دوفصلنامهٔ هیدروفیزیک

دورهٔ هشتم، شمارهٔ دوم (پاییز و زمستان ۱۴۰۱)؛ صفحات ۱۲۹-۱۱۹

مقالهٔ پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1401.8.2.14.4

درصد همانندی: ۱۳٪

ارزیابی و تحلیل سایزموتکتونیک و توان لرزه‌خیزی حوضه آبخیز افچه، بیله‌سوار

فریبا اسفندیاری درآباد[*۱]، مارال آبادکار بهروز[۲]، بهروز نظافت تکله[۳]

[*۱] نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
esfandyari@uma.ac.ir

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
m.abadkar12@gmail.com

[۳] دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
behrouznezafat75@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۳/۰۲/۱۹

چکیده

زمین‌لرزه‌ها یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی با ماهیتی غیرقابل‌پیش‌بینی هستند. سایزموتکتونیک علم بررسی رابطه بین وقوع زمین‌لرزه و فرایندهای تکتونیکی است که ارزیابی میزان تأثیرات فرایندهای تکتونیکی در منطقه را بررسی می‌کند. منطقه مورد مطالعه در زون البرز غربی در آذربایجان قرار دارد که بر اساس شواهد زمین‌شناسی و زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده یکی از پهنه‌های فعال و لرزه‌خیز در ایران به شمار می‌آید. ازاین‌رو آگاهی از وضعیت فعالیت‌های نئوتکنیک و توان لرزه‌خیزی منطقه جهت جلوگیری از ساخت‌وساز غیراصولی در حوضه موردتحقیق ضروری است. هدف از پژوهش حاضر ارزیابی توان لرزه‌خیزی گسل‌ها در حوضه بیله‌سوار استان اردبیل است. در این پژوهش برای ترسیم نقشه‌ها و تحلیل آن‌ها از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. ابتدا با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در حوضه مورد مطالعه، گسل‌های (اصلی و فرعی) تعیین و طول آن‌ها مشخص شد. سپس توان لرزه‌زایی گسل‌های منطقه با استفاده از روابط زارع (۱۳۷۴)، نوروزی (۱۹۸۵) و نوروزی و اشجعی (۱۹۷۸) محاسبه شد. با توجه به نتایج، متوسط توان لرزه‌زایی برحسب ریشتر در گسل‌های حاجی محمود قره‌ککیل ۴/۵۳، گورچینلو حاجی‌بیوک ۴/۰۹، حاجی اسماعیل ایمان‌خان ۴/۳۷، حاجی قدرت‌کندی ۴/۸۰، قشلاق آق‌برون ۴/۳۸، شابی‌کندی ۵/۰۳، ایده‌لو ۵/۲۴، کهل‌قشلاق ۴/۵۶، حاجی نورش‌کندی ۴/۳۲، قشلاق محمودلار ۴/۴۷، قشلاق حاج اکبر ۴/۳۹، جهان خانملو ۳/۷۵ و چای قشلاقی سیاب ۳/۵۳ است. نتایج حاصله نشان داد که منطقه موردمطالعه، به‌خصوص بخش‌های مرکزی به سمت جنوب حوضه به علت تمرکز خطواره‌های گسلی، ازنظر لرزه‌خیزی مستعد است و امکان وقوع زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی بیشتر از ۴ ریشتر در آن است. گسل‌های ایده‌لو، شابی‌کندی و حاجی قدرت‌کندی به ترتیب بالاترین توان لرزه‌زای در منطقه را دارند. بر این اساس هر چقدر طول گسل‌ها بزرگ‌تر باشد به همان اندازه میزان تخریب آن بیشتر خواهد بود. بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که بین توان لرزه‌زایی گسل‌ها با طول گسل ارتباط مستقیم وجود دارد. با توجه به نبود مطالعات کافی در مورد تکتونیک و لرزه‌خیزی منطقه، باید به جهت حصول اطمینان بیشتر، مطالعات دیگری در رابطه با سایزموتکتونیک و پهنه‌بندی منطقه ازنظر لرزه‌خیزی نیز انجام گیرد.

کلمات کلیدی: ارزیابی لرزه‌خیزی، تکتونیک، حوضه بیله‌سوار، زمین‌لرزه، گسل فعال.

۱. مقدمه

زمین‌لرزه یکی از خطرناک‌ترین مخاطراتی است که قابلیت پیش‌بینی ندارد و گریز از این پدیده طبیعی ممکن نیست. زمین‌لرزه پدیده غالب در کره زمین است که هرساله خسارت‌های مالی سنگین و تلفات جانی بسیاری به بار می‌آورد، ازاین‌رو مطالعات و پژوهش‌های فراوانی در رابطه با این پدیده مخرب انجام شده است [۱]. با وجود اینکه جلوگیری از وقوع زمین‌لرزه ممکن نیست اما شناسایی مناطق گسلی فعال و بررسی توان لرزه‌خیزی ناشی از آن ضروری است [۲] . یکی از مهم‌ترین مباحث در پژوهش‌های مرتبط با پروژه‌های عمرانی مهم و بزرگ، مطالعه گسل‌ها و توان لرزه‌خیزی آن‌ها است. این مطالعات شاخص‌های ضروری در طراحی مهندسی مانند شناسایی مناطق گسلی فعال و نوع فعالیت گسل‌ها، تعیین رژیم زمین‌ساختی و الگوی تنش‌های اصلی در منطقه و تعیین توان لرزه‌خیزی گسل‌های فعال منطقه موردمطالعه را ارائه می‌دهد. این شاخص‌ها در پایداری و حفظ پروژه‌های عمرانی مؤثر هستند [۳].

بر اساس تعاریف، زمین‌لرزه آزاد شدن انرژی الاستیک ذخیره‌شده در پوسته زمین به‌طور ناگهانی است که باعث لرزش و جنبش‌هایی در سطح زمین می‌شود که همراه با خرابی و خسارت‌هایی است [۴]. زمین‌لرزه باعث تغییر شکل و گسیختگی توده‌های سنگی در مقیاس‌های متفاوت می‌شود. بین گسل و زمین‌لرزه رابطه‌ای دوطرفه و مستقیم برقرار است به‌طوری‌که فراوانی گسل‌ها در یک منطقه باعث وقوع زمین‌لرزه می‌شود. زمین‌لرزه‌های فراوان در یک منطقه نیز سبب ایجاد گسل‌ها و شکستگی‌های جدیدی در توده‌های سنگی منطقه می‌شود و بدین ترتیب توان لرزه‌خیزی منطقه افزایش می‌یابد [۵]. بین توان لرزه‌خیزی گسل‌ها با طول شکسته شده و جابه‌جاشده آن‌ها ارتباط مستقیمی وجود دارد. در هر مطالعه پس از بررسی دقیق سایزموتکتونیک گسل‌های فعال منطقه باید بیشینه توان لرزه‌خیزی گسل‌ها نیز محاسبه شود [۶]. سایزموتکتونیک دانش بررسی هم‌زمان ویژگی‌های زمین‌ساختی با ویژگی‌های لرزه‌ای یک پهنه یا گستره لرزه‌زا است. این علم فرایندهای پوسته زمین را با به‌کارگیری دانش زمین‌لرزه‌شناسی بررسی می‌کند. به عبارتی سایزموتکتونیک، زمین‌لرزه را در درون فرایندهای زمین‌ساختی بررسی می‌کند. مهم‌ترین هدف سایزموتکتونیک یافتن کانون‌های احتمالی رویداد زمین‌لرزه‌های آینده و ویژگی‌های آن‌ها، بررسی شکنندگی پوسته و اندازه تغییرات آن با عمق است. این هدف همچنین شناسایی چشمه‌های با توان جنبش زمین‌لرزه در لیتوسفر و ویژگی‌های آن‌ها را نیز در بر می‌گیرد. علم سایزموتکتونیک زمین‌لرزه‌ها را ابزاری برای درک بهتر از تکتونیک یک گستره جنبا می‌داند [۷]. ازاین‌رو، بررسی لرزه‌شناسی زمین‌لرزه نقش عمده‌ای در توسعه مفهوم تکتونیک صفحه‌ای داشته است. ازآنجایی‌که حرکات تکتونیکی باعث ایجاد زمین‌لرزه می‌شود، درک تکتونیک صفحه‌ای هنگام تلاش برای کاهش مخاطرات مرتبط با گسل بسیار مهم است [۸]. در پژوهش حاضر توان لرزه‌خیزی گسل‌ها در حوضه بیله‌سوار در استان اردبیل بررسی شده است همچنین در پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین میزان تأثیرات زمین‌لرزه و رابطه میان طول گسل با میزان تخریب آن موردبررسی قرار گرفته است.

پژوهش‌ها و مطالعات زیادی در مورد ارزیابی توان لرزه‌خیزی گسل‌ها در مناطق مختلف انجام شده که در منابع خارجی و داخلی می‌توان به پژوهش‌ها و مطالعات زیر اشاره کرد.

رابطی و همکاران (۱۳۹۷)، به بررسی زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در حوضه سپیدرود البرز غربی پرداختند. نتایج نشان داد که در زیرحوضه‌های منطبق بر گسل‌های منجیل، جیرنده، درفک و دیلمان و همچنین مناطق با تراکم گسلی بالا شاخص‌های اندازه‌گیری شده مقادیر بالایی را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده تأثیر گسل‌های مذکور بر منطقه موردمطالعه است [۹]. نگهبان و درتاج (۱۳۹۸)، به ارزیابی تکتونیک فعال حوضه رودخانه سیروان با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک پرداختند. نتایج نشان داد که در بین زیرحوضه‌های مطالعاتی، زیرحوضه شویشه با میانگین کلاس ۲، وضعیت فعال‌تری نسبت به سایر زیرحوضه‌ها دارد [۱۰]. مقصودی و همکاران (۱۳۹۹)، به

بررسی ارزیابی تکتونیک فعال در حوضه‌های حبله‌رود و کردان بر اساس شاخص‌های ژئومورفیک پرداختند. نتایج نشان داد که حوضه کردان در کلاس ۱ و حوضه حبله‌رود در کلاس ۲ قرار دارد. طبق طبقه‌بندی از شاخص IAT می‌توان گفت که هر دو منطقه ازنظر تکتونیکی فعال هستند ولی میزان فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه کردان نسبت به حوضه حبله‌رود بیشتر است [۱۱]. خلج (۱۴۰۰)، به ارزیابی فعالیت زمین‌ساختی حوضه آبریز قروه- دهگلان با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک پرداخت. نتایج نشان داد که فعالیت زمین‌ساختی بالا را در منطقه موردمطالعه نشان می‌دهد که به دلیل فعالیت گسل‌های موجود در منطقه است. از مهم‌ترین گسل‌های واقع در منطقه می‌توان گسل‌های بنه‌آباد، سورمه علی، پریشان، گسل محمودآباد، گسل سیاه و گسل خلخال را نام برد [۱۲]. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)، اثرات ژئومورفولوژیکی تکتونیک فعال و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه را با تأکید بر توان لرزه‌زایی گسل‌ها (مطالعه موردی: نمین، آستارا، تالش) با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی بررسی کردند. نتایج نشان داد که شهرهای نمین، عنبران، لوندویل و اسالم در پهنه خطر بسیار زیاد زمین‌لرزه، آستارا در پهنه خطر زیاد، حویق در پهنه خطر متوسط و شهرهای هشتپر و آبی‌بیگلو در پهنه‌بندی خطر بسیار کم قرار دارند [۱۳]. عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)، فعالیت‌های نئوتکتونیکی را با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و توان لرزه‌زایی گسل‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کوزه‌توپراقی) بررسی کردند. نتایج نشان داد در این مناطق فعالیت گسل شدت نداشته و بنابراین در این مناطق برای مناطق مسکونی خطرات چندانی ایجاد نمی‌کند. از مهم‌ترین گسل حوضه کوزه‌توپراقی می‌توان به گسل آمین‌آباد و ترکه‌ده اشاره کرد [۱۴]. گورشکوف و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی توان لرزه‌خیزی بلوک کورس- ساردینیا با استفاده از منطقه‌بندی مورفوساختاری (MSZ) پرداختند. نتایج نشان داد که توان لرزه‌خیزی بلوک کورس- ساردینیا را می‌توان به‌صورت کم تا متوسط مشخص کرد. مکان‌های تعریف‌شده گره‌های لرزه‌زا اطلاعات کلیدی را برای ارزیابی آگاهانه خطر لرزه‌ای بلندمدت منطقه فراهم می‌کند [۱۵]. وروبیوا و همکاران (۲۰۲۱)، مدل‌سازی توان لرزه‌ای مگاتراست هندوبرمه را با استفاده از مدل دینامیک بلوک و گسل بررسی کردند. نتایج نشان داد که مگاتراست قفل شده است و می‌تواند زلزله‌های بزرگ M ۸+ ایجاد کند. میانگین تخمینی دوره بازگشت رویدادهای بزرگ بیش از هزار سال است. زمین‌لرزه‌هایی با این اندازه تهدید بزرگی برای شمال هند، بنگلادش و میانمار، پرجمعیت‌ترین مناطق جهان هستند [۱۶]. جارا مونیوز و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی توان لرزه‌خیزی پنهان گسل کور پیچیلمو در شیلی با استفاده از ژئومورفولوژی خارج از گسل پرداختند. نتایج نشان داد که گسترش در منطقه پیچیلمو با تغییرات تنش در طول زلزله‌های مگاتراست و با لغزش پراکنده در طول زمین‌لرزه‌های صفحه بالایی همراه است که پیامدهایی برای ارزیابی توان لرزه‌خیزی گسل‌های پنهان در طول حاشیه‌های همگرا و جاهای دیگر دارد [۱۷]. یانگ و همکاران (۲۰۲۳)، به بررسی فعالیت کنونی و توان لرزه‌خیزی گسل کینلینگ شمالی، بلوک اوردوس جنوبی، مرکز چین با استفاده از داده‌های GPS و لرزه‌خیزی پرداختند. نتایج نشان داد که بخش شرقی گسل کینلینگ شمالی توان لرزه‌خیزی قوی دارد و در حال حاضر قفل شده است [۱۸].

با توجه به این امر که بررسی لرزه‌خیزی گسل‌ها در مناطق لرزه‌خیز و پهنه‌های گسلی فعال اهمیت زیادی دارد، بر این اساس تحقیقات زیادی در سال‌های اخیر در داخل و خارج از کشور درزمینهٔ ارزیابی لرزه‌خیزی در مناطق مختلف انجام شده است. بررسی آثار و منابع منتشره نشان داد که هیچ‌گونه پژوهشی درباره فعالیت‌های لرزه‌خیزی حوضه مورد بررسی انجام نشده است. بنابراین خلأ تحقیقی با موضوع تحقیق حاضر کاملاً محسوس بود. از طرفی منطقه موردمطالعه در شمال‌غرب ایران قرار دارد. در این زون پهنه‌های گسلی با امتدادهای مختلف وجود دارد که برهم‌کنش آن‌ها سبب ایجاد زون‌های لرزه‌زا شده است [۱۹]. همچنین مطابق نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله، شهرهای مشکین‌شهر، پارس‌آباد، بیله‌سوار، نیر و درنتیجه حوضه موردمطالعه در پهنه با خطر نسبتاً بالا قرار دارد [۲۰]. ازاین‌رو انجام پژوهش حاضر برای

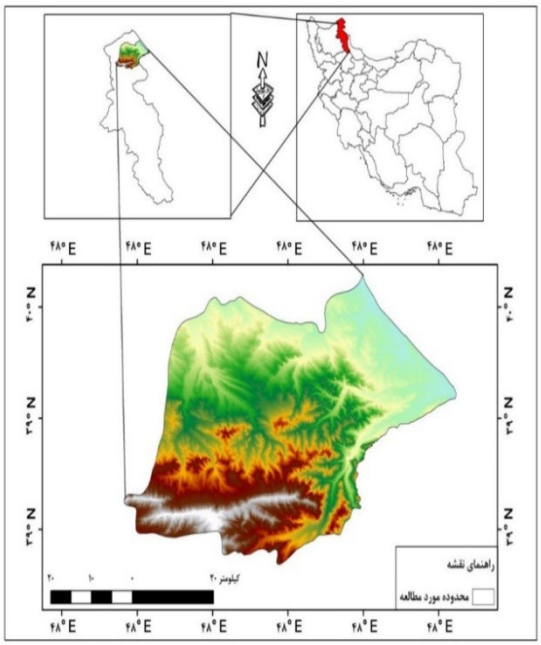
به دست آوردن توان لرزه‌خیزی منطقه و شناسایی پهنه‌های گسلی فعال و پرخطر، جهت جلوگیری از پروژه‌های عمرانی و ساخت‌وساز غیراصولی در حوضه موردتحقیق ضروری است. هدف از پژوهش حاضر ارزیابی توان لرزه‌خیزی گسل‌ها در حوضه بیله‌سوار و برآورد حداکثر توان لرزه‌زایی گسل‌های فعال منطقه بر پایه روابط زارع (۱۳۷۴)، نوروزی (۱۹۸۵) و نوروزی و اشجعی (۱۹۷۸) است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. موقعیت منطقه موردمطالعه

حوضه بیله‌سوار در طول شرقی ′۳۰ °۴۷ تا ′۱۵ °۴۸ و عرض شمالی ′۰۰ °۳۹ تا ′۴۰ °۳۹ قرار دارد و متوسط ارتفاع آن از سطح دریا ۸۳ متر است. این حوضه ۱۹۴۵ کیلومترمربع وسعت دارد و ازنظر وسعت چهارمین شهرستان استان اردبیل محسوب می‌شود که حدود ۱۱ درصد از مساحت استان را به خود اختصاص داده است. حوضه بیله‌سوار در منتهی‌الیه شمال‌شرق اردبیل در فاصله ۲۰۰ کیلومتری آن واقع شده و از قسمت شرق، شمال‌شرقی و جنوب‌شرقی با جمهوری آذربایجان همسایه و تقریباً ۶۸ کیلومتر مرز مشترک دارد. این حوضه در جنوب رود ارس و با فاصله ۵۰ کیلومتری از سمت شرق با دریای خزر قرار دارد و به سبب ارتفاع کم از سطح دریا و مقدار بارندگی نسبتاً خوب و خاک حاصل‌خیز از عمده‌ترین مناطق کشاورزی استان اردبیل به‌شمار می‌رود. بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۶ جمعیت شهرستان بیله‌سوار بالغ بر ۵۱۴۰۴ نفر بوده است (شکل ۱).

حوضه بیله‌سوار در دشت مغان، شمال‌غربی ایران واقع شده است. رودخانه‌های مهم این حوضه بالهارود و آق‌بیگلر هستند [۲۱]. طبق نقشه واحدهای ساختمانی- رسوبی ایران، نبوی (۱۳۵۵)، حوضه موردمطالعه جزء واحد ساختمانی البرز غربی در آذربایجان می‌باشد [۲۲]. بر اساس نقشه ایالت‌های اصلی لرزه‌زمین‌ساختی ایران، میرزائی و همکاران (۱۳۸۱)، این واحد پهنه‌ای لرزه‌خیز است [۲۳]. این حوضه در زون فروافتاده کورا- ارس جای گرفته است. ازنظر ریخت‌شناسی منطقه عمدتاً دارای توپوگرافی ملایم است. بیشتر برونزدهای منطقه را نهشته‌های رسوبی تشکیل می‌دهد، تمامی رسوبات این حوضه در اثر یک فاز تکتونیکی بزرگ که در پلیوسن به وقوع می‌پیوندد، چین‌خورده‌اند. این فاز تکتونیکی درواقع مربوط به فاز پایانی جنبش‌های کوهزایی آلپی است. در اثر این چین‌خوردگی گسل‌های متعددی در این منطقه به وجود آمده است [۲۴].



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

۲-۲. روش پژوهش

این پژوهش به‌منظور ارزیابی توان لرزه‌خیزی گسل‌های حوضه بیله‌سوار انجام شد. ابتدا منابع و یافته‌های علمی درزمینهٔ موضوع پژوهش از طریق بررسی‌های کتابخانه‌ای گردآوری شد. سپس از نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۱۲ متر و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ حوضه موردمطالعه استفاده شد. در این پژوهش برای ترسیم نقشه‌ها و تحلیل آن‌ها از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و در محیط Arcmap، نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین مرجع و مختصات‌دار شد و داده‌های رستری به فرمت وکتوری (رقومی) تبدیل شد. سپس اقدام به ترسیم نقشه‌های محدودهٔ مطالعاتی شد. ابتدا از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات

معدنی کشور در حوضه موردمطالعه، ساختارهای اصلی منطقه مانند گسل‌ها (اصلی و فرعی) به‌صورت شیپ فایل (فرمت وکتوری) استخراج شد. پس از ترسیم خطواره‌ها، طول آن‌ها با استفاده از ابزار COGO در محیط Arcmap به دست آمد. بعد از شناسایی خطواره‌های گسلی در محدوده موردمطالعه، موقعیت دقیق مناطق مسکونی در منطقه نیز با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و به‌صورت شیپ فایل (فرمت وکتوری) استخراج شد. درنهایت با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) نقشه موقعیت جغرافیای منطقه (شکل ۱) تهیه شد. با ترکیب لایه‌های اطلاعاتی مدل رقومی ارتفاعی (DEM) به‌عنوان نقشه زمینه و دو لایه اطلاعات وکتوری مربوط به گسل‌ها و موقعیت مناطق مسکونی، نقشه گسل‌های منطقه موردمطالعه (شکل ۲) نیز ترسیم شد. در مرحله بعدی جهت ارزیابی فعالیت گسل‌ها از روابط لرزه‌خیزی گسل‌ها (روابط ۱ تا ۳) استفاده شد و جدولی بر اساس پارامترهای طول گسل و لرزه‌خیزی محاسبه‌شده از رابطه‌های ۱ تا ۳ (جدول ۱) ترسیم شد. در مرحله پایانی، نتایج حاصل از محاسبات توان لرزه‌خیزی گسل‌های منطقه، بررسی و تجزیه‌وتحلیل شد.

۲-۲-۱. سایزموتکتونیک

سایزموتکتونیک دانش ارزیابی ارتباط بین وقوع زمین‌لرزه و فرایندهای تکتونیکی است [۲۵]. در سایزموتکتونیک به تکتونیک صفحه‌ای به‌عنوان موتور مولد زمین‌لرزه‌ها نگریسته می‌شود و زمین‌لرزه‌ها را به‌عنوان نشانه‌ای از تکتونیک صفحه‌ای در نظر می‌گیرند. به‌طورکلی، سایزموتکتونیک مرتبط با مواردی است که تغییر شکل لرزه‌ای سطح زمین را کنترل می‌کنند که این امر اهمیت سایزموتکتونیک را در تشخیص مخاطرات لرزه‌ای نشان می‌دهد. در مطالعات سایزموتکتونیک، تمرکز بر شناخت نحوه پراکندگی زمین‌لرزه‌ها در مکان، زمان، اندازه و سبک‌های متفاوت است [۲۶].

سرچشمه‌های لرزه‌ای مناطقی هستند که توانایی وقوع زمین‌لرزه را دارند که گسل‌های فعال یکی از مهم‌ترین آن‌ها هستند [۶] . گسل فعال، گسلی است که در رژیم سایزموتکتونیک کنونی دارای حرکت بوده و احتمال دارد در آینده نیز دارای حرکت باشد. بر اساس شواهد تاریخی، زمین‌شناسی، لرزه‌شناسی، ژئودتیک و ژئوفیزیک می‌توان فعالیت گسل‌ها را تعیین کرد [۲۷]. زمین‌لرزه‌های بزرگ در مناطق گسلی باعث جابه‌جایی‌های قائم و افقی می‌شوند که این جابه‌جایی‌ها سبب تشکیل پرتگاه‌های گسلی می‌شود. این پرتگاه‌های گسلی در اثر وقوع زمین‌لرزه به وجود می‌آیند و زمین‌لرزه‌های بعدی باعث جابه‌جایی آن‌ها می‌شود. برای اندازه‌گیری قدرت زلزله یا به عبارتی کمّی‌کردن زلزله از مقیاس‌های بزرگی و شدت زلزله استفاده می‌شود. بزرگی زلزله بر اساس اطلاعات دستگاهی بوده و مقیاسی کمّی است که بیانگر کل انرژی آزادشده است و واحد سنجش آن ریشتر است که تا ۸ درجه آن رایج است. به دلیل اینکه بزرگی‌های محاسبه‌شده در مناطق مختلف باید یکسان باشند تصحیحاتی با توجه به فاصله ایستگاه تا مرکز سطحی زلزله انجام می‌شود. شدت زلزله مقیاسی مشاهده‌ای، غیردستگاهی و فاقد مبنای ریاضی و علمی است. این مقیاس به فاصله کانون زلزله تا منطقه موردنظر، عمق کانونی زلزله، مدت پایداری لرزش، نوع خاک، عمق سنگ‌بستر و ساختمان آن، عمق سطح ایستابی، کیفیت ساختمان‌ها، تراکم جمعیت و ... بستگی دارد [۶]. مقیاس شدت زلزله (مقیاس مرکالی) را برحسب اثراتی که به وجود می‌آورد، درجه‌بندی می‌کنند. بنابراین شدت یک زلزله را نمی‌توان با عدد معینی بیان کرد بلکه فقط امکان دارد خطوط یک شدت را ترسیم نمود، یعنی نقاطی را که خرابی آن‌ها شبیه یکدیگر است را به هم وصل نمود و شدت هر منطقه را معین کرد [۲۸].

کانون یا مرکز درونی زلزله نقطه‌ای در عمق زمین است که انتشار امواج لرزه‌ای از آنجا شروع می‌شود. مرکز سطحی یا بیرونی زلزله نزدیک‌ترین نقطه روی سطح زمین نسبت به مرکز درونی زلزله است که بیشترین شدت لرزش را دارد. عمق کانونی فاصله بین مرکز درونی تا مرکز بیرونی زلزله است که به‌صورت خطی عمود بر سطح زمین است. فاصله مرکز بیرونی زلزله تا ایستگاه لرزه‌نگاری موردنظر فاصله سطحی زلزله است [۶].

در مطالعات لرزه‌شناسی حریم ایمنی گسلش، حریمی است که برای یک گسل لرزه‌زا در نظر گرفته می‌شود که در آن سازه‌ها از اثرات منطقه نزدیک گسل، مانند گسیختگی سطحی، جنبش شدید زمین، جابه‌جایی و زمین‌لغزش، در مناطق با توپوگرافی و شیب زیاد، تأثیر می‌پذیرند [۲۹]. گسیختگی سطحی یکی از خطرات رویداد زمین‌لرزه است که با رعایت فاصله تعریف‌شده به‌سادگی قابل‌اجتناب است. فاصله تعریف‌شده به‌عنوان حریم عموماً از ۱۵۰ متر تا ۲ کیلومتر در تغییر است و بر مبنای مطالعات زمین‌شناسی و حساسیت سازه معرفی می‌شود. هدف قانون حریم گسل، قانونمند کردن توسعه سازه‌های بشری و زندگی شهری در مجاورت گسل‌های فعال است که بدین ترتیب خطر گسیختگی مستقیم ناشی از زمین‌لرزه کاهش می‌یابد [۳۰].

۲-۲-۲. توان لرزه‌خیزی گسل‌ها

برای تعیین لرزه‌خیزی در یک منطقه باید مخاطره‌آمیزی گسل‌ها ازنظر توان لرزه‌زایی بررسی شود [۳۱]. روش بزرگا- طول گسل یکی از معتبرترین روش‌ها در اندازه‌گیری توان لرزه‌زایی گسل است (زارع، ۱۳۷۴)، برخی روابط کمّی تعیین توان لرزه‌زایی گسل‌ها عبارت‌اند از:

الف: رابطه زارع (۱۳۷۴).

$$M_s = 3.66 + 0.91 \ln L \quad (۱)$$

L نیمی از طول گسل برحسب کیلومتر است (نوروزی، ۱۹۸۵).

ب: رابطه نوروزی (۱۹۸۵).

$$M_s = 1.259 + 1.244 \log l \quad (۲)$$

L نیمی از طول گسل برحسب کیلومتر است (نوروزی و مهاجر اشجعی، ۱۹۸۷).

پ: رابطه نوروزی و مهاجر اشجعی (۱۹۷۸).

$$M_s = 5.4 + \log l \quad (۳)$$

Ms بزرگی زمین‌لرزه در مقیاس ریشتر و L نیمی از طول گسل برحسب کیلومتر است [۳۲].

روابط زیادی برای محاسبه توان لرزه‌خیزی گسل‌ها وجود دارد اما به دلیل اینکه نتایج حاصل از این روابط کاربردی‌تر است و همچنین در مطالعات پیشین با استفاده از این روابط نتایج خوبی حاصل شده است، به همین علت در این پژوهش از روابط فوق استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

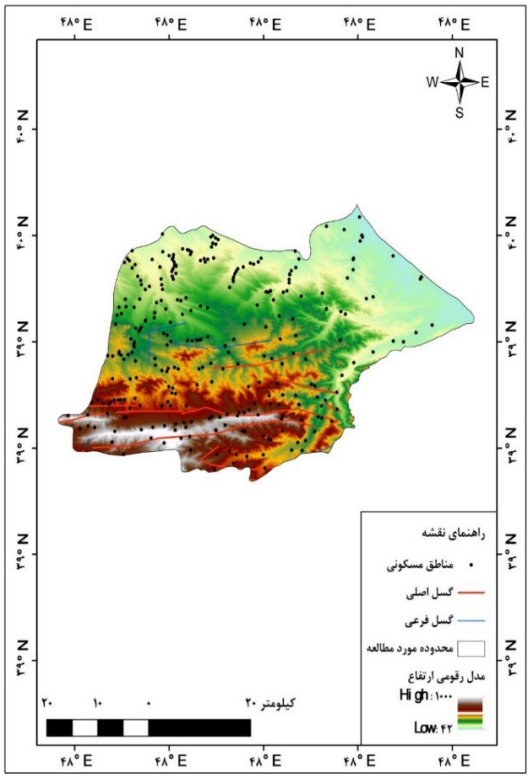
در این پژوهش تعداد ۱۳ خطواره گسلی در منطقه موردمطالعه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور در حوضه موردمطالعه استخراج (شکل ۲) و طول آن‌ها مشخص شد. در مرحله بعد مقادیر توان لرزه‌زایی برای هرکدام از این خطواره‌های گسلی با استفاده از روابط زارع (۱۳۷۴)، نوروزی (۱۹۸۵) و نوروزی و اشجعی (۱۹۷۸) محاسبه شد. نتایج حاصل از این محاسبات در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به محاسبات انجام‌شده و معادلات زراع، نوروزی و نوروزی و اشجعی گسل‌های موجود در منطقه موردمطالعه به‌طور متوسط به ترتیب توان ایجاد زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۵/۰۸، ۲/۱۰ و ۶/۰۸ ریشتر را دارند. محاسبات انجام شده همچنین مقادیر متوسط توان لرزه‌زایی گسل‌های حاجی محمود قره‌ککیل ۴/۵۳، گورچینلو حاجی‌بیوک ۴/۰۹، حاجی اسماعیل ایمان‌خان ۴/۳۷، حاجی قدرت‌کندی ۴/۸۰، قشلاق آق‌برون ۴/۳۸، شابی‌کندی ۵/۰۳، ایده‌لو ۵/۲۴، کهل‌قشلاق ۴/۵۶، حاجی نورش‌کندی ۴/۳۲، قشلاق محمودلار ۴/۴۷، قشلاق حاج اکبر ۴/۳۹، جهان خانملو ۳/۷۵ و چای قشلاقی سیاب ۳/۵۳، در حوضه موردبررسی را برحسب ریشتر نشان می‌دهد.

محاسبات صورت گرفته بر اساس روابط بالا (جدول ۱) در مقدار توان لرزه‌خیزی گسل‌ها تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. به‌عنوان‌مثال، توان لرزه‌خیزی گسل ایده‌لو در رابطه نوروزی ۲/۸۱ ریشتر بوده، درحالی‌که در روابط زارع و نوروزی و اشجعی به ترتیب ۶/۲۷ و ۶/۶۴ ریشتر محاسبه شد. با توجه به این محاسبات، میانگین توان لرزه‌خیزی گسل ایده‌لو نیز

محاسبه شد که عدد ۵/۲۴ ریشتر به دست آمد. بر اساس ماهنامه شبکه شتاب‌نگاری ایران (۱۳۹۲)، اطلاعات لرزه‌ای ثبت‌شده در ایستگاه شتاب‌نگاری بیله‌سوار از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۲ میلادی، زلزله‌هایی با بزرگی بیشتر از ۵ ریشتر را نشان می‌دهد، بر این اساس محاسبات انجام‌شده به‌طور نسبی با واقعیت منطبق است [۳۳].

طبق مقادیر محاسبه‌شده و طول گسل‌های به‌دست‌آمده در منطقه، بین توان لرزه‌زایی و لگاریتم طول گسل‌ها هم‌بستگی مثبت و مستقیم برقرار است. گسل‌های ایده‌لو، شابی‌کندی و حاجی قدرت‌کندی (به ترتیب با طول ۳۵/۱۱، ۲۵/۰۲ و ۱۷/۵۵ برحسب کیلومتر) که طول بیشتری نسبت به سایر گسل‌های منطقه دارند، بالاترین توان لرزه‌زایی را در منطقه دارند درنتیجه باعث رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ می‌شوند. بر این اساس مناطق مسکونی اطراف این گسل‌ها در خطر زمین‌لرزه بیشتری قرار دارند. بعد از گسل‌های ذکرشده در بالا گسل‌های حاجی محمود قره‌ککیل، گورچینلو حاجی‌بیوک، حاجی اسماعیل ایمان‌خان، قشلاق آق‌برون، کهل‌قشلاق، حاجی نورش‌کندی، قشلاق محمودلار و قشلاق حاج اکبر به ترتیب بالاترین توان لرزه‌زایی را در منطقه دارند. گسل‌های جهان خانملو و چای قشلاقی سیاب به دلیل طول کمتر خود، کمترین توان لرزه‌زایی را در مقایسه با سایر گسل‌های منطقه دارند.

با توجه به استفاده از روابط زارع (۱۳۷۴)، نوروزی (۱۹۸۵) و نوروزی و اشجعی (۱۹۷۸) و نتایج حاصله از گسل‌های موجود در منطقه تنها یک نقشه به‌عنوان نتیجه (شکل ۲) به دست آمد. بر اساس شکل (۲) در مناطق مرکزی به سمت جنوب حوضه تمرکز خطواره‌های گسلی می‌باشد. این قسمت حوضه بر اساس نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) نسبت به سایر قسمت‌های حوضه مرتفع‌تر است. به دلیل اینکه وقوع زمین‌لرزه در شیب‌های کم و زیاد موجب تحریک و ناپایداری شیب‌ها یا به‌عبارتی‌دیگر، باعث وقوع زمین‌لغزش می‌شود (شعاعی، ۱۳۹۸)، امکان وقوع زمین‌لغزش نیز در این بخش از حوضه وجود دارد [۳۴].



شکل ۲. نقشه گسل‌های منطقه موردمطالعه (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۲)

بر اساس جدول (۱) منطقه موردمطالعه به‌طورکلی ازنظر لرزه‌خیزی مستعد است و گسل‌های منطقه و مجاور آن توان ایجاد زمین‌لرزه‌هایی به بزرگی بیش از ۴ ریشتر را دارند. طبق نقشه گسل‌های منطقه موردمطالعه (شکل ۲)، لرزه‌خیزی بیشتر در مناطق مرکزی به سمت جنوب حوضه است که به علت تمرکز گسل‌ها در آن بخش است. با توجه به قرار گرفتن این گسل‌ها در نزدیکی مناطق مسکونی در صورت رخداد زمین‌لرزه در راستای این گسل‌ها، خسارت‌های زیادی به بار می‌آید و مناطق مسکونی در این قسمت‌های حوضه در خطر زمین‌لرزه بیشتری قرار دارند. از بررسی‌های انجام‌یافته در خصوص توان لرزه‌خیزی گسل‌های منطقه و نحوه استقرار مناطق مسکونی (شکل ۲) می‌توان گفت زمین‌لرزه یکی از عوامل مهم مخاطره‌آمیز محیطی و ژئومورفولوژی منطقه موردبررسی است.

جدول ۱. توان لرزه‌زایی گسل‌های موجود در حوضه بیله‌سوار برحسب ریشتر

نام گسل	طول گسل (کیلومتر)	زارع	نوروزی	نوروزی و اشجعی	میانگین
حاجی محمود قره‌ککیل	۱۱/۳۴	۵/۲۴	۲/۲۰	۶/۱۵	۴/۵۳
گورچینلو حاجی‌بیوک	۵/۶۰	۴/۶۰	۱/۸۱	۵/۸۵	۴/۰۹
حاجی اسماعیل ایمان‌خان	۸/۸۲	۵/۰۱	۲/۰۶	۶/۰۴	۴/۳۷
حاجی قدرت‌کندی	۱۷/۵۵	۵/۶۴	۲/۴۳	۶/۳۴	۴/۸۰
قشلاق آق‌برون	۸/۹۰	۵/۰۲	۲/۰۶	۶/۰۵	۴/۳۸
شابی‌کندی	۲۵/۰۲	۵/۹۶	۲/۶۲	۶/۵۰	۵/۰۳
ایده‌لو	۳۵/۱۱	۶/۲۷	۲/۸۱	۶/۶۴	۵/۲۴
کهل‌قشلاق	۱۲/۰۵	۵/۲۹	۲/۲۳	۶/۱۸	۴/۵۶
حاجی نورش‌کندی	۸/۱۵	۴/۹۴	۲/۰۲	۶/۰۱	۴/۳۲
قشلاق محمودلار	۱۰/۳۴	۵/۱۶	۲/۱۵	۶/۱۱	۴/۴۷
قشلاق حاج اکبر	۹/۱۲	۵/۰۴	۲/۰۸	۶/۰۶	۴/۳۹
جهان خانملو	۳/۲۹	۴/۱۱	۱/۵۳	۵/۶۱	۳/۷۵
چای قشلاقی سیاب	۲/۳۰	۳/۷۹	۱/۳۳	۵/۴۶	۳/۵۳
متوسط		۵/۰۸	۲/۱۰	۶/۰۸	--

نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات عابدینی و همکاران (۱۴۰۱) که به بررسی توان لرزه‌زایی گسل‌ها حوضه آبخیز کوزه‌تـوپراقی پرداختنـد و مطالعـات اسـفندیاری درآبـاد و نظافت تکله (۱۴۰۲) که به بررسی توان لرزه‌خیزی گسل‌ها در حوضه آبخیز نیر پرداختند منطبق است زیرا مناطق ازنظر طول گسل منطبق هستند [۳۵-۳۶]. در هر دو پـژوهش ذکرشـده بـا استفاده از روابط زارع، نوروزی و اشجعی و نوروزی، فعالیت گسـل‌ها بررسی‌شـده کـه کـارایی ایـن روابـط را در محاسـبه لرزه‌خیزی گسل‌ها نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج مطالعـات رجبـی و آقاجـانی (۱۳۸۹) کـه بـه بررسی گسل‌ها، توان لرزه‌زایی و خطر زمین‌لـرزه در مخـروط افکنه‌های شمال‌شرق دریاچه ارومیه پرداختند و به ایـن نتیجـه رسـیدند کـه گسـل‌های منطقـه و مجـاور آن تـوان ایجـاد زمین‌لرزه‌هـایی بـه بزرگـی بـیش از ۶ ریشـتر را دارنـد و بـین قابلیت لرزه‌زایی گسل‌ها با طول گسل ارتباط مسـتقیم وجـود دارد، هم‌راستا است [۳۷]. نتایج پژوهش عابدینی و همکـاران (۱۴۰۱)، توان لرزه‌زایی گسل‌ها در منطقه نمین، آستارا، تالش را بـا اسـتفاده از معـادلات ولـز و کـوپر اسـمیت، نـوروزی، اشجعی و زارع، محاسبه کردند [۳۸].

۴. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به ارزیابی و تحلیل سایزموتکتونیک و توان لرزه‌خیزی حوضه آبخیز افچه، بیله‌سوار با استفاده از روابط زارع (۱۳۷۴)، نوروزی (۱۹۸۵) و نوروزی و اشجعی (۱۹۷۸) پرداخته است. بزرگای به‌دست‌آمده از رابطه زارع و نوروزی و اشجعی هم‌خوانی بیشتری با زلزله‌های ثبت‌شده در ایستگاه شتاب‌نگاری در منطقه داشته است، بر این اساس نسبت به رابطه نوروزی نتایج قابل‌قبول‌تری را ارائه می‌دهند. سپس توان لرزه‌زایی گسل‌های منطقـه با استفاده از روابط زارع (۱۳۷۴)، نوروزی (۱۹۸۵) و نوروزی و اشجعی (۱۹۷۸) محاسبه شد. با توجه به نتایج، متوسط توان لرزه‌زایی برحسب ریشتر در گسل‌های حاجی محمود قره‌ککیل ۴/۵۳، گورچینلو حاجی‌بیوک ۴/۰۹، حاجی اسماعیل ایمان‌خان ۴/۳۷، حاجی قدرت‌کندی ۴/۸۰، قشلاق آق‌برون ۴/۳۸، شابی‌کندی ۵/۰۳، ایده‌لو ۵/۲۴، کهل‌قشلاق ۴/۵۶، حاجی

نورش‌کندی ۴/۳۲، قشلاق محمودلار ۴/۴۷، قشلاق حاج اکبر ۴/۳۹، جهان خانملو ۳/۷۵ و چای قشلاقی سیاب ۳/۵۳ است. نتایج حاصله نشان داد که منطقه موردمطالعه، به‌خصوص بخش‌های مرکزی به سمت جنوب حوضه به علت تمرکز خطواره‌های گسلی، ازنظر لرزه‌خیزی مستعد است و امکان وقوع زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی بیشتر از ۴ ریشتر در آن وجود دارد. گسل‌های ایده‌لو، شابی‌کندی و حاجی قدرت‌کندی به ترتیب بالاترین توان لرزه‌زای در منطقه را دارند. نتایج این مطالعه بیانگر مستعد بودن منطقه ازنظر لرزه‌خیزی است، به‌خصوص در مناطق مرکزی به سمت جنوب حوضه که تمرکز خطواره‌های گسلی در آن بخش بررسی شد. همچنین این نتیجه حاصل شد که گسل‌های ایده‌لو، شابی‌کندی و حاجی قدرت‌کندی به ترتیب بالاترین توان لرزه‌زایی را در منطقه دارند. نتایج همچنین نشان داد که تمرکز گسل‌ها در مناطق مرتفع‌تر حوضه است. با توجه به اینکه وقوع زمین‌لغزش بعد از زلزله در شیب‌ها محتمل است، ازاین‌رو پیشنهاد می‌شود که منطقه ازنظر وقوع زمین‌لغزش نیز بررسی شود. با توجه به نبود مطالعات کافی در مورد تکتونیک و لرزه‌خیزی منطقه، پیشنهاد می‌شود در این منطقه مطالعات سطح زمین از طریق بازدیدهای میدانی و استفاده از سایر روش‌های تعیین لرزه‌خیزی، برای تأیید نتایج این پژوهش و به دست آوردن اطلاعات کامل‌تر در مورد سایزموتکتونیک منطقه و پهنه‌بندی منطقه ازنظر لرزه‌خیزی انجام شود. بر اساس نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود برای اجتناب از خسارت‌های جانی و مالی با فعالیت‌های نئوتکتونیکی روی گسل‌های بیله‌سوار فعالیت‌های پیشگیرانه در جهت جلوگیری از ساخت‌وسازهای غیرمجاز بر روی گسل‌های موردمطالعه انجام گیرد و همچنین یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های پیشگیرانه در جهت جلوگیری از آسیب‌پذیری لرزه‌ای بر سکونتگاه‌ها تعیین حریم ایمنی گسل و رعایت میزان فاصله سازه‌ها از گسل است.

سپاسگزاری

از حمایت دانشگاه محقق اردبیلی در جهت پیشبرد و تحقق این پژوهش قدردانی می‌گردد.

مراجع

[۱] خدادادی جید، شاهین پورزینلی سعید. پهنه‌بندی لرزه‌ای شهر اردبیل با استفاده از تحلیل خطر قطعی و سیستم فازی مهندسی عمران مدرس.۱۴۰۱؛ ۲۲(۲): ۵۷-۴۳.

[2] Erdik M, Demircioglu M, Sesetyan K, Durukal E, Siyahi B. Earthquake hazard in Marmara region, Turkey. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2004 Sep 1;24(8):605-31.

[۳] ولی‌زاده قاسم. مطالعه ریسک لرزه‌خیزی منطقه اردبیل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه عمران. دانشکده فنی مهندسی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود. ۱۳۹۵؛ ۸۰ صفحه.

[۴] پرویزی فریبا، شعاعی غلام رضا. تحلیل احتمالی خطر زمین‌لرزه و لرزه‌خیزی شهر بندرعباس. اولین همایش بین‌المللی پژوهش و پیشرفت در علوم زمین. ۱۳۹۶؛ شیراز.

[۵] آلگر کلود. ناآرامی‌های زمین (زلزله و آتش‌فشان)- ترجمه درویش‌زاده، علی. چاپ اول. دانشگاه تهران. ۱۳۶۷؛ ۱۹۴ صفحه.

[۶] پورکرمانی محسن، آرین مهران. سایزموتکتونیک. ویرایش اول. شرکت مهندسی مشاور دزآب. ۱۳۷۶؛ ۲۷۰ صفحه.

[۷] نعمتی مجید. مبانی لرزه‌زمین‌ساخت با نگاهی ویژه به لرزه‌زمین‌ساخت ایران‌زمین. دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۱۳۹۶؛ ۲۹۹ صفحه.

[8] Lay T, Wallace TC. Modern global seismology. Elsevier; 1995 May 18.

[۹] رابطی دنیا، ده‌بزرگی مریم، حکیمی‌آسیابر سعید، نوزعیم رضا. بررسی زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در حوضه سپیدرود البرز غربی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی. ۱۳۹۷؛ ۷(۲): ۱۵۷- ۱۴۰.

[۱۰] نگهبان سعید، درتاج دیانا. ارزیابی تکتونیک فعال حوضه رودخانه سیروان با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک. هیدروژئومورفولوژی. ۱۳۹۸؛ ۵(۱۹): ۲۰۹- ۱۸۷.

[۱۱] مقصودی مهران، جعفربگلو منصور، جعفری رضا. ارزیابی تکتونیک فعال در حوضه‌های حبله‌رود و کردان بر اساس شاخص‌های ژئومورفیک. جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۳۹۹؛ ۹(۳۵): ۷۷- ۵۵.

[۱۲] خلج محمد. ارزیابی فعالیت زمین‌ساختی حوضه آبریز قروه دهگلان با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک. جغرافیا و توسعه. ۱۴۰۰؛ ۱۹(۶۲): ۱۵۶- ۱۳۳.

[۱۳] عابدینی موسی، ایرانی ویدا، اسفندیاری درآباد فریبا. اثرات ژئومورفولوژیکی تکتونیک فعال و پهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه با تأکید بر توان لرزه‌زایی گسل‌ها (مطالعه موردی: نمین، آستارا، تالش). جغرافیا و برنامه‌ریزی. ۱۴۰۱؛ ۲۶(۸۲): ۱۶۰- ۱۴۵.

[۱۴] عابدینی موسی، پاسبان امیر حسام، نظافت تکله بهروز، پورقاسمی الهامه. بررسی فعالیت‌های نئوتکتونیکی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و توان لرزه‌زایی گسل‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کوزه‌توپراقی). مطالعات علوم محیط‌زیست. ۱۴۰۱؛۷(۲): ۵۰۵۲- ۵۰۴۳.

[15] Gorshkov A, Panza GF, Soloviev A, Brandmayr E. On the seismic potential of the Corsica–Sardinia block. Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali. 2021 Dec;32:715-28.

[16] Vorobieva I, Gorshkov A, Mandal P. Modelling the seismic potential of the Indo-Burman megathrust. Scientific Reports. 2021 Oct 27;11(1):21200.

[17] Jara-Muñoz J, Melnick D, Li S, Socquet A, Cortés-Aranda J, Brill D, Strecker MR. The cryptic seismic potential of the Pichilemu blind fault in Chile revealed by off-fault geomorphology. Nature Communications. 2022 Jun 11;13(1):3371.

[18] Yang C, Ji L, Yang Y, Su L, Wang Y, Shi H. Present-day activity and seismic potential of the north Qinling fault, southern ordos block, central China, as revealed from GPS data and seismicity. Frontiers in Earth Science. 2023 Jan 20;10:1058243.

[۱۹] ولی‌زاده قاسم. مطالعه ریسک لرزه‌خیزی منطقه اردبیل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه عمران. دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود. ۱۳۹۵؛ ۸۰ صفحه.

[۲۰] مطالعات طرح آمایش استان اردبیل. جلد اول تحلیل وضعیت و ساختار. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اردبیل. ۱۳۹۱.

[۲۱] اسدیان علی. گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱۰۰۰۰۰ :۱ گرمی (بیله‌سوار). سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۱۹۹۴؛ ۱۰ صفحه.

[۲۲] نبوی محمد حسین. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور. ۱۳۵۵؛ ۱۰۹ صفحه.

[۲۳]میرزائی نوربخش، قیطانچی محمد رضا. پارامترهای مبنایی زمین‌لرزه‌های ایران. چاپ اول. انتشارات دانش نگار. ۱۳۸۱؛ ۱۱۸ صفحه.

[۲۴] اسدیان علی. گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱۰۰۰۰۰ :۱ گرمی (بیله‌سوار)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۱۹۹۴؛ ۱۰ صفحه.

[25] Lay T, Wallace T. Modern global seismology. Academic Press. London. U.K. 1995; 521p.

[۲۶] آرین مهران. لرزه‌زمین‌ساخت کاربردی. چاپ اول. ناشر آثار نفیس. ۱۳۹۱؛ ۳۰۴ صفحه.

[27] Slemmons DB, McKinney R. Definition of ‘active fault’. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Soils and Pavements Laboratory Vicksburg. 1997; 77–8.

[28] Daneshjoo F. Earthquake Engineering Lecture - Part 5- Earthquake Intensity and Magnitude. Tarbiat Modares University– Tehran– Iran. Technical Report. 2010.

[۲۹] مجرب مسعود، زارع مهدی. تعیین حریم مهندسی گسل شمال تهران. زمین. ۱۳۸۸؛ ۴(۱): ۱۰- ۱.

[۳۰] میرزائی نوربخش، قیطانچی محمد رضا. پارامترهای مبنایی زمین‌لرزه‌های ایران. چاپ اول. انتشارات دانش نگار. ۱۳۸۱؛ ۱۱۸ صفحه.

[۳۱] عابدینی موسی، سرمستی نادر. ارزیابی فعالیت و توان لرزه‌زایی گسل تبریز با شاخص‌های ژئومورفیک.

تکنیک سنجش‌ازدور و GIS. جغرافیا و پایداری محیط. ۱۳۹۴؛ ۵(۲): ۴۷- ۳۳.

[32] Nowroozi Ahmad., Mohajer-Ashjai A. Obserud and probable Intensity Zoning of Iran. Tectonophysics. 1978; p49.

[۳۳] ماهنامه شبکه شتاب‌نگاری ایران. وزارت راه و شهرسازی. مرکز تحقیقات راه. مسکن و شهرسازی شبکه شتاب‌نگاری ایران. ۱۳۹۲؛۱۰(۵):۱۰- ۷.

[۳۴] شعاعی ضیاء الدین. ناپایداری شیب‌ها (زمین‌لغزش‌ها)- اصول و سازوکارهای وقوع. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. ۱۳۹۸؛ ۳۰ صفحه.

[۳۵] عابدینی موسی، پاسبان امیرحسام، نظافت تکله بهروز، پورقاسمی الهامه. بررسی فعالیت‌های نئوتکتونیکی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و توان لرزه‌زایی گسل‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کوزه‌توپراقی). مطالعات علوم محیط‌زیست. ۱۴۰۱؛۷(۲): ۵۰۵۲- ۵۰۴۳.

[۳۶] اسفندیاری درآباد فریبا، نظافت تکله بهروز. ارزیابی و تحلیل فعالیت‌های نئوتکتونیکی و توان لرزه‌خیزی گسل‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز نیر). جغرافیا و روابط انسانی. ۱۴۰۲؛ ۵(۴): ۵۹۰- ۵۶۸.

[۳۷] رجبی معصومه، آقاجانی کامیلا. بررسی گسل‌ها و توان لرززایی و خطر زمین‌لرزه در مخروط افکنه‌های شمال شرق دریاچه ارومیه. جغرافیای طبیعی. ۱۳۸۹؛۳(۷): ۱۴- ۱.

[۳۸] ایرانی ویدا، عابدینی موسی، اسفندیاری درآباد فریبا. مطالعه اثرات ژئومورفولوژیکی و نئوزمین ساخت با تأکید بر توان لرزه‌خیزی گسل‌ها و مخاطرات ناشی از آن‌ها (مطالعه موردی: نمین، آستارا، تالش). جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای). ۱۴۰۱؛ ۱۲(۴): ۱۰۵۴-۱۰۳۴.