جغرافیا و توسعه شماره ۵۰ بهار ۱۳۹۷
وصول مقاله : ۱۳۹۵/۰۷/۲۷
تأیید نهایی : ۱۳۹۶/۰۳/۱۰
صفحات : ۵۴- ۴۱

ارزیابی خطر زمین‌لرزه به روش منطق فازی در منطقهٔ دهک (خراسان جنوبی)

محترم قهرمانی[۱*]، دکتر سیدمرتضی موسوی[۲]، دکتر محمدمهدی خطیب[۳]، هاشم منصوری[۴]

چکیده

در استان خراسان جنوبی (شرق ایران) به‌دلیل عملکرد گسل‌های فعال (گسل‌های شمالی- جنوبی، شرقی- غربی و شمال غرب- جنوب شرق)، شاهد بروز زمین‌لرزه‌هایی با بزرگاهای مختلف هستیم. برای کاهش خسارات، تعیین مناطق دارای پتانسیل بالای لرزه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، از شش عامل مؤثر در زمین‌لرزه (گشتاور لرزه‌ای، هم‌شتاب لرزه‌ای، هم‌شدت شکستگی، فاصله از شکستگی، مقاومت واحدها و عمق آبرفت)، استفاده شد. در این زمینه پارامترهای مؤثر اولویت‌بندی شد. در مرحلهٔ بعدی با استفاده از منطق فازی، وزن پارمترها مشخص شد و در پایان با استفاده ازARC GIS با هم تلفیق شدند. مطالعات پهنه‌بندی حاکی‌از آن است که فاکتورهای گشتاور لرزه‌ای و هم‌شتاب مهم‌ترین نقش را در وقوع زمین‌لرزه‌ها در منطقه ایفا می‌کنند. در نقشهٔ پهنه‌بندی به روش فازی، حریم گسل‌های نهبندان، سهل‌آباد، دهک، چهارفرسخ، اردکول و ماژان در محدودهٔ خطرِ خیلی‌زیاد قرار دارند. براساس پارامتر شتاب لرزه‌ای، شتابی که گسل دهک به روستاهای آن منطقه وارد می‌کند، معادل ۰/۵۸ شتاب ثقلی زمین است. نقشه‌های خروجی به‌دست‌آمده براساس اپراتورهای فازی نشان می‌دهد که نقشهٔ حاصل از جمع جبری فازی (sum)، بیشترین انطباق را با واقعیت دارد که به‌ترتیب۲۰، ۲۸، ۲۶، ۱۶ و ۱۰ درصد از منطقه در کلاس‌های خطر خیلی‌کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد قرار دارد. در این نقشه قسمت اعظم منطقهٔ دهک (۷۰ درصد) در کلاس خطر زیاد و خیلی‌بالا قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: گشتاور لرزه‌ای، منطق فازی، اپراتورهای فازی، گسل دهک، خراسان جنوبی.

۱- کارشناس ارشد تکتونیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران* ghahramani@birjand.ac.ir
۲- استادیار تکتونیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران mmoussavi@birjand.ac.ir
۳- استاد تکتونیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران mkhatib@birjand.ac.ir
۴- دانشجوی دکتری تکتونیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران hashemmansouri1@birjand.ac.ir

مقدمه

بیان مسئله

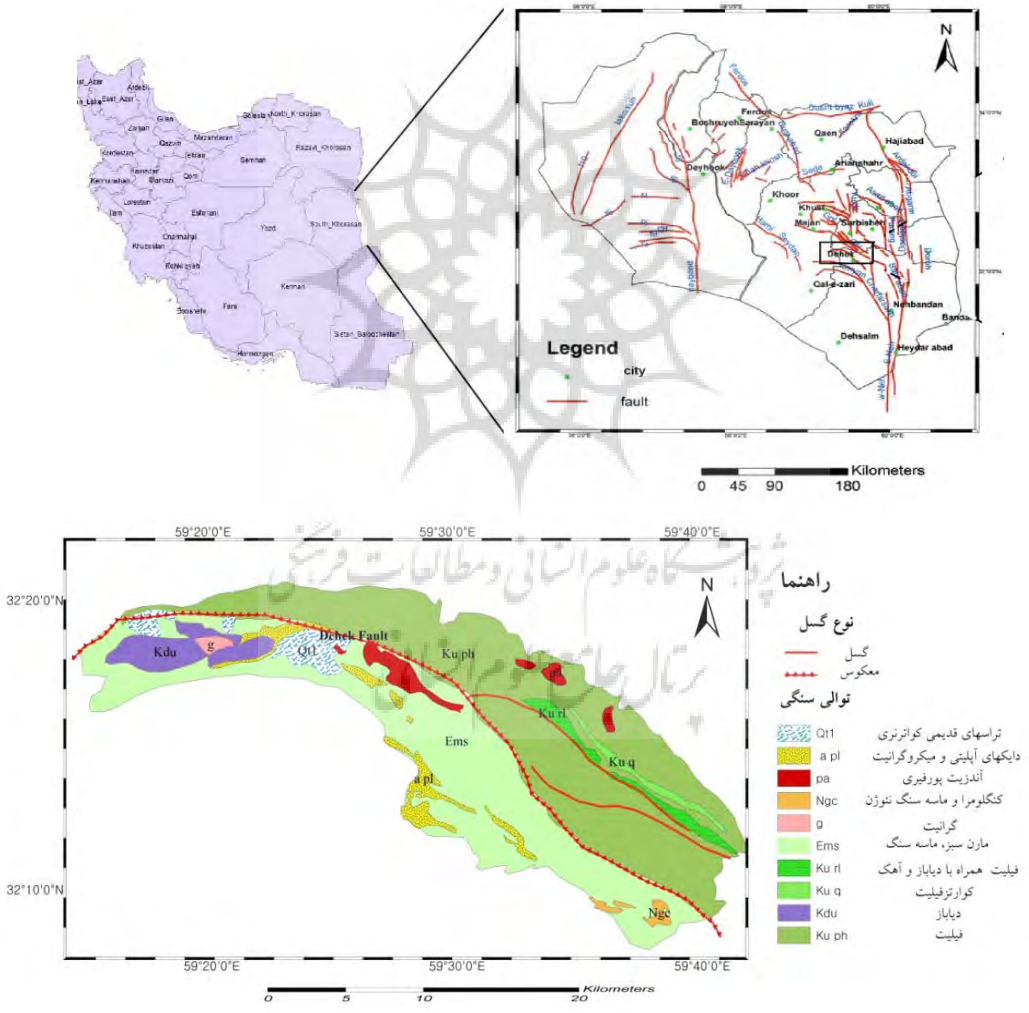
زمین‌لرزه‌ها همواره جزء مهمترین مخاطرات طبیعی هستند که هر ساله تعداد بسیاری از مردم جهان، گرفتار آثار نامطلوب آن می‌شوند. برای کاهش تلفات جانی و اقتصادی و تبعات اجتماعی آن ضروری است که براساس دانش کنونی و آخرین فنّاوری‌های قابل‌اعتماد از خطر وقوع زمین‌لرزه در نقاط مختلف، شناختی دقیق به‌دست آوریم. قدم اول و مهم در تجزیه‌وتحلیل خطر لرزه‌ای، راهبرد کاهش استقرار جمعیت در مناطق پرخطر است. هرچند پیش‌بینی دقیق این مخاطرهٔ بزرگ طبیعی به‌صورت قطعی ممکن نیست، ولی تعیین احتمالی مکان رخداد یک زلزله 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 نقشه ممکن است به روش‌های کمّی یا کیفی تهیه شود. روش‌های کیفی عموماً مبتنی‌بر عقیدهٔ کارشناسی هستند؛ اما در برخی از روش‌های کیفی از اصول رتبه‌دهی و وزن‌دهی به پارامترها بهره گرفته شده است. این روش‌ها طبیعتی شبه‌کمّی دارند. نمونه‌هایی از این روش‌ها استفاده از روش AHP و یا منطق فازی است. عمدهٔ دگرشکلی در شرق ایران درنتیجهٔ گسل‌های راستگرد شمالی- جنوبی است(*Walker & Jackson, 2004:2*) ازاین‌رو ارتباط گسل‌های مذکور می‌تواند سبب دگرشکلی‌های متفاوت در زیر پهنهٔ سیستان شود. عملکرد گسل‌های کواترنری سبب بروز زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای کم تا زیاد در منطقه می‌شود. سیمای گسل‌ها، با میزان لرزه‌خیزبودن این گسل‌ها در ارتباط است. گسل‌های شرق ایران دارای سیمای مستقیم و توان لرزه‌خیزی و فعالیت بالایی هستند. در این تحقیق، سؤالات زیر دنبال می‌شود: «چند درصد از منطقه در محدودهٔ خطرِ زیاد قرار دارد؟»؛ «گسل دهک در کدام محدوده از کلاس خطر وجود دارد؟»؛ «کدام‌یک از خروجی‌های منطق فازی، بیشترین تطابق را با لرزه‌خیزی منطقه دارند؟».

پیشینهٔ تحقیق

- مهاجر و پیرز (۱۹۶۳)، با استفاده از زمین‌لرزه‌های بزرگ ایران، نقشه‌های هم‌لرز را برای مناطق مختلف تهیه کردند (*Mohajer & Pierce ,1963*).
- محمودزاده (۱۳۶۸) با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی (گسل، شیب، زمین‌شناسی و کاربری اراضی) شهر تبریز و همپوشانی این لایه‌ها در Gis، نقشهٔ پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه را برای تبریز تهیه کرد.
- وکیلی اوندری (۱۳۹۳) با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی و منطق فازی به پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقهٔ باقران (جنوب بیرجند) پرداخت که در آن عوامل فرسایش، فاصله از گسل و شتاب مهمترین عوامل بروز زمین‌لغزش معرفی شدند. همچنین بیش از ۸۵ درصد زمین‌لغزش‌ها در فاصلهٔ بین صفر تا ۷۰۰ متری از گسل‌ها قرار دارند که دال بر ارتباط مستقیم با زمین‌ساخت منطقه است.
- حیدری آقاگل (۱۳۹۴) نیز با با استفاد از پنج فاکتور گشتاور لرزه‌ای، هم‌شتاب، هم‌شدت شکستگی، فاصله از شکستگی و عمق آبرفت به تحلیل لرزه‌خیزی منطقهٔ اردکول قائن پرداخت که نشان داد نرخ فعالیت گسل اردکول از شمال به جنوب منطقه افزایش می‌یابد و قسمت جنوب منطقه را به‌عنوان منطقه با خطرِ زیاد و خیلی‌زیاد ازنظرِ لرزه‌خیزی معرفی کرد.

جایگاه زمین‌شناسی و لرزه زمین‌ساختی

منطقهٔ مورد مطالعه در ایالت ساختاری سیستان واقع شده است که مطالعهٔ گسل‌های فعال در این منطقه به‌همراه زمین‌لرزه‌های رخداده نشان‌دهندهٔ فعال بودن منطقه ازنظرِ تکتونیکی است. ایالت ساختاری سیستان در شرق ایران با روند کلی شمالی جنوبی نشان‌دهندهٔ زمین‌درز برخوردی قطعهٔ لوت و افغان است *(Tirrule, R., Bell, L.R., Griffins, R.J., and Camp, V.E, 1983: 142)*. گسل تراستی دهک با راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی که یکی از سرشاخه‌های گسل نه غربی است و با تداوم به‌سمت جنوب شرقی به گسل راستگرد اسماعیل‌آباد می‌رسد. این گسل تراستی باعث رانده‌شدن واحدهای فیلیتی به سن کرتاسه فوقانی بر روی واحدهای آهکی، ماسه‌سنگی و مارنی به سن کرتاسه شده است (شکل ۱).



شکل ۱: نقشهٔ زمین‌شناسی منطقهٔ مورد مطالعه

(ترسیم مجدد نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ مختاران و سهل‌آباد)

موحد اول، محسن؛ کاظم امامی؛ جمشید افتخارنژاد؛ یووان اشتوکلین (۱۹۷۸)

منطقهٔ مورد مطالعه ازنظرِ جایگاه لرزه‌زمین‌ساختی در بخش بالایی سیستان قرار دارد. بررسی نقشه‌های لرزه‌زمین‌ساختیحاکی‌از آن است که این منطقه از پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی برخوردار است و زمین‌لرزه‌های زیادی در این منطقه روی داده است. براساس مطالعاتی که بر روی تراکم زمین‌لرزه‌ها، طول گسل‌های منطقه، بزرگی زمین‌لرزه‌ها و شتاب زمین‌لرزه‌ها صورت گرفته است، شرق ایران دارای پتانسیل لرزه‌ای بالایی است.

در این مطالعه برای بررسی خطر زمین‌لرزه از شش پارامتر نقشهٔ گشتاور لرزه‌ای، هم‌شتاب لرزه‌ای، هم‌شدت شکستگی، فاصله از گسل، مقاومت واحدها و عمق آبرفت استفاده شد. سپس رسترهای موردنظر از روش منطق فازی مورد تحلیل قرار گرفت. درنهایت نتایج بررسی در غالب نقشه‌های خطر لرزه‌ای مورد تحلیل قرار گرفت.

معرفی پارامترها

گشتاور لرزه‌ای

یکی از روش‌های برآورد نرخ گشتاور، برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای، استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری زمین‌لرزه‌ها و کاتالوگ زمین‌لرزه‌های تاریخی است. با استفاده از از روابط تجربی می‌توان نرخ گشتاور لرزه‌ای را در منطقه تعیین کرد. در این روش با توجه به روابط تجربی موجود بین بزرگاهای مختلف و گشتاور لرزه‌ای اسکالر، می‌توان گشتاور لرزه‌ای را برای هر زمین‌لرزه محاسبه و سپس نرخ گشتاور لرزه‌ای را تعیین کرد. در اینجا با استفاده از فرمول‌های تجربی مربوطبه داده‌های لرزه‌ای میزان گشتاور لرزهای منطقهٔ مورد نظر تعیین شد:

رابطهٔ ۱: $\log M_0 = cM + d$

(Hanks and Kanamori, 1979:2349) ثابت کردند که گشتاور اسکالر را می‌توان از طریق موج سطحی زلزله‌ها به صورت زیر به دست آورد:

رابطهٔ ۲: $\log(M_0/Nm) = 9.05 + 1.5M_S$

رابطه دیگری به وسیلهٔ *Dziewonski & Eksrtom, 1987: 11* ارائه شد:

رابطهٔ ۳:

$$\log(M_0/Nm) = M_S + 12.243 \qquad M_S < 7.16$$
$$\log(M_0/Nm) = 1.5(M_S + 5.776) \qquad M_S > 7.16$$

رابطه زیر را بین بزرگای موج پیکری m_b وگشتاور لرزه‌ای اسکالر پیشنهاد کرد:

رابطهٔ ۴:

$$\log(M_0/Nm) = 11.28 + 0.679m_b + 0.077m_b^2$$

برای رابطه یبن بزرگای گشتاوری و گشتاور لرزه‌ای نیز چند رابطه وجود دارد که ارائه شده است:

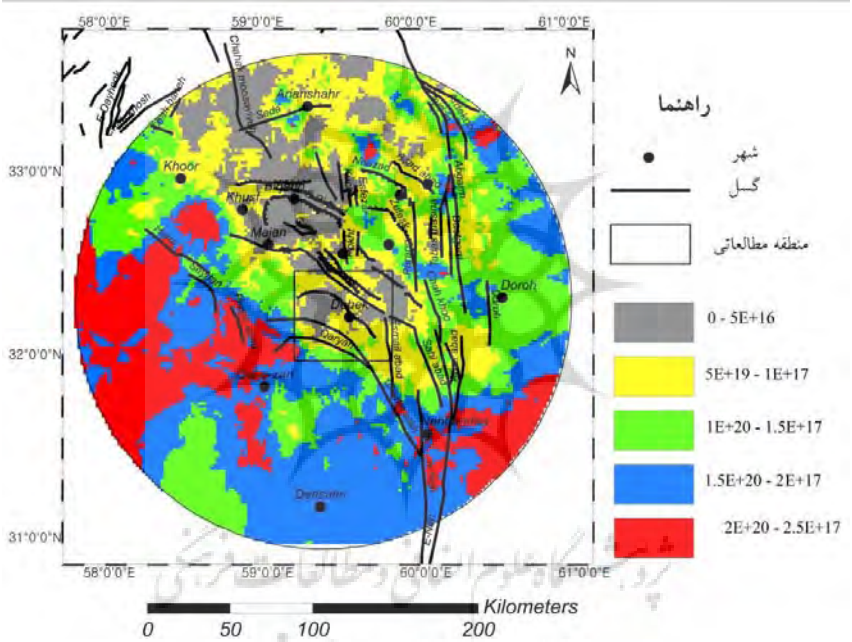
رابطهٔ ۵:

$$M_W = \left(\frac{\log(M_0/dynCm)}{1.5}\right) - 10.73$$
$$M_W = \frac{2}{3}\log(M_o/Nm) - 6.0$$
$$M_W = \frac{\log(M_0/NM) - 16.1}{1.5}$$

بزرگای (M_W) برای مقادیر تا حدود $M_W = 6.0$ اغلب با (m_b)و (M_L) برابر است بنابراین می‌توان بزرگای محلی و بزرگای گشتاوری را معادل یکدیگر گرفته و از روابطی که برای بزرگای گشتاوری وجود دارد، برای بزرگای محلی نیز استفاده کرد.

در برآورد نرخ گشتاور لرزه‌ای از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی منطقهٔ موردنظر استفاده می‌شود. کاتالوگ‌های زمین‌لرزه‌ای مورد استفاده در این‌پژوهش مربوط‌به پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، کاتالوگ مربوط به زمین‌لرزه‌های USGS است و برای برخی از زمین‌لرزه‌ها از داده‌های سایت CMT هاروارد(Centroid Moment-Tensor) و ISC (International Seismological Centre) استفاده شده است.

زمین‌لرزه‌های تاریخی با توجه به *(Ambraseys & Melville, 1982)* و بربریان (۱۳۷۴) به‌دست آمده است. بعد از تهیهٔ نقشهٔ گشتاور لرزه‌ای مشخص شد که منطقهٔ اردکول، دهک، گیو و سهل‌آباد دارای بیشترین نرخ گشتاور لرزه‌ای در محدودهٔ مورد مطالعه هستند (شکل ۲).

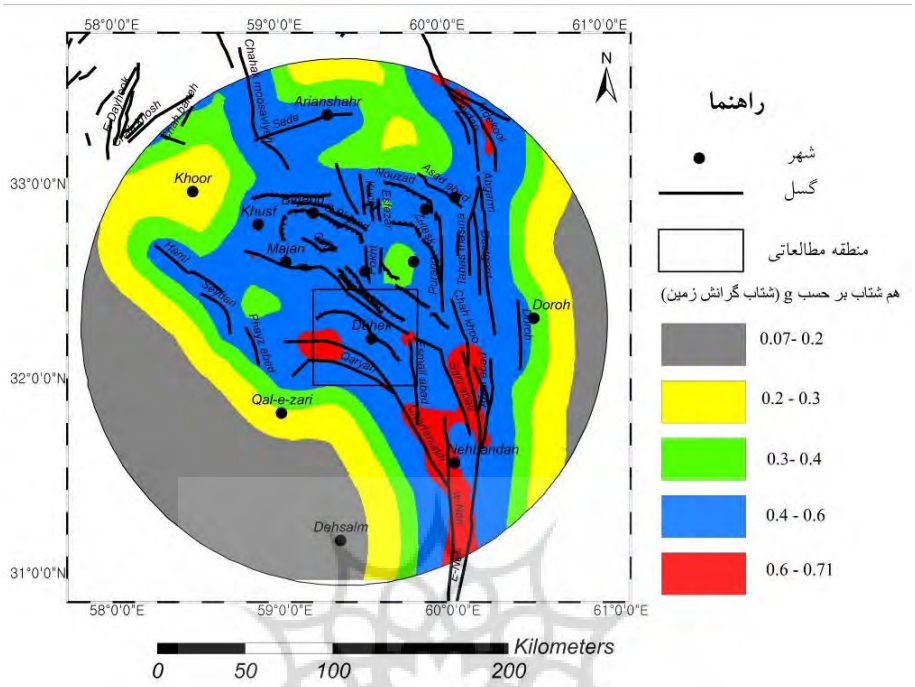


شکل ۲: نقشهٔ گشتاور لرزه‌ای منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: محترم قهرمانی، ۱۳۹۵

همشتاب لرزه‌ای

به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ همشتاب لرزه‌ای، ابتدا گسل‌های اصلی کواترنری منطقه ازطریق نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ *(بیرجند، گزیک، نایبندان، قاین، شاهرخت، گزیک، چاه‌وک و زابل) (علوی‌نایینی، مهدی؛ عباس بهروزی (۱۹۸۲) و (علوی نایینی، مهدی، عباس بهروزی، ۱۹۸۳)و (افتخارنژاد، جمشید،مهدی علوی نایینی، عباس بهروزی، ۱۹۹۱) و (افتخارنژاد، جمشید،یووان اشتوکلین، ۱۳۶۹) و (m,Sahandi,1992)* و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری مشخص شد. سپس مقادیر بیشینهٔ شتاب ثقل افقی وارده ازطرفِ گسل‌های فعال نسبت‌به یک نقطهٔ خاص اندازه‌گیری شد. در این روش محدودهٔ گسل‌هایی که بیشترین خطر زمین‌لرزه‌ای را برای مرکز موردنظر دارند، مشخص می‌شود که در این میان گسل نهبندان، دهک و گیو بیشترین خطر را برای منطقه دارند (شکل ۳).

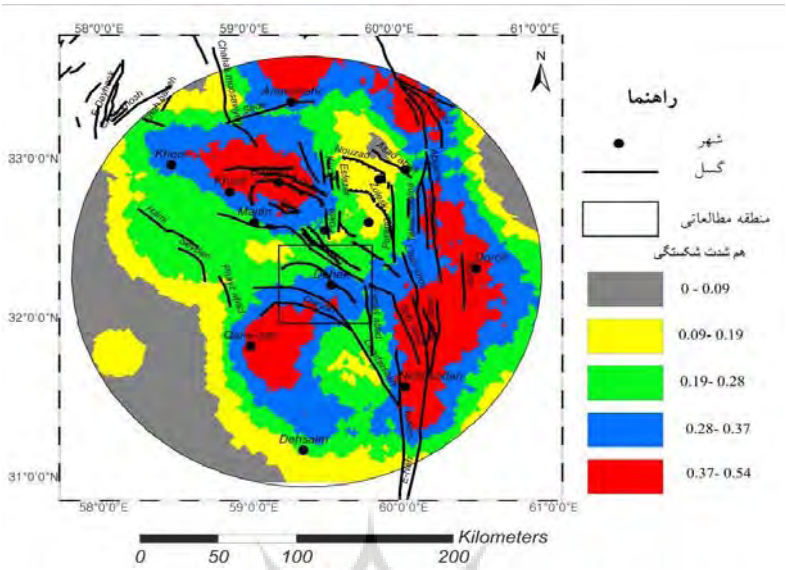


شکل ۳: نقشهٔ هم‌شتاب لرزه‌ای منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: محترم قهرمانی، ۱۳۹۵

هم‌شدت شکستگی

برای تهیهٔ نقشهٔ هم‌شدت شکستگی ابتدا نقشهٔ شکستگی‌های کواترنری و غیرکواترنری منطقه ازطریقِ نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ *(افتخارنژاد، جمشید، یووان اشتوکلین، ۱۳۶۹)* و تصاویر ماهواره‌ای تهیه شد؛ سپس شبکه‌ای به ضلع ۵ کیلومتری بر روی این شکستگی‌ها طراحی شد و در هر واحد شدت شکستگی در نرم‌افزار GIs و با استفاده از ابزار XTools محاسبه شد. سپس با استفاده از ابزار Geostatistical Analyst در برنامهٔ Arc Map و از روش کریجینگ ساده با مدل برازش گوسی، نقشهٔ شدت شکستگی برای کواترنری و غیرکواترنری تهیه شد. بیشترین شدت شکستگی در منطقهٔ مورد مطالعه در بخش نهبندان، شوسف، منطقهٔ دهک و گسل جنوب بیرجند قرار دارد (شکل۴).

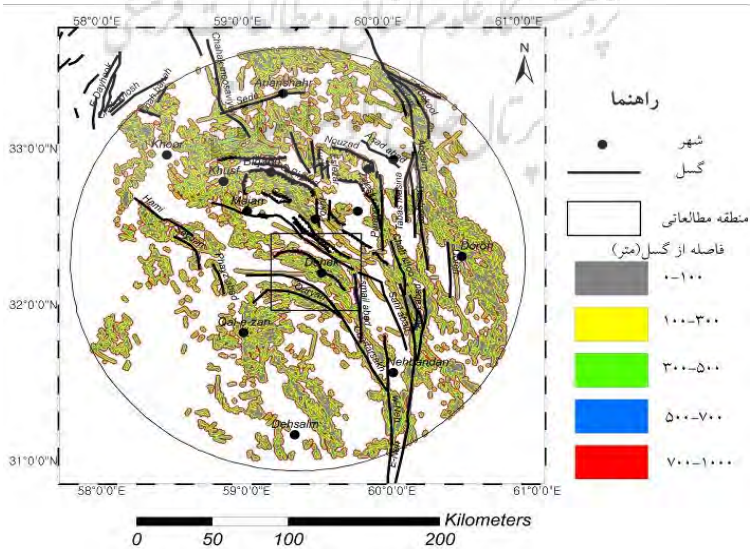


شکل ۴ : نقشه هم‌شدت شکستگی منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم : محترم قهرمانی، ۱۳۹۵

فاصله ازگسل

در اثر عملکرد یک گسل علاوه‌بر محدودهٔ خود گسل، محدودهٔ خارج از خود گسل را که به‌نام «حریم گسل» شناخته می‌شود . تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. در هنگام بروز زمین‌لرزه، بیشترین خسارات وارد به منطقه در بخش حریم گسل قرار دارد؛ بنابراین تعیین حریم گسل و شکستگی‌های کواترنری حاصل از آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به‌همین‌دلیل با توجه به نظر کارشناس محدودهٔ حریم برای گسل‌های منطقه، ۱ کیلومتر درنظر گرفته شد (شکل۵)

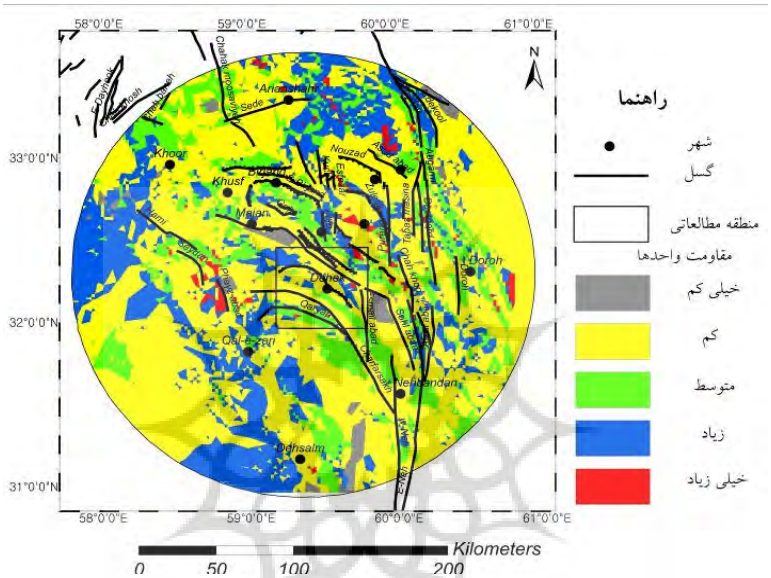


شکل ۵: نقشهٔ فاصله از گسل‌های منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: محترم قهرمانی، ۱۳۹۵

- نقشهٔ مقاومت واحدها

«مقاومت واحدها» یک پارامتر مؤثر دیگر در لرزه‌خیزی است. این تقسیم‌بندی برمبنای مقاومت واحدها دربرابر هوازدگی و میزان صلبیت واحد سنگی است. به‌طوری‌که واحدهای کواترنری در ردهٔ ضعیف و سنگ‌هایی همچون بازالت در ردهٔ مقاومت زیاد قرار می‌گیرند. در مناطقی که دارای میزان مقاومت کمتری هستند، به‌دلیل اینکه در اثر حرکت گسل‌های اصلی منطقه در این مناطق زودتر شکسته می‌شوند؛ احتمال بروز زمین‌لرزه بیشتر می‌شود.

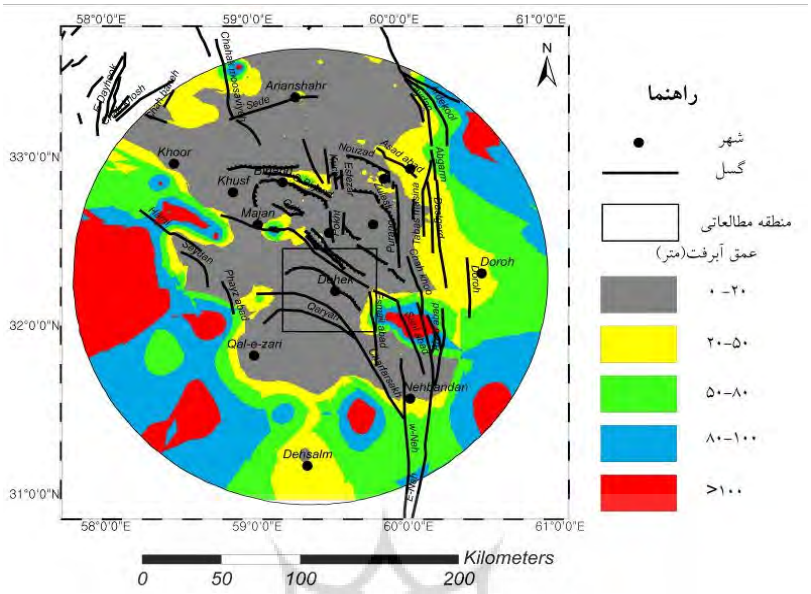


شکل ۶: نقشهٔ مقاومت واحدها در منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم : محترم قهرمانی، ۱۳۹۵

عمق آبرفت

عوامل مختلفی در تشدید شتاب حاصل از زمین‌لرزه نقش مثبت یا منفی را دارند. یکی از این عوامل عمق آبرفت در محدودهٔ گسل‌های فعال منطقه است. ازآنجاکه آبرفت یک لایهٔ منفصل است، در اثر بروز زمین‌لرزه نمی‌تواند موج‌های حاصل از زمین‌لرزه را به‌خوبی منتقل کند؛ یعنی به‌عبارتی سبب تحلیل انرژی حاصل از زمین‌لرزه می‌شود؛ به‌همین‌دلیل هرچه عمق آبرفت در محل گسل بیشتر باشد، میزان خسارات ناشی‌از امواج زمین‌لرزه کمتر است. در محدودهٔ مورد مطالعه به‌علت عدم‌انجام عملیات ژئوفیزیک، عمق آبرفت منطقه مشخص نشده است؛ به‌همین‌دلیل برای تعیین عمق آبرفت از عمق چاه‌های عمیق استفاده شد (شکل ۷).



شکل ۷ : نقشهٔ عمق آبرفت در منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم: محترم قهرمانی، ۱۳۹۵

بحث

- تئوری منطق فازی

مفهوم منطق فازی اولین بار توسط دکتر لطفی‌زاده استاد دانشگاه کالیفرنیا در مقاله‌ای با عنوانِ «مجموعه‌های فازی»، در سال ۱۹۶۵ ارائه شد منطق فازی یک منطق چند مقداری است؛ یعنی پارامترها و متغیّرهای آن، علاوه‌بر اختیار اعداد ۰ یا ۱، می‌توانند تمامی مقادیر بین این دو عدد را نیز اختیار کنند. تعلق هر عضو مجموعه مرجع به یک عضو زیرمجموعهٔ خاص، به‌صورت قطعی نیست، یعنی با قاطعیت نمی‌توان گفت که عضو موردنظر متعلق به این مجموعه است یا نه. این عدم‌قطعیت با نسبت‌دادن یک عدد بین ۰ و ۱ به این عضو انجام می‌گیرد. اگر این عدد برابربا صفر 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 موردبحث متعلق به آن مجموعه است. به این ترتیب می‌توان زیرمجموعه‌های یک مجموعه فازی را با نسبت‌دادن عددهای ۰ و ۱ به هر عضو مجموعه بازنمایی کرد *(Champti- ray, 2007:101)*.

به‌طورکلی هدف از تئوری فازی، ایجاد روشی نوین در بیان عدم‌قطعیت‌ها و ابهامات روزمره است. منطق فازی که در برابر منطق کلاسیک مطرح شد، ابزاری توانمند درجهتِ حل مسائل مربوط‌به سیستم‌های پیچیده‌ای است که درک آنها مشکل است یا حل مسائلی است که وابسته‌به استدلال، تصمیم‌گیری و استنباط بشری هستند. انتخاب یک روش و رویکرد مناسب برای مدل‌سازی یک سیستم، کاملاً بستگی به میزان پیچیدگی آن سیستم داشته و پیچیدگی نیز با میزان دانش و شناخت ما از آن سیستم ارتباط معکوس دارد. واضح است که انسان تمایل دارد یک سیستم را با بیشترین دقت مدل‌سازی کند؛ اما چنانچه شناخت کافی نسبت‌به آن نداشته باشد، مجبور است که دقت مورد انتظار از مدل را با میزان شناخت خود از سیستم منطبق کند.

برای پیش‌بینی سری‌های زمانی با استفاده از منطق فازی هم، مدل‌های بسیاری در بازۀ زمانی ۲۰۰۵-۱۹۸۵ مطرح شده که از آنها برای پهنه‌بندی و پیش‌بینی پدیده‌ها می‌توان استفاده کرد *(Gooijer, 2006:443)*

داده‌های موردنیاز

پس از بررسی منابع و یافته‌های علمی مرتبط با موضوع، با استفاده از عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (به فاصلۀ ۱۵۰ کیلومتری منطقه) همراه با داده‌های لرزه‌ای تهیه‌شده از سازمان ژئوفیزیک، نقشه‌های موردنیاز در منطقه تهیه شد. براساس سابقۀ تحقیق، موقعیت منطقه، مقیاس و روش‌های پهنه‌بندی مورد استفاده، مجموعاً ۶ عامل گشتاور لرزه‌ای، هم‌شتاب لرزه‌ای، هم‌شدت شکستگی، فاصله از شکستگی، مقاومت واحدها و عمق آبرفت، مورد استفاده و مطالعه قرار گرفته است.

روش کار

- اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لرزه

در منطق‌های کلاسیک، برای وزن‌دهی به هر عامل، قسمت‌هایی که به‌طور تقریبی ازنظرِ ویژگی‌های دیگر مشابه بوده و عامل موردنظر تغییر می‌کند، درنظر گرفته می‌شود و با مشاهدۀ تغییرات این عامل و تأثیر آن بر وقوع زمین‌لرزه، با استفاده از جدول ۱ براساس نظر و دید کارشناس نسبت‌به منطقۀ عوامل به‌صورت دوبه‌دو با هم مقایسه می‌شوند و یکی از وزن‌های جدول انتخاب می‌شود که بستگی‌به دقت عمل، تجربه و میزان آشنایی کارشناس با منطقه دارد *(کلارستاقی،۱۳۸۱:۱۴۱)* وزن‌دهی برمبنای دانش و قضاوت کارشناسی است. نتایج این مقایسه‌ها به‌صورتِ یک ماتریس به نرم‌افزار Expert choice وارد شد و در خروجی آن وزن هر پارامتر تعیین شد *(قدسی‌پور، ۱۳۸۴: ۲۲۰)* جدول ۲) از بین عوامل، پارامتر گشتاور لرزه‌ای بیشترین وزن و پارامتر عمق آبرفت کمترین وزن را به خود اختصاص دادند *(کوره‌پزان دزفولی، ۱۳۸۴: ۱۷۱)*.

جدول ۱: مقایسات زوجی استفاده‌شده برای پارامترهای مورد استفاده

ترجیحات	مقدار عددی
کاملاً مرجح	۹
ترجیح خیلی‌قوی	۷
ترجیح قوی	۵
کمی مرجح	۳
ترجیح یکسان	۱
ترجیحات بین فواصل فوق	۸ و۶،۴،۲

مأخذ: مطالعات میدانی ملکی و همکاران، ۱۳۸۸

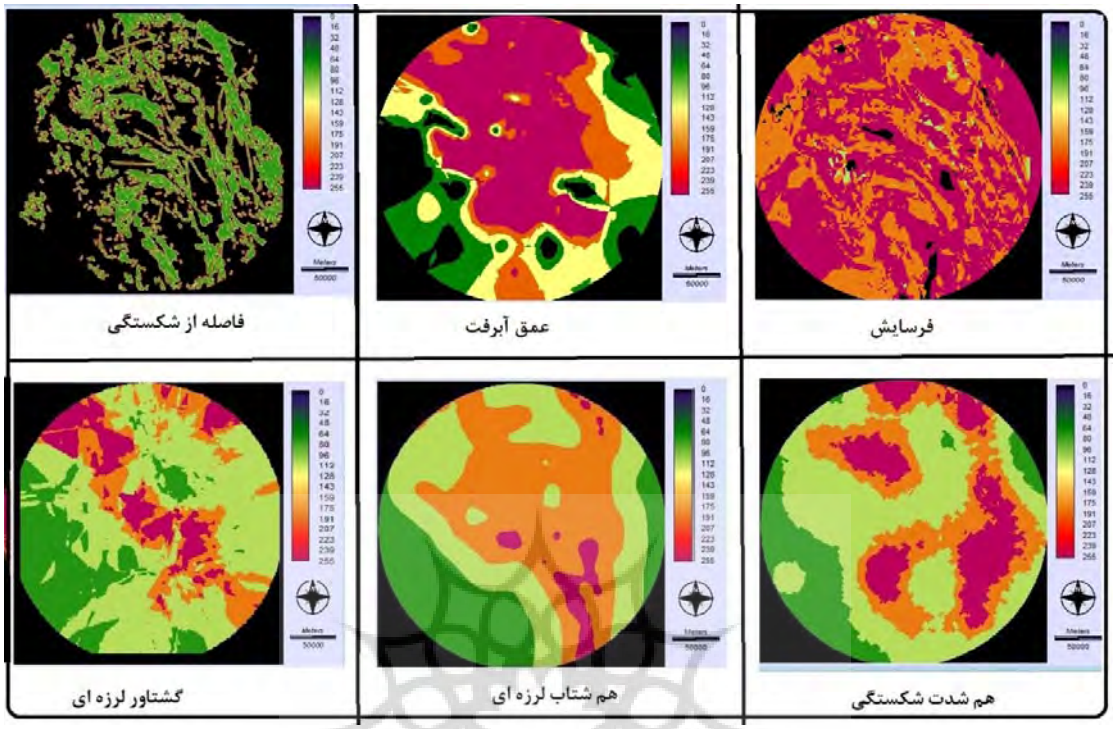
جدول ۲: وزن پارامترها در expert choice

معیارها	وزن‌های استاندارد
گشتاور لرزه‌ای	۰,۴۲۸
هم‌شتاب	۰,۲۵۵
هم‌شدت شکستگی	۰,۱۵
فاصله از گسل	۰,۰۸۷
مقاومت واحدها (فرسایش)	۰,۰۴۷
عمق آبرفت	۰,۰۳۳

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۵

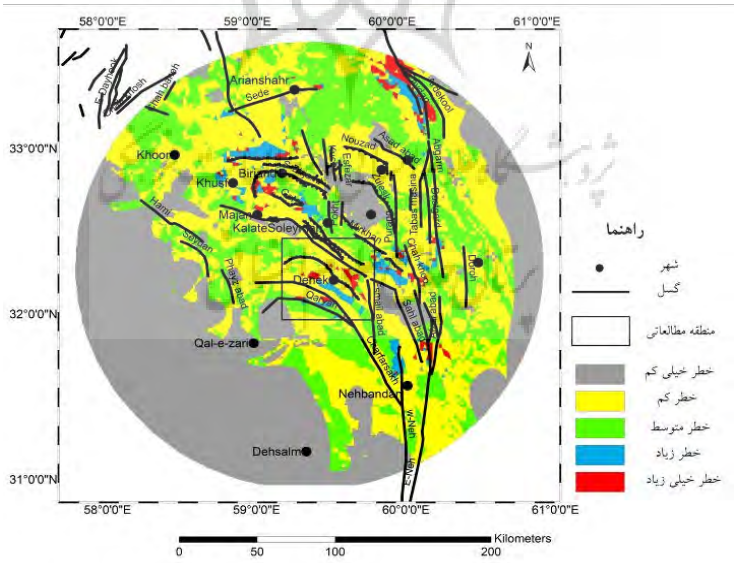
پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه

در روش فازی، نرمال‌سازی نسبت فراوانی هریک از نقشه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Expert choice و درجۀ عضویت فازی براساس نسبت فراوانی‌های نرمال‌سازی‌شده در محیط نرم‌افزار Idrisi تعیین شد (شکل ۸). سپس نقشه‌های تهیه‌شده براساس عملگرهای فازی در نرم‌افزار ARC-GIS به هم همپوشانی داده شدند و خروجی نهایی به‌عنوان نقشۀ پهنه‌بندی تهیه شد (شکل ۹ تا ۱۱) و (جدول ۳).



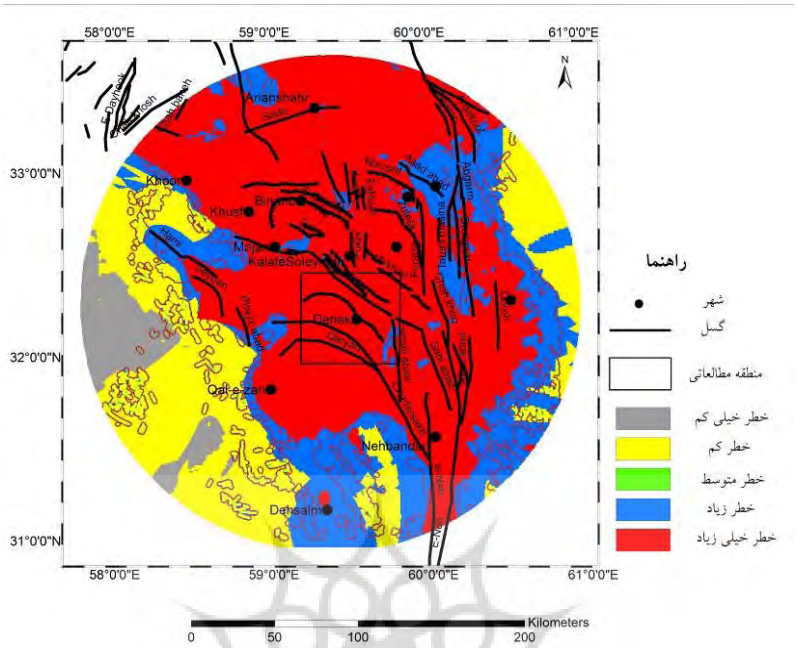
شکل ۸: درجه عضویت فازی پارامترهای مؤثر بر زلزله در منطقهٔ مورد مطالعه

تهیه و ترسیم : محترم قهرمانی، ۱۳۹۵



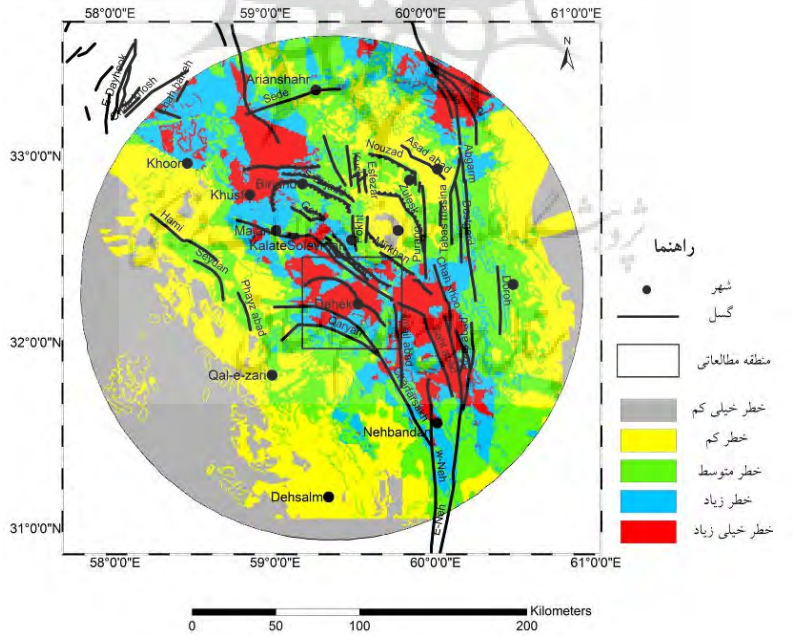
شکل ۹: نقشهٔ پهنه‌بندی نهایی به روش اشتراک فازی

تهیه و ترسیم : محترم قهرمانی، ۱۳۹۵



شکل ۱۰: نقشهٔ پهنه‌بندی نهایی به روش اجتماع فازی

تهیه و ترسیم : محترم قهرمانی، ۱۳۹۵



شکل ۱۱: نقشهٔ پهنه‌بندی نهایی به روش جمع جبری فازی

تهیه و ترسیم : محترم قهرمانی، ۱۳۹۵

جدول ۳: درصد هر کلاس خطر در منطقهٔ مورد مطالعه به فاصلهٔ ۱۵۰ کیلومتری

کلاس خطر	درصد برحسب تابع sum (جمع جبری فازی)	درصد برحسب تابع OR (اجتماع فازی)	درصد برحسب تابع AND (اشتراک فازی)
خیلی‌کم	۲۰	۶	۳۶
کم	۲۸	۲۱	۳۷
متوسط	۲۶	۱	۲۲
زیاد	۱۶	۲۰	۳
خیلی‌زیاد	۱۰	۵۲	۲

مأخذ: مطالعات میدانی نگارندگان، ۱۳۹۵

نتیجه

در این پهنه‌بندی ابتدا عوامل مؤثر بر ایجاد زمین‌لرزه تهیه و اولویت‌بندی شد. از بین عوامل، پارامتر گشتاور لرزه‌ای بیشترین وزن و پارامتر فرسایش و عمق آبرفت کمترین وزن را به خود اختصاص دادند. پایین‌بودن وزن فاکتورهای فرسایش و آبرفت به این دلیل است که بیشتر کانون زمین‌لرزهای با بزرگی بالا در منطقه در عمق کانونی کمتر از ۱۲ کیلومتر و در اثر عملکرد گسل‌های پی‌سنگی است؛ بنابراین تأثیر این فاکتورها کم است. براساس پارامتر شتاب‌لرزه‌ای، شتابی که گسل دهک به روستاهای آن منطقه وارد می‌کند، معادل ۰/۵۸ شتاب ثقلی زمین است. براساس عملگر جمع جبری فازی، حدود ۷۰ درصد از منطقهٔ دهک در محدودهٔ کلاس خطر زیاد و خیلی‌زیاد قرار دارد. همچنین براساس نقشهٔ اجتماع، ۱۰۰ درصد و براساس نقشهٔ اشتراک فازی ۱۵ درصد از منطقهٔ دهک در کلاس‌های خطر زیاد و خیلی‌زیاد قرار دارد. درنهایت در نقشهٔ پهنه‌بندی به روش فازی تا شعاع ۱۵۰ کیلومتری، بیشترین خطر زمین‌لرزه در اطراف گسل نهبندان، سهل‌آباد، دهک، چهارفرسخ، اردکول و ماژان در محدودهٔ خطر خیلی‌زیاد قرار دارند.

منابع

- افتخارنژاد، جمشید؛ یووان اشتوکلین (۱۳۶۹). نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش بیرجند، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- افتخارنژاد، جمشید؛ مهدی علوی‌نایینی؛ عباس بهروزی (۱۹۹۱). نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش قاین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حیدری‌آقاگل، مسعود (۱۳۹۴). بررسی ساختاری زیرکوه با نگرشی بر لرزه‌خیزی منطقه (حاجی‌آباد- شرق ایران)، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند.
- علوی‌نایینی، مهدی؛ عباس بهروزی (۱۹۸۲). نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش شاهرخت؛ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- علوی‌نایینی، مهدی؛ عباس بهروزی (۱۹۸۳). نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ چهارگوش گزیک، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- قدسی‌پور، سیدحسن (۱۳۸۴). مباحثی در تصمیم‌گیری چندمعیاره، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. چاپ چهارم. صفحه ۲۲۰.
- کلارستاقی، ع (۱۳۸۱). بررسی عوامل مؤثر بر وقوع زمین-لغزش‌ها و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضهٔ آبخیز شیرینرود ساری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، صفحه ۱۴۱.

- کوره‌پزان دزفولی، امین (۱۳۸۴). اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن در مدل‌های مسائل مهندسی آب، دانشگاه امیرکبیر. جلد ۱. صفحات ۱۸۱-۱۷۰.
- محمودزاده، حسین (۱۳۶۸). ارزیابی و پهنه‌بندی درجه تناسب شهر تبریز با استفاده از GIS، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان آذربایجان شرقی.
- موحد اول، محسن؛ کاظم امامی؛ جمشید افتخارنژاد؛ یووان‌اشتوکلین(۱۹۷۸).نقشه زمین‌شناسی ۱۰۰۰۰۰: ۱ مختاران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- وکیلی‌اوندری، فاطمه (۱۳۹۳). برهمکنش گسل‌های فعال و کوه‌لغزش در گسترهٔ رشته‌کوه باقران (جنوب بیرجند)، پایان‌نامهٔ تحصیلی کارشناسی ارشد. دانشگاه بیرجند.
- Ambraseys, N., Melvile, A (1991). History of Persian Earthquake. Cambridge University.
- 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: PP: 101-111.
- Ziewonski, A.M., Ekström, G., Franzen, J.E. and Woodhouse, J.H (1987). Global seismicity of 1977: centroid-moment tensor solutions for 471 earthquakes. Physics of the earth and planetary interiors, 45(1), PP:11-36
- Gooijer, J., Hyndman, R (2006). 25 Years of Time Series Forecasting, International Journal of Forecasting, No. 2. PP: 443- 473.
- anks, T.C. and Kanamori, H (1979). A moment magnitude scale. Journal of Geophysical Research B, 84(B5), PP: 2348-2350.
- Mohajer, G.A., Pierce, G. R (1963). Qazvin, Iran earthquake. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 47 (10), PP: 1878- 1883.
- Sahandi, M (1992). Geological quadrangle map of Iran. Dehsalm (Chah Vak) sheet (K9), scale, 1(250,000).
- Tirrule, R., Bell, L.R., Griffins, R.J., and Camp, V. E (1983). The Sistan Suture zone of eastern Iran. G.S.A V. 94.., p. 134- 150.
- Walker, R. T., Jackson, J (2004). Active tectonic and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. Tectonics 23.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی