

تکتونیک ژئومورفولوژی جنوب‌خاوری اردبیل، البرز غربی

نسیم رضانی - کارشناس ارشد تکتونیک، دانشگاه خوارزمی تهران.
سعید حکیمی آسیابار* - استادیار دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد واحد لاهیجان.
مریم ده‌بزرگی - استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران.
رضا نوزعیم - استادیار دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران.
حامد علیانپور - کارشناس ارشد تکتونیک، دانشگاه خوارزمی تهران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۱ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۵/۱۴

چکیده

یکی از روش‌های بررسی حرکات زمین‌ساخت فعال، استفاده از اطلاعات ریخت‌زمین‌ساخت است. در بررسی زمین‌ساخت پویا، تکتونیک ژئومورفولوژی دانشی بسیار ارزشمند است که می‌تواند تاثیر تکتونیک فعال را بر مورفولوژی سطحی زمین مشخص نماید. ایران به دلیل قرارگیری در کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا یکی از مناطق فعال زمین می‌باشد؛ کمربند کوهزایی البرز نیز بخشی از این منطقه است و قرارگیری گسترده مورد مطالعه در بخش باختری البرز غربی و آذربایجان باعث شده است که این ناحیه تحت تاثیر فرآیندهای زمین‌ساختی حاصل از این برخورد باشد. در این مطالعه به منظور ارزیابی میزان فعالیت تکتونیک حوضه قزل اوزن در استان‌های اردبیل، زنجان و گیلان، تعداد ۵۰ حوضه آبریز به همراه طولانی‌ترین مسیر احتمالی عبور رودخانه‌ها آن‌ها در محیط ArcGIS10.1، استخراج گردید و سپس شاخص‌های ژئومورفیک ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، انشعابات (R)، گرادیان طولی رود (SL)، شکل حوضه زهکشی (Bs)، محاسبه شده و در نهایت با تلفیق شاخص‌های مزبور، با استفاده از شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat)، گستره مورد مطالعه به چهار رده فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا، بالا، متوسط و کم طبقه‌بندی شده است. بر اساس مقادیر حاصل شده از محاسبات شاخص‌های ذکر شده، حوضه‌های ۲۶، ۲۷، ۱۹، ۱۰، ۹، ۱۰، ۱۹، ۲۶، ۳۳، ۳۴، ۴۴، ۳۹، ۴۰، ۳۳، ۳۴، ۴۴ منطبق بر گسل عنصلیبی و نیکی در شرق و مجدرا، که گسل اصلی محدوده مورد مطالعه است و از شمال تا نزدیک جنوب گستره مورد بررسی را تحت تاثیر قرار می‌دهد، فعالیت زمین‌ساختی بالا و بسیار بالا را نشان می‌دهد، همچنین مقادیر شاخص‌های ژئومورفیک حوضه‌های ۳۳، ۳۴، ۴۴، ۳۹، ۴۰، ۳۳، ۳۴، ۴۴ منطبق بر گسل عنصلیبی و نیکی در شرق و گسل شیخ‌جانلو و نیاخرم نزدیک به بخش جنوب باختری و گسل قالین‌قیه در باختر فعالیت زمین‌ساختی بالای این گسل‌ها را نشان می‌دهند. شواهد زمین‌شناسی حاصل از مشاهدات صحرایی از جمله سطوح مثلثی، پادگانه‌های آبرفتی، چشمه‌های گسلی، دره‌های خطی، رودشکن و بریدگی و کج‌شدگی واحدهای نئوژن و کواترنری، و بررسی تاریخچه لرزه‌ای منطقه، اثبات‌کننده نتایج حاصل از چهار شاخص ژئومورفولوژی و فعالیت تکتونیک بالا در بخش اعظمی از گستره مورد مطالعه است.

واژگان کلیدی: تکتونیک ژئومورفولوژی، البرز غربی، ریخت زمین‌ساخت، شاخص زمین‌ساخت فعال Iat

مقدمه

البرز در حاشیه جنوبی خزر و در شمال ایران قرار دارد (حکیمی آسیابر و باقریان، ۲۰۱۸). پهنه رسوبی-ساختاری البرز شامل بلندی‌های شمال صفحه ایران است که به شکل تاقدیسی مرکب^۱ در یک راستای عمومی خاوری-باختری، از آذربایجان تا خراسان امتداد دارد. از نگاه زمین‌ریخت‌شناسی، مرز شمالی البرز منطبق بر تپه ماهورهای متشکل از نهشته‌های سنوزویک و دشت ساحلی خزر است (علوی، ۱۹۹۶). همراه با پیشرفت علم تکتونیک ژئومورفولوژی، مهندسان زمین‌شناس دریافته‌اند که فرآیندهای تکتونیک جنبا می‌تواند شکل و عملکرد رودخانه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد (هول‌بورک و شوم^۲، ۱۹۹۹). یکی از ابزارهای شناسایی چشم اندازه‌ها استفاده از شاخص‌های ریخت‌شناسی می‌باشد، استفاده از این شاخص‌ها برای مطالعه مناطقی که بالاآمدگی یا دگرریختی سریع تکتونیک را تجربه کرده‌اند مفید می‌باشد (ده‌بزرگی و مومنی^۳، ۲۰۱۶). رودخانه‌ها از مهمترین چشم‌اندازهای موجود در سطح زمین هستند که تجزیه و تحلیل آن‌ها به عنوان یک ابزار با ارزش در بررسی‌های زمین‌ساختی مربوط به دو میلیون سال تا چند هزار سال گذشته شناخته شده است. واکنش رودخانه‌ها به زمین‌ساخت فعال و ویژگی‌های ریخت‌زمین‌ساختی خاصی را ایجاد می‌کند که می‌تواند الگوی دگرشکلی سطحی را در هر ناحیه آشکار سازد (هول‌بورک و شوم، ۱۹۹۹). عوارض ژئومورفولوژی در مناطق دارای فعالیت تکتونیک، نتیجه ترکیب پیچیده‌ای از حرکات قائم و افقی مرتبط با بلوک‌های پوسته‌ای و فرسایش یا رسوب‌گذاری توسط فرآیندهای سطحی هستند (یوانس و همکاران، ۲۰۰۶). از آنجایی که با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی می‌توان میزان فعالیت تکتونیک را مشخص کرد، این شاخص‌ها ابزار مهم و قابل اطمینانی برای این کار هستند، این شاخص‌ها می‌توانند تحول شبکه زهکشی و تغییرات جبهه کوهستان را نیز به نمایش بگذارند (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۸). بنابر موارد ذکر شده با تجزیه و تحلیل رودخانه‌ها و شبکه زهکشی و با استفاده از شاخص‌های زمین‌ریختی، قادر خواهیم بود به اطلاعات مفیدی در مورد تاریخچه زمین‌ساختی منطقه برسیم. دوسانتوس و همکاران^۴ (۲۰۱۹) وضعیت مورفوتکتونیک رودخانه‌های لاواتودو و پلاتوس را در برزیل ارزیابی کردند، تالامپاس و کابهاگ^۵ (۲۰۱۸) با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و پارامترهای ژئومورفولوژی نشان داده‌اند حوضه رودخانه ایپونان در کشور فیلیپین از لحاظ تکتونیک فعال است لنگ‌کومر و همکاران^۶ (۲۰۱۹) مورفوتکتونیک و فعالیت نئوتکتونیک کمربند اسچوپن را در هندوستان ارزیابی کردند، نتایج این پژوهش نشان دهنده منطقه فعال تکتونیک است که تغییر شکل رسوبات کواترنری و ویژگی‌های مختلف ژئومورفولوژی از جمله شواهد آن می‌باشند. تحقیقات مشابهی نیز توسط محققین مختلف (عزتی و همکاران، ۱۳۹۷؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۷؛ گورابی و محمدنژاد، ۱۳۹۷) در ایران انجام گردیده. با توجه به اینکه رودخانه‌های مهمی در منطقه مورد نظر وجود دارند که بازتاب‌کننده شرایط زمین‌ساختی منطقه هستند و تا کنون از روش‌های مزبور برای این مطالعه استفاده نشده، هدف این مطالعه بررسی تکتونیک مورفولوژی منطقه به منظور مشخص نمودن آخرین فعالیت زمین‌ساختی می‌باشد.

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

گستره مورد مطالعه با مساحتی بالغ بر ۱۳۶۳ کیلومتر مربع بخش‌هایی از کوه‌های تارم، منطقه فرونشست درام-فیروزآباد و کوه‌های تالش در البرز غربی و آذربایجان از استان‌های اردبیل، گیلان و زنجان را پوشش می‌دهد. از جمله شهرهایی که در منطقه مورد مطالعه وجود دارند، می‌توان به شهرهای خلخال، کوثر و فیروزآباد اشاره کرد. بخش خاوری گستره مورد

1. Anticlinorium

2. Holbrook and Schumm, 1999

3. Dehbozorgy and Momeni, 2016

4. Dos Santos et al, 2019

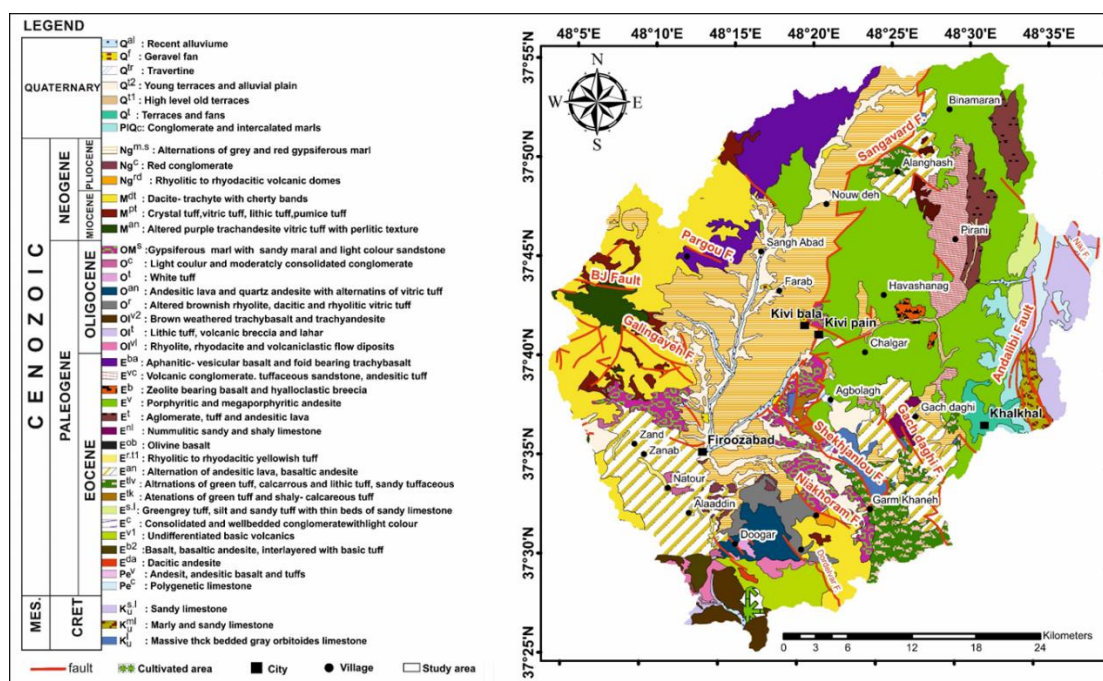
5. Talampas and Cabahug, 2018

6. Longkumer et al, 2019

مطالعه به پهنه‌های ساحلی دریای خزر می‌رسد، در بخش میانی آن کوهستان تالش قرار دارد و از باختر به فلات آذربایجان و از جنوب به رودخانه قزل‌اوزن محدود می‌شود (شکل ۱). راه ارتباطی اصلی منطقه، جاده اردبیل - کیوی - خلخال است که به صورت آسفالت‌پوشیده و دو جاده خاکی کیوی - سنگ‌آباد و کیوی - فیروزآباد این ناحیه را به شهرستان میانه متصل می‌کند.

موقعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

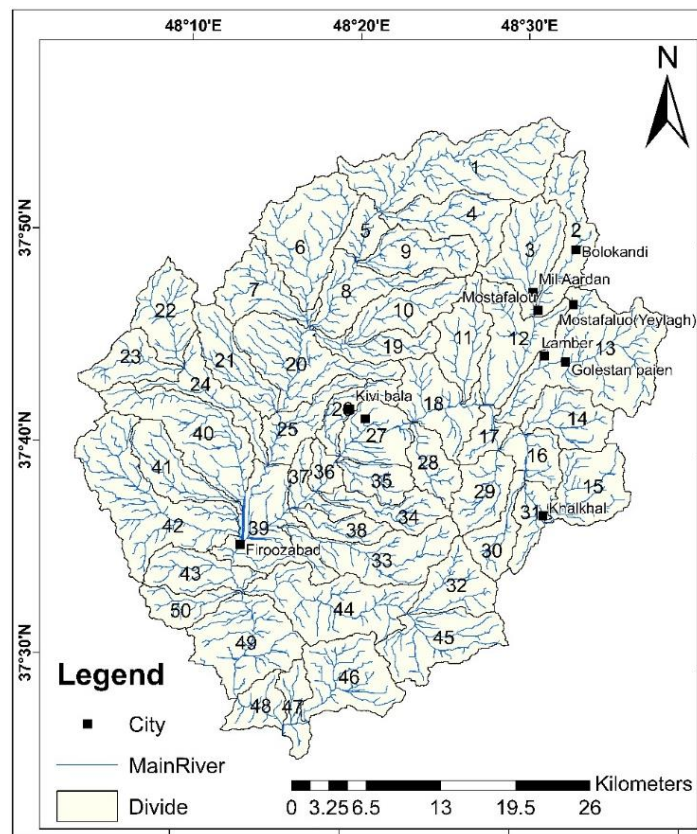
محدوده مورد نظر بخشی از زون زمین‌ساختی البرز - آذربایجان می‌باشد، پهنه البرز شامل مجموع صفحه‌های راندهای است که به‌وسیله تغییر شکل حاصل از نیروی فشارشی در زمان سنوزوئیک پایانی به وجود آمده است و از زمان تریاس تا حال در طول کوه‌زایی سیمیرین و آلپین در حال نمو و گسترش است (علوی^۱، ۱۹۹۶). کهن‌ترین سنگ‌های منطقه میکاشیست‌هایی هستند که در بخش خاوری رخنمون دارند و به نظر می‌رسد که پی سنگ منطقه را تشکیل می‌دهد. باتوجه به شواهد صحرائی در منطقه کیوی، سن این سنگ‌های دگرگونی قبل از میوسن است و نظر به اینکه در ورقه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ سراب (بهریزی، ۱۳۸۱)، آهک‌های کرتاسه نیز بر روی این سنگ‌ها قرار گرفته‌اند سن آنها می‌بایست قبل از کرتاسه باشد. شاید بتوان این شبست‌ها و فیلیت‌ها را که دارای درون لایه‌های آهکی بلورین هستند معادل سازند گهر در البرز دانست. گسل‌های متعددی در منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. گسل سنگاورد که اصلی‌ترین گسله محدوده مورد مطالعه می‌باشد روند شمال شمال‌خاور و جنوب جنوب‌باختر دارد. به غیر از این گسل و گسل‌های فرعی منشعب از آن بیشتر گسل‌های منطقه دارای روند شمال باختری - جنوب خاوری است، البته بایستی متذکر شد که با توجه به جوان بودن رخنمون‌های سنگی منطقه اکثر گسل‌های قدیم دارای نشانه‌ای در سطح زمین نیستند، و گسل‌های رخنمون شده با روند اصلی و فرعی نیز مربوط به حرکات جوان هستند. منطقه مورد مطالعه محدوده نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرستان‌های خلخال، رضوانشهر، کیوی و هشتچین را شامل می‌شود (شکل ۱).



¹. Alavi, 1996

شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه (برگرفته از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ خلخال- رضوانشهر، کیوی و هشتچین) روش تحقیق

در این مطالعه ابتدا با استفاده از نرم افزار Arc GIS و مدل ارتفاعی رقومی^۱ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به روش استراهلر^۲ به حوضه‌بندی و استخراج آبراهه‌ها پرداخته شد (شکل ۲). سپس با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ و از طریق نرم افزار Arc GIS لایه‌های مختلف کاربردی که شامل آبراهه، حوضه، گسل، سنگ‌شناسی و خطوط ارتفاعی می‌باشد، تهیه گردید و سپس جهت انجام تحقیق حاضر در محدوده البرز غربی و آذربایجان، گستره مورد مطالعه به ۵۰ حوضه تقسیم و شاخص‌های ریخت‌سنجی شامل ناهنجاری سلسله مراتبی ($a\Delta$)، انشعابات (R)، گرادیان طولی رود (SL) و شکل حوضه زهکشی (Bs) به منظور بررسی میران فعالیت زمین‌ساختی منطقه ارزیابی شده است. در نهایت، واحد‌های زمین‌شناسی و ساختارهای اصلی منطقه با نتایج حاصل از اندازه‌گیری شاخص‌های ژئومورفولوژی و مشاهدات صحرایی، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شاخص‌های ریخت‌شناسی استفاده شده در ادامه تشریح می‌گردند.



شکل ۲: زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های استخراج شده در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM).

۱. DEM

۲. STRAHLER

شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی^۱

این شاخص براساس تعداد انشعاباتی که از یک رده به رودخانه رده دو یا چند رده بالاتر از خود می‌ریزد، محاسبه می‌شود و بعد از بررسی دو (یا چند) حوضه با توجه به مقادیر به‌دست آمده، تفاوت میزان فعالیت زمین‌ساختی بین حوضه‌های مختلف تعیین می‌گردد. 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 (بابایی و همکاران^۲، ۲۰۱۷). وقتی یک رده آبراهه بنابر دلایلی مانند عوامل فعالیت‌های تکتونیکی به آبراهه‌ی دو یا چند رده بالاتر از خود وارد می‌شود و از الگوی منظم خود تبعیت نمی‌کند، این بی‌نظمی را ناهنجاری سلسله مراتبی می‌نامند. بعد از بررسی حوضه‌ها با توجه به مقادیر به‌دست آمده از شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) تفاوت میزان فعالیت زمین‌ساخت بین حوضه‌های مختلف تعیین می‌گردد. فرمول محاسبه این شاخص به صورت ذیل می‌باشد که در این فرمول HA آنومالی سلسله مراتبی، \bar{I} رده رودخانه پایین‌تر است (سیساک و همکاران^۳، ۱۹۸۶):

$$HA(i > j) = 2i - 1 - 2j - 11 - 3$$

$$\text{Hat} = HA(i > j) * \text{No.}(i > j) - 2 - 3$$

در این رابطه $\text{No.}(i > j)$ تعداد انشعاباتی است که از رده بالا به رده پایین می‌ریزد؛ در نهایت آنومالی سلسله مراتبی محاسبه می‌شود. مجموع مقادیر محاسبه شده برای تمامی رده‌ها بر تعداد کل آبراهه‌های رده‌ی ۱ تقسیم شده و به عنوان شاخص آنومالی سلسله مراتبی (Δa) هر حوضه تعیین می‌شود.

شاخص انشعابات^۴

شاخص انشعابات یکی از شاخص‌های تعیین آنومالی سیستم زهکشی در حوضه‌های آب‌خیز است. شاخص مذکور اطلاعات بسیار سودمندی را در مورد نحوه فعالیت فرآیندهای فرسایشی و درجه فعالیت حوضه ارائه می‌دهد. شاخص انشعابات نسبت انشعابات یک رده خاص به تعداد انشعابات یک رده بالاتر است (هورتن ۱۹۴۵، استراهلر، ۱۹۵۲). مقدار شاخص انشعابات با افزایش درجه‌ی تأثیر عوامل تکتونیکی در حوضه‌ها افزایش می‌یابد (بارونی و همکاران، ۲۰۰۵). به سبب اینکه نحوه اتصال انشعابات در شبکه‌ی رودخانه‌ها بسیار متفاوت است بنابراین الگوهای شبکه‌ی زهکشی حوضه‌ها در طبیعت بسیار متغیر است. شکل پیوستن رودخانه‌ها بستگی به ساختار زمین‌شناسی و عمر سیستم رودخانه‌ای دارد. برای مشخص کردن تأثیری که انشعابات شبکه‌ی رودخانه بر هیدروگراف سیل می‌گذارد، از نمایه‌ی نسبت انشعابات استفاده می‌شود. شاخص انشعابات، از اختلاف بین نسبت انشعابات و نسبت مستقیم انشعابات محاسبه می‌شود:

$$R = Rb - Rdb$$

در رابطه بالا، R شاخص انشعابات، Rb نسبت انشعابات و Rdb نسبت مستقیم انشعابات است. نسبت انشعابات برای هر رده یک حوضه به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$Rb(u - u + 1) = Nu / Nu + 1$$

در رابطه بالا، Nu تمام انشعابات یک رده و $Nu + 1$ تمام انشعابات یک رده بالاتر است. نسبت انشعابات برای هر رده آبراهه محاسبه و در نهایت به‌صورت میانگین برای یک حوضه بیان می‌شود.

نسبت انشعابات در یک حوضه با افزایش رده کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش رده در یک حوضه، تعداد آبراهه‌هایی که با پیوستن به یکدیگر رده بالاتر را ایجاد می‌کنند افزایش می‌یابد. مقدار میانگین این نسبت برای حوضه‌های مناطق پست و

1. Hierarchical anomaly index

2. Babaei et al., 2017

3. Ciaccacci et al., 1986

4. Bifurcation indexes

کم ارتفاع، ۲ و برای حوضه‌های واقع در مناطق کوهستانی بین ۳ تا ۴ می‌باشد. نسبت مستقیم انشعابات برای هر رده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Rdb = Ndu / Nu+1$$

در رابطه بالا، Ndu تعداد انشعابات یک رده که به آبراهه‌های رده بالاتر خود می‌ریزند و Nu+1 تعداد انشعابات رده بالاتر است (گارنیری و پیروتا^۱، ۲۰۰۸).

شکل حوضه زهکشی (Bs)

این شاخص بیانگر کشیدگی حوضه زهکشی می‌باشد به این صورت که در مناطق دارای فعالیت تکتونیکی بالا، 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 این شاخص کاهش می‌یابد. شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود (ده بزرگی و مومنی^۲، ۲۰۱۶):

$$Bs = Bl/Bw$$

در رابطه بالا (Bl) طول یک حوضه در مسیر زهکش اصلی است که از نقطه خروج زهکش از حوضه تا بالا مرتفع‌ترین نقطه در حوضه محاسبه می‌شود، همچنین (Bw) نیز پهنای حوضه است، این مقدار در عریض‌ترین قسمت حوضه که همزمان عمود بر طول حوضه (Bl) باشد اندازه‌گیری می‌شود.

شاخص گرادیان طولی رود^۳

شاخص گرادیان طولی رود به منظور ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی مورد استفاده قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده‌ی تغییرات توپوگرافیکی در امتداد یک رود است. این شاخص که تأثیر تغییرات محیطی بر روی نیمرخ‌های طولی رودخانه را نشان می‌دهد، از رابطه زیر به دست می‌آید (هک^۴، ۱۹۸۲):

$$SL = (\Delta H / \Delta L) L$$

در این رابطه SL شاخص شیب رودخانه، ΔH اختلاف ارتفاع در یک مقطع خاص از رودخانه، ΔL فاصله افقی همان محل و یا $\Delta H / \Delta L$ شیب بخشی از مجراست و L طول رودخانه از نقطه مرکزی همان محل تا سرچشمه رودخانه می‌باشد. به طور معمول تغییرات توپوگرافی تحت تأثیر سه عامل اصلی می‌باشد: فعالیت تکتونیکی که می‌تواند باعث ایجاد بالاآمدگی شود، تفاوت سنگ‌شناسی و فراوانی زیاد تغییرات سطح اساس دریا طی دوره‌ی کواترنری. شاخص SL با قدرت رود نیز ارتباط دارد (کلر و پینتر^۵، ۲۰۰۲).

نتایج

1. Guarnieri and Pirrota, 2008

2. Dehbozorgi and Momeni, 2016

3. Stream Length_Gradient

4. Hack, 1982

5. Keller and Pinter, 2002

برای تعیین سطح فعالیت زمین ساخت نسبی اخیر در گستره مورد نظر، ۴ شاخص زمین‌ریخت شناسی در ۵۰ زیر حوضه محاسبه گردید. به منظور اندازه‌گیری شاخص‌های ریخت‌سنجی، آبراه‌ها و حوضه‌های زهکشی منطقه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر استخراج گردید. سپس شاخص‌های سلسله مراتبی، انشعابات، شکل حوضه زهکشی و شاخص گرادیان طولی رود محاسبه گردید. برای هر شاخص به طور مجزا نقشه پهنه‌بندی در گستره مورد مطالعه تهیه گردید.

شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی^۱

با استفاده از مقادیر محاسبه شده برای این شاخص، نقشه شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی در گستره مورد مطالعه در نرم‌افزار Arc GIS ترسیم شد (شکل ۳).

نتایج کسب شده از شاخص ریخت‌سنجی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که این شاخص در زیرحوضه‌های شماره ۴۸، ۴۹، ۳۹، ۳۶، ۳۱، ۱۶ و ۱۸ دارای بیش‌ترین مقدار است (رد ۱). وجود زون گسلی سنگاورد (فیروزآباد-مجدر) و گسل‌های فرعی زیادی که در مجاورت آن به‌وجود آمده‌اند موجب شده تا در امتداد این گسل منطبق بر زیرحوضه‌های شماره ۸، ۱۰، ۱۸، ۲۰، ۲۵، ۲۷، ۳۶، ۳۷ و ۳۹ که در این پهنه گسلی قرار گرفته‌اند، مقدار فعالیت زمین‌ساختی بالا (میانگین ۳/۹) را نشان دهد. با توجه به اینکه شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) در زیرحوضه‌های واقع بر گسل سنگاورد رده فعالیت بالا و متوسط را نشان می‌دهند، نشان از تاثیرپذیری بالای این شاخص از گسل سنگاورد (فیروزآباد-مجدر) که گسله اصلی گستره مورد مطالعه است و پهنه وسیعی از منطقه بر روی آن منطبق می‌باشد را دارد. در زیر حوضه شماره ۱۳ با توجه به قرارگیری گسل نیکی و عندلیبی در این ناحیه که در شرق منطقه مورد بررسی قرار دارد فعالیت متوسط (۰/۹) را دارا می‌باشد. تاثیر گسل شیخ‌جانلو بر روی شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) در زیرحوضه شماره ۳۳ سبب شده تا فعالیت بالایی در این قسمت حاصل شود. هم‌چنین در زیرحوضه شماره ۴۴ که واقع در پهنه گسلی نیاخرم است نیز مقدار شاخص بالاست. در حوضه شماره ۴۰ که در محدوده نزدیک به غرب منطقه و محل قرارگیری گسل قالین‌قیه می‌باشد فعالیت بالا و در حوضه شماره ۲۲ که واقع بر گسل‌های فرعی در بخش غربی گستره مورد مطالعه است نشان می‌دهند، که در اثر فعالیت این گسل‌های فرعی اتصال غیرعادی آبراهه‌هایی با رده پایین‌تر به آبراهه‌های دو یا چند رده بالاتر قابل مشاهده است. بر بخش‌های واقع در قسمت جنوبی گستره مورد مطالعه که گسل‌های فرعی زیادی از جمله گسل اسمرود، گسل دوگر و گسل دردلور وجود دارد، شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) در زیرحوضه‌های ۴۳، ۴۷، ۴۸ و ۴۹ رده فعالیت بسیار بالا را نشان می‌دهند. بنابراین گسل‌های سنگاورد، نیکی، عندلیبی، شیخ‌جانلو، نیاخرم و قالین‌قیه باعث جابه‌جایی آبراهه‌های گستره مورد مطالعه و اتصال آبراهه‌های درجه پایین‌تر به صورت غیرمنطقی به آبراهه‌های دو یا چند درجه بالاتر شده و موجب افزایش میزان شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی در آن زیرحوضه‌ها به رده یک کلاس‌بندی با فعالیت بالای زمین‌ساختی شده است (شکل ۳).

شاخص انشعابات^۲

براساس رابطه‌های بیان شده در بالا، نسبت انشعابات و نسبت مستقیم انشعابات محاسبه شده و با استفاده از این دو نسبت شاخص انشعابات محاسبه گردید. مقادیر بدست آمده شاخص انشعابات (R) در منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۳ متغیر می‌باشد که در سه رده به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی طبقه‌بندی شد: رده یک شامل مقادیر ۱ تا ۳ ($1 < R \leq 3$) که فعالیت

^۱. Hierarchical anomaly index

^۲. Bifurcation indexes

بالای زمین‌ساختی را نشان می‌دهد، رده ۲ شامل مقادیر ۱ تا ۰/۵ ($0.5 < R < 1$) که بیانگر میزان فعالیت زمین‌ساختی متوسط است و رده ۳ شامل مقادیر کم تر از ۰/۵ ($0 < R < 0.5$) که نشان دهنده زیرحوضه‌هایی با فعالیت زمین‌ساختی کم است. با توجه به نقشه پراکندگی شاخص انشعابات (R) منطقه مورد مطالعه تصویر شده در شکل ۴؛ در ارتباط با گسل سنگاورد (فیروزآباد-مجدر) و منطبق بر زیرحوضه‌های ۱، ۸، ۹، ۱۹، ۲۰، ۲۷، ۳۴، ۳۶ و ۳۹ رده فعالیت زمین‌ساختی بالا را نشان می‌دهند. در امتداد گسل‌های عندلیبی و نیکی در حوضه شماره ۱۳ میزان فعالیت زمین‌ساختی متوسط است. در زیرحوضه‌های ۳۳ که پهنه گسلی شیخ‌جانلو می‌باشد و هم‌چنین حوضه شماره ۴۴ که بر گسل نیاخرم منطبق است، رده فعالیت زمین‌ساختی بالا را نمایان می‌کند. این شاخص در غرب محدوده مطالعاتی که گسل قالین‌قیه و تعداد زیادی از گسل‌های فرعی قرار دارند منطبق بر زیرحوضه شماره ۴۰ و ۲۴ رده فعالیت بالا و در حوضه‌های ۴۱، ۴۲ و ۴۳ فعالیت زمین‌ساختی متوسط را نشان می‌دهند. در امتداد گسل‌های فرعی در بخش جنوبی گستره مورد مطالعه از جمله گسل اسمرود، گسل دوگر و گسل دردلور در زیرحوضه شماره ۴۹ رده فعالیت زمین‌ساختی بالا می‌باشد (شکل ۳).

شکل حوضه زهکشی (Bs)

شاخص (Bs) برای تمامی حوضه‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و نتایج آن در ۳ کلاس رده‌بندی شده‌اند (حمدونی و همکاران، ۲۰۰۸). مقدار فعالیت زمین‌ساختی در رده ۱ بیشترین مقدار و در رده ۳ کمترین مقدار است. نتایج حاصل از شاخص ریخت‌سنجی شکل حوضه زهکشی (Bs) در گستره مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است. بیش‌ترین کشیدگی در زیرحوضه‌های شماره ۲ با میزان شاخص ۴/۶۷، زیرحوضه شماره ۲۶ با میزان شاخص ۴/۹۲ و زیر حوضه شماره ۲۴ با میزان شاخص ۵/۸۷ می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل از شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) در امتداد گسل سنگاورد در زیرحوضه‌های ۱۰، ۱۹، ۲۵، ۲۶، ۳۷، ۳۸ و ۳۹ رده فعالیت بالا را نشان می‌دهند. در زیرحوضه تحت فعالیت گسل‌های نیکی و عندلیبی رده فعالیت متوسط تا کم را نشان می‌دهد. این شاخص در زیرحوضه‌های ۳۳ و ۳۸ مرتبط با گسل شیخ‌جانلو رده فعالیت بالا را نشان می‌دهند. گسل نیاخرم در حوضه ۴۴ نیز باعث شده که بر حسب مقدار این شاخص در رده فعالیت زمین‌ساختی متوسط قرار داشته باشد. هم‌چنین در زیرحوضه‌های ۴۰ و ۴۱ که منطبق بر گسل قالین‌قیه و گسل‌های فرعی دیگر که در این ناحیه می‌باشند نیز رده فعالیت بالا را نمایانگر هستند. شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) در امتداد زیرحوضه‌های بخش جنوب غربی محدوده مطالعاتی که گسل‌های فرعی زیادی که در ادامه گسل سنگاورد هستند و در این ناحیه قرار گرفته‌اند، رده فعالیت متوسط تا بالا را نشان می‌دهد (شکل ۳).

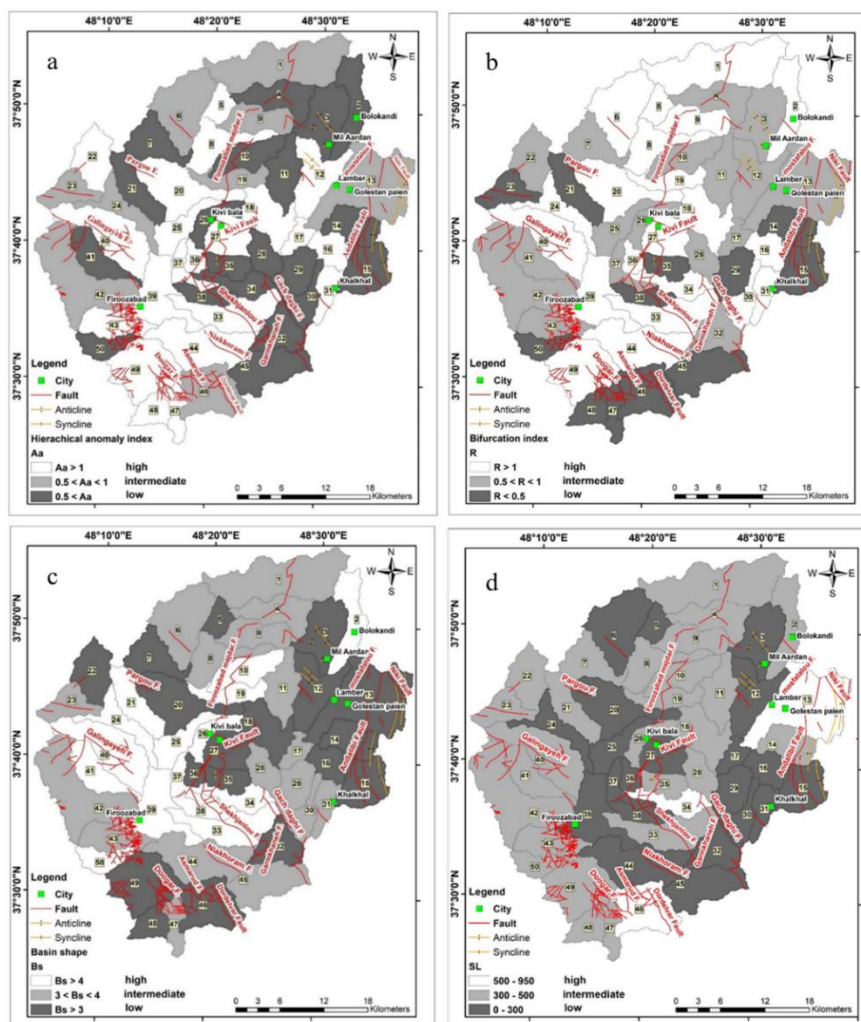
شاخص گرادیان طولی رود^۲

به منظور محاسبه شاخص گرادیان طولی رود برای هرکدام از آبراهه‌های موجود در ۵۰ زیرحوضه گستره مورد مطالعه، با استفاده از لایه آبراهه‌های استخراج شده در نرم‌افزار Arc GIS مقادیر مرتبط با $\Delta H/\Delta L$ و L محاسبه و سپس میزان شاخص مربوطه در تمام حوضه‌ها به‌دست آمد، مقادیر عددی ارزیابی شده برای شاخص SL در کل زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه از ۴۸/۲۷ در زیرحوضه شماره ۵ تا ۶۰۰/۹۹ در زیرحوضه شماره ۱۳ تغییر کرده است. مقادیر میانگین حوضه‌ها از نظر فعالیت زمین‌ساختی به رده‌های زیر طبقه‌بندی شده است: مقادیر ($500 < SL < 950$) در رده ۱ قرار می‌گیرند و فعالیت زمین‌ساختی رود بالا است. مقادیر ($300 < SL < 500$) در رده ۲ قرار گرفته‌اند و فعالیت زمین‌ساختی متوسط می‌باشد و برای مقادیر ($300 > SL > 0$) در رده ۳ فعالیت زمین‌ساختی و شاخص گرادیان رود کم است.

¹. El Hamdouni et al., 2008

². Stream Length_Gradient

نتایج حاصل از محاسبه این شاخص نشان می‌دهد که گسل‌های منطقه مورد مطالعه تاثیر زیادی در آنومالی‌های به وجود آمده دارند. در زیرحوضه‌های قرار گرفته در امتداد گسل سنگاورد (فیروزآباد-مجدر) رده فعالیت متوسط تا بالا را شامل می‌شود. بیشترین میزان این شاخص در زیرحوضه ۱۳ مرتبط با فعالیت گسل نیکی و گسل عندیسی می‌باشد و رده فعالیت بالا را نشان می‌دهد و در محل تقاطع رود با این گسل‌ها ناهنجاری‌هایی دیده می‌شود. شاخص (SL) در رودخانه‌های مرتبط با گسل شیخ‌جانلو در زیر حوضه شماره ۳۳ و در امتداد آن رده فعالیت متوسط را نشان می‌دهد. همچنین در زیرحوضه ۴۰، ۴۱، ۴۲ و ۴۳ مربوط به گسل قالین قبه و گسل‌های فرعی این محدوده از گستره مطالعاتی رده فعالیت متوسط را نشان می‌دهند. در حوضه‌های واقع در بخش جنوبی گستره مورد مطالعه گسل‌های فرعی زیادی از جمله گسل اسمرود، گسل دوگر و گسل دردلور وجود دارد که شاخص گرادیان طولی رود (SL) در زیرحوضه ۴۶ رده فعالیت بالا را نشان می‌دهد همچنین در سایر زیرحوضه‌های ۴۳، ۴۷، ۴۸، ۴۹ و ۵۰ رده فعالیت زمین‌ساختی متوسط می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳: a: نقشه پراکندگی شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Aa) در منطقه مورد مطالعه. b: نقشه پراکندگی مقادیر شاخص انشعابات در منطقه مورد مطالعه. c: نقشه پراکندگی شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) در گستره مورد مطالعه. d: نقشه پراکندگی شاخص گرادیان طولی رود (SL) در منطقه مورد مطالعه.

شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی^۱

شاخص‌های ژئومورفولوژی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، انشعابات (R)، شکل حوضه زهکشی (Bs)، و شاخص گرادیان طولی رود (SL) براساس مقادیری که دارا بودند، به منظور طبقه‌بندی منطقه براساس شاخص زمین‌ساخت نسبی (Iat) هر شاخص به سه رده به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی رده‌بندی شدند و در نهایت برای هر حوضه میانگین مقادیر رده شاخص‌های ژئومورفولوژی (S/n) اندازه‌گیری شد و به ۴ رده فعالیت زمین‌ساختی (Iat) تقسیم شد (جدول ۱). رده ۱ نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا است، رده ۲ فعالیت زمین‌ساختی بالا است، رده ۳ فعالیت زمین‌ساختی متوسط را نشان می‌دهد و رده ۴ فعالیت زمین‌ساختی کم است (حمدونی و همکاران^۲، ۲۰۰۸). پس از رده‌بندی گستره مورد مطالعه براساس شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی، نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت زمین‌ساختی (Iat) در گستره مورد مطالعه ترسیم شد (شکل ۴).

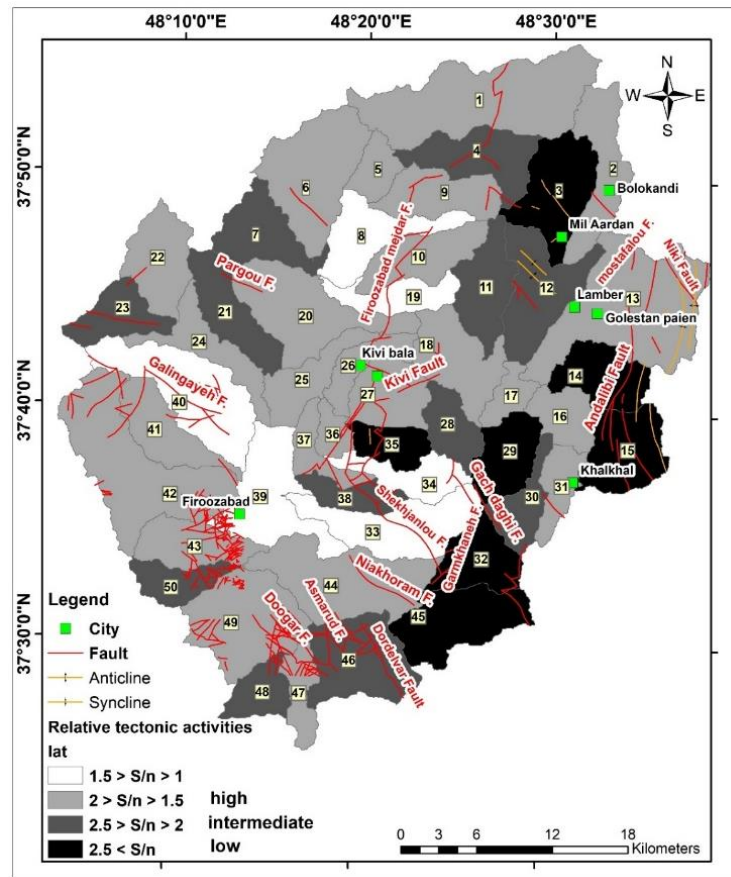
جدول ۱: مقادیر چهار شاخص اندازه‌گیری شده و سطح فعالیت زمین‌ساختی در گستره مورد مطالعه.

Bisin No.	Rate				Class				Iat	Iat Class
	Δa	Rb-Rdb	SL	Bs	Δa	R	SL	Bs		
1	0.86	1.17	453.06	2.95	2	1	2	2	1.75	2
2	0.46	1.2	499.65	4.66	3	1	2	1	1.75	2
3	0.38	1	277.23	1.78	3	2	3	3	2.75	4
4	0.27	0.8	320.59	2.14	3	2	2	2	2.25	3
5	1.66	1.66	48.26	1.26	1	1	3	3	2	2
6	0.8	1.02	238.3	1.98	2	1	3	2	2	2
7	0.4	0.66	404.24	1.81	3	2	2	3	2.5	3
8	1.26	1.61	348.81	2.64	1	1	2	2	1.5	1
9	0.58	1.75	345.21	2.51	2	1	2	2	1.75	2
10	0.5	0.77	454.79	3.17	3	2	2	1	2	2
11	0.38	0.58	326.39	2.21	3	2	2	2	2.25	3
12	1.14	0.76	208.04	1.45	1	2	3	3	2.25	3
13	0.9	0.94	600.99	1.77	2	2	1	3	2	2
14	0.42	0.33	327.37	1.86	3	3	2	3	2.75	4
15	0.4	0.38	261.43	1.59	3	3	3	3	3	4
16	4.58	1.45	176.03	1.88	1	1	3	3	2	2
17	3.33	1	143.96	2.04	1	2	3	2	2	2
18	4.19	1.68	343.05	1.59	1	1	2	3	1.75	2
19	0.73	1.08	425.58	3.21	2	1	2	1	1.5	1
20	2.15	1.69	297.61	1.38	1	1	3	3	2	2
21	0.14	0.3	380.48	3.67	3	3	2	1	2.25	3
22	1.04	0.76	328.41	1.68	1	2	2	3	2	2
23	0.56	0.5	327.89	2.23	2	3	2	2	2.25	3
24	1	2.75	219.46	5.87	2	1	3	1	1.75	2

¹. Index of Active Tectonics (Iat)

². Ehamdouni et al, 2008

25	3.68	0.83	142.19	3.23	1	2	3	1	1.75	2
26	0.23	0.75	325	4.91	3	2	2	1	2	2
27	5	1.56	216.42	1.75	1	1	3	3	2	2
28	0.33	0.66	452.08	2.18	3	2	2	2	2.25	3
29	0.15	0.3	171.25	2.18	3	3	3	2	2.75	4
30	0.5	1.33	158.87	2.39	3	1	3	2	2.25	3
31	5.75	3	187.51	2.03	1	1	3	2	1.75	2
32	0.21	0.83	191.22	1.32	3	2	3	3	2.75	4
33	1.15	1.04	377.28	3.36	1	1	2	1	1.25	1
34	0.5	2	505.58	3.46	3	1	1	1	1.5	1
35	0.09	0.12	362.86	1.39	3	3	2	3	2.75	4
36	6.2	1.33	59.97	1.55	1	1	3	3	2	2
37	3.28	0.83	111.29	3.47	1	2	3	1	1.75	2
38	0	0	209.11	3.25	3	3	3	1	2.5	3
39	8.96	1.41	120.28	3.15	1	1	3	1	1.5	1
40	1.08	1.35	352.1	3.27	1	1	2	1	1.25	1
41	0.4	0.75	399.86	3.55	3	2	2	1	2	2
42	0.59	0.85	426.53	2.39	2	2	2	2	2	2
43	3.92	0.81	414.63	2.01	1	2	2	2	1.75	2
44	1.44	1.5	261.02	2.61	1	1	3	2	1.75	2
45	0.09	0.16	278.36	2.26	3	3	3	2	2.75	4
46	0.51	0.33	523.7	1.49	2	3	1	3	2.25	3
47	3.3	0.5	495.91	2.34	1	3	2	2	2	2
48	15.88	0	495.74	1.24	1	3	2	3	2.25	3
49	10.05	2.86	384.39	1.43	1	1	2	3	1.75	2
50	0.18	0.25	454.52		3	3	2	1	2.25	3



شکل ۴: نقشه‌ی فعالیت زمین‌ساختی نسبی (Iat) در منطقه مورد مطالعه

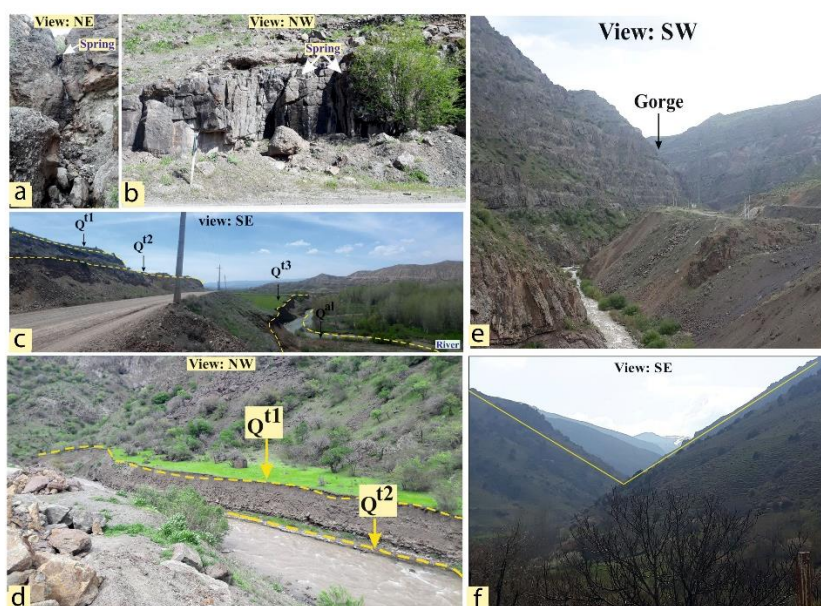
نتایجی که از نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت زمین‌ساختی نسبی (Iat) در محدوده مورد مطالعه بدست آمد، نشان می‌دهد مقادیر شاخص فعالیت زمین‌ساختی نسبی (Iat) مربوط به فعالیت گسل سنگاورد (فیروزآباد-مجدر) در زیرحوضه‌های شماره ۸، ۱۹، ۳۴ و ۳۹ میزان فعالیت بسیار بالا و در اکثر زیر حوضه‌های این پهنه گسلی فعالیت بالا را نشان می‌دهد. در امتداد گسل نیکی و گسل عندلیبی در زیرحوضه‌های ۱۳ و ۲ رده فعالیت بالا را نشان می‌دهد. مقادیر شاخص در امتداد گسل شیخ‌جانلو در زیرحوضه ۳۳ رده فعالیت بالا را نشان می‌دهد. و در زیرحوضه ۴۴ که منطبق بر گسل نیاخرم می‌باشد نیز فعالیت زمین‌ساختی بالا دارد. مقادیر شاخص فعالیت زمین‌ساختی نسبی (Iat) مربوط به گسل قالین‌قیه در زیرحوضه ۴۰ رده فعالیت بسیار بالا و همچنین در زیرحوضه‌های ۴۱ و ۴۲ نیز میزان فعالیت زمین‌ساختی بالا را نشان می‌دهد. در بخش جنوبی گستره مورد مطالعه در زیرحوضه‌های ۴۷ و ۴۹ رده فعالیت بالا و در زیر حوضه‌های ۴۶، ۴۸ و ۵۰ رده فعالیت متوسط می‌باشد.

شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) در سه رده (فعالیت بالا، فعالیت متوسط و فعالیت کم) به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی طبقه‌بندی شد و در مجموع ۳۰ حوضه از ۵۰ حوضه محدوده مورد مطالعه فعالیت بالا و متوسط را دارا بودند که ۲۱ حوضه از آن فعالیت بالا را نشان دادند. شاخص انشعابات (R) بر حسب محاسبات انجام پذیرفته به ۳ رده (فعالیت زمین‌ساختی بالا، فعالیت زمین‌ساختی متوسط و فعالیت زمین‌ساختی کم) تقسیم بندی شد، و از ۵۰ حوضه منطقه مورد مطالعه در ۳۸ حوضه میزان فعالیت بالا و متوسط را نشان داد. با توجه به مقادیر به دست آمده و نتایج حاصل، شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) در ۳ کلاس (فعالیت تکتونیک بالا، فعالیت تکتونیک متوسط و فعالیت تکتونیک کم) رده‌بندی شد. از ۵۰ زیرحوضه کل منطقه زیرحوضه ۳۲ بر حسب شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) مقدار فعالیت زمین‌ساختی بالا و متوسط

را نشان دادند. شاخص گرادیان طولی رود (SL) نیز مانند دیگر شاخص‌ها به ۳ کلاس رده‌بندی شد که بر طبق آن میزان فعالیت گسل‌ها بررسی شده است. از مجموع ۵۰ زیرحوضه گستره مورد مطالعه بر حسب مقادیر بدست آمده از شاخص گرادیان طولی رود (SL)، ۲۹ زیرحوضه دارای فعالیت بالا و متوسط می‌باشند.

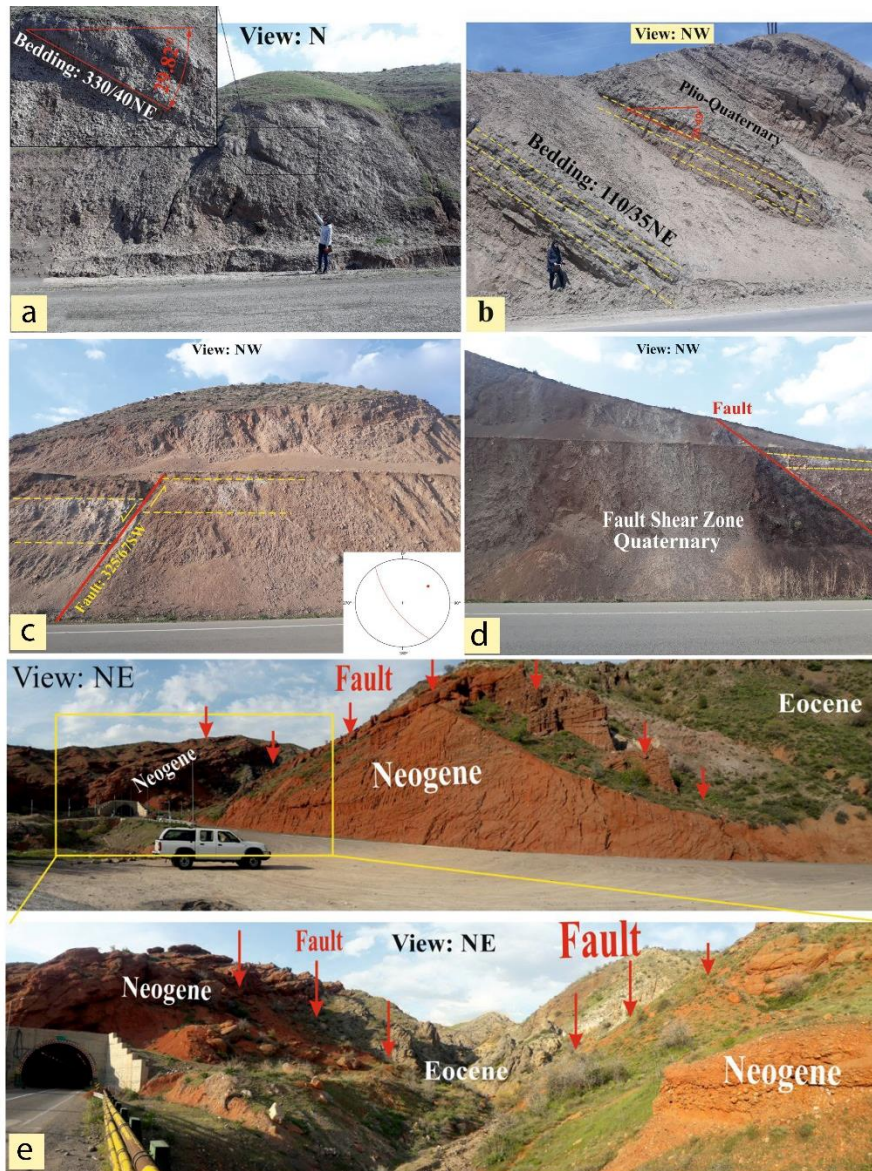
بحث و یافته‌ها

پس از تعیین و محاسبه شاخص‌های ریخت‌سنجی در محدوده مورد پژوهش و تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین‌ساخت نسبی مناطقی که نشان‌دهنده فعالیت زمینی‌ساختی اخیر است، تعیین شدند و در ادامه به منظور بررسی شاخص‌های ریخت‌سنجی محاسبه شده در مناطق فعال زمین‌ساختی، بازدیدهای صحرایی صورت گرفت. وجود زمین‌منظرهایی هم‌چون پادگانه‌های آبرفتی مرتفع، ایجاد سطوح مثلثی، کج‌شدگی لایه‌ها، ایجاد تنگ‌دره^۱، چشمه‌های گسلی و شواهد زمین‌ساختی هم‌چون گسلش و چین‌خوردگی در واحدهای نئوژن و کواترنری، جابه‌جایی واحدهای نئوژن در اثر فعالیت گسل‌های مذکور، راندگی واحدهای قدیمی بر روی واحدهای جوان دلیلی قوی بر فعالیت بالای ساختارهای مربوط به گسل‌های گستره مورد مطالعه می‌باشد، کج‌شدگی لایه‌های کواترنری همانند زاویه دار شدن پادگانه‌های آبرفتی می‌تواند دلیلی دیگر بر اعمال فشار جهت‌دار زمین‌ساختی بر گستره مورد مطالعه باشد. به سبب جوان بودن این لایه‌ها که منشأ آن‌ها آبرفتی است هرگونه فشار جهت‌دار می‌تواند تغییری در زاویه‌بندی افقی این رسوبات ایجاد کند که می‌تواند ادعایی بر فعالیت نوزمین‌ساختی در منطقه باشد. کج‌شدگی لایه‌های کواترنری و پلیوکواترنری در اثر گسل سنگاورد در منطقه قابل مشاهده است (شکل ۵و۶).



شکل ۵: a: چشمه‌های گسلی در واحد سنگی اتوسن b: چشمه‌های گسلی خطی سنگاورد در واحد سنگی اتوسن c و d: مشاهده چند نسل پادگانه آبرفتی در مسیر رودخانه در ۴ کیلومتری جنوب غربی شهر کیوی d: نمونه‌ای از سطوح مثلثی دیده شده غرب شهر فیروزآباد e: مسیر رودخانه و تنگ دره ایجاد شده در محدوده جنوب غربی دوگر در اثر فعالیت‌های زمین‌ساختی. f: نمونه‌ای از دره v شکل ایجاد شده در پهنه گسلی سنگاورد واقع در روستای کوندق.

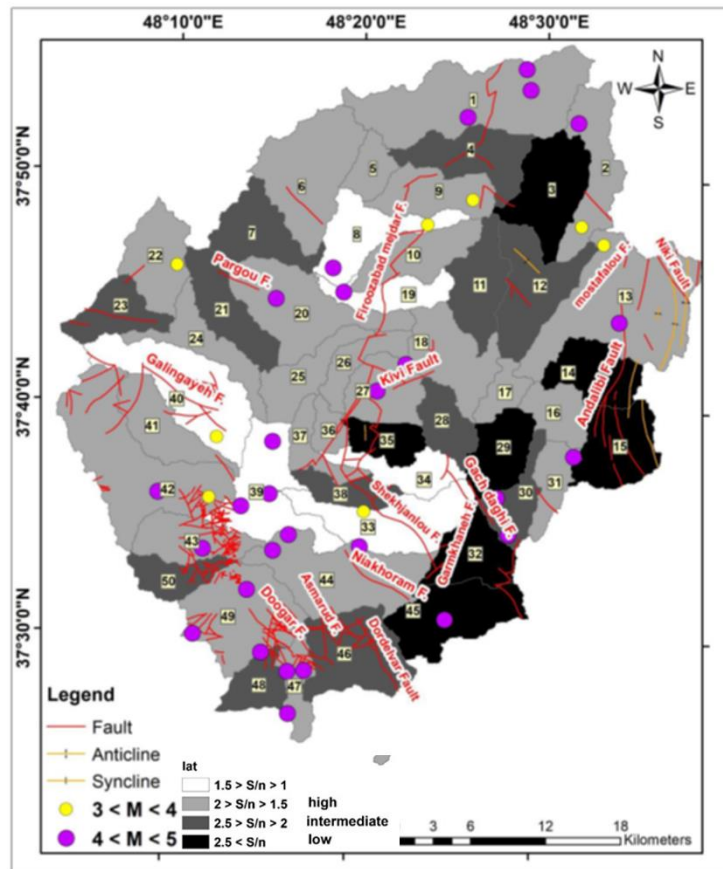
^۱. Gorge



شکل ۶: a: کج شدگی در شرق روستای نوده در پهنه گسلی سنگاورد b: کج شدگی لایه‌های پلیوکواترنری در ۲ کیلومتری جنوب غربی شهر کیوی در پهنه گسلی سنگاورد.. c: گسلش در واحدهای کواترنری در پهنه گسلی سنگاورد، شرق شهر کیوی. d: زون برشی گسلی به‌وجود آمده در اثر فعالیت دو گسل در کنار هم در محدوده گسل شیخ‌جانلو. e: دگرشکل‌های ایجاد شده در اثر فعالیت گسل‌های حوضه ۴۹، دگرشیبی بین واحدهای نئوژن و انوسن را نشان می‌دهد و بیانگر فاز کوهزایی پیرنه و خروج منطقه از آب قبل از رسوبگذاری رسوبات نئوژن است.

ارزیابی مقادیر شاخص‌های ژئومورفولوژی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، شاخص انشعابات (R)، شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs)، شاخص گرادیان طولی رود (SL) و نقشه فعالیت زمین‌ساخت نسبی (Iat) حاصل از اندازه‌گیری شاخص‌های ذکر شده، گویای این مطلب است که مقادیر زیاد این شاخص‌ها هماهنگی خوبی با گسل‌های شناخته شده منطقه از جمله گسل فیروزآباد-مجدر در گستره مورد مطالعه را نشان می‌دهند. بر حوضه‌های واقع بر گسل سنگاورد شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) رده فعالیت بالا و بسیار بالا را نشان می‌دهند در زیرحوضه‌های شماره ۸، ۱۸، ۲۰، ۲۵، ۲۷، ۳۶، ۳۷ و ۳۹ که در پهنه گسلی سنگاورد قرار گرفته‌اند مقدار این شاخص بالا می‌باشد. عملکرد این گسل باعث تاثیر بر شاخص انشعابات (R) در زیرحوضه‌های ۱، ۸، ۹، ۱۹، ۲۰، ۲۷، ۳۴، ۳۶ و ۳۹ گردیده که رده فعالیت بسیار بالا را بیان

می‌کنند، شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) در امتداد این گسل در زیرحوضه‌های ۱۰، ۱۹، ۲۵، ۲۶، ۳۷، ۳۸ و ۳۹ فعالیت بالای گسل را نمایان می‌سازد. شاخص گرادیان طولی رود (SL) در تمام امتداد طول این گسل تحت تاثیر حرکات زمین ساختی اخیر بیانگر رده فعالیت متوسط تا بالا بوده و در نهایت مقادیر شاخص فعالیت زمین ساخت نسبی (Iat) در زیرحوضه‌های شماره ۸، ۱، ۳۴ و ۳۹ میزان فعالیت بسیار بالا و در اکثر زیر حوضه‌های این پهنه گسلی فعالیت بالا را نشان می‌دهد. بر حوضه‌های واقع بر گسل نیکی و عندلیبی در شرق گستره مورد مطالعه شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) رده فعالیت متوسط را نشان می‌دهند که منطبق بر بخش‌هایی از زیرحوضه‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ می‌باشند. شاخص انشعابات (R) در امتداد این گسل‌ها بیانگر فعالیت متوسط هستند. لازم به ذکر است این شاخص‌ها به زمین ساخت فعال بسیار حساس می‌باشد و حوضه‌هایی که رده پایین تری از فعالیت زمین ساختی توسط شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی را دارا می‌باشند، جزء مناطق شهری هستند که دخالت‌های انسانی در آن دخیل می‌باشد. شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) در زیرحوضه تحت فعالیت این گسل فعالیت متوسط و کم را نشان می‌دهد. بیشترین میزان شاخص گرادیان طولی رود (SL) در زیرحوضه ۱۳ مرتبط با فعالیت این دو گسل می‌باشد که موجب ناهنجاری در محل تقاطع رود با این گردیده، مقادیر شاخص فعالیت زمین ساخت نسبی (Iat) در امتداد گسل نیکی در زیرحوضه‌های ۱۳ و ۲ بیانگر فعالیت بالای این گسل می‌باشد. در بخش جنوبی گستره مورد مطالعه گسل‌های فرعی زیادی وجود دارد از جمله گسل اسمرود، گسل دوگر و گسل دردلور که فعالیت آن‌ها در زیر حوضه‌های ۴۳، ۴۷، ۴۸ و ۴۹ با تاثیر بر مقادیر شاخص‌های نام برده قابل استنباط است. بر حوضه‌های واقع گسل شیخ جانلو در بخش مرکزی تا جنوب شرقی گستره مورد مطالعه شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) رده فعالیت بالا را در زیرحوضه‌های ۳۳، ۴۴ و ۳۸ نشان می‌دهد و شاخص انشعابات (R) در زیرحوضه‌های ۳۳ و ۴۴ رده فعالیت بسیار بالا را نمایان می‌کنند. شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) در زیرحوضه‌های مرتبط با این گسل عطاری رده فعالیت بسیار بالا و بالا و شاخص گرادیان طولی رود (SL) در رودخانه‌های مرتبط با این گسل و در امتداد آن رده فعالیت متوسط را نشان می‌دهند. مقادیر شاخص فعالیت زمین ساخت نسبی (Iat) در امتداد این گسل در زیر حوضه ۳۳ رده فعالیت بسیار بالا را نشان می‌دهد. در بخش غربی گستره مورد مطالعه شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa) بر حوضه‌های واقع بر گسل‌های فرعی رده فعالیت بالا را در زیرحوضه شماره ۴۰ و ۲۲ نشان می‌دهند، که در اثر فعالیت این گسل‌ها اتصال غیرعادی آبراهه‌هایی با رده پایین تر به آبراهه‌های دو یا چند رده بالاتر قابل مشاهده است. شاخص انشعابات (R) در زیرحوضه شماره ۴۰ رده فعالیت بالا، شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) در زیرحوضه‌های ۴۰ و ۲۱ رده فعالیت بسیار بالا، شاخص گرادیان طولی رود (SL) در زیرحوضه مربوط به این گسل‌ها رده فعالیت متوسط و مقادیر شاخص فعالیت زمین ساخت نسبی (Iat) در زیرحوضه ۴۰ رده فعالیت بسیار بالا را نشان می‌دهند. در کنار محاسبات انجام گرفته شواهد زمین‌ریختی حاصل از مشاهدات صحرائی نیز اثبات کننده فعالیت زمین ساختی اخیر ساختارها و گسل‌های منطقه است. وجود لندفرم‌هایی هم‌چون پادگانه‌های آبرفتی مرتفع، ایجاد سطوح مثلثی، کج‌شدگی لایه‌ها، ایجاد تنگ‌دره و وجود دره‌های V شکل در کنار نتایج حاصل از شاخص‌های ریخت‌سنجی می‌باشد. شواهد زمین ساختی هم‌چون گسلس و چین خوردگی در واحدهای نئوژن و کواترنری، جابه‌جایی واحدهای نئوژن در اثر فعالیت گسل‌های مذکور، راندگی واحدهای قدیمی بر روی واحدهای جوان دلیلی قوی بر فعالیت بالای ساختارهای مربوط به گسل‌های اصلی گستره مورد مطالعه می‌باشد. در این مطالعه از زلزله‌های دستگاهی بالای ۳ ریشتر ثبت شده از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۵ استفاده شد و موقعیت رو مرکز زلزله‌ها بر روی نقشه‌های پهنه‌بندی فعالیت تکتونیکی قرار گرفت، با توجه به نقشه‌های تهیه شده، بیشترین تمرکز زلزله‌ها در حوضه‌های دارای فعالیت زمین ساختی بالا و بسیار بالا بوده و تطابق خوبی بین زلزله‌های وقوعی، نتایج حاصل از شاخص‌های ریخت‌شناسی و مشاهدات صحرائی مشاهده می‌شود.



شکل ۷: نقشه تطابق شاخص Iat و رومرکز زلزله‌های وقوعی با بزرگای ۳ الی ۵ ریشتر.

نتیجه‌گیری

در نهایت به منظور طبقه‌بندی منطقه بر اساس شاخص فعالیت زمین‌ساخت نسبی (Iat)، شاخص‌های ژئومورفولوژی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، شاخص انشعابات (R)، شاخص شکل حوضه زهکشی (Bs) و شاخص گرادیان طولی رود (SL) بر اساس مقادیری که دارا بودند به سه رده به لحاظ فعالیت زمین‌شناختی رده‌بندی شدند و برای هر حوضه مقادیر رده شاخص‌های ژئومورفولوژی (S/N) اندازه‌گیری شد و به ۴ رده فعالیت زمین‌ساختی نسبی (Iat) تقسیم شدند. که از ۵۰ زیرحوضه گستره مورد مطالعه ۳۱ حوضه دارای فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا و بالا می‌باشد. با بررسی و ارزیابی مقادیر حاصل از شاخص‌های ریخت‌سنجی و در کنار هم قرار دادن کل نتایج برای هر کدام از گسل‌ها به صورت جداگانه و تطبیق زیرحوضه‌های قرار گرفته بر روی گسل‌های مهم گستره مورد مطالعه در تمامی شاخص‌های ریخت‌سنجی، نشان داده شد که در نتایج حاصل از تمامی شاخص‌های ریخت‌سنجی، زیرحوضه‌هایی که برگسل‌های فعال منطقه قرار داشتند دارای رده فعالیت بالا بودند. شواهد زمین‌ریختی حاصل از مشاهدات صحرایی نیز اثبات‌کننده فعالیت زمین‌ساختی اخیر ساختارها و گسل‌های منطقه است. شواهد زمین‌ساختی هم‌چون گسلش و چین‌خوردگی در واحدهای نئوژن و کواترنری، جابه‌جایی واحدهای نئوژن در اثر فعالیت گسل‌های مذکور، راندگی واحدهای قدیمی بر روی واحدهای جوان دلیلی قوی بر فعالیت بالای ساختارهای مربوط به گسل‌های گستره مورد مطالعه می‌باشد. وجود معادن تراورتن بر امتداد گسل شیخ‌جانلو و وجود لندفرم‌هایی هم‌چون پادگانه‌های آبرفتی، ایجاد سطوح مثلثی، کج‌شدگی لایه‌ها، ایجاد تنگ‌دره ($Gorge$) و وجود دره‌های شکل ۷ و همچنین انطباق رومرکز زلزله‌های دستگاهی با نتایج حاصل از شاخص‌های ریخت‌سنجی فعالیت زمین‌ساختی اخیر بالای منطقه را تایید می‌کند.

منابع

- اسدیان، ع، میرزایی، ع، ر، (۱۳۷۷). نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خلخال-رضوانشهر، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- آقا نباتی، ع، (۱۳۸۳). زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- بهروزی، الف، (۱۳۸۱). نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سراب، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- حاجی علیلو، ب، رضایی، ح، (۱۳۸۰). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کیوی، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- عزتی، م، غلامی، الف، مویوب، م، (۱۳۹۷). بررسی بالآمدگی تکتونیکی در کوه‌های شکراب واقع در شمال بیرجند با استفاده از شواهد ریخت زمین‌ساختی، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ۵، شماره ۳، صص ۹۵-۱۸۱.
- فریدی، م، انوری، الف، (۱۳۸۰). نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ هشتچین، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- گورابی، الف، محمدنژاد، و، (۱۳۹۷). تکامل لندفرم‌های اواخر کواترنری در پاسخ به تغییرات تکتونیکی فعال سطح اساس در منطقه طبس، ایران مرکزی، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۰، شماره ۲، صص ۲۹۱-۲۷۱.
- یمانی، م، امیری نژاد، س، غلامی، ف، نژادحسینی، ر، (۱۳۹۷). بررسی تکتونیک فعال در جنوب سمنان با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک، کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، سال ۳، شماره ۳، صص ۳۴۱-۳۵۴.
- Alavi, M., (1996). *Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. Geodynamics, 21, pp. 1- 33.*
- Babaei, S., Dehbozorgi, M., Hakimi Asiabar, S. 2017. "Assessment of active tectonics by using morphometric indices in Central Alborz" *Iranian Association of Geomorphology, Quarterly Quantitative Geomorphological researches. 1, pp. 40-56.*
- Baroni, C., Noti, V. Ciccacci, S. Righini, G., and Salvatore, M. C. Eds. 2005. *Fluvial origin of the valley system in northern Victoria Land (Antarctica) from quantitative geomorphic analysis. Geological Society of America Bulletin 117, pp. 1-2:212-228.*
- Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E. and Pugliese, F., (1986). *Indirect Evaluation of Erosion Entity in Drainage Basins through Geomorphic, Climatic and Hydrological Parameters, International Geomorphology, pp. 233- 248.*
- Dehbozorgy, M., Momeni, M. 2016. "Recent tectonic activity in Qom-Zefreh fault zone, Central Iran". *Journal of Quantitative Geomorphological researches 5(2), pp. 110-129.*
- Dos Santos, J.M., Salamuni, E., Dasilva, C.L., Sanches. E., Gimenez, V.B., Nascimento, E.R., (2019). *Morphotectonics in the Central-East Region of South Brazil: Implications for Catchments of the Lava-Tudo and Pelotas Rivers, State of Santa Catarina, Geomorphology, Vol 328, pp 138-156.*
- Elhamdouni, R. E., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J., Keller, E.A., 2008, *Assessment of Relative Active Tectonic, SouthWest Border of the Sierra Nevada (Southern Spain). Geomorphology. 96, pp. 150-173.*
- Guarnieri, P. and Pirrotta, C., (2008). "The Response of Drainage Basins to the Late Quaternary Tectonics in the Sicilian Side of the Messina Strait (NE Sicily)". *Geomorphology, pp. 95, 260- 273.*

- Hack, John Tilton., 1982. *Physiographic division and differential uplift in the piedmont and Blue Ridge*. U.S. Geological Survey Professional, pp. 1265:1-49.
- 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, pp. 539- 551.
- Holbrook, J., Schumm, S. A., (1999). *Geomorphic and Sedimentary Response of Rivers to Tectonic Deformation: a Brief Review and Critique of a Tool For Recognizing Subtle Epeirogenic Deformation In Modern And Ancient Settings*. *Tectonophysics*, 305, pp. 287-306.
- Horton, R. E., (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*. *Geological Society of America Bulletin*, 56, p 275- 370.
- Ioannis, M.T., Ioannis, K., Pavlides, S., 2006. *Tectonic geomorphology of the easternmost extension of the Gulf Corinth (Beotia, central Greece)*. *Tectonophysics*. 453, 211-232 p.
- Keller, E. A., Pinter N., 2002. *Active tectonic, Earthquakes, Uplift and Landscape*. Prentice Hall, New Jersey, pp. 362.
- Keller, E.A., Zepeda, R.L., Rockwell, T.K., Ku, T.L. and Dinklage, W.S., (1998). *Active tectonics at Wheeler Ridge, southern San Joaquin Valley, California*. *Geological Society of America Bulletin*, 110, pp. 298- 310.
- Longkumer, L., Luirei, Kh., Moiya, J.N., Thong, G.T., (2019). *Morphotectonics and neotectonic activity of the Schuppen Belt of Mokokchung, Nagaland, India*, *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol 170, Pp 138-154
- Strahler, A.N., (1952). *Hypsometric (area- altitude) analysis of erosion topography*. *Geological Society of America Bulletin*, 63, pp. 1117- 1142.
- Talampas, W., Cabahug, R., (2018). *Morphotectonic Characteristics of the Iponan River Watershed in Cagayan de Oro City, Philippines*, *Mindanao Journal of Science and Technology Vol 16*, pp 115-131.