

فعالیت زمین‌ساخت جوان در پهنه گسلی قم- زفره، ایران مرکزی

مریم ده بزرگی* - استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی
محمد مومنی طارم‌سری - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه خوارزمی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۵/۰۸

چکیده

گسل قم- زفره از گسل‌های بنیادین با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق است که دشت کاشان را از ارتفاعات جنوبی آن جدا می‌کند و در نهایت به منطقه زفره می‌رسد. از آنجاکه پهنه گسلی قم- زفره یکی از پهنه‌های مهم و فعال ایران مرکزی در نظر گرفته شده است، بررسی میزان فعالیت تکتونیکی اخیر آن ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور در این پژوهش به تحلیل و بررسی ۶ شاخص مورفوتکتونیکی مهم نظیر گرادیان طولی رودخانه (SL)، عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)، شکل حوضه زهکشی (Bs)، نسبت عرض کف به ارتفاع دره (Vf)، پیشانی کوهستان (J) و انتگرال هیپسومتریک (Hi) پرداخته شده است. برای ایجاد حوضه‌ها بر روی گستره مطالعاتی و به منظور انجام تصحیحات بر روی داده‌های مدل رقومی ارتفاعی از نرم‌افزار Arc Hydro (در محیط نرم‌افزاری Arc GIS 10.1) استفاده شده است، پس از آن ۶ شاخص مورفوتکتونیکی بر روی هر یک از حوضه‌ها مورد اندازه‌گیری و رده‌بندی قرار گرفته است. در نهایت به منظور تعیین تکتونیک فعال نسبی در منطقه مورد مطالعه، شاخص تکتونیک فعال (Iat) محاسبه شده است. بر اساس این شاخص پهنه گسلی قم- زفره به ۴ رده فعالیت تکتونیکی بسیار بالا، بالا، متوسط و پایین رده‌بندی گردید. طبق شاخص Iat، ۱۴،۳۹ درصد از گستره مورد مطالعه معادل ۹۰۴،۱۳ کیلومتر مربع که ۱۱ حوضه را در برمی‌گیرد فعالیت تکتونیکی بسیار بالا نشان می‌دهند، ۵۲،۱۱ درصد از منطقه مورد مطالعه (۳۲۷۴،۹۴ کیلومتر مربع، ۵۴ حوضه) فعالیت تکتونیکی بالا، ۲۷،۲۹ درصد (۱۷۱۵،۳۶ کیلومتر مربع، ۳۲ حوضه) فعالیت تکتونیکی متوسط و ۶،۲۱ درصد (۳۹۰،۴۶ کیلومتر، ۶ حوضه) هم فعالیت تکتونیکی پایین را نشان می‌دهند. در ادامه، به منظور بررسی صحت و تأیید شاخص‌های مورفومتری مطالعات صحرایی گسترده در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت. شواهد به‌دست‌آمده شامل گسلش و شکستگی در واحدهای تراورتن جوان در پهنه گسلی قم- زفره بوده که نشانگر فعالیت جوان این پهنه می‌باشند. در منطقه مورد مطالعه بیشترین مقدار فعالیت تکتونیکی در بخش‌های جنوب شرقی، شمال غربی و مرزهای شرقی گستره مطالعاتی واقع در پهنه گسلی قم- زفره است.

واژگان کلیدی: زمین‌ساخت جوان، شاخص‌های مورفومتری، تراورتن، پهنه گسلی قم- زفره، ایران مرکزی

مقدمه

زمین ساخت فعال یا زمین ساخت ژئومورفولوژی به مطالعه فرآیندهای پویای مؤثر در شکل دهی زمین و چشم اندازهای موجود در آن می پردازد. رویکردهای ساختاری و تکتونیکی نهشته های تراورتنی مورد توجه محققان زیادی است (التونل و هنکوک، ۱۹۹۶؛ جاکیر، ۱۹۹۹). تراورتن ها به آب های زیرزمینی خروجی اسیدی در امتداد گسل ها و شکستگی ها نسبت داده می شوند (چافتس و فولک، ۱۹۸۴). گسل ها و شکاف مرکزی تراورتن نقش مهمی را در انتقال سیالات هیدروترمال به سطح زمین ایفا می کنند. ارتباط بین تراورتن ها و تکتونیک فعال و نقش شکستگی ها و گسل ها در انتقال آب های گرم به سطح زمین توسط محققین متعددی مورد بررسی قرار گرفته اند (فورد و پدلی، ۱۹۹۶؛ هنکوک و همکاران، ۱۹۹۹؛ مسکی و همکاران، ۲۰۰۸).

یک رابطه نزدیک تکتونیکی بین مناطق فعال و تشکیلات تراورتنی وجود دارد. دگرشکلی های تکتونیکی در نتیجه رژیم زمین ساختی کششی تراورتن های نوع شکاف- پشته (Fissure ridge travertine) به وجود می آورند (مسکی و همکاران، ۲۰۰۸). (جاکیر، ۱۹۹۹) نشان داد که تراورتن ها در پایانه های قطعات گسلی یا در مناطق پلکان گسلی (Step Over) نهشته می شوند که در نتیجه، مطالعه این نهشته ها می تواند در بررسی قطعات گسلی فعال مفید واقع شود. برای توصیف کمی چشم اندازها نیز از شاخص های مورفومتری استفاده می شود. استفاده از شاخص های مورفوتکتونیکی برای مطالعه مناطقی که بالا آمدگی ها و یا دگرریختی های سریع تکتونیکی را تجربه کرده اند مفید می باشد (کلر و پینتر، ۲۰۰۲) (ده بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰) (مومنی طارم سری و همکاران، ۱۳۹۴). محدوده مورد بررسی در این مطالعه در ایران مرکزی واقع گردیده است و شامل نواحی باختری و جنوب باختری کاشان می باشد (شکل ۱- الف و ب). به منظور دستیابی به مقدار فعالیت تکتونیکی در این منطقه شاخص های گرادیان طولی رود، عدم تقارن حوضه زهکشی، انتگرال هیپوسومتریک، نسبت شکل حوضه زهکشی، نسبت عرض بستر دره به ارتفاع دره و شاخص سینوسی پیشانی کوهستان بررسی شده اند. برای این کار در محیط نرم افزار Arc GIS با استفاده از افزونه Arc Hydro مرز زیرحوضه ها و آبراهه های محدوده مورد مطالعه ایجاد شده و مورد بررسی و اندازه گیری قرار گرفته است. بر این اساس، گستره مورد مطالعه به ۱۰۳ حوضه تقسیم گردیده و شاخص های ژئومورفیک مذکور، به تفکیک در هر کدام از حوضه ها مورد اندازه گیری واقع شده اند (شکل ۲). در نهایت نقشه فعالیت تکتونیکی نسبی (Iat) از منطقه مورد مطالعه با استفاده از ۶ شاخص ذکر شده تهیه شد و مقدار فعالیت تکتونیک نسبی اخیر مربوط به هر حوضه مشخص گردید.

موقعیت زمین ساختی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

ایران مرکزی به محدوده مثلی شکلی اطلاق می شود که از جنوب باختری به کوه های زاگرس، از شمال به کوه های البرز و از خاور به کوه های خاور ایران محدود می گردد. این ناحیه از فلات ایران تحولات ساختمانی گوناگونی را پشت سر گذاشته و از ساختار پیچیده ای برخوردار است (آقائباتی، ۱۳۸۳). پهنه ماگمایی ارومیه - دختر با روند شمال باختر - جنوب خاور در ایران مرکزی، توسط گسل هایی با روندهای شمال، شمال باختر - جنوب، جنوب خاور مانند پهنه های گسلی دهشیر، قم - زفره، بیدهند و جنوب ساوه بریده و جابه جاشده است (محجل و پروهان، ۱۳۸۴). گسل قم - زفره به عنوان یکی از گسل های پی سنگی با روند کلی شمال - شمال باختر ارزیابی می شود که با رویداد زمین ساختی بسته

¹ Altunel and Hancock, 1996

² Cakir, 1999

³ Chafets and Folk, 1984

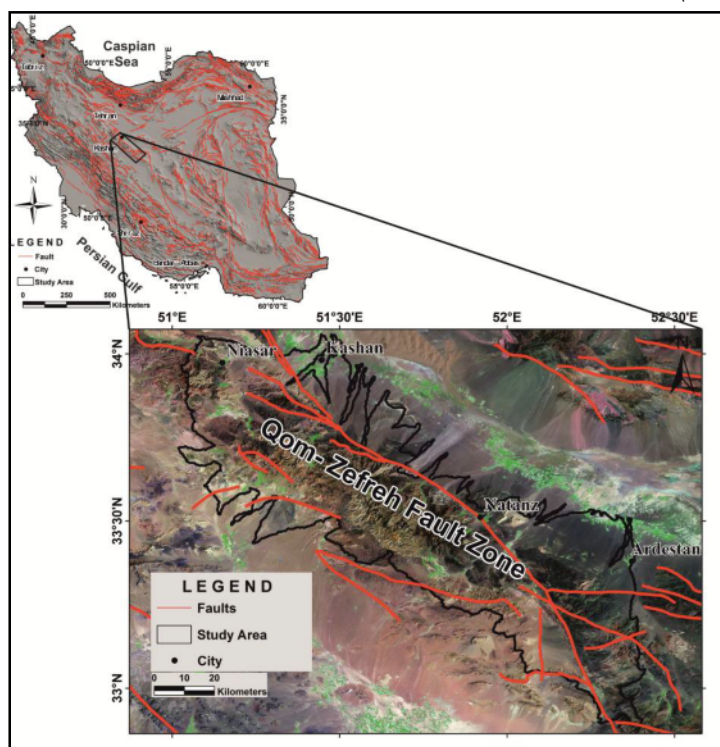
⁴ Ford and Pedley, 1996

⁵ Hancock et al., 1999

⁶ Mesci et al., 2008

⁷ Keller and Pinter, 2002

شدن اقیانوس تیس جوان فعال شده است (نوگل سادات، ۱۳۶۴). بنابراین زمین‌ساخت پهنه کاشان مرتبط با گسلش راستالغز راستگرد مزبور و چین‌های در حال رشد که در عمق با گسلش معکوس همراه است، در نظر گرفته می‌شود (جمالی و همکاران، ۲۰۰۸).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه در پهنه گسلی قم- زفره بر روی تصویر Mersid

این گسل که از حوالی قم تا منطقه زفره امتداد یافته، فرونشست کاشان- اردستان را در شمال باختری از کوه‌های کرکس به‌عنوان بخشی از کوه‌های آتشفشانی ارومیه- دختر در جنوب خاوری جدا نموده است. جابه‌جایی امتدادلغز گسل قم- زفره، دگرشکلی در نهشته‌های سنوزوئیک را در این بخش از ایران مرکزی کنترل می‌کند.^۲ ناجی (۱۹۷۲) اولین کسی بود که به فعالیت‌های جوان گسل قم- زفره در جنوب فین اشاره کرد. بر اساس اظهارات وی در راستای گسل قم- زفره در جنوب فین نهشته‌های کواترنر توسط گسلی با شیب حدود 80° به سمت جنوب باختر بریده شده‌اند. بسته شدن اقیانوس نتوتیس در سمت جنوب باختری از ژوراسیک پسین، پهنه سنندج - سیرجان را متأثر می‌سازد (محل و همکاران، ۲۰۰۳) و نهشته‌های موجود در آن را با راستای چیره شمال خاوری - جنوب باختری دستخوش فشردگی می‌کند. پهنه گسلی قم- زفره، از آن زمان در پهنه سنندج - سیرجان فعال بوده و در طول زمین‌ساخت برخوردی، دگرشکلی مداوم پیشرونده در ورای پهنه سنندج - سیرجان به پهنه آتشفشانی ارومیه - دختر نیز منتقل می‌شود. (محل و پروهان، ۲۰۰۳) بر اساس روند و سازوکار، گسل قم- زفره را با طولی حدود ۲۲۰ کیلومتر به سه قطعه شمال شمال باختری، میانی و جنوب خاوری تقسیم کرده‌اند. تحلیل هندسه ساختارهای مرتبط با گسل قم- زفره و جنبش آن‌ها، نشانگر حرکت چیره راستالغز راستگرد با مؤلفه معکوس در پاره‌هایی از گسل قم- زفره است. در راستای این گسل چشمه‌های متعدد تراورتن ساز فعال و نیز واحدهای تراورتن متعددی وجود دارد که در نواحی کششی ناشی از حرکت

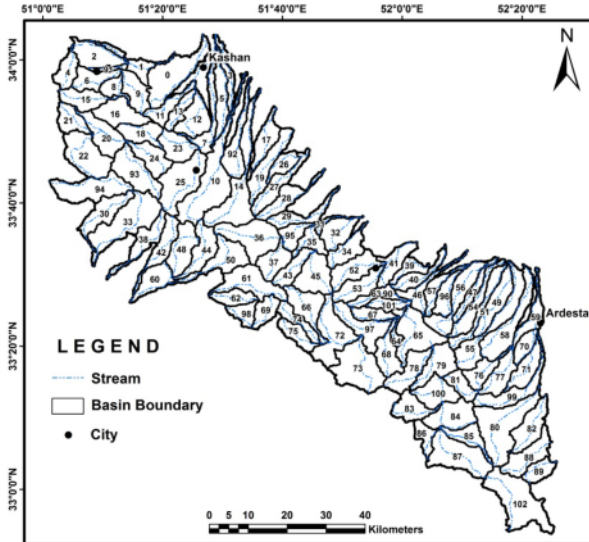
¹ Jamali et al., 2008

² Nadji, 1972

³ Mohajjel et al., 2003

⁴ Mohajjel and porouhan., 2003

قطعات این زون گسلی به وجود آمده‌اند. این واحدهای رسوبی جوان خود تحت تأثیر تکتونیک فعال دچار گسلس و شکستگی گردیده‌اند.



شکل ۲: نقشه حوضه‌های زهکشی منطقه مورد مطالعه

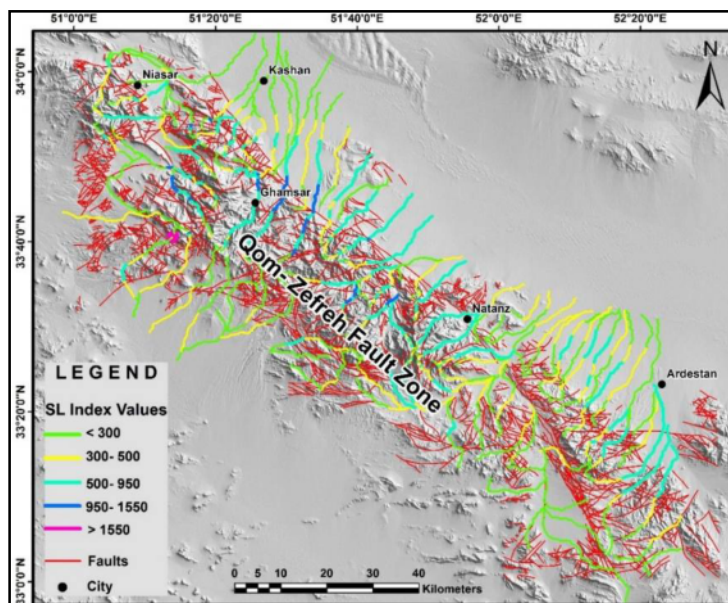
مواد و روش‌ها

شاخص گرادیان طولی رودخانه

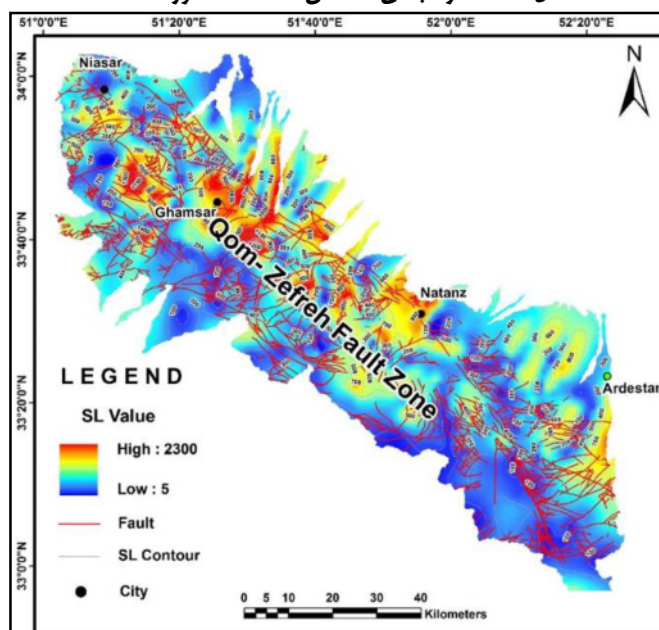
شاخص گرادیان طولی رود (SL) برای یک محدوده و مسیر مشخص شبکه زهکشی بر اساس رابطه زیر محاسبه و مشخص می‌شود (هک، ۱۹۷۳، ۱۹۵۷، و ۱۹۸۲):

$$SL = (\Delta H / \Delta L_r) L_{sc}$$

در رابطه فوق (SL)، شاخص گرادیان طولی رود ($\Delta H / \Delta L_r$) شیب کانال یا گرادیان مسیر مشخص شده می‌باشد و L_{sc} طول کل کانال از نقطه مشخص شده و جایی که شاخص شروع به ارزیابی شده تا مرتفع‌ترین نقطه کانال می‌باشد. در این مطالعه، به منظور محاسبه شاخص (SL) برای هر کدام از آبراهه‌های موجود در ۱۰۳ زیر حوضه گستره مورد مطالعه، مقادیر L_{sc} و ($\Delta H / \Delta L_r$) اندازه‌گیری گردیده‌اند. سپس بر اساس میزان شاخص (SL) به هر قطعه آبراهه یک رنگ مشخص اختصاص یافته است، به گونه‌ای که مقادیر کوچک‌تر از ۳۰۰ رنگ سبز، ۳۰۰-۵۰۰ رنگ زرد، ۵۰۰-۹۵۰ رنگ آبی روشن، ۹۵۰-۱۵۵۰ رنگ آبی تیره، ۱۵۵۰-۳۰۰۰ رنگ بنفش و مقادیر بزرگ‌تر از ۳۰۰۰ رنگ قرمز دارند (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۷). در نهایت، لایه آبراهه‌ها با مقادیر معین شاخص (SL)، بر روی مدل ارتفاع رقمی قرار داده شده و نقشه شاخص (SL) گستره مورد مطالعه تهیه گردیده است (شکل ۳ و ۴).



شکل ۳: نقشه رده‌بندی شاخص SL منطقه مورد مطالعه



شکل ۴: نقشه آنومالی‌های شاخص SL در گستره مورد مطالعه

با توجه به نقشه تهیه شده بیشترین مقادیر SL به ترتیب در حوضه‌های (۱۴، ۹۳، ۱۰، ۵۲، ۲۵، ۲۸، ۵۳، ۳۷ و ۱۵) اندازه‌گیری شده که این حوضه‌ها بر روی قسمت‌های شمال غربی و جنوب شرقی پهنه گسلی قم- زفره در منطقه مورد مطالعه واقع می‌باشند (شکل ۳ و ۴). از نظر خصوصیات سنگ‌شناسی این حوضه‌ها دارای لیتولوژی پادگانه‌ها و مخروط افکنه‌های جوان، شیل، آهک، توف، ماسه‌سنگ، دولومیت، کنگلومرا و تراورتن هستند.

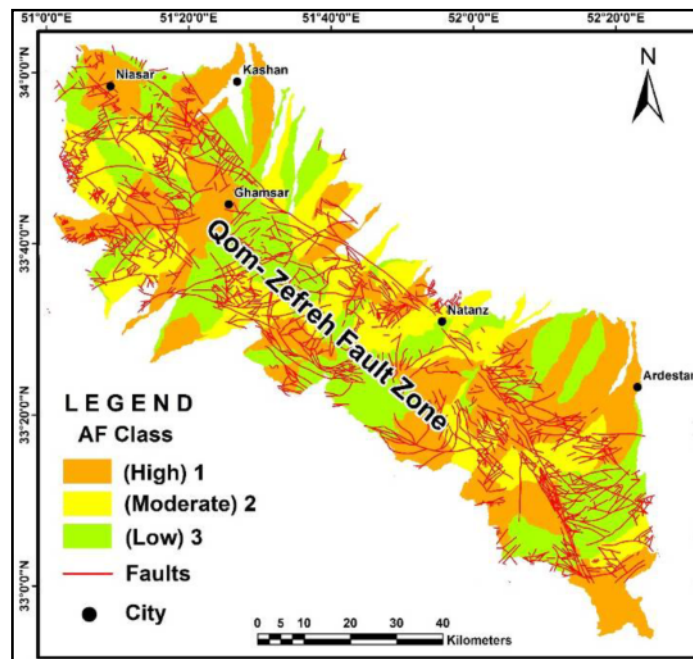
شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی

شکل هندسی شبکه‌های زهکشی را می‌توان از نظر کیفی و کمی با روش‌های مختلفی تفسیر کرد. روش محاسبه برای این شاخص در مقیاس یک حوضه‌ی زهکشی برای دستیابی به ارتباط این کج‌شدگی با فعالیت‌های زمین‌ساختی استفاده

می‌شود، شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (هیر و گاردنر، ۱۹۸۵، کِلر و پینتر، ۲۰۰۲، آل، ۲۰۰۷):

$$Af = 100 (A_r/A_t)$$

در رابطه بالا، (A_r) مساحت سمت راست حوضه نسبت به رود اصلی (در جهت پایین‌رود) و (A_t) مساحت کل حوضه زهکشی می‌باشد. اگر نتیجه‌ی محاسبه شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی نزدیک به ۵۰ باشد حاکی از آن است که حوضه دارای یک شرایط ثابت و بدون کج شدگی و یا با کج شدگی اندک است. اگر مقدار این شاخص بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از ۵۰ باشد در این صورت حوضه کج شده است و می‌شود استنباط کرد که حوضه تحت تأثیر فعالیت تکتونیکی قرار دارد و یا اینکه تحت تأثیر خصوصیات و ویژگی‌های سنگ‌شناسی منطقه است. پس از محاسبه این شاخص برای تمامی حوضه‌ها، نتایج این مقادیر در سه کلاس ۱، ۲ و ۳ طبقه‌بندی شدند. کلاس ۱ با بازه‌ی $Af \geq 65$ یا $Af < 35$ نشان‌دهنده‌ی مقادیر بالای کج شدگی حوضه، کلاس ۲ با بازه‌ی $35 \leq Af < 43$ یا $43 \leq Af < 57$ نشان‌دهنده‌ی مقادیر پایین کج شدگی حوضه هستند. (شکل ۵، جدول ۱). بیشترین مقادیر این شاخص در حوضه‌های ۲، ۵۹، ۷۹، ۹۱، ۶۰، ۶۱ و ۳۴ اندازه‌گیری شده است. که این حوضه‌های با مقادیر بالای کج شدگی در سرتاسر پهنه گسلی قم- زفره توزیع شده‌اند.



شکل ۵: نقشه عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)

شکل حوضه زهکشی

نسبت شکل حوضه زهکشی (B_s) از رابطه زیر محاسبه می‌شود (کنن، ۱۹۷۶، رامیرز و هررا، ۱۹۹۸):

$$B_s = B_l/B_w$$

در رابطه فوق، (B_l) طول حوضه که همان طول مسیر آبراهه اصلی از نقطه خروج تا دورترین قله روی خط تقسیم آب می‌باشد و (B_w) عرض حوضه است که در عریض‌ترین بخش آن، عمود بر طول حوضه اندازه‌گیری می‌شود. در نواحی

¹ Hare and Gardner, 1985

² Keller and Pinter, 2002

³ Bull, 2007

⁴ Cannon, 1976

⁵ Ramirez-Herrera, 1998

فعال از نظر زمین‌ساختی، حوضه‌های زهکشی موجود تمایل به کشیدگی از خود نشان می‌دهند و با مقادیر زیاد (Bs) همراهند، درحالی‌که در مناطقی با فعالیت زمین‌ساختی کمتر، حوضه‌های زهکشی به‌سوی دایره‌واری پیش می‌روند و مقادیر (Bs) پایینی ارائه می‌دهند (بال و مک فادن، ۱۹۷۷). در این مطالعه با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی منطقه و رودخانه اصلی هر حوضه، شاخص ژئومورفیکی فوق، در هرکدام از حوضه‌ها به تفکیک اندازه‌گیری شده و درنهایت به سه رده زمین‌ساختی ۱، ۲، و ۳ تقسیم شده است. در این رده‌بندی، $Bs \geq 4$ رده ۱، $3 < Bs \leq 3$ رده ۲ و $Bs < 3$ رده ۳ فعالیت زمین‌ساختی را به دست می‌دهند. شاخص (Bs) در ۱۰۳ حوضه در منطقه مورد مطالعه محاسبه گردیده است (جدول ۱). بیشترین مقادیر این شاخص در حوضه‌های ۳، ۵۱، ۴۷، ۵، ۹۹، ۳۱، ۵۴، ۹۱، ۵۹ و ۷ اندازه‌گیری شده‌اند. این حوضه‌های با مقدار کشیدگی بالا بر روی فرادیواره پهنه گسلی قم زفره قرار دارند. بازه مقادیر این شاخص از ۶ در حوضه ۷ تا ۱۰٫۹ در حوضه ۳ متغیر است.

نسبت عرض کف دره به ارتفاع دره

این شاخص یکی از شاخص‌های مورفومتری است که بالآآمدگی تکتونیکی بر روی آن تأثیر می‌گذارد و نسبت به این عامل حساس است. این شاخص از نسبت عرض کف دره به ارتفاع دره به‌صورت زیر مشخص می‌شود:

$$Vf = V_{fw} / [(Ald-Asc) + (Ard-Asc) / 2]$$

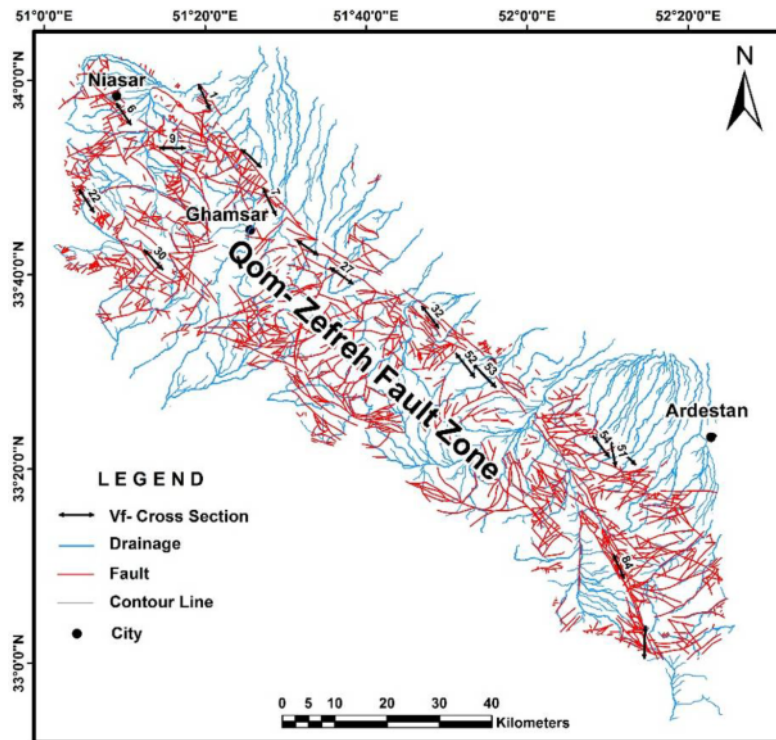
در رابطه فوق (Vf) نسبت عرض به ارتفاع دره، (V_{fw}) پهنای دره، (Ald)، (Asc)، (Ard)، به ترتیب، ارتفاع خط تقسیم آب در قسمت راست و چپ دره و کف بستر دره می‌باشند (بال، ۲۰۰۷). به‌طورمعمول مقادیر بالای شاخص Vf با نرخ‌های پایین بالآآمدگی تکتونیکی همخوانی دارد (کلر و پینتر، ۲۰۰۲). پس از محاسبه شاخص Vf در گستره مطالعاتی، این شاخص در ۳ کلاس رده‌بندی می‌شود، این ۳ کلاس عبارت‌اند از: کلاس ۱ ($Vf \leq 0.5$)، این رده از شاخص Vf نشان‌دهنده دره‌های V شکل است، کلاس ۲ ($0.5 < Vf < 1.0$)، این رده از Vf بیانگر یک حالت حد واسط از شکل دره بین رده‌های ۱ و ۳ است و درنهایت کلاس ۳ ($Vf \geq 1$) که نشان‌دهنده دره‌های U شکل است (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۷). محدوده شاخص Vf از ۰٫۱ (در حوضه ۵۱) تا ۱۳ (در حوضه ۱۲) متغیر است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری این شاخص نشان‌دهنده آن است که تقریباً بیشتر دره‌های اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه V شکل هستند (شکل ۶ و جدول ۱).

¹ Bull and McFadden, 1977

² Bull, 2007

³ Keller and Pinter, 2002

⁴ El Hamdouni et al., 2007



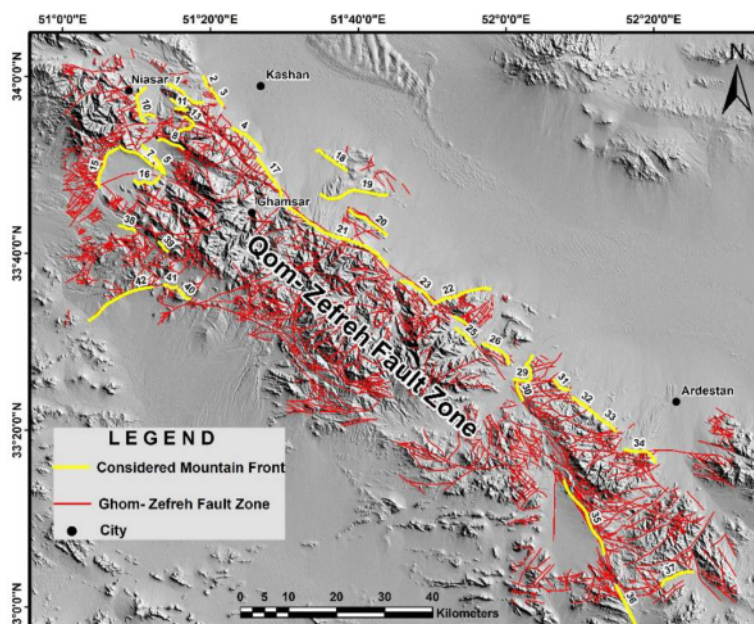
شکل ۶: موقعیت مقاطع شاخص Vf در پهنه گسلی قم- زفره

شاخص سینوسی پیشانی کوهستان

شاخص سینوسی پیشانی کوهستان از رابطه زیر به دست می‌آید (بال، ۲۰۰۷):

$$J = L_j / L_s$$

در رابطه فوق، (J) شاخص سینوسی پیشانی کوهستان، (L_j) طول پیشانی کوهستان در امتداد کوهپایه و در محل شکست مشخص شیب و (L_s) طول خط مستقیم پیشانی کوهستان را نشان می‌دهند. شاخص سینوسی پیشانی کوهستان، شاخصی است که بیانگر تعادل بین نیروهای فرسایش دهنده که تمایل به بریدن و ایجاد شکل‌های خلیجی شکل از یک طرف و از طرف دیگر نیروهای زمین‌ساختی که تمایل به ایجاد یک پیشانی کوهستانی مستقیم را دارند، نشان می‌دهد. در این مطالعه با استفاده از تصاویر SRTM و مدل ارتفاعی رقومی منطقه، شاخص ژئومورفیکی فوق، برای ۴۲ پیشانی کوهستان موجود در منطقه مورد مطالعه محاسبه گردیده است (شکل ۷، جدول ۱) و در نهایت به سه رده زمین‌ساختی ۱، ۲، و ۳ تقسیم شده است. در این رده‌بندی، $J < 1.10$ رده ۱، $1.10 > J \geq 1.50$ رده ۲ و $J \geq 1.50$ رده ۳ فعالیت زمین‌ساختی را به دست می‌دهند. طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی پیشانی‌های کوهستان در منطقه مورد مطالعه (جدول ۱) ۴۰ عدد پیشانی‌های اندازه‌گیری شده میزان فعالیت تکتونیک بالابالا با رده ۱ را نشان می‌دهند و ۲ پیشانی هم‌رده ۲ فعالیت تکتونیک را نشان می‌دهند. این پیشانی‌های کوهستان در سراسر پهنه گسلی قم- زفره مشاهده شده و مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند.



شکل ۷: پیشانی‌های کوهستان اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه برای برآورد شاخص J.

انتگرال و منحنی هیپسومتری

انتگرال هیپسومتری، توزیع سطوح ارتفاعی در یک منطقه و حوضه آبریز را نشان می‌دهد. یکی از روش‌های ساده برای توصیف شکل منحنی هیپسومتری یک حوضه، محاسبه انتگرال هیپسومتریک آن است. معادله‌ای که برای محاسبه انتگرال هیپسومتری استفاده می‌شود به صورت زیر است (میر، ۱۹۹۰، کالر و پینتر، ۲۰۰۲، بال، ۲۰۰۷):

$$Hi = (\text{Average elevation} - \text{min elevation} / \text{max elevation} - \text{min elevation})$$

بعد از محاسبه شاخص Hi برای تمامی حوضه‌های زهکشی این شاخص در ۳ کلاس رده‌بندی شده است (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۷): کلاس ۱ ($Hi \geq 0.5$)، کلاس ۲ ($0.4 \leq Hi < 0.5$) و کلاس ۳ ($Hi < 0.4$). برای تشکیل منحنی هیپسومتری یک حوضه زهکشی، ارتفاع کل حوضه را در برابر مساحت کل حوضه ترسیم می‌کنیم. به دلیل اینکه در منحنی هیپسومتریک، مساحت و ارتفاع حوضه بر مساحت و ارتفاع کل حوضه تقسیم می‌شود، اعداد به صورت بی‌بعد هستند، بنابراین منحنی‌های هیپسومتریک، مستقل از مساحت و ارتفاع می‌باشند، بنابراین می‌توان این نوع منحنی‌ها را در حوضه‌هایی که از نظر اندازه، ارتفاع و مساحت باهم تفاوت دارند با یکدیگر مقایسه کرد. بنابراین منحنی‌های هیپسومتریک که در ارزیابی پستی و بلندی‌ها بسیار مهم هستند به عنوان یک روش کارآمد برای تشخیص مناطق فعال و غیرفعال زمین‌ساختی اهمیت ویژه‌ای دارند. انتگرال هیپسومتری در ۱۰۳ حوضه مورد مطالعه اندازه‌گیری شده است (جدول ۱). کمترین و بیشترین مقدار انتگرال هیپسومتریک مربوط به حوضه‌های ۰ و ۸۲ است که به ترتیب مربوط قطعه شمال غربی و قطعه جنوب شرقی پهنه گسلی قم-زفره است.

شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat)

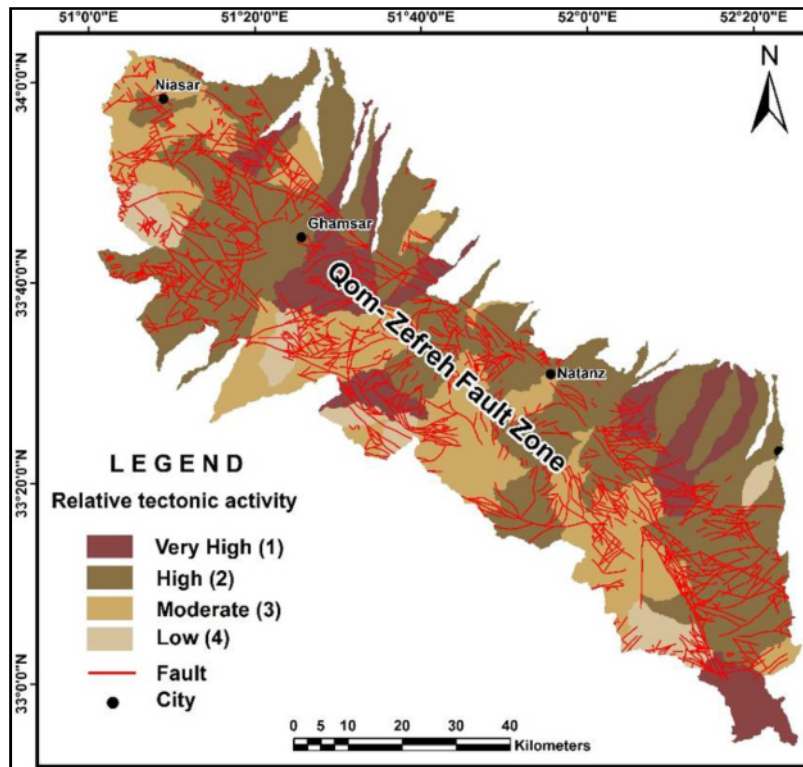
¹ Mayer, 1990

² Keller and Pinter, 2002

³ Bull, 2007

⁴ El Hamdouni et al., 2007

در این مطالعه، شاخص‌های گرادیان طولی رود، عدم تقارن حوضه زهکشی، انتگرال هیپسومتریک، نسبت شکل حوضه زهکشی، نسبت عرض بستر دره به ارتفاع دره و شاخص سینوسی پیشانی کوهستان به تفکیک در هر کدام از ۱۰۳ حوضه محاسبه شده و همان‌طور که به این شاخص‌ها در بالا اشاره شد، نتایج به دست آمده از همه شاخص‌ها در شاخص زمین ساخت فعال نسبی به ۳ رده زمین ساختی تقسیم گردیده‌اند. آنگاه در هر حوضه به‌طور مجزا میانگین مقادیر رده شاخص‌های ژئومورفیکی (S/n) اندازه‌گیری شده و سپس به ۴ رده که در حقیقت همان رده‌های شاخص زمین ساخت فعال (Iat) گستره مورد مطالعه می‌باشند، طبقه‌بندی شده است (جدول ۱). رده ۱ سطح فعالیت زمین ساختی، شامل مقادیر $1.5 > S/n > 1$ بوده و نشانگر فعالیت نسبی خیلی زیاد می‌باشد. رده ۲ بیانگر فعالیت زمین ساختی نسبی زیاد با مقادیر $2 > S/n > 1.5$ ، رده ۳ نشان‌دهنده فعالیت زمین ساختی نسبی متوسط با مقادیر $2.5 > S/n > 2$ و رده ۴ با مقادیر $S/n > 2.5$ فعالیت زمین ساختی نسبی کم را ارائه می‌نماید (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۷). در نهایت، نقشه توزیع سطح فعالیت زمین ساخت نسبی، برای منطقه مورد مطالعه ترسیم شده و گستره مورد مطالعه به چهار بخش خیلی فعال، فعال، فعالیت متوسط و فعالیت کم تقسیم گردیده است (شکل ۸).



شکل ۸: نقشه توزیع سطح فعالیت تکتونیکی نسبی (Iat) در منطقه مورد مطالعه

مقادیر خیلی بالا و بالای Iat در قطعه‌های شمال غربی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه بر روی پهنه گسلی قم-زفره قرار دارند. از بین این حوضه‌ها ۱۱ حوضه رده ۱ (فعالیت خیلی زیاد)، ۵۴ حوضه رده ۲ (فعالیت زیاد)، ۳۲ حوضه رده ۳ (فعالیت متوسط) و ۶ حوضه رده ۴ (فعالیت کم) را از لحاظ زمین ساخت در پهنه مورد مطالعه نشان می‌دهند.

جدول ۱: مقادیر و رده فعالیت تکتونیکی شاخص‌های مورفوتکتونیکی در ۱۰۳ حوضه زهکشی در منطقه مورد مطالعه

شماره حوضه	مساحت (Km ²)	شاخص SL	شاخص Af	شاخص Bs	شاخص Vf	شاخص J	شاخص Hi	مقادیر Iat	شاخص Iat
0	117/76	1	1	2	-	1	3	1/6	2
1	41/89	2	3	1	2	1	3	2/00	2
2	66/25	2	1	3	-	-	3	2/25	3
3	33/49	3	1	1	-	-	3	2/00	2
4	41/10	2	3	3	-	-	2	2/5	3
5	55/74	2	1	1	-	1	3	1/6	2
6	46/94	1	1	3	1	1	3	1/66	2
7	54/38	1	3	1	2	1	3	1/83	2
8	27/68	3	1	3	-	1	3	2/2	3
9	52/85	1	3	3	2	1	3	2/16	3
10	159/69	1	3	1	-	1	1	1/4	1
11	41/04	1	1	2	-	-	3	1/4	1
12	64/78	1	3	3	3	1	3	2/33	3
13	32/12	1	3	1	-	1	3	1/8	2
14	134/33	1	3	1	1	1	1	1/33	1
15	54/12	1	3	3	-	-	2	2/25	3
16	67/99	1	2	3	-	1	3	2/00	2
17	51/78	2	3	2	-	1	2	2/00	2
18	50/91	1	2	3	-	1	3	2/00	2
19	68/93	1	2	1	-	1	3	1/6	2
20	68/58	2	3	3	-	1	3	2/4	3
21	44/17	2	2	3	-	2	3	2/4	3
22	99/58	3	2	3	3	2	3	2/66	4
23	55/93	1	1	3	-	-	2	1/75	2
24	57/26	1	3	3	-	-	1	2/00	2
25	115/29	1	1	3	-	-	2	1/75	2
26	32/34	3	1	3	-	1	3	2/2	3
27	57/25	1	2	1	2	1	3	1/66	2
28	52/35	1	1	1	-	1	2	1/2	1
29	47/07	1	2	1	-	-	3	1/75	2
30	67/96	1	3	2	2	1	3	2/00	2
31	10/47	3	3	1	-	1	3	2/2	3
32	55/94	1	2	3	1	1	3	1/83	2
33	138/32	1	2	3	-	1	3	2/00	2
34	50/15	1	1	2	-	1	3	1/8	2
35	35/43	1	1	3	-	-	3	2/00	2
36	105/93	1	3	3	-	-	2	2/25	3
37	51/80	1	2	3	-	-	1	1/75	2
38	58/03	2	1	1	-	1	3	1/6	2

39	28/35	2	3	1	-	1	2	1/8	2
40	40/10	2	2	1	-	1	3	1/8	2
41	50/59	2	2	3	-	1	2	2/00	2
42	57/56	2	3	1	-	-	3	2/4	3
43	43/82	1	3	2	-	-	1	1/75	2
44	65/75	2	2	3	-	-	2	2/25	3
45	77/40	1	2	3	-	-	3	2/25	3
46	42/39	2	2	2	-	1	2	1/8	2
47	33/38	2	3	1	-	1	3	2/00	2
48	70/89	3	3	3	-	-	3	3/00	4
49	65/73	2	3	1	-	1	3	2/00	2
50	78/42	2	2	3	-	-	3	2/5	3
51	48/71	1	1	1	1	1	3	1/33	1
52	67/52	1	2	3	2	1	3	2/00	2
53	58/78	1	3	2	3	1	3	2/16	3
54	54/68	2	1	1	1	1	3	1/5	1
55	102/34	1	1	1	1	1	3	1/33	1
56	83/23	1	3	1	-	1	3	1/8	2
57	34/80	2	1	1	-	-	2	1/5	1
58	96/24	2	1	1	-	1	3	1/6	2
59	43/18	3	1	1	-	-	2	1/75	2
60	53/79	3	1	3	-	-	2	2/25	3
61	90/88	2	1	2	-	-	1	1/5	1
62	36/98	3	3	2	-	-	3	2/75	4
63	33/90	1	2	1	-	-	3	1/75	2
64	17/33	2	3	2	-	-	3	2/5	3
65	97/96	2	1	3	-	1	3	2/00	2
66	69/30	1	3	3	-	-	3	2/5	3
67	31/72	2	1	2	-	-	3	2/00	2
68	56/18	2	2	3	-	-	2	2/25	3
69	37/73	2	3	3	-	-	3	2/75	4
70	31/24	3	1	3	-	1	3	2/75	4
71	53/83	2	1	2	-	1	3	1/8	2
72	105/21	1	3	3	-	-	3	2/5	3
73	121/85	1	1	3	-	-	2	1/75	2
74	36/21	2	3	1	-	-	3	2/25	3
75	39/30	2	3	2	-	-	3	2/5	3
76	43/74	1	2	3	-	-	2	2/00	2
77	55/78	1	2	3	-	1	3	2/00	2
78	65/20	2	2	2	-	-	3	2/25	3
79	66/88	3	1	3	-	-	3	2/5	3
80	149/63	1	3	3	-	-	1	2/00	2

81	35/87	1	2	3	-	-	2	2/00	2
82	70/83	1	3	2	-	-	1	1/75	2
83	52/42	3	1	3	-	-	2	2/25	3
84	75/68	3	1	3	3	1	3	2/33	3
85	42/89	3	1	2	-	1	3	2/00	2
86	30/64	3	1	3	-	-	3	2/5	3
87	114/04	3	3	3	-	-	3	3/00	4
88	69/62	2	2	2	-	-	1	1/75	2
89	35/01	3	1	3	-	1	3	2/2	3
90	33/90	1	2	1	-	-	3	1/75	2
91	11/28	3	1	1	-	1	3	2/25	3
92	64/60	2	2	1	-	-	2	1/75	2
93	88/75	1	1	3	-	-	2	1/75	2
94	101/02	2	1	1	-	1	3	1/6	2
95	35/65	1	2	3	-	-	2	2/00	2
96	40/38	2	1	1	-	1	2	1/4	1
97	74/46	1	1	2	-	-	3	1/75	2
98	31/71	3	1	3	-	-	3	2/5	3
99	69/20	1	3	1	-	-	3	2/00	2
100	63/00	3	2	3	-	1	3	2/4	3
101	26/77	2	1	2	-	1	3	1/8	2
102	144/91	1	1	3	1	1	2	1/5	1

مزیت استفاده از نهشته‌های تراورتنی در بررسی تکتونیک جوان

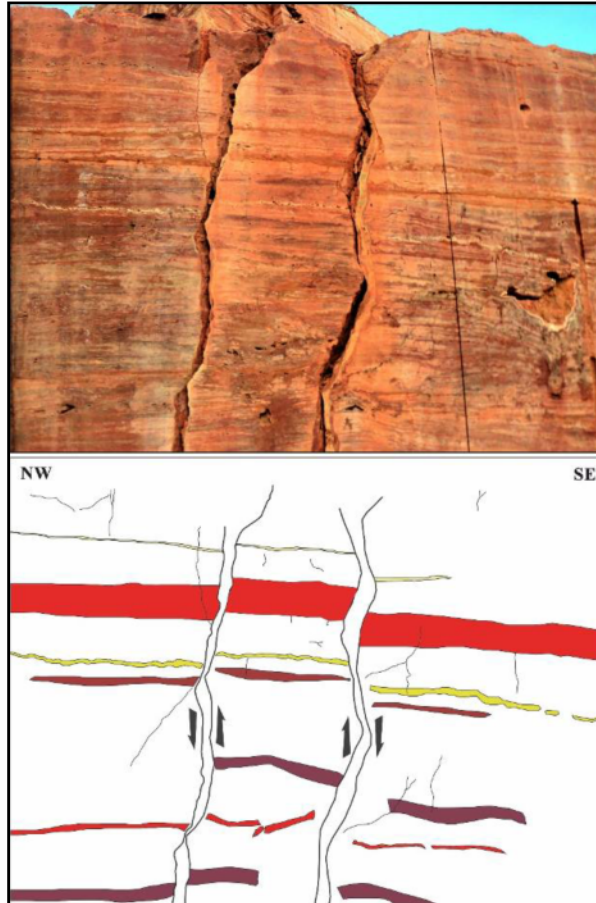
از آنجایی که تراورتن‌ها از نوع نهشته‌های قاره‌ای محسوب می‌شوند و گسترش جانبی محدودی دارند به راحتی توسط عوامل فرسایشی حذف شده و از بین می‌روند. بنابراین این پتانسیل کم ماندگاری آن‌ها در سطح این مزیت را دارد که ما می‌توانیم مطمئن شویم که در مکانی که تراورتن‌ها حفظ شده‌اند، نشان‌دهنده تکتونیک جوان و فعال آن منطقه است. در بازدیدهای صحرائی صورت گرفته از منطقه مورد مطالعه چشمه‌های تراورتنی فعال مشاهده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۹).



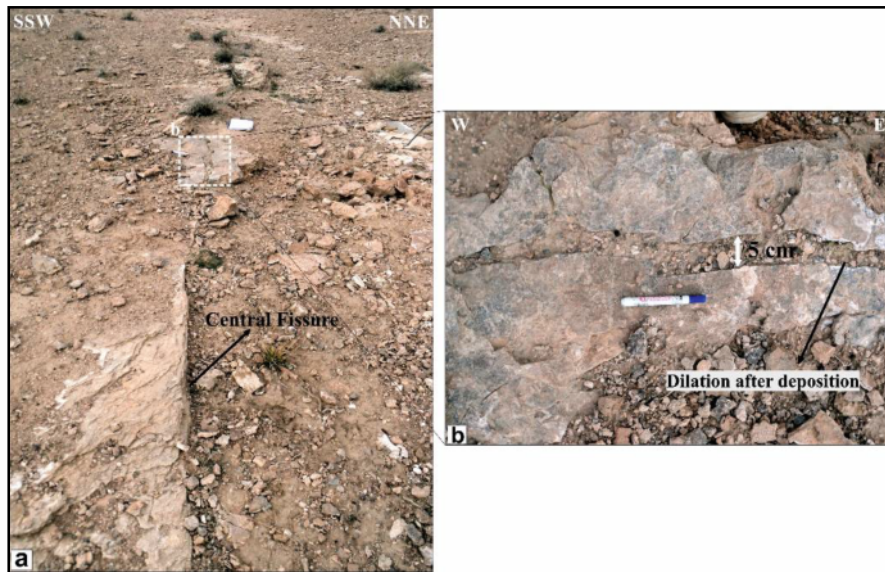
شکل ۹: چشمه تراورتنی فعال در پهنه گسلی قم- زفره در منطقه مورد مطالعه

ارتباط بین پشته‌های تراورتن با تکتونیک کششی فعال

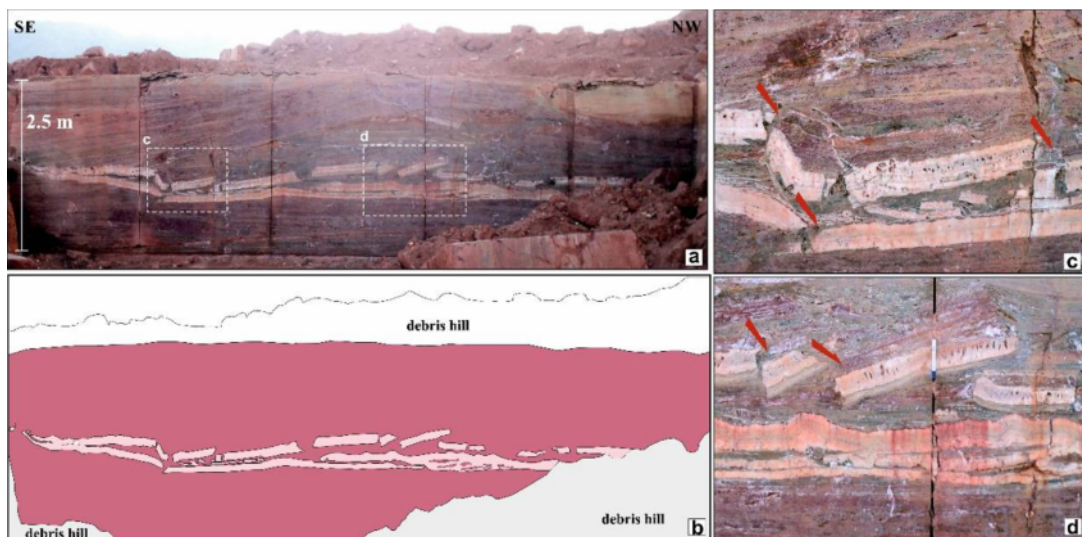
لایه‌های تراورتنی در منطقه مورد مطالعه به وسیله شکستگی‌های عمودی و نیمه عمودی قطع شده‌اند (شکل ۱۰).



شکل ۱۰: جابجایی و برش لایه‌های تراورتن به وسیله شکستگی‌ها و گسل‌های عمودی در پهنه گسلی قم-زفره در بعضی موارد این شکستگی‌ها توسط تراورتن‌های تازه تشکیل یافته پر شده‌اند (شکل ۱۱). در نتیجه شکستگی‌ها و تراورتن‌های برشی موجود در شکستگی‌ها توسط تراورتن‌های جدید سیمانی شده‌اند. لایه‌های تحکیم یافته تراورتن توسط رژیم کششی جدید در منطقه و بلوک‌هایی که از هم جدا شده یا چرخش یافته‌اند و همچنین برش‌های در امتداد شکستگی‌های توسعه یافته که به وسیله تراورتن‌های جدید سیمانی شده‌اند، تحت تأثیر قرار گرفته و شکسته شده‌اند (شکل ۱۲). که گسل‌های نرمال در این نهشته‌ها یک رخداد کششی همراه بعد از تشکیل پشته‌های تراورتن را نشان می‌دهد.



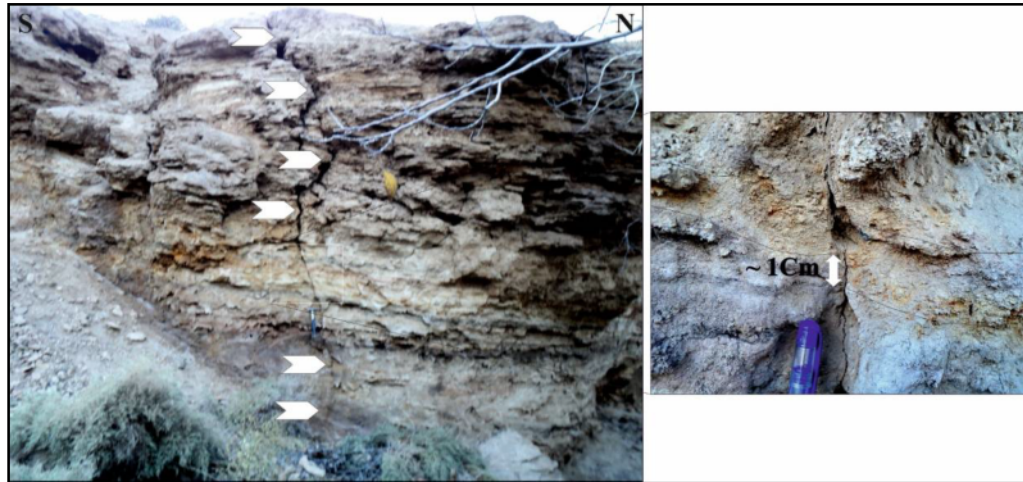
شکل ۱۱: نمایی از شکاف مرکزی تراورتن و بازشدگی آن و تغییر حجم شکاف بعد از رسوب‌گذاری مجدد



شکل ۱۲: نمایی از دیواره معدن تراورتن و مدل شماتیک آن به همراه گسل‌های نرمال و چرخش بلوک‌ها در آن

بحث و نتیجه‌گیری

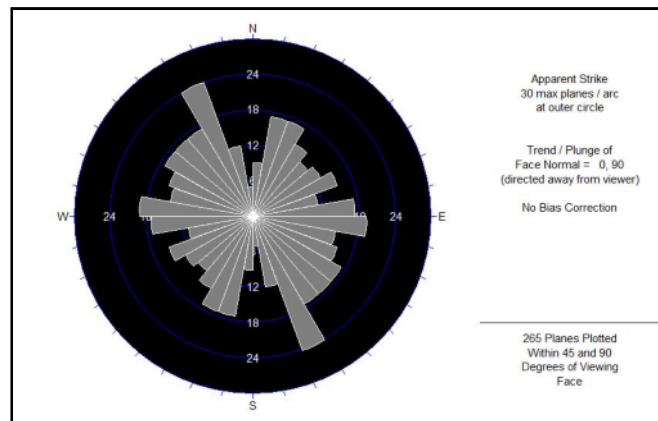
در این مطالعه شواهدی محکم دال بر فعالیت زمین‌ساختی جوان در پهنه گسلی قم زفره در نظر گرفته شده است که به‌طور کلی شامل مقادیر بالای شاخص‌های مورفومتری اندازه‌گیری شده، شواهد ژئومورفولوژیکی صحرایی و شواهد ساختاری نظیر گسل‌ها و شکستگی‌های برداشت‌شده از واحدهای تراورتن می‌باشد (شکل ۱۳) و (شکل ۱۴). نمودار گل‌سرخ‌ی مربوط به این گسل‌ها و شکستگی‌ها در منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۵) امتداد غالب شمال غرب- جنوب شرق را نشان می‌دهد که با جهت اصلی پهنه گسلی قم- زفره مطابقت داشته و بیانگر تأثیر آن پهنه در ایجاد شکستگی‌های مزبور در واحدهای جوان و در نتیجه فعالیت جدید آن می‌باشد.



شکل ۱۳: نمایی از گسل مشاهده شده در واحدهای تراورتن در منطقه مورد مطالعه

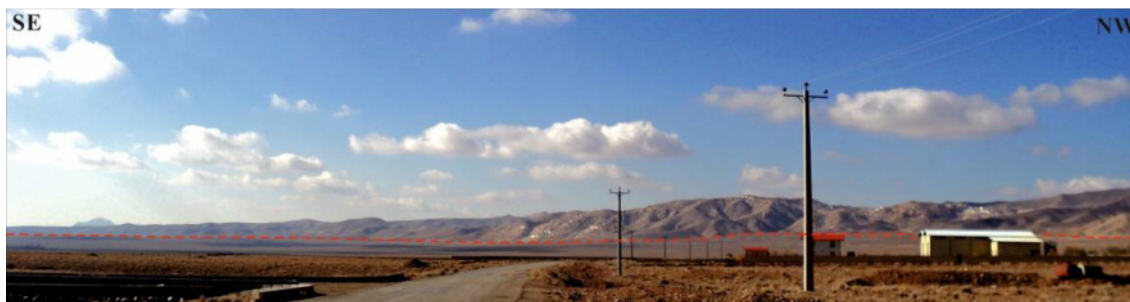


شکل ۱۴: شکستگی‌های متعدد در واحدهای تراورتن در پهنه گسلی قم- زفره



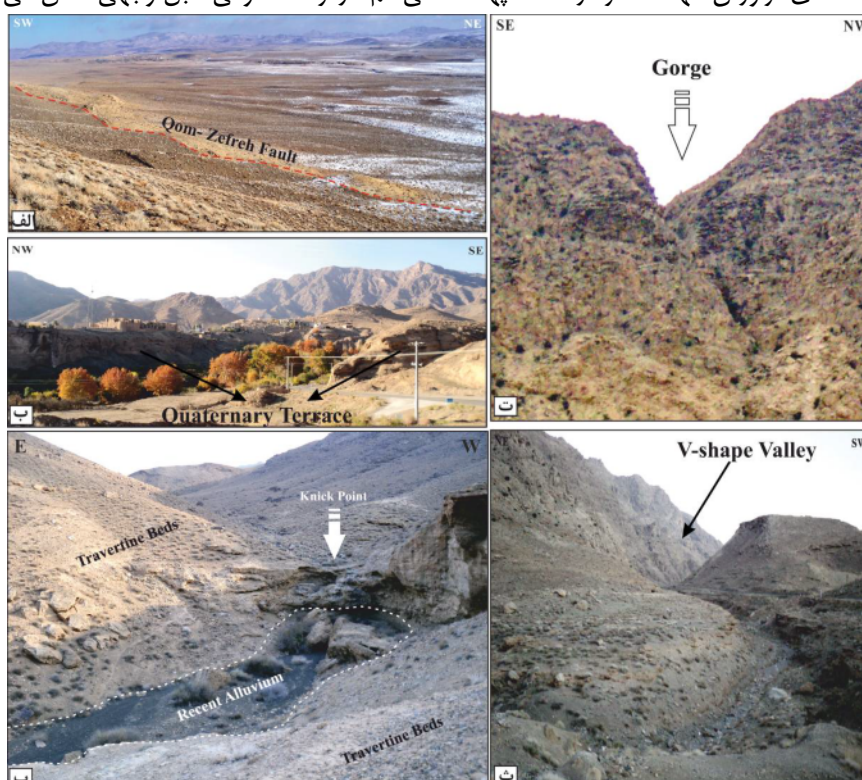
شکل ۱۵: نمودار گل سرخی امتداد گسل‌ها و شکستگی‌های برداشت شده در واحدهای تراورتن در گستره مطالعاتی

ارزیابی مقادیر شاخص کج شدگی (Af) در حوضه‌های گستره و مقایسه آن با شواهد صحرایی، حاکی از این است که مقادیر زیاد این شاخص هماهنگی خوبی با عناصر ساختاری شناخته شده منطقه ارائه می‌دهند. نتایج حاصل از محاسبه شاخص BS نشان می‌دهد که کشیده‌ترین حوضه‌ها در قسمت‌های شمال غربی و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه در پهنه گسلی قم- زفره قرار دارند. مقادیر بالای انتگرال هیپسومتری (Hi) در قسمت‌های شمال غربی و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه قرار دارند که منطبق با این قطعه از شاخه‌های پهنه گسلی قم- زفره است. مقادیر شاخص J در گستره مطالعاتی نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی بسیار زیاد و زیاد در گستره مطالعاتی است که نشان‌دهنده پیشانی‌های صاف و مستقیم است و بیانگر گسلش فعال در قسمت‌های شرقی و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۱۶).



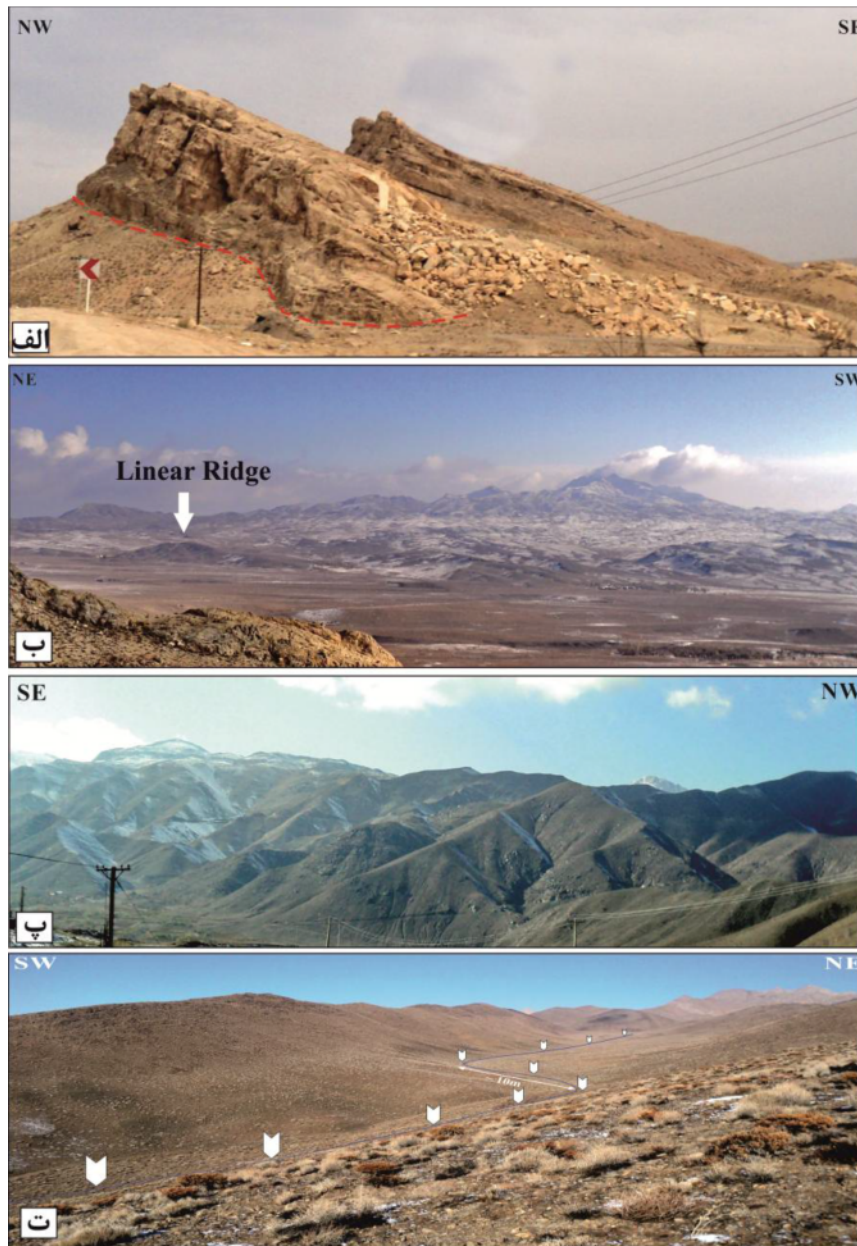
شکل ۱۶: پیشانی‌های مستقیم کوهستان در پهنه گسلی قم- زفره

بر اساس مطالعات صحرایی شاخص Iat بالا در قسمت‌های جنوب شرقی و شمال غربی منطقه مورد مطالعه با پیشانی‌های کوهستان مستقیم (شکل‌های ۱۶ و ۱۷- الف)، فراز یافتگی تراس‌های کواترنری (شکل ۱۷- ب)، ایجاد رودشکن‌های گسلی در مسیر رودخانه‌ها (شکل ۱۷- پ)، دره‌های تنگ (Gorge) (شکل ۱۷- ت)، دره‌های V شکل در نهشته‌های تراورتنی (شکل ۱۷- ث)، راندگی واحدهای قدیمی بر روی واحدهای جوان تر (شکل ۱۸- الف)، پشته‌های خطی ایجاد شده در راستای پهنه گسلی قم- زفره (شکل ۱۸- ب)، تشکیل سطوح مثلی در منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۸- پ)، انحراف سیستم آبراهه‌ای در اثر گسلش (شکل ۱۸- ت)، شکستگی و گسلش در نهشته‌های تراورتنی (شکل ۱۳ و ۱۴) و برش عمیق رود در واحدهای تراورتن عهد حاضر در امتداد پهنه گسلی قم- زفره همخوانی قابل توجهی نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- لندفرهای مورفوتکنیکی فعال در منطقه مورد مطالعه. الف) نمایی از گسل قم- زفره و پیشانی کوهستانی آن در قسمت جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه، ب) تراس‌های کواترنری مرتفع در گستره مطالعاتی، پ) نمونه‌ای از رودشکن‌ها در پهنه گسلی قم- زفره با ارتفاع بیش از ۱۰ متر در واحدهای تراورتن، ت) تشکیل Gorge در منطقه مورد مطالعه در اثر بالآمدگی و گسلش، ث) برش عمیق رود در واحدهای تراورتن عهد حاضر و ایجاد دره

نتایج مقادیر حاصل از اندازه‌گیری شاخص Vf در منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده دره‌های عمیق و V شکل است که بیانگر فعالیت تکتونیکی بالایی منطقه با نرخ بالآمدگی زیاد است که باعث بریده شدن و عمیق شدن این دره‌ها شده است (شکل ۱۷- ث). قرارگیری بیشترین مقادیر SL بر روی قطعات پهنه گسلی قم- زفره نشانگر فعالیت تکتونیکی جوان در طول آن‌ها است.



شکل ۱۸- شواهد لندفرهای مورفوتکتونیک فعال منطقه قم- زفره. الف) رانده شدن واحدهای الیگو میوسن بر روی کواترنر در پهنه گسلی قم- زفره، ب) نمونه‌ای از پشته‌های خطی در امتداد پهنه گسلی در منطقه مورد مطالعه، پ) سطوح مثلثی ایجادشده در اثر فعالیت گسل قم- زفره، ت) نمونه‌ای از انحراف مسیر آبراهه ناشی از تأثیر فعالیت عهد حاضر گسل قم- زفره بر منطقه مورد مطالعه

مقادیر زمین ساخت فعال نسبی (Iat) نشانگر سطح فعالیت تکتونیک خیلی بالا و بالا در قسمت‌های شمال غرب، مرکز و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه بر روی پهنه گسلی قم- زفره قرار است. نتایج حاصل از این شاخص بیانگر آن است که قطعات جنوب شرقی، مرکزی و شمال غرب پهنه گسلی قم- زفره اغلب سطح فعالیت تکتونیک بالا و خیلی بالا نشان می‌دهند و بیشتر قسمت‌های جنوب غرب و مرزهای غربی گستره مطالعاتی در این پهنه گسلیده فعالیت تکتونیک متوسط و پایین نشان می‌دهند (شکل ۸). از سوی دیگر مقادیر پایین شاخص Iat (رده ۴) عمدتاً در بخش‌های جنوب غربی و مرکزی منطقه مورد مطالعه قرار دارند. همچنین تجزیه و تحلیل شکستگی‌های برداشت شده در واحدهای تراورتن در منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده آن است که میانگین امتداد این شکستگی‌ها با جهت اصلی زون گسلی قم- زفره

همخوانی داشته و یک روند مشابه را نشان می‌دهند که این شواهد بیانگر ارتباط این شکستگی‌ها با پهنه گسلی قم-زفره و بنابراین فعالیت عهد حاضر این پهنه گسلی است.

منابع

- آقاباتی، علی، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶ ص.
- نوگل سادات. ۱۳۶۴. منطقه‌های برشی و خمیدگی ساختاری در ایران، دستاوردهای تحلیل ساختاری ناحیه قم، گزارش شماره ۵۵ سازمان زمین‌شناسی کشور.
- محجل، محمد، پروهان، ندا، ۱۳۸۴. هندسه و سینماتیک سامانه گسل قم-زفره و اهمیت آن در زمین‌ساخت ترافشاری، فصلنامه علوم زمین، سال دوازدهم، شماره ۵۶، ص ۷۲-۸۳.
- مؤمنی طارمسری، محمد، ده بزرگی، مریم، یساقی، علی، نوزعیم، رضا، ۱۳۹۴. ارزیابی تکتونیک فعال از یک کوه در شمال طیس، ایران مرکزی، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۴، شماره ۳، ص ۶۹-۵۰.
- Altunel, E., & Hancock, P. L., 1996, *Structural attributes of travertine-filled extensional fissures in the Pamukkale Plateau, Western Turkey. International Geology Review*, 38(8), 768-777.
- Bull, W.B., McFadden, L.D., 1977, *Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California*, In: Doehring, D.O. (Ed.), *Geomorphology in Arid Regions, Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton*, pp. 115-138.
- Bull, W.B., 2007, *Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology*, Blackwell, Malden.
- ÇAKIR, Z., 1999, *Along-strike discontinuity of active normal faults and its influence on Quaternary travertine deposition; examples from western Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences*, 8(1), 67-80.
- Cannon, P.J., 1976, *Generation of explicit parameters for a quantitative geomorphic study of Mill Creek drainage basin, Oklahoma Geology Notes* 36 (1), 3-16.
- Chafetz, H. S., & Folk, R. L., 1984, *Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents. Journal of Sedimentary Research*, 54(1).
- Dehbozorgi, M., Pourkermani, M., Arian, M., Matkan, A. A., Motamedi, H., & Hosseiniasl, A., 2010, *Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran, Geomorphology*, 121(3), 329-341.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., Keller, E.A., 2007, *Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain), Geomorphology* 96, 150-173.
- Ford, T. D., & Pedley, H. M., 1996, *A review of tufa and travertine deposits of the world. Earth-Science Reviews*, 41(3), 117-175.
- Hack, J.T., 1957, *Studies of longitudinal stream-profiles in Virginia and Maryland: U.S. Geological Survey Professional Paper 294B*, 45-97.
- Hack, J.T., 1973, *Stream-profiles analysis and stream-gradient index, Journal of Research of the U.S. Geological Survey* 1, 421-429.
- Hack, J.T., 1982, *Physiographic division and differential uplift in the piedmont and Blue Ridge. U.S. Geological Survey Professional Paper 1265*, 1-49.
- Hancock, P. L., Chalmers, R. M. L., Altunel, E., & Cakir, Z., 1999, *Travitonics: using travertines in active fault studies. Journal of Structural Geology*, 21(8), 903-916.
- Hare, P.W., Gardner, T.W., 1985, *Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: Morisawa, M., Hack, J.T. (Eds.), Tectonic Geomorphology, Proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium, Allen and Unwin, Boston*, pp. 123-134.
- Jamali, F., Hessami Azar, Kh., Qoreshi, M., 2008, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 68, 182, GSI, Iran.

- Keller, E.A., 1986, *Investigation of active tectonics: use of surficial Earth processes*. In: Wallace, R.E. (Ed.), *Active tectonics Studies in Geophysics*, National Academy Press, Washington DC, pp. 136–147.
- Keller, E.A., Pinter, N., 1996, *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*, Prentice Hall, New Jersey.
- Keller, E.A., Pinter, N., 2002, *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape (2ndEd.)*, Prentice Hall, New Jersey.
- Mayer, L., 1990, *Introduction to Quantitative Geomorphology*, Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ.
- Mesci, B. L., GÜRSOY, H., & Tatar, O., 2008, *The evolution of travertine masses in the Sivas area (central Turkey) and their relationships to active tectonics*. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(2), 219-240.
- Mohajjel, M., Fergusson, C. L., M.R., Sahandi., 2003, *Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran*, *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397-412.
- Mohajjel, M., Porouhan, N., 2003, *Geometry and Kinematics of the Qom-Zefreh Fault System and its Significance in Transpression Tectonics*, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 56, 72, GSI, Iran.
- Molin, P., Pazzaglia, F.J., Dramis, F., 2004, *Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming fore arc, sila massif, Calabria, southern Italy*, *American Journal of Science* 304, 559–589.
- Nadji, M., 1972, *Geologie and hydrogeology de gebietes von Kashan/Iran*, *Geologische Mitteilung* 11, 275-362.
- Ramirez-Herrera, M.T., 1998, *Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt*, *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 317–332.
- Strahler, A.N., 1952, *Hypsometric (area–altitude) analysis of erosional topography*, *Geological Society of America Bulletin* 63, 1117–1142.