

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در امتداد آزادراه خرم‌آباد-زال در استان لرستان با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرحناز میرزایی^۱، علی‌اکبر مومنی^{۲*} و یاسین عبدی^۳

۱- کارشناس ارشد زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

نویسنده مسئول: ali_moomeni@yahoo.com*

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹

دریافت: ۱۴۰۲/۷/۹

چکیده

آزاد راه خرم‌آباد-زال بخشی از محور سراسری تهران - بندر امام خمینی می‌باشد که از لحاظ اقتصادی از جمله راه‌های مهم کشور می‌باشد. بنابراین، این پژوهش به بررسی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مسیر آزادراه خرم‌آباد-زال با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS پرداخته است. به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مطالعه حاضر، از روش تحلیل سلسله مراتبی یا AHP استفاده شده است. بر همین اساس، با توجه به مطالعات و مشاهدات صحرایی و شرایط زمین‌شناسی، تعداد ۱۰ عامل تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش شامل سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، کاربری اراضی، آب و هوا، ارتفاع، فاصله از رودخانه، فاصله از زهکش، و میزان بارندگی انتخاب و در محیط GIS با استفاده از روش AHP، بعد از وزن‌دهی، نقشه مربوط به هر لایه تهیه شده است. در نهایت با ترکیب لایه‌های مختلف، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برای منطقه مورد مطالعه تهیه شده است. بر اساس نقشه تهیه شده مشخص شد که ۵۴ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل زمین‌لغزش زیاد و خیلی زیادی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، GIS، تحلیل سلسله مراتبی AHP، آزادراه خرم‌آباد-زال

۱- پیشگفتار

آسیب‌دیده ایجاد می‌کند و گاهی منجر به تلفات جانی نیز می‌شود (عابدین و همکاران، ۲۰۲۰؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۰). زمین‌لغزش از جمله مخاطرات زمینی است که به فراوانی در ایران اتفاق می‌افتد و آثار آن در بسیاری از دامنه‌های نیمه‌خشک تا مرطوب مستعد کشور دیده می‌شود (محمدخان و همکاران، ۱۳۹۳). این پدیده هر سال در بیش‌تر استان‌های کشور موجب خسارات اقتصادی به راه‌ها، خطوط راه‌آهن، خطوط انتقال نیرو و ارتباطات، کانال‌های آبیاری و آبرسانی، تأسیسات معدنی، تأسیسات استخراج و پالایش نفت و گاز، شبکه شریان‌های حیاتی درون شهرها، کارخانه‌ها و مراکز صنعتی، سدها و دریاچه‌های مصنوعی و طبیعی، جنگل‌ها و مراتع و منابع طبیعی، مزارع و مناطق مسکونی و روستاها می‌شود. از این‌رو در دهه‌های اخیر، تحلیل و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، توجه بسیاری از مهندسان و پژوهش‌گران حوزه علوم زمین را به خود معطوف کرده است. هدف از چنین بررسی‌هایی، به‌دست آوردن راه‌حلی برای مشکل پیچیده و

شبکه راه‌ها یکی از مؤلفه‌های اساسی توسعه اجتماعی-اقتصادی یک کشور است. بنابراین، کشورهای در حال توسعه در برنامه‌های بزرگ ساخت و ساز و بازسازی راه‌ها سرمایه‌گذاری می‌کنند. با این حال، تعریض یا گسترش جاده‌های موجود می‌تواند به محیط‌زیست آن‌ها آسیب برساند (پیلگر و همکاران، ۲۰۲۰). در واقع، جاده‌سازی محیط را مختل می‌کند و زهکشی رواناب را قطع می‌کند، پوشش گیاهی را حذف می‌کند، خاک را حفاری می‌کند، مواد را انباشته می‌کند، شیب‌ها را تغییر می‌دهد و خواص فیزیکی خاک را دچار تغییر می‌کند. این تغییرات فعالیت فرسایشی را تسریع می‌کند و منجر به ناپایداری شیب و حرکات توده‌ای بالقوه در حین و پس از ساخت جاده می‌شود (تیلور و همکاران، ۲۰۲۰). در نتیجه، اقتصاد کشور به دلیل هزینه‌های بالای نگهداری و اختلال در ترافیک تحت تأثیر منفی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، این رویدادها خطر قابل‌توجهی برای اموال انسانی مانند خانه‌های

استفاده از برش نقشه فاکتورهای مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه سپیددشت لرستان، تأثیر هر یک از پارامترهایی چون شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، ارتفاع، لیتولوژی، بارندگی، فاصله از گسل، جاده و آبراهه را با ناپایداری شیب‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS بررسی نمودند. آن‌ها با مقایسه دو مدل تراکم سطح و فازی مشاهده کردند که مدل فازی عملکرد بهتری در شناسایی مناطق با حساسیت بالا نسبت به وقوع خطر زمین‌لغزش دارد. کیانی و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و ANFIS به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبریز هشتجین استان اردبیل پرداخته‌اند. در این مطالعه آن‌ها از ۹ پارامتر مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش در منطقه از قبیل شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله از گسل، فاصله از جاده، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و میزان بارش استفاده نمودند. نتایج صحت‌سنجی کارایی مدل‌های گفته شده با اجرای منحنی راک نشان داد که میزان دقت مدل ANFIS و رگرسیون لجستیک به ترتیب ۸۸/۲۳ درصد و ۸۶/۴۵ درصد است. گامراسا و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از یک دیدگاه آنالیز تصمیم‌گیرنده چندمتغیره در محیط GIS به بررسی ارزیابی خطر زمین‌لغزش در بخش اول آزادراه شمالی-جنوبی الجزایر پرداختند. آن‌ها ۹ پارامتر شامل لیتولوژی، شیب، بارندگی، تغییرات دمای روزانه، پوشش گیاهی، تراکم خطوط راه‌ها، پستی و بلندی، تراکم زهکشی، و فاصله با نهرها را انتخاب و در محیط GIS با استفاده از روش سلسله مراتبی وزن‌دهی کردند و در نهایت با روش ترکیب خطی وزنی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را برای منطقه مورد نظر تهیه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش از ۳۱ درصد منطقه پتانسیل خطر زمین‌لغزش بالایی دارد. بر این اساس، با توجه به اهمیت بالای آزادراه خرم‌آباد-زال به عنوان یک شاهراه ارتباطی که شمال و جنوب کشور را به هم وصل می‌کند، در این مطالعه سعی شده است که با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) نقشه مناطق مستعد زمین‌لغزش در ۱۵ تا ۷۵ مسیر آزاد راه خرم‌آباد-زال شناسایی گردد.

۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

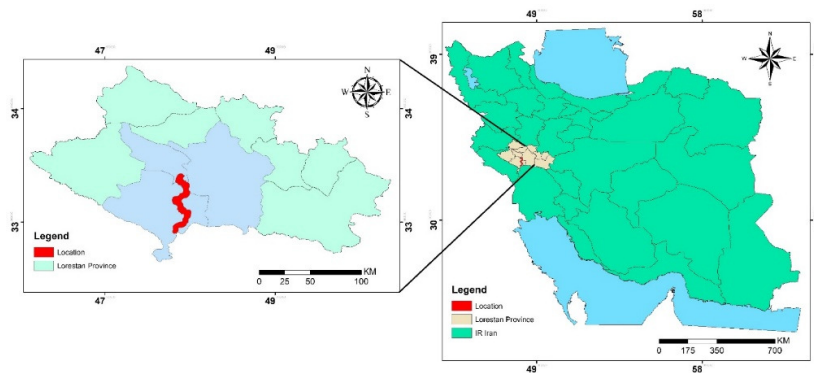
آزادراه خرم‌آباد-زال به طول ۱۰۴ کیلومتر به عنوان گلوگاه شاهراه ترانزیتی شمال به جنوب کشور با صرف اعتباری

چندبعدی خطر زمین‌لغزش است که نیاز به تخصص‌های مختلف علوم زمین به‌ویژه زمین‌ریخت‌شناسی، زمین‌شناسی مهندسی، آمار، علوم کامپیوتر، فیزیک، فناوری اطلاعات و اقتصاد دارد (گازتی و همکاران، ۲۰۰۰). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، تقسیم‌بندی سطح زمین به نواحی مجزای همگن و رتبه‌بندی این نواحی بر پایه میزان خطر واقعی یا بالقوه ناشی از حرکت توده‌های روی شیب دامنه‌هاست (وارنز، ۱۹۷۸ و ۱۹۹۶). بنابراین، نقشه خطر زمین‌لغزش به طراحان و مهندسان در جهت انتخاب مکان مناسب برای اجرای طرح‌های توسعه کمک بزرگی می‌کند و نتایج آن می‌تواند به عنوان داده اولیه برای کمک به مدیریت ناپایداری‌ها و طراحی کاربری زمین مورد استفاده قرار گیرد. محققین زیادی به بررسی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در ایران و سایر نقاط جهان پرداخته‌اند (حائری و سمیعی، ۱۳۷۶؛ ارومیه‌ای و امین‌زاده، ۱۳۷۷؛ فیض‌نیا و همکاران، ۱۳۸۰؛ جلالی، ۱۳۸۱؛ فرهادی‌نژاد و غیومیان، ۱۳۸۲؛ احمدی و همکاران، ۱۳۸۲ و ۱۳۸۴؛ فیض‌نیا و همکاران، ۱۳۸۳؛ بابازاده و اصغری کلجاهی، ۱۴۰۱؛ کانانگو و همکاران، ۲۰۰۹؛ چن و همکاران، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۷).

به‌طور مثال، شادفر و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوزه آبخیز چالکرد تنکابن پرداخته‌اند. بر این اساس، آن‌ها در ابتدا با استفاده از پارامترهایی مثل شیب، جهت دامنه، ارتفاع، گسل‌ها، شبکه آبراهه و راه‌های ارتباطی، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی و نقشه‌های هم‌باران و بررسی و تعیین خصوصیات مربوط به هر یک از آن‌ها و نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها در منطقه، به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد نظر پرداخته‌اند. احمدی و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از دو روش رگرسیون چند متغیره و تحلیل سلسله مراتبی به پهنه‌بندی خطر حرکات توده‌ای در حوزه آبخیز گرمی چای پرداخته‌اند. بر اساس مطالعه آن‌ها، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش بر اساس میزان اولویت به‌ترتیب سنگ‌شناسی، شیب، کاربری اراضی، عناصر خطی، بارش، جهت دامنه و ارتفاع شناسایی شدند. در این مطالعه مشخص شد که روش تحلیل سلسله مراتبی به دلیل برخوردار از متغیرهای بیش‌تر و کلاسه‌بندی اصولی و بدون اعمال نظر کارشناسی نسبت به روش رگرسیون چندمتغیره از اهمیت بالاتری برخوردار بوده و دقت بیش‌تری دارد. بهاروند و سوری (۱۳۹۴) با

به ۲۸ تونل بوده و تونل گندمکار بزرگ‌ترین تونل این مسیر است که بیش از ۲۳۰۰ متر طول دارد. آزادراه مورد مطالعه در جنوب شهر خرم‌آباد بین طول‌های جغرافیایی $48^{\circ}00'$ تا $48^{\circ}30'$ و عرض‌های $32^{\circ}45'$ تا $33^{\circ}30'$ واقع شده است.

بالغ بر ۲۵۱ میلیارد تومان با مشارکت ۵۱ درصدی بخش خصوصی احداث شده است (شکل ۱). این آزادراه دارای حدود ۲۶ کیلومتر تونل و سه کیلومتر پل دره‌ای است و برای ساخت این آزادراه بیش از ۱۰ میلیون متر مکعب عملیات کوه بری انجام شده است. این آزادراه دارای نزدیک



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد در استان لرستان

Fig. 1. Geographical location of the study area in Lorestan province



شکل ۲. برخی از زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در طول مسیر آزادراه خرم‌آباد-زال

Fig. 2. Some of the landslides occurred along the Khorramabad-Zal Highway

از جمله سازند گچساران و همچنین خردشدگی سنگ در اثر فرآیندهای تکتونیکی، دامنه‌ها بسیار مستعد ناپایداری می‌باشند. به‌گونه‌ای که تاکنون در نقاط مختلف این آزادراه بارها ریزش و ناپایداری علی‌الخصوص بعد از بارندگی‌های شدید اتفاق افتاده است که این امر منجر به خسارات جانی و مالی و بسته شدن آزاد راه گردیده است (شکل ۲). با توجه به موارد عنوان شده، ارزیابی خطر زمین‌لغزش در

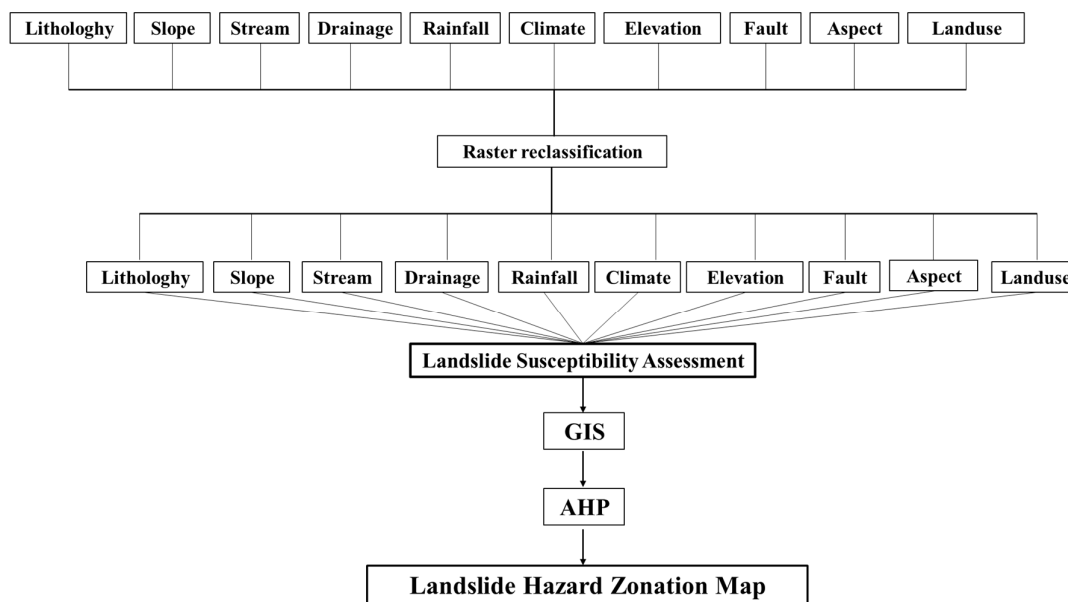
این منطقه از نظر موقعیت جغرافیایی جزء مناطق کوهستانی می‌باشد و در طول مسیر خود چین‌های متعددی را قطع کرده به‌دلیل اختلاف ارتفاع ۱۴۰۰ متری ابتدا و انتهای مسیر آزاد راه، و همچنین قطع شدن چین‌خوردگی‌ها، ترانشه‌های سنگی فراوانی در طول مسیر ایجاد شده است. به‌دلیل شیب زیاد ترانشه‌ها، حضور سازندهای بسیار حساس به رطوبت و مستعد زمین‌لغزش

را شناسایی کند. پس از ایجاد پایگاه داده پارامترهای انتخاب شده، ۱۰ شیپ فایل به فرمت رستری تبدیل شده و در فواصل مساوی به پنج کلاس طبقه‌بندی شدند. به هر طبقه یک شاخص رتبه‌بندی بر اساس تأثیر آن در رخداد زمین‌لغزش اختصاص داده شد. رتبه‌ها از ۱ "خیلی کم"، ۲ "کم"، ۳ "متوسط"، ۴ "بالا" و ۵ "خیلی بالا" متغیر است. سپس دو مدل ارزیابی مختلف برای تهیه نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ساخته شد. انتخاب فاکتور ورودی بر اساس قضاوت کارشناسی و مطابق با تأثیر آن بر زمین‌لغزش تعیین می‌شود (شکل ۳). در نهایت، روش‌های AHP و WLC در محیط GIS به منظور وزن‌دهی و ترکیب عوامل، محاسبه شاخص‌های خطر زمین‌لغزش و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به کار گرفته شد.

مسیر آزادراه ضروری به نظر می‌رسد. همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شد، روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی یا AHP به تهیه نقشه‌های خطر زمین‌لغزش در مسیر آزادراه خرم‌آباد - پل زال پرداخته شده است.

۳- روش انجام کار

همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، هدف از این مطالعه، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مسیر آزادراه خرم‌آباد-زال با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و روش ترکیب خطی-وزنی (WLC) می‌باشد. ایده این است که چندین عامل را با هم ترکیب کنیم تا نقشه‌ای تهیه شود که مستعدترین مناطق برای حرکت توده‌ای و زمین‌لغزش



شکل ۳. شماتیک روش اتخاذ شده در این پژوهش

Fig. 3. Schematic of the method utilized in this research

منطقه مورد مطالعه مجموعه‌ای از عوامل خاص خود را دارد که خطرات جابجایی جمعی را تعیین می‌کند. این عوامل در درجه اول بر اساس نظرات کارشناسان انتخاب می‌شوند (جبور و همکاران، ۲۰۱۴). در نتیجه و با توجه به ویژگی‌های کلی منطقه مورد مطالعه، ۱۰ پارامتر یا لایه انتخاب شده برای ارزیابی و انجام مطالعه حاضر شامل لیتولوژی یا سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، فاصله از زهکش‌ها، فاصله تا رودخانه، ارتفاع، فاصله از گسل، کاربری اراضی، بارندگی، و آب و هوا می‌باشند.

۴- نتایج

۴-۱- پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی یا AHP
اولین گام در مدل‌سازی خطرات حرکت توده‌ای و زمین‌لغزش‌ها، ساخت یک پایگاه داده فضایی حاوی عوامل شرطی‌سازی زمین‌لغزش است. با این حال، شناسایی این عوامل اغلب پیچیده است و به ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، زمین‌شناسی و زیست‌اقليمی منطقه مورد مطالعه بستگی دارد. ون وستن و همکاران (۲۰۰۳) بیان کردند که هر

کلاس ۶۰ تا ۷۵ درجه با کم‌تر از یک درصد است (شکل ۴-ب).

فاصله از زهکش: نزدیکی به شبکه زهکشی یک عامل بسیار مهم در کنترل وقوع زمین‌لغزش است. در واقع، شبکه‌های زهکشی می‌توانند بر پایداری شیب از طریق فرسایش خندقی یا اشباع مواد تأثیر منفی بگذارند (گوک سی اوغلو و آکسوی، ۱۹۹۶). این عامل هیدرولوژیکی اغلب در ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش توسط بسیاری از نویسندگان در نظر گرفته می‌شود (فیضی‌زاده و بلاشکه، ۲۰۱۳؛ بورتیت و همکاران، ۲۰۱۵؛ دمیر و همکاران، ۲۰۱۵؛ الجزولی و همکاران، ۲۰۱۹؛ هونگ و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهش حاضر، سیستم زهکشی از نقشه DEM با استفاده از ابزارهای هیدرولوژیکی موجود در ArcGis استخراج شده است. تراکم زهکشی بالاتر، میزان نفوذ را کاهش می‌دهد و باعث ایجاد رواناب سطحی با شدت بیشتری می‌شود. علاوه بر این، فعالیت‌های انسانی مانند ساخت و ساز جاده در نزدیکی مناطق با تراکم زهکشی بالا می‌تواند باعث افزایش رواناب و ایجاد ناپایداری شود. با توجه به اینکه هر چقدر فاصله از زهکش‌ها کم‌تر باشد امکان وقوع زمین‌لغزش بالاتر می‌رود و بالعکس، کم‌ترین امتیاز یعنی یک به کلاس ۵ که دارای بیش‌ترین فاصله (>200 متر) است تعلق گرفته است. این در حالی است که بیش‌ترین امتیاز یعنی ۵ به کلاس ۱ با کم‌ترین فاصله ($0-50$ متر) تعلق گرفته است (شکل ۴-پ).

فاصله از رودخانه: فاصله از رودخانه‌ها یکی از عوامل اصلی کنترل کننده زمین‌لغزش در منطقه است. این پارامتر در چندین ارزیابی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش گنجانده شده است که تأثیر مستقیم فاصله از نهرها و زهکشی‌ها را بر احتمال خطرات زمین‌لغزش نشان می‌دهد (سباتاکسیس و همکاران، ۲۰۱۳؛ ایفات و هگازی، ۲۰۱۴؛ سینگ و کومار، ۲۰۱۷؛ بانرجی و همکاران، ۲۰۱۸). نقشه فاصله تا رودخانه‌ها (شکل ۵-ت) با استفاده از روش فاصله اقلیدسی تهیه شد و به پنج کلاس ($0-100$ متر)، ($100-200$ متر) ($200-300$ متر)، 300 تا 400 متر بیش‌تر از 400 متر طبقه‌بندی شد (جدول ۱). نقشه فاصله از رودخانه در شکل ۴-ت نشان داده شده است.

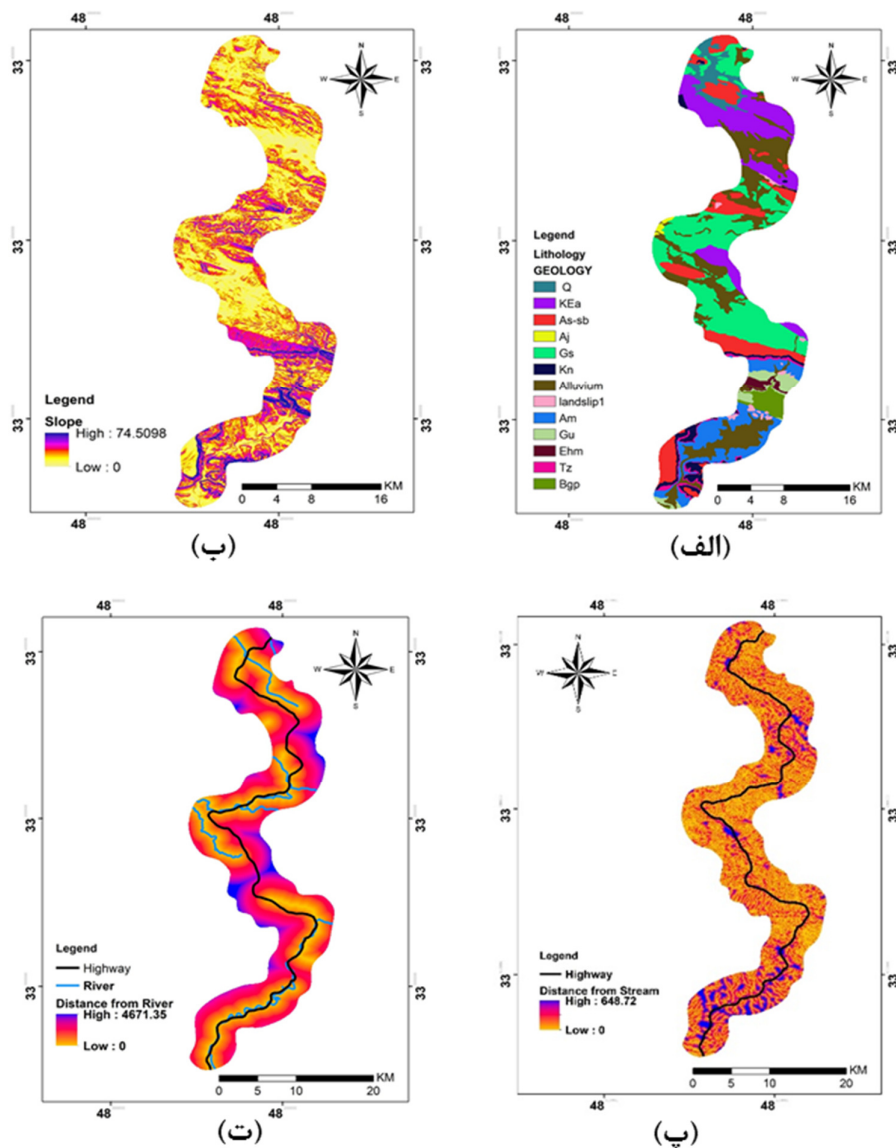
بارندگی: بارندگی اغلب به‌عنوان عامل اصلی محرک حرکات توده‌ای و زمین‌لغزش‌ها در نظر گرفته می‌شود. در

لیتولوژی یا سنگ‌شناسی: سنگ‌شناسی یک عامل اساسی در ارزیابی خطرات ناشی از وقوع زمین‌لغزش است، زیرا انواع سنگ‌های مختلف، مقاومت متفاوتی در برابر هوازدگی و فرسایش دارند. این تغییرات در تعیین نیروی برشی، نفوذپذیری و حساسیت به فرسایش حیاتی هستند و بر وقوع و نوع حرکت دامنه (لغزش و ریزش‌سنگ) تأثیر می‌گذارند. مطالعات متعددی عامل لیتولوژی را در ارزیابی زمین‌لغزش و ریزش سنگ در نظر گرفته‌اند. نقشه سنگ‌شناسی در این پژوهش از ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خرم‌آباد تهیه شده است و واحدهای سنگ‌شناسی مختلف را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد (شکل ۴-الف). به‌منظور تهیه نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و همچنین وزن‌دهی لایه‌های مختلف، منطقه مورد مطالعه از نظر سنگ‌شناسی به ۵ کلاس تقسیم‌بندی شده است که به‌ترتیب امتیاز ۱ برای کلاس با خطر زمین‌لغزش خیلی کم، کلاس دوم دارای پتانسیل زمین‌لغزش کم (امتیاز ۲)، کلاس سوم پتانسیل خطر زمین‌لغزش متوسط (امتیاز ۳)، کلاس چهارم دارای خطر زمین‌لغزش زیاد (امتیاز ۴) و در نهایت کلاس پنجم که بیش‌ترین پتانسیل زمین‌لغزش را دارد، امتیاز ۵ می‌گیرد. بر اساس مشاهدات صورت گرفته، کم‌ترین امتیاز (امتیاز ۱) برای رسوبات آبرفتی^۱ (Q) در نظر گرفته شد که بیانگر پتانسیل زمین‌لغزش خیلی کم است. در نهایت نیز برای کلاس‌های Az، Gs که نشان‌دهنده سازند گچساران و آغاچاری می‌باشند، امتیاز ۵ به‌معنای خطر و پتانسیل زمین‌لغزش خیلی زیاد در نظر گرفته شده است (جدول ۱). شیب: شیب به‌دلیل تأثیر آن بر نیروهای برشی به‌عنوان یک عامل محرک اصلی در نظر گرفته می‌شود (لی و مین، ۲۰۰۱). همچنین، یکی از پرکاربردترین عوامل در ارزیابی حساسیت حرکت توده ای است (شیرزادی و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۸؛ یوسف و همکاران، ۲۰۱۵؛ بورنان و همکاران، ۲۰۱۶؛ برچیچه و گوئیتوچه، ۲۰۱۸؛ گوئیتوچه، ۲۰۱۹). با توجه به نقشه شیب به‌دست آمده از یک نقشه DEM با وضوح $12/5$ متر (شکل ۴-ب)، منطقه مورد مطالعه دارای شیب‌هایی از صفر تا ۷۵ درجه است. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، کلاس صفر تا ۱۵، بیش‌ترین درصد را در منطقه با $59/13$ درصد به خود اختصاص داده است، در حالی که کم‌ترین مقدار مربوط به

^۱ Alluvium

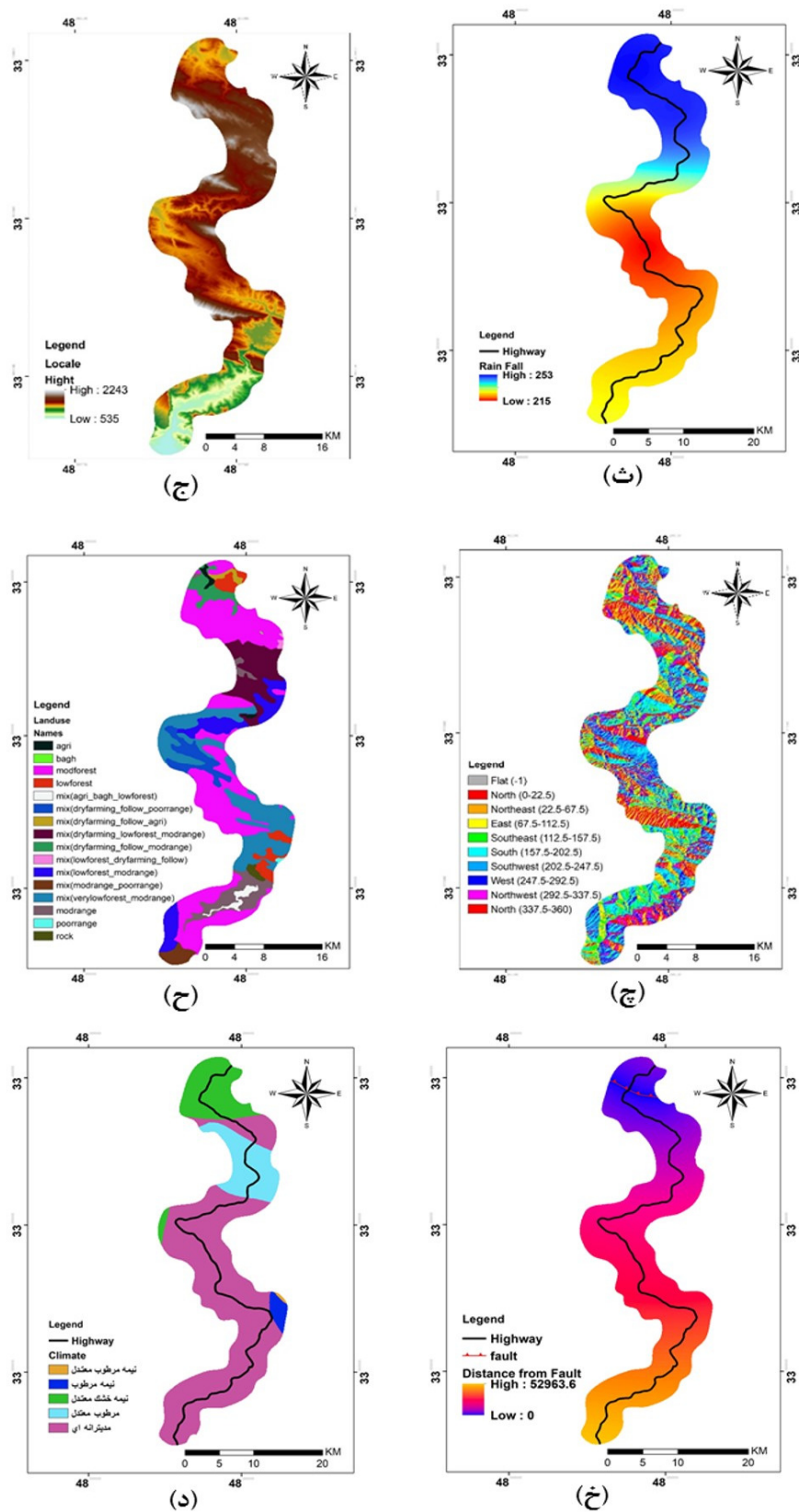
میانگین بارش سالانه پردازش شد. مقادیر بارندگی در منطقه مورد مطالعه از ۲۲۲ تا ۲۵۲ میلی‌متر متغیر است. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، میزان بارندگی در منطقه مورد نظر به ۵ کلاس (۰-۲۲۲) میلی-متر، (۲۲۲-۲۳۰) میلی‌متر، (۲۳۰-۲۳۸) میلی‌متر، (۲۳۸-۲۴۶) میلی‌متر، و (۲۴۶-۲۵۲) میلی‌متر تقسیم‌بندی شده است. بر این اساس، کم‌ترین امتیاز یعنی ۱ به کلاس اول و بالاترین امتیاز یعنی ۵ به کلاس پنجم (۲۳۸-۲۴۶) میلی‌متر) تعلق گرفته است. شکل ۴- ث نقشه میزان بارندگی برای منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد.

دوره‌های بارانی، درصد آب موجود در سنگ باعث کاهش چسبندگی دانه‌ها و افزایش فشار آب منفذی می‌شود که در نتیجه وزن و نیروهای گرانشی بیش‌تری بر شیب‌ها تأثیر می‌گذارد و باعث ناپایداری می‌شود. چندین مطالعه رابطه بین بارندگی و حرکات توده‌ای را مورد بررسی قرار داده‌اند (کانوتی و همکاران، ۱۹۸۵؛ دلونکا و ایلینکا، ۲۰۰۹؛ دلونکا و همکاران، ۲۰۱۴؛ چن و همکاران، ۲۰۱۷؛ اندرسون و همکاران، ۲۰۱۷؛ دو و همکاران، ۲۰۱۹). بر این اساس، داده‌های بارندگی از ایستگاه هواشناسی در نزدیکی منطقه مورد مطالعه بر روی نرم‌افزار ArcGis™ با استفاده از ابزار درون‌یابی با فاصله معکوس (IDW) برای تولید یک نقشه



شکل ۴. نقشه لایه‌های مورد استفاده در این مطالعه

Fig. 4. Map of layers used in this study



ادامه شکل ۴. نقشه لایه‌های مورد استفاده در این مطالعه
 Fig. 4. Map of layers used in this study

جدول ۱. لایه‌های مورد استفاده، کلاس، سطح، رتبه و توصیف آن‌ها
 Table 1. Layers used, their class, area, rank and description

توصیف	رتبه یا امتیاز	سطح (درصد)	سطح (متر مربع)	کلاس	نام لایه یا پارامتر
خیلی کم	۱	۳/۹۹	۲۷۲۹	Q	لیتولوژی یا سنگ‌شناسی
زیاد	۳	۱۵/۴۲	۱۰۵۳۵	KEa	
کم	۲	۱۳/۳۰	۹۰۹۰	As-sb	
خیلی زیاد	۵	۰/۳۳	۲۲۷	Aj	
خیلی زیاد	۵	۲۵/۳۶	۱۷۳۲۳	Gs	
متوسط	۳	۳/۲۴	۲۲۱۸	Kn	
خیلی کم	۱	۲۱/۸۰	۱۴۸۹۷	Alluvium	
متوسط	۳	۸/۹۲	۶۰۹۸	Am	
زیاد	۴	۲/۵۷	۱۷۵۷	Gu	
متوسط	۳	۰/۹۸	۶۷۳	Ehm	
کم	۲	۱/۶۷	۱۱۴۱	Tz	
کم	۲	۲/۳۶	۱۶۱۸	Bgp	
خیلی کم	۱	۵۹/۱۳	۲۹۹۶۱۳	۱۵-صفر	
کم	۲	۳۴/۵۳	۱۷۴۹۶۱	۱۵-۳۰	
متوسط	۳	۴/۸۹	۲۴۷۸۰	۳۰-۴۵	
زیاد	۴	۱/۱۹	۶۰۴۸	۴۵-۶۰	
خیلی زیاد	۵	۰/۲۴	۱۲۶۰	۶۰-۷۵	
خیلی کم	۱	۰/۰۸	۸۴	> ۲۰۰	فاصله از زهکش (متر)
کم	۲	۰/۵۰	۴۸۷	۱۵۰ - ۲۰۰	
متوسط	۳	۳/۰۵	۲۹۶۷	۱۰۰ - ۱۵۰	
زیاد	۴	۱۶/۹۲	۱۶۴۳۲	۵۰-۱۰۰	
خیلی زیاد	۵	۷۹/۴۲	۷۷۱۱۱	۵۰-صفر	
خیلی کم	۱	۳۷/۸۲	۳۶۷۲۴	> ۴۰۰	فاصله از رودخانه
کم	۲	۳۲/۹۹	۳۲۰۳۰	۳۰۰-۴۰۰	
متوسط	۳	۱۹/۷۵	۱۹۱۷۵	۲۰۰-۳۰۰	
زیاد	۴	۸/۷۰	۸۴۴۹	۱۰۰-۲۰۰	
خیلی زیاد	۵	۰/۷۲	۷۰۳	۰-۱۰۰	
خیلی کم	۱	۳۰/۱۴	۲۹۲۶۵	۰-۲۲۲	بارندگی (میلی‌متر)
کم	۲	۲۹/۴۸	۲۸۶۲۱	۲۲۲-۲۳۰	
متوسط	۳	۵/۹۶	۵۷۹۲	۲۳۰-۲۳۸	
زیاد	۴	۵/۶۳	۵۴۷۲	۲۳۸-۲۴۶	
خیلی زیاد	۵	۲۸/۷۷	۲۷۹۳۱	۲۴۶-۲۵۴	
خیلی کم	۱	۸/۶۴	۴۲۵۱۵	۰-۵۰۰	ارتفاع (متر)
کم	۲	۹/۹۴	۴۸۸۸۳	۵۰۰-۱۰۰۰	
متوسط	۳	۵۱/۰۱	۲۵۰۸۷۹	۱۰۰۰-۱۵۰۰	
زیاد	۴	۲۷/۹۲	۱۳۷۲۹۳	۱۵۰۰-۲۰۰۰	
خیلی زیاد	۵	۲/۴۷	۱۲۱۶۳	> ۲۰۰۰	
خیلی کم	۱	۱۶/۶۹	۸۴۶۱۲	Flat	جهت شیب
کم	۲	۱۱/۰۳	۵۵۹۱۷	North	
کم	۲	۱۰/۵۱	۵۳۲۵۹	Northwest	
متوسط	۳	۷/۵۳	۳۸۱۸۴	Northeast	
زیاد	۴	۹/۱۳	۴۶۲۹۷	East	
زیاد	۴	۸/۶۱	۴۳۶۲۵	Southwest	
خیلی زیاد	۵	۱۵/۰۹	۷۶۴۶۴	Southeast	
خیلی زیاد	۵	۱۴/۱۵	۷۱۷۱۸	South	
خیلی کم	۱	۴۲/۷۲	۲۹۱۸۴	پوشش جنگلی	

کاربری اراضی	جنگل + باغ	۳۳۸۷۴	۴۹/۵۹	۲	کم
	جنگل + باغ + کشاورزی	۲۸۲۵	۴/۱۳	۳	متوسط
	کشاورزی و بعضاً باغ	۲۰۰۰	۲/۹۲	۴	زیاد
	پوشش سنگی	۴۲۳	۰/۶۲	۵	خیلی زیاد
فاصله از گسل (متر)	> ۸۰۰۰	۲۵۳۵۰	۲۶/۱۱	۱	خیلی کم
	۶۰۰۰-۸۰۰۰	۲۰۱۵۶	۲۰/۷۶	۲	کم
	۴۰۰۰-۶۰۰۰	۱۹۹۸۸	۲۰/۵۸	۳	متوسط
	۲۰۰۰-۴۰۰۰	۱۵۷۹۱	۱۶/۲۶	۴	زیاد
	۰-۲۰۰۰	۱۵۷۹۶	۱۶/۲۷	۵	خیلی زیاد
آب و هوا	مدیرانه‌ای	۴۷۲۰۶	۶۹/۱۴	۱	خیلی کم
	مرطوب معتدل	۹۱۸۸	۱۳/۴۵	۲	کم
	نیمه مرطوب معتدل	۱۱۷	۰/۱۷	۳	متوسط
	نیمه مرطوب	۱۴۳۹	۲/۱۰	۴	زیاد
	نیمه خشک	۱۰۳۱۹	۱۵/۱۱	۵	خیلی زیاد

غرب گرم‌تر از شیب رو به شرق است (سینگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ برا و همکاران، ۲۰۱۹). نقشه جهت شیب منطقه مورد مطالعه از ASTER DEM استخراج شده است. جهت‌های شیب کل حوضه به ده دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از: مسطح (۱-)، شمال (۵/۲۲-۰)، شمال شرقی (۵۰/۶۷-۵۰/۲۲)، شرق (۵۰/۶۷-۱۱۲/۵۰)، جنوب شرقی (۵۰/۱۵۷-۱۱۲/۵۰)، جنوب (۵۰/۲۰۲-۵۰/۱۵۷)، غرب (۵۰/۲۴۷-۲۰۲/۵۰) غربی (۵۰/۲۹۲-۵۰/۲۴۷)، شمال غربی (۵۰/۳۳۷-۲۹۲/۵۰) و شمال (۳۳۷/۵۰-۳۶۰). نقشه جهت شیب (شکل ۴-ج) منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که شیب رو به غرب به جنوب غربی در امتداد کرانه چپ جریان اصلی غالب است و درصد بالایی از شیب‌های شمال به شمال شرقی در امتداد ساحل راست آن غالب است.

کاربری اراضی: کاربری یا پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه، پارامتر مهمی در کنترل زمین‌لغزش‌ها محسوب می‌گردد. فرآیندهای فیزیکی پیچیده‌ای که روی سطح زمین عمل می‌کنند را می‌توان از الگوی کاربری زمین تعیین کرد (دای و لی، ۲۰۰۲). پنج دسته برجسته کاربری/پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد (شکل ۴-ح). پوشش جنگلی، پوشش جنگلی و باغی، پوشش جنگلی، باغی و زمین کشاورزی، زمین کشاورزی و باغی، زمین‌های صخره‌ای بایر و سکونت‌گاه در منطقه مورد مطالعه شناسایی شده است. منطقه مورد مطالعه با توجه به کوهستانی بودن، عمدتاً دارای پوشش جنگلی است. در برخی نقاط نیز مناطق مسکونی قرار دارد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، منطقه مورد نظر از لحاظ

ارتفاع: ارتفاع زمین عامل مهمی برای شناسایی مناطق مستعد زمین‌لغزش است. در این پژوهش، به‌منظور پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، منطقه مورد مطالعه از نظر ارتفاع به ۵ دسته یا کلاس تقسیم‌بندی شده است که عبارتند از: ارتفاع بسیار کم (صفر تا ۵۰ متر)، ارتفاع کم (۵۰ تا ۱۰۰۰ متر)، ارتفاع متوسط (۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر)، ارتفاع زیاد (۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر) و نقش ارتفاع بسیار زیاد (بیش تر از ۲۰۰۰ متر). لازم به ذکر است که مناطق ارتفاعی بیش از ۱۴۰۰ متر به دلیل وجود قطعات، آوار و غیره به شدت مستعد خطر زمین‌لغزش است. بر اساس نتایج، بیش‌ترین ارتفاع در منطقه مربوط به کلاس متوسط یا ارتفاع بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر است که ۵۱ درصد منطقه مورد مطالعه را به خودش اختصاص داده است. نتایج تقسیم‌بندی منطقه از نظر ارتفاع در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین شکل ۴-ج نیز نقشه تقسیمات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جهت شیب: جهت شیب یکی از پارامترهای مهم در تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش است. قرار گرفتن در معرض تابش نور خورشید، بارندگی و ناپیوستگی‌ها که پارامترهای مرتبط با جهت شیب هستند، ممکن است وقوع زمین‌لغزش‌ها را کنترل کنند. جهت شیب به‌صورت مسطح، شمالی، شرقی، جنوبی و غربی طبقه‌بندی می‌شود. نقشه جهت شیب به‌طور کلی به جهتی که یک دامنه کوه رو به آن قرار دارد، اشاره می‌کند. نقشه جهت شیب پارامتر بسیار مهمی برای درک تأثیر خورشید بر اقلیم محلی منطقه است. به‌طور کلی شیب رو به غرب، گرم‌ترین زمان روز را در بعدظهر نشان می‌دهد، و در بیش‌تر موارد، شیب رو به

(۱۹۸۰)، برای تخمین وزن نسبی هر عامل استفاده شد. روش AHP یک روش نیمه کمی رایج است که به طور گسترده در ارزیابی زمین‌لغزش‌ها برای وزن‌دهی به پارامترهای انتخاب شده، استفاده می‌شود. در این روش ابتدا با استفاده از یک مقیاس پیوسته از ۱ تا ۹، عوامل اولویت‌بندی شده و به صورت زوجی و با توجه به اهمیت آن‌ها مقایسه شدند (جدول ۲). سپس، یک ماتریس مقایسه زوجی برای هر ارزیابی به منظور محاسبه وزن‌ها در AHP ساخته شد. توجه به این نکته مهم است که هر دو روش AHP و WLC مستلزم این هستند که جمع همه وزن‌ها برابر با ۱ باشد. پس از ارزیابی و مقایسه زوجی، سازگاری رویکرد در هر دو ارزیابی با محاسبه نسبت سازگاری (CR) که به صورت زیر بیان می‌شود تأیید شد:

$$CR = CI/IR$$

جایی که RI میانگین شاخص همبستگی بر اساس تعداد سطرهای ماتریس معرفی شده توسط ساعتی (۱۹۸۰) می‌باشد. CI هم شاخص همبستگی است که با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (1 - n)$$

λ_{\max} جایی که بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس است که به راحتی از طریق ماتریس قابل محاسبه می‌باشد. n هم تعداد سطرهای ماتریس است.

طبق نظر ساعتی (۱۹۸۰)، اگر مقدار CR کمتر از ۰/۱ باشد، سازگاری ماتریس قابل قبول است. رتبه و وزن عوامل شرطی با توجه به اهمیت آن‌ها در هر ارزیابی با استفاده از روش AHP تعریف و محاسبه شد (جدول‌های ۲ و ۳). در مورد حاضر، مقادیر CR برای ارزیابی‌های زمین‌لغزش ۰/۰۵۱ است، که سازگاری کافی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، ۱۰ پارامتر مورد استفاده برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی وزن‌دهی شده‌اند که به ترتیب لایه‌های سنگ‌شناسی با وزن ۰/۲۴۶، شیب با وزن ۰/۱۹۸، ارتفاع با وزن ۰/۱۵۹، بارندگی با وزن ۰/۱۲۴، کاربری اراضی با وزن ۰/۰۹۳، تراکم زهکشی با وزن ۰/۰۷۰، جهت شیب با وزن ۰/۰۵۳، آب و هوا با وزن ۰/۰۲۶، فاصله از رودخانه با وزن ۰/۰۱۷، و فاصله از گسل با وزن ۰/۰۱۳ می‌باشند. همچنین با توجه به اینکه ضریب سازگاری ماتریس کمتر از ۰/۱ (۰/۰۵۱) می‌باشد، ضریب سازگاری ماتریس در این کار قابل قبول است.

پوشش گیاهی و یا کاربری اراضی به ۵ کلاس، جنگلی (امتیاز ۱)، جنگلی-باغی (امتیاز ۲)، جنگلی-باغی-کشاورزی (امتیاز ۳)، کشاورزی و بعضاً باغی (امتیاز ۴)، و پوشش سنگی (امتیاز ۵) تقسیم‌بندی شده است.

فاصله از گسل: فاصله از گسل یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر وقوع زمین‌لغزش‌ها می‌باشد. نتایج مطالعات حاکی از این است که هرچه قدر فاصله منطقه مورد نظر با گسل کمتر می‌شود، تراکم زمین‌لغزش‌ها در آن نقطه افزایش یافته است. بر همین اساس با توجه به اینکه در منطقه مورد نظر فقط یک گسل اصلی وجود داشت، از نظر فاصله با گسل به ۵ کلاس مختلف تقسیم‌بندی شد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، کلاس اول که بالاترین امتیاز یعنی ۵ به معنای بالاترین خطر زمین‌لغزش را دارد، فواصل بین صفر تا ۲۰۰۰ متر را در بر می‌گیرد. بر اساس نتایج، این کلاس حدود ۱۶ درصد از منطقه را به خود اختصاص داده است. شکل ۴-خ نقشه فاصله از گسل برای منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

آب و هوا: شرایط آب و هوایی یک منطقه نیز از عواملی است که می‌تواند بر روی وقوع زمین‌لغزش‌ها مؤثر باشد. به عبارتی، مناطقی که از آب و هوای خشک و نیمه‌خشک برخوردارند، طبیعتاً از پوشش گیاهی کم‌تری نیز برخوردارند و همین موضوع باعث افزایش میزان هوازدگی و فرسایش و در نهایت افزایش احتمال وقوع زمین‌لغزش می‌شود. بر عکس، مناطقی که از آب و هوای معتدل و مرطوب برخوردار هستند، پوشش گیاهی بیش‌تری دارند و ضخامت خاک نیز بیش‌تر است که همین موضوع می‌تواند دلیلی برای کم‌تر شدن وقوع زمین‌لغزش‌ها در منطقه باشد. بر این اساس و مطابق با جدول ۱، منطقه مورد نظر از لحاظ شرایط آب و هوایی به ۵ کلاس مدیترانه‌ای (رتبه ۱)، مرطوب معتدل (رتبه ۲)، نیمه‌مرطوب معتدل (رتبه ۳)، نیمه‌مرطوب (رتبه ۴)، نیمه‌خشک معتدل (رتبه ۵) تقسیم‌بندی شده است. همچنین شکل ۴-د نیز نقشه تقسیم‌بندی منطقه مورد مطالعه از نظر شرایط آب و هوایی را نشان می‌دهد.

۵- بحث

تأثیر عوامل انتخاب شده در این مطالعه باید در رخدادهای نوع حرکت توده‌های وزن‌دهی شود. در این پژوهش، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، توسعه یافته توسط ساعتی

جدول ۲. مقایسه زوجی در تحلیل سلسله مراتبی یا AHP

Table 2. Pairwise comparison in the analytic hierarchy process (AHP)

مقیاس	تعاریف
۱	اهمیت مساوی
۳	کمی مهم‌تر
۵	مهم‌تر
۷	خیلی مهم‌تر
۹	کاملاً مهم‌تر
۰.۲، ۰.۴، ۰.۶، ۰.۸	ارزش بینابین

جدول ۳. ماتریس مقایسه زوجی و وزن‌های محاسبه شده برای پارامترهای استفاده شده

Table 3. Pairwise comparison matrix and calculated weights for the used parameters

Factors	LI	SL	EL	RF	RO	LA	DD	AS	CL	RI	Weights
Lithology (LI)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9	0.246
Slope (SL)	1.2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0.198
Elevation (EL)	1.3	1.2	1	2	3	4	5	6	7	8	0.159
Rain Fall (RF)	1.4	1.3	1.2	1	2	3	4	5	6	7	0.124
Landuse (LA)	1.5	1.4	1.3	1.2	1	2	3	4	5	6	0.093
Drainage density (DD)	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1	2	3	4	5	0.070
Aspect (AS)	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1	2	3	4	0.053
Climate (CL)	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1	2	3	0.026
Distance to River (RI)	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1	2	0.017
Distance to Fault (FL)	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1	0.013

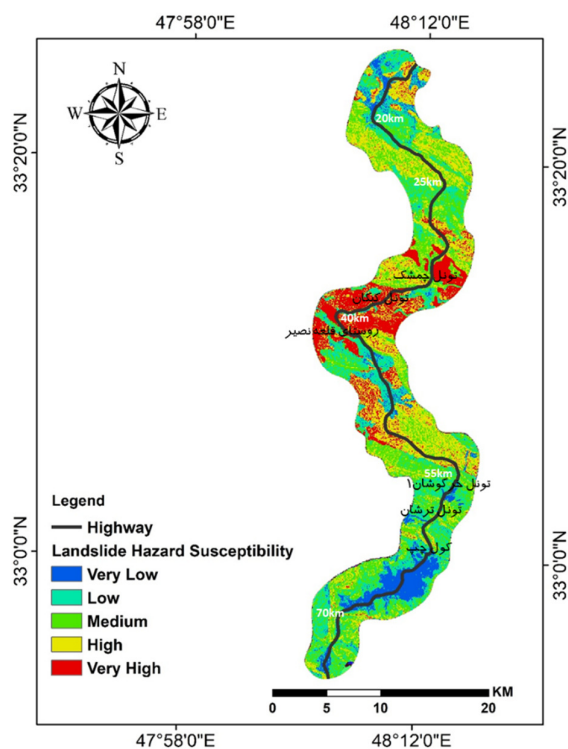
$$\lambda_{\max} = 10.5243, CR = 0.051$$

است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، مشخص شد که ۲۲/۰۵ درصد منطقه دارای پتانسیل لغزش خیلی کم، ۸/۷۳ درصد کم، ۱۳/۹۰ درصد متوسط، ۲۵/۹۵ درصد پتانسیل لغزش بالا و ۲۹/۳۵ درصد پتانسیل لغزش خیلی زیاد دارد. بر این اساس، در مجموع بیش از ۵۴ درصد منطقه مورد مطالعه از خطر زمین‌لغزش زیاد و خیلی زیادی برخوردار می‌باشد که بخودی خود درصد بالایی می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز عنوان شد، شرایط پیچیده زمین‌شناسی به‌خصوص وجود سازندهای عمدتاً حساس از نظر لیتولوژی مثل سازند گچساران، آغاچاری، گورپی و آسماری شهبازان که به‌راحتی در حضور آب دچار هوازگی می‌شوند، عامل اصلی پتانسیل بالای منطقه از نظر وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. به‌منظور بررسی میزان صحت و درستی نقشه نهایی تهیه شده برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، تعدادی از زمین‌لغزش‌هایی که قبلاً اتفاق افتاده اند مورد بررسی قرار گرفت. به عبارت دیگر موقعیت زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در منطقه مورد مطالعه بررسی شد با این هدف که بررسی شود این زمین‌لغزش‌ها در مناطق با خطر زمین‌لغزش بالا و خیلی بالا اتفاق افتاده اند یا نه؟ به همین دلیل همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش فقط برای مناطق با خطر بالا و خیلی بالا تفکیک شد و در شکل ۸ موقعیت

در ادامه فرآیند تصمیم‌سازی که در نمودار شکل ۳ نشان داده شد، یک رویکرد تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDA) برای ارزیابی خطر زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی انتخاب شده در بخش ابتدایی آزادراه خرم‌آباد- زال اتخاذ شد. به‌منظور این ارزیابی، داده‌های مختلف از منابع مختلف در محیط GIS پردازش شد. ده لایه موثر بر وقوع زمین‌لغزش انتخاب، رتبه‌بندی و براساس تأثیر آن‌ها مدل‌های ارزیابی زمین‌لغزش به پنج کلاس طبقه‌بندی شدند. دو روش رایج و محبوب GISMCDA، یعنی AHP و WLC برای وزن دادن به تأثیر و ترکیب عوامل انتخاب شده در هر مدل، بر اساس مشاهدات میدانی و ارزیابی کیفی ناپایداری‌های قبلی استفاده شد. شاخص‌های حاصل برای تهیه نقشه‌های خطر زمین‌لغزش منطقه مورد مطالعه استفاده شد. شکل ۵ نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در بخش ابتدایی مسیر آزادراه خرم‌آباد-پل‌زال را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل و جدول ۴ نشان داده شده است، منطقه مورد مطالعه از نظر پتانسیل خطر زمین‌لغزش به ۵ کلاس خیلی کم، کم، متوسط، بالا و خیلی بالا تقسیم‌بندی شده است. ملاحظه می‌گردد که بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه از پتانسیل لغزشی زیاد و خیلی زیادی برخوردار است. نتایج به تفکیک کلاس‌های مختلف در جدول ۴ و شکل ۶ نشان داده شده

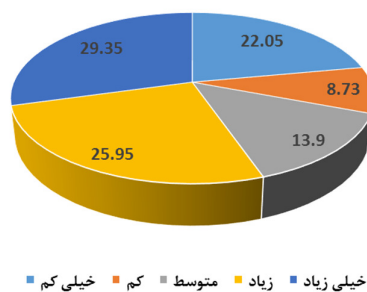
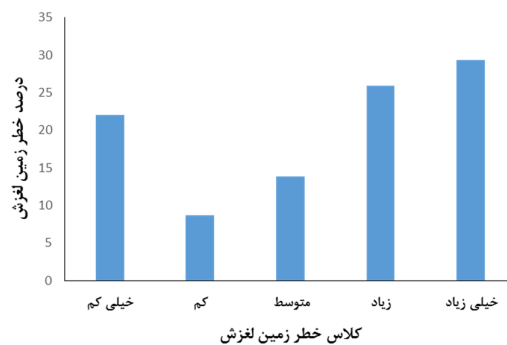
خیلی بالای زمین‌لغزش اتفاق افتاده است که این موضوع نشان‌دهنده دقت بالای نقشه تهیه شده در این مطالعه است.

چندین زمین‌لغزش اتفاق افتاده بر روی آن مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در این شکل نیز نشان داده شده است، تعدادی از زمین‌لغزش‌ها در مناطق با خطر بالا و



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه

Fig. 5. The landslide hazard zonation map in the study area



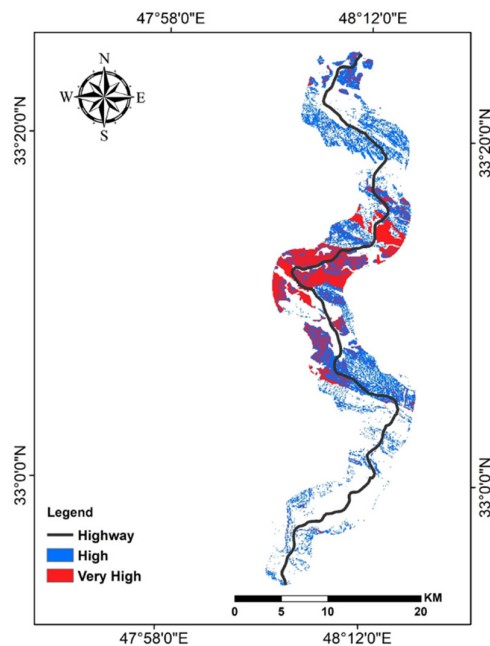
شکل ۶. نمودار خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد نظر به تفکیک کلاس‌های مختلف

Fig. 6. Diagram of the landslide hazard in the study area by different classes

جدول ۴. کلاس‌های مختلف خطر زمین‌لغزش و مساحت مربوط به هر کدام

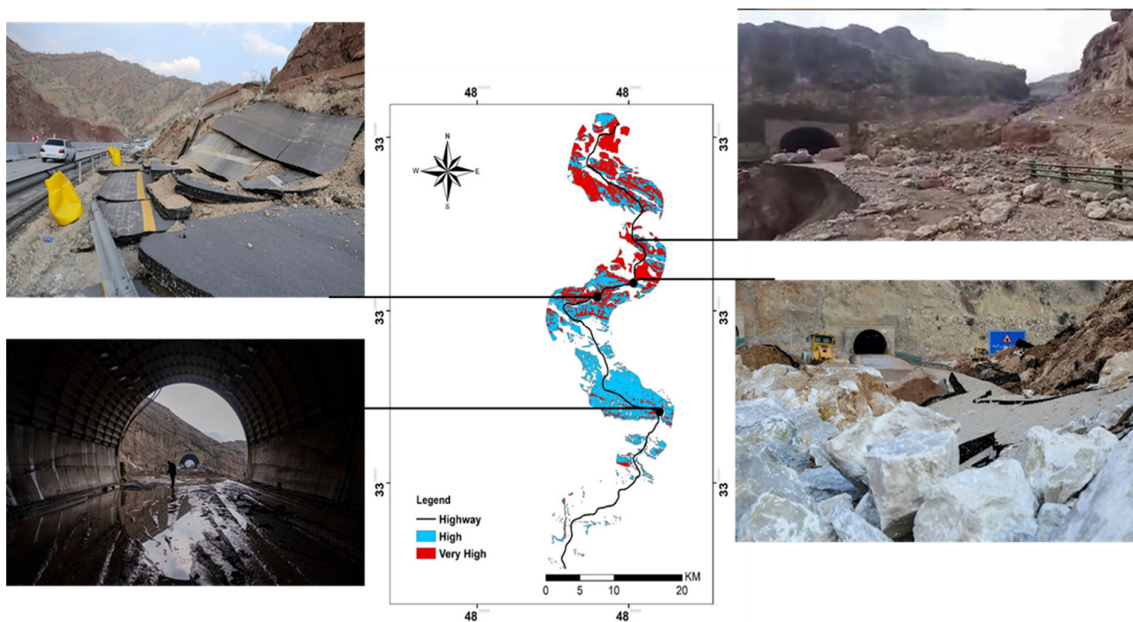
Table 4. Different landslide hazard classes and the area corresponding to each one

کلاس	مساحت (کیلومتر مربع)	سطح در برگیرنده (درصد)
خیلی کم	۲۰/۸۸	۲۲/۰۵
کم	۸/۲۷	۸/۷۳
متوسط	۱۳/۱۷	۱۳/۹۰
زیاد	۲۴/۵۸	۲۵/۹۵
خیلی زیاد	۲۷/۸۰	۲۹/۳۵



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش برای مناطق با خطر زیاد و خیلی زیاد

Fig. 7. Landslide hazard zonation map for high and very high risk areas



شکل ۸. موقعیت برخی از زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در مناطق با پتانسیل بالا و خیلی بالای زمین‌لغزش

Fig. 8. Location of some landslides occurred in areas with high and very high landslide potential

۶- نتیجه‌گیری

این مطالعه به ارزیابی خطر زمین‌لغزش در مسیر آزادراه خرم‌آباد- زال در حد فاصل کیلومتر ۱۵ تا ۷۵ از سمت خرم‌آباد پرداخته است. به‌همین منظور با استفاده روش تحلیل سلسله مراتبی یا AHP فاکتورهای موثر بر زمین لغزش وزن‌دهی شدند و در نهایت با ترکیب و همپوشانی لایه‌ها، نقشه نهایی خطر وقوع زمین‌لغزش تهیه شد. در ادامه مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش خلاصه شده است:

۱- بر اساس مشاهدات صحرایی صورت گرفته و اطلاعات موجود و قضاوت کارشناسی، ۱۰ عامل شامل سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، کاربری اراضی، آب و هوا، ارتفاع، فاصله از رودخانه، فاصله از نهر، و میزان بارندگی به عنوان عوامل تأثیرگذار و کنترل کننده زمین‌لغزش شناسایی و در نظر گرفته شد.

۲- بر اساس مشاهدات و مطالعات انجام شده می‌توان گفت لیتولوژی مهم‌ترین عامل بر وقوع زمین‌لغزش‌ها در طول مسیر آزادراه می‌باشد. حضور لایه‌های ژیبسی و انیدریتی، مارنی، شیلی، ماسه‌سنگ و آهکی که عمدتاً به صورت بین لایه‌ای هستند، باعث شده است که در اثر حضور آب و تغییرات دمایی محیط، سنگ‌های ضعیف‌تر دچار هوازدگی شده و احتمال وقوع زمین‌لغزش افزایش یابد. بر این اساس، حضور آب ناشی از بارندگی علاوه بر افزایش وزن دامنه، باعث کاهش مقاومت سنگ و خاک شده و در نتیجه پتانسیل زمین‌لغزش بالا می‌رود. بارندگی می‌تواند باعث انحلال سنگ‌های گچی سازند گچساران شده و در نتیجه هوازدگی و تخریب آن‌ها و در نهایت زمین‌لغزش شود. علاوه بر این، حضور کانی‌های رسی در مارن‌ها و شیل‌ها نیز در اثر بارندگی تحت تأثیر قرار می‌گیرد و اصطلاحاً دچار پدیده شکستگی می‌شوند. لایه‌های مارن در اثر بارندگی دچار کاهش مقاومت برشی می‌شوند و احتمال لغزش در آن‌ها افزایش می‌یابد. حضور این سازندها و خاک‌های حاصل از هوازدگی در زمان بارندگی شرایط مساعدی را برای ایجاد زمین‌لغزش‌های دورانی و جریان‌ی فراهم می‌کند. حضور سنگ‌های آهکی انحلال‌پذیر نیز می‌تواند در اثر بارندگی تحت تأثیر قرار گرفته و احتمال وقوع زمین‌لغزش را با توجه به اینکه عمدتاً به‌صورت بین لایه‌ای با لایه‌های مارنی و گچی قرار دارند، افزایش دهد. حضور و نفوذ آب در سیستم‌های درز و شکستگی سنگ‌های آهکی و یخ-زدگی آن‌ها در طول فصل سرد می‌تواند باعث اعمال

زمین‌شناسی مهندسی مسیر آزادراه خرم‌آباد-زال

تنوع سنگ‌شناسی و ساختاری منطقه با توجه به ویژگی‌های خاص سنگ‌های رسوبی مسیر آزادراه و شرایط محیطی متنوع و لرزه‌خیزی بالای منطقه باعث شده است تا نقاط بحرانی متعددی در طول مسیر آزادراه ایجاد گردد. اختلاف شدید تغییر دمای هوا و میزان رطوبت در فصول گرم و سرد در این منطقه عامل اصلی هوازدگی (شیمیایی و فیزیکی) رسوبات و سنگ‌های منطقه می‌باشد. جریان آب زیرزمینی از زیر مسیر آزادراه در بسیاری از نقاط سبب انحلال سنگ گچ شده و در دراز مدت باعث ایجاد حفره‌های زیرزمینی در طول مسیر می‌شود. در برخی از نقاط آزادراه، سطح آب زیرزمینی بالا بوده و می‌تواند عامل اصلی ناپایداری شیب‌ها شود. علاوه بر این، منطقه مورد مطالعه از نظر تکتونیکی فعال محسوب می‌شود و بر اساس آیین-نامه ۲۸۰۰، دارای لرزه‌خیزی با خطر نسبی بالا می‌باشد. وجود ساختارهایی مانند گسل‌ها اهمیت مطالعه لرزه‌خیزی را افزایش می‌دهد. بر اساس مطالعات انجام شده اکثر گسل‌های منطقه از نوع راندگی و معکوس می‌باشد که نشان‌دهنده فشاری بودن منطقه از لحاظ تکتونیکی است. بیش‌ترین تراکم گسل‌ها محلی در ابتدای مسیر آزاد راه می‌باشد که باعث تقاطعی زیاد در یک محدوده کوچک شده است، بنابراین خطر ناپایداری شیب را افزایش می‌دهد. همان‌طور که قبلاً نیز عنوان شد عامل اصلی پتانسیل بالای زمین‌لغزش در طول مسیر آزادراه حضور سازندهای با لیتولوژی حساس به فرسایش و هوازدگی می‌باشد. به عبارت دیگر، سنگ‌های گچی، مارنی، و شیلی با توجه به اینکه به آسانی در اثر حضور آب دچار هوازدگی می‌شوند، باعث افزایش پتانسیل خطر زمین‌لغزش می‌شوند. علاوه بر این، لیتولوژی‌های مقاوم‌تر در مقابل هوازدگی از قبیل سنگ‌آهک و ماسه‌سنگ به دلیل اینکه به صورت بین لایه‌ای با مارن و گچ قرار گرفته‌اند، در اثر هوازدگی لایه‌های زیرین و ضعیف‌تر، احتمال ناپایداری در آن‌ها نیز بسیار بالا می‌باشد. همچنین وجود کانی‌های رسی مانند ایلیت سبب کاهش مقاومت برشی مارن‌ها و ناپایداری لایه‌های مارنی می‌شود. علاوه بر این، افزایش شیب شیروانی‌های حاشیه بزرگراه تا ۷۰ درجه نیز عاملی برای افزایش پتانسیل لغزش در طول مسیر می‌باشد.

- geology Journal, 15 (2): 91-112 (In Persian).
- Baharvand, S., Soori, S (2015) Landslide hazard zonation using artificial neural network (Case study: Sepiddasht-Lorestan, Iran). *RS & GIS for Natural Resources*, 6 (4): 15-31 (In Persian).
- Banerjee, P., Ghose, M. K., Pradhan, R (2018) Analytic hierarchy process and information value method-based landslide susceptibility mapping and vehicle vulnerability assessment along a highway in Sikkim Himalaya. *Arab J Geosci*, 11(7).
- Bera, A., Mukhopadhyay, B. P., Das, D (2019) Landslide hazard zonation mapping using multi-criteria analysis with the help of GIS techniques: a case study from Eastern Himalayas, Namchi, South Sikkim. *Nat Hazards*, 96(2): 935-959. doi.org/10.1007/s11069-019-03580-w.
- Berchiche, & Guettouche (2018) Integration of an MCA-GIS approach for the modelling and assessment of mass movement risk. case of Aïn El Hammam, Basin of Tizi-Ouzou (Algeria). *Annals of the University of Oradea, Geography Series/Analele Universitatii Din Oradea, Seria Geografie*, 28 (2).
- Bourenane, H., Bouhadad, Y., Guettouche, M. S., Braham, M (2015) GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria). *Bull Eng Geol Environ*, 74(2):337-355. doi.org/10.1007/s10064-014-0616-6
- Bourenane, H., Guettouche, MS., Bouhadad, Y., Braham, M (2016) Landslide hazard mapping in the Constantine city, Northeast Algeria using frequency ratio, weighting factor, logistic regression, weights of evidence, and analytical hierarchy process methods. *Arab J Geosci*, 9 (2): 1-24
- Canuti, P., Focardi, P., Garzonio, C. A (1985) Correlation between rainfall and landslides. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin del Association Internationale de Geologie de l'Ingénieur*, 32(1):49-54. doi.org/10.1007/BF02594765.
- Chen, W., Xie, X., Peng, J., Wang, J., Duan, Z. & Hong, H (2017) GIS-based landslide susceptibility modelling: a comparative assessment of kernel logistic regression, Naïve-Bayes tree, and alternating decision tree models. *Geomatics. Natural Hazards and Risk*, 1-24. doi/full/10.1080/19475705.2017.1289250.
- Chen, X. Q., Cui, P., Yong, Li., Wan, Y. Z (2013) Emergency response to the Tangjiashan landslide-dammed lake resulting from the 2008 Wenchuan Earthquake, China. *Landslides*, 8:91-98. doi.org/10.1007/s10346-010-0236-6
- Dai, F. C., Lee, C. F., Ngai, Y. Y (2002) Landslide risk assessment and management: an overview. *Eng Geol* 64: 65-87.
- Delonca, A., Gunzburger, Y., Verdel, T (2014) فشارهای درونی به ساختار سنگ شده که در نهایت تخریب توده‌سنگ و افزایش احتمال وقوع زمین‌لغزش را در پی خواهد داشت.
- ۳- ۱۰ لایه مورد نظر برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی وزن‌دهی شدند که به ترتیب لایه سنگ‌شناسی با وزن ۰/۲۴۶، شیب با وزن ۰/۱۹۸، ارتفاع با وزن ۰/۱۵۹، بارندگی با وزن ۰/۱۲۴، کاربری اراضی با وزن ۰/۰۹۳، تراکم زهکشی با وزن ۰/۰۷۰، جهت شیب با وزن ۰/۰۵۳، آب و هوا با وزن ۰/۰۲۶، فاصله از رودخانه با وزن ۰/۰۱۷، و فاصله از گسل با وزن ۰/۰۱۳ حائز اهمیت می‌باشند. همچنین با توجه به اینکه ضریب سازگاری ماتریس کمتر از ۰/۱ (۰/۰۵۱) می‌باشد، ضریب سازگاری ماتریس در این کار قابل قبول است.
- ۴- در نهایت با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و ترکیب خطی وزنی، نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در محیط GIS تهیه شد و منطقه مورد مطالعه از نظر پتانسیل خطر زمین‌لغزش به ۵ کلاس خطر زمین‌لغزش خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی شد.
- ۵- بر اساس نقشه تهیه شده مشخص شد که ۲۲/۰۵ درصد منطقه دارای پتانسیل لغزش خیلی کم، ۸/۷۳ درصد کم، ۱۳/۹۰ درصد متوسط، ۲۵/۹۵ درصد پتانسیل لغزش بالا و ۲۹/۳۵ درصد پتانسیل لغزش خیلی زیادی دارد. در مجموع بیش از نیمی از منطقه یعنی بیش از ۵۵ درصد از خطر زمین‌لغزش زیاد و خیلی زیادی برخوردار می‌باشد.

References

- Ahmadi, H., Esmali, A., Feiznia, S., Shariat Jafari, M (2004) Mass movement hazard zonation with two multiple regression (MR) and Analytical Hierarchy Process (AHP) methods (case study: Germichay watershed). *Iranian J Natural Res*, 56 (4) (In Persian).
- Ahmadi, H., Mohammadkhan, Sh., Feiznia, S., Ghoddousi, J (2005) A Modeling of Mass Movement Hazard, Case Study: Taleghan Drainage Catchment. *Iranian J. Natural Res*, 58 (1) (In Persian).
- Anderson, S. P., Rengers, F. K., Foster, M. A., Winchell, E. W., Anderson, R. S (2017) Rainfall influence on styles of mass movement. *AGUFM EP51B-1638*.
- Babazadeh, R., Asghari KalJahi, E (2022) Instability risk assessment of open cut trenches of Sungun copper mine by FAHP. *Engineering*

- Area, Hodna Basin, Algeria. *J Geogr Inf Syst* 11(2):166-184.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Relchenbach, P., Carrara, A (2000) comparing landslide map: A case study in the upper tiber river basin, central Italy, *Environmental management*, 25: 247-263. doi.org/10.1007/s002679910020.
- Haeri, S. M., Samiei, A. H (1997) A new method of sloping areas zoning against the risk of landslides, based on zoning studies in Mazandaran province. *Earth Science Journal*, 6 (23) (In Persian).
- Hong, H., Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., Pradhan, B (2016) GIS-based landslide spatial modeling in Ganzhou City, China. *Arab J Geosci*, 9(2):1-26.
- Ilinca, V (2009) Rockfall hazard assessment case study: Lotru Valley and Olt Gorge. *Revista de Geomorfologie* 11: 101-108.
- Jebur, M. N., Pradhan, B., Tehrani, M. S (2014) Optimization of landslide conditioning factors using very high-resolution airborne laser scanning (LiDAR) data at catchment scale. *Remote Sens Environ*, 152: 150-165. doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.013.
- Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S., Gupta, R. P (2009) Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping: a review. *J South Asia Disaster Stud*, 2: 81-105.
- Komakpanah, A., Chodani, A. J., Montazer al-Qaim, S (1991) Risks caused by landslides in urban areas and the importance of preparing zonation maps. First International Conference on Natural Disasters in Urban Areas. Earthquake Section I, Tehran Studies and Planning Office (In Persian).
- Lee, S., Min, K (2001) Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environ Geol*, 40 (9): 1095-1113. doi.org/10.1007/s002540100310.
- Saaty, T. L (1980) *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York.
- Sabatakakis, N., Koukis, G., Vassiliades, E., Lainas, S (2013) Landslide susceptibility zonation in Greece. *Nat Hazards*, 65 (1): 523-543. doi.org/10.1007/s11069-012-0381-4.
- Shadfar, S., Yamani, M., Ghodousi, Jamal, & Ghayoumian, J (2007) landslide hazard zonation using analytical hierarchy method a case study: Chalkrood catchment. *Pajouhesh-Va-Sazandegi*, 20(2) (75 In Natural Resources)), 118-126. (In Persian)
- Shalmashi, A., Khodadadi, F (2003) An investigation of effective factors on landslide occurrence and landslide hazard zonation (case study: Shirin rood drainage basin - Tajan dam). *Iranian Journal of Natural Resources*, 57 (1): 3-22 (In Persian).
- Shirzadi, A., Bui, D. T., Pham, B. T., Solaimani, K., Chapi, K., Kaviani, A., Shahabi, H., Revhaug, I Statistical correlation between meteorological and rockfall databases. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 14(8): 1953-1964.
- Demir, G., Aytekin, M., Akgun, A (2015) Landslide susceptibility mapping by frequency ratio and logistic regression methods: an example from Niksar-Resadiye (Tokat, Turkey). *Arab J Geosci*, 8(3): 1801-1812.
- Dou, J., Yunus, A. P., Bui, D. T., Merghadi, A., Sahana, M., Zhu, Z., Chen, C. W., Khosravi, K., Yang, Y., Pham, B. T (2019) Assessment of advanced random forest and decision tree algorithms for modeling rainfall induced landslide susceptibility in the Izu-Oshima Volcanic Island, Japan. *Sci Total Environ*, 662:332-346.
- Effat, H. A., Hegazy, M. N (2014) Mapping landslide susceptibility using satellite data and spatial multi-criteria evaluation: the case of Helwan District, Cairo. *Applied Geomatics*, 6(4):215-228. doi.org/10.1007/s12518-014-0137-9
- El Jazouli, A., Barakat, A., Khellouk, R (2019) GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, 6(1). doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7
- Farhadinejad, T., Ghaumian, J., Shariat Jafari, M., Veiskarami, I (2001) Evaluation of landslide hazard zonation methods in Surkhhab Basin, Tehran. *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*, (In Persian). doi.org/20.1001.1.23222069.1388.16.1.4.4.
- Feizizadeh, B., Blaschke, T (2013) GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran. *Nat Hazards*, 65(3): 2105-2128. doi.org/10.1007/s11069-012-0463-3.
- Feyznia, S., Ahmadi, H., Hassanzadeh Nafuti, M (2001) landslide hazard zonation in shalmanrood basin in Gilan province. *Iranian Journal of Natural Resources*, 54 (3): 207-220 (In Persian).
- Gökçeoglu, C., Aksoy, H (1996) Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Eng Geol*, 44 (1-4):147-161.
- Goumrassa, A., Guendouz, M. & Guettouche, M. S (2021) GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis Approach (GIS-MCDA) for investigating mass movements' hazard susceptibility along the first section of the Algerian North-South Highway. *Arab J Geosci*, 14, 850. .https://doi.org/10.1007/s12517-021-07124-0
- Guettouche (2019) Using a GIS to assess the land movements hazard: application on Berhoum

- (2017) Shallow landslide susceptibility assessment using a novel hybrid intelligence approach. *Environ Earth Sci*, 76 (2). doi.org/10.1007/s12665-016-6374-y.
- Shirzadi, A., Saro, L., Hyun Joo, O., Chapi, K (2012) A GIS-based logistic regression model in rockfall susceptibility mapping along a mountainous road: Salavat Abad case study, Kurdistan, Iran. *Nat Hazards*, 64(2):1639–1656. doi.org/10.1007/s11069-012-0321-3.
- Shokrollah, K., karimkhani, A., Mazidi, A (2021) Landslide Risk Zoning using Logistic Regression and Anfis Models in Hashtjin Catchment Area in Ardabil Province. *Geography and Sustainability of Environment*, 39: 55-73 (In Persian). doi.org/10.22126/ges.2021.6461.2391.
- Singh, & Kumar (2017) Landslide hazard mapping along national highway-154A in Himachal Pradesh, India using information value and frequency ratio. *Arab J Geosci*, 10(24). doi.org/10.1007/s12517-017-3315-3.
- Uromeie, A., Aminizadeh, M. R (1398) Landslide hazard zonation in Halilrood watershed. Collection of articles of the second landslide conference, publications of the UNESCO National Commission in Iran, Tehran (In Persian).
- Van Westen, C. J., Rengers, N., Soeters, R (2003) Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Nat Hazards*, 30 (3): 399-419.
- Vames, D. J (1978) Landslide Types and Processes. In: *Landslides and Engineering Practice*. E.B.Eckel (ed). Special Report no.29., Highway Research Board, pp 20-47.
- Vames, D. J (1996) Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides: investigation and mitigation*, Transportation Research Board special report 247. National Academy Press, National Research Council, Washington, D.C
- Yusof, N. M., Pradhan, B., Shafri, H. Z. M., Jebur, M. N., Yusoff, Z (2015) Spatial landslide hazard assessment along the Jelapang Corridor of the North-South Expressway in Malaysia using high resolution airborne LiDAR data. *Arab J Geosci*, 8(11):9789-9800.

Landslide hazard zonation along Khorramabad-Zal Highway in Lorestan province using analytical hierarchy process (AHP)

F. Mirzai¹, A. Momeni^{2*} and Y. Abdi³

1- M. Sc. of Geology, Earth Sciences Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Earth Sciences Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Assist. Prof., Dept., of Geology, Faculty of sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran

* ali_moomeni@yahoo.com

Received: 2023.10.1 Accepted: 2024.1.9

Abstract

The Khorramabad-Zal Highway is a crucial component of the Tehran-Bander Imam Khomeini axis, which holds significant economic importance in the country. Hence, this study focuses on assessing the risk of landslides in the Khorramabad-Zal Highway through the utilization of geographic information system (GIS). To assess the landslide hazards zonation in this study, the hierarchical analysis method (AHP) was employed. Field studies, observations, and geological conditions were considered to identify 10 factors that influence landslide occurrences. These factors include lithology, slope, aspect, distance from fault lines, land use, climate, altitude, distance from rivers, distance from drainages, and rainfall. Through the AHP method within a GIS environment, each parameter was weighted and maps were generated to represent their individual contributions. In conclusion, the integration of various layers has facilitated the creation of a comprehensive landslide hazard zoning map for the designated study area. The analysis of this map revealed that approximately 54% of the surveyed region possesses a high and very high potential for landslides.

Keywords: Landslide hazard zonation, GIS, AHP, Khorramabad-Zal Highway

Introduction

Transportation infrastructure forms the backbone of socio-economic development in any country. Expanding or constructing highways can, however, adversely impact the surrounding environment by disrupting natural ecosystems, altering drainage patterns, and destabilizing slopes. Landslides, among the most prevalent geological hazards in Iran, pose significant threats to infrastructure, property, and human lives.

The Khorramabad-Zal Highway, as a vital north-south corridor in Iran, traverses geologically sensitive terrains, often experiencing slope instability exacerbated by steep gradients, high rainfall, and the geological characteristics of formations like Gachsaran. This study aims to develop a reliable landslide hazard zonation (LHZ) map for a 60 km section of this highway using the Analytical Hierarchy Process (AHP) integrated with Geographic Information Systems (GIS).

Materials and Methods

The Khorramabad-Zal Highway, spanning 104 km, is a critical transit route linking northern

and southern Iran. The study focused on a segment between kilometer 15 and 75, characterized by steep slopes, complex geological formations, and frequent landslide occurrences. The area falls within a high seismicity zone and experiences significant climatic variations, contributing to slope instability. To assess landslide susceptibility, a multi-criteria evaluation approach combining AHP and Weighted Linear Combination (WLC) in GIS was employed. Ten key factors influencing landslide occurrences were identified:

Lithology: The Gachsaran and Aghajari formations, due to their marly and gypsum-rich compositions, are particularly susceptible to landslides.

Slope Gradient: High gradients ($>45^\circ$) significantly elevate shear stress and reduce stability.

Elevation: Areas above 1400 m are more prone to instability due to heightened weathering.

Rainfall: Increased precipitation reduces soil cohesion and raises pore pressure, triggering mass movements.

Land Use: Forested areas exhibit higher stability, while barren lands are more prone to erosion.

Aspect: South-facing slopes receive more sunlight, exacerbating desiccation and erosion.

Proximity to Faults, Rivers, and Drainages: These factors influence groundwater flow and slope erosion.

Climatic Conditions: Semi-arid climates with periodic intense rainfall events exacerbate slope failures.

Each factor was weighted based on expert judgment and processed within GIS. Factors were classified into five susceptibility classes, ranging from very low to very high.

Results and Discussion

The LHZ map indicated that:

Very High Susceptibility Areas: Constituted 29.35% of the region, primarily along the Gachsaran formation.

High Susceptibility Areas: Accounted for 25.95%, located near steep slopes and fault lines.

Moderate to Low Susceptibility Areas: Covered the remaining regions, corresponding to forested zones and less steep gradients.

Key Findings

Critical Role of Lithology: Gachsaran's water-soluble layers and Aghajari's marls showed the highest instability.

Influence of Rainfall: Seasonal heavy rains triggered slope failures, particularly in fractured and marly terrains.

Verification: Field observations validated the model, as most historical landslides occurred in zones classified as high or very high susceptibility.

The model's consistency ratio (CR) was 0.051, indicating high reliability in the AHP framework. Comparisons with historical landslide data confirmed the map's accuracy.

Conclusion

The study successfully identified and mapped landslide-prone zones along the Khorramabad-Zal Highway. Over 54% of the study area exhibited high to very high susceptibility to landslides. Key recommendations include:

Monitoring: Regular geotechnical inspections, especially after heavy rainfall.

Preventive Measures: Stabilizing slopes using retaining walls and vegetation cover.

Land Use Planning: Avoiding construction in high-susceptibility zones.

This LHZ map serves as a vital tool for policymakers and engineers in mitigating landslide risks and ensuring the highway's sustainability.