

بررسی زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در البرز غربی و مرکزی

علی یآوری‌فرد - کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه خوارزمی تهران

مریم ده بزرگی * - استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه خوارزمی تهران

رضا نوزعیم - استادیار گروه زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

سعید حکیمی آسیابار - استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان

دنیا رابطی - کارشناس ارشد تکتونیک، دانشگاه خوارزمی تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۰۶/۲۶

چکیده

بسیاری از سیماهای کنونی زمین طی رخدادهای جوان زمین‌ساختی شکل گرفته‌اند. تحلیل‌های مورفوتکتونیکي ابزار سودمندی جهت شناسایی اشکال ایجاد شده بر روی زمین هستند. هدف از این مطالعه بررسی فعالیت زمین‌ساختی اخیر در حوضه‌های آبریز طالقان - الموت و بخشی از حوضه‌های آستانه و منجیل با استفاده از هفت شاخص ژئومورفولوژی ناهنجاری سلسله مراتبی (Da)، انشعابات (R)، انتگرال و منحنی فرازسنجی (Hi)، برجستگی نسبی (Bh)، تراکم زهکشی (Dd)، ضریب شکل (Ff) و گرادیان طولی رود (SL) می‌باشد. گستره مورد بررسی در البرز غربی و مرکزی واقع شده است. جهت انجام این پژوهش از نقشه‌های زمین‌شناسی، مدل رقومی ارتفاعی، تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزار ArcGIS جهت استخراج ساختارهای اصلی منطقه، آبراهه‌ها و زیرحوضه‌ها استفاده شده است و سپس به محاسبه شاخص پرداخته شد و برای هر شاخص نقشه پهنه‌بندی تهیه گردید. در نهایت سطح فعالیت زمین‌ساختی کل بر مبنای شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) به دست آمد و رده‌بندی شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که به طور کلی فعالیت زمین‌ساختی نسبی اخیر منطقه بالا و بسیار بالاست که به دلیل فعالیت گسل‌های سفیدخانی، طالقان، الموت رود - شاهرود، خشچال، انگول، جبرنده، رودبار، بخش‌هایی از گسل‌های خارخون و بلوکان، بخش شرقی پهنه گسلی منجیل و گسل‌های واقع در شرق منطقه می‌باشد. در حدود ۳۵ درصد (۱۷۴۸ کیلومتر مربع) از گستره مطالعاتی فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا و حدود ۵۳ درصد (۲۶۸۴ کیلومتر مربع) فعالیت زمین‌ساختی بالا را دارا می‌باشد. محاسبه کمی شاخص‌های ریخت‌سنجی و تجزیه و تحلیل آن‌ها با ساختارهای واقع در منطقه، زمین لرزه‌های رخ داده، لندفرم‌های مختلف و شواهد صحرائی مانند گسلش در واحدهای کواترنری، کج‌شدگی واحدهای یادگانه آبرفتی، تنگ‌دره‌ها و سطوح مثلثی فعالیت نو زمین - ساختی اخیر این منطقه را تایید می‌کند و نشانگر صحت نتایج حاصل از این پژوهش می‌باشد. پیشنهاد می‌شود از ساخت و ساز در حریم گسل‌هایی که در این مطالعه فعال شناخته شده‌اند، جلوگیری شود.

واژگان کلیدی: زمین‌ساخت فعال، شاخص ریخت‌سنجی، گسل، حوضه زهکشی، البرز.

مقدمه

رشته‌کوه البرز در شمال ایران، منطقه‌ای با تغییر شکل فعال در درون ناحیه وسیع برخورد عربی- اوراسیائی می‌باشد و به سه بخش شرقی، مرکزی و غربی تقسیم‌بندی می‌شود. گستره مورد مطالعه که شامل حوضه‌های آبریز طالقان- الموت و بخشی از حوضه‌های آستانه و منجیل می‌باشد، در البرز غربی و مرکزی واقع گردیده است. گسل‌های فعال متعددی به موازات کوه‌های البرز وجود دارد و لرزه‌خیزی کوه‌های البرز نشان‌گر ادامه جنبش‌های کوهزایی در این گستره است (آلن و همکاران^۱، ۲۰۰۳: ۶۵۹-۶۷۲). بنابراین بررسی این پهنه به لحاظ سطح فعالیت زمین‌ساختی سودمند می‌باشد. زمین‌سیستمی پویاست و تغییر و تحول از جمله ویژگی‌های آن می‌باشد. تقریباً هیچ ناحیه‌ای را در جهان نمیتوان یافت که تحت تاثیر تغییرات تکتونیکی قرار نگرفته باشد. معمولاً دگرشکلی‌های سطح زمین به آرامی و در بیش از هزاران سال رخ می‌دهند و برای تشخیص فعالیت‌هایی که مسبب دگرشکلی هستند نیاز داریم به بررسی لندفرم‌هایی پیردازیم که تغییرات را در طی سال‌ها در خود حفظ کرده‌اند (فوسن^۲، ۲۰۱۶: ۴۸۱). شاخص‌های ژئومورفیکی برای مطالعه زمین‌ساختی مفید می‌باشند و از این شاخص‌ها برای ارزیابی سریع فعالیت تکتونیکی در یک ناحیه خاص استفاده می‌شود (جباری و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۷-۳۴). مورفومتري به معنی اندازه‌گیری کمی شکل چشم‌اندازهای روی زمین است. اندازه‌گیری‌های کمی امکان مقایسه عینی زمین‌ریخت‌های مختلف و محاسبه متغیرهای کمتر قابل فهم را فراهم و شناسایی ویژگی‌های خاص مانند سطح فعالیت زمین‌ساختی یک منطقه را امکان‌پذیر می‌سازد (علی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷: ۳۱-۵۶). فرآیندهای زمین‌ساخت فعال بر شکل و عملکرد رودخانه‌ها تاثیر می‌گذارد. بنابراین بررسی رودها، برش و انحراف رودخانه‌ها، اطلاعات مهمی در مورد گسترش و تکامل چین‌ها و گسل‌های منطقه فراهم می‌آورد. از طرفی حفر سنگ بستر رودخانه‌ها که به طور عمده توسط فرآیندهای زمین‌ساختی صورت می‌گیرد، موجب ایجاد تغییر شکل و توپوگرافی رودخانه‌ها می‌شود (واکر^۳، ۲۰۰۶: ۶۵۴-۶۶۶). نگاپنا و همکاران^۴ (۲۰۲۰)، تکتونیک فعال نسبی در منطقه ایدیا اسکا در جنوب غرب کامرون، آفریقای مرکزی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که فعالیت مجدد گسل‌هایی که در این منطقه واقع شده‌اند، موجب ایجاد زلزله شده و این منطقه از نظر تکتونیکی فعال می‌باشد. گارسیا و والنديا^۵ (۲۰۲۰) به بررسی زمین‌ساخت فعال در منطقه سن لوکاس در کوردیلرای مرکزی با استفاده از شاخص‌های مورفومتري پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که فعالیت گسل‌های سیمیتی- سان بلاس و گسل‌های با روند شمال غرب- جنوب شرق موجب ایجاد بیشترین فعالیت تکتونیکی و بالآمدگی در منطقه شده است. رابطی و همکاران (۱۳۹۷)، زمین‌ساخت فعال در حوضه سپیدرود واقع در البرز غربی را با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی مورد مطالعه را قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که در زیرحوضه‌های منطبق بر گسل‌های منجیل، جیرنده، درفک و دیلمان و همچنین مناطق با تراکم گسلی بالا شاخص‌های اندازه‌گیری شده مقادیر بالایی را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده تاثیر گسل‌های مذکور و فعالیت زمین‌ساختی نسبی اخیر بالای منطقه می‌باشد. حاجی کریمی و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی تکتونیک فعال حوضه آبخیز کرگانرود در دامنه شرقی تالش (نغروداغ) با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که حوضه کرگانرود در کلاس فعالیت‌های نئوتکتونیکی زیاد قرار دارد. شواهد ژئومورفولوژیکی به دست آمده مانند پادگانه‌های رودخانه‌ای ارتفاع یافته، وجود تراس‌های قدیمی و آبراهه‌های عمیق شده و دره‌های V شکل نتایج تحقیق را تأیید می‌کند. از دیگر کارهای انجام شده در زمینه ریخت زمین‌ساخت میتوان به مطالعات بابایی و همکاران (۱۳۹۸) در حوضه‌های ناحیه مراغه و شفییعی و همکاران (۱۳۹۹) در حوضه آبخیز دشت بیرجند اشاره کرد.

1. Allen et al

2. Fossen

3. Walker

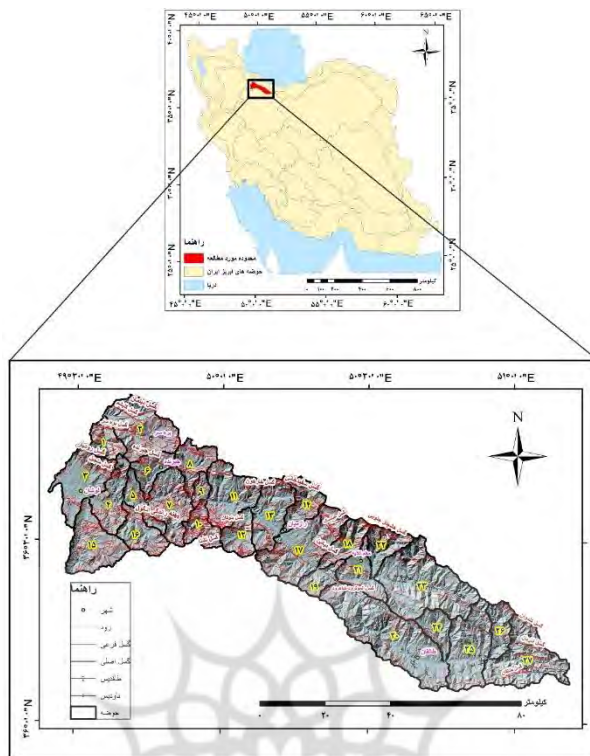
4. Ngapna et al

5. Garcia and Velandia

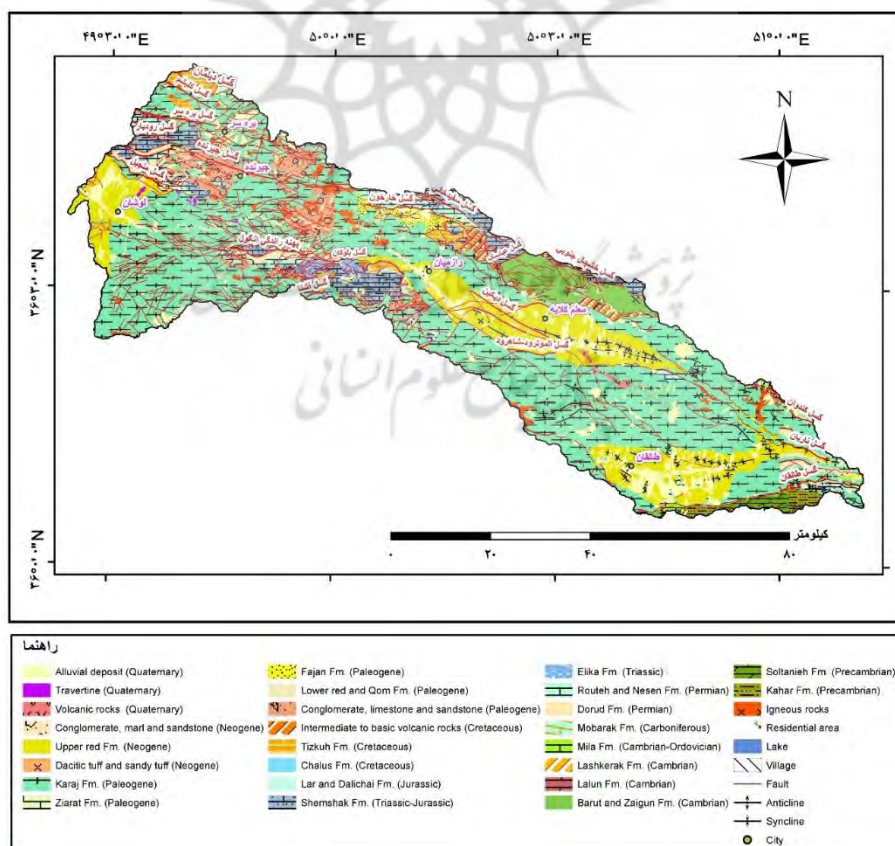
از آنجا که تاکنون مطالعات دقیقی جهت بررسی ارتباط بین زمین‌ساخت فعال و ژئومورفولوژی در منطقه مورد مطالعه صورت نگرفته است، بنابراین بررسی مورفومتری به منظور شناسایی تأثیر زمین‌ساخت فعال بر تکامل تکتونیکی حوضه‌های زهکشی و رودخانه‌های منطقه ضروری به نظر می‌رسد زیرا تعیین آنومالی‌های حاصل از زمین‌ساخت فعال در رودها با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی می‌تواند آشکارکننده ساختارهای فعال در منطقه باشد. شناسایی ساختارهای فعال به ما کمک می‌کند که از ساخت و ساز در این مکان‌ها خودداری کرده و بتوانیم تا حدود زیادی از خسارات مالی و جانی ناشی از فعالیت گسل‌ها و زلزله‌ها جلوگیری کنیم. هدف از این پژوهش تعیین زمین‌ساخت فعال در حوضه‌های آبریز طالقان - الموت و بخشی از حوضه‌های آستانه و منجیل با استفاده از هفت شاخص ژئومورفولوژی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، انشعابات (R)، انتگرال و منحنی فرازسنجی (Hi)، برجستگی نسبی (Bh)، تراکم زهکشی (Di)، ضریب شکل (Ff) و گرادیان طولی رود (SL) می‌باشد. در نهایت نیز سطح فعالیت زمین‌ساختی کل منطقه با استفاده از شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) محاسبه شده و همراه با ساختارهای منطقه و مشاهدات صحرایی، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۵۰۴۷,۴۳ کیلومتر مربع در شمال ایران و در بخش‌هایی از استان‌های گیلان، قزوین، مازندران و البرز واقع شده است و زیرحوضه‌های آبریز طالقان - الموت و بخشی از زیرحوضه‌های آستانه و منجیل را در برمیگیرد که این زیرحوضه‌ها جزو حوضه آبریز سفیدرود می‌باشند (شکل ۱). این منطقه در محدوده نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جواهرده، جیرنده، رودبار، قزوین، تاکستان، شکران، مرزن آباد و رامسر قرار گرفته و شهرهای جیرنده، لوشان، بره سر، رازمیان، معلم کلایه و طالقان در این منطقه قرار دارند. گسل‌های متعددی در منطقه واقع شده که شامل گسل‌های دیلمان، کلیشم، بره سر، سفیدخانی، طالقان، الموت‌رود - شاهرود، خشچال، انگول، جیرنده، رودبار، خارخون، بلوکان، آشنا، منجیل، عباسک، دیکین، خشچال جنوبی، کندوان و ناربان می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۱: نقشه ساختاری گستره مورد مطالعه.



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی گستره مطالعاتی (برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جواهرده، جیرنده، رودبار، قزوین، تاکستان، شکران، مرزن‌آباد و رامسر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)

روش تحقیق

با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) می‌توان ویژگی‌ها و شاخص‌های رودخانه‌ای را به‌طور دقیق استخراج کرد و به تحلیل حوضه‌های زهکشی پرداخت (متیوس و وانگ^۱، ۲۰۰۶: ۲۶-۲۱). در این مطالعه به منظور تعیین فعالیت زمین‌ساختی با استفاده از شاخص‌های مورفومتری در گستره مورد مطالعه، در ابتدا حوضه‌های زهکشی و آبراهه‌ها با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) ۳۰ متر در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.1 و به کارگیری افزونه جانبی نرم‌افزار GIS به نام Arc Hydro، استخراج گردید و منطقه مورد مطالعه به ۲۷ زیرحوضه تقسیم شد و برای هر زیرحوضه به صورت مجزا هفت شاخص مورفومتری ناهنجاری سلسله مراتبی، انشعابات، انتگرال و منحنی فرازسنجی، برجستگی نسبی، تراکم زهکشی، ضریب شکل و گرادبان طولی رود مورد محاسبه قرار گرفت. برای تمامی شاخص‌ها نقشه پهنه‌بندی رسم شد و از لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به ۳ رده طبقه‌بندی گردید. در مرحله بعد، به منظور تعیین ساختارهای اصلی و واحدهای زمین‌شناسی منطقه از داده‌های صحرایی، نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان کشور و تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردید. در نهایت برای تعیین سطح فعالیت زمین‌ساختی کل منطقه، شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Δa) محاسبه و نقشه پهنه‌بندی این شاخص نیز در مقیاس حوضه رسم و از لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به ۴ رده تقسیم‌بندی شد. سپس ساختارهای اصلی و واحدهای زمین‌شناسی منطقه با نتایج حاصل از اندازه‌گیری کمی شاخص‌های مورفومتری و مشاهدات صحرایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

بحث و یافته‌های تحقیق

شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی^۲ (Δa)

شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی براساس تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی محاسبه می‌شود. زمانی که یک آبراهه به یک رده بالاتر از خود وارد می‌شود، نظم سلسله مراتبی دارد، برای مثال هر آبراهه رده ۱ که به آبراهه رده ۲ وارد شود دارای نظم سلسله مراتبی است (هورتن^۳، ۱۹۴۵: ۲۷۵-۳۷۰). اگر این ترتیب رعایت نشود و یک رده آبراهه به آبراهه‌ای با دو یا چند رده بالاتر از خود وارد شود، ناهنجاری سلسله مراتبی رخ می‌دهد (شکل ۳). تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (سیکاسی و همکاران^۴، ۱۹۸۶: ۴۸-۳۳):

$$Ha_{i \rightarrow j} = 2^{(j-2)} - 2^{(i-1)} \quad (1)$$

در این رابطه (Ha) تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی، (i) رده آبراهه پایین‌تر و (j) رده آبراهه بالاتر است. پس از تعیین تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی برای هر رده، تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی کل حوضه با رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$Ha_t = \sum (Ha_{i \rightarrow j} \times N_{s_{i \rightarrow j}}) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ($N_{s_{i \rightarrow j}}$) تعداد آبراهه‌هایی است که به آبراهه‌های بالاتر از خود وارد شده‌اند. با استفاده از تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی کل حوضه، شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی به صورت زیر (رابطه ۳) محاسبه می‌شود:

$$\Delta a = Ha_t / N_1 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، (Δa) شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی و (N_1) تعداد کل آبراهه‌های رده ۱ حوضه است. شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی یکی از شاخص‌های مهم تعیین میزان نقش تکتونیک در ناهنجاری شبکه زهکشی است، به طوری که هر

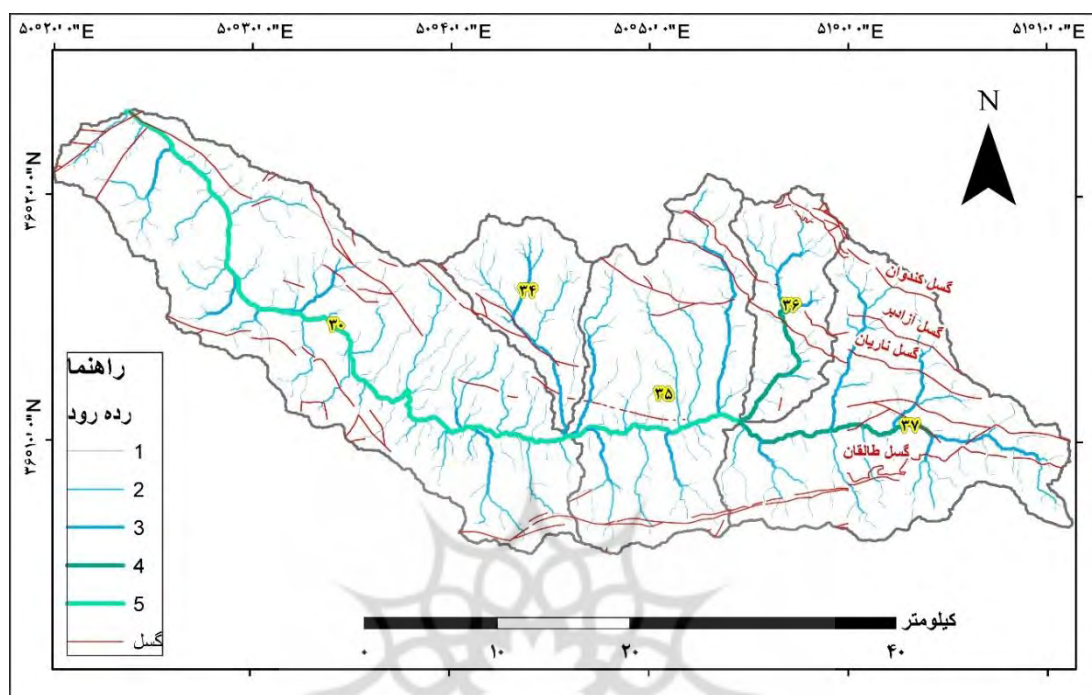
1. Maathuis and Wang

2. Hierarchical anomaly index

3. Horton

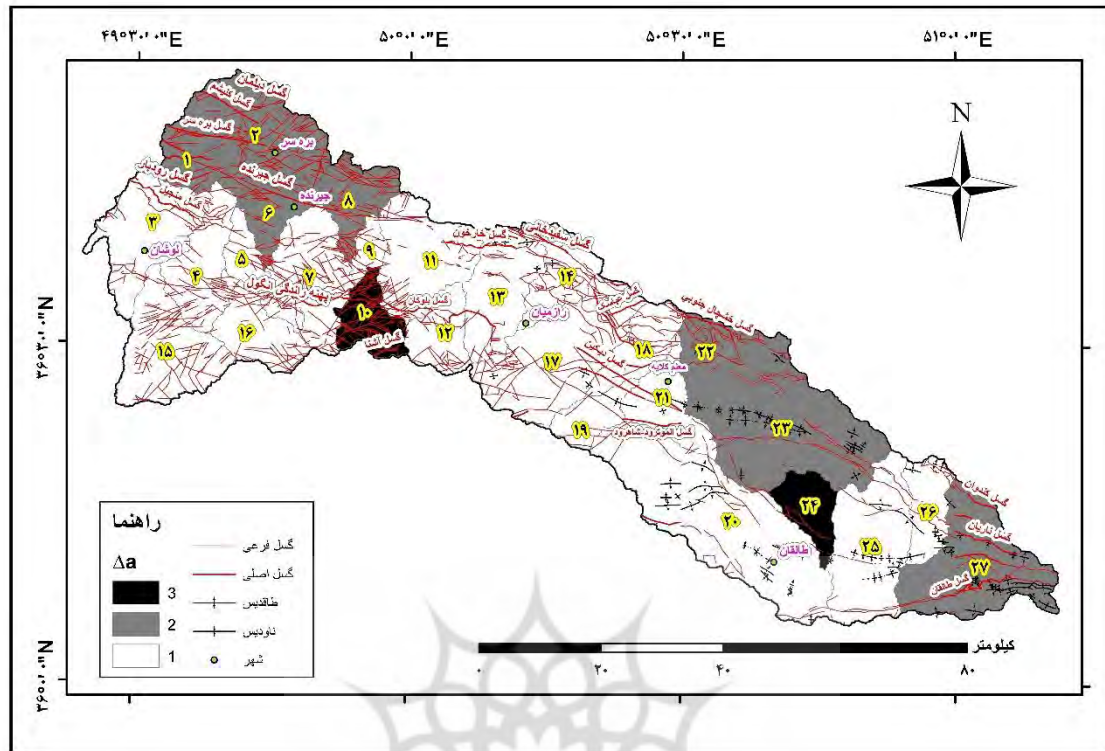
4. Ciccacci et al

چه میزان این شاخص در حوضه‌ها بیشتر باشد، نشان‌دهنده ناهنجاری بیشتر شبکه زهکشی یا تأثیر بیشتر زمین‌ساخت بر سیستم آبراهه‌های حوضه است (بهرامی، ۱۳۹۴: ۳۴-۱۵).



شکل ۳: شبکه آبراهه در حوضه‌های ۲۰، ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ و افزایش ناهنجاری سلسله‌مراتبی در محل تلاقی گسل با آبراهه

این شاخص به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی در ۳ رده طبقه‌بندی شده است (گارنیری و پیروتا، ۲۰۰۸: ۲۶۰-۲۷۳): رده ۱ شامل مقادیر ۱ و بیشتر ($\Delta a \geq 1$) فعالیت بالای زمین‌ساختی را نشان می‌دهد، رده ۲ شامل مقادیر ۰/۵ تا ۱ ($\Delta a \geq 0.5$) که نشان‌گر فعالیت متوسط زمین‌ساختی و رده ۳ شامل مقادیر کمتر از ۰/۵ ($\Delta a > 0.5$) که بیان‌گر حوضه‌های با فعالیت زمین‌ساختی کم است (شکل ۴). در گستره مورد مطالعه مقادیر بالای مربوط به این شاخص در حوضه ۹ با مقدار ۶/۹۱ به علت عملکرد گسل جیرنده، حوضه ۱۹ با مقدار ۶/۲۴ به علت عملکرد گسل‌های الموت رود-شاهرود و دیکین و حوضه‌های ۳ و ۴ به ترتیب با مقادیر ۵/۱۴ و ۵/۰۵ به علت عملکرد گسل‌های منجیل و انگول مشاهده می‌شود که رده یک فعالیت زمین‌ساختی را دارا هستند (جدول ۱). فعالیت گسل‌های دیلمان، کلیشم، بره سر، جیرنده، خشچال جنوبی، ناربان و طالقان موجب فعالیت متوسط زمین‌ساختی در حوضه‌های ۱، ۲، ۶، ۸، ۲۲، ۲۳ و ۲۷ شده است. کمترین فعالیت زمین‌ساختی شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی نیز مربوط به حوضه ۱۰ با مقدار ۰/۳ و حوضه ۲۴ با مقدار ۰/۳۱ می‌باشد که رده ۳ فعالیت را دارا هستند.



شکل ۴: نقشه پراکندگی مقادیر شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی در گستره مطالعاتی

شاخص انشعابات^۱ (R)

شاخص انشعابات از دیگر شاخص های تعیین ناهنجاری سیستم زهکشی در حوضه های آبریز است. شاخص انشعابات به ناهنجاری سلسله مراتبی وابسته است و اطلاعات مفیدی در مورد نوع فرآیند فرسایشی و درجه تکامل حوضه زهکشی ارائه می دهد (گرنیری و پیروتا، ۲۰۰۸: ۲۶۰-۲۷۳). شاخص انشعابات، از اختلاف بین نسبت انشعابات و نسبت مستقیم انشعابات محاسبه می شود (رابطه ۴):

$$R = R_b - R_{db} \quad (4)$$

در این رابطه، (R) شاخص انشعابات، (R_b) نسبت انشعابات و (R_{db}) نسبت مستقیم انشعابات می باشد. نسبت انشعابات برای هر رده در یک حوضه از رابطه (۵) محاسبه می شود:

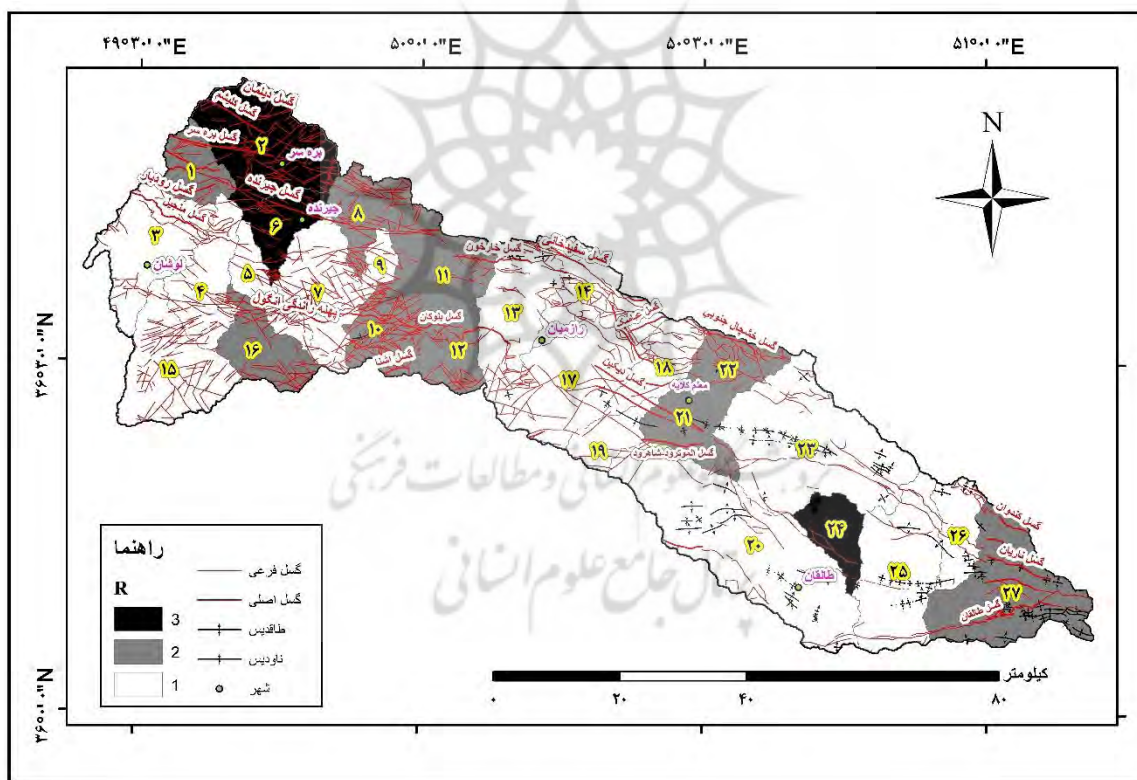
$$R_b(u \rightarrow u+1) = N_u / N_{u+1} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، (N_u) تمام انشعابات یک رده و (N_{u+1}) تمام انشعابات یک رده بالاتر است. هر چه ساختارهای زمین شناختی کمتر دچار تغییر شده باشند و الگوی زهکشی به حالت طبیعی خود باقی بماند، نسبت انشعابات در حوضه پایین خواهد بود (استراهلر^۲، ۱۹۶۴: ۴-۳۹). نسبت مستقیم انشعابات برای هر رده به صورت زیر (رابطه ۶) محاسبه می شود (آونا و همکاران^۳، ۱۹۶۷: ۷۸۱-۷۹۶):

1. Bifurcation index
 2. Guarnieri and Pirrotta
 3. Strahler
 4. Avena et al

$$R_{db} = N_{du} / N_{u+1} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، (N_{du}) تعداد انشعابات یک رده که به آبراهه‌های رده بالاتر از خود می‌ریزند و (N_{u+1}) تعداد انشعابات یک رده بالاتر است. در هر حوضه برای رده‌های مختلف نسبت انشعابات جمع شده و میانگین گرفته می‌شود. همچنین این کار برای نسبت مستقیم انشعابات نیز انجام می‌گیرد و در نهایت شاخص انشعابات محاسبه می‌شود. این شاخص به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به صورت زیر طبقه‌بندی شده است: رده ۱ شامل مقادیر ۱ و بیشتر ($R \geq 1$) که فعالیت بالایی زمین‌ساختی را نشان می‌دهد، رده ۲ شامل مقادیر ۰/۵ تا ۱ ($0/5 < R < 1$) که نشان‌گر فعالیت متوسط زمین‌ساختی است و رده ۳ شامل مقادیر کمتر از ۰/۵ ($R < 0/5$) که بیان‌گر حوضه‌های با فعالیت زمین‌ساختی کم است (شکل ۵). این شاخص در حوضه ۱۷ با مقدار ۱/۹۱ به دلیل فعالیت گسل‌های دیکین و عباسک، حوضه ۷ با مقدار ۱/۷۶ به دلیل فعالیت گسل انگول، و حوضه ۳ با مقدار ۱/۶۹ به دلیل فعالیت گسل منجیل بیشترین مقادیر را نشان می‌دهد (جدول ۱). همچنین گسل‌های سفیدخانی، الموت-شاهرود، رودبار با فعالیت خود موجب شده‌اند مقادیر بالایی از شاخص انشعابات و رده یک فعالیت زمین‌ساختی را در حوضه‌های واقع در این گسل‌ها شاهد باشیم. کمترین مقدار فعالیت زمین‌ساختی نیز مربوط به حوضه‌های ۲، ۶ و ۲۴ می‌باشد.



شکل ۵: نقشه پراکندگی مقادیر شاخص انشعابات در گستره مطالعاتی.

انتگرال و منحنی فرازسنجی^۱ (Hi)

انتگرال فرازسنجی پراکندگی ارتفاع را در یک ناحیه خاص مشخص می‌کند. این شاخص، توزیع نسبی ارتفاع در یک منطقه و حوضه آبریز را نشان می‌دهد (استراهلر^۲، ۱۹۵۲: ۱۱۱۷-۱۱۴۲). تحلیل فرازسنجی به عنوان یک شاخص برای مراحل

^۱. Hypsometric integral and curve

^۲. Strahler

فرسایش حوضه‌های زهکشی به کار برده می‌شود و مقادیر بالای این شاخص نشان‌دهنده نواحی فعال و جوان و مقادیر پایین آن با نواحی قدیمی که فرایند فرسایش بر آن‌ها حاکم است و کمتر تحت تأثیر زمین‌ساخت فعال منطقه است، مرتبط هستند (سینگ^۱، ۲۰۰۹: ۵۳-۵۹). انتگرال فراسنجی حوضه آبریز با استفاده از مساحت سطح زیرین منحنی فراسنجی به دست می‌آید و از رابطه (۷) محاسبه می‌شود (مایر^۲، ۱۹۹۰: ۲۷۱):

$$Hi = (\text{average elevation} - \text{min elevation}) / (\text{max elevation} - \text{min elevation}) \quad (7)$$

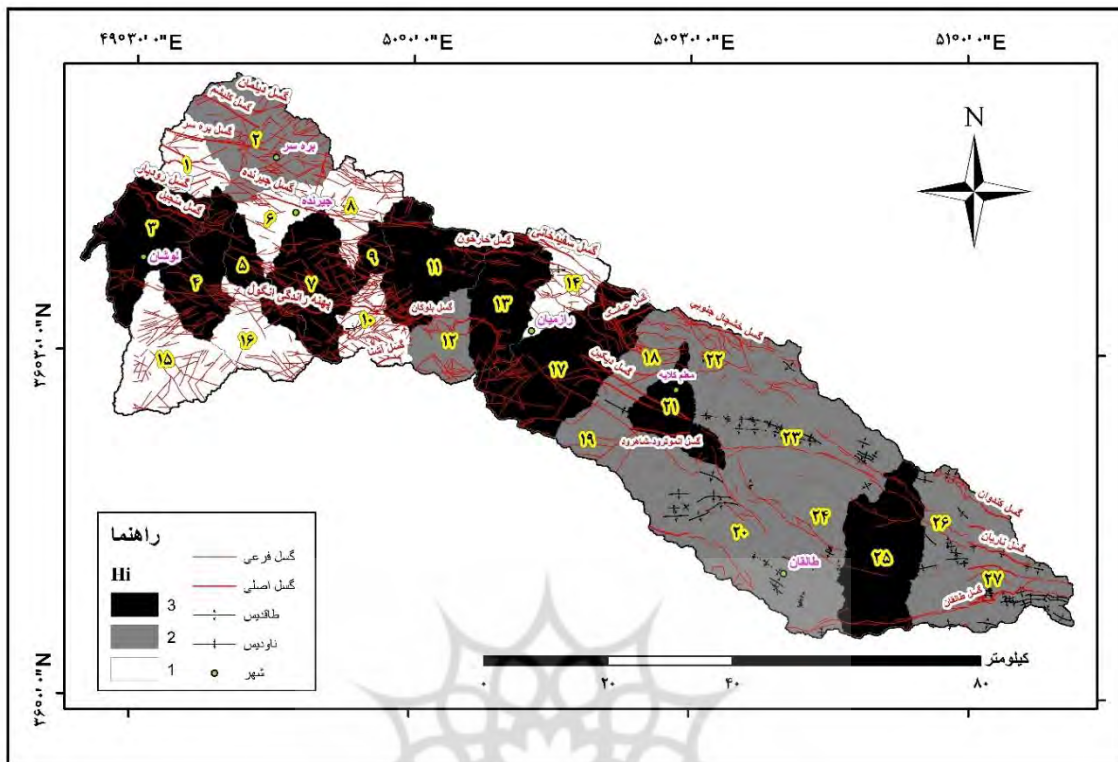
منحنی فراسنجی شامل رسم نسبت ارتفاعی در برابر نسبت مساحت و محاسبه مساحت زیر منحنی است. این منحنی مستقل از اندازه حوضه و برآمدگی است. با توجه به همین ویژگی این منحنی‌ها در حوضه‌هایی با اندازه، ارتفاع و مساحت متفاوت جهت مقایسه با یکدیگر استفاده می‌شوند. این منحنی از ترسیم مساحت نسبی (a/A) در محور افقی به ارتفاع نسبی (h/H) در محور عمودی حاصل می‌شود. مساحت کلی حوضه (A) و ارتفاع کل (H) در طول خطوط توپوگرافی به سطوح (a) و ارتفاعات (h) تقسیم می‌شود. سطح (a) شامل مساحتی از حوضه است که بالای ارتفاع (h) قرار دارد (استراهلر^۳، ۱۹۵۲: ۱۱۱۷-۱۱۴۲). با توجه به مقادیر حاصل از محاسبه این شاخص در تمامی حوضه‌های واقع در منطقه مورد مطالعه، شاخص انتگرال فراسنجی به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به ۳ رده طبقه‌بندی شده است (الحمدونی و همکاران^۴، ۲۰۰۸: ۱۵۰-۱۷۳): رده ۱ با فعالیت بالا و مقادیر انتگرال فراسنجی $0/5$ و بیشتر ($Hi \geq 0/5$)، رده ۲ با فعالیت متوسط و مقادیر انتگرال فراسنجی $0/4$ تا $0/5$ ($0/4 > Hi \geq 0/5$) و رده ۳ با فعالیت کم و مقادیر انتگرال فراسنجی کمتر از $0/4$ ($0/4 > R$). این شاخص در حوضه ۶ و ۸ با مقادیر $0/59$ و $0/58$ به دلیل فعالیت گسل‌های جبرنده و رودبار، حوضه ۱۰ با مقدار $0/57$ به دلیل فعالیت گسل انگول و حوضه ۱۶ با مقدار $0/55$ به دلیل فعالیت گسل‌های موجود بیشترین مقادیر را نشان می‌دهد. همچنین حوضه ۱ به دلیل فعالیت گسل رودبار و بره سر، حوضه ۱۴ به دلیل فعالیت گسل سفیدخانی و حوضه ۱۵ به دلیل گسل‌های واقع در غرب منطقه، رده یک فعالیت زمین‌ساختی را دارا هستند (شکل ۶). منحنی فراسنجی با توجه به شکل و میزان تحدب و تقعر به سه رده از لحاظ فعالیت زمین‌ساختی تقسیم می‌شود: رده ۱ مربوط به منحنی فراسنجی محدب و جوان با فعالیت زمین‌ساختی بالا است. این رده از منحنی‌های فراسنجی که مقادیر بالایی دارند نشان‌دهنده توپوگرافی بالا نسبت به مقدار میانگین آن در حوضه هستند، مانند سطوح بالا آمده و فلات‌هایی که توسط رودها بریده شده‌اند. رده ۲ مربوط به منحنی فراسنجی محدب-مقعر و بالغ با فعالیت زمین‌ساختی متوسط است. این رده حد واسطه رده ۱ و ۳ است. رده ۳ مربوط به منحنی فراسنجی مقعر و فرسوده با فعالیت زمین‌ساختی پایین است. این رده نشان‌دهنده بریده شدن شبکه زهکشی در یک سطح هموارتر است. در شکل (۷) منحنی فراسنجی حوضه‌های ۸ و ۱۰ که دارای رده ۱ فعالیت زمین‌ساختی هستند آمده است که به صورت محدب شکل می‌باشند.

1. Singh

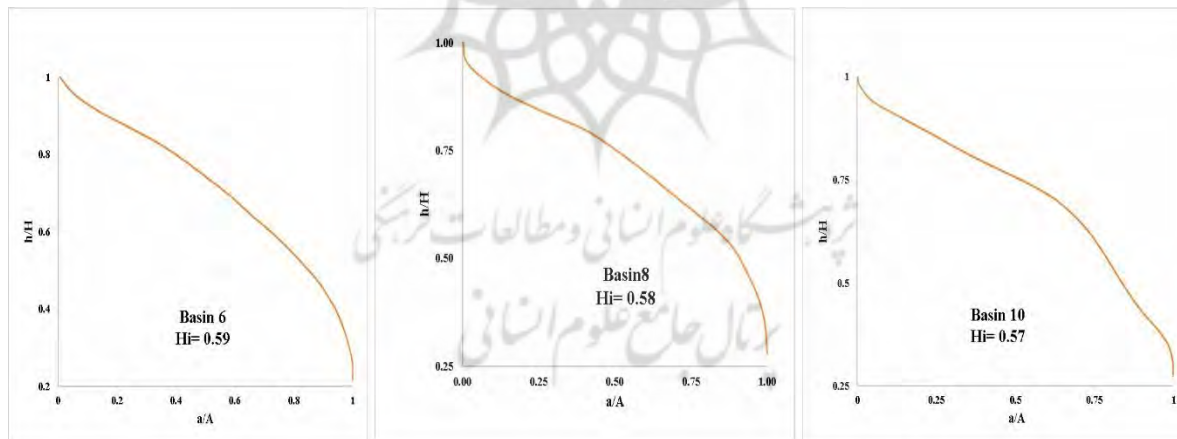
2. Mayer

3. Strahler

4. El Hamdouni et al



شکل ۶: نقشه رده‌بندی شاخص فرازسنجی در گستره مطالعاتی



شکل ۷: منحنی بیشینه فرازسنجی در حوضه‌های شماره ۶، ۸ و ۱۰

برجستگی نسبی^۱ (Bh)

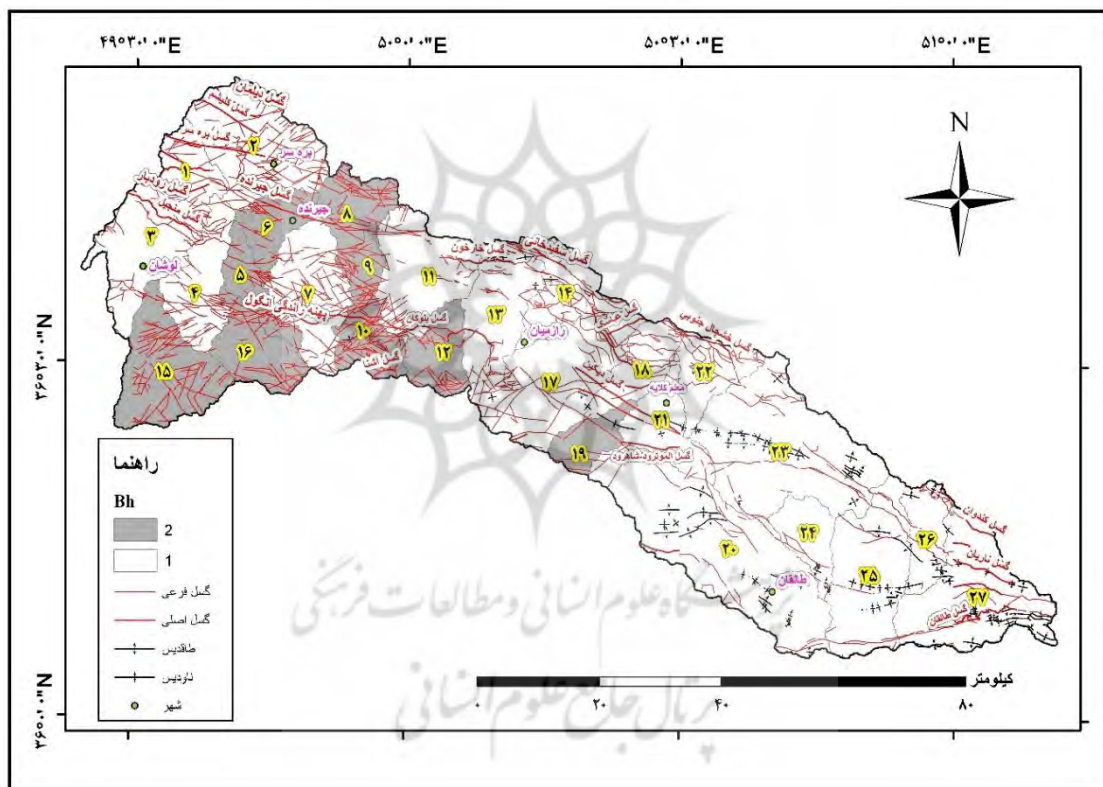
برجستگی حوضه نقش مهمی در توسعه زهکشی، حرکت آب‌های سطحی و زیرزمینی، تراوایی، توسعه اشکال سطحی زمین و ویژگی‌های فرسایشی عوارض زمینی دارد. مقدار بالای برجستگی نشان‌دهنده شدت جریان آب، نفوذ پایین و مقدار بالای رواناب می‌باشد. برجستگی نسبی از اختلاف بین مرتفع‌ترین و پست‌ترین ارتفاعات حوضه به‌دست می‌آید و از رابطه (۸) محاسبه می‌شود (کلر و پینتر^۲، ۲۰۰۲: ۳۶۲):

^۱. Relative Relief index

^۲. Keller and Pinter

$$Bh = H_{max} - H_{min} \quad (۸)$$

بالا بودن مقدار شاخص Bh نشان دهنده فعالیت بالای زمین ساختی است. در رابطه (۸)، H_{max} بالاترین ارتفاع موجود در حوضه و H_{min} پایین ترین ارتفاع حوضه است. با توجه به مقادیر شاخص برجستگی نسبی در منطقه مورد مطالعه، به لحاظ فعالیت زمین ساختی این شاخص در ۲ رده طبقه بندی شده است: رده ۱ با مقادیر ۲۰۰۰ و بیش تر ($Bh \geq 2000$) که نمایانگر فعالیت زمین ساختی بالاست و رده ۲ با مقادیر ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ ($1000 < Bh < 2000$) که فعالیت زمین ساختی متوسط را نشان می دهد (شکل ۸). به دلیل نرخ بالا آمدگی بالای منطقه، گستره مورد مطالعه فاقد رده ۳ ($Bh > 1000$) می باشد و بیشتر مساحت منطقه دارای رده یک فعالیت زمین ساختی است. بیشترین مقدار شاخص برجستگی نسبی مربوط به حوضه ۱۸ با ۲۸۹۷ متر و حوضه ۲۳ با ۲۸۸۳ متر در اثر عملکرد گسل های خشچال، دیکین و الموت رود- شاهرود می باشد (جدول ۱).



شکل ۸: نقشه پراکندهی مقادیر شاخص برجستگی نسبی در گستره مطالعاتی

تراکم زهکشی^۱ (Da)

میزان تراکم آبراهه در یک حوضه، می تواند نشان دهنده وضعیت شدت و ضعف آبراهه ها و فرسایش در قسمت های مختلف آن باشد. مقدار این شاخص به فرسایش و میزان برش چشم اندازها بستگی دارد. شبکه زهکشی در چشم اندازهای قدیمی که در زمان طولانی در سطح زمین قرار دارند، گسترش بیشتری یافته و در نتیجه دارای مقدار تراکم زهکشی بیشتری است. مقدار تراکم زهکشی در حوضه هایی که دارای فعالیت زمین ساختی اخیر می باشند، کمتر است (کلر و پینتر^۲، ۲۰۰۲):

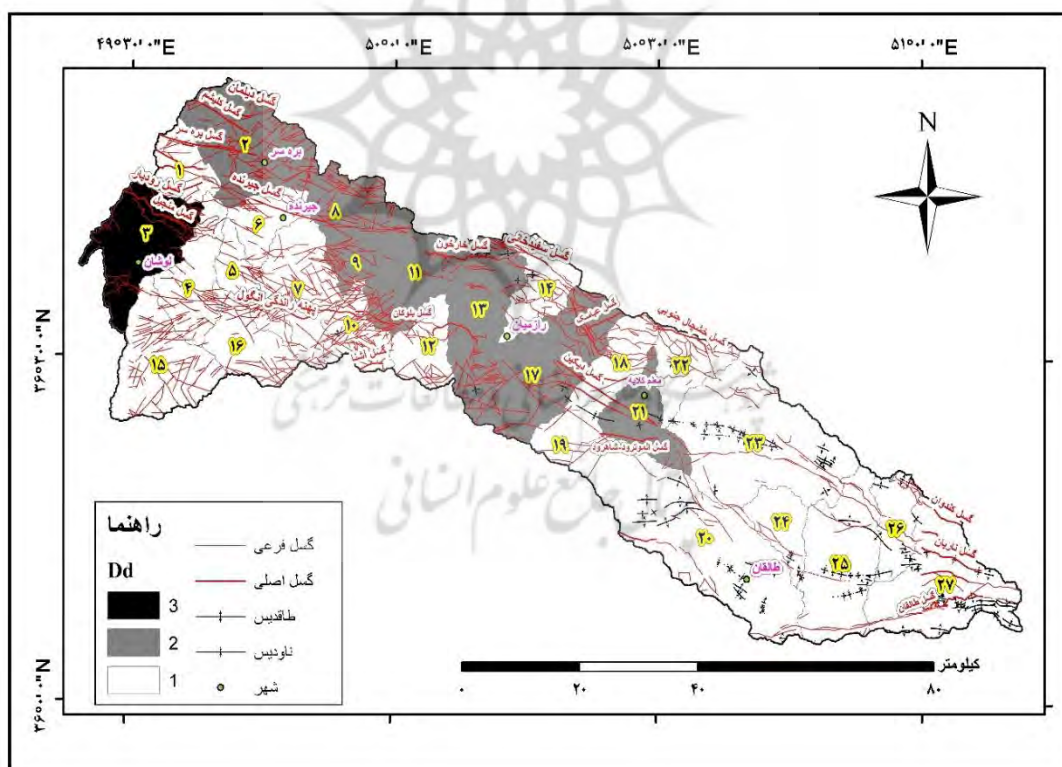
^۱ Drainage density index

^۲ Keller and Pinter

۳۶۲). تراکم زهکشی از نسبت مجموع طول تمام آبراهه‌های یک حوضه به مساحت حوضه محاسبه می‌شود (هورتن^۱، ۱۹۴۵: ۲۷۵-۳۷۰):

$$D_d = L_{II} / A \quad (9)$$

در رابطه بالا، (L_{II}) مجموع طول تمام آبراهه‌های یک حوضه و A مساحت حوضه می‌باشد. شاخص تراکم زهکشی نیز به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به ۳ رده طبقه بندی می‌شود: رده ۱ شامل مقادیر $0/8$ و کم‌تر ($0/8 \geq D_d$) و نمایان‌گر فعالیت بالای زمین‌ساختی، رده ۲ شامل مقادیر بین $0/8$ تا $0/9$ ($0/8 > D_d \geq 0/9$) و نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی متوسط و رده ۳ شامل مقادیر بیش‌تر از $0/9$ ($0/9 < D_d$) می‌باشد که فعالیت زمین‌ساختی پایین را نشان می‌دهد (شکل ۹). این شاخص در حوضه ۱ به دلیل فعالیت گسل‌های رودبار، جیرنده و بره سر، حوضه ۱۲ به دلیل فعالیت گسل‌های انگول و بلوکان، حوضه‌های ۱۸ و ۲۲ به دلیل فعالیت گسل‌های دیکین و خشچال جنوبی و حوضه ۲۷ به دلیل فعالیت گسل‌های طالقان، ناربان و گسل‌های شرقی منطقه بالاترین فعالیت زمین‌ساختی را نشان می‌دهد (جدول ۱). همچنین فعالیت گسل‌های پهنه راندگی انگول، سفیدخانی، الموت رود-شاهرود، کندوان، ناربان و طالقان نیز موجب رده یک فعالیت زمین‌ساختی شاخص برجستگی نسبی در حوضه‌های واقع در این گسل‌ها شده است. غیر از حوضه ۳، بقیه حوضه‌ها فعالیت متوسط و بالا را دارا هستند.



شکل ۹: نقشه پراکندگی مقادیر شاخص تراکم زهکشی در گستره مطالعاتی.

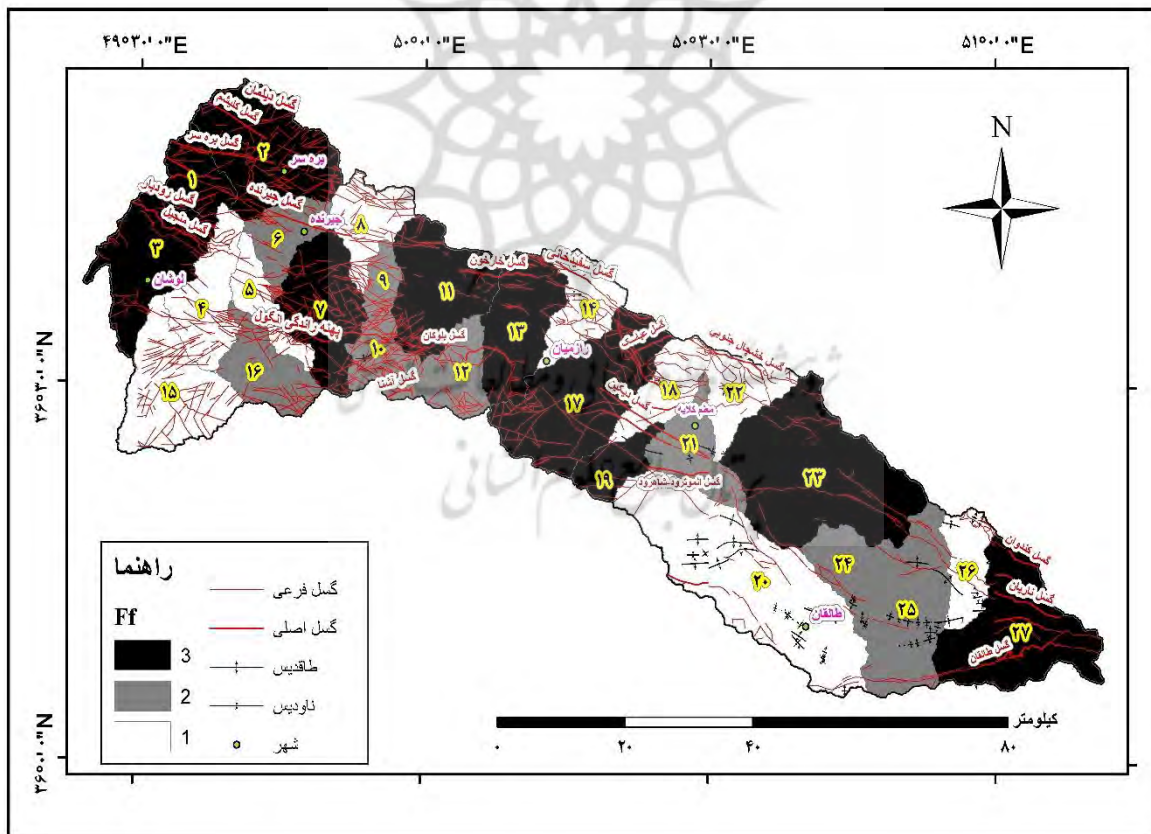
¹. Horton

شاخص ضریب شکل^۱ (Ff)

شاخص ضریب شکل از رابطه (۱۰) محاسبه می شود (هورتن^۲، ۱۹۴۵: ۲۷۵-۳۷۰):

$$Ff = A / L^2 \tag{10}$$

در این رابطه، A مساحت حوضه و L^2 مجذور طول حوضه است. طول حوضه از محل خروج آبراهه اصلی تا مرتفع ترین نقطه در حوضه محاسبه می گردد. ضریب شکل نشان دهنده شدت جریان یک حوضه برای یک مساحت معین است. هر چه مقدار این شاخص به عدد ۱ نزدیکتر باشد حوضه به مربع نزدیکتر است و هر چه ضریب فرم کوچکتر از یک باشد حوضه کشیده تر است و از نظر زمین ساختی دارای فعالیت بیشتری می باشد (سینق و همکاران^۳، ۲۰۱۴: ۱۱۱-۱۲۱). مقدار این شاخص در گستره مورد مطالعه بین ۰/۱۶ تا ۰/۴۵ می باشد (جدول ۱). شاخص ضریب شکل به لحاظ فعالیت زمین ساختی به رده های بالا (رده ۱ با مقادیر ۰/۲۵ و کمتر: $Ff \geq 0.25$)، متوسط (رده ۲ با مقادیر ۰/۲۵ تا ۰/۳: $0.25 > Ff \geq 0.3$) و پایین (رده ۳ با مقادیر بیش تر از ۰/۳: $Ff > 0.3$) طبقه بندی شده است (شکل ۱۰). حوضه های ۱۴، ۲۰ و ۵ به ترتیب بیشترین کشیدگی را در گستره مورد مطالعه دارند که تحت اثر گسل های سفیدخانی، طالقان، الموت رود- شاهرود، انگول و منجیل فعالیت بالای زمین ساختی را نشان می دهند. کمترین کشیدگی و بیشترین مقدار عددی شاخص ضریب شکل نیز مربوط به حوضه های ۳، ۱۱، ۱۳ و ۱۹ می باشد.



شکل ۱۰: نقشه پراکندگی مقادیر شاخص ضریب شکل در گستره مطالعاتی.

1. Form factor index

2. Horton

3. Singh et al

شاخص گرادیان طولی رود^۱ (SL)

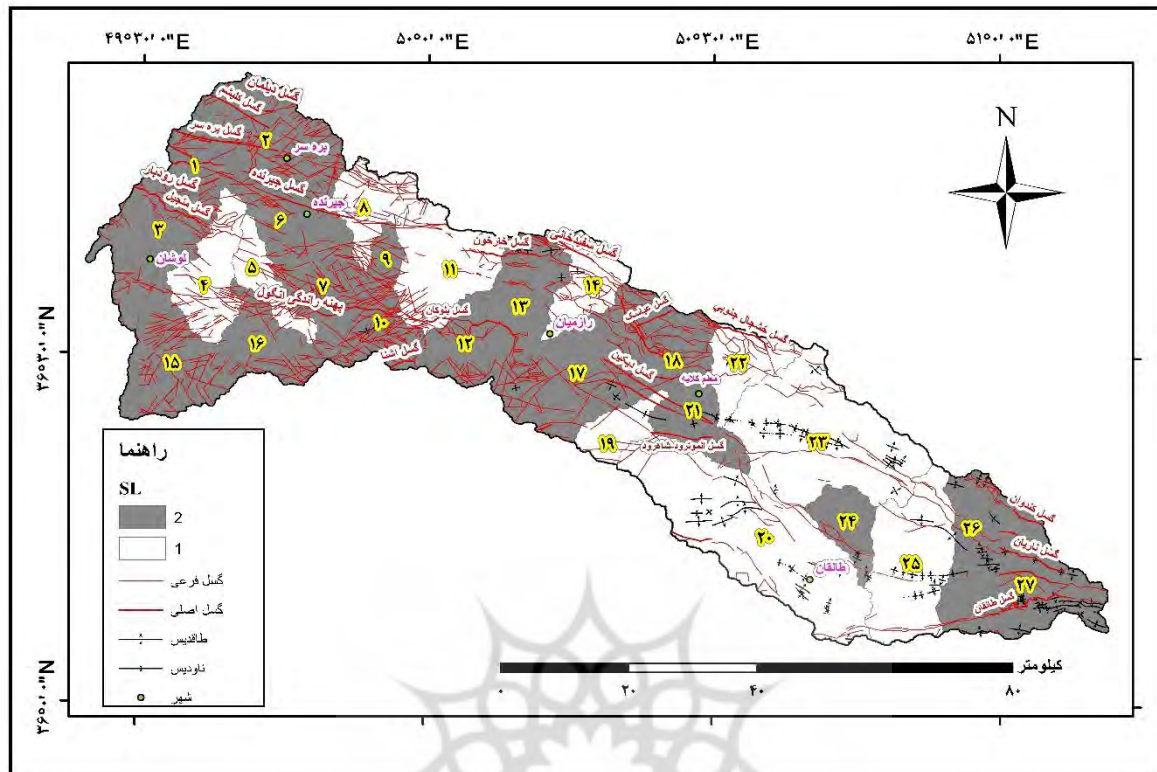
شاخص گرادیان طولی رود برای ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی ابزار مفیدی است. این شاخص همچنین ارتباط بین فرسایش و جریان رودخانه را مشخص می‌کند و با قدرت رود نیز ارتباط دارد (هک^۲، ۱۹۷۳: ۴۲۱-۴۲۹). این شاخص از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$SL = (\Delta H / \Delta L_r) L_{sc} \quad (11)$$

در رابطه بالا SL گرادیان طولی رود، ΔH اختلاف ارتفاع بین دو تراز کنتور، ΔL_r فاصله بین دو تراز روی طولانی‌ترین آبراهه، $(\Delta H / \Delta L_r)$ گرادیان مسیر کانال رود و L_{sc} طول کلی کانال رودخانه از نقطه‌ای که این شاخص محاسبه می‌شود تا مرتفع‌ترین نقطه کانال است. هنگامی که رودخانه و آبراهه‌ها در نواحی با نرخ بالآمدگی زیاد جریان دارند، مقدار SL افزایش می‌یابد. برای محاسبه این شاخص از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر در امتداد هر مسیر جریان در نرم افزار Arc GIS 10.1 برای تمامی حوضه‌ها استفاده شده است و همچنین لایه توپوگرافی تهیه گردید و با استفاده از طولانی‌ترین آبراهه موجود در هر حوضه، در هر قسمت داده‌های مورد نیاز به دست آمد. در نهایت میانگین مقادیر این شاخص برای هر حوضه محاسبه شد. مقادیر میانگین حوضه‌ها به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی در ۲ رده طبقه‌بندی شده است: رده ۱ با مقادیر ۹۵۰ و بیش‌تر ($SL \geq 950$) که نشانگر فعالیت زمین‌ساختی بالاست و رده ۲ با مقادیر ۵۰۰ تا ۹۵۰ ($500 < SL < 950$) که فعالیت زمین‌ساختی متوسط را نشان می‌دهد (شکل ۱۱). به دلیل نرخ بالا آمدگی بالای منطقه، گستره مورد مطالعه فاقد رده ۳ ($SL > 500$) می‌باشد. در گستره مورد مطالعه، حوضه ۲۰ بیشترین مقدار شاخص SL را نشان می‌دهد که ناشی از عملکرد گسل‌های طالقان، الموت رود-شاهرود و همچنین چین خوردگی‌های موجود می‌باشد. همچنین حوضه‌های ۱۴ و ۱۱ نیز نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی بالایی هستند که ناشی از عملکرد گسل‌های سفیدخانی و خارخون است که به صورت عرضی طولانی‌ترین آبراهه موجود در این حوضه را بریده‌اند (جدول ۱). در حوضه ۸ فعالیت گسل جیرنده، حوضه ۹ فعالیت گسل الموت رود-شاهرود و در حوضه ۲۵ فعالیت گسل طالقان، موجب شده طولانی‌ترین آبراهه‌های موجود در حوضه توسط گسل‌های مذکور قطع شده و موجب ایجاد آنومالی در آبراهه‌ها و فعالیت بالای زمین-ساختی مربوط به شاخص گرادیان طولی رود شود.

¹. Longitudinal gradient index

². Hack



شکل ۱۱: نقشه رده بندی شاخص گرادیان طولی رود در گستره مطالعاتی

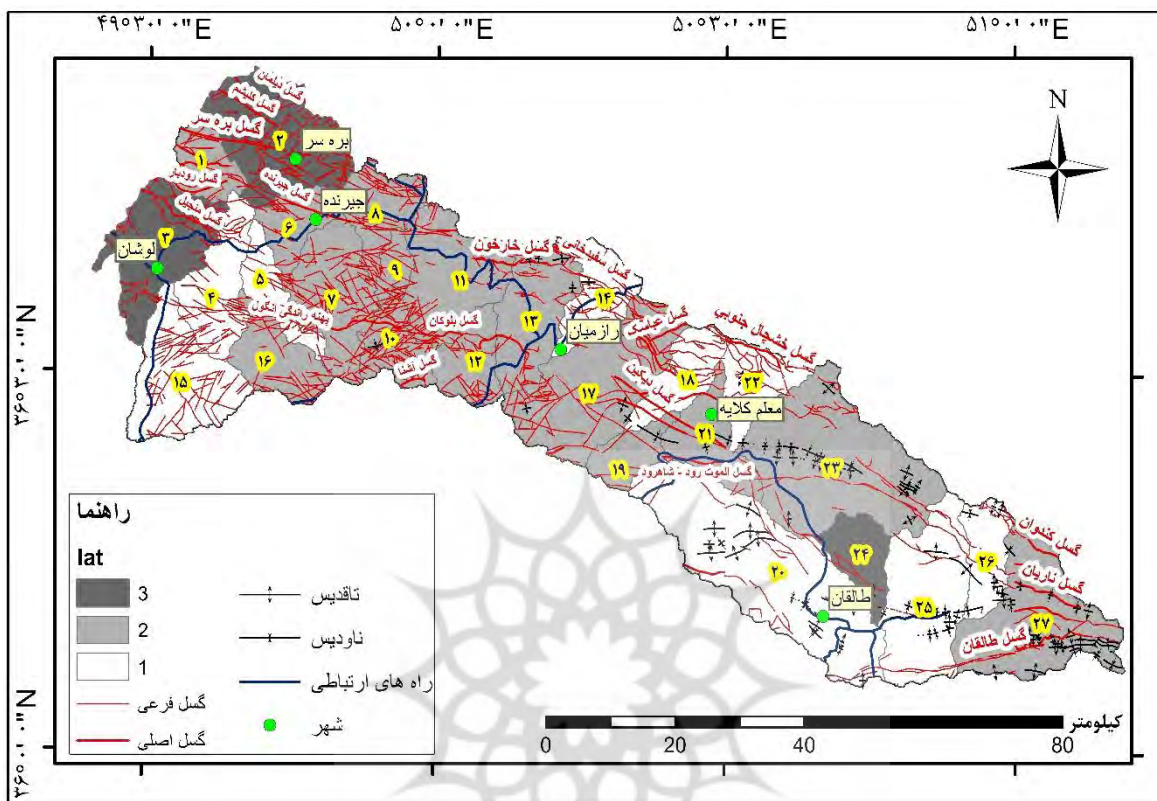
شاخص زمین ساخت فعال نسبی^۱ (Iat)

در این پژوهش برای بررسی فعالیت زمین ساختی گستره مورد مطالعه از چند شاخص مورفومتری استفاده شده است که شامل شاخص های ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، انشعابات (R)، انتگرال و منحنی فرازسنجی (Hi)، برجستگی نسبی (Bh)، تراکم زهکشی (Dd)، ضریب شکل (Ff) و گرادیان طولی رود (SL) می باشند. هر یک از این شاخص ها به ۳ رده فعالیت زمین ساختی پایین تا فعالیت زمین ساختی بالا تقسیم بندی شدند. در نهایت برای هر حوضه با میانگین گیری از رده کل شاخص ها (S/n)، شاخص زمین ساخت فعال نسبی (Iat) محاسبه شد. این شاخص نیز با توجه به نظر الحمدونی و همکاران^۲ (۲۰۰۸) در ۴ رده توزیع شده است: رده ۱ زمین ساخت فعال نسبی ($1 \geq Iat > 1/5$) که نشان دهنده فعالیت زمین ساختی بسیار بالا، رده ۲ زمین ساخت فعال نسبی ($2 \geq Iat > 1/5$) که نشان دهنده فعالیت زمین ساختی بالا، رده ۳ زمین ساخت فعال نسبی ($2/5 \geq Iat > 2$) که نشان دهنده فعالیت زمین ساختی متوسط و رده ۴ زمین ساخت فعال نسبی ($Iat \geq 2/5$) که نشان دهنده فعالیت زمین ساختی پایین می باشد. با توجه به این که بیشترین مقدار این شاخص در منطقه مورد مطالعه ۲/۱۴ می باشد، رده ۴ طبقه بندی در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد که نشان از نبود فعالیت پایین در منطقه است. نقشه پهنه بندی فعالیت زمین ساختی در گستره مورد مطالعه تهیه شد (شکل ۱۲). نتایج حاصل از این شاخص نشان می دهد که بیش از نیمی از مساحت حوضه های آبریز رده ۲ فعالیت زمین ساختی را دارا هستند. فعالیت گسل های واقع در گستره مورد مطالعه از جمله سفیدخانی، طالقان، الموت رود-شاهرود، خشچال، انگول، منجیل، جیرنده، رودبار، بلوکان،

1. Relative tectonic activity index

2. El Hamdouni et al

خارخون، جیرنده و رودبار موجب شده که این منطقه دارای فعالیت زمین‌ساختی نسبی اخیر باشد که مشاهدات صحرایی نیز این موضوع را تایید می‌کند.



شکل ۱۲: نقشه توزیع سطح فعالیت زمین‌ساختی نسبی (Iat) در گستره مطالعاتی.

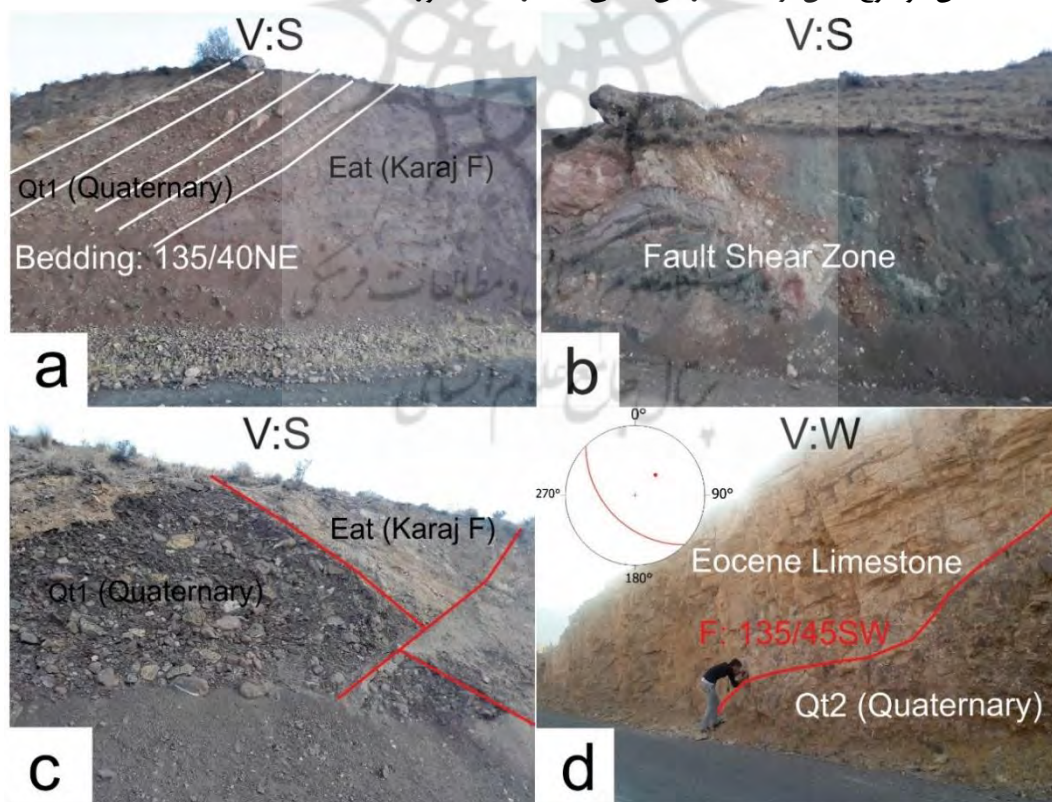
جدول ۱: مقادیر هفت شاخص اندازه‌گیری شده و سطح فعالیت زمین‌ساختی در گستره مورد مطالعه.

Basin no.	Δa	R	H i	B h (m)	Dd (Km ⁻¹)	F f	S L	Ia t	Ia t class
۱	.۵۳	.۵۲	-۰/۵۱۸۳۷	۲۱۲۲	-۰/۶۷۱۶۹۵	۰/۳۰۵۰۹	۸۲۱/۸۸	۱/۷۱	۲
۲	۰/۹۸	۰/۴۸	-۰/۴۸۲۸۷	۲۴۵۲	-۰/۸۲۲۰۵۶	۰/۳۵۴۶۵	۸۲۱/۰۲	۲/۱۴	۳
۳	۵/۱۴	۱/۶۹	-۰/۲۷۹۳۵	۲۱۱۲	۰/۹۰۱۸۳۹	۰/۴۲۳۰۴	۶۸۷/۷۵	۲	۳
۴	۵/۰۵	۱/۳۷	-۰/۳۳۰۱۷	۲۰۰۸	۰/۷۸۱۰۷۷	۰/۲۱۲۴۱	۱۰۴۰/۹۶	۱/۲۹	۱
۵	۴/۸۱	۱/۶۷	-۰/۳۷۲۹۹	۱۸۷۴	-۰/۷۴۷۸۸	۰/۱۸۵۶۴	۱۰۶۳/۳۲	۱/۴۳	۱
۶	۰/۶۱	۰/۲۴	-۰/۵۸۶۳۱	۱۸۲۵	۰/۷۹۲۶۹۳	۰/۲۵۱۸۴	۵۴۸/۸۵	۱/۸۶	۲
۷	۳/۷۷	۱/۷۶	-۰/۳۶۳۴۱	۲۰۳۹	۰/۷۷۳۷۵۴	۰/۳۹۵۹۴	۶۶۱/۴	۱/۷۱	۲
۸	۰/۶۱	۰/۶۱	-۰/۵۸۴۶۷	۱۸۹۷	۰/۸۱۱۳۳۹	۰/۲۴۶۰۵	۹۶۲/۳۵	۱/۵۷	۲
۹	۶/۹۱	۱/۲۵	-۰/۳۶۹۲۵	۱۶۳۳	-۰/۸۲۴۸۸۹	۰/۲۸۳۹۶	۷۵۸/۶۲	۱/۸۶	۲
۱۰	۰/۳	۰/۶۹	-۰/۵۶۹۳۲	۱۸۹۷	-۰/۷۲۷۴۳	۰/۲۷۴۷۹	۸۳۲/۸۲	۱/۸۶	۲
۱۱	۴/۲۶	۰/۹۳	-۰/۳۶۹۵۶	۲۳۴۶	۰/۸۳۵۴۶۸	۰/۴۴۸۹۱	۱۱۴۹/۳۷	۱/۸۶	۲
۱۲	۱/۱۷	۰/۵۵	-۰/۴۸۳۲۷	۱۸۸۳	۰/۱۵۷۰۴۱	۰/۲۹۱۶۸	۷۹۵/۹۵	۱/۷۱	۲
۱۳	۴/۴۷	۱/۰۱	-۰/۳۴۲۲۷	۲۵۹۲	۰/۸۴۳۹۹۶	۰/۴۱۵۷۲	۷۶۸/۲۶	۱/۸۶	۲
۱۴	۱/۰۲	۱/۳۵	-۰/۵۰۴۷۲	۲۵۵۲	۰/۷۳۲۰۷۷	۰/۱۶۳۶۹	۱۷۱۲/۱۴	۱	۱
۱۵	۳/۳	۱/۳۷	-۰/۵۱۷۳۹	۱۷۵۳	۰/۷۵۲۴۰۶	۰/۲۴۳۸۴	۹۳۳/۵۹	۱/۲۹	۱

۱۶	۱/۱۵	۰/۹	۰/۵۵۲۶۴	۱۸۳۳	۰/۷۲۵۹۷۹	۰/۲۸۴۸۱	۶۲۳/۰۱	۱/۵۷	۲
۱۷	۳/۹۹	۱/۹۱	۰/۳۰۹۶۶	۲۷۳۲	۰/۸۰۳۶۸۱	۰/۳۴۷۰۲	۸۹۸/۳۷	۱/۸۶	۲
۱۸	۱/۱	۱/۰۹	۰/۴۰۳۱۷	۲۸۹۷	۰/۶۰۷۶۲۹	۰/۲۰۰۲۱	۹۱۴/۸۶	۱/۲۹	۱
۱۹	۶/۳۴	۱/۱۴	۰/۴۳۱۸۹	۱۵۴۹	۰/۷۱۴۵۵۴	۰/۴۱۴۵۲	۱۰۲۵/۸۶	۱/۵۷	۲
۲۰	۲/۵۴	۱/۳	۰/۴۵۸۲۴	۲۲۶۳	۰/۷۷۴۴۴۶	۰/۱۸۱۱۴	۲۰۹۱/۲۷	۱/۱۴	۱
۲۱	۲/۲۸	۰/۷۲	۰/۳۲۸۱۵	۲۲۵۲	۰/۸۶۱۳۰۴	۰/۲۸۶۹۱	۷۹۴/۴۱	۱/۸۶	۲
۲۲	۰/۸۷	۰/۶۵	۰/۴۸۲۹۱	۲۶۶۳	۰/۶۹۹۶	۰/۲۴۸۲۳	۱۰۸۲/۹	۱/۴۳	۱
۲۳	۰/۷۱	۱/۰۳	۰/۴۵۲۶۵	۲۸۸۳	۰/۷۵۸۶۲۲	۰/۳۱۳۸۳	۱۰۶۳/۰۲	۱/۵۷	۲
۲۴	۰/۳۱	۰/۲۲	۰/۴۱۶۳۳	۲۲۹۴	۰/۷۵۰۹۳۸	۰/۲۵۸۸۴	۷۸۵/۴۲	۲	۳
۲۵	۱/۷۷	۱/۱۶	۰/۳۵۳۲۸	۲۲۵۶	۰/۷۳۸۶۸۶	۰/۲۶۲۹۸	۱۱۰۰/۷	۱/۴۳	۱
۲۶	۱/۲۹	۱/۱۴	۰/۴۰۵۲۸	۲۳۸۶	۰/۷۴۵۶۰۱	۰/۲۰۱۷۶	۶۷۹/۴۱	۱/۲۹	۱
۲۷	۰/۷۶	۰/۸۲	۰/۴۰۶۸۳	۲۲۰۵	۰/۷۰۷۱۴۳	۰/۳۲۰۸۲	۵۶۳/۲۲	۱/۸۶	۲

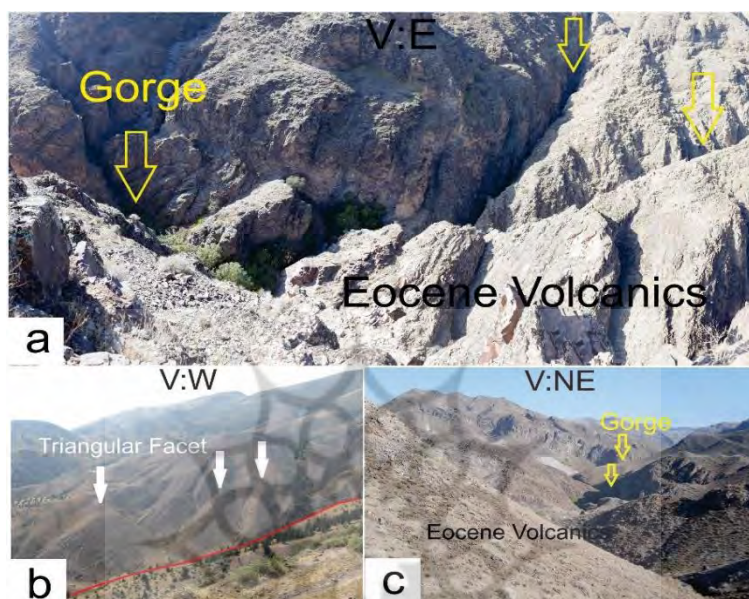
مطالعات صحرایی

بر اساس مطالعات صحرایی، کج شدگی لایه های جوان و گسلش نهشته های کواترنری موید فعالیت منطقه طی کواترنری می باشد (شکل ۱۳). در گستره مطالعاتی با مشاهده لایه های جوان کج شده در مناطق مختلف و با توجه به این که در حالت عادی لایه های جوان باید افقی باشند، می توان به قطعیت در مورد فعالیت کنونی زمین ساختی اظهار نظر کرد. از سوی دیگر در مجاورت گسل های منجیل، جیرنده، انگول، الموت رود، دیکین و خشچال واحدهای کواترنری به کرات تحت تاثیر گسلش قرار گرفته اند که این موضوع نشان گر فعالیت زمین ساختی بالا در منطقه مورد مطالعه است.

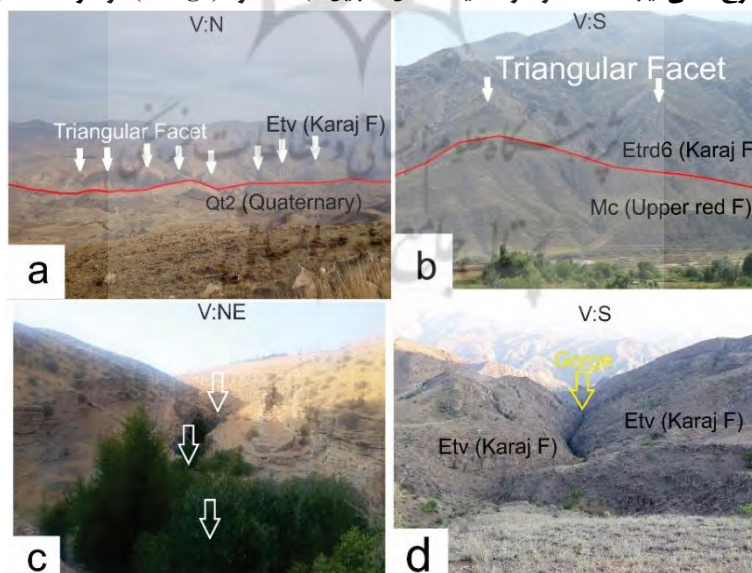


شکل ۱۳: دگرشکلی های ایجاد شده در واحدهای کواترنری. (a) کج شدگی واحدهای پادگانه ابرفتی تحت تاثیر فعالیت گسل انگول و نهشته شدن آن ها به صورت دگرشیب بر روی سازند کرج، (b) پهنه برشی گسل با حدود ۲۰ متر عرض در حوضه شماره ۱۱، (c) گسلش در پادگانه ابرفتی و راندگی سازند کرج بر روی آن در حوضه شماره ۷، (d) گسلش در واحدهای کواترنری تحت تاثیر گسل جیرنده.

فعالیت زمین‌ساختی نسبی بسیار بالا و بالا در منطقه مورد مطالعه به خوبی با لندفرم‌های فعال مانند رودشکن‌های^۱ گسلی در مسیر رودخانه‌ها، دره‌های V شکل، دره‌های تنگ (Gorge) در امتداد گسل، سطوح مثلثی و پادگانه‌های آبرفتی مرتفع همخوانی دارد (شکل ۱۴ و ۱۵). گسل منجیل یکی از شاخص‌ترین گسل‌ها از نظر فعالیت زمین‌ساختی اخیر در منطقه مورد مطالعه است که بخش شرقی این گسل فعالیت بالایی را نشان می‌دهد و شواهد صحرایی برداشت شده از منطقه نیز تایید کننده نتایج به دست آمده می‌باشد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: لندفرم‌های مرتبط با فعالیت زمین‌ساختی گسل منجیل. (a) تنگ‌دره (Gorge) و حفر عمیق رودخانه در حوضه شماره ۵ (b) سطوح مثلثی ایجاد شده در اثر فعالیت گسل منجیل (c) تنگ‌دره (Gorge) در حوضه شماره ۷



شکل ۱۵: لندفرم‌های مرتبط با فعالیت زمین‌ساختی اخیر در منطقه. (a) سطوح مثلثی مربوط به حوضه شماره ۱۲ تحت تاثیر فعالیت گسل منجیل و راندگی سازند کرج بر روی سازند قرمز بالایی بر اثر فعالیت گسل شاهرود (c) دره عمیق و تنگ در حوضه شماره ۸ که دارای رودشکن و نشان‌گر فعالیت گسل جیرنده است. (d) حفر قائم رودخانه در حوضه شماره ۱۲.

^۱. Knickpoint

با توجه به نقشه پهنه‌بندی زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat)، بالا بودن مقادیر شاخص‌های مورفومتری در حوضه‌هایی که تحت تاثیر گسل‌های منجیل، رودبار، الموت‌رود-شاهرود، جیرنده و طالقان قرار گرفته‌اند، لندفرم‌های فعال و زمین‌لرزه‌های رخ داده در اثر عملکرد گسل‌های موجود در منطقه را می‌توان تاییدی برای فعالیت بالا و خیلی بالای زمین‌ساختی حوضه‌های شاهرود، طالقان رود و الموت رود دانست. از مهمترین زمین‌لرزه‌های رخ داده در گستره مورد بررسی میتوان به زلزله ۲۰ جون ۱۹۹۰ رودبار با بزرگی $M_w=7/3$ اشاره کرد که بزرگترین زمین‌لرزه دستگاهی ثبت شده در البرز می‌باشد و بر روی گسل رودبار و جیرنده رخ داده است. همچنین زمین‌لرزه ۱۵ آگوست ۱۴۸۵ پلرود با بزرگی $M_s=7/2$ و زمین‌لرزه ۲۰ آوریل ۱۶۰۸ الموت‌رود با بزرگی $M_s=7/6$ بر اثر عملکرد گسل‌های کلیشم و الموت‌رود از زمین‌لرزه‌های ثبت شده تاریخی در این منطقه می‌باشند (بربریان و واکر^۱، ۲۰۱۰: ۱۵۷۷-۱۶۰۲). از سایر زمین‌لرزه‌های تاریخی منطقه می‌توان به زلزله ۲۳ فوریه ۹۵۸ طالقان با بزرگی $M_s=7/7$ در اثر گسل طالقان، زلزله ۹ ژانویه ۱۹۰۵ درام با بزرگی $M_s=6/2$ در اثر گسل منجیل و زلزله ۱۶ دسامبر ۱۸۰۸ طالقان با بزرگی $M_s=5/9$ در اثر گسل الموت‌رود اشاره کرد (امبرسیس و ملویل^۲، ۲۰۰۵: ۱۰۷). در کل میتوان اذعان کرد که حوضه‌هایی که تحت تاثیر گسل‌های فعال منطقه قرار گرفته‌اند از لحاظ زمین‌ساختی به شدت فعال هستند و مناطق مسکونی واقع در شهرهای طالقان، معلم کلايه، رازمیان و جیرنده و همچنین روستاهایی واقع در مناطق فعال زمین‌ساختی، در معرض خطر زمین‌لرزه قرار دارند.

بحث

در مناطق مختلف جهان پژوهش‌های زیادی با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی انجام شده که می‌توان به فیگورا و همکاران^۳ (۲۰۱۰) در جنوب نوادای کالیفرنیا، ملوش و کلر^۴ (۲۰۱۳) در کمربند چین‌خورده سانتا باربارا کالیفرنیا، یمانی و همکاران (۱۳۹۱) در مخروطه افکنه‌های شمال دامغان، بهیاری و همکاران (۱۳۹۵) کمپلکس میشو در شمال باختر ایران اشاره کرد. با توجه به شاخص‌های مورفومتری محاسبه شده در این پژوهش و تلفیق نتایج به دست آمده از این شاخص‌ها با مطالعات صحرائی نتایج زیر حاصل شده است:

گسل‌های جیرنده، دیکین، منجیل و انگول تاثیر زیادی در ناهنجاری سلسله‌مراتبی و انشعابات ایجاد کرده‌اند که نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی کنونی و تاثیر آن‌ها بر انشعابات رودخانه می‌باشد. همچنین در حوضه‌هایی که تحت تاثیر گسل‌های طالقان، الموت‌رود-شاهرود و عباسک قرار دارند نیز شاخص‌های سلسله‌مراتبی و انشعابات مقادیر بالایی نشان می‌دهند (شکل‌های ۳، ۴ و ۵). با توجه به نقشه پهنه‌بندی بر اساس شاخص انتگرال فرازسنجی بیشترین فعالیت زمین‌ساختی در حوضه‌هایی دیده می‌شود که گسل‌های جیرنده، رودبار و انگول دارای بیشترین تاثیر در آن‌ها می‌باشند (شکل ۷). شاخص برجستگی نسبی در حوضه‌هایی از گستره مورد بررسی که تحت تاثیر گسل‌هایی نظیر خشچال، دیکین، الموت‌رود-شاهرود، سفیدخانی و طالقان و نیز چین‌های متعدد هستند، بیانگر نرخ بالآمدگی بیشتر به دلیل فعالیت زمین‌ساختی بیشتر در این محدوده است (شکل ۸). در مطالعه شاخص تراکم زهکشی در منطقه، بیشترین فعالیت در حوضه‌های جنوبی و شرقی اندازه‌گیری و مشاهده شده است که با ساختارهای زمین‌ساختی موجود در این مناطق نظیر گسل‌های انگول، طالقان، ناریان، بلوکان، دیکین، قسمت شرقی گسل منجیل و جیرنده همخوانی نشان می‌دهد (شکل ۹). از آنجا که حوضه‌های با کشیدگی بیشتر نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی بالاتر می‌باشد، بررسی شاخص ضریب شکل نشان می‌دهد حوضه‌هایی که ناشی از عملکرد گسل‌های منطقه همچون سفیدخانی، طالقان، دیکین، خشچال، الموت‌رود-شاهرود و انگول هستند، فعالیت

1. Berberian and Walker

2. Ambraseys and Melville

3. Figueroa et al

4. Melosh and Keller

بالتری را نشان می‌دهند (شکل ۱۰). در بررسی شاخص گرادیان طولی رود (SL)، در مناطقی که گسل‌ها آبراهه‌های موجود در حوضه را قطع کرده‌اند آنومالی‌هایی در شیب رودها مشاهده شده است. به این صورت که در محل برخورد گسل رود دستخوش تغییر شده و شیب آن افزایش یافته است. به طور مثال گسل منجیل در مناطقی که به آبراهه حوضه ۴ برخورد کرده، گرادیان طولی را افزایش داده است. در حوضه ۸ آبراهه‌هایی که در مسیر خود به گسل جیرنده برخورد کرده‌اند نیز عدد بالایی از این شاخص در محل برخورد نشان می‌دهند. در حوضه‌های ۸ و ۱۴ به علت عملکرد گسل سفیدخانی، در محل تلاقی گسل با آبراهه شاهد افزایش شاخص گرادیان طولی هستیم. مسیر آبراهه اصلی در حوضه‌های ۵، ۷ و ۱۰ به دلیل فعالیت گسل انگول دچار تغییرات شیب شده است. همچنین در حوضه ۲۰ در محل تلاقی گسل طالقان با آبراهه شاهد تغییر در مقدار گرادیان طولی هستیم. طبق شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat)، گستره مورد مطالعه سطح فعالیت زمین‌ساختی متوسط، بالا و بسیار بالا را نشان می‌دهد. این مناطق با چشم‌اندازهای فعال به دست آمده از عملیات صحرایی مطابقت دارند و شواهد صحرایی تطابق خوبی با توزیع فعالیت زمین‌ساخت نسبی محاسبه شده در پهنه‌های گسلی منطقه نشان می‌دهند. بر پایه نقشه پهنه‌بندی زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat)، بخش‌های وسیعی از منطقه فعالیت زمین‌ساخت کنونی خیلی بالایی نشان می‌دهند که این وضعیت به دلیل فعالیت گسل‌هایی نظیر منجیل، انگول، طالقان، سفیدخانی، الموت‌رود-شاهرود، دیکین و خشچال می‌باشد (شکل ۱۲). رده ۲ فعالیت زمین‌ساختی اخیر در منطقه نیز حاکی از فعالیت و جابجایی در گسل‌های رودبار، جیرنده، خارخون، بلوکان و ناربان می‌باشد. گسل دیلمان از مزوزویک تا کواترنری رخدادهای متفاوتی از فعالیت و مکانیسم را داشته است و در زمان تئوزن هم فعال بوده است (حکیمی آسیابر و باقریان، ۲۰۱۸).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ارزیابی میزان فعالیت نو زمین‌ساختی با استفاده از هفت شاخص ریخت‌سنجی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، شاخص انشعابات (R)، انتگرال و منحنی فرازسنجی (Hi)، برجستگی نسبی (Bh)، تراکم زهکشی (Dd)، ضریب شکل (Ff) و شاخص گرادیان طولی رود (SL) در حوضه‌های آبریز شاهرود، طالقان رود و الموت رود به انجام رسید. علاوه بر ایران، در مناطق مختلف جهان نیز پژوهش‌های زیادی با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی جهت تعیین مناطق فعال از لحاظ زمین‌ساختی انجام شده است. تعیین مناطق فعال به ما کمک می‌کند که بتوانیم تا حدود زیادی از خسارات ناشی از بلایای طبیعی مانند سیل و زلزله جلوگیری کنیم. با توجه به نتایج حاصل از محاسبه کمی شاخص‌ها میتوان گفت هر چه گستره مورد بررسی از لحاظ زمین‌ساختی فعال‌تر باشد، دارای مقادیر عددی بیشتر شاخص‌های Δa ، R، Bh، Hi، Dd و SL و مقدار کمتر شاخص Ff می‌باشد. نتایج حاصل از نقشه پهنه‌بندی شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) نشان می‌دهد که به طور کلی فعالیت زمین‌ساختی نسبی اخیر در بیشتر حوضه‌های گستره مورد مطالعه بالا و بسیار بالاست، به طوری که فقط حوضه‌های ۲، ۳ و ۲۴ دارای فعالیت متوسط بوده و سایر حوضه‌ها فعالیت بالا و بسیار بالا را نشان می‌دهند. در حدود ۳۵ درصد (۱۷۴۸ کیلومتر مربع) از گستره مطالعاتی فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا و حدود ۵۳ درصد (۲۶۸۴ کیلومتر مربع) فعالیت زمین‌ساختی بالا را دارا می‌باشد که بیان‌گر فعالیت نو زمین‌ساختی اخیر ساختارهای موجود در منطقه می‌باشد. از شواهد صحرایی فعالیت بالای این منطقه میتوان به کج‌شدگی واحدهای پادگانه آبرفتی در حوضه ۱۶ به دلیل فعالیت گسل انگول و نهشته شدن آن‌ها به صورت دگرشیب بر روی سازند کرج، پهنه برشی گسل در حوضه شماره ۱۱ به دلیل فعالیت بخش‌هایی از گسل‌های خارخون و بلوکان، گسلش در واحدهای کواترنری در حوضه‌های ۱، ۶ و ۸ تحت تاثیر فعالیت گسل جیرنده، تنگ‌دره (Gorge) و سطوح مثلثی ایجاد شده در حوضه شماره ۵ به دلیل فعالیت گسل منجیل اشاره کرد. عملکرد سایر گسل‌های فعال موجود در منطقه از قبیل گسل‌های سفیدخانی، دیکین، طالقان، الموت‌رود-

شاهرود، خشچال و گسل رودبار نیز موجب ایجاد لندفرم‌های زیادی در منطقه شده است که نشان‌دهنده فعالیت بالای این منطقه می‌باشد. نتایج حاصل از محاسبه کمی شاخص‌های ریخت‌سنجی و تجزیه و تحلیل آن‌ها با گسل‌های واقع در منطقه، زمین‌لرزه‌های رخ داده در گستره مطالعاتی، مطالعات صحرایی، ایجاد لندفرم‌های مختلف و گسلش در واحدهای کواترنری فعالیت زمین‌ساختی اخیر بالا و بسیار بالای این منطقه را تایید می‌کند.

منابع

- بابایی، س.، قرشی، م.، پورکرمانی، م.، حاجی حسینلو، ح.، بوذری، س.، ۱۳۹۸. بررسی فعالیت زمین‌ساختی با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی و *GIS* در حوضه‌های ناحیه مراغه (آذربایجان خاوری، شمال باختر ایران)، فصلنامه کواترنری ایران، دوره ۵، شماره ۱، صص ۴۵-۲۷.
- بهرامی، ش.، ۱۳۹۴. تحلیل کمی ناهنجاری سلسله مراتبی شبکه زهکشی و ارتباط آن با تکتونیک، مطالعه موردی: ۱۰ حوضه آبخیز زاگرس، فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۶، شماره ۱، صص ۳۴-۱۵.
- بهیاری، م.، محجل، م.، مؤید، م.، رضائیان، م.، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر تغییرات منطقه‌ای برافرازش بر شاخص‌های ژئومورفیک: کمپلکس میشو در شمال باختر ایران، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، دوره ۱۰، شماره ۳۸، صص ۵۳-۳۹.
- جباری، ن.، ثروتی، م.ر.، حسین‌زاده، م.م.، ۱۳۹۱. مطالعه مورفوتکتونیک فعال حوضه آبخیز حصارک (شمال غرب تهران) با استفاده از شاخص‌های مورفومتریکی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱، شماره ۲، صص ۱۷-۳۴.
- حاجی کریمی، ز.، شایان، س.، خوش رفتار، ر.، ۱۳۹۹. ارزیابی تکتونیک فعال حوضه آبریز کرگانرود در دامنه شرقی تالش (بغرداغ)، با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۱، صص ۲۳۶-۲۱۷.
- رابطی، د.، ده بزرگی، م.، حکیمی اسپابر، س.، نوزعیم، ر.، ۱۳۹۷. بررسی زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در حوضه سپیدرود، البرز غربی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۷، شماره ۲، صص ۱۴۰-۱۵۷.
- شفیعی، آ.، عباسی، ز.، تاجبخش، س. م.، موسوی، س. م.، معاریان، ه.، ۱۳۹۹. بررسی زمین‌ساخت فعال در شمال حوزه آبخیز دشت بیرجند با استفاده از فاکتورهای مورفومتریکی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۹، شماره ۱، صص ۱۳۳-۱۱۷.
- علی‌پور، ر.، صدر، ا.ح.، نظری دبیر، ح.، قمریان، س.، ۱۳۹۷. ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی کوه‌های گرین با استفاده از شاخص‌های مورفومتری و تحلیل الگوی فرکتالی (نهاد، باختر ایران). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۷، شماره ۳، صص ۳۱-۵۶.
- یمانی، م.، مقصودی، م.، قاسمی، م. ر.، محمدنژاد، و.، ۱۳۹۱. شواهد مورفولوژیکی و مورفومتریکی تأثیر تکتونیک فعال بر مخروطه افکنه‌های شمال دامغان، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۴، شماره ۲، صص ۱-۱۸.
 - Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M., Qorashi, M. (2003). Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Ira. *Journal of Structural Geology*, 25(5), pp. 659-672.
 - Ambraseys, N.N., & Melville, C.P. (2005). *A history of Persian earthquakes*. Cambridge university press, pp. 107.

- Avena, G.V.C., Giuliano, G., Lupia Palmieri, E. (1967). Sulla valutazione quantitativa della gerarchizzazione ed evoluzione dei reticoli fluviali. *Bollettino della Societa Geologica Italiana*, 86(8), pp. 781–796.
- Berberian, M., & Walker, R. (2010). The Rudbār Mw 7.3 earthquake of 1990 June 20; seismotectonics, coseismic and geomorphic displacements, and historic earthquakes of the western (High-Alborz), Iran. *Geophysical Journal International*, 182(3), pp. 1577–1602.
- Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., Pugliese, F. (1986). Indirect evaluation of erosion entity in drainage basins through geomorphic, climatic and hydrological parameters. *International Geomorphology*, 2(3), pp. 33–48
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., Keller, E.A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), pp. 150–173.
- Figueroa, A., Jeffrey, M., Knott, R. (2010). Tectonic geomorphology of the southern Sierra Nevada Mountains (California), Evidence for uplift and basin formation. *Geomorphology*, 123(1-2), pp. 34- 45.
- Fossen, H. (2016). *Structural Geology*. Cambridge University Press, pp. 481.
- García Delgado, H., & Velandia, F. (2020). Tectonic geomorphology of the Serranía de San Lucas (Central Cordillera), Regional implications for active tectonics and drainage rearrangement in the Northern Andes. *Geomorphology*, 349(4), pp. 106914.
- Guarnieri, P., & Pirrotta, C. (2008). The Response of Drainage Basins to the Late Quaternary Tectonics in the Sicilian Side of the Messina Strait (NE Sicily). *Geomorphology*, 95(3-4), pp. 260- 273.
- Hack, J.T. (1973). Stream-profiles analysis and stream-gradient index, *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 1(4), pp. 421–429.
- Hakimi Asiabar, S., & Bagheriyan, S. (2018). Exhumation of the Deylaman fault trend and its effects on the deformation style of the western Alborz belt in Iran. *International Journal of Earth Sciences*, 107(2), pp. 539-551.
- Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), pp. 275- 370.
- Keller, E.A. (1986). Investigation of active tectonics: use of surficial Earth processes, *Active Tectonics, Studies in Geophysics*. National Academy Press, Washington, DC, pp. 136-147.
- Keller, E.A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape (2ndEd.)*. Prentice Hall, New Jersey, pp. 362.
- Maathuis, B.H.P., & Wang, L. (2006). Digital elevation model based hydro-processing. *Geocarto International*, 21(1), pp. 21-26.
- Mayer, L. (1990). *Introduction to quantitative geomorphology: an exercise manual*. Prentice-Hall International, Inc, pp. 271.
- Melosh, B.L., & Keller, E.A. (2013). Effects of active folding and reverse faulting on stream channel evolution, Santa Barbara Fold Belt, California. *Journal of Geomorphology*, 186(6), pp. 119-135.
- Ngapna, M.N., Owona, S., Owono, F.M., Ateba, C.B., Tsimi, V.M., Ondoa, J.M., Ekodeck, G.E. (2020). Assessment of relative active tectonics in Edea–Eseka region (SW Cameroon, Central Africa). *Journal of African Earth Sciences*, 164(5), pp. 103798.
- Singh, O.M. (2009). Hypsometry and erosion proneness: a case study in the lesser Himalayan Watersheds. *Journal of Soil and Water conservation*, 8(2), pp. 53- 59.
- Singh, P., Gupta, A., Singh, M. (2014). Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 17(2), pp. 111- 121.

- *Strahler, A.N. (1952). Hypsometric (area–altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, 63(11), pp. 1117–1142.*
- *Strahler, A.N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, pp. 4-39.*
- *Walker, R.T. (2006). A remote sensing study of active folding and faulting in southern Kerman province, S.E. Iran. Journal of Structural Geology, 28(4), pp. 654-666.*

