



کاربرد مدل‌های آماری دو متغیره در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش

در حوضه آبریز نازلوچای

احمد نجفی ایگدیر^{۱*}، شهرام روستایی^۲، اسداله حجازی^۳، معصومه رجبی^۴، نادر جلالی^۵

۱- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز و عضو هیئت علمی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

۲- استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۴- استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۵- استادیار جغرافیا، دانشکده‌ی حفاظت خاک و آبریزداری کشور

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۰۵

وصول مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

چکیده

زمین‌لغزش‌ها حاصل تغییر شرایط طبیعی و فعالیت‌های مخرب ساکنین طبیعت می‌باشند. شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی خطر آن جهت برنامه‌ریزی و انجام اقدامات کنترلی از اهداف تحقیق حاضر می‌باشد. شناسایی این عوامل و ارزشگذاری هر عامل می‌تواند به پهنه‌بندی مناسب خطر زمین‌لغزش کمک کند. بنابراین برای مدیریت خطر در حوضه‌ی نازلوچای در شمالغرب ایران، کارایی روش‌های آماری دومتغیره مورد ارزیابی قرار گرفته است. لذا از طریق بازدیدهای میدانی و استفاده از اطلاعات محلی، عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌های Google Earth، نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش‌ها تهیه گردید. در ادامه عوامل مؤثر در زمین‌لغزش شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، بارش، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه و فاصله از جاده با استفاده از نقشه‌ی توپوگرافی، عکس هوایی و تصاویر ماهواره‌ای تهیه و وارد مدل گردیدند. سپس از طریق همپوشانی و انطباق نقشه‌های عامل با نقشه‌ی پراکنش زمین‌لغزش بطور مستقل و جداگانه، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با روش‌های آماری دومتغیره (مدل‌های گوپتا- جوشی و ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح) انجام شد. در نهایت نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با همپوشانی لایه‌های مختلف بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل تراکم سطح و ارزش اطلاعاتی از کارایی بالایی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مناطق نیمه خشک و مرطوب برخوردار هستند.

کلمات کلیدی: مدل‌های آماری دومتغیره، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، سیستم اطلاعات جغرافیایی، حوضه‌ی نازلوچای، استان آذربایجان غربی

۱- مقدمه

زمین لغزش‌ها از عوامل تئیرگذار بر روی زندگی انسانی هستند که به خوبی شناخته نشده‌اند. عوامل متعددی در رخداد زمین لغزش نقش دارند که وجود آنها می‌تواند خطر وقوع زمین لغزش در هر پهنه را افزایش دهد. شناسایی این عوامل و ارزش اثرگذاری آنها می‌تواند به پهنه‌بندی مناسب زمین لغزش کمک کند. هدف از بررسی زمین لغزش‌ها، یافتن راه‌هایی برای کاهش خسارت‌های ناشی از آنها می‌باشد و همین امر پهنه‌بندی مناطق مستعد لغزشی را ضروری ساخته که نقش غیرقابل انکاری را در مدیریت حوضه‌های آبریز ایفا می‌کند. لذا با بکارگیری مدل‌های آماری ضمن ارزیابی و اعتبارسنجی آنها، مناطق حساس به لغزش حوضه شناسایی و پهنه‌بندی صورت می‌گیرد. مقیاس کار، میزان و کیفیت داده‌ها، انتخاب روش مناسب تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی، اعتبار نقشه‌های حساسیت زمین لغزش را تضمین می‌کند. فرآیندی که منجر به تهیه‌ی چنین نقشه‌هایی می‌شود شامل چندین رویکرد کیفی و کمی است (آیالو و یاماگیشی^۱، ۲۰۰۵). نظرات کارشناسی معیار رویکردهای کیفی است که ارزیابی خطر یا حساسیت را انجام می‌دهند (آلتوتی و چادوری^۲، ۱۹۹۹). روش‌های کیفی به دو نوع تقسیم می‌شوند: تحلیل پراکندگی یا سیاهه لغزش^۳ و اکتشافی^۴. بهترین روش تهیه نقشه خطر زمین لغزش، تهیه سیاهه لغزش می‌باشد که با بررسی‌های میدانی و بر اساس تفسیر عکس‌های هوایی، و با استفاده از داده‌های تاریخی لغزش‌های وقوع یافته می‌باشد. نقشه‌های سیاهه حرکات توده‌ای، پایه‌ی بیشتر روش‌ها برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش می‌باشند (ون وستن و سوترز^۵، ۱۹۹۸). انتظار و همکاران (۱۳۹۲) در ارزیابی روش‌های آماری دومتغیره در پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در کارون جنوبی به این نتیجه رسیدند که عمده دامنه‌های ناپایدار در منطقه که دارای شرایط وقوع لغزش هستند در حواشی رودخانه ماربربه بوقوع می‌پیوندند و قسمت‌های شرق و جنوب شرق منطقه دارای دامنه‌های پایدار با کمترین میزان لغزش می‌باشد. امیراحمدی و همکاران (۱۳۹۳)، در حوضه‌ی بقیع با استفاده از روش‌های آماری دومتغیره اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش نمودند که با بررسی‌های صورت گرفته، روش ارزش اطلاعاتی به لحاظ داشتن انطباق بیشتر زمین لغزش‌ها با پهنه‌های خطر بالا، کارایی بهتری نسبت به روش گوپتا و جوشی داشته است. شادفر و همکاران (۱۳۸۴)، زمین لغزش در حوضه‌ی لاکتراشان تنکابن را با استفاده از مدل LNRf مورد پهنه‌بندی قرار داد. نتایج تحقیق نشان داد که مدل LNRf کارایی بسیار خوبی برای پهنه‌بندی زمین لغزش بویژه در نواحی مرطوب تا نیمه مرطوب دارد. در این تحقیق عوامل لیتولوژی (رس، سیلت با لایه‌هایی از ماسه‌سنگ زغالدار)، شیب ۳۰ تا ۴۰ درجه و جهت شیب شمال غربی به دلیل دریافت رطوبت زیادتر از دریای خزر بیشترین تأثیر را

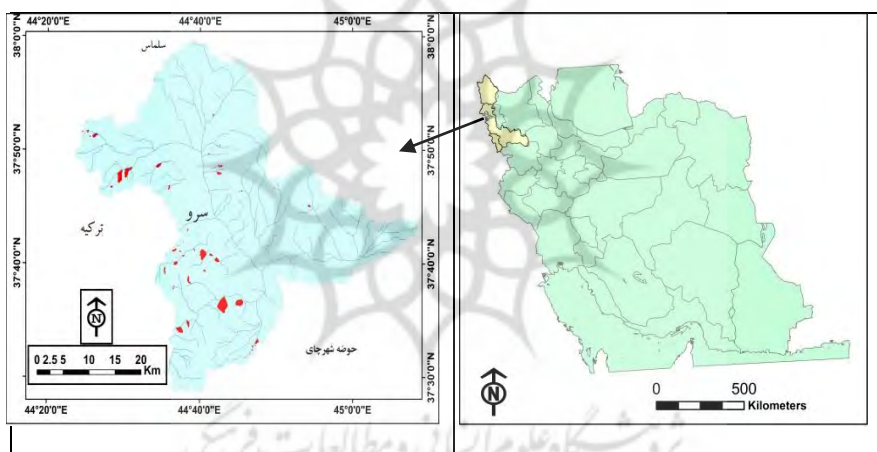
1- Ayalew & Yamagishi
2- Aleotti & Chowdhury
3- landslide inventory

4- heuristic approach
5- Van Westen & Soeters

در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه داشته‌اند. هدف از انجام این تحقیق، بررسی عوامل مختلف و تأثیرگذار در وقوع زمین‌لغزش و همچنین ارزیابی و مقایسه‌ی کارایی روش‌های آماری در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه و معرفی مناسب‌ترین روش می‌باشد.

۲-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه بین $24^{\circ} 44'$ تا $53^{\circ} 45'$ طول شرقی و $30^{\circ} 37'$ تا $58^{\circ} 37'$ عرض شمالی در شمال غرب کشور و محدوده‌ی سیاسی استان آذربایجان غربی واقع شده است.



شکل (۱): موقعیت حوضه‌ی آبریز نازلوچای در استان آذربایجان غربی

Fig (1): Location map of the Nazlo Basin –West Azarbijan

وسعت حوضه‌ی آبریز $1518/8$ کیلومتر مربع می‌باشد. محیط حوضه‌ی نازلوچای $260/65$ کیلومتر، حداقل ارتفاع حوضه 1291 متر و حداکثر ارتفاع آن 3600 متر می‌باشد. درجه حرارت متوسط سالیانه‌ی حوضه‌ی نازلوچای از $1/9$ - درجه سانتیگراد در ارتفاع 2770 متر تا $11/9$ در ارتفاع 1207 متر متغیر است. نوع اقلیم حوضه بر اساس روش دومارتن از نیمه مرطوب تا مرطوب و در روش کوپن از استپی تا مرطوب و در روش آمبرژه از نیمه خشک سرد تا نیمه مرطوب سرد می‌باشد (مهندسین مشاور امداد آب چهار محال، 1385). با توجه به دمای میانگین ماه‌های مختلف سال و طبق شواهد، مدت استقرار برف در حوضه (ارتفاعات حوضه) در حدود 5 ماه و بعضاً از اواخر آبان ماه لغایت اواخر فروردین ماه می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن ارتفاع برفگیر حوضه (2553 متر)، می‌توان ارتفاعات بالاتر از آن را جزء مناطق با ماندگاری برف و مرطوب در نظر گرفت. گسترش واحدهای زمین‌شناسی در حوضه به صورتی است که سازندهای آواری دانه‌ریز (شیل‌های اسلیتی، فیلونیت‌ها) در بخش

جنوب غرب حوضه گسترش زیادی داشته و بیشتر زمین لغزش‌ها نیز در این قسمت از حوضه رخ داده‌اند. حوضه‌ی عرصه فعالیت گسل‌هایی هستند که به صورت شمالی- جنوبی و غربی- شرقی گسترش داشته و زمینه را برای ناپایداری و تشدید آن فراهم می‌نمایند.

۲- مواد و روش

در این تحقیق، داده‌های مورد نیاز با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای ETM+ و Google Earth (با توجه به اینکه از تصاویر با اندازه‌ی پیکسل کوچک‌تر از ۱ متر تهیه شده از دقت بالاتری در تشخیص عوارض برخوردار می‌باشد)، مطالعات میدانی و نیز منابع کتابخانه‌ای تهیه گردید. مهم‌ترین بخش کار تهیه‌ی سیاهه لغزش یا نقشه‌ی پراکندگی زمین لغزش‌های موجود می‌باشد (شکل ۲). بدین منظور کارهای میدانی هم به منظور شناسایی و ثبت زمین لغزش‌های موجود و هم به منظور نمونه‌برداری از کاربری‌های اراضی برای تهیه‌ی لایه‌ی کاربری اراضی از روی تصویر ماهواره‌ای انجام گرفت. در این مرحله مهم‌ترین ابزار کار دستگاه GPS می‌باشد. برای روش‌شناسی و انجام تحقیق مراحل مختلفی شامل پردازش تصاویر ماهواره‌ای بمنظور شناسایی و استخراج زمین لغزش‌ها، استخراج پوشش گیاهی و کاربری اراضی، و همچنین مدل‌ها و روش‌های مختلف آماری جهت انجام پهنه‌بندی زمین لغزش مورد بحث و استفاده قرار گرفته‌اند. در تحقیق حاضر با مرور منابع قبلی (میرنظری و همکاران، ۱۳۹۳، عابدینی و همکاران، ۱۳۹۳، آیالو و همکاران، ۲۰۰۴، عبادی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۶) با بررسی عوامل مختلف (مورفومتریک، اقلیمی و انسانی) حوضه‌ی آبریز نازلوچای تعداد ده عامل موثر بر وقوع زمین لغزش مورد بررسی قرار گرفتند که عبارتند از: ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، فاصله از گسل، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، بارش و پوشش گیاهی. در راستای هدف تحقیق، داده‌های مورد نیاز از روی نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای ETM+ و Google Earth (GeoEye) با قدرت تفکیک تقریباً کمتر از ۱ متر (که بدلیل وسعت زیاد منطقه امکان نمایش زمین لغزش‌ها بر روی تصویر ماهواره‌ای در حد این نوشتار وجود ندارد)، مطالعات میدانی و نیز منابع کتابخانه‌ای حاصل شد. جهت رقوم‌سازی و تهیه‌ی لایه‌های اطلاعاتی به منظور انجام پهنه‌بندی زمین لغزش از نرم‌افزارهای Arc GIS و ENVI (به منظور پردازش تصویر و تهیه‌ی نقشه‌ی پوشش گیاهی و کاربری اراضی) استفاده گردید.

۲-۲- روش تحقیق

علی‌رغم وجود روش‌های دیگر و همچنین جدید، روش‌های دومتغیره مثل روش گوپتا- جوشی از دقت و کارایی مناسبی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برخوردار بوده و مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش‌های مختلف در تحقیقات محققین بیانگر این امر می‌باشد.

۲-۳- مدل‌های LNRF و LNSF

روش فاکتور خطر اسمی زمین‌لغزش^۱ (LNRF) (روش گوپتا- جوشی) بمنظور ارزیابی حساسیت و استخراج فاکتورهای بی‌بعد، بوسیله‌ی گوپتا و جوشی (۱۹۹۰) توسعه داده شد، و بر اساس رابطه‌ی (۱) تعیین می‌شود (گوپتا- جوشی، ۱۹۹۰، وانگ و لین^۲، ۲۰۱۰، کانونگو^۳ و همکاران، ۲۰۰۹، ساها^۴ و همکاران، ۲۰۰۵):

$$LNRF_i = \frac{N_{Pix(S_i)}}{(\sum_{i=1}^n N_{Pix(S_i)})/n} \quad (1)$$

که در آن: $N_{Pix(S_i)}$: تعداد پیکسل‌های لغزشی در طبقه i ام و n : تعداد طبقات موجود در لایه‌ی موضوعی خاص می‌باشد. مقادیر $LNRF > 1$ نشان‌دهنده‌ی حساسیت بیشتر و مقادیر $LNRF < 1$ نشان‌دهنده‌ی حساسیت کمتر نسبت به زمین‌لغزش هستند؛ درحالی‌که، مقدار $LNRF = 1$ نشان‌دهنده‌ی یک طبقه با حساسیت زمین‌لغزش متوسط می‌باشد. مقادیر $LNRF$ برای هر لایه موضوعی مجدداً به سه کلاس طبقه‌بندی می‌شود، و وزن‌های ۰، ۱ و ۲ به ترتیب برای $LNRF < 0.67$ (حساسیت پایین)، $0.67 < LNRF < 1.33$ (حساسیت متوسط) و $LNRF > 1.33$ (حساسیت بالا) اختصاص می‌یابد. لایه‌های موضوعی بر اساس این مقادیر، همپوشانی می‌شوند و لایه‌ی نهایی (LSI) به سه پهنه با حساسیت پایین، متوسط و بالا طبقه‌بندی می‌شود (آدھیکاری^۵، ۲۰۱۱ و کانونگو و همکاران، ۲۰۰۹). با وجود این، مشاهده شده که طبقه‌بندی مجدد مقادیر LNRF به اعداد اسمی (۰، ۱، ۲) منجر به اشکال در رویکرد و کاهش اهمیت نسبی طبقات مختلف می‌شود. بنابراین، ساها و همکاران (۲۰۰۵) یک رویکرد LNRF اصلاح شده را پیشنهاد دادند که در آن وزن‌های محاسبه شده به صورت مستقیم و بدون هیچ طبقه‌بندی مجدد مورد استفاده قرار می‌گیرند (کانونگو و همکاران، ۲۰۰۹، ساها و همکاران، ۲۰۰۵) و آن را روش عامل حساسیت اسمی زمین‌لغزش^۶ (LNSF) نامیدند (ساها و همکاران، ۲۰۰۵ و آدھیکاری، ۲۰۱۱).

1- Landslide Nominal Risk Factor
2- Wang & Lin
3- Kanungo et al.,

4- Saha et al.,
5- Adhikari
6- Landslide Nominal Susceptibility Factor

روش ارزش اطلاعاتی: وان وستن^۱ (۱۹۹۷) روش ارزش اطلاعاتی را برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش پیشنهاد داد، که احتمال وقوع زمین‌لغزش را در مساحت مشخصی از هر کلاس یک لایه‌ی موضوعی مورد بررسی قرار می‌دهد و به‌عنوان یک روش ساده شده‌ای از روش یین و یان^۲ (۱۹۸۸) در نظر گرفته می‌شود (سها و همکاران، ۲۰۰۵). در این روش، ارزش وزنی برای هر کلاس عاملی بوسیله‌ی لگاریتم طبیعی تراکم زمین‌لغزش در کلاس، تقسیم بر تراکم زمین‌لغزش در کل نقشه تعریف می‌شود (وان وستن، ۱۹۹۷). این روش بر اساس رابطه‌ی (۲) انجام می‌شود (سها و همکاران، ۲۰۰۵، مگیلیو^۳ و همکاران، ۲۰۰۸، و وان وستن، ۱۹۹۷):

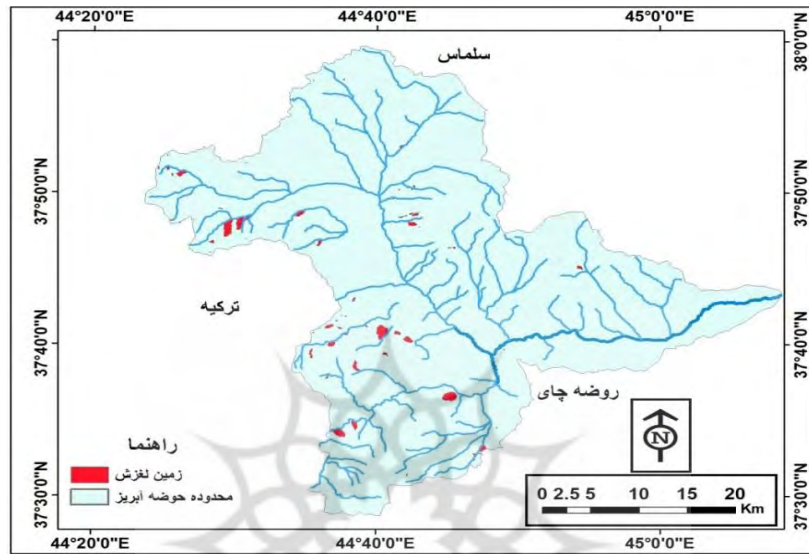
$$W_i = \ln \left(\frac{\text{Densclas}}{\text{Densmap}} \right) = \ln \frac{\text{Npix}(S_i) / \text{Npix}(N_i)}{\sum_{i=1}^n \text{Npix}(S_i) / \sum_{i=1}^n \text{Npix}(N_i)} \quad (2)$$

که در آن: W_i : ارزش وزنی کلاس i $DensClas$: تراکم زمین‌لغزش‌ها در کلاس i $DensMap$: تراکم زمین‌لغزش‌ها در کل منطقه مورد مطالعه، $NpixSi$: تعداد پیکسل‌های لغزشی موجود در کلاس i ، $NpixNi$: تعداد پیکسل‌های کلاس i $NpixSi$: تعداد کل پیکسل‌های لغزشی در کل منطقه و $\sum NpixNi$: تعداد کل پیکسل‌های منطقه مورد مطالعه می‌باشد. پس از آنکه برای کلاس‌های مختلف هر لایه موضوعی وزن‌ها محاسبه شد، لایه‌های موضوعی با همدیگر همپوشانی می‌شوند و براساس منحنی فراوانی تجمعی به پنج کلاس با میزان خطر زمین‌لغزش بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی می‌شود (سها و همکاران، ۲۰۰۵).

روش تراکم سطح: در روش تراکم سطح، نرخ مربوط به هر یک از کلاس‌های عوامل مختلف از رابطه‌ی (۳) بدست می‌آید (کریمی و همکاران، ۱۳۹۰، مصفايي و همکاران، ۱۳۸۸).

$$W_a = 1000 \left(\frac{A}{B} \right) - 1000 \left(\frac{C}{D} \right) \quad (3)$$

که در آن: W_a : نرخ مربوط به هر کلاس از عوامل، A : مساحت زمین‌لغزش‌های رخ داده در هر کلاس، B : مساحت هر کلاس، C : مساحت کل زمین‌لغزش‌های منطقه و D : مساحت کل منطقه‌ی مورد مطالعه می‌باشد.



شکل (۲): نقشه‌ی پراکندگی زمین‌لغزش‌های حوضه‌ی نازلوچای
Fig. (2): Landslide Distribution Map of Nazlo Basin

۳- یافته‌ها و بحث

برای پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آماری دو متغیره، عوامل مختلف به شرح ذیل مورد بررسی قرار گرفت:

- تصویر مدل ارتفاع رقومی (DEM) منطقه با قدرت تفکیک ۱۰ متر از روی نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ با فواصل منحنی‌های میزان ۱۰ متر تهیه گردید. حداقل ارتفاع منطقه ۱۲۹۰/۸۶ متر، حداکثر ارتفاع آن ۳۶۰۴/۶۱ متر و متوسط ارتفاع آن ۱۹۸۶ متر از سطح دریا می‌باشد. منطقه از نظر ارتفاعی، به ۱۰ طبقه با فاصله‌ی طبقات ۲۵۰ متر تقسیم شد. تقریباً ۷۶ درصد توده‌های لغزشی در محدوده‌ی ارتفاعی ۱۷۵۰ تا ۲۵۰۰ متری و ۴۰ درصد لغزش‌ها فقط در محدوده‌ی ارتفاعی ۱۷۵۰ تا ۲۰۰۰ متری رخ داده‌اند.

- شیب: لایه‌ی شیب منطقه از روی تصویر مدل ارتفاع رقومی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۰ متر تهیه گردید و به ۷ طبقه با فاصله طبقات مختلف بر اساس وضعیت شیب منطقه تقسیم شد. متوسط شیب منطقه ۲۶/۷۵ درصد می‌باشد. بیش از ۲۷ درصد توده‌های لغزشی حوضه در کلاس شیب ۳۰-۴۵ درصد و نزدیک به ۵۱ درصد رخداد لغزش در کلاس ۲۰-۴۵ درصد واقع شده‌اند به نوعی با طبقات ارتفاعی ۱۷۵۰ تا ۲۵۰۰ متری انطباق دارند.

- جهت شیب: لایه جهت شیب از روی تصویر مدل ارتفاع رقومی (DEM) با قدرت تفکیک ۱۰ متر تهیه گردید و به ۹ طبقه شامل جهت های اصلی، فرعی و بدون جهت تقسیم گردید. بررسی لغزش های منطقه نشان می دهد که نزدیک به ۷۷٪ اتفاقات در دامنه های متمایل به شمال رخ داده است که نشان از تأثیر رطوبت فراوان می باشد. وجود رطوبت نیز تابعی است از ماندگاری بلند مدت برف در دامنه های شمالی که همین امر موجب گسیختگی ذرات خاک و وقوع لغزش می شود. از طریق نفوذ، آب داخل خاک تأمین شده و با کاهش چسبندگی، مقاومت رسوب کاهش می یابد (کچ، ۱۹۹۵). بنابر این حضور آب و بدنبال آن نفوذ پذیری به عنوان عاملی در وقوع زمین لغزش در شیب های شمالی می تواند مورد توجه قرار گیرد.

- در تهیه نقشه ی کاربری اراضی از تصویر ماهواره لندست و روش طبقه بندی نظارت شده استفاده شد. برای اطمینان از دقت نقشه تهیه شده، از نقشه هایی که توسط اداره منابع طبیعی تهیه شده بود استفاده گردید و جهت افزایش دقت با کنترل های زمینی و همچنین تصویر ماهواره ای Google Earth که از قدرت تفکیک بالایی برخوردار است اصلاح شد و لایه ی نهایی تهیه گردید. کاربری های عمده حوضه، بیشتر مرتع و اراضی کشاورزی دیم می باشند که مجموعاً حدود ۶۸/۸ درصد از مساحت حوضه را شامل می شود که اکثر زمین لغزش ها بر روی این واحدها رخ داده اند.

- گسل های حوضه از روی نقشه های زمین شناسی استخراج شد. سپس حوضه برحسب فاصله از گسل ها به شش طبقه تقسیم گردید. برخی از زمین لغزش ها در مجاورت گسل ها بوده که نزدیک به ۳۰ درصد آنها در فاصله صفر تا ۴۰۰ متری از گسل ها واقع شده که با بیشتر شدن فاصله از گسل، از مقدار لغزش ها کاسته می شود. مناطق با فعالیت های گسلی امکان شکست و تخریب سنگ ها را نیز افزایش داده که عاملی است برای نفوذ بیشتر آب که با اشباع آب ذرات و دانه های خاک از هم جدا شده و گسستگی رخ می دهد. در نهایت سطوح توده های لغزشی نسبت به فاصله از گسل ها محاسبه شده و در پهنه بندی منظور گردیدند.

- آبراهه های حوضه با استفاده از تصویر مدل ارتفاع رقومی (DEM) تهیه گردید. برخی از زمین لغزش ها در مجاورت آبراهه ها و در نتیجه پدیده ی زیرشویی توسط جریانات موجود رخ داده اند. برای دخالت دادن تأثیر فاصله از آبراهه در وقوع زمین لغزش، حریم هایی به فواصل ۱۰۰ متر نسبت به آبراهه ها ترسیم گردید. در حدود ۵۰ درصد توده های لغزشی در فاصله ی صفر تا ۵۰۰ متری آبراهه ها واقع شده اند و با بیشتر شدن فاصله از آبراهه، از مقدار زمین لغزش ها کاسته می شود.

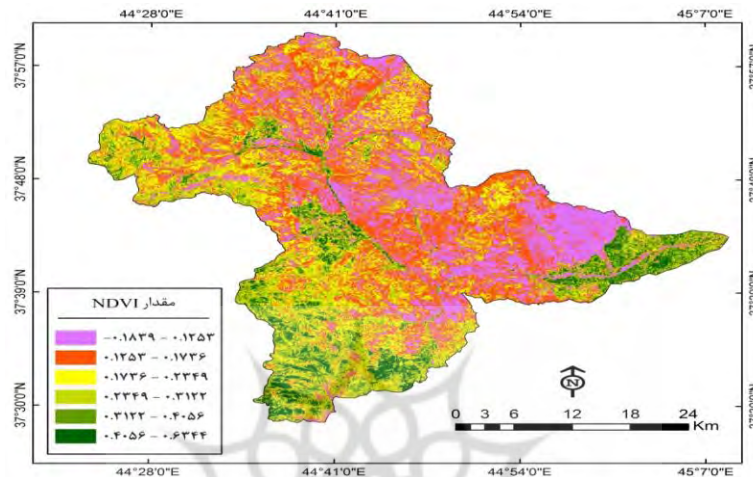
فاصله از جاده: احداث جاده تاثیر مخربی بر سطوح حوضه داشته و در صورت عدم رعایت موارد احتیاطی شرایط را برای وقوع ناپایداری دامنه‌ای مخصوصا زمین‌لغزش مهیا خواهد کرد. در حوضه‌ی مورد مطالعه حدود ۳۶ درصد زمین‌لغزش‌ها در محدوده‌ی ۰ تا ۵۰۰ متری و بیش از ۶۳ درصد در محدوده‌ی ۰ تا ۱۰۰۰ متری از خطوط جاده‌ای رخ داده‌اند که در این بین با نزدیک شدن به جاده بر مقدار زمین‌لغزش‌ها افزوده و بر عکس با بیشتر شدن فاصله از مقدار آنها کاسته می‌شود.

بارش: نقشه‌ی بارش حوضه نازلوچای با استفاده از مطالعات حصاری و همکاران، ۱۳۸۴ و بر اساس بارش ۳۰ ساله تهیه گردیده است. در مطالعه‌ی فوق بدلیل عدم تطابق داده‌های بارش و رواناب، مقدار بارش مناطق مرتفع حوضه از مقدار رواناب حوضه تخمین و با استفاده از بیلان آب سطحی و بصورت سلولی تهیه گردیده است. در نقشه‌ی اصلاحی بارش، بیشترین مقدار بارش حدود ۸۸۰ میلی‌متر در محدوده‌ی مرزی (مرز کشور ترکیه) و کمترین مقدار حدود ۲۶۰ میلی‌متر در قسمت‌های کم ارتفاع در پایین دست حوضه بدست آمد. حدود ۵۸ درصد زمین‌لغزش‌های حوضه در کلاس ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متری و ۸۱ درصد در کلاس ۳۰۰-۶۰۰ میلی‌متری بارش بوقوع پیوسته‌اند. از کلاس ۶۰۰ میلی‌متری به بالا از مقدار زمین‌لغزش‌ها کاسته شده است.

- شاخص پوشش گیاهی: نقشه‌ی پوشش گیاهی برای تکمیل کاربری اراضی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر، از شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، برای تهیه‌ی نقشه‌ی پوشش گیاهی استفاده گردید. بدین منظور از تصاویر ETM+ ماهواره لندست (مربوط به سال ۲۰۱۵) استفاده شد (شکل ۳). مقدار این شاخص بین -۱ تا +۱ می‌باشد. هرچه مقدار آن به +۱ نزدیکتر باشد نشان‌دهنده‌ی سرسبزی و بالا بودن پوشش گیاهی است (روستایی و همکاران، ۱۳۹۱). نسبت Band 4/ Band 3 برای شناخت وضعیت و تراکم تاج پوشش گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۵: ۲۶). رابطه (۴) نحوه‌ی محاسبه شاخص NDVI را نشان می‌دهد:

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (4)$$

که در آن NIR باند مادون قرمز نزدیک (باند ۴ سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷) و Red باند قرمز (باند ۳ سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷) می‌باشد.



شکل (۳): نقشه‌ی شاخص پوشش گیاهی (NDVI) حوضه نازلوچای

Fig. (3): Normalized Difference Vegetation Index of Nazlo Basin

بر اساس شاخص NDVI حوضه‌ی مورد مطالعه به شش طبقه تقسیم گردیده است که مناطق با شاخص منفی و پایین اغلب شامل بستر شنی آبراهه‌ها و قسمت‌های شرقی حوضه است. برای تقریباً بیشتر قسمت‌های حوضه، مقدار این شاخص مقادیری مثبت را نشان می‌دهد که بیانگر وجود پوشش گیاهی است و از شرق به غرب حوضه بر مقدار آن افزوده می‌شود. افزایش پوشش گیاهی در مناطق و دامنه‌های غربی نشان از رطوبت زیاد بوده و این خود دلیل تراکم زمین‌لغزش‌ها در این قسمت از حوضه می‌باشد.

- جنس سازندها و گسل‌های موجود در حوضه از روی نقشه‌های زمین‌شناسی به مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ ورقه ارومیه، ۱/۱۰۰۰۰۰ ورقه سرو و ۱/۲۵۰۰۰۰ ورقه سرو استخراج گردید. تقریباً ۳۰ درصد توده‌های لغزشی بر روی سازندهای آهکی، دولومیتی و نزدیک به ۲۲ درصد بر روی ماسه‌سنگ و مارن و کنگلومرا بوقوع پیوسته‌اند. همچنین حدود ۳۰ درصد لغزش‌ها بر روی کالردملانژ، اسلیت و فیلیت رخ داده‌اند که دارای میان‌لایه‌هایی از سنگ آهک بوده و منطقه تراکم گسل می‌باشد. بزرگ‌ترین لغزش‌های حوضه نیز بر روی این واحدها رخ داده‌اند. مناطق بروزند سنگی (Rock Outcrops) دامنه‌ها و پهنه‌هایی را در بر می‌گیرد که ۲۵ تا ۷۵ درصد سطح رخمونشان سنگی است. این مناطق اکثراً در سازندهای کربناته یا کنگلومرایبی با سیمان کربناته واقع گردیده‌اند. این منطقه و مناطق توده سنگی محل و جایگاه اکثر زمین‌لغزش‌های رخ داده در حوضه می‌باشد (مهندسین مشاور امداد آب چهار محال، ۱۳۸۵).

برای ارزیابی دقت روش‌های مورد استفاده از شاخص نسبت تراکم و شاخص جمع مطلوبیت استفاده شد. از شاخص نسبت تراکم^۱ بمنظور ارزیابی توانایی‌های مدل در جداسازی کلاس‌های خطر استفاده شد. هرچه تفکیک بین کلاس‌های خطر بیشتر باشد مدل از توانایی بیشتری برخوردار بوده و از شاخص جمع کیفیت^۲ برای مقایسه‌ی کارایی مدل‌های مختلف استفاده می‌شود (رابطه‌ی ۵). هر قدر Q_s حاصله بیشتر باشد مدل مناسب‌تر خواهد بود (کریمی سنگ‌چینی و همکاران، ۱۳۹۱).

$$Q_s = \sum_{i=0}^n [(D_r - 1)^2 * S] \quad D_r = \frac{\frac{S_i}{A_i}}{\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n A_i}} \quad (5)$$

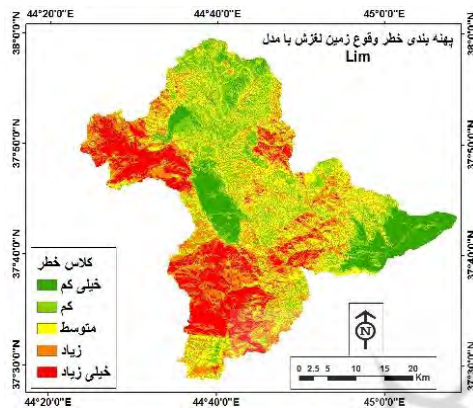
که در آن: D_r : تراکم لغزش را در هر کلاس خطر نشان داده و S : نسبت مساحت هر کلاس خطر به مساحت کل حوضه می‌باشد. در این رابطه n : تعداد کلاس‌های خطر می‌باشد. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از شاخص جمع کیفیت، روش‌های تراکم سطح و ارزش اطلاعاتی بترتیب با مقادیر $3/23$ و $1/26$ به‌عنوان بهترین روش‌ها برای انجام پهنه‌بندی انتخاب شدند. جدول ۱، نتایج روش‌های چهارگانه مورد استفاده برای پهنه‌بندی را نشان می‌دهد.

جدول (۱): نتایج حاصل از شاخص جمع کیفیت برای مدل‌های مورد استفاده

Table (1): Quality sum index results for using models

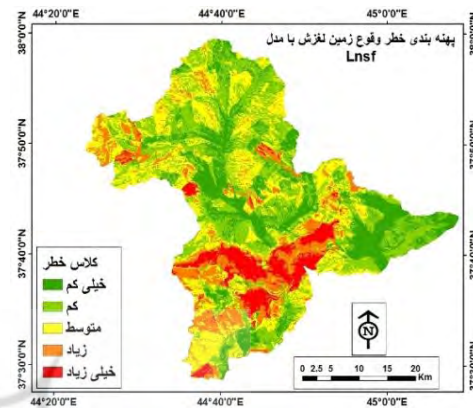
Wa	Lnrf	Lnsf	Lim	کلاس خطر
۰/۲۲۵۷	۰	۰/۰۳۳۸	۰/۰۰۷۶	خیلی کم
۰/۲۸۴۴	۰/۲۰۵۲	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۲۵	کم
۰/۰۱۹۱	۰/۱۲۵۵	۰/۲۳۰۱	۰/۰۰۴۴	متوسط
۰/۸۵۲۵	۰/۶۲۵۹	۰/۲۲۵۶	۰/۱۹۲۳	زیاد
۱/۸۴۸۹	۰	۰/۵۷۰۵	۱/۰۵۴۹	خیلی زیاد
۳/۲۳۰۶	۰/۹۵۶۶	۰/۰۶۹۵	۱/۲۶۱۹	جمع

نتایج حاصل از پهنه‌بندی با استفاده از روش‌های ارزش اطلاعاتی و تراکم سطح نشان می‌دهند که نقشه‌های حاصله انطباق بیشتری با پراکنش زمین‌لغزش‌های حوضه دارند (اشکال ۴ تا ۷).



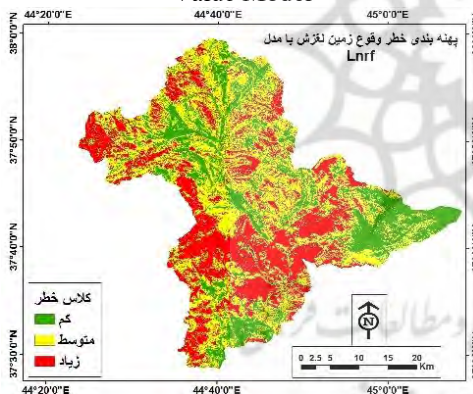
شکل (۴): پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش با مدل ارزش اطلاعاتی

Fig. (4): Landslide Zonation Using Information Value Model



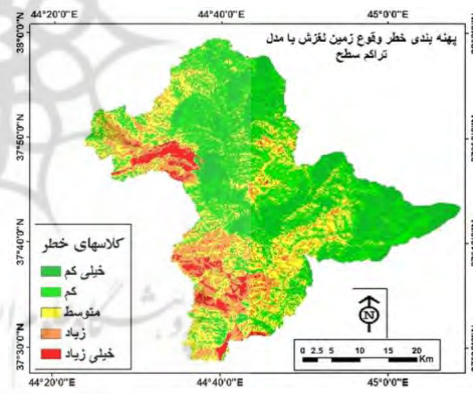
شکل (۵): پهنه بندی خطر زمین لغزش با مدل Lnsf

Fig. (5): Landslide zonation Using Lnsf Model



شکل (۶): پهنه بندی خطر زمین لغزش با مدل Lnrf

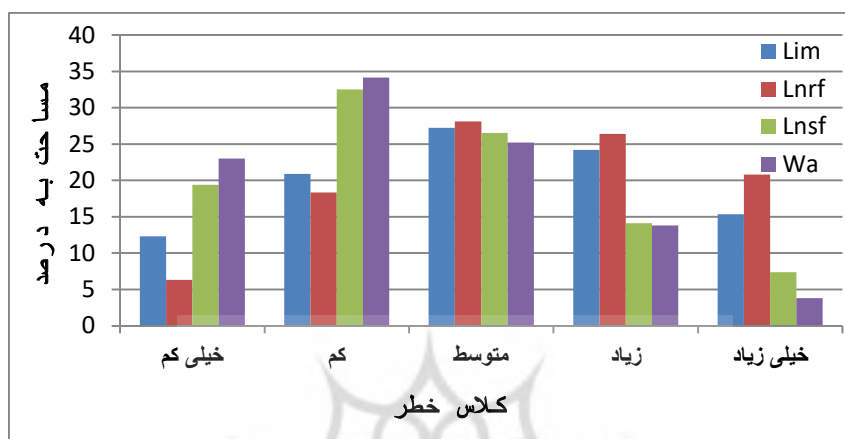
Fig. (6): Landslide Zonation Using Lnrf Model



شکل (۷): پهنه بندی وقوع زمین لغزش با روش تراکم سطح

Fig. (7): Landslide Zonation Using Surface Density Model

در چهار روش مورد استفاده بیش از ۶۰ درصد لغزش‌های موجود در محدوده‌ی کلاس زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. در روش ارزش اطلاعاتی تقریباً تمام لغزش‌ها در محدوده کلاس زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته (بیش از ۹۶ درصد) و در روش‌های تراکم سطح و Lnrf به ترتیب ۷۸/۵ و ۷۸/۶ درصد لغزش‌ها در محدوده‌ی کلاس زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است (شکل ۸). با این بررسی مدل ارزش اطلاعاتی با بالاترین وزن از دقت و اعتبار بیشتری برخوردار بوده و مطلوبیت بیشتری دارد.



شکل (۸): نمودار درصد مساحت کلاس‌های خطر با استفاده از روش‌های دو متغیره
Fig. (8): Percentage of Hazard Classes Area Using Bivariate Methods

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از پهنه‌بندی، می‌توان گفت که عوامل زمین‌شناسی، بارش و فاصله از آبراهه به ترتیب مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده‌ی وقوع زمین‌لغزش می‌باشند. مخصوصاً عامل زمین‌شناسی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. اکثر زمین‌لغزش‌های حوضه بر روی سنگ آهک و کنگلومرا رخ داده‌اند که با نتایج تحقیق آقای روستایی در حوضه‌ی نازلوچای ارومیه (با عملگرهای گامای فازی)، تنگستانی در جنوبغرب ایران و آقای امیراحمدی که برای ایران کار کرده‌اند سنخیت دارد و این در حالی است که این سازندها از مساحت زیادی در حوضه برخوردار نیستند. سنگ آهک و مقدار کمی سنگ آهک دولومیتی با سطح اشغال ۱۵/۵ درصد حوضه بیش از ۳۰ درصد زمین‌لغزش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. علیرغم اینکه بعضی از محققین (گمیتزی^۱، ۲۰۱۱)، نقش جهت شیب را نادیده می‌گیرند ولی تعداد دیگری از محققین (روستایی و همکاران، ۱۳۹۶، کاررارا و همکاران^۲، ۱۹۹۱) و (گوکجه اوغلو و آکسوی^۳، ۱۹۹۶) آن را در تحقیقاتشان به حساب آورده‌اند.

در حوضه‌ی مورد مطالعه نقش جهت شیب در ماندگاری رطوبت قابل اغماض نیست و سازند کنگلومرای در حضور رطوبت در صورتی که شرایط مساعد (به خصوص حضور آب و شیب مناسب) فراهم باشد، از پتانسیل بالایی برای زمین‌لغزش برخوردار می‌باشد. با بررسی‌های میدانی به نظر می‌رسد که ماندگاری طولانی مدت برف و رطوبت، مهم‌ترین دلیل وقوع زمین‌لغزش بر روی این سازندها می‌باشد. با بررسی مدل‌های دومتغیره مورد

1- Gemitzi
2- Carrara et al.,

3-Gokceoglu and Aksoy

استفاده در تحقیق، مدل LNRF مساحت بیشتری را در مقایسه با دیگر مدل‌ها برای کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد نشان داده است و این در حالی است که در کلاس خطر متوسط همه‌ی مدل‌ها نزدیک می‌باشد (شکل ۸). از نظر ایجاد شرایط لغزشی واحد اسلپت و فیلیت در درجه‌ی سوم اهمیت قرار دارد که با وجود مساحت کم (۵/۲ درصد)، نزدیک به ۱۹ درصد لغزش‌ها بر روی آن بوقوع پیوسته‌اند. دلیل این امر را می‌توان در انطباق این سازند با گسل‌های متراکم و ماندگاری برف در این منطقه از حوضه توجه کرد که بدلیل فعالیت‌های تکتونیکی و تخریب سنگ‌ها، آب در داخل شیارها نفوذ کرده که در ابتدا موجب تخریب فیزیکی و شیمیایی شده و شرایط را برای زمین‌لغزش فراهم کرده است. همچنین لرزش‌های ضعیف و خفیفی که در منطقه وجود دارد از عوامل محرک برای وقوع زمین‌لغزش در این محدوده بشمار می‌آیند. همچنین نقش فرسایش عمقی در دره مارمیشو، لغزش سازندهای شیلی اسلپتی کهر را (بدلیل اینکه در شرایط شیب بحرانی قرار گرفته و بدلیل کاهش ضریب اصطکاک داخلی ذرات خاک در اثر جذب آب) در پی داشته که نتیجه آن جمع شدن آب در پشت خاکریز لغزشی و تشکیل دریاچه مارومیشو می‌باشد (روستایی و همکاران، ۱۳۹۶).

۵-منابع

- Abedini, M., & Fathi, M. H. (2014). Zoning of landslide risk sensitivity in Khalkhal Chay watershed using multi-criteria models. *Quantitative Geomorphological Research*, 2(4), 71-85.
- Adhikari, M. (2011). Bivariate statistical analysis of landslide susceptibility in western Nepal. Master thesis in geosciences. University of Oslo. pp: 1-88.
- Aleotti, P. & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull EngGeolEnv*, 58: 21-44.
- Amir Ahmadi, A., Pourhashemi, S., Akbari, E. (2014). Selection of an appropriate model among two-variable statistical methods for landslide risk zoning in GIS environment (Case study: Baqieh watershed). *Geographical Studies of Arid Areas*, 15, 71-89.
- Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1/2): 15-31.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surf Proc Land* 16, 427-445.
- Ebadinejad, S. A., Yamani, M., Maghsoudi, M., & Shadfar, S. (2007). Evaluating the efficiency of fuzzy logic operators in determining landslide capability (Case study of Shiroad watershed). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 1(2), 39-44.
- Entezari, M., Izadi, Z. (2013). Study and evaluation of bivariate statistical methods in landslide risk zoning, *Journal of Geography and Environmental Planning*, No. 4., 205-214.
- Gemitzi, A., Falalakis, G. and Eskioglou, P. (2011). Evaluating landslide susceptibility using environmental factors, Fuzzy membership functions and GIS. *Global Nest Journal*, 13(1), 28-40.
- Geological maps of Urmia and Sero with a scale of 1: 100000 and geological maps with a scale of 1: 250,000. *Geological Survey of Iran*, 1988 and 2006, along with reports.
- Gupta, R. P & Joshi, B. C. (1990). Landslide hazard zoning using the GIS approach- a case study from Ramganga catchment, Himalayas. *Engineering geology*, 28, 119-131.
- Kanungo, D. P et al., (2009). Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping – a review. *Journal of south Asia disaster studies*, 2 (1), 81-105.
- Karimi, H., Naderi, F., Morshedi, E., & Nikseresht M. (2011). Landslide Hazard Zoning in Chardavol Watershed in Ilam Using Geographic Information System (GIS). *Journal of Applied Geology*, 7(4), 319-332.

- Karimi Sangochin, I., Onagh, M., & Saad al-Din, A. (2012). Comparison of the efficiency of 4 quantitative and semi-quantitative models of landslide risk zoning in Chehelchai watershed, Golestan province. *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 19 (1), 183-196.
- Magliulo, P. et al., (2008). Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics, a case study in southern Italy. *Nat Hazards* 47, 411-435.
- Meteorological Studies Report. (2006). General Department of Natural Resources of West Azerbaijan, Chaharmahal Water Rescue Consulting Engineers.
- MirNazari, J., Shahabi, H., & Khezri, S. (2014). Currency and Physics of the AHP and Objectives in the Islamic Republic of Iran. *Journal of Geography and Development*, 37, 53-70.
- Mosfaei, J., Onagh, M., & Mesdaghi, M. (2009). Comparison of the efficiency of experimental and statistical models of landslide risk zoning (Case study: Alamut River watershed). *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 16(4), 43-61.
- Rahimpour, T., Roostaei, S. & Nakhostinrouhi, M. (2018). Landslide Hazard Zonation Using Analytical Hierarchy Process and GIS. A Case Study of Sardool Chay Basin, Ardabil Province. *Hydrogeomorphology*, 4(13), 1-20.
- Roostaei, S., Khairizadeh, M., Sarafrozeh, S., & Najafi Igdir, A. (2012). Landslide risk zoning using the factor of uncertainty model. *National Conference of the Iranian Geomorphological Association*, 1, 163-165.
- Roostaei, S., Najafi Igdir, A., & Hejazi, A. (2018). Landslide Hazard Zonation Using the Fuzzy Logic Method in Nazlo-Chay Basin. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(4), 103-119.
- Sakar, S., Kanungo, D.P. and Mehrotra, G.S., (1995). Landslide hazard zonation. A case study in Garhwal Himalaya, India. *Mountain Research and Development*, 15(4), 301-309.
- Saha, A. K et al., (2005). An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation-with a case study in the Himalayas. *Landslides* 2, 61-69.
- Shadfar, S., Nowruzi, A. A. Ghodoosi, J., and Jafar Gh. (2005). Landslide Hazard Zoning in Laktrashan Watershed, *Soil and Water Conservation Extension Scientific Journal*, 1, 1-10.
- Teimouri, M., & Asadi Nalivan, O. (2020). Susceptibility Zoning and Prioritization of the Factors Affecting Landslide Using MaxEnt, Geographic Information System and Remote Sensing Models (Case study: Lorestan Province). *Hydrogeomorphology*, 6(21), 155-179.
- Van Westen, C. J & Soeters, R. (1998). Geographic information systems in slope instability zonation (GISSIZ), ITC, P. 156.
- Van Westen, C. J. (1997). Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for windows applications guide. ITC publication, Enschede, pp. 73-84.

- Wang, K. L. and Meci-Ling L. (2010). Development of shallow seismic landslide potential map based on newmark's displacement. The case study of Chi-Chi earthquake, Taiwan, *Environ Earth Sci*, 60, 775-785.
- Yin K, J. and Yan T. Z. (1988). Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. Proceeding of the 5th international symposium on landslides, Lausanne, Switzerland 2, 1269-1272.

