

تطبيق لندفرمی و ارزیابی پتانسیل فعالیت‌های تکتونیکی و لرزه‌خیزی بخش شمالی زون گسلی قم- زفره

ابراهیم مقیمی - استاد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
منصور جعفریگلو- دانشیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
مجتبی یمانی- استاد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
سیدمحمد زمان‌زاده- دانشیار دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
حمید کامرانی دلیر- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۲۹

چکیده

پتانسیل لرزه‌خیزی و فعالیت‌های تکتونیکی بخش شمالی سامانه گسلی قم- زفره، براساس روش‌های ژئومورفومتری و تطبیق لندفرمی، بررسی شد. برای تطبیق داده‌های به‌دست‌آمده، از شواهد میدانی و مورفوتکتونیکی موجود در منطقه استفاده شد. بدین منظور، از اندازه‌گیری برخی شاخص‌های ژئومورفیک و تطبیق آن‌ها با محل گسل‌های اصلی و کانون‌های لرزه‌خیز بهره‌گیری شد. شاخص‌های ژئومورفیک، که در مطالعات مربوط به ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی و لرزه‌خیزی مناطق بیشترین کاربرد را دارند، به دو بخش تقسیم شدند: بخش اول، شاخص‌های مربوط به دینامیک سطح ۱؛ بخش دوم، شاخص‌های مربوط به دینامیک حوضه ۲. از ویژگی‌های شاخص‌های ذکرشده حساسیت آن‌ها به حرکات گسل‌های شیب‌لغز و امتداد لغز است؛ از سوی دیگر، بیانگر غالب بودن پدیده‌های دگرشکلی و بالآمده ۳ نسبت به پدیده‌های فرسایشی در مناطق فعال تکتونیکی‌اند. محدوده مورد مطالعه به ۱۸ قطعه آبراه‌های ۴ تقسیم شد و شاخص‌های ژئومورفیک و نقشه‌های مورفوتکتونیکی آن جداگانه از طریق برنامه الحاقی TecDEM محاسبه و وزن‌دهی شد. نتایج اولیه به‌دست‌آمده نشان‌دهنده لرزه‌خیزی و فعالیت تکتونیکی بالا در نزدیکی گسل‌های اصلی بخش شمالی زون قم- زفره (جنوب و جنوب غرب استان قم) مانند گسل قم، گسل خورآباد، گسل بیدهند، و گسل کاشان است.

واژگان کلیدی: برنامه الحاقی TecDEM، تطبیق لندفرمی، زون گسلی قم- زفره، ژئومورفومتری، شاخص ژئومورفیک، لرزه‌خیزی.

مقدمه

این حقیقتی انکارناپذیر است که ایران در منطقه فعال تکتونیکی با سطح خطر لرزه‌خیزی بسیار بالا قرار گرفته است؛ این موضوع را زلزله‌های رخ داده در سنوات گذشته به‌اثبات می‌رساند (زلزله ۷/۴ ریشتری خرداد ۱۳۶۹ رودبار و منجیل، زلزله ۶ ریشتری دی ۱۳۸۲ بم، و زلزله ۷/۳ ریشتری آبان ۱۳۹۶ ازگله کرمانشاه و ...). بدون شک، درباره پیشگیری از چنین حوادث غیرمترقبه‌ای راهی جز شناسایی و ارزیابی مناطق مستعد لرزه‌خیزی و حساس به فعالیت‌های تکتونیکی نیست. در

محدوده مورد مطالعه، براساس آمار و اطلاعات مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، زمین‌لرزه‌های کوچک تا متوسط مختلفی (بین ۳ تا ۵ ریشتر) به وقوع پیوسته است. البته، وجود گسل‌های فعال و رخداد چندین زمین‌لرزه تاریخی و دستگامی در پیرامون این پهنه‌ها، که شهر قم را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد، لرزه‌خیزی نسبتاً بالا (بالای ۶ ریشتر) برای این مناطق دور از ذهن نیست. بنابراین، امکان وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ با دوره بازگشت طولانی نیز در منطقه وجود دارد. امروزه، ژئومورفولوژیست‌ها برای ارزیابی مناطق فعال تکتونیک از نظر درجات فعالیت‌های تکتونیک و لرزه‌خیزی به‌طور وسیعی از روش‌های مختلف اندازه‌گیری کمی لندفرم‌های سطح زمین (ژئومورفومتری) بهره می‌جویند. اندازه‌گیرهای کمی پدیده‌های ژئومورفیک از طریق محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک امکان مشاهده غیرمستقیم پدیده‌ها و مقایسه لندفرم‌های مختلف را به محققان مورفوتکتونیک می‌دهد که این موضوع خود موجب صرفه‌جویی در وقت و هزینه اجرای طرح‌های پژوهشی و عمرانی می‌شود.

اعظم مابقی و حسین‌زاده (۱۳۹۶) در پژوهش خود، با هدف ارزیابی تکتونیک فعال و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های ژئومورفیک و شواهد ژئومورفولوژیکی حوضه و تأثیر آن بر شبکه زهکشی رودخانه درونگر، این‌طور نتیجه‌گیری کردند که، با توجه به محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک و برآورد شاخص طبقه‌بندی IAT، این حوضه جزو مناطق فعال از نظر تکتونیک است. بهرامی و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیق تحت، با عنوان کارایی شاخص‌های ژئومورفومتری شبکه زهکشی جهت ارزیابی تکتونیک فعال، با استفاده از برخی شاخص‌ها از جمله شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی (Δa)، تراکم ناهنجاری سلسله‌مراتبی (ga)، شاخص انشعابات (R)، و شاخص زاویه برخورد (CA) به بررسی میزان اثرهای فعالیت‌های تکتونیک در حوضه‌های آبریز مورد مطالعه خود پرداختند. ده‌بزرگی و مؤمنی طارم‌سری (۱۳۹۵)، با مطالعه فعالیت زمین‌ساخت جوان در پهنه گسلی قم- زفره و با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و برآورد شاخص Iat، ۱۴/۳۹ درصد کل محدوده مورد مطالعاتی خود را با فعالیت بسیار بالا ارزیابی کردند. بر همین اساس، بیشترین مقدار فعالیت تکتونیک در بخش‌های جنوب شرقی، شمال غربی، و مرزهای شرقی در پهنه گسلی قم- زفره ارزیابی شده است. گورابی و کیارستمی (۱۳۹۴)، با اجرای الگوی TecDEM و محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک در قالب آن برای حوضه آبریز رودک در شمال شرق تهران، تغییرات مقادیر چولگی، شاخص تقعر، و گرادیان طولی رودخانه را بررسی و وجود نفوتکتونیک فعال را در منطقه اثبات کردند. بهرامی (۲۰۱۳) در مقاله خود یک روش کمی برای محاسبه تعداد آنومالی سلسله‌مراتبی جریان با نام شاخص انحرافی سلسله‌مراتبی (Δa) ارائه کرد و با تجزیه و تحلیل مورفومتریکی، محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک، ترتیب سلسله‌مراتبی شبکه‌های زهکشی منطقه مورد مطالعاتی خود، اثر کنترل‌های خارجی به‌ویژه تکتونیک را در توسعه حوضه‌های آبریز بررسی کرد و این‌طور نتیجه‌گیری کرد که انحراف سلسله‌مراتبی محل خروجی آبراهه‌ها در حوضه‌های مورد مطالعه با شدت فعالیت‌های تکتونیک زاگرس کنترل می‌شود. محمدنژاد (۱۳۹۵) به بررسی شواهد و آثار گسل‌های فعال بر لندفرم‌های کوتاه‌تر واقع در بخش جنوبی کوهستان میشو داغ پرداخت و نتایج آن نشان داد که منطقه به لحاظ تکتونیک طی کوتاه‌تر فعال بوده است.

در حوزه مطالعات خارجی، شبیر احمد و همکاران (۲۰۱۸)، با هدف بررسی فعالیت‌های تکتونیک در حوضه ارین (شمال شرق کشمیر) با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و مدل ارتفاعی دیجیتال (SRTM) منطقه را از لحاظ تکتونیک فعال ارزیابی کردند و با استفاده از داده‌های جی‌پی‌اس حداکثر تغییر شکل مورفوتکتونیک را در بخش شمال غربی کشمیر هیمالیا برآورد کردند.

مومی‌پور و همکاران (۲۰۱۲)، با به‌کاربردن برنامه TecDEM و مدل رقومی ارتفاعی در منطقه مطالعاتی (کوه‌های زاگرس) و شاخص‌های ژئومورفیک، نظیر سینوسیته جبهه کوهستان، انتگرال هیپسومتري، عدم تقارن حوضه زهکشی، و گرادبان طولی رودخانه، به ارزیابی فعالیت تکتونیکی و میزان بالآمدگی منطقه دینارکوه اقدام کردند. این محققان، میزان بالآمدگی منطقه مطالعاتی را بین ۰٫۶ تا ۳٫۷ میلی‌متر در سال برآورد کردند. شهزاد و گلوگوئن (2011a؛ 2011b) با استفاده از برنامه TecDEM و مدل رقومی ارتفاعی، به تحلیل فعالیت‌های تکتونیکی، تحلیل‌های کمی آبراهه‌ها، محاسبه نیمرخ طولی، شاخص‌های تقعر، و میزان بالآمدگی تکتونیکی اقدام کردند. در این پژوهش نیز سعی شده است با روش‌های ژئومورفومتري و مورفوتکتونیکی و بازبیدهای صحرایی به ارزیابی میزان تحرکات تکتونیکی و فعالیت گسل‌های اصلی بخش شمالی زون قم-زفره با استفاده از محاسبات شاخص‌های ژئومورفیک و خروجی‌های تحلیلی نرم‌افزار TecDEM برای ارزیابی پتانسیل فعالیت‌های تکتونیکی و لرزه‌خیزی در محدوده قطعات مشخص شده در سطح استان قم- که شامل بخش‌های شمالی زون گسلی قم- زفره و ایران مرکزی می‌شود- پرداخته شود. در این پژوهش سعی شده برای نخستین بار، علاوه بر پارامترهای زمین‌شناسی مانند فاصله از گسل و نوع سازند، از وزن‌دهی به پارامترهای ژئومورفولوژی و مورفوتکتونیکی در قالب شاخص‌های ژئومورفیک و شاخص فعالیت نسبی تکتونیکی Iat برای پهنه‌بندی مناطق مستعد لرزه‌خیزی و مناطق دارای فعالیت‌های تکتونیکی بالا استفاده شود.

مواد و روش‌ها

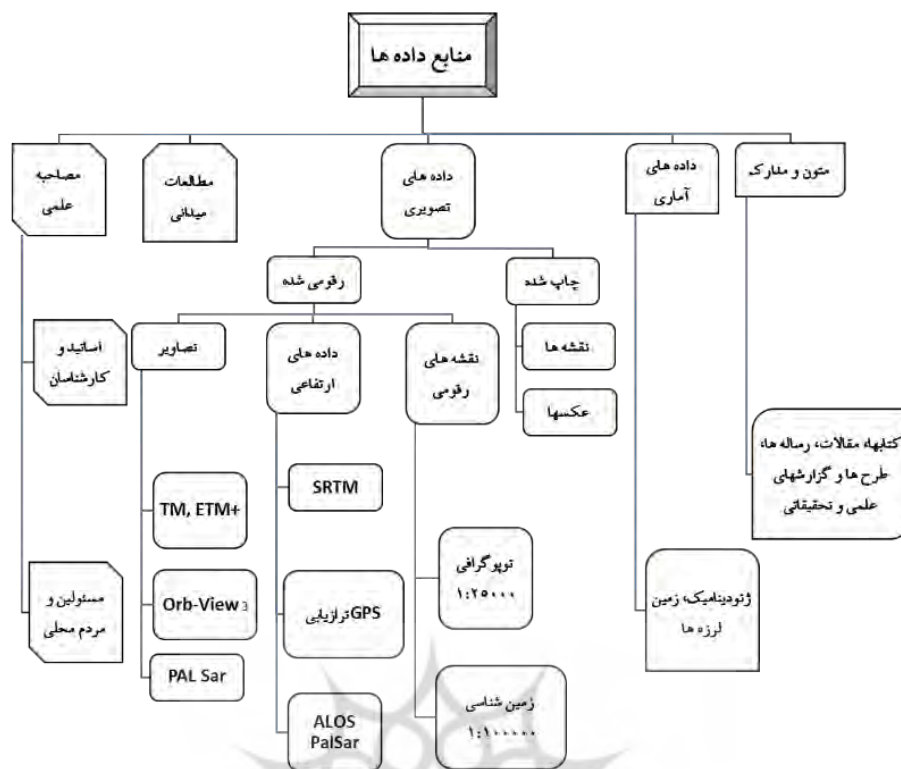
در پژوهش حاضر پتانسیل لرزه‌خیزی و فعالیت‌های تکتونیکی بخش شمالی سامانه گسلی قم- زفره، با به‌کارگیری روش‌های ژئومورفومتري و مورفوتکتونیکی ارزیابی شده است. برای بررسی میزان لرزه‌خیزی و فعالیت تکتونیکی، منطقه مورد مطالعه به ۱۸ بخش آبراهه‌ای تقسیم شد. سپس، برای محاسبه فعالیت‌های تکتونیکی از اندازه‌گیری شاخص‌های ژئومورفیک و برای ارزیابی پتانسیل لرزه‌خیزی از آمار و داده‌های لرزه‌خیزی تاریخی و دستگاهی استفاده شد. برای نتیجه‌گیری بهتر، نتایج محاسبه‌شده در قالب لایه‌های اطلاعاتی با لایه گسل‌های اصلی منطقه در محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.x تلفیق شد. روش گردآوری اطلاعات طی مراحل زیر انجام گرفته است که در فلوچارت شکل ۱ نیز نمایش داده شده است:

- جمع‌آوری اطلاعات: که شامل جمع‌آوری و مطالعه گزارش‌ها، مقاله‌ها، و کتاب‌های مرتبط با موضوع است و تهیه و مطالعه نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰، داده‌های دورسنجی شامل تصاویر ماهواره‌ای راداری ALOS PALSAR^۱ با قدرت تفکیک (پیکسل ساین)^۲ ۱۲٫۵ متر و تصاویر Orb-View3 با قدرت تفکیک ۴ متر و تجزیه و تحلیل تصاویر برگرفته از Google Earth.

- مطالعات میدانی: در این مرحله، نقشه زمین‌شناسی اولیه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای پردازش و سپس با عوارض سطح زمین انطباق داده شد. همچنین، با اندازه‌گیری‌های کمی عوارض، شیب و جهت شیب لندفرم‌ها، میزان و جهت جابه‌جاشدگی‌ها، و انحراف عوارض دینامیک سطحی از روی پایگاه داده‌ای موجود محاسبه و برداشت شد.

۱. ALOS با نام ژاپنی «DAICHI» ماهواره مشاهده زمینی، توسعه‌یافته توسط JAXA سازمان اکتشاف هوافضای ژاپن، توکیو است (۲۰۰۶-۲۰۱۱).

2. Pixel Size



شکل ۱. فلوچارت روش‌های گردآوری منابع و اطلاعات

برای محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک منطقه مورد مطالعه، آن‌ها به دو دسته کلی تقسیم شدند: ۱. شاخص‌های دینامیک سطح که عبارت‌اند از: شاخص‌های گرادیان طولی رود^۱ (SL)، سینوسی جبهه کوهستان^۲ (Smf)، و نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره^۳ (Vf)؛ ۲. شاخص‌های دینامیک قطعات آبراهه‌ای^۴ که عبارت‌اند از: شاخص‌های عدم تقارن^۵ (Af)، انتگرال هیپوسومتریک^۶ (Hi)، و نسبت شکل حوضه^۷ (Bs). برای بهبود و ارتقای کیفیت اندازه‌گیری شاخص‌های تکتونیکی از توانمندی محاسباتی نرم‌افزار الحاقی TecDEM، که در محیط نرم‌افزاری متلب (Matlab) اجرا می‌شود، بهره‌گیری شده است. پس از استخراج نتایج شاخص‌های ژئومورفیک به تفکیک قطعات مطالعاتی هریک به صورت لایه‌های اطلاعاتی جداگانه با یکدیگر در محیط ArcGIS تلفیق شدند. پس از برآورد شاخص‌های ژئومورفیک در منطقه مورد مطالعه و تعیین کلاس آن‌ها بر پایه جدول ۱، ارزیابی شاخص^۸ Iat (شاخص فعالیت نسبی تکتونیکی) از طریق فرمول زیر برای محدوده مورد مطالعه به دست آمد:

$$Iat = S / n$$

Iat شاخص فعالیت نسبی تکتونیکی، S مجموع کلاس شاخص‌های ژئومورفیک محاسبه‌شده، و N تعداد شاخص‌های

محاسبه‌شده است.

1. Stream Length-Gradient Index (SL Index)
2. Mountain Front Sinuosity (Smf) index
3. Valley Floor Width To Height Ratio (Vf)
4. Dynamic parameters stream parts
5. Asymmetry Factor (AF)
6. Hypothesis Integral (Hi)
7. Basin shape index (Bs)
8. Index of relative active tectonics (Iat)

براساس مقادیر به‌دست‌آمده از شاخص I_{at} و لایه‌های اطلاعاتی دوری و نزدیکی به گسل و کانون‌های لرزه‌خیزی، محدوده مورد مطالعه در سه کلاس به روش الهمدونی (۲۰۰۸) (جدول ۱) طبقه‌بندی و وزن‌دهی شد: کلاس ۱: فعال؛ کلاس ۲: فعالیت متوسط؛ کلاس ۳: فعالیت کم. بدیهی است نواحی‌ای با کلاس ۱ بیشترین وزن و نواحی‌ای با کلاس ۳ کمترین وزن را دارند.

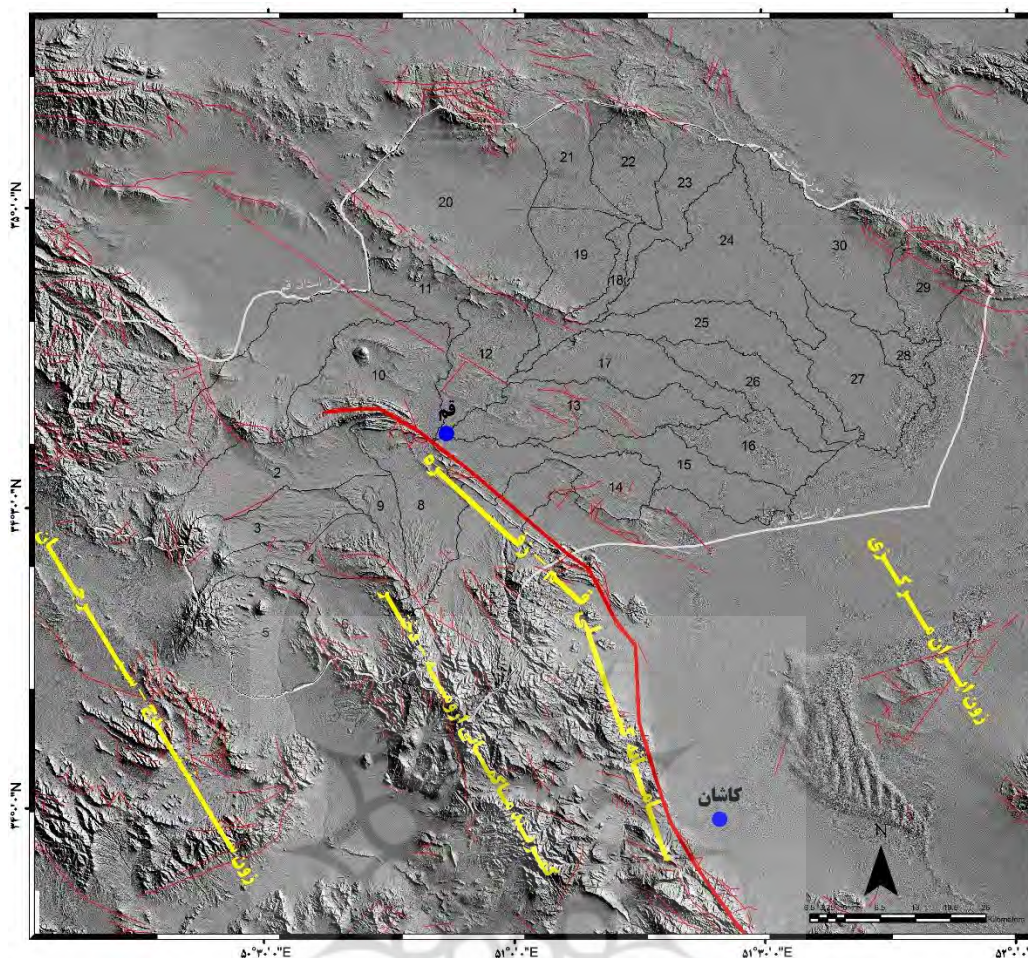
جدول ۱. مقایسه کلاس‌بندی شاخص‌های ژئومورفیک از نظر فعالیت‌های تکتونیکی (الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۸)

کلاس	بال و مکفادن (۱۹۷۷)	راکول و همکاران (۱۹۸۵)	سیلوا و همکاران (۲۰۰۳)	الهمدونی و همکاران (۲۰۰۸)
کلاس ۱ (فعال)	Smf: 1.2–1.6 Vf: 0.055 – 0.5 - مخروط‌افکنه‌های فرسایش نیافته - حوضه‌های آبریز طویل با کف دره باریک و دامنه‌های شیب‌دار حتی در مواد نرم	Uplift rate: > 0.4–0.5 m/ka Smf < 1.4 Vf < 1	Smf < 1.53 Vf < 0.6	Smf: < 1.1 Vf < 0.5 SL: High مقادیر ناهنجاری زیاد Af-50 > 15 Bs > 4
کلاس ۲ (فعالیت متوسط)	Smf: 1.8–3.4 Vf: 0.5–3.6 - مخروط‌افکنه‌های فرسایش‌یافته و خندقی شده. - حوضه‌های بزرگ آبریز که نسبت به حوضه‌های کلاس ۱ دایره‌ای شکل‌ترند.	Uplift rate: 0.5–0.05 m/ka	Smf 1.8–2.3 Vf 0.3–0.8	Smf: 1.1–1.5 Vf: 0.5–1 SL: مقادیر کم ناهنجاری Af-50 : 7–15 Bs: 4–3
کلاس ۳ (فعالیت کم)	Smf: 2–7 Vf: 2–47 - بستر سنگی پیشانی کوهستان (پدیمت) و خلیجی شکل - دامنه‌های شیب‌دار بر روی تپه‌های پایدار و ارتفاعاتی با شبکه زهکشی یکپارچه و نسبتاً بزرگ	Uplift rate: < 0.05 m/ka Smf > 1.4 Vf > 1	Smf 2.8–3.5 Vf 0.8–1.2	Smf > 1.5 Vf: > 1 SL: بدون ناهنجاری Af-50 < 7 Bs < 3

معرفی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شامل بخش شمالی زون گسلی قم- زفره است که بخش وسیعی از محدوده استان قم را شامل می‌شود. از این‌رو، برای کاربردی کردن موضوع تحقیق، در این پژوهش استان قم محدوده مورد مطالعاتی انتخاب شد. این محدوده از سمت شرق و جنوب شرق به زون ایران مرکزی و از سمت شمال به زون البرز و از سمت غرب و جنوب غرب به زون سنندج سیرجان منتهی می‌شود. موقعیت جغرافیایی آن بین طول‌های جغرافیایی $۵۰^{\circ}۳'$ تا $۵۱^{\circ}۵۸'$ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی $۳۴^{\circ}۹'$ تا $۳۵^{\circ}۱۱'$ درجه شمالی است (شکل ۲). حدود ۲۵ درصد از وسعت محدوده مورد مطالعه را مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ای تشکیل داده و مابقی به‌صورت دشت است.

به‌طورکلی، روندهای تکتونیکی فعال و گسل‌های لرزه‌زا در منطقه امتداد شمال غربی- جنوب شرقی قرار دارند. اندازه‌گیری‌ها و بررسی شواهد فعالیت گسل‌ها در رسوبات کواترنری بیانگر تغییر روند گسل‌های یادشده و باعث تغییر مکانیسم این گسل‌ها به‌صورت عموماً راست‌الغز راست‌گرد شده است، هرچند حرکات چپگرد نیز در برخی گسل‌های فرعی یا غیراصلی به‌دلیل جهت‌گیری آن‌ها نسبت به تنش اصلی دیده می‌شود (مورلی و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۲. موقعیت قطعات آبراهه‌ای مورد مطالعه نسبت به موقعیت گسل‌های اصلی در محدوده استان قم (بخش شمالی سامانه گسلی قم-زفره)

یافته‌های پژوهش

الف) محاسبه شاخص‌های دینامیک سطح

۱. شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL): این شاخص از طریق برنامه الحاقی TecDEM برای قطعات آبراهه‌ای مورد مطالعه با احتساب منحنی میزان ۱۰۰ متر محاسبه شده است (جدول ۲). بر مبنای محاسبات انجام گرفته، بیشترین میزان گرادیان طولی رودخانه ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی به ترتیب در قطعات ۷، ۲، ۱، و ۶ جایی که رودخانه بسترهای سخت سنگی را قطع کرده است (قطعات واقع در دامنه کوهستان) - به دست آمد. مقادیر زیاد SL در سنگ‌های دارای مقاومت کم یا در سنگ‌های هم مقاومت می‌تواند بیانگر حرکات تکتونیکی فعال و جوان باشد (کلر و پتتر، ۲۰۰۲). این وضعیت در پایین دست رودخانه (در ارتفاع ۸۰۰-۹۰۰ متری) در آبرفت‌های رودخانه‌ای دیده می‌شود. این مسئله با شواهد مورفوتکتونیکی منطقه از طریق تطبیق نقشه قطعات آبراهه‌ای با موقعیت گسل‌ها، وجود گسل‌های تراستی و راست‌گرد در خروجی قطعات مذکور نمایان است.

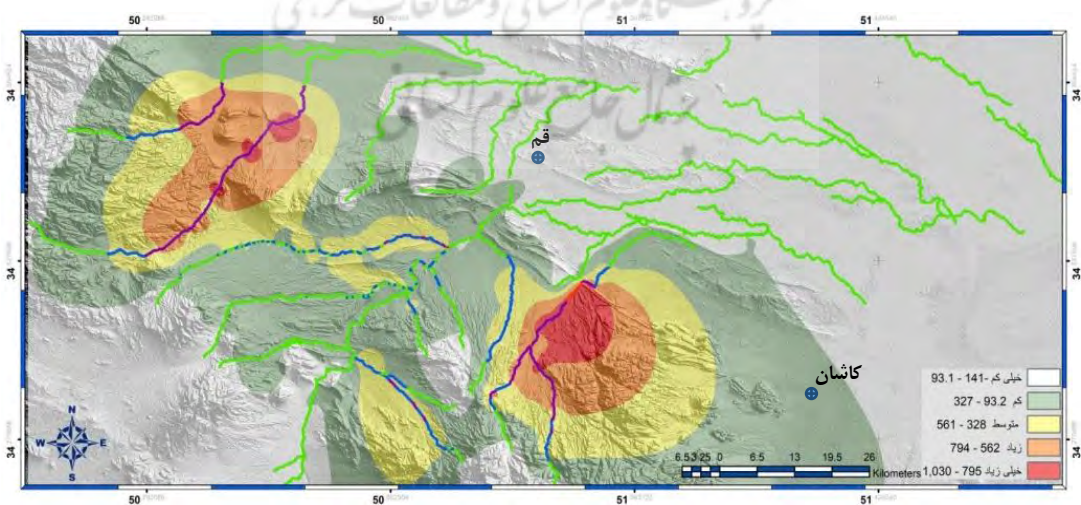
در شکل ۳، آبراهه‌های با مقادیر SL کمتر از ۱۴۰ نشانه سطح فعالیت تکتونیکی خیلی کم (به رنگ سبز)، آبراهه‌های با مقادیر ۳۲۷-۹۳۲ سطح فعالیت تکتونیکی کم (به رنگ آبی)، آبراهه‌های با مقادیر ۳۲۸-۵۶۱ نشانه سطح فعالیت

تکتونیکی متوسط (رنگ بنفش)، و آبراهه‌های با مقادیر ۵۶۲-۷۹۴ نشانه فعالیت تکتونیکی زیاد و مقادیر بالاتر از ۷۹۵ نشانه سطح فعالیت تکتونیکی خیلی (به رنگ قرمز) نشان داده شده است.

۲. شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع متوسط دره (Vf): در سطح محدوده مورد مطالعه مقادیر (Vf) در ۵۰۰ متری بالای جبهه کوهستان و در دره‌های اصلی محاسبه شده و در جدول ۳ آمده است. برای نمایش منحنی‌های هم‌ارزش شاخص (Vf) در سطح منطقه، مقدار شاخص در ۲۲ نقطه در مسیر قطعات آبراهه‌های اصلی محاسبه شده است (شکل ۴).

جدول ۲. مقادیر شاخص SL در قطعات آبراهه‌های محدوده مورد مطالعه (تقسیم‌بندی تغییرات SL براساس الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۸)

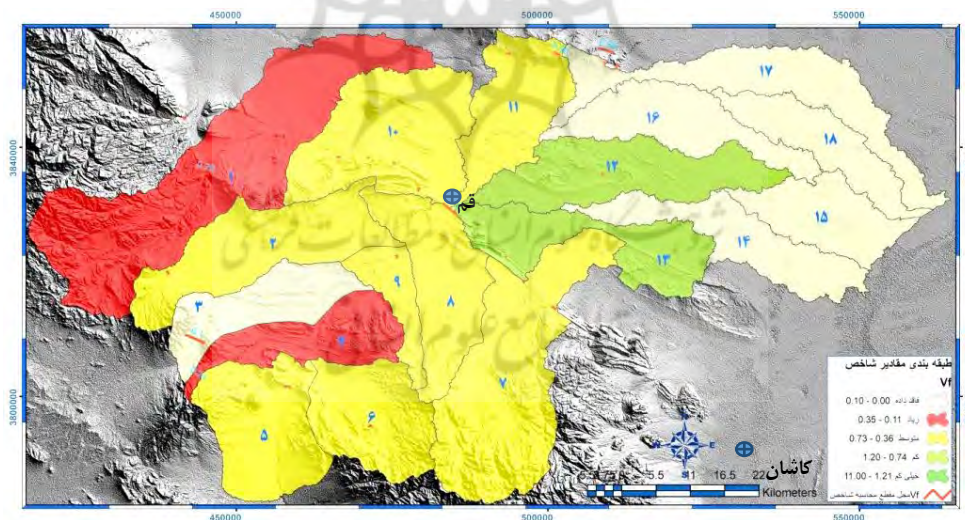
ویژگی واحدهای لیتولوژی	کلاس	تغییرات SL	مقادیر SL	قطعات آبراهه‌ای	ویژگی واحدهای لیتولوژی	کلاس	تغییرات SL	مقادیر SL	قطعات آبراهه‌ای
سازند قرمز بالایی	۳	کم	۲۹۲	۱۰	سازند قرمز بالایی	۱	زیاد	۸۹۰	۱
رسوبات کواترنری و سنگ‌های آتش‌فشانی	۳	کم	۴۶	۱۱	سازند قرمز بالایی همراه سنگ‌های آتش‌فشانی	۱	زیاد	۹۶۹	۲
رسوبات و تراس‌های کواترنری همراه سازند قرمز بالایی	۳	کم	۶۲	۱۲	رسوبات و تراس‌های کواترنری	۲	متوسط	۴۵۱	۳
سازند قم و تراس‌های کواترنری	۳	کم	۱۳۹	۱۳	سنگ‌های آتش‌فشانی	۳	کم	۲۴۵	۴
رسوبات کواترنری	۳	کم	۴۱	۱۴	رسوبات کواترنری و سازند قم	۳	کم	۲۰۳	۵
رسوبات کواترنری	۳	کم	۲	۱۵	رسوبات کواترنری و سنگ‌های آذرآواری	۲	متوسط	۵۳۴	۶
رسوبات کواترنری	۳	کم	۹	۱۶	سنگ‌های آتش‌فشانی و آذرآواری	۱	زیاد	۱۰۵۴	۷
رسوبات کواترنری	۳	کم	۷۴	۱۷	رسوبات و تراس‌های کواترنری	۲	متوسط	۴۱۶	۸
رسوبات کواترنری	۳	کم	۲	۱۸	رسوبات کواترنری و سازند قرمز پایینی	۲	متوسط	۴۲۴	۹



شکل ۳. نقشه شاخص گرادیان طولی رودخانه‌ها (SL)

جدول ۳. مقادیر شاخص Vf و کلاس‌بندی شاخص Iat در حوضه‌های مورد مطالعه (الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۸)

شماره قطعه	عرض بستر Vf	ارتفاع بستر Esc	ارتفاع کرانه راست دره Erd	ارتفاع کرانه چپ دره Eld	مقادیر شاخص Vf	کلاس (Iat)
۱	۲۰	۱۲۷۶	۱۳۴۰	۱۳۵۰	۰.۲۹	۱
۲	۳۰	۱۶۶۸	۱۷۰۶	۱۷۱۲	۰.۷۳	۲
۳	۲۰	۱۶۰۰	۱۷۹۰	۱۸۱۰	۰.۱	۱
۴	۲۰	۱۸۲۵	۱۹۰۰	۱۹۲۰	۰.۲۴	۱
۵	۵۰	۱۲۲۵	۱۲۹۶	۱۳۱۰	۰.۶۴	۲
۶	۲۵	۱۵۸۴	۱۶۲۰	۱۶۲۶	۰.۶۴	۲
۷	۲۰	۱۰۲۴	۱۰۷۰	۱۰۷۲	۰.۴۳	۱
۸	۶۰	۹۵۰	۱۰۶۰	۱۰۸۰	۰.۵	۲
۹	۱۰	۱۰۱۴	۱۰۲۷	۱۰۲۹	۰.۷۱	۲
۱۰	۱۰	۱۰۳۴	۱۰۷۵	۱۰۷۸	۰.۲۴	۱
۱۱	۲۵	۹۶۵	۱۰۳۵	۱۰۰۴	۰.۴۶	۱
۱۲	۶	۸۴۱	۸۴۹	۸۴۸	۰.۸	۲
۱۳	۱۰	۹۳۳	۹۴۲	۹۴۴	۱	۲
۱۴	-	-	-	-	-	-
۱۵	-	-	-	-	-	-
۱۶	-	-	-	-	-	-
۱۷	۲۰	۸۹۱	۹۵۰	۹۴۵	۰.۳۵	۱
۱۸	۵۰	۸۷۴	۹۲۶	۹۳۵	۰.۸۸	۲



شکل ۴. طبقه‌بندی مقادیر شاخص Vf قطعات آبراهه‌ای محدوده مطالعاتی. رنگ قرمز کلاس یک (فعال)، زرد کلاس دو (فعالیت متوسط)، و سفید کلاس سه (غیرفعال)

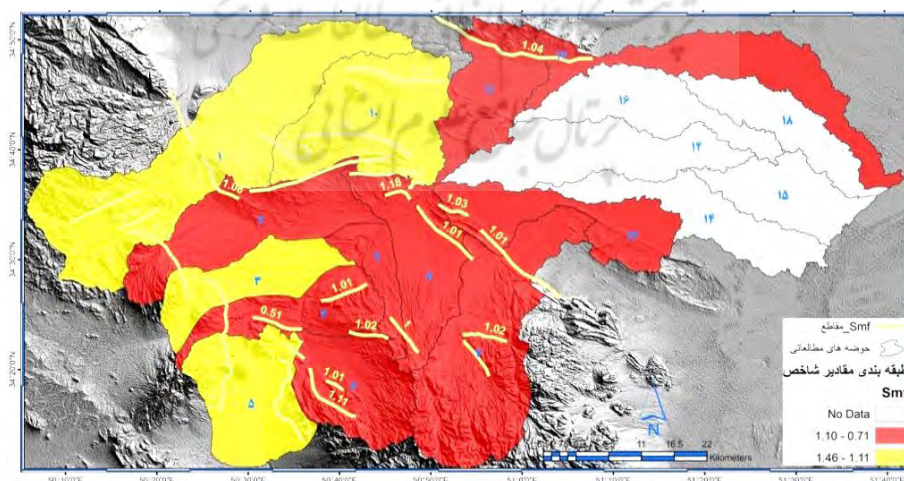
۳. شاخص سینوسی جبهه کوهستان (Smf): در این مطالعه با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM 12.5m) منطقه، ۲۷ پیشانی کوهستان (Smf) تعیین شد که از این تعداد در قطعاتی که دارای بیش از یک پیشانی کوهستان بودند میانگین آنان در نظر گرفته شد (شکل ۵). شاخص Smf پس از محاسبه به سه کلاس تکنیکی تقسیم شد (جدول ۴):

طبقه‌بندی $S_{mf} < 1.10$ کلاس ۱، $1.10 < S_{mf} < 1.50$ کلاس ۲، و $S_{mf} > 1.50$ کلاس ۳ (الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۸). از بین جبهه‌های تعیین‌شده، جبهه کوهستان قطعات ۴، ۶، ۷، ۹، ۱۱، ۱۴، و ۲۵ با مقادیر S_{mf} اندازه‌گیری‌شده ۱ دارای بالاترین میزان فعالیت تکتونیکی بودند.

جدول ۴. مقادیر شاخص سینوسیته جبهه کوهستان (S_{mf}) در حوضه‌های مورد مطالعه

شماره حوضه	Lmf	Ls	S _{mf}	میانگین هر حوضه S _{mf}	شاخص Iat
۱	۱۷۵۳۰.۵۱	۱۷۲۳۳.۲	۱.۰۲	۱.۴۶	۳
۲	۴۱۴۲۰.۸۵	۳۹۷۰۸.۲	۱.۰۴	۱.۰۷	۲
۳	۳۰۱۹۱.۹	۱۹۱۹۳.۳	۱.۰۵	۱.۱۳	۲
۴	۱۳۰۹۲.۴۱	۱۲۹۶۰	۱.۰۱	۰.۸۸	۱
۵	۱۷۸۳۸۸۱	۱۷۶۴۹.۹	۱.۰۱	۱.۱۴	۲
۶	۱۳۲۲۴.۳۹	۱۳۱۵۳.۳	۱.۰۱	۱.۰۳	۱
۷	۷۰۱۷.۷۲	۶۹۵۹.۵	۱.۰۱۴	۱.۰۱	۱
۸	۱۸۸۳۴.۱۵	۱۴۴۶۴.۲	۱.۳	۱.۰۷	۲
۹	۴۳۷۱.۹۶	۴۳۷۱.۹	۱	۱	۱
۱۰	۸۶۱۴.۵۲	۸۴۸۴	۱.۰۲	۱.۲	۲
۱۱	۳۳۳۹.۹۴	۳۳۱۵.۲	۱.۰۱	۱.۰۴	۱
۱۲	۷۵۰۶.۰۹	۷۴۳۰.۹	۱.۰۱	-	-
۱۳	۵۰۶۹.۴۹	۴۳۰۶.۲	۱.۱۸	۱.۰۲	۱
۱۴	۱۷۶۴۶.۹۳	۱۴۹۸۳.۶	۱.۱۸	-	-
۱۵	۹۳۸۸.۸۷	۹۲۷۲.۹	۱.۰۱	-	-
۱۶	۲۴۱۴۹.۹۹	۲۴۱۴۹.۹	۱	-	-
۱۷	۱۲۸۵۱.۹۵	۷۸۱۳.۶	۱.۶۴	-	-
۱۸	۱۰۰۵۲.۴۵	۹۳۳۱	۱.۰۸	-	-

در جدول فوق حوضه‌هایی که فاقد مقادیر شاخص S_{mf} می‌باشند قطعات آبراهه‌ای واقع در دشت‌اند و فاقد پیشانی کوهستان‌اند. بنابراین، این شاخص در مورد آنان در نظر گرفته نشده است (شکل ۵).



شکل ۵. رده‌بندی قطعات آبراهه‌ای بر اساس میزان اندازه‌گیری‌شده بی شاخص S_{mf} . رنگ قرمز کلاس یک (فعال)، زرد کلاس دو (فعالیت متوسط)، و سفید کلاس سه (غیرفعال)

ب) محاسبه شاخص‌های دینامیک حوضه‌ها

۱. شاخص عدم تقارن (AF): شاخص AF به خم‌شدگی عمودی بر امتداد آبراهه اصلی در حوضه حساس است. مقادیر بیشتر یا کمتر از ۵۰ ممکن است حاکی از کج‌شدگی حوضه باشد. در قطعات آبراهه‌ای مطالعاتی، که جریان آبراهه آن به سمت شرق و شمال شرق است، چرخش تکتونیکی به طرف شمال و جنوب غرب است. مقادیر شاخص (AF) در جدول ۵ آمده است. در حالت کلی، تمایل به چپ قطعات آبراهه‌ای محدوده با حرکت امتدادلغز راست‌گرد گسل اصلی منطبق است. این وضعیت سبب شده شاخص (AF) محدوده مورد مطالعه را از نظر فعالیت‌های تکتونیکی فعال نشان دهد (شکل ۶-الف).

جدول ۵. مقادیر شاخص عدم تقارن حوضه AF، حوضه‌های مورد مطالعه

شماره قطعه آبراهه‌ای	مساحت سمت راست (Ar) به مترمربع	مساحت کل حوضه (At) به مترمربع	مقادیر شاخص (AF)	کلاس‌بندی تکتونیکی (Iat)
۱	۴۰۴۰۵۷۴۶۰۹۴	۸۷۹۳۳۴۲۱۸۰۷۵	۴۵۰۹۵	۳
۲	۱۶۵۹۳۱۱۴۷۰۱۳	۴۱۱۸۱۰۵۱۰۰۷۱۱	۴۰۰۲۹	۲
۳	۱۱۱۲۲۹۰۲۳۰۰۱	۲۵۰۹۳۲۸۴۱۵۰۰۱	۴۰۰۳۳	۳
۴	۱۵۷۱۳۶۸۹۹۰۱	۲۴۱۳۳۴۱۸۹۰۷۴۹	۶۵۰۱۱	۲
۵	۱۰۷۲۱۲۲۵۹۰۷۵	۳۶۱۲۴۷۰۸۴۰۵۵۶	۲۹۰۶۸	۱
۶	۱۳۵۱۵۸۸۲۰۵۴	۳۰۷۷۲۳۲۲۷۰۹۴۴	۴۳۰۹۲	۳
۷	۵۰۶۴۰۰۲۶۶۰۲۹	۶۴۰۴۸۳۱۲۵	۷۹۰۰۷	۱
۸	۲۵۳۰۸۷۵۲۹۰۴۲	۶۲۰۲۵۲۱۸۷۰۵	۴۰۰۸	۲
۹	۸۷۲۱۰۵۰۲۰۳۳	۱۱۹۸۷۶۶۷۶۰۷۸۹	۷۲۰۷۵	۱
۱۰	۴۳۱۶۲۲۸۳۱۰۴۸	۴۹۰۲۳۹۳۷۵	۸۸۰۰۴	۱
۱۱	۳۱۰۹۸۱۲۵۸۵	۶۲۰۲۵۲۱۸۷۰۵	۵۰۰۱	۱
۱۲	۸۶۱۷۷۰۱۸۰۰۹	۳۸۴۲۲۹۵۳۱۰۲۵	۲۲۰۴۳	۱
۱۳	۲۳۶۷۰۲۸۲۰۰۴۵	۳۰۴۶۲۲۹۶۸۰۷۵	۷۷۰۷	۲
۱۴	۱۸۱۸۷۷۵۴۱۰۵	۲۸۱۲۲۲۴۳۷۰۵	۶۳۰۱	۲
۱۵	۱۶۹۷۵۳۲۵۲۰۰۳	۲۳۵۷۰۰۶۲۵	۷۲۰۰۲	۲
۱۶	۲۰۸۶۲۶۰۱۴۰۴۹	۲۸۹۲۶۷۵۰۰	۷۲۰۱۲	۲
۱۷	۲۹۲۶۳۵۴۲۰۴۷	۶۰۹۳۳۶۸۲۰۳۲۶۳	۴۸۰۰۳	۳
۱۸	۱۷۰۱۴۲۲۳۰۰۰۲	۲۴۲۷۶۳۵۳۷۰۴۴۹	۷۰۰۰۹	۲
کل حوضه	۳۴۷۲۶۸۷۹۸۵	۶۷۴۹۲۳۶۹۰۷	۵۴۰۲۵	۱۰۹

۲. شاخص نسبت شکل حوضه (Bs): مقادیر بالای این شاخص ($Bs > 4$) نشان‌دهنده فعال بودن حوضه است. قطعات آبراهه‌ای فعال با تکتونیک بالا شکل کشیده‌ای دارند. شکل قطعه آبراهه‌ای در طی زمان، با توقف میزان بالآمدگی، به تدریج دایره‌ای شکل می‌شود (بوربانک و اندرسون، ۲۰۰۱). همان‌طور که در جدول ۶ آورده شده است، در بیشتر قطعات مورد مطالعه، مقدار Bs بیشتر از ۱ است که نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک نسبتاً بالا و شکل تقریباً کشیده اغلب این قطعات آبراهه‌ای است. در شکل ۷-ب، شکل قطعات مورد مطالعه و مقادیر شاخص Bs نمایش داده شده است.

۳. شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi) و منحنی هیپسومتری: برنامه TecDEM با استفاده از داده‌های رقومی ارتفاعی (DEM) برای هر قطعه آبراهه‌ای، مقادیر انتگرال هیپسومتری، مقادیر چولگی، و کشیدگی منحنی را محاسبه و منحنی هیپسومتری را ترسیم می‌کند (شهزاد و گلوگوئن، ۲۰۱۱a؛ ۲۰۱۱b). نتایج شاخص‌های محاسبه‌شده (جدول ۷ و شکل ۶-ج) حاکی از فقدان شرایط تکتونیکی فعال و دوره پیری چشم‌اندازهای ژئومورفیک در سطوح مختلف محدوده

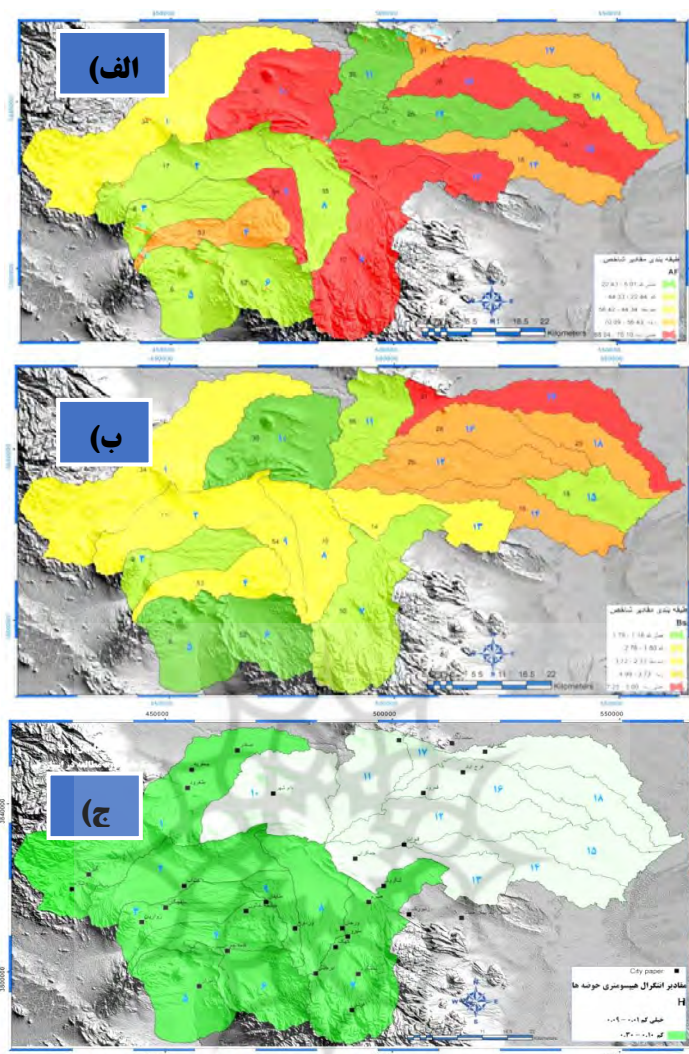
مورد مطالعه است. مطابق نقشه شکل ۶ ج، نواحی جنوب و جنوب غرب محدوده مورد مطالعه، که اغلب مرتفع و کوهستانی‌اند، دارای شاخص بالاتر H_i نسبت به دشتهای مسطح شرق و شمال شرق منطقه‌اند.

جدول ۶. مقادیر شاخص نسبت شکل حوضه B_s و کلاس فعالیت تکتونیکی (I_{at}) در حوضه‌های مطالعاتی

شماره قطعه آبراه‌ای	طول حوضه B_l به متر	عرض حوضه B_w به متر	مقادیر شاخص شکل B_s حوضه	کلاس فعالیت تکتونیکی (I_{at})
۱	۶۴۸۵۵	۱۸۱۴۲	۳.۵۷	۲
۲	۶۸۱۵۲	۱۸۷۴۵	۳.۶۴	۲
۳	۳۲۳۷۲	۱۱۷۱۶	۲.۷۶	۳
۴	۳۵۲۰۳	۱۱۲۸۵	۳.۱۲	۲
۵	۲۳۱۸۴	۱۶۸۴۸	۱.۳۸	۳
۶	۲۵۱۷۴	۲۰۲۸۱	۱.۲۴	۳
۷	۴۸۴۴۸	۱۸۹۴۰	۲.۵۶	۳
۸	۳۵۷۳۹	۱۰۰۷۶	۳.۵۵	۲
۹	۲۳۷۸۹	۸۰۸۰	۲.۹۴	۳
۱۰	۳۵۹۹۴	۲۵۸۱۳	۱.۳۹	۳
۱۱	۳۰۶۹۶	۱۳۱۰۰	۲.۳۴	۳
۱۲	۵۲۴۹۶	۱۱۲۹۹	۴.۶۵	۱
۱۳	۴۱۷۷۸	۱۱۲۳۳	۳.۷۲	۲
۱۴	۵۰۰۲۹	۱۰۲۶۰	۴.۸۱	۱
۱۵	۲۹۶۶۲	۱۳۶۳۷	۲.۱۸	۳
۱۶	۴۵۰۴۹	۹۰۸۸	۴.۹۶	۱
۱۷	۲۰۶۲۷	۳۰۳۲	۶.۸	۱
۱۸	۱۹۴۷۹	۱۵۱۲۴	۱.۲۹	۳

جدول ۷. مقادیر شاخص‌های تقعر و شیب همراه کلاس فعالیت تکتونیکی (I_{at}) و برخی شاخص‌های عدم تقارن و کشیدگی در قطعات آبراه‌های مورد مطالعه

شماره قطعه آبراهه	شیب $slope$	شاخص تقعر ()	شاخص I_{at}	شاخص شیب نرمال (K_{sn})	شاخص I_{at}	انتگرال هیپسومتر (H_i)	شاخص عدم تقارن Sk_{wness}	شاخص کشیدگی $Kurtosis$
۱	۴.۳	۰.۷۸	۲	۶۲	۲	۰.۱۹	۰.۵۲	۲.۴
۲	۲.۷	۰.۵۵	۲	۷۱.۳	۲	۰.۱۳	۱.۶	۵.۷
۳	۱.۴	۰.۴	۱	۵۸.۶	۲	۰.۱۴	۱.۲	۴.۴۵
۴	۱.۸	۰.۵	۱	۳۴.۸۵	۳	۰.۱۲	۰.۸	۳.۵
۵	-۱.۴۸	۰.۰۵	۱	۲۰.۴	۳	۰.۱۱	۲.۱	۸.۸۴
۶	۱.۵	۰.۳۷	۱	۱۱۶.۵	۱	۰.۱۷	۱	۳.۷۵
۷	۰.۷	۰.۲۷	۱	۱۴۱	۱	۰.۳	۰.۱۹	۲.۱۳
۸	۲.۳	۰.۵	۱	۵۵.۲	۲	۰.۱۲	۱.۳	۴.۴
۹	۲.۳	۰.۵	۱	۴۳.۲	۳	۰.۱۲	۱.۱۹	۳.۷
۱۰	۴.۷	۰.۸۸	۲	۱۹.۱	۳	۰.۰۷	۱.۸۷	۶.۲
۱۱	-۰.۳۴	۰.۱	۱	۶.۷۸	۳	۰.۰۵	۱.۵	۶.۲
۱۲	-۰.۲	۰.۳۲	۱	۶.۳	۲	۰.۰۶	۰.۳۶	۱.۹
۱۳	۱.۶	۰.۱۲	۱	۹.۵	۳	۰.۰۷	۱.۱۹	۳.۷
۱۴	-۸.۶	۰.۲۴	۱	۵.۳	۲	۰.۰۵	۰.۳۷	۲.۶۸
۱۵	-۲.۷۸	۰.۰۶	۱	۱.۳۷	۳	۰.۰۸	۰.۸۷	۳.۰۲
۱۶	-۱.۲	۰.۲	۱	۲.۹	۳	۰.۰۲	۱.۱۷	۶.۴۶
۱۷	۴.۲۸	۰.۹۷	۲	۳.۴	۳	۰.۰۱	۳.۴	۱۵.۷
۱۸	-۰.۶	۰.۳	۱	۱.۷	۳	۰.۰۱	۳.۲	۱۵.۴



شکل ۶. الف) مقادیر شاخص AF در قطعات آبراهه‌ای مورد مطالعه. حوضه‌های قرمز رنگ مقادیر بسیار زیاد Af را نشان می‌دهند؛ ب) مقادیر شاخص BS؛ ج) طبقه‌بندی مقادیر شاخص انتگرال هیسومتری (Hi)

طبقه‌بندی شاخص‌ها براساس شاخص Iat^۱

شاخص Iat (فعالیت نسبی تکتونیکی) با میانگین کلاس‌های مختلف شاخص‌های ژئومورفیک (S/n) به دست می‌آید. در طبقه‌بندی ارائه شده الهمدونی و همکاران (۲۰۰۸) برای شاخص‌های SL، Smf، Vf، BS، و AF، این شاخص‌ها براساس مقدار کمی به دست آمده در سه کلاس ۱، ۲، و ۳ طبقه‌بندی شده‌اند. در این طبقه‌بندی، کلاس ۱ بیشترین فعالیت و کلاس ۲ فعالیت متوسط و کلاس ۳ کمترین فعالیت تکتونیکی را دارد (جدول ۸).

براساس شاخص Iat، فعالیت‌های تکتونیکی قطعات آبراهه‌ای ارزیابی شد که نتایج آن در جدول ۹ آمده است. براساس داده‌های جدول ۸، قطعه‌های ۷، ۱۲، ۱۴، و ۱۶ در کلاس ۱ با فعالیت تکتونیکی بالا و سایر حوضه‌ها در کلاس ۲ با فعالیت متوسط قرار گرفته‌اند. همچنین، برای همه قطعات آبراهه‌ای به علت وجود و نزدیکی به گسل‌های اصلی از جمله گسل تراستی البرز و گسل رو رانده بیدهند، ایندیس، و گسل‌های فرعی متعدد، فعالیت تکتونیکی نسبتاً بالایی برآورد شد (شکل ۷).

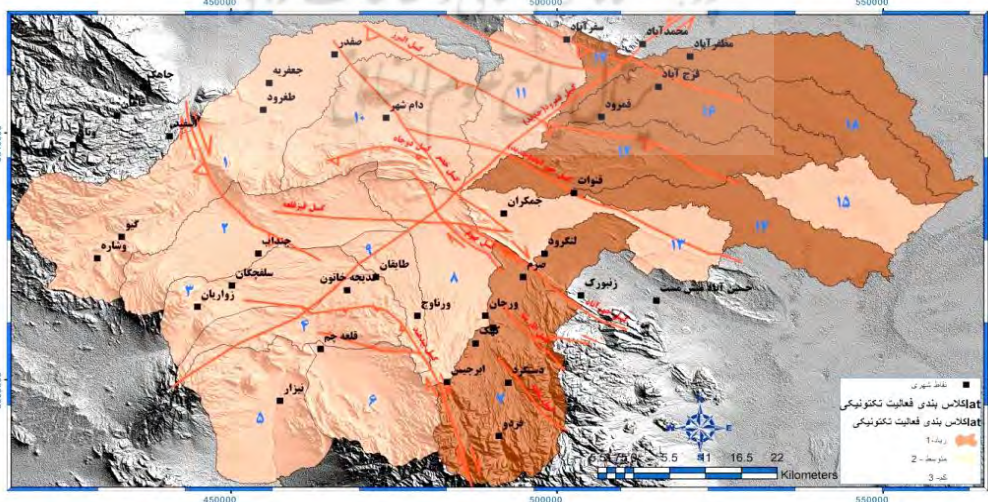
1. Index of relative active tectonics

جدول ۸. طبقه‌بندی فعالیت نسبی تکتونیکی ارائه‌شده الهمدونی و همکاران (۲۰۰۸)

شاخص‌ها	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳
SL	میزان تغییرات زیاد	میزان تغییرات کم	بدون تغییرات
Smf	Smf < ۱.۱	Smf: ۱.۱-۱.۵	Smf > ۱.۵
Vf	Vf < ۰.۵	Vf: ۰.۵-۱	Vf > ۱
Bs	Bs > ۴	Bs: ۳-۴	Bs > ۳
Af	Af: ۵۰ > ۱۵	Af: ۵۰ : ۷-۱۵	Af: ۵۰ < ۷

جدول ۹. طبقه‌بندی Iat (شاخص فعالیت نسبی تکتونیکی) در قطعات آبراهه‌ای مورد مطالعه

Iat	(S/n)	کلاس شاخص‌های ژئومورفیک						قطعات آبراهه‌ای
		Hi	Af	Bs	SL	Vf	Smf	
۲	۲	۳	۳	۲	۱	۱	۳	۱
۲	۱.۸۶	۳	۲	۲	۱	۲	۲	۲
۲	۲	۳	۳	۳	۲	۱	۲	۳
۲	۱.۷۱	۳	۲	۲	۳	۱	۱	۴
۲	۲	۳	۱	۳	۳	۲	۲	۵
۲	۱.۸۶	۳	۳	۳	۲	۲	۱	۶
۱	۱.۴۳	۳	۱	۳	۱	۱	۱	۷
۲	۱.۸۶	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۸
۲	۱.۸۶	۳	۱	۳	۲	۲	۱	۹
۲	۱.۸۶	۳	۱	۳	۳	۱	۲	۱۰
۲	۱.۷۱	۳	۱	۳	۳	۱	۱	۱۱
۱	۱.۴۳	۳	۱	۱	۳	۲		۱۲
۲	۱.۸۶	۳	۲	۲	۳	۲	۱	۱۳
۱	۱.۲۹	۳	۲	۱	۳	-	-	۱۴
۲	۱.۵۷	۳	۲	۳	۳	-	-	۱۵
۱	۱.۲۹	۳	۲	۱	۳	-	-	۱۶
۲	۱.۵۷	۳	۳	۱	۳	۱	-	۱۷
۲	۱.۸۶	۳	۲	۳	۳	۲	-	۱۸



شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی فعالیت‌های تکتونیکی براساس کلاس بندی شاخص فعالیت نسبی تکتونیکی Iat در قطعات آبراهه‌ای مورد مطالعه

شواهد لندفرمی

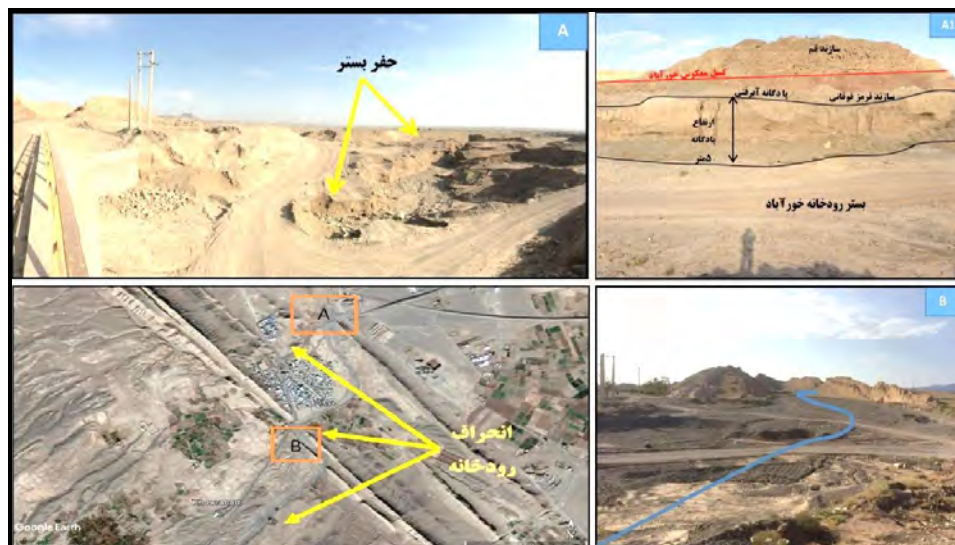
وجود شواهد میدانی عملکرد خطوط گسلی مذکور نظیر حفر و جابه‌جایی رأس مخروط‌افکنه‌ها (شکل ۸)، تغییر محل رسوب‌گذاری، برش رسوبات، و وجود شکستگی‌های متعدد پشته‌های مسدودکننده و خطی در امتداد آبراهه‌ها، دره‌های خطی و پرتگاه گسلی معکوس متعدد به‌ویژه در حوالی روستای زنبورک (شکل ۹) انحراف شبکه آبراهه‌ها و حفر عمیق بستر به‌ویژه در خورآباد (شکل ۱۰ - A، A1، B) و وجود پادگانه‌های مرتفع آبرفتی، وجود خط کنیک در محل خروجی آبراهه اصلی از کوهستان تطابق خوبی با توزیع نسبی فعالیت تکتونیک و نتایج مقادیر به‌دست‌آمده از شاخص‌های ژئومورفیک را نشان می‌دهند (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳). به‌منظور کسب اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده، در چند نوبت بازدید صحرایی از منطقه مطالعاتی به‌عمل آمد. آثار و شواهد مورفوتکتونیک در گستره مطالعاتی وجود خط گسل تراستی و راست‌گرد متعدد در بخش‌های مختلف منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۸. حفر بستر و تغییر مسیر رودخانه قمرود در رأس مخروط‌افکنه بر اثر فعالیت تکتونیک راست‌گرد گسل البرز



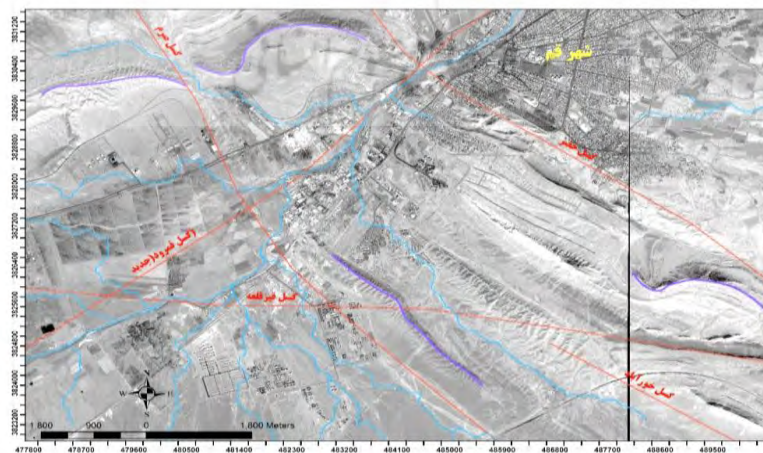
شکل ۹. تغییر مسیر و حفر شدید بستر رودخانه‌ها در غرب زنبورک بر اثر حرکات تکتونیک راست‌گرد گسل کاشان



شکل ۱۰. تغییر مسیر و حفر رودخانه خورآباد (A) حفر عمیق بستر رودخانه خورآباد؛ (A1) پادگانه آبرفتی به ارتفاع ۵ متر در محل گسل معکوس خورآباد و روندگی سازند قم بر روی رسوبات قرمز بالایی؛ (B) تغییر مسیر رودخانه خورآباد و فرسایش بین لایه‌های یال‌های طاق‌دیس خورآباد



شکل ۱۱. توالی پادگانه‌های آبرفتی جدید و قدیمی رودخانه قمرود (حداقل سه سطح پادگانه)



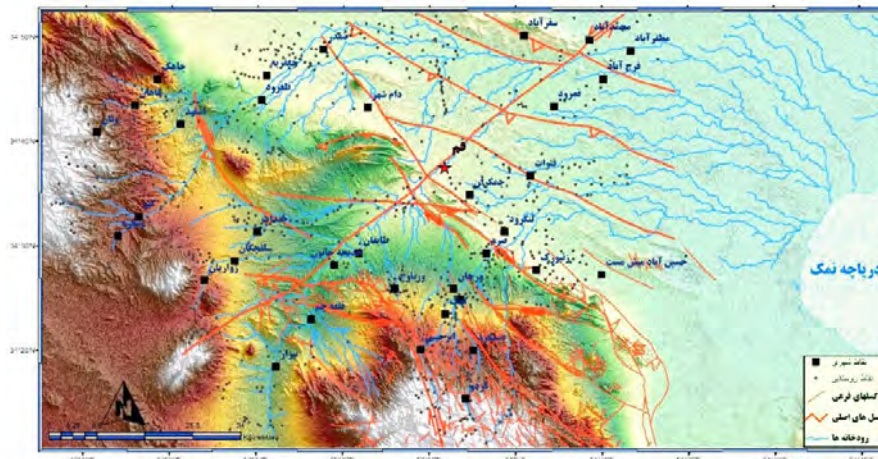
شکل ۱۲. ایجاد الگوهای پیچ‌وخم‌دار در عوارض سطحی و رودخانه‌ای بر اثر فعالیت‌های تکتونیکی جدید که با رنگ بنفش نشان داده شده‌اند (تصویر ماهواره‌ای Orb-View3 با قدرت تفکیک ۴ متر)



شکل ۱۳. تخریب و جابه‌جایی رشته قنات‌ها در شمال پردیسان قم بر اثر حرکات تکتونیکی (تصویر ماهواره‌ای Orb-View3 با قدرت تفکیک ۴ متر)

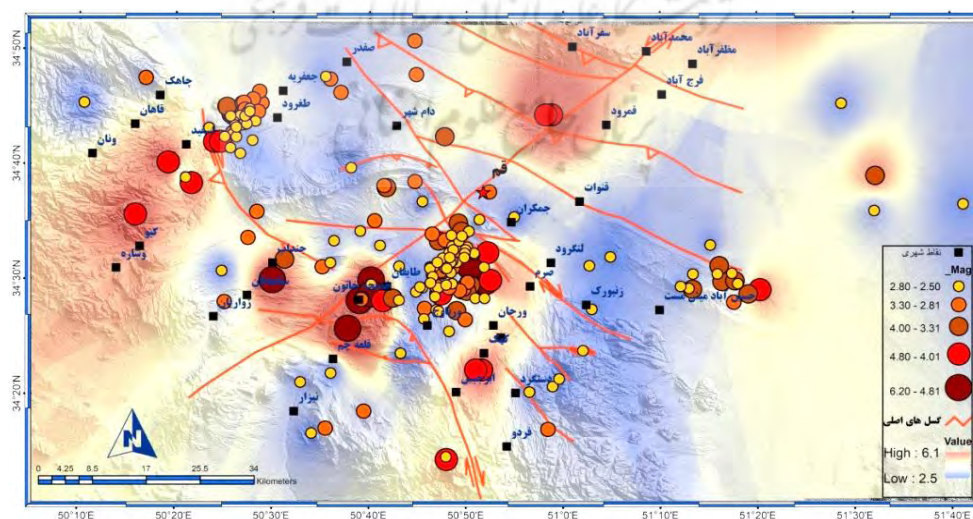
بحث و نتیجه‌گیری

سامانه گسلی قم- زفره دارای گسل‌های اصلی و مهم در گستره مورد مطالعه است. فعالیت گسل‌های اصلی و دیگر گسل‌های فرعی منطقه در طول کواترنری نقش اصلی را در ساختار ژئومورفولوژی منطقه ایفا کرده است؛ به طوری که آثار این فعالیت‌ها بر روی ویژگی‌های سیستم رودخانه‌ای و حوضه‌های زهکشی دیده می‌شود. نتایج تحلیل مورفومتریک در ۱۸ قطعه آبراهه‌ای در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که چشم‌اندازهای منطقه تا حدود زیادی از فعالیت‌های تکتونیکی سیستم‌های گسلی قم-زفره تأثیر پذیرفته‌اند. ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه‌های مطالعاتی با شاخص Iat و این واقعیت را آشکار می‌سازد که بیشتر قطعات آبراهه‌ای مورد مطالعه با درجات مختلف از حرکات تکتونیکی متأثر شده‌اند؛ به طوری که فعالیت تکتونیکی در قطعات واقع در شمال زون گسلی قم- زفره زیاد و در سایر قطعات، که در دشت‌های پست حاشیه دریاچه نمک واقع شده‌اند، کم است. بنابراین، در راستای برنامه‌ریزی منطقه‌ای، می‌توان از استقرار کاربری‌های مختلف و تمرکز بیشتر جمعیت و فعالیت انسانی در آن‌ها اجتناب کرد. بدون شک، برای ارزیابی دقیق لرزه‌خیزی و تعیین فعالیت‌های تکتونیکی گسل‌های این منطقه، بررسی‌های میدانی و تفصیلی بیشتری مورد نیاز است. بررسی‌های ژئومورفومتری و به‌ویژه مطالعات میدانی انجام‌گرفته در این پژوهش نشان می‌دهد تقریباً همه لندفرم‌های پیرامون سامانه‌های گسلی محدوده مورد مطالعه تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی قرار دارد. با توجه به تمرکز برخی تأسیسات صنعتی، راه‌های ارتباطی، و مراکز سکونتگاهی (که روزه‌روز رو به افزایش‌اند)، امکان تحمیل خسارات بالا برای آن‌ها زیاد است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود با در نظر گرفتن نتایج این پژوهش و اجرای مطالعات تفصیلی، در استفاده از زمین و انتخاب نوع کاربری آن‌ها ملاحظات و اقدامات پیشگیرانه مدنظر برنامه‌ریزان قرار بگیرد. با در نظر گرفتن موقعیت و پراکندگی نقاط شهری و روستایی در سطح منطقه مورد مطالعه و موقعیت قرارگیری گسل‌های اصلی و فرعی موجود، به‌خوبی درمی‌یابیم که بیشتر این نقاط جمعیتی در حریم گسل‌ها واقع شده‌اند. براساس یافته‌های پژوهش، شهرهای کهک و فردو بیشترین همپوشانی را با پهنه‌های گسلی دارند. سپس، روستاهای جعفرآباد، راهجرد شرقی، و نیزار به ترتیب از بیشترین همپوشانی برخوردارند (شکل ۱۴).

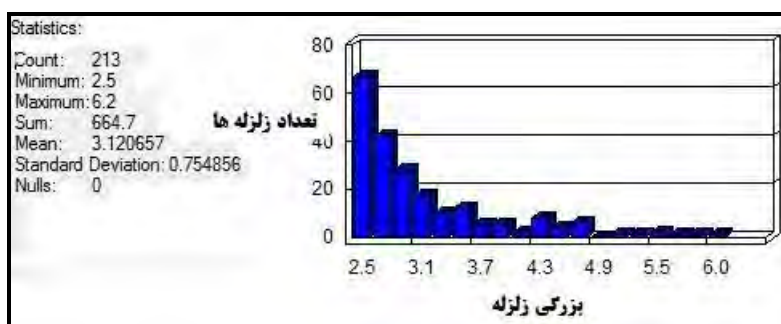


شکل ۱۴. نقشه پراکنده‌گی نقاط شهری و روستایی و موقعیت سامانه‌های گسلی شمال زون قم- زفره

در تأیید تحلیل‌های لرزه‌خیزی و تکتونیک فعال در منطقه با گردآوری داده‌های زمین‌لرزه‌ای تاریخی و دستگاهی در حوضه‌های سطح منطقه مورد مطالعه و ترسیم نقشه پراکنش کانون سطحی لرزه‌های دستگاهی (شکل ۹) مشخص شد که تراکم کانون زمین‌لرزه‌ها در بخش مرکزی محدوده مورد مطالعه بیشتر وجود دارد. این نواحی از منظر نوع واحدهای لیتولوژی از سنگ‌های رسوبی و پادگانه‌های آبرفتی تشکیل شده‌اند. بر پایه این نقشه، کانون سطحی بیشتر زلزله‌ها در پیرامون گسل‌های اصلی منطقه قرار گرفته است. دستگاه‌های لرزه‌نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران بزرگی زمین‌لرزه‌های سده بیستم محدوده مورد مطالعه را مابین کمتر از ۲.۵ ریشتر تا ۶.۲ ریشتر ثبت کرده‌اند. داده‌های زمین‌لرزه‌ای ثبت‌شده تاریخی، زلزله‌های بزرگ‌تر از ۵ ریشتر را در منطقه نمایان می‌کنند. براساس داده‌های لرزه‌نگاری سطحی، فراوانی وقوع زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی ۴.۶-۶.۲ ریشتر در بخش‌های غربی و جنوب غربی محدوده مورد مطالعه بیشتر است (شکل ۱۵). از آنجا که کانون زمین‌لرزه‌های محدوده مورد مطالعه سطحی و کم‌عمق است و به دلیل تمرکز جمعیت و کیفیت پایین سازه‌ها و بناها در این مناطق زمین‌لرزه‌های بیش از ۴ ریشتر خسارت‌های مالی زیادی به‌وجود آورده‌اند.



نقشه ۱۵. پهنه‌بندی کانون‌های لرزه‌خیز سطحی براساس داده‌های لرزه‌نگار تاریخی و دستگاهی از سال ۱۹۷۱ تا ۲۰۱۷. نواحی قرمز رنگ دارای بیشترین بزرگای لرزه‌ای بوده‌اند

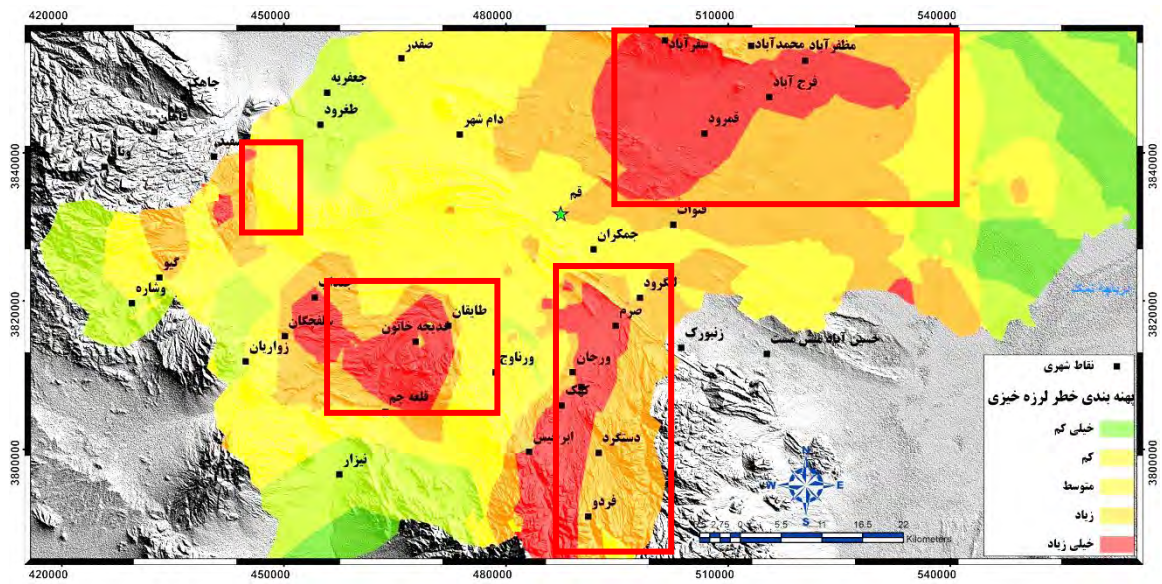


شکل ۱۶. نمودار تعداد و بزرگای زمین‌لرزه‌های به‌وقوع پیوسته در محدوده مورد مطالعه از سال ۱۹۷۱ الی ۲۰۱۷ و خلاصه آماری آن

براساس نمودار شکل ۱۶، تعداد ۲۱۳ زمین‌لرزه ثبت شده است. کمترین شدت زلزله ثبت شده ۲.۵ ریشتر بوده که دارای بیشترین فراوانی است. بزرگ‌ترین شدت زلزله ثبت شده ۶.۲ ریشتری رخ داده در تاریخ ۱۹۸۰/۱۲/۱۹ در روستایی به نام خدیجه‌خاتون واقع در جنوب غرب شهر قم است. میانگین شدت و بزرگای زلزله‌های ثبت شده برابر با ۳.۱ ریشتر است. همین‌طور از این تعداد زمین‌لرزه ثبت شده بیشترین عمق ثبت شده ۶۲ کیلومتر عمق زمین است که در تاریخ ۱۹۸۵/۲/۱۱ با ۴.۷ ریشتر در جنوب تایقان واقع در جنوب غرب شهر قم رخ داده است. کمترین عمق نیز در جنوب شهر پردیسان قم به عمق ۱.۱ کیلومتر رخ داده است.

براساس نقشه پهنه‌بندی مناطق فعال تکتونیکی و مستعد لرزه‌خیزی (شکل ۱۰)، شهرهای خدیجه‌خاتون، تایقان، کهک، ابرجیس و روستاهای رحمت‌آباد، خلج‌آباد، محمودآباد، فیض‌آباد، ابفین، باشیون، باغ نره، سمین‌آباد، قبادبزن، چنارک، ازناوه، کوکون، سیف‌آباد، شریف‌آباد، و ملک‌آباد در محدوده پرخطر شناسایی شدند. براساس همین مطالعات، شهر قم در محدوده با خطر متوسط و کم قرار می‌گیرد. سامانه‌های گسلی کوشک نصرت، البرز، صرم، خورآباد، بیدهند، و ایندیس جزو گسل‌های پرخطر و لرزه‌زا قرار می‌گیرند، زیرا بیشترین رویدادهای لرزه‌خیزی و تغییرات مورفوتکتونیکی در طول آن‌ها به‌وقوع پیوسته است. این گسل‌ها بخش شمالی سامانه گسلی قم- زفره را تشکیل می‌دهند. براساس نقشه سائزمو تکتونیک محدوده مورد مطالعه، گسل‌های اناربنه و خورآباد دارای رفتارهای زلزله‌خیزی در پایانه گسلی خود در بخش حسین‌آباد میش مست می‌باشند و نشان از فعال بودن و رو به رشد بودن آنان دارد. بنابراین، رویدادهای لرزه‌زا در این بخش در آینده نزدیک دور از ذهن نیست.

براساس یافته‌های این تحقیق، چهار کانون مخاطره‌آمیز تکتونیکی و لرزه‌خیز در سطح منطقه مورد مطالعه شناسایی شد که با چهارگوش‌های قرمز رنگ در شکل ۱۷ نمایش داده شده‌اند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که در پهنه‌های مخاطره‌آمیز تعیین شده اجرای طرح‌های عمرانی و ساخت‌وسازها با احتیاط و با در نظر گرفتن مسائل مقاومت‌سازی و پیشگیری در برابر زلزله انجام گیرد. نتیجه ارزیابی فعالیت‌های زمین‌ساختی در منطقه مطالعاتی با استفاده از ویژگی‌های ژئومورفولوژیک حاکی از فعالیت‌های نسبتاً زیاد تکتونیکی در ارتفاعات شمال شرقی و جنوب غربی محدوده مورد مطالعه است. اما بخش‌های جنوبی و شرقی منطقه (دشت‌های پست نزدیک به چاله‌های تکتونیکی دریاچه نمک و حوض سلطان) از فعالیت تکتونیکی پایینی برخوردارند.



شکل ۱۷. نقشه پهنه‌بندی مناطق فعال تکتونیکی و مستعد لرزه‌خیزی براساس تلفیق لایه‌های اطلاعاتی شاخص‌های ژئومورفیک. پهنه‌های قرمز رنگ محدوده‌های پُرخطر و لرزه‌خیز منطقه‌اند



منابع

- اعظم مابقی، س. و حسین‌زاده، س.ر. (۱۳۹۶). تجزیه و تحلیل تکتونیک- ژئومورفولوژی حوضه رودخانه درونگر، مجله جغرافیا و توسعه، ۴۹: ۱۶۳-۱۸۸.
- باقری، سجاد (۱۳۸۸). بررسی نقش تکتونیک در شکل‌گیری و تحول لندفرم‌های طاق‌دیس قلاجه (استان کرمانشاه)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران.
- بهرامی، ش.؛ تقوی مقدم، ا. و زنگنه اسدی، م.ع. (۱۳۹۶). کارایی شاخص‌های ژئومورفومتری شبکه زهکشی جهت ارزیابی تکتونیک فعال در حوضه‌های باغرود، بوژان، زاوین، و سررود در شمال شرق کشور، مجله آمایش جغرافیایی فضا، فصل‌نامه علمی- پژوهشی دانشگاه گلستان، ۷(۲۵).
- ده‌بزرگی، م. و مؤمنی طارم‌سری، م. (۱۳۹۵). فعالیت زمین‌ساخت جوان در پهنه گسلی قم- زفره ایران مرکزی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۵(۲): ۱۱۰-۱۲۹.
- سایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله: [http://www.iiies.ac.ir\(IIEES\)](http://www.iiies.ac.ir(IIEES))
- قربانی، ا.؛ دولتی، ا. و پورکرمانی، م. (۱۳۹۴). ارزیابی میزان جنبایی زمین‌ساختی و پویایی گسل‌های شمال باختری گستره ایران مرکزی، پهنه قم- ساوه، فصل‌نامه کوآترنری ایران، ۱(۴): ۲۹۳-۳۰۶.
- گورابی، ا. و کیارستمی، ف. (۱۳۹۴). ارزیابی زمین‌ساخت حوضه‌های آبریز با استفاده از اختصاصات ژئومورفولوژیک در قالب الگوی TecDEM مورد مطالعه: حوضه آبریز رودک در شمال شرق تهران، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۷(۳): ۴۶۵-۴۷۹.
- محمدنژاد، و. (۱۳۹۵). گسل‌های فعال و تأثیر آن‌ها بر تغییر شکل لندفرم‌های کوآترنر شمال شرق دریاچه ارومیه، ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۸(۱): ۸۳-۱۰۶.
- Azam Mabaghi, S. and Hosseinzadeh, S.R. (2017). Tectonic-Geomorphological Analysis of the Darongar River Basin, *Journal of Geography and Development*, 49: 163-188.
- Bagheri, S. (2009a). Investigating the role of tectonics in the formation and transformation of the altogether of Taqdis Qalajeh (Kermanshah province), Master's thesis, Faculty of Geography, Tehran University.
- Bagheri, S. (2009b). Investigation of the role of tectonics in the formation and evolution of the Ghalajeh anticline landforms (Kermanshah province), M.Sc., Faculty of Geography, University of Tehran.
- Bahrami, Sh. (2013). Analyzing the drainage system anomaly of Zagros basins: Implications for active tectonics, *Journal of Tectonophysics*, pp. 914-928.
- Bahrami, S.; Taghavi Moghaddam, E. and Zanganeh Asadi, M.A. (2017). Efficiency of Geomorphometric Indices of Drainage Network for Active Tectonic Assessment in Baghroud, Bojan, Zavin and Sarrood Basins in Northeast of Iran, *Journal of Geographical Planning of Space, Scientific Journal Golestan*, 7(25).
- Bull, W.B. and Mcfadden, L.D. (1977). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California, *Geomorphology in arid regions. Proc. 8th Binghamton symposium in geomorphology*, 977: 115-138.
- Burbank, D. W. and Anderson, S., 2001, *Tectonic Geomorphology*. Blackweel Science, Massachusetts.

- Deh Bozorgi, M. and Momeni Taramsari, M. (2016). NeoTectonic Activity in the Qom-Zefra Fault Zone of Central Iran, *Quantitative Geomorphological Research*, 5(2): 110-129.
- Ghorbani, E.; Dowlati, A. and Pourkermani, M. (2015). Assessment of Tectonic Kinetic and Dynamics of Northwest Fault of Central Iran Range, Qom-Saveh Zone, *Iranian Quaternary Quarterly*, Volume 1, Number 4, Winter 2015, pp293-306.
- Gorabi, A. and Kiarostami, F. (2015). Tectonic Evaluation of Watersheds Using Geomorphological Properties in the TecDEM Model Study: Rudak Basin in Northeast of Tehran, *Journal of Geographical Research*, 47: 465-479.
- Hessami, K.; Jamali, F. and Tabassi, H. (2003). Major active faults of Iran, scale 1: 2,500,000. *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*.
- Keller, E.A. and Pinter, N. (2002). *Active tectonics: Earthquake Uplift, and Landscape*, Prentic Hall, Newjersey.
- Moghipi, E. (2009). Comparative Study of Changing Drainage Basin System with Tectonic Forms, Case Study: Lut Block, Iran, *American Journal of Applied Sciences*, 6(6): 1270-1276.
- Mohammadnejad, V. (2016). Active faults and their effect on the deformation of Quaternary landforms northeast of Urmia Lake, Iran, *Journal of Natural Geography Research*, 44(1): 24-106.
- Morley, C.K.; Kongwung, B.; Julapour, A.A.; Abdolghafourian, M.; Hajian, M.; Waples, D.; Warren, J.; Otterdoom, H.; Srisuriyon, K. and Kazemi, H. (2009). Structural development of a major late Cenozoic basin and transpressional belt in central Iran: the Central Basin in the Qom-Saveh area, *Geosphere*, 5(4): 325-362.
- Mumipour, M.; Rezaei-Moghaddam, M.H. and Khorshiddoust, A.M. (2012). Active Tectonics Influence On Drainage Networks In Dinarkooh Region, Zagros Mountain Range, Iran, *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 35: 61-68, 8 figg., 3 tabb. DOI 10.4461/GFDQ.2012.35.6.
- Hamdouni, R.El.; Irigaray, C.; Fernández, T.; Chacón, J. and Keller, E.A. (2008). Assessment of relative active tectonic, south west border of the Sierra Nevada (Southern Spain), *Geomorphology*, 96:150-173.
- Rockwell, T. K., Keller, E. A. & Johnson, D. L., 1985, Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain front near Ventura, California. In: Morisawa, M. (Ed), *Tectonic geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Geomorphology Symposium*. Allen and Unwin Publishers, Boston, MA, pp. 183-207.
- Shabir Ahmad, Akhtar Alam, Bashir Ahmad , Ahsan Afzal , M.I. Bhat , M. Sultan Bhat , Hakim Farooq Ahmad (2018). Tectono-geomorphic indices of the Erin basin, NE Kashmir valley, India, *Journal of Asian Earth Sciences*, 151:16-30.
- Shahzad, F. and Gloaguen, R. (2011a). TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 1: Drainage network preprocessing and stream profile analysis, *Computers & Geosciences*, 37: 250-260.
- Shahzad, F. and Gloaguen, R. (2011b). TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology, Part 2: Surface dynamics and basin analysis, *Computers & Geosciences*, 37: 261-271.
- Silva, P. G., Goy, J. L., Zazo, C. & Bardajm, T., 2003, Fault generated mountain front in Southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and earthquake activity. *Geomorphology*, 250, 203-226.
- Site of International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, <http://www.iiees.ac.ir> (IIEES).