

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

حبیب 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 تأیید 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 زمین لغزش است. افزایش جمعیت و گسترش سکونتگاه‌های انسانی در نواحی کوهستانی، مشکل بودن پیش‌بینی زمان وقوع زمین لغزش و متعدد بودن عوامل مؤثر در رخداد این پدیده، ضرورت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش را آشکار می‌سازد. تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین لغزش این امکان را فراهم می‌سازد که مناطق آسیب‌پذیر شناسایی و در برنامه‌ریزی‌های محیطی مد نظر قرار بگیرد. استان گلستان در شمال ایران از جمله مناطق مستعد زمین لغزش در کشور است. بنابراین هدف از این پژوهش، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان با شناسایی عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش و عملگر فازی گاما می‌باشد. از ابزارهایی مانند نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای و ... جهت پهنه‌بندی خطر زمین لغزش استفاده شده است. مجموعه اطلاعات ورودی جهت ارزیابی پتانسیل خطر زمین لغزش در این پژوهش شامل ۸ لایه‌ی ارتفاع، شیب، 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 زمین لغزش با استفاده از عملگر فازی گامای ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ تهیه شد. نتایج نشان داد که پهنه‌های با سازندهای سست و نزدیک به راه‌های ارتباطی و پهنه‌های با بارش فراوان تر دارای پتانسیل بیش‌تری از نظر احتمال وقوع لغزش هستند. هم‌چنین شاخص مجموع کیفیت (QS) نشان داد که گامای ۰/۷ با مقدار جمع کیفی ۲/۴۲، از دقت بالاتری نسبت به دو گامای دیگر در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان برخوردار است.

واژگان کلیدی: پهنه‌بندی زمین لغزش، عملگر فازی گاما، روش جمع کیفی، گرگان.

مقدمه

زمین لغزش جزء پرخطرترین و مضرترین مخاطرات طبیعی در مناطق کوهستانی است که عمدتاً تحت تأثیر زلزله و یا بارندگی ایجاد می شود (پاندی و همکاران^۱، ۲۰۰۸) و هر ساله اموال و زندگی مردم را ویران می کنند (آررا و همکاران^۲، ۲۰۰۴؛ کانگو و همکاران^۳، ۲۰۰۵). افزایش جمعیت و گسترش سکونتگاه‌های انسانی در نواحی کوهستانی (اتامن 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 پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را آشکار می‌سازد (ناپان و پینتان آکولچای^۵، ۲۰۰۶). پهنه‌بندی 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 (پاریسه^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 پهنه‌بندی خطر رخداد زمین‌لغزش می‌توان مناطق حساس و دارای پتانسیل خطر را شناسایی نموده و با ارائه 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 زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی زیاد، ویژگی‌های متنوع زمین‌شناسی، 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 قضایه مستثنی نمی‌باشد. با توجه به اینکه، برای شناخت مناطق دارای پتانسیل زمین‌لغزش و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر باید بهترین و دقیق‌ترین روش را با توجه به شرایط محیطی هر منطقه انتخاب نمود، بنابراین پژوهش حاضر ضمن پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان در استان گلستان، به ارزیابی و مقایسه‌ی روش‌های پهنه‌بندی عملگرهای فازی با استفاده از دو روش مجموع کیفیت (QS)^۹ و دقت (P) جهت تعیین مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی 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 پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در داخل و خارج از کشور انجام گیرد که در زیر به چند مورد از آنها اشاره شده است.

شادفر (۱۳۸۴) زمین‌لغزش حوضه آبخیز چالکرو در استان مازندران را با استفاده از اپراتورهای منطق فازی پهنه‌بندی 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 پهنه‌بندی زمین‌لغزش در حوضه آبخیز مورد بررسی می‌باشد. عبادی نژاد و همکاران (۱۳۸۶) کارایی اپراتورهای منطق فازی در تعیین زمین‌لغزش در حوضه آبخیز شیروود 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. متکان و همکاران (۱۳۸۸) در پژوهشی مدل‌های منطق فازی و سنجش از دور را جهت پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

1 - Pandey et al

2 - Arora et al

3 - Kanungo et al

4 - Othman et al

5 - Neaupane & Piantanakulchai

6 - Parise

7 - Cornforth

8 - Saha et al

9 - Quality Sum

10 - Quality Sum

در حوضه‌ی آبخیز لاجیم بکار بردند و به این نتیجه رسیدند که مدل گامای $0/7$ فازی و مدل میانگین وزنی مرتب شده فازی به دلیل کمترین تغییرپذیری و انحراف از معیار در مدل سازی، مناسبترین مدل برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه هستند. مرادی و همکاران (۱۳۸۹) در پژوهشی تحت عنوان پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما در حوضه آبخیز هراز، سطح همبستگی هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش 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 $0/975$ بیشترین دقت را در تهیه نقشه حساسیت به خطر زمین لغزش در منطقه مطالعاتی دارد. نادری (۱۳۹۱) در پژوهش خود با عنوان کاربرد منطق فازی در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز چرداول ایلام با استفاده از تئوری منطق فازی و شاخص نسب دانسیته (Dr) ^۲، نقشه‌ی خطر زمین لغزش را در محدوده مطالعاتی تهیه نمود و به این نتیجه رسید که اپراتور گاما به لحاظ تفکیک مناسب طبقات خطر زمین لغزش از مطلوبیت بیش‌تری نسبت به دیگر اپراتورهای فازی برخوردار می‌باشد. نوجوان و همکاران (۱۳۹۸) پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز کمره استان اصفهان را با استفاده از تلفیق دو مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فازی مطالعه نموده‌اند. 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 گامای $0/8$ با $6/44$ بالاترین مقدار QS را در میان سایر عملگرهای فازی دارد. از دیگر مطالعات انجام شده در بخش‌های مختلف کشور که با روش فازی انجام شده‌اند می‌توان به کارهای سوری و همکاران (۱۳۹۲)، طولابی 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 زمین لغزش 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. مرآت و کاندان^۵ (۲۰۰۳) در پژوهشی با عنوان استفاده از روابط فازی جهت تولید نقشه‌های پهنه‌بندی زمین لغزش در غرب دریای سیاه (ترکیه) به این نتیجه رسیدند که به دلیل پیچیده بودن ماهیت زمین لغزش و دخالت عوامل متعدد در رخداد آن، بکار بردن روابط فازی در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین لغزش از سایر روش‌ها بهتر و به واقعیت نزدیک‌تر است. گرسوسکی و همکاران^۶ (۲۰۰۶) در پژوهشی به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از مجموعه‌های فازی محدودیت روش‌های کمی را بر طرف ساخته است. آنبالاگان و همکاران^۷ (۲۰۱۵) تهیه نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش در دره لاچونگ را با استفاده از نسبت فراوانی و منطق فازی را بررسی نموده و نتیجه گرفتند که پهنه بندی خطر زمین لغزش 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 زمین لغزش شهر ساری پرداخته و نتیجه گرفتند که مدل Fuzzy-AHP نسبت به دو مدل دیگر در پهنه بندی خطر زمین لغزش از دقت بالاتری برخوردار بوده و فازی گاما با اندکی اختلاف در رتبه دوم قرار دارد. با توجه به

1- Frequency Ratio

2- Density Ratio

3- Lee & Juang

4- Juang et al

5- Murat & Candan

6- Gorsevski et al

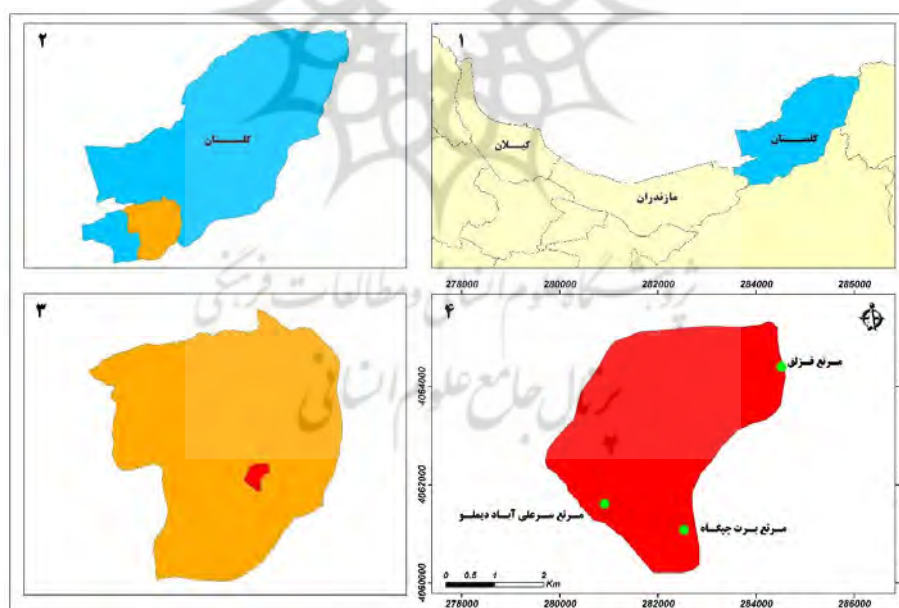
7- Anbalagan et al

توضیحات داده شده، هدف از این پژوهش، شناسایی عوامل مؤثر 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 روش ها

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با وسعتی حدود ۲۴ کیلومتر مربع در موقعیت جغرافیایی ۴۹° ۴۶' ۳۶" عرض شمالی و ۴۸° ۳۴' ۵۴" طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه جنگلی و توپوگرافی آن کوهستانی می باشد؛ بر اساس طبقه بندی اقلیمی دمارتن دارای ماکرو اقلیم از نوع نیمه مرطوب، مرطوب و خیلی مرطوب است. محدوده مورد مطالعه در زون ساختاری البرز شرقی در حوضه رسوبی شمال ایران واقع شده است. قسمت اعظم این حوضه توسط رسوبات کواترنری پوشیده شده که تمام بخش شمالی و همچنین بخشی از نوار جنوبی ناحیه گرگان را تشکیل می دهد. این رسوبات شامل پادگانه های جوان و مخروط افکنه های آبرفتی، پادگانه های قدیمی و مخروط افکنه، تپه های لسی و رس و رس های ماسه ای می باشند. رس و رس های ماسه ای در داخل ارتفاعات در فاصله ای بسیار دور از محدوده مطالعه واقع شده است. بخش های با مورفولوژی دشت و تپه ماهوری، از نهشته های کواترنری تشکیل شده است. بخش های تپه ماهوری از لس تشکیل شده اند که به دلیل ویژگی خاص رسوب شناسی توانایی نگهداری رطوبت را برای مدت زیادی دارا می باشد و همین مسأله موجب تقویت پتانسیل زمین لغزش و روان شدگی تپه ها می شود.



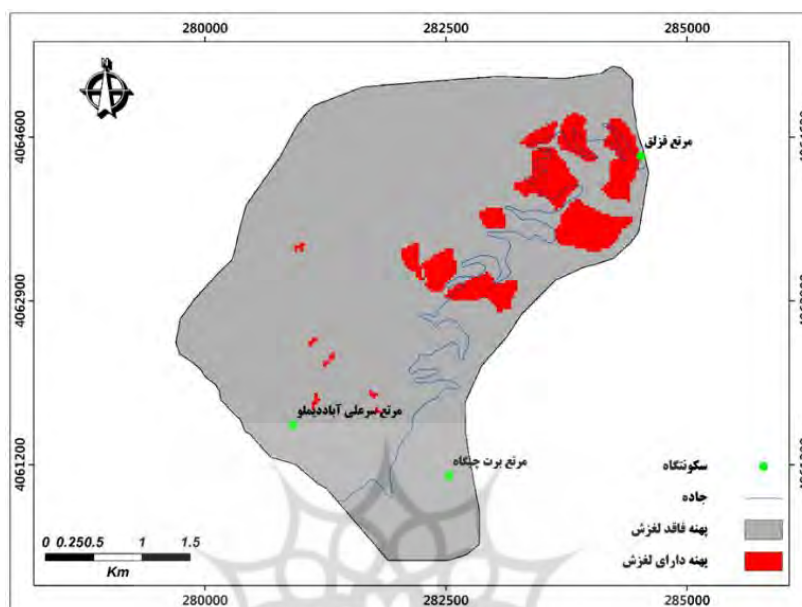
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان در استان گلستان

روش کار

تهیه نقشه متغیرهای مؤثر در وقوع زمین لغزش، نسبت فراوانی

انجام پهنه بندی و تهیه نقشه های خطر زمین لغزش در این پژوهش، بر مبنای تلفیق زمین لغزش های شناسایی شده در منطقه با عوامل مؤثر در رخداد زمین لغزش ها می باشد. در ابتدا داده های پراکنش زمین لغزش های رخ داده در محدوده مورد مطالعه، به صورت نقطه ای از سازمان جنگل ها، مراتع و آبخیزداری کشور تهیه گردید؛ سپس این لایه با استفاده از تصاویر Google Earth و همچنین نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه به پهنه های لغزشی تبدیل شد. لایه ی

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



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

در ادامه، براساس بررسی مطالعات انجام شده، عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش در حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان به عنوان متغیرهای مستقل شنا سایی شدند. لایه‌های ارتفاع، شیب و جهت شیب از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری و پوشش گیاهی از شاخص تراکم پوشش گیاهی NDVI و تصویر ماهواره‌ای لندست ETM سال ۲۰۱۸ استخراج شدند. لایه‌های جاده از نقشه‌های توپوگرافی و گسل از نقشه زمین شناسی استخراج شدند. چون این لایه‌ها به صورت خطی هستند، جهت آماده سازی آن‌ها از تابع Distance بر مبنای حداکثر فاصله استفاده شد. با این تابع لایه‌های رستری به دست 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 درآمد که تراکم آبراهه را در واحد سطح نشان داد (عباسی و همکاران، ۲۰۱۸). پس از آماده شدن لایه‌های ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین شناسی، کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی، فاصله از گسل، فاصله از جاده و تراکم آبراهه، این لایه‌ها به عنوان متغیرهای مؤثر با لایه‌های پهنه‌های لغزشی 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 لغزشی در هر طبقه از هر کدام از عوامل مؤثر مورد استفاده در این پژوهش بدست 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 (لی^۱، 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 زمین لغزش‌های محدوده مورد مطالعه است.

$$FR = A/B \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن A درصد پیکسل‌های لغزشی، B درصد پیکسل‌های فاقد لغزش و FR نسبت فراوانی است.

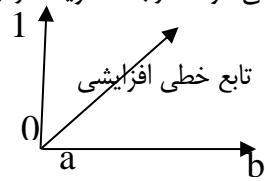
منطق فازی، عملگر فازی گاما

تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی به‌عنوان نظریه‌ای ریاضی برای مدل‌سازی و صورت‌بندی ریاضی ابهام و عدم دقت موجود در فرآیندهای شناختی انسانی، ابزارهای بسیار کارآمد و مفیدی به‌شمار می‌آیند. این نظریه که نخستین بار توسط پروف‌سور لطفی‌زاده دانشمند ایرانی‌الاصل دانشگاه کالیفرنیا در سال ۱۹۶۵ مطرح شد، حوزه‌های بسیار از علوم مختلف و به‌ویژه دانش برنامه‌ریزی شهری و شهرسازی و مدل‌سازی مخاطرات را فرا گرفته است. در ارتباط با به‌کارگیری منطق فازی، باید اشاره نمود که در تحلیل تصمیم‌گیری‌های چند معیاره، تئوری فازی معمول‌ترین 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 توصیف 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 این‌گونه تعریف کرد.

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

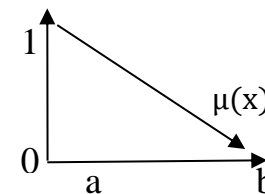
در رابطه بالا X یک عنصر مانند شیب است و X عضو از عنصر یاد شده می‌باشد که با درجه عضویت $\mu(x)$ تعریف می‌گردد. درجه عضویت در این مدل با استفاده از توابع عضویت تعیین می‌گردد.

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



$$= \begin{cases} x = a \\ a < x < b \\ x = b \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1 \\ \frac{b-x}{b-a} \\ 0 \end{cases} \quad \text{تابع خطی کاهشی}$$

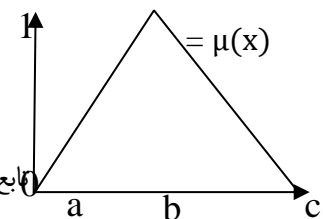


در دو رابطه بالا $\mu(x)$ درجه عضویت فازی، a کوچک‌ترین عضو مجموعه و b بزرگ‌ترین عضو مجموعه می‌باشد.

$$\begin{cases} x = a \\ a < x < b \\ x = b \\ b < x < c \\ x = c \end{cases}$$

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

(گوسین)



در رابطه بالا $\mu(x)$ 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 حداکثر درجه عضویت اعضا 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 مجموعه 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 بر خلاف 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 تعدیل حساسیت خیلی بالای عملگر ضرب فازی و حساسیت خیلی پایین عملگر جمع جبری فازی، از عملگر دیگری تحت عنوان گامای فازی استفاده شده است که حد فاصل بین دو عملگر ضرب و جمع جبری عمل می‌کند. توان لاتدا در این عملگر نشان دهنده اعمال ضرب تاثیر بیشتر برای عملگر جمع می‌باشد به طوری که هرچه لاتدا 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 گامای ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ تهیه شده‌اند.

رابطه ۲

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

عملگر فازی گاما، حالت کلی روابط عملگرهای ضرب و جمع است و می‌توان با انتخاب صحیح مقدار گاما، پارامترهای کاهش و افزایشی را همزمان تلفیق نموده، به مقادیری در خروجی دست یافت که حاصل سازگاری قابل انعطاف میان گرایش‌های 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 تالاقی نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه و نقشه‌های پهنه‌بندی خطر در محیط Arc 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 (یین و یان^۱، ۱۹۸۸؛ یالسین^۲، ۲۰۰۸).

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^۳، ۱۹۹۲).

رابطه ۳

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

که در آن Si = مجموع مساحت زمین‌لغزش‌های واقع در هر رده خطر، Ai = مساحت زمین 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 $Dr = 1$ معادل با متوسط تراکم لغزش در کل منطقه و رده دارای نسبت تراکمی ۲، دارای تراکم لغزشی معادل با دو برابر تراکم لغزش منطقه است. بنابراین هرچه تفکیک بین رده‌های خطر به وسیله 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.

معمولاً مقدار این شاخص برای روش‌های مختلف در گستره صفر تا ۷ قرار می‌گیرد. البته از بعد نظری (تئوریک) حدی برای آن وجود ندارد. اختلاف بین مقادیر QS ، کم‌تر از ۰/۱ در نظر گرفته می‌شود و مقادیر با اختلاف کم‌تر از این مقدار تقریباً یکسان لحاظ می‌گردند؛ 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 روشی 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).

$$P = KS/S \quad \text{رابطه ۵}$$

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

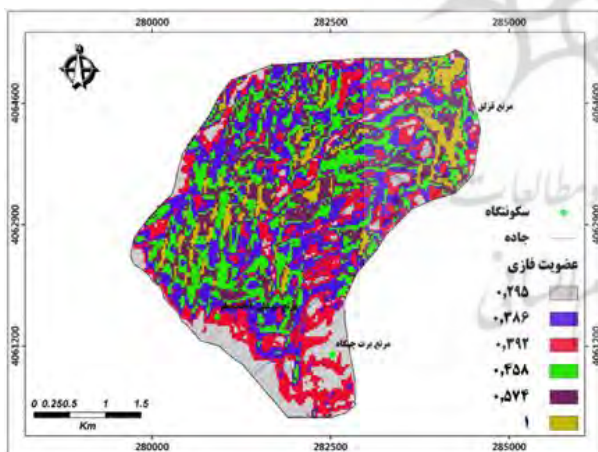
بررسی نتایج حاصل از مقادیر عضویت فازی (نسبت فراوانی) و ارتباط بین عوامل مؤثر بر رخداد زمین‌لغزش و لغزش‌های رخ داده منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲، مشاهده می‌شود که پایین‌ترین و بالاترین طبقات ارتفاعی به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار عضویت فازی را دارند که علت آن کاهش بارندگی منطقه با افزایش ارتفاع می‌باشد. عضویت فازی رده‌های عامل مؤثر شیب نشان می‌دهد 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. دامنه‌های با جهت شمالی به دلیل برخورداری از بارش و رطوبت بیشتر، نقش مؤثرتری در ایجاد زمین‌لغزش‌های منطقه ایفا می‌کنند و مقدار عضویت فازی آن برای منطقه مورد مطالعه نیز ۱ بدست آمده 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 سنگ‌شناسی 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 برای طبقات مختلف آن 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. 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. 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 باشد. همان‌طور که در منطقه مورد مطالعه این عدم انطباق وجود دارد و تأثیرگذاری بیش‌تر عوامل فاصله از جاده و سازندهای زمین‌شناسی، نحوه‌ی تأثیرگذاری سایر عوامل را تحت‌الشعاع 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.

¹ - Jade & Sarker

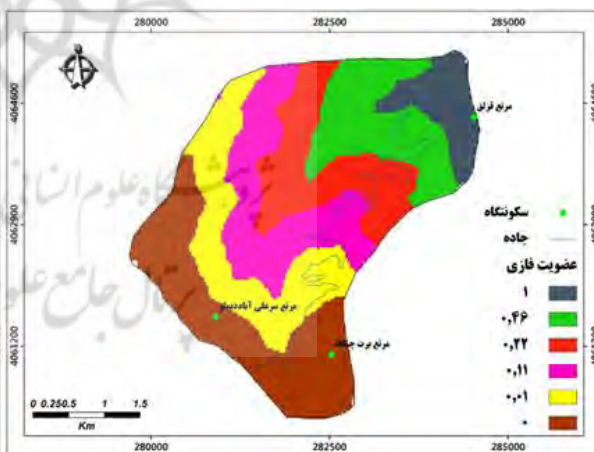
جدول ۲: مقادیر عضویت فازی (وزن نسبی) مربوط به هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش

عامل	طبقه	تعداد پیکسل	تعداد پیکسل لغزشی	درصد پیکسل لغزشی	تعداد پیکسل فاقد لغزش	درصد پیکسل فاقد لغزش	FR	عضویت فازی
ارتفاع (متر)	۱۰۰۰ - ۱۳۰۰	۱۴۲۱	۴۵۹	۳۱,۸۸	۹۶۲	۵,۷۶	۵,۵۴	۱
	۱۳۰۰ - ۱۶۰۰	۲۸۶۷	۵۱۳	۳۵,۶۳	۲۳۵۴	۱۴,۰۹	۲,۵۳	۰,۴۶
	۱۶۰۰ - ۱۸۰۰	۲۹۲۳	۲۸۱	۱۹,۵۱	۲۶۴۲	۱۵,۸۱	۱,۲۳	۰,۲۲
	۱۸۰۰ - ۲۰۰۰	۳۲۵۵	۱۶۹	۱۱,۷۴	۳۰۸۶	۱۸,۴۷	۰,۶۴	۰,۱۱
	۲۰۰۰ - ۲۲۰۰	۳۳۵۳	۱۸	۱,۲۵	۳۳۳۵	۱۹,۹۶	۰,۰۶	۰,۰۱
	۲۲۰۰ - ۲۶۳۷	۴۳۳۳	۰	۰	۴۳۳۳	۲۵,۹۳	۰	۰
شیب (درجه)	۰ - ۱۰	۲۰۴۷	۱۰۸	۷,۵۰	۱۹۳۹	۱۱,۶۰	۰,۶۵	۰,۲۹
	۱۰ - ۱۷	۳۷۱۰	۲۵۶	۱۷,۷۸	۳۴۵۴	۲۰,۶۶	۰,۸۶	۰,۳۹
	۱۷ - ۲۳	۴۴۸۶	۳۰۵	۲۱,۱۸	۴۱۸۱	۲۵,۰۰	۰,۸۵	۰,۳۹
	۲۳ - ۲۸	۳۹۶۶	۳۱۶	۲۱,۹۴	۳۶۵۰	۲۱,۸۳	۱,۰۱	۰,۴۶
	۲۸ - ۳۶	۲۸۳۲	۲۷۷	۱۹,۲۴	۲۵۵۵	۱۵,۲۸	۱,۲۶	۰,۵۷
	۳۶ - ۵۷	۱۱۲۰	۱۷۸	۱۲,۳۶	۹۴۲	۵,۶۳	۲,۱۹	۱
جهت دامنه	N	۳۲۹۴	۳۵۸	۲۴,۸۶	۲۹۳۶	۱۷,۵۶	۱,۴۲	۱
	NE	۴۰۴۹	۳۸۰	۲۶,۳۹	۳۶۶۹	۲۱,۹۴	۱,۲۰	۰,۸۴۹
	E	۵۰۲۸	۳۷۷	۲۶,۱۸	۴۶۵۱	۲۷,۸۲	۰,۹۴	۰,۶۶۵
	SE	۲۶۵۸	۱۲۶	۸,۷۵	۲۵۳۲	۱۵,۱۴	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	۱۳,۷۵	۱۹۸۴	۱۱,۸۷	۱,۱۶	۰,۸۱۸
لیتولوژی	Deg	۱۴۰۳۲	۱۴۲۰	۹۹	۱۲۶۱۲	۸۴,۸۸	۱,۱۶	۱
	Pd	۱۷۶۰	۲۰	۱	۱۷۴۰	۱۱,۷۱	۰,۱۲	۰,۱
	Qtl	۵۰۷	۰	۰	۵۰۷	۳,۴۱	۰	۰
کاربری اراضی	جنگل متراکم	۱۰۱۱۰	۶۲۳	۴۳,۲۶	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	۵۶,۷۴	۳۷۲۱	۲۵,۰۴	۲,۲۷	۱
پوشش گیاهی	متوسط (۵۰ - ۷۵ درصد)	۹۶۴۱	۹۱۴	۶۳	۸۷۲۷	۵۸,۷۸	۱,۰۸	۱

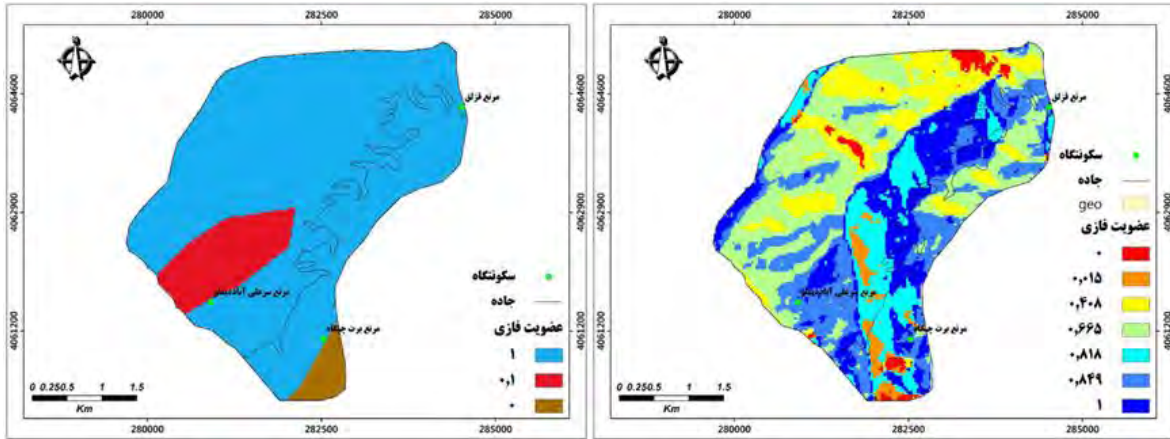
	زیاد (۷۵ - ۱۰۰ درصد)	۶۶۴۵	۵۲۶	۳۶,۵۳	۶۱۱۹	۴۱,۲۲	۰,۸۹	۰,۸۲
تراکم آبراهه (متر / کیلومتر مربع)	۱۲۰۰ - ۷۵	۲۹۷۶	۴۸۵	۳۳,۶۸	۲۴۹۱	۱۶,۷۷	۲,۰۱	۱
	۲۳۰۰ - ۱۲۰۰	۲۵۴۸	۳۳۷	۲۳,۴۰	۳۲۱۱	۲۱,۶۲	۱,۰۸	۰,۵۴
	۳۵۰۰ - ۲۳۰۰	۲۹۵۷	۲۶۲	۱۸,۱۹	۲۶۹۵	۱۸,۱۴	۱,۰۰	۰,۵۰
	۴۵۰۰ - ۳۵۰۰	۳۰۳۷	۲۳۶	۱۶,۳۹	۲۸۰۱	۱۸,۸۶	۰,۸۷	۰,۴۳
	۶۰۰۰ - ۴۵۰۰	۲۶۴۳	۱۱۰	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	۲۶,۲۴	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 ژپس (سازند خوش بیلاق)							
Pd	پریدوتیت شامل هارزبورژیت، دونیت، لرزولیت و ویستریت							
Qt1	ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای قدیمی مرتفع							



شکل ۴: نقشه فازی شده متغیر شیب

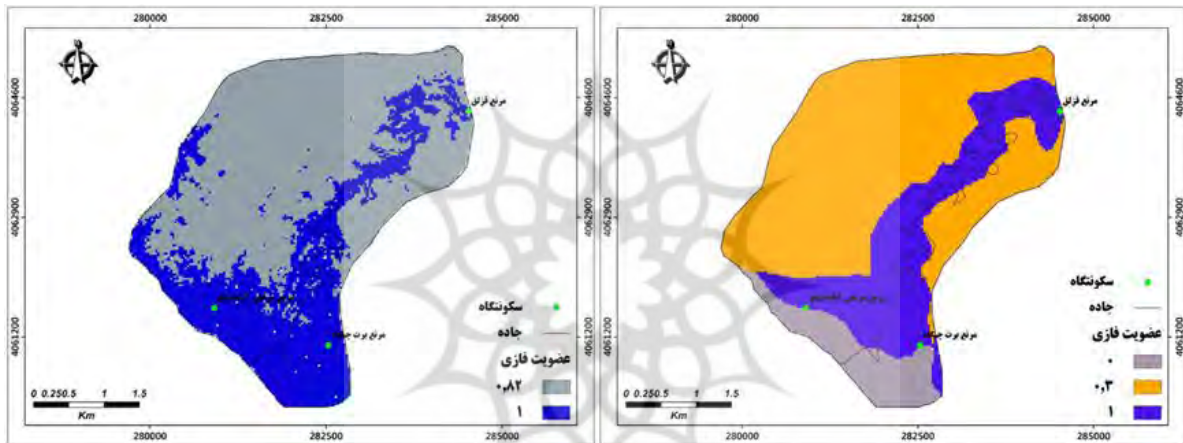


شکل ۳: نقشه فازی شده متغیر ارتفاع



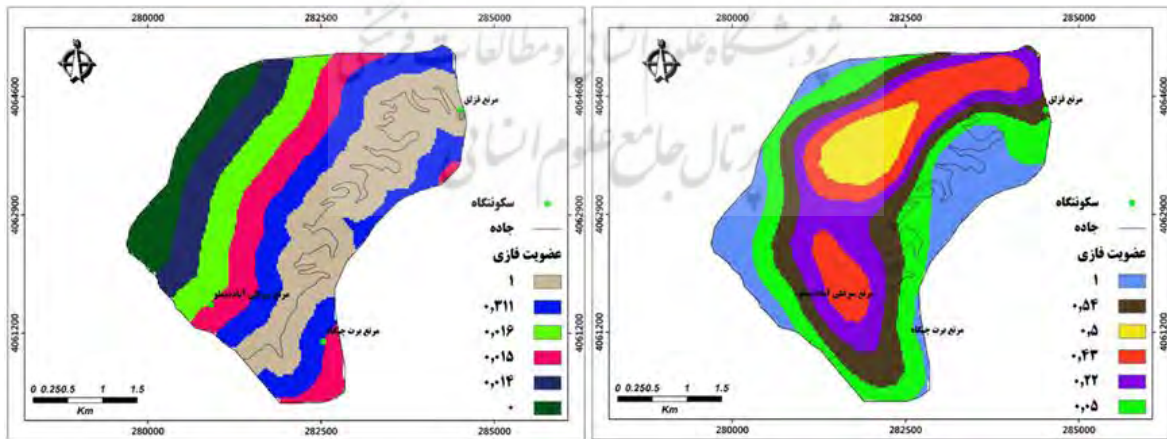
شکل ۶: نقشه فازی شده متغیر زمین شناسی

شکل ۵: نقشه فازی شده متغیر جهت دامنه



شکل ۸: نقشه فازی شده متغیر پوشش گیاهی

شکل ۷: نقشه فازی شده متغیر کاربری اراضی

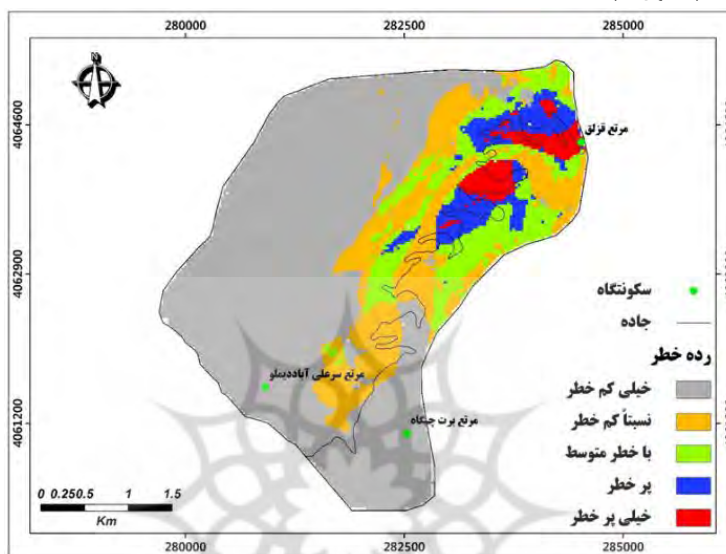


شکل ۱۰: نقشه فازی شده متغیر فاصله از جاده

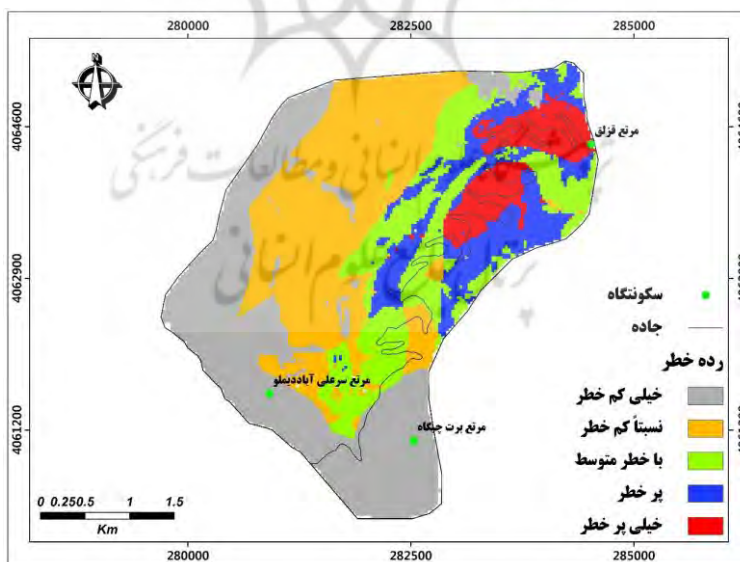
شکل ۹: نقشه فازی شده متغیر تراکم آبراهه

پس از تعیین وزن طبقات هر یک از عوامل موثر بر رخداد زمین لغزش، تهیه 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 پهنه‌بندی با گامای ۰/۷ نشان می‌دهد که مساحت طبقه خیلی پر خطر در حد فاصل جنگل توسکستان تا گرگان ۰/۴۷ کیلومتر مربع (۳/۲۳ درصد از کل مساحت)، طبقه پر خطر با ۰/۸۲

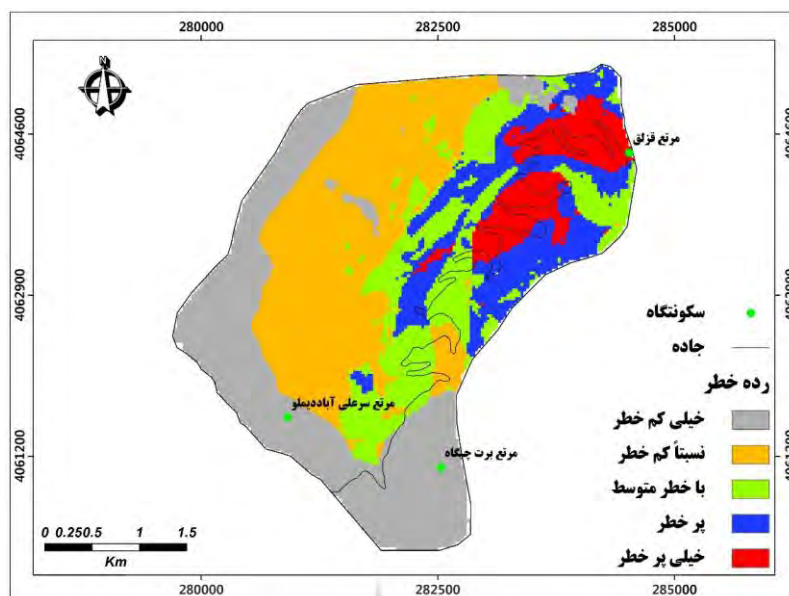
کیلومتر مربع (۵/۶۷ درصد از مساحت منطقه)، طبقه با خطر متوسط ۱/۶۵ کیلومتر مربع (۱۱/۴۱ درصد از مساحت منطقه) و طبقات نسبتاً کم خطر و خیلی کم خطر هم به ترتیب ۲/۵۴ و ۸/۹۵ کیلومتر مربع (معادل ۱۷/۶۳ و ۶۲/۰۵ درصد از مساحت منطقه) مورد بررسی را در بر گرفته اند (جدول ۲). در نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با گامای ۰/۸، مساحت طبقات خیلی پر خطر، پر خطر، با خطر متوسط، نسبتاً کم خطر و خیلی کم خطر به ترتیب ۱/۰۵، ۱/۷۴، ۲/۵۶، ۴/۴۳ و ۴/۶۳ کیلومتر مربع هستند. در نقشه‌ی پهنه‌بندی با گامای ۰/۹، مساحت پهنه‌ها به ترتیب ۱/۱۹، ۱/۹۴، ۲/۴۹، ۴/۶۲ و ۴/۱۸ کیلومتر مربع است (جدول ۳).



شکل ۱: 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

گاما ۰/۹		گاما ۰/۸		گاما ۰/۷		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 ۲/۴۲، ۲/۲ و ۲/۳ بدست آمده است. مقدار دقت روش (P) برای سه عملگر فازی استفاده شده به ترتیب ۰/۳۴، ۰/۲۳ 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 ۲/۴۲، بالاترین مقدار QS را در میان سایر عملگرهای گاما دارد؛ پس این عملگر به‌عنوان 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، به‌عنوان مناسبترین عملگر در تعیین پتانسیل زمین‌لغزش در حوضه آبخیز شیرود به شمار می‌رود.

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

مدل پهنه بندی	رده خطر لغزش	مساحت پهنه به کیلومتر مربع (Ai)	مساحت لغزش پهنه به کیلومتر مربع (Si)	نسبت تراکمی (DR)	درصد مساحت (S)	در QS هر رده	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	۰,۲۹	۰,۲۹	۲,۳	۰,۲۲
	۲	۴,۶۲	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۳۲	۰,۲۸		
	۳	۲,۴۹	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 منعکس‌کننده‌ی 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 نقش کلیدی در جابجایی و حمل مواد دامنه‌ای منطقه به خصوص دامنه‌های مشرف به راه‌های ارتباطی داشته است. دامنه‌های با جهت شمالی به دلیل 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 منبع 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 یخندان 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 سنگ‌شناسی 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 پوش گیاهی، مقدار عضویت فازی ۱ برای بخش‌هایی از منطقه بدست آمد که تراکم پوش 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 فراوان‌تر 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 کنترل‌کننده وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز نازلوچای 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 مشابه نیز مورد استفاده قرار گرفته است (نوجوان و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از روش‌های انتخاب شده، میزان دقت متفاوتی را در تهیه نقشه نهایی پهنه‌بندی نشان داد. اگرچه 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 بیان‌کننده ارجحیت روش‌ها است، می‌تواند ناشی از مواردی مانند یکسان نبودن ماهیت پارامترها و عوامل شرکت‌دهنده 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 ۰/۷ مبتنی 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 پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در استان کرمان با مدل‌های فازی و AHP نشان داد که عملگر گامای فازی با لاندای ۰/۷ نسبت به سایر روش‌های ارائه شده دارای مطلوبیت بهتری در پهنه‌بندی 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 پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش استان کرمان با مدل‌های فازی و AHP، فصلنامه زمین‌شناسی محیط زیست، ۱۰(۳۷)، ۴۴-۲۵.
- احمدی، ح؛ اسمعیلی، ا؛ فیض‌نیا، س؛ شریعت جعفری، م.، ۱۳۸۲، پهنه‌بندی خطر حرکت‌های توده‌ای با استفاده از دو روش رگرسیون چند متغیره MR و تحلیل سلسله مراتبی AHP (مطالعه موردی حوزه آبخیز گرمی چاه)، مجله منابع طبیعی ایران، ۵۶(۴)، ۳۳۶-۳۲۳.

- بهشتی فر، س؛ مسگری، م؛ ولدان زوج، م؛ کریمی، م.، ۱۳۸۹، استفاده از منطق فازی در محیط GIS به منظور مکان یابی نیروگاههای گازی، نشیبه مهندسی عمران و نقشه برداری، ۴۴(۴)، ۵۹۵-۵۸۳.
- رستمی، ذ؛ المدرسی، س؛ جمالی، ع.، ۱۳۹۸، پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی (مطالعه ی موردی: حوضه ی آبخیز سد چم گردلان ایلام)، مخاطرات محیط طبیعی، ۸(۲۲)، ۱۸-۱.
- روستایی، ش؛ حجازی، ا؛ رجبی، م؛ جلالی، ن؛ نجفی ایگدیر، ا.، ۱۳۹۷، کاربرد منطق فازی در پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز نازلوچای، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۶(۴)، ۱۱۹-۱۰۳.
- سوری، س؛ بهاروند، س؛ فرهادی نژاد، ط.، ۱۳۹۲، پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: حوضه چم سنگر)، نشریه سنجش از دور وسامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۴(۱۳)، ۶۰-۴۷.
- شادفر، ص.، ۱۳۸۴، پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، مطالعه موردی حوضه آبخیز چالکرو، پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، شماره ۷۵، ۱۲۶-۱۱۸.
- شیرانی، ک؛ سیف، ع؛ علیمردی، م.، ۱۳۹۲، صحت سنجی روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و رگرسیون چند متغیره (MR) در پهنه بندی خطر زمین لغزش به کمک تکنیک GIS (مطالعه موردی: حوضه رودخانه ماربر)، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۱(۲)، ۹۱-۱۰۸.
- صالح پور میلانی، ع؛ یمانی، م.، ۱۳۹۷، پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه 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 مدل های تصمیم گیری چند معیاره (مطالعه موردی: حوضه رود-دره)، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، شماره ۲۲، ۱۰۷-۸۵.
- طولابی، س؛ عابدینی، م.، ۱۳۹۵، پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش حوضه نوزیان با مدل های همپوشانی فازی و AHP، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۰(۳۴)، ۹۳-۱۰۳.
- عبادی نژاد، س؛ یمانی، م؛ مقصودی، م؛ شادفر، ص.، ۱۳۸۶، ارزیابی کارایی عملگرهای منطق فازی در تعیین توانمندی زمین لغزش در حوضه آبخیز شیرو، علوم مهندسی آبخیزداری، ۱(۲)، ۳۹-۴۴.
- کورکی نژاد، م؛ اونق، م؛ اسلامی، م؛ کبیر، آ؛ شفیق زاده، ا.، ۱۳۸۴، پهنه بندی 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 زمین لغزش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سردارآباد استان لرستان)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۵، ۷۵-۹۶.
- متکان، ع؛ سمیعا، ج؛ پورعلی، س؛ صفایی، م.، ۱۳۸۸، مدل های منطق فازی و سنجش از دور جهت پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه ی آبخیز لاجیم، فصل نامه زمین شناسی کاربردی، ۵(۴)، ۳۲۵-۳۱۸.
- مرادی، ح؛ پورقاسمی، ح؛ محمدی، م؛ مهدویفر، م.، ۱۳۸۹، پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردی: حوضه آبخیز هراز)، علوم محیطی، ۷(۴)، ۱۴۲-۱۲۹.
- نادری، ف.، ۱۳۹۱، کاربرد منطق فازی در پهنه بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبخیز چرداول ایلام، پژوهش های آبخیزداری، شماره ۹۴، ۸۵-۷۴.
- نوجوان، م؛ شاه زیدی، س؛ داوودی، م؛ امین رعایا، ه.، ۱۳۹۸، پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از تلفیق دو مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و فازی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کمه، استان اصفهان، پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۷(۴)، ۱۵۹-۱۴۲.

- Abbasi, H., Sharafi, 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, ..., 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.
- Neaupane, 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.