

ارزیابی تکتونیک فعال ازبک کوه در شمال طبس، ایران مرکزی

محمد مؤمنی طارمسری - دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه خوارزمی
مریم ده‌بزرگی* - استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی
علی یساقی - دانشیار دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس تهران
رضا نوزعیم - استادیار دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۲۱ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۱۱/۱۰

چکیده

منطقه ازبک‌کوه در ایران مرکزی در پهنه گسلی کلمرد قرار دارد. گسل کلمرد یکی از گسل‌های مهم بنیادی ایران مرکزی به شمار می‌رود که در کوتاه‌تری نیز فعال می‌باشد. کوه‌های ازبک‌کوه در قسمت‌های شرقی تحت تأثیر پهنه گسلی کلمرد قرار گرفته‌اند. همان‌طور که ذکر شد گسل کلمرد در شرق ایران به‌عنوان یک گسل کوتاه‌تری در نظر گرفته می‌شود و آخرین حرکات این گسل را به عهد حاضر نسبت داده‌اند، بنابراین برآورد شاخص‌های مورفومتری به‌منظور شناسایی تأثیر تکتونیک فعال آن بر تکامل تکتونیکی حوضه‌های زهکشی ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این مطالعه به تجزیه و تحلیل ۶ شاخص مورفوتکتونیکی مهم نظیر گرادیان طولی رودخانه، عدم تقارن حوضه زهکشی، انتگرال هیپسومتریک، شکل حوضه زهکشی، نسبت عرض کف به ارتفاع دره و پیشانی کوهستان پرداخته شده است. برای تشکیل حوضه‌ها بر روی منطقه مورد مطالعه از نرم‌افزار Arc Hydro (از افزونه‌های نرم‌افزار Arc GIS) بر پایه داده‌های حاصل از مدل رقومی ارتفاعی استفاده شده است، سپس ۶ شاخص مورفوتکتونیکی بر روی هر یک از حوضه‌ها مورد محاسبه و رده‌بندی قرار گرفته است. در نهایت، شاخص تکتونیک فعال (Iat) محاسبه گردیده که بر اساس آن ازبک‌کوه به ۴ رده فعالیت تکتونیکی بسیار بالا، بالا، متوسط و پایین رده‌بندی گردیده است. بر اساس شاخص IAT کمتر از ۵ درصد از محدوده مورد مطالعه، فعالیت تکتونیکی بسیار بالا نشان می‌دهند، ۲۷ درصد از منطقه مورد مطالعه فعالیت تکتونیکی بالا، ۵۰ درصد فعالیت تکتونیکی متوسط و حدود ۲۰ درصد هم فعالیت تکتونیکی پایین را نشان می‌دهند. در گستره مطالعاتی بیشترین سطح فعالیت تکتونیکی در بخش شرقی ازبک‌کوه مرتبط با فعالیت گسل کلمرد در نظر گرفته شده است. در بخش غربی نیز سطح فعالیت تکتونیکی بالا تا متوسط بوده که نشانگر عملکرد پهنه گسلی غرب ازبک‌کوه می‌باشد.

واژگان کلیدی: تکتونیک فعال، شاخص‌های مورفومتری، گسل کلمرد، ازبک‌کوه، ایران مرکزی

مقدمه

منطقه ایران مرکزی شامل یک محدوده گسترده از فلات ایران است که در زون برخوردی بین ورقه‌های عربستان و اوراسیا محصور شده است (۱ آلن و همکاران، ۲۰۰۴) و مهم‌ترین ویژگی آن وجود گسل‌های فعال مهم نظیر درونه، کلمرد و نایبند می‌باشد. چندین مطالعه بر روی این گسل‌ها در قسمت‌های شرقی فلات ایران مرکزی انجام شده است (۲ بربریان و یاتس، ۱۹۹۹، ۳ بربریان و همکاران، ۲۰۰۱، ۴ واکر و جکسون، ۲۰۰۴، ۵ باکمانوف و همکاران، ۲۰۰۴). این دگرریختی فعال در فلات ایران که مربوط به برخورد قاره‌ای بین صفحات عربستان و اوراسیا است (۶ آلن و همکاران، ۲۰۰۶، واکر و جکسون، ۲۰۰۴) باعث کوتاه شدگی در ایران مرکزی در جهت شمالی-جنوبی و با نرخ تقریباً ۲ میلی‌متر بر سال شده است (۷ ورنانت و همکاران، ۲۰۰۴). کوه‌های ازبک‌کوه نیز با روند شمال-شمال شرق، جنوب-جنوب غرب در شمال بلوک طیس، در ورقه ایران مرکزی قرار دارند (شکل ۱-الف). راه‌های دسترسی به این منطقه از شهر عشق‌آباد به سمت روستاهای گوش‌کمر، معدن قلعه و غیره می‌باشد (شکل ۱-ب). این منطقه در بخشی از زون تکتونیکی کاشمر-کرمان واقع در غرب پهنه گسلی کلمرد (KMF) قرار گرفته است (۸ رضانی و تاکر، ۲۰۰۳) این گسل به‌عنوان یک گسل فعال در کواترنری در شرق ایران شناخته می‌شود و آخرین حرکات آن را به عهد حاضر نسبت می‌دهند (۹ بربریان و مهاجر اشجعی، ۱۹۷۷). شاخه‌های مربوط به این گسل در منطقه ازبک‌کوه بر روی تصویر ماهواره‌ای لندست نمایش داده شده است (شکل ۱-ب). برای بررسی تأثیر فعالیت اخیر گسل کلمرد و سایر شاخه‌های این پهنه گسلی، از تجزیه و تحلیل حوضه‌های زهکشی واقع بر منطقه ازبک‌کوه به وسیله شاخص‌های مورفومتری استفاده گردیده است. ویژگی‌های مورفوتکتونیکی حوضه‌های زهکشی در بیشتر نقاط جهان به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۱۰ آلتین و آلتین، ۲۰۱۱، ۱۱ ردی و همکاران، ۲۰۰۴). بنابراین این شاخص‌ها می‌توانند به‌عنوان یک ابزار سودمند در برآوردهای تکتونیک فعال شناخته به کار گرفته شوند (۱۲ کالر و پینتر، ۲۰۰۲، ۱۳ سیلوا و همکاران، ۲۰۰۳، ۱۴ مولین و همکاران، ۲۰۰۴). همچنین مقایسه بین چندین شاخص مورفوتکتونیکی با نرم‌افزارهایی مانند Arc GIS می‌تواند یک روش عددی دقیق را در تعیین فعالیت تکتونیکی منطقه فراهم کند (۱۵ کالر پینتر، ۱۹۹۶). بنابراین برای برآورد تکتونیک فعال گستره مطالعاتی با استفاده از افزونه Arc Hydro در محیط نرم‌افزار Arc GIS حوضه‌های زهکشی و رودخانه‌های اصلی هر حوضه استخراج شده‌اند (شکل ۲) و به بررسی ۶ شاخص مهم تکتونیکی پرداخته شده است که عبارت‌اند از: شاخص گرادیان طولی رودخانه، عدم تقارن حوضه زهکشی، انتگرال هیپسومتریک، نسبت شکل حوضه زهکشی، نسبت عرض کف دره به ارتفاع دره و شاخص پیچ‌وخم پیشانی کوهستان.

¹ Allen et al., 2004

² Berberian and Yeats, 1999

³ Berberian et al., 2001

⁴ Walker and Jackson, 2004

⁵ Bachmanov et al., 2004

⁶ Allen et al., 2006

⁷ Vernant et al., 2004

⁸ Ramezani and Tucker, 2003

⁹ Berberian and Mohajer-Ashjai, 1977

¹⁰ Altin and Altin, 2011

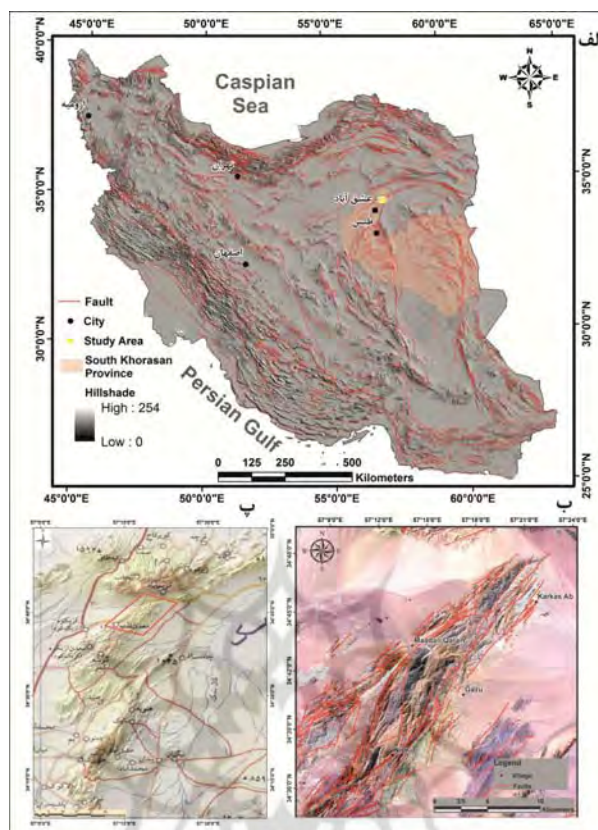
¹¹ Reddy et al., 2004

¹² Keller and Pinter, 2002

¹³ Silva et al., 2003

¹⁴ Molin et al., 2004

¹⁵ Keller and Pinter, 1996



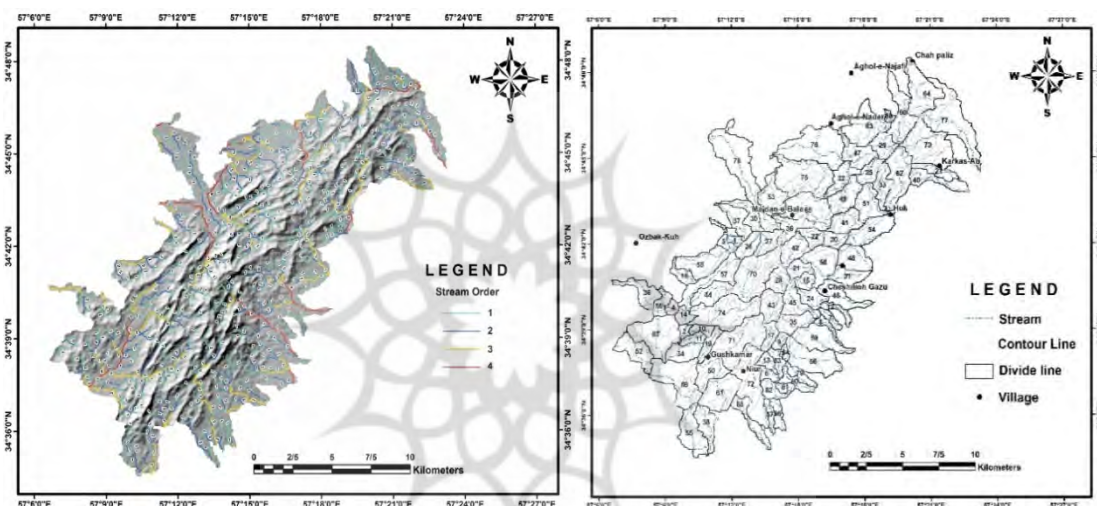
شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه، الف) نقشه سایه‌روشن ایران و محدوده مطالعاتی در آن که با کادر زرد رنگ مشخص شده است
 ب) نقشه گسل‌های گسترده مورد مطالعه بر روی تصویر ماهواره‌ای Landsat 8 سنجنده OLI، پ) نقشه راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه
 بر روی مدل ارتفاعی رقومی سایه‌روشن آن

علاوه بر این به منظور تعیین دقت همه شاخص‌ها و مشاهده لندفرم‌های تکتونیکی مرتبط با گسل و چین و همچنین تکمیل کردن نتایج این مطالعه، عملیات صحرائی انجام شد و داده‌های حاصل از آن با تجزیه و تحلیل‌های مورفوتکتونیکی مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

به منظور تعیین تکتونیک فعال در مقیاس حوضه زهکشی با استفاده از شاخص‌های مورفومتری بر روی ازبک کوه، در ابتدا حوضه‌های زهکشی با به‌کارگیری افزونه Arc Hydro در نرم‌افزار Arc GIS 10.1 استخراج و سپس اقدام به ساخت شبکه رودخانه‌های اصلی در منطقه مورد مطالعه شده و در نهایت، بر روی حوضه‌های تشکیل شده شاخص‌های مورفومتری اندازه‌گیری شده است. برای ایجاد شبکه زهکشی ابتدا حفره‌های موجود در مدل رقومی ارتفاعی خام را پر می‌کنیم، در واقع این گودی یا چاهک‌ها، سلول‌هایی بدون مسیر زهکش تعریف شده هستند و هیچ کدام از سلول‌های اطراف پایین‌تر از آن قرار ندارند، نتیجه این کار یک خروجی رستری با چاهک‌های پر شده است. در مرحله بعد جهت جریان زهکش‌ها محاسبه شده و یک خروجی رستری از هر سلول نسبت به پرشیب‌ترین سلول مجاورش در جهت پایین شیب ایجاد گردیده است. نگاه تجمع جریان در نقاط مختلف مدل رقومی ارتفاعی محاسبه شده و یک خروجی رستری از جریان تجمع یافته برای هر سلول به دست آمده است. سپس این فایل رستری تجمع جریان تغییر اندازه یافته است، این تغییر اندازه با محاسبه لگاریتم بر مبنای ۱۰ برای همه سلول‌ها در یک نقشه رستری محاسبه می‌شود. در این محاسبه از لایه رستری

تجمع جریان به‌عنوان داده ورودی استفاده می‌شود. در ادامه، یک شبکه جریان ایجاد و سپس رده جریان تعیین گردیده تا مشخص شود هر کدام از زهکش‌ها در چه رده‌ای قرار دارند. با این کار یک رده عددی برای هر قطعه از شاخه‌های شبکه خطی به دست آمد. برای انجام این کار دو نوع رده‌بندی STRAHLER و SHREVE وجود دارد که در این مطالعه از روش STRAHLER استفاده شده است. در این روش رده جریان فقط وقتی افزایش می‌یابد که جریان‌های دیگر با رده مشابه آن را قطع کنند. بنابراین اتصال یک جریان رده اول با یک جریان رده دوم به‌جای اینکه یک اتصال رده سوم ایجاد کند یک جریان رده دوم باقی خواهد ماند. در نهایت، به‌منظور استخراج شبکه رودخانه‌ای، فایل رستری به شبکه خطی تبدیل شده است (شکل ۳). در نتیجه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.1 تعریف و تشکیل گردید (شکل ۳) و شاخص‌های مورفومتری در آن‌ها با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی و نقشه‌های توپوگرافی به‌دست‌آمده از آن اندازه‌گیری گردیده‌اند.



سمت چپ شکل ۲: رده‌بندی آبراهه‌های استخراج‌شده از مدل ارتفاعی رقومی در کوه‌های ازبک‌کوه،

سمت راست شکل ۳: حوضه‌های زهکشی ایجادشده در منطقه مورد مطالعه

در مرحله بعد، به‌منظور تعیین واحدهای زمین‌شناسی و گسل‌های اصلی منطقه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ازبک‌کوه سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده گردیده و در ادامه برای مشخص نمودن فعالیت عناصر ساختاری منطقه در واحدهای کواترنری نظیر مخروط افکنه‌ها تصویر ماهواره‌ای IRS P5 سازمان جغرافیایی ارتش به کار گرفته شده است و سپس با انجام مطالعات صحرایی گسترده در تمام بخش‌های منطقه مورد مطالعه صحت داده‌های فوق مورد تأیید واقع گردیده است. در نهایت، ارتباط بین داده‌های کمی مورفومتری اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار، ساختارهای به‌دست‌آمده از مطالعات صحرایی و خطواره‌های تعیین‌شده توسط تصاویر ماهواره‌ای در منطقه (شکل ۱-ب)، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و از تلفیق آن‌ها در منطقه شاخص زمین‌ریختی نهایی (Iat) تهیه شده و زمین‌ساخت فعال نسبی در سرتاسر گستره مورد مطالعه تعیین گردیده است.

۳- شاخص‌های مورفوتکتونیکی

۳-۱- شاخص گرادیان طولی رودخانه

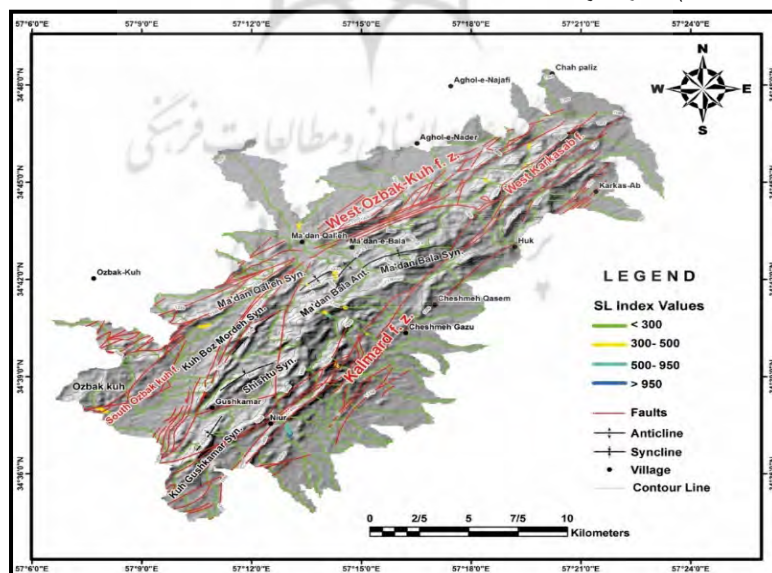
شاخص گرادیان طولی رود (SL) یکی از شاخص‌های مورفومتری است که ارتباط بین فرسایش و جریان رودخانه را مشخص می‌کند، این شاخص همچنین با قدرت رود نیز ارتباط دارد^۱ (هک، ۱۹۷۳ و ۱۹۸۲). به دلیل حساسیت شاخص

^۱ Hack, 1973, 1982

SL به تغییرات شیب بستر کانال رودخانه این شاخص می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر و مناسب برای برآورد آشفستگی جریان رودخانه مورد استفاده قرار گیرد (ترویانی، ۲۰۰۸). معادله‌ی شاخص SL به‌وسیله‌ی فرمول زیر محاسبه می‌شود (هک، ۱۹۵۷ و ۱۹۷۳ و ۱۹۸۲، بال، ۲۰۰۷):

$$SL = (\Delta H / \Delta L_T) L_{SC}$$

در رابطه‌ی بالا SL شاخص گرادیان طولی رودخانه، $(\Delta H / \Delta L_T)$ گرادیان مسیر کانال رودخانه و L_{SC} طول کلی کانال رودخانه از نقطه‌ی شروع شاخص تا مرتفع‌ترین نقطه‌ی کانال می‌باشد. علاوه بر مواردی که در بالا برای کاربرد شاخص SL گفته شد، این شاخص همچنین می‌تواند برای برآورد فعالیت تکتونیکی نسبی به کار گرفته شود (اکلر و پینتر، ۲۰۰۲). برای محاسبه‌ی این شاخص از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر در امتداد هر مسیر جریان و برای تمامی حوضه‌ها در نرم‌افزار Arc GIS 10.1 استفاده شده است در نهایت میانگین مقادیر این شاخص برای هر زیر حوضه نیز محاسبه شده است. رده‌بندی مقادیر این شاخص در (جدول ۱) نشان داده شده است. در اینجا، به‌منظور محاسبه شاخص (SL) برای هر کدام از آبراهه‌های موجود در ۸۷ زیر حوضه گستره مورد مطالعه، لایه توپوگرافی تهیه شده از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر به لایه آبراهه‌ها در محیط Arc GIS 10.1 افزوده شده و مقادیر L_{SC} و $(\Delta H / \Delta L_T)$ اندازه‌گیری گردیده‌اند. آنگاه، بر اساس میزان شاخص (SL) به هر قطعه آبراهه که شامل فاصله بین نقطه میانی دو خط تراز مجاور با ارتفاع معین (مکانی که اندازه‌گیری شاخص از آنجا شروع شده است) تا مرتفع‌ترین نقطه کانال می‌باشد، یک‌رنگ مشخص اختصاص یافته است، به‌طوری که مقادیر SL کوچک‌تر از ۳۰۰ رنگ سبز، ۳۰۰-۵۰۰ رنگ زرد، ۵۰۰-۹۵۰ رنگ آبی روشن، ۹۵۰-۱۵۵۰ رنگ آبی تیره دارند (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۷) در پایان، لایه آبراهه‌ها با مقادیر معین شاخص (SL)، بر روی مدل ارتفاع رقومی قرار داده شد و نقشه شاخص گرادیان طولی رودخانه در گستره مورد مطالعه تهیه گردید (شکل ۴ و جدول ۱). با توجه به نقشه تهیه شده بیشترین مقادیر SL در حوضه‌های (۷۲، ۲۸، ۲۷، ۲۱، ۳۶، ۳۵، ۳۶، ۳۶، ۵۲، ۵۷، ۴۷) اندازه‌گیری شده است.



شکل ۴: نقشه شاخص (SL) بر روی مدل ارتفاعی رقومی گستره مورد مطالعه

¹ Troiani, 2008

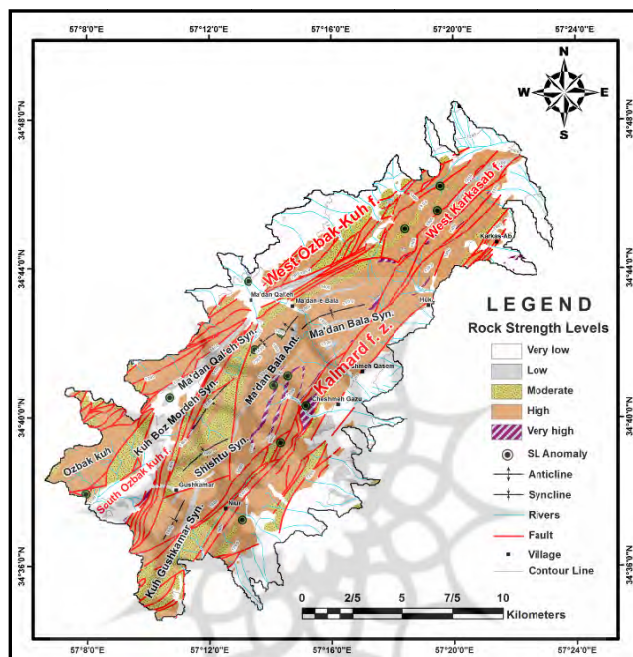
² Hack, 1957, 1973, 1982

³ Bull, 2007

⁴ Keller and Pinter, 2002

⁵ El Hamdouni et al., 2007

در نهایت، نقشه توزیع مقادیر آنومالی شاخص (SL) بر روی سنگ‌های با مقاومت مختلف، با ثبت مقادیر آنومالی بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برگرفته از (روتنر و همکاران، ۱۹۷۰) رقومی شده در این بخش از ایران مرکزی ترسیم گردیده است (شکل ۵). با در نظرگیری جنس سنگ دره‌های رودخانه‌ای مذکور، مقادیر زیاد آنومالی شاخص (SL) فوق می‌توانند به‌عنوان علائم زمین‌ساختی تفسیر شوند. با توجه به داده‌های موجود و نقشه زمین‌شناسی، مقادیر بالای آنومالی شاخص (SL) با قطعات پهنه گسلی کلمرد در سرتاسر منطقه مورد مطالعه همخوانی نشان می‌دهند (شکل ۵).



شکل ۵: نقشه توزیع مقادیر آنومالی شاخص SL بر روی سنگ‌های با مقاومت مختلف

۳-۲- عدم تقارن حوضه زهکشی

شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی برای ارزیابی و بررسی کج شدگی حوضه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل هندسی شبکه‌های زهکشی را می‌توان از نظر کیفی و کمی با روش‌های مختلفی تفسیر کرد. روش محاسبه برای این شاخص در مقیاس یک حوضه زهکشی برای دستیابی به ارتباط این کج شدگی با فعالیت‌های زمین‌ساختی استفاده می‌شود، شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (هیر و گاردنر، ۱۹۸۵، کلر و پینتر، ۲۰۰۲، بال، 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

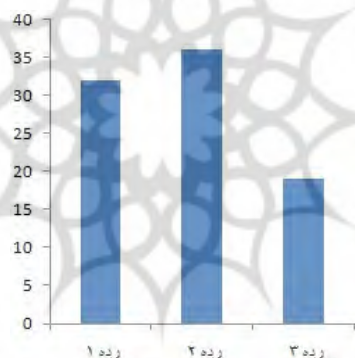
¹ Ruttner et al., 1970

² Hare and Gardner, 1985

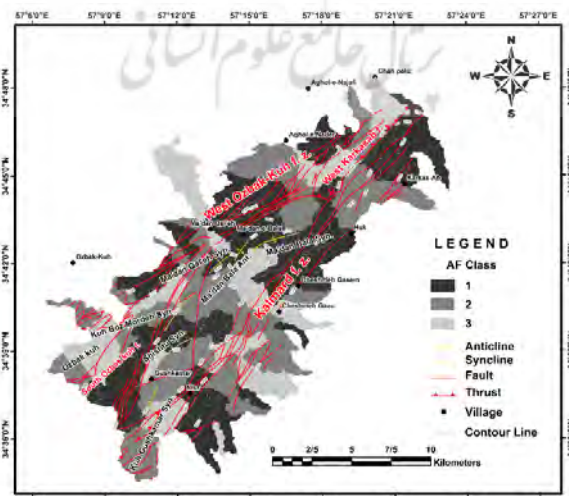
³ Keller and Pinter, 2002

⁴ Bull, 2007

قرار دارد و یا اینکه تحت تأثیر خصوصیات و ویژگی‌های سنگ‌شناسی منطقه است. به‌طور کلی برای شبکه زهکشی و حوضه‌ای که تداوم جریان در حالت ثابتی وجود دارد، مقدار این شاخص باید برابر ۵۰ باشد. این شاخص به خم‌شدگی عمود بر امتداد زهکش اصلی در حوضه تأثیرپذیر می‌باشد. مقادیر بیشتر اگر خم‌شدگی در جهت عکس باشد، Af کمتر از ۵۰ می‌باشد. بیشتر شاخص‌های مورفوتکتونیک در مناطق و حوضه‌هایی که وضعیت سنگ‌شناسی مشابه دارند، نتایج بهتری را ارائه می‌دهند. در محاسبه شاخص Af و تجزیه و تحلیل نتایج، تأثیرات کنترل‌کننده‌های سنگ‌شناسی و شرایط اقلیمی را در نظر نمی‌گیرند. شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی و مقادیر مساحت سمت راست حوضه (A_r) و مساحت کل حوضه‌ی زهکشی (A_t) در نرم‌افزار Arc GIS 10.1 محاسبه شده و شاخص Af در ۸۷ حوضه زهکشی در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفته است. مقدار این شاخص از ۱۶ (در حوضه ۵۴) تا ۸۳ (در حوضه ۶) متغیر است. پس از محاسبه این شاخص برای تمامی حوضه‌ها، نتایج این مقادیر در سه کلاس ۱، ۲ و ۳ طبقه‌بندی شدند. کلاس ۱ با بازه $Af \geq 65$ یا $Af < 35$ نشان‌دهنده‌ی مقادیر بالای کج‌شدگی حوضه، کلاس ۲ با بازه $35 \leq Af < 43$ یا $57 \leq Af < 65$ نشان‌دهنده‌ی مقادیر متوسط کج‌شدگی و کلاس ۳ با بازه $43 \leq Af < 57$ نشان‌دهنده‌ی مقادیر پایین کج‌شدگی حوضه هستند (ده بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰) (شکل ۶، جدول ۱). در نتیجه، نقشه عدم تقارن حوضه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.1 تهیه و تولید شده است (شکل ۷). بیشترین مقادیر این شاخص در حوضه‌های ۶، ۵۱، ۲۷، ۶۵، ۵۳، ۳۷، ۴۸ و ۱۰ اندازه‌گیری شده است.



شکل ۶: نمودار عدم تقارن حوضه زهکشی (Af) در منطقه مورد مطالعه



شکل ۷: نقشه عدم تقارن حوضه زهکشی در منطقه مورد مطالعه

۳-۳- انتگرال و منحنی هیپسومتري

انتگرال هیپسومتري، توزیع سطوح ارتفاعی در یک منطقه و حوضه آبریز را نشان می‌دهد^۱ (استرالر، ۱۹۵۲). شاخص H_i مساحت سطح زیرین منحنی هیپسومتري را توصیف می‌کند بنابراین نشان‌دهنده‌ی ظرفیت یک حوضه بدون فرسایش است. یکی از روش‌های ساده برای توصیف شکل منحنی هیپسومتريک یک حوضه، محاسبه انتگرال هیپسومتريک آن است. انتگرال هیپسومتريک حوضه‌ی آبریز با استفاده از مساحت سطح زیرین منحنی هیپسومتريک به دست می‌آید. معادله‌ای که برای محاسبه انتگرال هیپسومتري استفاده می‌شود به صورت زیر است^۲ (میر، ۱۹۹۰، کلر و پینتر، ۲۰۰۲، بال، ۲۰۰۷):

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

در این شاخص ارتفاع کمینه، بیشینه و میانگین، از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS نسخه ۱۰.۱ محاسبه شده است. بعد از محاسبه شاخص H_i برای تمامی حوضه‌های زهکشی این شاخص در ۳ کلاس رده‌بندی شده است^۳ (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۷): کلاس ۱ شامل منحنی‌های محدب یا کوژ با مقدار انتگرال هیپسومتري بیشتر و برابر با ۰.۵ ($H_i \geq 0.5$)، این رده از منحنی‌های هیپسومتريک که مقادیر بالایی دارند نشان‌دهنده‌ی توپوگرافی بالایی حوضه نسبت به مقدار میانگین آن است، مانند سطوح بالآمده و فلات‌هایی که توسط رودها بریده شده‌اند. کلاس ۲ شامل منحنی‌های محدب-مقعر ($0.4 \leq H_i < 0.5$)، این رده حالت حدواسط بین کلاس ۱ و ۲ است و کلاس ۳ شامل منحنی‌های مقعر یا کاو با مقدار انتگرال هیپسومتري کمتر از ۰.۴ ($H_i < 0.4$) است، این رده بیان‌کننده‌ی بریده شدن شبکه آبریز در سطوحی با توپوگرافی ملایم‌تر نسبت به رده‌ی ۱ است. برای تشکیل منحنی هیپسومتري یک حوضه زهکشی، ارتفاع کل حوضه را در برابر مساحت کل حوضه ترسیم می‌کنیم. به دلیل اینکه در منحنی هیپسومتريک، مساحت و ارتفاع حوضه بر مساحت و ارتفاع کل حوضه تقسیم می‌شود، اعداد به صورت بی‌بعد هستند، بنابراین منحنی‌های هیپسومتريک، 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. از این رو با توجه به این خاصیت منحنی‌های هیپسومتريک می‌توان از نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس‌های مختلف استفاده کرد. از رابطه‌ی بین انتگرال هیپسومتري و مقدار بریدگی شبکه‌های زهکشی به عنوان یک شاخص برای تشخیص چرخه فرسایش چشم‌اندازها در منطقه استفاده می‌شود. این چرخه در خلال چند مرحله به وقوع می‌پیوندد که عبارت‌اند از: مرحله جوانی، بلوغ و پیری، که هر کدام ویژگی‌های مربوط به خود را دارند. مرحله جوانی در این چرخه با بریدگی‌های عمیق و برجستگی‌های ناهموار تعریف می‌شود. در مرحله بلوغ شاهد یک تعادل و توازن در فرآیندهای ژئومورفولوژی هستیم. مرحله پیری با مناظری که نزدیک به سطح اساس هستند و برجستگی‌های بسیار هموار شده دارند توصیف می‌شود. بنابراین منحنی‌های هیپسومتريک 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 هیپسومتري در ۸۷ حوضه مورد مطالعه اندازه‌گیری شده است (شکل ۸، جدول ۱). کمترین مقدار انتگرال هیپسومتريک اندازه‌گیری شده متعلق به حوضه شماره ۷۸ با مقدار (۰.۲۱) است که شکل منحنی مربوط به آن مقعر است و بیشترین مقدار این انتگرال در حوضه شماره ۶۷ با مقدار (۰.۵۸) و منحنی به شکل محدب به دست آمده است.

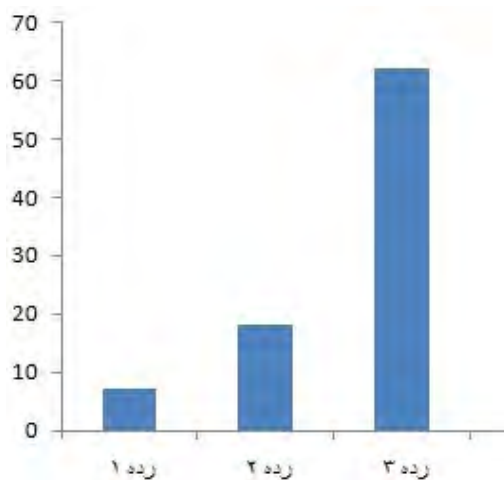
¹ Strahler, 1952

² Mayer, 1990

³ Keller and Pinter, 2002

⁴ Bull, 2007

⁵ El Hamdouni et al., 2007



شکل ۸) نمودار مقادیر انگرال هیپسومتري (Hi)

۳-۴- شکل حوضه زهکشی

در طی فرآیندهای تکتونیکی شکل حوضه ممکن است دچار تغییر شود. شاخص شکل حوضه، تفاوت میان حوضه‌های با کشیدگی قابل توجه و حوضه‌هایی که شکل آن‌ها نزدیک به دایره است را مشخص می‌کند. تصویر افقی یک حوضه می‌تواند به وسیله شاخص شکل حوضه یا نسبت کشیدگی توصیف شود^۱ (رامیرز و هررا، ۱۹۹۸). در مناطقی که از نظر تکتونیکی فعال هستند حوضه‌ها کشیده‌تر و با مقادیر بالای این شاخص همراه هستند و در مناطق با فعالیت تکتونیکی پایین‌تر، کشیدگی حوضه‌ها کمتر شده و شکل آن‌ها به دایره نزدیک‌تر می‌شود و مقدار شاخص BS نیز کاهش می‌یابد^۲ (بال و مک فادن، ۱۹۷۷، ^۳بال، ۲۰۰۷). شاخص شکل حوضه زهکشی (BS) با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود^۴ (کنن، ۱۹۷۶، رامیرز و هررا، ۱۹۹۸):

$$Bs = BI/Bw$$

در رابطه بالا BI طول یک حوضه در مسیر زهکش اصلی است که از نقطه خروج زهکش از حوضه تا مرتفع‌ترین نقطه در حوضه محاسبه می‌شود، همچنین BW نیز پهنای حوضه است، این مقدار در عریض‌ترین قسمت حوضه که هم‌زمان عمود بر طول حوضه (BI) باشد اندازه‌گیری می‌شود. شاخص BS برای تمامی حوضه‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و نتایج آن در ۳ کلاس رده‌بندی شده‌اند، این ۳ رده عبارت‌اند از: رده ۱ فعالیت تکتونیکی ($Bs \geq 4$)، رده ۲ فعالیت تکتونیکی ($3 \leq Bs < 4$) و رده ۳ فعالیت تکتونیکی ($Bs \leq 3$)^۵ (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۷). مقدار فعالیت زمین‌ساختی در رده ۱ بیشترین مقدار و در رده ۳ کمترین مقدار است. نتایج محاسبه شاخص BS در گستره مطالعاتی در ۸۷ حوضه مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۹، جدول ۱). محدوده نتایج این شاخص از ۰.۹ (در حوضه ۶۷) تا ۵.۰۱ (در حوضه ۱۲) متغیر است. تقریباً ۷۳ درصد از حوضه‌های مورد مطالعه شکلی نزدیک به دایره داشته و به کلاس ۳ فعالیت زمین‌ساختی تعلق دارند.

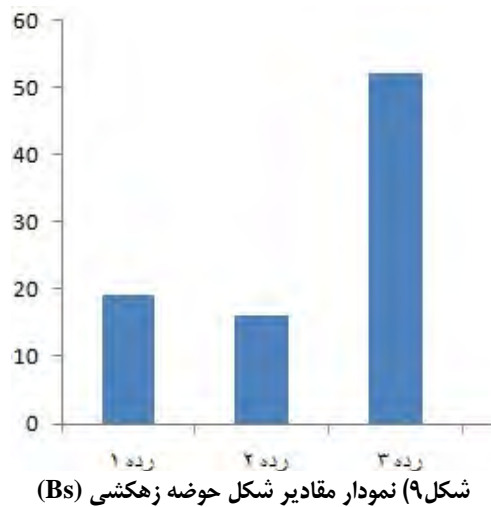
¹ Ramirez-Herrera, 1998

² Bull and McFadden, 1977

³ Bull, 2007

⁴ Cannon, 1976

⁵ El Hamdouni et al., 2007



۳-۵- نسبت عرض کف دره به ارتفاع دره

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

$$Vf = Vf_w / [(Ald - Asc) + (Ard - Asc) / 2]$$

در رابطه فوق (Vf) نسبت عرض به ارتفاع دره، (Vfw) پهنای دره، (Ald)، (Asc)، (Ard)، به ترتیب، ارتفاع خط تقسیم آب در قسمت راست و چپ دره و کف بستر دره می‌باشند (بال، ۲۰۰۷). به طور معمول مقادیر بالای شاخص Vf با نرخ‌های پایین بالآمدگی تکتونیکی همخوانی دارد (آکلر 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 در نهایت کلاس ۳ ($Vf \geq 1$) که نشان‌دهنده دره‌های U شکل است (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۷). محدوده شاخص Vf از ۰.۳۵ (در حوضه ۳۹) تا ۳.۰۴ (در حوضه ۵۲) متغیر است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری این شاخص نشان‌دهنده آن است که تقریباً بیشتر دره‌های اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه U شکل هستند (جدول ۱ و ۲).

¹ Bull, 2007

² Keller and Pinter, 2002

³ El Hamdouni et al., 2007

جدول ۲) مقادیر Vf محاسبه شده در منطقه مورد مطالعه به همراه جنس سنگ کف بستر دره

ردده	مقادیر Vf	سنگ شناسی کف رودخانه	مساحت حوضه (Km ²)	شماره رودخانه
۲	۰.۸۱	کنگومرا و ماسه سنگ	۰.۷۱	۳
۲	۰.۶۵	شیل، ماسه سنگ و سنگ آهک	۰.۹۵	۱۰
۳	۱.۳۲	سنگ آهک، ماسه سنگ و شیل	۲.۳۷	۳۱
۳	۱.۰۲	سنگ آهک و ماسه سنگ	۲.۵۵	۳۵
۱	۰.۵۰	سنگ آهک و دولومیت	۲.۵۵	۳۶
۱	۰.۳۵	شیل و ماسه سنگ، سنگ آهک	۲.۶۳	۳۹
۲	۰.۵۶	شیل و ماسه سنگ	۲.۹۲	۴۴
۳	۳.۰۴	سنگ آهک	۳.۳۳	۵۲
۳	۲.۶۳	دولومیت	۴.۴۳	۵۹
۱	۰.۴۲	سنگ آهک	۴.۵۹	۶۰
۱	۰.۴۷	دولومیت	۵.۱۵	۶۳
۱	۰.۴۶	سنگ آهک و دولومیت	۷.۰۰	۶۹
۲	۰.۷۲	سنگ آهک، ماسه سنگ	۷.۱۸	۷۲
۲	۰.۸۵	شیل و ماسه سنگ	۷.۴۰	۷۴
۲	۰.۹۳	مارن، شیل و ماسه سنگ	۸.۲۹	۷۵
۱	۰.۴۹	سنگ آهک و شیل، ماسه سنگ	۸.۴۶	۷۷
۲	۰.۹۸	شیل و ماسه سنگ	۲.۳۵	۸۵

۳-۶- شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان

این شاخص تعادل بین فرآیندهای فرسایشی رودخانه که تمایل به برش درون پیشانی کوهستان را دارند و نیروهای فعال تکتونیکی که تمایل به ایجاد پیشانی کوهستان مستقیم همراه با گسلش را دارند توصیف می‌کند (بال و مک فادن، ۱۹۷۷، آکلر، ۱۹۸۶). شاخص سینوسیته پیشانی کوهستان با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (بال، ۲۰۰۷):

$$(J) (Smf) = L_z / L_s$$

در رابطه بالا Smf شاخص سینوسیته پیشانی کوهستان، L_z طول پیشانی کوهستان در امتداد کوهپایه و L_s طول خط مستقیم پیشانی کوهستان می‌باشد. این شاخص معمولاً کمتر از ۳ و نزدیک به ۱ است که کوهستان با شیب تند به صورت ناگهانی در امتداد پیشانی کوهستان بالا می‌آید (بال، ۲۰۰۷). پیشانی‌های کوهستان بالا آمده در اثر فعالیت‌های تکتونیکی، مستقیم و صاف هستند و مقدار این شاخص در آن‌ها پایین است اما اگر سرعت بالا آمدگی پیشانی کوهستان کم شود و یا بالا آمدگی متوقف شود، پیشانی کوهستان تحت تأثیر فرآیندهای فرسایشی قرار می‌گیرد و شکل سینوسی پیدا می‌کند و پیچ و خم آن افزایش می‌یابد، در نتیجه مقدار شاخص J نیز افزایش پیدا خواهد کرد. محاسبه مقدار این شاخص به وسیله نقشه‌های توپوگرافی و یا تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند انجام شود، نقشه‌های بزرگ مقیاس و تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا می‌توانند برای اندازه‌گیری دقیق و مؤثر این شاخص مورد استفاده قرار گیرند. این

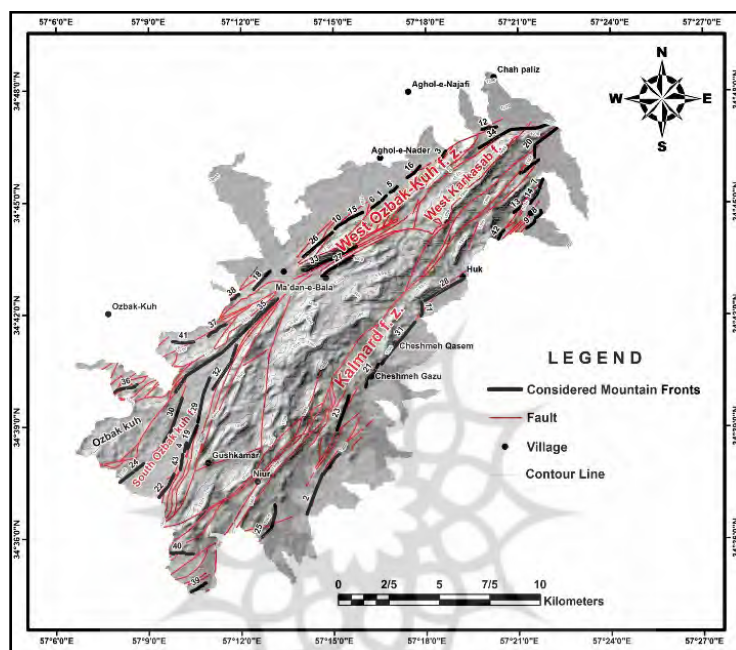
¹ Bull and McFadden, 1977

² Keller, 1986

³ Bull, 2007

⁴ Bull, 2007

شاخص برای ۴۳ پیشانی کوهستان مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۰، جدول ۱) و پس از محاسبه این شاخص در ۳ رده زمین ساختی دسته بندی شده است. در این تقسیم بندی، رده ۱ $J < 1.10$ ، رده ۲ $1.10 > J \geq 1.50$ و رده ۳ $J \geq 1.50$ نشان دهنده فعالیت تکتونیک منطقه هستند (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۷). کمترین مقدار شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان در منطقه مورد مطالعه ۱ است که مربوط به حوضه های ۱۰، ۱۱ و ۳۴ است. تمامی مقادیر شاخص J در گستره مطالعاتی به رده ۱ فعالیت زمین ساختی این شاخص تعلق دارند.



شکل ۱۰) پیشانی های کوهستان اندازه گیری شده در منطقه مورد مطالعه برای برآورد شاخص J

۳-۷- شاخص زمین ساخت فعال نسبی

در اغلب مطالعات تکتونیک، شاخص زمین ساخت فعال نسبی با ارزیابی دو شاخص اصلی صورت می گیرد، و تحقیقات اغلب به مطالعات بر روی پیشانی کوهستان و یا حوضه های رودخانه ای تأکید دارند (بال و مک فادن، ۱۹۷۷، راکول و همکاران، ۱۹۸۵، آزور و همکاران، ۲۰۰۲، مولین و همکاران، ۲۰۰۴، بال، ۲۰۰۷). در این پژوهش برای برآورد فعالیت تکتونیک نسبی تعدادی از شاخص های ژئومورفیک را در سرتاسر منطقه، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، این شاخص ها عبارتند از: گرادیان طولی رودخانه، عدم تقارن حوضه زهکشی، انتگرال هیپسومتریک، نسبت شکل حوضه زهکشی، نسبت عرض بستر دره به ارتفاع دره و شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان. زمین ساخت فعال نسبی از رابطه (S/n)، با استفاده از میانگین مقادیر هر رده از شاخص های مورفوتکتونیک در تمامی حوضه ها به دست آید. برای توصیف شدت و درجه فعالیت های تکتونیک این شاخص در ۴ رده تکتونیک توزیع شده است، رده ۱ زمین ساخت فعال نسبی $(1.0 \leq Iat < 1.5)$ ، این رده نشان دهنده فعالیت تکتونیک بسیار بالا است. رده ۲ این شاخص با بازه

¹ El Hamdouni et al., 2007

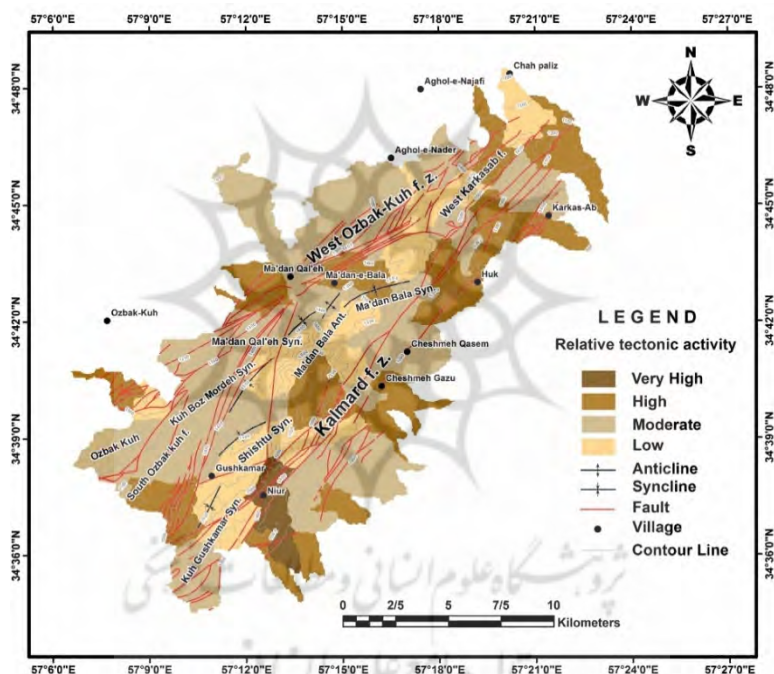
² Bull and McFadden, 1977

³ Rockwell et al, 1985

⁴ Azor et al, 2002

⁵ Molin et al, 2004

($1.5 \leq Iat < 2.0$)، بیانگر فعالیت تکتونیکی نسبی بالا است. رده ۳ شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی با مقادیر ($2.0 \leq Iat < 2.5$)، فعالیت تکتونیکی متوسط را نشان می‌دهد و رده ۴ با مقدار ($Iat \leq 2.5$)، فعالیت زمین‌ساخت نسبی کم را نشان می‌دهد (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۷). در نهایت بعد از رده‌بندی مقادیر زمین‌ساخت فعال نسبی، نقشه توزیع سطح فعالیت تکتونیکی این بخش از ایران مرکزی در محیط نرم‌افزاری Arc GIS 10.1 تهیه شد و منطقه مورد مطالعه به ۴ بخش خیلی فعال، فعال، فعالیت متوسط و فعالیت کم پهنه‌بندی گردید (شکل ۱۱). تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از رده‌بندی شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی نشان‌دهنده آن است که حدود ۳۰ درصد (۷۸ کیلومتر مربع) از گستره مطالعاتی فعالیت تکتونیکی بسیار بالا و بالا را در منطقه نشان می‌دهند و در کلاس ۱ و ۲ از شاخص Iat قرار می‌گیرند و حدود ۵۰ درصد (۱۳۱ کیلومتر مربع) مربوط به رده ۳ هستند و نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی متوسط در ازبک کوه است، و حدود ۲۰ درصد از منطقه مورد مطالعه (۵۲ کیلومتر مربع) در رده ۴ شاخص Iat قرار می‌گیرند که بیانگر مقادیر پایینی از فعالیت تکتونیکی نسبی در گستره مورد مطالعه است (جدول ۱).



شکل ۱۱: نقشه توزیع سطح فعالیت تکتونیکی نسبی (Iat) در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱: مقادیر و رده فعالیت تکتونیکی شاخص‌های مورفوتکتونیکی در ۸۷ حوضه زهکشی در منطقه مورد مطالعه

شماره حوضه	مساحت حوضه (Km ²)	رده Af	رده Bs	رده Hi	رده J	رده SL	رده Vf	مقادیر Iat	رده Iat
1	0/56	2	3	2	-	3	-	2/5	3
2	0/61	2	3	3	1	3	-	2/4	3
3	0/71	2	1	3	1	3	2	2	2
4	0/72	3	3	2	-	3	-	2/75	4
5	0/77	1	3	3	-	3	-	2/5	3
6	0/85	1	3	3	-	3	-	2/5	3
7	0/86	2	1	2	-	3	-	2	2

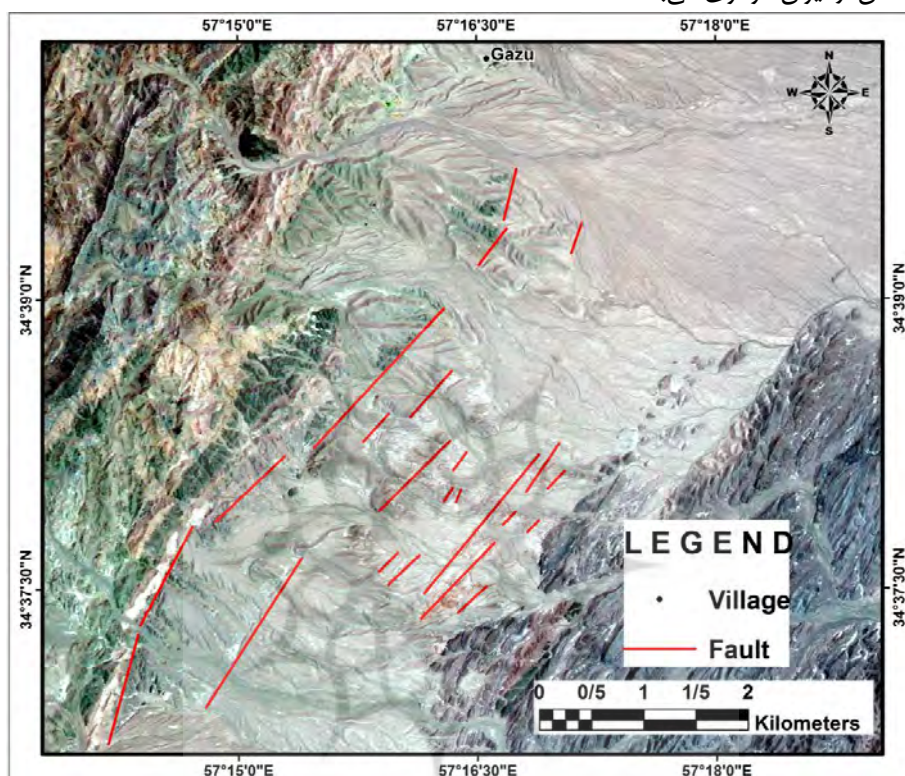
8	0/88	2	1	1	-	3	-	1/75	2
9	0/91	2	3	2	-	3	-	2/5	3
10	0/95	1	3	3	1	3	2	2/16	3
11	0/98	1	3	3	1	3	-	2/2	3
12	0/98	1	1	2	-	3	-	1/75	2
13	1/03	2	2	3	-	3	-	2/5	3
14	1/08	2	3	3	1	3	-	2/4	3
15	1/23	3	3	3	-	3	-	3	4
16	1/3	2	2	2	-	3	-	2/25	3
17	1/4	3	3	3	-	3	-	3	4
18	1/42	3	3	3	-	3	-	3	4
19	1/45	3	1	2	-	3	-	2/25	3
20	1/49	1	3	3	-	3	-	2/5	3
21	1/56	3	3	3	-	3	-	3	4
22	1/63	3	3	2	-	3	-	2/75	4
23	1/73	2	1	3	1	3	-	2	2
24	1/82	2	3	3	1	3	-	2/4	3
25	1/84	1	3	3	-	3	-	2/5	3
26	1/88	2	3	3	1	3	-	2/4	3
27	1/95	1	3	3	-	2	-	2/25	3
28	2/08	2	3	1	-	1	-	1/75	2
29	2/17	3	3	3	-	3	-	3	4
30	2/21	2	1	2	1	3	-	1/8	2
31	2/37	2	2	3	1	3	3	2/3	3
32	2/38	2	3	3	-	3	-	2/75	4
33	2/39	2	2	2	-	3	-	2/25	3
34	2/48	1	3	3	1	3	-	2/2	3
35	2/55	3	3	3	-	3	3	3	4
36	2/55	1	3	3	1	3	1	2	3
37	2/58	1	2	3	1	3	-	2	2
38	2/59	2	2	3	-	3	-	2/5	3
39	2/63	2	2	3	1	3	1	2	2
40	2/67	2	1	3	1	3	-	2	2
41	2/68	1	3	3	-	3	-	2/5	3
42	2/72	3	3	3	-	3	-	3	4
43	2/78	1	3	1	-	3	-	2	2
44	2/92	2	3	3	1	3	2	2/33	3
45	2/92	2	2	2	1	3	-	2	2
46	3/1	3	1	2	1	3	-	2	2
47	3/17	3	3	3	-	3	-	3	4
48	3/2	1	3	3	1	3	-	2/2	3
49	3/25	2	3	3	-	3	-	2/75	4

50	3/31	2	3	3	-	3	-	2/75	4
51	3/32	1	3	1	-	3	-	2	2
52	3/33	2	3	1	1	3	3	2/17	3
53	3/6	1	3	3	1	3	-	2/2	3
54	4	1	2	3	1	3	-	2	2
55	4/07	2	2	3	1	3	-	2/2	3
56	4/13	1	3	3	-	3	-	2/5	3
57	4/3	3	2	3	1	3	-	2/4	3
58	4/4	1	3	3	1	3	-	2/2	3
59	4/43	2	2	3	1	3	3	2/33	3
60	4/59	2	2	3	1	3	1	2	2
61	4/71	3	3	3	-	3	-	3	4
62	4/88	2	1	2	-	3	-	2	2
63	5/15	1	3	3	1	3	1	2	2
64	5/34	3	3	3	1	3	-	2/6	4
65	5/44	1	3	2	1	3	-	2	2
66	5/55	3	2	3	1	3	-	2/4	3
67	6/55	3	3	1	1	3	-	2/2	3
68	0/42	1	3	2	-	3	-	2/25	3
69	7	1	3	3	1	3	1	2	2
70	7/04	2	3	3	-	3	-	2/75	4
71	7/06	2	3	3	-	3	-	2/75	4
72	7/18	1	1	3	1	1	2	1/5	1
73	7/22	1	3	3	1	3	-	2/2	3
74	7/4	1	3	3	1	3	2	2/16	3
75	8/29	1	3	3	1	3	2	2/16	3
76	8/45	2	3	3	1	3	-	2/4	3
77	8/46	1	2	3	1	3	1	1/83	2
78	9/38	3	1	3	-	3	-	2/5	3
79	1/28	1	1	3	-	3	-	2	2
80	1/43	2	1	2	-	3	-	2	2
81	0/69	2	3	2	-	3	-	2/5	3
82	1/5	1	2	3	-	3	-	2/25	3
83	1/12	2	1	3	-	3	-	2/25	3
84	0/42	2	1	3	-	3	-	2/25	3
85	2/35	1	1	3	1	3	2	1/83	2
86	1/29	1	1	2	-	3	-	1/75	2
87	0/9	3	1	1	-	3	-	2	2

۴- بحث و نتیجه‌گیری

از تلفیق نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی صحرایی، اندازه‌گیری شاخص‌های ژئومورفیک در محیط نرم‌افزار Arc GIS10.1 و همچنین مطالعه تصاویر ماهواره‌ای Landsat7 و IRS P5 نتایج زیر حاصل می‌شود؛ بررسی‌های

ساختاری در پهنه گسلی کلمرد و غرب ازبک کوه نشان می‌دهد که واحدهای آبرفتی کواترنری توسط گسل‌ها و شکستگی‌های متعددی ناشی از عملکرد قطعات گسلی موجود در این پهنه که پس از نهشته شدن، این رسوبات را تحت تأثیر فعالیت تکتونیک خود قرار داده‌اند بریده شده‌اند (شکل ۱۲). حضور گسل‌ها و شکستگی‌های مزبور که با امتداد پهنه‌های گسلی کلمرد و غرب ازبک کوه همخوانی بالایی نشان می‌دهند، بیانگر عملکرد تکتونیک فعال مرتبط با این پهنه در این بخش از ایران مرکزی می‌باشد.



شکل ۱۲: نقشه شکستگی‌های موجود در واحدهای کواترنری بر روی تصویر ماهواره‌ای IRS

مطالعات ساختاری و مورفوتکتونیک در گستره مطالعاتی نشان‌دهنده آن است که در بخش‌های شرقی و غربی کوه‌های ازبک کوه در شمال طیس که به وسیله پهنه گسلی کلمرد در قسمت شرقی و پهنه گسلی غرب ازبک کوه در بخش غربی محدود شده است، بیشتر فعالیت تکتونیک بالا تا متوسط نشان می‌دهند. اما بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه در کوه‌های ازبک کوه فعالیت تکتونیک پایینی را ارائه می‌دهند. شواهد صحرایی لندفرم‌ها تطابق خوبی با توزیع فعالیت تکتونیک نسبی به دست آمده در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند. در مطالعه‌ی شاخص گرادبان طولی رودخانه در منطقه مورد مطالعه، بیشترین مقدار SL بر روی آبراهه‌های جنوب نیور، جنوب شرق ناودیس معدن قلعه، گسل جنوب ازبک کوه و روستای معدن قلعه اندازه‌گیری و مشاهده شده است (شکل ۴) که با قطعات پهنه‌ی گسلی کلمرد در مرزهای شرقی ازبک کوه همخوانی نشان می‌دهد. مقادیر متوسط این شاخص نیز با فعالیت تکتونیک در ارتباط با پهنه‌ی گسلی غرب ازبک کوه و گسل جنوب ازبک کوه می‌باشد. با در نظر گرفتن خصوصیات سنگ‌شناسی منطقه، آنومالی‌های شاخص گرادبان طولی رودخانه می‌توانند به عنوان علائم زمین‌ساختی در نظر گرفته شوند. با توجه به داده‌های موجود، مقادیر اندازه‌گیری شده برای این شاخص و نقشه‌های زمین‌شناسی، تقریباً تمامی آنومالی‌های این شاخص بر روی قطعات پهنه‌ی گسلی کلمرد و پهنه‌ی گسلی غرب ازبک کوه واقع هستند و یا درجایی که سنگ‌ها مقاومت بالایی دارند. نتایج نهایی از اندازه‌گیری شاخص کج شدگی حوضه زهکشی، نشان‌دهنده‌ی آن است که بیشینه مقادیر کج شدگی بر روی حوضه‌های واقع بر چین‌های فعال منطقه و نیز قطعات پهنه گسلی کلمرد (شکل ۱۳) و پهنه گسلی غرب ازبک کوه (شکل

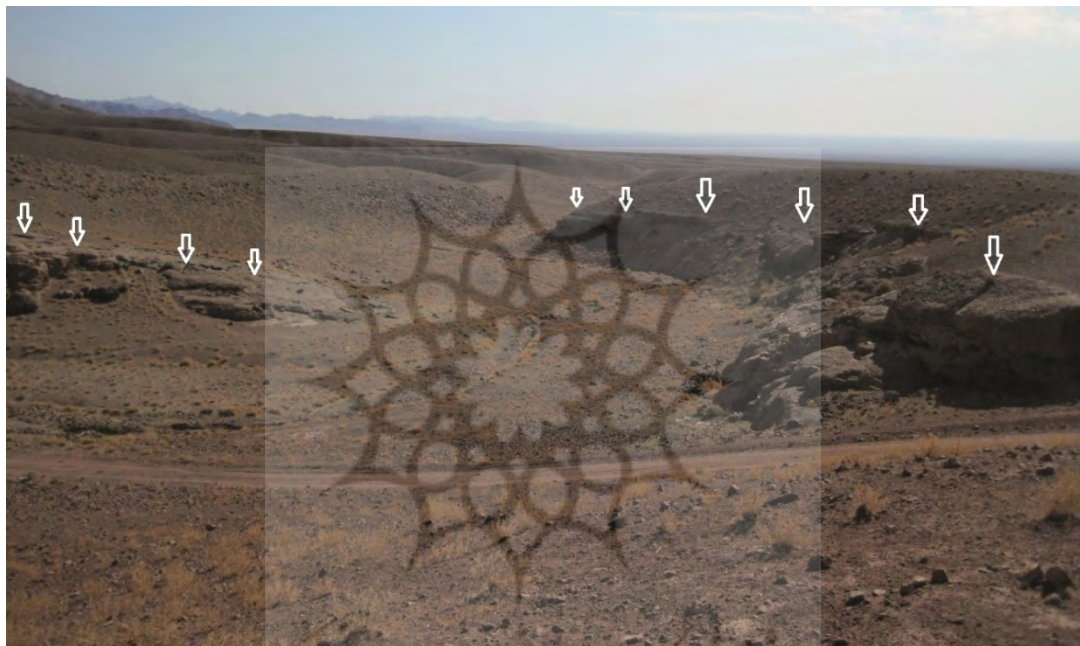
(۱۴) مشاهده می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از ترسیم منحنی‌های هیپسومتریک در ۸۷ حوضه نشان‌دهنده آن است که مقادیر بالای انتگرال هیپسومتری، در قسمت شرقی و جنوب غرب منطقه مورد مطالعه به ترتیب منطبق با پهنه گسلی کلمرد و گسل جنوب ازبک‌کوه است. نتایج حاصل از محاسبه شاخص کشیدگی حوضه (BS) نشان می‌دهد که کشیده‌ترین حوضه‌ها در محدوده پهنه گسلی غرب ازبک‌کوه و پهنه گسلی کلمرد قرار دارند. ۷۹ درصد حوضه‌های با رده ۱ شاخص BS بر روی پهنه گسلی کلمرد و ۱۶ درصد از حوضه‌های با این رده بر روی پهنه گسلی غرب ازبک‌کوه قرار دارند. همچنین، حدود ۶۹ درصد از حوضه‌های با رده ۲ شاخص BS مربوط به پهنه گسلی کلمرد است. مقادیر شاخص Vf حاکی از ۳ نوع دره V شکل، V باز و U شکل می‌باشد که بر اساس مطالعات صورت گرفته در پهنه‌های گسلی غرب ازبک‌کوه و کلمرد دره‌های U شکل مرتبط با گسل‌های امتداد لغز و خردشدگی ناشی از آن و در ادامه فرسایش تشکیل گردیده‌اند و خود دره‌های تکتونیکی فعال محسوب می‌گردند. این در حالیست که در مناطقی که فعالیت تکتونیکی مرتبط با بالا آمدگی در امتداد پیشانی‌های فعال کوهستان صورت گرفته است، دره‌ها به شکل V مشاهده می‌گردند. تمامی مقادیر شاخص J در گستره مطالعاتی به رده ۱ فعالیت زمین‌ساختی این شاخص تعلق دارند که نشان‌دهنده پیشانی‌های خطی و صاف و مستقیم است و بیانگر گسلش فعال در قسمت‌های شرقی و غربی ازبک‌کوه می‌باشند (شکل ۱۰، جدول ۱). طبق شاخص (Iat)، حدود ۸۰ درصد از گستره مورد مطالعه، سطح فعالیت زمین‌ساختی متوسط تا بالا و حدود ۲۰ درصد هم فعالیت تکتونیکی پایین را به دست می‌دهد. این مناطق با لندفرم‌های فعال به‌دست‌آمده از عملیات صحرایی مطابقت دارند. مقادیر زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) نشانگر سطح فعالیت تکتونیکی بالا در بیشتر قسمت‌های پهنه گسلی کلمرد است و در قسمت‌هایی هم سطح فعالیت تکتونیکی متوسط را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از این شاخص بیانگر آن است که در امتداد پهنه گسلی غرب ازبک‌کوه، اغلب سطح فعالیت تکتونیکی متوسط و در قسمت‌هایی هم سطح فعالیت تکتونیکی بالا می‌باشد، بخش میانی از منطقه مورد مطالعه در کوه‌های ازبک‌کوه نیز سطح فعالیت تکتونیکی پایین را نشان می‌دهند (شکل ۱۱). بر اساس مطالعات صحرایی، شاخص Iat بالا در قسمت‌های شرقی و غربی منطقه مورد مطالعه با پیشانی‌های کوهستان مستقیم، دره‌های V شکل، گسلش نهشته‌های کواترنری، تراس‌های آبرفتی مرتفع (شکل ۱۵)، وجود رودشکن‌های گسلی در مسیر رودخانه‌ها (شکل ۱۶) و دره‌های تنگ (Gorge) در امتداد پهنه‌های گسلی کلمرد و غرب ازبک‌کوه همخوانی قابل توجهی نشان می‌دهد (شکل ۱۳ و ۱۴). از سوی دیگر مقادیر پایین شاخص Iat (رده ۴) عمدتاً در بخش‌های میانی منطقه مورد مطالعه قرار دارند که بیانگر دگرشکلی قدیمی پالئوژئوپیک بوده و عدم فعالیت تکتونیکی کنونی را ارائه می‌دهد.



شکل ۱۳: پهنه گسلی کلمرد در شرق کوه‌های ازبک‌کوه



شکل ۱۴: پهنه گسلی غرب از یک کوه در منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۵: تراس‌های آبرفتی ارتفاع یافته و گسلیده در کوه‌های از یک کوه



شکل ۱۶: نمونه‌ای از رودشکن‌های گسلی مشاهده شده در مسیر رودخانه‌ها در منطقه مورد مطالعه

Reference:

- Allen, M., J. Jackson, R. Walker., 2004, *Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long term deformation rates*, *Tectonics*, 23, TC2008, doi:10.1029/2003TC001530.
- Allen, M.B., Blanc, E.J.-P., Walker, R., Jackson, J., Talebian, M., Ghassemi, M.R., 2006, *contrasting styles of convergence in the Arabia-Eurasia collision, why escape tectonics does not occur in Iran*, *Geological Society of America Special Paper* 409, 579–589.
- Allen, M.B., Kheirkhah, M., Emami, M.H., and Jones, S.J., 2011, *Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia–Eurasia collision zone*, *Geophysical Journal International*, v. 184, p. 555–574.
- Altin, T.b, Altin, B.N., 2011, *Development and morphometry of drainage network in volcanic terrain, Central Anatolia, Turkey*, *Geomorphology* 125, 485–503.
- Azor, A., Keller, E.A., Yeats, R.S., 2002, *Geomorphic indicators of active fold growth: South Mountain–Oak Ridge Ventura basin, Southern California*, *Geological Society of America Bulletin* 114, 745–753.
- Bachmanov, D.M., Trifonov, V.G., Hessami, Kh.T., Kozhurin, A.I., Ivanova, T.P., Rogozhin, E.A., Hademi, M.C., Jamali, F.H., 2004, *Active faults in the Zagros and central Iran*, *Tectonophysics* 380, 221–241.
- Berberian, M., Mohajer-Ashjai, A., 1977, *SEISMIC RISK MAP OF IRAN, A PROPOSAL*.
- Berberian, M., Yeats, R.S., 1999, *Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian Plateau*, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), 120-139.
- Berberian, M., Jackson, J.A., Fielding, E., Parsons, B., Priestley, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T.J., Baker, C., 2001, *The 1998 March 14 Fandoqa earthquake (Mw6.6) in Kerman province, southeast Iran: re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts and the active tectonics of the Gowk fault zone*, *Geophysical Journal International* 146, 371–398.
- 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., 1978, *Geomorphic Tectonic Classes of the South Front of the San Gabriel Mountains, California*. U.S. Geological Survey Contract Report, 14-08-001-G-394, Office of Earthquakes, Volcanoes and Engineering, Menlo Park, CA.
- Bull, W.B., 2007, *Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology*, Blackwell, Malden.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
 - Molin, P., Pazzaglia, F.J., Dramis, F., 2004, *Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, sila massif, Calabria, southern Italy*, *American Journal of Science* 304, 559–589.
 - Ramezani, J., Tucker, R., 2003, *The Saghand Region, Central IRAN: U–Pb geochronology, petrogenesis and implication for Gondwana tectonics*, *American Journal of Science*, Vol. 303, pp. 622–665.
 - Ramírez-Herrera, M.T., 1998, *Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt*, *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 317–332.
 - Reddy, G.P.O., Maji, A.K., Gajbhiye, K.S., 2004, *Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India — a remote sensing and GIS approach*, *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information* 6, 1–16.
 - Ruttner, A., Nabavi, M.H., Alavi, M., 1970, *Geological map of the Ozbak-Kuh Mountains 1:100000*. Geological Survey of Iran.
 - Rockwell, T.K., Keller, E.A., Johnson, D.L., 1985, *Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California*. In: Morisawa, M. (Ed.), *Tectonic Geomorphology, Proceedings of the 15th Annual Geomorphology Symposium*. Allen and Unwin Publishers, Boston, pp. 183–207.
 - Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., Bardajm, T., 2003, *Fault generated mountain fronts in Southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and earthquake activity*, *Geomorphology* 250, 203–226.
 - Strahler, A.N., 1952, *Hypsometric (area–altitude) analysis of erosional topography*, *Geological Society of America Bulletin* 63, 1117–1142.
 - Troiani, F., Della Seta, M., 2008, *The use of the stream length–gradient index in morphotectonic analysis of small catchments: a case study from Central Italy*, *Geomorphology* 102, 159–168.
 - Vernant, Ph., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., Chery J., 2004, *Present day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman*, *Geophys. J. Int.*, 157, 381 – 398.
 - Walker, R., Jackson, J., 2004, *Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran*, *Tectonics* 23, TC5010.