

جغرافیا و توسعه شماره ۵۵ تابستان ۱۳۹۸

وصول مقاله : ۹۶/۰۸/۰۵

تأیید نهایی : ۹۷/۰۳/۱۶

صفحات: ۱۷۴-۱۵۳

پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه و زمین‌لغزش به روش منطق فازی در رشته‌کوه باقران (جنوب بیرجند)

دکتر مهدی حسین آبادی^{۱*}، دکتر سیدمرتضی موسوی^۲، دکتر محمد ناظمی^۳

چکیده

زمین‌لغزش و زمین‌لرزه از مخاطرات طبیعی هستند که هر ساله باعث ایجاد خسارت‌های جانی و مالی فراوانی در سطح کشور شده‌اند. در این تحقیق پس از تهیه نقشه زمین‌لغزش‌ها با استفاده از کارهای میدانی و نقشه‌های زمین‌شناسی، عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لرزه و زمین‌لغزش در کوه باقران تهیه و تراکم سطح آن‌ها (وزن داخلی) محاسبه شد. مقایسات زوجی بین این پارامترها صورت گرفت و در این زمینه پارامترهای مؤثر، اولویت‌بندی شد. در مرحله بعدی با استفاده از منطق فازی، درجه عضویت پارامترها مشخص شد و در پایان با هم تلفیق شدند. از بین عوامل مؤثر بر زمین‌لرزه، پارامتر هم‌شتاب بیشترین وزن را داشت و از بین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، پارامتر هم‌شتاب لرزه‌ای و فاصله از گسل بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند. براساس نقشه‌های خروجی فازی زمین‌لرزه مشخص شد که جمع جبری فازی بهترین تطابق را با پراکنش زمین‌لرزه در منطقه دارد؛ به طوری که ۴۲ درصد از منطقه در کلاس خطر زیاد و خیلی‌زیاد زمین‌لرزه قرار دارد. در پایان پس از تلفیق نقشه‌های حاصل از زمین‌لغزش و زمین‌لرزه مشخص شد که جمع جبری فازی بهترین تطابق را دارد که به ترتیب ۰/۲۶، ۰/۱۹، ۰/۲۲، ۰/۲۱، ۰/۱۲ و ۰/۱۲ درصد از منطقه در کلاس‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد نهایی حاصل از تلفیق زمین‌لرزه و زمین‌لغزش قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: مقایسات زوجی، منطق فازی، درجه عضویت فازی، اپراتورهای فازی، آنالیز شبکه، کوه باقران.

mhsedi1355@gmail.com

mmoussavi@birjand.ac.ir

nazemigeo@gmail.com

۱- استادیار زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی طبس، طبس، ایران *

۲- استادیار زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- استادیار زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی طبس، طبس، ایران

مقدمه

- بیان مسأله و سؤالات تحقیق

زمین‌لرزه‌ها و زمین‌لغزش‌ها همواره جزو مهم‌ترین مخاطرات طبیعی هستند که هر ساله تعداد بسیاری از مردم جهان، گرفتار آثار نامطلوب آن می‌شوند. برای کاهش تلفات جانی و اقتصادی و تبعات اجتماعی آن ضروری است که براساس دانش کنونی و آخرین فناوری‌های قابل‌اعتماد، از خطر وقوع زمین‌لرزه در نقاط مختلف، شناختی دقیق به‌دست آورد. قدم اول و مهم در تجزیه و تحلیل خطر لرزه‌ای، راهبرد کاهش استقرار جمعیت در مناطق پرخطر است. هر چند پیش‌بینی دقیق این مخاطره بزرگ طبیعی به‌صورت قطعی ممکن نیست؛ ولی تعیین احتمالی مکان رخداد یک زلزله یا مکان‌های احتمالی وقوع زمین‌لغزش امکان‌پذیر است؛ بنابراین ضرورت پهنه‌بندی آشکار می‌شود. قابلیت اعتماد این نقشه تا حد زیادی به کیفیت داده‌های در دسترس، مقیاس مطالعه، انتخاب یک روش و مدل‌سازی مناسب بستگی دارد. این نقشه‌ها ممکن است به روش‌های کمی یا کیفی تهیه شود. روش‌های کیفی عموماً مبتنی بر عقیده کارشناسی هستند؛ اما در برخی از روش‌های کیفی از اصول رتبه‌دهی و وزن‌دهی به پارامترها بهره گرفته شده‌است. این روش‌ها طبیعت شبه کمی دارند. نمونه‌هایی از این روش‌ها استفاده از روش ANP یا منطق فازی است (کوره‌پزان دزفولی، ۱۳۸۴: ۱۸۱-۱۷۰). گسل‌های امتدادلغز راستگرد (مانند گسل‌های نه شرقی، نه غربی، اسماعیل‌آباد، پرنگ) با راستای شمالی-جنوبی در عرض‌های پایین‌تر از ۳۴ درجه و گسل‌های راندگی با مؤلفه امتدادلغز چپگرد (گسل‌های دشت بیاض و درونه باختری) با راستای خاوری-باختری در عرض‌های بالاتر از ۳۴ درجه دیده می‌شود. فعالیت هر دو روند اصلی ذکرشده سبب افزایش برشی راستگردی با روند

شمالی-جنوبی بین افغانستان و بخش مرکزی ایران می‌شود. Walker and Jackson, 2004:265-282. بررسی نقشه‌های (Allen et al., 2006:579-589). پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی (پورکرمانی، ۱۳۷۶: ۲۸۴) حاکی از آن است که این منطقه از پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی برخوردار است و زمین‌لرزه‌های زیادی در این منطقه روی داده‌است.

با توجه به تراکم جمعیت روستایی و ساخت‌وساز انبوهی که در این منطقه در حریم گسل‌های فعال صورت گرفته‌است، برای جلوگیری از تلفات جانی، اهمیت این پهنه‌بندی آشکار می‌شود. نقشه‌های نهایی این برآورد خطر بر مبنای مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لرزه و زمین‌لغزش در منطقه صورت می‌گیرد. در این تحقیق سؤالات زیر مطرح می‌شود:

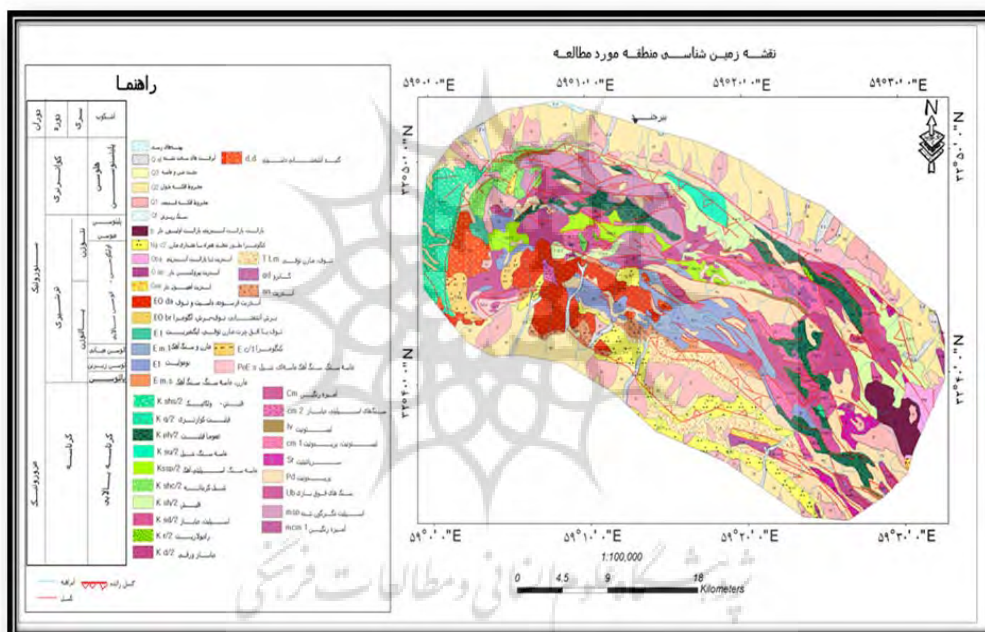
- ۱- آیا ارتباطی بین زمین‌لغزش‌ها و زمین‌لرزه در منطقه وجود دارد؟ به عبارتی دیگر، آیا مناطق با لغزش بالا منطبق با مناطق با لرزه‌خیزی بالاست؟
 - ۲- کدام یک از عوامل، مهم‌ترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش در منطقه ایفا می‌کنند؟
 - ۳- کدام یک از خروجی‌های نهایی، منطبق بر واقعیت در وقوع زمین‌لرزه و زمین‌لغزش است؟
- اهداف اصلی تحقیق عبارت‌اند از:
- شناسایی سکونتگاه‌های ناامن و هشدار برای تخلیه (در صورت امکان).
 - شناسایی سکونتگاه‌های امن به‌منظور ساخت‌وسازهای جدید.

- جایگاه زمین‌شناختی

منطقه موردنظر به وسعت حدود ۱۱۰۰ کیلومتر مربع در جنوب بیرجند واقع است (شکل ۱). کوه باقران یکی از شاخه‌های تمایل‌یافته از پهنه سیستان به داخل پهنه لوت است. ایالت ساختاری سیستان در شرق ایران با روند کلی شمالی-جنوبی نشان‌دهنده

عامل ایجاد خمیدگی‌های ساختاری در نیمه شمالی لوت هستند و خمیدگی‌های اصلی ساختاری محل فعالیت خمیدگی‌های این سیستم گسلی است (خطیب، ۱۳۷۷:۲۲۴). آمیزه‌های افیولیتی حدود ۶۰ درصد از رخنمون‌های سنگی را در این ناحیه به خود اختصاص می‌دهند و به دلیل تحمل برش زیاد و مخلوط شدن تکتونیکی، نظم بخش‌های مختلف آن از بین رفته است که شامل سنگ‌های اولترامافیک، سنگ‌های رسوبی و سنگ‌های دگرگون است (خطیب، ۱۳۶۸: ۱۶۰).

زمین درز برخوردی قطعاً لوت و افغان است (Tirrul et al, 1983:134-156) وجود سیستم گسلی نهندان در مرز بین این ایالت ساختاری و پهنه لوت موجب دگرشکلی واحدهای سنگی در حاشیه و درون ایالت ساختاری سیستان شده‌است. سیستم گسل نهندان با سازوکار غالب امتداد لغز راستگرد و روند کلی شمالی- جنوبی دارای سرشاخه‌های فرعی زیادی است. فعالیت این سیستم گسلی در مراحل مختلف و جداشدن اریب‌های پایانه‌ای در هر یک از این مراحل،



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

اوهانیان و همکاران، ۱۹۷۸ (ترسیم مجدد: نگارندگان، ۱۳۹۶)

پیشینه تحقیق

منصوری و همکاران (۱۳۹۵: ۱۱-۴۹) در مقاله خود با عنوان «پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش تحلیل سلسله‌مراتبی و منطق بولین در کوه باقران (جنوب بیرجند)» بیان کردند که فاکتورهای فرسایش، فاصله از گسل و شتاب مهم‌ترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش‌ها در منطقه بیرجند ایفا می‌کنند. همچنین بیش از ۹۵ درصد از زمین‌لغزش‌ها در رده سنگ‌های با مقاومت ضعیف و خیلی ضعیف در برابر فرسایش

قرار دارند. براساس نتایج پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش تحلیل سلسله‌مراتبی به ترتیب ۱۵، ۱۲، ۲۵، ۲۹ و ۱۹ درصد از مساحت منطقه در کلاس‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفت. بررسی گسلش فعال در بیرجند شمال شرق ایران، گسل محدوده جلویی کوه باقران در اواخر کواترنری فعال هستند (Walker and khai, 2006: 1-17).

جنبه نوآوری این تحقیق

در پهنه باقران ممکن است مناطقی باشد که در مناطق بی خطر زمین لغزش قرار گیرند، اما از نظر لرزه خیزی در مناطق با خطر بالا قرار بگیرند؛ بنابراین باید نقشه‌هایی با استفاده از تلفیق فاکتورهای مؤثر بر این دو عامل تهیه شود. مقایسات زوجی زیر نظر کارشناس انجام می‌شود و چه بسا اولویت‌بندی نامناسب منجر به تهیه نقشه‌های اشتباه شود که در برخی مطالعات قبلی رخ داده‌است. در ادامه پس از تهیه نقشه‌ها، راستی‌آزمایی نقشه‌های خروجی بر مبنای داده‌های واقعی و آماری صورت می‌گیرد تا بهترین نقشه خروجی انتخاب شود.

بحث

- تئوری منطق فازی

مفهوم منطق فازی اولین بار توسط دکتر لطفی‌زاده استاد دانشگاه کالیفرنیا در مقاله‌ای با عنوان «مجموعه‌های فازی»، در سال ۱۹۶۵ ارائه شد (Zadeh, 1965).

منطق فازی یک منطق چند مقداری است، یعنی پارامترها و متغیرهای آن علاوه بر اختیار اعداد ۰ یا ۱، می‌توانند همه مقادیر بین این دو عدد را نیز اختیار کنند. تعلق هر عضو مجموعه مرجع به یک عضو زیرمجموعه خاص، به صورت قطعی نیست؛ یعنی با قاطعیت نمی‌توان گفت که عضو مورد نظر متعلق به این مجموعه هست یا نه. این عدم قطعیت با نسبت دادن یک عدد بین ۰ و ۱ به این عضو انجام می‌گیرد. اگر این عدد برابر با ۰ باشد، می‌توان با قطعیت گفت که عضو مورد بحث متعلق به آن مجموعه نبوده و همچنین اگر این عدد ۱ باشد می‌توان ادعا کرد که عضو مورد بحث متعلق به آن مجموعه است. به این ترتیب می‌توان زیر مجموعه‌های یک مجموعه فازی را

زمین لغزش هاوانان به صورت لغزش دورانی و موضعی است که توده‌های سست و تجمع آن‌ها در نواحی پایین دست قرار دارد (محمدی، ۱۳۹۱: ۱۵۲). مهم‌ترین عوامل مؤثر در وقوع زمین لغزش‌های حوضه کشوری به ترتیب اولویت مربوط به شیب، لیتولوژی، گسل، آبراهه، جهت شیب، کاربری اراضی، ارتفاع، بارش، زمین لرزه و جاده هستند که فاصله از جاده تأثیر زیادی بر روی زمین لغزش ندارد (سوری، ۱۳۹۰: ۱۰۷).

حیدری آقاگل (۱۳۹۴: ۱۸۶) نیز با استفاده از پنج فاکتور گشتاور لرزه‌ای، هم‌شتاب، هم‌شدت شکستگی، فاصله از شکستگی و عمق آبرفت به تحلیل لرزه‌خیزی منطقه اردکول قائن پرداخت که نشان داد نرخ فعالیت گسل اردکول از شمال به جنوب منطقه افزایش می‌یابد و قسمت جنوب منطقه را به عنوان منطقه با خطر زیاد و خیلی زیاد از نظر لرزه‌خیزی معرفی کرد.

قهرمانی (۱۳۹۵: ۱۱۹) با استفاده از ۶ فاکتور گشتاور لرزه‌ای، هم‌شتاب، هم‌شدت شکستگی، فاصله از گسل، مقاومت واحدها و عمق آبرفت به تحلیل لرزه‌خیزی منطقه دهک (جنوب غرب سربیشه) پرداخت که عنوان کرد براساس پارامتر شتاب لرزه‌ای، شتابی که گسل دهک به روستاهای آن منطقه وارد می‌کند، معادل ۰/۵۸ شتاب ثقلی زمین است. نقشه‌های خروجی به دست آمده براساس اپراتورهای فازی نشان می‌دهد که نقشه حاصل از جمع جبری فازی (sum)، بیشترین انطباق را با واقعیت دارد که به ترتیب ۲۰، ۲۸، ۲۶، ۱۶ و ۱۰ درصد از منطقه در کلاس‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. در این نقشه قسمت اعظم منطقه دهک (۷۰ درصد) در کلاس خطر زیاد و خیلی بالا قرار دارد.

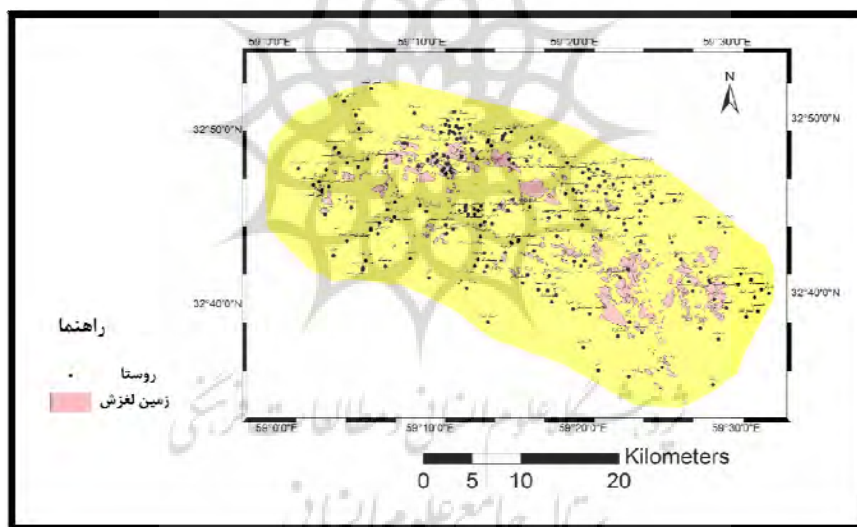
از ۹ پارامتر هم‌شتاب لرزه‌ای، هم‌شدت شکستگی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، مقاومت واحدها، توپوگرافی، شیب، جهت شیب و بارش استفاده شده است. در ادامه به معرفی پارامترها و تحلیل آماری زمین‌لرزه و زمین‌لغزش در آن‌ها می‌پردازیم. در معرفی پارامترها، منظور از وزن داخلی برای زمین‌لرزه، درصد کلاس خطر را نشان می‌دهد و برای زمین‌لغزش بیان‌کننده تراکم سطح لغزش است که از رابطه زیر استفاده شده‌است.

با نسبت‌دادن عددهای ۰ و ۱ به هر عضو مجموعه بازنمایی کرد (Champti-ray, 2007: 101-111).

- داده‌های موردنیاز

پس از بررسی منابع و یافته‌های علمی مرتبط با موضوع، با استفاده از عکس‌های گوگل‌ارث و همراه با بازدید میدانی، نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها در منطقه تهیه شد (شکل ۲) در این مطالعه برای بررسی خطر زمین‌لرزه از چهار پارامتر نقشه هم‌شتاب لرزه‌ای، هم‌شدت شکستگی، فاصله از گسل و مقاومت واحدها استفاده شد. همچنین برای بررسی خطر زمین‌لغزش

تراکم سطح زمین‌لغزش = (مساحت کل منطقه مساحت کل زمین‌لغزش‌ها) (مساحت آن کلاس مساحت لغزش در آن کلاس)



شکل ۲: نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

می‌شود، $g = 0.63$ (شتاب جاذبه زمین) برآورد شده‌است. (شکل ۳) براساس نتایج به‌دست‌آمده بیش از ۴۶ درصد منطقه در کلاس‌های خطر زیاد و خیلی زیاد از نظر لرزه‌خیزی و ۴۲ درصد از آن در کلاس‌های خطر زیاد و خیلی زیاد از نظر خطر زمین‌لغزش قرار دارد (جدول ۱).

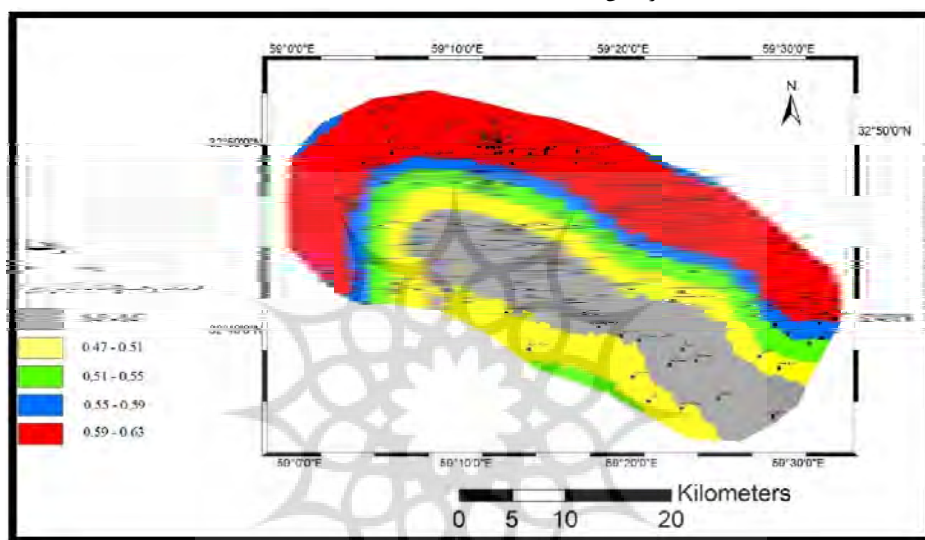
- پارامتر هم‌شتاب لرزه‌ای

به‌منظور تهیه نقشه هم‌شتاب لرزه‌ای، ابتدا گسل‌های اصلی کواترنری منطقه از طریق نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بزرگ‌مقیاس مشخص شد. سپس مقادیر بیشینه شتاب ثقل افقی وارده از طرف گسل‌های فعال نسبت به یک نقطه خاص اندازه‌گیری شد. بر این اساس بیشینه شتابی که از گسل‌های فعال بر روستاهای اطراف وارد

جدول ۱: محاسبه وزن داخلی هم‌شتاب لرزه‌ای

وزن داخلی زلزله	وزن داخلی زمین‌لغزش	کلاس خطر
۰/۲۵	۰/۱۶	خیلی کم
۰/۱۹	۰/۱۵	کم
۰/۱	۰/۲۷	متوسط
۰/۰۹	۰/۳۶	زیاد
۰/۳۷	۰/۰۶	خیلی زیاد

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۳: نقشه هم‌شتاب لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

از ابزار XTools محاسبه شد. سپس با استفاده از ابزار Geostatistical Analyst در برنامه Arc Map و از روش کریجینگ ساده با مدل برازش گوسی، نقشه شدت شکستگی برای کواترنری و غیرکواترنری تهیه شد. از نظر آماری حدود ۷۰ درصد از زمین‌لغزش‌ها در کلاس‌های تراکم زیاد و خیلی زیاد قرار دارند (جدول ۲) (شکل ۴).

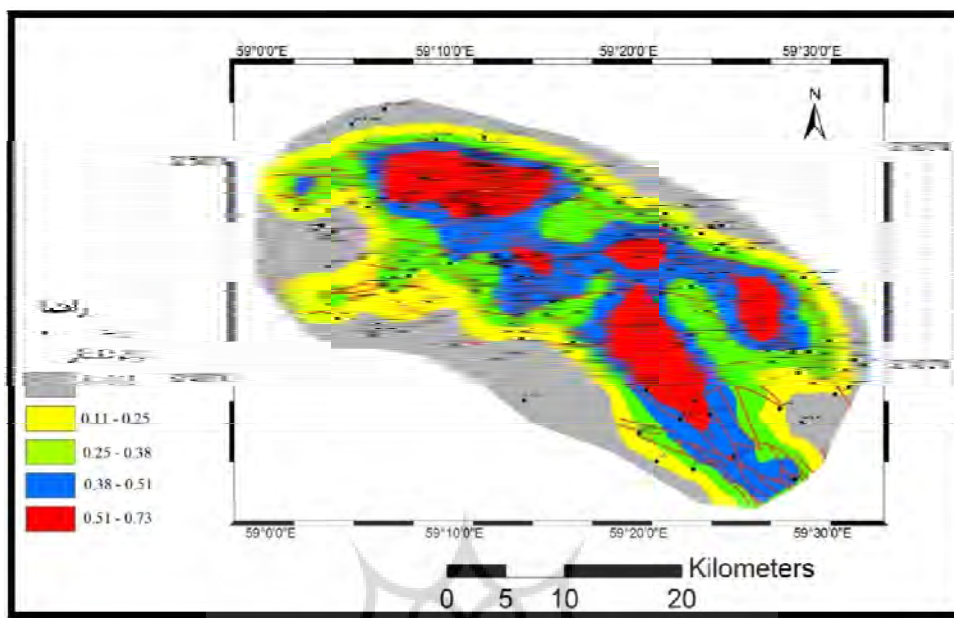
پارامتر هم‌شدت شکستگی

برای تهیه نقشه هم‌شدت شکستگی ابتدا نقشه شکستگی‌های کواترنری و غیرکواترنری منطقه از طریق نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بزرگ‌نمایی و تصاویر ماهواره‌ای تهیه شد، سپس شبکه‌ای به ضلع ۲ کیلومتری بر روی این شکستگی‌ها طراحی شد و در هر واحد شدت شکستگی در نرم‌افزار GIS و با استفاده

جدول ۲: محاسبه وزن داخلی هم‌شدت شکستگی

وزن داخلی زلزله	وزن داخلی زمین‌لغزش	تراکم شکستگی	تراکم شکستگی
۰/۲۵	۰/۰۴	خیلی کم	۰ - ۰/۱۱
۰/۱۷	۰/۰۷	کم	۰/۱۱ - ۰/۲۵
۰/۲۲	۰/۱۹	متوسط	۰/۲۵ - ۰/۳۸
۰/۲۲	۰/۲	زیاد	۰/۳۸ - ۰/۵۱
۰/۱۴	۰/۵	خیلی زیاد	۰/۵۱ - ۰/۷۳

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۴: نقشه هم‌شدت شکستگی منطقه مورد مطالعه تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

شکستگی‌های کواترنری حاصل از آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به‌همین دلیل با توجه به شیب گسل‌های محدوده، حریم برای گسل‌های منطقه ۷۰۰ متری در نظر گرفته شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، بیش از ۹۵ درصد زمین‌لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۷۰۰ متری گسل قرار دارند (جدول ۳) (شکل ۵).

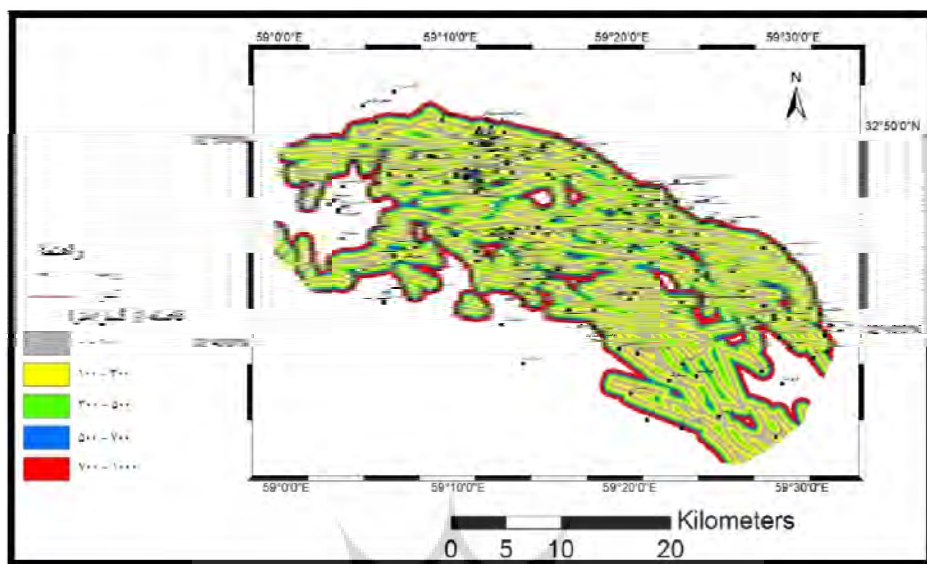
- فاصله از گسل

در اثر عملکرد یک گسل علاوه‌بر محدوده خود گسل، محدوده خارج از خود گسل را که به‌نام حریم گسل شناخته می‌شود، تحت تأثیر قرار می‌دهد. در هنگام بروز زمین‌لرزه بیشترین خسارات وارد منطقه در بخش حریم گسل قرار دارد، بنابراین تعیین حریم گسل و

جدول ۳: محاسبه وزن داخلی فاصله از گسل

فاصله از گسل (متر)	وزن داخلی زمین‌لغزش	وزن داخلی زلزله
۰-۱۰۰	۰/۲۶	۰/۲
۱۰۰-۳۰۰	۰/۲۵	۰/۲
۳۰۰-۵۰۰	۰/۲۴	۰/۱۴
۵۰۰-۷۰۰	۰/۲	۰/۰۸
>۷۰۰	۰/۰۵	۰/۳۸

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۵: نقشه فاصله از گسل در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

- مقاومت واحدها

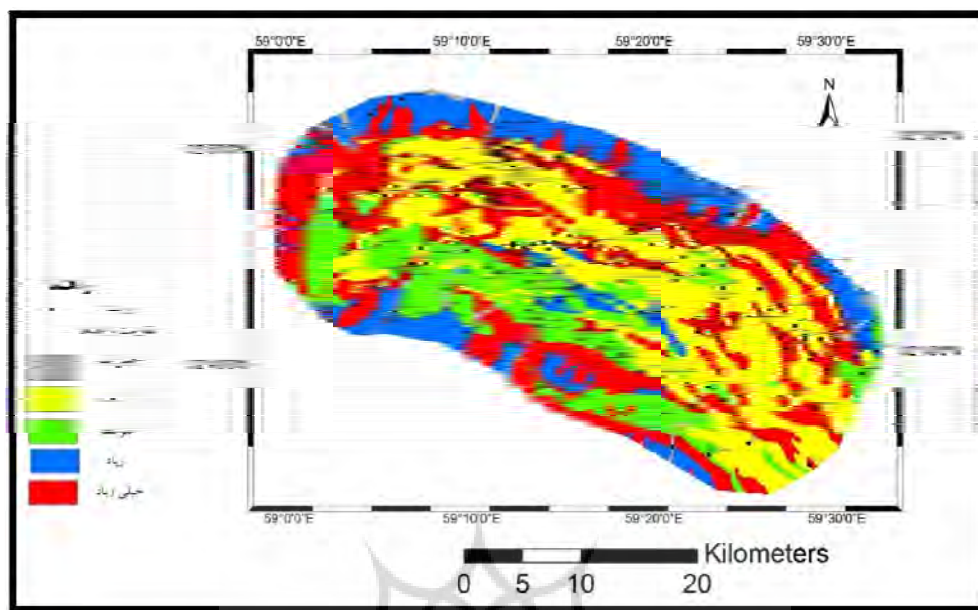
ضعیف و سنگ‌هایی همچون بازالت در رده مقاومت زیاد قرار می‌گیرند. براساس نتایج به دست آمده، قسمت عمده زمین‌لغزش‌ها در کلاس‌های خطر پایین و متوسط قرار دارد (جدول ۴) (شکل ۶).

مقاومت واحدها نیز یک پارامتر مؤثر دیگر در لرزه‌خیزی است. این تقسیم‌بندی بر مبنای مقاومت واحدها در برابر هوازدگی و میزان صلبیت واحد سنگی است. طوری که واحدهای کواترنری در رده خیلی

جدول ۴: محاسبه وزن داخلی مقاومت واحدهای سنگی

مقاومت واحدهای سنگی	وزن داخلی زمین‌لغزش	وزن داخلی زلزله
خیلی کم	۰	۰/۳۲
کم	۰/۵۶	۰/۱۶
متوسط	۰/۱۷	۰/۱۸
زیاد	۰/۰۵	۰/۳۲
خیلی زیاد	۰/۲۲	۰/۰۲

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۶: نقشه مقاومت واحدهای سنگی در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

درجه تشکیل می‌شود (جدول ۵) (شکل ۷). درصد پراکنش زمین‌لغزش براساس پارامتر جهت شیب (جدول ۶) حاکی از پراکنش تقریباً یکسان در همه راستاهاست؛ از این رو این عامل تأثیر زیادی در شکل‌گیری زمین‌لغزش ندارد و از نظر اولویت‌بندی در پارامترهای پایانی قرار می‌گیرد.

پارامترهایی که در بالا اشاره شد، هم در وقوع زمین‌لغزش و هم زمین‌لرزه تأثیر دارند؛ اما در ادامه پارامترهایی که فقط در وقوع زمین‌لغزش تأثیر دارند بیان می‌شود.

-نقشه شیب و جهت شیب

این پارامترها به نوبه خود نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش ایفا می‌کنند. براساس نتایج به دست آمده، بیش از ۸۰ درصد زمین‌لغزش‌ها در نشیب توپوگرافی ۱۰-۴۰

جدول ۵: محاسبه وزن داخلی جهت شیب

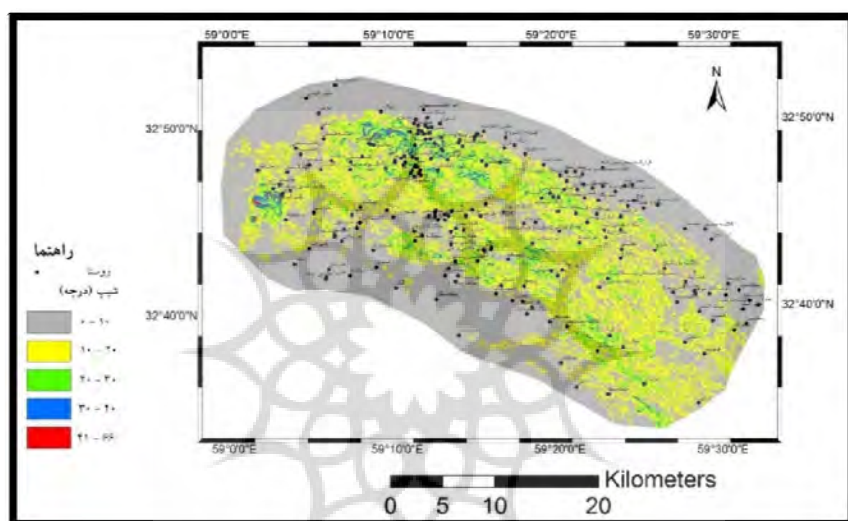
وزن داخلی زمین‌لغزش	آزیموت جهت شیب (درجه)
۰/۱۸	۰-۴۵
۰/۲۶	۴۵-۱۳۵
۰/۱۸	۱۳۵-۲۲۵
۰/۱۷	۲۲۵-۳۱۵
۰/۲۱	۳۱۵-۳۶۰

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۶: محاسبه وزن داخلی شیب

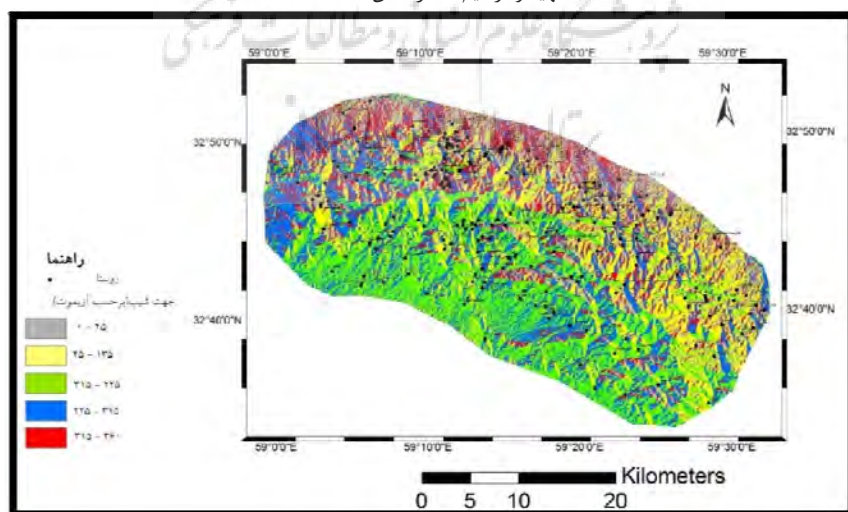
شیب توپوگرافی (درجه)	وزن داخلی زمین لغزش
۰-۱۰	۰/۰۷
۱۰-۲۰	۰/۲۷
۲۰-۳۰	۰/۳
۳۰-۴۰	۰/۲۳
۴۰-۶۶	۰/۱۳

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۷: نقشه شیب توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۸: نقشه جهت شیب توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

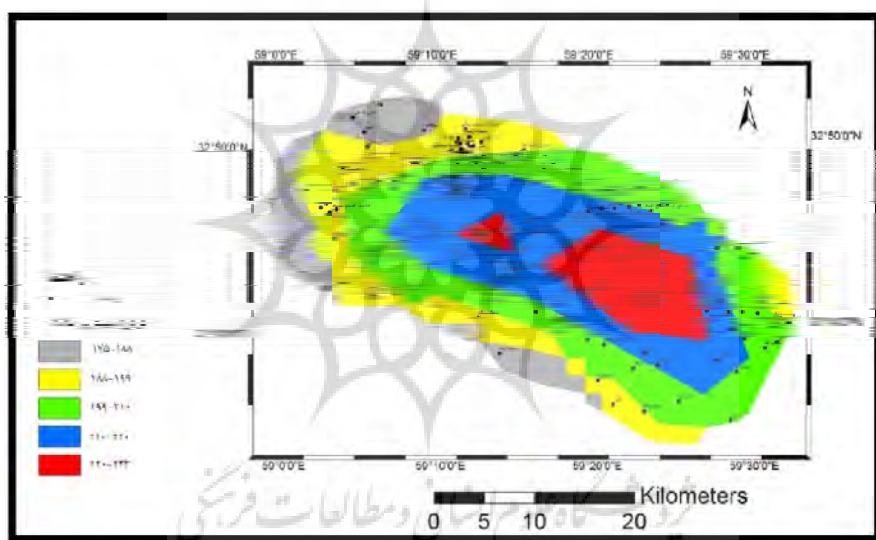
- بارش

براساس نتایج به‌دست‌آمده، منطقه مورد مطالعه محدوده بارش‌های بالای ۲۰۰ میلی‌متر در سال را شامل می‌شود (جدول ۷).

جدول ۷: محاسبه وزن داخلی بارش

وزن داخلی زمین‌لغزش	میزان بارش (میلی‌متر)
۰/۰۱	۱۷۵-۱۸۸
۰/۰۴	۱۸۸-۱۹۹
۰/۱۹	۱۹۹-۲۱۰
۰/۳۴	۲۱۰-۲۲۰
۰/۴۲	۲۱۱-۲۳۳

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۹: نقشه هم‌بارش در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

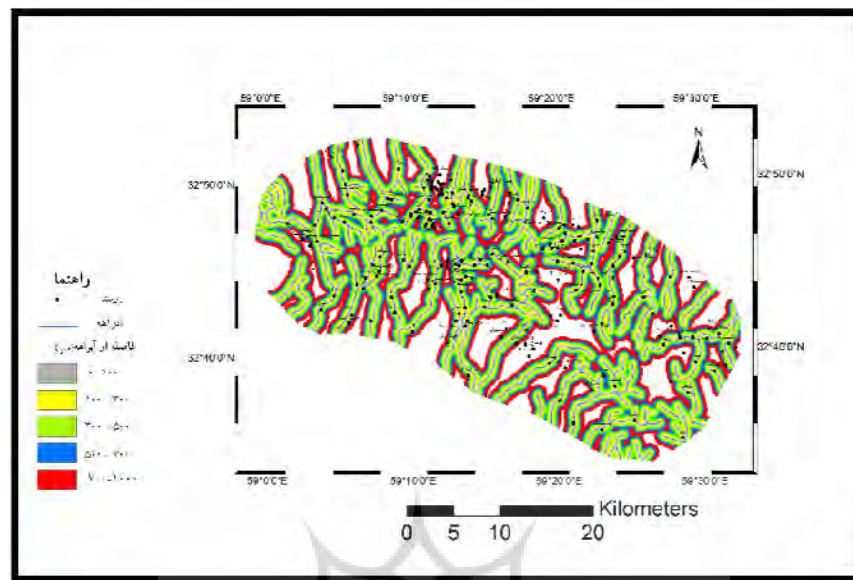
- فاصله از آبراهه

براساس نتایج به‌دست‌آمده، قسمت عمده زمین‌لغزش‌ها در فاصله صفر تا ۷۰۰ متری از آبراهه‌ها قرار دارند (جدول ۸)

جدول ۸: محاسبه وزن داخلی فاصله از آبراهه

وزن داخلی زمین‌لغزش	فاصله از آبراهه (متر)
۰/۲۱	۰-۱۰۰
۰/۲۳	۱۰۰-۳۰۰
۰/۲۳	۳۰۰-۵۰۰
۰/۱۹	۵۰۰-۷۰۰
۰/۱۴	۷۰۰>

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۱۰: نقشه فاصله از آبراهه در منطقه مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

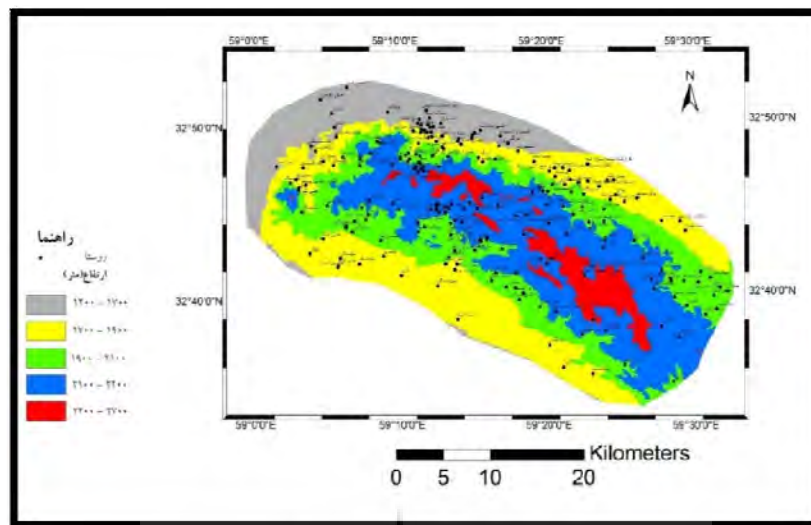
- توپوگرافی

نتایج به دست آمده حاکی از وقوع قسمت عمده زمین لغزش‌ها در ارتفاعات بالای ۱۹۰۰ متر است که می‌تواند به دلیل بارش در ارتفاعات باشد (جدول ۹).

جدول ۹: محاسبه وزن داخلی توپوگرافی

ارتفاع (متر)	وزن داخلی زمین لغزش
۱۴۰۰-۱۷۰۰	۰/۰۲
۱۹۰۰-۱۴۰۰	۰/۱۹
۲۱۰۰-۱۹۰۰	۰/۳۲
۲۴۰۰-۲۱۰۰	۰/۴۷

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۱۱: نقشه توپوگرافی در منطقه مورد مطالعه

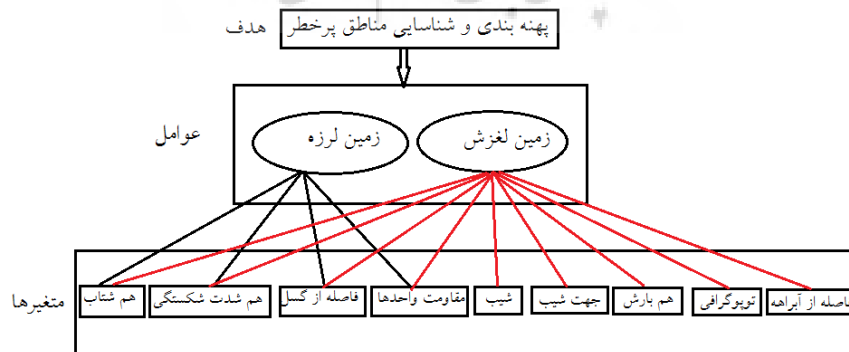
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

روش کار و راستی‌آزمایی داده‌ها

اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و زمین‌لرزه

از وزن‌های جدول انتخاب می‌شود که بستگی به دقت عمل، تجربه و میزان آشنایی کارشناس با منطقه دارد. نتایج این مقایسه‌ها به صورت یک ماتریس به نرم‌افزار Expert choice وارد شد و در خروجی آن وزن هر پارامتر تعیین شد (جدول ۱۲ و ۱۱). از بین عوامل مؤثر بر زمین‌لرزه، پارامتر هم‌شتاب بیشترین وزن را به خود اختصاص داد و از بین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، پارامتر هم‌شتاب لرزه‌ای و فاصله از گسل بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند. در شکل ۱۲، فلوجارتی از روش کار آورده شده‌است.

برای وزندهی به هر عامل، قسمت‌هایی که به‌طور تقریبی از نظر ویژگی‌های دیگر مشابه بوده و عامل موردنظر تغییر می‌کند، درنظر گرفته می‌شود و با مشاهده تغییرات این عامل و تأثیر آن بر وقوع لغزش‌ها، با استفاده از جدول ۱۰ براساس نظر و دید کارشناس (مالچفسکی، ۱۳۸۵: ۳۶۴) نسبت به منطقه عوامل به صورت دوه‌دو با هم مقایسه می‌شوند و یکی



شکل ۱۲: نحوه ارتباط بین فاکتورهای مؤثر در وقوع زمین‌لرزه و زمین‌لغزش

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۱۰: مقایسات زوجی استفاده شده برای پارامترهای مورد استفاده

مقدار عددی	ترجیحات
۹	کاملاً مرجح
۷	ترجیح خیلی قوی
۵	ترجیح قوی
۳	کمی مرجح
۱	ترجیح یکسان
۸، ۶، ۴، ۲ و ۸	ترجیحات بین فواصل فوق

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۱۱: وزن پارامترهای مؤثر در زمین لریزه در expert choice

وزن های استاندارد	معیارها
۰/۴۶۷	هم شتاب
۰/۲۷۷	فاصله از گسل
۰/۱۶۰	هم شدت شکستگی
۰/۰۹۵	مقاومت واحدها (فرسایش)

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۱۲: وزن پارامترهای مؤثر در زمین لغزش در expert choice

وزن های استاندارد	معیارها
۰/۲۹۲	هم شتاب
۰/۲	فاصله از گسل
۰/۱۴۱	هم شدت شکستگی
۰/۱۰۳	شیب
۰/۰۸۳	بارش
۰/۰۶۵	توپوگرافی
۰/۰۵۲	فاصله از آبراهه
۰/۰۳۵	مقاومت واحدها (فرسایش)
۰/۰۲۹	جهت شیب

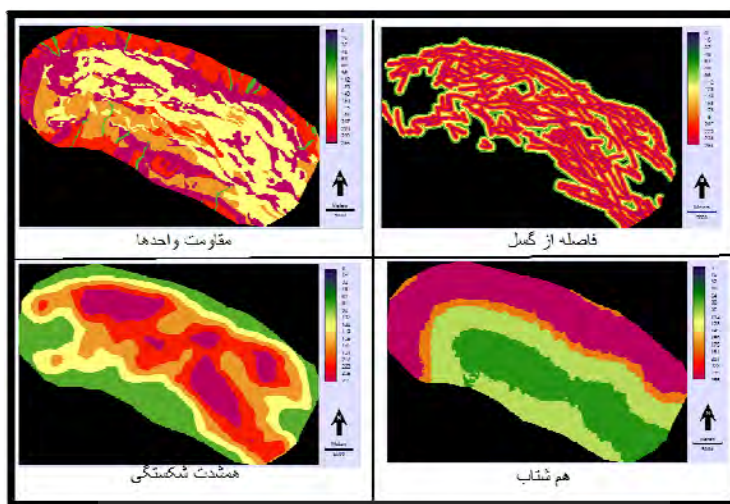
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

پهنه بندی

- زمین لریزه

در روش فازی، نرمال سازی نسبت فراوانی هر یک از نقشه ها با استفاده از نرم افزار Expert choice. سپس درجه عضویت فازی براساس نسبت فراوانی های نرمال سازی شده در محیط نرم افزار Idrisi تعیین شد

(شکل ۱۳). سپس نقشه های تهیه شده براساس عملگرهای فازی در نرم افزار GISARC به هم هم پوشانی داده شدند و خروجی نهایی به عنوان نقشه پهنه بندی تهیه شد (شکل ۱۴) (جدول ۱۳). در بین خروجی های فازی، از خروجی های اجتماع فازی، جمع جبری فازی و ضرب فازی خروجی مناسب تهیه شد.



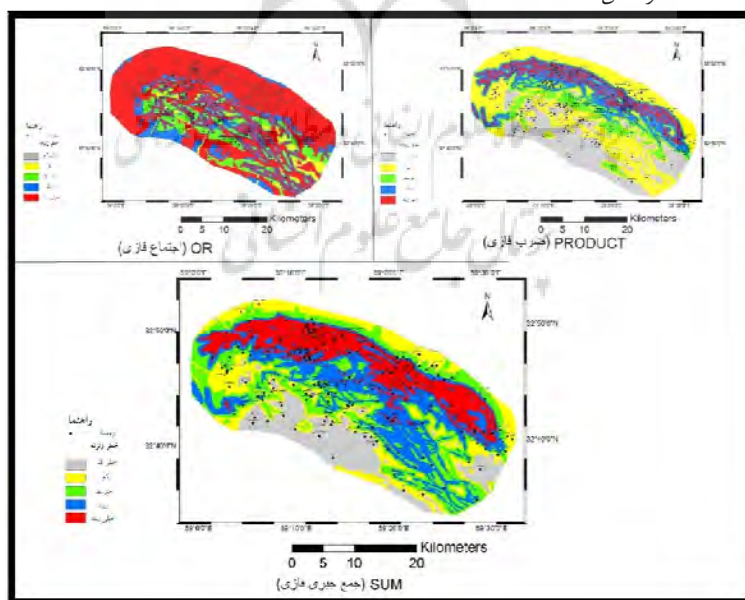
شکل ۱۳: درجه عضویت فازی پارامترهای مؤثر در زمین‌لرزه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۱۳: درصد کلاس خطر زمین‌لرزه در هر یک از اپراتورهای فازی

کلاس خطر زمین‌لرزه	SUM	PRODUCT	OR
خیلی کم	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۰۱
کم	۰/۱۹	۰/۳۶	۰/۰۴
متوسط	۰/۲۳	۰/۱۴	۰/۱۳
زیاد	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۱۸
خیلی زیاد	۰/۱۷	۰/۰۷	۰/۶۴

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶



شکل ۱۴: نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

زمین لغزش

به طور کلی پهنه‌بندی زمین لغزش در حوضه شامل مراحل زیر است:

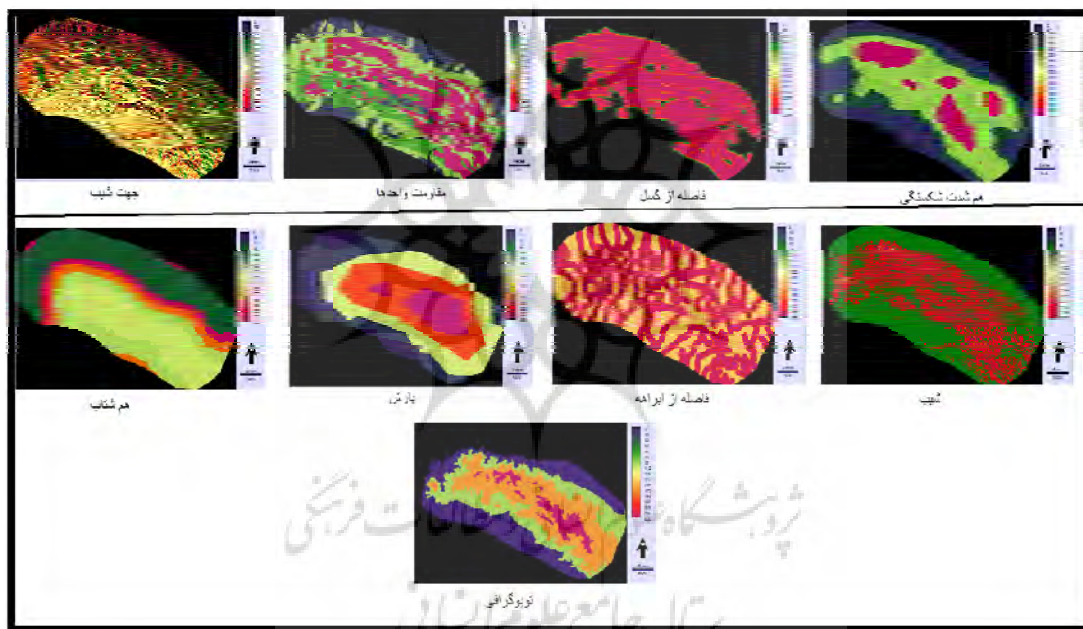
۱- ساختن پایگاه داده‌های فضایی و به بیانی، ورود و سازماندهی داده‌های فضایی مربوط به لایه‌های مختلف مورد استفاده برای پهنه‌بندی و ساماندهی آن‌ها در قالب مدل‌های رستری و برداری.

۲- مرحله پردازش داده‌ها که شامل طبقه‌بندی داده‌ها و استخراج نقشه‌های مشتق شده از لایه‌های مختلف است.

۳- تعیین نسبت فراوانی وقوع زمین لغزش در هر طبقه.

۴- تعیین درجه عضویت فازی براساس نسبت فراوانی‌های نرمال‌سازی شده در محیط نرم‌افزار Idrisi (شکل ۱۵).

۵- همپوشانی نقشه‌ها براساس عملگرهای فازی و درنهایت تهیه نقشه پهنه‌بندی منطقه (شکل ۱۶) (جدول‌های ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷).



شکل ۱۵: درجه عضویت فازی پارامترهای مؤثر در زمین لغزش

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۱۴: درصد طبقات نقشه پهنه‌بندی زمین لغزش به روش جمع جبر فازی

تراکم لغزش	درصد در منطقه	کلاس خطر Sum
۰	۰/۰۴	خیلی کم
۰/۰۲	۰/۳۵	کم
۰/۱۳	۰/۳۱	متوسط
۰/۳۴	۰/۲۶	زیاد
۰/۵۱	۰/۰۴	خیلی زیاد

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۱۵: درصد طبقات نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش به روش اجتماع فازی

تراکم لغزش	درصد در منطقه	or
۰	۰/۱	خیلی کم
۰/۰۵	۰/۰۱	کم
۰/۱۲	۰/۰۹	متوسط
۰/۲۲	۰/۱۲	زیاد
۰/۶۱	۰/۶۸	خیلی زیاد

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۱۶: درصد طبقات نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش به روش اشتراک فازی

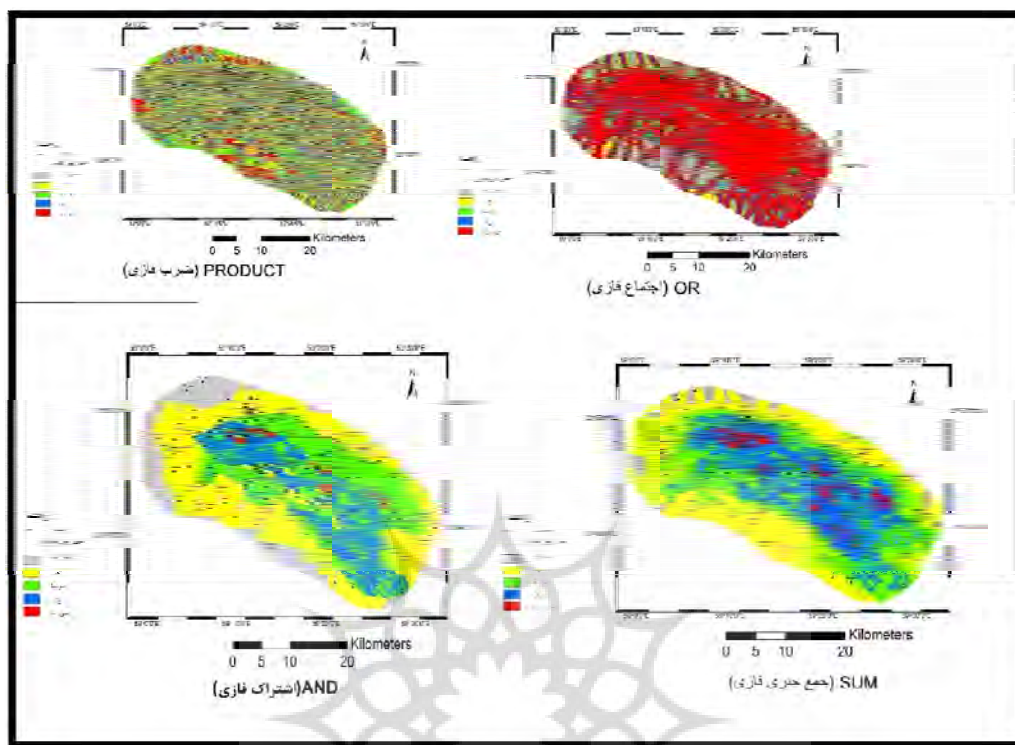
تراکم لغزش	درصد در منطقه	And کلاس خطر
۰	۰/۱۵	خیلی کم
۰/۰۶	۰/۳۸	کم
۰/۱۹	۰/۳	متوسط
۰/۳۵	۰/۱۶	زیاد
۰/۴	۰/۰۱	خیلی زیاد

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۱۷: درصد طبقات نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش به روش ضرب فازی

تراکم لغزش	درصد در منطقه	Product کلاس خطر
۰/۲	۰/۱۸	خیلی کم
۰/۱۹	۰/۲	کم
۰/۲	۰/۲۲	متوسط
۰/۲۳	۰/۱۹	زیاد
۰/۱۸	۰/۲۱	خیلی زیاد

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

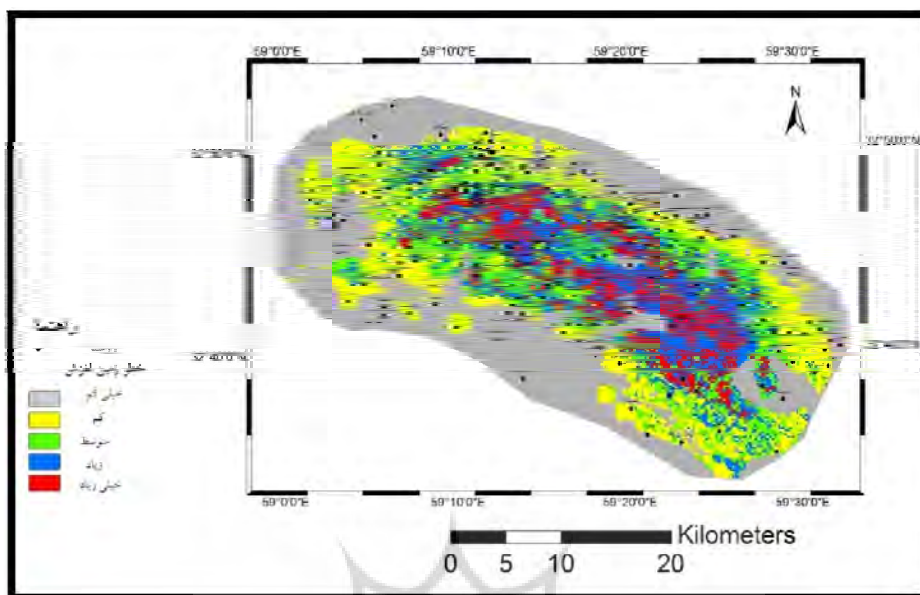


شکل ۱۶: نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

-انطباق خروجی‌های زمین‌لغزش و زمین‌لرزه با واقعیت

از آن به نام «ارزش مطالعاتی» (آماری) یاد می‌شود (شکل ۱۷). با توجه به این نقشه مشخص شد که نقشه خروجی براساس جمع جبری فازی و اشتراک فازی بهترین تطابق را با واقعیت دارد.

برای تشخیص اینکه کدام یک از خروجی‌های فازی در زمین‌لغزش بهترین انطباق را با واقعیت دارند، اقدام به تهیه نقشه به روش پهنه‌بندی واقعی شد که

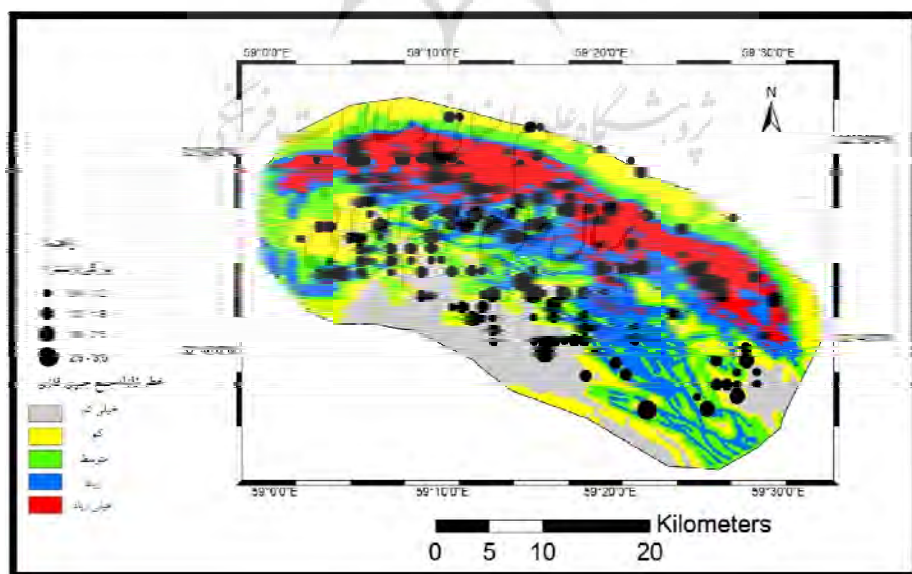


شکل ۱۷: نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش به روش مطالعاتی (آماری)

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

روی نقشه‌ها پلات شد. در نهایت مشخص شد که جمع جبری فازی بهترین تطابق را برای نقشه نهایی خطر زمین‌لرزه دارد (شکل ۱۸).

برای تشخیص بهترین خروجی فازی براساس زمین‌لرزه، کاتالوگ خردلرزه‌های ده سال گذشته منطقه از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران تهیه و بر



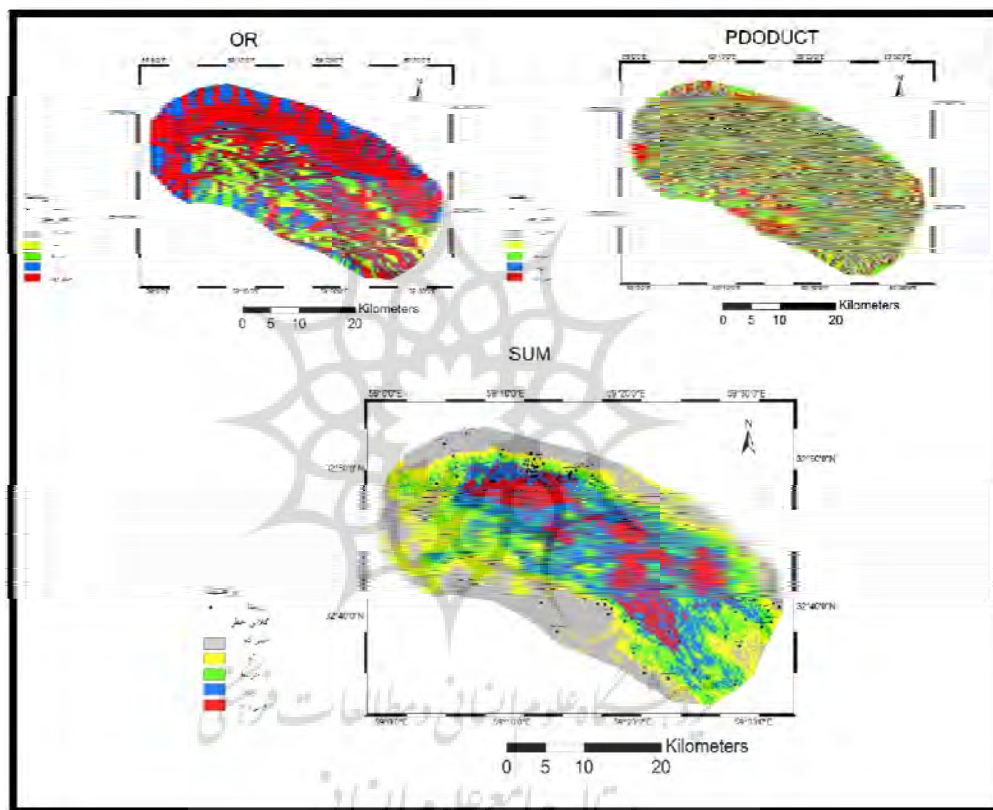
شکل ۱۸: تطابق خردلرزه‌ها با نقشه پهنه‌بندی جمع جبری فازی برای زمین‌لرزه

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

جبری فازی در خروجی‌های قبلی، هم در زمین‌لرزه هم در زمین‌لغزش به‌عنوان بهترین خروجی مطابق با واقعیت مشخص شده‌است؛ این خروجی نهایی حاصل از تلفیق این عوامل نیز می‌تواند بهترین خروجی با واقعیت قلمداد شود (شکل ۱۹).

– نقشه‌های نهایی حاصل از تلفیق زمین‌لرزه و زمین‌لغزش

در پایان اقدام به تلفیق خروجی‌های نهایی به‌دست آمده از هر یک از زمین‌لرزه و زمین‌لغزش شد که در این بین تنها سه خروجی مناسب اجتماع فازی، ضرب فازی و جمع جبری فازی تهیه شد. از آنجا که جمع



شکل ۱۹: نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی حاصل از تلفیق خطر زمین‌لغزش و زمین‌لرزه تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۶

جدول ۱۸: درصد کلاس‌های خطر در نقشه‌های نهایی حاصل از تلفیق زمین‌لرزه و زمین‌لغزش

کلاس خطر	SUM	PRODUCT	OR
خیلی کم	۰/۲۶	۰/۱۹	۰
کم	۰/۱۹	۰/۲	۰/۰۶
متوسط	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۱۳
زیاد	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۲۹
خیلی زیاد	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۵۲

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۶

نتیجه

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از نقشه‌های درجه عضویت فازی هر یک از پارامترها، مشخص شد که همبستگی مستقیمی بین گسل و زمین‌لغزش وجود دارد؛ به‌طوری که حدود ۹۵ درصد از زمین‌لغزش‌های منطقه در فاصله ۰ تا ۷۰۰ متری گسل قرار دارند که دال بر ارتباط مستقیم با تنش ناحیه‌ای است. از بین عوامل مؤثر بر زمین‌لرزه، پارامتر هم‌شتاب بیشترین وزن را به خود اختصاص داد و از بین عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش، پارامتر هم‌شتاب لرزه‌ای و فاصله از گسل بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند. براساس نقشه هم‌شتاب لرزه‌ای، بیشینه شتابی که از گسل‌های فعال بر روستاهای اطراف وارد می‌شود، ۰/۶۳ برآورد شده‌است که ۴۶ درصد از منطقه در کلاس‌های خطر زیاد و خیلی‌زیاد از نظر لرزه‌خیزی و ۴۲ درصد از آن در کلاس‌های خطر زیاد و خیلی‌زیاد از نظر خطر زمین‌لغزش قرار دارد. براساس نقشه‌های خروجی فازی زمین‌لغزش مشخص شد که جمع جبری فازی و اشتراک فازی بهترین تطابق را با نقشه پهنه‌بندی واقعی دارند؛ به‌طوری که در جمع جبری فازی ۸۰ درصد زمین‌لغزش‌های منطقه در ۳۰ درصد منطقه و در دو کلاس خطر زیاد و خیلی‌زیاد قرار دارند. براساس نقشه‌های خروجی فازی زمین‌لرزه مشخص شد که جمع جبری فازی بهترین تطابق را با پراکنش زمین‌لرزه‌ها در منطقه دارد؛ به‌طوری که ۴۲ درصد منطقه در کلاس خطر زیاد و خیلی‌زیاد زمین‌لرزه قرار دارد. در پایان پس از تلفیق نقشه‌های حاصل از زمین‌لغزش و زمین‌لرزه مشخص شد که جمع جبری فازی بهترین تطابق را دارد که به‌ترتیب ۰/۲۶، ۰/۱۹، ۰/۲۲، ۰/۲۱ و ۰/۱۲ درصد از منطقه در کلاس‌های خطر خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد نهایی حاصل از تلفیق زمین‌لرزه و زمین‌لغزش قرار دارد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره ۹۶۰۰۹۴۰ و با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد طبس انجام شده است.

منابع

- اوهانیان، ترگم؛ شاهین طاوسی؛ جمشید افتخارنژاد (۱۹۷۸). نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی بیرجند. ورقه بیرجند.
- حیدری‌آقاگل، مسعود (۱۳۹۴). بررسی ساختاری زیرکوه با نگرشی بر لرزه‌خیزی منطقه (حاجی‌آباد- شرق ایران)، پایان‌نامه تحصیلی کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند. ۱۸۶ ص.
- تاناکا، کازوئو (۱۳۸۳). مقدمه‌ای بر منطق فازی برای کاربردهای عملی آن، ترجمه علی وحیدیان‌کامیاد؛ و حامد رضا طارقیان. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. صفحه ۱۴۱.
- پورکرمانی، محسن؛ مهران آرین (۱۳۷۶). لرزه‌خیزی ایران، دانشگاه شهید بهشتی.
- خطیب، محمدمهدی (۱۳۶۸). تحلیل ساختاری کوه‌های جنوب بیرجند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه زمین‌شناسی. دانشگاه تربیت مدرس.
- خطیب، محمدمهدی (۱۳۷۷). هندسه پایانه گسل‌های امتداد لغز، پایان‌نامه دکتری. دانشگاه شهید بهشتی. ۲۲۴ ص.
- سوری، سلمان (۱۳۹۰). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه کشوری (نوژیان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. گروه زمین‌شناسی. دانشگاه فردوسی.

- قهرمانی، محترم (۱۳۹۵). تحلیل هندسی- جنبشی و برآورد خطر زمین‌لرزه پهنه گسلی دهک در غرب سهل‌آباد (جنوب‌شرق بیرجند)، پایان‌نامه تحصیلی کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند ۱۱۹ ص.
- کوره‌پزان‌دزفولی، امین (۱۳۸۴). اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربرد آن در مدل‌سازی مسائل مهندسی آب، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر. ۲۶۱ ص
- محمدی، مجتبی (۱۳۹۱). شناسایی و ارزیابی ریسک زمین‌لغزش روستای هاوانان جنوب بیرجند، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد زاهدان.
- منصوری، هاشم؛ فاطمه و کیلی‌اوندی؛ محمدمهدی خطیب (۱۳۹۵). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش به روش تحلیل سلسله‌مراتبی و منطق بولین در کوه باقران (جنوب بیرجند)، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی همدان. دوره دهم. شماره ۲۰. صفحات ۴۹-۶۱.
- Allen, M., Walker, R., Jackson, J., Talebian, M and Ghasemi, M. (2006). Contrasting styles of convergence in the Arabia-Eurasia collision: Why escape tectonics does not occur in Iran, Mem. Geol. Soc. Am., Special paper, 409, 579-589.
- Champati-ray, P.K., Dimri, S., Lakhera, R.C., and Sati, S (2007). Fuzzy- based method for landslide hazard assessment in active seismic zone of Himalaya, Landslides, 4: P. 101-111.
- Tirrule, R., Bell, L.R., Griffis, R.J., and Camp, V.E (1983). The Sistan suture zone of eastern Iran., G.S.A, V.94, P.134-156.
- Walker, R. and Jackson, J (2004). Active tectonic and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. Tectonics 23.
- Walker, R., Jackson J. & Baker, C (2004). Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran, Geophys. J. Int., 157: 265-282.
- Walker, R. & Khatib. M.M (2006). Active faulting in the Birjand region of NE Iran, Tectonics, V.25: TC4016(1-17).