

بررسی عوامل مؤثر بر مخاطره زمین لغزش‌های بالادست سد لتیان با استفاده از روش‌های ارزیابی آنتروپی و فازی

مهران مقصودی^۱ - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

شیرین محمدخان - استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پریسا پیرانی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

سمانه ریاهی - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

فاطمه گراوند - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۷/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

چکیده

زمین لغزش‌ها از جمله مخاطرات کاتاستروفیک هستند که شناسایی و بخش‌بندی نواحی مستعد آن، نقشی مهم در ارزیابی خطرات محیطی و مدیریت حوضه آبخیز ایفا می‌کند. حوضه لتیان در بالادست سد لتیان قرار دارد و بیش از ده لغزش با مجموع مساحت ۲/۵۳ کیلومتر مربع در آن شناسایی شده که علاوه بر تهدید مناطق مسکونی، زراعی و باغات منطقه، در محدوده فرسایش بالا قرار دارند که تهدیدی برای افزایش حجم رسوبات ورودی به سد لتیان به شمار می‌روند. در این تحقیق، ده فاکتور مؤثر بر لغزش‌های منطقه شناسایی و پس از تهیه ماتریس مربوطه با مدل آنتروپی اولویت‌بندی شدند، سپس با استفاده از این مدل و روش فازی، پهنه‌های پرخطر شناسایی شدند، نقشه پراکندگی لغزش‌ها با نقشه خطر به دست آمده همپوشانی شد و سهم هر یک از مناطق خطر از نظر وقوع لغزش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که بافت خاک ۱۷/۶۵ درصد، فاصله از گسل ۱۴/۴۲ درصد، پوشش گیاهی ۱۳/۰۵ درصد، فاصله از رودخانه ۱۱/۷۳۱۴ درصد و کاربری اراضی ۱۱/۵۷ درصد و شیب و سنگ‌شناسی ۹/۷۳ درصد در وقوع زمین لغزش‌های منطقه تأثیرگذار بوده‌اند. همچنین در مدل آنتروپی تعداد لغزش‌های رخ داده نسبت به پهنه‌های خطر توزیع منطقی‌تری داراست؛ در صورتی که در مدل فازی این رابطه برقرار نیست.

کلیدواژه‌ها: مخاطره، لغزش، سد لتیان، آنتروپی، فازی.

۱- مقدمه

زمین لغزش‌ها یکی از رایج‌ترین خطرات طبیعی کاتاستروفیک می‌باشند که در بسیاری از نقاط جهان رخ می‌دهند و هر ساله باعث خسارت اقتصادی و مرگ‌ومیر و جراحت می‌شوند (Aleotti & Chowdhur, 1999). ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین لغزش به سبب دشواری ارزیابی توزیع زمانی و مکانی رخداد‌های گذشته به دلیل محدودیت‌ها و فاصله ثبت تاریخی و اطلاعات جغرافیایی، بسیار پیچیده است (Leonardia et al., 2016). شناسایی و بخش‌بندی نواحی مستعد لغزش و پهنه‌بندی خطر آن، گامی مهم در ارزیابی خطرات محیطی به شمار رفته و نقش انکارنکردنی در مدیریت حوضه آبخیز ایفا می‌کند (Sakar et al., 1995). تهیه نقشه وقوع خطر زمین لغزش، ابزاری اساسی برای فعالیت‌های مدیریت بحران در نواحی کوهستانی است (Kumar, 2008). یکی از مهم‌ترین توانایی‌های GIS به‌عنوان سیستمی ویژه، توانایی تلفیق داده‌ها برای مدل‌سازی، مکان‌یابی و تعیین اراضی از طریق ارزش‌گذاری پهنه سرزمین است. برای ترکیب معیارها روش‌های متفاوتی وجود دارد (پوراحمد و همکاران، ۱۳۸۶). مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: منطق بولین^۱ یا منطق صفر و یک: در این منطق وزن‌دهی به واحدها در هر لایه اطلاعاتی بر اساس امتیاز صفر و یک می‌باشد. منطق همپوشانی^۲ یا روی هم‌گذاری: که در آن به عوارض مختلف و کلاس‌های متفاوت موجود وزن‌های مختلف داده شده است. منطق فازی^۳ یا منطق تار و نامعین: که بسیاری از سیستم‌هایی را که مبهم هستند صورت‌بندی ریاضی بخشیده و زمینه را برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم می‌آورد. منطق احتمالات^۴: که در آن با استفاده از مدل‌های ضریب تطبیق، شاخص کاپا، آنتروپی و غیره، لایه‌های مختلف اطلاعاتی با هم تلفیق و به‌صورت دو یا چند لایه تحلیل می‌شوند (فرهودی و همکاران، ۱۳۸۴). در زمینه بررسی زمین لغزش و پهنه‌بندی آن به‌منظور کاهش خطرات و مدیریت بحران پژوهش‌هایی در ایران و جهان صورت گرفته‌اند که به تازه‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود: (Pradhan et al., 2010) که با روش شبکه عصبی مصنوعی اهمیت وزن نسبی مؤثر در رخداد زمین لغزش را بررسی کردند و نتایج نشان داد که نقشه خطر زمین لغزش و داده‌های واقعی منطبق است. (Dieu Bui et al., 2012) نقشه حساسیت خطر زمین لغزش را با استفاده از ۹ عامل و مدل‌های لاجستیک فازی و توابع باور شاهد^۵ محاسبه کرده‌اند. (Barille et al., 2016)

باریل و همکاران^۶ (۲۰۱۶) با روش فازی به پهنه‌بندی لغزش با هدف مشخص نمودن شبکه جاده‌ای در معرض خطر در محدوده رژیوکالابریا پرداخته‌اند. (Feizizadeh et al., 2017) به ارزیابی عملگرهای فازی یک تحلیل تصویری بر مبنای داده به‌منظور شناسایی زمین لغزش و تغییرات آن پرداختند. بر اساس اطلاعات گروه مطالعه امور

1 Boolean Logic

2 Index overlay

3 Fuzzy Logic

4 Probability Logic

5 Evidential Belief Functions

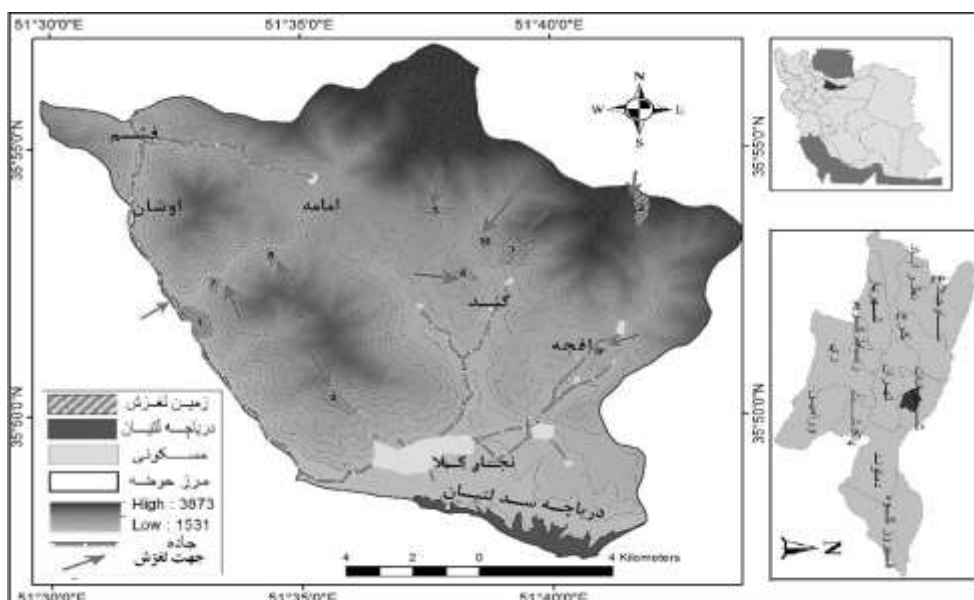
6 Barille et al

زمین‌لغزش‌ها از سال ۱۳۷۵ لغایت ۱۳۸۶ زمین‌لغزش‌ها در طول یازده سال ۱۲۶ هزار میلیارد ریال خسارت بر جای گذاشته‌اند (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی ۱۳۸۹). پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۳) در اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در بخش شمالی تهران با استفاده از شاخص آنتروپی شانون، لایه‌های کاربری اراضی، لیتولوژی، درجه شیب، شاخص توان آبراهه و شاخص تراکم پوشش گیاهی را مؤثرترین دانستند. اسفندیاری درآبادی و بهشتی جاوید (۱۳۹۵) در پهنه‌بندی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در منطقه گردنه حیران اردبیل از ترکیب مدل‌های چندمعیاره و آماری و ۱۲ پارامتر استفاده کردند. قنبری و همکاران (۱۳۹۶) در تهیه نقشه پتانسیل بروز زمین‌لغزش در محدوده شهر تبریز با استفاده از مدل فازی-تاپسیس نشان دادند که ۶ درصد اراضی شهر در پهنه خطر بسیار بالا قرار دارند. منطقه حوضه سد لتیان در بالادست سد لتیان قرار دارد، توپوگرافی آن عمدتاً کوهستانی و پرشیب با اختلاف ارتفاع زیاد است، به دلیل قرارگیری در عرصه ساختمانی گسله مشا-شم، این محدوده در پهنه‌بندی ریسک خطر زمین‌لرزه جزو محدوده با تخریب شدید طبقه‌بندی می‌شود. همچنین مجموعه متنوعی از سازندهای سخت تا سست و فرسایش‌پذیر در محدوده مورد مطالعه گسترده شده‌اند. بارندگی بالا و پوشش گیاهی عمدتاً مرتعی تا تنک، کشاورزی و باغداری در مناطق پرشیب و عبور رودخانه جاجرود و شعبات آن مجموعه عواملی هستند که سبب شده منطقه عمده شرایط طبیعی برای ایجاد طیف وسیعی از زمین‌لغزش‌ها دارا باشد. در بررسی‌های انجام شده بیش از ده لغزش با مجموع مساحت ۲/۵۳ کیلومترمربع در آن شناسایی شده که در قسمت‌های مختلف منطقه پراکنده شده‌اند. به‌علاوه لغزش‌هایی در مقیاس کوچک نیز همه ساله در امتداد مسیرهای ارتباطی منطقه به وقوع می‌پیوندند. این حجم از مواد لغزش‌یافته علاوه بر تهدید مناطق مسکونی، زراعی و باغات منطقه، با توجه به قرار گرفتن سد لتیان در پایین دست حوضه، تهدیدی برای افزایش حجم رسوبات ورودی به سد لتیان به شمار می‌روند که سبب تسریع در پر شدن مخزن سد و کاهش عمر مفید آن می‌گردند. مجموعه این عوامل لزوم بررسی محدوده‌های خطر زمین‌لغزش به‌منظور مدیریت حوضه آبخیز در این محدوده را مسلم می‌گرداند. در این تحقیق ده فاکتور مؤثر بر لغزش‌های منطقه با توجه به پیشینه مطالعات لغزش و نیز شرایط منطقه شناسایی شدند، سپس از مدل‌های آنتروپی و فازی، که با توجه به مطالعات انجام شده از مدل‌های مناسب برای ارزیابی زمین‌لغزش هستند، برای شناسایی پهنه‌های پرخطر استفاده شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مختصات $51^{\circ}29'$ تا $51^{\circ}43'$ طول شرقی و $35^{\circ}47'$ تا $35^{\circ}57'$ عرض شمالی در شمال شرقی تهران قرار گرفته است و دریاچه سد لتیان در انتهای جنوبی حوضه قرار دارد (شکل ۱). رودخانه اصلی حوضه جاجرود می‌باشد که از ارتفاعات البرز سرچشمه می‌گیرد. در محل دریاچه شاخه‌های کندرود و نارون به اتفاق جاجرود وارد دریاچه می‌شوند. این منطقه یکی از حوضه‌های آبخیز کوهستانی کشور با ارتفاع و شیب زیاد

می باشد. ارتفاع متوسط منطقه ۲۳۲۹ متر از سطح دریا و شیب متوسط آن ۴۱ درصد است. از لحاظ جهت شیب در قسمت جنوبی رشته کوه البرز قرار گرفته است. منطقه بیشتر تحت تأثیر جبهه‌های آب و هوایی خزری و جبهه‌هایی که از شمال و شمال شرق وارد کشور می‌شوند قرار دارد. محدوده مورد مطالعه بیش از ۵۰۰ میلیمتر در سال بارش دارد که بیش از نیمی از آن به شکل برف است. به دلیل کوهستانی و کم‌عمق بودن منطقه، خاک تکامل یافته‌ای ندارد. بافت‌های خاک منطقه شامل رسی، لوم رسی، لوم رس ماسه‌ای، لوم رس لای، لوم لای هستند. از نظر پوشش بیشترین مساحت منطقه را مراتع ضعیف تا متوسط، توده و بیرون زدگی سنگی دربر می‌گیرد. همچنین هر سه نوع فرم رویشی درختی، بوته‌ای و علفی در منطقه دیده می‌شوند (محمدخان، ۱۳۸۸). رشته کوه‌های البرز در قسمت مرکزی، آنتیکلینوریوم ساده‌ای در حاشیه شمالی ایران مرکزی است. البرز مرتفع، زون چین‌خورده پیچیده‌ای از رسوبات پالئوزوئیک-مزوزوئیک و ترشیاری است که توسط گسل موشافشم به سمت جنوب روی زون چین‌های حاشیه‌ای رانده است. از نظر چینه‌شناسی در منطقه مورد مطالعه از قدیمی‌ترین سازندها مانند باروت تا جوانترین نهشته‌ها مانند پادگانه‌های آبرفتی کواترنری، واریزه‌ها و زمین‌لغزش‌ها و رسوبات بستر رودخانه‌ها دیده می‌شوند. سازندهای منطقه از قدیم به جدید عبارت‌اند از سازندهای: باروت، فجن، کرج، کند، قرمز بالایی، نهشته‌های کواترنری. منطقه از نظر سنگ‌شناسی متنوع و در آن سه نوع سنگ رسوبی، آذرآرایی و آذرین به ترتیب وسعت وجود دارند. سنگ‌های رسوبی در شمال شرقی و جنوب حوضه و سنگ‌های آذرآرایی بیشتر در غرب منطقه مورد مطالعه برونزد دارند. ترکیب سنگ‌شناسی این منطقه عمدتاً شیل-ماسه-سنگ-بازالت-توف-مارن و رسوبات آبرفتی است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰). از نظر ژئومورفولوژی نیز بیشتر بصورت توده و بیرون زدگی سنگی است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه - حوضه لتیان در بالادست سد لتیان (ترسیم: نگارندگان)

۳- مواد و روش‌ها

این پژوهش به لحاظ هدف، کاربردی و به لحاظ روش از نوع تحلیلی به شمار می‌رود. نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژی به‌عنوان مبنا مورد استفاده قرار گرفت و سپس با توجه به تصاویر Google Earth و نقشه زمین‌شناسی دیگر لغزش‌های محدوده استخراج شد. سپس با توجه به شرایط منطقه و پیشینه مطالعاتی عوامل مؤثر بر لغزش شناسایی شد و نقشه هر یک در محیط نرم‌افزار ARC GIS 10 تحلیل شدند. در گام بعد جدول ۱ تهیه شد که به طبقات هر لایه امتیاز کارشناسی که بیانگر میزان اهمیت آن در ایجاد لغزش است، داده شد و اختصاصات هر لغزش به دست آمد (جدول ۲). در مرحله بعدی لایه‌ها رستری و امتیازدهی شدند و به‌عنوان داده‌های اصلی در تشکیل ماتریس اولیه مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۳). در این پژوهش از مقیاس دو قطبی فاصله‌ای برای تبدیل مقادیر کیفی به کمی استفاده شد. اندازه‌گیری در این روش بر اساس یک مقیاس ده نقطه‌ای است، به طوری که صفر مشخص‌کننده کمترین ارزش ممکن - که عملاً قابل درک باشد - و ده نشان‌دهنده حداکثر ارزش ممکن از شاخص موردنظر است. نقطه وسط نیز نقطه شکست مقیاس بین مساعدها و نامساعدهاست (اصغرپور، ۱۳۹۲: ۱۹۳). در گام آخر با استفاده از روش‌های آنتروپی و فازی ارزیابی خطر لغزش در منطقه انجام گرفت و نتیجه با لغزش‌های رخ داده همپوشانی شد و مورد مقایسه قرار گرفتند. فرایند روش تحقیق در شکل ۲ نمایش داده شده است. مدل آنتروپی^۱ برای نخستین بار توسط (Wilson, 1967 & 1970) ارائه شد و توسط (Sinior, 1979) مورد تجدیدنظر و اصلاح قرار گرفت (Paulov, 1991). آنتروپی به معنای کمیتی از بی‌نظمی بین علل و نتایج یا تصمیم‌گیری‌ها در موضوع‌های مختلف مورد بحث است. برای استفاده از این مدل ابتدا باید ماتریس تصمیم‌گیری ایجاد شود زیرا حاوی اطلاعاتی است که آنتروپی می‌تواند به‌عنوان معیاری برای ارزیابی آن به‌کار رود و با محاسبه ماتریس آنتروپی و وزن کل عوامل، میزان ضریب وقوع زمین‌لغزش به‌دست می‌آید (مقیم‌ی و همکاران، ۱۳۹۱).

منطق فازی نخستین بار توسط لطفی‌زاده دانشمند ایرانی‌الاصل دانشگاه کالیفرنیا در سال ۱۹۶۵ مطرح شد (امینی فسخودی، ۱۳۸۴). در منطق کلاسیک عضویت یک عنصر در یک مجموعه به‌صورت صفر (عدم عضویت) و یک (عضویت) بیان می‌شود؛ اما در منطق فازی، قطعیت موجود در منطق بولین وجود ندارد و میزان عضویت یک عنصر در یک مجموعه، با مقداری در بازه یک (عضویت کامل) تا صفر (عدم عضویت کامل) تعریف می‌شود (Lin et al., 1996). یکی از روش‌های رایج برای استدلال فازی استفاده از روش ممدانی است.

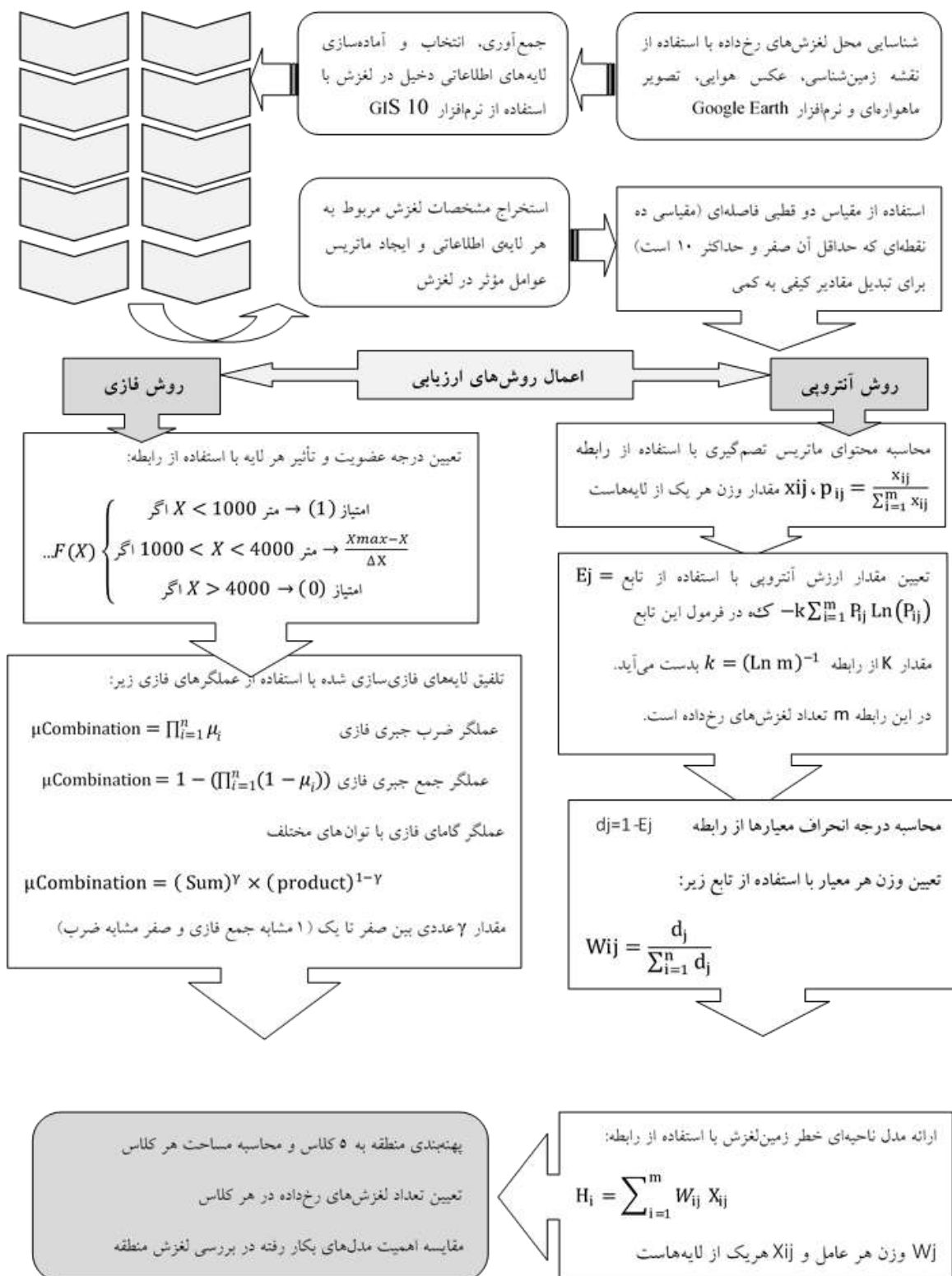
در این روش از شرط منطقی «اگر A، آنگاه B» استفاده می‌شود (Bo & Keir, 1995). در مدل آنتروپی پس از تبدیل معیارها به عدد صحیح و تشکیل ماتریس اولیه (جدول ۳)، مقدار (p_{ij}) مقدار (K) و (E_j) با استفاده از فرمول‌های شکل ۲ به دست آمد. در این رابطه E از توزیع احتمال p_i بر اساس سازوکار آماری محاسبه شده است و

1 Entropy

مقدار آن در صورت تساوی π ها با یکدیگر بیشترین مقدار ممکن خواهد بود (اصغرپور، ۱۳۹۲: ۱۹۶). سپس عدم اطمینان یا درجه انحراف هر معیار (d_j) از کسر مقدار E_j از عدد ۱ حاصل شد و با استفاده از رابطه W_{ij} وزن معیارهای استفاده شده در ماتریس آنتروپی حاصل شد. جدول ۴ مقادیر پارامترهای ذکر شده را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر جدول ۴ وزن هر یک از معیارهای استفاده شده در ماتریس آنتروپی زمین‌لغزش (W_j) حاصل شد. در نهایت مدل ناحیه‌ای خطر زمین‌لغزش در محدوده حوضه لتیان با رابطه (H_i) به صورت رابطه ۱ به دست آمد.

در مدل فازی، فازی سازی کردن به معنای تعریف توابع عضویت برای پارامترها می‌باشد. نقشه فاکتور به گونه‌ای تهیه می‌شود که مقدار هر پیکسل اهمیت نسبی فاکتور مربوطه در مقایسه با سایر فاکتورهای مکان‌یابی است (بهشتی‌فر و همکاران، ۱۳۸۹). می‌توان تابع بین این دو مقدار را به صورت نزولی (کاهش ارزش با نزدیک شدن به صفر) یا صعودی (افزایش ارزش با نزدیک شدن به یک) تعریف کرد، که یک تابع با سیر مستقیم است. حاصل اعمال توابع فازی ایجاد لایه‌هایی است که با استفاده از فرمول‌های ضرب، جمع و گامای فازی همپوشانی می‌شوند.

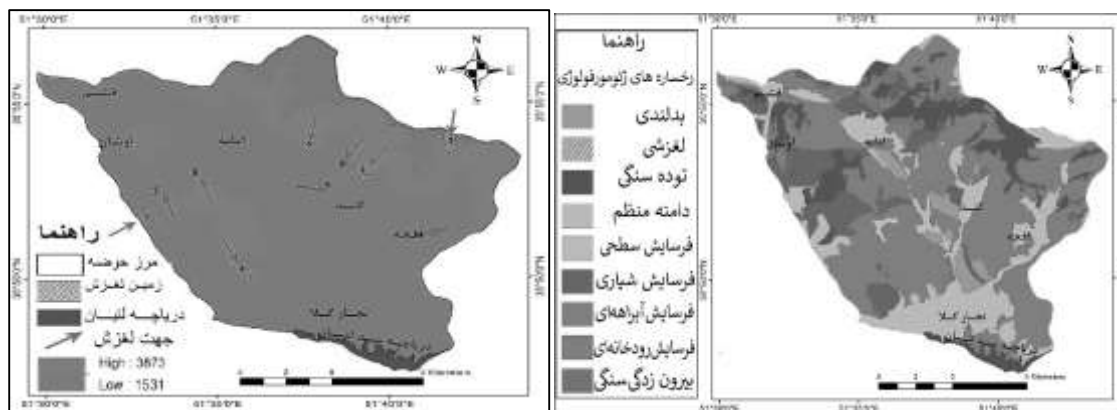
در این روابط (دیاگرام پژوهش، شکل ۲) μ combination لایه حاصل از حداقل سازی در ضرب و حداکثر سازی در جمع، μ_i تابع عضویت فازی برای نقشه نام است و $i=1,2,\dots$ نقشه‌هایی هستند که تلفیق شده‌اند. با استفاده از عملگر ضرب مقادیر عضویت فازی در نقشه خروجی به سمت صفر میل می‌کند، بنابراین ترکیب عوامل اثر کاهشی خواهد داشت، به عبارتی عوامل همدیگر را تضعیف می‌کنند. با استفاده از عملگر جمع مقادیر عضویت فازی در نقشه به سمت یک میل می‌کنند که و ترکیب عوامل، اثر افزایشی خواهد داشت، به عبارت دیگر عوامل همدیگر را تقویت می‌کنند. جهت تعدیل حساسیت بالا و کم این دو و به منظور دستیابی به نتیجه مناسب‌تر عملگر گامای فازی استفاده شده است که انتخاب صحیح و آگاهانه γ بین صفر و یک (رابطه گاما در شکل ۲)، مقادیری را در خروجی به وجود می‌آورد (Bonham-Carter 1994).



شکل ۲- دیاگرام فرایند پژوهش (ترسیم: نگارندگان)

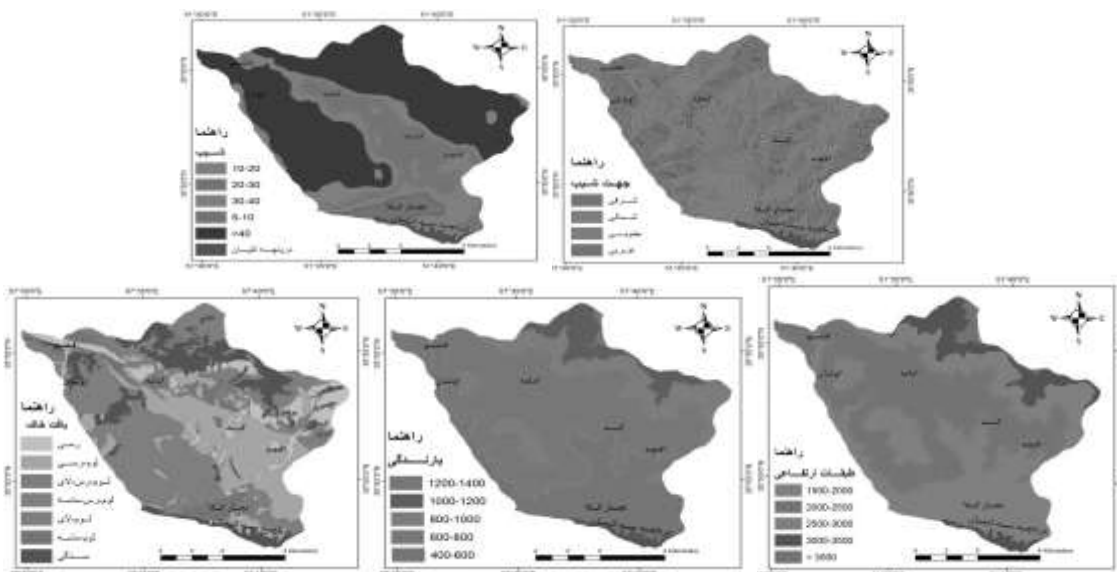
۴- نتایج و بحث

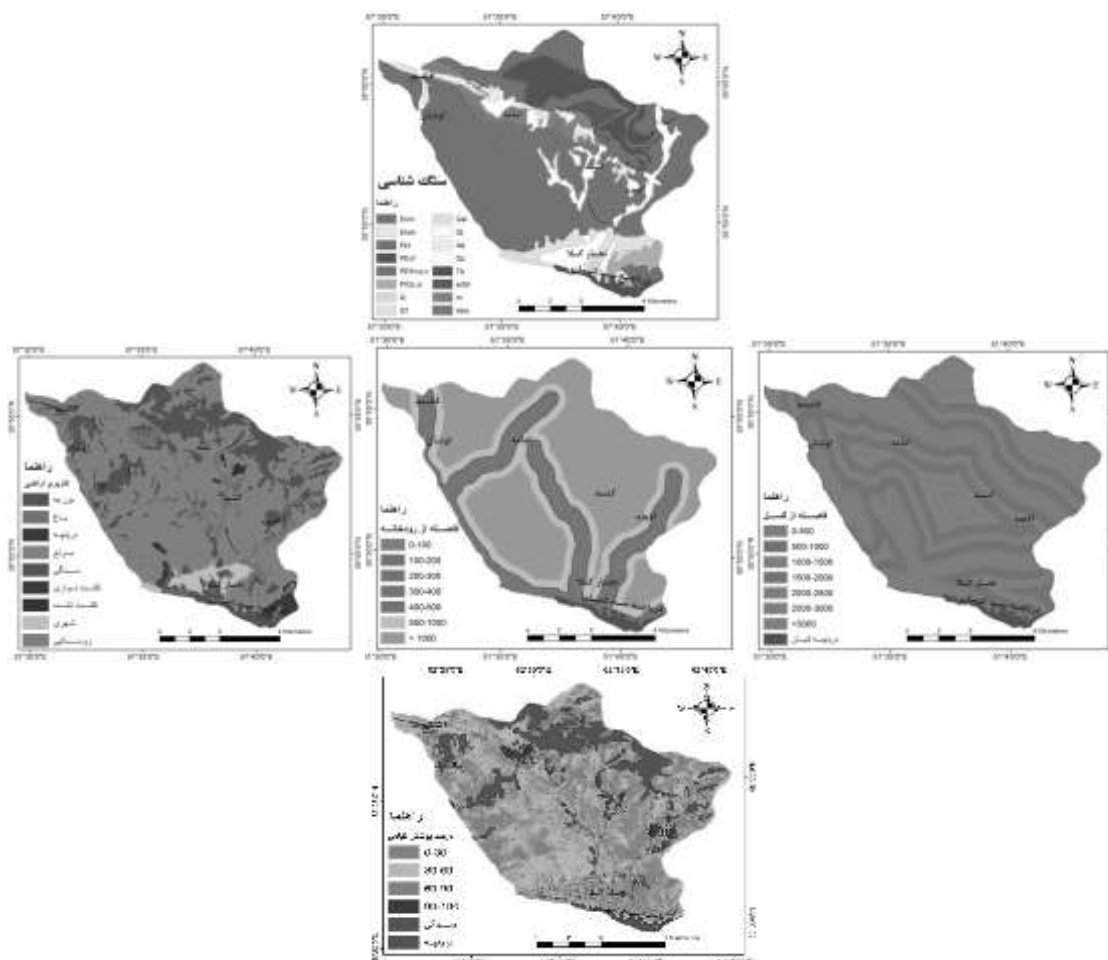
نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژی پراکنش زمین لغزش‌ها را در ابعاد مختلف در منطقه نشان می‌دهد. این زمین لغزش‌ها به همراه زمین لغزش‌های شناسایی شده در شکل ۳ به ترتیب وسعت از یک تا ۱۰ شماره‌گذاری شده‌اند.



شکل ۳- سمت چپ: رخساره‌های ژئومورفولوژی منطقه مطالعاتی (محمدخان، ۱۳۸۸، ترسیم مجدد: نگارندگان) و شکل سمت راست لغزش‌های جدا شده از این نقشه به همراه لغزش‌های اضافه شده است.

همانطور که در دیاگرام فرایند پژوهش آمده ده لایه اطلاعاتی مختلف (جهت شیب، شیب، ارتفاع، بارندگی، بافت خاک، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، پوشش گیاهی) برای انجام پژوهش مورد گردآوری و تجزیه و تحلیل قرار گرفتند (شکل ۴).





شکل ۴- لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در فرایند تحقیق (منبع: محمدخان، ۱۳۸۸، ترسیم مجدد: نگارندگان)

توپوگرافی کوهستانی، میانگین بالای شیب، ماندگاری رطوبت در دامنه‌های شمالی و شرقی، وجود عرصه ساختمانی گسله مشا‌فشم و پتانسیل منطقه برای لرزه‌خیزی، مجموعه متنوعی از سازندهای سخت تا سست و میان‌لایه‌های فرسایش پذیر، بارندگی بالا و پوشش گیاهی عمدتاً مرتعی تا تنک در معرض چرای بی‌رویه، کشاورزی و باغداری در مناطق پرشیب و نقش آن در فرسایش بیشتر خاک، زیر بری دامنه‌ها تحت تأثیر عبور رودخانه جاجرود و شعبات آن، بافت خاک فرسایش‌پذیر همگی از عوامل تسهیل و تشدید کننده لغزش به ویژه در منطقه مورد مطالعه هستند که سبب شده به‌عنوان عوامل اصلی دخیل در لغزش انتخاب شوند.

جدول ۱- امتیاز اختصاص داده شده به طبقات مختلف لایه‌های شکل ۳ (منبع جداول: محاسبات نگارندگان)

امتیاز	جهت شیب	امتیاز	شیب	امتیاز	ارتفاع	امتیاز	بارندگی	امتیاز	پوشش گیاهی
۹	شمالی	۳	۰-۱۰	۵	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۵	۴۰۰-۶۰۰	۹	۰-۳۰
۸	شرقی	۴	۱۰-۲۰	۶	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۶	۶۰۰-۸۰۰	۷	۳۰-۶۰
۷	جنوبی	۵	۲۰-۳۰	۷	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۷	۸۰۰-۱۰۰۰	۳	۶۰-۹۰
۶	غربی	۶	۳۰-۴۰	۸	۳۰۰۰-۳۵۰۰	۸	۱۰۰۰-۱۲۰۰	۱	۹۰-۱۰۰
		۸	> ۴۰	۸	> ۳۵۰۰	۸	۱۲۰۰-۱۴۰۰	۴	سنگی
امتیاز	سنگ شناسی	امتیاز	کاربری اراضی	امتیاز	فاصله از گسل	امتیاز	فاصله از رود	امتیاز	بافت خاک
۲	Q^{al}	۶	مزرعه	۹	۰-۵۰۰	۹	۰-۱۰۰	۵	رسی
۳	PE^c_f Q^l / Q_u	۷	باغ	۸	۵۰۰-۱۰۰۰	۸	۱۰۰-۲۰۰	۷	ماسه-رس-لوم
۴	T^b / E^{sh}_k	۸	مرتع	۷	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۷	۲۰۰-۳۰۰	۸	ماسه-لوم
۵	Q / Q^s E^{d}_{bt}	۶	کشت نواری	۶	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۶	۳۰۰-۴۰۰	۸	سیلت-رس-لوم
۶	PE^{msc} PIQ_{cs}	۱	شهری	۵	۲۰۰۰-۲۵۰۰	۵	۴۰۰-۵۰۰	۹	رس-لوم
۷/۸	M / E^m_k	۵	روستایی	۴	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۴	۵۰۰-۱۰۰۰	۹	سیلت-لوم
۹	E^l_k / Q^l	۴	سنگی	۳	> ۳۰۰۰	۳	> ۱۰۰۰	۴	سنگی

جدول ۱ امتیاز اختصاص یافته به طبقات عوامل مؤثر در لغزش را نشان می‌دهد. از طریق همپوشانی لغزش‌های استخراج شده در شکل ۲ با لایه‌های شکل ۳ مشخصات لغزش‌ها (جدول ۲) به دست آمد که داده‌های اصلی در تشکیل ماتریس آنتروپی هستند (جدول ۳). تا این مرحله در هر دو روش مشترک بوده و این داده‌ها به‌عنوان مقادیر استاندارد در تجزیه و تحلیل بعدی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۲- اختصاصات استخراج شده از لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر لغزش

شماره لغزشها	فاصله از گسل	ارتفاع	جهت شیب	فاصله از رود	شیب	بارندگی	بافت خاک	درصد پوشش	کاربری اراضی	لیتولوژی
لغزش ۱	۰-۵۰۰	۱۵۰۰-۲۰۰۰	غربی	۴۰۰-۵۰۰	> ۴۰	۴۰۰-۶۰۰	ماسه-رس-لوم	۰-۳۰	مرتع	Et k
لغزش ۲	> ۳۰۰۰	۳۰۰۰-۳۵۰۰	جنوبی	> ۱۰۰۰	> ۴۰	-۱۴۰۰ ۱۲۰۰	ماسه-رس-لوم	۰-۳۰	مرتع	Et k
لغزش ۳	۰-۵۰۰	۲۵۰۰-۳۰۰۰	جنوبی	> ۱۰۰۰	> ۴۰	۸۰۰-۱۰۰۰	ماسه-رس-لوم	۳۰-۶۰	مرتع	PE fmsc
لغزش ۴	۰-۵۰۰	۲۰۰۰-۲۵۰۰	شرقی	> ۱۰۰۰	> ۴۰	۶۰۰-۸۰۰	رس-لوم	۳۰-۶۰	مرتع	Et k
لغزش ۵	۰-۵۰۰	۲۰۰۰-۲۵۰۰	شرقی	> ۱۰۰۰	۳۰-۴۰	۶۰۰-۸۰۰	رس	۳۰-۶۰	مرتع	Esh k
لغزش ۶	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۲۰۰۰-۲۵۰۰	شرقی	> ۱۰۰۰	۲۰-۳۰	۶۰۰-۸۰۰	رس-لوم	۳۰-۶۰	مرتع	Em k

ادامه جدول ۲

شماره لغزشها	فاصله از گسل	ارتفاع	جهت شیب	فاصله از رود	شیب	بارندگی	بافت خاک	درصد پوشش	کاربری اراضی	لیتولوژی
لغزش ۷	۵۰۰-۱۰۰۰	۱۵۰۰-۲۰۰۰	شمالی	۴۰۰-۵۰۰	>۴۰	۴۰۰-۶۰۰	سنگی	سنگی	سنگی	Et k
لغزش ۸	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۲۰۰۰-۲۵۰۰	شمالی	۴۰۰-۵۰۰	>۴۰	۶۰۰-۸۰۰	سنگی	سنگی	سنگی	Et k
لغزش ۹	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۲۰۰۰-۲۵۰۰	غربی	۵۰۰-۱۰۰۰	۱۰-۲۰	۶۰۰-۸۰۰	رس	۳۰-۶۰	مزرعه	Em k
لغزش ۱۰	۰-۵۰۰	۲۰۰۰-۲۵۰۰	غربی	>۱۰۰۰	۳۰-۴۰	۶۰۰-۸۰۰	رس-لوم	۳۰-۶۰	مرتع	M

جدول ۳- حاصل همپوشانی جدول ۱ و ۲ و در نهایت ایجاد ماتریس اولیه لغزش‌ها

شماره لغزشها	مساحت لغزش KM ²	فاصله از گسل	ارتفاع	جهت شیب	فاصله از رود	شیب	بارندگی	بافت خاک	درصد پوشش	کاربری اراضی	لیتولوژی
لغزش ۱	۰/۶۰	۹	۵	۶	۵	۸	۵	۷	۹	۸	۹
لغزش ۲	۰/۵۴	۳	۸	۷	۳	۸	۸	۷	۹	۸	۹
لغزش ۳	۰/۴۴	۹	۷	۷	۳	۸	۷	۷	۸	۸	۶
لغزش ۴	۰/۳۶	۹	۶	۸	۳	۸	۶	۹	۸	۸	۹
لغزش ۵	۰/۱۶	۹	۶	۸	۳	۶	۶	۵	۸	۸	۴
لغزش ۶	۰/۱۳	۷	۶	۸	۳	۵	۶	۹	۸	۸	۸
لغزش ۷	۰/۱۳	۸	۵	۹	۵	۸	۵	۴	۴	۴	۹
لغزش ۸	۰/۰۹	۶	۶	۹	۵	۸	۶	۴	۴	۴	۹
لغزش ۹	۰/۰۵	۷	۶	۶	۴	۴	۶	۵	۸	۷	۸
لغزش ۱۰	۰/۰۴۴	۹	۶	۶	۳	۶	۶	۹	۸	۸	۷

رابطه ۱ مدل ناحیه‌ای خطر زمین لغزش در منطقه در مدل آنتروپی است. در این رابطه T: بافت خاک، Df: فاصله از گسل، V: پوشش گیاهی، Dr: فاصله از رودخانه، Lu: کاربری زمین، S: شیب، L: سنگ‌شناسی، A: جهت شیب، E: ارتفاع و R: بارندگی، است.

رابطه ۱:

$$H = (T \times 0.1765) + (Df \times 0.1442) + (V \times 0.1305) + (Dr \times 0.1173) + (Lu \times 0.1157) + (S \times 0.0974) + (L \times 0.0973) + (A \times 0.0469) + (E \times 0.0371) + (R \times 0.0371)$$

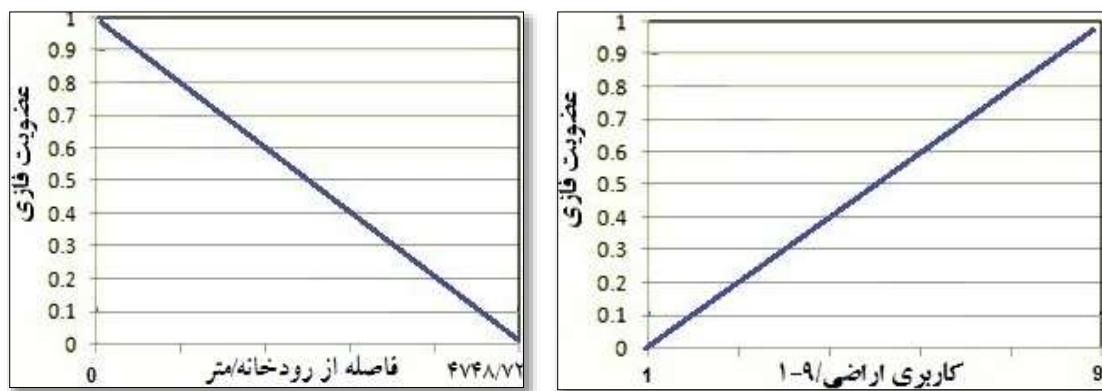
بافت خاک ۱۷/۶۵ درصد، فاصله از گسل ۱۴/۴۲ درصد، پوشش گیاهی ۱۳/۰۵ درصد، فاصله از رودخانه ۱۱/۳۱۴ درصد و کاربری اراضی ۱۱/۵۷ درصد و ... در وقوع زمین لغزش‌های منطقه تأثیرگذار بوده‌اند. درصد تأثیر

پایین برای جهت شیب، ارتفاع و بارندگی به سبب امتیازات برابر اکثر لغزش‌ها در این سه پارامتر است یعنی بیشتر لغزش‌ها در یک جهت شیب، ارتفاع و در یک طبقه بارشی مشابه واقع شده‌اند.

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های محاسبه شده برای عوامل مؤثر در فرسایش

شاخص‌های محاسبه شده	فاصله از گسل	ارتفاع	جهت شیب	فاصله از رود	شیب	بارندگی	بافت خاک	درصد پوشش	کاربری اراضی	لیتولوژی
E_j	۰/۹۸۴۸	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۵۱	۰/۹۸۷۶	۰/۹۸۹۷	۰/۹۹۶۱	۰/۹۸۱۴	۰/۹۸۶۲	۰/۹۸۷۸	۰/۹۸۹۷
d_j	۰/۰۱۵۲	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۴۹	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۳۹	۰/۰۱۸۶	۰/۰۱۳۸	۰/۰۱۲۲	۰/۰۱۰۳
W_j	۰/۱۴۴۲	۰/۰۳۷۱	۰/۰۴۶۹	۰/۱۱۷۳	۰/۰۹۷۴	۰/۰۳۷۱	۰/۱۷۶۵	۰/۱۳۰۵	۰/۱۱۵۷	۰/۰۹۷۳
درصد تأثیر	۱۴/۴۲	۳/۷۱	۴/۶۹	۱۱/۷۳	۹/۷۴	۳/۷۱	۱۷/۶۵	۱۳/۰۵	۱۱/۵۷	۹/۷۳
ترتیب اهمیت	۲	۹	۸	۴	۶	۹	۱	۳	۵	۷

در مدل فازی لایه‌هایی که با جدول ۱ طبقه‌بندی شدند به عنوان داده‌های اصلی مورد استفاده قرار گرفتند و با استفاده از تعریف نوع تابع به دو صورت افزایشی و کاهش‌ی مستقیم (تابع خطی) به صورت مقادیر صفر تا یک فازی‌سازی شدند. (شکل ۵).

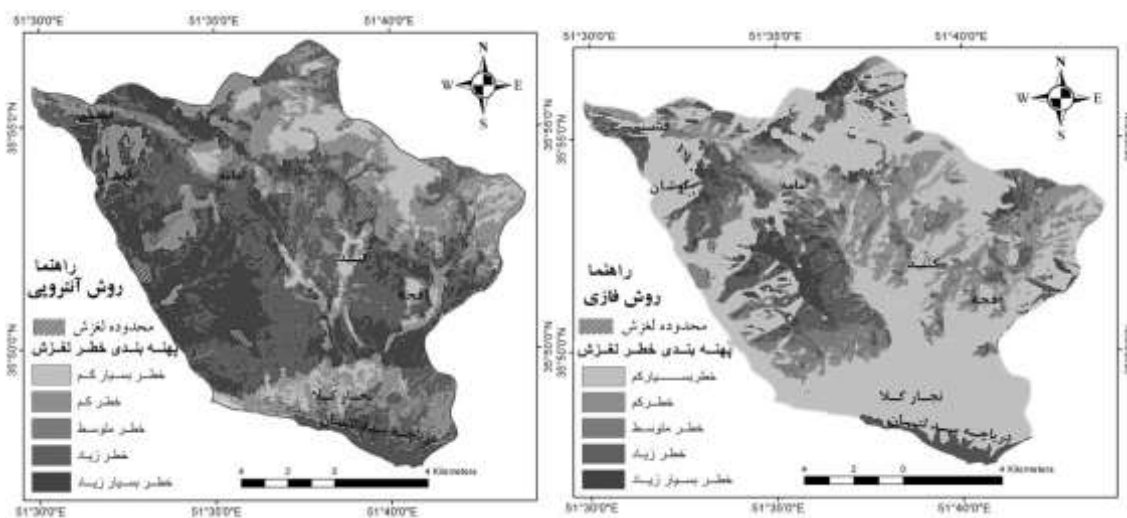


شکل ۵- نمونه‌هایی از توابع عضویتی کاهنده و افزایشی مستقیم برای فازی‌سازی لایه‌ها (ترسیم: نگارندگان)

حاصل اعمال این توابع ایجاد لایه‌هایی است با ارزش صفر تا یک که با استفاده از فرمول‌های ضرب، جمع و گامای فازی همپوشانی می‌شوند. جدول ۵ مقادیر کلاس‌های هر یک از عملگرهای فازی را نشان می‌دهد. در نهایت نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از این دو روش به دست آمد و مورد طبقه‌بندی قرار گرفت. شکل ۶ خروجی نهایی را که در غالب ۵ کلاس عرضه شده است نشان می‌دهد.

جدول ۵- مساحت هر کلاس در عملگرهای مختلف فازی

انواع پهنه‌ها		کلاس بسیار کم		کلاس کم		کلاس متوسط		کلاس زیاد		کلاس بسیار زیاد		مجموع مساحت	
مساحت	پارامتر	درصد مساحت	مساحت km^2	درصد مساحت	مساحت km^2	درصد مساحت	مساحت km^2	درصد مساحت	مساحت km^2	درصد مساحت	مساحت km^2	درصد مساحت	مساحت km^2
		جمع فازی	۰/۱۷	۰/۰۸	۱/۱۲	۰/۵۷	۴/۱۵	۲/۰۹	۱۰/۱۱	۵/۰۹	۱۸۲/۹۸	۹۲/۱۷	۱۹۸/۵۲
ضرب فازی	۱۴۰/۸۳	۷۰/۸۹	۳۴/۴۹	۱۷/۳۸	۱۶/۰۴	۸/۰۸	۵/۳۸	۲/۷۱	۱/۸۷	۰/۴۹	۱۹۸/۵۲	۱۰۰	۱۹۸/۵۲
گامای ۰/۷ فازی	۱۰۸/۵۸	۵۴/۷۰	۲۱/۳۹	۱۰/۷۸	۳۳/۱۰	۱۶/۶۷	۲۵/۸۴	۱۳/۰۲	۹/۶۱	۴/۸۴	۱۹۸/۵۲	۱۰۰	۱۹۸/۵۲
گامای ۰/۸ فازی	۱۰۵/۳۱	۵۳/۰۵	۱۱/۴۰	۵/۷۴	۲۹/۲۰	۱۴/۷۱	۳۴/۱۴	۱۷/۱۹	۱۸/۴۹	۹/۳۱	۱۹۸/۵۲	۱۰۰	۱۹۸/۵۲
گامای ۰/۹ فازی	۱۰۵/۲۵	۵۳/۰۲	۷/۳۸	۳/۷۲	۲۲/۷۲	۱۱/۴۵	۳۷/۵۴	۱۸/۹۱	۲۵/۶۱	۱۲/۹۰	۱۹۸/۵۲	۱۰۰	۱۹۸/۵۲



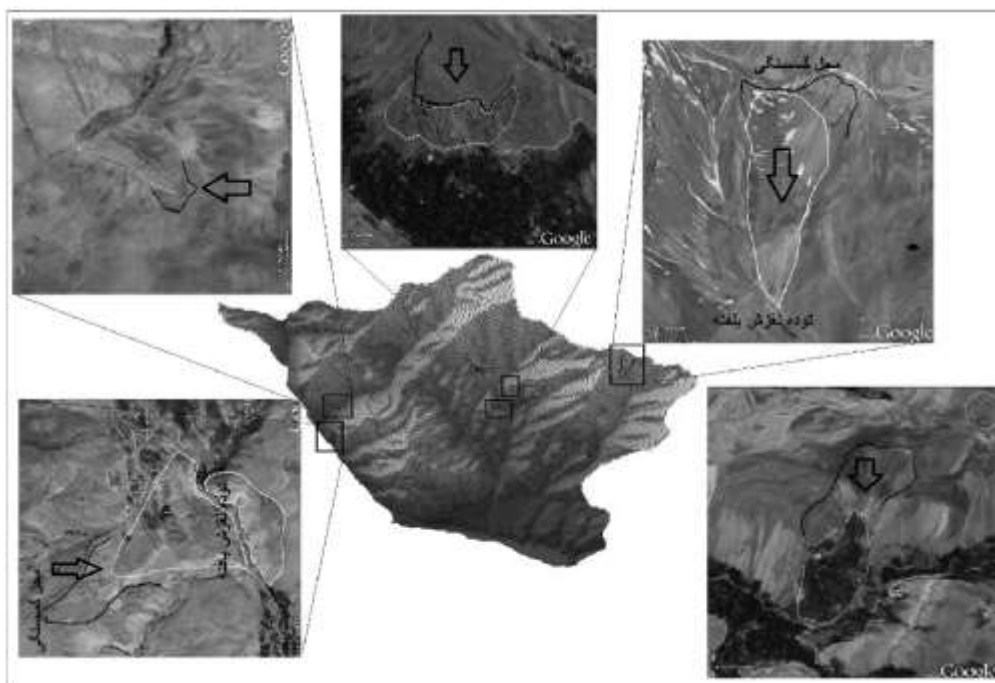
شکل ۶- نقشه‌های طبقه‌بندی شده با استفاده از دو روش ارزیابی فازی و آنترپی (ترسیم: نگارندگان)

شکل ۶ را که حاصل همپوشانی نقشه‌های به دست آمده از مدل‌ها و همپوشانی لغزش‌ها است، می‌توان به صورت جدول ۶ ارائه نمود تا تصویر بهتری از کارایی هر مدل در ارائه پهنه‌های خطر به دست آید.

جدول ۶- مساحت هر کلاس خطر و تعداد لغزش‌های رخ داده در آن

فازی				آتروپی				مدل
لغزش		گستره		لغزش		گستره		
تعداد	شماره لغزش‌های رخ داده	درصد مساحت	مساحت KM^2	تعداد	شماره لغزش‌های رخ داده	درصد مساحت	مساحت KM^2	مساحت پارامتر
۳	۷،۱	۵۳/۰۲	۱۰۵/۲۵	۰	۰	۱۰/۵۱	۲۰/۸۶۳۹	خطر بسیار کم
۱	۹	۳/۷۲	۷/۳۸	۰	۰	۱۶/۱۰	۳۱/۹۵۸۰	خطر کم
۲	۱۰،۳	۱۱/۴۵	۲۲/۸۳	۱	۹	۱۹/۵۲	۳۸/۷۴۷۶	خطر متوسط
۳	۶،۵،۲	۱۸/۹۱	۳۷/۵۵	۴	۱۰،۶،۵،۲	۲۸/۴۰	۵۶/۳۷۲۶	خطر زیاد
۲	۸،۴	۱۲/۹۰	۲۵/۶۱	۵	۸،۷،۴،۳،۱	۲۵/۴۸	۵۰/۵۸۱۰	خطر بسیار زیاد
۱۰	۱۰	۱۰۰	۱۹۸/۵۲	۱۰	۱۰	۱۰۰	۱۹۸/۵۲۲۹	مجموع

با توجه به مساحت پهنه‌ها و توزیع لغزش‌ها مشاهده می‌شود که در مجموع مدل آتروپی حدوداً ۱۰۷ کیلومترمربع معادل با ۵۳/۸۷ درصد یعنی بیش از نیمی از منطقه مطالعاتی را در خطر بالاتر از متوسط ارزیابی کرده و عمده لغزش‌ها در این محدوده و تنها یک لغزش در محدوده خطر متوسط رخ داده. محدوده‌های زیر خطر متوسط هیچ لغزشی را در برنمی‌گیرند که با توجه به پراکنش لغزش‌ها (شکل ۲) توزیع منطقی است.



شکل ۷- تعدادی از توده‌های لغزش یافته از نمای نزدیک

برغم مدل آتروپی از نتایج ارزیابی مدل فازی و پراکنش لغزش‌ها اینگونه که مشاهده می‌شود لغزش‌ها در سراسر پهنه‌هایی با خطرهای مختلف بسیار کم تا بسیار زیاد توزیع یافته‌اند و همانطور که از مشاهده جدول فوق برمی‌آید محدوده‌های بالاتر از خطر متوسط تنها دارای ۵ لغزش می‌باشند و ۵ لغزش بعدی در محدوده خطر متوسط تا بسیار کم پراکنده شده‌اند؛ به عبارت دیگر توزیع لغزش‌ها در ارتباط با محدوده‌های خطر توزیعی منطقی و قابل انتظار نیست. شکل ۷ تصاویر مربوط به تعدادی از این لغزش‌ها را در پهنه مورد مطالعه نشان می‌دهد؛ که در آن محل گسستگی با خط مشکی و توده لغزشی با خط سفید نمایش داده شده است. شکل ۸ تصاویر مربوط به دو نمونه ناپایداری دامنه در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۸- سمت راست لغزش در مقیاس کوچک و سمت چپ ریزش در منطقه مورد مطالعه

۵- جمع‌بندی

بیش از ده لغزش با مجموع مساحت $۲/۵۳$ کیلومتر در قسمت‌های مختلف حوضه آبخیز لتیان در بالادست سد لتیان شناسایی شده‌اند که تهدیدی برای افزایش ورود بار رسوبی به سد به شمار می‌آیند. در فرایند مدلسازی با استفاده از دو روش ارزیابی فازی و آتروپی، نتایج پهنه‌بندی و نیز همپوشانی لغزش‌های رخ داده با نقشه‌های نهایی نشان می‌دهند که مدل آتروپی، طبقه‌بندی مناسب‌تر و توزیع منطقی‌تری از لغزش‌ها را نسبت به پهنه‌های با خطرات مختلف وقوع لغزش نشان می‌دهند. این در حالی است که در مدل فازی، پراکنش لغزش‌ها در محدوده خاصی تمرکز پیدا نکرده است؛ بنابراین می‌توان این گونه نتیجه گرفت که مدل آتروپی برای بررسی منطقه و طبقه‌بندی پهنه‌های مستعد خطر لغزش نتایج مطلوب‌تری ارائه نموده. از نتایج این مدل می‌توان برای محدود سازی فعالیت‌ها در پهنه‌های مستعدتر با صرف هزینه‌های کمتر بهره برد. در این مدل در مجموع نیمی از مساحت منطقه مورد بررسی در پهنه‌ای با خطر بالا قرار دارد که ۹ لغزش از لغزش‌های رخ داده در این محدوده قرار گرفته‌اند که از پتانسیل بالای

خصوصیات این قسمت از جمله بافت خاک، تأثیر گسل، پوشش گیاهی، تأثیر رودخانه، کاربری اراضی و... در تولید لغزش خبر می‌دهد که به ترتیب در محاسبات مدل آنتروپی دارای بالاترین درصد تأثیر در وقوع لغزش می‌باشند. همپوشانی نقشه منتخب نهایی با لایه‌های مختلف استفاده شده در فرایند تحقیق نشان می‌دهد مناطق مستعد لغزش عمدتاً از نظر بافت خاک به صورت ماسه-رس-لوم و رس-لوم، فاصله صفر تا ۲۵۰۰ متر از گسل، پوشش گیاهی ۳۰ تا ۶۰ درصدی، فاصله صفر تا ۵۰۰ متری از رودخانه، کاربری اراضی به صورت مرتع، شیب ۳۰ تا ۶۰ درجه، سنگ‌شناسی توف، شیل، آذرآورای‌ها، همچنین مادستون، مارن، ماسه‌سنگ، کنگلومرا می‌باشد.

منابع

- اسفندیاری درآبادی، فریبا؛ بهشتی جاوید، ابراهیم؛ ۱۳۹۵. پهنه بندی حساسیت وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه‌ی بیز ANP (مطالعه موردی: گردنه حیران). نشریه هیدروژئومورفولوژی. سال دوم، شماره ۸. اصغرپور، محمدجواد؛ ۱۳۹۲. تصمیم‌گیری‌های چند معیاره. چاپ ۱۱. تهران، انتشارات دانشگاه تهران. امینی فسخودی، عباس؛ ۱۳۸۴. کاربرد استنتاج منطق فازی در مطالعات برنامه‌ریزی و توسعه منطقه‌ای. مجله دانش و توسعه، شماره ۱۷.
- بهشتی فر، سارا؛ مسگری، محمدسعیدی؛ ولدان زوج، محمدجواد؛ کریمی، محمد؛ ۱۳۸۹. استفاده از منطق فازی در محیط GIS به منظور مکان‌یابی نیروگاه‌های گازی. دانشکده فنی: نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری. دوره ۴۴. شماره ۴.
- پوراحمد، احمد؛ حبیبی، کیومرث؛ محمدزهرایی، سجاده؛ نظری علوی، سعید؛ ۱۳۸۶. استفاده از الگوریتم‌های فازی و GIS برای مکان‌یابی تجهیزات شهری: مطالعه موردی محل دفن زباله شهر بابلسر. مجله محیط‌شناسی، سال سی و سوم، شماره ۴۲.
- پورقاسمی، حمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ فاطمی‌عقدا، سید محمود؛ ۱۳۹۳. اولویت بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین لغزش و پهنه بندی حساسیت آن. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). سال هجدهم. شماره ۴.
- درویش‌زاده، علی؛ ۱۳۷۰. زمین‌شناسی ایران، انتشارات نشر دانش امروز (وابسته به انتشارات امیرکبیر). صفحه ۹۰۱. سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۸۹.
- فرهودی، رحمت‌الله؛ حبیبی، کیومرث؛ زندی‌بختیاری، پروانه؛ ۱۳۸۴. مکان‌یابی محل دفن مواد زائد جامد شهری با استفاده از منطق فازی (Fuzzy Logic) در محیط GIS: مطالعه موردی شهر سنندج. نشریه هنرهای زیبا، شماره ۲۳.
- قنبری، ابوالفضل؛ کرمی، فریبا؛ سالکی، محمدعلی؛ ۱۳۹۶. ارزیابی استعداد بروز زمین لغزش‌های احتمالی در محدوده شهر تبریز، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال چهارم، شماره ۱.

محمدخان، شیرین؛ ۱۳۸۸. برآورد کمی فرسایش و رسوب به روش ژئومورفولوژی (مطالعه موردی حوزه آبخیز لتیان)، رساله دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

مقیم، ابراهیم؛ باقری سیدلشکری، سجاد؛ صفرراد، طاهر؛ ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی: تاکدیس نثار زاگرس شمال غربی)، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال چهارم و چهارم، شماره ۷۹.

- Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Environ*, No. 58, pp. 21–44.
- Barille, V., Cirianni, F., Giovanni, I., Rocca, P., 2017. A Fuzzy-base methodology for landslide susceptibility mapping. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 223, pp. 896–902.
- Bonham- Carter, G. F., 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. 1stEd. Pergamo Press, Oxford, UK.
- Dieu Bui, T., Pradhan, B., Lofman, O., Revhaug, I., Dick, O., 2012. Spatial prediction of landslide hazards in Hoa Binh province (Vietnam): A comparative assessment of the efficacy of evidential belief functions and fuzzy logic models. *Catena*, pp. 28–40.
- Feizizadeh, B., Blaschke, T., Tiede, D., Rezaei Moghaddam, M. H. 2017. Evaluating fuzzy operators of an object-based image analysis for detecting landslides and their changes. *Geomorphology* 293, pp. 240–254.
- Klir, J. G., Bo, Y., 1995. *Fuzzy Sets Fuzzy Logic: Theory and Application*, Prentice Hall, PTR.
- Kumar Dahal, R., 2008. Predictive Modeling of Rainfall-induced Landslide Hazard in the Lesser Himalaya of Nepal Based on Weights-of-evidence, *Geomorphology* 102, pp. 496–510.
- Leonardia, D., Palamaraa, R., Ciriannia, F., 2016. Landslide Susceptibility Mapping Using a Fuzzy Approach. *Procedia Engineering* 161, pp. 380 – 387.
- Lin, H., kao, J., Li, K., Hwang, H. H., 1996. Fuzzy GIS assisted landfill siting analysis. *proceedings of International Conference on solid waste technology and management*. System Theory. Brooklyn, NY: Polytechnic Press.
- Paulov, J., 1991. The Zone-Size-Dependent Entropy Formula and Spatial Interaction Modeling: A Note on Some Implications. *Environment and Planning* 23: pp. 557-570.
- Pradhan, B., Lee, S., 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling. *Environmental Modelling & Software* 25, pp. 747–759.
- Sakar, S., Kanungo, D.P., Mehrotar, G.S., 1995. *Landslide Zonation: A Case Study in Garhwal Himalaya, India*. Mountain Research and Development, Vol. 15, No. 4, PP.301-309

