

تحلیل و پهنه‌بندی مخاطرات ژئومورفولوژیک (لغزش و سیل) استان البرز با استفاده از مدل‌های VIKOR-AHP و FR

فاطمه خدادادی - دانشجوی دکتری رشته مخاطرات ژئومورفولوژیک، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
مژگان انتظاری* - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان
فرزانه ساسان‌پور - دانشیار گروه برنامه‌ریزی شهری، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۴

چکیده

مخاطرات زمینی و ژئومورفیک از مخاطرات مهم طبیعی‌اند که سالیانه خسارات جانی و مالی زیادی در کل کشورهای جهان و به‌ویژه ایران به‌بار می‌آورند. از این‌رو، مطالعه و تهیه نقشه پهنه‌بندی مخاطرات امروزه یکی از اولویت‌های هر کشور به‌شمار می‌آید. در این تحقیق به بررسی مخاطرات زمین‌لغزش و سیل در سطح استان البرز پرداخته شده است. برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استان، از مدل ترکیبی VIKOR-AHP و برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر سیل از مدل نسبت فراوانی FR استفاده شد. سپس، به‌منظور داشتن دیدی کلی و جامع نسبت به وضعیت این مخاطرات، نقشه تلفیقی مخاطرات استان، که از همپوشانی دو نقشه پهنه‌بندی سیل و زمین‌لغزش است، با استفاده از مدل FUZZY تهیه شد. طبق نتایج نهایی حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از مخاطرات، ۳۳/۰۹ درصد سطح استان در پهنه با خطر زیاد زمین‌لغزش و ۲۱/۲۱ درصد از سطح استان در پهنه خطر متوسط سیل قرار دارند که شناسایی و پهنه‌بندی مناطق دارای پتانسیل خطر وقوع این‌گونه مخاطرات اهمیت بسیاری دارد.

واژگان کلیدی: استان البرز، مخاطرات ژئومورفیک، مدل نسبت فراوانی، مدل VIKOR-AHP.

مقدمه

مخاطرات طبیعی با انواع گوناگون و میزان تأثیرگذاری، به‌عنوان پدیده‌های تکرارشده و مخرب، همواره در طول حیات کره زمین وجود داشته‌اند و پس از پیدایش بشر نیز همیشه خطری جدی برای انسان‌ها بوده‌اند. بر این اساس، می‌توان ادعان کرد که هیچ جامعه‌ای ادعای مصونیت از مخاطرات طبیعی را ندارد و انسان‌ها همواره با تأثیرات عینی و ذهنی زیان‌بار آن مواجهند (غفوری، ۲۰۰۵). مخاطرات طبیعی با تخریب منابع درآمد، امکانات زیستی، و مراکز فعالیت مردم (خانه‌ها، کارگاه‌ها، مزارع، و ...) به افزایش آسیب‌های اقتصادی و فیزیکی دامن می‌زنند. در این میان، سیل و لغزش جزو حوادث ویرانگرند. بنابراین، شناسایی مناطقی که توسعه بیشتری از این‌گونه مخاطرات طبیعی دارند می‌تواند در جهت برنامه‌ریزی برای مقابله یا کاهش اثرهای این حوادث مؤثر باشد. پژوهشگران بسیاری در ارتباط با پهنه‌بندی مخاطرات طبیعی فعالیت کرده‌اند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

سپهر و همکاران (۱۳۹۲)، در پژوهشی، نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش در دامنه‌های شمالی بینالود را بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافقی VIKOR تهیه و در آن خطر ریسک در زیرحوضه‌های مختلف را بررسی کردند. کریمی سنگ‌چینی و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از سه مدل آماری - AHP، مدل رگرسیون چندمتغیره گام‌به‌گام، و رگرسیون چندمتغیره لجستیک - نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را در حوضه چل‌چای در استان گلستان تهیه کردند.

آریان‌پور و جمالی (۲۰۱۵)، در مقاله خود، در امیدیه خوزستان، با استفاده از قوانین فازی در مدل SMCE و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP و ادغام لایه‌های GIS، نقشه شاخصی را که در آن مناطق حساس به سیل مشخص بودند تهیه کردند و در نهایت دلایل وجود سیل در مناطق پُرخطر را کمترین زمان تمرکز، شیب بالاتر، نفوذپذیری کم، و نزدیکی به تأسیسات نفت و گاز و مناطق مسکونی برشمردند.

کالو و همکاران (۲۰۱۶)، در مقاله‌ای، نقشه پهنه‌بندی سیل را با استفاده از مدل نسبت فراوانی و روش‌های آماری در مناطق سیل‌زده معادن زغال سنگ واقع در شرق ناحیه فانگشان در جنوب غربی پکن تهیه کردند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد که معیارهای مدل FR، به‌عنوان یک روش طبقه‌بندی طبیعی، برای منطقه مطالعاتی مناسب‌تر است. رحمتی و همکاران (۲۰۱۵)، در پژوهشی، نقشه حساسیت‌پذیری سیلاب را در استان گلستان با استفاده از مدل‌های FR و WOFI تهیه کردند.

دارابی و همکاران (۱۳۹۵)، در مقاله‌ای، با استفاده از روش نسبت فراوانی، از پارامترهای طبقات ارتفاعی، درصد شیب، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه، میانگین بارندگی، فاصله از رودخانه، سنگ‌شناسی، نوع خاک، و کاربری اراضی استفاده کردند و نقشه‌های احتمال و حساسیت سیل در حوضه آبخیز پل دوآب سازند را تهیه کردند.

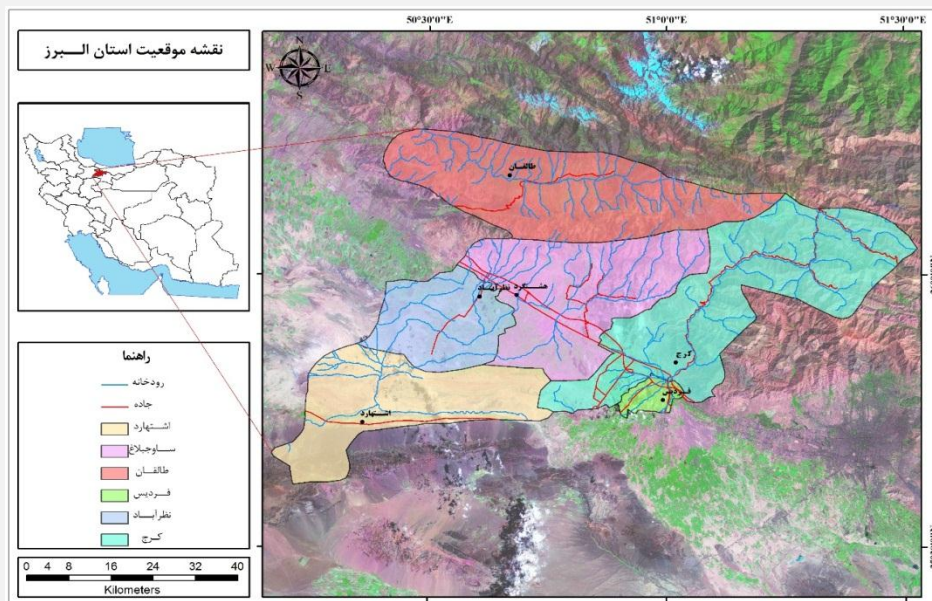
خسروی و همکاران (۲۰۱۶)، در مقاله خود، با استفاده از چهار مدل نسبت فراوانی (FR)، وزن از شواهد (WOFI)، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، و مجموعه‌ای از نسبت فراوانی با AHP و مقایسه آن‌ها نقشه‌های حساسیت سیل در حوضه هراز در استان مازندران را تهیه کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که مدل نسبت فراوانی بالاترین سطح زیر منحنی را در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد و دقت مناسبی در حساسیت سیل مناطق نشان می‌دهد. لی و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از روش نسبت فراوانی اصلاح‌شده، حساسیت به زمین‌لغزش را در حوضه آنینگ در سیچوان و حوضه کایان در فوجیان (مناطق کوهستانی جنوب غربی و سواحل جنوب شرقی مناطق کوهستانی چین) ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که روش نسبت فراوانی اصلاح‌شده برای ارزیابی حساسیت به لغزش روشی مفید است.

جیمز - پرالوارز و همکاران (۲۰۱۷)، در پژوهشی، به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از طریق ارزیابی چند تکنیک در بتیک کردیلرا (جنوب اسپانیا) پرداختند. نتایج حاصل از مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که از هر ۶ درصد لغزشی که در منطقه به‌صورت سالانه رخ می‌دهد ۵ درصد آن دارای خطر متوسط تا بسیار زیاد است. در خصوص پیشینه مطالعات لغزش و مدل VIKOR نیز پژوهش‌هایی در سایر کشورها انجام گرفته است که از آن جمله می‌توان به پلیکانی و همکاران (۲۰۱۴) و مالکیان و آذرینوند (۲۰۱۶) اشاره کرد. بیشتر مطالعات فوق بر یک نوع مخاطره تمرکز داشته‌اند و مطالعه‌ای که در آن دید جامع و تلفیقی به مخاطرات باشد کمتر دیده شده است. علاوه‌براین، تعداد شاخص‌های مورد استفاده نیز در مطالعات قبلی محدود بوده و سعی شده در این پژوهش با در نظر داشتن جمیع دیدگاه‌ها کامل‌ترین عوامل دخیل در وقوع این مخاطرات شناسایی شود و مهم‌ترین کاستی در مطالعات قبلی عدم لحاظ و مقایسه وضع موجود مخاطرات (نقاطی که لغزش و سیل در منطقه مطالعاتی رخ داده است) با نتایج نهایی است که سعی شده به این موضوع در این پژوهش توجه شود. بنابراین، نیاز به مطالعه مخاطرات ژئومورفیک (سیلاب و زمین‌لغزش) در استان به دلیل اهمیت اقتصادی آن در بُعد منطقه‌ای و ملی و تراکم جمعیت میلیونی آن ضروری است تا در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌های استان البرز مورد توجه و عمل قرار بگیرد.

براین اساس، هدف از مقاله حاضر، پهنه‌بندی مخاطرات ژئومورفولوژیکی (سیل و لغزش) استان البرز و تبیین میزان خطرپذیری بخش‌های مختلف استان در برابر این دو مخاطره ژئومورفولوژیکی است تا، با ارائه نگاهی یک‌پارچه، وضعیت استان از نظر رخداد سیل و لغزش بررسی شود.

منطقه مورد مطالعه

البرز کوچک‌ترین استان ایران است که، با مساحت ۵۱۴۲ کیلومتر مربع، کمتر از نیم درصد (حدود ۰/۳۱ درصد) از وسعت کشور را به خود اختصاص داده است. این استان، از نظر موقعیت جغرافیایی، بین مدارهای ۳۵ تا ۳۶ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۱ درجه طول شرقی و با ارتفاع ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر از سطح دریا در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی و در مجاورت تهران واقع شده است (شکل ۱). استان البرز دارای ۶ شهرستان، ۱۶ شهر، ۲۵ دهستان، و ۴۲۵ روستا است. شهرستان‌های استان البرز عبارت‌اند از: کرج، ساوجبلاغ، نظرآباد، طالقان، اشتهارد، و فردیس. جمعیت استان البرز در سال ۱۳۹۵ برابر با ۲۷۱۲۴۰۰ نفر هست. تراکم جمعیت در سال ۱۳۹۵ برابر با ۵۳۰ نفر در هر کیلومتر مربع است.



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی استان البرز

مواد و روش‌ها

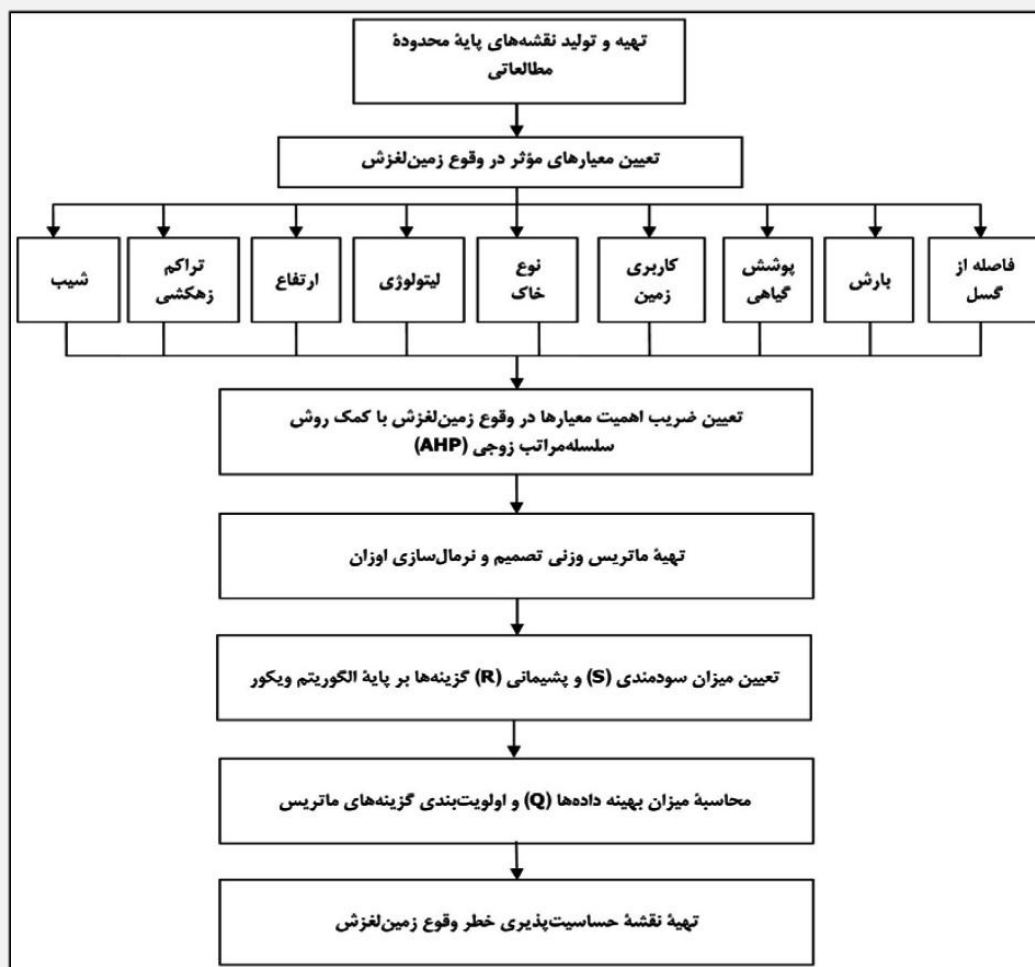
این پژوهش، از نظر روش تحقیق، ترکیبی از روش‌های توصیفی و تحلیلی است و، از نظر هدف، از نوع تحقیقات کاربردی به‌شمار می‌رود. برای جمع‌آوری داده‌ها در این پژوهش، از روش‌های اسنادی و میدانی استفاده شده است که به تبیین وضعیت مخاطرات لغزش و سیل در استان البرز می‌پردازد. در این تحقیق، برای پهنه‌بندی مخاطرات سیلاب و زمین‌لغزش، با توجه به مدل‌های به‌کاررفته، شاخص‌های مربوط به هر مدل استخراج شد تا برای تهیه نقشه خطر این مخاطرات به شرح زیر استفاده شود: برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استان البرز، از یکی از روش‌های غیررتبه‌ای با عنوان روش بهینه‌سازی توافقی ویکور^۱ VIKOR، که بر پایه محاسبه حداکثر سودمندی و حداقل ضرر است، استفاده شد و نقشه حساسیت‌پذیری زیرحوضه‌های استان البرز نسبت به وقوع پدیده زمین‌لغزش تهیه شد. برای بررسی میزان خطر سیل استان البرز نیز از مدل نسبت فراوانی (FR) استفاده شد. شکل‌های ۲ و ۳ مراحل روش کار را برای رسیدن به نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش و سیل نشان می‌دهد. برای اجرای این دو مدل نیاز است که مهم‌ترین شاخص‌های تأثیرگذار در رخداد این مخاطره‌ها استخراج شود. بدین منظور، با یک بررسی و مطالعه عمیق بر روی پژوهش‌های گذشته، که در این حوضه انجام گرفته و همچنین ویژگی‌های

1. Visekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (in Serbian) = Multi criteria optimization and compromise solution (in English)

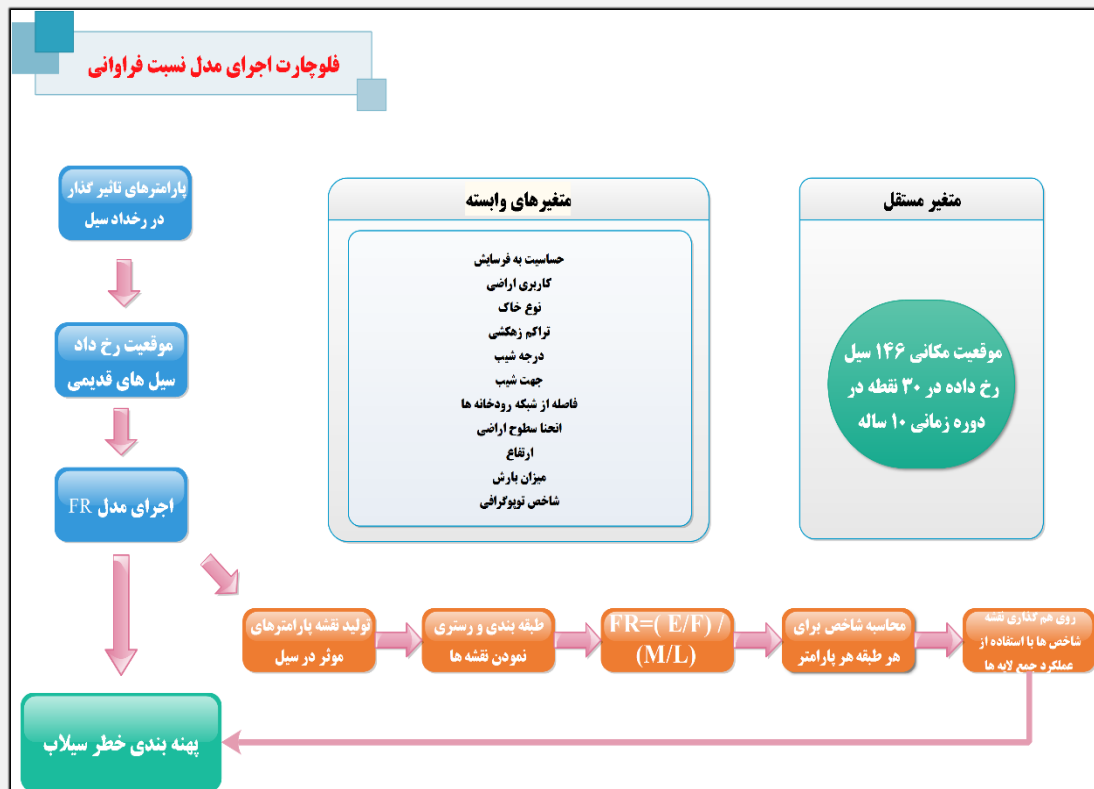
منطقه مورد مطالعه، برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش با استفاده از مدل ویکور، نه شاخص- شامل شیب، تراکم زهکشی، ارتفاع، لیتولوژی، نوع خاک، کاربری زمین، پوشش گیاهی، بارش، و فاصله از گسل- استفاده شد. برای پهنه‌بندی سیل با استفاده از مدل نسبت فراوانی هم یازده شاخص حساسیت به فرسایش، کاربری زمین، نوع خاک، تراکم زهکشی، درجه شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، انحنای سطوح اراضی، ارتفاع، میزان بارش، و شاخص توپوگرافی به کار گرفته شد. جدول ۱ پیشینه‌ای از مطالعات گذشته و انواع شاخص‌های به کاررفته برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش و سیل را نشان می‌دهد.

جدول ۱. شاخص‌های مورد استفاده برای پهنه‌بندی مخاطرات سیل و لغزش در مطالعات گذشته

مخاطره	محقق - سال نشر اثر	شاخص‌های مورد استفاده برای پهنه‌بندی خطر
زمین لغزش	کروزیر- ۲۰۱۷	شیب، بارش، جنس زمین، و پوشش گیاهی
	لئوناردی و همکاران- ۲۰۱۶	شیب، سنگ‌شناسی، ارتفاع، بارندگی، و کاربری اراضی
	کومار و همکاران- ۲۰۱۵	سنگ‌شناسی، خاک‌شناسی، کاربری اراضی، زهکشی، شیب، رطوبت توپوگرافی، و ارتفاع
سیل	رامش و همکاران- ۲۰۱۴	جهت شیب، انحنای شیب، لیتولوژی، و فاصله از رودخانه
	کاو و همکاران- ۲۰۱۶	ارتفاع، شیب، انحنای زمین، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، بافت خاک، قدرت جریان، رطوبت توپوگرافی، و بارش
	خسروی و همکاران- ۲۰۱۶	زاویه شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، رطوبت توپوگرافی، قدرت جریان، بارش، لیتولوژی، پوشش گیاهی، و نقشه انحنای
	رحمتی و همکاران- ۲۰۱۵	سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، خاک، زاویه شیب، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، ارتفاع، و تراکم زهکشی
	آریان‌پور و جمالی- ۲۰۱۵	شیب، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، نرخ فرسایش، بافت خاک، بارش سالانه، تراکم زهکشی، و پوشش گیاهی



شکل ۲. فلوچارت روش مطالعاتی انجام گرفته برای رسیدن به نقشه حساسیت‌پذیری زمین لغزش با استفاده از مدل VIKOR

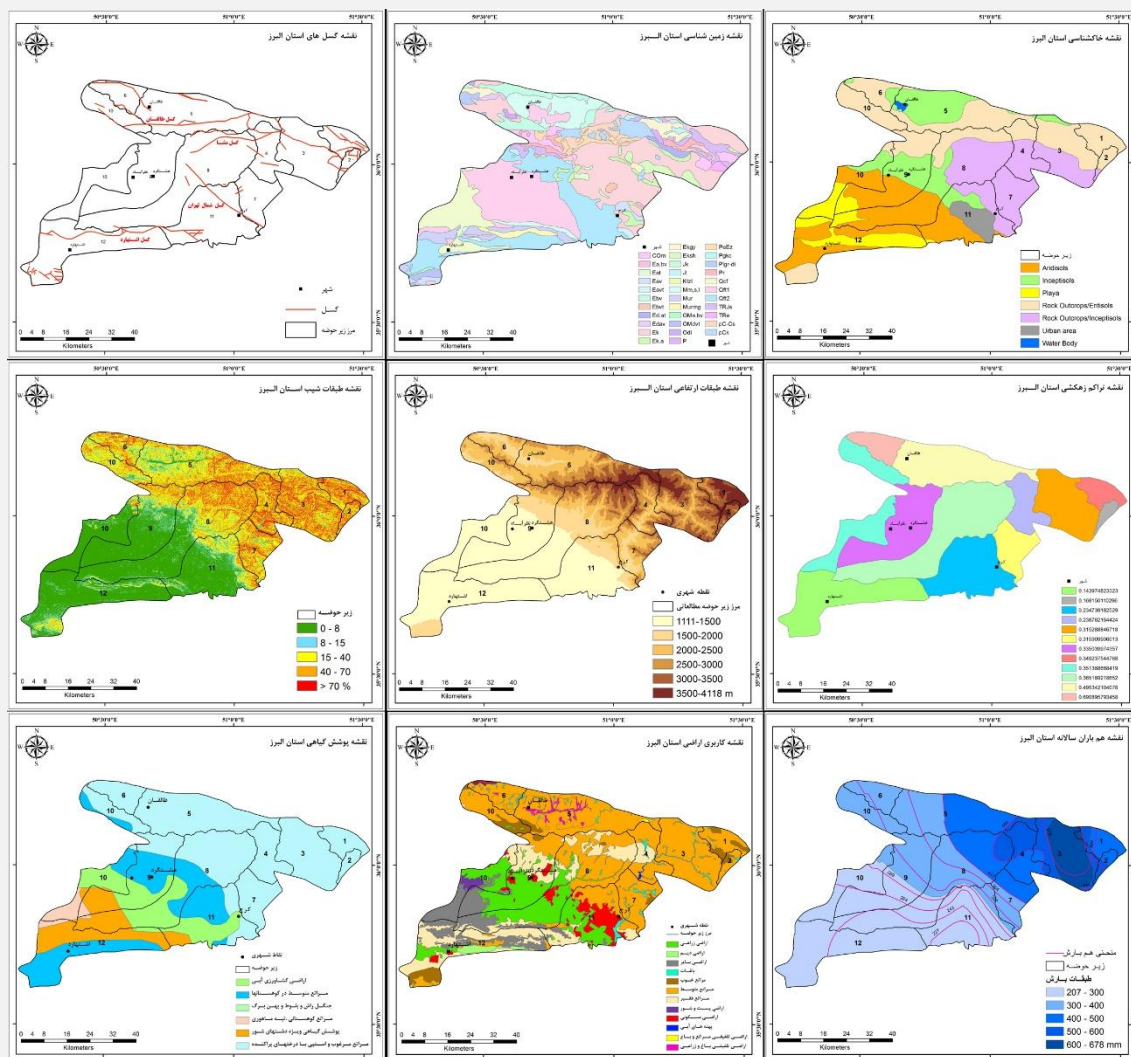


شکل ۳. فلوجارت روش مطالعاتی انجام گرفته برای رسیدن به نقشه حساسیت پذیری سیل با استفاده از مدل FR

به منظور بررسی مخاطرات لغزش و سیل در سطح استان البرز و برای تولید نقشه تلفیقی، دو لایه نهایی، که شامل پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و پهنه‌بندی سیل استان البرز است، با استفاده از مدل فازی گاما روی هم قرار گرفت و نقشه پهنه‌بندی ریسک استان البرز در این دو مخاطره ترسیم و نقشه پهنه‌بندی سیل و لغزش استان البرز در پنج کلاس طبقه‌بندی و درصد مساحت هر شهرستان نسبت به مخاطرات فوق تعیین شد. در نهایت، با توجه به وضعیت سکونتگاه‌های انسانی و تعداد نقاط شهری و روستایی هر شهرستان، آسیب‌پذیرترین شهرها از نظر مخاطرات مشخص شد.

یافته‌های پژوهش

برای پهنه‌بندی خطر ناشی از زمین‌لغزش در استان البرز، ابتدا نه معیار اصلی در ارتباط با استعداد حوضه به زمین‌لغزش در زیرحوضه‌های مطالعاتی در نظر گرفته شد. پس از انتخاب معیارهای اصلی، در مرحله بعد، نقشه‌های مربوط به هر یک از معیارهای انتخابی برای وزن‌دهی و ارزیابی زیرحوضه‌ها در محیط GIS تهیه و ترسیم شد (شکل ۴). با توجه به اثر نه معیار فوق در وقوع زمین‌لغزش (فاصله از گسل، بارش، پوشش گیاهی، کاربری زمین، نوع خاک، لیتولوژی، ارتفاع، تراکم زهکشی، و شیب)، معیارهای میزان پوشش گیاهی و فاصله از گسل دارای اثر کاهشی‌اند و هفت معیار دیگر اثر افزایشی دارند. پس از تهیه نقشه معیارهای انتخابی، ضریب اهمیت معیارهای یادشده از نقطه‌نظر درجه اهمیت در وقوع زمین‌لغزش و حساسیت‌پذیری حوضه‌ها به این پدیده به کمک الگوریتم سلسله‌مراتبی AHP و از طریق توزیع پرسش‌نامه بین افراد متخصص و کارشناس تعیین شد.



شکل ۴. پارامترهای مؤثر در خطر وقوع زمین لغزش در استان البرز با استفاده از مدل ویکور

در این پژوهش، وزن‌دهی گزینه‌ها از طریق تکمیل پرسش‌نامه کارشناسی و براساس نقش هر معیار در وقوع مخاطره مدنظر بوده است و از بازه وزن‌دهی یک تا ده استفاده شد؛ به گونه‌ای که وزن ۱ کمترین تأثیر و ۱۰ بالاترین تأثیر را در خطر زمین لغزش نشان می‌دهد. پس از تعیین ضریب اهمیت معیارها، ماتریس تصمیم اوزان برای اجرای الگوریتم ویکور تهیه شد. همان‌طور که مشخص است، نه معیار در ارزیابی حوضه‌های آبریز نقش دارند. ماتریس تصمیم‌گیری براساس پارامترهای مؤثر در زیرحوضه‌ها تشکیل و سپس اعداد ماتریس نرمال‌سازی شد. پس از نرمال‌سازی و تهیه ماتریس نرمال وزنی، برای به‌دست‌آوردن مقادیر سودمندی و پشیمانی (ضرر) براساس الگوریتم بهینه‌سازی ویکور، مراحل زیر روی ماتریس وزنی نرمال انجام گرفت.

وزن‌دار کردن ماتریس نرمال

برای وزن‌دار کردن مقادیر ماتریس نرمال هر یک از گزینه‌ها بر وزن معیار (ضریب AHP) ضرب می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲. وزن دار کردن مقادیر نرمال شده اوزان گزینه‌ها براساس معیارهای مؤثر در وقوع زمین لغزش

معیار	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی	زیرحوضه
ضریب AHP	۰/۰۲۵	۰/۳۱۰	۰/۱۶۳	۰/۰۳۲	۰/۰۵	۰/۰۵۶	۰/۰۵۴	۰/۰۲۶	۰/۲۸۴	
شماره ۱	۰/۰۱۰۶	۰/۱۲۳	۰/۰۶۷	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۳	۰/۰۰۹۰	۰/۰۱۷۴	۰/۰۰۷۳	۰/۰۶۹	
شماره ۲	۰/۰۰۹۵	۰/۱۲۵	۰/۰۶۵	۰/۰۰۴۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹۰	۰/۰۱۹۳	۰/۰۰۶۱	۰/۰۵۵	
شماره ۳	۰/۰۰۷۴	۰/۱۲۳	۰/۰۵۶	۰/۰۰۷۹	۰/۰۱۳	۰/۰۰۹۰	۰/۰۲۳۲	۰/۰۰۸۶	۰/۰۸۳	
شماره ۴	۰/۰۰۸۵	۰/۱۲۸	۰/۰۵۴	۰/۰۰۶۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۹۰	۰/۰۱۹۳	۰/۰۰۷۳	۰/۰۸۳	
شماره ۵	۰/۰۰۸۵	۰/۰۸۴	۰/۰۵۱	۰/۰۱۲۷	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱۱	۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۱۰	۰/۱۱۱	
شماره ۶	۰/۰۰۶۳	۰/۰۹۶	۰/۰۴۲	۰/۰۱۷۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۵۱	۰/۰۱۳۵	۰/۰۰۹۸	۰/۱۱۱	
شماره ۷	۰/۰۰۴۲	۰/۱۰۳	۰/۰۴۴	۰/۰۰۷۹	۰/۰۱۳	۰/۰۰۹۰	۰/۰۱۵۴	۰/۰۰۶۱	۰/۰۸۳	
شماره ۸	۰/۰۰۵۳	۰/۰۵۷	۰/۰۳۸	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۰	۰/۰۱۸۱	۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۴۹	۰/۰۶۹	
شماره ۹	۰/۰۰۱۰	۰/۰۲۶	۰/۰۳۰	۰/۰۰۸۴	۰/۰۱۳	۰/۰۲۱۱	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۶۱	۰/۰۵۵	
شماره ۱۰	۰/۰۰۳۱	۰/۰۳۶	۰/۰۳۲	۰/۰۰۸۹	۰/۰۱۵	۰/۰۲۱۱	۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۷۳	۰/۰۹۷	
شماره ۱۱	۰/۰۰۵۳	۰/۰۲۶	۰/۰۲۹	۰/۰۰۵۸	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵۱	۰/۰۱۱۶	۰/۰۰۷۳	۰/۰۸۳	
شماره ۱۲	۰/۰۰۹۵	۰/۰۱۴	۰/۰۲۶	۰/۰۰۳۵	۰/۰۱۳	۰/۰۲۴۲	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۴۹	۰/۰۴۱	

تعیین مقادیر بالاترین و پایین‌ترین ارزش ماتریس نرمال وزنی

بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین عدد هر ستون تعیین می‌شود. در اینجا منظور از بزرگ‌ترین عدد یعنی عددی که بیشترین ارزش مثبت را داراست و کوچک‌ترین یعنی بیشترین ارزش منفی. پس اگر معیار ما از نوع منفی باشد، بزرگ‌ترین عدد برعکس می‌شود؛ یعنی می‌شود کمترین مقدار و کوچک‌ترین می‌شود بیشترین مقدار و بالعکس.

محاسبه مقدار سودمندی و تأسّف معیارها

در این مرحله، با توجه به مقادیر مثبت و منفی محاسبه شده در مرحله قبل، فاصله هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل و سپس حاصل جمع آن‌ها برای ارزش نهایی براساس رابطه ۱ محاسبه شد. به بیانی، در این مرحله سودمندی و پشیمانی (ضرر) حاصل از انتخاب یک گزینه به‌منزله رتبه برتر محاسبه می‌شود. مقادیر حداقل برای هر دو مقدار معرف کمترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل (گزینه برتر) است که کمترین پشیمانی (ضرر) و بیشترین سودمندی را همراه دارد (سپهر و همکاران، ۱۳۹۲).

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-}; \quad R_j = \max_i \left[w_i \cdot \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right] \quad (1)$$

f_i^* = بزرگ‌ترین عدد ماتریس نرمال وزنی برای هر ستون

f_{ij} = عدد گزینه موردنظر برای هر معیار در ماتریس نرمال وزنی

f_i^- = کوچک‌ترین عدد ماتریس نرمال وزنی برای هر ستون

W = ضریب AHP.

طبیعتاً برای گزینه به ازای هر معیار یک شاخص مطلوبیت به‌دست می‌آید که مجموع آن‌ها شاخص نهایی S_j گزینه را مشخص می‌کند. بزرگ‌ترین S_j هر گزینه به ازای هر معیار شاخص نارضایتی (R_j) آن گزینه است. برترین و بدترین رتبه براساس ارزش S_j و R_j به‌دست می‌آید (جدول ۳).

محاسبه شاخص ویکور (Q) و رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

در نهایت، پس از محاسبه مقادیر سودمندی و پشیمانی (ضرر)، شاخص ویکور (Q) برای هر گزینه (زیرحوضه مطالعاتی) به صورت مجزا و براساس رابطه ۲ محاسبه شد که جدول ۳ مقادیر آن را نشان می‌دهد (سپهر و همکاران، ۱۳۹۲).

$$Q_j = v \cdot \frac{S_j - S^-}{S^* - S^-} + (1 - v) \cdot \frac{R_j - R^-}{R^* - R^-} \quad (2)$$

$v = 0.5$ = عدد ثابت

S_j = مجموع مقدار S برای هر گزینه

S^- = بزرگ‌ترین عدد شاخص S برای هر گزینه

S^* = کوچک‌ترین عدد شاخص S برای هر گزینه

R_j = مقدار R برای هر گزینه

R^- = بزرگ‌ترین عدد شاخص R برای هر گزینه

R^* = کوچک‌ترین عدد شاخص R برای هر گزینه

جدول ۳. شاخص مطلوبیت (Sj) و شاخص ناراضی (Rj)

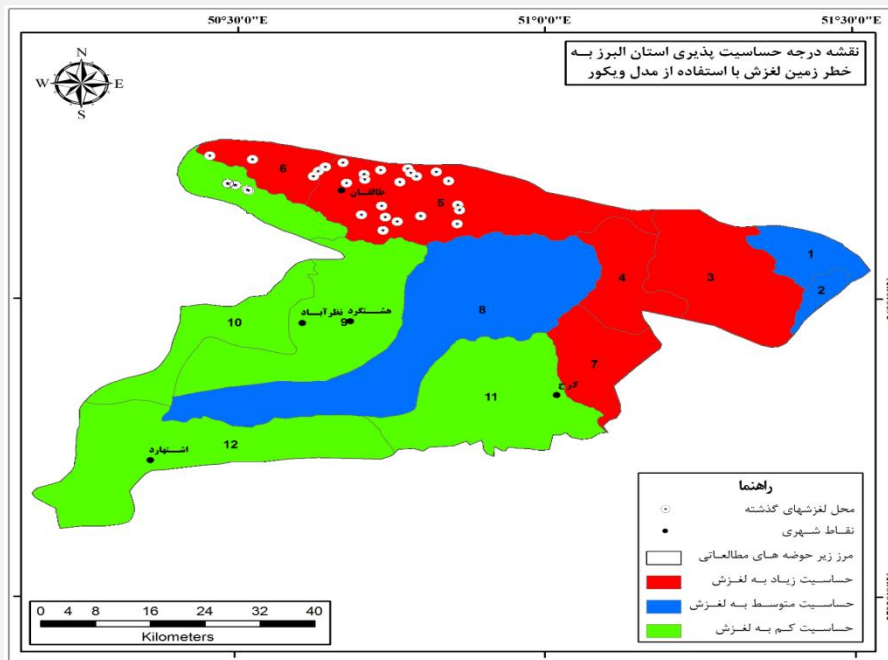
معیار	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لینتوزی	Sj	Rj	Q	زیرحوضه
شماره ۱	۰	۰/۰۱۳	۰	۰/۰۲۰	۰/۰۲۳	۰/۰۵۶	۰/۰۲۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۷۰	۰/۳۳۲	۰/۱۷۰	۰/۴۴۳	شماره ۱
شماره ۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	۰/۰۳۰	۰/۰۵۰	۰/۰۵۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲۰	۰/۰۲۲۷	۰/۴۱۷	۰/۲۲۷	۰/۴۴۱	شماره ۲
شماره ۳	۰/۰۰۸	۰/۰۱۳	۰/۰۴۱	۰/۰۲۲	۰/۰۳۳	۰/۰۵۶	۰	۰/۰۱۰	۰/۰۱۱۳	۰/۲۹۸	۰/۱۱۳	۰/۰۸۳	شماره ۳
شماره ۴	۰/۰۰۵	۰	۰/۰۴۹	۰/۰۲۶	۰/۰۳۳	۰/۰۵۶	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۱۳	۰/۳۱۵	۰/۱۱۳	۰/۰۹۶	شماره ۴
شماره ۵	۰/۰۰۵	۰/۰۱۱۸	۰/۰۶۳	۰/۰۱۱	۰	۰/۰۱۱	۰/۰۲۳	۰	۰	۰/۲۳۳	۰/۱۱۸	۰/۰۴۷	شماره ۵
شماره ۶	۰/۰۱۱	۰/۰۸۵	۰/۰۹۸	۰	۰	۰/۰۳۳	۰/۰۳۸	۰	۰	۰/۲۷۲	۰/۰۹۸	۰/۰۲۸	شماره ۶
شماره ۷	۰/۰۱۶	۰/۰۶۵	۰/۰۸۹	۰/۰۲۲	۰/۰۳۳	۰/۰۵۶	۰/۰۳۰	۰/۰۱۱۳	۰/۰۱۱۳	۰/۴۴۸	۰/۱۱۳	۰/۱۹۵	شماره ۷
شماره ۸	۰/۰۱۳	۰/۰۹۱	۰/۰۱۱۲	۰/۰۱۹	۰/۰۵۰	۰/۰۲۲	۰/۰۴۶	۰/۰۱۷۰	۰/۰۱۷۰	۰/۶۵۱	۰/۱۹۱	۰/۵۳۰	شماره ۸
شماره ۹	۰/۰۲۵	۰/۰۲۷۷	۰/۱۴۴	۰/۰۲۱	۰/۰۳۳	۰/۰۱۱	۰/۰۵۴	۰/۰۲۲۷	۰/۰۲۲۷	۰/۸۱۴	۰/۲۷۷	۰/۸۵۴	شماره ۹
شماره ۱۰	۰/۰۱۹	۰/۲۵۰	۰/۱۳۸	۰/۰۲۰	۰/۰۱۶	۰/۰۱۱	۰/۰۴۶	۰/۰۵۶	۰/۰۵۶	۰/۵۷۵	۰/۲۵۰	۰/۶۱۴	شماره ۱۰
شماره ۱۱	۰/۰۱۳	۰/۰۲۷۷	۰/۱۴۷	۰/۰۲۶	۰/۰۱۶	۰/۰۳۳	۰/۰۴۶	۰/۰۱۱۳	۰/۰۱۱۳	۰/۶۹۱	۰/۲۷۷	۰/۷۶۲	شماره ۱۱
شماره ۱۲	۰/۰۲۷	۰/۰۳۱۰	۰/۱۶۳	۰/۰۳۲	۰/۰۲۳	۰	۰/۰۵۴	۰/۰۲۸۴	۰/۰۲۸۴	۰/۹۰۵	۰/۳۱۰	۱	شماره ۱۲

رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس مقادیر Q

پس از تعیین رتبه Q و دسته‌بندی مقادیر R و S برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زیرحوضه‌های مطالعاتی به زمین‌لغزش بر پایه مقادیر شاخص بهینه‌سازی ویکور (Q)، مناطق در سه کلاس کیفی حساسیت‌پذیری کم، متوسط، و حساسیت‌پذیری زیاد طبقه‌بندی شدند (جدول ۴). در نهایت، براساس طبقات حساسیت و مقادیر کمی Q، نقشه حساسیت‌پذیری منطقه مطالعاتی به زمین‌لغزش در محیط GIS تهیه شد (شکل ۵).

جدول ۴. کلاس‌بندی کمی و کیفی درجه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش

درجه حساسیت‌پذیری	کلاس (طبقه)	مقدار کمی ویکور (Q)
کم	I	> 0.6
متوسط	II	$0.2 - 0.6$
زیاد	III	< 0.2



شکل ۵. حساسیت‌پذیری خطر وقوع زمین‌لغزش در استان البرز

نتایج بررسی لغزش استان البرز با استفاده از مدل ویکور نشان می‌دهد که از بین نه عامل مؤثر در حساسیت‌پذیری حوضه به لغزش، هفت معیار (شیب، طبقات ارتفاعی، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، بارش، نوع خاک، و لیتولوژی) دارای اثر فزاینده و دو معیار (فاصله از گسل و پوشش گیاهی) دارای اثر کاهنده در آسیب‌پذیری حوضه به زمین‌لغزش‌اند. پس از محاسبهٔ مجموع اوزان معیارها با اثر افزایشی برای هر زیرحوضهٔ مطالعاتی، مشخص شد که زیرحوضه‌های شمارهٔ ۵، ۳، و ۴ بیشترین مقدار و زیرحوضه‌های ۱۲، ۹، و ۱۱ دارای کمترین مقدار شاخص ویکور هستند. به گفته‌ای، زیرحوضه‌های شمارهٔ ۳، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ از بیشترین حساسیت‌پذیری به وقوع زمین‌لغزش برخوردارند. حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در زیرحوضه‌های ۱۲، ۹، و ۱۱ حداقل است. با تطبیق زیرحوضه‌های مطالعاتی با مرزهای سیاسی شهرستان به نتایجی به شرح جدول‌های ۵ و ۶ می‌رسیم.

جدول ۵. مساحت هریک از پهنه‌های مخاطره لغزش استان البرز

پتانسیل خطر	مساحت (km ²)	درصد مساحت
کم	۲۲۹۵٫۳۸	۴۴٫۶۴
متوسط	۱۱۴۵٫۱۴	۲۲٫۲۷
زیاد	۱۷۰۱٫۴۸	۳۳٫۰۹

جدول ۶. درصد مساحت پهنه‌های مختلف مخاطره لغزش به تفکیک شهرستان در استان البرز

نام شهرستان	درصد مساحت پهنه‌های مختلف مخاطره لغزش استان البرز		
	کم	متوسط	زیاد
کرج	۲۷٫۱۰	۵۸٫۷۳	۱۴٫۱۷
طالقان	۳۰٫۵۰	۲۷٫۴۶	۴۲٫۰۴
ساوجبلاغ	۵۷٫۹۷	۳۳٫۹۲	۸٫۱۱
نظرآباد	۸۷٫۲۹	۱۲٫۷۱	.
اشتهارد	۹۳٫۰۳	۶٫۹۷	.
فردیس	۱۰۰	.	.

همان‌طور که جدول‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد، بیش از ۵۰ درصد از مساحت استان البرز در پهنه متوسط و زیاد مخاطره لغزش قرار گرفته‌اند که این میزان در دو شهرستان طالقان و کرج به بیش از ۶۰ درصد می‌رسد که مقادیر فوق لزوم توجه و مدیریت بیشتر به این مناطق را نشان می‌دهد. در ادامه کار، برای مشخص کردن وضعیت آسیب‌پذیری استان البرز نسبت به مخاطره سیل، به پهنه‌بندی این مخاطره در استان البرز پرداخته خواهد شد.

پهنه‌بندی خطر سیل در استان البرز

با استفاده از تجزیه و تحلیل سوابق وقوع سیل در منطقه، می‌توان وضعیت وقوع سیل در آینده را برآورد کرد. بنابراین، نقشه پراکندگی سیل‌های رخ داده می‌تواند مهم‌ترین عامل پیش‌بینی سیل در آینده باشد. در این مطالعه، نقشه ۱۴۶ مورد از سیل‌های قدیمی، که در سی نقطه سیل‌خیز استان البرز رخ داده بود، با استفاده از اطلاعات منابع آب ایران و اداره کل آب منطقه‌ای استان البرز در یک دوره ده‌ساله (۱۳۸۲-۱۳۹۲) استخراج شد. اطلاعات به‌دست‌آمده حاکی از آن بود که در این سی نقطه سیل‌خیز در این دوره آماری، ۱۴۶ مورد سیل رخ داده که منشأ بیشتر آن‌ها رودخانه‌ای و سرریز آب رودخانه‌ها به دشت‌ها بوده است.

برای تهیه نقشه حساسیت منطقه به سیل، تعیین عوامل مؤثر در وقوع سیل ضروری است (بختیاری کیا و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین، از عوامل مهم و مؤثر در ایجاد سیل می‌توان به عوامل سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، خاک‌شناسی، درجه شیب، جهت شیب، نقشه انحناى سطوح، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، تراکم زهکشی، ارتفاع، و میزان بارش اشاره کرد که به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی سیل در استان البرز با استفاده از مدل نسبت فراوانی در نظر گرفته شدند. همه عوامل مؤثر به یک شبکه سلول‌های ۲۰ در ۲۰ متر برای استفاده در مدل‌های FR تبدیل شد. در نهایت، نقشه نهایی حساسیت سیل به‌دست‌آمده توسط مدل FR در شکل ۶ ارائه شده است.

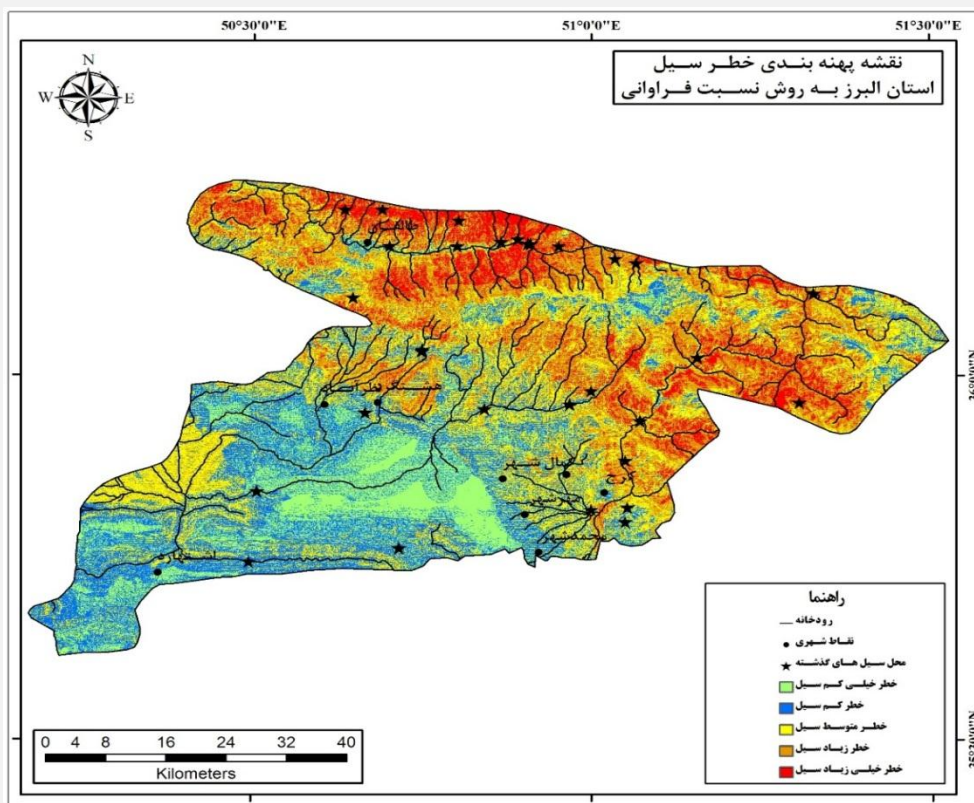
جدول ۷، به‌طور خلاصه، وضعیت همه پارامترهای مؤثر در محاسبه خطر سیل با مدل نسبت فراوانی و طبقات مختلف آن‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، تعداد سیل‌های رخ داده در گذشته نیز به تفکیک هر کلاس پارامتر نشان داده شده است.

جدول ۷. ارتباط فضایی بین هر عامل مؤثر در ایجاد سیل با استفاده از مدل FR

پارامترها	فراوانی نقاط وقوع سیل	درصد فراوانی	تعداد پیکسل‌ها (۲۰*۲۰)	درصد پیکسل‌ها	شاخص FR
حساسیت به فرسایش					
سازندهای مقاوم	۷	۲۳٫۳۴	۸۸۹۰۶۸	۸٫۴۸	۲٫۷۴
سازندهایی با مقاومت متوسط	۱۳	۴۳٫۳۳	۶۴۲۷۵۲۱	۶۱٫۳۵	۰٫۷۰
سازندهای حساس	۱۰	۳۳٫۳۳	۳۱۶۱۲۲۴	۳۰٫۱۷	۱٫۱۰
کاربری اراضی					
مناطق مسکونی	۱	۳٫۳۳	۴۴۸۵۴۴	۴٫۲۸	۱٫۷۷
اراضی زراعی	۴	۱۳٫۳۳	۱۸۶۴۱۲۲	۱۷٫۸۰	۰٫۷۴
اراضی باغ و مشجر	۲	۶٫۶۶	۱۷۱۱۰۱	۱٫۶۳	۱٫۰۸
اراضی بایر	۳	۱۰٫۰	۹۵۱۸۴۶	۹٫۰۹	۱٫۱۰
پهنه‌های آبی	۰	۰٫۰۰	۹۰۶۳	۰٫۰۸	۰٫۰۰
اراضی مرتعی	۲۰	۶۶٫۶۷	۷۰۲۵۵۵۹	۶۷٫۱۰	۱٫۹۹
فاصله از رودخانه (m)					
< ۵۰۰	۶	۲۰٫۰۰	۲۹۹۳۵۷۸	۲۸٫۵۹	۱٫۶۷
۵۰۰-۱۰۰۰	۹	۳۰٫۰۰	۲۴۱۵۶۸۱	۲۳٫۰۷	۱٫۳۰
۱۰۰۰-۲۰۰۰	۸	۲۶٫۶۷	۲۷۷۸۷۸۵	۲۶٫۵۴	۱٫۱۷
۲۰۰۰-۳۰۰۰	۶	۲۰٫۰۰	۱۲۲۱۲۷۱	۱۱٫۶۶	۱٫۰۰
> ۳۰۰۰	۱	۳٫۳۴	۱۰۶۰۹۴۳	۱۰٫۱۴	۰٫۳۲

ادامهٔ جدول ۷. ارتباط فضایی بین هر عامل مؤثر در ایجاد سیل با استفاده از مدل FR

شاخص FR	درصد پیکسل‌ها	تعداد پیکسل‌ها (۲۰*۲۰)	درصد فراوانی	فراوانی نقاط وقوع سیل	پارامترها
خاک‌شناسی					
پلایا	۰,۷۸	۸,۴۶	۸۸۶۸۳۶	۶,۶۶	۲
انتی‌سول	۱,۰۲	۲۹,۳۱	۳۰۷۱۲۲۹	۳۰,۰۰	۹
اینسپتی‌سول و بستر سنگی	۱,۴۱	۲۱,۲۶	۲۲۲۸۳۲۹	۳۰,۰۰	۹
مناطق مسکونی	۱,۱۲	۲,۹۷	۳۱۰۷۵۵	۳,۳۴	۱
بهنهٔ آبی	۰,۰۰	۰,۲۴	۲۵۰۰۹	۰,۰۰	۰
اریدی‌سول	۰,۱۴	۲۲,۶۲	۲۳۶۹۳۱۶	۳,۳۴	۱
اینسپتی‌سول	۱,۷۶	۱۵,۱۴	۱۵۸۶۳۳۸	۲۶,۶۷	۸
زاویهٔ شیب (درجه)					
۰-۸	۰,۵۳	۵۰,۳۵	۵۲۷۲۰۳۷	۲۶,۶۷	۸
۸-۱۵	۱,۵۶	۱۲,۷۴	۱۳۳۴۲۱۶	۲۰,۰۰	۶
۱۵-۲۵	۱,۸۲	۱۶,۱۱	۱۶۸۷۱۵۲	۱۳,۳۴	۴
۲۵-۴۰	۱,۱۱	۱۴,۸۹	۱۵۶۰۰۱۷	۱۶,۶۶	۵
> ۴۰	۰,۹۶	۵,۹۰	۶۱۶۷۶۱	۲۳,۳۳	۷
جهت شیب					
فلت	۰,۰۰	۰,۸۱	۸۴۸۰۸	۰,۰۰	۰
شمال	۰,۴۳	۷,۶۹	۸۰۵۱۵۷	۳,۳۳	۱
شمال شرق	۰,۲۳	۱۳,۹۸	۱۴۶۳۷۳۱	۳,۳۳	۱
شرق	۰,۶۶	۱۰,۰۶	۱۰۵۲۳۰۰	۶,۶۷	۲
جنوب شرق	۱,۴۲	۹,۲۳	۹۷۶۸۶۸	۱۳,۳۳	۴
جنوب	۱,۷۰	۱۳,۷۲	۱۴۳۶۵۰۹	۲۳,۳۳	۷
جنوب غرب	۱,۲۱	۱۶,۵۱	۱۷۲۸۶۲۷	۲۰,۰۰	۶
غرب	۱,۰۶	۱۲,۵۳	۱۳۱۱۹۱۳	۱۳,۳۴	۴
شمال غرب	۱,۰۸	۱۵,۳۷	۱۶۰۹۲۶۷	۱۶,۶۶	۵
نقشهٔ انحنا					
انحنای مقعر	۰,۸۱	۳۶,۹۰	۳۸۶۳۶۲۸	۳۰,۰۰	۹
صاف	۰,۹۲	۲۵,۱۹	۲۶۳۷۶۱۵	۲۳,۳۳	۷
انحنای محدب	۱,۲۳	۳۷,۹۱	۳۹۶۸۹۳۹	۴۶,۶۷	۱۴
شاخص رطوبت توپوگرافی					
< ۷	۰,۳۴	۲۹,۲۶	۳۰۶۳۹۲۰	۱۰,۰۰	۳
۷-۱۰	۰,۸۲	۴۴,۵۲	۴۶۶۱۴۵۶	۳۶,۶۷	۱۱
۱۰-۱۵	۱,۲۴	۲۴,۱۸	۲۵۳۱۹۶۲	۳۰,۰۰	۹
> ۱۵	۱,۱۴۷	۲,۰۳	۲۱۲۸۴۵	۲۳,۳۳	۷
تراکم زهکشی					
< ۰,۲۵	۰,۶۸	۲۹,۲۸	۳۰۶۶۰۷۲	۲۰,۰۰	۶
۰,۲۵-۰,۳۶	۰,۷۲	۳۶,۸۳	۳۸۵۵۹۸۹	۲۶,۶۷	۸
۰,۳۶-۰,۴۷	۰,۷۱	۱۸,۶۶	۱۹۵۳۸۰۳	۱۳,۳۳	۴
۰,۴۷-۰,۵۸	۳,۰۲	۱۲,۱۳	۱۲۷۰۸۳۷	۳۶,۶۷	۱۱
> ۰,۵۸	۱,۰۷	۳,۱۰	۳۲۳۵۵۷	۳,۳۳	۱
ارتفاع (m)					
< ۱۵۰۰	۰,۴۷	۴۲,۲۳	۴۴۲۲۴۹۲	۲۰,۰۰	۶
۱۵۰۰-۲۰۰۰	۲,۳۸	۱۶,۸۰	۱۷۵۹۳۴۷	۴۰,۰۰	۱۲
۲۰۰۰-۲۵۰۰	۱,۳۲	۲۰,۱۲	۲۱۰۶۷۳۱	۲۶,۶۷	۸
۲۵۰۰-۳۰۰۰	۰,۹۹	۱۳,۴۵	۱۴۰۸۱۱۷	۱۳,۳۳	۴
> ۳۰۰۰	۰,۰۰	۷,۳۹	۷۷۳۴۹۶	۰,۰۰	۰
بارش (mm)					
< ۳۰۰	۰,۴۹	۴۰,۴۸	۴۲۳۹۱۴۶	۲۰,۰۰	۶
۳۰۰-۴۰۰	۱,۴۱	۲۸,۳۰	۲۹۶۳۶۱۴	۴۰,۰۰	۱۲
۴۰۰-۵۰۰	۱,۹۲	۱۷,۳۰	۱۸۱۱۳۳۲	۳۳,۳۳	۱۰
۵۰۰-۶۰۰	۰,۰۰	۷,۶۵	۸۰۰۸۴۲	۰,۰۰	۰
> ۶۰۰	۲,۰۶	۶,۲۷	۶۵۵۱۸۶	۶,۳۴	۲



شکل ۶. پهنه‌بندی خطر سیل استان البرز با مدل نسبت فراوانی

نتایج بررسی سیل استان البرز با استفاده از مدل نسبت فراوانی نشان می‌دهد که بیش از ۳۴ درصد از مساحت استان را پهنه‌هایی با خطر زیاد و خیلی زیاد تشکیل می‌دهد. شهرستان‌های طالقان و کرج نیز دارای بیشترین خطر سیل‌گیری هستند که لزوم توجه و مدیریت در این مکان‌ها را با توجه به تراکم بالای جمعیتی به خود جلب می‌کند (جدول‌های ۸ و ۹).

جدول ۸. درصد مساحت پهنه‌های مختلف مخاطره سیل به تفکیک شهرستان در استان البرز

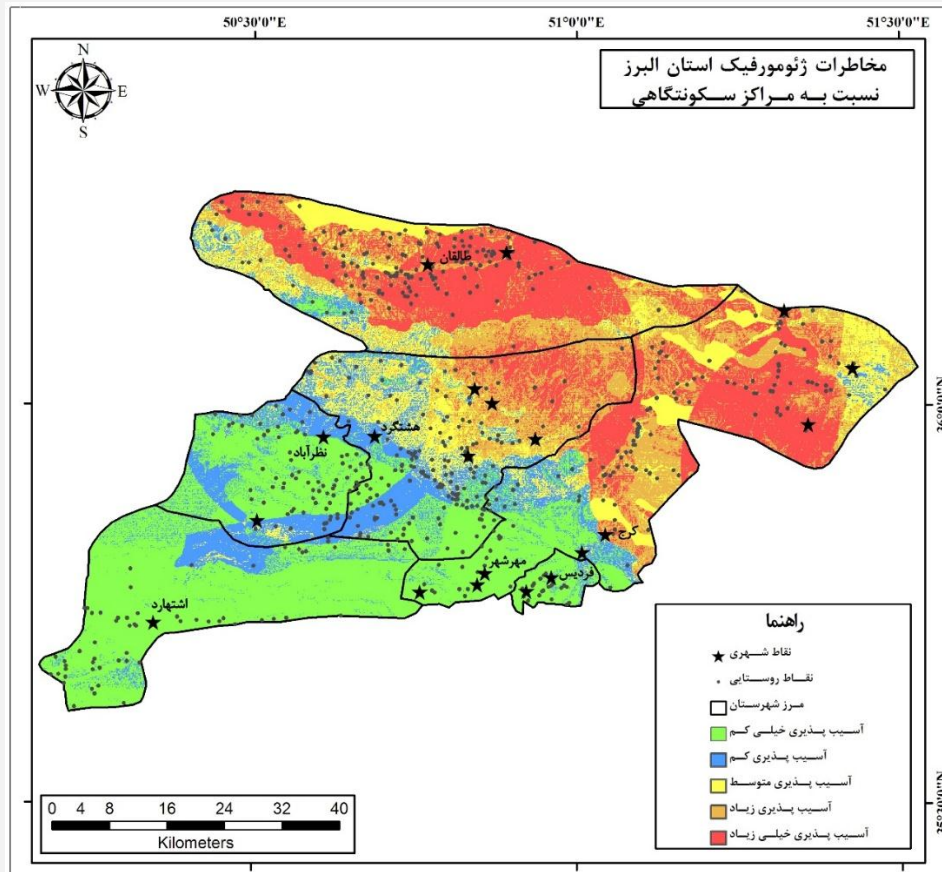
درصد مساحت پهنه‌های مختلف مخاطره سیل استان البرز					نام شهرستان
خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	
۲۶٫۸۳	۲۱٫۲۷	۲۴٫۴۶	۱۶٫۱۶	۱۱٫۲۸	کرج
۴۴٫۹۲	۲۱٫۱۰	۱۷٫۶۷	۱۲٫۵۷	۳٫۷۴	طالقان
۱۹٫۰۵	۱۵٫۳۴	۱۹٫۸۷	۲۸٫۶۱	۱۷٫۱۳	ساوجبلاغ
۰	۲٫۶۳	۱۸٫۵۴	۶۲٫۷۹	۱۶٫۰۴	نظرآباد
۰	۱٫۳۰	۱۴٫۲۷	۶۶٫۲۶	۱۸٫۱۷	اشتهارد
۶٫۶۹	۸٫۶۷	۳۵٫۷۴	۴۱٫۰۹	۷٫۸۱	فردیس

جدول ۹. مساحت هریک از پهنه‌های مخاطره سیل استان البرز

درصد مساحت	مساحت (km ²)	پتانسیل خطر
۱۴٫۸۰	۷۶۱٫۰۱	خیلی کم
۲۶٫۵۶	۱۳۶۵٫۷۱	کم
۲۲٫۲۱	۱۱۴۲٫۰۴	متوسط
۲۴٫۹۹	۱۲۸۴٫۹۸	زیاد
۱۱٫۴۴	۵۸۸٫۲۴	خیلی زیاد

تهیه نقشه تلفیقی مخاطرات ژئومورفیک (سیل و لغزش) استان البرز

پس از اینکه هر یک از مخاطرات سیل و لغزش به‌طور جداگانه در سطح استان بررسی شد و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر آن‌ها تولید شد، به‌منظور داشتن دیدی کلی و جامع نسبت به وضعیت این دو مخاطره، نقشه تلفیقی مخاطرات استان، که از همپوشانی دو نقشه فوق است، تهیه شد. بدین‌منظور، دو لایه نهایی، که شامل پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و پهنه‌بندی سیل استان البرز است، با استفاده از مدل فازی گاما و از طریق همپوشانی فازی روی هم قرار گرفت و نقشه پهنه‌بندی مخاطره سیل و لغزش استان البرز ترسیم شد (شکل ۷). در این پژوهش از میان اپراتورهای مختلف، اپراتور گامای فازی و آسیب‌پذیر انتخاب شد. جدول‌های ۱۱ و ۱۲ نتایج تلفیق نقشه مخاطرات را به‌تفکیک میزان خطر و شهرستان نشان می‌دهند. شکل ۷ نیز نقشه پراکندگی انواع مخاطرات در استان البرز را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی خطر سیل و لغزش استان البرز

جدول ۱۰. مساحت هر یک از پهنه‌های مخاطرات ژئومورفیک استان البرز

پتانسیل خطر	مساحت (km ²)	درصد مساحت
خیلی کم	۱۳۰۶,۰۷	۲۵,۴۰
کم	۷۵۶,۳۹	۱۴,۷۱
متوسط	۹۵۵,۸۹	۱۸,۵۹
زیاد	۶۰۸,۳۰	۱۱,۸۳
خیلی زیاد	۱۵۱۵,۳۴	۲۹,۴۷

جدول ۱۰ گویای آن است که بیش از ۴۰ درصد از سطح استان البرز نسبت به دو مخاطره سیل و لغزش حساس است و پتانسیل ایجاد خطر در این نواحی خیلی زیاد است. همچنین، این نواحی پُرخطر بیشتر شامل مراکز سکونتگاهی پُرجمعیت شهری است که لزوم توجه به مدیریت صحیح در این مناطق را بیشتر قوت می‌بخشد. در ادامه، وضعیت پهنه‌بندی مخاطرات ژئومورفیک استان به تفکیک شهرستان نشان داده شده است (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. درصد مساحت پهنه‌های مختلف مخاطرات ژئومورفیک به تفکیک شهرستان

نام شهرستان	درصد مساحت پهنه‌های مخاطرات سیل و لغزش			
	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد
کرج	۱۶،۴۱	۱۱،۱۲	۱۴،۵۹	۵۲،۲۱
طالقان	۷،۳۱	۸،۶۵	۱۳،۱۱	۶۰،۸۶
ساوجبلاغ	۱۷،۲۶	۲۴،۱۷	۳۲،۲۳	۱۴،۱۶
نظرآباد	۶۰،۳۴	۲۷،۷۱	۹،۳۹	۲،۵۶
اشتهارد	۶۲،۴۷	۲۵،۱۱	۱۱،۳۲	۴،۱۷
فردیس	۴۷،۲۵	۳۹،۵۶	۹،۹۱	۳،۲۸

جدول ۱۲. وضعیت سکونتگاه‌های انسانی استان البرز

نام شهرستان	بررسی وضعیت سکونتگاه‌های انسانی استان البرز به تفکیک شهرستان		
	تعداد نقاط شهری	تعداد نقاط روستایی	درصد مساحت
کرج	۸	۷۳	۲۷،۹۷
طالقان	۲	۸۲	۲۳،۴۸
ساوجبلاغ	۵	۹۱	۲۰،۰۸
نظرآباد	۲	۵۲	۹،۹۷
اشتهارد	۱	۴۶	۱۶،۹۳
فردیس	۲	۱۱	۱،۵۵

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج بررسی لغزش استان البرز گویای این مطلب است که در شهرستان‌های طالقان و کرج، به دلیل شرایط طبیعی منطقه از لحاظ شاخص‌های مورد نظر، امکان رخداد پدیده لغزش زیاد است، زیرا در این شهرستان‌ها شرایط بارش نسبتاً خوب است و عمدتاً پوشش گیاهی از نوع مراتع فقیر است که باعث شده شرایط زهکشی مناسبی وجود نداشته باشد و وجود خاک‌های کمتر توسعه‌یافته و سنگ بستر عمدتاً نفوذناپذیر، ارتفاع، و شیب نسبتاً بالا در این مناطق و وجود گسل‌های زیاد شرایط رخداد پدیده لغزش را فراهم کرده است. بنابراین، همان‌گونه که خروجی نقشه پهنه‌بندی لغزش استان نشان می‌دهد، بیش از ۶۰ درصد سطح این دو شهرستان در مناطق با خطر زیاد قرار گرفته است.

در ارتباط با مخاطره سیل نیز شرایط طبیعی گفته‌شده در مورد لغزش پابرجاست و شاخص‌هایی مثل حساسیت به فرسایش، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه‌ها، میزان بارش، ارتفاع بارش، و میزان و جهت شیب باعث شده است که توان سیل‌خیزی در استان وجود داشته باشد و بالطبع به دلیل غلبه این شاخص‌ها در شهرستان‌های طالقان و کرج و ساوجبلاغ به ترتیب شاهد بیشترین خطر سیل‌خیزی هستیم.

همان‌طور که جدول ۱۱ نشان می‌دهد، دو شهرستان طالقان و کرج نسبت به وقوع مخاطرات ژئومورفیک حساس و آسیب‌پذیرترند، زیرا درصد مساحت طبقات خطر زیاد و خیلی زیاد این دو شهرستان مقادیر بسیار زیادی است. از طرفی

دیگر، بیشتر نقاط سکونتگاهی استان از نظر خطرهای سیل و زمین‌لغزش در نواحی با ریسک زیاد قرار دارد که این موضوع لزوم برنامه‌ریزی بیشتر و دقیق‌تر را برای جلوگیری از خطرهای حاصله و خسارات به‌وجودآمده ناشی از این خطرها نشان می‌دهد.

برای بررسی میزان دقت و صحت‌سنجی مدل‌های به‌کارگرفته‌شده، همان‌طور که نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی لغزش و سیل استان نشان می‌دهد، از لایه‌های نقاط لغزش و سیلاب تاریخی استان استفاده شد. نتایج همپوشانی نقشه‌ها گواه آن است که اغلب نقاط لغزش و سیل تاریخی استان، که در گذشته به‌وقوع پیوسته، مطابق با مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد نقشه‌های پهنه‌بندی است (شکل‌های ۵ و ۶). بنابراین، این یافته‌ها گویای آن است که مدل‌های فوق در منطقه مورد مطالعه کارایی و دقت لازم را دارند.

در ادامه، برای بررسی وضعیت مراکز سکونتگاهی استان البرز نسبت به مخاطرات ژئومورفیک و میزان انطباق و مکان‌یابی صحیح این مراکز (شهری و روستایی) مطالعه‌ای انجام گرفت که حاکی از استقرار بیشتر مراکز شهری و روستایی در نواحی پُرخطر است (جدول ۱۲). مثلاً، شهرستان کرج، که حدود ۲۸ درصد از سطح استان را به خود اختصاص داده و جمعیتی در حدود ۲ میلیون نفر دارد، بیش از ۵۲ درصد از این شهرستان در پهنه با خطر خیلی زیاد مخاطرات سیل و لغزش قرار گرفته است که باید نسبت به وقوع خطرهای احتمالی در آن آگاه‌سازی و تدابیر لازم اندیشیده شود تا از خسارات وقوع احتمالی آن‌ها کاسته شود. توجه به مراکز سکونتگاهی و داشتن دید جامع و تلفیقی به موضوع مخاطرات (سیل و لغزش) و همچنین لحاظ‌کردن نقاط تاریخی وقوع لغزش و سیلاب گذشته استان از وجوه تمایز این پژوهش نسبت به سایر مطالعات در حوزه پهنه‌بندی مخاطرات است.

منابع

- دارابی، ح؛ شاهدی، ک. و مردیان، م. (۱۳۹۵). تهیه نقشه‌های خطر احتمال و حساسیت سیل با استفاده از روش نسبت فراوانی در حوضه آبخیز پل دوآب شازند، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۸(۱): ۶۸-۷۹.
- سپهر، ع؛ بهنیا، ا؛ محمدیان، ع. و عبدالمهی، ا. (۱۳۹۲). تهیه نقشه حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش دامنه‌های شمالی بینالود بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافق ویکور، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۲(۱): ۱۹-۳۶.
- Arianpour, M. and Jamali, A. (2015). Flood Hazard Zonation using Spatial Multi-Criteria Evaluation (SMCE) in GIS (Case Study: Omidieh-Khuzestan), *European Online Journal of Natural and Sciences*, 4(1): 39-49.
- Bakhtyari kia, M.B.; Pirasteh, S.; Pradhan, B.; Mahmud, A.R.; Sulaiman, W.N.A. and Moradi, A. (2012). An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor river basin, Malaysia, *Environmental Earth Sciences*, 67(1): 254-264.
- Cao, Ch.; Xu, P.; Wang, Y.; Chen, J.; Zheng, L. and Niu, C. (2016). Flash Flood Hazard Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Statistical Index Methods in Coalmine Subsidence Areas, *Sustainability*, 8(9): 948-966.
- Crozier, M.J. (2017). A proposed cell model for multiple-occurrence regional landslide events: Implications for landslide susceptibility mapping, *Geomorphology*, 295: 480-488.
- Darabi, H.; Shahedi, K. and Mardian, M. (2016). Preparation of flood probable risk and susceptibility maps using the frequency ratio method in the watershed basin of Do-ab Bridge of Shazand, *Watershed Engineering and Management*, 8(1): 68-79.
- Jiménez-Perálvarez, J.D.; El Hamdouni, R.; Palenzuela, J.A.; Irigaray, C. and Chacón, J. (2017). Landslide-hazard mapping through multi-technique activity assessment: an example from the Betic Cordillera (southern Spain), *Landslides*, 14(6): 1975-1991.
- Ghafory, M. (2005). *Earthquake Risk Management Strategic: The Iranian Experience*, Tehran, UNESCO Office and International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEEs), PP. 1-9
- Karimi Sangchini, E.; Ownegh, M.; Sadaldin, A. and Mashayekhan, A. (2012). Probabilistic Landslide Risk Analysis and Mapping (Case Study: Chehel-Chai Watershed, Golestan Province, Iran), *Journal of Rangeland Science*, 2(1): 425-438.
- Khosravi, KH.; Nohani, E.; Maroufinia, E. and Pourghasemi, H.R. (2016). A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique, *Nat Hazards*, 83(2): 947-987.
- Kumar, R. and Anbalagan, R. (2015). Landslide susceptibility zonation in part of Tehri reservoir region using frequency ratio, fuzzy logic and GIS, *Journal Earth System Sciences*, 124(2): 431-448.
- Leonardi, G.; Palamara, R. and Cirianni, F. (2016). Landslide Susceptibility Mapping Using a Fuzzy Approach, *World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium 2016, Procedia Engineering*, 161: 380-387.
- Li, L.; Lan, H.; Guo, Ch.; Zhang, Y.; Li, Q. and Wu, Y. (2016). A modified frequency ratio method for landslide susceptibility Assessment, *Landslides*, 14(2): 727-741.
- Malekian, A. and Azarnivand, A. (2016). Application of Integrated Shannon's Entropy and VIKOR Techniques in Prioritization of Flood Risk in the Shemshak Watershed, Iran, *Water Resources Management*, 30(1): 409-425.
- Pellicani, R.; Van Westen, C.J. and Spilotro, G. (2014). Assessing Landslide Exposure in Areas with Limited Landslide Information, *Landslide*, 11(3): 463-480.

Rahmati, O.; Pourghasemi, H.R. and Zeinivand, H. (2015). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran, *Geocarto International*, 31(1) 42-70.

Ramesh, V. and Anbazhagan, S. (2014). Landslide susceptibility mapping along Kolli hills Ghat road section (India) using frequency ratio, relative effect and fuzzy logic models, *Environmental Earth Sciences*, 73(12): 8009-8021.

Sepehr, A.; Behniafar, A.; Mohammadian, A. and Abdollahi, A. (2013). Preparing susceptibility map of landslide in northern Binalud hillsides based on VIKOR consensus optimization algorithm, *Journal of Quantitative geomorphological researches*, 2(1): 19-36.