

تأثیر گسلش بر احتمال وقوع زمین‌لغزش‌ها، مطالعه موردی: زمین‌لغزش‌های منطقه نرگس چال

حجت‌اله صفری*، حامد رضایی، افسانه قجقی؛
دانشگاه گلستان، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی

پذیرش ۹۸/۰۶/۲۵

تاریخ: دریافت ۹۷/۰۴/۰۳

چکیده

زمین لغزش‌ها به‌عنوان مخاطرات طبیعی، موجب خسارات فراوانی می‌شوند، در بسیاری از موارد می‌توان با شناخت زمین‌شناسی مناطق مختلف، وقوع زمین‌لغزش‌ها را پیشگویی و با راهکارهای مناسب از وقوع آن جلوگیری کرد. یکی از مناطق مستعد و پرخطر از نظر زمین‌لغزش در البرز شرقی، منطقه نرگس چال است. در این پژوهش، به‌کمک روش‌های سنجش از دور، GIS و هم‌چنین مشاهدات و اندازه‌گیری‌های صحرایی اقدام به بررسی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌ها در منطقه نرگس چال شد. در این راستا هفت لایه اطلاعاتی برداری از عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش تهیه شده و به مقادیر موجود در هر لایه اطلاعاتی وزن داده شده و کلاس‌بندی انجام شد. در نهایت با محیط نرم‌افزاری GIS نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تهیه شد. نتایج حاصل از تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نشان می‌دهد که الگوی فضایی بیش‌ترین خطرات زمین‌لغزش به‌صورت نواری پهن با امتداد شمال‌شرق-جنوب‌غربی قابل مشاهده است. نتایج حاصل از بررسی اثر شکستگی‌ها (به‌عنوان عوامل ساختاری) بر پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش نشان می‌دهد که عوامل ساختاری نظیر گسل‌های اصلی (و سایر شکستگی‌های مرتبط با آنها) به‌طور غیرمستقیم، با ایجاد شیب‌های تند، ایجاد مناطق خردشده و نامقاوم، ایجاد مناطق چشمه‌سار و ایجاد زلزله‌ها، تعیین‌کننده الگوی پراکنش بیش‌ترین خطر زمین‌لغزش بوده است و تأثیر زیادی بر رخداد این بلای طبیعی داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: منطقه نرگس چال، پهنه‌بندی زمین‌لغزش، سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی، گسلش

مقدمه

بنا به تعریف انجمن زمین‌شناسی مهندسی، زمین‌لغزش به جابه‌جایی به سمت پایین توده‌ای از مواد روی یک شیب اطلاق می‌شود. زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان مخاطرات طبیعی، از جمله پدیده‌های زمین‌شناسی قابل بررسی و پیش‌بینی هستند که می‌توان با شناخت ویژگی‌های عمومی و زمین‌شناسی مناطق مختلف، پتانسیل رخداد آنها را پهنه‌بندی کرده و در بسیاری از موارد، وقوع آنها را پیش‌گویی کرد. یک نقشه پهنه‌بندی شامل تقسیم‌بندی سطح زمین به مناطق مشابه از نظر خطر زمین‌لغزش و عوارض ناشی از آن است. روش‌های متعددی برای پهنه‌بندی وجود دارد که همگی آنها با توجه به سه فرض زیر پایه‌ریزی شده‌اند:

۱. فعالیت لغزش گذشته و نشان‌دهنده استعداد بالای زمین لغزش منطقه دارد.

۲. عوامل مؤثر در زمین‌لغزش قابل شناسایی است.

۳. میزان خطر قابل پیش‌بینی است.

هدف روش‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش کمک به اتخاذ تصمیم‌های مرتبط با محیط‌های شهری و برنامه‌ریزی منطقه‌ای برای کاهش خطر بلایای طبیعی است [۵]. کشور ما نیز با توجه به قرار گرفتن روی کمر بند لرزه‌ای و بروز زلزله‌های متعدد و هم‌چنین وضعیت مورفولوژی زمین و زمین‌شناسی در معرض زمین‌لغزش‌های متعدد (ناشی از زلزله و سایر عوامل) و خسارات ناشی از آن قرار دارد، از این‌رو تلاش برای شناخت این پدیده و راه‌های پیش‌بینی آنها اهمیت زیادی دارد. به‌طور کلی روش‌های تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زمین-لغزش را می‌توان به دو دسته روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم کرد. روش‌های مستقیم بر شناسایی لندفرم‌های همراه با زمین‌لغزش متکی است. روش‌های غیرمستقیم بر اساس شناسایی عوامل کنترل‌کننده توزیع زمین‌لغزه‌ها و استفاده از وجود این عوامل کنترل‌کننده به‌عنوان معرف‌های پتانسیل زمین‌لغزش بنا نهاده شده‌اند. روش‌های غیرمستقیم از پنج مرحله اساسی: انتخاب واحدهای کاری (تعیین درجه خطر)، تهیه نقشه‌های پارامتریک (نقشه‌های شیب، سنگ‌شناسی، لرزه‌خیزی، بارندگی و غیره)، وزن‌دهی مناسب به زیرگروه‌های مختلف (وزن‌دهی کور، وزن‌دهی براساس زمین‌لغزه‌های رخ داده در منطقه و یا وزن‌دهی بعد از حادثه)، وزن‌دهی مناسب به هرکدام از نقشه‌های عامل در مقایسه با یک‌دیگر و ارزیابی خطر

نسبی در هر واحدکاری با استفاده از هم‌پوشانی نقشه‌های عوامل مختلف و جمع کردن وزن‌های حاصل از هر نقشه تشکیل یافته‌اند. در این رابطه افرادی در ایران و سایر نقاط جهان از روش‌های غیرمستقیم پهنه‌بندی استفاده کرده‌اند که در ذیل به مهم‌ترین آنها می‌پردازیم:

- آنبالاگان^۱ و همکاران، برای پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در یک منطقه کوهستانی هیمالیا، روشی را مبتنی بر نمره‌بندی برای ارزیابی خطر زمین لغزه و پهنه‌بندی آن در مناطق کوهستانی به کار ابداع کردند [۱۲]. در این روش نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزه بر مبنای ارزیابی عوامل مؤثر در ایجاد زمین لغزه تهیه شده و محدوده بررسی شده به واحدهای شیئی تقسیم و عوامل مذکور برای هر واحد ارزیابی و امتیاز مربوط تعیین شده بود. سپس جمع امتیازهای مربوط به نام خطر برآورد شده کل محاسبه شد. بر اساس عدد شاخص خطر و نسبت دادن وزن به هریک از لایه‌های اطلاعاتی، هر یک از لایه‌ها به پنج رده تقسیم شد. جمع امتیازات برای هر واحد کاری در حالت بیشینه ۱۰ است. بنابراین هرچه جمع امتیازات محاسبه شده بیش‌تر باشد، خطر زمین لغزش در آن واحد بیش‌تر است. بر این اساس پهنه‌های لغزشی از نظر خطر نسبی تقسیم‌بندی می‌شوند.

- مورا^۲ و وارسون^۳، مجموعه مطالعات موردی انجام شده در رابطه با گسیختگی‌های به وقوع پیوسته در نتیجه وقوع زلزله‌های تاریخی و بارندگی‌های سنگین در آمریکای مرکزی را ساماندهی کرده و براساس نتایج به دست آمده روشی را برای پیش‌گویی پهنه‌های مستعد گسیختگی شیب پیشنهاد دادند [۲۳]. عوامل استفاده شده شامل پستی و بلندی نسبی، شرایط لیتولوژیک و رطوبت خاک بود. هم‌چنین دو عامل شدت لرزه و شدت بارندگی نیز به عنوان عوامل محرک در نظر گرفته شده و بر اساس این روش، شاخص خطر زمین لغزش به دست آمد.

- حق‌شناس، با بررسی آماری رابطه توزیع زمین لغزش‌های طالقان با عوامل زمین‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناسی، اقلیمی و کاربری اراضی، عوامل مؤثر در کنترل توزیع زمین لغزش‌ها را شناسایی کرده و برای تحلیل خطر به کار گرفت [۶].

1. Anbagan
2. Mora
3. Wharson

- حائری و سمیعی، با تلفیق و اصلاح روش‌های مرسوم یک مدل وزنی منطقه‌ای برای مناطق البرز و جنگل‌های خزری با امتیازبندی هفت متغیر و با هفت کلاس خطر تدوین کردند. آن‌ها مدل را در استان‌های مازندران و گلستان در ابعاد سلولی 2500×2500 متر اجرا و براساس شواهد زمینی و نظر کارشناسی کارایی مدل را سنجیده و آن‌را مطلوب ارزیابی کردند [۷]. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در این روش براساس هفت عامل توپوگرافی (شیب)، زمین‌شناسی، طول آبراهه‌ها، طول گسل‌ها در هر واحد کاری (سلول)، زمین‌لرزه، شدت بارندگی و رطوبت خاک انجام گرفت.

- محمدخان، نیز عمل پهنه‌بندی خطر حرکت‌های توده‌ای را برای حوضه آبخیز طالقان و با در نظر گرفتن شش عامل شیب، ارتفاع، سنگ‌شناسی، بارندگی، جهت دامنه و کاربری اراضی و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی انجام داد [۹]. وزن هر معیار (W) بیان‌گر میزان اهمیت هر عامل نسبت به سایر عوامل است که مجموع ارزش این عوامل باید ۱۰۰ درصد باشد. در این روش ابتدا با استفاده از قضاوت کارشناسی که مبتنی بر قضاوت کارشناسی پژوهش‌گر و نتایج سایر تحقیقات در حوضه آبریز مجاور منطقه بررسی شده و مناطقی با شرایط محیطی مشابه اقدام به رتبه‌بندی عوامل به ترتیب از اولویت ضعیف تا اولویت حداکثر شد. سپس این رتبه‌ها به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل شد. پس از تشکیل جدول مقادیر، برای پهنه‌بندی منطقه بررسی شده این مراحل انجام شد:

۱. مقایسه دو به دو فاکتورها و اولویت‌بندی آن‌ها براساس وزن آن‌ها، برای مقایسه دو به دو فاکتورها و تعیین اولویت، ابتدا فاکتورها با هم مقایسه شدند و ارزش‌های مربوط به هر ستون از ماتریس مقایسه، دو به دو با هم جمع شدند.

۲. هر عنصر ماتریس بر مقدار کل ستون آن تقسیم شدند.

۳. میانگین عناصر مطرح در هر ردیف از ماتریس استاندارد محاسبه شد. این میانگین‌ها تخمینی از وزن‌های نسبی معیارهای مقایسه شده به دست می‌دهند. با استفاده از این روش، وزن‌ها به منزله میانگینی از تمامی راه‌های ممکن از مقایسه معیارها تلقی شدند. در این پژوهش با توجه به بررسی کارهای انجام گرفته، روش امتیازبندی آنباگالان با استفاده از قابلیت‌های محیط GIS مناسب دانسته شد و شواهد صحرایی حکایت از آن

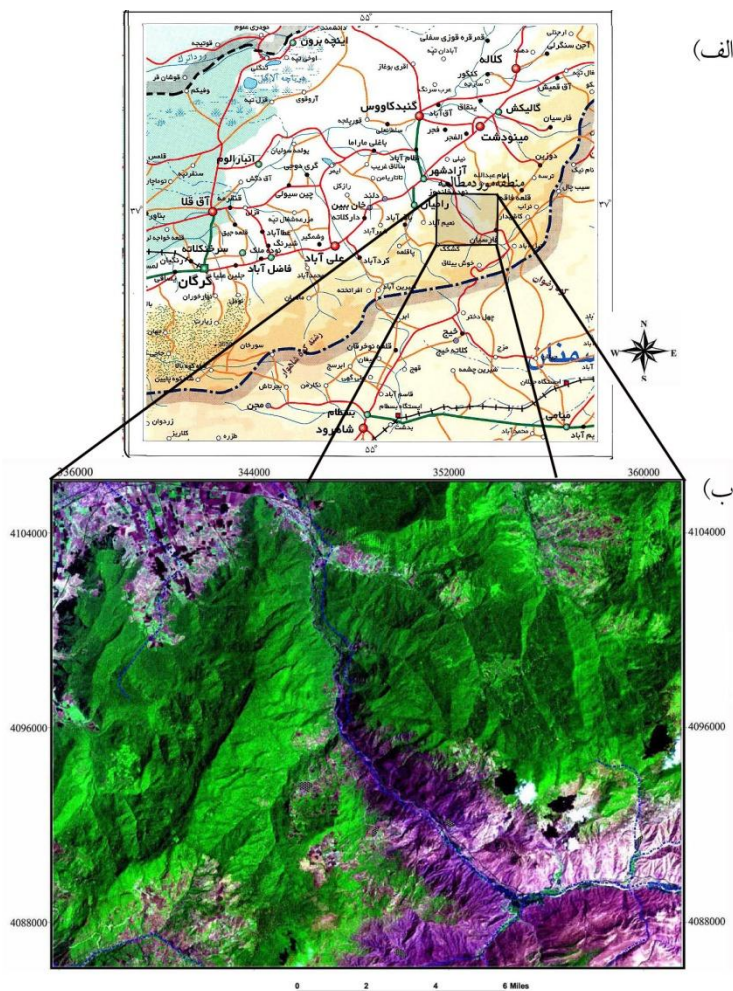
داشت که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رخداد زمین لغزش منطقه پارامترهایی نظیر عوامل لیتولوژی، ساختاری (میزان خردشدگی واحدهای سنگی)، شیب زمین، وضعیت پوشش گیاهی، وضعیت لرزه‌خیزی [۸]، وضعیت آب‌های زیرزمینی و پراکنش جغرافیایی زمین لغزش‌های موجود هستند. به نظر می‌رسد که یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در زمین لغزش‌ها، ساختارهای منطقه (به‌ویژه گسلش) باشند، به گونه‌ای که در پهنه‌بندی زمین لغزش‌ها، اثر این عامل به‌خوبی نمایان است.

لرزه‌خیزی و گسلش فعال، شیب‌های تند دامنه‌ای، رخنمون‌های سنگی گسلیده و نرم به‌همراه متوسط بارش بالا شرایطی را فراهم کرده است که در بسیاری از مناطق البرز شرقی، پتانسیل رخداد حرکات ثقلی بزرگ مقیاس وجود داشته باشد. یکی از مناطق مستعد زمین لغزش در البرز شرقی منطقه نرگس چال (در مسیر آزادشهر-شاهرود) است (شکل ۱) که به تازگی در آن زمین لغزش روستای نرگس چال رخ داده است. این روستا تحت این لغزش بزرگ مقیاس جابه‌جا شده و جزء مناطق پرخطر استان گلستان محسوب می‌شود. در این پژوهش، ابتدا سعی خواهد شد که پدیده رخداد زمین لغزش‌ها در این منطقه به‌درستی شناسایی شده و ابعاد واقعی آن مشخص شود. سپس به بررسی عوامل ایجاد آن پرداخته شود و در ادامه با تهیه لایه‌های برداری (از عوامل مؤثر) در محیط GIS اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش کرده و در نهایت اثر (وزن) عوامل ساختاری در بین عوامل مؤثر مشخص شود.

زمین‌شناسی عمومی منطقه

منطقه بررسی شده در بخش شرقی کمربند کوهزاد البرز (در شمال ایران) قرار گرفته است. این کمربند، به‌عنوان بخشی از رشته کوه‌های آلپ-هیمالیا با پهنای حدود ۱۰۰ کیلومتر و طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر از قفقاز کوچک در غرب تا کپه داغ در شرق گسترش داشته و حوضه خزر جنوبی را احاطه می‌کند [۱۳]، [۱۴]، [۲۰]. این رشته کوه طی فازهای کوهزایی آلپی به شکل کنونی خود درآمده است [۲۲]. به‌همین دلیل، این کمربند منطقه‌ای با دگرشکلی فعال را در درون منطقه برخوردی بین صفحه عربی و اوراسیا به مساحت ۳ میلیون مترمربع را تشکیل داده است [۱۰]، [۱۱]، [۱۵]. در البرز شرقی، ساختارها روند شمال شرقی-جنوب

غربی دارند و گسلش راندگی بارزترین شکل تغییر ساختاری در منطقه است. گسلش فعال، آتشفشان‌های عهد حاضر و ارتفاعات بلند از مهم‌ترین ویژگی‌های این مناطق است [۱۰]، [۱۱]. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که اغلب سازوکار کانونی زلزله‌ها در نوار البرز، نشان‌دهنده دو نوع گسلش معکوس و امتدادلغز چپ‌بر روی گسله‌های موازی با روند البرز است [۱۶]، [۱۸].



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی ب) تصویر ماهواره‌ای اصلاح‌شده

سكانس نسبتاً كاملی متشكل از سازندهایی به سن دونین تا ژوراسیک در منطقه نهشته شده‌اند. سازندهای این سكانس رسوبی شامل: خوش‌ییلاق (ماسه سنگ، سنگ جوش، سنگ آهك و مارن و شیل)، مبارك (آهك دولومیتی بیتومینه شده)، درود-روته (آهك روشن متوسط تا ضخیم لایه، كنگلومرا و ماسه سنگ)، الیکا (دولومیت و آهك ورمیکوله)، شمشك (توالی شیل زغال‌دار، ماسه سنگ و مارن)، دلیچای (آهك مارنی و مارن) و لار (آهك ضخیم لایه) است [۱]. ستیغ‌های بلند و دره‌های عمیق و پرشیب مهم‌ترین عوارض ریخت‌شناسی منطقه است. بررسی آرایش و نوع آبراهه‌ها نشان می‌دهد كه این عوارض تابعی از وضعیت ساختارها (روند گسل‌ها) و لیتولوژی سنگ‌های مسیر است. به‌گونه‌ای كه در بیش‌تر نقاط، آبراهه‌ها با امتداد شمال غرب-جنوب شرقی در مسیر عبور گسل (زون گسلش) قرار گرفته‌اند و به‌همین دلیل، شكل اكثر آبراهه‌ها در منطقه بررسی شده خطی است. تنها مورد استثناء، آبراهه‌های بخش جنوب شرقی هستند كه الگوی شاخه درختی را به‌نمایش گذاشته‌اند [۳].

روش انجام كار

در این پژوهش، به‌كمك روش‌های سنجش از دور، GIS و هم‌چنین مشاهدات و اندازه‌گیری‌های صحرایی به بررسی عوامل مؤثر بر زمین لغزش‌ها در منطقه نرگس چال اقدام شد. در این راستا هفت لایه اطلاعاتی برداری با كمك اطلاعات و آمار موجود و پیمایش‌های دقیق صحرایی از وضعیت ساختارها، لیتولوژی، شیب، پوشش گیاهی، لرزه‌خیزی، آب‌های زیرزمینی و زمین لغزش‌های موجود تهیه شد و در ادامه كار، به مقادیر موجود در هر لایه اطلاعاتی وزن داده شده و كلاس‌بندی انجام شد. با كمك محیط GIS اقدام به‌روی هم انداختن لایه‌ها و جمع جبری مقادیر تمام لایه‌ها در هر پیکسل شد و در نهایت با كمك این محیط نرم‌افزاری نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش تهیه شد. سپس برای بررسی وزن عوامل ساختاری در این پهنه‌بندی، اقدام به قرار دادن لایه ساختاری روی نقشه پهنه‌بندی در محیط GIS کرده و ارتباط فضایی ساختارها با مناطق با پتانسیل لغزش بالا بررسی و ارزیابی شد.

تهیه لایه‌های اطلاعاتی

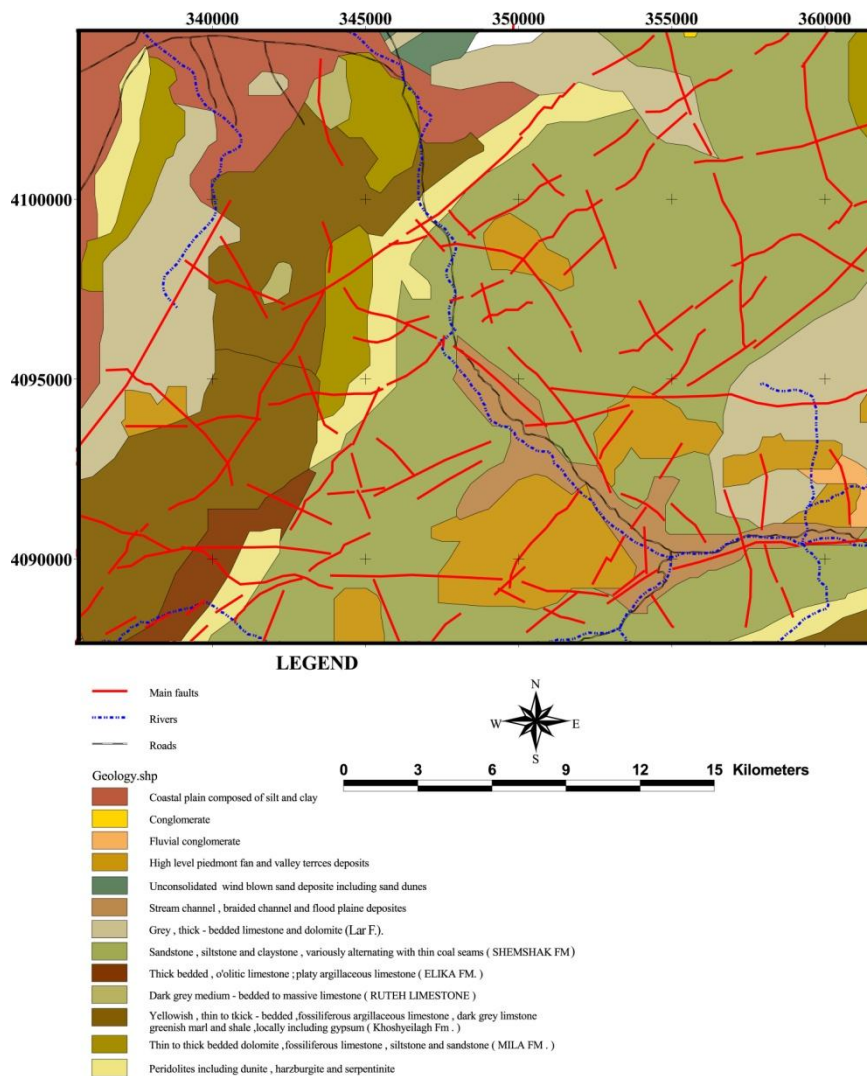
در این بخش به کمک روش‌های مختلف به تهیه هفت لایه اطلاعاتی شامل: عوامل ساختاری، لیتولوژی، شیب زمین، وضعیت پوشش گیاهی، وضعیت لرزه‌خیزی، وضعیت آب‌های زیرزمینی و پراکنش جغرافیایی زمین‌لغزش‌های موجود اقدام شد که بدین شرح است:

۱. **لایه واحدهای سنگی:** برای تشخیص لیتولوژی‌های مختلف [۲]، [۲۱]، ابتدا تصاویر ماهواره‌ای Landsat 7 ETM+ تهیه و تصویری با رنگ کاذب (RGB 7-4-1) ساخته شد. سپس با اعمال فیلترهای بالاگذر روی تصویر ماهواره‌ای منطقه تصویر یادشده بارزسازی شد (شکل ۱ ب). سپس به کمک روش نیمه خودکار مشاهده‌ای لایه‌های مختلف با سنگ‌شناسی متفاوت در منطقه شناسایی شده و به صورت نقشه چینه‌شناسی آماده شد. سپس با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی و از طریق کنترل‌های میدانی لایه‌های سنگی با لیتولوژی‌های متفاوت از هم تفکیک شد (شکل ۲).

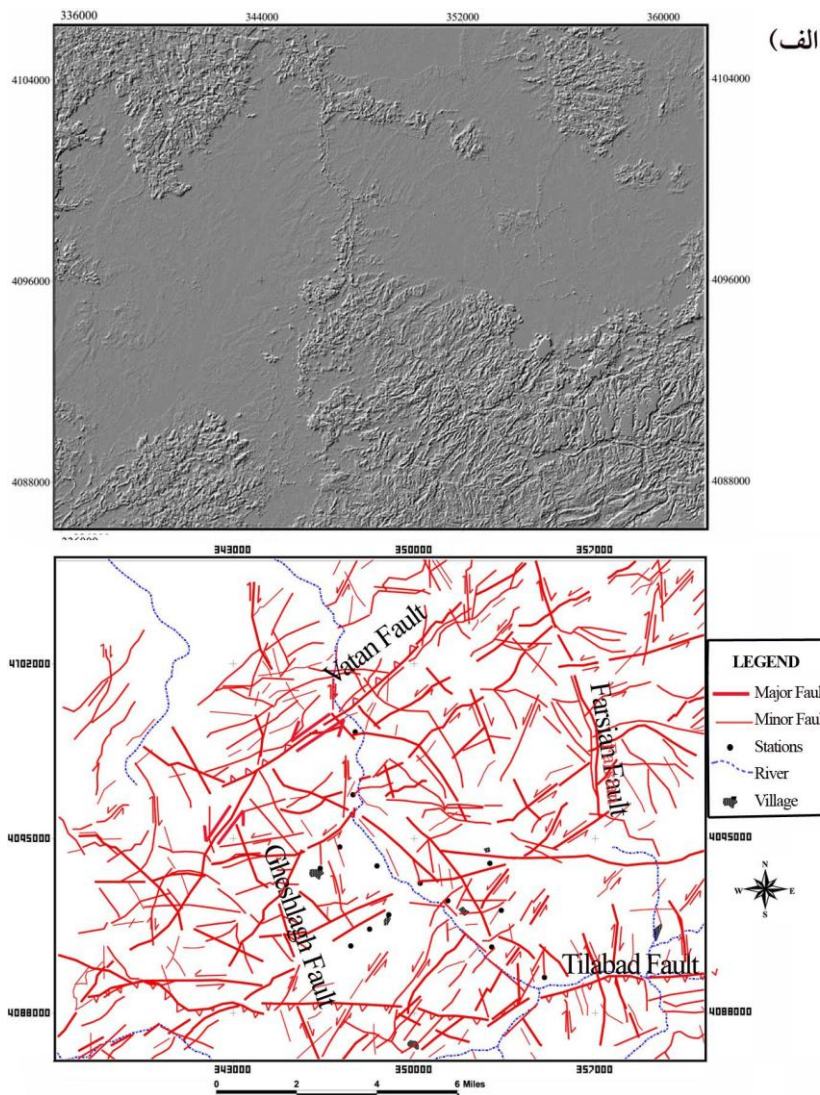
۲. **لایه شکستگی‌ها:** برای شناسایی اولیه شکستگی‌ها، با اعمال فیلترهای جهت‌دار^۱ در جهات ۴۵، ۹۰، ۱۳۵، ۱۸۰ درجه روی تصویر (شکل ۳ الف) اقدام به شناسایی و استخراج شکستگی‌های در قالب خطواره موجود در منطقه شد [۲۱]. سپس از طریق کنترل‌های میدانی (اندازه‌گیری‌های صحرایی) گسله‌های اصلی و فرعی شناسایی و بررسی شدند. در ادامه با استفاده از محیط نرم‌افزاری GIS به رقومی کردن گسل‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای اقدام شد (شکل ۳ ب).

برای محاسبه تراکم شکستگی‌ها در منطقه بررسی شده، ابتدا شبکه‌ای ترسیم شد که دارای سلول‌هایی با ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰ متر بود [۲۰]. سپس نقطه مرکزی هر سلول در مرکز آن ترسیم شد (شکل ۴ الف). در ادامه مختصات هر نقطه مرکزی محاسبه شده است. سپس در محیط نرم‌افزار Arcview اقدام به اندازه‌گیری و قرائت مجموع طول شکستگی‌های استخراج شده در هر سلول کرده و در جدول همراه شبکه مورد نظر ثبت شد. در نهایت بر اساس جدول همراه شبکه ترسیمی، سطوح هم‌پتانسیل ترسیم شده و این خروجی به عنوان نقشه تراکم شکستگی‌ها یا نقشه هم‌شکستگی^۲ تهیه شد (شکل ۴ ب).

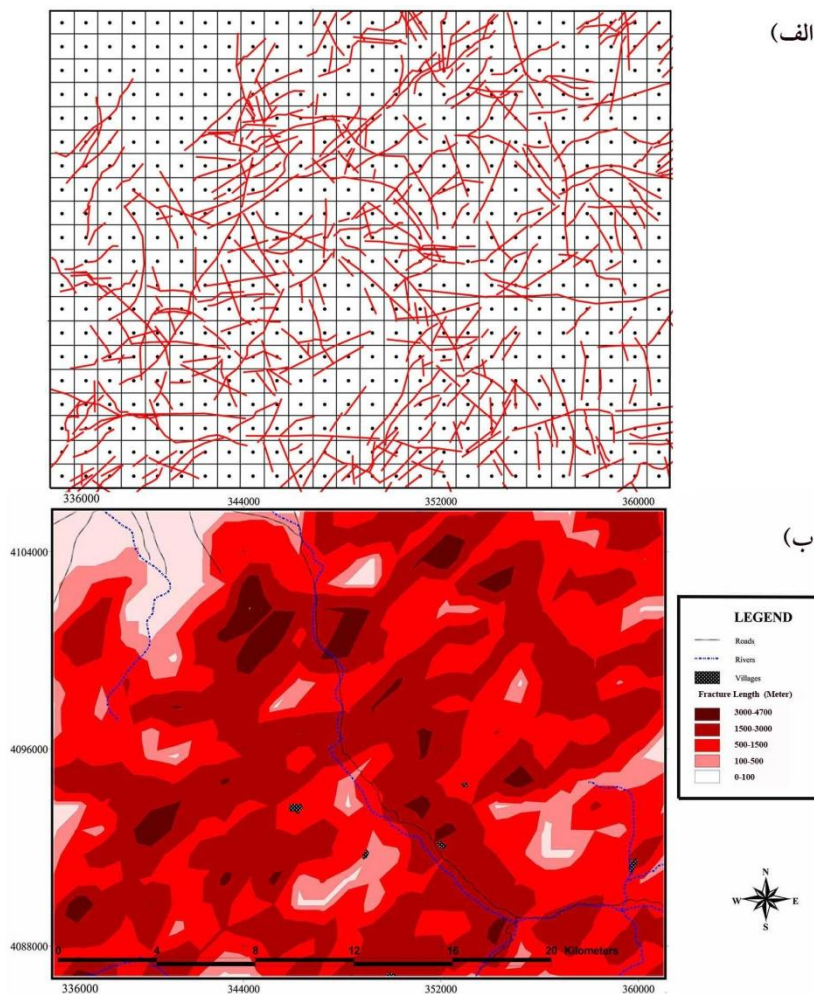
1. Convolution/ Directional
2. Iso Fracture



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه بررسی شده



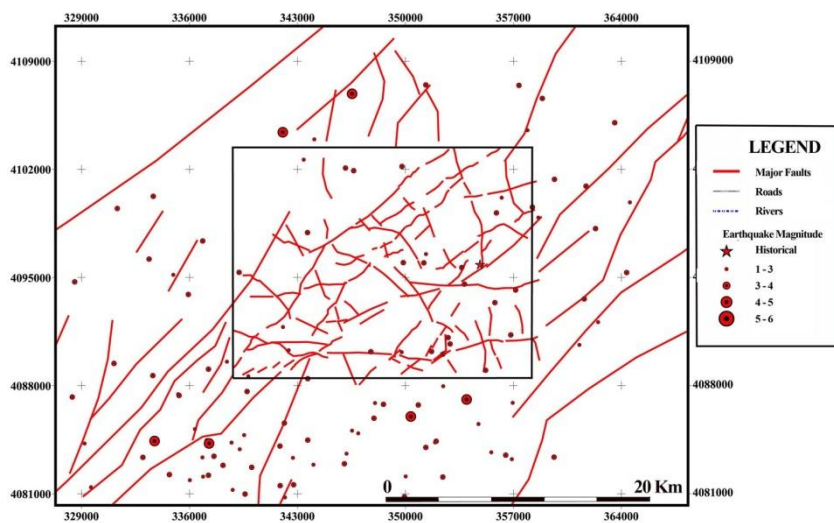
شکل ۳. الف) اعمال فیلتر جهت‌دار (۴۵ درجه) روی تصویر ماهواره‌ای، ب) استخراج و دسته‌بندی گسل‌های منطقه



شکل ۴. الف) ترسیم شبکه با ابعاد 1000×1000 متر و محاسبه طول شکستگی‌ها، ب) ترسیم نقشه چگالی شکستگی‌ها

۳. لایه وضعیت لرزه خیزی منطقه: با استفاده از داده‌های موجود در کاتالوگ‌هایی که از مؤسسات معتبری نظیر: موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا برگرفته شد، لایه اطلاعاتی به تهیه شد. به این صورت که مشخصاتی نظیر مختصات جغرافیایی، زمان رخداد، بزرگای

زلزله و عمق زلزله به صورت فایل اکسل excel در آمده و تبدیل به فایلی با پسوند *.DBF شد. در ادامه فایل مذکور فراخوانده شده و کانون زلزله‌های منطقه و پیرامون بر اساس بزرگا رسم شد (شکل ۵). در منطقه یک زلزله تاریخی در بخش شرقی منطقه موجود است. باید این مسئله را در نظر داشت که با توجه به این که عمده اثرات زلزله به ویژه خرابی‌های آن در رومرکز زلزله رخ می‌دهد و این واقعیت که در صورت در نظر گرفتن زلزله‌های بزرگ بسیار دور از منطقه بررسی شده، اثرات آن‌ها در یک منطقه بسیار کوچک قابل تفکیک و پهنه‌بندی نیست، به همین دلیل تراکم کانون‌های زلزله به عنوان معیاری محلی برای سنجش خطرات زلزله در نظر گرفته شد.



شکل ۵: نقشه لرزه‌زمین‌ساختی منطقه مورد بررسی (داخل کادر) و پیرامون

۴. لایه زمین‌لغزش‌های رخ داده: برای تهیه لایه زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه بررسی شده، ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای محدوده‌هایی که در آنها زمین‌لغزش‌های قدیمی رخ داده بودند، بر اساس شکل ریخت‌شناسی زمین‌لغزش‌ها (که شامل محدوده‌هایی فرولغزیده به صورت تغییرات ناگهانی شیب و وجود افراز در بالادست آنها)، مشخص شده و در محیط GIS رقومی شدند (شکل ۷ الف). در ادامه با کنترل‌ها و پیمایش‌های صحرایی (شکل ۶) محدوده‌های استخراج شده از زمین‌لغزش‌ها تصحیح و نهایی شدند

الف

شکافهای تاج
تاج زمین لغزش
سطح اولیه زمین
افراز اصلی
چندین فرعی
سطح جدایش
پهنه اصلی
پهنه سطح جدایش
پای زمین لغزش
سطح جدایش
شکافهای شعاعی
برجستگی های عرضی
شکاف های عرضی
افراز فرعی

ب

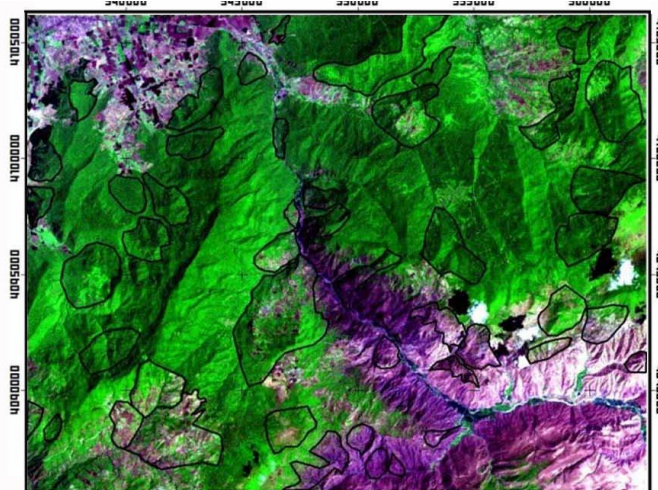
ج

تاج زمین لغزش
افراز اصلی
سطح جدایش
سطح جدایش
پایین
شکافهای طولی
شکافهای عرضی
پهنه لغزش

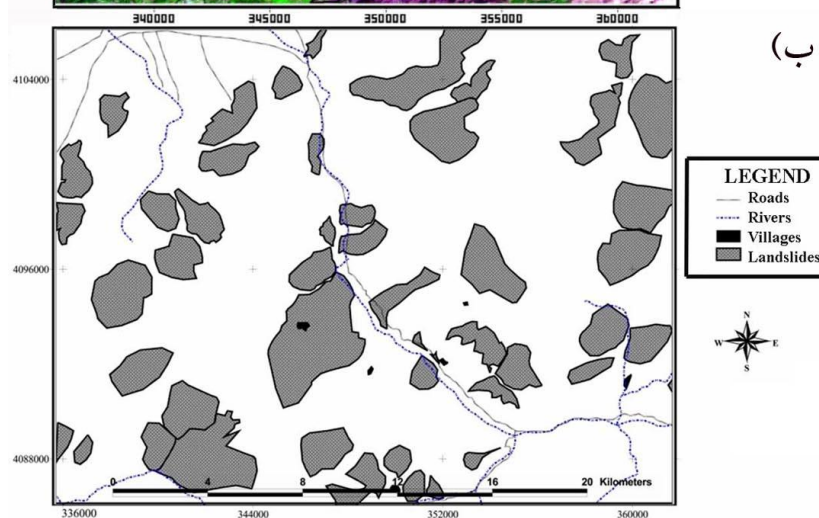
د

شکل ۶. الف و ج) اشکالی شماتیک از زمین لغزشی چرخشی و انتقالی [۲۴]، ب) زمین لغزشی چرخشی در جنوب شرق وطن، د) زمین لغزش انتقالی مرکب در جنوب غرب نرگس چال

(الف)

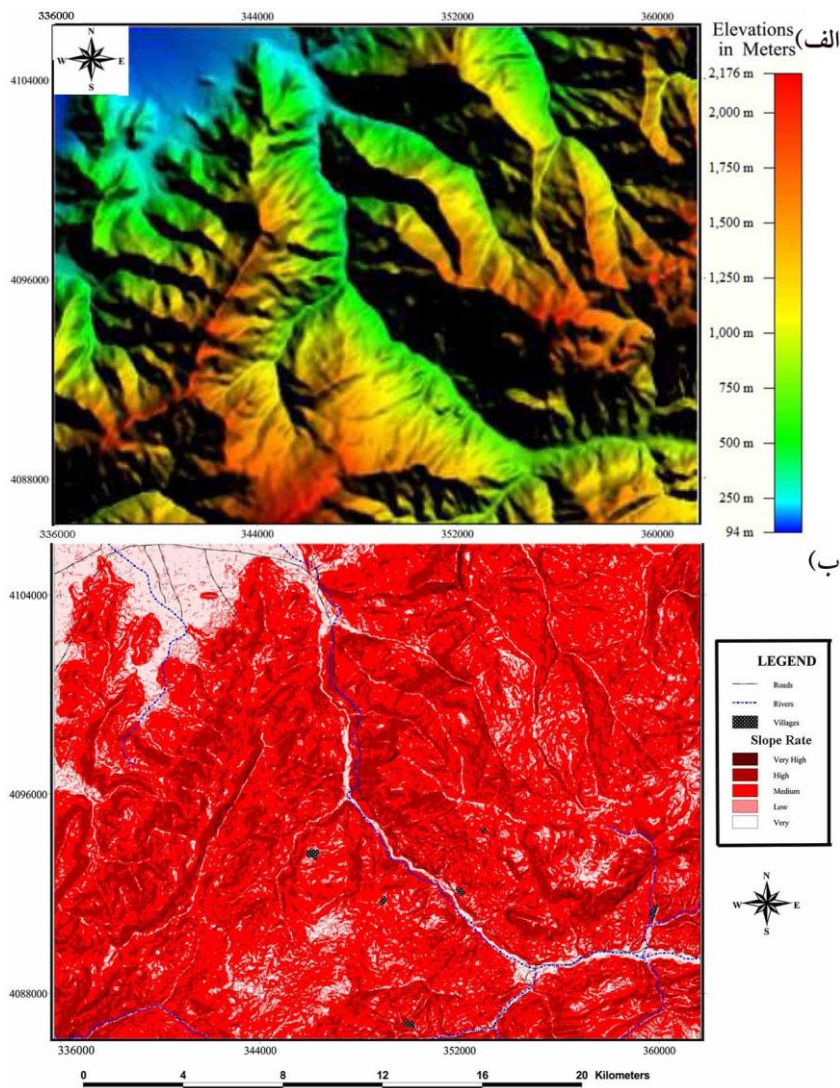


(ب)



شکل ۷. الف) استخراج پهنه‌های زمین‌لغزش از تصاویر ماهواره‌ای، ب) نقشه زمین‌لغزش‌های قدیمی در منطقه

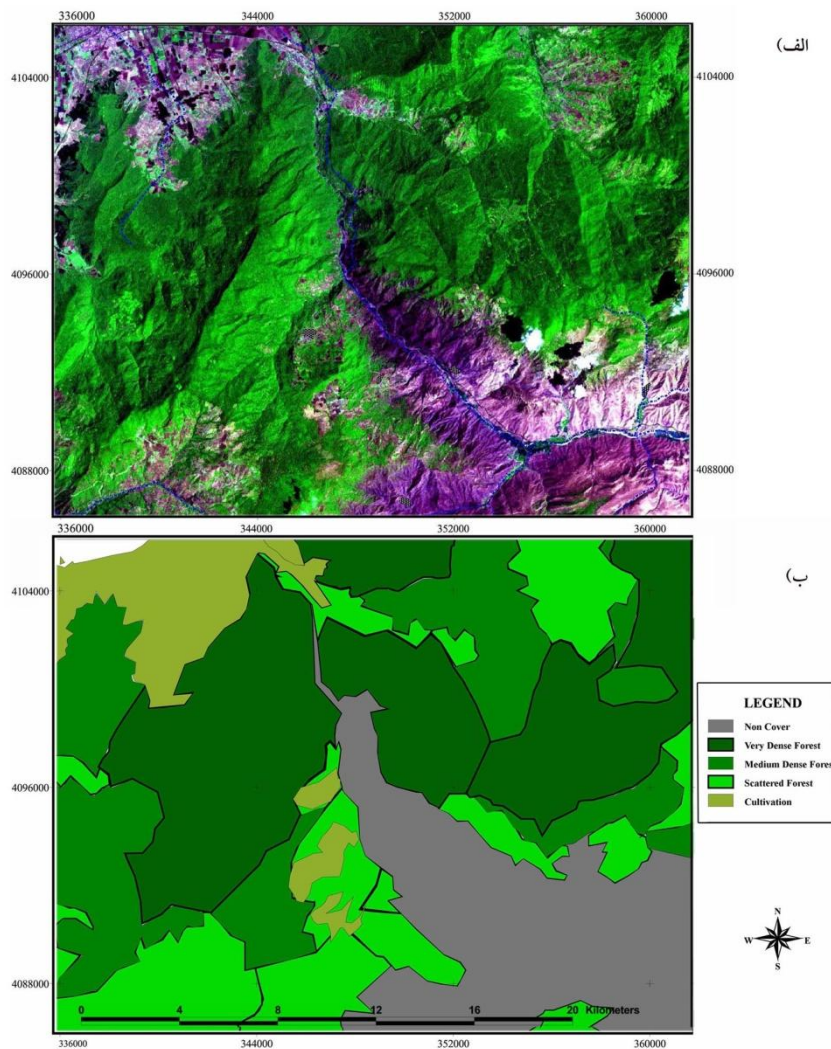
۵. لایه وضعیت شیب منطقه: نقشه شیب و جهت شیب از مواردی هستند که در اکثر موارد در تجزیه‌های مکانی استفاده می‌شوند. برای اینکار ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۲۵۰۰۰ منطقه، مدل رقومی ارتفاعی تهیه شد (شکل ۸ الف). سپس بر اساس آن اقدام به کلاس‌بندی شیب و تهیه نقشه شیب کردیم (شکل ۸ ب).



شکل ۸. الف) مدل رقومی ارتفاعی زمین (DEM)، ب) نقشه کلاس‌بندی شیب منطقه

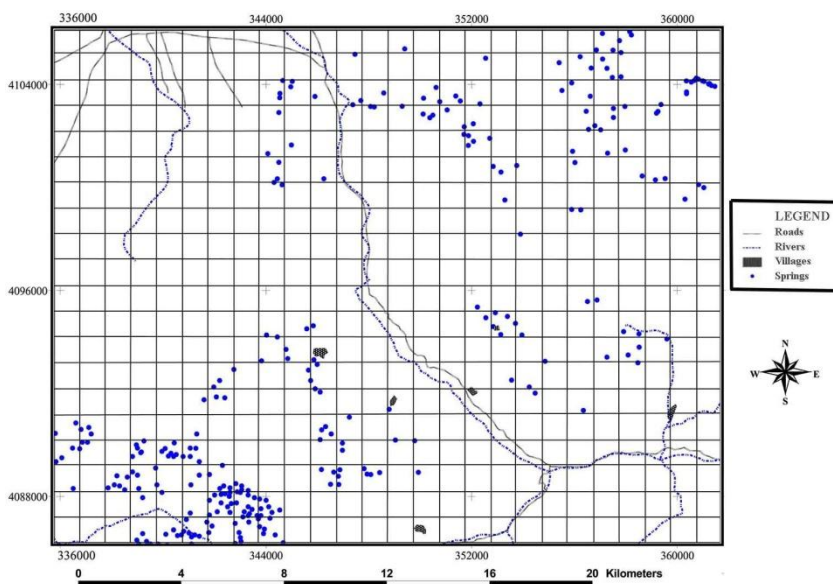
۶. لایه پوشش گیاهی: برای تهیه این لایه در محیط نرم‌افزار GIS از روش‌های سنجش از دور و پیمایش‌های صحرایی استفاده شد. به این ترتیب که با کمک تصویر ماهواره‌ای، منطقه بررسی شده از نظر نوع پوشش به پنج کلاس: جنگل انبوه، جنگل با پوشش

متوسط، جنگل با پوشش کم، زمین‌های کشاورزی و بدون پوشش گیاهی تقسیم و استخراج شد (شکل ۹ الف). سپس با استفاده از نقاط کنترلی، محدوده‌های ترسیمی اصلاح و نهایی شدند (شکل ۹ ب).



شکل ۹. الف) استخراج انواع پوشش گیاهی از تصویر ماهواره‌ای، ب) رقومی و ترسیم کردن پهنه‌های شناسایی شده

۷. لایه اطلاعات مکانی چشمه‌ها: ابتدا بانک اطلاعاتی مربوط به چشمه‌ها (تهیه شده به وسیله شرکت سهامی آب منطقه‌ای گلستان) بازبینی شد. موقعیت مکانی برخی از چشمه‌ها نیز به وسیله GPS جمع‌آوری شد. سپس جدول اطلاعاتی چشمه‌ها شامل موقعیت مکانی چشمه‌ها (با مختصات UTM^۱) و مشخصات مهم آنها در محیط اکسل با فرمت DBF4 ذخیره شد. در محیط GIS جدول مورد نظر فراخوانی شده و لایه نقطه‌ای از چشمه‌ها در محیط GIS تهیه شد (شکل ۱۰ الف). در ادامه، برای تهیه نقشه تراکم چشمه‌ها، در شبکه تهیه شده با سلول‌های 1000×1000 متر تعداد چشمه‌های موجود در واحد هر سلول محاسبه شده و به جدول اطلاعات لایه برداری مورد نظر افزوده شد. سپس نقشه تراکم چشمه‌ها نیز به صورت سطوح هم‌پتانسیل ترسیم شد (رجوع شود به شکل ۱۱).



شکل ۱۰. لایه اطلاعاتی از وضعیت پراکنش چشمه‌ها در هر پیکسل 1000×1000 متر در منطقه

1 - Universal Transverse Mercator

بررسی لایه‌های اطلاعاتی

۱. **بررسی وضعیت لیتولوژی:** عمده‌ترین رخنمون سنگی در منطقه مربوط به گروه شمشک است (شکل ۲) که در بخش‌های مرکزی و جنوبی رخنمون یافته است. این گروه که از توالی شیل، مارن و ماسه‌سنگ تشکیل یافته است، بسیار نرم و فرسایش‌پذیر بوده است و عمده زمین‌لغزش‌ها در این سازند رخ داده‌اند. ارتفاعات منطقه عمدتاً از سازند آهکی لار تشکیل شده که بسیار سخت و مقاوم به فرسایش هستند. این سازند عمدتاً در بخش شمالی منطقه رخنمون دارد. نهشته‌های کواترنر نیز بیش‌تر پیرامون دره اصلی منطقه که رودخانه تیل‌آباد در آن جریان دارد، مشاهده می‌شوند.

۲. **بررسی وضعیت ساختاری منطقه:** ناحیه بررسی شده دچار گسلش شده و شبکه‌ای از شکستگی‌های پیچیده را به نمایش می‌گذارد. به‌همین دلیل، عمده‌ترین ساختارهای موجود در منطقه شامل گسل‌ها و درزه‌ها است. در منطقه بررسی شده چهار پهنه گسل اصلی وطن، فارسین، قشلاق و تیل‌آباد وجود دارند که چهارچوب ساختاری منطقه را رقم زده‌اند (شکل ۳). گسل وطن با طول ۲۵ کیلومتر به‌صورت اریب بخش شرق-شمال‌شرقی منطقه را بریده است. مکانیسم این گسل این معکوس با مقداری مؤلفه راست‌الغز چپ‌بر است. گسل فارسین با طول ۲۰ کیلومتر و امتداد شمالی-جنوبی در شرق منطقه بررسی شده قرار گرفته است. مکانیسم حرکتی این گسل راست‌الغز راست‌بر با مقداری مؤلفه معکوس است. گسل تیل‌آباد با طول ۲۶ کیلومتر با امتداد شرقی-غربی در جنوب منطقه بررسی شده قرار گرفته است و مکانیسم حرکتی این گسل معکوس با مقدار کمی مؤلفه راست‌الغز چپ‌بر است.

۳. **بررسی وضعیت لرزه‌خیزی منطقه:** بررسی وضعیت فضایی کانون زلزله‌های رخ داده نشان می‌دهد که کانون زلزله‌های منطقه به‌صورت نوار پهنی با امتداد شمال‌شرق-جنوب‌غربی (موازی با امتداد گسل وطن) رخ داده‌اند. روستاهای وطن، نرگس‌چال و رحیم‌آباد درون این پهنه قرار گرفته‌اند. عمده زلزله‌ها دارای بزرگای ۵-۳ است. تنها زلزله تاریخی ثبت شده در منطقه در محل برخورد این پهنه از زلزله‌ها با گسل فارسین (شمال روستای

فارسیان) رخ داده است. به نظر می‌رسد که بیش‌ترین زمین لغزش‌ها در درون این پهنه از کانون‌های زلزله رخ داده باشند (شکل ۵).

۴. **بررسی زمین لغزش‌های موجود:** بررسی وضعیت فضایی پراکنش زمین لغزش‌هایی که قبلاً رخ داده‌اند (شکل ۶)، نشان می‌دهد که زمین لغزش‌ها در منطقه بررسی شده ظاهراً به صورت پراکنده دیده می‌شوند اما با کمی دقت معلوم می‌شود که عمده زمین لغزش‌ها به صورت نواری پهن با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی گسترش یافته‌اند. بزرگ‌ترین زمین لغزش‌ها در بخش مرکزی این نوار در حدفاصل وطن- نرگس چال- رحیم آباد قرار گرفته‌اند (شکل ۷).

۵. **بررسی وضعیت شیب:** بررسی وضعیت شیب منطقه در مدل رقومی ارتفاعی و هم‌چنین وضعیت کلاس‌بندی شیب (شکل ۸) نشان می‌دهد که بیش‌ترین شیب مربوط به بخش غرب- شمال غربی است که مربوط به صخره‌های گسلی درون زون گسله وطن است. در درجه دوم وجود سازند آهکی صخره ساز لار در ارتفاعات، در حالی که در پایین‌دست آنها سازند نرم و شکل پذیر شمشک قرار گرفته است، شرایطی را فراهم کرده که در گذر از ارتفاعات به سمت دره رودخانه تیل آباد، بخش‌های بالایی دره شیب زیادی دارند.

۶. **بررسی وضعیت پوشش گیاهی:** بررسی وضعیت پوشش گیاهی در نقشه تهیه شده (شکل ۹) نشان می‌دهد که عمده پوشش گیاهی در ارتفاعات میانی (روی سازند شمشک) است. در حالی که بخش بالایی ارتفاعات به دلیل وجود سازند مقاوم لار، خاک کم ضخامتی تشکیل شده و به همین دلیل رشد درختان بسیار کم صورت پذیرفته است این بخش در رده دارای پوشش کم جنگلی تا بدون پوشش قرار می‌گیرد (شکل ۹). در اطراف رودخانه روی تراس‌های آبرفتی پیرامون رودخانه، کشاورزی انجام شده و پوشش به صورت زمین‌های کشاورزی است.

۷. **بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی:** به دلیل این‌که عمده منطقه دارای پوشش سنگی بوده است و به غیر از کف و در حریم رودخانه‌ها، پوشش آبرفتی چشم‌گیری وجود ندارد، عملاً تشکیل آبخوان‌های عمده آبرفتی غیرممکن بوده است. به همین دلیل، برای بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی باید به پراکنش چشمه‌ها توجه شود. بررسی وضعیت فضایی

پراکنش چشمه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۱۰) که عمده چشمه‌ها در بخش‌های جنوب‌غربی و شمال‌شرقی (منطبق بر رخنمون سازندهای لار و دلیچای) در طول نواری است که بیش‌ترین کانون‌های زلزله و زمین‌لغزش‌های رخ داده، در آن قرار می‌گیرند. به خط‌شدگی چشمه‌ها در طول گسل‌های اصلی حکایت از آن دارد که این چشمه‌ها احتمالاً مرتبط با زون‌های گسلش بوده و این ساختارها در کنترل محل تظاهر چشمه‌ها نقش داشته باشند.

وزن‌دهی و کلاس‌بندی لایه‌های اطلاعاتی:

پس از تهیه لایه‌های مورد نیاز از وضعیت ساختارها، لیتولوژی، شیب، پوشش گیاهی، لرزه‌خیزی، آب‌های زیرزمینی و زمین‌لغزش‌های به‌وقوع پیوسته قدیمی در منطقه، براساس خصوصیات هر لایه، وزن‌دهی به‌کمیت محتوای هر لایه بر اساس قضاوت مهندسی و در نظر گرفتن واقعیت‌های موجود انجام گرفت [۱۷] (جدول ۱). در این پژوهش از منطق بولین برای مکانیابی معیارها استفاده شد. زیرا با توجه به قضاوت کارشناسی انجام گرفته، تفکیک لایه‌های اطلاعاتی و دادن وزن‌های متفاوت به آنها تقریباً غیرممکن است. هم‌چنین، با توجه این که هدف اصلی پژوهش این است که پس از پهنه‌بندی لغزش نسبت به اهمیت لایه ساختاری قضاوت شود، عملاً در نظر گرفته منطقی دیگر و داشتن سیستم وزن‌دهی غیریکسان سبب خطا در این مورد می‌شود.

هم‌چنین کل سطح منطقه به پیکسل‌هایی^۱ با فواصل 1000×1000 متری شبکه‌بندی شد. هر لایه یک جدول همراه خود^۲ (Table Attribute) داشته که وزن هر پیکسل در داخل آن ثبت شد. در نهایت بر اساس این وزن‌دهی، اقدام به تهیه نقشه تراکم مقادیر (پارامترها) برای هر لایه اطلاعاتی شد (شکل ۱۱ الف تا ز).

نقشه‌های ذکرشده بر اساس تراکم موجود و تأثیری که بر ایجاد زمین‌لغزش در منطقه دارا بودند به پنج رده (وزن) ذیل تقسیم شدند:

- تراکم خیلی بالا، دارای بالاترین وزن و بالاترین ریسک (عدد وزنی = ۵) شد.

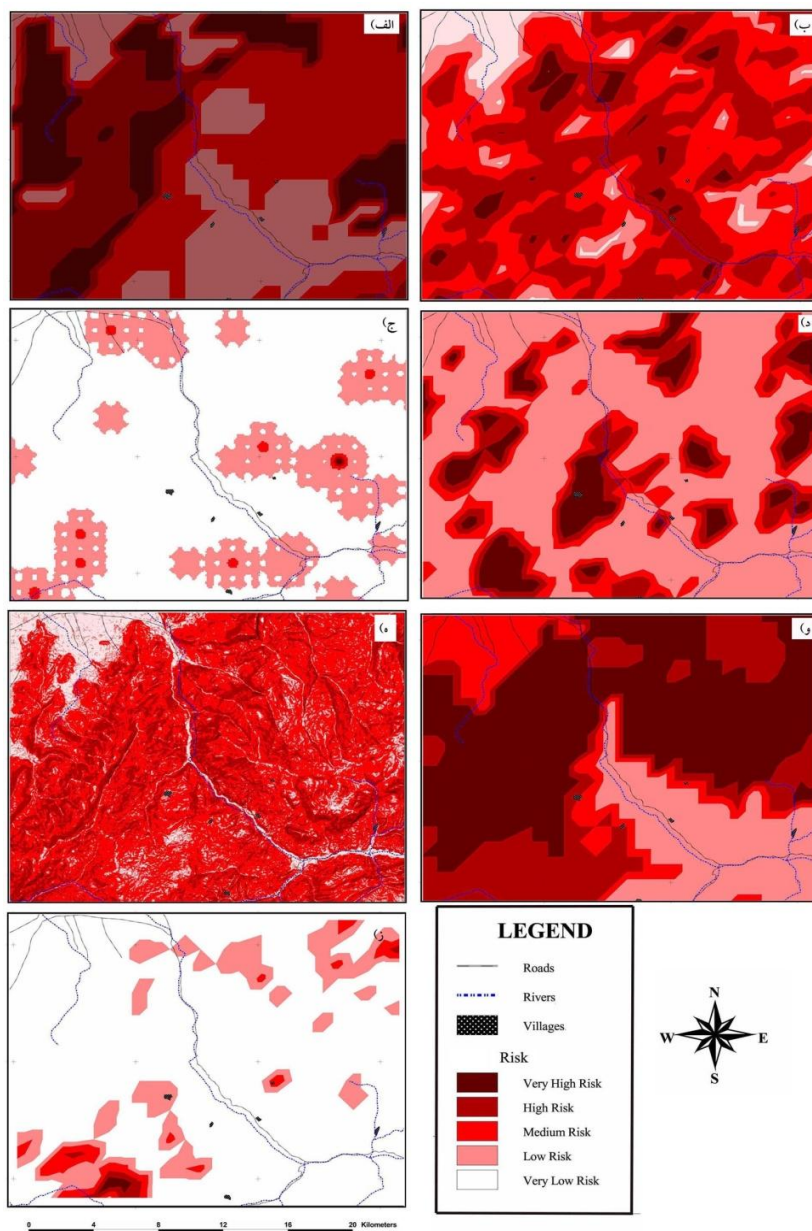
1. Pixels

2. Attribute Table

- تراکم بالا، دارای وزن بالا و ریسک بالا (عدد وزنی = ۴) شد.
- تراکم متوسط، دارای وزن متوسط و ریسک متوسط (عدد وزنی = ۳) شد.
- تراکم کم، دارای وزن کم و ریسک کم (عدد وزنی = ۲) شد.
- تراکم خیلی کم، دارای وزن خیلی کم و ریسک خیلی کم (عدد وزنی = ۱) شد.

جدول ۱. وزن‌دهی به کمیت محتوای هر لایه بر اساس قضاوت مهندسی و در نظر گرفتن واقعیت‌های موجود

کلاس ۱ (ریسک خیلی کم)	کلاس ۲ (ریسک کم)	کلاس ۳ (ریسک متوسط)	کلاس ۴ (ریسک زیاد)	کلاس ۵ (ریسک خیلی زیاد)	وزن‌دهی (ریسک) لایه مورد نظر
آهک‌های میلا، روته، الیکا و لار	سنگ‌های آذرین بعضاً آلتره شده	سازند خوش ییلاق (عمدتاً بخش‌های آواری)	سازند شمشک (بخش‌های شیلی و مارنی)	رسوبات کواترنری	لیتولوژی (جنس لایه‌ها)
۰-۱۰۰	۱۰۰-۵۰۰	۵۰۰-۱۵۰۰	۱۵۰۰-۳۰۰۰	۴۷۰۰- ۳۰۰۰	ساختارها (طول گسلش-متر)
۰-۵	۶-۱۰	۱۱-۲۵	۲۶-۴۵	۴۶-۹۰	شیب (درجه شیب)
جنگلی متراکم	نیمه انبوه جنگلی	کم پشت جنگلی	زمین‌های کشاورزی	بدون پوشش	نوع پوشش گیاهی
بدون کانون زلزله	با کانون‌هایی با بزرگای ۲	با کانون‌هایی با بزرگای ۳	با کانون‌هایی با بزرگای ۴	با کانون- هایی با بزرگای ۵	لرزه‌خیزی (بزرگا و الگوی فضایی)
بدون چشمه	۱-۳ چشمه	۳-۶ چشمه	۶-۹ چشمه	۹-۱۲ چشمه	آب‌های زیرزمینی (پراکنش چشمه‌ها)
> ۵٪	۶-۲۵٪	۲۶-۵۰٪	۵۱-۷۵٪	۷۶-۱۰۰٪	زمین لغزش‌ها (سطح اشغالی)



شکل ۱۱. تهیه نقشه‌های وضعیت هر کدام از لایه‌های اطلاعاتی بر اساس وزندهی و کلاس‌بندی انجام شده برای لایه‌های: الف) لیتولوژی، ب) گسل‌ها، ج) لرزه‌خیزی، د) زمین‌لغزش‌های قدیمی، ه) شیب، و) پوشش گیاهی، ز) پراکنش چشمه‌ها

تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش

در این پژوهش از منطق بولین برای مکان‌یابی معیارها استفاده شد. زیرا با توجه به قضاوت کارشناسی انجام گرفته، تفکیک لایه‌های اطلاعاتی و دادن وزن‌های متفاوت به آنها تقریباً غیرممکن است. هم‌چنین، با توجه این که هدف اصلی پژوهش این است که پس از پهنه‌بندی لغزش نسبت به اهمیت لایه ساختاری قضاوت شود، عملاً در نظر گرفته منطقی دیگر و داشتن سیستم وزن‌دهی غیریکسان سبب خطا در این مورد می‌شود. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS اقدام به‌روی هم قرار دادن لایه‌های برداری ایجاد شده، شد. با توجه به مطالب ذکر شده، هر لایه دارای پنج رده وزنی: ریسک خیلی بالا (۵)، بالا (۴)، متوسط (۳)، پائین (۲) و خیلی پایین (۱) شدند. پس از روی هم قرار دادن لایه‌ها، اقدام به جمع جبری مقادیر وزن لایه‌های مختلف در هر پیکسل (هر سلول شبکه) شد که بالطبع برای هر سلول جمع یاد شده در یک طیف عددی ۳۵-۷ قرار گرفت (شکل ۱۲). سپس طیف یاد شده به پنج رده ریسک دارای وزن‌های مشخص، تقسیم‌بندی شد [۱۹] که عبارت از گروه‌های ذیل است:

- ریسک خیلی زیاد (۳۵-۳۱)

- ریسک زیاد (۳۰-۲۵)

- ریسک متوسط (۲۴-۱۹)

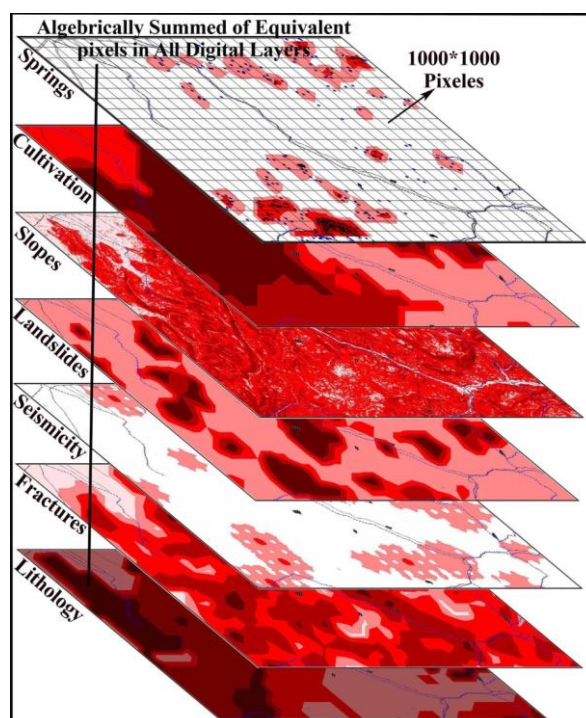
- ریسک کم (۱۸-۱۳)

- ریسک خیلی کم (۱۲-۷)

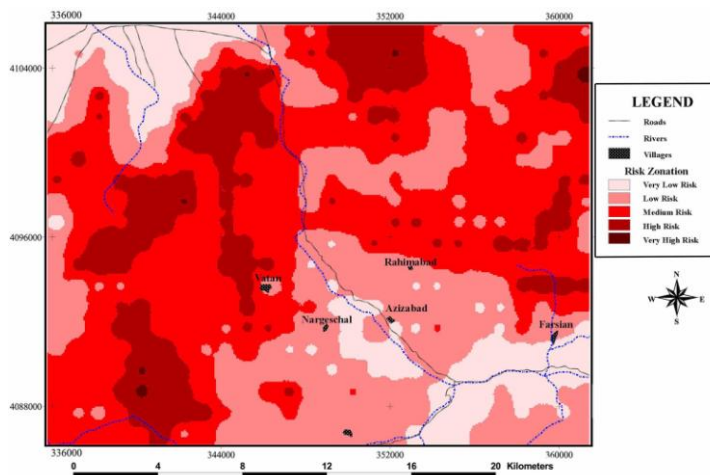
سپس بر اساس جمع جبری مقادیر در لایه‌های مختلف هر سلول، اقدام به تهیه سطوح هم‌پتانسیل شد و به این ترتیب نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش تهیه شد (شکل ۱۳).

با توجه به نقشه خطر زمین لغزش تهیه شده برای منطقه بررسی شده، می‌توان به این نتیجه رسید که الگوی بیش‌ترین تمرکز خطر زمین لغزش در دو امتداد است که عبارتند از: الف) نوار پهنی با امتداد شمال‌شرق- جنوب‌غربی در بخش شمالی منطقه که بر زون گسلیده‌ای است که هم‌روند با گسل وطن است (شکل ۳ و ۴) منطبق شده است و ب) دو روند شمالی- جنوب در بخش‌های غربی و شرقی منطقه که بر گسل‌هایی نظیر گسل فارس‌یان

و قشلاق منطبق هستند (شکل ۱۳). روند اول هم‌چنین منطبق بر تراکم چشمه‌ها (شکل ۱۰) و زمین‌لغزش‌های قدیمی (شکل ۷) و رخنمون‌های سنگی عمدتاً از نوع شیلی و مارنی سازند شمشک (شکل ۲) هستند. بیش‌ترین ریسک خطر زمین‌لغزش در بخش‌های جنوب غربی (رودبار قشلاق)، غربی (محدوده وطن-نرگس چال) و تا حدودی شمالی منطقه (جنوب سوسرا) دیده می‌شوند. کم‌ترین ریسک خطر زمین‌لغزش در بخش مرکزی است که علیرغم این‌که پوشش ندارند، چون شیب کم بوده است و واحدهای سنگی مقاوم (نظیر سازندهای آهکی) دارند، ریسک خطر کم شده است.



شکل ۱۲. روی هم انداختن لایه‌ها در محیط GIS و جمع جبری مقادیر هر پکسل برای تمامی لایه‌ها

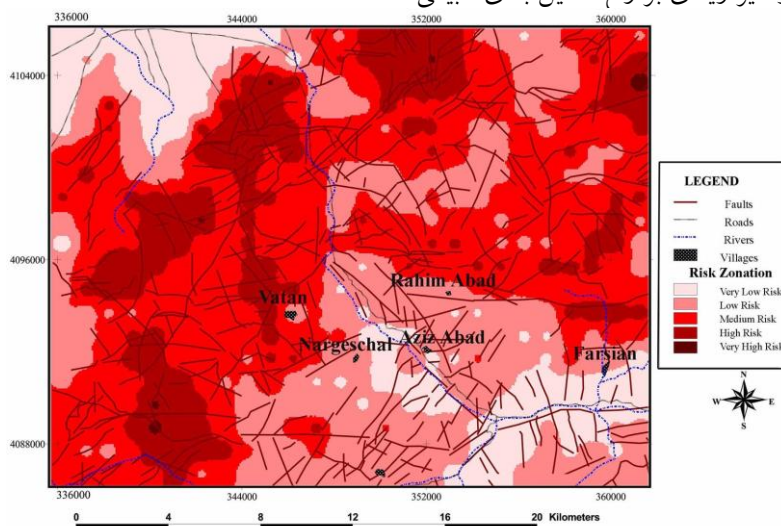


شکل ۱۳. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه نرگس چال و پیرامون

بررسی وزن عوامل ساختاری بر وقوع زمین لغزش‌ها

با کمک قابلیت‌های محیط GIS، می‌توان محل گسل‌ها را از نظر موقعیت فضایی با نقشه پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در منطقه کنترل و مقایسه کرد (شکل ۱۴). با این مقایسه متوجه می‌شویم که الگوی فضایی بیش‌ترین خطرات زمین لغزش در دو امتداد شمال‌شرق-جنوب-غربی (در بخش شمالی منطقه) شمالی-جنوب (در بخش‌های غربی و شرقی منطقه) است (شکل ۱۳). [۳]، [۴]. این الگوی نواری منطبق بر زون‌های گسلیده‌ای است که هم‌روند با گسل‌های وطن، فارسین و قشلاق بوده است و هم‌چنین منطبق بر تراکم چشمه‌ها و زمین-لغزش‌های قدیمی و رخنمون سازند شمشک است. با توجه به این‌که شیب‌های تند بر محل صخره‌های گسلی منطبق است، می‌توان نتیجه گرفت که گسل‌ها با ایجاد شیب‌های تند و مناطق خردشده و نامقاوم به‌طور غیرمستقیم تأثیر به‌سزایی در رخداد زمین لغزش در منطقه داشته‌اند. شاید به‌همین دلیل باشد که الگوی بیش‌ترین خطر زمین لغزش هم امتداد با گسل‌های اصلی نظیر گسل‌های وطن، قشلاق و فارسین بوده است. هم‌چنین الگوی فضایی پراکنش محل کانون‌های زلزله و محل چشمه‌ها نیز از این روندها پیروی می‌کنند. به‌همین دلیل

می‌توان نتیجه گرفت که عوامل ساختاری نظیر گسل‌های اصلی (و سایر شکستگی‌های مرتبط با آنها) به‌طور غیرمستقیم، با ایجاد شیب‌های تند، ایجاد مناطق خردشده و نامقاوم، ایجاد مناطق چشمه‌سار و ایجاد زلزله‌ها، تعیین‌کننده الگوی پراکنش بیش‌ترین خطر زمین‌لغزش است و تأثیر زیادی بر رخداد این بلای طبیعی داشته‌اند.



شکل ۱۴. نقشه در برگرفته پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و گسل‌های اصلی منطقه نرگس‌چال برای بررسی ارتباط فضایی گسلش و ایجاد پهنه‌هایی با ریسک خطر بالای زمین‌لغزش

نتیجه‌گیری

یکی از مناطق مستعد زمین‌لغزش در البرز شرقی منطقه نرگس‌چال است که در حفاصل روستاهای وطن-نرگس‌چال-قشلاق-فارسیان قرار داشته و به تازگی در آن زمین‌لغزش روستای نرگس‌چال رخ داده است. به‌کمک روش‌های سنجش از دور و هم‌چنین مشاهدات و اندازه‌گیری‌های صحرایی اقدام به بررسی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش‌ها در این منطقه شده و در این راستا هفت لایه اطلاعاتی برداری تهیه شده و در محیط GIS با روی هم‌قرار آنها اقدام به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش شد. نتایج حاصل از بررسی نقشه پهنه‌بندی خطر زمین-لغزش تهیه شده، نشان می‌دهد که الگوی فضایی بیش‌ترین خطرات زمین‌لغزش به‌صورت

نوارهایی با امتدادهای شمال شرق-جنوب غربی و شمالی-جنوبی قابل مشاهده است. این نوارها منطبق بر زون گسلیده‌ای است که هم‌روند با گسل وطن، قشلاق و فارسیان است و هم‌چنین منطبق بر تراکم چشمه‌ها و زمین لغزش‌های قدیمی و رخنمون سازند شمشک است. بیش‌ترین ریسک خطر زمین لغزش در بخش‌های جنوب غربی (رودبار قشلاق)، غربی (محدوده وطن-نرگس چال) و تا حدودی شمالی در منطقه بررسی شده دیده می‌شوند و کم‌ترین ریسک خطر زمین لغزش در بخش مرکزی است که علت آن شیب کم توپوگرافی و وجود واحدهای سنگی مقاوم است.

هم‌چنین، نتایج حاصل از بررسی اثر شکستگی‌ها (به‌عنوان عوامل ساختاری) بر پهنه‌بندی خطر زمین لغزش نشان می‌دهد که عوامل ساختاری نظیر گسل‌های اصلی (و شکستگی‌های رده دوم مرتبط با آنها) به‌طور غیرمستقیم، با ایجاد شیب‌های تند، ایجاد مناطق خردشده و نامقاوم، ایجاد مناطق چشمه‌سار و ایجاد زلزله‌ها، تعیین‌کننده الگوی پراکنش بیش‌ترین خطر زمین لغزش است و تأثیر زیادی بر رخداد این بلای طبیعی داشته‌اند.

منابع

۱. آقائاتی ع.، "زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (۱۳۸۳) ۵۸۶.
۲. علوی پناه س. ک.، "کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک)"، انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۸۲).
۳. قجقی ا.، "تأثیر عوامل ساختاری بر زمین لغزش‌های منطقه نرگس چال"، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه گلستان، (۱۳۹۶) ۱۱۶.
۴. قجقی ا.، صفری ح.، رضایی ح.، "بررسی اثر گسلش بر زمین لغزش‌های یال شمالی البرز شرقی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS"، سی و چهارمین گردهمایی علوم زمین، تهران (۱۳۹۵).
۵. شریعت جعفری م.، "زمین لغزش: مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی"، انتشارات سازه، (۱۳۷۵) ۲۰۰.

۶. حق‌شناس ا.، "پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ارتباط آن با تولید رسوب در طالقان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۷۵) ۱۸۳.
۷. حائری س. م.، سمیعی ا. ج.، "روش جدید پهنه‌بندی مناطق شیب‌دار در برابر خطر زمین‌لغزش با تأکید بر پهنه‌های مازندران"، فصلنامه علوم زمین، سال ششم، شماره ۲۴-۲۳ (۱۳۷۶) ۱۵-۲.
۸. حافظی مقدس ن.، "پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در مناطق لرزه‌خیز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۷۲).
۹. محمدخان ش.، "ارائه مدل منطقه‌ای پهنه‌بندی خطر حرکات دامنه‌ای، مطالعه موردی: حوضه آبخیز طالقان"، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران (۱۳۸۰).
10. Allen M., Jackson J., Walker R., "Late Cenozoic reorganization of the Arabia- Eurasia collision & comparison of short- term & long-term deformation rates", Tectonic Journal, No: 23, TC 2008, doi: 10.1029/2003 TC001530 (2004).
11. Allen M. B., Ghassemi M. R., Shahrabi M., Qorashi M., "Accommodation of Late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, Northern Iran", Journal of structural Geology., No. 25 (2003) 659-672.
12. Anbalagan and manag point, "Landslide hazard mapping based on geological attributec" (1991).
13. Berberian M., Yeats R. S., "Patterns of Historical Earthquake Rupture in Iranian Plateau", Bull. Seim. Am. 89 (1999) 120-139.
14. Djamour Y., Vernant P., Bayer R., Nankali H. R., Ritz J., Hinderer J., Hatam Y., Luck B., Moigne N., Sedighi M., Khorrami F., "GPS & gravity constraints on continental deformation in the Alborz mountain range", Iran, Geophysical Journal International, No.183 (2010) 1287-1301.

15. De Mets C., Gordon R. G., Argus D. F., Stein S., "Current Plate Motions", International Journal of Geophysics, No. 101 (1990) 425- 478.
16. Gorshkov A. L., Mokhtari M., Piotrovskaya E. P., "The Alborz Region: Identification of Seismogenic Nodes with Morphostructural Zoning & Pattern Recognition", Spring Journal, Vol: 11, No: 1 (2009) 1- 15.
17. Gupta R. P., Jushi B. C., "Landslide hazard zoning using the GIS approach-A case study from the ramanga catchment", Himalaya, Engineering geology, 28 (1990) 119-137.
18. Jackson J. A., Priestley K., Allen M. B., Berberian M., "Active tectonics of the South Caspian Basin", Geophysical Journal International 148 (2002) 214-245.
19. Safari H., Khedri Gharibvand L., "Gas leakage hazard zonation of Masjed-i-Soleiman area, Zagros, Iran, using GiT", Natural Hazards, DOI 10.1007/s11069-015-2022-1, Vol. 80, (2016)1257-1278.
20. Safari H, Gholami M, "Tectonic Evolution of Southern Limb of Eastern Alborz, Iran" International Geoinformatics Research Development Journal. Vol: 2, Issue: 1 (2011) 1-13.
21. Sabins Floyd F., "Remote sensing principle and interpretation" W. H. Freeman and company, New York, (1996) 119-176.
22. Stocklin J., "North Iran: Alborz Mountains" Geological Society of London, Special Publications, Vol: 4, (1974) 213- 2334.
23. Mora S., Vahrson, W. G., "Determinacion "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinamicos", Tecnologia, No. 1, Vol. 3 (1993) 32

24. United States Geological Survey (USGS), "The landslide handbook: a guide to understanding landslides", report No. 1325, by: Highland, L.M. and Bobrowski, P., (2008) 129.
25. Varnes D. J., "Movement types and process, in Schuster, R.L., Krizek, R.J., eds, Landslides analysis and control", Transportation research board, Special report No. 176, National Research Council, Washington, (1978) 11-23.