

## بررسی زمین ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در حوضه سپیدرود، البرز غربی

دنیا رابطی - دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه خوارزمی تهران  
مریم ده بزرگی\* - استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران  
سعید حکیمی آسیابر - استادیار دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد واحد لاهیجان  
رضا نوزعیم - استادیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۰۷      تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۶/۰۴

### چکیده

تکتونیک ژئومورفولوژی به عنوان دانشی ارزشمند در بررسی زمین ساخت پویاست که می‌تواند تاثیر تکتونیک فعال را بر رودخانه مشخص نماید. مطالعات مورفومتری به عنوان سنجش و توصیف کمی شکل‌ها و چشم‌اندازهای زمین تعریف شده‌اند. اندازه‌گیری‌های کمی شرایطی را فراهم می‌آورد تا با استفاده از آن‌ها به شناسایی وضعیت مناطق دارای تکتونیک فعال پرداخته شود. استخراج شاخص‌های ژئومورفیک با استفاده از مدل‌های ارتفاع رقومی در محیط GIS در دو دهه گذشته، روشی سریع و دقیق در تحلیل حوضه زهکشی بوده است. به طوری که از این شاخص‌ها برای ارزیابی سریع فعالیت تکتونیک اخیر در یک ناحیه خاص استفاده شده است. در این مطالعه زمین ساخت فعال البرز غربی در حوضه سپیدرود با اندازه‌گیری هفت شاخص ژئومورفولوژی ناهنجاری سلسله مراتبی ( $\Delta a$ )، انشعابات ( $R$ )، انتگرال و منحنی فراسنجی ( $H_i$ )، برجستگی نسبی ( $B_h$ )، تراکم زهکشی ( $D_d$ )، ضریب شکل ( $F_f$ ) و گرادیان طولی رود ( $S_L$ ) مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی؛ حوضه‌ها و آبراهه‌های منطقه مورد مطالعه استخراج شد. پس از محاسبه شاخص‌ها در هر حوضه، فعالیت زمین ساختی آن به پنج رده تقسیم گردید. سپس برای هر شاخص نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت زمین ساختی اخیر در گستره مورد مطالعه ترسیم شد. در نهایت شاخص زمین ساخت فعال نسبی ( $I_{at}$ ) به منظور تعیین سطح فعالیت زمین ساختی کل محاسبه گردید و منطقه مورد مطالعه به چهار رده فعالیت زمین ساختی بسیار بالا، بالا، متوسط و کم تقسیم شد. شاخص‌های اندازه‌گیری شده در هر زیرحوضه نشان می‌دهد که در زیرحوضه‌های منطبق بر گسل‌های منجیل، جبرنده، درفک و دیلمان و همچنین مناطق با تراکم گسلی بالا شاخص‌های اندازه‌گیری شده مقادیر بالایی را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده تأثیر گسل‌های مذکور بر منطقه مورد مطالعه است.

واژگان کلیدی: تکتونیک ژئومورفولوژی، شاخص ژئومورفیک، فعالیت تکتونیک، گسلش، البرز غربی.

## مقدمه

موقعیت قرارگیری ایران در کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا باعث شده یکی از مناطق فعال زمین باشد و کمربند کوهزایی فعال البرز نیز قسمتی از کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا می باشد که از شمال به بلوک فرورفته کاسپین و از جنوب به فلات ایران مرکزی محدود می شود و لرزه خیزی کوه های البرز نشانگر ادامه جنبش های کوهزایی در این گستره است (بربریان و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۸۱). البرز در حاشیه جنوبی خزر و در شمال ایران قرار دارد (حکیمی آسیابار و باقریان<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸). طول تقریبی آن ۱۰۰۰ کیلومتر و پهنای آن از ۵۰ تا بیش از ۱۰۰ کیلومتر در تغییر است. البرز یک پشته از ورقه های راندگی است که توسط تغییر شکل فشارشی سنوزوئیک پایانی ایجاد شده است (علوی<sup>۳</sup>، ۱۹۹۶). روند ساختمانی کوه های بخش غربی البرز، شمال غرب- جنوب شرق و تا اندازه ای با نوار شمالی زاگرس چین خورده و امتداد ساختمانی قفقاز کوچک و بزرگ هم جهت است (بربریان<sup>۴</sup>، ۱۹۷۶). گسل های فعال متعددی به موازات کوه های البرز وجود دارد (آلن و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۰۳) و بررسی این پهنه به لحاظ سطح فعالیت زمین ساختی مفید است. گستره مورد بررسی در تقسیم بندی ساختمانی- رسوبی ایران (اشتوکلین<sup>۶</sup>، ۱۹۶۸) در محدوده زون البرز غربی واقع شده و گسل های متعددی در منطقه وجود دارد که شامل گسل های منجیل، جیرنده درفک و دیلمان می باشد (شکل ۱). به منظور بررسی تکنونیک فعال در گستره مورد مطالعه از شاخص های ریخت زمین ساختی حوضه آبریز استفاده شده است. همراه با پیشرفت علم تکنونیک ژئومورفولوژی، زمین شناسان دریافته اند که فرآیندهای تکنونیک فعال می تواند شکل و عملکرد رودخانه ها را تحت تأثیر قرار دهد (هول بورک و شوم<sup>۷</sup>، ۱۹۹۹). رودخانه ها از مهمترین زمین منظرهای موجود در سطح زمین هستند که به سرعت و به طور ثابت به تغییر شکل حاصل از تکنونیک فعال در سطح زمین که بازتاب کننده تغییرات جزئی در توپوگرافی است واکنش نشان می دهند (هول بورک و شوم، ۱۹۹۹: سیبر و گورنیتز<sup>۸</sup>، ۱۹۸۳). بنابراین بررسی الگوی زهکشی و انحراف رودها، اطلاعات مهمی در مورد گسترش و تکامل ساختاری منطقه فراهم می آورد (کلر و همکاران<sup>۹</sup>، ۱۹۹۸: واکر<sup>۱۰</sup>، ۲۰۰۶). مطالعه کمی سیستم های زهکشی شده توسط (هورتن<sup>۱۱</sup>، ۱۹۴۵) آغاز شده و توسط (استراهلر<sup>۱۲</sup>، ۱۹۵۲) دنبال شده و تا کنون نیز ادامه یافته است. از آنجا که در منطقه مورد بررسی رودخانه های متعددی حضور دارند که بازتاب کننده شرایط زمین ساختی حاکم می باشند و تا کنون از روش مزبور در مطالعه زمین ساختی فعال آن استفاده نشده است، لذا هدف این مطالعه بررسی تکنونیک ژئومورفولوژی رودخانه ها به منظور مشخص نمودن فعالیت زمین ساختی اخیر در منطقه می باشد.

منطقه مورد مطالعه در محدوده نقشه های ۱:۱۰۰۰۰۰ رودبار، جیرنده، رشت و بندرانزلی قرار گرفته و گسل های منجیل، جیرنده، درفک و دیلمان در منطقه واقع شده اند (شکل ۲).

<sup>1</sup> Berberian et al., 1981

<sup>۲</sup> Hakimi Asiabar and Bagheriyan, 2018

<sup>3</sup> Alavi, 1996

<sup>4</sup> Berberian, 1976

<sup>۵</sup> Allen et al., 2003

<sup>6</sup> Stocklin, 1968

<sup>7</sup> Holbrook and Schumm, 1999

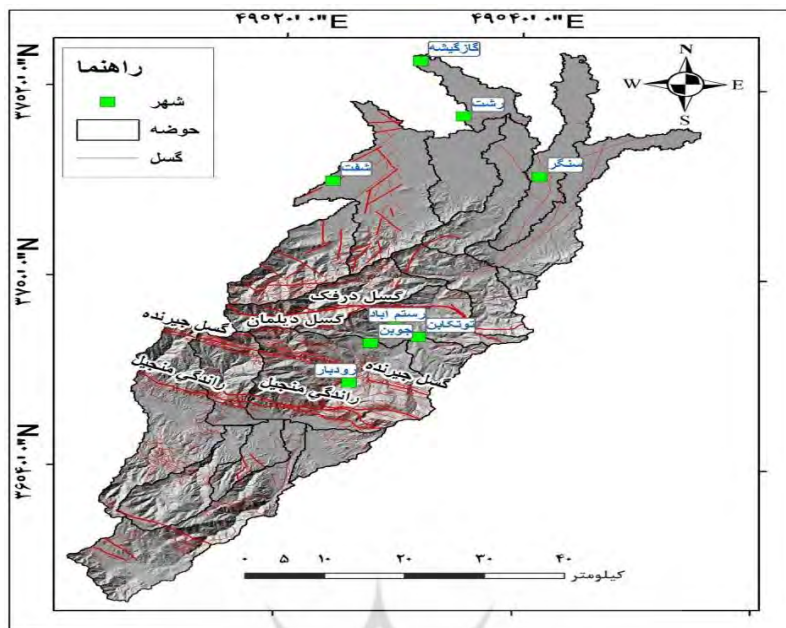
<sup>8</sup> Seeber and Gornitz, 1983

<sup>۹</sup> Keller et al., 1998

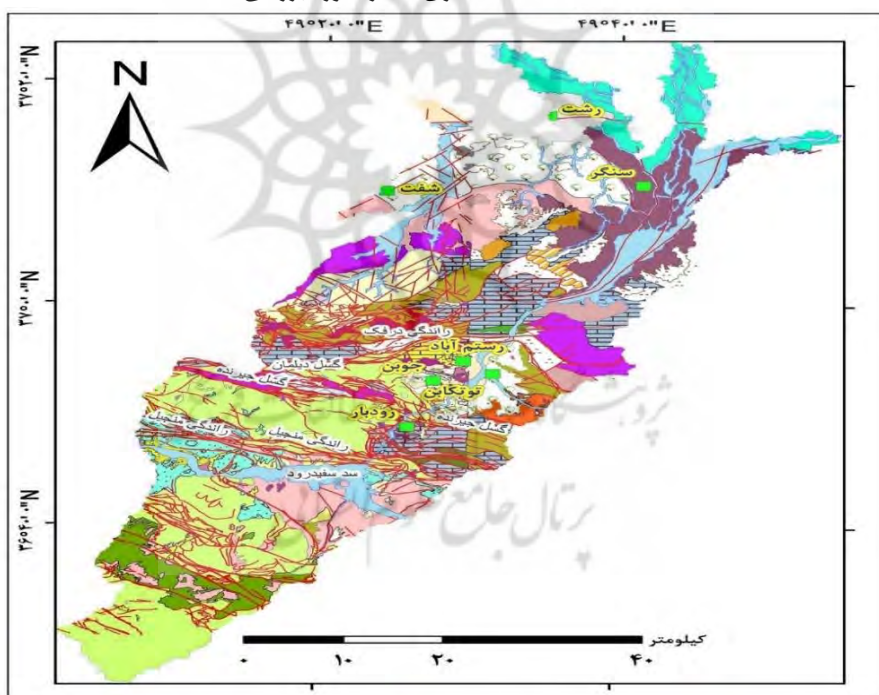
<sup>۱۰</sup> Walker, 2006

<sup>11</sup> Horton, 1945

<sup>12</sup> Strahler, 1952



شکل ۱: نقشه ساختاری گستره مورد بررسی

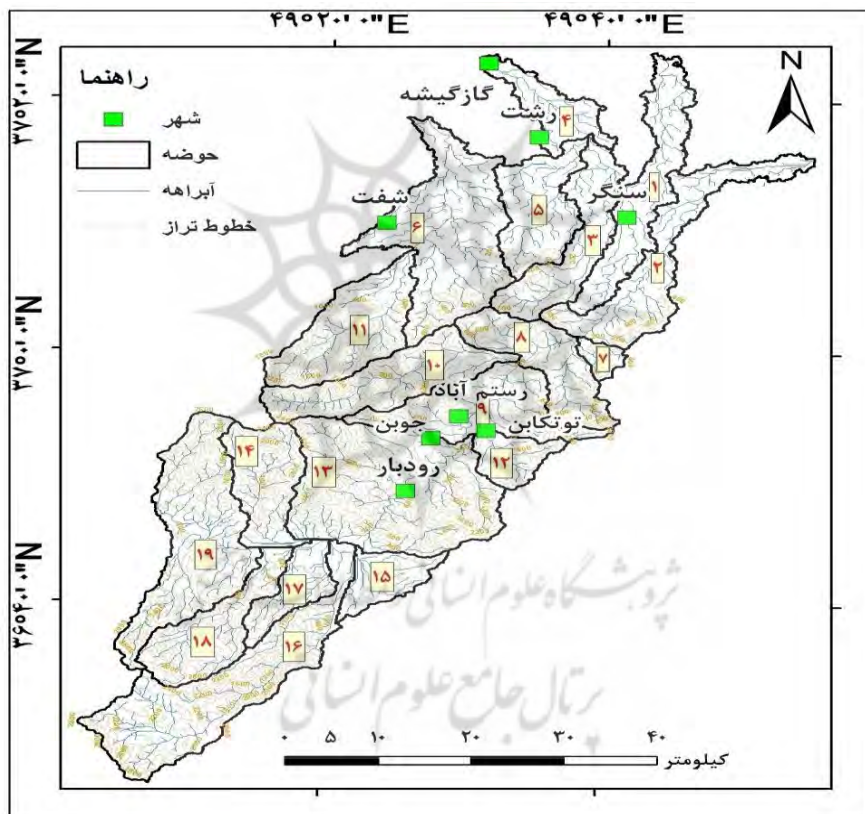


راه‌نما			
beach deposits and blown sand (Quaternary)	Volcanogenic conglomerate (Neogene)	pink, microgranular (Paleogene)	alternation of quartzite (Permian)
Old terraces (Quaternary)	alternation of mudstone (Neogene)	calcareous conglomerate, dark to grey sandstone (Cretaceous)	slaty to phyllic sediments (Permian)
Young terraces (Quaternary)	grey conglomerate (Neogene)	alternation of tuff (Cretaceous)	massive to medium bedded limestone (Permian)
Low level gravel fan (Quaternary)	brownish conglomerate (Neogene)	basaltic andesite lava (Cretaceous)	black amphibole and schist (Permian)
high level gravel fan (Quaternary)	red claystone and siltstone (Neogene)	medium to thick bedded limestone (Cretaceous)	white cataclastic to mylonitic gneissoid (Permian)
fresh water deposits (Quaternary)	metamorphic shale and sand (Paleogene)	metamorphosed volcanic rock (Jurassic)	crumy brown to green slate (Carbonifer)
losses, brownish, worm (Quaternary)	acidic lava (Paleogene)	andesite lava (Jurassic)	basic metamorph volcanic rock (Devonian)
undivided deltaic deposits (Quaternary)	white lithic tuff (Paleogene)	grey to light conglomerate (Jurassic)	olivine gabbro-norite
deltaic deposits and gravel (Quaternary)	alternating of dark grey shale (Paleogene)	alternation of grey shale (Jurassic)	dacite andesitic masses
deluvial and fluvial deposits (Quaternary)	undivided volcanic rock (Paleogene)	light grey to cream limestone (Jurassic)	andesite to diabasic dykes
young deposits (Quaternary)	dark brown sandstone (Paleogene)	alternation of grey sandstone (Triassic-Jurassic)	City
old deposits (Quaternary)	light grey-granular (Paleogene)	basic alkali volcanics (Permian)	Fault

شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی گستره مورد بررسی (برگرفته از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ رشت، انزلی، رودبار و جیرنده، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور)

## روش تحقیق

جهت انجام تحقیق حاضر در محدوده البرز غربی، به منظور بررسی تکتونیک فعال در منطقه؛ در ابتدا با استفاده از نرم افزار Arc GIS و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) ۳۰ متر، به حوضه بندی و استخراج آبراهه‌ها پرداخته شد (شکل ۳). سپس با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ و از طریق نرم افزار Arc GIS لایه‌های مختلف کاربردی که شامل آبراهه، حوضه، گسل، لیتولوژی و خطوط ارتفاعی می‌باشد، تهیه گردید. در آخر برای حوضه‌های استخراج شده شاخص‌های ژئومورفیک که شامل ناهنجاری سلسله مراتبی ( $\Delta a$ )، انشعابات (R)، انتگرال و منحنی فرازسنجی (Hi)، برجستگی نسبی (Bh)، تراکم زهکشی (Dd)، ضریب شکل (Ff) و گرادیان طولی رود (SL) می‌باشد؛ اندازه‌گیری شد. برای هر شاخص نقشه پهنه‌بندی فعالیت تکتونیک در محدوده مورد بررسی تهیه گردید و نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌ها پس از انجام مطالعات صحرایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



شکل ۳: حوضه‌ها و آبراهه‌های استخراج شده در محدوده مورد مطالعه

شاخص آنومالی سلسله مراتبی ( $\Delta a$ ):

آنومالی سلسله مراتبی (Hierarchical) (HA): در این شاخص تعداد انشعاباتی که از یک رده به رودخانه رده دو یا چند رده بالاتر از خود می‌ریزد محاسبه می‌شود و بر اساس رابطه ۱ تعیین می‌گردد (سیکاسی و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۸۶):

$$HA (i > j) = 2^{(i-1)} - 2^{(j-1)} \quad (1)$$

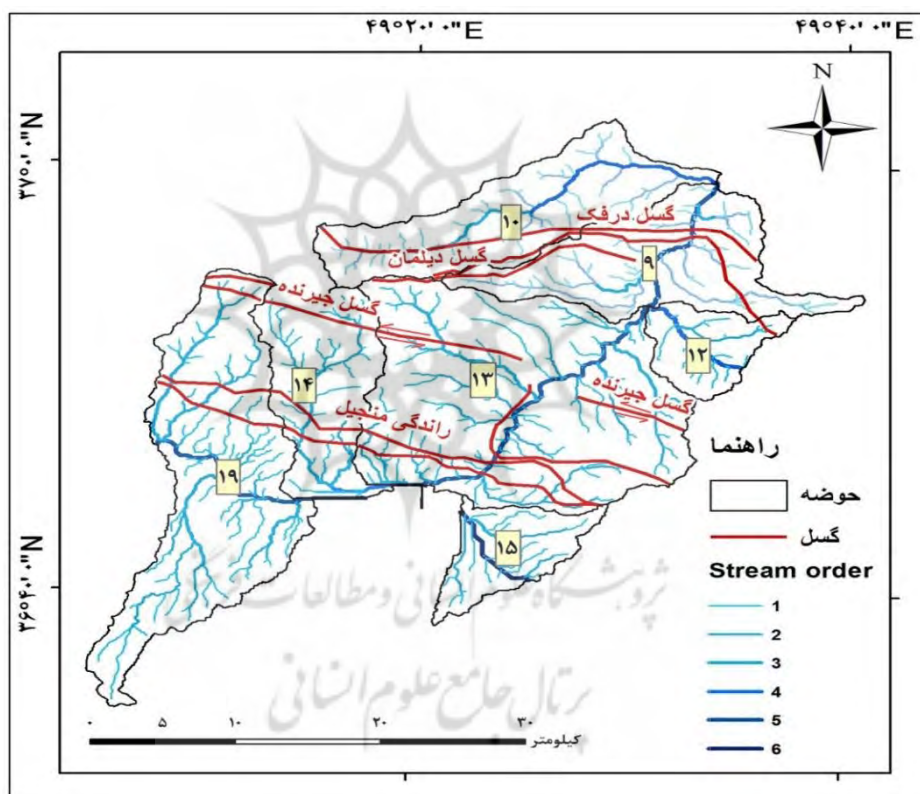
در این رابطه (HA) آنومالی سلسله مراتبی (Hierarchical)، (i) رده رودخانه پایین تر و (j) رده رودخانه بالاتر است. برای هر رده به تعیین تعداد آنومالی سلسله مراتبی می‌پردازیم. آنومالی سلسله مراتبی کل حوضه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Hat = \sum_{i \rightarrow j} N_{i \rightarrow j} * N_{i \rightarrow j} \quad (2)$$

در رابطه ۲ تعداد کل آبراهه‌هایی است که به آبراهه‌های رده بالاتر از خود وارد شده‌اند. در نهایت این مقادیر برای تمامی رده‌های آبراهه محاسبه می‌شود. شاخص آنومالی سلسله مراتبی ( $\Delta a$ ): یکی از شاخص‌های مهم تعیین میزان نقش تکتونیک در ناهنجاری شبکه زهکشی است. این شاخص از تقسیم ( $H_a$ ) کل حوضه بر تعداد کل آبراهه‌های درجه ۱ موجود در حوضه (رابطه ۳) به دست می‌آید (گارنیری و پیروتا، ۲۰۰۸).

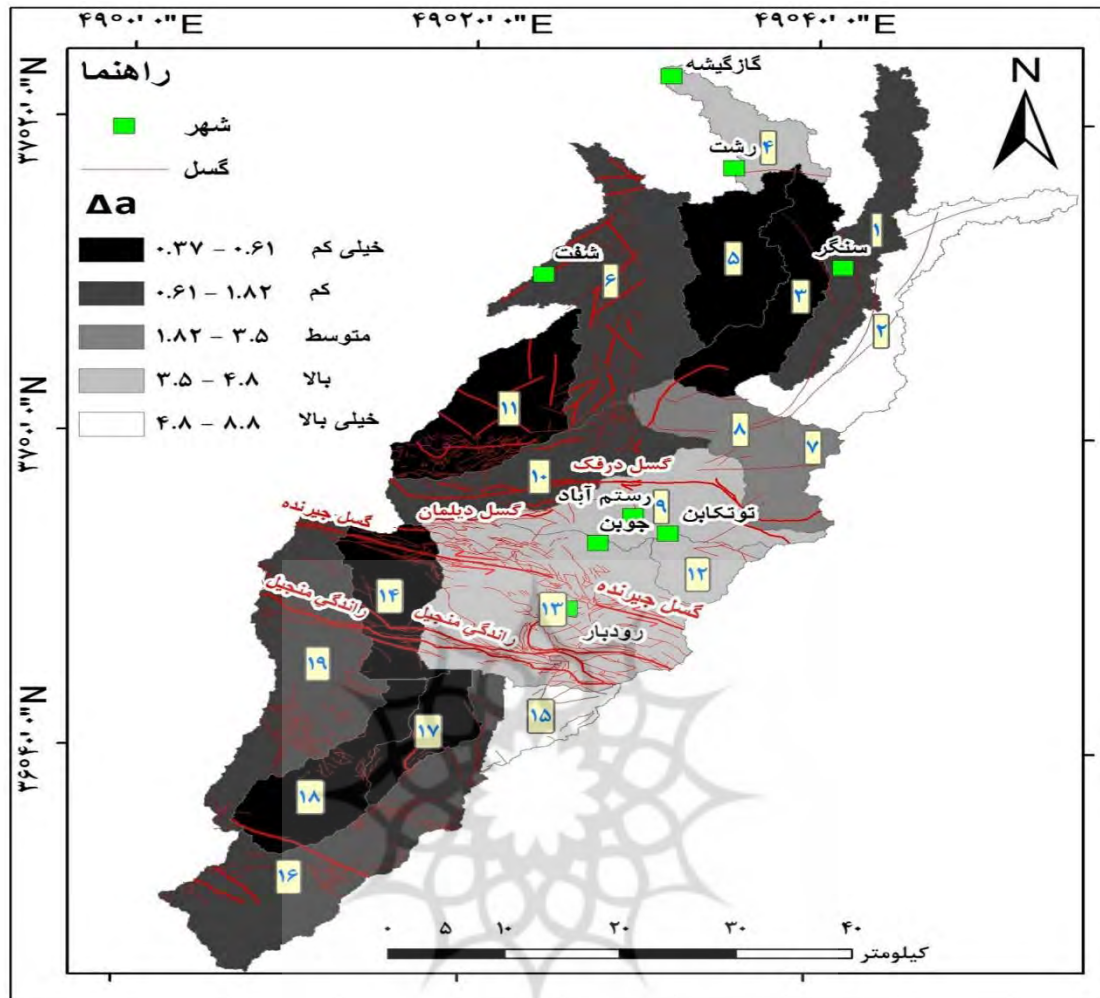
$$\Delta a = \frac{Hat}{N_1} \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $Hat$  تعداد آنومالی سلسله مراتبی کل حوضه و  $N_1$  تعداد کل آبراهه‌های رده یک را نشان می‌دهد.



شکل ۴: شبکه آبراهه در حوضه‌های ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۹ و افزایش ناهنجاری سلسله مراتبی در محل تلاقی گسل با آبراهه.

این شاخص در ۵ رده به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی طبقه‌بندی شده است: رده ۱ فعالیت بسیار بالای تکتونیک، رده ۲ فعالیت بالا، رده ۳ فعالیت تکتونیک متوسط، رده ۴ فعالیت کم و رده ۵ فعالیت بسیار کم تکتونیک را نشان می‌دهد (شکل ۵). نتایج حاصل از اندازه‌گیری این شاخص در حوضه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این شاخص مربوط به حوضه ۱۵ با مقدار ۸/۸ به دلیل زون گسلی منجیل، حوضه ۲ با مقدار ۷/۶، حوضه ۹ با مقدار ۴/۸ به دلیل فعالیت گسل درفک و سپس حوضه ۱۳ با مقدار ۴/۷ به دلیل فعالیت اخیر گسل‌های منجیل و جیرنده می‌باشد.



شکل ۵: نقشه‌ی پراکنندگی مقادیر شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی در منطقه‌ی مورد مطالعه.

### شاخص انشعابات (R)

نحوه اتصال انشعابات در شبکه‌ی رودخانه‌ها بسیار متفاوت است. شکل پیوستن رودخانه‌ها بستگی به ساختار زمین‌شناسی و عمر سیستم رودخانه‌ای دارد. در طبیعت الگوهای شبکه‌ی زهکشی حوضه‌ها بسیار متفاوت است. برای مشخص کردن تاثیر انشعابات شبکه‌ی رودخانه بر هیدروگراف سیل، از نمایه‌ی نسبت انشعابات استفاده می‌شود. شاخص انشعابات، از اختلاف بین نسبت انشعابات و نسبت مستقیم انشعابات به دست می‌آید که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$R = Rb - Rdb \quad (4)$$

در این رابطه (R) شاخص انشعابات، (Rb) نسبت انشعابات و (Rdb) نسبت مستقیم انشعابات می‌باشد. نسبت انشعابات برای هر حوضه از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

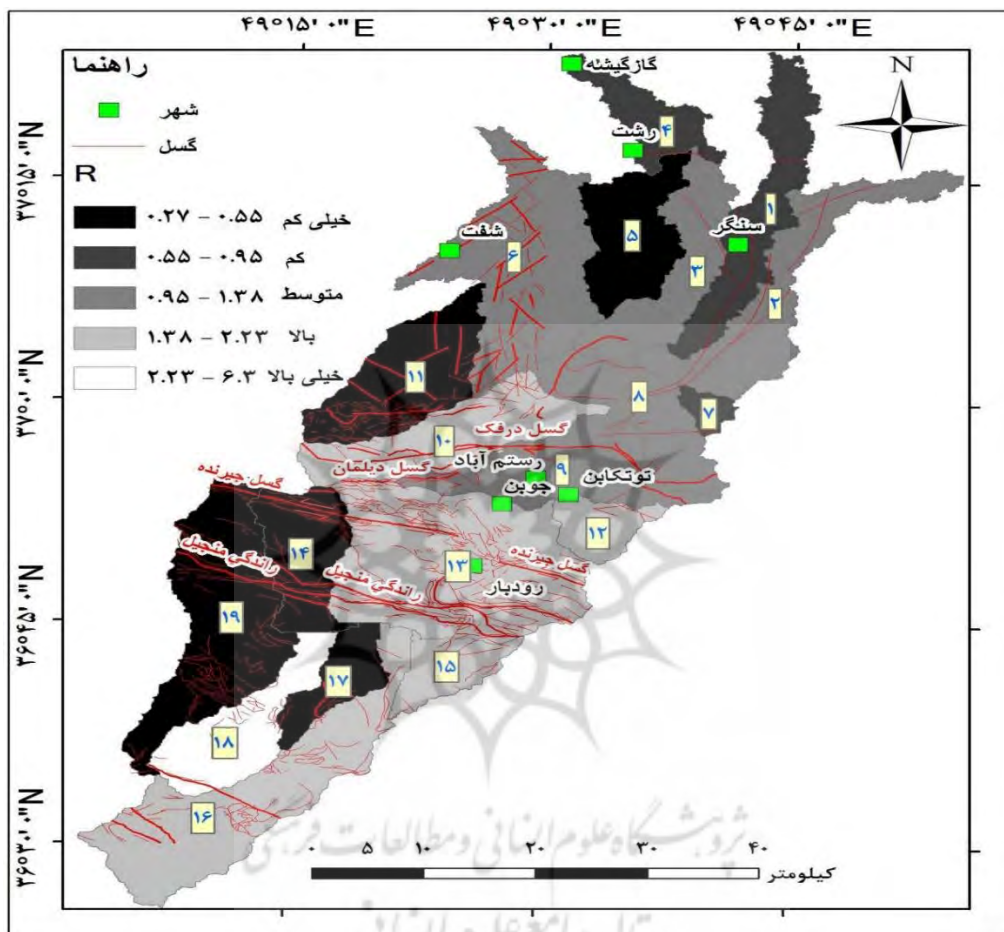
$$Rb(u - u + 1) = Nu / Nu + 1 \quad (5)$$

در این رابطه، Nu تعداد آبراهه‌های یک رده و Nu+1 تعداد آبراهه‌های یک رده بالاتر است. نسبت مستقیم انشعابات از رابطه ۶ به دست می‌آید:

$$Rdb = Ndu / Nu + 1 \quad (6)$$

در رابطه بالا، Ndu تعداد آبراهه‌های یک رده که به رده بالاتر از خود می‌ریزد و Nu+1 تعداد آبراهه‌های رده بالاتر است. مقادیر

شاخص انشعابات در کنار آنومالی سلسله مراتبی اطلاعاتی در مورد میزان فعالیت تکتونیکی کنونی منطقه مورد مطالعه در اختیار ما قرار می‌دهد (گارنیری و پیروتا<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸). گستره مورد نظر به ۵ رده که شامل فعالیت تکتونیکی بسیار بالا، بالا، متوسط، کم و خیلی کم می‌باشد؛ طبقه‌بندی شده است. این شاخص در حوضه ۱۸ با مقدار ۶/۳ به دلیل فعالیت گسل‌های موجود، حوضه ۱۳ با مقدار ۲/۲ به دلیل فعالیت گسل‌های منجیل و جیرنده، حوضه ۱۲ با مقدار ۱/۹ و حوضه ۱۰ با مقدار ۱/۷۳ به دلیل فعالیت گسل درفک بیشترین مقادیر را نشان می‌دهد (شکل ۶).



شکل ۶: نقشه‌ی پراکنده‌ی مقادیر شاخص انشعابات در منطقه‌ی مورد مطالعه.

### انتگرال و منحنی فراسنجی (Hi)

تشخیص وضعیت فرسایش برای تمام حوضه‌های زهکشی اصلی مهم و ضروری است. تحلیل فراسنجی به عنوان یک شاخص برای مراحل فرسایش حوضه‌های زهکشی به کار برده می‌شود (سینگ<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹). انتگرال فراسنجی یکی از پارامترهای رده‌بندی شده زمین‌ریخت‌شناختی در توسعه مراحل زمین‌شناسی یک حوضه زهکشی است. این شاخص به عنوان مساحت نسبی زیر منحنی فراسنجی تعریف شده است، که بیانگر حجم فرسایش نیافته حوضه است و به صورت درصدی بیان می‌شود (کلر و پنتر<sup>۳</sup>، ۲۰۰۲). مقادیر بالای این شاخص مربوط به نواحی فعال و جوان زمین‌ساختی است، در صورتی که مقادیر پائین آن مربوط به نواحی قدیمی است که دچار فرسایش شده و کمتر تحت تأثیر زمین‌ساخت فعال قرار

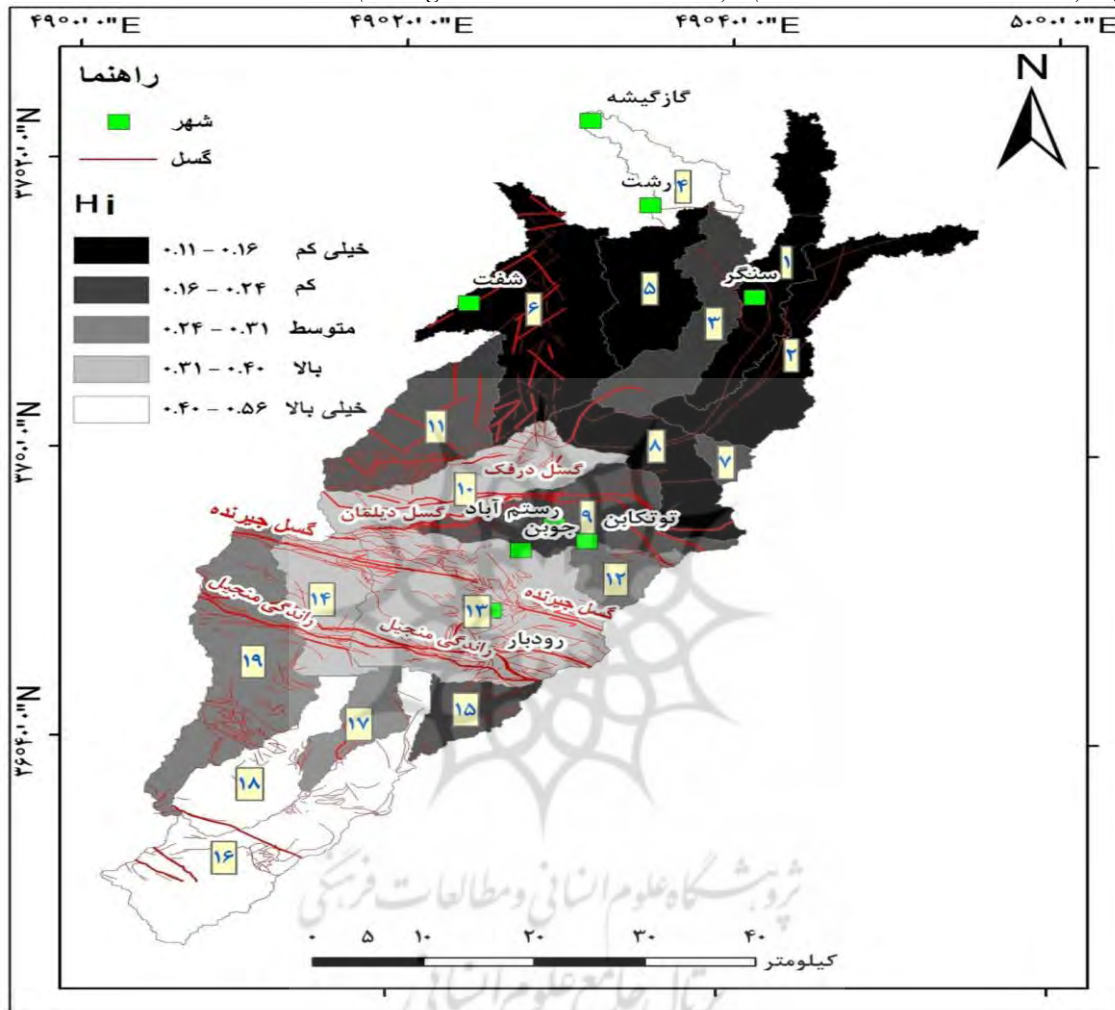
<sup>۱</sup>Guarnieri and Pirrotta, 2008

<sup>۲</sup>Singh, 2009

<sup>۳</sup>Keller and Pinter, 2002

گرفته‌اند (حمدونی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸). انتگرال فرازسنجی (هیپسومتری) توصیف کننده توزیع نسبی ارتفاع در یک منطقه به ویژه حوضه آبریز است (استراهلر<sup>۲</sup>، ۱۹۵۲). این شاخص با استفاده از مساحت سطح زیرین منحنی فرازسنجی مشخص می‌شود و از رابطه ۷ به دست می‌آید (شکل ۷):

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



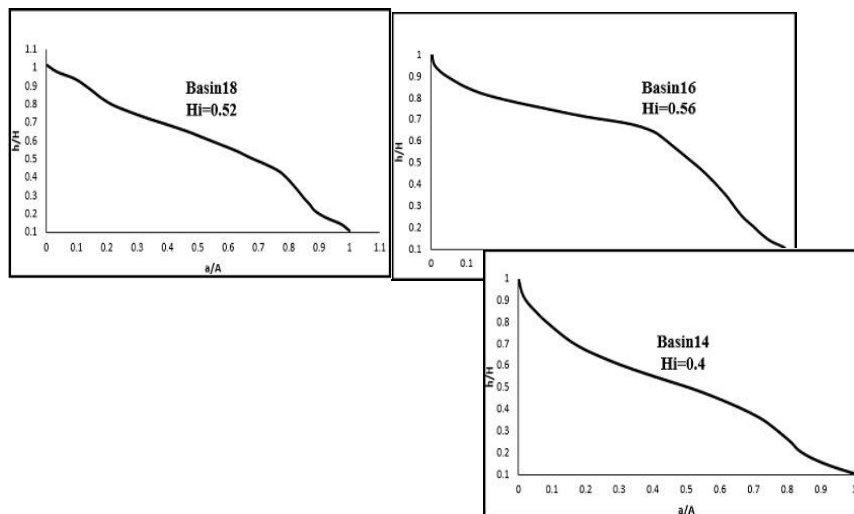
شکل ۷: نقشه رده‌بندی شاخص فرازسنجی در منطقه مورد مطالعه

منحنی فرازسنجی با پیاده کردن نسبت ارتفاع کل حوضه (ارتفاع نسبی) در مقابل نسبت مساحت کل حوضه (مساحت نسبی) حاصل می‌شود (استراهلر، ۱۹۵۲). شاخص فرازسنجی در پنج رده به لحاظ فعالیت تکتونیکی طبقه‌بندی شد که شامل رده‌های با فعالیت تکتونیکی بسیار بالا، بالا، متوسط، کم و خیلی کم می‌باشد. این شاخص در حوضه ۱۶ با مقدار ۰/۵۶، حوضه ۱۸ با مقدار ۰/۵۲، و حوضه ۴ با مقدار ۰/۴۶. به دلیل فعالیت گسل‌های موجود، در حوضه ۱۳ و ۱۴ به دلیل عملکرد گسل‌های زون گسلی منجیل و جیرنده و در حوضه ۱۰ به دلیل فعالیت گسل‌های درفک و دیلمان بیشترین مقادیر را داراست. همچنین منحنی این حوضه‌ها به صورت زیر می‌باشد (شکل ۸).

El Hamdouni et al., 2008<sup>۱</sup>

Strahler, 1952<sup>۲</sup>





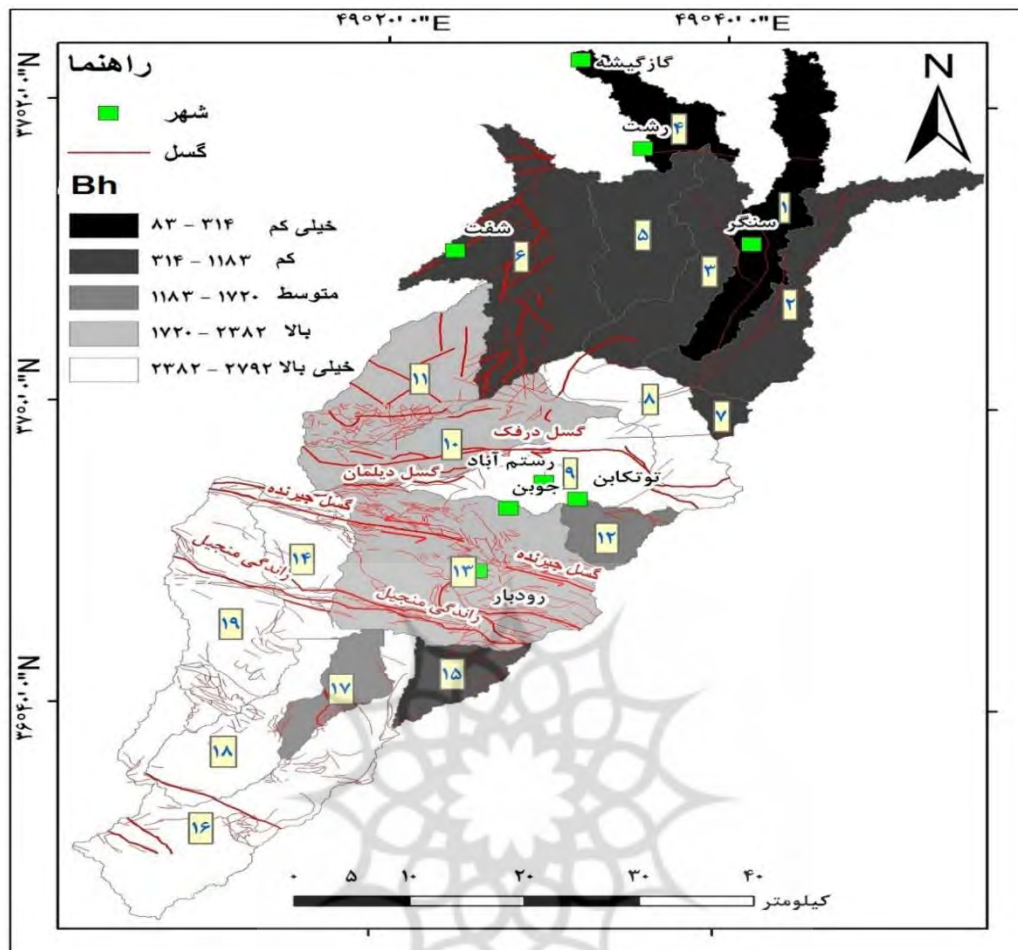
شکل ۸: منحنی بیشینه فراسنجی در حوضه‌های ۱۶، ۱۸ و ۱۴

### برجستگی نسبی (Bh)

برجستگی حوضه نقش مهمی در توسعه‌ی زهکشی، حرکت آب‌های سطحی و زیرزمینی، تراوایی، توسعه‌ی اشکال سطحی زمین و ویژگی‌های فرسایشی عوارض زمینی دارد. مقدار بالای برجستگی نشان‌دهنده‌ی 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، ۲۰۰۲):

$$Bh = H_{max} - H_{min} \quad (8)$$

در این رابطه  $H_{max}$  مقدار ارتفاع بیشینه و  $H_{min}$  مقدار ارتفاع کمینه حوضه است. مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقطه در هر حوضه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) محاسبه گردید. برای بررسی بهتر، شاخص برجستگی نسبی در پنج رده به لحاظ فعالیت تکتونیکی طبقه‌بندی شد و برای آن نقشه پراکندگی مقدار شاخص تهیه گردید (شکل ۹). بر اساس شاخص برجستگی نسبی حوضه، ارتفاع بیشتر نشان‌دهنده‌ی فرسایش کمتر و در نتیجه فعالیت تکتونیکی بیشتر می‌باشد. بیشترین برجستگی در منطقه مورد مطالعه مربوط به حوضه ۱۶ و با مقدار ۲۷۹۲ است که متعاقب آن دارای بیشترین نرخ فعالیت تکتونیکی می‌باشد و کمترین مقدار مربوط به حوضه ۴ با مقدار ۸۳ می‌باشد.



شکل ۹: نقشه پراکنده شاخص برجستگی نسبی در منطقه مورد مطالعه

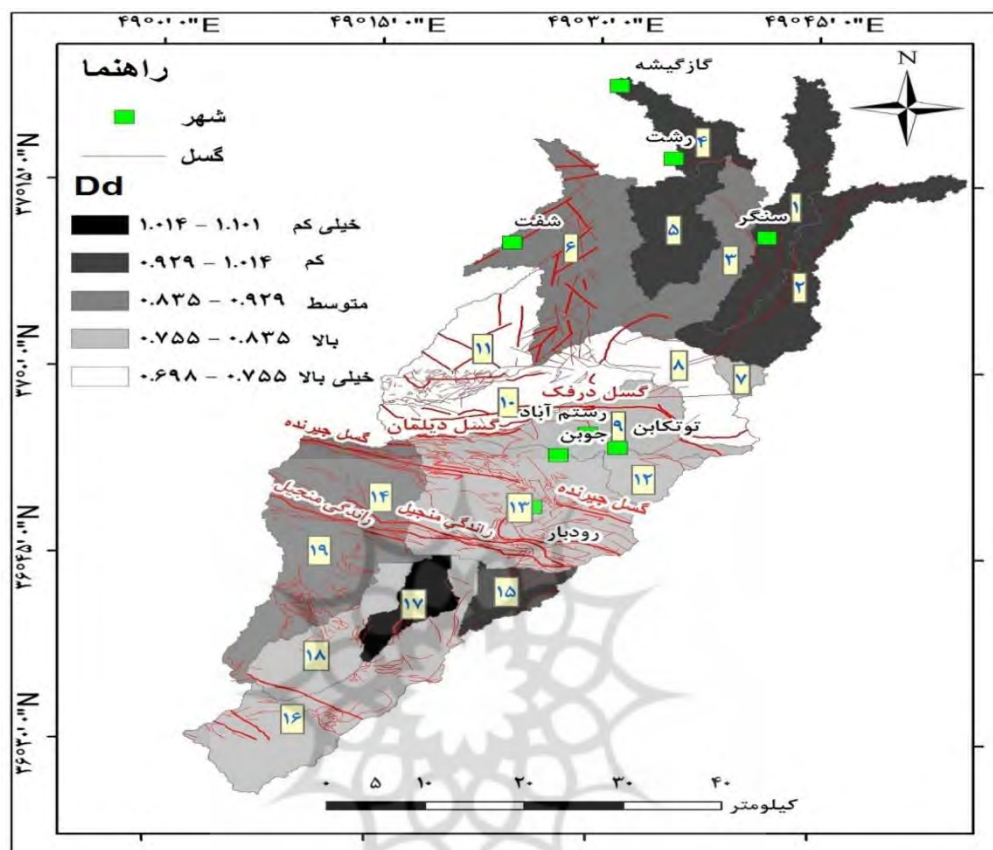
### تراکم زهکشی (Dd)

مقادیر بالای تراکم زهکشی بیانگر این است که منطقه شامل مواد زیرسطحی ضعیف یا نفوذناپذیر، با پوشش گیاهی اندک و پستی و بلندی زیاد است. تراکم زهکشی از نسبت مجموع طول تمام آبراهه‌های یک حوضه به مساحت حوضه محاسبه می‌شود (هورتن<sup>۱</sup>، ۱۹۴۵) و با توجه به رابطه ۹ به‌دست می‌آید:

$$Dd = Lu / A \quad (9)$$

در رابطه بالا Lu مجموع طول تمام آبراهه‌های یک حوضه و A مساحت حوضه می‌باشد. برای محاسبه این شاخص مجموع طول تمام آبراهه‌های یک حوضه و مساحت را در محیط نرم‌افزار GIS به‌دست آمده و با توجه به رابطه بالا مقدار شاخص تراکم زهکشی محاسبه شد. سپس نقشه پهنه‌بندی این شاخص برای کل حوضه‌های منطقه تهیه گردید. این شاخص بر اساس میزان فعالیت تکتونیکی به ۵ رده تقسیم بندی شده است: رده ۱ فعالیت تکتونیکی بسیار بالا، رده ۲ فعالیت تکتونیکی بالا، رده ۳ فعالیت تکتونیکی متوسط، رده ۴ فعالیت تکتونیکی کم و رده ۵ فعالیت تکتونیکی خیلی کم. هر چه عدد محاسبه شده از شاخص تراکم زهکشی کمتر باشد نشان‌دهنده فعالیت بیشتر تکتونیکی در منطقه است و بالعکس (شکل ۱۰). حوضه ۹ به دلیل عملکرد گسل دیلمان، حوضه ۱۰ به دلیل عملکرد گسل درفک و حوضه ۱۳ به دلیل عملکرد

گسل‌های منجیل و جیرنده، حوضه‌های ۷ و ۸ و ۱۱ به دلیل فعالیت گسل‌های موجود، از نظر تکتونیکی فعال هستند. همچنین کمترین فعالیت تکتونیکی مربوط به حوضه ۱۷ می‌باشد.



شکل ۱۰: نقشه پهنه‌بندی شاخص تراکم زهکشی

### ضریب شکل (Ff)

شکل حوضه: حوضه‌های آبریز از نظر ظاهری دارای شکل‌های گوناگون می‌باشند. به طوری که با مساوی بودن سایر شرایط فیزیکی دبی اوج حوضه‌های گرد بیشتر از حوضه‌های کشیده خواهد بود. به دلیل اینکه شکل حوضه تابعی از پستی و بلندی و محیط آن می‌باشد گوناگونی زیادی در شکل حوضه‌ها دیده می‌شود و مقایسه آنها را با یکدیگر مشکل می‌سازد. برای حل این مشکل از روابطی که در آنها فاکتورهای ثابتی از حوضه گنجانده شده است استفاده می‌شود (مهدوی، ۱۳۸۶، ۴۳۷). از جمله این پارامترها می‌توان به ضریب شکل اشاره نمود. این شاخص با توجه به رابطه ۱۰ به دست می‌آید (هورتن<sup>۱</sup>، ۱۹۴۵):

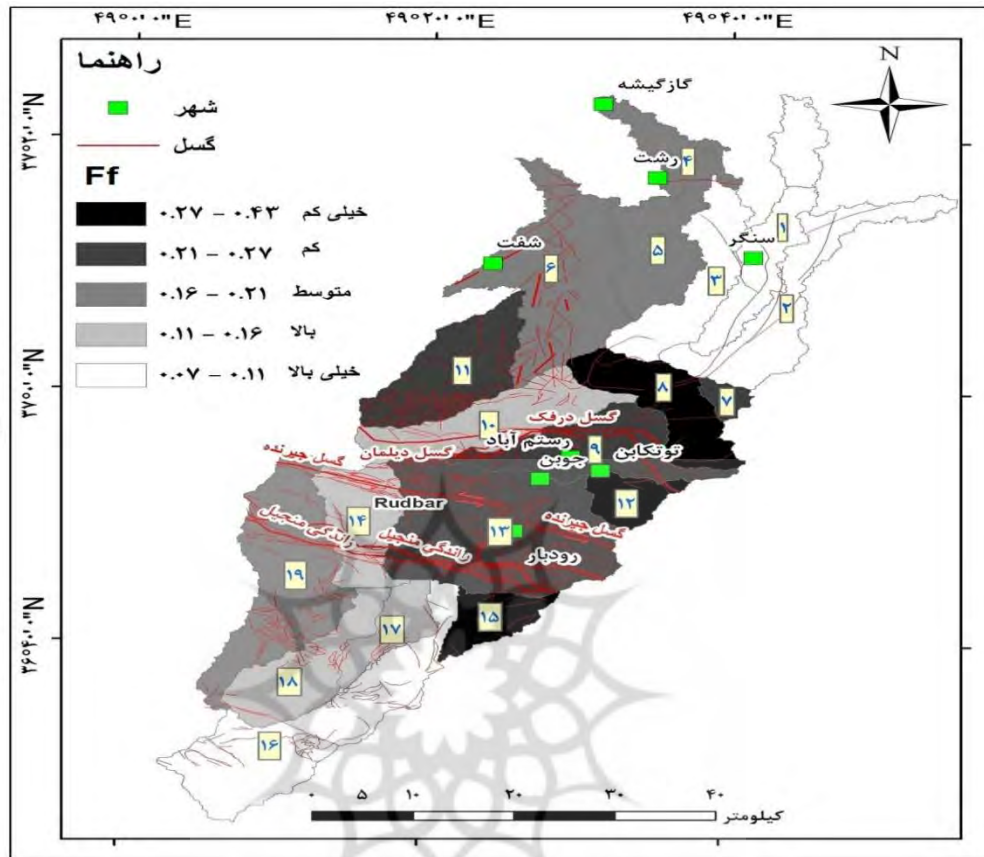
$$Ff = A / L^2 \quad (10)$$

در این رابطه A مساحت حوضه و  $L^2$  مجذور طول حوضه است. طول حوضه از محل خروج آبراهه اصلی تا مرتفع‌ترین نقطه در حوضه محاسبه می‌گردد. هر چه مقدار ضریب فرم به عدد ۱ نزدیکتر باشد حوضه مذکور به مربع نزدیکتر است و هر چه ضریب فرم کوچکتر از یک باشد حوضه کشیده‌تر است (مهدوی، ۱۳۸۶). حوضه‌های زهکشی در مناطق فعال از نظر تکتونیکی، دارای شکل کشیده‌تر می‌باشند (بال و مکافی<sup>۲</sup>، ۱۹۷۷). برای این شاخص نیز نقشه پراکندگی در ۵ رده تهیه شده است. کمترین مقدار شاخص مربوط به حوضه ۱ با مقدار ۰/۰۷ می‌باشد که دارای بیشترین کشیدگی و بیشترین فعالیت

<sup>۱</sup>Horton, 1945

<sup>۲</sup>Bull and McFadden, 1977

تکتونیک است و بیشترین عدد شاخص مربوط به حوضه ۸ با مقدار ۰.۴۳. می باشد که کمترین فعالیت تکتونیک را دارا است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: نقشه پراکنندگی شاخص ضریب شکل

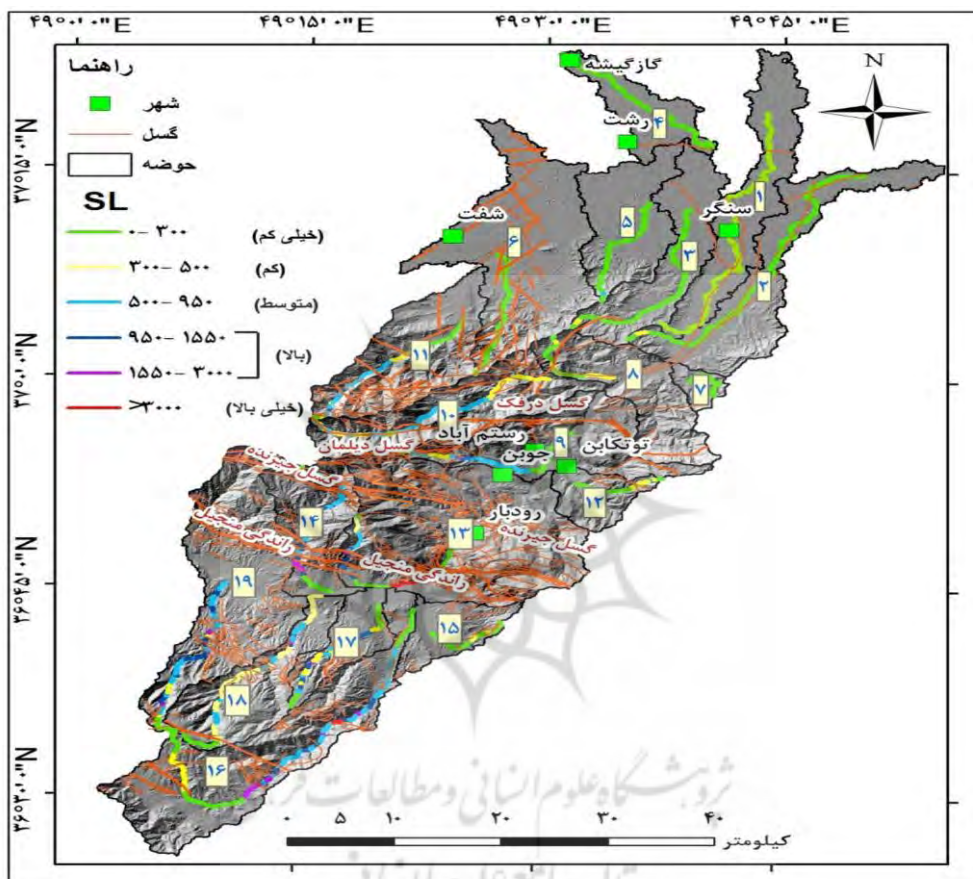
### شاخص گرادیان طولی رود (SL):

این شاخص که تأثیر تغییرات محیطی بر روی نیمرخ‌های طولی رودخانه را نشان می‌دهد، از رابطه ۱۱ به دست می‌آید:

$$SL = (\Delta H / \Delta L) L \quad (11)$$

در این رابطه (SL) شاخص شیب رودخانه، ( $\Delta H$ ) اختلاف ارتفاع در یک مقطع خاص از رودخانه، ( $\Delta L$ ) 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. این شاخص برای ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی مفید بوده (کلر و پینتر، ۲۰۰۲) و نشان‌دهنده تغییرات توپوگرافیکی در امتداد یک رود است. به‌طور معمول این تغییرات تحت تأثیر سه عامل که شامل: فعالیت تکتونیک می‌تواند باعث ایجاد بالآمدگی شود، تفاوت سنگ‌شناسی و فراوانی زیاد تغییرات سطح اساس دریا طی دوره‌ی کوتاه‌تر هستند (فونت و همکاران، ۲۰۱۰). این شاخص به ۵ رده تقسیم شده است که بیشترین مقدار آن در مناطقی است که گسل آبراهه را قطع می‌کند. این مناطق فعال هستند و با رنگ قرمز و بنفش نمایش داده می‌شوند. مثلاً در حوضه‌های ۱۳ و ۱۴ گسل منجیل آبراهه اصلی را قطع کرده و موجب افزایش گرادیان طولی به دلیل فعالیت تکتونیک کنونی گسل شده است (شکل ۱۲).

در حوضه ۱۱ در محل تغییر لیتولوژی چرت (سازند روته) و ماسه‌سنگ (سازند درود)، مقدار SL بالا رفته است. در حوضه ۱۳ در محل تغییر لیتولوژی سنگ‌های پیروکلاستیکی و ماسه‌سنگ سیلتی و همچنین در محل تغییر لیتولوژی رسوبات رودخانه‌ای و تراکی‌اندزیت؛ در حوضه ۱۴ در محل تغییر لیتولوژی سنگ‌آهک و شیل، در حوضه ۱۶ در محل تغییر لیتولوژی رسوبات آتشفشانی و گرانیتوئید، در حوضه ۱۷ در محل تغییر لیتولوژی رسوبات آتشفشانی و سنگ‌های پیروکلاستیکی نیز مقدار SL بالا رفته است. در حوضه ۱۹ در محل تغییر لیتولوژی سنگ‌های پیروکلاستیکی و لاوا و همچنین در محل تغییر لیتولوژی سنگ‌های پیروکلاستیکی و آندزیت، شاهد مقادیر بالایی از SL هستیم.

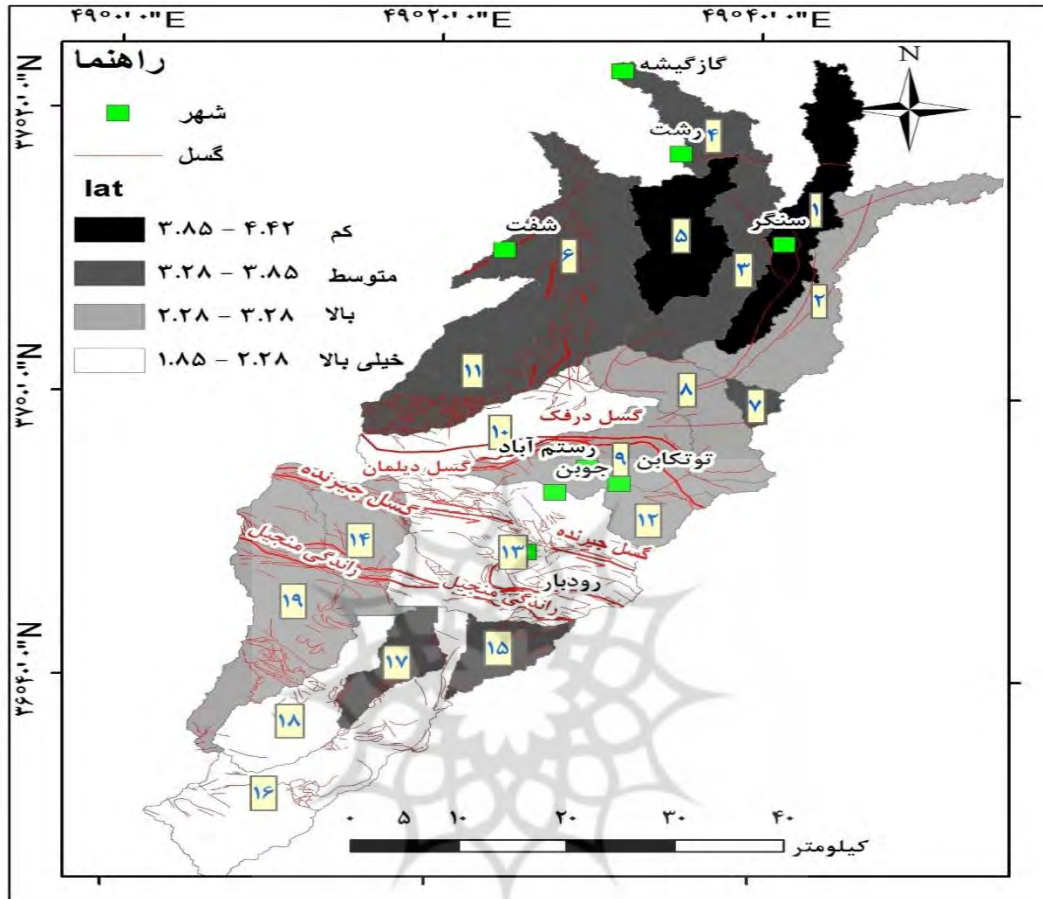


شکل ۱۲: نقشه پراکندگی شاخص گرادیان طولی رود

### شاخص نهایی (Iat)

در این پژوهش به منظور بررسی منطقه مورد مطالعه از لحاظ فعالیت تکتونیکی از شاخص‌های مورفومتری استفاده شده است که شامل شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی ( $\Delta a$ )، انشعابات (R)، انتگرال و منحنی فرازسنجی (Hi)، برجستگی نسبی (Bh)، تراکم زهکشی (Dd)، ضریب شکل (Ff) و گرادیان طولی رود (SL) می‌باشند. هر شاخص به پنج رده به لحاظ فعالیت تکتونیکی تقسیم شد و در نهایت برای هر حوضه شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) محاسبه گردید. این شاخص با میانگین‌گیری از رده‌های شاخص زمین‌ریختی (s/n) در هر زیر حوضه محاسبه می‌شود که خود شامل چهار رده است: رده ۱ فعالیت زمین‌ساختی خیلی بالا، رده ۲ فعالیت زمین‌ساختی بالا، رده ۳ فعالیت زمین‌ساختی متوسط و رده ۴ فعالیت زمین‌ساختی پایین را نشان می‌دهد. شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی برای ۱۹ زیر حوضه در ناحیه مورد مطالعه محاسبه (جدول ۱) و نتایج آن در شکل (۱۳) ترسیم شده است. در منطقه مورد مطالعه، تقریباً نیمی از مساحت کل حوضه‌های

آبریز در رده فعالیت زمین‌ساختی بالا و خیلی بالا قرار گرفته است که به دلیل عملکرد گسل‌های درفک، دیلمان، زون گسلی جیرنده و منجیل و گسل‌های موجود در جنوب باختری منطقه می‌باشد.



شکل ۱۳: نقشه‌ی توزیع سطح فعالیت زمین‌ساختی نسبی (Iat) در منطقه مورد مطالعه

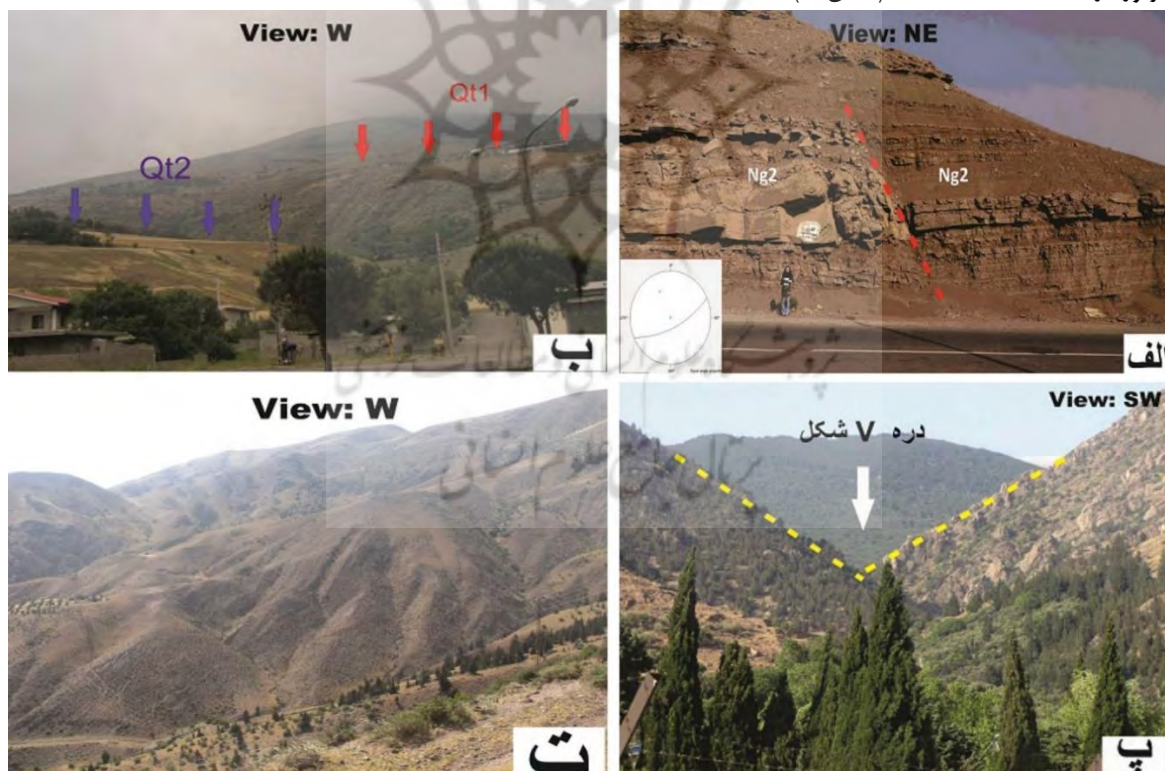
جدول ۱: مقادیر هفت شاخص اندازه‌گیری شده و سطح فعالیت زمین‌ساختی در گستره مورد مطالعه

Basin .no	$\Delta a$	R	Bh (m)	Hi	Dd (km <sup>-1</sup> )	Ff	SL	Iat
۱	۱/۰۷	۰/۹۵	۳۱۴	۰/۱۶	۰/۹۸	۰/۰۷	۶۴	۴
۲	۷/۶	۱/۳	۸۱۲	۰/۱۵	۰/۹۸	۰/۰۸	۲۰۲	۲
۳	۰/۵	۱/۱	۷۸۷	۰/۱۹	۰/۹۱	۰/۱	۱۷۳	۳
۴	۴	۰/۸۵	۸۳	۰/۴۶	۰/۹۵	۰/۱۸	۷۴	۳
۵	۰/۵	۰/۵۵	۶۲۴	۰/۱۱	۰/۹۷	۰/۱۹	۲۴۱	۴
۶	۱/۵۲	۱/۳۸	۱۰۳۳	۰/۱۱	۰/۹۲	۰/۱۹	۲۷۸	۳
۷	۲/۶	۰/۸۵	۷۸۷	۰/۲۴	۰/۸۱	۰/۲۴	۱۲۴	۳
۸	۳/۵	۱/۲	۲۵۲۵	۰/۱۶	۰/۷۵	۰/۴۳	۲۰۸	۲
۹	۴/۸	۱/۴	۲۴۹۷	۰/۱۹	۰/۸	۰/۲۳	۵۹۹	۲
۱۰	۱/۰۳	۱/۷۳	۲۳۱۲	۰/۳۸	۰/۶۹	۰/۱۶	۶۰۱	۱

۱۱	۰/۵۵	۰/۴۴	۲۳۸۲	۰/۲۴	۰/۷۲	۰/۲۲	۷۵۳	۳
۱۲	۳/۸۴	۱/۹۵	۱۱۸۳	۰/۲۸	۰/۸	۰/۳۸	۳۹۰	۲
۱۳	۴/۷۹	۲/۲۳	۲۲۷۰	۰/۳۶	۰/۷۹	۰/۲۷	۹۹۶	۱
۱۴	۰/۳۷	۰/۵	۲۵۸۲	۰/۴	۰/۸۸	۰/۱۵	۶۹۹	۲
۱۵	۸/۸	۱/۶	۱۱۲۷	۰/۲۱	۱/۰۱	۰/۳۵	۲۷۳	۳
۱۶	۱/۵۸	۱/۷۱	۲۷۹۲	۰/۵۶	۰/۷۶	۰/۱۱	۱۵۴۴	۱
۱۷	۰/۶۱	۰/۲۷	۱۷۲۰	۰/۳۱	۱/۱	۰/۱۶	۷۶۱	۳
۱۸	۰/۴۸	۶/۳	۲۵۲۸	۰/۵۲	۰/۸۳	۰/۱۴	۱۶۷۹	۱
۱۹	۱/۸۲	۰/۵۲	۲۵۲۲	۰/۳	۰/۹	۰/۲۱	۱۱۰۷	۲

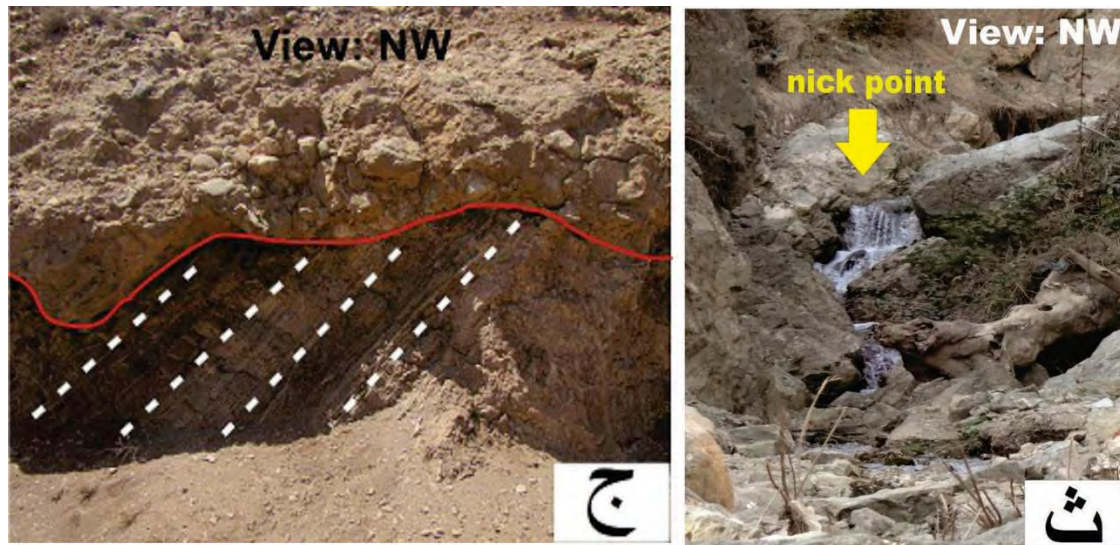
### مشاهدات صحرائی:

مشاهدات صحرائی، لندفرم‌هایی نظیر کج‌شدگی واحدهای کواترنری و نیز وجود سطوح مثلثی، چند نسل پادگانه آبرفتی، رودشکن‌های<sup>۱</sup> متعدد، دره‌های تنگ<sup>۲</sup> و باریک و دره‌های V شکل را نشان می‌دهد که در نتیجه فعالیت‌های اخیر گسل‌های مزبور در منطقه ایجاد شده‌اند (شکل ۱۴).



<sup>۱</sup>Knickpoint

<sup>۲</sup>Gorge



شکل ۱۴: شواهد مورفوتکتونیکی مشاهده شده در پهنه گسلی منجیل. الف) نمایی از گسل منجیل که واحدهای سنگی نئوژن را تحت تاثیر قرار داده است، ب) تراس های آبرفتی ایجاد شده به دلیل عملکرد گسل منجیل، پ) دره V شکل ایجاد شده بر اثر فعالیت گسل منجیل (ت) سطوح مثلی ایجاد شده به علت فعالیت تکتونیکی منطقه (ث) رودشکن موجود در منطقه، ج) کج‌شدگی رسوبات تراس‌های آبرفتی در اثر فعالیت زمین‌ساختی منطقه

#### بحث :

بررسی شاخص‌های ژئومورفیک، روش مفیدی برای ارزیابی میزان فعالیت تکتونیکی اخیر را فراهم می‌آورد. بر اساس مقدار شاخص‌های ناهنجاری سلسله مراتبی ( $\Delta a$ )، انشعابات ( $R$ )، انتگرال و منحنی فراسنجی ( $Hi$ )، برجستگی نسبی ( $Bh$ )، تراکم زهکشی ( $Dd$ )، ضریب شکل ( $Ff$ ) و گرادیان طولی رود ( $SL$ )، شاخص کلی زمین‌ساخت فعال نسبی ( $Iat$ ) برای گستره مورد نظر محاسبه شد. نتایج حاصل از بررسی ریخت‌زمین‌ساخت گستره مورد مطالعه گویای این است که این گستره تا حد زیادی از فعالیت گسل‌های منطقه به ویژه گسل منجیل، جبرنده و دیلمان تأثیر پذیرفته است. گسل منجیل یک گسل رانده (حکیمی آسیابر و همکاران، ۲۰۱۱) به طول تقریبی ۲۸۰ کیلومتر می‌باشد. راستای این گسل در بخش اصلی آن در خاور، شمال باختری است. شیب گسل به سوی شمال خاور - خاور است. انتهای باختری گسل جبرنده به این گسل می‌رسد. زلزله رودبار با بزرگی  $M_w=7.3$  و  $MS=7.7$  در سال ۱۹۹۰، بزرگترین زمین‌لرزه‌های دستگاهی ثبت شده در البرز بوده که بر روی گسل منجیل رخ داده است (بربریان و واکر، ۲۰۱۰). گسل جبرنده دارای طول تقریبی ۱۷۸ کیلومتر و شیب آن به سوی جنوب می‌باشد. این گسل یک گسل رانده با مولفه جابجایی امتدادلغز از نوع چپ‌بر است. راستای آن در نیمه خاوری، شمال باختر و در نیمه باختری، باختر - شمال باختری می‌باشد. مطالعات لرزه‌نگاری در این ناحیه نشان می‌دهد که وضعیت لرزه‌خیزی این محدوده از وضعیت لرزه‌خیزی البرز تبعیت می‌کند. در این ناحیه زمین‌لرزه‌های با فراوانی کم و بزرگی متوسط تا بالا رخ می‌دهد. گسل درفک از نوع گسل‌های راندگی است و دارای روند شرقی - غربی می‌باشد که جهت شیب لایه‌ها به سمت جنوب است. گسل دیلمان از نوع گسل‌های راندگی است و شیب سطح گسل آن به سمت شمال بوده و روند آن شرقی - غربی می‌باشد. مقادیر بالایی از شاخص‌های ناهنجاری سلسله مراتبی در بخش میانی منطقه مورد مطالعه که سبب گردیده است آبراهه‌های با رده‌های مختلف به طور نامنظمی به رده‌های بالاتر ریخته شوند در اثر عملکرد گسل‌های جبرنده، منجیل و دیلمان می‌باشد و این منطقه را به ناحیه‌ای فعال از نظر تکتونیکی تبدیل کرده‌اند. بر اساس نقشه پهنه‌بندی نسبت انشعابات می‌توان دریافت که بیشترین نسبت انشعاب در مجاورت گسل‌ها است. بطور مشخص



گسل‌های منجیل، جیرنده و دیلمان بیشترین فعالیت تکتونیکی را بر اساس تحلیل این شاخص نشان می‌دهند. با بررسی شاخص فرازسنجی در این منطقه می‌توان نتیجه گرفت که این شاخص که در ارتباط مستقیمی با تغییرات ارتفاع است در حوضه‌های جنوبی منطقه مورد بررسی بیشترین مقدار را نشان می‌دهد. همچنین در حوضه‌های منطبق با ناحیه مرتفع و پرتراکم گسلی که گسل‌های منجیل و جیرنده در این نواحی واقع شده‌اند، مقادیر بالایی از شاخص فرازسنجی را مشاهده می‌کنیم. شاخص برجستگی نسبی در حوضه‌های واقع بر گسل‌های جیرنده و منجیل و مناطقی که تراکم گسل‌ها زیاد است، مقدار بیشتری نشان داده است. مقادیر کم شاخص تراکم زهکشی در قسمت میانی گستره مورد نظر که گسل‌های منجیل و جیرنده در آنجا واقع شده و خصوصا در امتداد گسل درفک و دیلمان نیز دلیل دیگری بر فعالیت تکتونیکی اخیر ساختارهای مورد بررسی می‌باشد. بیشترین کشیدگی در مجاورت گسل‌های شمال و شمال خاوری و همچنین زیر حوضه‌های واقع در جنوب باختری منطقه دیده می‌شود که در آن‌ها مقدار کمتر شاخص ضریب شکل در حوضه‌های کشیده مشهود می‌باشد و بیانگر این است که از نظر تکتونیکی فعال‌تر هستند. نتایج حاصل از زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) میزان فعالیت بالای تکتونیکی را در بیشتر از نیمی از گستره مورد مطالعه و در مجاورت گسل‌های اصلی و جوان منجیل، جیرنده، دیلمان، درفک در منطقه را تایید می‌کند.

#### نتیجه‌گیری:

مطالعه صورت گرفته در این بخش از البرز غربی نشان می‌دهد که به طور کلی فعالیت زمین‌ساختی نسبی اخیر در اثر عملکرد گسل‌های فعال موجود در منطقه از قبیل مجیل، جیرنده، درفک و دیلمان بالا و بسیار بالاست. در حدود ۶۲٫۶ درصد از منطقه فعالیت تکتونیکی متوسط به بالایی را ارائه می‌دهد. لندفرم‌های زیادی نیز در نتیجه جابجایی و فعالیت گسل‌های مزبور ایجاد شده‌اند که از جمله شواهد فعالیت بالای گستره مورد بررسی می‌باشد. نتایج حاصل از مشاهدات صحرایی، شاخص‌های مورفولوژی، کج شدگی واحدهای کواترنر و زمین لرزه‌های رخ داده در گستره مورد بررسی، فعالیت اخیر این منطقه از نظر زمین‌ساختی را تایید می‌کند.

#### منابع:

- مهدوی، محمد، ۱۳۸۶، هیدرولوژی کاربردی، جلد دوم، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. *Journal of Geodynamics*, 21, pp. 1- 33.
- Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M., Qorashi, M., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, 25, pp. 659- 672.
- Avena, G.C., Giuliano, G. and Lupia Palmieri, E., 1967. Sulla valutazione quantitativa Della gerarchizzazione Ed evoluzione dei reticoli fluviali. *Bollettino Della Societa Geologica Italiana*, 86, pp. 81- 796.
- Berberian, M., 1976. An explanatory note on the first seismotectonic map of Iran; a seismotectonic review of the country. *Geol. Surv. Iran*, 39, pp.7- 142.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, pp. 210- 265.
- Berberian, M., and 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, pp. 1577- 1602.
- Bull, W.B. and 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.
- 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.
- EL Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J., Keller, E.A., 2008. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain), *Geomorphology*, 969, pp. 150- 173.

- Font, M., Amorese, D., Lagarde, J.L., 2010. DEM and GIS analysis of the stream gradient index to evaluate effects of tectonics: The Normandy intraplate area (NW France), 109, pp. 172- 180.
- 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, pp. 260- 273.
- Hakimi Asiabar, S., Pourkermani, M., Shahriari, S., Ghorbani, M., Ghasemi, M.R., 2011. Geological zones of western Alborz Mountains. *Journal of Islamic Azad University*, 21, pp. 113- 124.
- 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, pp. 275- 370.
- 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.
- Keller, E.A., Pinter, N., 2002. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape (2ndEd.)*, Prentice Hall, New Jersey.
- Seeber, L., Gornitz, V., 1983. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*, 92, pp. 335- 367.
- Singh, O.M., 2009. Hypsometry and erosion proneness: a case study in the lesser Himalayan Watersheds, *Journal of Soil and Water conservation*, 8, pp. 53- 59.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52, pp. 1229- 1258.
- Strahler, A.N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Geological Society of America Bulletin*, 63, pp. 1117- 1142.
- 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, PP. 654- 66.