

ارزیابی ریسک زمین لغزش در منطقه هشتچین به منظور استفاده در طراحی‌های توسعه‌ای و کاربری اراضی

رضا طلائی*

مربی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اردبیل

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۰۴

چکیده

در این مقاله در برآورد خطر و ریسک زمین لغزش به ترتیب از مدل‌های توابع مطلوب و فازی استفاده شده است. پیش‌بینی ناپایداری‌های دامنه‌ای طی یک فرایند دو مرحله‌ای انجام شد. در مرحله اول، ۷۵ درصد از پیکسل‌های دارای زمین لغزش که در آن‌ها در ۵۰ سال گذشته زمین لغزش جدید با شدت متوسط و یا متوسط به بالا رخ داده و یا حداقل زمین لغزش‌های موجود یک‌بار و یا بیشتر حرکت دوباره داشته‌اند، به عنوان گروه تخمین وارد مدل شدند. در مرحله دوم، دقت نقشه خطر با استفاده از روش منحنی ROC و بر مبنای ۲۵ درصد از پیکسل‌های دارای لغزش که در مدل وارد نشده‌اند، تعیین شد. ریسک زمین لغزش تابعی از پتانسیل خطر آن و پتانسیل خسارت بر منابع است. پتانسیل خطر و خسارت منابع موجود معمولاً به ترتیب از نقشه پهنه‌بندی خطر و نقشه کاربری و پوشش گیاهی منطقه به دست می‌آید. با ترکیب دو ماتریس پتانسیل خطر و پتانسیل خسارت منابع و با استفاده از عملگر ضرب فازی، منطقه از نظر ریسک زمین لغزش پهنه‌بندی شد. با توجه به این که سطح زیر منحنی (AUC) ۰/۷۹۵ می‌باشد، صحت مدل احتمال به کار رفته نیز برابر ۷۹/۵ درصد است. بر اساس نتایج به دست آمده از اجرای چنین مدل ترکیبی، ۱۳/۸ درصد از محدوده در پهنه‌های با طبقه ریسک بالا و خیلی بالا و ۷۸/۱ درصد از مساحت منطقه در طبقات ریسک بسیار پائین و پائین قرار می‌گیرد. نتایج این پژوهش در برنامه‌ریزی‌های توسعه منطقه و تعیین کاربری‌ها قابل بهره‌برداری است.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی خطر، پیش‌بینی ریسک، خسارت، فازی، ناپایداری‌های دامنه‌ای

مقدمه

Westen (۲۰۰۷). محققان حدود یک چهارم از خسارت‌های طبیعی وارده در دنیا را مربوط به زمین لغزش‌ها می‌دانند (Kojima و همکاران، ۲۰۰۰). بیشتر زمین لغزش‌ها در ایران، در امتداد دو رشته کوه البرز و زاگرس به وقوع می‌پیوندد (Shoaei و همکاران، ۲۰۰۵). منطقه هشتچین در غرب البرز و در شمال غرب ایران هر سال شاهد وقوع زمین لغزش‌های جدید و یا فعالیت دوباره برخی از زمین لغزش‌های

زمین لغزش‌ها یکی از مهمترین پدیده‌های مخرب طبیعی هستند که در مناطق کوهستانی مشکلات جدی به وجود می‌آورند (Intarawichian و Dasananda، ۲۰۱۰؛ Kanungo و همکاران، ۲۰۰۸). زمین لغزش‌ها هر ساله در نقاط مختلف دنیا خسارات مالی و جانی قابل توجه وارد می‌سازند (Mayavan و Sundaram، ۲۰۱۲؛ Van و Castellanos Abella

* مسئول مکاتبه: rztala@yahoo.com

همکاران، ۲۰۰۲). در چند دهه گذشته، نتایج منتشر شده از مطالعات کمی ریسک زمین‌لغزش‌ها در دو مقیاس ناحیه‌ای (Yoshimatsu و Abe، ۲۰۰۶؛ Van Westen و همکاران، ۲۰۰۶) و در محدوده‌های سایت (مقیاس سایت) (Bonnard و همکاران، ۲۰۰۴؛ Glade و Crozier، ۲۰۰۵؛ Eberhardt و همکاران، ۲۰۰۵) ارائه شده‌اند. در ارزیابی کیفی ریسک زمین‌لغزش‌ها در مقیاس ناحیه‌ای نیز از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود (Cardinali و همکاران، ۲۰۰۲؛ Shou و Chen، ۲۰۰۵). علاوه بر این‌ها، روش‌های نیمه کمی جدیدی نیز جهت ارزیابی ریسک زمین‌لغزش، بر مبنای پیکسل‌های خطر و تئوری مجموعه فازی، پیشنهاد شده است (Kanungo و همکاران، ۲۰۰۸). در این روش ریسک زمین‌لغزش با ترکیب درجه خطر زمین‌لغزش و پتانسیل خسارت منابع در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و با استفاده از عملگر ضرب مجموعه‌های فازی به دست آمده است.

در تمام روش‌های مورد استفاده در ارزیابی ریسک زمین‌لغزش‌ها می‌بایست در ابتدا حساسیت و یا خطر زمین‌لغزش‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. تا به حال جهت ارزیابی حساسیت و یا خطر زمین‌لغزش روش‌های مختلفی استفاده شده است (Fourniadis و همکاران، ۲۰۰۷؛ Yalcin، ۲۰۰۸؛ Chu و همکاران، ۲۰۰۹؛ Dragičević و همکاران، ۲۰۱۲؛ Zizioli و همکاران، ۲۰۱۳). در این پژوهش، خطر زمین‌لغزش در منطقه با استفاده از روش توابع مطلوب^۱ (Fabbri و Chung، ۲۰۰۱، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۸؛ Chung، ۲۰۰۶) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مدل توابع مطلوب مورد استفاده در اینجا بر اساس تابع احتمال نسبی^۲ بوده و در آن نتایج به دست آمده از تحلیل داده‌های گروهی و پیوسته با هم ترکیب شدند. در برخی از منابع، درجه خطر زمین‌لغزش با حساسیت زمین‌لغزش به‌طور مترادف مورد استفاده قرار گرفته است (Uromeihy و MahdaviFar، ۲۰۰۰؛ Ohlmacher و Davis، ۲۰۰۳؛ Liu و همکاران، ۲۰۰۶؛ Sharma و Kumar، ۲۰۰۸). در این پژوهش، احتمال وقوع زمین‌لغزش در آینده در یک دوره زمانی خاص

قدیمی است (Talaiei و همکاران، ۲۰۰۴). در اثر وقوع زمین‌لغزش‌ها از سال ۱۹۰۳ تا ۲۰۰۷ تعداد ۵۷۰۲۸ نفر کشته شده و حدود ده میلیون نفر نیز خسارت دیده‌اند (OFDA/CRED، ۲۰۰۷). مبلغ خسارت مادی در این مدت بیش از پنج میلیارد دلار برآورد شده است (Castellanos Abella، ۲۰۰۸).

متأسفانه در ایران و منطقه مورد پژوهش، آمار رسمی و دقیقی از میزان خسارت وارده از وقوع این پدیده ارائه نشده است. اما میزان خسارات مستقیم سالانه زمین‌لغزش به‌طور غیررسمی در کشور بالغ بر ۵۰۰ میلیارد ریال برآورد شده است (Komakpanah و Hafezimoghadas، ۱۹۹۴). در منطقه هشتچین، زمین‌لغزش‌ها نه تنها باعث تخریب سازه‌ها، راه‌های ارتباطی، اراضی زراعی و باغی می‌شوند، بلکه خسارت‌های زیادی را بر پوشش گیاهی طبیعی مرتعی و جنگلی وارد آورده و ضمن تولید حجم زیادی از رسوبات از کیفیت منابع آب سطحی نیز می‌کاهند. در سال‌های گذشته میزان خسارت‌های مستقیم و غیرمستقیم ناشی از زمین‌لغزش‌ها در بسیاری از مناطق دنیا، مسئولین و جامعه علمی را بر آن داشته تا طرح‌های مختلفی را جهت کاهش خسارت این پدیده تهیه نمایند. ارائه هرگونه طرحی در راستای کنترل فعالیت و کاهش خسارت زمین‌لغزش‌ها، در حله اول مستلزم ارزیابی ریسک زمین‌لغزش در منطقه لغزش خیز است. به‌طور کلی می‌توان ریسک را به‌صورت خسارت مالی و جانی احتمالی که انتظار می‌رود در اثر وقوع زمین‌لغزش به انسان و اشیائی که برای او دارای ارزش است وارد شود، تعریف کرد (Lee و Jones، ۲۰۰۴). منابع علمی مربوط به مطالعه ریسک زمین‌لغزش‌ها نسبت به منابع ارزیابی حساسیت و خطر زمین‌لغزش‌ها بسیار کمتر است. این مسئله ممکن است به دلیل دشواری ذاتی تعیین ریسک زمین‌لغزش، فقدان مدل‌های ابتکاری و مدبرانه جهت ارزیابی ریسک و ماهیت چند رشته‌ای ریسک زمین‌لغزش باشد.

در سال‌های اخیر برخی از محققین تلاش کرده‌اند تا اصول، مفاهیم و تعاریف ریسک زمین‌لغزش را ارائه داده و روش‌های را جهت ارزیابی کمی و کیفی آن پیشنهاد نمایند (Arora و Anbalagan، ۲۰۱۰؛ Dai و

¹ Favorability Function Model

² Likelihood Ratio Function

در مطالعاتی که MahdaviFar (۱۹۹۷) و Uromeihy و MahdaviFar (۲۰۰۰) در بخشی از منطقه هشتچین تحت نام بخش خورش‌رستم خلخال انجام داده‌اند، از روش مجموعه‌های فازی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش‌ها استفاده کرده‌اند. نتایج این پژوهش، به‌عنوان یک پژوهش اولیه، بسیار ارزشمند بوده و از دقت خوبی برخوردار است. در نیمه غربی منطقه هشتچین عوامل موثر در لغزش‌خیزی منطقه با استفاده از روش‌های آماری مورد تحلیل قرار گرفته است (Talaiei و همکاران، ۲۰۰۴). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که حضور آب و لیتولوژی مناسب، یعنی وجود سنگ‌های مارنی، گل‌سنگ و سنگ‌های رسی و همچنین، مناطق دگرسان شده به‌وسیله محلول‌های گرمایی، یکی از دلایل اصلی وقوع زمین‌لغزش در منطقه است.

در این پژوهش، منطقه با روش شاخص زمین‌لغزش به زون‌های نسبی حساس به لغزش تقسیم شده ولی درجه صحت پهنه‌بندی مورد ارزیابی قرار نگرفته است. با توجه به این‌که در حال حاضر طرح‌ها و برنامه‌های مختلف صنعتی، مسکونی و توسعه‌ای در منطقه در حال اجرا بوده و پیش‌بینی‌های لازم جهت اجرای طرح‌های دیگر در آینده نیز صورت گرفته است، لذا ارزیابی خطر و ریسک زمین‌لغزش در یک دوره زمانی مشخص برای چنین منطقه‌ای ضروری به‌نظر می‌رسد. نتایج پهنه‌بندی خطر و ریسک زمین‌لغزش در منطقه هشتچین می‌تواند در طرح‌های تعیین کاربری اراضی و هرگونه فعالیت توسعه‌ای، صنعتی و تعیین ضوابط ساختمان سازی مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: منطقه هشتچین به مساحت ۱۶۴۵ کیلومترمربع در بخش جنوبی استان اردبیل (شمال غربی ایران) قرار دارد. این ناحیه بین طول‌های جغرافیایی $37^{\circ} 13' 48''$ و $48^{\circ} 54' 1''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $37^{\circ} 04' 17''$ و $34^{\circ} 34' 17''$ شمالی واقع شده است (شکل ۱).

سنگ‌های متنوع منطقه از دوره پالئوزوئیک تا عهد حاضر تشکیل شده است. کهن‌ترین سنگ‌ها در شرق و

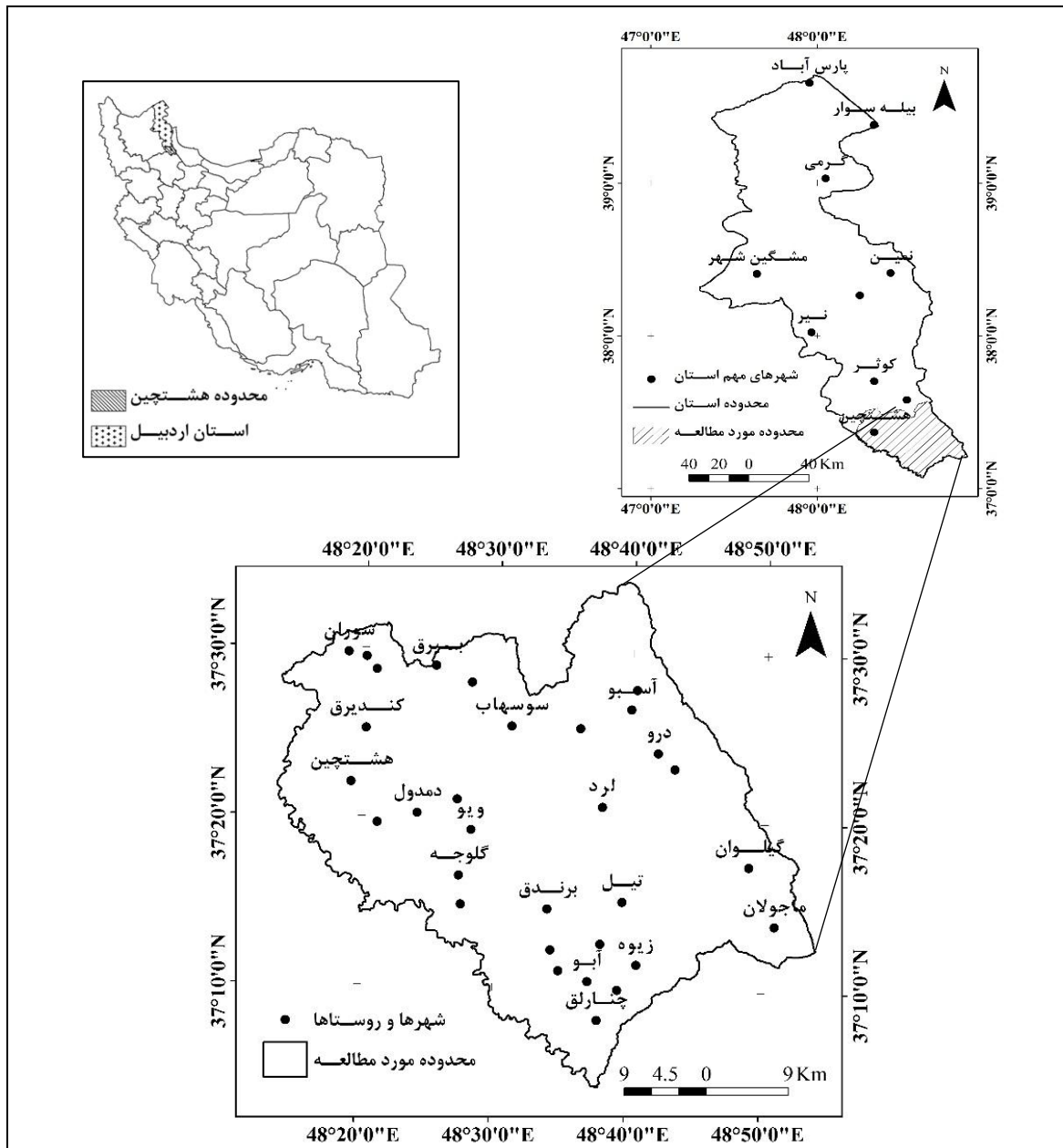
بیان شده است. به این منظور داده‌های مکانی و زمانی در وقوع زمین‌لغزش‌های این منطقه، از شناسنامه‌های تهیه شده در طول سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۱ استخراج شده است. آماره‌های فرکانس-مساحت زمین‌لغزش‌ها می‌تواند بر اساس نقشه شناسنامه زمین‌لغزش‌ها تعیین شود (Guzzetti و همکاران، ۲۰۰۲؛ Malamud و همکاران، ۲۰۰۴؛ Guzzetti و همکاران، ۲۰۰۶)، و این اطلاعات نیز می‌تواند در تخمین شدت زمین‌لغزش‌ها در یک منطقه به‌کار برده شود.

بر اساس فرکانس و حجم زمین‌لغزش‌های منطقه هشتچین که از داده‌های شناسنامه‌های تهیه شده استخراج شد، شدت زمین‌لغزش‌های منطقه تخمین زده شد و لغزش‌هایی که طی ۵۰ سال گذشته با شدت متوسط و بالا حداقل یک‌بار در منطقه فعالیت داشته‌اند، انتخاب شدند (Talaiei، ۲۰۱۲). در اجرای مدل خطر، ۷۵ درصد از پیکسل‌های دارای زمین‌لغزش به‌طور تصادفی انتخاب شدند و ۲۵ درصد باقی‌مانده نیز در تعیین دقت مدل به‌روش ROC^۱ به‌کار برده شد (Mathew و همکاران، ۲۰۰۹؛ Sdao و همکاران، ۲۰۱۳). در نهایت پهنه‌های با درجات مختلف ریسک زمین‌لغزش با استفاده از عملگر ضرب فازی و بر مبنای دو نقشه خطر به‌دست آمده تهیه شد. مجموعه‌های پتانسیل خطر و پتانسیل خسارت با استفاده از عملگر ضرب فازی ترکیب شدند و یک نقشه پهنه‌بندی ریسک به‌دست آمد. متأسفانه در منطقه هشتچین در خصوص پیش‌بینی خطر و ریسک زمین‌لغزش و همچنین، پیشگیری از وقوع زمین‌لغزش‌های جدید و یا فعالیت دوباره زمین‌لغزش‌هایی که قبلاً به وقوع پیوسته‌اند، مطالعات چندانی در گذشته صورت نگرفته است. ویژگی‌های کلی چند مورد از زمین‌لغزش‌های منطقه توسط برخی از پژوهشگران توصیف شده است (Mir Sanei و Nikandish، ۱۹۹۶؛ Blurchi، Ansari و Mir Sanei، ۱۹۹۶). عوامل اصلی موثر در وقوع لغزش‌های منطقه را Hashemi Tabatabaei (۱۹۹۸) بررسی کرده و نقشه پهنه‌بندی حساسیت به لغزش را با استفاده از مدل کیفی تهیه نموده است. اما دقت و صحت نتایج این پهنه‌بندی مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

¹ Receiver Operating Characteristic Curve

زیرین برونزد یافتند. روی سازند شمشک را سازند لار و شال پوشانیده‌اند که سن هر دو حدود ژوراسیک میانی تا بالائی تعیین شده است. در همین منطقه آهک‌های ریفی و پشت ریفی ژوراسیک میانی تا فوقانی روی سازند شمشک قرار گرفته و به سمت بالا به کرتاسه می‌رسد. در قسمت شرق و شمال شرق منطقه برونزدهای آهک‌های ریفی همراه با آواری‌های توفی و سنگ‌های آتشفشانی بازیک به سن کرتاسه بالائی برونزد یافته‌اند.

شمال شرق منطقه برونزد دارند. این سنگ‌ها به دو مجموعه دگرگون شده با خاستگاه رسوبات پالئوزوئیک و دگرگون نشده به سن پرمو-کربنیفر تفکیک شده‌اند. ترکیب سازندهای اصلی دوران اول در این منطقه سنگ‌های آتشفشانی بازیک و اسپیلیتی بوده که به وسیله لایه‌های آهکی، اسلیتی، آتشفشانی و رسوبات آواری پوشانیده شده است. در بخش شرقی منطقه هشتچین سنگ‌های آواری سازند شمشک با روند شمال غرب-جنوب شرق با سن توراسین تا باژوسین



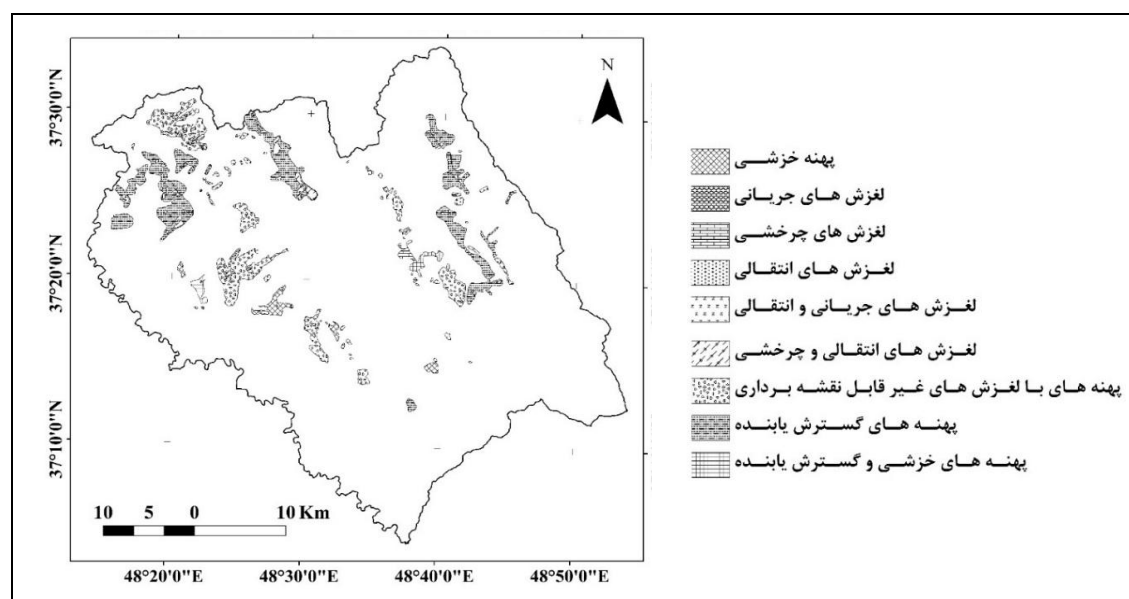
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش

جنوب‌شرق، شرقی-غربی و شمالی-جنوبی است. وجود چهار دسته درزه و نظم آرایشی که در این درزه‌ها مشاهده می‌شود، آشکارا نشان‌دهنده اعمال تنش در چند مرحله و با جهات متفاوت است. غالب‌ترین روند چین‌خوردگی‌های منطقه در جهت شمال‌غربی-جنوب‌شرقی می‌باشد. چین‌خوردگی سنگ‌های منطقه در اثر حرکات فاز پیرنه (اوسن- اولیگوسن) می‌باشد که تحت تأثیر فازهای بعدی تغییراتی در آن ایجاد شده است.

۹/۵۲ درصد از مساحت منطقه مورد پژوهش تحت تأثیر زمین‌لغزش‌های منفرد و پهنه لغزشی قرار گرفته است. مساحت ۱۷۵ زمین‌لغزش منطقه حدود ۱۵۷ کیلومترمربع می‌باشد که ۲۰/۸۹ کیلومترمربع آن به لغزش‌های منفرد و ۱۳۵/۸۶ کیلومترمربع آن به پهنه‌های لغزشی مربوط می‌شود. لغزش‌های منفرد در گروه‌های انتقالی، چرخشی و ترکیب این دو و همچنین، پهنه‌های لغزشی در گروه‌های خزشی، غیرقابل نقشه‌برداری و گسترش‌یابنده قرار می‌گیرند (شکل ۲). از لغزش‌های مورد پژوهش ۱۰۳ مورد یعنی ۵۸/۹ درصد در حال حاضر فعال هستند. شواهد موجود نشان می‌دهد که در ۵۰ سال گذشته ۶۰ درصد از زمین‌لغزش‌های منطقه فعالیت داشته‌اند، این زمین‌لغزش‌ها در طول دوره ۵۰ساله یا برای اولین بار به وقوع پیوسته‌اند و یا لغزش‌هایی قدیمی هستند که حداقل یک‌بار فعالیت داشته‌اند.

سازندهای دوران سوم در منطقه تحقیق، محدود به پهلوه‌های غربی و جنوب‌غربی رشته تالش و کوه بغروداغ است. سنگ‌های این دوران شامل سازند فجن، زیارت و کرج است که در فرورفتگی‌های حاصل از سیستم گسلی منطقه با یک روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق به‌وسیله نهشته‌های قرمز رنگ نئوژن پوشیده شده‌اند. گدازه‌های آتشفشانی سازند کرج به‌طور عمده آندزیتی تا تراکی‌آندزیتی است اما در بخش‌های از آن توف‌های سبز همراه با داسیت مشاهده می‌شود. رسوب‌گذاری در زمان نئوژن محدود به گودی‌های بین کوه‌ها و فرورفتگی‌های تکتونیکی است که در اواخر پالئوژن به‌وجود آمده‌اند. شن و ماسه‌ها، نهشته‌های پادگانه‌های آبرفتی و دریاچه‌ای مرتفع، زمین‌لغزش‌ها و واریزه‌ها در دوران چهارم به‌وجود آمده و ردیف چینه‌شناسی نواحی کوهستانی منطقه را تکمیل می‌کنند. منطقه هشتچین از نظر زمین‌شناسی ساختمانی بسیار پیچیده است. امتداد اصلی ساختارهای منطقه شمال‌غرب-جنوب‌شرقی است. زون‌های گسلی گسترده و چین‌خوردگی‌های منطقه نشان‌دهنده فشردگی حاصل از فاز کوه‌زایی آلپی است.

در محدوده مورد پژوهش به‌خصوص در بخش‌های شرقی آن زون‌های گسلی معکوس که گاهی برگشتگی محلی نیز نشان می‌دهند، تشکیل شده‌اند. راستای عمومی گسل‌های منطقه در سه گروه شمال‌غرب-



شکل ۲- نوع و موقعیت زمین‌لغزش‌های منطقه مورد پژوهش

از نوع گروه‌بندی شده و پیوسته است و به‌صورت یک فایل dBASEIV و در قالب پیکسل‌های ۵۰×۵۰ متری ذخیره و جهت انجام تحلیل آماری به نرم‌افزار SPSS-20 انتقال داده شد.

ابزارهای اصلی نقشه‌برداری در این پژوهش شامل نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس‌های ۱:۵۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰ و عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ هشت‌چین (Faridi و Anvari، ۲۰۰۶) و ماسوله (Davies و همکاران، ۱۹۷۲) و نقشه زمین‌شناسی (Davies و همکاران، ۱۹۷۵) ۱:۲۵۰۰۰۰ بندر انزلی (Davies و همکاران، ۱۹۷۵) بودند. اطلاعات نقشه‌های قبلی در تکمیل لایه‌های اطلاعاتی که در تحلیل خطر و ریسک زمین‌لغزش در منطقه مورد پژوهش به‌عنوان متغیر تعریف شده‌اند، مورد استفاده قرار گرفتند. با مطالعه عکس‌های هوایی منطقه و نقشه‌های زمین‌شناسی موجود، نقشه اولیه زمین‌شناسی و تکتونیک تهیه شد و در هنگام بررسی-های صحرایی، نوع سازندها، ترکیب سنگ‌شناسی، محل تماس‌های مهم و اشکال تکتونیکی شناسایی و بعد از انجام اصلاحات لازم بر روی نقشه‌های توپوگرافی منتقل شدند. از نقشه زمین‌شناسی تهیه شده از منطقه، لایه‌های لیتولوژی و فاصله از گسل‌های اصلی تهیه شد. داده‌های مربوط به پوشش گیاهی منطقه و کاربری اراضی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و تصاویر ماهواره‌ای لندست ETM⁺ سال ۲۰۰۲ استخراج شده است. نقشه کاربری منطقه بر اساس روش هیبرید، یعنی طبقه‌بندی نظارت شده و نظارت نشده تهیه شده است.

زلزله به‌عنوان یک عامل تحریک کننده در وقوع زمین‌لغزش‌ها در نظر گرفته می‌شود. اثرات زلزله بر روی پایداری دامنه‌ها به عواملی مانند وضعیت زمین‌شناسی، لیتولوژی، هیدروژئولوژی، توپوگرافی و غیره بستگی دارد. جهت ساده نمودن تاثیر زلزله بر مکانیسم زمین‌لغزش‌ها، نیروی برشی در امتداد یک سطح گسیختگی غیریوسته تنها نیروی ناپایدار کننده شیب به حساب آورده می‌شود. برای تحلیل شبه استاتیکی، این نیرو ناشی از حداکثر شتاب افقی زمین می‌باشد (Shariat Jafari، ۱۹۹۶). به‌منظور بررسی تاثیر زلزله در وقوع زمین‌لغزش‌ها، علاوه بر بررسی

روش پژوهش: این مطالعه با آماده‌سازی نقشه زمین‌لغزش‌ها بر اساس عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰۰ و بررسی‌های میدانی شروع شد. بر اساس نقشه زمین‌لغزش شدت زمین‌لغزش‌های منطقه تخمین زده شد و لغزش‌هایی که طی ۵۰ سال گذشته با شدت متوسط و بالا اتفاق افتاده و یا حداقل یک‌بار فعالیت داشته‌اند، انتخاب شدند (Talaei، ۲۰۱۲). تعیین جابه‌جایی و یا هرگونه فعالیت زمین‌لغزش‌ها در ۵۰ سال گذشته بر اساس داده‌های موجود (Hashemi Tabatabaei، ۱۹۹۸) و همچنین، شناسنامه‌های تهیه شده در طول فاصله زمانی ۱۳۷۲ تا ۱۳۹۱ صورت گرفت.

به‌منظور تهیه شناسنامه زمین‌لغزش‌ها بازدیدهای مستمر سالانه از تمام زمین‌لغزش‌های منطقه انجام گرفت و شواهد فعالیت و یا جابه‌جایی در دامنه‌ها ثبت شد. تاریخ وقوع و یا فعالیت دوباره برخی از این زمین‌لغزش‌ها معلوم است. در برخی دیگر از زمین‌لغزش‌های منطقه شواهدی چون ترک‌های ایجاد شده در سازه‌ها، سطوح پرتگاهی واضح، پهلوه‌های نسبتاً تازه، پوشش گیاهی به‌هم ریخته، مرزهای کاملاً مشخص و پهنه‌های خزشی فعال مشاهده می‌شود. در این خصوص مشاهدات ساکنان منطقه یکی از منابع مهم اطلاعاتی بوده است. علل وقوع زمین‌لغزش‌ها در گذشته می‌توانند به‌عنوان مهمترین عوامل موثر در وقوع زمین‌لغزش‌ها در آینده در نظر گرفته شوند (Wang و Sassa، ۲۰۰۵). لذا در مرحله بعدی پژوهش، لایه‌های اطلاعاتی مربوط به عوامل موثر از جمله فاصله تا شبکه زهکشی، فاصله تا سطوح گسلی، فاصله تا جاده، لیتولوژی، میانگین بارندگی سالانه، پوشش گیاهی و کاربری اراضی و در قالب سیستم اطلاعات جغرافیائی تهیه شد.

مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه تهیه شد. بر اساس مدل رقومی ارتفاعی به‌دست آمده، لایه‌های اطلاعاتی مربوط به پارامترهای ژئومورفولوژیکی شامل درجه شیب، جهت شیب دامنه‌ها و انحنای دامنه‌ها نیز تهیه شد. علل وقوع زمین‌لغزش‌ها و وقوع و یا عدم وقوع آن‌ها به‌ترتیب به‌عنوان متغیرهای مستقل و وابسته در نظر گرفته شدند. داده‌های متغیرهای مستقل و وابسته

باشند، توابع توزیع فراوانی چند متغیره به‌شرح $f\{c_1, \dots, c_m / M\}$ و $f\{c_1, \dots, c_m / I\}$ تعریف شدند. نسبت احتمال در c به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود (Chung, ۲۰۰۶؛ Chung و Fabbri, ۲۰۰۸):

$$\lambda(c_1, \dots, c_m) = \frac{f\{c_1, \dots, c_m / M\}}{f\{c_1, \dots, c_m / I\}} \quad (2)$$

چون لایه‌های عوامل موثر به دو صورت پیوسته و طبقه‌بندی شده هستند، لذا احتمال نسبی برای هر کدام از این دو گروه متغیر به‌طور جداگانه محاسبه شد. در لایه‌های با داده‌های طبقه‌بندی شده تخمین تابع احتمال نسبی با فرض استقلال لایه‌های طبقه‌بندی شده به‌صورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$\lambda(x_1, \dots, x_k) = \lambda(x_1) \dots \lambda(x_k) \quad (3)$$

که در آن، $\lambda(x_1, \dots, x_k)$ مقادیر تابع احتمال نسبت برای یک نقطه x با مقادیر k پیکسل (x_1, \dots, x_k) است. هر x_i یک طبقه از متغیر طبقه‌بندی شده را در نقطه x که متعلق به i امین لایه از داده‌ها است، را نشان می‌دهد. به‌جای محاسبه هم‌زمان احتمالات در تمام لایه‌های k ، توابع احتمال نسبی تک متغیره برای هر k به‌صورت جداگانه محاسبه شده و در هم ضرب شدند. هر تابع احتمال نسبی تک متغیره به‌وسیله تقاطع تک تک لایه‌های داده‌های طبقه‌بندی شده و لایه پراکنش زمین‌لغزش‌ها تخمین زده شده است (رابطه ۴):

$$\lambda = \frac{\text{تعداد پیکسل‌های دارای زمین‌لغزش در طبقه } x_i \text{ از } i \text{امین لایه}}{\text{تعداد پیکسل‌های فاقد زمین‌لغزش در طبقه } x_i \text{ از } i \text{امین لایه}} \quad (4)$$

جهت تخمین مقدار تابع احتمال نسبی در مورد داده‌های پیوسته می‌توان از روش تحلیل تشخیصی استفاده کرد (Chung, ۲۰۰۶). در ساختن مدل پیش‌گویی با یک متغیر دو و یا چند گروهی می‌توان از تحلیل تشخیصی خطی استفاده کرد (Pohar و همکاران، ۲۰۰۴). در این روش، تعیین توابعی از متغیرهای $X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$ که باعث جداسازی g گروه از یکدیگر شده باشند، حائز اهمیت می‌باشد. ساده‌ترین روش برای این منظور، عبارت از تعیین ترکیب خطی متغیرهای مورد نظر است (رابطه ۵):

$$d_{ik} = a_{0k} + b_{1k}x_{i1} + \dots + b_{pk}x_{ip} \quad (5)$$

که در آن، d_{ik} مقدار k امین تابع ممیزی برای i امین مورد (وقوع و عدم وقوع زمین‌لغزش)، p شماره

نقش گسل‌های فعال، نقشه حداکثر شتاب افقی زمین نیز تهیه شد. این نقشه می‌تواند به‌عنوان یک لایه اطلاعاتی مهم در تحلیل حساسیت و خطر زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گیرد (Schuster و Turner, ۱۹۹۶).

خاک‌برداری و ایجاد ترانشه و سایر تغییرات در دامنه‌ها به واسطه احداث جاده‌ها می‌تواند با کاهش مقاومت لایه‌ها در وقوع زمین‌لغزش‌ها موثر باشد (Ayalew و Yamagishi, ۲۰۰۵؛ Knapen و همکاران، ۲۰۰۶). لایه‌های مربوط به فاصله از جاده‌ها و سازه‌ها به‌منظور وارد نمودن متغیر جاده‌ها و سازه‌ها در مدل تحلیل خطر زمین‌لغزش تهیه شد. اثر هیدرولوژی و اقلیم در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه به‌صورت لایه‌های میزان بارندگی سالانه و فاصله از رودخانه‌ها و مسیل‌های اصلی در نظر گرفته شد. جهت تعیین میانگین مجموع بارندگی سالانه از رابطه (۱) استفاده شده و نقشه هم‌باران ۱:۵۰۰۰ ترسیم شد (Hemmati و همکاران، ۲۰۰۷).

$$\bar{P} = b - (X \times 4.81) + (Y \times 0.002) + (Z \times 0.963) \quad (1)$$

که در آن، \bar{P} میانگین بارندگی سالانه، $b = 471.162$ طول جغرافیائی (درجه)، Y عرض جغرافیائی (درجه) و Z ارتفاع (متر) می‌باشد. تحلیل خطر زمین‌لغزش در منطقه بر اساس لایه‌های اطلاعاتی اشاره شده و با استفاده از مدل توابع مطلوب انجام گرفت.

مدل توابع مطلوب: در این پژوهش جهت تعیین درجه خطر زمین‌لغزش در منطقه، روش توابع مطلوب به‌کار برده شد و نتایج مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. در این روش برای هر کدام از لایه‌ها اطلاعاتی (متغیرهای مستقل یا همان عوامل موثر در لغزش)، توابع توزیع فراوانی چند متغیره بر اساس تابع احتمال نسبی محاسبه شد و یک مدل پیش‌گویی، جهت تعیین مناطقی که احتمال وقوع زمین‌لغزش در آینده در آن‌ها وجود دارد، ساخته شد. برای تبدیل این ایده به رابطه ریاضی، یک نقطه c فرضی با m پیکسل (که دارای مقادیر c_1, \dots, c_i است) از کل منطقه با مساحت A انتخاب شده است. این منطقه به دو بخش دارای لغزش (M) و بدون لغزش (\bar{M}) تقسیم شد. با فرض این که پیکسل‌ها جزء مساحت (M) و (\bar{M})

شده‌اند، حساسیت^۱ مدل نامیده می‌شوند (مثبت‌های درست) (رابطه ۹).

$$Sensitivity = \frac{n_{TP}}{n_{TP} + n_{FN}} \quad (9)$$

که در آن، n_{TP} تعداد پیکسل‌های دارای زمین‌لغزش که درست پیش‌بینی شده است و n_{FN} تعداد پیکسل‌های بدون زمین‌لغزش که اشتباه پیش‌بینی شده است، می‌باشند.

قدرت درست‌نمائی و یا وضوح‌سازی^۲ مدل نیز بر اساس درصد مشاهدات (پیکسل‌های) درست طبقه‌بندی شده که فاقد لغزش هستند، نشان داده می‌شود (منفی‌های درست) (رابطه ۱۰).

$$Specificity = \frac{n_{TN}}{n_{TN} + n_{FP}} \quad (10)$$

که در آن، n_{TN} تعداد پیکسل‌های بدون زمین‌لغزش که درست پیش‌بینی شده است و n_{FP} تعداد پیکسل‌های دارای زمین‌لغزش که اشتباه پیش‌بینی شده است، می‌باشد.

مساحت زیر منحنی از صفر تا یک تغییر می‌کند. اگر مدل به کار رفته وقوع زمین‌لغزش را نتواند بهتر از یک روش تصادفی پیش‌گوئی نماید، سطح زیر منحنی می‌تواند برابر با ۰/۵ باشد. اگر سطح زیر منحنی در یک مدل، برابر یک باشد، بهترین و کامل‌ترین پیش‌گوئی را انجام خواهد داد.

ارزیابی ریسک بر اساس تئوری مجموعه فازی:

تئوری مجموعه‌های فازی^۳ توسط Zadeh (۱۹۶۵) معرفی شد و در تحلیل نتایج بسیاری از مطالعات علمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تئوری مجموعه‌های فازی، توسعه یافته همان تئوری مجموعه‌های معمولی^۴ است. در حقیقت، در مجموعه‌های فازی، درجات عضویت از مجموعه‌های دو عضوی $\{0, 1\}$ به بازه $[0, 1]$ توسعه داده شده است. بنابراین، در مجموعه‌های معمولی، یک عضو^۵ به مجموعه تعلق دارد و یا ندارد و درجه عضویت تنها می‌تواند صفر و یک باشد، درحالی‌که در مجموعه تئوری فازی، درجه عضویت عناصر در فاصله بین صفر و یک تغییر می‌کند.

متغیر مستقل (پیش‌گوئی کننده)، مقدار b_{jk} مقدار z ضریب در تابع k ام و x_{ij} مقدار نامین مورد از نامین متغیر مستقل (عوامل موثر در لغزش خیزی منطقه) می‌باشد.

در نهایت با استفاده از تابع به‌دست آمده برای هر پیکسل از منطقه مقادیر تابع نسبی $\tilde{\lambda}(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h)$ برآورد شد.

$$\tilde{\lambda}(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h) = \tilde{\lambda}(x_1, \dots, x_k) \cdot \tilde{\lambda}(y_1, \dots, y_h) \quad (6)$$

مقادیر عددی احتمال تخمین‌زده شده، یعنی مقدار عددی $\tilde{\lambda}(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h)$ بین صفر تا بی‌نهایت در تغییر است. هر چقدر این عدد بیشتر باشد، نشان می‌دهد که در پیکسل مربوطه احتمال وقوع زمین‌لغزش در آینده بیشتر است. مقادیر به‌دست آمده بر اساس تابع همسان استاندارد شدند (رابطه ۸) (Fabbri و Chung، ۲۰۰۸).

$$m(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h) = \frac{[h(\tilde{\lambda}(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h))]}{[1 + h(\tilde{\lambda}(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h))]} \quad (8)$$

مقادیر به‌دست آمده از این تابع $m(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h)$ بین صفر و یک بوده و می‌تواند در این پژوهش به‌عنوان تابع مطلوب مورد استفاده قرار گیرد. پیکسل‌هایی که در آن‌ها مقدار این تابع نزدیک به یک برآورد شده احتمال وقوع زمین‌لغزش در آینده بیشتر است. بر مبنای مقادیر محاسبه شده برای هر پیکسل نقشه پیش‌گوئی که سطوح مختلف خطر نسبی وقوع زمین‌لغزش را نشان می‌دهد، به‌دست آمد. در این بخش اعتبارسنجی نتایج مدل پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در ۵۰ سال آینده در منطقه مورد پژوهش با استفاده از روش ارزیابی مقاطع (Geisser، ۱۹۷۴؛ Chung و Fabbri، ۲۰۰۸) و روش ROC انجام گرفت. ۲۵ درصد از پیکسل‌هایی که نگه‌داشته شده بودند و در برآورد احتمال خطر وارد مدل نشدند، در ارزیابی درجه صحت مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

ارزیابی دقت مدل: روش ROC جهت ارزیابی تناسب مدل پیش‌گوئی احتمال، مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش درصدی از مشاهدات (پیکسل‌های) دارای لغزش که به‌وسیله مدل به درستی پیش‌بینی

¹ Sensitivity

² Specificity

³ Fuzzy Set Theory

⁴ Ordinary Set Theory

⁵ Element

فازی به سازه‌ها و راه‌ها و کمترین امتیازات به اراضی جنگلی داده شده است (جدول ۲، با تغییرات از Kanungo و همکاران، ۲۰۰۸). نحوه تخصیص مقادیر عضویت در گروه‌های مختلف به تفکیک در جداول ۱ و ۲ تشریح شود.

روش‌های فازی مختلفی جهت ترکیب دو مجموعه داده پتانسیل خسارت منابع و پتانسیل زمین‌لغزش و تشکیل ماتریس ارزیابی ریسک زمین‌لغزش به‌کار برده شده است. عملگرهای فازی به‌کار برده شده وابستگی زیادی به نوع و ماهیت داده‌های مکانی دارد که ترکیب می‌شوند (Choi و همکاران، ۲۰۰۰). μ_A و μ_B به ترتیب توابع عضویت نقشه‌های پتانسیل خطر و پتانسیل خسارت در منطقه هستند که با استفاده از قانون ضرب فازی ترکیب شدند و مقادیر ریسک زمین‌لغزش در هر پیکسل محاسبه شد (Chung و Fabbri، ۲۰۰۱) (رابطه ۱۱):

$$\mu_{PRODUCT}(x) = \prod_{i=1}^2 \mu_i(x) \quad (11)$$

مقادیر ماتریس به‌دست آمده بر اساس محدوده‌های ارقام پیشنهادی Kanungo و همکاران (۲۰۰۸) به پنج گروه ریسک‌پذیر تقسیم شدند و به‌صورت نقشه رستری در آمدند.

نتایج و بحث

پهنه‌بندی خطر: احتمال وقوع زمین‌لغزش، با شرط استقلال متغیرها، در دو گروه متغیر طبقه‌بندی شده و پیوسته به‌طور جداگانه محاسبه شد. در گروه متغیرهای پیوسته فاصله از گسل‌ها، شتاب ماکزیمم زلزله، میزان بارندگی سالیانه، فاصله از رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، فاصله از مناطق مسکونی و درجه شیب دامنه قرار دارند و متغیرهای نوع لیتولوژی، جهت شیب دامنه‌ها، ارتفاع توپوگرافی، انحناء دامنه، کاربری و پوشش زمین به‌عنوان متغیرهای طبقه‌بندی شده در نظر گرفته شدند (جدول‌های ۳-۱ و ۳-۲).

با حاصل‌ضرب مقادیر $\tilde{\lambda}(x_i)$ مقدار تابع احتمال نسبی در هر پیکسل بر حسب متغیرهای گروه‌بندی شده $(\tilde{\lambda}(x_1, \dots, x_k))$ تخمین زده شد، حداقل و حداکثر مقدار به‌دست به‌ترتیب برابر صفر و $139/86$ است. مقادیر $\tilde{\lambda}(y_1, \dots, y_h)$ بر اساس مقادیر متغیرهای پیوسته و با استفاده از آنالیز تشخیصی محاسبه شد.

به‌عبارت دیگر تابع عضویت^۱ مجموعه فازی A، به هر x از X، عددی را از بازه [۰،۱] نسبت می‌دهد (Ross، ۲۰۱۰). نقشه ارزیابی ریسک زمین‌لغزش در منطقه هشتچین با استفاده از قوانین محاوره‌ای (زبانی) فازی^۲ به‌عنوان یک روش از تئوری مجموعه فازی تهیه شد.

این روش را شاید گسترش یافته روش‌های ماتریس طبقه‌بندی پیشنهادی توسط Anbalagan و Singh (۱۹۹۶) دانست که در ارزیابی ریسک زمین‌لغزش به‌کار برده شده است. در این پژوهش، ابتدا به درجات خطر و عناصر مختلف منابع در معرض خسارت امتیازاتی در فاصله صفر و یک اختصاص یافت و سپس دو ماتریس به‌دست آمده با استفاده از قوانین فازی ترکیب شدند. به‌منظور طبقه‌بندی مقادیر احتمال خطر به نقشه‌های به طبقه‌های خطر مختلف از روش فواصل برابر استفاده شد و بر اساس آن گروه‌های خطر (یا پتانسیل) زمین‌لغزش به‌صورت کیفی و با اصطلاحات بسیار کم خطر، کم خطر، با خطر متوسط، با خطر بالا و بسیار پرخطر مشخص شده‌اند. برای هر طبقه از خطر زمین‌لغزش^۳ درجه عضویت فازی بر اساس پیشنهاد (Kanungo و همکاران، ۲۰۰۸) و برای پتانسیل خسارت منابع مختلف^۴ درجه عضویت فازی بر اساس نظر کارشناسی تعیین شد.

بر اساس روش تئوری مجموعه فازی، مقادیر عضویت (Membership values) منابع (عناصر) در فاصله بین صفر و یک تغییر می‌کند. مقادیر امتیازات اختصاصی در نقشه‌های خطر تهیه شده بر اساس ۷۵ درصد از زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده بعد از سال ۱۹۶۰ و با استفاده از روش توابع مطلوب طبق قوانین زبانی (محاوره‌ای) به‌صورت (جدول ۱) می‌باشد (Kanungo و همکاران، ۲۰۰۸).

منابع منطقه به هفت گروه متفاوت تحت عناوین سازه‌ها، راه‌ها، اراضی زراعی آبی، اراضی زراعی دیم، مراتع، باغات و جنگل تفکیک شدند. در تعیین درجه عضویت فازی پتانسیل خسارت عناصر، میزان اهمیت اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی آن‌ها در نظر گرفته شد. در این منطقه بیشترین درجه عضویت

¹ Fuzzy Membership Function (FMF)

² Fuzzy Linguistic Rules

³ Landslide Potential (LP)

⁴ Resource Damage Potential (RDP)

مقادیر به دست آمده بر اساس تابع همسان $m(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h)$ بین صفر و یک تغییر می‌نماید. پیکسل با بزرگ‌ترین مقدار $m(x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_h)$ برابر ۰/۹۹۲ است که بیشترین احتمال وقوع زمین‌لغزش مربوط به آن است. مقادیر به دست آمده از این تابع به‌طور پیوسته خطر نسبی وقوع زمین‌لغزش در پیکسل‌ها را به‌صورت یک نقشه نشان می‌دهد (شکل ۳).

در شکل ۳، پهنه‌های با رنگ‌های آبی خطر بسیار پائین و پائین، پهنه‌های با رنگ زرد خطر متوسط و پهنه‌های با رنگ قرمز خطر بالا و بسیار بالا را نشان می‌دهند.

جدول ۱- قوانین محاوره‌ای برای امتیازدهی ریسک در زون‌های مختلف خطر

مقادیر عضویت فازی برای پتانسیل زمین‌لغزش	قوانین محاوره‌ای برای امتیازدهی ریسک	پهنه خطر زمین‌لغزش
۱	زمین‌لغزش‌ها به‌طور گسترده اتفاق افتاده‌اند و اغلب اتفاق خواهند افتاد. شواهدی از فعالیت زمین‌لغزش‌ها در بیشتر مناطق دیده می‌شود. بیشتر زمین‌لغزش‌های احتمالی در شرایط نامطلوب اتفاق می‌افتند.	بسیار پر خطر
۰/۸	زمین‌لغزش‌های گذشته به‌طور محلی اتفاق افتاده‌اند. زمین‌لغزش‌ها ممکن است در شرایط نامناسب اتفاق بی‌افتند.	پر خطر
۰/۵۵	احتمال وقوع زمین‌لغزش کم است و عموماً دامنه‌ها پایدارند.	خطر متوسط
۰/۳	زمین‌لغزش بسیار نادر اتفاق می‌افتد و یا اصلاً وجود ندارد. دامنه‌ها به‌طور طبیعی پایدارند.	کم خطر
۰/۱		بسیار کم خط

جدول ۲- قوانین محاوره‌ای جهت امتیازدهی ریسک در گروه‌های مختلف منابع برای پتانسیل خسارت

مقادیر عضویت فازی برای پتانسیل منابع	قوانین محاوره‌ای برای امتیاز دهی ریسک	گروه‌های منابع
۱	تاثیر مستقیم بر اهالی و دارائی آن‌ها دارد. خسارت‌های عمده به‌صورت کشته، مجروح و زیان‌های مالی است.	سازه‌ها
۰/۹	راه‌های مواصلاتی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. خسارت‌های عمده عبارتند از: قطع راه‌های ارتباطی در منطقه که می‌تواند عملیات نجات و بازسازی بعد از سانحه را نیز تحت تاثیر قرار دهد.	راه‌ها و جاده‌ها
۰/۷	تاثیر مستقیم در اقتصاد (درآمد) و غذای مردم دارد.	اراضی زراعی آبی
۰/۳۵	در وضعیت مالی اهالی تاثیر می‌گذارد.	اراضی زراعی دیم
۰/۸	تاثیر مستقیم در اقتصاد و غذای مردم دارد.	باغ
۰/۶	علاوه بر تاثیر مستقیم در اقتصاد اهالی، سبب از بین رفتن منابع ملی نیز می‌شود.	مراتع
۰/۳	منابع ملی را از بین می‌برد ولی تاثیر مستقیم بر اقتصاد فردی اهالی ندارد.	جنگل

نتایج آزمون برابری میانگین گروه‌ها در متغیرهای پیوسته نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر سطح معنی‌داری ($\text{sig} < 0.0001$) بین تمام متغیرهای مستقل (فاصله از گسل‌های اصلی، درجه شیب، میانگین مجموع بارندگی سالانه، فاصله از رودخانه‌ها و جاده‌ها، ماکزیمم شتاب افقی زمین در اثر زلزله و فاصله از سازه‌ها) و متغیر گروه‌بندی (وقوع و عدم وقوع زمین‌لغزش) اختلاف معنی‌دار وجود دارد. صحت کلی تحلیل تشخیصی ۶۹/۶ درصد بوده و پیش‌گویی

پیکسل‌های درگیر زمین‌لغزش ۷۶/۸ درصد درست است. سطح زیر منحنی^۱ در این مدل برابر ۰/۷۹۵ بوده و نشان می‌دهد که دقت پیش‌گویی مدل ۷۹/۵ درصد است که نتیجه خوبی در ارزیابی خطر زمین‌لغزش است (شکل ۴). در شکل ۴، حساسیت عبارت از احتمال درست تعیین شدن زمین‌لغزش در یک پیکسل و قدرت درست‌نمایی احتمال اینکه یک پیکسل بدون زمین‌لغزش درست تعیین شده باشد. با

¹ The Area Under Curve (AUC)

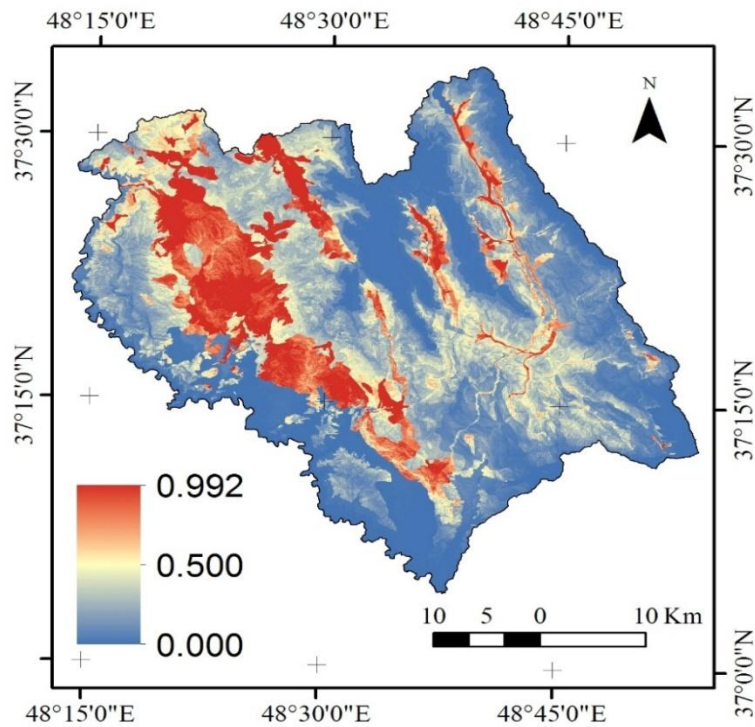
توجه به این‌که سطح معنی‌داری مساحت زیر منحنی تخمین می‌باشد. لذا می‌توان از این مدل در پهنه‌بندی ریسک منطقه با دقت قابل قبولی استفاده نمود. کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و استفاده از ارزیابی بهتر از

جدول ۳-۱- متغیرهای مستقل مورد استفاده در تحلیل آماری

ردیف	نام متغیر	نوع متغیر	کد طبقه	توصیف
۱	ترکیب سنگی	طبقه‌بندی شده	I طبقه	Q: نهشته‌های آلوویال و کولوویال
			II طبقه	V: گدازه‌های آتشفشانی
			III طبقه	P: آذرین نفوذی
			IV طبقه	SCM: ماسه سنگ، گنگلومرا و مارن
			V طبقه	WV: سنگ‌های آتشفشانی هوازده و برشی شده
			VI طبقه	M: مارن
			VII طبقه	Sh: شیل
			VIII طبقه	C: سنگ‌های آهکی
			IX طبقه	SL: سنگ آهک‌های ماسه‌ای و سیلتی
			X طبقه	SC: ماسه سنگ و کنگلومرا
			XI طبقه	SP: رسوبات کلاستیک اسلیتی و فیلیتی
			XII طبقه	A: زون‌های دگرسان شده
			XIII طبقه	VT: گدازه‌ها و توف‌ها
۲	جهت شیب	طبقه‌بندی شده	I طبقه	جهت شمالی
			II طبقه	جهت شمال شرقی
			III طبقه	جهت شرقی
			IV طبقه	جهت جنوب شرقی
			V طبقه	جهت جنوبی
			VI طبقه	جهت جنوب غربی
			VII طبقه	جهت غربی
			VIII طبقه	جهت شمال غربی
			IX طبقه	مسطح (بدون جهت مشخص)
			I طبقه	۴۰۰ ≤ ارتفاع < ۶۰۰
			II طبقه	۶۰۰ ≤ ارتفاع < ۸۰۰
			III طبقه	۸۰۰ ≤ ارتفاع < ۱۰۰۰
			IV طبقه	۱۰۰۰ ≤ ارتفاع < ۱۲۰۰
V طبقه	۱۲۰۰ ≤ ارتفاع < ۱۴۰۰			
VI طبقه	۱۴۰۰ ≤ ارتفاع < ۱۶۰۰			
VII طبقه	۱۶۰۰ ≤ ارتفاع < ۱۸۰۰			
VIII طبقه	۱۸۰۰ ≤ ارتفاع < ۲۰۰۰			
IX طبقه	۲۰۰۰ ≤ ارتفاع < ۲۲۰۰			
X طبقه	۲۲۰۰ ≤ ارتفاع < ۲۴۰۰			
XI طبقه	۲۴۰۰ ≤ ارتفاع < ۲۶۰۰			
XII طبقه	۲۶۰۰ ≤ ارتفاع < ۲۸۰۰			
XIII طبقه	۲۸۰۰ ≤ ارتفاع < ۳۰۰۰			
XIV طبقه	۳۰۰۰ ≤ ارتفاع < ۳۲۰۰			
XV طبقه	۳۲۰۰ ≤ ارتفاع < ۳۴۰۰			
۴	مورفولوژی دامنه (انحناء دامنه)	طبقه‌بندی شده	(-)	مقعر
			(0)	مستقیم
			(+)	محدب

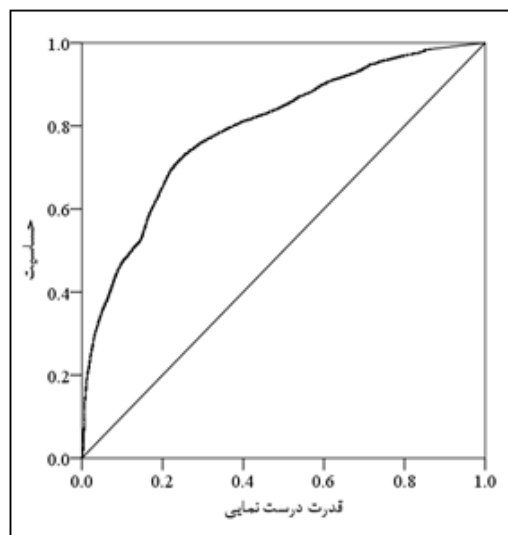
جدول ۳-۲- متغیرهای مستقل مورد استفاده در تحلیل آماری

ردیف	نام متغیر	نوع متغیر	کد طبقه	توصیف
۱	نوع کاربری و پوشش زمین	طبقه‌بندی شده	I طبقه II طبقه III طبقه IV طبقه V طبقه VI طبقه VII طبقه VIII طبقه IX طبقه X طبقه XI طبقه XII طبقه XIII طبقه XIV طبقه XV طبقه XVI طبقه	زراعی باغ مخلوط جنگلی با سایر مخلوط مرتع متوسط با سایر مرتع متوسط مخلوط زراعت و باغ مرتع خوب مرتع فقیر مخلوط جنگل کم تراکم و سایر زراعت دیم مخلوط مرتع خوب با سایر جنگل کم تراکم و تخریب شده مخلوط مرتع فقیر، صخره‌ای با سایر جنگل با تراکم متوسط مخلوط زراعت، مراتع و باغ و سایر سازه‌ها
۲	فاصله از گسل‌های اصلی (متر)	پیوسته		
۳	فاصله از آبراهه‌ها و رودخانه‌ها (متر)	پیوسته		
۴	زاویه شیب (درجه)	پیوسته		
۵	فاصله از راه‌ها و جاده‌ها (متر)	پیوسته		
۶	فاصله از سازه‌ها (متر)	پیوسته		
۷	ماکزیمم شتاب زمین (g)	پیوسته		
۸	میزان بارندگی سالانه (میلی‌متر در سال)	پیوسته		



شکل ۳- نقشه خطر زمین‌لغزش در منطقه هشتچین

پهنه‌بندی ریسک: با به‌کارگیری عملگر ضرب جبری فازی اعداد خروجی کوچک‌تر شده و به سمت صفر میل می‌کنند، چون درجه عضویت اعضاء در دو مجموعه فازی بین صفر و یک در تغییر است. در نتیجه تعداد پیکسل‌های کمتری در طبقه با ریسک بالا قرار می‌گیرند. به‌همین دلیل این عملگر دقت و حساسیت بسیار بالایی در تعیین میزان ریسک زمین‌لغزش‌ها دارد. پهنه‌بندی درجه ریسک زمین‌لغزش و طبقه‌بندی آن به پهنه‌های مختلف ریسک، بر اساس این عملگر صورت گرفت. در این روش مقادیر مختلف ریسک زمین‌لغزش‌ها برای ترکیب‌های مختلف از پتانسیل خسارت منابع و پتانسیل زمین‌لغزش با تشکیل ماتریس ارزیابی ریسک زمین‌لغزش در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- منحنی ROC برای ارزیابی دقت مدل توابع مطلوب

جدول ۴- ماتریس ارزیابی ریسک زمین‌لغزش

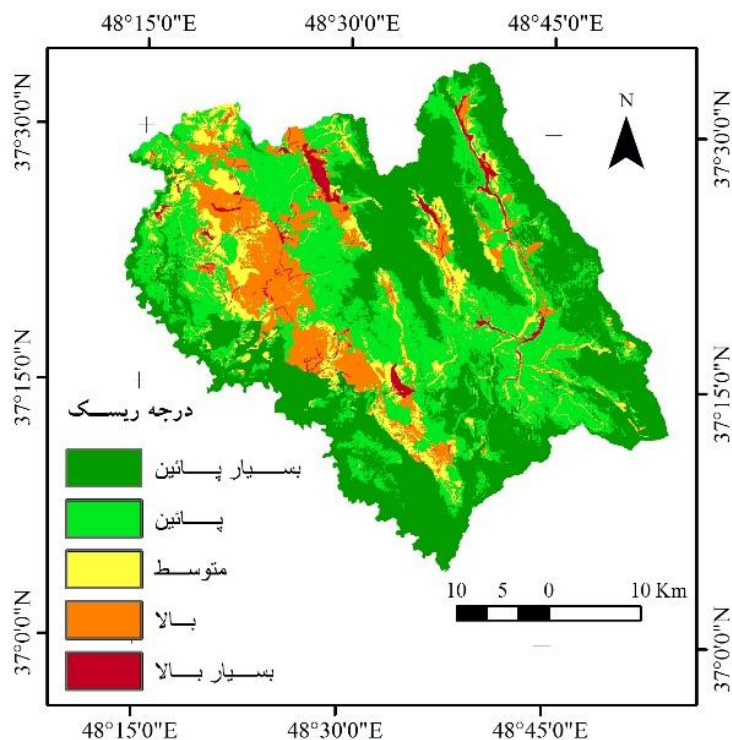
پتانسیل زمین‌لغزش					پتانسیل خسارت منابع
بسیار پرخطر (۱)	پرخطر (۰/۸)	خطر متوسط (۰/۵۵)	کم خطر (۰/۳)	بسیار کم خطر (۰/۱)	
۱	۰/۸۰	۰/۵۵	۰/۳۰	۰/۱۰	سازه‌ها (۱)
۰/۹۰	۰/۷۲	۰/۵۰	۰/۲۷	۰/۰۹	راه‌ها و جاده‌ها (۰/۹)
۰/۸۰	۰/۶۴	۰/۴۴	۰/۲۴	۰/۰۸	باغ (۰/۸)
۰/۷۰	۰/۵۶	۰/۳۸	۰/۲۱	۰/۰۷	اراضی زراعی آبی (۰/۷)
۰/۶۰	۰/۴۸	۰/۳۳	۰/۱۸	۰/۰۶	مراعات (۰/۶)
۰/۳۵	۰/۲۸	۰/۱۹	۰/۱۰	۰/۰۳۵	اراضی زراعی دیم (۰/۳۵)
۰/۳۰	۰/۲۴	۰/۱۶۵	۰/۰۹	۰/۰۳	جنگل (۰/۳)

پهنه‌بندی ریسک منطقه، مقادیر ریسک زمین‌لغزش در فاصله بین ۰/۰۳ و یک به پنج طبقه تقسیم شدند. جهت این رده‌بندی از رنج‌های عددی پیشنهادی Kanungo و همکاران (۲۰۰۸) استفاده شد (جدول ۵). با توجه به مرز پهنه‌های ذکر شده فوق، نقشه ریسک منطقه تهیه شد (شکل ۵).

چنان‌که در ماتریس ارزیابی ریسک زمین‌لغزش مشاهده می‌شود، مقادیر هر پیکسل از ۰/۰۳ تا یک تغییر می‌کند. مقدار ۰/۰۳ نشان‌دهنده پتانسیل زمین‌لغزش بسیار کم در گروه اراضی جنگلی است، در حالی‌که عدد یک مربوط به مناطق مسکونی با پتانسیل زمین‌لغزش بسیار بالا می‌باشد. به‌منظور

جدول ۵- طبقه‌بندی مقادیر ریسک زمین‌لغزش

مقادیر ریسک زمین‌لغزش	پهنه‌های ریسک زمین‌لغزش
$0/1 \leq$ ریسک زمین‌لغزش $< 0/0$	ریسک بسیار پائین
$0/1 \leq$ ریسک زمین‌لغزش $< 0/1$	ریسک پائین
$0/2 \leq$ ریسک زمین‌لغزش $< 0/4$	ریسک متوسط
$0/4 \leq$ ریسک زمین‌لغزش $< 0/6$	ریسک بالا
$0/6 >$ ریسک زمین‌لغزش	ریسک بسیار بالا



شکل ۵- پهنه‌بندی ریسک زمین‌لغزش بر اساس خطر تخمینی با روش تابع احتمال نسبی

درجه ریسک متوسط واقع شده است. بیشتر مساحت پهنه‌های با ریسک پائین و بسیار پائین به اراضی مرتعی مربوط است (جدول ۶).

هدف اصلی ارزیابی ریسک زمین‌لغزش تعیین درجه خسارت مورد انتظار در اثر زمین‌لغزش در یک منطقه است (Varnes, ۱۹۸۴). معمولاً دستیابی به این هدف به روش‌های ارزیابی کیفی و کمی ریسک ممکن است (Chowdhury و Flentje, ۲۰۰۳). در ارزیابی کمی ریسک، نتیجه احتمال وقوع یک حادثه فاجعه‌بار تعیین می‌شود، در این روش میزان خسارت جانی یا مالی احتمالی وقوع زمین‌لغزش در یک منطقه تخمین زده می‌شود (Fell و Hartford, ۱۹۹۷).

در ارزیابی کمی ریسک زمین‌لغزش نیاز به فهرستی از زمین‌لغزش‌ها و پیامدهای آن می‌باشد که جمع‌آوری اطلاعات از خسارت‌های جانی و مالی با مشکلات زیادی همراه است (Guzzetti, ۲۰۰۰؛ Kong, ۲۰۰۲). ارزیابی ریسک زمین‌لغزش در مقیاس ناحیه‌ای که در آن انواع زمین‌لغزش‌ها اتفاق می‌افتند در ایجاد خطرهای متعدد دخالت دارند، به روش کمی اغلب غیرعملی است (Guzzetti, ۲۰۰۲). در این حالت تعیین شدت، فراوانی، شکل و روند تحول

درجه خطر تخمینی در هر پیکسل از منطقه هشتچین بر مبنای مدل پیشنهادی و بر اساس زمین‌لغزش‌های با شدت متوسط و بالا که بعد از سال ۱۹۶۰ به‌وقوع پیوسته و یا حداقل یک‌بار فعالیت کرده‌اند، از دقت خوبی برخوردار است. لذا انتظار می‌رود با مینا قرار دادن نقشه خطر فوق به‌عنوان لایه پتانسیل خطر، پهنه‌بندی ریسک منطقه نیز از دقت بالای برخوردار باشد. بر اساس نقشه ریسک منطقه، پهنه‌های با ریسک بالا و خیلی بالا ۱۳/۸ درصد از مساحت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. در این پهنه‌بندی به ترتیب ۸، ۲۱/۵ و ۵۶/۶ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های با ریسک متوسط، پائین و خیلی پائین قرار می‌گیرند.

نتایج ارزیابی ریسک نشان می‌دهد که ۲/۳ درصد از کل پیکسل‌ها در زون با درجه بسیار بالای ریسک قرار می‌گیرند. در ۱/۸ درصد از مساحت پهنه با ریسک بسیار بالا اراضی زراعی و باغی و در ۰/۶ درصد از آن سازه‌ها و راه‌ها قرار دارند. بیش از ۹۰ درصد از پهنه با ریسک بالا، با اراضی مرتعی هم‌پوشانی دارد. حدود ۴۱/۵ درصد از پیکسل‌های دارای سازه در قلمروی با ریسک بالا و ۳۶ درصد از این مناطق در پهنه با

زمین لغزش‌ها در یک منطقه به سادگی امکان پذیر نیست.

جدول ۶- مقایسه درصد پیکسل‌های منابع مختلف منطقه هشتچین در پهنه‌های مختلف ریسک

ریسک	پارامتر	منابع در معرض خطر						کل	
		جنگل	اراضی زراعی دیم	مراتع	اراضی زراعی آبی	باغ	راه‌ها		سازه‌ها
ریسک بسیار	تعداد پیکسل‌ها	۴۳۶۸	۲۶۶۶	۳۷۹۹۷۴	۳۰۱۲	۲۴۶۴	۸۰۱۰	۴۹۵	۴۰۰۹۸۹
	درصد در طبقه ریسک	۱/۱	۰/۷	۹۴/۸	۰/۸	۰/۶	۲/۰	۰/۱	۱۰۰
	درصد در منابع	۶۶	۲۱/۴	۵۹/۶	۱۸/۱	۱۶/۸	۴۳/۲	۲۲/۵	۵۶/۶
	درصد از کل	۰/۶	۰/۴	۵۳/۶	۰/۴	۰/۳	۱/۱	۰/۱	۵۶/۶
ریسک پایین	تعداد پیکسل‌ها	۰	۲۰۶۳	۱۵۰۵۳۶	۰	۰	۰	۰	۱۵۲۶۰۱
	درصد در طبقه ریسک	۰/۰	۱/۴	۹۸/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۰۰
	درصد در منابع	۰/۰	۱۶/۶	۲۳/۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۲۱/۵
	درصد از کل	۰/۰	۰/۳	۲۱/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۲۱/۵
ریسک متوسط	تعداد پیکسل‌ها	۲۲۵۲	۷۷۰۹	۳۳۱۷۷	۴۶۰۵	۳۰۴۷	۵۴۱۳	۷۹۱	۵۶۹۹۴
	درصد در طبقه ریسک	۴	۱۳/۵	۵۸/۲	۸/۱	۵/۳	۹/۵	۱/۴	۱۰۰
	درصد در منابع	۳۴	۶۲	۵/۲	۲۷/۶	۲۰/۸	۲۹/۲	۳۶	۸
	درصد از کل	۰/۳	۱/۱	۴/۷	۰/۷	۰/۴	۰/۸	۰/۱	۸
ریسک بالا	تعداد پیکسل‌ها	۰/۰	۰/۰	۷۳۶۱۰	۲۱۴۳	۳۷۱۱	۱۸۱۳	۳۳۳	۸۱۶۱۰
	درصد در طبقه ریسک	۰/۰	۰/۰	۹۲/۲	۲/۶	۴/۵	۲/۲	۰/۴	۱۰۰
	درصد در منابع	۰/۰	۰/۰	۱۱/۶	۱۲/۹	۲۵/۳	۹/۸	۱۵/۲	۱۱/۵
	درصد از کل	۰/۰	۰/۰	۱۰/۴	۰/۳	۰/۵	۰/۳	۰/۰	۱۱/۵
ریسک بسیار بالا	تعداد پیکسل‌ها	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۶۹۱۷	۵۴۵۲	۳۳۱۴	۵۷۹	۱۶۲۶۲
	درصد در طبقه ریسک	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۲/۵	۳۳/۵	۲۰/۴	۳/۶	۱۰۰
	درصد در منابع	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۱/۵	۳۷/۲	۱۷/۹	۲۶/۳	۲/۳
	درصد از کل	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱	۰/۸	۰/۵	۰/۱	۲/۳
کل	تعداد پیکسل‌ها	۶۶۲۰	۱۲۴۳۸	۶۳۷۲۹۹	۱۶۶۷۷	۱۴۶۷۴	۱۸۵۵۰	۲۱۹۸	۷۰۸۴۵۶
	درصد در طبقه ریسک	۰/۹	۱/۸	۹۰	۲/۴	۲/۱	۲/۶	۰/۳	۱۰۰
	درصد در منابع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
	درصد از کل	۰/۹	۱/۸	۹۰	۲/۴	۲/۱	۲/۶	۰/۳	۱۰۰

تعیین کرد. روش‌های مورد استفاده در ارزیابی ریسک زمین لغزش به‌طور آشکارا از هم متفاوت بوده و لذا در هر کدام از آن‌ها ریسک زمین لغزش‌های یک منطقه از جنبه‌های متفاوتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

با توجه به حجم و نوع داده‌های موجود از منطقه هشتچین، در این پژوهش جهت بهبود کیفیت ارزیابی ریسک و کاربردی کردن نتایج آن، از روش نیمه کمی استفاده شد. ارزیابی ریسک زمین لغزش در یک مقیاس ناحیه‌ای و با استفاده از این روش در منطقه هشتچین برای اولین بار در این پژوهش صورت گرفته و تا زمان انجام آن در غرب رشته کوه البرز در شمال غرب ایران، مطالعه مشابهی گزارش نشده است. لذا

همچنین، ممکن است جزئیات اتفاقات گذشته (تاریخی) به‌طور کامل موجود نباشد. اما در دامنه‌های کم وسعت روش‌های ارزیابی کمی ریسک می‌تواند به راحتی اجرا شود (Dai و همکاران، ۲۰۰۲). علاوه بر این دو روش مرسوم، در چند سال‌های گذشته روش نیمه کمی نوینی نیز جهت ارزیابی ریسک زمین لغزش‌ها پیشنهاد شده است (Arora و Anbalagan، ۲۰۱۰؛ Kanungo و همکاران، ۲۰۰۸). در این روش با داشتن معلوماتی از منطقه از جمله نقشه سازه‌ها در قالب GIS، داده‌های پرسش‌نامه‌های تکمیل شده و با یک عملیات ساده ژئوگرافیکی می‌توان مکان‌هایی را که ممکن است زمین لغزش‌ها در آینده بر منابع در معرض ریسک خسارت وارد سازند را

بارندگی‌های شدید و یا زلزله و در یک دوره زمانی محدود به‌وقوع پیوسته باشند.

ارزیابی خطر زمین‌لغزش‌ها به‌روش ارزیابی تقاطعی و بر مبنای تفکیک مکانی زمین‌لغزش‌ها می‌تواند به‌طور مستقل از روش آماری مورد استفاده در ارزیابی مدل خطر زمین‌لغزش‌ها به‌کار برده شود. عدم قطعیت‌های مرحله ارزیابی خطر زمین‌لغزش مستقیماً در تحلیل و تعریف ریسک آن‌ها تاثیر می‌گذارند. به‌همین دلیل مراحل مختلف مدل توابع مطلوب با استفاده از آماره‌های مربوطه مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. اگر مبنای وقوع زمین‌لغزش در فاصله احتمال بین صفر تا ۰/۹۹۲ بیش از ۰/۵۰ در نظر گرفته شود، ارزیابی مدل نشان‌دهنده موفقیت ۷۹/۵ درصد است که خوب ارزیابی می‌شود.

در این پژوهش فرض بر این است که عوامل ایجاد کننده زمین‌لغزش‌های با شدت متوسط تا بالا در آینده نیز می‌توانند در وقوع زمین‌لغزش‌های جدید و یا فعالیت دوباره زمین‌لغزش‌های موجود تاثیرگذار باشند. مطمئناً این فرض دارای عدم قطعیت‌هایی است، چراکه وقوع زمین‌لغزش می‌تواند با جابه‌جائی مواد و افزایش مقاومت آن‌ها، حساسیت دامنه‌ها را جهت وقوع ناپایداری در آینده تغییر دهد (Dykes, ۲۰۰۲؛ Crozier و Glade, ۲۰۰۵). بنابراین داده‌های تاریخی به‌دست آمده از رابطه فراوانی-شدت زمین‌لغزش‌ها نمی‌تواند معیاری کاملاً قابل اعتماد جهت تعیین فعالیت زمین‌لغزش‌ها در آینده باشد (Crozier و Glade, ۲۰۰۵). بیش از ۶۰ درصد از لغزش‌های انتخاب شده جهت اجرای مدل در این منطقه در حال حاضر نیز فعال هستند و این می‌تواند تا حدودی عدم قطعیت ذکر شده را کاهش دهد. با امتیازدهی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و نقشه منابع در معرض خطر بر اساس مفهوم تئوری مجموعه‌های فازی به‌ترتیب لایه‌های رستری پتانسیل زمین‌لغزش و پتانسیل خسارت منابع تهیه شد.

در اجرای این روش درجه عضویت ترکیب پتانسیل زمین‌لغزش بر مبنای ماتریس پیشنهادی Kanungo و همکاران (۲۰۰۸) تعیین شد، اما درجه عضویت پتانسیل خسارت منابع بر مبنای اهمیت منابع و طبق نظر کارشناسی در منطقه

این مدل را می‌توان در ارزیابی ریسک زمین‌لغزش‌ها در مناطق مشابه کوهستانی دیگر مانند ارتفاعات زاگرس، البرز و قفقاز نیز به‌کار برد. تحلیل ریسک زمین‌لغزش در یک مقیاس ناحیه‌ای نیاز به یک فرایند چند مرحله‌ای پیچیده دارد و برای این منظور داشتن لایه‌های اطلاعاتی خطر زمین‌لغزش، عناصر در معرض ریسک و درجه آسیب‌پذیر ضروری است (Zêzere و همکاران، ۲۰۰۸).

خطر زمین‌لغزش در هر سلول (پیکسل) بر اساس تحلیل رابطه بین زمین‌لغزش‌های با شدت متوسط تا شدیدی که در ۵۰ سال گذشته به‌وقوع پیوسته‌اند و یا حداقل یک‌بار فعالیت داشته‌اند با مجموعه عوامل موثر که به‌عنوان فاکتورهای مستقل فرض می‌شوند، مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت ارزیابی خطر زمین‌لغزش از روش کمی آماری، تحت عنوان روش توابع مطلوب استفاده شد (Chung و Fabbri, ۲۰۰۴ و ۲۰۰۸؛ Chung, ۲۰۰۶). در تعیین شدت زمین‌لغزش‌ها از حجم مواد جابه‌جا شده، سرعت تخمینی آن‌ها و داده‌های تاریخی موجود استفاده شد. در این مورد زمین‌لغزش‌های با شدت متوسط تا شدید که جدیداً (یعنی در ۵۰ سال گذشته) اتفاق افتاده‌اند و یا زمین‌لغزش‌های که در این مدت حداقل یک‌بار حرکت داشته‌اند، انتخاب شدند.

در این پژوهش فاکتورهایی که رابطه متوسط تا قوی با زمین‌لغزش دارند و همچنین، از عدم قطعیت پائینی برخوردار هستند، انتخاب شدند. به‌دلیل اشکال غیرهندسی زمین‌لغزش‌ها اجرای مدل در واحدهای پیکسلی می‌تواند از دقت محاسبات بکاهد، اما در یک مقیاس ناحیه‌ای انتخاب پیکسل‌های ۵۰×۵۰ متری میزان عدم قطعیت را کاهش داده است. قدرت پیش‌گوئی مدل‌های خطر زمین‌لغزش‌ها بر اساس روش‌های ارزیابی تقاطعی و همچنین، روش منحنی ROC و با استفاده از تقسیم زمین‌لغزش‌ها به دو گروه تخمین و ارزیابی انجام گرفت. تقسیم زمین‌لغزش‌ها به دو گروه تخمین و ارزیابی در یک دوره زمانی، ولی در مکان‌های مختلف از تقسیم آن‌ها به دو گروه زمانی در این منطقه می‌تواند دقیق‌تر باشد، چرا که زمان دقیق زمین‌لغزش‌ها یکسان نبوده و ممکن است زمین‌لغزش‌ها در اثر عوامل تشدید کننده مانند

بر اساس نتایج به‌دست آمده تنها ۱۱/۶ درصد از اراضی مرتعی در قلمره پهنه‌های با ریسک بالا و بسیار بالا واقع شده است. در این دامنه‌ها پوشش مرتعی یا تخریب شده و یا به‌دلیل بهره‌برداری‌های بی‌رویه به شدت تضعیف شده است. مساحت اصلی پهنه‌های با ریسک پائین و بسیار پائین دارای پوشش مرتعی متوسط و خوب هستند.

ویژگی‌های طبیعی منطقه مورد پژوهش مانند شرایط زمین‌شناسی، تکتونیکی، سنگ‌شناسی، هیدرولوژیکی، اقلیمی و مورفولوژیکی بستر مناسبی را برای وقوع زمین‌لغزش به‌وجود آورده است. وقوع زمین‌لغزش در بیش از ۱۲ درصد از مساحت منطقه خود موید این ادعا است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین تعداد و مساحت لغزش‌ها بر روی سازندهای قرمز فوقانی مربوط به میوسن و در سازندهای آتشفشانی ائوسن دگرسان شده به‌علت وجود سنگ و خاک‌های حاوی کانی‌های رسی رخ داده‌اند. علاوه بر عامل سنگ‌شناسی بیشترین مقدار لغزش در کاربری زراعی و باغی به میزان ۹۷۱۵/۵۳ هکتار، در فاصله شش تا ۱۸ کیلومتری از گسل‌های اصلی به میزان ۸۰۴۷/۵ هکتار، در شیب پنج تا ۲۰ درصد به‌میزان ۹۱۵۷/۵ هکتار به‌علت قرار گرفتن بر روی مصالح رس‌دار، در جهات شیب شمال شرقی به‌میزان ۲۰۰۰ هکتار و با بارندگی سالانه ۲۶۰ تا ۴۶۰ میلی‌متر به‌میزان ۱۳۵۱۴/۲۵ هکتار به‌دلیل ترکیب سنگی و شیب ملایم به‌وقوع پیوسته‌اند.

در ۸۰ درصد از لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه عامل زیرسویی رودخانه‌ها دخالت مستقیم داشته است. میزان تاثیر عوامل موثر در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه هشتچین را می‌توان به‌ترتیب به سه گروه زیر تقسیم کرد: الف) ترکیب سنگی، کاربری و پوشش گیاهی زمین، ب) فاصله از گسل‌های اصلی، توپوگرافی، زلزله، میانگین مجموع بارندگی سالانه، درجه شیب دامنه و فاصله از رودخانه‌ها و ج) جهات شیب دامنه‌ها، فاصله از راه‌ها و سازه‌ها و در نهایت مورفولوژی دامنه. خاک‌ها و سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی در دامنه‌های این منطقه بر اثر افزایش رطوبت و اشباع شدن، خواص مکانیکی ویژه‌ای پیدا می‌کنند. با افزایش آب در

هشتچین امتیازدهی شده است. جهت ترکیب این دو لایه از عملگر ضرب فازی استفاده شد و پهنه‌بندی ریسک زمین‌لغزش انجام شد. در عملگر ضرب فازی تقریباً تناسب مناسبی بین طبقات ریسک وجود دارد و ۱۳/۸ درصد از مساحت منطقه هشتچین در پهنه‌های با طبقه ریسک بالا و خیلی بالا قرار گرفته است. از این پهنه‌بندی ریسک زمین‌لغزش می‌توان در بیشتر برنامه‌ریزی‌های محیطی و طراحی‌ها استفاده کرد.

نقشه ریسک به‌صورت پهنه‌های با درجات بسیار بالا، بالا، متوسط، پائین و بسیار پائین تعریف و طبقه‌بندی شد. مدل ارزیابی خطر زمین‌لغزش در منطقه هشتچین با فرض‌های زیر اجرا شد: (۱) زمین‌لغزش‌ها در آینده در شرایطی مانند گذشته اتفاق خواهند افتاد. (۲) زمین‌لغزش‌ها وقایعی مستقل هستند. (۳) دوره برگشت وقوع زمین‌لغزش در آینده مشابه گذشته خواهد بود. (۴) اندازه زمین‌لغزش‌ها نشان‌دهنده شدت آن‌ها است. (۵) اندازه احتمالی زمین‌لغزش‌ها، احتمال وقوع آن‌ها در یک دوره زمانی و احتمال توزیع مکانی گسیختگی دامنه‌ها همه مستقل‌اند.

بیشتر تغییرات ایجاد شده در منطقه از جمله ساخت و سازها، احداث جاده و تغییر کاربری‌ها در ۵۰ سال گذشته صورت گرفته است. امکان جمع‌آوری داده‌های مربوط به زمین‌لغزش‌های ۵۰ سال گذشته از طریق برخی مستندات و اطلاعات ساکنان منطقه به‌صورت پرسش‌نامه‌ای وجود داشت. بر این اساس تحلیل خطر و ریسک زمین‌لغزش‌های منطقه مورد پژوهش در آینده برای یک دوره ۵۰ساله انجام گرفته است. نقشه ارزیابی ریسک میزان خسارات زمین‌لغزش‌ها را در صورت وقوع در ۵۰ سال آینده در منطقه هشتچین به‌طور نسبی نشان می‌دهد. بر اساس نقشه ریسک به‌دست آمده از مدل پیشنهادی پهنه‌های با ریسک بالا و خیلی بالا ۱۳/۸ درصد از مساحت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. ۶۲/۵ درصد از اراضی باغی و ۵۴/۴ درصد از زمین‌های کشاورزی آبی در پهنه‌های با ریسک بالا و بسیار بالا قرار گرفته‌اند. ۴۱/۵ درصد از پیکسل‌های دارای سازه و ۲۷/۷ درصد از پیکسل‌های واجد راه در گروه پهنه‌های با ریسک بسیار بالا و بالا طبقه‌بندی شده‌اند.

به کار برده شود. به نظر می‌رسد که بهترین کاربرد آن در زمان احداث سازه‌های زیربنائی مانند شهرک‌های مسکونی و صنعتی، جابه‌جایی و اسکان اهالی روستاها در مکان‌های جدید و احداث یا تعمیر راه‌های منطقه باشد. هرچند ممکن است به دلیل هزینه‌های گزاف کنترل و کاهش خسارت وقوع زمین‌لغزش‌ها، سیاست "منتظر اتفاق باش و بعداً تعمیر و بازسازی کن" استراتژی مناسبی به نظر برسد، اما با توجه به خسارت‌های مستقیم (و غیرمستقیم) زیادی که سالانه به منطقه وارد می‌شود، مصلحت در استفاده از روش‌های پیش‌گیرانه است. یکی از اساسی‌ترین نیاز برنامه‌ریزی‌ها، نقشه پهنه‌بندی ریسک زمین‌لغزش در منطقه است.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از کلیه همکاران و اساتید پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری که از راهنمایی‌های علمی‌شان در این پژوهش بهره برده‌ام، کمال تشکر را دارم. همچنین، از مساعدت مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل در انجام این پژوهش سپاسگزارم.

دامنه‌ها فاصله بین ورقه‌های کانی‌های رسی بیشتر شده و با انبساط آن‌ها مقاومت برشی خاک‌ها کاهش یافته و حرکات دامنه‌ای به‌وقوع می‌پیوندد.

جهت جلوگیری از وقوع لغزش‌های جدید و یا پایدارسازی دامنه‌های ناپایدار می‌توان در مرحله اول از اشباع شدن خاک و سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی دامنه‌های مستعد زمین‌لغزش جلوگیری کرده و از زیرشوئی آن‌ها به‌وسیله رودخانه‌ها ممانعت به عمل آورد. همچنین، با کنترل زمان و مدت آبیاری باغات و زراعت آبی و دفع اصولی پساب فاضلاب‌های خانگی و صنعتی نیز می‌توان بر پایدارسازی بیشتر دامنه‌ها کمک کرد. احیاء پوشش گیاهی مراتع خصوصاً مراتع تضعیف شده و تقویت آن‌ها یکی از مناسب‌ترین روش‌های کنترل‌کننده فعالیت زمین‌لغزش‌ها و یا وقوع آن‌ها است.

روش‌های به‌کار رفته در این پژوهش، شناسائی مناطقی را که بیشتر تحت خطر و ریسک زمین‌لغزش هستند، تسهیل نموده و زون‌هایی که کوشش در کاهش خطر در آن‌ها مقرون به‌صرفه خواهد بود را نشان می‌دهند. این پهنه‌بندی می‌تواند در طراحی پروژه‌های مختلف و بر حسب درجه حساسیت آن‌ها

منابع مورد استفاده

1. Anbalagan, B. and B. Singh. 1996. Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains- a case study from Kumaon Himalaya, India. *Engineering Geology*, 4: 237-246.
2. Ansari, F. and M.C. Blurchi. 1996. Landslides of Ardabile Province, Iran. *Geological Survey of Iran*. 46 pages. (in Persian).
3. Arora, M.K. and R. Anbalagan. 2010. Overview of landslide hazard and risk, practices in India. Department of Civil Engineering and Earth Sciences, Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee, *SafeLand*, 247 667, 187 pages.
4. Ayalew, L. and H. Yamagishi. 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65: 15-31.
5. Bonnard, C., F. Forlati and C. Scavia. 2004. Identification and mitigation of large landslide risk in Europe, advances in risk assessment. *IMIRILAND Project* Leiden, London, 317 pages.
6. Cardinali, M., P. Reichenbach, F. Guzzetti, F. Ardizzone, G. Antonini, M. Galli, M. Cacciano, M. Castellani and P. Salvati. 2002. A geomorphological approach to estimate landslide hazard and risk in urban and rural areas in Umbria, central Italy. *Natural Hazards and Earth Systems Science*, 2(1-2): 57-72.
7. Castellanos Abella, E.A. 2008. Multi-scale landslide risk assessment in Cuba. ITC, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, ITC dissertation number 154, 293 pages.
8. Castellanos Abella, E.A. and C.J. Van Westen. 2007. Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides*, 4: 311-325.
9. Choi, S.W., W.M. Moon and S.G. Choi. 2000. Fuzzy logic fusion of W-Mo exploration data from Seobyeog-ri, Korea. *Geosciences Journal*, 4(2): 43-52.
10. Chowdhury, R. and P. Flentje. 2003. Role of slope reliability analysis in landslide risk management. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62: 41-46.

11. Chu, C.M., B.W. Tsai and K.T. Chang. 2009. Integrating decision tree and spatial cluster analysis for landslide susceptibility zonation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 59: 479-483.
12. Chung, C.F. and A.G. Fabbri. 2001. Prediction models for landslide hazard using a fuzzy set approach. In: Marchetti, M., V. Rivas. (Eds.), *Geomorphology and Environmental Impact Assessment*. Balkema, Rotterdam, 31-47.
13. Chung, C.F. and A.G. Fabbri. 2004. Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In: Glade, T., M.G. Anderson, M.J. Crozier. (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, New York, NY, 139-174.
14. Chung, C.F. and A.G. Fabbri. 2008. Predicting landslides for risk analysis, spatial models tested by a cross-validation technique. *Geomorphology*, 94: 438-452.
15. Chung, C.J. 2006. Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment. *Computers and Geosciences*, 32: 1052-1068.
16. Crozier, M.J. and T. Glade. 2005. Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. In: Glade, T., M.G. Anderson, M.J. Crozier. (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester, 1-40.
17. Dai, F.C., C.F. Lee and Y.Y. Ngai. 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64(1): 65- 87.
18. Davies, R.G., G.C. Clark, B. Hamzepour, C.R. Jones. 1975. Explanatory text of the Bandar-e-Pahlavi quadrangle map, 1:250000. Geological Survey of Iran, No. D3, 203 pages.
19. Davies, R.G., C.R. Jones, B. Hamzepour, G.C. Clark. 1972. The Geology of the Masuleh Sheet (north-west Iran). Geology Survey of Iran. Report No. 24, 110 pages.
20. Dragičević, S., I. Carević, S. Kostadinov, I. Novković, B. Abolmasov, B. Milojković and D. Simić. 2012. Landslide susceptibility zonation in the Kolubara river basine (western Serbia), analysis of input data. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 7(2): 37-47.
21. Dykes, A.P. 2002. Weathering-limited rainfall-triggered shallow mass movements in undisturbed steep land tropical rainforest. *Geomorphology*, 46: 73-93.
22. Eberhardt, E., K. Thuro and M. Luginbuehl. 2005. Slope instability mechanisms in dipping interbedded conglomerates and weathered marls, the 1999 Ruffi landslide, Switzerland. *Engineering Geology*, 77: 35-56.
23. Faridi, M. and A. Anvari. 2006. Geological map of the Hashtchin area, 1:100000. Iran: Geological Survey of Iran, No. 5664 (in Persian).
24. Fell, R. and D. Hartford. 1997. Landslide risk management. In: Cruden, D.M., R. Fell (Eds.), *Landslide Risk Assessment*. Proceeding of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Balkema, 51-109.
25. Fourniadis, I.G., J.G. Liu and P.J. Mason. 2007. Landslide hazard assessment in the three gorges area, China, using ASTER imagery: Wushan-Badong. *Geomorphology*, 84: 126-144.
26. Geisser, S. 1974. A predictive approach to the random effect model. *Biometrika*, 61(1): 101-107.
27. Glade, T. and M.J. Crozier. 2005. A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. In: Glade, T., M.G. Anderson, M.J. Crozier (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester, pp. 75-138.
28. Guzzetti, F. 2000. Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering Geology*, 58: 89-107.
29. Guzzetti, F. 2002. Landslide hazard assessment and risk evaluation: limits and prospective. *Mediterranean Storms, Proceedings of the 4th EGS Plinius Conference, Mallorca, Spain, October 2002*, 4 pages.
30. Guzzetti, F., M. Galli, P. Reichenbach, F. Ardizzone and M. Cardinali. 2006. Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6: 115-131.
31. Guzzetti, F., B.D. Malamud, D.L. Turcotte and P. Reichenbach. 2002. Power-law correlations of landslide areas in Central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 195: 169-183.
32. Hashemi Tabatabaei, S. 1998. Landslide hazard zonation in south-west of Ardabil Province, Iran. Ministry of Roads and Urban Development, Tehran, Iran. Vol. 2. 72 pages (in Persian).
33. Hemmati, R., A. Dolatimehr, A. Nasirifaer, M. Shahbazi, Gh. Hezhabrpour and Kh. Aghaei. 2007. Ardabil Province climate. Applied Meteorology Research Center of Ardabil, Meteorological Organization, Ministry of Roads and Urban Development, , Iran, 143 pages (in Persian).
34. Intarawichian, N. and S. Dasananda. 2010. Analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping in lower Mae Chaem watershed, Northern Thailand. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 17(3): 277-292.
35. Kanungo, D.P., M.K. Arora, R.P. Gupta and S. Sarkar. 2008. Landslide risk assessment using concepts of danger pixels and fuzzy set theory in Darjeeling Himalayas. *Landslides*, 5: 407-416.

36. Knapen, A., M.G. Kitutu, J. Poesen, W. Breugelmanns, J. Deckers and A. Muwanga. 2006. Landslides in a densely populated county at the footslopes of Mount Elgon (Uganda): characteristics and causal factors. *Geomorphology*, 73: 149–165.
37. Kojima, H., F. Chung Chang-Jo and C.J. Van Westen. 2000. Strategy on the landslide type analysis based on the expert knowledge and the quantitative prediction model. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII*, B7: 701-707.
38. Komakpanah, A. and N. Hafezimoghadas. 1994. Landslide hazard zonation methods. 1st Workshop Proceeding on Landslide Damage Mitigation Strategies in Iran, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 390-414 (in Persian).
39. Kong, W.K. 2002. Risk assessment of slopes. *Quarterly Journal Engineering Geology and Hydrogeology*, 35: 213-222.
40. Lee, E.M. and D.K.C. Jones. 2004. *Landslide risk assessment*. Thomas Telford, London, 454 pages.
41. Liu, R.Z., J.R. Ni, A.G.L. Borthwick, Z.S. Li and O.W.H. Wai. 2006. Rapid zonation of abrupt mass movement hazard part II: applications. *Geomorphology*, 80: 226–235.
42. Mahdaviifar, M.R. 1997. Landslide hazard zonation in Khorshrostan region (south-west of Khalkhal county). MSc Thesis, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran. 154 pages (in Persian).
43. Malamud, B.D., D.L. Turcotte, F. Guzzetti and P. Reichenbach. 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6): 687–711.
44. Mathew, J., V.K. Jha and G.S. Rawat. 2009. Landslide susceptibility zonation mapping and its validation in part of Garhwal Lesser Himalaya, India, using binary logistic regression analysis and receiver operating characteristic curve method. *Landslides*, 6: 17–26.
45. Mayavan, N. and A. Sundaram. 2012. Statistical analysis for landslide in relation to landuse, in Sirumalai Hill, Dindigul district, Tami Nadu, India, using GIS technologies. *Research Journal of Recent Sciences*, 1(12): 36-39.
46. Nikandish, N. and R. Mir Sanei. 1996. Introduction to Ardabile Province landslides. Iran Ministry of Jihad-e-Agriculture, Tehran, Iran. 63 pages (in Persian).
47. OFDA/CRED. 2007. EM-DAT, International emergency disaster database. www.em-dat.net. Université Catholique de Louvian, Brussels, Belgium.
48. Ohlmacher, C.G. and C.J. Davis. 2003. Using multiple regression and GIS technology to predict landslide hazard in north-east Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69: 331–343.
49. Pohar, M., M. Blas and S. Turk. 2004. Comparison of logistic regression and linear discriminant analysis: a simulation study. *Metodološki zvezki*, 1(1): 143-161.
50. Ross, T.J. 2010. *Fuzzy logic with engineering applications*. Third edition, John Wiley and Sons, Ltd., 607 pages.
51. Sdao, F., D.S. Lioi, S. Pascale, D. Caniani and I.M. Mancini. 2013. Landslide susceptibility assessment by using a neuro-fuzzy model: a case study in the Rupestrian heritage rich area of Matera. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 395–407.
52. Shariat Jafari, M. 1996. Landslide, principles of natural slope stability. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran, 218 pages. (in Persian).
53. Sharma, M. and R. Kumar. 2008. GIS-based landslide hazard zonation: a case study from the Parwanoo area, lesser and outer Himalaya, H.P., India. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67: 129-137.
54. Shoaie, Z., G. Shoaie and R. Emamjomeh. 2005. Interpretation of the mechanism of motion and suggestion of remedial measures using GPS continuous monitoring data In: Sassa, K., H. Fukuoka, F. Wang, G. Wang (Eds.), *Landslides: Risk Analysis and Sustainable Disaster Management*. Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium of Landslides. Springer, 327-335.
55. Shou, K.J. and Y.L. Chen. 2005. Spatial risk analysis of Li-shan landslide in Taiwan. *Engineering Geology*, 80: 199-213.
56. Talaei R., J. Ghayoumian, M. Shariat Jafari and E. Aliakbarzadeh. 2004. Study on effective factor causing landslide in southwest of Khalkhal region. Agricultural Research and Education Organization, Ministry of Jihad-e-Agriculture, Tehran, Iran. 153 pages (in Persian).
57. Talaei, R. 2012. Determination and assessment of landslide hazard index in the Hashtjin area (north-western region of Iran). *Bulletin of the Moscow State Regional University, Natural Sciences Series*, 1: 69-74.
58. Turner, A.K. and R.L. Schuster. 1996. Landslides, investigation and mitigation. Special Report 247, Transportation Research Board, National Academic, Washington, USA, 673 pages.
59. Uromeihy, A. and M.R. Mahdaviifar. 2000. Landslide hazard zonation of the Khorshrostan area, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58: 207-213.
60. Van Westen, C.J., T.W.J. Van Asch and R. Soeters. 2006. Landslide hazard and risk zonation, why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65: 176–184.

61. Varnes, D.J. 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. IAEG Commission on Landslides and Other Mass Movements. Paris, UNESCO Press, 63 pages.
62. Wang, H.B. and K. Sassa. 2005. Comparative evaluation of landslide susceptibility in Minamata area, Japan. *Environmental Geology*, 47: 956-966.
63. Yalcin, A. 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72: 1-12.
64. Yoshimatsu, H. and S. Abe. 2006. A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using an analytical hierarchic process (AHP) method. *Landslides*, 3: 149-158.
65. Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8: 338-353.
66. Zêzere, J.L., R.A.C. Garcia, S.C. Oliveira and E. Reis. 2008. Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*, 94: 467-495.
67. Zizioli, D., C. Meisina, R. Valentino and L. Montrasio. 2013. Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 559-573.

Landslide risk evaluation for land use and developmental planning, case study: Hashtchin Region

Reza Talae^{*1}

¹ Scientific Board, Agricultural and Natural Resources Research Center, Ardebil, Iran

Received: 25 November 2013

Accepted: 26 February 2014

Abstract

In this research, a spatial prediction model (a quantitative method) and the fuzzy sets theory (a semi-quantitative method) have been used for landslide hazard and risk assessment, respectively. A procedure, comprising two analytical stages, has been proposed to show the location of future slope instability. In the first step, 75% of the pixels with landslide have been entered to the model as the estimation set, in which new landslides have occurred with a moderate to high intensity or at least have displaced once or more in the last 50 years. At the second stage, the accuracy of prediction map has been examined by ROC curve (Receiver Operating Characteristic curve) based on 25% of the landslide pixels that have not been entered in the model. Landslide risk evaluation was considered by combination of the hazard potential and resource damage potential and using the fuzzy algebraic product operator in the region. The hazard potential and resource damage potential obtained typically from the hazard zonation map and the land cover/land use map. The area under the ROC curve is 0.795 for hazard zonation map, equivalent to an accuracy of 79.5%. In the base of multi-method approach results, 13.8% of the region is located in a high and very high risk level zone, and 78.1% of the area is placed in low and very low risk categories. Proposed method was used for landslide risk assessment in Hashtchin region and the results could be used to established land use planes, developmental activities, displacement and extension of settlement area, and patterns of building regulations.

Key words: Damage, Fuzzy, Hazard zonation, Risk prediction, Slope instability

* Corresponding author: rztala@yahoo.com