha)

پس از تعیین میزان وزن مربوط به هر کلاس از عوامل موثر و اعمال آن‌ها بر روی نقشه‌های عوامل نامبرده، با روی هم اندازی و جمع کردن ارزش پیکسل‌های عوامل مختلف، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به روش ارزش اطلاعاتی در محیط GIS در طبقات خطر کم، متوسط و زیاد تهیه شد (ایلانلو و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۴۳). پس از تهیه نقشه‌های وزنی

مربوط به پارامترهای موثر در رخداد زمین لغزش، همه آن‌ها با هم جمع شده و نقشه وزنی تجمعی تهیه شد. در رابطه با مقدار عددی وزن‌ها، هر چه عدد منفی‌تر باشد، نشان دهنده تاثیر کمتر پارامتر مربوط در رخداد زمین لغزش و عدد مثبت تر نشان دهنده بیشترین تاثیر است.

مدل تراکم سطح

در این روش همانند روش ارزش اطلاعات با استفاده از رابطه (۲) برای هر نقشه عامل یا متغیر، تراکم زمین لغزش محاسبه و در مرحله بعد همانند روش ارزش اطلاعات اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه مورد مطالعه شده است. به این صورت که با جمع جبری نقشه‌های وزنی برای ۷ عامل، نقشه وزنی پایانی تهیه و رده بندی انجام شد و در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش بر پایه روش آماری تراکم سطح به دست آمد.

$$W_a = 1000(A/B) - 1000(C/D)$$

رابطه (۲)

که در آن:

W_a : وزن تراکم سطح، A : مساحت زمین لغزش‌های رخ داده در کلاس متغیر (ha)، B : مساحت کلاس متغیر (ha)، C : مساحت کل زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه (ha)، D : مساحت کل حوضه مورد بررسی (ha).

مدل نسبت فراوانی

برای تهیه نقشه استعداد زمین لغزش به صورت کمی، روش نسبت فراوانی و سیستم اطلاعات جغرافیای بکار گرفته شد. روش نسبت فراوانی براساس ارتباط مشاهده شده بین توزیع زمین لغزش‌ها و هر عامل موثر زمین لغزش پایه گذاری شده است. با استفاده از این مدل، ارتباط بین موقعیت زمین لغزش‌ها و هر عامل موثر در رخداد زمین لغزش استخراج شد. مقدار فراوانی نیز از تحلیل ارتباط بین زمین لغزش‌ها و عوامل موثر با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شده است.

$$FR = (A/B)/(C/D) = E/F$$

رابطه (۳)

که در آن:

FR : مقدار یا نسبت فراوانی، A : تعداد نقاط لغزشی در هر کلاس عامل، B : تعداد کل نقاط لغزشی در کل حوضه، C : مساحت هر کلاس عوامل مؤثر در لغزش، D : مساحت کل حوضه، E : درصد رخداد لغزش در هر زیرکلاس از عوامل مؤثر، F : درصد نسبی مساحت هر زیرکلاس از کل مساحت،

در ادامه برای محاسبه شاخص حساسیت به رخداد زمین لغزش، نتایج عوامل در محیط GIS با استفاده از رابطه (۴) با یکدیگر جمع شدند.

$$LSI = \sum(FR)_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

رابطه (۴)

که در آن LSI : شاخص پتانسیل رخداد زمین لغزش، FR : نسبت فراوانی عامل و n : مجموع عوامل ورودی است.

مدل LNRF

در مدل LNRF^۱ برای به دست آوردن میزان هر کلاس از عوامل مختلف، از رابطه (۵) استفاده شده است. بعلاوه با توجه به رابطه (۵) برای هر یک از طبقات عوامل مختلف وزن آن‌ها از جدول (۱) به دست آمده است. بعد از پیدا کردن وزن‌های

مربوط به هر عامل با جمع کردن نقشه وزن‌های مختلف و کلاسه‌بندی آن در سیستم اطلاعات جغرافیایی نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش حوضه تهیه شده است (گوپتا و جوشی^۱، ۱۹۹۰: ۱۱۹؛ پورهاشمی و همکاران، ۱۳۹۳: ۷۱).

$$LNRF = A/E$$

رابطه (۵)

در این رابطه A: مساحت سطح لغزش رخ داده در هر طبقه از نقشه عامل‌ها برحسب هکتار، E: میانگین مساحت لغزش رخ داده در کل طبقه‌های نقشه عامل‌ها برحسب هکتار است.

جدول ۱: تعیین مقادیر وزنی وسعت زمین لغزش براساس مدل LNRF

ناپایداری	وزن	دامنه تغییرات LNRF	ضریب LNRF		ردیف
			حداقل	حداکثر	
کم	۰	$<LNRF/۰.۶۷>$	۰	۰.۶۷	۱
متوسط	۱	$<LNRF/۰.۶۷ < LNRF/۱.۳۳>$	۰.۶۷	۱/۳۳	۲
زیاد	۲	$<LNRF/۱.۳۳>$	۱/۳۳	$< ۱/۳۳$	۳

ارزیابی و مقایسه کارایی مدل‌های پهنه بندی خطر زمین لغزش

در این مرحله با تلاقی نقشه پراکنش زمین لغزش‌های حوضه و نقشه‌های پهنه بندی خطر زمین لغزش به روش‌های آماری دو متغیره در محیط GIS ارزیابی و مقایسه روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش انجام شد. لازم به یادآوری است که از شاخص نسبت تراکم (Dr) به منظور مقایسه بین پهنه‌های خطر (طبقات هر عامل) در هر روش و از شاخص مجموع کیفیت (Qs) و دقت (P) جهت تعیین و انتخاب مدل مناسب منطبق با حوضه و از شاخص نسبت تراکم (Dr) جهت تعیین دقت تفکیک بین پهنه‌ها یا رده‌های خطر در مدل‌های پهنه‌بندی استفاده شده است.

شاخص زمین لغزش (Li) Land slide Index

در این بررسی برای ارزیابی و طبقه بندی نقشه های خطر زمین لغزش از شاخص زمین لغزش استفاده شد. شاخص زمین لغزش برای ارزیابی روش های پهنه بندی استفاده می شود که از رابطه (۶) به دست می آید. (پورهاشمی و همکاران، ۱۳۹۳: ۷۶). در این رابطه شاخص زمین لغزش عبارت از درصد نسبت سطح لغزش در هر پهنه به مساحت آن پهنه، تقسیم بر نسبت مجموع لغزش به سطح کل پهنه‌ها می باشد.

$$Li = \left(\frac{Si}{Ai} \right) / \left(\sum ni \left(\frac{Si}{Ai} \right) \right) * 100$$

رابطه (۶)

که در آن:

Li: شاخص وقوع لغزش در هر پهنه خطر (به درصد)، Si: مساحت لغزش در هر پهنه خطر، Ai: مساحت هر پهنه خطر، Ni: تعداد طبقه های خطر

¹ Gupta & Joshi

ویژگی دقت نتایج پیش‌بینی شده Precision of the predicted result

دقت روش (P) عبارت است از مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد به مساحت آن پهنه‌ها که از رابطه (۷) به دست می‌آید. در این بررسی برای محاسبه و مقایسه دقت نتایج پیش‌بینی شده (P) از رابطه (۷) استفاده شده است (نیازی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۱).

$$P = Ks / S$$

رابطه (۷)

که در آن:

P: دقت مدل در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد، Ks: مساحت سطح لغزشی یافته در پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد، S: مساحت پهنه‌های خطر زیاد و خیلی زیاد

نسبت تراکمی (Dr) (Density ratio)

از شاخص نسبت تراکمی برای ارزیابی توانایی مدل در تشخیص طبقه خطر استفاده می‌شود. هر چه تفکیک بین طبقه‌های خطر بهتر باشد، مدل تواناتر است. در این رابطه اگر درصد سطح گسیختگی در طبقه‌های با خطر زیاد بیشتر باشد و روند توزیع درصد گسیختگی، از طبقه‌های کم خطر به سمت طبقه با خطر زیاد افزایش و روند آن صعودی باشد، بیانگر این است که مدل به کار برده شده در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش مناسب است. اگر این روند نزولی یا به شکل یکسان باشد، نشان‌دهنده کارایی ضعیف مدل است. در این بررسی برای محاسبه این شاخص از رابطه (۸) استفاده شده است. (قبادی و همکاران، ۱۳۹۶: ۹۱).

$$Dr = (Si / Ai) / (\sum Si / \sum Ai)$$

رابطه (۸)

در این رابطه، Dr: نسبت تراکمی، Si: مجموع مساحت زمین لغزش‌های واقع در هر پهنه خطر، Ai: مساحت پهنه خطر هدف در یک نقشه پهنه‌بندی، $\sum si$: مجموع کل مساحت‌های زمین لغزش‌ها در حوضه آبخیز، $\sum Ai$: مساحت کل حوضه آبخیز

شاخص‌های جمع کیفیت

برای تعیین مجموع کیفیت، لازم است ابتدا نسبت تراکمی محاسبه شود. پس از محاسبه مقدار (Dr) با استفاده از شاخص جمع کیفیت یا (Qs)، عملکرد مدل‌ها مقایسه و ارزیابی شد. در روش پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، تراکم لغزش رده Dr = 1 معادل با میانگین تراکم لغزش در همه حوضه و رده دارای نسبت تراکمی ۲، یعنی تراکم لغزشی معادل با دو برابر تراکم لغزش حوضه است (نیازی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۳). بنابراین هر چه تفکیک بین رده‌های خطر توسط شاخص نسبت تراکم بهتر صورت گرفته باشد، روش تهیه نقشه پهنه‌بندی دقیق یا بسترین مطلوبیت را دارد. مقدار مجموع کیفیت (Qs) که با رابطه (۹) محاسبه می‌شود نشان‌دهنده درستی یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش‌بینی خطر رانش زمین هم است. معمولاً مقدار این شاخص برای روش‌های مختلف بین صفر تا ۷ قرار می‌گیرد. اگرچه از نظر تئوری حدی برای آن وجود ندارد. در ارزیابی روش‌ها هر چه مقدار مجموع کیفیت Qs بیشتر باشد، روش درستی یا مطلوبیت بیشتری در تفکیک دارد. مقدار مجموع کیفیت از رابطه (۹) محاسبه به دست آمده است:

$$Qs = \sum n(Dr - 1)^2 * S$$

رابطه (۹)

در این رابطه : Qs: شاخص جمع مطلوبیت، Si: نسبت مساحت هر کلاس خطر به مساحت کل حوضه Dr: تراکم لغزش در هر کلاس خطر، n: تعداد کلاس های خطر

بحث و یافته‌ها

بررسی ها نشان می‌دهد که در روش LNRF عوامل مختلف لیتولوژی، شیب، فاصله از گسل کمتر از ۱۰۰۰ متر، ارتفاع و میزان بارندگی بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. در روش نسبت فراوانی نیز فاصله از جاده، میزان بارندگی و در صد شیب و در روش تراکم سطح فاصله از جاده، سطوح ارتفاعی و درصد شیب و در روش ارزش اطلاعات نیز بارندگی، سطوح ارتفاعی و درصد شیب بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. بررسی نتایج نرخ طبقه‌های عوامل موثر در وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز سد کردستان بیانگر تفاوت میزان نرخ‌ها در مدل‌ها و تغییر ارزش مقادیر تاثیر عوامل موثر در رخداد زمین لغزش است و نشان می‌دهد که وزن متغیرها با توجه به روش محاسباتی در هر مدل متفاوت است. بعلاوه بررسی‌ها نشان می‌دهد شیب یک عامل بسیار مهم در رخداد زمین لغزش در همه مدل‌هاست. نتایج بیانگر این است که در هر یک از مدل‌های موجود سهم تاثیر هر عامل در رخداد زمین لغزش متفاوت بوده و نشان می‌دهد که این موضوع در وزن عوامل موثر در رخداد زمین لغزش و نتایج پهنه‌بندی بسیار مهم می‌باشد بررسی‌ها نشان می‌دهد که یکی از عوامل موثر در تفاوت مساحت پهنه‌های خطر زمین لغزش در مدل‌ها تغییر نرخ طبقه‌های عوامل موثر در وقوع زمین لغزش می‌باشد، که می‌تواند در ارزیابی دقت نتایج نیز موثر واقع شود. بنابراین تعیین نوع عوامل موثر در هر حوضه بر اساس ویژگی‌های محیطی و سرزمینی می‌تواند در انتخاب مدل پهنه‌بندی مناسب و اخذ نتایج مطلوب و دقیق بسیار مهم و موثر واقع شود (جدول ۲، ۳، ۴ و ۵). بررسی نرخ طبقه‌های عوامل موثر در وقوع زمین لغزش در مدل‌ها نشان می‌دهد که مقادیر در رده‌ها بسیار متفاوت بوده، به طوری که در تمام مدل‌های عامل لیتولوژی بالاترین رده را به خود اختصاص داده است و بیانگر این است که لیتولوژی یک عامل بسیار مهم و تاثیرگذار در رخداد زمین لغزش در منطقه است. اما نرخ طبقه‌های عوامل موثر در وقوع زمین لغزش در سایر عوامل بسیار متفاوت می‌باشد.

جدول ۲: نرخ طبقه‌های عوامل موثر در وقوع زمین لغزش در مدل LNRF

شماره رده	فاصله از گسل	لیتولوژی	فاصله از جاده	سطوح ارتفاعی	میزان بارندگی	درصد شیب	کاربری اراضی
۱	۳/۶	۰	۰/۲	۲	۱/۹۴	۱/۱	۰/۱۲
۲	۰/۳۳	۱	۲/۸	۱/۹۵	۳/۳	۰/۹۷	۰/۵۹
۳	۰	۰	۰/۶۳	۰	۱/۷	۱/۶۱	۲/۲۷
۴	۰	۰	۰/۲۹	۰	۰	۰/۳	
۵	۴/۷	۰/۱۸			۰		
۶	۴/۲				۰		
۷		۰			۰		
۸		۰					
۹		۰					
۱۰		۲					
۱۱		۰					
۱۲		۰					

جدول ۳: نرخ طبقه‌های عوامل موثر در وقوع زمین لغزش در مدل آماری نسبت فراوانی

شماره رده	فاصله از گسل	لیتولوژی	فاصله از جاده	سطوح ارتفاعی	میزان بارندگی	درصدشیب	کاربری اراضی
۱	۱/۱۲	۰	۲	۰/۱۱	۴/۸۲	۱۰/۱۸	۰/۱۵
۲	۰/۵۵	۱/۱۷	۷/۱۲	۳/۴۵	۰/۱۴	۱/۴۱	۰/۸۳
۳	۰	۰	۰/۹۲	۰	۰/۹۲	۱/۶۴	۱/۵۲
۴	۰	۰	۰/۱۷	۰	۰	۰/۱۴	
۵		۰/۲۷			۰		
۶		۲/۶۸			۰		
۷		۰			۰		
۸		۰					
۹		۰					
۱۰		۰/۵					
۱۱		۰					
۱۲		۰					

جدول ۴: نرخ طبقه‌های عوامل موثر در وقوع زمین لغزش در مدل تراکم سطح

شماره رده	فاصله از گسل	لیتولوژی	فاصله از جاده	سطوح ارتفاعی	میزان بارندگی	درصدشیب	کاربری اراضی
۱	۰/۳۸	- ۳/۰۱	۳/۶۷	۷/۴۳	۱۱/۶۲	۲۷/۸۶	- ۲/۵۳
۲	- ۱/۳۲	۵۱/۵۶	۲۱۹/۷۳	- ۰/۳۹	۳/۲۸	۱/۳۰	- ۰/۴۶
۳	- ۳/۰۱	- ۳/۰۱	- ۰/۳۶	- ۳/۰۱	- ۰/۱۹	۱/۹۵	۱/۵۸
۴	- ۳/۰۱	- ۳/۰۱	- ۲/۴۸	- ۳/۰۱	- ۳/۰۱	- ۲/۶۰	
۵		۳/۸۳	- ۲/۶۸		- ۳/۰۱		
۶		۵/۱۳			- ۳/۰۱		
۷		- ۳/۰۱			- ۳/۰۱		
۸		- ۳/۰۱					
۹		- ۳/۰۱					
۱۰		- ۱/۴۱					
۱۱		- ۳/۰۱					
۱۲		- ۳/۰۱					

جدول ۵: نرخ طبقه‌های عوامل موثر در وقوع زمین لغزش در مدل ارزش اطلاعاتی

شماره رده	فاصله از گسل	لیتولوژی	فاصله از جاده	سطوح ارتفاعی	میزان بارندگی	درصدشیب	کاربری اراضی
۱	۰/۱۲	۰	۰/۸	۳/۴۸	۱/۵۸	۲/۳۲	- ۱/۹
۲	۰/۵۹	۰/۱۴	۴/۳	۰/۱۴	۰/۷۴	۰/۳۵	- ۰/۱۷
۳	۰	۰	- ۰/۱۲	۰	۰/۹۳	۰/۵	۰/۴

	-۲	-۰/۰۷	۰	۱/۷۷	۰	۰	۴
		۰		-۲/۳	۰/۸۱		۵
		۰			۰/۹۹		۶
		۰			۰		۷
					۰		۸
					۰		۹
					۰/۵۳		۱۰
					۰		۱۱
					۰		۱۲

نتایج حاصله از طبقه‌بندی عوامل موثر در زمین لغزش و مقادیر به دست آمده از روش‌های دو متغیره برای تعیین خطر زمین لغزش، نشان داد که در بروز زمین لغزش‌های حوضه شیب، لیتولوژی، سطوح ارتفاعی و فاصله از گسل مهمترین عوامل موثر هستند. به منظور ارزیابی دقیقتر تاثیر نرخ طبقه‌های عوامل موثر در وقوع زمین لغزش پراثرترین و کم اثرترین کلاس‌های مربوط به هر کدام از عوامل در مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بررسی جدول (۶)، نشان می‌دهد که سنگ‌های گرانیت و گنیس موثرترین عامل وقوع زمین لغزش‌ها (عامل لیتولوژی) در منطقه‌اند که به دلیل داشتن درز و شکاف فراوان و تجزیه فیزیکوشیمیایی زیاد سبب گسیختگی و ناپایداری دامنه و زمین لغزش در این سازند زمین‌شناسی شده است. همچنین بیشترین زمین لغزش در فاصله کمتر از ۱۰۰۰ متری گسل‌ها رخ داده و عملکرد گسل‌ها در حوضه به صورت مستقیم (حرکت ناشی از انرژی گسل) و به صورت غیر مستقیم (تاثیر لیتولوژی و شیب) سبب رخداد لغزش در حوضه شده است. تقریباً بیش از نیمی از لغزش‌ها (۴۵/۵۸ درصد) در شیب ۰-۵ در صد اتفاق افتاده و بررسی‌ها نشان می‌دهد که اکثر لغزش در ارتفاع ۱۸۰۰-۰ و به تعداد محدود در ارتفاع ۱۸۰۰-۲۶۰۰ رخ داده است (شکل ۲). نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در اکثر پارامترهای موثر و کلاس‌ها تا حدودی از لحاظ شدت تاثیر دارای اختلاف کمی هستند. اما بررسی‌ها نشان می‌دهد که در دو مدل LNRF و نسبت فراوانی عوامل موثر بر زمین لغزش تقریباً مشابه و در مدل‌های ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح تاحدودی متفاوت می‌باشد.



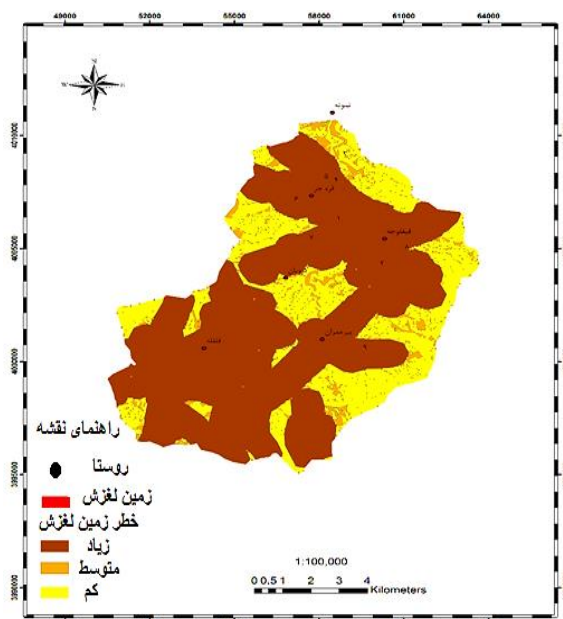
شکل ۲: لغزش رخ داده در شیب‌ها، سطوح ارتفاعی، لیتولوژی و کاربری‌های متفاوت حوضه مورد مطالعه

جدول ۶: پر اثرترین و کم اثرترین کلاس‌های هر کدام از عوامل در مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

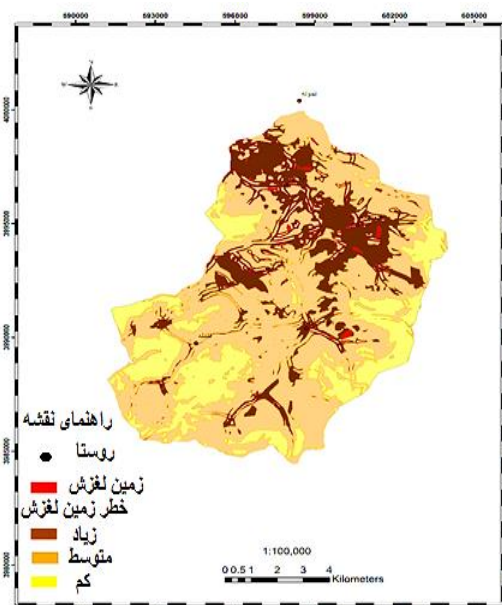
مدل	(ارزش اطلاعاتی)		(تراکم سطح)		(LNRF)		(نسبت فراوانی)	
	پر اثر ترین	کم اثر ترین	پر اثر ترین	کم اثر ترین	پر اثر ترین	کم اثر ترین	پر اثر ترین	کم اثر ترین
فاصله از گسل	<۱۰۰۰	۳۰۰۰<	<۱۰۰۰	۳۰۰۰<	<۱۰۰۰	۳۰۰۰<	<۱۰۰۰	۳۰۰۰<
لیتولوژی	(Mtgrgn) گرانیت گنایس	(Mtv) کوارتز	(Mtgrgn) گرانیت گنایس	(G1) گرانیت	(Mtv) کوارتز	(Mtv) کوارتز	(Mtgnsch) گنایس	(Mtv) کوارتز
فاصله از جاده	۱۰۰-۵۰	۵۰۰-۷۰۰	۱۰۰-۵۰	۵۰۰-۷۰۰	۱۰۰-۵۰	۵۰۰-۷۰۰	۱۰۰-۵۰	۵۰۰-۷۰۰
سطوح ارتفاعی	۱۸۰۰-۰	۲۶۰۰	۱۸۰۰-۰	۲۶۰۰	۱۸۰۰-۰	۲۶۰۰	۱۸۰۰-۲۲۰۰	۲۶۰۰
میزان بارندگی	۵۰۰-۴۰۰	۱۱۰۰-۱۰۰۰	۵۰۰-۴۰۰	۱۱۰۰-۱۰۰۰	۶۰۰-۵۰۰	۱۱۰۰-۱۰۰۰	۴۰۰-۵۰۰	۱۱۰۰-۱۰۰۰
درصد شیب	۲۰-۵	≥۴۰	۲۰-۵	≥۴۰	۳۰-۴۰	≥۴۰	۲۰-۵	≥۴۰
کاربری اراضی	مرتع	باغ	مرتع	باغ	مرتع	باغ	مرتع	باغ

پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه براساس مدل‌ها

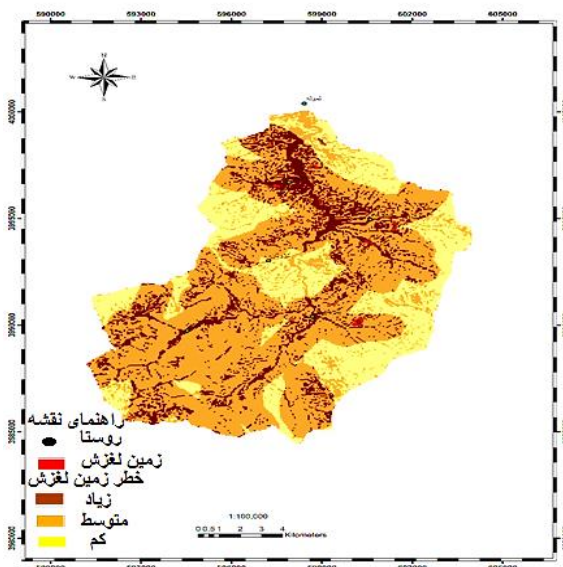
با توجه به اینکه احتمال رخداد زمین لغزش تابع تاثیر همزمان مجموعه عوامل موجود طبیعی و محیطی در هر واحد نقشه است لذا با فرض وجود همبستگی بین این عوامل، احتمال نهایی وقوع زمین لغزش برابر با احتمال وقوع مجموع عوامل خواهد بود. از این رو، وزن نهایی هر پیکسل برابر با جمع جبری وزن مربوط به مجموعه عوامل موثر در آن واحد است که این موضوع در این بررسی با همپوشانی و ترکیب مجموعه نقشه‌های عامل وزنی حاصل شده است. بر این اساس پس از محاسبه وزن لایه‌های عوامل مختلف در زمین لغزش، با روی هم اندازی این لایه‌ها، نقشه‌های نهایی خطر زمین لغزش با استفاده از روش‌های آماری دو متغیره تهیه شد. بررسی‌های میدانی و تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی حوضه (اشکال ۳، ۴، ۵ و ۶) و جدول (۷) نشان می‌دهد که در مدل ارزش اطلاعاتی سطحی از حوضه سد کردستان معادل ۲۰/۱ و با رخداد وقوع لغزش به میزان ۵۵/۵۵، در مدل تراکم سطح ۷/۱۱ و با رخداد وقوع لغزش ۸/۴، در مدل LNRF ۲۱/۵ و با رخداد وقوع لغزش ۶۳/۱ و در مدل نسبت فراوانی ۶۸/۵۲ درصد و با رخداد وقوع لغزش ۹۱/۶ درصد در طبقه خطر زیاد قرار گرفته است. و طبقه متوسط به ترتیب در مدل ارزش اطلاعاتی ۵۳/۵۷، و با رخداد وقوع لغزش ۳۳/۳۳، در مدل تراکم سطح ۲۰/۰۶ با رخداد وقوع لغزش ۴۲/۸، در مدل LNRF ۵۶/۷ و با رخداد وقوع لغزش ۳۶/۹ و در نسبت فراوانی ۵/۸۲ و با رخداد وقوع لغزش ۸/۴ درصد از حوضه را شامل شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تمام مدل‌های پهنه‌بندی تقریباً در مرحله پهنه‌بندی درجه خطر زیاد و متوسط تا حدودی متفاوت هستند و نشان می‌دهد که اختلاف نرخ پارامترهای موثر و کلاس‌ها در رخداد لغزش (جدول ۶)، موجب شده تا مدل‌ها در طبقه‌بندی خطر دارای اختلاف قابل توجهی هم در درصد پهنه خطر و هم در درصد وقوع زمین لغزش باشند، که این موضوع به علت تفاوت مدل‌ها در روش کاراست. بررسی جدول (۷) نشان می‌دهد که شدت خطر زمین لغزش در تمام مدل‌ها از کم به متوسط و از متوسط به پهنه‌های خطر زیاد در حال افزایش است و خطر لغزش در حوضه سد کردستان صعودی است.



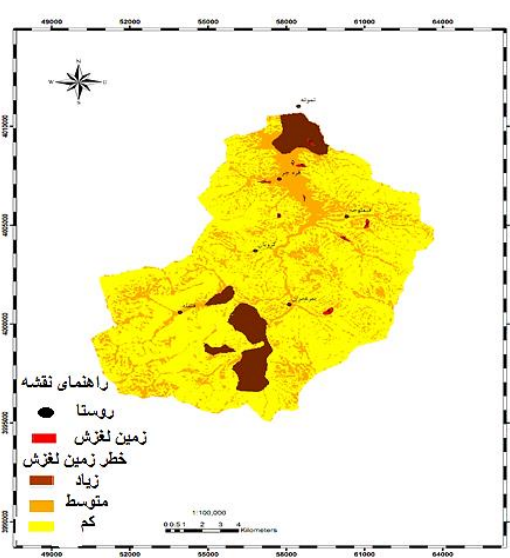
شکل ۴: نقشه پهنه‌بندی خطر در مدل آماری نسبت فراوانی



شکل ۳: نقشه پهنه‌بندی خطر در مدل LNRF



شکل ۶: نقشه پهنه‌بندی خطر در مدل ارزش اطلاعات



شکل ۵: نقشه پهنه‌بندی خطر در مدل تراکم سطح

جدول ۷: مقایسه نتایج حاصل از نقشه‌های مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه

روش	طبقه خطر	مساحت طبقه خطر (هکتار)	درصد مساحت طبقه خطر	تعداد رخداد زمین لغزش	مساحت زمین لغزش (هکتار)	درصد وقوع زمین لغزش
ارزش اطلاعاتی	زیاد	۲۴۱۴/۴۵	۲۰/۱	۵	۱۹۵۲/۸۸	۵۵/۵۵
	متوسط	۶۴۵۸/۱۲	۵۳/۷۵	۳	۱۳۷۹/۲۹	۳۳/۳۳
	کم	۳۱۴۲/۴۳	۲۶/۱۵	۱	۳۰۳/۸۵	۱۱/۱۲
تراکم سطح	زیاد	۸۵۳/۹۱	۷/۱۱	۱	۳۰۳/۸۴	۸/۴
	متوسط	۲۴۱۰/۰۷	۲۰/۰۶	۵	۱۵۵۶/۲۵	۴۲/۸
	کم	۸۷۵۱/۰۲	۷۲/۸۳	۳	۱۷۷۵/۹۳	۴۸/۸
LNRF	زیاد	۲۵۸۳/۶۴	۲۱/۵	۶	۲۲۹۴	۶۳/۱
	متوسط	۶۸۱۱/۹۲	۵۶/۷	۳	۱۳۴۲/۰۲	۳۶/۹
	کم	۲۶۱۹/۴۴	۲۱/۸	۰	۰	۰
نسبت فراوانی	زیاد	۸۲۳۲/۶۵	۶۸/۵۲	۸	۳۳۳۲/۱۸	۹۱/۶
	متوسط	۶۹۹/۰۷	۵/۸۲	۱	۳۰۳/۸۴	۸/۴
	کم	۳۰۸۳/۲۸	۲۵/۶۶	۰	۰	۰

نتایج ارزیابی مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در مدل ارزش اطلاعاتی مقدار شاخص L_i برابر $۷۲/۳۲$ ، در تراکم سطح ۳۰ ، در مدل LNRF $۸۱/۶۵$ و در مدل نسبت فراوانی $۴۹/۴$ در صد حوضه در طبقه خطر زیاد قرار دارد (جدول ۸ و ۹). روند صعودی شاخص نسبت تراکمی نیز بیانگر این است که تفکیک طبقات خطر به خوبی در مدل‌ها انجام شده است. بررسی شاخص نسبت تراکم (Dt) یا دقت تفکیک بین پهنه یا رده خطر در حوضه نشان می‌دهد که مدل‌های LNRF و ارزش اطلاعاتی بیشترین مطلوبیت و دقت را نسبت به مدل‌های نسبت فراوانی و تراکم سطح در حوضه دارند (جدول ۱۰) و نشان می‌دهد که تفکیک بین طبقه‌های خطر در مدل‌ها در حد قابل قبول اما با درجات متفاوت می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد مدل‌ها در تفکیک رده‌های خطر توانا می‌باشند و درصد سطح گسیختگی در طبقه‌های با خطر زیاد بیشتر می‌باشد. از طرف دیگر روند توزیع درصد گسیختگی، از طبقه‌های کم خطر به سمت طبقه متوسط و نهایتاً به خطر زیاد، افزایش یافته و روند آن صعودی است و بیانگر این است که مدل‌های به کار برده شده در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش مناسب، اما دارای دقت متفاوتی می‌باشند. نتایج میزان مجموع کیفیت Qs در مدل‌ها نیز نشان می‌دهد که مدل‌های LNRF، نسبت فراوانی، تراکم سطح و ارزش اطلاعاتی مقادیر درستی یا تفکیک خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز سد کردستان را با اختلاف ارائه داده‌اند. به طوری که مدل‌های ارزش اطلاعاتی و LNRF به ترتیب با مقدار $۲/۴۱$ و $۲/۸۹$ نسبت به مدل‌های نسبت فراوانی با مقدار $۰/۳۰۴$ و تراکم سطح با $۱/۱۱$ عملکرد بهتر و دقیقتری در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه دارند (جدول ۱۱). نتایج بررسی مقادیر شاخص نسبت تراکم نشان می‌دهد که مدل‌های LNRF و ارزش اطلاعاتی به ترتیب در تفکیک بین رده‌های خطر، بیشترین مطلوبیت و دقت را نسبت به مدل‌های نسبت فراوانی و تراکم سطح از نظر روش در حوضه دارند. به طور کلی نتایج بررسی شاخص P نیز نشان می‌دهد که که از میان مدل‌های استفاده شده در این پژوهش مدل‌های ارزش اطلاعاتی با مقدار P برابر $۰/۸۱$ و LNRF به مقدار $۰/۸۹$ مدل‌های مناسب و منطبق با منطقه بررسی شده می‌باشند و مدل‌های تراکم سطح و نسبت فراوانی از دقت کمتری برخوردارند (جدول ۱۲).

جدول ۸: شاخص‌های زمین لغزش (Li) در مدل‌های پهنه بندی خطر زمین لغزش

مدل	طبقه خطر	Ai (هکتار)	Si (هکتار)	تراکم در هر رده Si/Ai	$\sum \ln(Si/Ai)$	Li درصد
ارزش اطلاعاتی	زیاد	۲۴۱۴/۴۵	۱۹۵۲/۸۸	۰/۸۱	۱/۱۲	۷۲/۳۲
	متوسط	۶۴۵۸/۱۲	۱۳۷۹/۲۹	۰/۲۱		۱۸/۷۵
	کم	۳۱۴۲/۴۳	۳۰۳/۸۵	۰/۱		۸/۹۲
تراکم سطح	زیاد	۸۵۳/۹۱	۳۰۳/۸۴	۰/۳۶	۱/۲	۳۰
	متوسط	۲۴۱۰/۰۷	۱۵۵۶/۲۵	۰/۶۴		۵۳/۳۳
	کم	۸۷۵۱/۰۲	۱۷۷۵/۹۳	۰/۲		۱۶/۶۶
LNRF	زیاد	۲۵۸۳/۶۴	۲۲۹۴	۰/۸۹	۱/۰۹	۸۱/۶۵
	متوسط	۶۸۱۱/۹۲	۱۳۴۲/۰۲	۰/۲		۱۸/۳۵
	کم	۲۶۱۹/۴۴	۰	۰		۰
نسبت فراوانی	زیاد	۸۲۳۲/۶۵	۳۳۳۲/۱۸	۰/۴۱	۰/۸۳	۴۹/۴
	متوسط	۶۹۹/۰۷	۳۰۳/۸۴	۰/۴۳		۵۱/۸۱
	کم	۳۰۸۳/۲۸	۰	۰		۰

جدول ۹: شاخص آماری دقت نتایج پیش بینی شده برای مدل‌ها

ردیف	روش	مساحت زمین لغزش دو پهنه زیاد و خیلی کم (Ks)	مساحت دو پهنه زیاد و خیلی زیاد (S)	$P = (Ks/s)$
۱	ارزش اطلاعاتی	۱۹۵۲/۸۸	۲۴۱۴/۴۵	۰/۸۱
۲	تراکم سطح	۳۰۳/۸۴	۸۵۳/۹۱	۰/۳۶
۳	LNRF	۲۲۹۴	۲۵۸۳/۶۴	۰/۸۹
۴	نسبت فراوانی	۳۳۳۲/۱۸	۸۲۳۲/۶۵	۰/۴۱

جدول ۱۰: مقدار شاخص‌های نسبت تراکمی در مدل‌های پهنه بندی خطر زمین لغزش

مدل	طبقه خطر	Si (هکتار)	Ai (هکتار)	تراکم در هر رده Si/Ai	$\sum si$	$\sum Ai$	نسبت تراکمی (Dr)
ارزش اطلاعاتی	زیاد	۱۹۵۲/۸۸	۲۴۱۴/۴۵	۰/۸۱	۳۶۳۶/۰۲۵	۱۲۰۱۵	۲/۶۸
	متوسط	۱۳۷۹/۲۹	۶۴۵۸/۱۲	۰/۲۱			۰/۶۹
	کم	۳۰۳/۸۵	۳۱۴۲/۴۳	۰/۱			۰/۳۳
تراکم سطح	زیاد	۳۰۳/۸۴	۸۵۳/۹۱	۰/۳۶	۳۶۳۶/۰۲۵	۱۲۰۱۵	۱/۲
	متوسط	۱۵۵۶/۲۵	۲۴۱۰/۰۷	۰/۶۴			۲/۱۱
	کم	۱۷۷۵/۹۳	۸۷۵۱/۰۲	۰/۲			۰/۶۶
LNRF	زیاد	۲۲۹۴	۲۵۸۳/۶۴	۰/۸۹	۳۶۳۶/۰۲۵	۱۲۰۱۵	۲/۹۴
	متوسط	۱۳۴۲/۰۲	۶۸۱۱/۹۲	۰/۲			۰/۶۶
	کم	۰	۲۶۱۹/۴۴	۰			۰

۱/۳۵	۱۲۰۱۵	۳۶۳۶/۰۲۵	۰/۴۱	۸۲۳۲/۶۵	۳۳۳۲/۱۸	زیاد	نسبت فراوانی
۱/۴۲			۰/۴۳	۶۹۹/۰۷	۳۰۳/۸۴	متوسط	
۰			۰	۳۰۸۳/۲۸	۰	کم	

جدول ۱۱: مقدار کیفیت با استفاده از مدل‌ها و در طبقه‌های مختلف خطر

Qs	$(Dr-1)^2 \times S$	S=Si/St	Ai (هکتار)	$(Dr-1)^2$	Dr-1	Dr	طبقه خطر	مدل پهنه‌بندی
۲/۴۱	۱/۸۶	۰/۶۶	۲۴۱۴/۴۵	۲/۸۲	۱/۶۸	۲/۶۸	زیاد	ارزش اطلاعاتی
	۰/۱۶	۱/۷۸	۶۴۵۸/۱۲	۰/۰۹	-۰/۳۱	۰/۶۹	متوسط	
	۰/۳۹	۰/۸۶	۳۱۴۲/۴۳	۰/۴۵	-۰/۶۷	۰/۳۳	کم	
۱/۱۱	۰/۰۰۹	۰/۲۳	۸۵۳/۹۱	۰/۰۴	۰/۲	۱/۲	زیاد	تراکم سطح
	۰/۸۱	۰/۶۶	۲۴۱۰/۰۷	۱/۲۳	۱/۱۱	۲/۱۱	متوسط	
	۰/۲۹	۲/۴	۸۷۵۱/۰۲	۰/۱۲	-۰/۳۴	۰/۶۶	کم	
۲/۸۹	۲/۶۷	۰/۷۱	۲۵۸۳/۶۴	۳/۷۶	۱/۹۴	۲/۹۴	زیاد	LNRF
	۰/۲۲	۱/۸۷	۶۸۱۱/۹۲	۰/۱۲	-۰/۳۴	۰/۶۶	متوسط	
	۰	۰/۷۲	۲۶۱۹/۴۴	۰	۰	۰	کم	
۰/۳۰۴	۰/۲۷	۲/۲۶	۸۲۳۲/۶۵	۰/۱۲	۰/۳۵	۱/۳۵	زیاد	نسبت فراوانی
	۰/۰۳۴	۰/۱۹	۶۹۹/۰۷	۰/۱۸	۰/۴۲	۱/۴۲	متوسط	
	۰	۰/۸۵	۳۰۸۳/۲۸	۰	۰	۰	کم	

جدول ۱۲: نتایج شاخص‌های ارزیابی (دقت روش) مدل‌ها برای حوضه

Qs	نسبت تراکمی (Dr)	P	Li	طبقه خطر	مدل پهنه‌بندی
۲/۴۱	۲/۶۸	۰/۸۱	۷۲/۳۲	زیاد	ارزش اطلاعاتی
	۰/۶۹		۱۸/۷۵	متوسط	
	۰/۳۳		۸/۹۲	کم	
۱/۱۱	۱/۲	۰/۳۶	۳۰	زیاد	تراکم سطح
	۲/۱۱		۵۳/۳۳	متوسط	
	۰/۶۶		۱۶/۶۶	کم	
۲/۸۹	۲/۹۴	۰/۸۹	۸۱/۶۵	زیاد	LNRF
	۰/۶۶		۱۸/۳۵	متوسط	
	۰		۰	کم	
۰/۳۰۴	۱/۳۵	۰/۴۱	۴۹/۴	زیاد	نسبت فراوانی
	۱/۴۲		۵۱/۸۱	متوسط	
	۰		۰	کم	

با توجه به ارزیابی جداول (۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸) و بررسی‌های به عمل آمده از طبقه‌بندی عوامل موثر در زمین لغزش و مقادیر به دست آمده از روش‌های دو متغیره آماری برای تعیین خطر زمین لغزش در حوضه چنین اسنباط می‌شود که در روش‌های مورد استفاده مقادیر (p) از ۰/۳۶ تا ۰/۸۹ دارای تفاوت بسیار زیادی است و این در حالی است که تمام عوامل موثر

در وقوع زمین لغزش‌های حوضه یکسان بوده و تنها در روش کار باهم متفاوت می‌باشند. این موضوع در بررسی شاخص مجموع کیفیت نیز نشان می‌دهد که مقادیر مربوطه نیز از $0/304$ تا $2/89$ دارای تفاوت قابل ملاحظه ای می‌باشد. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که جهت بررسی کارایی و دقت مدل‌های پهنه‌بندی نه تنها می‌بایست عوامل موثر در رخداد زمین لغزش‌ها را با دقت انتخاب و در مدل‌ها استفاده نمود، بلکه جهت ارزیابی دقت نتایج می‌بایست از روش‌های متعدد استفاده نمود، تا از زوایای مختلف موضوعات دقت، صحت، پیش‌بینی رخداد زمین لغزش، تفکیک رده‌های خطر و در نهایت میزان انطباق مدل با ویژگی‌های محیطی به خوبی ارزیابی شود. نتایج بررسی شاخص مجموع کیفیت (Qs) و دقت (P) جهت انتخاب مدل مناسب و منطبق با حوضه نشان داد که این شاخص در مدل‌های دو متغیره آماری بسیار متفاوت می‌باشد. بنابراین با توجه به مقادیر متفاوت شاخص‌ها، نتایج بیانگر این است که تمامی مدل‌های آماری جهت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حوضه مناسب می‌باشند، اما تناسب روش کار آن‌ها با ویژگی‌های محیطی، عوامل موثر در رخداد زمین لغزش از لحاظ دقت، صحت و کارایی متفاوت است. به طور کلی بررسی شاخص‌ها بیانگر این است که در موضوع پهنه‌بندی باید دقت بیشتری اعمال نمود تا کارا ترین مدل انتخاب شود. که با نتایج ایلانلو و همکاران (۱۳۹۵)، که مدل ارزش اطلاعاتی، قبادی و همکاران (۱۳۹۶)، که روش نسبت فراوانی، پرتابیان و همکاران (۱۳۹۶)، مدل ارزش اطلاعات، زارع و همکاران (۱۳۹۷)، مدل LNRF، نوجوان و همکاران (۱۳۹۸)، مدل نسبت فراوانی، ایلدرمی و همکاران (۱۳۹۶) مدل رگرسیون لجیستیک و خان و همکاران (۲۰۱۸) مدل ماشین بردار و آنروپی را مطلوب‌ترین مدل در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش معرفی کرده‌اند، نشان می‌دهد که مدل‌های بر اساس روش کار، تعداد و نوع عوامل موثر و نحوه ارزیابی دقت، نتایج متفاوتی ارائه می‌دهند که نتایج این بررسی با نتایج اشاره شده از نظر دقت و روش کار مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

در حال حاضر به کارگیری هر یک از مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به علت تفاوت شرایط محیطی و روش‌های به کار گرفته شده مستلزم اثبات صحت و دقت بیشتر آن‌ها می‌باشد. در سال‌های اخیر در کنار موضوع توسعه و گسترش روش‌ها و مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به همراه اصلاح آن‌ها، روش‌های ارزیابی و مقایسه تطبیقی و صحت و دقت مدل‌های آماری بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش با استفاده از مدل‌های آماری نسبت فراوانی، ارزش اطلاعات، تراکم سطح و LNRF نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه سد کردستان تهیه و دقت مدل‌ها، با شاخص زمین لغزش، ویژگی دقت نتایج پیش‌بینی شده و نسبت تراکمی ارزیابی شد. بر اساس نتایج حاصله از شاخص‌های ارزیابی و مقایسه مدل‌های آماری در حوضه آبخیز سد کردستان چنین استنباط می‌شود که در منطقه مورد تحقیق احتمال وقوع حرکات توده‌ای بسیار زیاد است. از این رو پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های دقیق و مناسب، اولین گام در مدیریت و کاهش خسارات این پدیده است. نتایج بررسی میدانی و تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی حوضه نشان می‌دهد که درصد قابل توجهی از سطح حوضه در طبقه خطر زیاد قرار دارد. همچنین ارزیابی و مقایسه مدل‌های ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از شاخص‌ها بیانگر روند صعودی رخداد وقوع زمین لغزش در حوضه است و نشان می‌دهد که تفکیک طبقات خطر به ویژه در مدل‌های ارزش اطلاعاتی و LNRF به دلایل تطبیق ویژگی‌های زمین شناسی، ژئومورفولوژی و اقلیمی حوضه سد کردستان بهتر انجام شده است و تاکید می‌کند که قبل از انتخاب مدل‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، می‌بایست عوامل موثر در لغزش و شرایط حوضه به خوبی ارزیابی شود. با توجه به اینکه در حوضه مورد مطالعه پارامترهای لازم و موثر برای رخداد زمین لغزش سبب افزایش خطر این پدیده شده است، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با مدل‌های آماری اختلاف زیادی را نسبت به هم نشان می‌دهند. نتایج بررسی شاخص P بیانگر این است که مدل ارزش اطلاعاتی با مقدار P برابر $0/81$ و مدل LNRF با مقدار $0/89$ مدل‌های مناسب و منطبق با منطقه می‌باشند و از کارایی مطلوب و توانایی بیشتر در پهنه بندی و تفکیک طبقات خطر زیاد برخوردار می‌باشند. به علت رفتار پیچیده و غیر خطی

بودن متغیرهای دخیل در وقوع لغزش در منطقه پیشنهاد می‌شود در ارزیابی و شناسایی رفتار پیچیده دامنه‌ها در خصوص رخداد زمین لغزش از شاخص‌های ژئومورفومتریک همچون تأثیر انحناء، انحنای متقاطع، انحنای سطح و انحنای گوسی و تکنیک جهت تکمیل نتایج استفاده شود.

منابع

- آرمین، م.، مصفاei، ج.، قربان نیا خیبری، و.، خیری، ا.، ۱۳۹۸. پهنه‌بندی زمین لغزش و برنامه مدیریتی کنترل خطر آن در استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از مدل حائری - سمیعی، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۷، شماره ۴، صص ۱۹۶-۱۷۶.
- ایلدرمی، ع.، نوری، ح.، محمدی‌پور، م.، موسوی، م.، ۱۳۹۶. بررسی عوامل موثر و پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل تراکم سطح، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون لجیستیک در حوضه آبخیز عشوند، پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۷، دوره ۲۸، صص ۲۳-۱.
- ایلانلو، م.، ابراهیمی، ل.، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی خطر وقوع حرکات توده‌ای با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح و *LNRFL* در حوضه آبخیز زهره، مدیریت مخاطرات محیطی، دوره ۳، شماره ۲، صص ۱۵۳-۱۴۱.
- بختیاری، م.، گومه، ز.، معماریان، ه.، ۱۳۹۷. مقایسه سه روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، شبکه عصبی مصنوعی و تراکم سطح در ارزیابی کمی و پهنه بندی حساسیت پذیری زمین لغزش در محیط *GIS* (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سیمره هومیان)، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۷، شماره ۲۷، صص ۴۰-۱۹.
- پرتیبیان، ع.، فتوحی، ص.، ریگی، ح.، ۱۳۹۶. مقادیر کارایی پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعات و تراکم سطح در استان سیستان و بلوچستان، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲۴، صص ۱-۱۱.
- تیموری یانسری، ز.، حسین زاده، ر.، کاویان، ع.، پورقاسمی، ح.، ۱۳۹۶. تعیین پهنه‌های حساس به وقوع لغزش با استفاده از روش آنترپی شانون (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهاردانگه - استان مازندران)، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۲۲، صص ۲۰۴-۱۸۳.
- پورهاسمی، س.، امیراحمدی، ا.، اکبری، ا.، ۱۳۹۳. انتخاب مدل مناسب از بین روش‌های آماری دومتغیره جهت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در محیط *GIS*، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، جلد ۴، شماره ۱۵، صص ۸۹-۷۱.
- رجبی، م.، ولی زاده، ک.، خلیل، عابدی قشلاقی، ح.، ۱۳۹۵. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه آذر شهر چای)، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۵، شماره ۱، صص ۷۴-۶۰.
- زارع، م.، شعبانی، م.، سلیمان‌پور، م.، راوری رستمی، ا.، ۱۳۹۷. ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های ال. ان. آر. اف و دبلی و. آی. ان. اف در حوضه آبخیز خارستان، استان فارس، پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، شماره ۱۱۸، صص ۳۶-۲۳.
- شیرانی، ا.، ۱۳۹۷. ارزیابی کارایی عوامل ژئومورفومتریک در افزایش درستی نقشه‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه دزعلیا، استان اصفهان)، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی اصفهان، دوره ۲۹، شماره ۳، صص ۱۳۰-۱۱۱.

- عابدینی، م.، یعقوب‌نژاد اصل، ن.، ۱۳۹۶. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در استان تهران با استفاده از مدل فازی. فصلنامه علمی و پژوهشی مدیریت بحران، شماره ۱۱، صص ۱۵۵-۱۴۵.
- عابدینی، م.، رنجبری، ا.، مختاری، د.، ۱۳۹۸. تجزیه و تحلیل خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ANP و LR در محیط GIS (مطالعه موردی پهنه گسلی قوشاداغ-ارسباران در آذربایجان شرقی)، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۱، صص ۸۰-۷۷.
- قاسمیان، ب.، عابدینی، م.، روستایی، ش.، شیرزادی، ع.، ۱۳۹۷. بررسی مقایسه ای مدل‌های ماشین پشتیبان بردار و لجستیک درختی برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش - مطالعه موردی: شهرستان کامیاران، استان کردستان، فصلنامه جغرافیای طبیعی، سال ۱۱، شماره ۳۹، صص ۶۸-۴۷.
- قبادی، م.، جلالی، ح.، ساعدی، ب.، پیروزی نژاد، ن.، ۱۳۹۶. ارزیابی کارایی روش‌های ارزش اطلاعات، تراکم سطح، LNRFR و نسبت فراوانی در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه پشت دربند، کرمانشاه، نشریه زمین شناسی مهندسی، دوره ۱۱، شماره ۱، صص ۱۱۴-۹۱.
- گودرزی، س.، طالبی، ع.، پورقاسمی، ح.، ۱۳۹۷. بررسی کارایی مدل سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سردارآباد استان لرستان)، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۷، شماره ۲۵، صص ۹۶-۷۵.
- مقصودی، م.، محمدخان، ش.، پیرانی، پ.، ریاهی، س.، ۱۳۹۷. بررسی عوامل موثر بر مخاطره زمین‌لغزش‌های بالادست سد لتیان با استفاده از روش‌های ارزیابی آنتروپی و فازی، نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۲۸، صص ۱۷-۱.
- نوجوان، م.، شاه زیدی، س.، داودی، م.، رعایا، ه.، ۱۳۹۸. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تلفیق دو مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فازی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کمه، استان اصفهان)، نشریه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۷، شماره ۴، صص ۱۵۹-۱۴۴.
- نیازی، ی.، اختصاصی، م.، طالبی، ع.، صالح مختاری، م.، ۱۳۸۹. ارزیابی کارایی مدل آماری دو متغیره، در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه سد ایلام)، نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، جلد ۴، شماره ۱۰، صص ۲۰-۹.
- Basu, T., & Pal, S. (2019). RS-GIS based morphometrical and geological multi- criteria approach to the landslide susceptibility mapping in Gish River Basin ,West Bengal, India, *Advances in Space Research*, 3, 1253-1269.
- Bera, S., Guru, B., & Ramesh, V. (2019). Evaluation of landslide susceptibility models: a comparative study on the part of Western Ghat Region, India, *Remote Sensing Applications, Society and Environment*, (17), 39-52.
- Broeckx, J., Vanmarcke, M., Duchateau, R., & Poesen, J. (2018). A data-based landslide susceptibility map of Africa, *Earth-Science Reviews*, 9, 102-121.
- Chousianitis, K., Del Gaudio, V., Sabatakakis, N., Kavoura, K., Drakatos, G., Bathrellos, G., & Skilodimou, H., 2016 . Assessment of earthquake-induced landslide hazard in Greece: from Arias intensity to spatial distribution of slope resistance deman.
- Costanzo, D., E. Rotigliano, C. Irigaray, J. Jimenez-Pervarez, D., & Chacon, J. (2012). Factors selection in landslide susceptibility modelling on large scale following the gis matrix method: application to the river Beiro basin (Spain), *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 12, 327-340.

- Gupta, R.P., & Joshi, B.C. (1990). Landslide hazard zoning using the GIS approach-A case study from the Ramganga catchment, *Himalayas Engineering Geology*, 28(1), 119-131.
- Hong, H., Jebur, M., Bui, D., Xu, C., Akgun, A. (2015). Spatial prediction of landslide hazard at the Luxi area China, using support vector machines, *Environ, Earth Sci*, 75(40), 245-256.
- Hong, H., Chen, W., Xu, C., Youssef, A., Pradhan, B., & Tien Bui, D. (2016). Rainfall-induced landslide susceptibility assessment at the Chongren area (China) using frequency ratio, certainty factor, and index of entropy, *Geocarto*, 23(4), 223-2464.
- Hong, H., Pradhan, B., Xu, C., & Tien Bui, D. (2015). Spatial prediction of landslide hazard at the Yihuang area (China) using two-class kernel logistic regression, alternating decision tree and support vector machines, *Catena*, 133, 266-281.
- Khan, H., Shafique, M., Khan, A., Mian, A., Bacha, S., & Chiara, C. (2018). Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio, a case study of northern Pakistan, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 10,(16), 103-104.
- Rao, G., Cheng, Y., Lin, A., & Yan, B. (2017). Relationship between Landslides and Active Normal Faulting in the Epicentral Area of the AD 1556 M~8.5 Huaxian Earthquake, SE Weihe Graben (Central China), *Journal of Earth Science*, 28(3), 545-554.
- Sharma, S., & Sarma, N. J. (2017). Application of drainage basin morphotectonic analysis for assessment of tectonic activities over two regional structures of the northeast India, *Journal of the Geological Society of India*, 89 (3), 271-280.
- Wang, Q., D. Wang, Y., Huang, Z., Wang, L., Zhang, Q., Guo, W., Chen, W., & Chen, M. (2015), Landslide susceptibility mapping based on selected optimal combination of landslide predisposing factors in a large catchment, *Sustainability*, 7, 16653-16669.
- Wang, Q., Li, W., Wu, Y., Pei, Y., Xing, M., & Yang, D. (2016). A comparative study on the landslide susceptibility mapping using evidential belief function and weight of evidence models, *J. Earth Syst. Sci*, 125, (3), 646-662.
- Zhou, S., Chen, G., Fang, L., Nie, Y. (2016). GIS-Based Integration of Subjective and Objective Weighting Methods for Regional Landslides Susceptibility Mapping, *Sustainability*, 8, 334-343.
- Zhou, S., & Fang, L. (2015). Support vector machine modeling of earthquake-induced landslides susceptibility in central part of Sichuan province, China, *Geoenviron. Disasters*, 2(2), 234-24.