

ارزیابی و مدیریت ریسک زمین لغزش در آبخیز شاهرود استان قزوین

جمال مصفايي^۱؛ دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران.
امین صالحپورجم؛ دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران.
محمودرضا طباطبایی؛ دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران.

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰

چکیده

ارزیابی ریسک زمین لغزش، برای ارائه تمامی طرح‌های کاهش خسارت ناشی از وقوع زمین لغزش‌ها ضروری است. هدف از این تحقیق ارزیابی ریسک زمین لغزش در حوزه آبخیز شاهرود استان قزوین است. برای این منظور، ابتدا ابتدا نقشه پراکنش زمین لغزش‌ها و نیز ۱۱ لایه اطلاعاتی شامل ارتفاع، میزان شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، متوسط بارش سالانه، حداکثر بارش روزانه، و پتانسیل لرزه‌خیزی فراهم شد. در ادامه پس از تعیین مقادیر نسبت فراوانی و عضویت فازی برای طبقات نقشه عوامل مختلف، نقشه حساسیت زمین لغزش با استفاده از مقادیر مختلف گاما تهیه شد. سپس، بعد از تهیه نقشه فازی آسیب‌پذیری برای واحدهای مختلف کاربری اراضی، میزان ریسک زمین لغزش از حاصل ضرب دو نقشه حساسیت زمین لغزش و آسیب‌پذیری تعیین شد. بطور کلی در این حوضه تعداد ۱۰۴ زمین لغزش با مجموع مساحت ۱۴۰۱ هکتار ثبت شد که ۷۰٪ آنها برای پهنه‌بندی (۷۳ زمین لغزش با مساحت ۹۸۲ هکتار) و ۳۰٪ باقیمانده (۳۱ زمین لغزش با مساحت ۴۱۸ هکتار) برای ارزیابی دقت نقشه‌های خطر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج ارزیابی نشان داد که بالاترین مقدار شاخص مجموع مطلوبیت (معادل ۱/۳۴) متعلق به عملگر فازی با گامی برابر با ۰/۹۳ بوده و لذا این مدل از دقت بالاتری نسبت به سایر مقادیر گاما برخوردار است. میزان اهمیت عوارض در معرض خطر دارای دامنه‌ای بین ۰/۰۵ (فاقد پوشش) تا ۱ (مناطق مسکونی و صنعتی) است. برای مقابله با خسارات زمین لغزش، سه سیاست کلی مناسب توسعه، پیشگیری و سیاست درمانی ارائه شد که می‌بایست آنها را بر اساس دو عامل میزان خطر و میزان آسیب‌پذیری برای پهنه‌های مختلف ریسک زمین لغزش اعمال نمود. در نهایت، به منظور کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین لغزش‌های احتمالی، کاربری‌های مناسب برای طبقات با ریسک بالا معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، حساسیت زمین لغزش، عملگرهای گاما، مدیریت ریسک زمین لغزش، قزوین.

مقدمه

زمین لغزش بنا بر تعریف عبارت است از تمامی جابه‌جایی‌ها و جداسدگی‌های خاک و مواد سنگی به سمت پایین دامنه که بر اساس تلفیقی از فرایندهای مختلف در مناطقی که توپوگرافی کوهستانی دارند، رخ می‌دهد (جویباری و همکاران، ۱۳۹۶). مهم‌ترین عامل وقوع زمین لغزش‌ها، نیروی وزن توده شیب‌دار است که باعث افزایش نیروی برشی می‌شود. اما عوامل دیگری مانند شرایط زمین‌شناسی، وضعیت توپوگرافی، شرایط آب و هوایی، شرایط آب زیرزمینی و سایر عوامل نیز وجود دارند که می‌توانند سبب کاهش مقاومت برشی توده شیب‌دار شده و لذا فرایند لغزش توده رسوبی را تسریع کنند (Salehpour Jam و همکاران ۲۰۲۱؛ سرفراز و همکاران، ۱۴۰۰). این پدیده موجب خسارت به انواع سازه‌های مهندسی، مناطق مسکونی، زمین‌های کشاورزی و در پی آن، ایجاد رسوب و سیلاب‌های گل‌آلود و در نهایت پرشدن مخازن سدها می‌شود (شعاعی، ۱۳۹۵). در بین بلایای طبیعی، سهم خسارات ناشی از حرکات توده‌ای در ایران، سالانه بالغ بر ۵۰۰ میلیارد ریال برآورد شده است (جویباری و همکاران، ۱۳۹۴؛ شفقتی و مصلحت‌جو، ۱۳۹۱). میزان خسارت‌های ناشی از زمین لغزش‌ها، مسئولین و جامعه علمی را بر آن داشته تا طرح‌های مختلفی را جهت کاهش خسارت این پدیده تهیه نمایند (طلایی، ۱۳۹۳). ارائه هرگونه طرحی در راستای کاهش خسارت زمین لغزش‌ها، در وهله اول مستلزم ارزیابی ریسک زمین لغزش در منطقه است. ریسک زمین لغزش عبارتست از پتانسیل ایجاد ضرر، آسیب و عواقب نامطلوب، و یا عبارتی خسارات جانی یا مالی ناشی از وقوع زمین لغزش (Lee & Jones, ۲۰۰۴). بنا بر تعریف ریسک نتیجه دو فاکتور حساسیت (بعنوان مثال یک رخداد زمین لغزش) و پیامدهای زیانبار آن است (Lee & Jones, ۲۰۰۴).

آسیب‌پذیری به میزان آسیب عناصر موجود در یک منطقه در اثر وقوع زمین لغزش اطلاق می‌شود (Papathoma-Köhle et al., ۲۰۱۷) که در مقیاس صفر (بدون آسیب) تا یک (آسیب کامل) بیان می‌شود. تعریف معمول و کیفی‌تری نیز از آسیب‌پذیری ارائه شده است که عبارتست از ویژگی‌ها و شرایطی از یک جامعه، سامانه یا دارایی‌ها که باعث حساسیت آن نسبت به اثرات مخرب یک خطر می‌شود (UNISDR, ۲۰۰۹). بر این اساس آسیب‌پذیری یک شرایطی از پیش موجود است و بطور مستقیم بستگی به ویژگی‌های عناصر در معرض خطر داشته و لذا در این تعریف تاکید کمتری بر روی خود فرآیند خطر وجود دارد (UNISDR, ۲۰۰۹).

سریع‌ترین روش پیش‌بینی خطر لغزش در مقیاس حوضه‌ای، تعیین پتانسیل خطر نسبی است. تعیین احتمال وقوع زمین لغزش، مستلزم تجزیه و تحلیل تمامی عوامل مؤثر در ایجاد آن و بکار بردن مدل‌های پیچیده است. از آنجاکه پیش‌بینی زمان وقوع زمین لغزش‌ها از توان علمی بشر خارج است، لذا شناسایی مناطق حساس به زمین لغزش و رتبه‌بندی این مناطق بر اساس پتانسیل خطر ناشی از بروز این پدیده حائز اهمیت است. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش عبارت است از تقسیم‌بندی سطح زمین به مناطق مجزا و رتبه‌بندی این مناطق بر اساس پتانسیل خطر ناشی از بروز زمین لغزش. با پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش می‌توان مناطق حساس و دارای پتانسیل خطر بالای لغزش را شناسایی نمود و با ارائه راه‌حل‌ها، روش‌های کنترل و مدیریت مناسب تا حدی از وقوع زمین لغزش‌ها جلوگیری و یا از خسارات ناشی از وقوع آن‌ها کاست (اصل پیشگیری بهتر از درمان). در برنامه‌های توسعه حوزه آبخیز باید تا حد امکان از مناطق با احتمال یا پتانسیل نسبی بالاتر خطر دوری جست و یا در صورت اجبار، حتی‌الامکان تمهیدات و نکات فنی لازم را در نظر گرفت (صالح‌پور جم و همکاران، ۱۳۹۹؛ رشوند و همکاران، ۱۳۹۲).

۱. United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR)

طی دو دهه اخیر تحقیقات زیادی در زمینه تعیین احتمال خطر وقوع و تهیه نقشه ریسک زمین لغزش برای مناطق مختلف انجام گرفته است. این تحقیقات دارای رویکردهای مختلفی از لحاظ نوع و تعداد عوامل مورد استفاده، مدل‌های پهنه‌بندی خطر و همچنین نحوه ارزیابی ریسک زمین لغزش هستند. آرمین و همکاران (۱۳۹۸)، نقشه خطر زمین لغزش استان کهگیلویه و بویراحمد را با استفاده از مدل تجربی حائری-سمیعی تهیه و پهنه‌بندی نمودند. مصفایی و همکاران (۱۳۹۹)، با استفاده از عملگرهای گامای فازی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش آبخیز طالقان رود را تهیه و برای ارزیابی دقت و صحت مقادیر مختلف گاما، از شاخص‌های نسبت تراکم و جمع مطلوبیت استفاده کردند. شریعت جعفری (۱۳۸۷) نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش البرز مرکزی را با عملگرهای گامای فازی بررسی و نتیجه‌گیری نمود که با افزایش ضریب گاما، درصدهای بیشتری از سطح منطقه در کلاس‌های خطر بالاتر قرار می‌گیرند و بر این اساس برای کاربری‌های مختلف مدنظر، مقادیر مختلفی از گاما را ارائه و پیشنهاد نمود. طلایی (۱۳۹۳)، نقشه ریسک زمین لغزش منطقه هشتمین را با ترکیب نقشه‌های پتانسیل خطر (عملگرهای گامای فازی) و پتانسیل خسارت منابع (نقشه‌های کاربری و پوشش گیاهی) تهیه و پهنه‌بندی نمود. کرنژادی و همکاران (۱۳۹۴)، نقشه پهنه‌بندی خسارت (ریسک) زمین لغزش آبخیز زیارت استان گلستان را از ترکیب سه نقشه خطر، عناصر در معرض خطر، و درجه آسیب‌پذیری تهیه کردند.

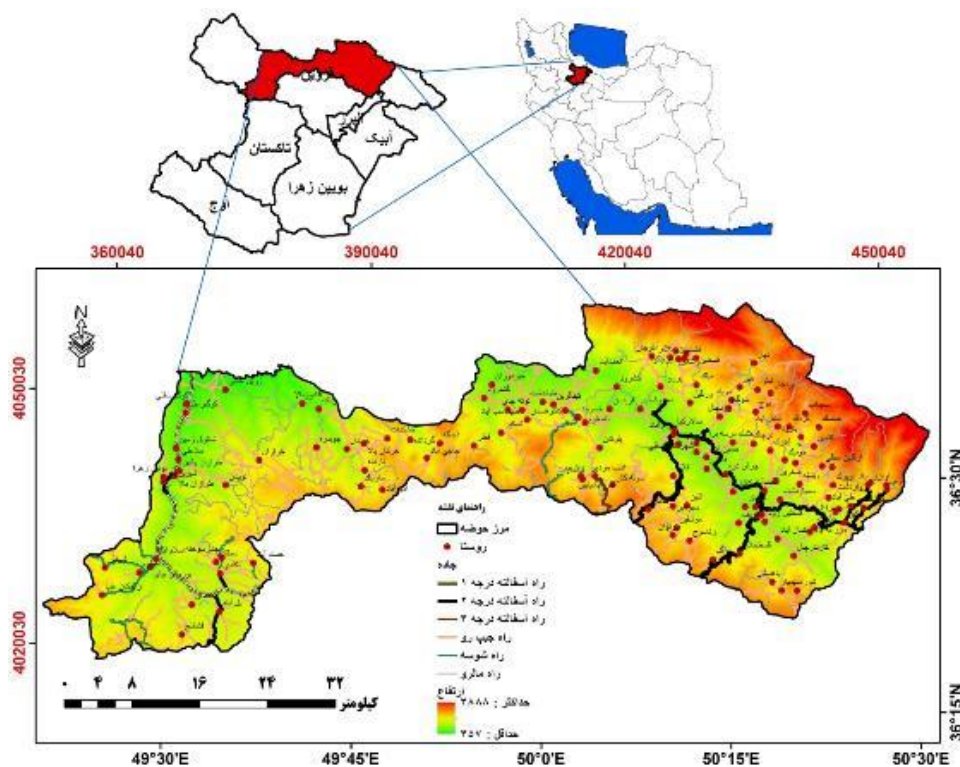
در منطقه دارجیلینگ هند نیز ریسک زمین لغزش بر اساس دو روش پیکسل‌های خطرناک و نظریه مجموعه فازی ارزیابی شده است (Kanungo et al., ۲۰۰۸). در مناطق احداث شده در جنوب صحرای آفریقا شامل کشورهای اتیوپی، کنیا، اوگاندا، نیجر و سنگال را که از لحاظ ویژگی‌های جغرافیایی و میزان توسعه متفاوت می‌باشند، ریسک زمین لغزش با استفاده از سه عامل خطر زمین لغزش، عوارض در معرض خطر و درجه آسیب‌پذیری ارزیابی و نتایج بیانگر آنست که شهرسازی و توسعه و زیرساخت‌های آسیب‌پذیر در کلاس‌های خطر کم تا متوسط باعث افزایش ریسک زمین لغزش این محدوده‌ها شده است (Redshaw et al., ۲۰۱۷).

مرور منابع بیان‌گر آنست که برای شناسایی مناطق حساس به زمین لغزش تأثیر عوامل مختلفی از جمله شیب، زمین‌شناسی، ارتفاع، کاربری، پوشش سطح زمین، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، جهت شیب، پوشش گیاهی، تراکم زهکشی، سنگ‌شناسی، خاک، بارش و سایر عوامل مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مطالعات انجام شده، در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش بوده و کمتر به ارزیابی ریسک و ارائه راهکارهای مدیریتی پرداخته شده است. آبخیز شاهرود از جمله بخش‌های کوهستانی و مستعد به زمین لغزش در استان قزوین است که باتوجه به خسارت‌های فراوان جانی و مالی زمین لغزش، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین طی تفاهم‌نامه‌ای با پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، خواستار انجام پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در این حوضه شده است. همچنین از آنجاکه تا کنون در حوضه شاهرود تحقیقی در رابطه با ارزیابی ریسک زمین لغزش انجام نگرفته است، لذا این تحقیق سعی بر آن دارد تا با برآورد دو عامل حساسیت زمین لغزش و میزان آسیب‌پذیری، میزان ریسک زمین لغزش را در این حوضه‌ها ارزیابی نماید. نتایج این تحقیق می‌تواند منجر به حفظ منابع و کاهش خسارات ناشی از رانش زمین شده و در نتیجه با راهنمای مدیریت ریسک زمین لغزش می‌توان گامی مؤثر را در جهت برنامه‌ریزی و مدیریت هر چه بهتر حوضه‌های مورد مطالعه برداشت.

داده و روش کار

• معرفی محدوده مورد مطالعه

وجود دره شاهرود در کوه‌های شمال استان قزوین سبب شکل‌گیری حوزه آبخیز شاهرود شده است. رودخانه‌های طالقان-رود و الموت‌رود که در منطقه شیرکوه به هم می‌پیوندند و رود پرآب شاهرود را به وجود می‌آوردند. این منطقه کوهستانی با مساحت ۱۹۴۴۵۸ هکتار (حدود ۲۲٪ مساحت استان) بخش‌های شمال و شمال شرقی استان را در بر گرفته است و دارای ارتفاع حداقل ۳۵۷، ارتفاع حداکثر ۳۸۸۸ و متوسط ارتفاع ۱۶۰۰ متر از سطح دریای آزاد، از طریق راه ارتباطی قزوین به رازمیان با شهر قزوین ارتباط می‌یابد. آبخیز شاهرود بصورت یک ناودیس مرکب است که عناصر تکتونیکی از جمله چین‌ها، گسل‌ها و درزه‌ها تغییراتی را در بخش‌های مختلف آن بوجود آورده‌اند. در این آبخیز، گسترش و رخنمون دو نوع سنگ‌شناسی مربوط به دوران سوم (تشکیلات آذرین مربوط به پالئوژن و رسوبی تخریبی و تبخیری مربوط به نئوژن)، مساحت قابل توجهی از منطقه را می‌پوشانند. در بخش‌های مرکزی منطقه و در امتداد بستر شاهرود، رسوبات آواری دانه‌ریز مربوط به نئوژن مشاهده می‌شوند. رخنمون مهم دیگر منطقه، مربوط به تشکیلات آذرین و آذرآواری پالئوژن است که شامل سنگ‌های آندزیت و توف می‌باشد. حرکات گسل‌ها در امتداد ارتفاعات شمالی، سبب رخنمون تشکیلات قدیمی‌تر (آهک، دولومیت، ماسه‌سنگ و به مقدار جزئی مارن و شیل مربوط به مزوزوئیک و پالئوزوئیک) شده است. شرایط آب‌وهوایی (بارش زیاد و تبخیر کم) و وجود قله‌های بلند و کانون‌های آبگیر دائمی در حوضه شاهرود سبب پیدایش پرآب‌ترین رود استان (شاهرود)، با حجم آب جاری سالانه حدود یک میلیارد مترمکعب (تقریباً ۷۰ درصد آب‌های جاری استان) شده است (مصفايي و همکاران، ۱۳۹۴).



شکل ۱- موقعیت آبخیز شاهرود در استان قزوین و ایران

• روش تحقیق

این تحقیق مشتمل بر شش مرحله اصلی تهیه لایه‌های اطلاعاتی، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، ارزیابی نقشه خطر زمین‌لغزش، تهیه نقشه آسیب‌پذیری، پهنه‌بندی ریسک زمین‌لغزش و ارائه پیشنهادات مدیریت ریسک زمین‌لغزش است.

- لایه‌های اطلاعاتی

برای تهیه نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها ابتدا نقشه اولیه‌ای با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای گوگل‌ارث و سایر منابع اطلاعاتی از جمله نقشه‌های زمین‌لغزش سازمان جنگل‌ها تهیه شد و بعد با انجام بازدیدهای گسترده میدانی، این نقشه تدقیق نهایی شد.

عوامل گسترده‌ای از جمله ارتفاع، میزان شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، متوسط بارش سالانه، حداکثر بارش روزانه، و پتانسیل لرزه‌خیزی بعنوان عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفتند. منابع اطلاعاتی برای تهیه نقشه عوامل مزبور، مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر، نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی کشور با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰، نقشه‌های توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰، نقشه پوشش گیاهی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ و تصاویر گوگل‌ارث بود. از آنجا که تعداد طبقات بعضی از نقشه‌های عوامل از جمله نقشه‌های سنگ‌شناسی و کاربری متعدد است لذا به منظور سهولت تحلیل داده‌ها سعی شد که تعداد طبقات آنها به نوعی کاهش یابد. برای تعیین ضریب عامل شدت زمین‌لرزه، از نتایج مطالعه موسوی بفرئی و همکاران (۱۳۹۳) استفاده شد و داده‌های رقومی شتاب بیشینه زمین^۱ مربوط به محدوده استان قزوین برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال تهیه شد.

- پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

برای تعیین خطر زمین‌لغزش ابتدا نقشه هریک از عوامل مؤثر، با نقشه پراکنش زمین‌لغزش قطع داده شد و مساحت زمین‌لغزش در هر طبقه از نقشه عوامل مشخص شد. سپس مقادیر نسبت فراوانی هریک از طبقات عوامل با استفاده از رابطه نسبت فراوانی^۲ (رابطه ۱)، محاسبه شد (Karimi Sangchini et al., ۲۰۱۳; Pourghasemi et al., ۲۰۰۷; Lee, ۲۰۱۶).

$$FR = \frac{L_i / \sum_{i=1}^n L_i}{C_i / \sum_{i=1}^n C_i} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن L_i مساحت زمین‌لغزش در طبقه i ام هر یک از عوامل، و C_i مساحت طبقه i ام هر یک از عوامل و n تعداد طبقات عامل است. در نهایت، از عملگرهای گامای فازی به‌منظور تلفیق نقشه‌های بر اساس نسبت فراوانی استفاده شد. در این راستا مقادیر نسبت فراوانی لایه‌های عوامل با استفاده از رابطه دو به دامنه عددی بین صفر تا یک تبدیل شدند.

$$\text{رابطه ۲} \quad X = (X - \text{MIN}x) / (\text{MAX}x - \text{MIN}x) = \text{مقدار عضویت فازی}$$

در رابطه ۲، X : مقدار نسبت فراوانی و $\text{MAX}x$ و $\text{MIN}x$ نیز به ترتیب کمینه و بیشینه مقادیر نسبت فراوانی طبقات هریک از عوامل است. در نهایت لایه‌های عوامل مؤثر با استفاده از روش‌های تلفیق فازی (Sum, Product, Gamma) (۰,۱)، (۰,۹۹، ...، ۰,۹، ۰,۹۱، ...، ۰,۹۹) با هم تلفیق شدند و حساسیت به وقوع زمین‌لغزش تعیین و در نهایت طبقه‌بندی شد.

۱. Peak Ground Acceleration (PGA)

۲. Frequency Ratio (FR)

- ارزیابی کارایی و صحت‌سنجی

ارزیابی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش، بر اساس ۳۰ درصد از مساحت زمین لغزش‌هایی که در تهیه نقشه پهنه‌بندی استفاده نشده‌اند، و با استفاده از شاخص‌های نسبت تراکم^۱ و مجموع مطلوبیت^۲ (Gee, ۱۹۹۲) انجام گرفت.

$$Dr = \frac{\sum_1^n \frac{Si}{Ai}}{\sum_1^n Ai} * 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن Dr : شاخص تراکم لغزش در هر طبقه خطر، Ai : مساحت هر طبقه خطر، Si : مساحت زمین لغزش‌ها در هر طبقه خطر و n : تعداد طبقات خطر است.

که در آن Qs : شاخص جمع مطلوبیت، S : نسبت مساحت رده خطر به مساحت منطقه است.

$$Qs = \sum_{i=1}^n [(Dr - 1)^2 \times S] \quad \text{رابطه ۴}$$

- نقشه آسیب پذیری

ابتدا نقشه تمامی عوارض در معرض خطر اعم از مناطق شهری و روستایی، راه‌ها، اراضی زراعی آبی، اراضی زراعی دیم، باغات، اراضی مرتعی و جنگلی با استفاده از منابع موجود تهیه شد و بعد بر اساس نظر کارشناسی و تحقیقات گذشته (طلایی، ۱۳۹۳؛ ۲۰۰۸، Kanungo et al) اعدادی بین صفر تا یک که بیانگر میزان خسارت احتمالی در صورت رخداد زمین لغزش هستند، به هر طبقه از نقشه منابع اختصاص یافت. در نهایت، نقشه آسیب‌پذیری منابع در معرض خطر بر اساس میزان خسارت احتمالی عوارض در محیط ArcGIS تهیه شد.

- ارزیابی ریسک زمین لغزش

برای ارزیابی ریسک زمین لغزش از دو عامل حساسیت زمین لغزش و میزان آسیب‌پذیری استفاده شد. نقشه ریسک زمین لغزش از حاصل ضرب دو نقشه فازی میزان خطر و نقشه فازی آسیب‌پذیری تهیه و طبقه‌بندی شد (طلایی، ۱۳۹۳).

- سیاست‌ها و اقدامات مدیریت ریسک زمین لغزش

بدین منظور ابتدا تناسب کلاس‌های مختلف خطر برای استقرار کاربری‌های مختلف با توجه به دو عامل میزان خطر و آسیب‌پذیری عناصر در معرض خطر مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس استقرار کاربری‌های با آسیب‌پذیری بالا در پهنه‌های پرخطر نامناسب بوده و باعث افزایش تصاعدی ریسک زمین لغزش خواهد شد. در نهایت راهبردها و اقدامات مدیریت ریسک زمین لغزش برای هر یک از طبقات خطر معرفی شد.

۱- Density Ratio (Dr)

۲- Quality sum (Qs)



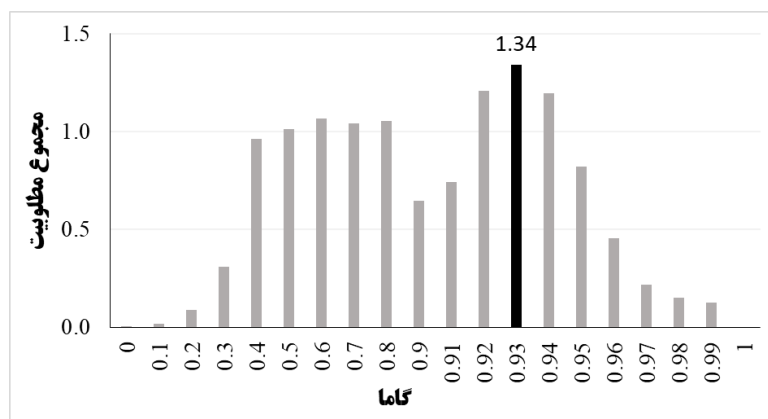
مابین دریاچه اوان و روستای زرآباد



دامنه‌های مجاور یارود

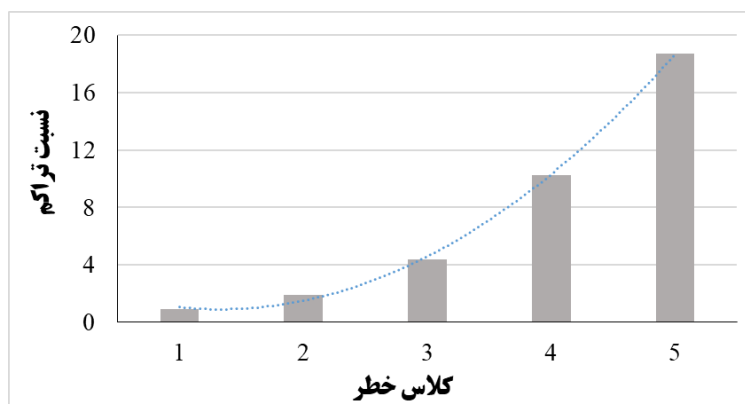
شکل ۳- تصاویری از زمین لغزش‌های آبخیز شاهرود و خسارات وارده

در شکل چهار نمودار مقادیر جمع مطلوبیت برای هر یک از مقادیر گاما ارائه شده است.

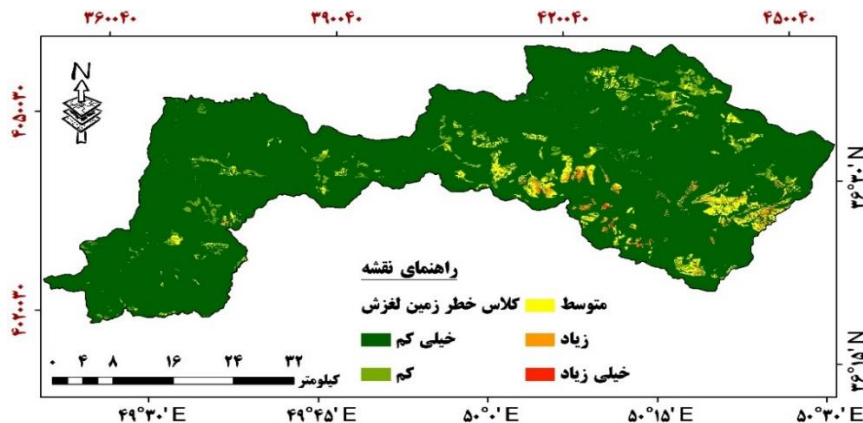


شکل ۴- شاخص جمع مطلوبیت برای هر یک از ضرایب گاما

در شکل پنج نمودار مقادیر نسبت تراکم برای هر یک از طبقات کلاس‌های نقشه خطر حاصل از گامای ۰/۹۳ ارائه شده است.



شکل ۴- شاخص نسبت تراکم کلاس‌های نقشه خطر حاصل از گامای ۰/۹۳



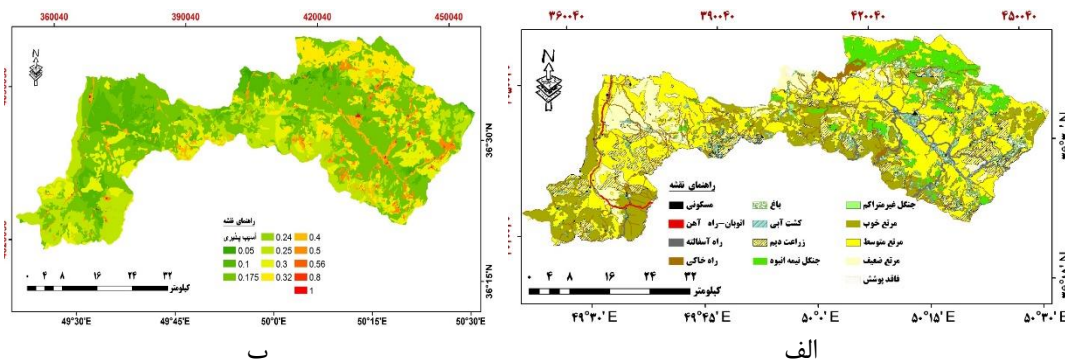
شکل ۶- نقشه حساسیت زمین لغزش آبخیز شاهرود (Gamma=۰.۹۳)

در جدول دو، میزان خسارات احتمالی در صورت رخداد زمین لغزش برای هر یک از عوارض در معرض خطر اعم از مناطق شهری و روستایی، راه‌ها، اراضی زراعی آبی، اراضی زراعی دیم، باغات، اراضی مرتعی و جنگلی و غیره ارائه شده است.

جدول ۲- میزان خسارات احتمالی عوارض در معرض خطر

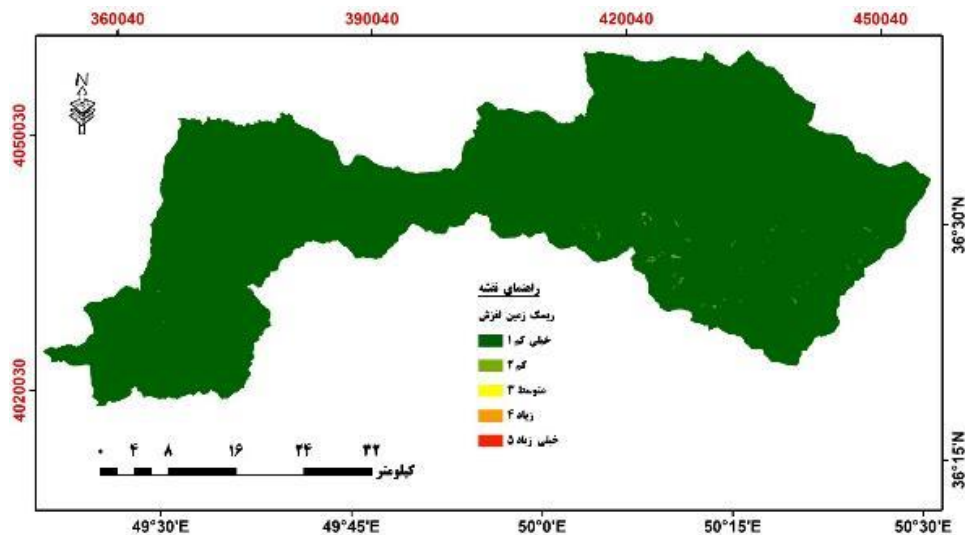
منابع اصلی	خسارت	بخش	خسارت	زیربخش	خسارت	خسارت نهایی
مناطق مسکونی و صنعتی	۱	-	-	-	-	۱
زیرساختها و ابنیه	۰.۸	اتوبان و راه آهن	۱	راه آسفالت	۰.۷	۰.۵۶
		جاده فرعی	۰.۳			۰.۲۴
		کشاورزی	۱	باغ		۰.۵
کشاورزی و منابع طبیعی	۰.۵	جنگل	۰.۸	زراعت آبی	۰.۸	۰.۴
				زراعت دیم	۰.۶	۰.۳
				متراکم	۱	۰.۴
				نیمه متراکم	۰.۷	۰.۳۲
				کم متراکم	۰.۴	۰.۲۴
	مرتع	۰.۵	خوب	۱	۰.۲۵	
			متوسط	۰.۷	۰.۱۷۵	
			ضعیف	۰.۴	۰.۱	
فاقد پوشش	۰.۱					۰.۰۵

نقشه کاربری‌های اراضی و منابع در معرض خطر منطقه در شکل هفت (الف) ارائه شده است. نقشه آسیب پذیری منابع در معرض خطر زمین لغزش که بر اساس میزان اهمیت عوارض تهیه شده، در شکل هفت (ب) ارائه شده است.



شکل ۷- نقشه عوارض در معرض خطر (الف) و آسیب پذیری (ب) منابع آبخیز شاهرود

نقشه پهنه‌بندی ریسک زمین لغزش که از حاصل ضرب دو نقشه خطر زمین لغزش و نقشه آسیب‌پذیری تهیه شد، در شکل هشت ارائه شده است. جدول سه نیز مساحت کاربری‌های مختلف اراضی در هر یک از کلاس‌های ریسک زمین لغزش را ارائه کرده است.



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی ریسک زمین لغزش آبخیز شاهرود

جدول ۳- توزیع مساحت (متر مربع) کاربری‌های اراضی در کلاس‌های ریسک زمین لغزش آبخیز شاهرود

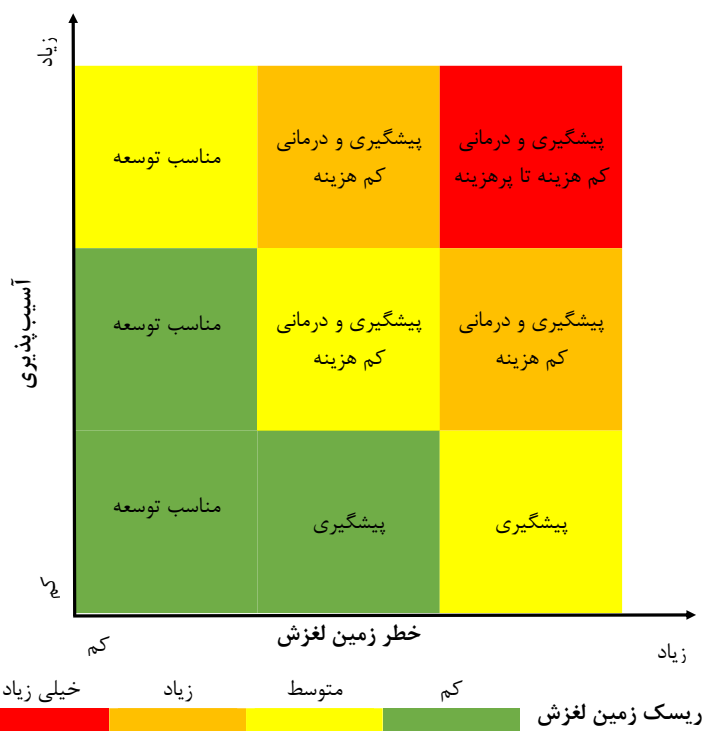
کلاس ریسک کاربری	۱	۲	۳	۴	۵	مجموع
باغ	۵۹۹۰۱۸۲۹	۱۷۱۰۰۶۴	۵۷۱	۰	۰	۶۱۶۳۲۰۰۹
جنگل	۱۷۸۷۲۷۲۸۱	۷۱۷۰۴	۱۷۰	۰	۰	۱۷۸۹۲۲۷۸۱
راه	۳۶۲۸۷۶۴۱	۱۱۱	۰	۰	۰	۳۶۳۸۰۸۹۴
زراعت دیم	۲۳۹۴۵۳۰۳۶	۲۸۶۱	۱	۰	۰	۲۳۹۷۳۷۶۲۱
فاقد پوشش	۱۲۶۱۳۰۴۳	۰	۰	۰	۰	۱۲۶۴۶۸۹۱
کشت آبی	۶۷۹۶۸۲۱۸	۶۰۷۲۴۸	۱۵۹۹	۴۳	۰	۶۸۶۲۲۱۷۱
مرتع	۱۳۶۶۹۴۱۲۹۷	۱۹۸۹	۰	۰	۰	۶۴۳۴۵۶۶۹۷
مسکونی	۶۰۴۴۷۳۴	۱۵۳۱۹۱	۲۷۳۴۷	۵۳۳	۰	۶۲۲۶۲۸۱
مجموع	۱۹۶۷۹۴۲۶۰۵	۲۵۴۷۱۶۷	۲۹۶۸۸	۵۷۶	۰	۱۹۷۲۳۵۹۲۹۱

دامنه مقادیر شاخص جمع مطلوبیت (شکل سه) برای هر یک از مقادیر گاما بین صفر (مربوط به گامای برابر با یک یا جمع فازی) تا ۱/۳۴ (مربوط به گامای برابر با ۰/۹۳) متغیر است. بر این اساس در آبخیز شاهرود روش تلفیق فازی با گامای برابر با ۰/۹۳ بهترین نقشه را برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش ارائه کرده است. تحقیقات گذشته نیز کارایی مناسب مقادیر گامای بالاتر از ۰/۹ را نشان داده‌اند که از جمله آنها می‌توان به گامای ۰/۹۷۵ در آبخیز هراز (مرادی و همکاران، ۱۳۸۹)، گامای ۰/۹ در جم بوشهر (صفاری و همکاران، ۱۳۹۴)، گامای ۰/۹۴ در آبخیز کلان استان فارس (Hinotoli Sema et al., ۲۰۰۴)، گامای ۰/۹۷۵ در کره (Lee, ۲۰۰۷)، گامای ۰/۹۷۵ در هندوستان (Tangestani, ۲۰۱۷) اشاره کرد.

انحراف زیاد مقادیر شاخص نسبت تراکم از مقدار میانگین برای هر یک از طبقات کلاس‌های نقشه خطر حاصل از گامای ۰/۹۳ (شکل چهار)، نشان‌دهنده آن است که تراکم زمین لغزش‌ها در کلاس‌های مختلف خطر دارای تفاوت فاحشی است.

از طرفی مقادیر شاخص نسبت تراکم این نقشه، نشان از سیر صعودی مقادیر این شاخص برای طبقات خطر به ترتیب از یک (خیلی کم) تا پنج (خیلی زیاد) دارد. این نتایج حاکی از تفکیک مناسب رده‌های خطر و طبقه‌بندی صحیح این نقشه خطر است (Gee, ۱۹۹۲).

سیاست‌های کاهش خسارات زمین‌لغزش را می‌توان به سه سیاست کلی شامل سیاست مناسب توسعه، سیاست پیشگیری (سعی بر حفظ وضع موجود) و سیاست درمانی (کم‌هزینه تا پرهزینه) تقسیم نمود که می‌بایست آنها را بر اساس دو عامل میزان خطر و میزان آسیب‌پذیری برای پهنه‌های مختلف ریسک زمین‌لغزش اعمال نمود (شکل نه).



شکل ۹- سیاست‌های مدیریت ریسک زمین‌لغزش بر اساس عوامل میزان خطر و آسیب‌پذیری

در مناطقی که خطر زمین‌لغزش خیلی کم است، نه تنها نیازی برای مدیریت خطر زمین‌لغزش نیست، بلکه در این مناطق می‌توان سیاست‌های توسعه بخش‌های مختلف از قبیل کشاورزی، صنعت، مناطق مسکونی، راه‌های مواصلاتی، خطوط انتقال نیرو و یا سایر زیرساخت‌ها را نیز اعمال نمود.

در سیاست پیشگیری سعی بر این است که از افزایش ضریب آسیب‌پذیری در مناطق پرخطر اجتناب گردد، لذا در این روش‌ها، اساس برنامه مدیریت ریسک زمین‌لغزش را قوانین و دستورالعمل‌های کاربری اراضی و برنامه‌های آموزش به عموم تشکیل می‌دهند. میزان آسیب‌پذیری کاربری‌های مختلف اراضی در برابر زمین‌لغزش یکسان نیست و استقرار کاربری‌های با درجه آسیب‌پذیری بالا در پهنه‌های پرخطر، باعث افزایش تصاعدی ریسک زمین‌لغزش خواهد شد. از طرفی برخی از تغییرات کاربری اراضی علاوه بر آسیب‌پذیری بالا، می‌توانند با تغییر شرایط عوامل مستعدکننده زمین‌لغزش (برای مثال افزایش میزان نفوذ آب ناشی از شخم و یا کشت آبی، و یا افزایش وزن توده ناشی از بارگذاری ابنیه، و یا برداشتن پای دامنه و افزایش شیب ناشی از جاده‌سازی)، میزان خطر را نیز افزایش داده و ریسک زمین‌لغزش یک محدوده را با افزایش هر دو پارامتر موثر بر ریسک افزایش دهند. لذا برای مدیریت ریسک زمین‌لغزش می‌بایست ضابطه‌ای را بر

اساس میزان خطر و آسیب‌پذیری زمین‌لغزش، برای استقرار کاربری‌های مختلف در پهنه‌های مختلف در نظر گرفت. بر این اساس در جدول چهار تناسب پهنه‌های کلاس خطر زمین‌لغزش برای استقرار کاربری‌های مختلف زمین ارائه شد.

جدول ۴- تناسب کلاس‌های خطر مختلف برای استقرار انواع کاربری‌های زمین

کاربری خطر	جنگل	مرتع	کشت دیم	باغ	کشت آبی	معدن	دامداری متمرکز	جاده	صنعتی	مسکونی
۱	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
۲	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
۳	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
۴	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
۵	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-

+ : مناسب، - : نامناسب، -- : بسیار نامناسب

بر این اساس در مناطق تحت پوشش این سیاست می‌بایست با استفاده از قوانین و دستورالعمل‌های آمایش سرزمین و نیز برنامه‌های آموزش به جوامع محلی از توسعه کاربری‌های نامتناسب با کلاس‌های مختلف خطر ممانعت بعمل آورد. سیاست درمانی نیز مناسب مناطقی است که از طرفی میزان خطر زمین‌لغزش بالاست، و از سوی دیگر به دلیل توسعه مناطق مسکونی، کشاورزی و یا استقرار زیرساخت‌ها، میزان آسیب‌پذیری نیز در آن محدوده‌ها افزایش یافته است. لذا در این مناطق می‌بایست از سیاست درمانی برای کاهش ریسک زمین‌لغزش بهره جست. برای کاهش ریسک زمین‌لغزش این مناطق نیز دو گزینه اصلی کاهش آسیب‌پذیری و کاهش میزان خطر را می‌توان در نظر گرفت. برای کاهش آسیب‌پذیری می‌بایست کاربری‌های متناسب با کلاس خطر محدوده را انتخاب و در منطقه اعمال نمود که از جمله این اقدامات می‌توان به مواردی نظیر تبدیل زراعت‌ها به مراتع، تغییر مسیر جاده و خطوط انتقال نیرو و یا سایر زیرساخت‌ها، تغییر مکان دامداری و حتی روستا اشاره نمود. استقرار سامانه‌های پایش و هشدار نیز می‌تواند با تخلیه جمعیت از توده لغزشی، میزان آسیب‌پذیری و در نتیجه ریسک را کاهش دهد. از جمله راهکارهای کاهش خطر زمین‌لغزش نیز می‌توان به مواردی نظیر اقدامات بیولوژیک کاهش خطر، زهکشی سطحی، جایگزینی سیستم‌های آبیاری سنتی با سیستم‌های آبیاری تحت فشار، ساماندهی فاضلاب شهری-روستایی، باز کردن مسیر آبراهه‌ها، آهک‌پاشی (کم‌هزینه) و البته اقدامات مکانیکی نظیر شمع کوبی، احداث دیوار حائل، شبکه‌های توری فلزی (پرهزینه) اشاره نمود که بنا به شرایط منطقه و فراخور نیاز می‌بایست مورد استفاده قرار گیرند.

نتیجه‌گیری

ارزیابی ریسک زمین‌لغزش، برای ارائه تمامی طرح‌های کاهش خسارت ناشی از وقوع زمین‌لغزش‌ها ضروری است. اتخاذ شیوه‌های مناسب مدیریتی در انتخاب گزینه‌های صحیح مقابله با زمین‌لغزش بسیار موثر است. وجود اطلاعات پایه، کسب و بکارگیری دانش و فنون لازم، وضع قوانین مناسب و تدوین برنامه‌های آموزشی و ترویجی به عنوان ابزارهای اولیه مدیریت ریسک زمین‌لغزش محسوب می‌گردند که پایه و اساس اجرای شیوه‌های مدیریتی را تشکیل می‌دهند. در این تحقیق ریسک زمین‌لغزش در حوزه آبخیز شاهرود مبتنی بر تلفیق نقشه حساسیت زمین‌لغزش و آسیب‌پذیری ارزیابی شد. بطور کلی در این حوضه تعداد ۱۰۴ زمین‌لغزش با مجموع مساحت ۱۴۰۱ هکتار ثبت شد و نتایج ارزیابی نشان داد که عملکرد فازی با گامای برابر با ۰/۷ بالاترین مقدار شاخص مجموع مطلوبیت (معادل ۱/۵۳) را داشته و از دقت بالاتری

نسبت به سایر مقادیر گاما برخوردار است. همچنین برای مقابله با خسارات زمین لغزش، سه سیاست کلی مناسب توسعه، پیشگیری و سیاست درمانی ارائه شد که می‌توان آنها را بر اساس دو عامل میزان خطر و میزان آسیب‌پذیری برای پهنه‌های مختلف آبخیز اعمال نمود. در نهایت، به منظور کاهش خسارات ناشی از وقوع زمین لغزش‌های احتمالی، کاربری‌های مناسب برای طبقات با ریسک بالا معرفی شد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق بصورت پروژه تحقیقاتی (کد: ۹۷۰۱۵۸-۹۷۰۰۸-۲۹-۲۹-۰۴) در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و با استفاده از اعتبارات مالی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان قزوین به انجام رسیده است. نگارندگان بدین‌وسیله از تمامی دست‌اندرکاران صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

منابع

- آرمین، محسن؛ جمال مصفایی، وجیهه قربان‌نیا خبیری و افسانه خیری. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی زمین لغزش و برنامه مدیریتی کنترل خطر آن در استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از مدل حائری-سمیعی. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۷(۴): ۱۷۶-۱۹۶.
- جویباری، جمشید؛ عطالله کاویان و جمال مصفایی. ۱۳۹۶. بررسی تاثیر کاربری اراضی بر میزان حرکت زمین لغزش (مطالعه موردی: زمین لغزش توان استان قزوین). *مجله پژوهش‌های آبخیزداری*، ۳۰(۳): ۲۹-۳۹.
- جویباری، جمشید؛ عطالله کاویان و جمال مصفایی. ۱۳۹۴. تأثیر خصوصیات بارش بر تغییرات مکانی و زمانی حرکت توده لغزشی منطقه توان در استان قزوین. *مجله پژوهش‌های آبخیزداری*، ۴(۴): ۷۵-۸۶.
- صالح‌پور جم، امین؛ فهیمه رسولی، امیر سررشته‌داری، جمال مصفایی و محمد کیا کیانیان. ۱۳۹۹. بررسی شاخص‌های اجتماعی مؤثر در عدم مشارکت مردمی در طرح‌های منابع طبیعی با کاربرد روش AHP و آزمون‌های ناپارامتریک. *مجله مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۲(۱): ۳۳۰-۳۳۹.
- رشوند، سعید؛ جمال مصفایی، محمد درویش، عمار رفیعی امام. ۱۳۹۲. بررسی پتانسیل بیابان‌زایی از منظر زوال پوشش گیاهی (مطالعه موردی: حوضه رود شور قزوین). *مجله تحقیقات مرتع و بیابان*، ۲۰(۱): ۳۸-۴۹.
- رشوند، سعید و جمال مصفایی. ۱۳۹۲. بررسی تاثیر روند فشار جمعیت انسانی بر محیط زیست (مطالعه موردی: حوضه شور قزوین). *مجله انسان و محیط زیست*، ۲۵: ۴۱-۵۵.
- سرفراز، فرامرز؛ جمال مصفایی، روح انگیز اختری و امین صالح‌پور جم. ۱۴۰۰. ارزیابی کارایی مدل تجربی حائری-سمیعی و آماری دو متغیره در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش (مطالعه موردی: استان قزوین). *جغرافیای طبیعی*، ۱۴(۵۲): ۹۹-۱۱۸.
- شفقتی، مهدی و عطاله مصلحت‌جو. ۱۳۹۱. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با روش آنبالاگان در محیط ArcGIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چاکرود گیلان). *فصلنامه جغرافیایی سرزمین*، ۹(۳۵): ۹۳-۱۰۲.
- شریعت‌جعفری، محسن. ۱۳۸۷. ارزیابی ریسک ویژه زمین لغزش در بخشی از البرز جنوبی. *نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران*، ۱: ۱-۱۴.
- شعاعی، ضیاء‌الدین. ۱۳۹۵. *زمین لغزش‌ها (شناخت، ارزیابی و کنترل)*. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- کرنازادی، آیدینگ؛ مجید اونق و امیر سعدالدین. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر و خسارت زمین لغزش (مطالعه‌ی موردی: حوضه آبخیز زیارت، استان گلستان). *فصلنامه مدیریت بحران*، ۷: ۵۱-۶۲.
- صفاری، امیر؛ منیره رعیتی شوازی، مریم جان احمدی، لیلا شیرزاد ملایری. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل نسبت فراوانی و منطق فازی (مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان جم). *فصلنامه جغرافیای طبیعی*، ۸(۳۰): ۱۵-۳۰.

- طلائی، رضا. ۱۳۹۳. ارزیابی ریسک زمین لغزش در منطقه هشتچین به منظور استفاده در طراحی‌های توسعه‌ای و کاربری اراضی. *مجله مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۶(۱): ۲۱-۴۴.
- مرادی، حمیدرضا؛ حمیدرضا پورقاسمی، مجید محمدی و محمدرضا مهدوی فر. ۱۳۸۹. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از اپراتور فازی گاما (مطالعه موردی: حوزه آبخیز هراز). *فصلنامه علوم محیطی*، ۷(۴): ۱۲۹-۱۴۲.
- مصفايي، جمال؛ امين صالح پورجم، فرامرز سرفراز، صمد شادفر... ۱۳۹۹. پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از عملگرهای گامای فازی در آبخیز طالقان رود استان قزوین. *مجله جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۰(۳): ۷۱-۹۰.
- مصفايي، جمال؛ داوود اخصري، سعید رشوند و جواد عطایی. ۱۳۹۴. تحلیل منطقه‌ای سیلاب با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره (مطالعه موردی: ایستگاه‌های آب‌سنجی استان قزوین). *مجله مرتع و آبخیزداری*، ۶۸(۴): ۸۲۱-۸۳۳.
- موسوی بفرئی، سید حسن؛ نوربخش میرزائی، الهام شعبانی، مرتضی اسکندری قادی. ۱۳۹۳. پهنه‌بندی خطر زمین لرزه در ایران و برآورد مقادیر بیشینه شتاب برای مراکز استان‌ها. *مجله فیزیک زمین و فضا*: ۴۰(۴): ۱۵-۳۸.
- Gee, M. D. ۱۹۹۲. Classification of Landslide Hazard Zonation Methods and a Test of Predictive Capability, Vol. ۲, Proc. 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand, pp. ۹۴۷-۹۵۲.
- Hinotoli Sema, V., Balamurugan, G., Ramesh, V. ۲۰۱۷. Fuzzy gamma operator model for preparing landslide susceptibility zonation mapping in parts of Kohima Town, Nagaland, India. *Model. Earth Syst. Environ.*, ۳: ۴۹۹-۵۱۴.
- Joybari, J., Kavian, A. A., & Mosaffaie, J. ۲۰۱۷. Effect of land use on landslide movement in the Tavan district, Qazvin. *Watershed Management Research Journal*, ۳۰(۳): ۲۹-۳۹.
- Joybari, J., Kavian, A., & Mosaffaei, J. ۲۰۱۶. The effect of precipitation characteristics on spatial and temporal variations of Tavan landslide movement. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ۴(۴): ۷۵-۸۶.
- Kanungo D. P., Arora, M. K., Gupta, R. P., Sarkar, S. ۲۰۰۸. Landslide risk assessment using concepts of danger pixels and fuzzy set theory in Darjeeling Himalayas. *Landslides*, ۵: ۴۰۷-۴۱۶. DOI ۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۳۴۶-۰۰۸-۰۱۳۴-۳.
- Karimi Sangchini, E., Emami, S.N., Tahmasebipour, N., Pourghasemi, H.R., Naghibi, S.A., Arami, S.A., Pradhan, B. ۲۰۱۶. Assessment and comparison of combined bivariate and AHP models with logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Chaharma-hal-e-Bakhtiari Province, Iran. *Arab J Geosci*, ۹:۱۵.
- Lee, E. M., & Jones, D. K. ۲۰۰۴. Landslide risk assessment, Vol. ۱۰. London: Thomas Telford.
- Lee, S. ۲۰۰۷. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, ۵۲: ۶۱۵-۶۲۳.
- Papathoma-Köhle, M., Gems, B., Sturm, M., & Fuchs, S. ۲۰۱۷. Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows. *Earth-Science Reviews*, ۱۷۱: ۲۷۲-۲۸۸.
- Pourghasemi H. R., Moradi H R, Fatemi Aghda S M. ۲۰۱۳. Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Nat Hazards*, ۶۹:۷۴۹-۷۷۹.
- Redshaw, P., Dijkstra, T., Free, M., Jordan, C., Morley, A., & Fraser, S. ۲۰۱۷. Landslide risk assessment for the built environment in Sub-Saharan Africa. In Workshop on World Landslide Forum (pp. ۵-۱۲). Springer, Cham.
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., Sarfaraz, F., Shadfar, S., & Akhtari, R. ۲۰۲۱. GIS-based landslide susceptibility mapping using hybrid MCDM models. *Natural Hazards*, ۱۰۸(۱): ۱۰۲۵-۱۰۴۶.
- Tangestani, M.H. ۲۰۰۴. Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma approach in a GIS, Kakan catchment area, southwest Iran. *Australian Journal of Earth Sciences*, ۵۱: ۴۳۹-۴۵۰.
- UNISDR, U. ۲۰۰۹. Terminology on disaster risk reduction. Geneva, Switzerland.