

تطبیق 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 دریافت: ۱۳۹۷/۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۰/۱/۱۳۹۷

چکیده

پتانسیل لرزه‌خیزی و فعالیت‌های تکتونیکی بخش شمالی سامانه گسلی قم-زفره، براساس روش‌های ژئومورفومتری و تطبیق لندفرمی، بررسی شد. برای تطبیق داده‌های به دست آمده، از شواهد میدانی و مورفو-تکتونیکی 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؛ بخش دوم، شاخص‌های مربوط به دینامیک حوضه‌۲. از ویژگی‌های شاخص‌های ذکر شده حساسیت آن‌ها به حرکات گسل‌های شیب‌لغز و امتدادلغز است؛ از سوی دیگر، بیانگر غالب بودن پدیده‌های دگرشکلی و بالاً‌مدده^۳ نسبت به پدیده‌های فرسایشی در مناطق فعال تکتونیکی‌اند. محدوده مورد مطالعه به ۱۸ قطعه آبراهه‌ای^۴ تقسیم شد و شاخص‌های ژئومورفیک و نقشه‌های مورفو-تکتونیکی آن جدائمه از طریق برنامه الحاقی TecDEM محاسبه و وزن دهی شد. نتایج اولیه به دست آمده 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.

وازگان 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 رخداده در سالات گذشته به ثبات می‌رساند (زلزله ۱۳۶۹ خرداد ۴/۷ ریشتری روبار و منجیل، زلزله ۱۳۹۶ آریشتری دی ۳/۷، وزن دهی ۳/۷، آیان ۱۳۸۲ بهم، و زلزله ۱۳۸۲ آریشتری آیان ۱۳۹۶ ازگله کرمانشاه و ...). بدون شک، درباره پیشگیری از چنین حادث غیرمتوجهه‌ای راهی جز شناسایی و ارزیابی مناطق مستعد لرزه‌خیزی و حساس به فعالیت‌های تکتونیکی نیست. در

E-mail: emoghimi@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۴۳۹۲۷۹۰

1. Surface Dynamics
2. Basin Dynamics
3. Uplifting
4. Drainage Sections

محدوده موردمطالعه، براساس آمار و اطلاعات مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، زمین‌لرزه‌های کوچک تا متوسط مختلفی (بین ۳ تا ۵ ریشتر) به‌وقوع پیوسته است. البته، وجود گسل‌های فعال و رخداد چندین زمین‌لرزهٔ تاریخی و دستگاهی 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 دورهٔ بازگشت طولانی نیز در منطقه وجود دارد. امروزه، ژئومورفولوژیست‌ها برای ارزیابی مناطق فعال تکتونیکی از نظر درجات فعالیت‌های تکتونیکی و لرزه‌خیزی به‌طور وسیعی از روش‌های مختلف اندازه‌گیری کمی لندرفم‌های سطح زمین (ژئومورفومتری) بهره می‌جویند. اندازه‌گیری‌های کمی پدیده‌های ژئومورفیک از طریق محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک امکان مشاهده غیرمستقیم پدیده‌ها و مقایسه لندرفم‌های مختلف را به محققان مورفو-تکتونیک می‌دهد که این موضوع خود موجب صرف‌جویی 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 شبکهٔ 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 تکتونیکی است. بهرامی و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیق تحت، با عنوان کارایی شاخص‌های ژئومورفومتری شبکهٔ 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 تکتونیکی در حوضه‌های آبریز مورد مطالعه خود پرداختند. ده‌بزرگی و مؤمنی طارمسری (۱۳۹۵)، با مطالعه فعالیت زمین‌ساخت جوان در پهنهٔ 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 تکتونیکی در بخش‌های جنوب شرقی، شمال غربی، و مرزهای شرقی در پهنهٔ 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 چوگانی، شاخص تقریبی، و گرادیان طولی رودخانه را بررسی و وجود نئوتکتونیک فعال را در منطقه اثبات کردند. بهرامی (۲۰۱۳) در مقالهٔ خود یک روش کمی برای محاسبه تعداد آنومالی سلسله‌مراتبی جریان با نام شاخص انحرافی سلسله‌مراتبی (Δa) ارائه کرد و با تجزیه و تحلیل مورفو-متريک، محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک، ترتیب سلسله‌مراتبی شبکه‌های زهکشی منطقه مورد مطالعاتی خود، اثر کنترل‌های خارجی به‌ویژه تکتونیکی را در توسعهٔ حوضه‌های آبریز بررسی کرد و این‌طور نتیجه‌گیری کرد که انحراف سلسله‌مراتبی محل خروجی آبراهه‌ها در حوضه‌های موردمطالعه باشد فعالیت‌های تکتونیکی زاگرس کنترل می‌شود. محمدنژاد (۱۳۹۵) به بررسی شواهد و آثار گسل‌های فعال بر لندرفم‌های کواترنر واقع در بخش جنوبی کوهستان می‌شو داغ پرداخت و نتایج آن نشان داد که منطقه به لحاظ تکتونیکی طی کواترنر فعال بوده است.

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

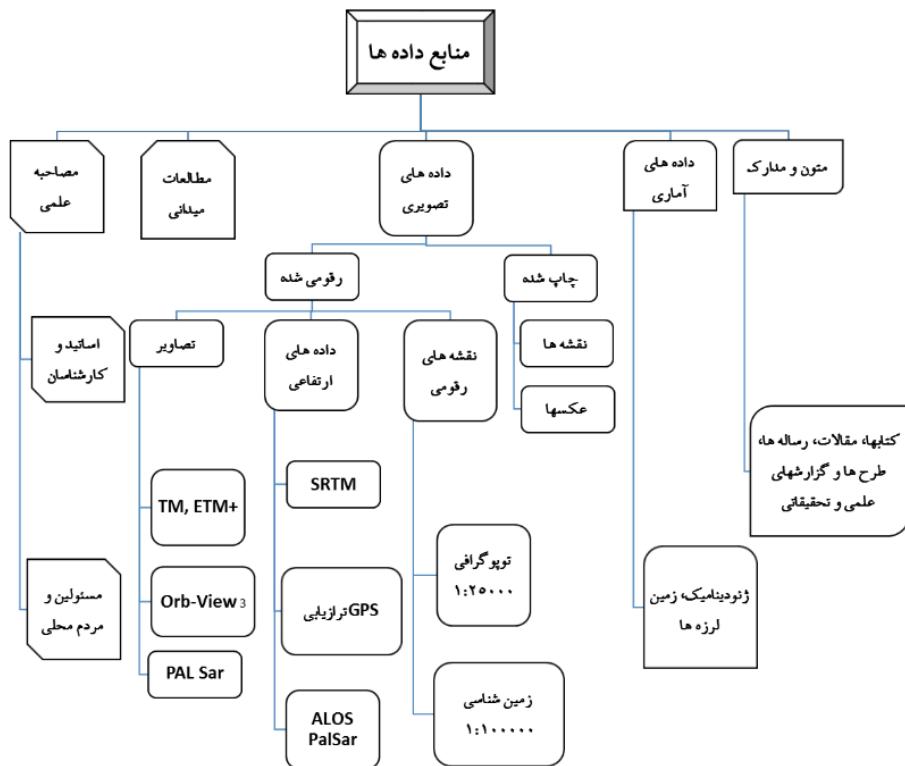
مومی‌پور و همکاران (۲۰۱۲)، با به کاربردن برنامه TecDEM و مدل رقومی ارتفاعی در منطقه مطالعاتی (کوههای زاگرس) و شاخص‌های ژئومورفیک، نظری سینوسیتۀ جبهه کوهستان، انگرال هیپسومتری، عدم تقارن حوضه زهکشی، و گرادیان طولی رودخانه، به ارزیابی فعالیت تکتونیکی و میزان بالاًمدگی منطقه دینارکوه اقدام کردند. این محققان، میزان بالاًمدگی منطقه مطالعاتی را بین ۳/۷ میلی‌متر در سال برآورد کردند. شهرزاد و گلوگوئن (2011a؛ 2011b) با استفاده از برنامه TecDEM و مدل رقومی ارتفاعی، به تحلیل فعالیت‌های تکتونیکی، تحلیل‌های کمی آبراهه‌ها، محاسبه نیمرخ طولی، شاخص‌های تقریبی، و میزان بالاًمدگی تکتونیکی اقدام کردند. در این پژوهش نیز سعی شده است با روش‌های ژئومورفومتری و مورفو-تکتونیکی و بازدیدهای صحرایی به ارزیابی میزان حرکات 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، علاوه‌بر پارامترهای زمین‌شناسی مانند فاصله از گسل و نوع سازند، از وزن دهی به پارامترهای ژئومورفولوژی و مورفو-تکتونیکی 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 حاضر پتانسیل لرزه‌خیزی و فعالیت‌های تکتونیکی بخش شمالی سامانه گسلی قم- زفره، با به کارگیری روش‌های ژئومورفومتری و مورفو-تکتونیکی 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 محاسبه شده در قالب لایه‌های اطلاعاتی با لایه گسل‌های اصلی منطقه در محیط نرم‌افزاری ArcGIS10.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 ۱:۲۵۰۰۰، داده‌های دورستجی شامل تصاویر ماهواره‌ای راداری ALOS PALSAR^۱ با قدرت تفکیک (پیکسل سایز)^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 لندرفرم‌ها، میزان و جهت جابه‌جاشدگی‌ها، و انحراف عوارض دینامیک سطحی از روی پایگاه داده‌ای موجود محاسبه و برداشت شد.

¹. ALOS با نام ژاپنی «DAICHI» ماهواره مشاهدات زمینی، توسعه‌یافته توسط JAXA سازمان اکتشاف هوافضای ژاپن، توکیو است (۲۰۱۱-۲۰۱۶).
². Pixel Size



شکل ۱. فلوچارت روش‌های گردآوری منابع و اطلاعات

برای محاسبه شاخص‌های ژئومورفیک منطقه مورد مطالعه، آن‌ها به دو دسته کلی تقسیم شدن: ۱. شاخص‌های دینامیک سطح که عبارت‌اند از: شاخص‌های گرادیان طولی رود^۱ (SL)، سینوسی جبهه کوهستان^۲ (Smf)، و نسبت پهنه‌ای کف دره به ارتفاع دره^۳ (Vf)؛ ۲. شاخص‌های دینامیک قطعات آبراهه‌ای^۴ که عبارت‌اند از: شاخص‌های عدم تقارن^۵ (Af)، انگرال هیپسومتریک^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 Iat^۸ (شاخص فعالیت نسبی تکتونیکی) از طریق فرمول زیر برای محدوده مورد مطالعه بدست آمد:

$$Iat = S / n$$

Iat شاخص فعالیت نسبی تکتونیک، S مجموع کلاس شاخص‌های ژئومورفیک محاسبه شده، و N تعداد شاخص‌های محاسبه شده 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 به دست آمده از شاخص Iat و لایه‌های اطلاعاتی دوری و نزدیکی به گسل و کانون‌های لرزه‌خیزی، محدوده مورد مطالعه در سه کلاس به روش الهمدونی (جدول ۱) طبقه‌بندی و وزن دهنده شد: کلاس ۱: فعال؛ کلاس ۲: فعالیت متوسط؛ کلاس ۳: فعالیت کم. بدینهی است نواحی‌ای با کلاس ۱ بیشترین وزن و نواحی‌ای با کلاس ۳ کمترین وزن را دارند.

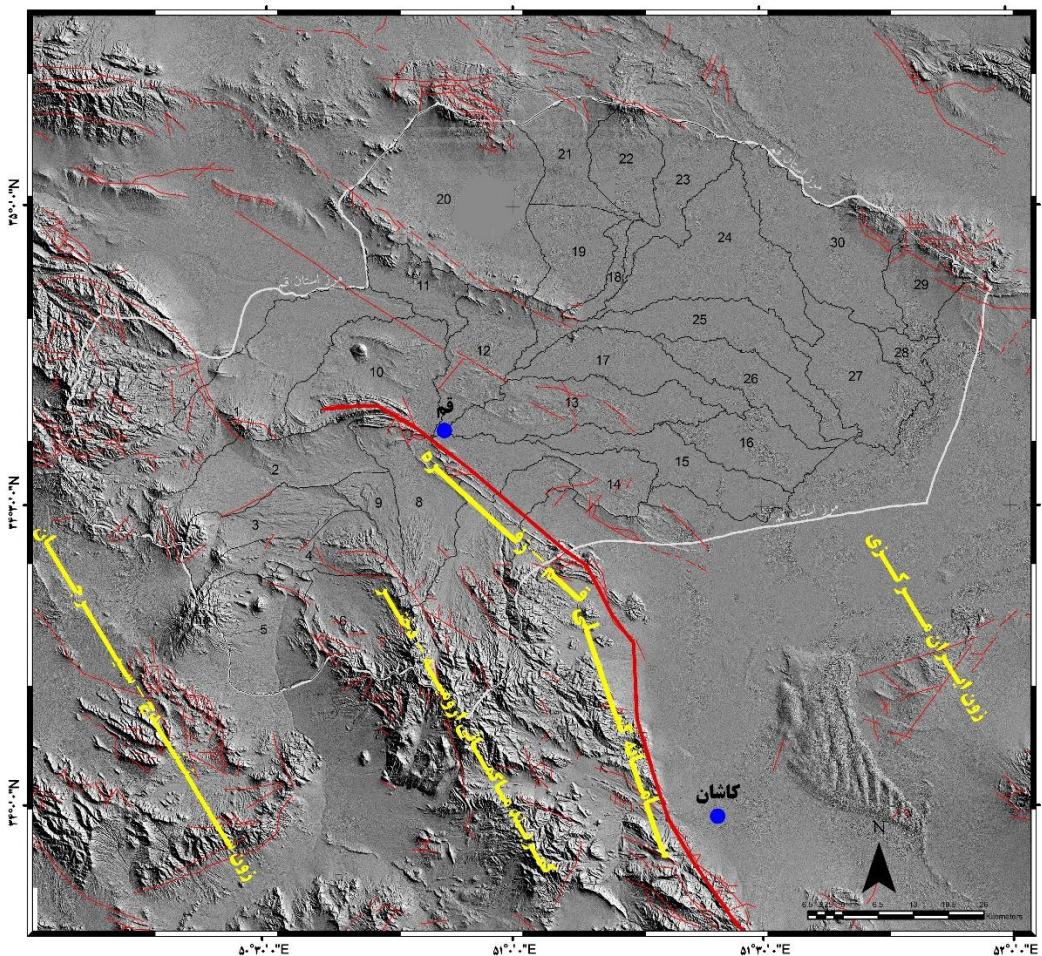
جدول ۱. مقایسه کلاس‌بندی شاخص‌های ژئومورفیک از نظر فعالیت‌های تکتونیکی (الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۸)

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

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 سندنج سیرجان متنهی می‌شود. موقعیت جغرافیایی آن بین طول‌های جغرافیایی $50^{\circ}30'$ تا $51^{\circ}58'$ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ}9'$ تا $35^{\circ}11'$ درجه شمالی است (شکل ۲). حدود ۲۵ درصد از وسعت محدوده مورد مطالعه را مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ای تشکیل داده و مابقی به صورت دشت است.

به‌طورکلی، روندهای تکتونیکی فعل 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 به صورت عموماً راستالغاز راست‌گرد شده است، هرچند حرکات چیگرد نیز در برخی گسل‌های فرعی یا غیراصلی به دلیل جهت‌گیری آن‌ها نسبت به تنش اصلی دیده می‌شود (مولی 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 بسترها 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 پتر، 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.

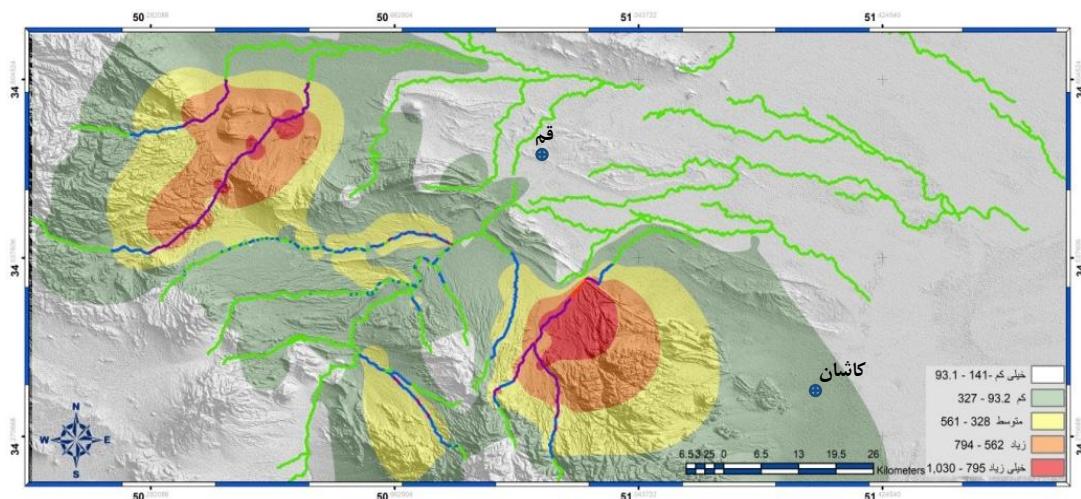
در شکل ۳، آبراهه‌های با مقادیر SL کمتر از ۱۴۰ نشانه سطح فعالیت تکتونیکی خیلی کم (به رنگ سبز)، آبراهه‌های با مقادیر ۳۲۷-۹۳۲ سطح فعالیت تکتونیکی کم (به رنگ آبی)، آبراهه‌های با مقادیر ۵۶۱-۳۲۸ نشانه سطح فعالیت

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 پهنه‌ای 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 همارش 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 آبراهه‌ای محدوده مورد مطالعه (تقسیم‌بندی تغییرات SL براساس الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۸)

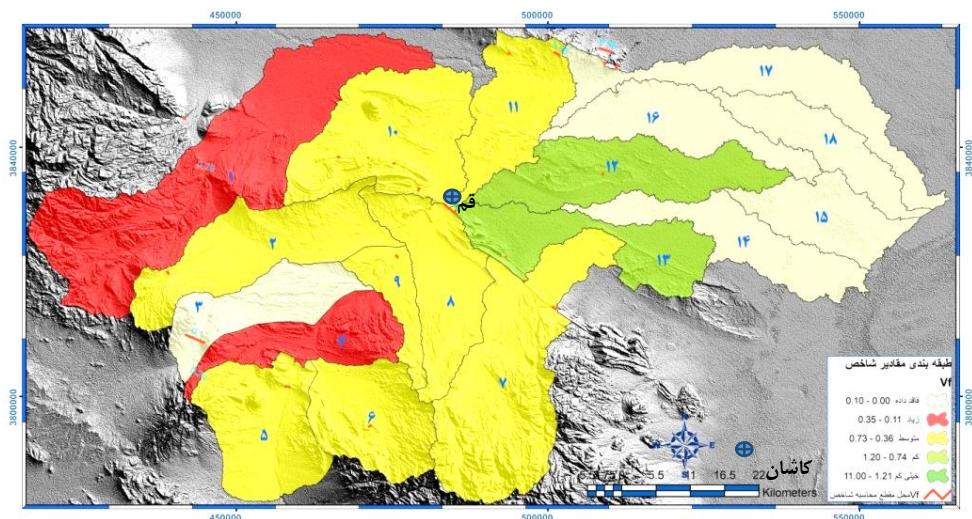
قطعات آبراهه‌ای	مقادیر SL	تفیرات SL	تفید SL	قطعات آبراهه‌ای	ویژگی واحدهای لیتوالوژی	کلاس	ویژگی واحدهای لیتوالوژی	مقادیر SL	تفیرات SL	تفید SL	قطعات آبراهه‌ای
سازند قرمز بالایی	۳	کم	۲۹۲	۱۰	سازند قرمز بالایی	۱	زیاد	۸۹۰	۱		
رسوبات کواترنری و سنگ‌های آتش‌فشاری	۳	کم	۴۶	۱۱	سازند قرمز بالایی همراه سنگ‌های آتش‌فشاری	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 آتش‌فشاری	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 آتش‌فشاری 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	Vfw	بس‌تر	ارتفاع افقی در درجه	ارتفاع کرانه راست در درجه	ارتفاع کرانه چپ در درجه	مقادیر شاخص کلاس (Iat)	Vf
۱	۲۰	۱۲۷۶	۱۳۴۰	۱۳۵۰	۱۷۱۲	۰.۲۹	۱	۰.۷۳
۲	۳۰	۱۶۶۸	۱۷۰۶	۱۷۱۲	۰.۱	۰.۲۴	۲	۰.۶۴
۳	۲۰	۱۶۰۰	۱۷۹۰	۱۸۱۰	۰.۲۴	۰.۶۴	۳	۰.۶۴
۴	۲۰	۱۸۲۵	۱۹۰۰	۱۹۲۰	۰.۶۴	۰.۴۳	۴	۰.۵
۵	۵۰	۱۲۲۵	۱۲۹۶	۱۳۱۰	۰.۴۳	۰.۵	۶	۰.۷۱
۶	۲۵	۱۵۸۴	۱۶۲۰	۱۶۲۶	۰.۷۱	۰.۷۱	۹	۰.۲۴
۷	۲۰	۱۰۲۴	۱۰۷۰	۱۰۷۲	۰.۴۶	۰.۴۶	۱۰	۰.۳۵
۸	۶۰	۹۵۰	۱۰۶۰	۱۰۸۰	۰.۸	۰.۸	۱۲	۰.۸۸
۹	۱۰	۱۰۱۴	۱۰۲۷	۱۰۲۹	-	-	۱۴	-
۱۰	۱۰	۱۰۳۴	۱۰۷۵	۱۰۷۸	-	-	۱۵	-
۱۱	۲۵	۹۶۵	۱۰۳۵	۱۰۰۴	-	-	۱۶	-
۱۲	۶	۸۴۱	۸۴۹	۸۴۸	-	-	۱۷	-
۱۳	۱۰	۹۲۳	۹۴۲	۹۴۴	-	-	۱۸	-
۱۴	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۵	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۶	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۷	۲۰	۸۹۱	۹۵۰	۹۴۵	۰.۳۵	۰.۸۸	۱۸	۰.۷۳
۱۸	۵۰	۸۷۴	۹۲۶	۹۳۵	۰.۸۸	-	-	-



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

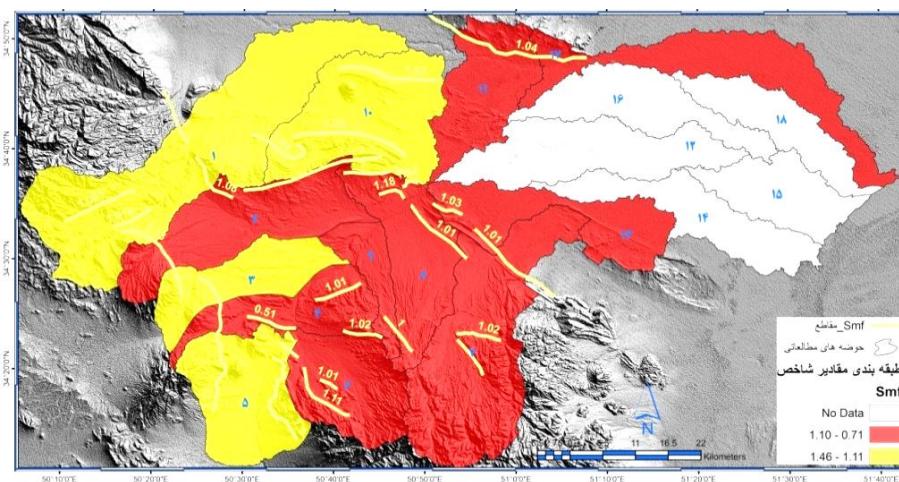
۳. شاخص سینوسی جبهه کوهستان (Smf): در این مطالعه با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM 12.5m) منطقه، ۲۷ پیشانی کوهستان (Smf) تعیین شد که از این تعداد در قطعاتی که دارای بیش از یک پیشانی کوهستان بودند میانگین آنان درنظر گرفته شد (شکل ۵). شاخص Smf پس از محاسبه به سه کلاس تکتونیکی تقسیم شد (جدول ۴):

Smf<1.10 کلاس ۱، Smf>1.50 کلاس ۲، و Smf>1.50 کلاس ۳ (الهمدونی و همکاران، ۲۰۰۸). از بین جبهه‌های تعیین شده، جبهه کوهستان قطعات ۴، ۵، ۷، ۱۱، ۹، ۱۴، و ۲۵ با مقادیر Smf اندازه‌گیری شده ۱ دارای بالاترین میزان فعالیت تکتونیکی بودند.

جدول ۴. مقادیر شاخص سینوسیتۀ جبهه کوهستان (Smf) در حوضه‌های مورد مطالعه

شماره حوضه	Lmf	Ls	Smf	میانگین هر حوضه	lat
۱	۱۷۵۳۰.۵۱	۱۷۲۲۳۳.۷	۱.۰۲	۱.۴۶	۳
۲	۴۱۴۲۰.۸۵	۳۹۷۰.۸۲	۱.۰۴	۱.۰۷	۲
۳	۲۰۱۹۱.۹	۱۹۱۹۳.۳	۱.۰۵	۱.۱۳	۲
۴	۱۳۰۹۲.۴۱	۱۲۹۶۰	۱.۰۱	۰.۸۸	۱
۵	۱۷۸۲۳۸.۸۱	۱۷۶۴۹.۹	۱.۰۱	۱.۱۴	۲
۶	۱۳۲۲۴.۳۹	۱۳۱۵۳.۳	۱.۰۱	۱.۰۳	۱
۷	۷۰۱۷۲.۷۲	۶۹۵۹.۵	۱.۰۱۴	۱.۰۱	۱
۸	۱۸۸۲۴.۱۵	۱۴۴۶۴.۷	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	۷۵۰.۶۰۹	۷۴۳۰.۹	۱.۰۱	-	
۱۳	۵۰۶۹.۴۹	۴۳۰.۶۲	۱.۱۸	۱.۰۲	۱
۱۴	۱۷۶۴۶.۹۳	۱۴۹۸۳۶	۱.۱۸	-	-
۱۵	۹۳۸۸.۸۷	۹۳۷۲.۹	۱.۰۱	-	-
۱۶	۲۴۱۴۹.۹۹	۲۴۱۴۹.۹	۱	-	-
۱۷	۱۲۸۵۱.۹۵	۷۸۱۳۶	۱.۶۴	-	-
۱۸	۱۰۰۵۲.۴۵	۹۳۲۱	۱.۰۸	-	-

در جدول فوق حوضه هایی که فاقد مقادیر شاخص Smf می باشند قطعات آبراهه ای واقع در دشت آن و فاقد پیشانی کوهستان آنند. بنابراین، این شاخص در مورد آنان در نظر گرفته نشده است (شکل ۵).



شکل ۵. رده‌بندی قطعات آبراهه‌ای براساس میزان اندازه‌گیری شده پی شاخص Smf. 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 خم شدگی عمودی بر امتداد آبراهه اصلی در حوضه حساس است. مقادیر بیشتر یا کمتر از ۵۰ ممکن است حاکی از کج شدگی 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 موردمطالعه

آبراهه‌ای	شماره قطعه	مساحت سمت راست (Ar) به	مساحت کل حوضه (At)	مقادیر شاخص	کلاس‌بندی تکتونیکی	مساحت سمت راست (Ar) به	به متراز	(Iat)	(AF)
۱	۴۰۰۵۷۴۶۰.۹۴	۸۷۹۳۳۴۲۱۸.۷۵	۴۵۰.۹۵	۸۷۹۳۳۴۲۱۸.۷۵	۳	۴۱۱۸۱۰۵۱۰.۷۱۱	۴۰۰۲۹	۲	۴۰.۲۹
۲	۱۶۵۹۳۱۱۴۷.۱۳	۲۵۰۹۳۲۸۴۰.۰۱	۴۰.۳۳	۲۵۰۹۳۲۸۴۰.۰۱	۳	۱۱۱۲۲۹۰۲۳۰.۰۱	۴۰.۳۳	۳	۴۰.۳۳
۳	۱۵۷۱۳۶۸۹۹.۱	۲۴۱۳۳۴۱۸۹.۷۴۹	۶۵.۱۱	۲۴۱۳۳۴۱۸۹.۷۴۹	۲	۱۰۷۲۱۲۵۹.۷۵	۲۹.۶۸	۱	۲۹.۶۸
۴	۱۳۵۱۵۸۸۲۰.۰۴	۳۰۷۷۲۳۲۲۷.۹۴۴	۴۳.۹۲	۳۰۷۷۲۳۲۲۷.۹۴۴	۳	۵۰۶۴۰۰۲۶۶.۲۹	۷۹.۰۷	۱	۷۹.۰۷
۵	۲۵۳۰۸۷۵۲۹.۴۲	۶۲۰۲۵۲۱۸۷.۵	۴۰.۸	۶۲۰۲۵۲۱۸۷.۵	۲	۸۷۲۱۰۵۰۲۳۳	۷۲.۷۵	۱	۷۲.۷۵
۶	۴۳۱۶۲۲۸۳۱.۴۸	۱۱۹۸۷۶۶۷۶.۷۸۹	۸۸.۰۴	۱۱۹۸۷۶۶۷۶.۷۸۹	۱	۳۱۰۹۸۸۲۸۵.۸۵	۵۰.۰۱	۱	۵۰.۰۱
۷	۸۶۱۷۷۰۱۸.۰۹	۴۹۰۲۳۹۳۷۵	۲۲.۴۳	۴۹۰۲۳۹۳۷۵	۱	۲۳۶۷۰۲۸۲۰.۴۵	۲۲.۴۳	۲	۲۲.۴۳
۸	۱۸۱۸۷۷۵۴۱.۵	۲۸۴۲۲۹۵۳۱.۲۵	۷۷.۷	۲۰۴۶۲۲۹۶۸.۷۵	۲	۲۳۵۷۰۰۶۲۵	۷۷.۷	۲	۷۷.۷
۹	۱۶۹۷۵۲۲۵۲۰.۳	۲۸۸۲۲۴۳۷.۵	۶۳.۱	۲۸۸۲۲۴۳۷.۵	۱	۲۰۸۶۲۶۰۱۴.۴۹	۷۲.۰۲	۲	۷۲.۰۲
۱۰	۲۰۸۶۲۶۰۱۴.۴۹	۲۸۹۲۶۷۵۰۰	۷۲.۱۲	۲۸۹۲۶۷۵۰۰	۲	۲۹۲۶۳۵۴۲.۴۷	۴۸.۰۳	۳	۴۸.۰۳
۱۱	۲۹۲۶۳۵۴۲.۴۷	۶۰۹۳۳۶۸۲۴۳۲۶۳	۷۰.۰۹	۶۰۹۳۳۶۸۲۴۳۲۶۳	۲	۱۷۰۱۴۲۲۳۰.۰۲	۵۴.۲۵	۱.۹	۵۴.۲۵
۱۲	۳۴۷۲۶۸۷۹۸۵	۶۷۴۹۲۲۶۹۰۷	۶۷۴۹۲۲۶۹۰۷	۶۷۴۹۲۲۶۹۰۷	۱.۹	کل حوضه			

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 بالاًمدگی، 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 موردمطالعه 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 محاسبه شده (جدول ۷ و شکل ۶-ج) حاکی از فقدان شرایط تکتونیکی فعال و دوره پیری چشم‌اندازهای ژئومورفیک در سطوح مختلف محدوده

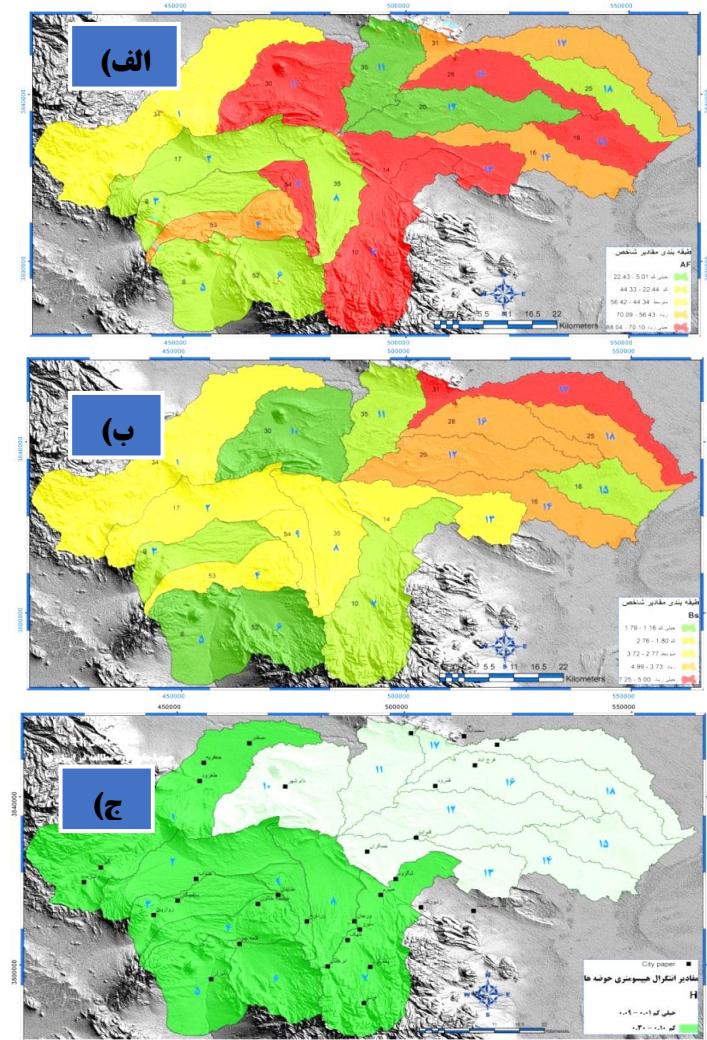
مورد مطالعه است. مطابق نقشه شکل ۶-ج، نواحی جنوب و جنوب غرب محدوده مورد مطالعه، که اغلب مرتفع و کوهستانی‌اند، دارای شاخص بالاتر Hi نسبت به دشت‌های مسطح شرق و شمال شرق منطقه‌اند.

جدول ۶. مقادیر شاخص نسبت شکل حوضه و کلاس فعالیت تکتونیکی (Iat) در حوضه‌های مطالعه

آبراهه‌ای	شماره قطعه	طول حوضه BI به متر	عرض حوضه Bw به متر	مقادیر شاخص شکل Bs	کلاس فعالیت تکتونیکی	حوضه	مقادیر شاخص شکل	Iat (lat)
۱	۶۴۸۵۵	۱۸۱۴۲	۳.۵۷	۲			۲	
۲	۵۸۱۵۲	۱۸۷۴۵	۳.۶۴	۲			۲	
۳	۳۲۲۷۲	۱۱۷۱۶	۲.۷۶	۳			۳	
۴	۳۵۲۰۳	۱۱۲۸۵	۳.۱۲	۲			۴	
۵	۲۳۱۸۴	۱۶۸۴۸	۱.۳۸	۳			۵	
۶	۲۵۱۷۴	۲۰۲۸۱	۱.۲۴	۳			۶	
۷	۴۸۴۴۸	۱۸۹۴۰	۲.۵۶	۳			۷	
۸	۳۵۷۳۹	۱۰۰۷۶	۳.۵۵	۲			۸	
۹	۲۳۷۸۹	۸۰۸۰	۲.۹۴	۳			۹	
۱۰	۳۵۹۹۴	۲۵۸۱۳	۱.۳۹	۳			۱۰	
۱۱	۳۰۶۹۶	۱۳۱۰۰	۲.۳۴	۳			۱۱	
۱۲	۵۴۴۹۶	۱۱۴۹۹	۴.۶۵	۱			۱۲	
۱۳	۴۱۷۷۸	۱۱۲۳۳	۳.۷۲	۲			۱۳	
۱۴	۵۰۰۲۹	۱۰۲۶۰	۴.۸۸	۱			۱۴	
۱۵	۲۹۶۶۲	۱۳۶۳۷	۲.۱۸	۳			۱۵	
۱۶	۴۵۰۴۹	۹۰۸۸	۴.۹۶	۱			۱۶	
۱۷	۲۰۶۲۷	۳۰۳۲	۶.۸	۱			۱۷	
۱۸	۱۹۴۷۹	۱۵۱۲۴	۱.۲۹	۳			۱۸	

جدول ۷. مقادیر شاخص‌های تقریر و شبیه همراه کلاس فعالیت تکتونیکی (Iat) و برخی شاخص‌های عدم تقارن و کشیدگی در قطعات آبراهه‌ای مورد مطالعه

شماره قطعه آبراهه	slope شبیه	شاخص تقریر (θ)	شاخص شبیه نرمال (Ksn)	شاخص	Iat	شاخص عدم تقارن (Hi)	شاخص Skuwness	Kurtosis شاخص کشیدگی
۱	۴.۳	۰.۷۸	۶۲	۲	۰.۱۹	۰.۵۲	-۰.۵۲	۲.۴
۲	۲.۷	۰.۵۵	۷۱.۳	۲	۰.۱۳	۱.۶	۰.۷	۵.۷
۳	۱.۴	۰.۴	۵۸.۶	۱	۰.۱۴	۱.۲	۰.۷	۴.۴۵
۴	۱.۸	۰.۵	۲۴.۸۵	۱	۰.۱۲	۰.۸	۰.۷	۲.۵
۵	-۱.۸	۰.۰۵	۲۰.۴	۱	۰.۱۱	۲.۱	۰.۷	۸.۸۴
۶	۱.۵	۰.۳۷	۱۱۶.۵	۱	۰.۱۷	۱	۰.۱	۲.۷۵
۷	۰.۷	۰.۲۷	۱۴۱	۱	۰.۳	-۰.۱۹	۰.۳	۲.۱۳
۸	۲.۳	۰.۵	۵۵.۲	۲	۰.۱۲	۱.۳	۰.۴	۴.۴
۹	۲.۳	۰.۵	۴۲.۲	۲	۰.۱۲	۱.۱۹	۰.۱۲	۲.۷
۱۰	۴.۷	۰.۸۸	۱۹.۱	۲	۰.۰۷	۱.۸۷	۰.۱	۶.۲
۱۱	-۰.۳۴	۰.۱	۶.۷۸	۲	۰.۰۵	۱.۵	۰.۱	۶.۲
۱۲	-۰.۲	۰.۲۲	۶.۳	۲	۰.۰۶	۰.۳۶	۰.۱	۱.۹
۱۳	۱.۶	۰.۱۲	۹.۵	۲	۰.۰۷	۱.۱۹	۰.۱	۳.۷
۱۴	-۸.۶	۰.۲۴	۵.۳	۲	۰.۰۵	۰.۳۷	۰.۱	۲.۶۸
۱۵	-۲.۷۸	۰.۰۶	۱.۳۷	۲	۰.۰۰۸	۰.۸۷	۰.۱	۳.۰۲
۱۶	-۱.۲	۰.۲	۲.۹	۲	۰.۰۲	۱.۱۷	۰.۱	۶.۴۶
۱۷	۴.۲۸	۰.۹۷	۲.۴	۲	۰.۰۱	۲.۴	۰.۱	۱۵.۷
۱۸	-۰.۶	۰.۳	۱.۷	۲	۰.۰۱	۳.۳	۰.۱	۱۵.۴



شکل ۶. (الف) مقادیر شاخص AF در قطعات آبراهه‌ای مورد مطالعه. حوضه‌های قرمزنگ مقادیر بسیار زیاد Af را نشان می‌دهند؛
ب) مقادیر شاخص Bs؛ (ج) طبقه‌بندی مقادیر شاخص انتگرال هیپسومتری (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، Vf، Smf، AF، Bs، Vf، AF، و Iat، 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).

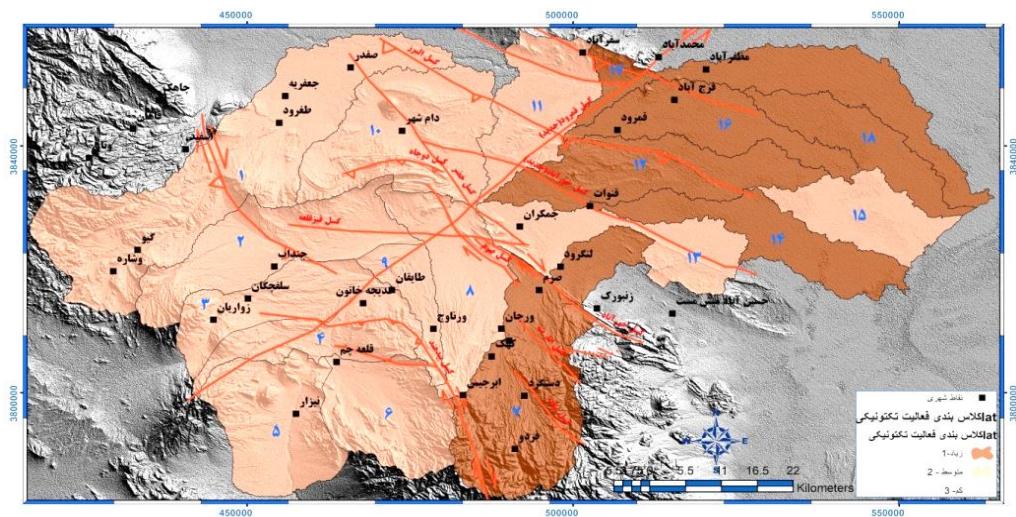
1. Index of relative active tectonics

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

شاخص‌ها	کلاس ۱	کلاس ۲	کلاس ۳
SL	میزان تغییرات زیاد	میزان تغییرات کم	بدون تغییرات
Smf	$Smf < 1.1$	$Smf: 1.1-1.5$	$Smf > 1.5$
Vf	$Vf < .5$	$Vf: .5-1$	$Vf > 1$
Bs	$Bs > 4$	$Bs: 4-3$	$Bs > 3$
Af	$Af: 5-15$	$Af: 5-7-15$	$Af: 5-7$

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

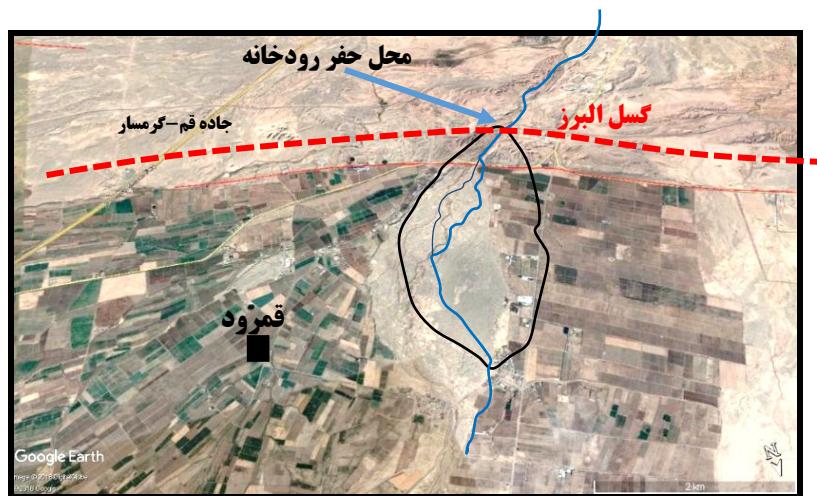
Iat	(S/n)	کلاس شاخص‌های زئومورفیک						قطعات آبراهه‌ای
		Hi	Af	Bs	SL	Vf	Smf	
۲	۲	۳	۳	۲	۱	۱	۳	۱
۲	۱.۸۶	۳	۲	۲	۱	۲	۲	۲
۲	۲	۳	۳	۳	۲	۱	۲	۳
۲	۱.۷۱	۳	۲	۲	۳	۱	۱	۴
۲	۲	۳	۱	۳	۳	۲	۲	۵
۲	۱.۸۶	۳	۳	۳	۲	۲	۱	۶
۱	۱.۴۳	۳	۱	۳	۱	۱	۱	۷
۲	۱.۸۶	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۸
۲	۱.۸۶	۳	۱	۳	۲	۲	۱	۹
۲	۱.۸۶	۳	۱	۳	۳	۱	۲	۱۰
۲	۱.۷۱	۳	۱	۳	۳	۱	۱	۱۱
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 کلاس‌بندی شاخص فعالیت نسبی تکتونیکی Iat در قطعات آبراهه‌ای مورد مطالعه

شواهد لندفرمی

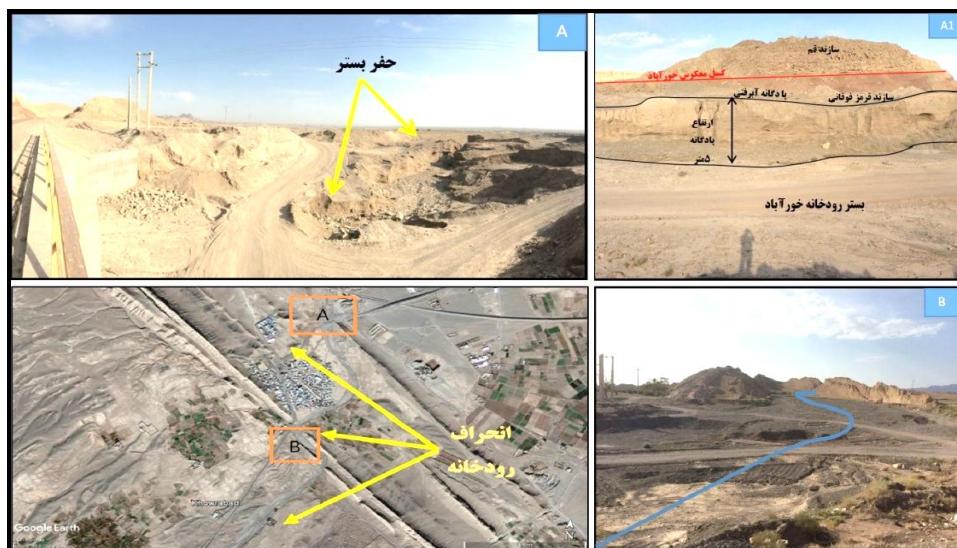
وجود شواهد میدانی عملکرد خطوط گسلی مذکور نظیر حفر و جایه‌جایی رأس مخروط‌افکنه‌ها (شکل ۸)، تغییر محل رسوب‌گذاری، برش رسوبات، و وجود شکستگی‌های متعدد پشت‌های مسدود‌کننده و خطی در امتداد آبراهه‌ها، دره‌های خطی و پرتوگاه گسلی معکوس متعدد بهویژه در حوالی روستای زنبورک (شکل ۹) انحراف شبکه آبراهه‌ها و حفر عمیق بستر بهویژه در خورآباد (شکل ۱۰ - A، A1، و B)، 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 مورفو-تکتونیکی 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 بر اثر فعالیت تکتونیکی راست‌گرد گسل البرز



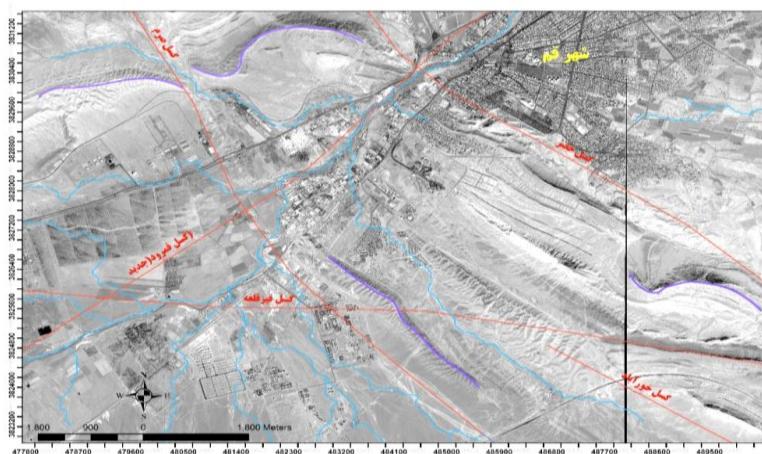
شکل ۹. تغییر مسیر و حفر شدید بستر رودخانه‌ها در غرب زنبورک بر اثر حرکات تکتونیکی راست‌گرد گسل کاشان



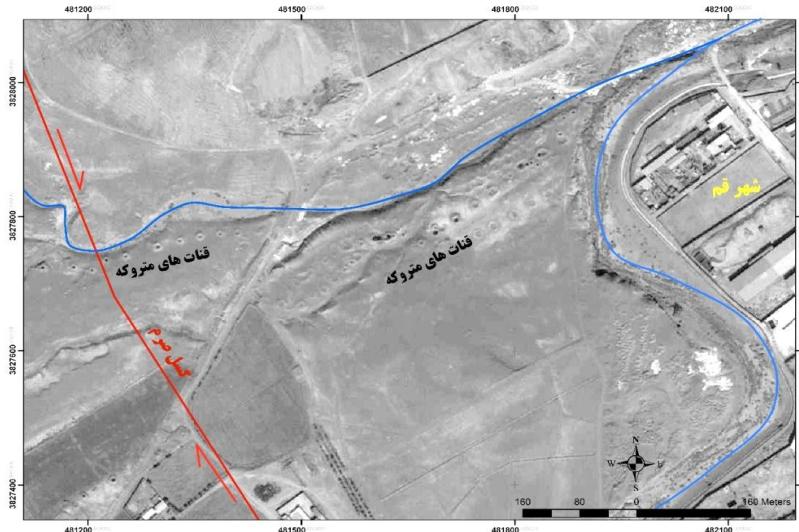
شکل ۱۰. تغییر مسیر و حفر رودخانه خورآباد (A) حفر عمیق بستر رودخانه خورآباد؛ (A1) پادگانه آبرفتی به ارتفاع ۵ متر در محل گسل معکوس خورآباد و رو راندگی سازند قم بر روی رسوبات قرمز بالای؛ (B) تغییر مسیر رودخانه خورآباد و فرسایش بین لایه‌ای یال‌های طاقدیس خورآباد



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)

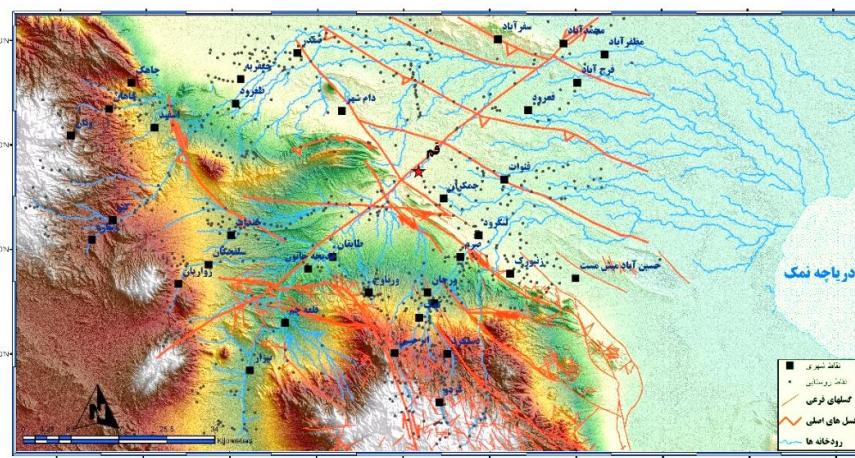


شکل ۱۳. تخریب و جابه‌جایی رشته قنات‌ها در شمال پرده‌ساز قم بر اثر حرکات تکتونیکی (تصویر ماهواره‌ای Orb-View3 با قدرت تفکیک ۴ متر)

بحث و نتیجه‌گیری

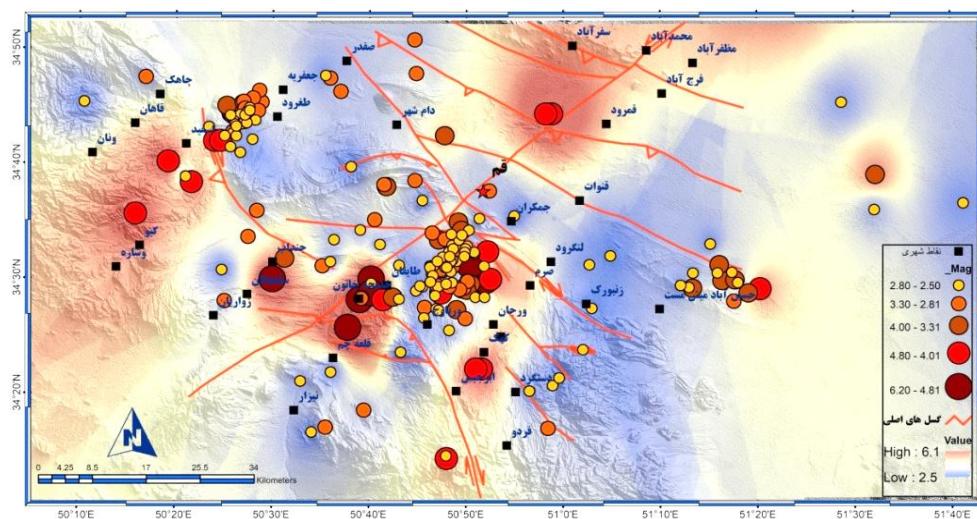
سامانه گسلی قم-زفره دارای گسل‌های اصلی و مهم در گستره مورد مطالعه است. فعالیت گسل‌های اصلی و دیگر گسل‌های فرعی منطقه در طول کواترنری نقش اصلی را در ساختار ژئومورفولوژی منطقه ایفا کرده است؛ به‌طوری‌که آثار این فعالیتها بر روی ویژگی‌های سیستم رودخانه‌ای و حوضه‌های زهکشی دیده می‌شود. نتایج تحلیل مورفومتریک 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 I_{at} و این واقعیت را آشکار می‌سازد که بیشتر قطعات آبراهه‌ای مورد مطالعه با درجات مختلف از حرکات تکتونیکی متأثر شده‌اند؛ به‌طوری‌که 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 احتساب کرد. بدون شک، برای ارزیابی دقیق لرزه‌خیزی و تعیین فعالیت‌های تکتونیکی گسل‌های این منطقه، بررسی‌های میدانی و تفضیلی بیشتری مورد نیاز است. بررسی‌های ژئومورفومتری و به‌ویژه مطالعات میدانی انجام گرفته در این پژوهش نشان می‌دهد تقریباً همه لندفرم‌های پیرامون سامانه‌های گسلی محدوده مورد مطالعه تحت تأثیر فعالیت‌های نئوتکتونیکی قرار دارد. با توجه به تمرکز برخی تأسیسات صنعتی، راههای ارتباطی، و مراکز سکونتگاهی (که روزبه‌روز رو به افزایش‌اند)، امکان تحمیل خسارات بالا برای آن‌ها زیاد است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود با درنظرگرفتن نتایج این پژوهش و اجرای مطالعات تفضیلی، در استفاده از زمین و انتخاب نوع کاربری آن‌ها ملاحظات و اقدامات پیشگیرانه مدنظر برنامه‌ریزان قرار بگیرد.

با درنظرگرفتن موقعیت و پراکندگی نقاط شهری و روستایی در سطح منطقه مورد مطالعه و موقعیت قرارگیری گسل‌های اصلی و فرعی موجود، به‌خوبی در می‌یابیم که بیشتر این نقاط جمعیتی در حریم گسل‌ها واقع شده‌اند. براساس یافته‌های پژوهش، شهرهای کهک و فُردو بیشترین همپوشانی را با پهنه‌های گسلی دارند. سپس، روستاهای جعفرآباد، راهجرد شرقی، و نیزار به ترتیب از بیشترین همپوشانی برخوردارند (شکل ۱۴).

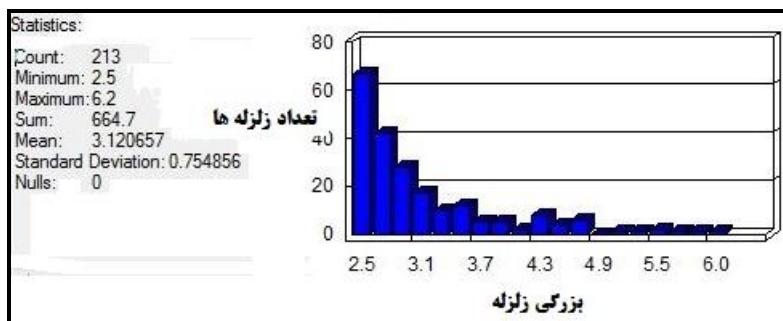


شکل ۱۴. نقشه پراکندگی نقاط شهری و روستایی و موقعیت سامانه‌های گسلی شمال زون قم-زفره

در تأیید تحلیل‌های لرزه‌خیزی و تکتونیک فعال در منطقه با گردآوری داده‌های زمین‌لرزه‌ای تاریخی و دستگاهی در حوضه‌های سطح منطقه مورد مطالعه و ترسیم نقشهٔ 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 لیتوژوئی از سنگ‌های رسوبی و پادگانهای 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 ثبت شده تاریخی، زلزله‌های بزرگ‌تر از ۵ ریشتر را در منطقه نمایان می‌کنند. براساس داده‌های لرزه‌نگاری سطحی، فراوانی وقوع زمین‌لرزه‌ای با بزرگی ۴-۶ ریشتر در بخش‌های غربی و جنوب غربی محدوده مورد مطالعه بیشتر است (شکل ۱۵). از آنجا که کانون زمین‌لرزه‌ای محدوده مطالعه سطحی و کم عمق است و بهدلیل تمرکز جمعیت و کیفیت پایین سازه‌ها و بنایها در این مناطق زمین‌لرزه‌ای بیش از ۴ ریشتر خسارت‌های مالی زیادی به وجود آورده‌اند.



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

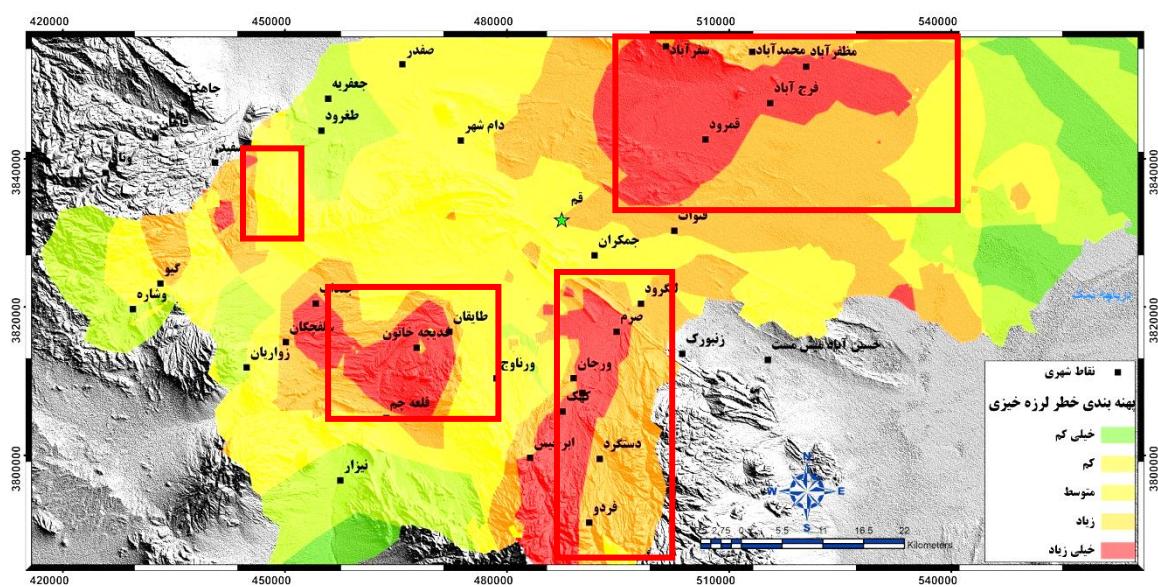


شکل ۱۶. نمودار تعداد و بزرگای زمین‌لرزه‌های به‌وقوع پیوسته در محدوده مورد مطالعه از سال ۱۹۷۱ الی ۲۰۱۷ و خلاصه آماری آن

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 زلزله ۲.۲ عریشتری رخداده در تاریخ ۱۹۸۰/۱۲/۱۹ روزتایی به نام خدیجه‌ختون واقع در جنوب غرب شهر قم است. میانگین شدت و بزرگای زلزله‌های ثبت شده برابر با ۳.۰ 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 رخداده است. کمترین عمق نیز در جنوب شهر پردیسان قم به عمق ۱۰.۱ کیلومتر رخداده است.

براساس نقشهٔ پهنه‌بندی مناطق فعال تکتونیکی و مستعد لرزه‌خیزی (شکل ۱۰)، شهرهای خدیجه‌ختون، تایقان، کهک، ابرجیس و روستاهای رحمت‌آباد، خلچ‌آباد، محمود‌آباد، فیض‌آباد، ابفین، باشیون، باغ‌نره، سمنی‌آباد، قبادبن، چنارک، ازانواه، کوکون، سیف‌آباد، شریف‌آباد، و ملک‌آباد در محدودهٔ پُر خطر شناسایی شدند. براساس همین مطالعات، شهر قم در محدودهٔ با خطر متوسط و کم قرار می‌گیرد. سامانه‌های گسلی کوشک نصرت، البرز، صرم، خورآباد، بیدهند، و ایندیس جزو گسل‌های پُر خطر و لرزه‌زا قرار می‌گیرند، زیرا بیشترین رویدادهای لرزه‌خیزی و تغییرات مورفو-تکتونیکی در طول آن‌ها به‌وقوع پیوسته است. این گسل‌ها بخش شمالی سامانه گسلی قم-زفره را تشکیل می‌دهند. براساس نقشهٔ سایزمو-تکتونیک محدوده مورد مطالعه، گسل‌های اثارینه و خورآباد دارای رفتارهای زلزله‌خیزی در پایانه گسلی خود در بخش حسین‌آباد میش‌مست می‌باشند و نشان از فعل‌بودن و رو به رشد بودن آنان دارد. بنابراین، رویدادهای لرزه‌زا در این بخش در آیندهٔ نزدیک دور از ذهن نیست.

براساس یافته‌های این تحقیق، چهار کانون مخاطره‌آمیز تکتونیکی و لرزه‌خیز در سطح منطقهٔ مورد مطالعه شناسایی شد که با چهارگوش‌های قرمزنگ در شکل ۱۷ نمایش داده شده‌اند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که در پهنه‌های مخاطره‌آمیز تعیین شده اجرای طرح‌های عمرانی و ساخت‌وسازها بالحتیاط و با درنظرگرفتن مسائل مقاوم‌سازی و پیشگیری در برابر زلزله انجام گیرد. نتیجهٔ ارزیابی فعالیت‌های زمین‌ساختی در منطقهٔ مطالعاتی با استفاده از ویژگی‌های ژئومورفولوژیک حاکی از فعالیت‌های 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. نقشهٔ پهنه‌بندی مناطق فعال تکتونیکی و مستعد لرزه‌خیزی براساس تلفیق لایه‌های اطلاعاتی شاخص‌های ژئومورفیک.
پهنه‌های قرمزرنگ محدوده‌های پُرخطر و لرزه‌خیز منطقه‌اند

منابع

- اعظم ماقی، 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 قلاچه (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 باگرود، بوژان، زاوین، و سررود در شمال شرق کشور، مجله آمایش جغرافیایی فضای، فصل نامه 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.iese.ac.ir/IIEES>
- قربانی، ا؛ دولتی، ا. و پورکرمانی، م. (۱۳۹۴). ارزیابی میزان جنبایی زمین‌ساختی و پویایی گسل‌های شمال باختی گستره ایران مرکزی، پهنه قم- ساوه، فصل نامه کواترنری 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 کواترنر 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 Tecnophysics, 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. adn 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.
- Moghimi, 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 Dinarkooch 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.iies.ac.ir> (IIEES).