

تهیه نقشه حساسیت به خطر زمین لغزش و ارزیابی آن با استفاده از اپراتورهای فازی

حمیدرضا پورقاسمی^۱، حمیدرضا مرادی^{۱*}، مجید محمدی^۱ و محمدرضا مهدویفر^۲

(تاریخ دریافت: ۸۶/۱۱/۲؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۷/۲۱)

چکیده

شناخت نواحی مستعد وقوع زمین لغزش یکی از اقدامات اولیه در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای و عمرانی است. هدف از این تحقیق، پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در بخشی از حوزه آبخیز هراز در حد فاصله روستای وانا تا امامزاده علی با استفاده از توابع عضویت فازی و اپراتورهای فازی است. ابتدا نقاط لغزشی با استفاده از عکس‌های هوایی و بازدیدهای میدانی مشخص و متعاقب آن نقشه پراکنش زمین لغزش منطقه تهیه گردید. سپس هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه از قبیل شیب، جهت شیب، ارتفاع، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از جاده، فاصله از شبکه آبراهه، فاصله از گسل و نقشه همباران در محیط GIS تهیه گردید. داده‌های مذکور در فرمت‌های برداری و رستری در محیط نرم افزار Idrisi و پس از تعیین مقادیر و توابع عضویت فازی صورت گرفت. در این مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل‌های فازی با استفاده از نرم‌افزار Idrisi و پس از تعیین مقادیر و توابع عضویت فازی صورت گرفت. در این تحقیق از اپراتورهای فازی مختلفی همچون Or, And, Product, Sum, Gamma استفاده گردید. نتایج نشان داد اپراتور فازی گاما با مقدار $\lambda = 0/975$ بیشترین دقت را در تهیه نقشه حساسیت به خطر زمین لغزش در منطقه مورد مطالعه دارد.

واژه‌های کلیدی: زمین لغزش، منطق فازی، اپراتورهای فازی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، حوزه آبخیز هراز

مقدمه

ناپایداری‌های دامنه‌ای، منطقی می‌نماید. در حالی که بسیاری از اطلاعات بالا به صورت محاوره‌ای بوده و از نوع اطلاعات غیر دقیق می‌باشند. این گونه محدودیت‌ها دقیقاً ایده اساسی تئوری فازی می‌باشد (۳ و ۷). از جمله مطالعاتی که در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی انجام شد عبارت‌اند از: مهدویفر (۱۳۷۶) در منطقه خورش رستم در جنوب غربی شهرستان خلخال به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش پرداخت. در این مطالعه، منطقه خورش رستم با استفاده از شبکه منظم به

بررسی ناپایداری‌های دامنه‌ای و خطر زمین لغزش مانند بسیاری از موضوعات زمین‌شناسی محیطی (Geo Environment) به دلیل تنوع عوامل مؤثر در وقوع آن، بسیار پیچیده است. وجود عدم قطعیت که ناشی از مبهم بودن شرایط و مفاهیم مرتبط با پارامترهایی نظیر زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، تکنونیک، پوشش گیاهی، بارندگی و فرسایش در بروز ناپایداری دامنه‌ای می‌باشد، لزوم استفاده از روش‌های دقیق و مناسب را در بررسی

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استادیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

۲. استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: morady5hr@yahoo.com

۵۰۷۱ واحد مربع شکل با ابعاد ۵۰۰ متر تقسیم گردید. سپس واحدهای مذکور از نظر وجود عوامل مختلف لغزش همچون زمین‌شناسی، درصد شیب دامنه، تیپ اراضی، فاصله از گسل و نهشته‌های لغزشی مورد بررسی قرار گرفته و به وسیله مجموعه‌های فازی پهنه‌بندی گردیدند. جانگ و همکاران در جنوب تایوان به بررسی و تهیه نقشه ناپایداری دامنه با استفاده از مجموعه‌های فازی پرداختند (۱۸). به این منظور ۴ طبقه از عوامل مؤثر در پایداری دامنه‌های طبیعی شامل زمین‌شناسی، توپوگرافی، عوامل زیست‌محیطی (پوشش گیاهی و کاربری اراضی) و داده‌های هواشناسی (ماکزیمم بارش روزانه) به منظور تجزیه و تحلیل به عنوان لایه‌های اطلاعاتی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحلیل، بیشتر سطح منطقه در کلاس خطر متوسط تا زیاد (۰/۶۲-۰/۷۲) قرار گرفته است. بیناگی و همکاران در ایتالیا با استفاده از دو روش فاکتور اطمینان و تئوری فازی Dempster-Shafer به ارزیابی و مقایسه خطر لغزش پرداختند (۱۲). در این مطالعه شش عامل مؤثر بر زمین-لغزش از قبیل زمین‌شناسی، شیب، کاربری اراضی، جهت، فاصله از گسل و فاصله از شبکه آبراهه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دو روش فوق پتانسیل بالایی در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش بخصوص در مناطق با لایه‌های اطلاعاتی محدود، دارا می‌باشند. چی و همکاران در کشور کره به منظور تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش از منطق فازی استفاده کردند. در این تحقیق از شبکه‌های استنتاج فازی با عملگرهای مختلف، به ویژه ترکیبی از عملگرهای Or و λ (گاما) استفاده گردید (۱۳). نتایج نشان داد که تئوری مجموعه فازی با روش‌های کمی پهنه‌بندی و ترسیم نقشه خطر زمین‌لغزش تفاوت زیادی داشته و از انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به آن برخوردار است. ارکانگلو و همکاران در شمال غربی ترکیه به ارزیابی و تهیه نقشه حساسیت به زمین‌لغزش با استفاده از مجموعه‌های فازی و قوانین اگر-آنگاه (If-Then) پرداختند (۱۴). نتایج نشان داد که ۵۳ درصد لغزش‌های اتفاق افتاده در کلاس‌های حساسیت بالا به خطر لغزش [زیاد (۲۸٪) و خیلی زیاد (۲۵٪)] قرار دارند.

پیستوجی و همکاران در کوه‌های آپنین ایتالیا به بررسی و تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش با روش‌های مدل احتمالی بیس، منطق فازی، عملگرهای جبری فازی و فاکتور اطمینان پرداختند (۲۱). نتایج نشان داد که منطق فازی دقت بیشتری در تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش نسبت به مدل احتمالی بیس و فاکتور اطمینان دارد. تنگستانی در حوزه آبخیز کاکان در شمال غربی استان فارس به بررسی و تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش با استفاده از عملگر فازی گاما در محیط GIS پرداخت (۲۴). نتایج نشان داد که عملگر فازی گاما با مقدار $\lambda = ۰/۹۴$ بهترین شکل نقشه حساسیت به خطر زمین‌لغزش را در حوزه آبخیز کاکان نشان داده است. ارکانگلو و همکاران در ترکیه از روابط فازی در تهیه نقشه حساسیت به زمین‌لغزش برای مناطق مستعد به لغزش استفاده کردند (۱۴). نتایج نشان داد که ۶/۹ درصد از منطقه حساسیت خیلی بالا، ۱۰/۳ درصد حساسیت بالا، ۸/۹ درصد متوسط، ۲۷/۵ درصد حساسیت کم و ۴۳/۸ درصد حساسیت بسیار کمی به لغزش دارند. زو و همکاران در ۳ منطقه چین به تهیه نقشه حساسیت به خطر زمین‌لغزش با استفاده از GIS، قضاوت کارشناسی و منطق فازی پرداختند (۲۶). در این تحقیق، مفاهیم منطق فازی به منظور تهیه نقشه خطر لغزش به صورت مقادیر عضویت فازی (کلاس‌های مختلف حساسیت‌پذیری به لغزش) ارائه و از موتور استنتاج فازی به منظور تخمین درجه عضویت فازی برای عوامل مؤثر بر لغزش از قبیل زمین‌شناسی، توپوگرافی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی استفاده گردید. نتایج نشان داد که درجه عضویت تخمین زده شده در تهیه نقشه خطر لغزش بسیار مناسب بوده است. اسکرنتاندر در منطقه ریو بلانکو کشور نیکاراگوئه به آنالیز و تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی پرداخت (۲۳). در این تحقیق توپوگرافی، زمین‌شناسی، بافت خاک و پوشش گیاهی به عنوان عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش انتخاب و با استفاده از عملگر فازی گاما وزن‌دهی گردیدند. مقادیر مختلفی از عملگر فازی گاما (۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸) برای تهیه نقشه خطر لغزش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملگر فازی گاما با مقدار

منطقه مورد مطالعه از طرف شمال به قله دماوند با ارتفاع ۵۶۷۱ متر و از جنوب به کوه قروقچی با ارتفاع ۳۰۵۹ متر و از شرق به روستای وانا و از غرب به روستای پلور ختم می‌شود. وجود رشته کوه البرز از یک طرف و دریای خزر از طرف دیگر موجب بوجود آمدن وضعیتی ویژه در اقلیم این منطقه گشته است. فصل‌های بهار و زمستان پرباران‌ترین فصل‌های سال بوده و در زمستان بارندگی عموماً به شکل برف است. ویژگی اصلی اقلیم منطقه، وجود یک فصل خشک در تابستان است که ۳ و گاهی تا ۵ ماه به طول می‌انجامد.

روش تحقیق

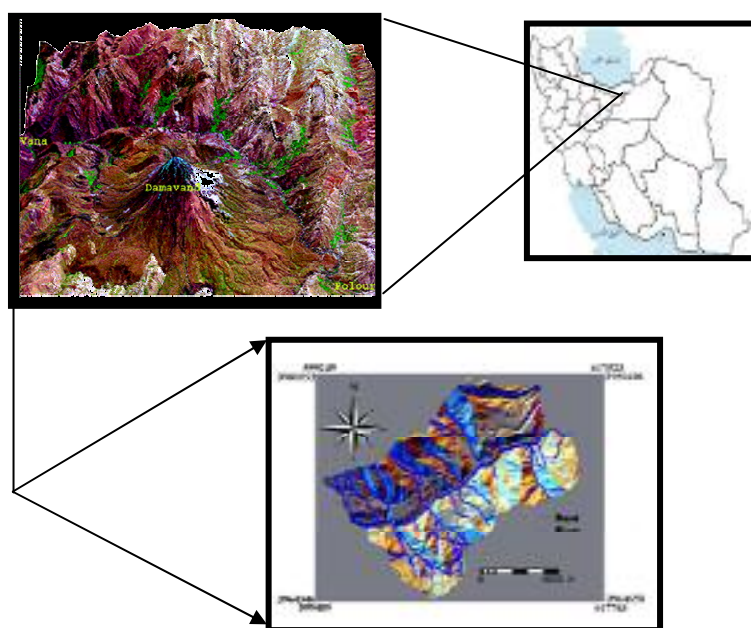
برای آنالیز خطر احتمالی زمین لغزش، شناسایی صحیح مناطق لغزشی امری ضروری به حساب می‌آید. لذا با استفاده از عکس‌های هوایی موجود نقاط لغزشی شناسایی و به منظور ارزیابی نتایج تفسیر عکس‌های هوایی، بازدیدهای صحرائی از منطقه مورد مطالعه صورت پذیرفت. هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش در منطقه شناسایی و نقشه‌های مربوطه در محیط نرم‌افزار ILWIS رقومی گردید. نقشه‌های پایه مورد استفاده در تحقیق عبارت‌اند از: نقشه توپوگرافی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه کاربری اراضی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و با استفاده از آمار بارندگی ایستگاه‌های باران سنجی، نقشه همباران تهیه گردید. آنگاه با استفاده از مدل احتمالی نسبت فراوانی (Frequency Ratio) سطح هم‌بستگی بین نقاط لغزشی موجود و هر یک از عوامل مؤثر تعیین گردید. برای محاسبه نسبت فراوانی هر یک از عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش مشخص، سپس با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی درصد سلول‌های (Pixels) لغزشی و فاقد لغزش منطقه مورد مطالعه تعیین و نهایتاً نسبت فراوانی برای هر یک از عوامل و کلاس‌های مرتبط با آن با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (جداول ۱ تا ۹).

$$FR = A/B \quad [1]$$

$\lambda = 0/8$ بهترین شکل نقشه حساسیت به لغزش را در منطقه مورد مطالعه نشان داده است. گورسوسکی و همکاران به منظور تهیه نقشه خطر زمین لغزش، از منطق فازی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده کردند (۱۷). نتایج نشان داد که این روش به علت انعطاف‌پذیری و دقت بالایی که دارد، می‌تواند به عنوان یک ابزار در تصمیم‌گیری و تهیه نقشه خطر لغزش مؤثر واقع شود. لی در کره با استفاده از عملگرهای جبری فازی به تهیه نقشه خطر زمین لغزش پرداخت (۲۰). در این تحقیق مکان‌های لغزشی با استفاده از تصاویر ماهواره KOMPSAT-1 و مطالعات صحرائی مشخص گردید. عوامل مؤثر بر لغزش در منطقه از قبیل شیب، جهت، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، بافت خاک و کاربری اراضی با استفاده از عملگرهای فازی وزن‌دهی گردیدند. نتایج نشان داد که در بین عملگرهای فازی، عملگر گاما ($\lambda = 0/975$) بیشترین دقت (۸۴/۶۸٪) در تهیه نقشه حساسیت به لغزش را دارد. نتایج حاصله از تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از مجموعه‌های فازی به دلیل در نظر گرفتن محدوده‌ای از امکان‌ها به جای اعداد، محدودیت روش‌های کمی را برطرف ساخته و تحلیل دقیق‌تری از نقش عوامل طبیعی نسبت به سایر روش‌های کمی ارائه کرده است و به مراتب دقت بیشتری در پیش‌بینی وقوع حوادث طبیعی از جمله زمین لغزش‌ها دارد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در استان مازندران در بخش مرکزی سلسله جبال البرز قرار دارد که خود بخشی از زیر حوزه رودخانه هراز می‌باشد. مقطع انتخابی بخشی از مسیر جاده ارتباطی بین شهرهای آمل و تهران به مساحت ۱۱۴ کیلومتر مربع می‌باشد. این منطقه در دو برکه ۱:۵۰۰۰۰ به نام‌های سنگلده و رینه قرار دارد. منطقه مورد مطالعه بین طول‌های جغرافیایی $38^{\circ} 06' 52''$ تا $35^{\circ} 17' 24''$ شرقی و عرض‌های $35^{\circ} 49' 39''$ تا $35^{\circ} 57' 11''$ شمالی استقرار یافته است. ارتفاع بیشینه و کمینه منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۳۲۹۰ متر و ۱۲۰۰ متر می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. مقادیر عضویت فازی مربوط به عامل شیب

| مقادیر عضویت فازی | Frequency ratio | درصد پیکسل‌های لغزشی | تعداد پیکسل‌های لغزشی | درصد پیکسل‌های فاقد لغزشی | تعداد پیکسل‌های فاقد لغزشی | کلاس بر حسب درصد |
|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|------------------|
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱/۴۳ | ۴۰۲۵۱ | ۰-۵ |
| ۰/۳۴ | ۰/۶۰۸ | ۳/۶۴ | ۲ | ۵/۹۹ | ۱۶۸۴۹۷ | ۵-۱۵ |
| ۱ | ۱/۷۹۴ | ۲۱/۸۲ | ۱۲ | ۱۲/۱۶ | ۳۴۱۹۴۸ | ۱۵-۳۰ |
| ۰/۸۴ | ۱/۵۰۱ | ۳۶/۳۶ | ۲۰ | ۲۴/۲۳ | ۶۸۱۰۲۸ | ۳۰-۵۰ |
| ۰/۳۸ | ۰/۶۸۹ | ۱۸/۱۸ | ۱۰ | ۲۶/۳۹ | ۷۴۱۸۱۲ | ۵۰-۷۰ |
| ۰/۳۷ | ۰/۶۷۱ | ۲۰ | ۱۱ | ۲۹/۷۹ | ۸۳۷۵۳۵ | >۷۰ |

که در آن A: درصد پیکسل‌های لغزشی و B: درصد پیکسل‌های فاقد لغزش است. Product (رابطه ۴)، Sum (رابطه ۵) و Gamma (رابطه ۶) تهیه گردید (۱۱، ۱۳ و ۲۰).

$$\mu_{\text{combination}} = \text{MIN}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad [2]$$

که در آن $\mu_{\text{combination}}$: تابع عضویت فازی تخمینی، μ_A : مقدار عضویت عامل A، μ_B : مقدار عضویت عامل B و ... اپراتور فازی And، عملگر اشتراک مجموعه‌هاست. بدین صورت که حداقل درجه عضویت اعضا را استخراج می‌کند. یعنی در بین کلیه لایه‌های اطلاعاتی حداقل ارزش (وزن) هر

به منظور تجزیه و تحلیل‌های فازی در ابتدا وزن‌های به دست آمده از روش نسبت فراوانی نرمال‌سازی (بین صفر و یک) وارد نرم افزار Idrisi شد. با انتخاب نوع و شکل تابع عضویت، هر یک از نقشه‌های مذکور فازی گردید. آنگاه با استفاده از روابط ۲ تا ۶ نقشه‌های خطر برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از اپراتورهای فازی And (رابطه ۲)، Or (رابطه ۳)،

با استفاده از اپراتورهای فازی And (رابطه ۲)، Or (رابطه ۳)،

جدول ۲. مقادیر عضویت فازی مربوط به عامل جهت شیب

| مقادیر عضویت فازی | Frequency ratio | درصد پیکسل‌های لغزشی | تعداد پیکسل‌های لغزشی | درصد پیکسل‌های فاقد لغزش | تعداد پیکسل‌های فاقد لغزش | کلاس |
|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------|
| ۱ | ۴/۳۱۲ | ۱۰/۹۱ | ۶ | ۲/۵۳ | ۷۰۸۹۱ | شمال |
| ۰/۱۷ | ۰/۷۲۰ | ۱۲/۷۳ | ۷ | ۱۷/۶۷ | ۴۹۵۱۱۰ | شمال شرقی |
| ۰/۱۳ | ۰/۵۷۵ | ۷/۲۷ | ۴ | ۱۲/۶۵ | ۳۵۴۴۲۶ | شرق |
| ۰/۳۴ | ۱/۴۵۷ | ۲۰ | ۱۱ | ۱۳/۷۳ | ۳۸۴۴۶۷ | جنوب شرقی |
| ۰/۲۲ | ۰/۲۱۹ | ۱۲/۷۳ | ۷ | ۱۳/۴۴ | ۳۷۶۳۹۰ | جنوب |
| ۰/۳۶ | ۱/۵۶۴ | ۱۶/۳۶ | ۹ | ۱۰/۴۶ | ۲۹۳۰۱۳ | جنوب غربی |
| ۰/۳۸ | ۱/۶۴۹ | ۱۲/۷۳ | ۷ | ۷/۷۲ | ۲۱۶۳۳۷ | غرب |
| ۰ | ۰/۵۴۵ | ۷/۲۷ | ۴ | ۱۳/۳۳ | ۳۷۳۲۶۰ | شمال غربی |

جدول ۳. مقادیر عضویت فازی مربوط به عامل لیتولوژی

| مقادیر عضویت فازی | Frequency ratio | درصد پیکسل‌های لغزشی | تعداد پیکسل‌های لغزشی | درصد پیکسل‌های فاقد لغزش | تعداد پیکسل‌های فاقد لغزش | کلاس |
|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|
| ۱ | ۴/۳۳۳ | ۳/۶۴ | ۲ | ۰/۸۴ | ۳۶۲۶۸۶ | EK ^{lv} |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۳/۳۱ | ۹۳۴۵۹ | J _d |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۶/۲۳ | ۱۷۵۹۷۰ | J _۱ |
| ۰/۵ | ۲/۱۶۱ | ۳۴/۵۵ | ۱۹ | ۱۵/۹۹ | ۴۷۱۷۸۷ | J _s |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۷۴ | ۲۱۰۴۹ | K _۲ |
| ۰/۲۶ | ۱/۱۰۵ | ۵/۴۵ | ۳ | ۴/۹۳ | ۱۳۹۳۶۳ | K _t |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۲۶ | ۷۲۷۹ | P _d |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۸۶ | ۲۴۴۰۹ | PE _f |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۸۶ | ۲۴۳۹۳ | PE _Z |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱/۱ | ۳۱۱۳۱ | Q ^{ag} |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۵۷ | ۱۶۱۵۱ | Q ^b |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۰۳ | ۷۳۴ | E _K ^{gy} |
| ۰/۲۱ | ۰/۹۲۰ | ۲۷/۲۷ | ۱۵ | ۲۹/۶۳ | ۸۳۸۶۴۵ | Q ^{sc} |
| ۰/۸۳ | ۳/۵۹۳ | ۲۳/۶۴ | ۱۳ | ۶/۵۸ | ۱۸۵۹۶۰ | Q ^t _۱ |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۳/۹۴ | ۱۱۱۳۵۵ | Q ^t _۲ |
| ۰/۱۱ | ۰/۴۷۹ | ۵/۴۵ | ۳ | ۱۱/۳۷ | ۳۲۱۲۶۳ | Q ^{ta} |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۴ | ۱۱۳۸۳ | Q ^{tu} |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۳ | ۸۴۳۹ | TR _{e1} |

EK^{lv}: توف سبز، جریان‌های گدازه و گدازه‌های برشی شده آندزیتی-بازالتی، ه: سنگ آهک تخریمی-تخریبی با لایه‌بندی خوب، سنگ آهک مارنی، J_۱: سنگ آهک چرت‌دار توده‌ای تا لایه‌ای، J_s: شیل و ماسه سنگ تیره رنگ همراه با آثار گیاهی زغالسنگ و سازند شمشک، K_۲: سنگ آهک بیوژنیک و چرتی، K_t: سنگ آهک اوریتولین‌دار (سازند تیزکوه)، P_d: ماسه سنگ کوارتزی با لایه‌بندی متقاطع (سازند دورود)، PE_f: کنگلومرا، آگلومرا، کمی مارن و سنگ آهک (سازند فجن)، PE_Z: سنگ آهک نومولیت و آلئومین‌دار، کنگلومرا (سازند زیارت)، Q^{ag}: آگلومرا، Q^b: اولیون بازالت (قبل از دماوند)، E_K^{gy}: سنگ گچ، Q^{sc}: واریزه، Q^t_۱: پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، Q^t_۲: پادگانه‌های آبرفتی جدید، Q^{ta}: جریان‌های گدازه تراکی-آندزیتی، Q^{tu}: خاکستر توف، لاپیلی توف، TR_{e1}: سنگ آهک نازک لایه.

جدول ۴. مقادیر عضویت فازی مربوط به عامل ارتفاع از سطح دریا

| مقادیر عضویت فازی | Frequency ratio | درصد پیکسل های لغزشی | تعداد پیکسل های لغزشی | درصد پیکسل های فاقد لغزش | تعداد پیکسل های فاقد لغزش | کلاس بر حسب متر |
|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------|
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲/۴۵ | ۶۹۳۹۲ | ۱۲۰۰-۱۵۰۰ |
| ۱ | ۲/۵۲۱ | ۳۴/۵۴ | ۱۹ | ۱۳/۷۰ | ۳۸۷۲۰۲ | ۱۵۰۰-۱۸۰۰ |
| ۰/۵۶ | ۱/۵۱۲ | ۴۰ | ۲۲ | ۲۶/۴۶ | ۷۴۷۹۳۴ | ۱۸۰۰-۲۱۰۰ |
| ۰/۱۹ | ۰/۴۷۶ | ۱۲/۷۳ | ۷ | ۲۶/۷۳ | ۷۵۵۶۱۵ | ۲۱۰۰-۲۴۰۰ |
| ۰/۲۴ | ۰/۵۹۷ | ۱۰/۹۱ | ۶ | ۱۸/۲۶ | ۵۱۶۱۵۸ | ۲۴۰۰-۲۷۰۰ |
| ۰/۰۷ | ۰/۱۶۶ | ۱/۸۲ | ۱ | ۱۰/۹۷ | ۳۱۰۱۸۵ | ۲۷۰۰-۳۰۰۰ |
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱/۴۳ | ۴۰۳۰۴ | >۳۰۰۰ |

جدول ۵. مقادیر عضویت فازی مربوط به عامل کاربری اراضی

| مقادیر عضویت فازی | Frequency ratio | درصد پیکسل های لغزشی | تعداد پیکسل های لغزشی | درصد پیکسل های فاقد لغزش | تعداد پیکسل های فاقد لغزش | کلاس |
|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|
| ۰/۰۳ | ۰/۸۳۰ | ۱۸/۱۸ | ۱۰ | ۲۱/۹۱ | ۶۱۷۴۸۲ | مرتع خوب |
| ۰ | ۰/۶۷۸ | ۴۳/۶۲ | ۲۴ | ۶۴/۳۲ | ۱۸۱۲۸۱۰ | مرتع متوسط |
| ۰/۰۷ | ۲/۱۶۰ | ۲۹/۱ | ۱۶ | ۱۳/۴۷ | ۳۷۹۷۷۷ | مخلوط باغ و کشاورزی |
| ۱ | ۳۰/۳۳۳ | ۹/۱ | ۵ | ۰/۳ | ۸۳۳۷ | مسکونی |

جدول ۶. مقادیر عضویت فازی مربوط به عامل فاصله از گسل

| مقادیر عضویت فازی | Frequency ratio | درصد پیکسل های لغزشی | تعداد پیکسل های لغزشی | درصد پیکسل های فاقد لغزش | تعداد پیکسل های فاقد لغزش | کلاس |
|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|---------|
| ۰/۷۷ | ۱/۸۴۵ | ۷/۲۷ | ۴ | ۳/۹۴ | ۱۱۱۳۹۰ | ۱۰۰-۰ |
| ۰/۸۰ | ۱/۹۲۳ | ۷/۲۷ | ۴ | ۳/۷۸ | ۱۰۶۸۶۰ | ۲۰۰-۱۰۰ |
| ۱ | ۲/۴ | ۹/۱ | ۵ | ۳/۷۹ | ۱۰۷۰۰۴ | ۳۰۰-۲۰۰ |
| ۰/۳۹ | ۰/۹۴۵ | ۳/۶۴ | ۲ | ۳/۸۵ | ۱۰۸۹۳۱ | ۴۰۰-۳۰۰ |
| ۰ | ۰/۸۶۰ | ۷۲/۷۲ | ۴۰ | ۸۴/۶۴ | ۲۳۹۲۶۰۵ | >۴۰۰ |

که حداکثر درجه عضویت اعضاء را استخراج می کند. یعنی در بین کلیه لایه های اطلاعاتی حداکثر ارزش (وزن) هر پیکسل را استخراج و در نقشه نهایی منظور می کند به همین دلیل این اپراتور در پهنه بندی خطر زمین لغزش تقریباً تمام سطح منطقه را در کلاس خطر خیلی زیاد قرار می دهد.

پیکسل را استخراج کرده و در نقشه نهایی منظور می کند به همین دلیل این اپراتور در پهنه بندی خطر زمین لغزش تقریباً تمام سطح منطقه را در کلاس خطر کم قرار می دهد.

$$\mu_{\text{combination}} = \text{MAX}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad [3]$$

اپراتور فازی Or، عملگر اجتماع مجموعه هاست. بدین صورت

جدول ۷. مقادیر عضویت فازی مربوط به عامل فاصله از شبکه آبراهه

| کلاس | تعداد پیکسل‌های فاقد لغزش | درصد پیکسل‌های فاقد لغزش | تعداد پیکسل‌های لغزشی | درصد پیکسل‌های لغزشی | Frequency ratio | مقادیر عضویت فازی |
|---------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|-------------------|
| ۱۰۰-۰ | ۶۶۸۷۸۶ | ۲۳/۶۶ | ۳۳ | ۶۰ | ۲/۵۳۶ | ۱ |
| ۲۰۰-۱۰۰ | ۴۹۸۵۶۶ | ۱۷/۶۴ | ۵ | ۹/۱ | ۰/۵۱۶ | ۰/۲۰ |
| ۳۰۰-۲۰۰ | ۳۹۲۹۹۲ | ۱۳/۹۰ | ۸ | ۱۴/۵۳ | ۱/۰۴۵ | ۰/۴۱ |
| ۴۰۰-۳۰۰ | ۳۲۱۹۹۰ | ۱۱/۳۹ | ۲ | ۳/۶۴ | ۰/۳۱۹ | ۰ |
| >۴۰۰ | ۹۴۴۴۵۶ | ۳۳/۴۱ | ۷ | ۱۲/۷۳ | ۰/۳۸۱ | ۰/۱۵ |

جدول ۸. مقادیر عضویت فازی مربوط به عامل فاصله از جاده

| کلاس | تعداد پیکسل‌های فاقد لغزش | درصد پیکسل‌های فاقد لغزش | تعداد پیکسل‌های لغزشی | درصد پیکسل‌های لغزشی | Frequency ratio | مقادیر عضویت فازی |
|---------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|-------------------|
| ۱۰۰-۰ | ۳۳۴۷۰۳ | ۱۱/۸۴ | ۲۴ | ۴۳/۶۴ | ۳/۶۸۶ | ۱ |
| ۲۰۰-۱۰۰ | ۲۷۰۱۷۸ | ۹/۵۶ | ۳ | ۵/۴۵ | ۰/۵۷۰ | ۰/۱۶ |
| ۳۰۰-۲۰۰ | ۲۳۲۲۰۰ | ۸/۲۱ | ۴ | ۷/۲۷ | ۰/۸۸۵ | ۰/۲۴ |
| ۴۰۰-۳۰۰ | ۲۰۶۷۶۰ | ۷/۳۱ | ۴ | ۷/۲۷ | ۰/۹۹۴ | ۰/۲۷ |
| ۵۰۰-۴۰۰ | ۱۸۷۶۴۲ | ۶/۶۴ | ۳ | ۵/۴۵ | ۰/۸۲۱ | ۰/۲۲ |
| ۵۰۰> | ۱۵۹۵۳۰۷ | ۵۶/۴۴ | ۱۷ | ۳۰/۹۲ | ۰/۵۴۸ | ۰ |

جدول ۹. مقدار QS اپراتورهای مختلف فازی به منظور ارزیابی بهترین نقشه خطر لغزش

| Qs | روش پهنه‌بندی خطر زمین لغزش | ردیف |
|--------|-----------------------------|------|
| ۰/۳۵۶۵ | اپراتور AND | ۱ |
| ۰/۱۵۱۱ | اپراتور OR | ۲ |
| ۰/۰۰۲۶ | اپراتور Sum | ۳ |
| ۱/۰۴۰۸ | اپراتور Product | ۴ |
| ۱/۳۱۹ | اپراتور Gamma (۰/۵) | ۵ |
| ۱/۷۹۷ | اپراتور Gamma (۰/۸) | ۶ |
| ۲/۰۷۹ | اپراتور Gamma (۰/۹) | ۷ |
| ۲/۱۴۹ | اپراتور Gamma (۰/۹۷۵) | ۸ |

صفر میل کند و در نتیجه تعداد پیکسل کمتری در کلاس حساسیت به خطر زیاد و خیلی زیاد به لغزش قرار گیرد.

$$\mu_{\text{combination}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad [5]$$

در این اپراتور، متمم ضرب متمم مجموعه‌ها محاسبه

$$\mu_{\text{combination}} = \prod_{i=1}^n \mu_i, \quad [4]$$

که در آن μ_i تابع عضویت فازی می‌باشد. در این اپراتور تمامی لایه‌های اطلاعاتی در هم ضرب می‌شوند. این اپراتور باعث می‌شود تا در شکل خروجی، اعداد کوچک‌تر شده و به سمت

جمع کیفی هر یک از نقشه‌های تهیه شده با اپراتورهای مختلف فازی تعیین گردید. هر چه مقدار Q_s بالاتر باشد، نمایانگر جدایش بهتر بین رده‌های خطر مختلف است. (۱۰ و ۱۶).

$$Q_s = \sum_{i=1}^n (Dr - 1)^2 * S \quad [7]$$

که در آن Q_s : جمع کیفی، n : تعداد رده‌های خطر، Dr : نسبت تراکم که بر اساس تقسیم تراکم زمین‌لغزش در رده خطر خاص به تراکم متوسط زمین‌لغزش‌ها بر مبنای تراکم سطحی و یا تعداد زمین‌لغزش محاسبه می‌گردد و S : مساحت رده خطر به درصد در منطقه است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مقادیر عضویت فازی و ارتباط بین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و لغزش‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ تا ۹ ارائه گردید. نتایج بررسی درصد شیب نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه در کلاس شیب ۱۵-۳۰ درصد اتفاق افتاده که با نظرات برخی محققین (۱، ۸ و ۲۰) مطابقت دارد. شایان ذکر است که کلاس شیب ۳۰-۵۰ درصد در درجه دوم اهمیت قرار دارد. نتایج بررسی جهت شیب نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های اتفاق افتاده در جهات شمال و غرب می‌باشد که دلیل این امر را می‌توان به تاثیر رطوبت به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر وقوع حرکات توده‌ای نسبت داد که با نظرات (احمدی و همکاران (۱)، محمدی و همکاران (۸) مطابقت دارد. بررسی طبقات ارتفاعی، نشان داده که کلاس ارتفاعی ۱۵۰۰-۱۸۰۰ (۳۴/۵۴٪) و ۱۸۰۰-۲۱۰۰ متر (۴۰٪) بیشترین درصد لغزش‌ها را به خود اختصاص داده که دارای بیشترین وزن بوده و کلاس ارتفاعی ۱۲۰۰-۱۵۰۰ متر هیچ‌گونه حساسیتی به لغزش در منطقه مورد مطالعه نداشته است. بررسی لیتولوژی حوزه مذکور نشان داده که بیشترین لغزش در سازندهای $Ektv$ ، $Qt1$ و JS رخ داده که به ترتیب از توف سبز، جریان گدازه، پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، شیل، ماسه سنگ تیره همراه با آثار

می‌شود. بنابراین در شکل خروجی، ارزش پیکسل‌ها به سمت یک میل می‌کند و در نتیجه تعداد پیکسل بیشتری در کلاس خطر بالا و خیلی بالا قرار می‌گیرند و به همین دلیل این اپراتور حساسیت خیلی کمی در پهنه‌بندی دارد.

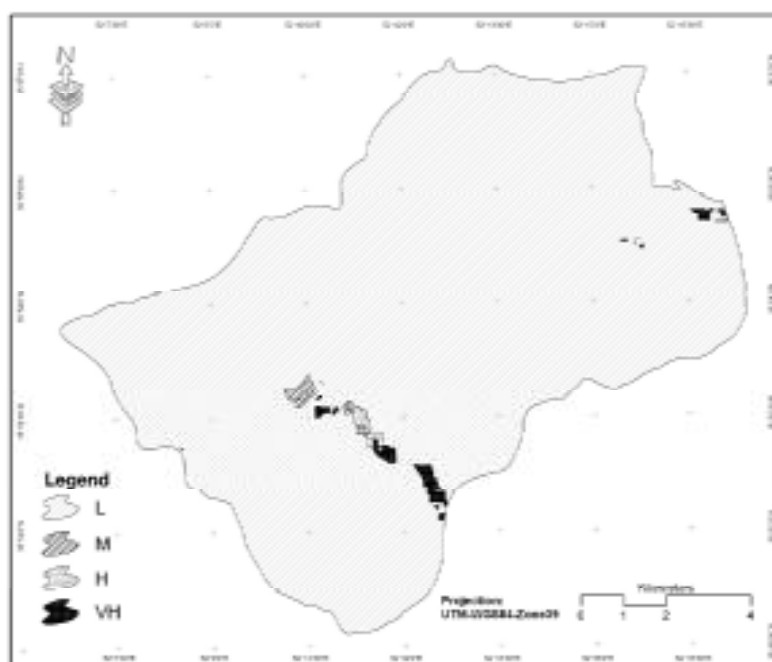
جهت تعدیل حساسیت خیلی بالای اپراتور ضرب فازی (Product) و دقت خیلی کم اپراتور فازی جمع (Sum)، اپراتور دیگری به نام فازی گاما معرفی شده که در زیر نشان داده شده است.

$$[6] \quad (\text{Fuzzy algebraic } \lambda * (\text{Fuzzy algebraic } \mu_{\text{combination}} = \text{product})1 - \lambda$$

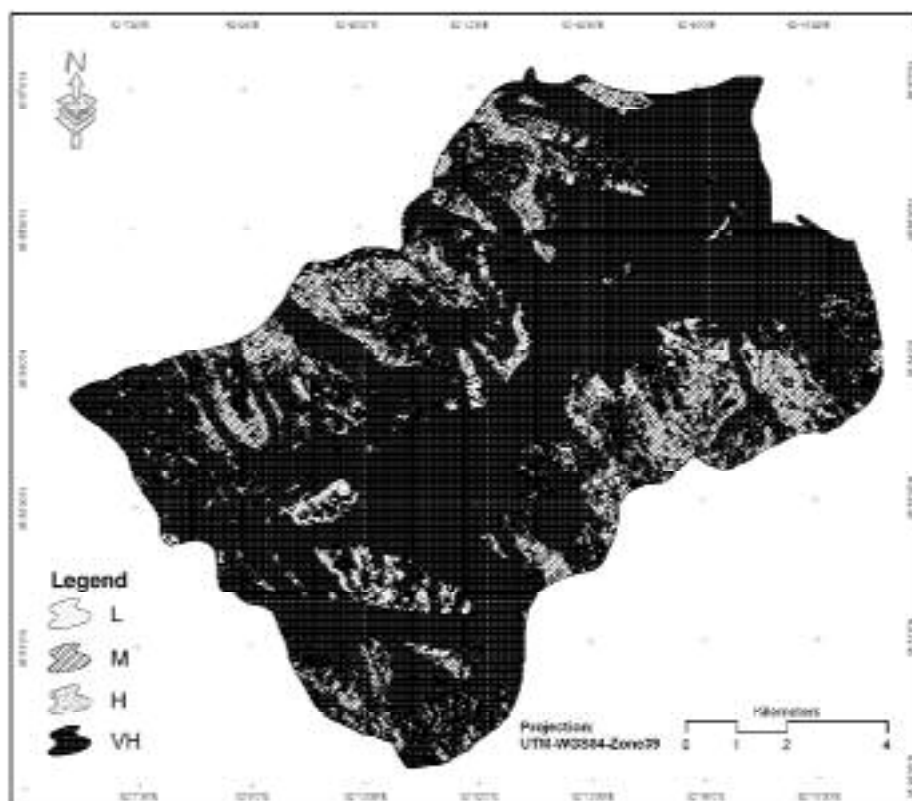
بر طبق رابطه ۷ اگر $\lambda = 1$ باشد نقشه خروجی همان نقشه حاصل از Fuzzy Sum خواهد بود و اگر $\lambda = 0$ باشد نقشه خروجی، نقشه حاصل از Fuzzy Product خواهد بود. بنابراین محدوده تغییرات λ بین صفر و یک می‌باشد. در این تحقیق از تابع فازی گامای مختلفی مانند ۰/۵، ۰/۸، ۰/۹، و ۰/۹۷۵ استفاده گردید.

ارزیابی روش پهنه‌بندی

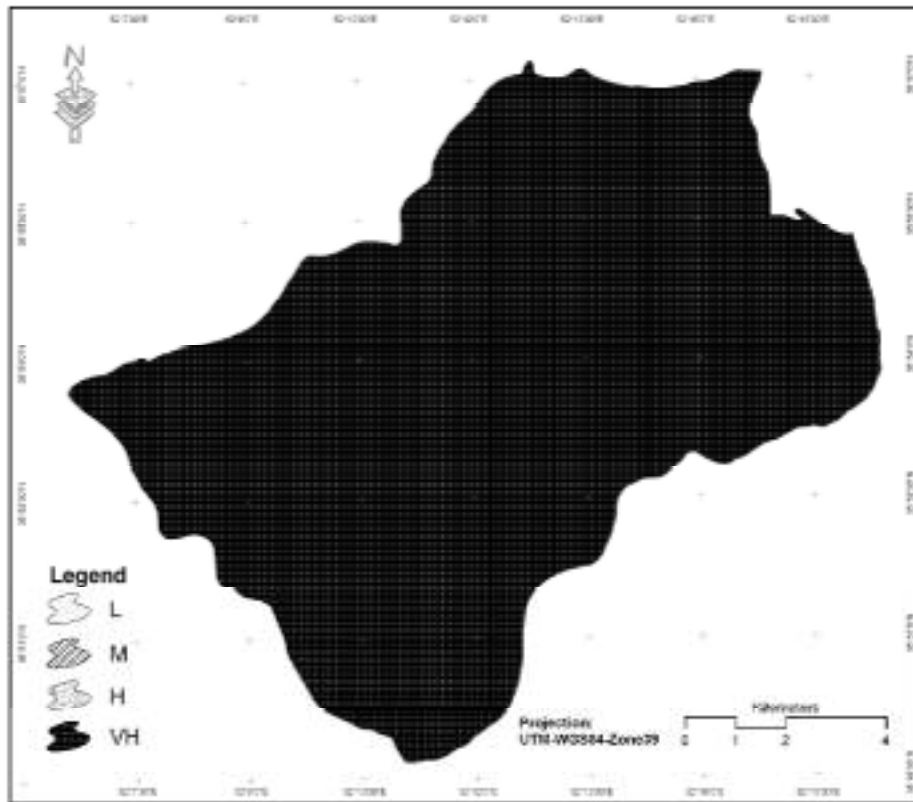
در روش آماری نسبت فراوانی برای وزن‌دهی به لایه‌های مختلف اطلاعاتی از نقشه پراکنش حرکات توده‌ای منطقه استفاده شد. بعد از تهیه نقشه‌های وزنی بر اساس رابطه مدل، نقشه پهنه‌بندی حرکات توده‌ای تهیه و سپس بر اساس روند تغییرات منحنی هیستوگرام طبقه‌بندی گردید. لذا نمی‌توان جهت ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حرکات توده‌ای، از نقشه پراکنش حرکات توده‌ای حوزه استفاده کرد (۲۲). جهت حل این مشکل از ۷۸ نقطه لغزشی که در منطقه شناسایی گردید ۲/۳ نقاط لغزشی (۵۵ نقطه لغزشی) برای مدل سازی و ۱/۳ نقاط لغزشی (۲۳ نقطه لغزشی) برای کالیبره کردن مدل استفاده گردید (۱۹). سپس نقشه حاصله با نقشه پراکنش حرکات توده‌ای مقایسه - گردید. یک نقشه خطر خوب، نقشه‌ای است که بهترین جدایش را بین مناطق با تراکم بالای زمین‌لغزش و مناطق با تراکم پایین زمین لغزش ایجاد نماید. بدین منظور بر اساس رابطه [۷] مقدار



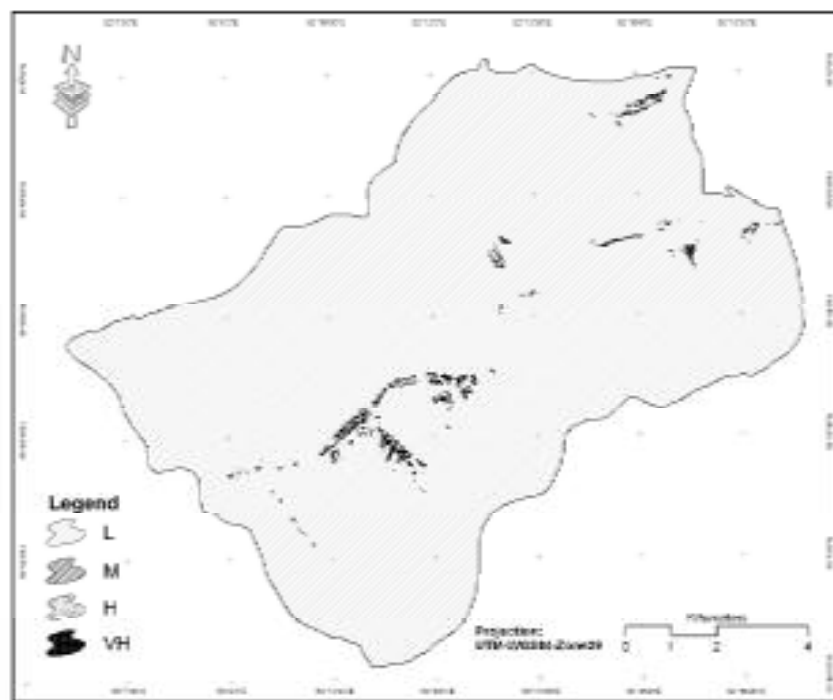
شکل ۲. نقشه خطر لغزش با اپراتور And



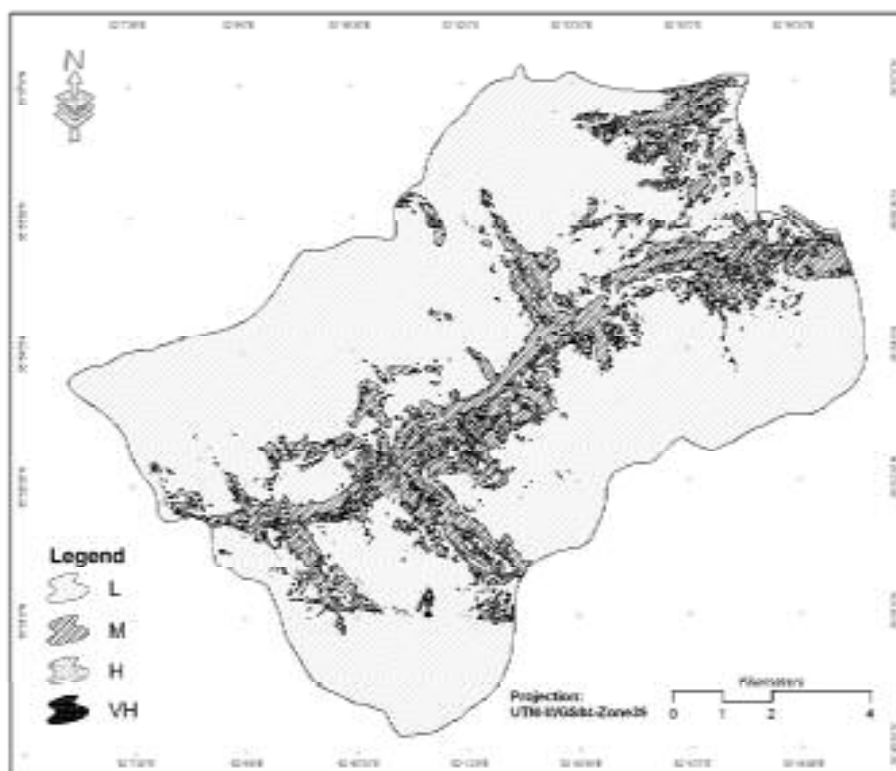
شکل ۳. نقشه خطر لغزش با اپراتور Or



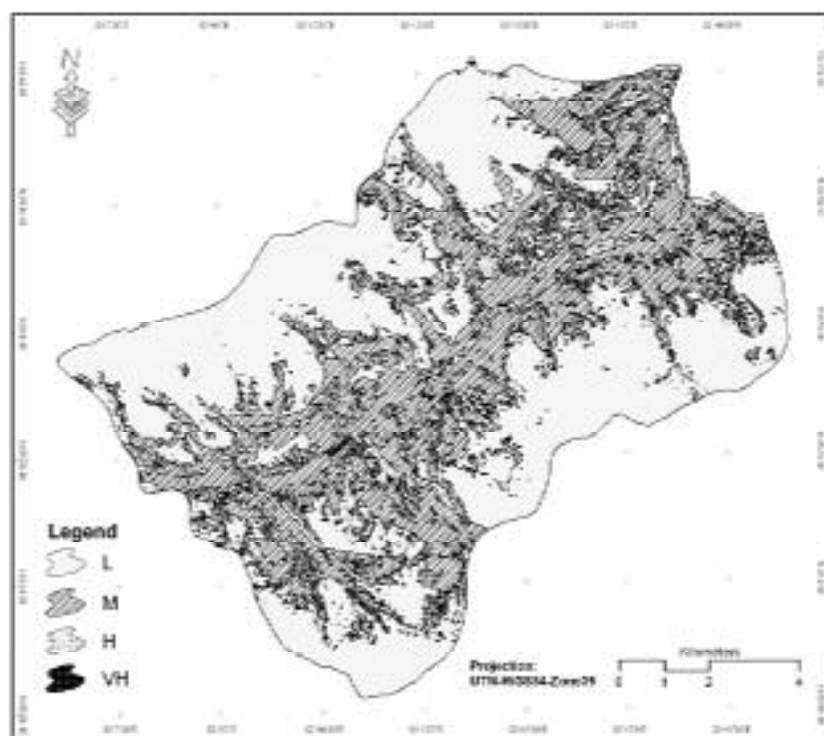
شکل ۴. نقشه خطر لغزش با اپراتور Sum



شکل ۵. نقشه خطر لغزش با اپراتور Product



شکل ۶. نقشه خطر لغزش با اپراتور گامای ۰/۵



شکل ۷. نقشه خطر لغزش با اپراتور گامای ۰/۸



شکل ۸. نقشه خطر لغزش با اپراتور گامای ۰/۹



شکل ۹. نقشه خطر لغزش با اپراتور گامای ۰/۹۷۵

بالا و خیلی بالا قرار می‌گیرند و به همین دلیل این اپراتور حساسیت خیلی کمی در پهنه‌بندی دارد. همچنین نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با اپراتور فازی Product در شکل ۵ نشان داده شد. از آنجایی که در این اپراتور تمامی لایه‌های اطلاعاتی در هم ضرب می‌شوند. لذا این اپراتور باعث شده تا در شکل خروجی، اعداد کوچکتر شده و به سمت صفر میل کند و در نتیجه تعداد پیکسل کمتری در کلاس حساسیت به خطر زیاد و خیلی زیاد به لغزش قرار گرفت. به منظور تعدیل حساسیت خیلی بالای اپراتور ضرب فازی و دقت خیلی کم اپراتور فازی جمع، اپراتور دیگری به نام فازی گاما مورد استفاده قرار گرفت که با نظرات An و همکاران (۱۹۹۱)، چی و همکاران (۱۱) و لی (۲۰) مطابقت دارد. مقادیر مختلفی از اپراتور فازی گاما از قبیل $0/5$ ، $0/8$ ، $0/9$ و $0/975$ به کار گرفته شد (۲۰). نتایج نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با اپراتور فازی گاما با مقادیر مختلف در شکل‌های ۶ تا ۹ ارائه گردید. دقت در شکل‌های ارائه شده نشان می‌دهد که هر چه مقدار گامای انتخابی از $0/5$ به سمت $0/975$ تمایل پیدا می‌کند نقشه‌های حاصله دارای کلاس‌های مختلف شده، جدایش بهتری بین کلاس‌های ارائه شده حاصل گردیده و دقت نقشه‌های تهیه شده بیشتر می‌گردد که با نتایج نظرات چی و همکاران (۱۳)؛ تنگستانی (۲۴)؛ اسکرنتانر (۲۳)؛ لی (۲۰) مطابقت داشته است. نتایج ارزیابی مدل‌های تهیه شده با اپراتورهای فازی مختلف و بر مبنای $1/3$ نقاط لغزشی شاهد در جدول ۹ نشان داده شده است. دقت در جدول مذکور نشان می‌دهد نقشه خطر زمین‌لغزش تهیه شده با اپراتور فازی گاما $0/975$ بیشترین دقت و صحت را با توجه به رابطه ۷ و مقدار QS (۲/۱۴۹) داشته است.

گیاهی زغالسنگ تشکیل شده که بسیار حساس به حرکات توده‌ای می‌باشند که با نتایج به دست آمده توسط شادفر و همکاران (۵) و محمدی و همکاران (۸) مطابقت دارد. بررسی کاربری اراضی منطقه نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های منطقه در کاربری مسکونی اتفاق افتاده که دلیل آن را می‌توان به نقش مؤثر انسان در اکوسیستم‌های طبیعی و تخریب‌هایی که بواسطه تغییرات کاربری اراضی از جمله ساخت و ساز در منطقه بوجود آمده نسبت داد که با نظرات (احمدی و همکاران (۱)، شادفر و همکاران (۵)، فاطمی عقدا و همکاران (۷)، و محمدی و همکاران (۸)، مطابقت دارد. بررسی نتایج فاصله از غسل نشان می‌دهد که بیشتر لغزش‌های اتفاق افتاده در فاصله $200-300$ متری از غسل مشاهده شده است. بررسی عامل فاصله از شبکه آبراهه و فاصله از جاده نشان داد که به ترتیب $64/43\%$ و 60% لغزش‌های اتفاق افتاده منطقه در فاصله 100 متری از جاده و شبکه آبراهه مشاهده شده است که بیشترین فراوانی را از نظر لغزش به خود اختصاص داده‌اند که با نظرات شادفر و همکاران (۵) و فاطمی عقدا و همکاران (۷) مطابقت دارد. نتایج پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تابع عضویت فازی در شکل‌های ۲ تا ۹ ارائه گردید. دقت در شکل‌های ارائه شده نشان می‌دهد که نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تهیه شده با استفاده از اپراتور فازی And (شکل ۲) تقریباً تمام سطح منطقه مورد مطالعه را، در کلاس خطر کم (Low) قرار داده است. اما استفاده از اپراتور فازی Or (شکل ۳) منجر شده که قسمت اعظم منطقه در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گیرد. نتیجه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با اپراتور Sum، در شکل (۴) ارائه گردید. از آنجا که در این اپراتور ارزش پیکسل‌ها به سمت یک میل می‌کند در نتیجه تعداد پیکسل بیشتری در کلاس خطر

منابع مورد استفاده

- احمدی، ح. ش. محمد خان، س. فیض نیا و ج. قدوسی. ۱۳۸۴. ساخت مدل منطقه‌ای خطر حرکت‌های توده‌ای با استفاده از ویژگی‌های کیفی و تحلیل سلسله مراتبی سیستم‌ها (AHP)، مطالعه موردی حوزه آبخیز طالقان، مجله منابع طبیعی ایران ۵۸:

۲. اشقلی فراهانی، ع. ۱۳۸۰. ارزیابی خطر ناپایداری دامنه‌های طبیعی در منطقه رودبار با استفاده از تئوری فازی، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت معلم، تهران.
۳. پورقاسمی، ح.ر.، ح. ر. مرادی، س. م. فاطمی عقدا و م. محمدی. ۱۳۸۵. مقدمه‌ای بر منطق فازی و کاربرد آن در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، مجموعه مقالات همایش منابع طبیعی و توسعه پایدار در عرصه‌های جنوبی دریای خزر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور، ۱۷ اسفند، ۸۵۰-۸۵۵.
۴. تاناکا، ک. ۱۳۸۳. مقدمه‌ای بر منطق فازی برای کاربردهای عملی آن (ترجمه علی وحیدیان کامیاد و حامد رضا طارقیان)، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
۵. شادفر، ص.، م. یمانی و م. نمکی. ۱۳۸۴. پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعاتی، تراکم سطح و LNRE در حوزه چالکروود، مجله آب و آبخیز. ۳: ۶۸-۶۲.
۶. شفاهی، ی. و س. نظری. ۱۳۸۲. تحلیل مساله انتخاب وسیله نقلیه در سفرهای کاری با به کارگیری سیستم‌های ژنتیک-فازی، مجموعه مقالات چهارمین همایش مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن، دانشگاه مازندران، ۷ و ۸ خرداد، ۱۳۸۲، صفحات ۱۱۱-۱۱۸.
۷. فاطمی عقدا، س. م.، ج. غیومیان، م. تشنه لب و ع. اشقلی فراهانی. ۱۳۸۴. بررسی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: منطقه رودبار)، مجله علوم دانشگاه تهران ۳۱ (۱): ۴۳-۶۴.
۸. محمدی، م.، ح. ر. مرادی، ح. ر. پورقاسمی و م. داودی. ۱۳۸۶. بررسی ناپایداری دامنه‌های طبیعی و کاربرد آن در آمایش سرزمین با استفاده از GIS. مجموعه مقالات اولین همایش ملی جغرافیا و آمایش سرزمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، ۲۰ و ۲۱ خرداد، ۹۱-۹۲.
۹. مهدویفر، م.ر. ۱۳۷۶. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش منطقه خورش رستم (جنوب غربی شهرستان خلخال)، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۱۰. میرصانعی، ر. ۱۳۸۲. ارزیابی و کاربرد نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ با استفاده از GIS (مطالعه موردی: تهران)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم، تهران.
11. An, P., W.M. Moon and A. Renez. 1991. Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. *Canad. J. Exploration Geophys.* 27 (1), 1-11.
12. Binaghi, E., L. Luzi, P. Madella, F. Pergalani and A. Rampini. 1998. Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy dempster-shafer approaches. *Natur. Hazards* 17: 77-97.
13. Chi, K.H., N.W. Park and C.J. Chung. 2002. Fuzzy logic integration for landslide hazard mapping using spatial data from Boeun, Korea. *Symposium Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa.*
14. Ercanoglu, M. C. Gokceoglu. 2002. Assessment of landslide susceptibility or a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environ. Geol.* 41: 720-730.
15. Ercanoglu, M., C. Gokceoglu. 2004. Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Eng. Geol.* 75: 229-250.
16. Gee, M.D. 1991. Classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability. PP. 947-952. *In: B. Landslides (Ed.)*, Balkema, Rotterdam.
17. Gorsevski, P.V., P. Jankowski and P.E. Gessler. 2006. Heuristic approach for mapping landslide hazard integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process. *Control and Cybernetics* 35: 1-26
18. Juang, C.H., D.H. Lee and C. Sheu. 1992. Mapping slope failure potential using fuzzy sets. *J. Geotech. Eng. ASCE* 118(3): 475-493.
19. Komac, M.A. 2006. Landslide susceptibility model using the Analytical Hiererchy Process method and multivariate statistics in perialpine Sloveni. *Geomorfology* 74: 17-28.
20. Lee, S. 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environ. Geol.* 52: 615-623.

21. Pistocchi, A., L. Luzi and P. Napolitano. 2002. The use of predictive modeling techniques for optimal exploitation of spatial databases: a case study in landslide hazard mapping with expert system-like methods. *Environ. Geol.* 41: 765-775.
22. Remendo, J., A. Gonzales, J. Teran, A. Cendrero, A. Fabbri and C. Chung. 2003. Validation of landslide susceptibility maps, examples and applications from a case study in northern Spain, *Natural Hazard*, 437-449.
23. Schernthanner, H. 2005. Fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping (Rio Blanco, Nicaragua). Msc Thesis, Institute of Geography, NAWI, Paris Lodron University Salzburg.
24. Tangestani, M.H. 2003. Landslide susceptibility mapping using fuzzy gamma operation in GIS, Kakan catchment area, Iran. *Proceedings of the Map India 2003 Conference*, copyright GIS Development .
25. Zhu, A.X., D. Scott Mackay. 2001. Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling. *J. Hydrol.* 284: 57-77.
26. Zhu, A.X., R.X. Wang, J.P. Qiao, Y.B. Chen, Q.G. Cai and C.H. Zhou. 2003. Mapping landslide susceptibility in the three gorges area, China using GIS, expert knowledge and fuzzy logic. *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment (Proceedings of ICGRHWE held at the Three Gorges Dam, China, and September 2003)*. IAHS Publ. 289, 2004.