

ارزیابی روش جمع کیفی (QS) جهت تعیین گام‌ای بهینه در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: جنگل توسکستان تا گرگان)

حبيب آرین تبار - دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه رازی کرمانشاه.
سیامک شرفی * - استادیار گروه جغرافیا(ژئومورفولوژی)، دانشگاه لرستان.
سعید نگهبان - استادیار گروه جغرافیا، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۸ تائید نهایی: ۱۳۹۹/۰۵/۲۹

چکیده

یکی از انواع فرآیندهای دامنه‌ای که هر ساله موجب خسارات جانی و مالی فراوان در بسیاری از نقاط ایران و جهان می‌شود، پدیده زمین‌لغزش است. افزایش جمعیت و گسترش سکونتگاه‌های انسانی در نواحی کوهستانی، مشکل بودن پیش‌بینی زمان وقوع زمین‌لغزش و متعدد بودن عوامل مؤثر در رخداد این پدیده، ضرورت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را آشکار می‌سازد. تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش این امکان را فراهم می‌سازد که مناطق آسیب‌پذیر شناسایی و در برنامه‌ریزی‌های محیطی مدد نظر قرار بگیرد. استان گلستان در شمال ایران از جمله مناطق مستعد زمین‌لغزش در گشور است. بنابراین هدف از این پژوهش، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان با شناسایی عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش و عملکر فازی گاما می‌باشد. از ابزارهایی مانند نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای و ... جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش استفاده شده است. مجموعه اطلاعات ورودی جهت ارزیابی پتانسیل خطر زمین‌لغزش در این پژوهش شامل ۸ لایه ارتفاع، شب، جهت دامنه، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی، فاصله از جاده و تراکم آبراهه هستند. ابتدا نقاط لغزشی منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به پهنه‌های لغزشی تبدیل شدند و سطح همبستگی هر یک از عوامل مؤثر و پهنه‌های لغزشی با استفاده از مدل نسبت فراوانی (FR) مشخص و سپس نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از عملکر فازی گاما می‌باشد. نتایج نشان داد که پهنه‌های با سازندهای سست و نزدیک به راههای ارتباطی و پهنه‌های با پارش فراوان تر دارای پتانسیل بیشتری از نظر احتمال وقوع لغزش هستند. هم چنین شاخص مجموع کیفیت (Qs) نشان داد که گاما می‌باشد با مقدار جمع کیفی ۰/۴۲، از دقت بالاتری نسبت به دو گاما دیگر در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان برخوردار است.

واژگان کلیدی: پهنه‌بندی زمین‌لغزش، عملکر فازی گاما، روش جمع کیفی، گرگان.

مقدمه

زمین لغزش جزء پرخطرترین و مضرورترین مخاطرات طبیعی در مناطق کوهستانی است که عمدتاً تحت تأثیر زلزله و یا بارندگی ایجاد می‌شود(پاندی و همکاران^۱، ۲۰۰۸) و هر ساله اموال و زندگی مردم را ویران می‌کنند(آردا و همکاران^۲، ۲۰۰۴؛ کاننگو و همکاران^۳، ۲۰۰۵). افزایش جمعیت و گسترش سکونتگاه‌های انسانی در نواحی کوهستانی(اُثمان و همکاران^۴، ۲۰۱۲)، مشکل بودن پیش‌بینی زمان وقوع زمین‌لغزش و متعدد بودن عامل‌های مؤثر در رخداد این پدیده مانند سنگ شناسی، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، نزدیکی به رودخانه و غیره، ضرورت پنهانه‌بندی خطر زمین‌لغزش را آشکار می‌سازد(نپان و پیتان آکولچای^۵، ۲۰۰۶). پنهانه‌بندی خطر زمین‌لغزش، سطح زمین را به نواحی ویژه و مجزایی از درجات بالفعل و یا بالقوه خطر (از خطر کم تا بسیار زیاد) تقسیم می‌کند(پاریسنه^۶، ۲۰۰۲؛ کرنفرت^۷، ۲۰۰۵) و برای انجام اقدامات سریع و ایمن و برنامه ریزی استراتژیک برای آینده بسیار مهم است(سها و همکاران^۸، ۲۰۰۲). با استفاده از پنهانه‌بندی خطر رخداد زمین‌لغزش می‌توان مناطق حساس و دارای پتانسیل خطر را شنا سایی نموده و با راهه راهکارها و شیوه‌های مدیریتی مناسب تا حدی از وقوع زمین‌لغزش‌ها جلوگیری و یا خسارات ناشی از آن‌ها را کاهش داد(احمدی و همکاران، ۱۳۸۲؛ کورکی نژاد و همکاران، ۱۳۸۴).

کشور ایران با توپوگرافی عمدتاً کوهستانی، فعالیت زمین ساختی و لرزه خیزی زیاد، ویژگی‌های متنوع زمین شناسی، ژئومورفولوژیکی و اقلیمی، شرایط لازم را برای رخداد طیف وسیعی از زمین‌لغزش‌ها دارد. استان گلستان در شمال کشور، با دارا بودن ۲۰۰ حرکت دامنه‌ای ثبت شده جزو مناطق بسیار فعال از لحاظ زمین‌لغزش است(صالح پور میلانی و یمانی، ۱۳۹۷)، که محدوده مورد مطالعه در این استان نیز از این قضیه مستثنی نمی‌باشد. با توجه به اینکه، برای شناخت مناطق دارای پتانسیل زمین‌لغزش و تهیه نقشه پنهانه‌بندی خطر باید بهترین و دقیق‌ترین روش را با توجه به شرایط محیطی هر منطقه انتخاب نمود، بنابراین پژوهش حاضر ضمن پنهانه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حد فاصل جنگل تو سکستان تا گرگان در استان گلستان، به ارزیابی و مقایسه‌ی روش‌های پنهانه‌بندی عملگرهای فازی با استفاده از دو روش مجموع کیفیت (QS) و دقت (P) جهت تعیین مناسب ترین روش پنهانه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه پرداخته است. پراکنش و فراوانی رخداد زمین‌لغزش در بخش‌های مختلف جهان، باعث شده تا مطالعات متعددی با استفاده از روش‌های کمی و کیفی جهت پنهانه‌بندی خطر زمین‌لغزش در داخل و خارج از کشور انجام گیرد که در زیر به چند مورد از آنها اشاره شده است.

شادرف (۱۳۸۴) زمین‌لغزش حوضه آبخیز چالکرود در استان مازندران را با استفاده از اپراتورهای منطق فازی پنهانه‌بندی نموده و صحت نقشه‌ها را با استفاده از نمایه جمع کیفی (QS)^{۱۰} مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که اپراتور فازی گام‌ای ۰/۸ مناسب‌ترین اپراتور جهت پنهانه‌بندی زمین‌لغزش در حوضه آبخیز مورد بررسی می‌باشد. عبادی نژاد و همکاران (۱۳۸۶) کارایی اپراتورهای منطق فازی در تعیین زمین‌لغزش در حوضه آبخیز شیرود را مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اپراتور فازی گام‌ای ۰/۸ مناسب‌ترین اپراتور در تعیین خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز مورد مطالعه است. مตکان و همکاران (۱۳۸۸) در پژوهشی مدل‌های منطق فازی و سنجش از دور را جهت پنهانه‌بندی خطر زمین‌لغزش

^۱ - Pandey et al

^۲ - Arora et al

^۳ - Kanungo et al

^۴ - Othman et al

^۵ - Neupane & Piantanakulchai

^۶ - Parise

^۷ - Cornforth

^۸ - Saha et al

^۹- Quality Sum

¹⁰- Quality Sum

در حوضه‌ی آبخیز لاجیم بکار بردنده و به این نتیجه رسیدند که مدل گامای ۰/۰ فازی و مدل میانگین وزنی مرتب شده فازی بهدلیل کمترین تغییرپذیری و انحراف از معیار در مدل سازی، مناسب‌ترین مدل برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه هستند. مرادی و همکاران (۱۳۸۹) در پژوهشی تحت عنوان پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما در حوضه آبخیز هراز، سطح همبستگی هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و نقاط لغزشی را با استفاده از مدل نسبت فراوانی (Dr)^۱ مشخص و سپس مقادیر فازی را با نظرات کارشناسی و تعیین توابع عضویت برای هر یک از عوامل مؤثر تعیین نمودند و به این نتیجه رسیدند که اپراتور فازی گاما با مقدار ۰/۹۷۵ بیشترین دقت را در تهیه نقشه حساسیت به خطر زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی دارد. نادری (۱۳۹۱) در پژوهش خود با عنوان کاربرد منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز چرداول ایلام با استفاده از تئوری منطق فازی و شاخص نسبت دانسیته (Dr)^۲، نقشه‌ی خطر زمین‌لغزش را در محدوده مطالعاتی تهیه نمود و به این نتیجه رسید که اپراتور گاما به لحاظ تفکیک مناسب طبقات خطر زمین‌لغزش از مطلوبیت بیشتری نسبت به دیگر اپراتورهای فازی برخوردار می‌باشد. نوجوان و همکاران (۱۳۹۸) پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز کمه استان اصفهان را با استفاده از تلفیق دو مدل فرآیند تحلیل سلسه مراتبی و فازی مطالعه نموده اند. نتایج نشان داد که مقدار شاخص مجموع کیفیت (Qs) که مقایسه و ارزیابی روش‌ها را در قیاس با یکدیگر نشان می‌دهد، حاکی از آن است که اپراتور فازی گاما با ۰/۸ با ۴۴٪ بالاترین مقدار Qs را در میان سایر عملگرهای فازی دارد. از دیگر مطالعات انجام شده در بخش‌های مختلف کشور که با روش فازی انجام شده اند می‌توان به کارهای سوری و همکاران (۱۳۹۲)، طلابی و عابدینی (۱۳۹۵) و رستمی و همکاران (۱۳۹۸) اشاره نمود.

لی و جانگ^۳ (۱۹۹۲) و جانگ و همکاران^۴ (۱۹۹۶) نوعی روش ارزیابی کمی با استفاده از منطق فازی برای نواحی دارای استعداد زمین‌لغزش در هنگ کنگ ارائه نمودند و با استفاده از این مدل منطقه مورد مطالعه را به پنج پهنه خطر از خیلی ناپایدار تا خیلی پایدار تقسیم بندی نمودند. مرات و کاندان^۵ (۲۰۰۳) در پژوهشی با عنوان استفاده از روابط فازی جهت تولید نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش در غرب دریای سیاه (ترکیه) به این نتیجه رسیدند که به دلیل پیچیده بودن ماهیت زمین‌لغزش و دخالت عوامل متعدد در رخداد آن، بکار بردن روابط فازی در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش از سایر روش‌ها بهتر و به واقعیت نزدیک‌تر است. گرسوسکی و همکاران^۶ (۲۰۰۶) در پژوهشی به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و تحلیل سلسه مراتبی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از مجموعه‌های فازی محدودیت روش‌های کمی را بر طرف ساخته است. آبالاگان و همکاران^۷ (۲۰۱۵) تهیه نقشه پهنه بندی خطر زمین‌لغزش در دره لاچونگ را با استفاده از نسبت فراوانی و منطق فازی را بررسی نموده و نتیجه گرفتند که پهنه بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی نتایج خوبی برای دره لاچونگ به همراه داشته است. میجانی و نیسانی سامانی (۲۰۱۷) به مقایسه مدل‌های مبتنی بر فازی (Fuzzy-AHP, Fuzzy Gamma and Fuzzy-OR) در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش شهر ساری پرداخته و نتیجه گرفتند که مدل Fuzzy-AHP نسبت به دو مدل دیگر در پهنه بندی خطر زمین‌لغزش از دقت بالاتری برخوردار بوده و فازی گاما با اندکی اختلاف در رتبه دوم قرار دارد. با توجه به

^۱- Frequency Ratio

^۲- Density Ratio

^۳ - Lee & Juang

^۴ - Juang et al

^۵ - Murat & Candan

^۶ - Gorsevski et al

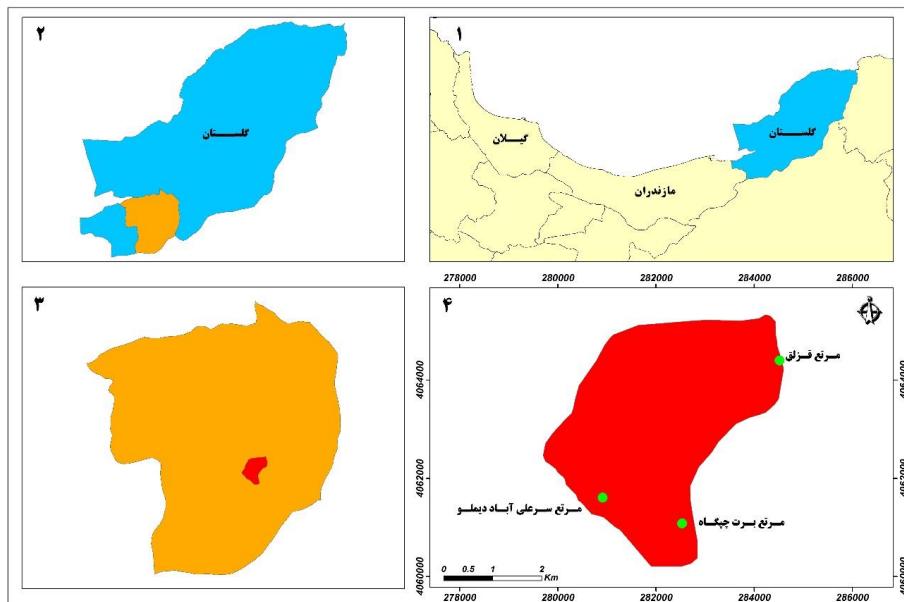
^۷ - Anbalagan et al

توضیحات داده شده، هدف از این پژوهش، شناسایی عوامل موثر بر رخداد زمین لغزش و انتخاب مدل مناسب و بهینه از مجموعه عملگرهای فازی به منظور تهیه نقشه خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با وسعتی حدود ۲۴ کیلومتر مربع در موقعیت جغرافیایی $36^{\circ} 46' 48''$ عرض شمالی و $34^{\circ} 54' 0''$ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه جنگلی و توپوگرافی آن کوهستانی می‌باشد؛ بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن دارای ماکرو اقلیم از نوع نیمه مرطوب، مرطوب و خیلی مرطوب است. محدوده مورد مطالعه در زون ساختاری البرز شرقی در حوضه رودخانه رودخانه ایران واقع شده است. قسمت اعظم این حوضه تو سط رسبابات کواترنری پوشیده شده که تمام بخش شمالی و همچنین بخشی از نوار جنوبی ناحیه گرگان را تشکیل می‌دهد. این رسبابات شامل پادگانهای جوان و مخروط افکنهای آبرفتی، پادگانهای قدیمی و مخروط افکنهای تپه‌های لسی و رس و رس‌های ماسه‌ای می‌باشند. رس و رس‌های ماسه‌ای در داخل ارتفاعات در فاصله‌ای بسیار دور از محدوده مطالعه واقع شده است. بخش‌های با مورفولوژی دشت و تپه ماهوری، از نهشته‌های کواترنری تشکیل شده است. بخش‌های تپه ماهوری از لس تشکیل شده‌اند که به دلیل ویژگی خاص رسباب‌شناسی توانایی نگهداری رطوبت را برای مدت زیادی دارا می‌باشد و همین مسئله موجب تقویت پتانسیل زمین لغزش و روان شدن تپه‌ها می‌شود.



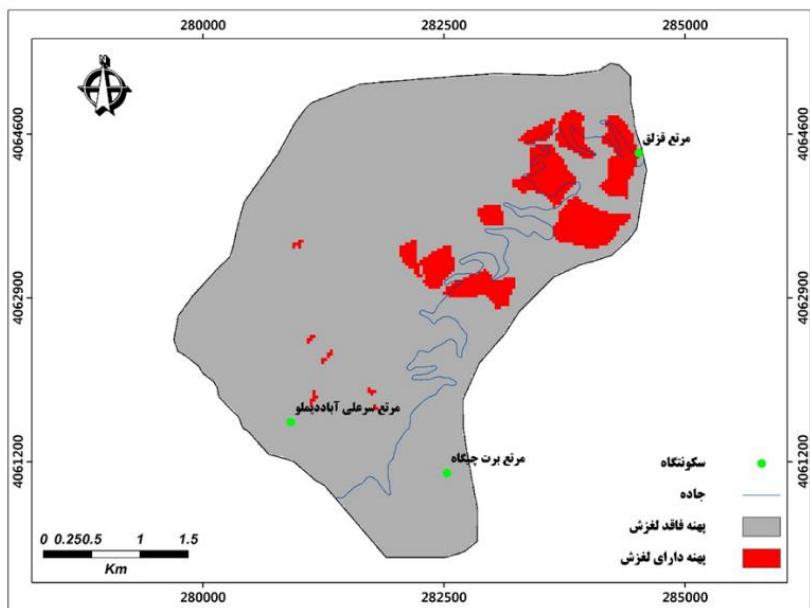
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان در استان گلستان

روش کار

- تهیه نقشه متغیرهای مؤثر در وقوع زمین لغزش، نسبت فراوانی

انجام پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های خطر زمین لغزش در این پژوهش، بر مبنای تلفیق زمین لغزش‌های شناسایی شده در منطقه با عوامل موثر در رخداد زمین لغزش‌ها می‌باشد. در ابتدا داده‌های پراکنش زمین لغزش‌های رخ داده در محدوده مورد مطالعه، به صورت نقطه‌ای از سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور تهیه گردید؛ سپس این لایه با استفاده از تصاویر Google Earth و همچنین نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه به پهنه‌های لغزشی تبدیل شد. لایه‌ی

پهنه‌های زمین‌لغزش به عنوان متغیر وابسته و مهم‌ترین لایه مورد استفاده، در اجرای مدل پهنه‌بندی زمین‌لغزش محدوده مورد مطالعه می‌باشد(شکل ۲).



شکل ۲: نقشه پراکنش پهنه‌های لرزشی در حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان

در ادامه، براساس بررسی مطالعات انجام شده، عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش در حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان به عنوان متغیرهای مستقل شنا سایی شدند. لایه‌های ارتفاع، شبیب و جهت شبیب از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری و پوشش گیاهی از شاخص تراکم پوشش گیاهی NDVI و تصویر ماهواره‌ای لندست ETM سال ۱۳۹۸ استخراج شدند. لایه‌های جاده از نقشه‌های توپوگرافی و گسل از نقشه زمین‌شناسی استخراج شدند. چون این لایه‌ها به صورت خطی هستند، جهت آماده سازی آن‌ها ازتابع Distance بر مبنای حداکثر فاصله استفاده شد. با این تابع لایه‌های رستری بددست آمد که فاصله از هر کدام از متغیرها را تا مرز محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. تراکم آبراهه (بر حسب طول به متر) در واحد سطح (بر حسب مساحت به کیلومتر مربع) از لایه شبکه زهکشی نقشه‌های توپوگرافی استخراج گردید. با استفاده از تابع Density این لایه به صورت رستری درآمده که تراکم آبراهه را در واحد سطح نشان داد(عباسی و همکاران، ۲۰۱۸). پس از آماده شدن لایه‌های ارتفاع، شبیب، جهت شبیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و تراکم آبراهه، این لایه‌ها به عنوان متغیرهای مؤثر با لایه‌ی پهنه‌های لرزشی تلفیق شدند(گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷). تلفیق و همپوشانی لایه‌ها با استفاده از تابع گاما که تلفیقی از ضرب و جمع فازی ضرب است، با استفاده از ابزار Raster Calculator در محیط Arc Map انجام شد. به این ترتیب، تعداد پیکسل‌های لرزشی در هر طبقه از هر کدام از عوامل مؤثر مورد استفاده در این پژوهش بددست آمد. در مرحله بعد با استفاده از مدل نسبت فراوانی، وزن نسبی هر یک از عوامل و طبقات مرتبط با آن با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (Lee¹، ۲۰۰۷). وزن هر یک از طبقات، همان مقدار وزن نسبی محاسبه شده برای هر طبقه از هر متغیر به عنوان میزان نقش آن طبقه در رخداد زمین‌لغزش‌های محدوده مورد مطالعه است.

$$FR = A/B \quad (1)$$

که در آن A درصد پیکسل‌های لرزشی، B درصد پیکسل‌های فاقد لرزش و FR نسبت فراوانی است.

¹ -Lee

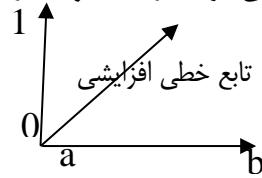
منطق فازی، عملگر فازی گاما

تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی به عنوان نظریه‌ای ریاضی برای مدل سازی و صورت‌بندی ریاضی ابهام و عدم دقت موجود در فرآیندهای شناختی انسانی، ابزارهای کارآمد و مفیدی به شمار می‌آیند. این نظریه که نخستین بار تو سط پروف‌سور لطفی‌زاده دانشمند ایرانی‌الا صل دانشگاه کالیفرنیا در سال ۱۹۶۵ مطرح شد، حوزه‌های بسیار از علوم مختلف و بهویژه دانش برنامه‌ریزی شهری و شهرسازی و مدل سازی مخاطرات را فرا گرفته است. در ارتباط با به کارگیری منطق فازی، باید اشاره نمود که در تحلیل تصمیم‌گیری‌های چند معیاره، تئوری فازی معمول ترین روش برای بحث و بررسی عدم قطعیت‌ها شناخته شده است. در واقع منطق فازی روشی برای برگرداندن طیف متنوع و گسترده‌ای از اطلاعات - داده‌های عینی، اطلاعات کمی، نظرات و قضاوت‌های ذهنی به یک زبان طبیعی برای تو صیف اثرات محیط است. منطق فازی درجه‌ای از عضویت را بین دامنه‌ی صفر تا ۱ در نظر می‌گیرد که اجازه می‌دهد عنصری از مجموعه‌ی فازی به طور نسبی درست یا غلط باشد. یک زیر مجموعه‌ی فازی را می‌توان این گونه تعریف کرد.

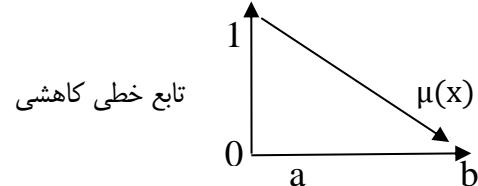
$$A = \{(x, \mu(x)) | x \in X\}$$

در رابطه بالا X یک عنصر مانند شیب است و X عضوی از عنصر یاد شده می‌باشد که با درجه عضویت (x) μ تعیین می‌گردد. درجه عضویت در این مدل با استفاده از توابع عضویت تعیین می‌گردد.

$$\mu(x) = \begin{cases} x = a & 0 \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ x = b & 1 \end{cases}$$

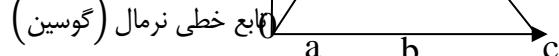


$$= \begin{cases} x = a & 1 \\ a < x > b & \frac{b-x}{b-a} \\ x = b & 0 \end{cases}$$



در دو رابطه بالا (x) درجه عضویت فازی، a کوچک‌ترین عضو مجموعه و b بزرگ‌ترین عضو مجموعه می‌باشد.

$$\begin{cases} x = a & a = 0 \\ a < x < b & \frac{x-a}{b-a} \\ x = b & b = 1 \\ b < x < c & \frac{b-x}{c-b} \\ x = c & c = 0 \end{cases}$$



در رابطه بالا (x) درجه عضویت فازی، a کوچک‌ترین عضو مجموعه، b عضو میانی و c بزرگ‌ترین عضو مجموعه می‌باشد.

بعد از تعیین عضویت توابع، لایه‌های موجود همپوشانی می‌شوند. همپوشانی در مدل فازی با استفاده از یک سری از عملگرهای فازی انجام می‌گیرد (صفاری و همکاران، ۱۳۹۰) که عبارتند از:

عملگر اجتماع^۱: حاصل این عملگر اجتماع مجموعه هاست. به این صورت که حداقل درجه عضویت اعضاء را استخراج و از دقت بالایی در مکان یابی برخوردار نیست.

$$\text{or} = \text{MAX}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots)$$

عملگر اشتراک^۲: این عملگر به این صورت است که حداقل درجه عضویت اعضاء را استخراج می‌کند. یعنی بین همه لایه‌های اطلاعاتی حداقل ارزش هر پیکسل را استخراج کرده و در نقشه نهایی اعمال می‌کند. به عبارت دیگر اشتراک در مجموعه‌های فازی به معنی حداقل درجه عضویت در هر یک از مجموعه‌های هاست. به همین دلیل این عملگر نیز حساسیت بالایی در مکان یابی دارد و از دقت زیادی برخوردار نمی‌باشد.

$$\text{and} = \text{MIN}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots)$$

عملگر ضرب جبری فازی^۳: در این عملگر تمامی لایه‌های اطلاعاتی در هم ضرب می‌شوند و در لایه خروجی اعداد کوچک‌تر شده و به سمت صفر میل می‌کنند، در نتیجه تعداد پیکسل کمتری در کلاس خیلی خوب قرار می‌گیرد. به همین علت این عملگر حساسیت بالایی در مکان یابی اعمال می‌کند.

$$\text{product} = \prod_{i=1}^n \mu_i$$

عملگر جمع جبری فازی^۴: در جمع جبری فازی متمم ضرب مجموعه‌ها محاسبه می‌شود. به همین دلیل در لایه خروجی برخلاف عملگر ضرب جبری فازی ارزش پیکسل به سمت یک میل می‌کنند. در نتیجه تعداد پیکسل بیشتری در کلاس خیلی خوب قرار می‌گیرد، به همین علت حساسیت پایینی در مکان یابی دارد و پهنه‌های بیشتری نسبت به ضرب فازی، در کلاس خیلی خوب و مناسب قرار می‌گیرد (بهشتی فر و همکاران، ۱۳۸۹).

$$\text{sum} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$$

عملگر گاما^۵: برای تعديل حساسیت خیلی بالایی عملگر ضرب فازی و حساسیت خیلی پایین عملگر جمع جبری فازی، از عملگر دیگری تحت عنوان گاما فازی استفاده شده است که حد فاصل بین دو عملگر ضرب و جمع جبری عمل می‌کند. توان لاندا در این عملگر نشان دهنده اعمال ضریب تاثیر بیشتر برای عملگر جمع می‌باشد به طوری که هرچه لاندا بزرگ‌تر انتخاب گردد، توان بخش اول فرمول یعنی عملگر جمع بیشتر شده و در نتیجه درجه تاثیر این عملگر نیز بیشتر می‌گردد. در این پژوهش با استفاده از رابطه ۲ نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از عملگر فازی گاما^۶، ۰/۸ و ۰/۹ تهیه شده‌اند.

$$(2) \quad \mu_{\text{combination}} = \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right)^{\gamma} * \left(\prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-\gamma}$$

عملگر فازی گاما، حالت کلی روابط عملگرهای ضرب و جمع است و می‌توان با انتخاب صحیح مقدار گاما، پارامترهای کاهشی و افزایشی را همزمان تلفیق نموده، به مقادیری در خروجی دست یافت که حاصل سازگاری قابل انعطاف میان گرایشات افزایشی و کاهشی دو عملگر ضرب و جمع فازی باشند و γ متغیری بین صفر و یک است.

¹- Fuzzy OR

²- Fuzzy AND

³- Fuzzy Product

⁴- Fuzzy Sum

⁵- Fuzzy Gama

ارزیابی دقت روش پهنه‌بندی

در این مرحله با تلاقي نقشه پراكنش زمین‌لغزش‌های منطقه و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر در محیط GIS، به ارزیابی و مقایسه روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش مجموع کیفیت (QS) و دقت (P) پرداخته می‌شود و مدل مناسب منطبق با منطقه مورد مطالعه انتخاب می‌گردد. برای ارزیابی و مقایسه دقت بین پهنه‌ها یا رده‌های خطر در هر یک از روش‌های پهنه‌بندی، نسبت تراکم (Dr) به کار می‌رود (Yin و Yan^۱؛ یالسین^۲، ۲۰۰۸؛ یالسین^۳، ۱۹۸۸).

صحت یا مجموع کیفیت (QS)

در صورتی که در منطقه‌ای چند نقشه خطر تهیه شده باشد، با استفاده از مقدار مجموع کیفیت یا جمع کیفی می‌توان نقشه‌های با دقت بیشتر و صحیح‌تر را شناسایی نمود. یک نقشه خطر مناسب، نقشه‌ای می‌باشد که بهترین جدایش را بین مناطق با تراکم بالا و مناطق با تراکم پایین زمین‌لغزش ایجاد نماید. برای تعیین مجموع کیفیت، لازم است ابتدا نسبت تراکمی که با استفاده از رابطه ^۳ انجام می‌گیرد، محاسبه گردد (جی^۴، ۱۹۹۲).

رابطه ^۳

$$Dr = \frac{\sum_i^n Si}{\sum_f^n Ai}$$

که در آن $Si =$ مجموع مساحت زمین‌لغزش‌های واقع در هر رده خطر، $Ai =$ مساحت آمین رده خطر در یک نقشه پهنه‌بندی و $n =$ تعداد رده‌های خطر می‌باشد.

تراکم زمین‌لغزش در نقشه‌های خطری که به طور صحیح تهیه شده‌اند، از رده‌های خطر کم تا رده‌های پرخطر به صورت صعودی است. در یک روش (نقشه) پهنه‌بندی، تراکم لغزش رده با $1 = Dr$ معادل با متوسط تراکم لغزش در کل منطقه و رده دارای نسبت تراکمی 2 ، دارای تراکم لغزشی معادل با دو برابر تراکم لغزش منطقه است. بنابراین هرچه تفکیک بین رده‌های خطر به وسیله‌ی شاخص نسبت تراکم بهتر صورت گرفته باشد، روش (نقشه) دارای دقت یا مطلوبیت بیشتری می‌باشد. مقدار مجموع کیفیت (QS) که از طریق رابطه ^۴ محاسبه می‌گردد، نشان‌دهنده صحت یا مطلوبیت عملکرد روش در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش منطقه است (شیرانی و همکاران، ۱۳۹۲).

رابطه ^۴

$$QS = \sum_{i=1}^n ((Dr - 1)^2 \times S)$$

که در آن $QS =$ مجموع کیفیت، $Dr =$ نسبت تراکم، $S =$ نسبت مساحت خطر به مساحت کل منطقه و $n =$ تعداد کلاس خطر می‌باشد.

معمولأً مقدار این شاخص برای روش‌های مختلف در ۵ ستره صفر تا ۷ قرار می‌گیرد. البته از بعد نظری (تئوریک) حدی برای آن وجود ندارد. اختلاف بین مقادیر QS ، کمتر از $1/0$ در نظر گرفته می‌شود و مقادیر با اختلاف کمتر از این مقدار تقریباً یکسان لحاظ می‌گردد؛ در واقع QS از جنس واریانس می‌باشد. انحراف مقادیر Dr از میانگین در پهنه‌های مختلف اگر به هم نزدیک باشند، نشان‌دهنده آن است که تراکم زمین‌لغزش‌ها در کلاس‌های مختلف نزدیک به یکدیگر بوده و

¹ - Yin and Yan

² - Yalcin

³ - Gee

مقدار QS نیز پایین می‌باشد و اگر انحراف مقادیر Dr از میانگین در پهنه‌های مختلف زیاد باشد، نشان‌دهنده آن است که تراکم زمین‌لغزش‌ها با یکدیگر تفاوت داشته و در نتیجه مقدار عددی QS بزرگ می‌گردد. بنابراین در ارزیابی روش‌ها، هرچه مقدار مجموع کیفیت (QS) در روشنی بیشتر باشد، آن روش صحت یا مطلوبیت بیشتری در تفکیک خواهد داشت.

- دقت روش (P)

عبارت است از نسبت مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های خطر بالا و خیلی بالا به مساحت کل آن پهنه‌ها که با استفاده از رابطه ۵ به دست می‌آید(جاد و سارکر^۱، ۱۹۹۳).

$$P = \frac{KS}{S} \quad (5)$$

که در آن $P =$ دقت روش در پهنه‌های دارای خطر متوسط به بالا، $KS =$ مساحت سطح لغزش یافته در پهنه‌های دارای خطر متوسط به بالا و $S =$ مساحت پهنه‌های خطر مرتبط است.

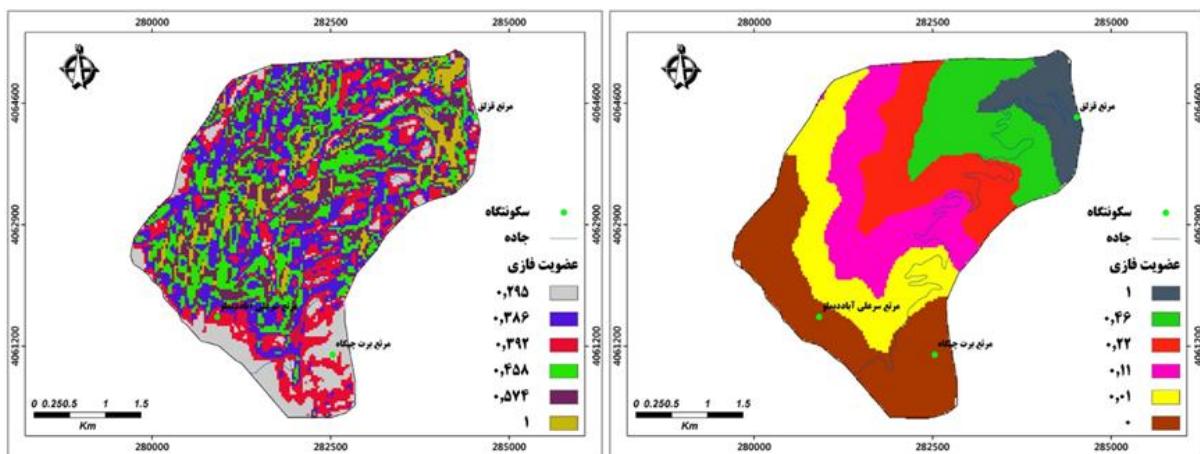
یافته‌ها و بحث

بررسی نتایج حاصل از مقادیر عضویت فازی (نسبت فراوانی) و ارتباط بین عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش و لغزش‌های رخ داده منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲، مشاهده می‌شود که پایین‌ترین و بالاترین طبقات ارتفاعی به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار عضویت فازی را دارند که علت آن کاهش بارندگی منطقه با افزایش ارتفاع می‌باشد. عضویت فازی رده‌های عامل مؤثر شبیه نشان می‌دهد که با افزایش شبیه، آستانه ناپایداری دامنه نیز افزایش پیدا کرده و احتمال وقوع حرکات توده‌ای از جمله زمین‌لغزش بیشتر می‌شود. برای این عامل بیشترین عضویت فازی به شبیه‌ای بالای ۳۵ درجه و کمترین عضویت فازی به شبیه‌ای ۰ تا ۱۰ درجه اختصاص داده شده است. دامنه‌های با جهت شمالی بهدلیل برخورداری از بارش و رطوبت بیشتر، نقش مؤثرتری در ایجاد زمین‌لغزش‌های منطقه ایفا می‌کنند و مقدار عضویت فازی آن برای منطقه مورد مطالعه نیز بدهست آمد است. پهنه‌هایی که دارای سازندهای مارنی هستند، همواره حساس‌ترین پهنه‌ها به وقوع زمین‌لغزش می‌باشند؛ پس این پهنه‌ها بیشترین مقدار عضویت فازی را در میان سایر واحدهای سنگ‌شناصی منطقه دارند. در عامل تراکم پوشش گیاهی، مقدار عضویت فازی ۱ برای بخش‌هایی از منطقه بدست آمد که تراکم پوشش گیاهی کمتری دارند (۵۰ - ۷۵ درصد). عامل فاصله از جاده، به خوبی نقش بارز خود را بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه با مقادیر عضویت فازی بدست آمده ایجاد کرده است. نشان می‌دهد؛ طبقه با فاصله کمتر از ۲۵۰ متری از جاده دارای بیشترین مقدار عضویت فازی و طبقه با فاصله بیشتر از ۱۸۰۰ متری از جاده کمترین مقدار عضویت فازی را دارد. تلقیق پهنه‌های لغزشی در لایه تراکم آبراهه بیانگر این امر است که بیشترین پراکنش زمین‌لغزش‌ها در طبقه‌ی با تراکم پایین آبراهه (۷۵ - ۱۲۰۰ متر / کیلومتر مربع) در واحد سطح قرار دارند. تحلیل عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که در واقع پهنه‌های با سازندهای سست و نزدیک به جاده ارتباطی دارای پتانسیل بیشتری از نظر احتمال وقوع لغزش هستند و این پهنه‌ها در طبیعت شاید همیشه با پهنه‌های نزدیک به آبراهه یا دارای تراکم بالای آبراهه انطباق نداشته باشند. همان‌طور که در منطقه مورد مطالعه این عدم انطباق وجود دارد و تأثیرگذاری بیشتر عوامل فاصله از جاده و سازندهای زمین‌شناصی، نحوه‌ی تأثیرگذاری سایر عوامل را تحت الشاعع خود قرار داده است. نقشه‌های عضویت فازی تهیه شده با مدل نسبت فراوانی برای عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه، در شکل‌های ۳ تا ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۲: مقادیر عضویت فازی (وزن نسبی) مربوط به هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش

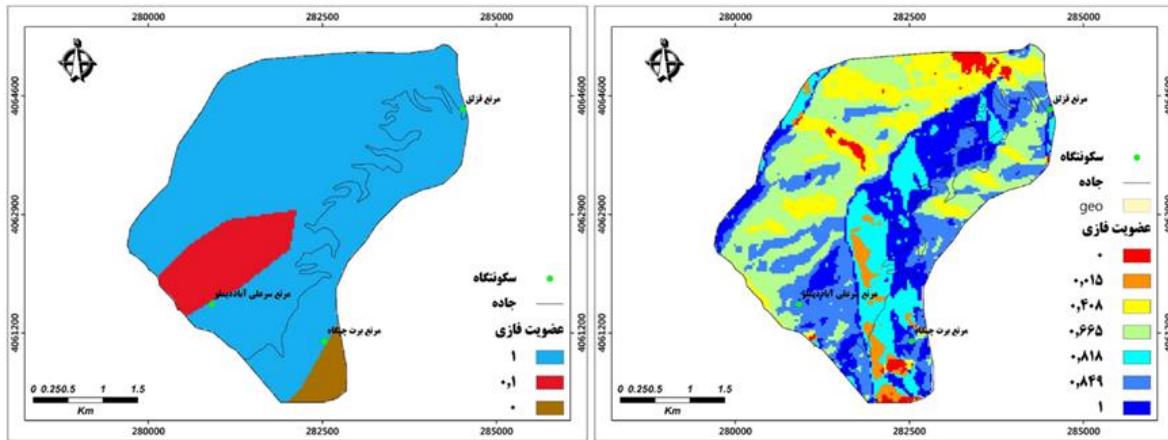
عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد پیکسل لغزشی	درصد پیکسل لغزشی	تعداد پیکسل فاقد لغزش	درصد پیکسل فاقد لغزش	FR	عضویت فازی
ارتفاع (متر)	۱۳۰۰ - ۱۰۰۰	۱۴۲۱	۴۵۹	۳۱,۸%	۹۶۲	۵,۷%	۵,۵۴	۱
	۱۶۰۰ - ۱۳۰۰	۲۸۶۷	۵۱۳	۳۵,۶%	۲۳۵۴	۱۴,۰%	۲,۰۳	۰,۴۶
	۱۸۰۰ - ۱۶۰۰	۲۹۲۳	۲۸۱	۱۹,۵%	۲۶۴۲	۱۵,۸%	۱,۲۳	۰,۲۲
	۲۰۰۰ - ۱۸۰۰	۳۲۵۵	۱۶۹	۱۱,۷%	۳۰۸۶	۱۸,۴%	۰,۶۴	۰,۱۱
	۲۲۰۰ - ۲۰۰۰	۳۳۵۳	۱۸	۱,۲%	۳۳۳۵	۱۹,۹%	۰,۰۶	۰,۰۱
	۲۶۳۷ - ۲۲۰۰	۴۲۲۳	۰	۰	۴۳۳۳	۲۵,۹%	۰	۰
شیب (درجه)	۱۰ - ۰	۲۰۴۷	۱۰۸	۷,۵%	۱۹۳۹	۱۱,۶%	۰,۶۵	۰,۲۹
	۱۷ - ۱۰	۳۷۱۰	۲۵۶	۱۷,۷%	۳۴۵۴	۲۰,۶%	۰,۸۶	۰,۳۹
	۲۳ - ۱۷	۴۴۸۶	۳۰۵	۲۱,۱%	۴۱۸۱	۲۵,۰%	۰,۸۵	۰,۳۹
	۲۸ - ۲۳	۳۹۶۶	۳۱۶	۲۱,۹%	۳۶۵۰	۲۱,۸%	۱,۰۱	۰,۴۶
	۳۶ - ۲۸	۲۸۲۲	۲۷۷	۱۹,۲%	۲۵۵۵	۱۵,۲%	۱,۲۶	۰,۵۷
	۵۷ - ۳۶	۱۱۲۰	۱۷۸	۱۲,۳%	۹۴۲	۵,۶%	۲,۱۹	۱
جهت دامنه	N	۳۲۹۴	۳۵۸	۲۴,۸%	۲۹۳۶	۱۷,۵%	۱,۴۲	۱
	NE	۴۰۴۹	۳۸۰	۲۶,۳%	۳۶۶۹	۲۱,۹%	۱,۲۰	۰,۸۴۹
	E	۵۰۲۸	۳۷۷	۲۶,۱%	۴۶۵۱	۲۷,۸%	۰,۹۴	۰,۶۶۵
	S-E	۲۶۵۸	۱۲۶	۸,۷%	۲۵۳۲	۱۵,۱%	۰,۵۸	۰,۴۰۸
	S	۳۲۳	۰	۰	۳۲۳	۱,۹۳	۰,۰۰	۰
	SW	۸۹	۰	۰	۸۹	۰,۵۳	۰,۰۰	۰
	W	۵۳۸	۱	۰,۰۷	۵۳۷	۳,۲۱	۰,۰۲	۰,۰۱۵
	NW	۲۱۸۲	۱۹۸	۱۳,۷%	۱۹۸۴	۱۱,۸%	۱,۱۶	۰,۸۱۸
لیتوژوژی	Dcg	۱۴۰۳۲	۱۴۲۰	۹%	۱۲۶۱۲	۸۴,۸%	۱,۱۶	۱
	Pd	۱۷۶۰	۲۰	۱	۱۷۴۰	۱۱,۷۱	۰,۱۲	۰,۱
	Qt1	۵۰۷	۰	۰	۵۰۷	۳,۴۱	۰	۰
کاربری اراضی	جنگل متراکم	۱۰۱۱۰	۶۲۳	۴۳,۲%	۹۴۸۷	۶۳,۸۵	۰,۶۸	۰,۳۰
	ترکیبی (جنگل کم تراکم، ساخته شده)	۱۶۵۰	۰	۰	۱۶۵۰	۱۱,۱۱	۰	۰
	جنگل نیمه متراکم	۴۵۳۸	۸۱۷	۵۶,۷%	۳۷۲۱	۲۵,۰%	۲,۲۷	۱
پوشش گیاهی	متوسط (۵۰ - ۷۵ درصد)	۹۶۴۱	۹۱۴	۶۳	۸۷۲۷	۵۸,۷%	۱,۰۸	۱

	۱۰۰ - ۷۵ (درصد)	۶۶۴۵	۵۲۶	۳۶,۵۳	۶۱۱۹	۴۱,۲۲	۰,۸۹	۰,۸۲
تراکم آبراهه (متر / کیلومتر مربع)	۱۲۰۰ - ۷۵	۲۹۷۶	۴۸۵	۳۳,۶۸	۲۴۹۱	۱۶,۷۷	۲,۰۱	۱
	۲۳۰۰ - ۱۲۰۰	۳۵۴۸	۳۳۷	۲۳,۴۰	۳۲۱۱	۲۱,۶۲	۱,۰۸	۰,۵۴
	۳۵۰۰ - ۲۳۰۰	۲۹۵۷	۲۶۲	۱۸,۱۹	۲۶۹۵	۱۸,۱۴	۱,۰۰	۰,۵۰
	۴۵۰۰ - ۳۵۰۰	۳۰۳۷	۲۳۶	۱۶,۳۹	۲۸۰۱	۱۸,۰۶	۰,۸۷	۰,۴۳
	۶۰۰۰ - ۴۵۰۰	۲۶۴۳	۱۱۰	۷,۶۴	۲۵۳۳	۱۷,۰۵	۰,۴۵	۰,۲۲
	۷۷۷۵ - ۶۰۰۰	۱۱۳۴	۱۰	۰,۶۹	۱۱۲۴	۷,۵۷	۰,۰۹	۰,۰۵
فاصله از جاده (متر)	۲۵۰ - ۰	۵۰۲۶	۱۱۲۸	۷۸,۳۳	۳۸۹۸	۲۶,۳۴	۲,۹۹	۱
	۵۰۰ - ۲۵۰	۳۴۵۲	۲۸۵	۱۹,۷۹	۳۱۶۷	۲۱,۳۲	۰,۹۳	۰,۳۱۱
	۱۰۰۰ - ۵۰۰	۲۵۶۸	۱۱	۰,۷۶	۲۵۵۷	۱۷,۲۱	۰,۰۴	۰,۰۱۵
	۱۴۰۰ - ۱۰۰۰	۱۹۷۵	۹	۰,۶۳	۱۹۶۶	۱۳,۲۳	۰,۰۵	۰,۰۱۶
	۱۸۰۰ - ۱۴۰۰	۱۷۷۵	۷	۰,۴۹	۱۷۶۸	۱۱,۹۰	۰,۰۴	۰,۰۱۴
	۲۴۳۰ - ۱۸۰۰	۱۴۹۹	۰	۰	۱۴۹۹	۱۰,۰۹	۰,۰۰	۰
واحد					ویژگی سنگ‌شناسی			
Dcg					سنگ آهک آرژیلی فسیل‌دار، سنگ آهک تیره، مارن و شیل و بهطور محلی حاوی ژیپس (سازند خوش بیلاق)			
Pd					پریدوتیت شامل هارزبوریت، دونیت، لرزولیت و وستربیت			
Qt1					ذخایر تراصی و مخروطافکنهای کوهپایه‌ای قدیمی مرتفع			



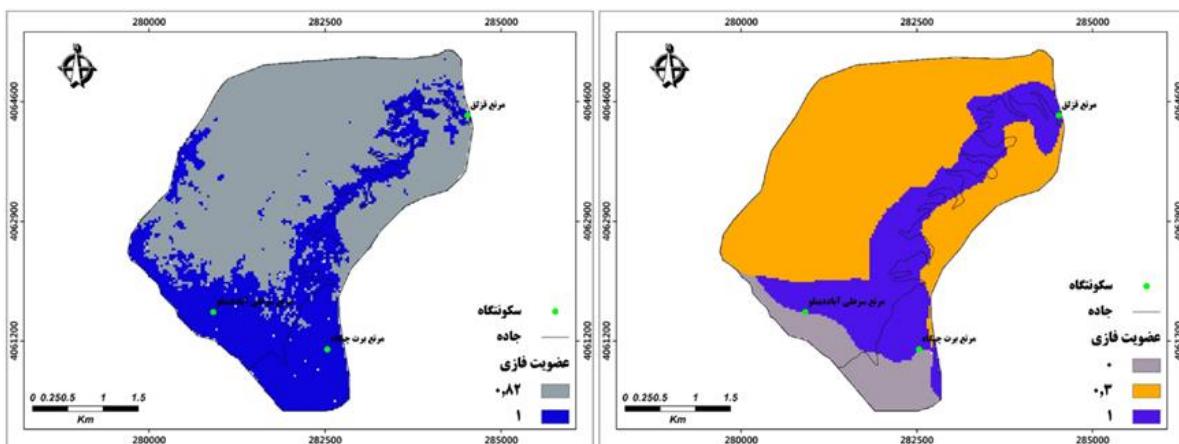
شکل ۴: نقشه فازی شده متغیر شیب

شکل ۳: نقشه فازی شده متغیر ارتفاع



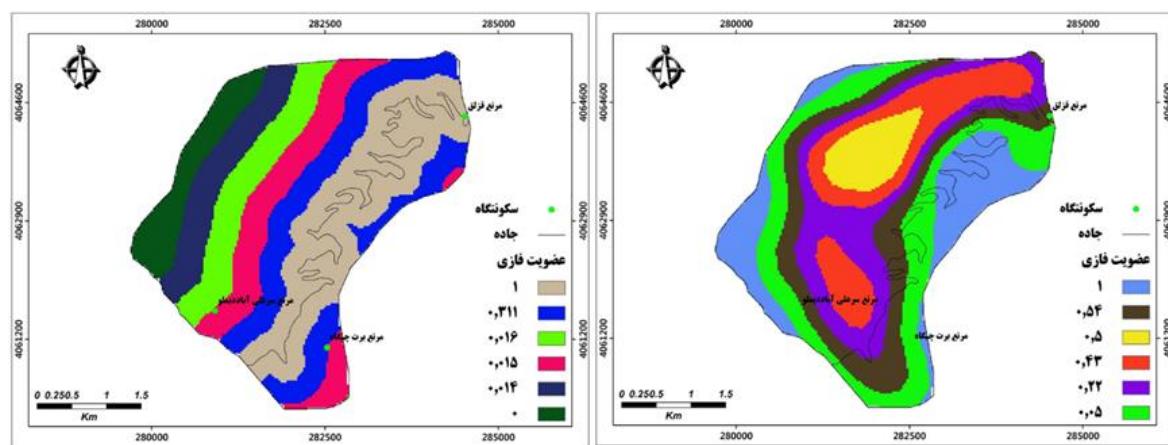
شکل ۶: نقشه فازی شده متغیر زمین‌شناسی

شکل ۵: نقشه فازی شده متغیر جهت دامنه



شکل ۸: نقشه فازی شده متغیر پوشش گیاهی

شکل ۷: نقشه فازی شده متغیر کاربری اراضی

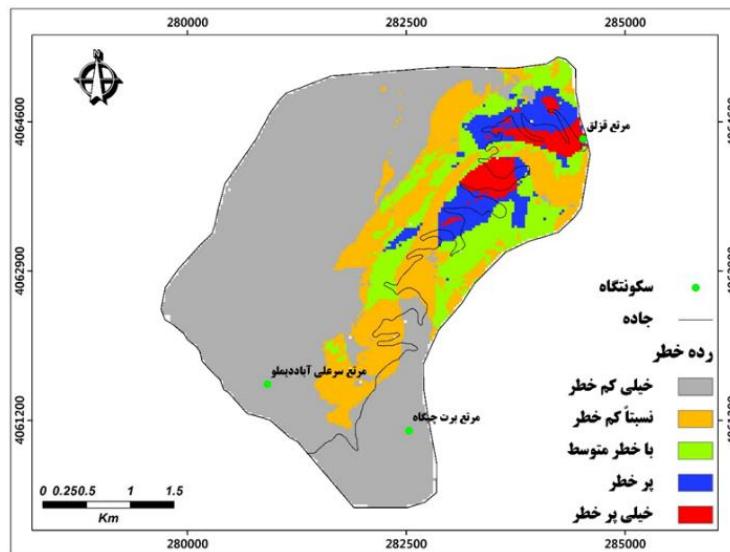


شکل ۱۰: نقشه فازی شده متغیر تراکم آبراهه

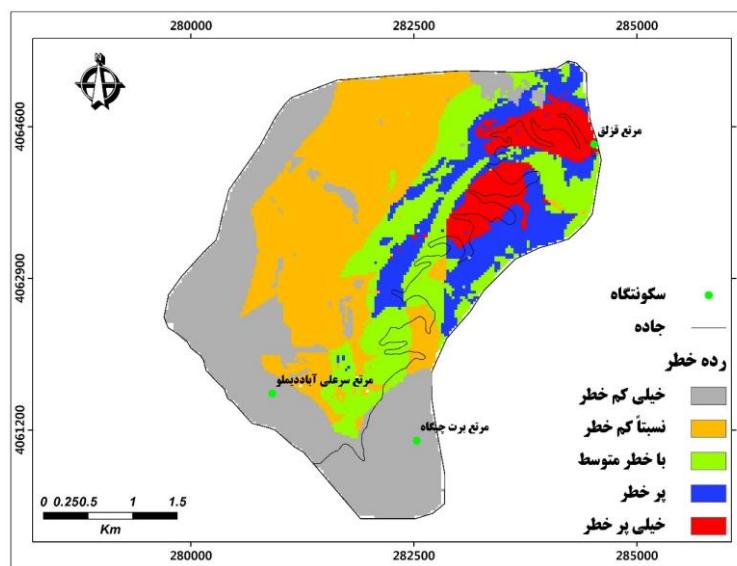
شکل ۹: نقشه فازی شده متغیر تراکم آبراهه از جاده

پس از تعیین وزن طبقات هر یک از عوامل موثر بر رخداد زمین لغزش، تهییه نقشه خطر زمین لغزش با استفاده از عملگرهای گاما انجام شد. با توجه به رابطه‌های تعریف شده جهت اعمال گاما، لایه‌ی نهایی حاصل از هر کدام از مقادیر ۷ در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ آورده شده است. نقشه پهن‌بندی با گاماها نشان می‌دهد که مساحت طبقه خیلی پر خطر در حد فاصل جنگل نوسکستان تا گرگان ۰/۴۷ کیلومتر مربع ($۳/۲۳$ درصد از کل مساحت)، طبقه پر خطر با ۰/۸۲

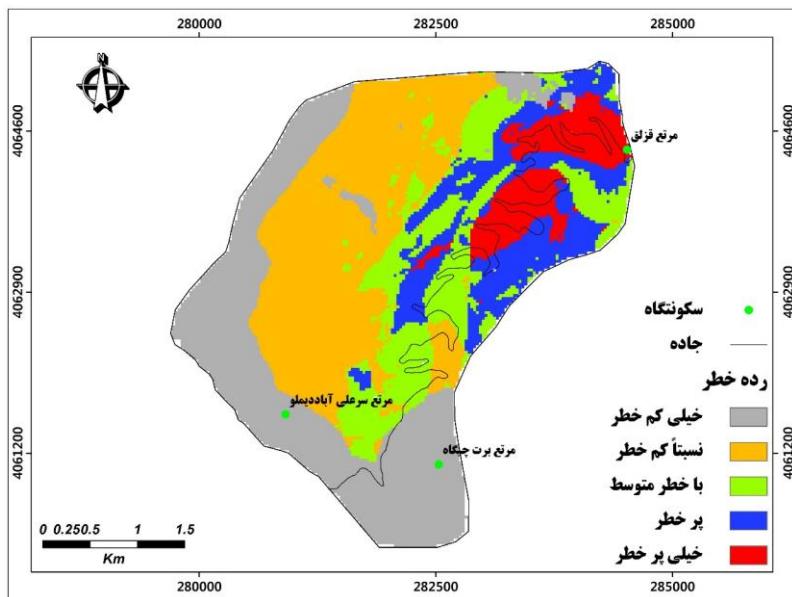
کیلومتر مربع (۵/۶۷) درصد از مساحت منطقه، طبقه با خطر متوسط کیلومتر مربع (۱۱/۴۱) درصد از مساحت منطقه و طبقات نسبتاً کم خطر و خیلی کم خطر هم به ترتیب ۲/۵۴ و ۸/۹۵ کیلومتر مربع (معادل ۶۲/۰۵ و ۱۷/۶۳) درصد از مساحت منطقه) مورد بررسی را در بر گرفته اند (جدول ۲). در نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با گام‌ای ۰/۸، مساحت طبقات خیلی پر خطر، پر خطر، با خطر متوسط، نسبتاً کم خطر و خیلی کم خطر به ترتیب ۴/۴۳، ۲/۵۶، ۱/۷۴، ۱/۰۵ و ۴/۶۳ کیلومتر مربع هستند. در نقشه‌ی پهنه‌بندی با گام‌ای ۰/۹ مساحت پهنه‌ها به ترتیب ۴/۶۲، ۲/۴۹، ۱/۹۴، ۱/۱۹ و ۴/۱۸ کیلومتر مربع است (جدول ۳).



شکل ۱۱: پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان با استفاده از گام‌ای ۰/۷



شکل ۱۲: پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان با استفاده از گام‌ای ۰/۸



شکل ۱۳: پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان با استفاده از گامای ۰/۹

جدول ۳: مساحت رده‌های خطر زمین‌لغزش در نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده با عملگر گامای فازی

۰/۹ گاما		۰/۸ گاما		۰/۷ گاما		طبقه خطر
درصد مساحت	مساحت (Km ²)	درصد مساحت	مساحت (Km ²)	درصد مساحت	مساحت (Km ²)	
۲۸,۹۵	۴,۱۸	۳۲,۰۷	۴,۶۳	۶۲,۰۵	۸,۹۵	خیلی کم خطر
۳۲,۰۱	۴,۶۲	۳۰,۷۲	۴,۴۳	۱۷,۶۳	۲,۵۴	نسبتاً کم خطر
۱۷,۲۹	۲,۴۹	۱۷,۷۶	۲,۵۶	۱۱,۴۱	۱,۶۵	با خطر متوسط
۱۳,۴۲	۱,۹۴	۱۲,۰۵	۱,۷۴	۵,۶۷	۰,۸۲	پر خطر
۸,۲۳	۱,۱۹	۷,۳۰	۱,۰۵	۳,۲۳	۰,۴۷	خیلی پر خطر

در نهایت با تلفیق نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه و نقشه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش تهیه شده با عملگرهای فازی در محیط Arc GIS، به ارزیابی و مقایسه روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش مجموع کیفیت (QS) و دقت (P) پرداخته شد و مدل مناسب و منطبق با منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. یافته‌های حاصل از محاسبه مقادیر شاخص‌های مجموع کیفیت و دقت روش در جدول ۴ آورده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که نسبت تراکمی (که همان مقادیر شاخص زمین‌لغزش مربوط به پهنه‌های خطر است) در هر ۳ روش بکار گرفته شده، ضمن تفکیک‌پذیری خوب، متناسب با افزایش خطر پهنه‌ها بیشتر شده است. مقدار شاخص مجموع کیفیت (QS) که ارزیابی روش‌ها را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد، در گاماهای فازی ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۴۲ و ۰/۴۲ بدست آمده است. مقدار دقت روش (P) برای سه عملگر فازی استفاده شده به ترتیب ۰/۳۴، ۰/۲۲ و ۰/۲۲ به دست آمده است. مدل‌هایی که پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را درست برآورده کرده باشند، با افزایش رده خطر، میزان دقت روش یا همان P نیز افزایش پیدا می‌کند. مقدار شاخص مجموع کیفیت (QS) که ارزیابی روش‌ها را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد، حاکی از آن است که عملگر فازی گامای ۰/۷ با ۰/۴۲ بالاترین مقدار QS را در میان سایر عملگرهای گاما دارد؛ پس این عملگر به عنوان عملگر بهینه در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش منطقه مطالعاتی در این پژوهش معرفی می‌شود. نتایج مطالعه عبادی نژاد و همکاران (۱۳۸۶) بیانگر این است که عملگر فازی گامای ۰/۸، به عنوان مناسب‌ترین عملگر در تعیین پتانسیل زمین‌لغزش در حوضه آبخیز شیرود به شمار می‌رود.

جدول ۴. ارزیابی صحت و دقت عملگر گام‌ای فازی در پهنه‌بندی خط‌زمین‌لغزش حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان

مدل پهنه بندی	ردی خطر لغزش	مساحت پهنه به کیلومتر مربع (Ai)	مساحت لغزش پهنه به کیلومتر مربع (Si)	نسبت تراکمی (DR)	درصد مساحت (S)	QS در هر ردی	مجموع کیفیت (QS)	دقت روش (P)
Gamma 0.7	۱	۸,۹۵	۰,۰۴	۰,۰۵	۰,۶۲۱	۰,۵۶	۲,۴۲	۰,۳۴
	۲	۲,۵۴	۰,۲۶	۱,۱۲	۰,۱۷۶	۰		
	۳	۱,۶۵	۰,۴۲	۲,۸۴	۰,۱۱۴	۰,۳۹		
	۴	۰,۸۲	۰,۳۴	۴,۵۹	۰,۰۵۷	۰,۷۳		
	۵	۰,۴۷	۰,۲۴	۵,۷۸	۰,۰۳۲	۰,۷۴		
	Sum	۱۴,۴۲	۱,۲۹					
Gamma 0.8	۱	۴,۶۳	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۳۲۱	۰,۳۲	۲,۲	۰,۲۳
	۲	۴,۴۳	۰,۰۷	۰,۱۷	۰,۳۰۷	۰,۲۱		
	۳	۲,۵۶	۰,۲۵	۱,۰۹	۰,۱۷۸	۰,۰۰		
	۴	۱,۷۴	۰,۵۰	۳,۲۵	۰,۱۲۰	۰,۶۱		
	۵	۱,۰۵	۰,۴۵	۴,۸۱	۰,۰۷۳	۱,۰۶		
	Sum	۱۴,۴۲	۱,۲۹					
Gamma 0.9	۱	۴,۱۸	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۳۹	۰,۲۹	۲,۳	۰,۲۲
	۲	۴,۶۲	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۳۲	۰,۲۸		
	۳	۲,۳۹	۰,۲۳	۱,۰۲	۰,۱۷	۰,۰۰		
	۴	۱,۹۴	۰,۵۰	۲,۸۸	۰,۱۳	۰,۴۷		
	۵	۱,۱۹	۰,۵۲	۴,۹۱	۰,۰۸	۱,۲۶		
	Sum	۱۴,۴۲	۱,۲۹					

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تلفیق پهنه‌های لغزشی رخ داده با طبقه بندی عوامل مؤثر (مدل نسبت فراوانی) نشان داد که پایین‌ترین و بالاترین طبقات ارتفاعی به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار عضویت فازی را دارند؛ این رابطه‌ی معکوس میان افزایش ارتفاع و وقوع زمین‌لغزش معکس کننده‌ی شرایط پراکنش مکانی بارش منطقه به ازای تغییرات ارتفاع است. عضویت فازی رده‌های عامل مؤثر شیب نشان داد که با افزایش شیب، آستانه ناپایداری دامنه نیز افزایش پیدا کرده و احتمال وقوع حرکات توده‌ای از جمله زمین‌لغزش بیشتر می‌شود. برای این عامل بیشترین عضویت فازی به شیب‌های بالای ۳۵ درجه و کمترین عضویت فازی به شیب‌های ۰ تا ۱۰ درجه اختصاص داده شده است. عامل شیب نقشی کلیدی در جابجایی و حمل مواد دامنه‌ای منطقه به خصوص دامنه‌های مشرف به راههای ارتباطی داشته است.

دامنه‌های با جهت شمالی بهدلیل برخورداری از بارش و رطوبت، نقش مؤثرتری در ایجاد حرکات لغزشی منطقه ایفا می‌کنند و مقدار عضویت فازی آن برای منطقه مورد مطالعه نیز ۱ بدست آمده است. نحوه‌ی عرضه دامنه‌ها در جهات مختلف جغرافیایی و تغییرات شیب آن، نقش فراوانی در تغییرات محیط شکل‌زایی به وجود می‌آورد. در درجه اول تفاوت نقش دامنه‌های آفتاب‌گیر و نساء (پشت به آفتاب) مورد توجه است؛ این تفاوت نتیجه اختلاف دریافت میزان آب و انرژی حرارتی دامنه‌ها بر حسب جهت آن‌ها نسبت به منع حرارت و بارش می‌باشد. دامنه‌های رو به مشرق و جنوب شرقی غالباً گرم و خشک می‌باشند. بنابراین پوشش برفی بر سطح آن‌ها نازک و یا منقطع است؛ در فصل بهار با ذوب سریع برف سطوح سنگی در مجاورت هوا قرار گرفته و پدیده یخ‌بندان و ذوب یخ فعال می‌شود. بر عکس دامنه‌های رو به شمال نسبتاً سرد و مرطوب هستند که امکان تجزیه سنگی فراهم شده و پدیده لغزش تشدید می‌شود.

پهنه‌هایی که دارای سازندهای مارنی هستند، همواره حساس‌ترین پهنه‌ها به وقوع زمین‌لغزش می‌باشند؛ پس این پهنه‌ها بیش‌ترین مقدار عضویت فازی را در میان سایر واحدهای سنگ‌شناصی منطقه دارند. واحدهای سنگی منطقه به تناوب موقعیت فضایی و میزان مقاومت آن‌ها تهدیدی جدی برای جاده و محور ارتباطی مورد نظر محسوب می‌شود؛ از جمله سنگ‌هایی از نوع شیل و مارن که م‌ستعد حرکات توده‌ای به ویژه زمین‌لغزش هستند. در عامل تراکم پوشش گیاهی، مقدار عضویت فازی ۱ برای بخش‌هایی از منطقه بدست آمد که تراکم پوشش گیاهی کمتری دارند (۵۰ – ۷۵ درصد). عامل مؤثر فاصله از جاده، نقش بارز خود را بر وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه با مقادیر عضویت فازی بدست آمده برای طبقات مختلف آن به خوبی نشان می‌دهد به طوری که طبقه با فاصله کمتر از ۲۵۰ متری از جاده دارای بیش‌ترین مقدار عضویت فازی و طبقه با فاصله‌های بیش‌تر از ۱۸۰۰ متری از جاده کمترین مقدار عضویت فازی را دارد. تلفیق پهنه‌های لغزشی در لایه تراکم آبراهه بیانگر این امر است که بیش‌ترین پراکنش زمین‌لغزش‌ها در طبقه‌ی با تراکم پایین آبراهه ۷۵ – ۱۲۰۰ متر / کیلومتر مربع در واحد سطح قرار دارند. این امر نشان می‌دهد که در واقع پهنه‌های با سازندهای سست و نزدیک به راههای ارتباطی و پهنه‌های با بارش فراوان تر دارای پتانسیل بیش‌تری از نظر احتمال وقوع لغزش هستند و این پهنه‌ها در طبیعت شاید همیشه با پهنه‌های نزدیک به آبراهه یا دارای تراکم بالای آبراهه انطباق نداشته باشند. نتیجه مطالعه روستایی و همکاران(۱۳۹۷) با استفاده از عملگرهای گام‌ای فازی نشان داد که زمین‌شناسی، جهت شیب و فاصله از آبراهه به ترتیب مهمترین عوامل کنترل کننده وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز نازل‌چای در استان آذربایجان غربی هستند، اما عامل زمین‌شناسی اهمیت بیشتری دارد.

به منظور انتخاب روش بهینه از میان عملگرهای فازی، از دو روش مجموع کیفیت و دقت روش استفاده شد که در تحقیقات م شایه نیز مورد استفاده قرار گرفته است(نوجوان و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج حاصل از مدل سازی با استفاده از روش‌های انتخاب شده، میزان دقت متفاوتی را در تهیه نقشه نهایی پهنه‌بندی نشان داد. اگر چه بر اساس دقت روش (P) که نشان از تفکیک‌پذیری پهنه‌های خطر در هر روش دارد، مقادیر تقریباً یکسانی برای روش‌ها بدست آمد و محدودیتی برای دخالت دادن پارامترها به چشم نمی‌خورد. اما اختلاف در صحت یا مطلوبیت (QS) که بیان کننده ارجحیت روش‌ها است، می‌تواند ناشی از مواردی مانند یکسان نبودن ماهیت پارامترها و عوامل شرکت دهنده در فرآیندها(هنگامی که هدف مقایسه است)، باشد. به عبارتی، ماهیت ذاتی پارامترها یا عوامل مؤثر در مدل‌های مختلف متفاوت هستند و روشی که بتواند اولویت عوامل مؤثر و مقدار وزن آن‌ها را با همدیگر محاسبه کند، دارای صحت بیش‌تری است و به عبارتی، انطباق بهتری با پتانسیل رخداد زمین‌لغزش در منطقه خواهد داشت. در منطقه مورد مطالعه، عملگر گام‌ای ۷/۰ می‌تنی بر بکارگیری ضرایب حاصل از روش نسبت فراوانی، ارجحیت بیش‌تری را نسبت به سایر عملگرهای گام‌ای فازی نشان داد. نتایج مطالعه ابراهیمی مقدم و عباس نژاد(۱۳۹۵) در پهنه بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در استان کرمان با مدل‌های فازی و AHP نشان داد که عملگر گام‌ای فازی با لاندای ۷/۰ نسبت به سایر روش‌های ارائه شده دارای مطلوبیت بهتری در پهنه بندی لغزش استان کرمان می‌باشد و منطقی است که هر گونه برنامه ریزی محیطی با توجه به آن صورت گیرد.

منابع

- ابراهیمی مقدم، ف؛ عباس نژاد، ا، ۱۳۹۵، ارزیابی و پهنه بندی خطر وقوع زمین‌لغزش استان کرمان با مدل‌های فازی و AHP، فصلنامه زمین‌شناسی محیط زیست، ۱۰(۳۷)، ۴۴-۲۵.
- احمدی، ح؛ اسماعلی، ا؛ فیض نیا، س؛ شریعت جعفری، م، ۱۳۸۲، پهنه بندی خطر حرکت‌های توده‌ای با استفاده از دو روش رگرسیون چند متغیره MR و تحلیل سلسه مراتبی AHP (مطالعه موردی حوزه آبخیز گرمی چاه)، مجله منابع طبیعی ایران، ۴(۵۶)، ۳۳۶-۳۲۳.

- بهشتی فر، س؛ مسکری، م؛ ولدان زوج، م؛ کریمی، م، ۱۳۸۹، استفاده از منطق فازی در محیط GIS به منظور مکان یابی نیروگاههای گازی، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، ۴(۴)، ۵۹۵-۵۸۳.
- رستمی، ذ؛ المدرسي، س؛ جمالی، ع، ۱۳۹۸، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردي: حوضه‌ی آبخیز سد چم گردلان ایلام)، مخاطرات محیط طبیعی، ۲۲(۸)، ۱۸-۱.
- روستایی، ش؛ حجازی، ا؛ رجبی، م؛ جلالی، ن؛ نجفی ایگدیر، ا، ۱۳۹۷، کاربرد منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه‌ی آبخیز نازل‌لوچای، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۶(۴)، ۱۱۹-۱۰۳.
- سوری، س؛ بهاروند، س؛ فرهادی نژاد، ط، ۱۳۹۲، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردي: حوزه چم‌سنگر)، نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۴(۱۳)، ۶۰-۴۷.
- شادر، ص، ۱۳۸۴، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، مطالعه موردي حوضه‌ی آبخیز چالکرود، پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۵، ۱۲۶-۱۱۸.
- شیرانی، ک؛ سیف، ع؛ علیمرادی، م، ۱۳۹۲، صحت سنجی روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون چند متغیره (MR) در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش به کمک تکنیک GIS (مطالعه موردي: حوضه رودخانه ماربر)، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۱(۲)، ۱۰۸-۹۱.
- صالح پور میلانی، ع؛ یمانی، م، ۱۳۹۷، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه‌ی آبریز رامیان (استان گلستان)، دانش پیشگیری و مدیریت بحران، ۸(۲)، ۱۷۲-۱۶۱.
- صفاری، ا؛ موسی وند، ج؛ افتخاری، س، ۱۳۹۰، تحلیل توسعه کاربریهای شهری در مناطق لغزشی با استفاده از تلفیق مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (مطالعه موردي: حوضه رود-دره)، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۲۲، ۱۰۷-۸۵.
- طولایی، س؛ عابدینی، م، ۱۳۹۵، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش حوضه نوژیان با مدل‌های همپوشانی فازی و AHP، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۰(۳۴)، ۱۰۳-۹۳.
- عبادی نژاد، س؛ یمانی، م؛ مقصودی، م؛ شادر، ص، ۱۳۸۶، ارزیابی کارایی عملگرهای منطق فازی در تعیین توانمندی زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبخیز شیرود، علوم مهندسی آبخیزداری، ۱(۳)، ۴۴-۳۹.
- کورکی نژاد، م؛ اونق، م؛ اسلامی، م؛ کبیر، آ؛ شفیع زاده، ا، ۱۳۸۴، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در آبخیز سیاه رودبار گلستان، مجموعه مقالات دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان، ۳۶۸-۳۶۱.
- گودرزی، س؛ طالبی، ع؛ پورقاسمی، ح، ۱۳۹۷، بررسی کارایی مدل سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش (مطالعه موردي: حوزه آبخیز سردارآباد استان لرستان)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۵، ۹۶-۷۵.
- متکان، ع؛ سمیعاء، ج؛ پورعلی، س؛ صفائی، م، ۱۳۸۸، مدل‌های منطق فازی و سنجش از دور جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبخیز لاجیم، فصل‌نامه زمین‌شناسی کاربردی، ۵(۴)، ۳۲۵-۳۱۸.
- مرادی، ح؛ پورقاسمی، ح؛ محمدی، م؛ مهدویفر، م، ۱۳۸۹، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردي: حوزه آبخیز هراز)، علوم محیطی، ۷(۴)، ۱۴۲-۱۲۹.
- نادری، ف، ۱۳۹۱، کاربرد منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه‌ی آبخیز چرداول ایلام، پژوهش‌های آبخیزداری، شماره ۹۴، ۸۵-۷۴.
- نوجوان، م؛ شاه زیدی، س؛ داودی، م؛ امین رعایا، م، ۱۳۹۸، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تلفیق دو مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فازی (مطالعه موردي: حوضه‌ی آبخیز کمه، استان اصفهان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۷(۴)، ۱۵۹-۱۴۲).

- Abbasi, H., Sharafî, S., & Maryanaj, Z. 2018, *Assessment of Areas Vulnerable to Natural Hazards: A Case Study on Rural Areas of Azna County, Iran*. *Sci J Rescue Relief*, 10(3), 42-49.
- Anbalagan, R., Kumar, R., Lakshmanan, K., Parida, S., & Neethu, S. 2015, *Landslide hazard zonation mapping using frequency ratio and fuzzy logic approach, a case study of Lachung Valley, Sikkim*. *Geo environmental Disasters*, 2(1), 6.
- Arora, M. K., Das Gupta, A. S., & Gupta, R. P. 2004, *An artificial neural network approach for landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas*. *International Journal of Remote Sensing*, 25(3), 559-572.
- Cornforth, D.H. 2005, *Landslides in Practice*. USA: John Wiley & Sons Inc., 591p.
- Gee, M.D. 1992, *Classification of Landslides Hazard Zonation Methods and a Test of Predictive Capability*. In: Bell, Davi, H. (eds.), *Proceedings International Symposium on Landslide*, 48-56.
- Gorsevski, P.V., Jankowski, P., and Gelssler, P.E. 2006, *Heuristic approach for mapping landslide hazard integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process*. *Control and Cybernetics*, (35): 1-26.
- Jade, S., & Sarkar, S. 1993, *Statistical models for slope instability classification*. *Engineering Geology*, 36(1-2), 91-98.
- Juang, C.H., Hauang, R.D., and Chen, J.W. 1996, *Determining of relative density of sands from CPT using fuzzy sets*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(1): 1-16.
- Kanungo, D. P., Arora, M. K., Gupta, R. P., & Sarkar, S. 2005, *GIS based Landslide Hazard Zonation using Neuro-Fuzzy Weighting*. In IICAI (pp. 1922-1937).
- Lee, D.H., and Juang, C.H. 1992, *Evaluation of failure potential in mudstone slopes using fuzzy sets*. ASCE Geotechnical Special Publication 31, *Stability and Performance of Slopes and Embankment-II* (2): 1137-1151.
- Lee, S. 2007, *Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping*. *Environmental Geology*, (50): 847-855.
- Murat, E., and Candan, G. 2003, *Use of fuzzy relation to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (west black sea region, turkey)*. *Engineering geology*, (75), pp24.
- Mijani, N., and Samani, N.N. 2017, *comparison of fuzzy-based models in landslide hazard mapping*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.
- Neupane, K. M., & Piantanakulchai, M. 2006, *Analytic network process model for landslide hazard zonation*. *Engineering Geology*, 85(3-4), 281-294.
- Othman, A. N., Naim, W. M., & Noraini, S. 2012, *GIS based multi-criteria decision making for landslide hazard zonation*. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 35, 595-602.
- Pandey, A., Dabral, P. P., Chowdary, V. M., & Yadav, N. K. 2008, *Landslide hazard zonation using remote sensing and GIS: a case study of Dikrong river basin, Arunachal Pradesh, India*. *Environmental geology*, 54(7), 1517-1529.
- Parise, M. 2002, *Landslide hazard zonation of slopes susceptible to rock falls and topples*.
- Saha, A. K., Gupta, R. P., & Arora, M. K. 2002, *GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas*. *International journal of remote sensing*, 23(2), 357-369.
- Yalcin, A. 2008, *GIS-based Landslide Susceptibility Mapping Using Analytical Hierarchy Process and Bivariate Statistics in Ardesen (Turkey)*. *Comparisons of results and confirmations*. *Catena*, (72): 1-12.
- Yin, K.J., and Yan, T.Z. 1988, *Statistical Prediction Model for Slope Instability of Metamorphosed Rocks*. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland, (2): 1269-1272.