

## قطعه‌بندی گسل آبیژ بر مبنای شاخص‌های مورفوتکتونیک

سعید حائری فرد\*؛ دکتری تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، ایران  
منوچهر قرشی؛ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، ایران  
محسن پور کرمانی؛ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، ایران  
محمود الماسیان؛ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۸

### چکیده

گسل آبیژ یکی از فعال‌ترین عناصر ساختمانی در شرق ایران به‌شمار می‌رود. اثر فعالیت این گسل در زمان کواترنری، کاملاً مشهود است. زمین‌لرزه‌های متعددی در ارتباط با گسل یادشده در منطقه به‌وقوع پیوسته و هر یک مربوط به یکی از بخش‌های گسل بوده است. از این رو، لازم است تا این گسل از دیدگاه‌های مختلف، نظیر مورفوتکتونیک، قطعه‌بندی شود. در این پژوهش، به بررسی زمین‌ساخت فعال و قطعه‌بندی گسل آبیژ بر پایه شاخص‌های زمین‌ریختی به‌وسیله نرم‌افزار ArcGIS پرداخته شده است. در این راستا، به منظور سهولت در انجام محاسبات در نرم‌افزار ArcGIS، چندین برنامه نوشته و طراحی شد. شاخص‌های محاسبه‌شده عبارت است از شاخص طول-شیب رودخانه (SL)، نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن (Vf)، شاخص عدم تقارن حوضه (AF)، شکل حوضه زهکشی (Bs)، منحنی فراسنجی (HC)، انتگرال فراسنجی (Hi)، شاخص پیچ‌وخم رودخانه (S)، و پیچ‌وخم پیشانی کوهستان (Smf). در پایان بررسی این ویژگی‌ها با هم به‌عنوان شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (IRAT) محاسبه شد که ترکیبی از شاخص‌های بالاست. دست‌کم سه منطقه فعال از نظر مورفوتکتونیک در طول گسل آبیژ قابل‌شناسایی است. این مناطق از جنوب شرق به شمال غرب به ترتیب در حد فاصل شمال زیدان تا جنوب غرب آهنگران، غرب حاجی‌آباد تا جنوب نوده و در نهایت شرق اسفاد تا شرق فندخت واقع شده است. در دو منطقه اردکول و کال شور کمترین میزان شاخص IRAT وجود دارد. می‌توان انتظار داشت که این مناطق نقاط مستعد رویداد زمین‌لرزه در آینده باشند.

کلیدواژه‌ها: زمین‌ساخت فعال، شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی، شاخص‌های مورفوتکتونیک، گسل آبیژ.

### مقدمه

گسل آبیژ، یکی از فعال‌ترین عناصر ساختاری شرق ایران (Berberian, 2014)، از دیرباز مسبب رویداد زمین‌لرزه‌های مهیب و ویرانگری نظیر رویدادهای ژوئن ۱۹۳۶، نوامبر و دسامبر ۱۹۷۹ و می ۱۹۹۷ به‌ترتیب با بزرگای ۶/۲، ۶/۶ و ۶/۱ بوده است. این گسل با روند تقریبی شمال-شمال غربی، جنوب-جنوب شرقی و در طولی بالغ بر ۱۲۵ کیلومتر، گسیختگی‌های متعددی را در رسوبات جوان منطقه به‌وجود آورده است (Berberian et al., 1999; Berberian, 2014). در مقیاس ناحیه‌ای، به‌دست‌آوردن نرخ زمین‌ساختی نسبی مشکل است. در این پژوهش، از روشی کمی بر پایه شاخص‌های زمین‌ریختی، در تعیین میزان فعالیت زمین‌ساختی نسبی حوضه‌های آبریز موجود در امتداد گسل آبیژ استفاده شده است (El Hamdouni et al., 2008; Mahmood & Gloaguen, 2012). این شاخص‌ها در مطالعه زمین‌ساخت

فعال نسبی بر پایه تهبیه شاخص منفرد بسیار مفید شناخته شده است (Bull & McFadden, 1977; Azor et al., 2002; Keller & Pinter, 2002; Silva et al., 2003; Molin et al., 2004).

ترکیب شاخص‌های پیچ‌وخم پیشانی کوه را بال و مک‌فادن (۱۹۷۷) و نسبت عرض کف دره به ارتفاع آن را راکول و همکاران (۱۹۸۵) برای تقسیم‌بندی پیشانی‌های کوه به رده‌های ۱ تا ۳ انجام دادند. بیشتر بررسی‌های شاخص‌های زمین‌ریختی به محاسبه شاخص‌های ویژه در مقیاس منطقه‌ای، مانند حوضه زهکشی یا پیشانی کوه، پرداخته‌اند. به‌جز شاخص طول-شیب آبراهه (SL)، بیشتر شاخص‌ها در مقیاس ناحیه‌ای بررسی نشده است. سیلوا و همکاران (۲۰۰۳) زمین‌ساخت فعال نسبی پیشانی‌های مختلف کوه‌ها را در جنوب باختر اسپانیا، با محاسبه شاخص‌های  $V_f$  و  $S_{mf}$  بررسی کردند، ولی از مطالعات جغرافیایی (GIS) استفاده نکردند. در بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از مدل ارتفاع رقومی، پدیده‌ها و عوارض ریخت‌زمین‌ساختی را در یونان شناسایی و استخراج و روشی نظام‌مند برای تجزیه ریخت‌سنجی عوارض زمینی ایجاد کردند. آن‌ها زمین‌ساخت و زمین‌ریخت‌شناسی رقومی<sup>۱</sup> را به‌عنوان ترکیبی از سه مؤلفه زمین‌شناسی ساختمانی، زمین‌ریخت‌شناسی، و تجزیه رقومی عوارض<sup>۲</sup> معرفی و در منطقه مورد مطالعه بررسی کردند (Jordan et al., 2005).

### زمین‌شناسی منطقه

گستره مورد مطالعه در شرق بلوک لوت جای‌دارد و بخشی کوچک از پهنه فلیشی شرق ایران یا پهنه زمین‌درز سیستان است (Tirrul et al., 1983) و در جنوب‌غربی منطقه برون‌زد دارد. از این‌رو، ویژگی‌های زمین‌شناسی این منطقه میراث دو پهنه ساختاری یادشده است. در این پهنه سنگ‌های کهن‌تر از ژوراسیک برون‌زد نیافته است (عمرانی و نظری، ۱۳۸۳). در شرق و شمال، نهشته‌های آواری-کربناته مربوط به سازندهای شمشک، بغمشاه و قلعه‌دختر کهن‌ترین واحدهای سنگی را تشکیل می‌دهند. لایه‌های سرخ‌رنگ سازند گره دو مرز ژوراسیک-کرتاسه است و گسترش دارد. لایه‌های یادشده با سنگ‌آهک‌های ماسه‌ای و سپس سنگ‌آهک اربیتولین‌دار توده‌ای و ضخیم‌لایه (۳۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری) کرتاسه پیشین دنبال می‌شود. سنگ‌های اخیر گسترش زیادی دارد و بر اثر فشارهای تکتونیکی دچار چین‌خوردگی و گسلش شده است، آن‌چنانکه مرز آن‌ها با دشت سمت شرق با گسل آبیض مشخص می‌شود (Alavi Naini & Behruz, 1981). سنوزوییک با سنگ‌آهک پالئوسن آغاز شده و به دنبال آن بر اثر فرسایش شدید و انباشته‌شدن رسوبات حاصل، واحدهای آواری قرمز رنگ در ائوسن نهشته شده است. فعالیت آتشفشانی بلوک لوت در این منطقه، با سرشت مافیک تا حد واسط و سنگ‌های آذرآواری وابسته دیده می‌شود.

### مواد و روش‌ها

مجموعه چند شاخص زمین‌ریختی در بررسی زمین‌ساخت فعال نسبی استفاده شده است. این شاخص‌ها روش کمی برای مطالعه زمین‌ریختی مرتبط با فرایندهای فرسایشی و رسوب‌گذاری در مجرای رودخانه، نیم‌رخ طولی و ریخت‌شناسی دره‌رود یا سیمای زمین‌ساختی مانند پرتگاه‌های گسلی به‌کار می‌رود. شاخص‌های زمین‌ساختی قادر به تعیین پهنه‌های مختلفی است که در نتیجه تغییرات محلی فعالیت زمین‌ساختی ایجاد شده است. در این پژوهش، چندین شاخص زمین‌ریختی در زیرحوضه‌های مجاور گسل آبیض بررسی و نتایج مربوط به هر شاخص بر پایه مقادیر به‌دست‌آمده برای آن شاخص تحلیل شد. داده‌های ارتفاعی مورد استفاده در این بررسی با دقت ۱۰ متر و از سازمان زمین‌شناسی تهیه شد. سایر داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید.

#### ۱. شاخص گرادیان طول رودخانه (SI)

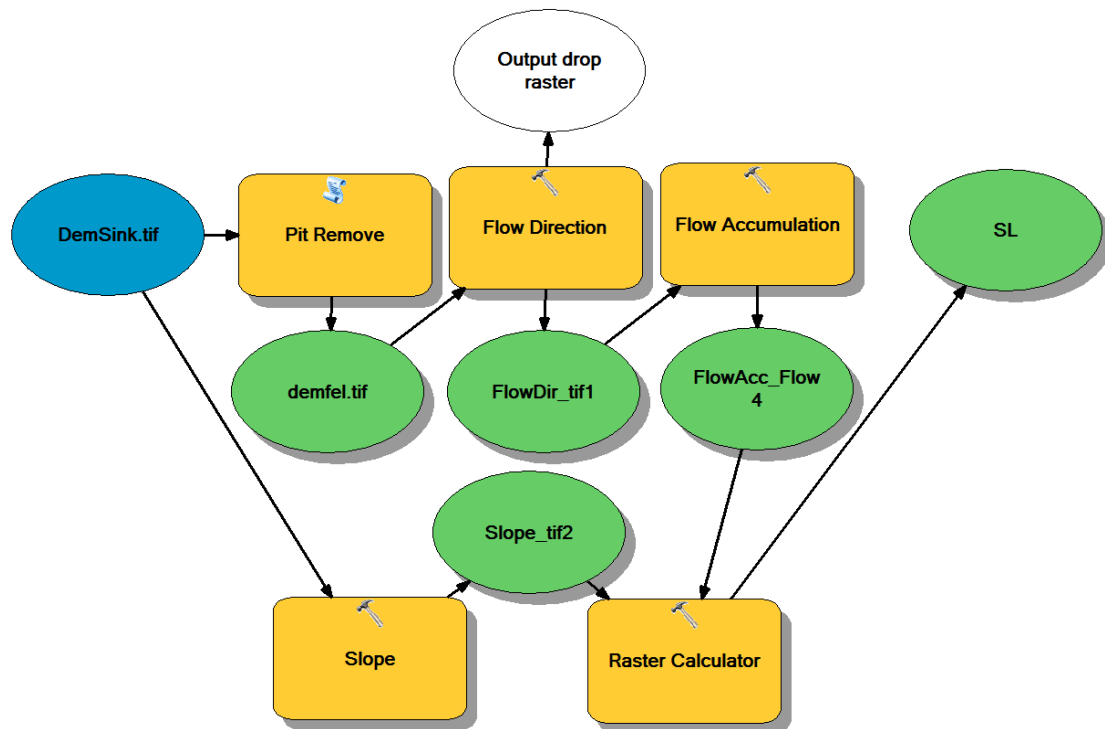
آن‌طور که از نام این شاخص مشخص است، به‌منظور تعیین گرادیان محلی ( $\Delta H / \Delta L$ ) در طول رودخانه در یک ناحیه یا

1. digital tectonic geomorphology
2. digital terrain analysis

یک مقطع مشخص (L) کاربرد دارد. در این حالت، گرادیان محلی یا نسبت اختلاف ارتفاع در مقطعی مشخص ( $\Delta H$ ) به اختلاف فاصله افقی در آن مقطع ( $\Delta L$ )، با توجه به طول رودخانه از نقطه مرکزی مقطع اندازه‌گیری شده است تا سرچشمه رودخانه یا محل تقسیم رود از ابتدای حوضه آبریز (L) شاخص گرادیان طول رودخانه (SL) تعیین شود. با توجه به توضیحات فوق، تعیین این شاخص از رابطه (۱) انجام می‌پذیرد (Keller, 1986).

$$SL = L \times \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (1)$$

با توجه به رابطه (۱) مشخص است که  $\Delta H / \Delta L$  در واقع همان رابطه شیب رودخانه است. بنابراین، شاخص پیش‌اشاره به تغییرات شیب رودخانه بسیار حساس و وابسته است. این وابستگی و حساسیت معیار و برآوردی از میزان ارتباط موجود بین فعالیت‌های زمین‌ساختی و مقاومت مصالح بستر رودخانه، همچنین توپوگرافی مسیر را ارائه می‌کند. طبق نظر کلر و پیتر (۲۰۰۲)، میزان SL در مناطق فعال زمین‌ساختی زیاد است. در واقع، بالا بودن مقدار SL مبین فعال بودن منطقه از نظر زمین‌ساختی است. الهمدونی و همکاران (۲۰۰۸) میزان SL بیش از ۵۰۰ را منطقه فعال، بین ۵۰۰ تا ۳۰۰ را نیمه‌فعال و کمتر از ۳۰۰ را غیرفعال در نظر گرفتند. از آنجا که تاکنون نرم‌افزار مشخصی برای محاسبه این شاخص روانه بازار نشده یا کارایی لازم را برای گستره‌ای با این وسعت دارا نیست، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS در بخش Modeling، مدل نویسی روند محاسبه این شاخص صورت پذیرفت (شکل ۱). سپس، با معرفی داده DEM به برنامه، نقشه هم‌پتانسیل شاخص مربوط برای تمامی آبراهه‌های موجود در گستره مورد مطالعه ترسیم شد (شکل ۲الف). مطابق شکل ۲الف، بیشتر آبراهه‌های گستره مورد مطالعه در رده آبراهه‌های فعال با میزان SL بالا قرار می‌گیرد.



شکل ۱. مدل محاسباتی در برآورد شاخص SL در نرم‌افزار ArcGIS

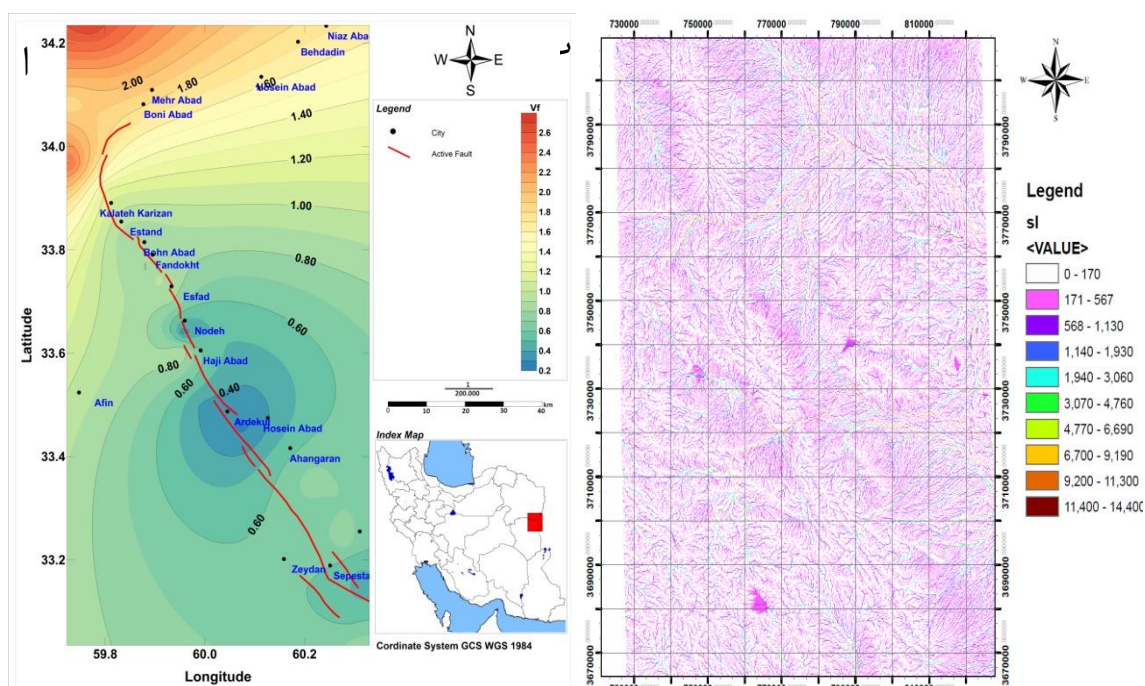
## ۲. شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع (VF)

نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن (vf) دیگر شاخص ژئومورفولوژی است که در بررسی میزان فعالیت نیروهای زمین‌ساختی در منطقه استفاده شده است. این شاخص عبارت است از نسبت دو برابر عرض کف دره به ارتفاع دیواره دو سمت آن و ارتفاع کف دره. این شاخص را نخستین بار بول (۱۹۷۸) بر اساس رابطه (۲) معرفی کرد.

$$VF = 2Vfw / [(Eld-Esc) + (Erd-Esc)] \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $VFW$  عرض کف دره،  $Eld$  ارتفاع سمت چپ دره،  $Erd$  ارتفاع سمت راست دره، و  $Esc$  ارتفاع متوسط کف دره است. از آنجا که دره‌ها عموماً  $V$  شکل یا  $U$  شکل است، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع ممکن است متفاوت باشد. این مسئله ممکن است با فعالیت‌های زمین‌ساختی و میزان بالآمدگی منطقه بر اثر این حرکات در ارتباط باشد. مقادیر کمتر از ۱ این متغیر نشانگر مناطق دارای بالآمدگی و تکتونیک فعال، از ۱ تا ۲ مناطق نیمه‌فعال و مقادیر بیش از ۲ مناطق غیرفعال است (El Hamdouni et al., 2008).

در طول گسل آبیژ، تعداد ۲۲ دره با فواصل حدود ۵ کیلومتر از یکدیگر انتخاب و نیم‌رخ عرضی آن‌ها در نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شد. سعی شد تا بسته به آبراهه‌ها، فاصله از جبهه کوهستان بین ۵۰۰ متر تا ۲ کیلومتر رعایت شود. سپس، مقادیر ارتفاع بیشینه دو طرف دره، ارتفاع کف دره و در نهایت عرض دره اندازه‌گیری شود. پس از آن، مقادیر مذکور بر مبنای رابطه شاخص  $VF$  که قبلاً بدان اشاره کردیم، محاسبه و نقشه هم‌پتانسیل این شاخص در طول گسل آبیژ ترسیم شد (شکل ۲ب). با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای این شاخص، می‌توان چنین استنباط کرد که عمل فرسایش آب‌های جاری نقش به‌سزایی در حفر عمیق دره‌ها دارد. این امر خود نشان از تکتونیک فعال منطقه است. گستره مورد مطالعه از لحاظ فعالیت یکسان نیست و می‌توان مناطق با فعالیت بالا و مناطق با فعالیت کمتر برای آن متصور شد. با توجه به شکل ۲ب، ملاحظه می‌شود که مقدار شاخص  $VF$  از جنوب شرق به شمال غرب در حال افزایش است. با توجه به دامنه تعریف‌شده برای مناطق فعال و غیرفعال، افزایش نرخ کف‌کنی دره‌ها از جنوب شرق به شمال غرب کاهش می‌یابد.



شکل ۲. الف) نقشه هم‌پتانسیل شاخص گرادیان رودخانه (SL) برای تمامی آبراهه‌های گستره مورد مطالعه، ب) نقشه هم‌پتانسیل شاخص نسبت کف دره به ارتفاع ( $VF$ ) برای محاسبه ۲۲ نقطه در طول گسل آبیژ

### ۳. شاخص عدم تقارن حوضه (AF)

شاخص عدم تقارن در مقیاس حوضه آبریز به‌کار می‌رود. در این حالت بررسی شکل هندسی شبکه آبراهه‌های موجود در حوضه، اساس تعیین این شاخص و به‌تناسب بررسی نرخ فعالیت زمین‌ساختی است. در مناطقی که نرخ فعالیت‌های زمین‌ساختی بالاست، عدم تقارن در هندسه آبراهه‌ها، همچنین حوضه آبریز قابل‌ردیابی و شناسایی است. بنابراین، با

استفاده از این شاخص، کج‌شدگی و عدم‌تقارن ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی در حوضه آبریز قابل‌تشخیص است. شاخص عدم‌تقارن حوضه (AF) مطابق پیشنهاد کالر (۱۹۸۶) به‌صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$AF=100 \left( \frac{A_r}{A_t} \right) \quad (3)$$

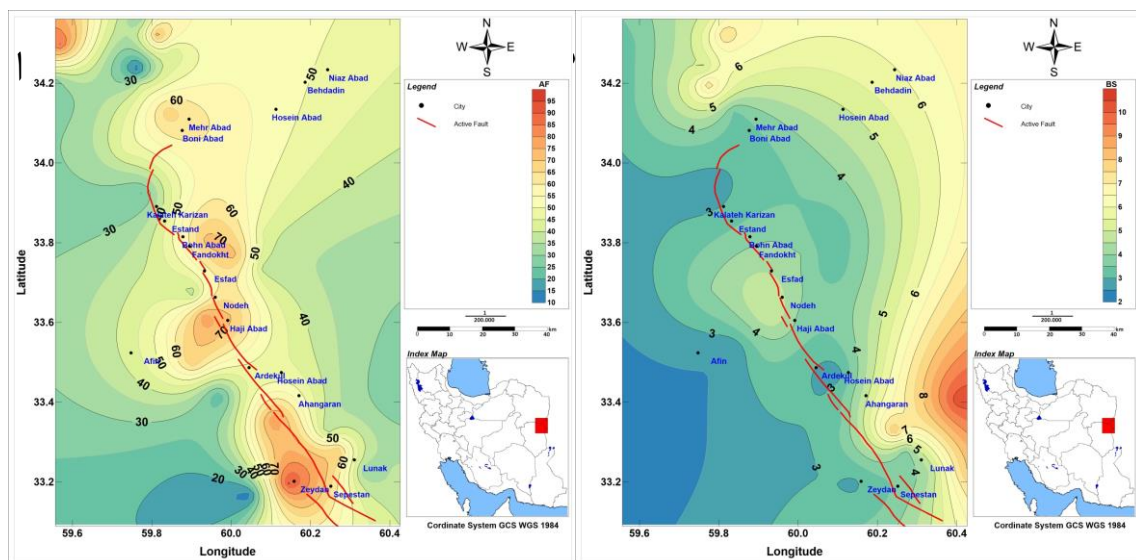
در این رابطه،  $A_r$  مساحت حوضه در سمت راست آبراهه اصلی (برحسب کیلومترمربع) و  $A_t$  کل مساحت حوضه آبریز (بر حسب کیلومترمربع) است. مقادیر توصیفی این شاخص را به‌صورت AF-50 در نظر می‌گیرند و مقایسه می‌کنند (El Hamdouni et al., 2008). در صورتی که این مقدار بیش از ۱۵ باشد، منطقه فعال، بین ۷ تا ۱۵ منطقه نیمه‌فعال و کمتر از ۷ منطقه غیرفعال است. بر اساس آنچه گفتیم، مقادیر این شاخص در ۴۰ حوضه زهکشی در امتداد گسل آبریز اندازه‌گیری و نقشه هم‌پتانسیل شاخص AF برای آن ترسیم شد (شکل ۳الف). به‌طور کلی، در بخش‌های جنوب‌شرقی و مرکزی گسل، مقادیر شاخص AF در رده مناطق فعال زمین‌ساختی محاسبه شده است.

#### ۴. شاخص شکل حوضه زهکشی (BS)

شکل حوضه آبریز یا حوضه زهکشی منطقه مورد مطالعه نیز ابزاری برای ارزیابی فعالیت‌های زمین‌ساختی است. معمولاً حوضه‌های فعال از نظر زمین‌ساختی، شکلی کشیده دارد. کاهش نرخ فعالیت‌های زمین‌ساختی و متعاقباً توقف میزان بالابردگی و در نتیجه غلبه فرایندهای فرسایشی، شکل حوضه را به تدریج طی زمان دایره‌ای‌شکل می‌کند (El Hamdouni et al., 2008). بنابراین، شاخص شکل حوضه (رابطه ۴) کاهش می‌یابد.

$$BS=BL/BW \quad (4)$$

در این رابطه BL طول حوضه آبریز است که از خروجی حوضه تا انتهای‌ترین بخش حوضه محاسبه می‌شود. BW عرض حوضه آبریز در پهن‌ترین قسمت است. از نظر زمین‌ساختی هر چه مقدار BS بیشتر باشد، نرخ فعالیت‌های زمین‌ساختی بالاتر و منطقه از نظر حرکات نوزمین‌ساختی فعال‌تر است. مقادیر بیش از ۴ این شاخص نشانگر مناطق فعال تکتونیک، بین ۳ تا ۴ مناطق نیمه‌فعال و کمتر از ۳ مربوط به مناطق غیرفعال است. در این بخش، ضمن محاسبه شاخص شکل حوضه برای ۴۰ حوضه زهکشی در امتداد گسل آبریز، نقشه هم‌پتانسیل این شاخص ترسیم شد (شکل ۳ب). به‌طور کلی، این شاخص در مناطق شمال مهرآباد و نوده مقادیر متوسطی دارد. منطقه جنوب آهانگران بیشترین مقدار این شاخص را شامل می‌شود. سایر مناطق در رده غیرفعال جای می‌گیرند.



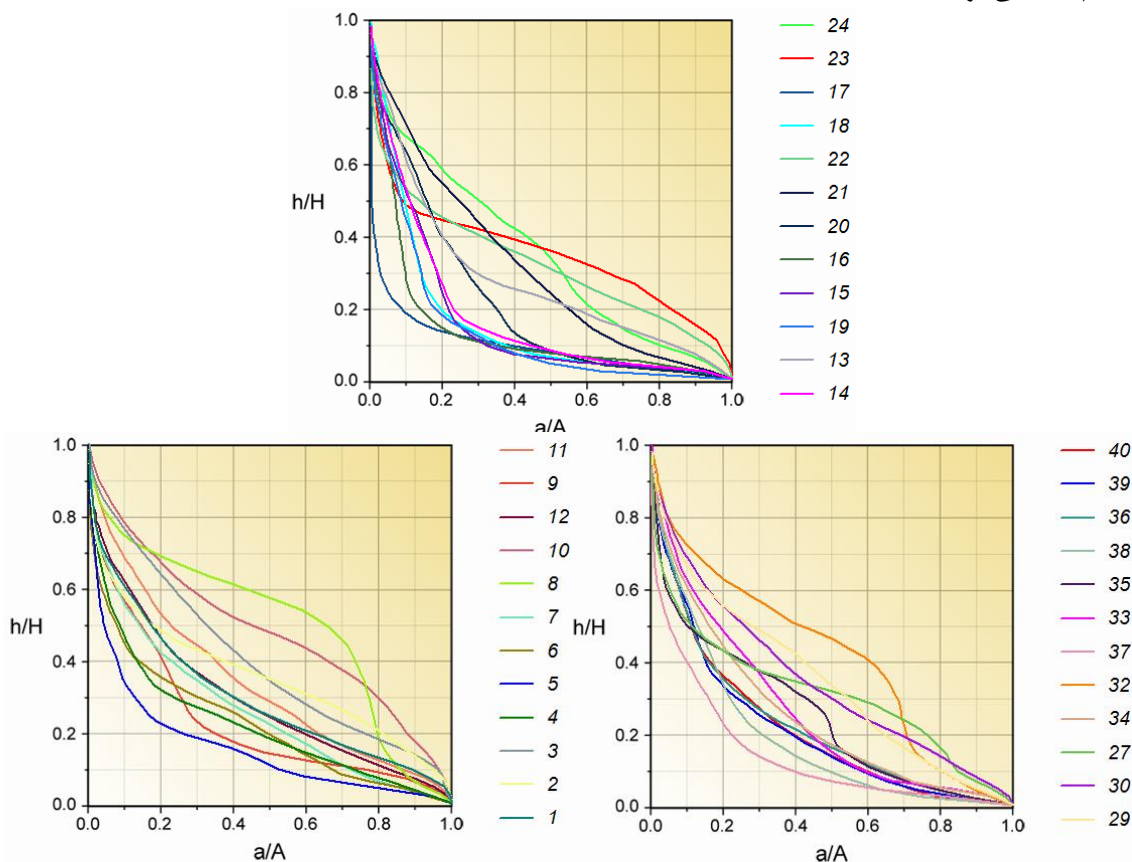
شکل ۳. الف) نقشه هم‌پتانسیل شاخص عدم‌تقارن حوضه (AF) که برای ۴۰ حوضه زهکشی در طول گسل آبریز محاسبه شده است. ب) نقشه هم‌پتانسیل شاخص شکل حوضه (BS) که برای ۴۰ حوضه زهکشی در طول گسل آبریز محاسبه شده است.

### ۵. شاخص منحنی هیپسومتری حوضه (HC)

منحنی‌های هیپسومتری را نخستین بار لانگین (۱۹۴۷) معرفی کرد و استراهلر (۱۹۵۲) توسعه داد. این منحنی برای بیان پراکندگی ارتفاعات در پهنای یک حوضه آبریز به کار برده می‌شود. بنابراین، به کمک این شاخص تغییرات نسبی ارتفاع به مساحت پهنه مورد مطالعه بررسی می‌شود. در محاسبه شاخص پیش‌اشاره، مقادیر  $\frac{h}{H}$  و  $\frac{a}{A}$  از نقشه‌های توپوگرافی اندازه‌گیری می‌شود. در این محاسبات  $H$  ارتفاع حوضه است که از تفاضل حداکثر و حداقل ارتفاعات موجود در حوضه حاصل می‌شود.  $a$  مساحت سطح محدود بین دو خط تراز با اختلاف ارتفاع  $h$  یا به تعبیر بهتر مساحت بخشی از حوضه است که در بالای سطح ارتفاع  $h$  واقع شده و  $A$  نیز مساحت کل پهنه حوضه است.

مقدار عددی نسبت  $\frac{a}{A}$  بین صفر و یک متغیر است. استراهلر (۱۹۵۲) سه مرحله جوانی، میانه یا بلوغ و پیری را برای منحنی‌های هیپسومتری مشخص کرد. در مرحله جوانی، در حوضه مورد بررسی، فرایندهای زمین‌ساختی فعال است و پستی‌ها و بلندی‌های زیادی مشاهده می‌شود. در مرحله میانه یا بلوغ، فرایندهای فرسایشی و زمین‌ساختی تقریباً متعادل است. در مرحله پیری حوضه آرام و پستی‌ها و بلندی‌ها از بین رفته است. چنانچه در بررسی این منحنی‌ها بخش عمده‌ای از حوضه تراز بالاتری از ارتفاع میانگین را دارا باشد، برای مثال ارتفاعات بلند حوضه با رودخانه‌ای عمیق بریده شده باشد، این منظر نشانگر منحنی هیپسومتری جوان و زمین‌ساخت فعال خواهد بود. این منحنی‌ها براساس نسبت  $\frac{h}{H}$  معمولاً روی محور قائم و نسبت  $\frac{a}{A}$  روی محور افقی ترسیم می‌شود.

بر این اساس، منحنی هیپسومتری برای تمامی حوضه‌های آبریز موجود در گستره مورد مطالعه (۴۰ عدد) محاسبه شده است (شکل ۴). مطابق شکل مذکور که در آن حوضه‌ها از جنوب‌شرق به شمال‌غرب با اعداد نامگذاری شده است، می‌توان به صورت توصیفی عنوان داشت که حوضه‌های ۳، ۴، ۷، ۹، ۱۰، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۳۷، ۳۷، ۳۹ و ۴۰ در رده حوضه‌های آبریز پیر، حوضه‌های ۶، ۱۱، ۲۳، ۲۸ و ۳۴ در رده حوضه‌های آبریز جوان و در نهایت، حوضه‌های ۱، ۲، ۵، ۸، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۲۲، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۵ و ۳۶ در رده حوضه‌های آبریز متعادل تقسیم‌بندی می‌شود.



شکل ۴. منحنی هیپسومتری حوضه‌های آبریز محدوده مورد مطالعه از ۱ الی ۴۰

**۶. انتگرال هیپسومتری (Hi)**

تجزیه و تحلیل منحنی‌های هیپسومتری یکی از راه‌های شناسایی نرخ فعالیت‌های زمین‌ساختی است. این تحلیل‌ها معمولاً با کمک محاسبه انتگرال مساحت زیر منحنی‌های مذکور به نام شاخص انتگرال هیپسومتری یا Hi انجام می‌پذیرد (Chorley & Morley, 1959). بدین منظور از رابطه (۵) می‌توان استفاده کرد.

$$Hi = \frac{Hint - Hmin}{Hmax - Hmin} \quad (5)$$

که در این رابطه Hmax حداکثر ارتفاع، Hmin حداقل ارتفاع و Hint ارتفاع متوسط حوضه است. لازم به تذکر است که این ارتفاعات را می‌توان از روی نقشه‌های توپوگرافی حوضه آبریز یا ناحیه مورد مطالعه استخراج کرد (Mahmood & Gloaguen, 2012). بر اساس نتایج بررسی‌های انجام‌شده، برای مناطق مختلف مقادیر این شاخص از حداکثر ۰/۵ تا نزدیک به صفر متغیر است. هر چه مقادیر این شاخص بالاتر باشد (نزدیک‌تر به ۰/۵)، منطقه از نظر زمین‌ساختی فعال‌تر است. مقادیر بین ۰/۴ تا ۰/۵ مناطق نیمه‌فعال و مقادیر کمتر از ۰/۴ مناطق غیرفعال را نشان می‌دهد. در این حالت وجود توپوگرافی جوان و پستی و بلندی‌های زیاد، برش‌های عمیق، برجستگی‌های ناهموار و سطوح بالاآمده و بریده‌شده را می‌توان انتظار داشت. اما، مقادیر پایین‌تر Hi دلالت بر تعادل در فرایندهای ریخت‌شناسی و کاهش نرخ فعالیت‌های زمین‌ساختی در ناحیه مورد مطالعه دارد.

مقادیر انتگرال هیپسومتری برای چهل حوضه آبریز در امتداد گسل آبیژ اندازه‌گیری شد. در نهایت، نقشه هم‌پتانسیل این شاخص در شکل ۵الف نشان داده شده است. بر این اساس می‌توان دو منطقه را مناطق فعال بر اساس مقادیر انتگرال هیپسومتری معرفی کرد. منطقه نخست، در جنوب غرب آهنگران و دیگری در شمال کریزان قرار گرفته است.

**۷. شاخص پیچ‌وخم رودخانه (S)**

شاخص پیچ‌وخم رودخانه شاخصی کم‌اهمیت‌تر در مقایسه با دیگر شاخص‌ها در بررسی میزان فعالیت نوزمین‌ساختی است. با این حال، بالابودن پیچ‌وخم در مسیر رودخانه، در یک منطقه، نشان از کم‌بودن فعالیت‌های زمین‌ساختی یا به تعبیر بهتر حکایت از پایداری نسبی زمین‌ساخت منطقه دارد. این شاخص بر اساس رابطه (۶) قابل اندازه‌گیری و سنجش است (El Hamdouni et al., 2008).

$$S = \frac{C}{V} \quad (6)$$

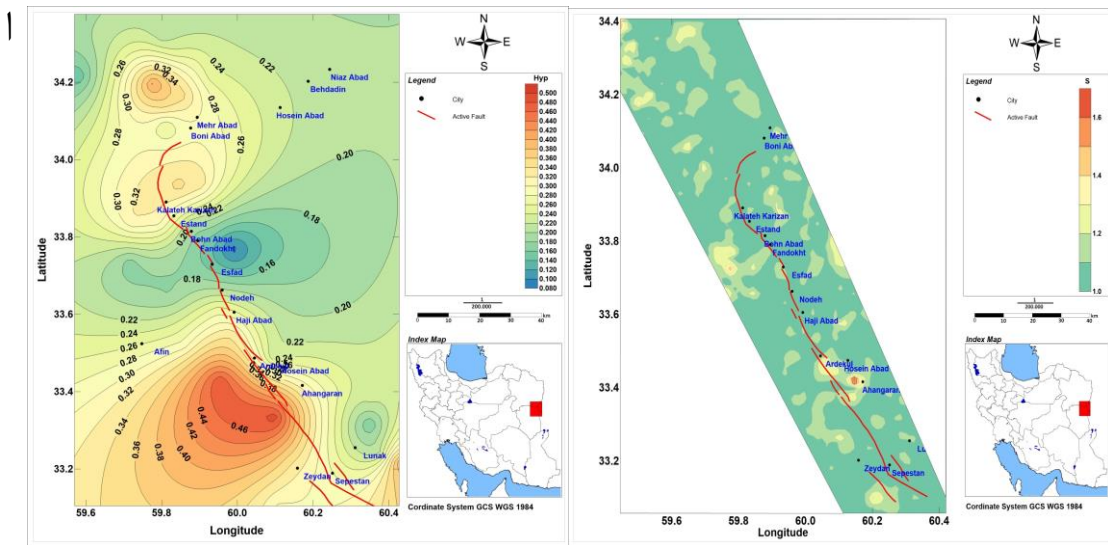
در رابطه (۶)، C طول رودخانه و V طول دره در خط مستقیم است.

هر چه مقادیر S بیشتر باشد، نشان می‌دهد که رود به‌حالت تعادل نزدیک‌تر شده و بنابراین نرخ فعالیت‌های زمین‌ساختی در منطقه پایین‌تر است. به‌عکس، هر اندازه S کمتر باشد، نرخ فعالیت‌های زمین‌ساختی در ناحیه مورد بررسی بیشتر است. بنابراین، در بررسی این شاخص با مشاهده سیمای کلی رودخانه، چنانچه میزان پیچ‌وخم زیاد باشد، نخستین نتیجه مورفوتکتونیک ممکن است پایداری نسبی منطقه از نظر فعالیت‌های زمین‌ساختی باشد. از دیدگاه بال (۱۹۷۸)، مقادیر S در بازه ۱/۲ تا ۱/۶ فعال، در بازه ۱/۸ تا ۳/۴ نیمه‌فعال و در بازه ۲ تا ۷ غیرفعال است.

مقادیر این شاخص در شبکه آبراهه‌های موجود در امتداد گسل آبیژ محاسبه شد. در نهایت، نقشه هم‌پتانسیل شاخص پیچ‌وخم آبراهه در شکل ۵ب محاسبه و نمایش داده شد. بر مبنای محاسبات این شاخص، تمامی آبراهه‌های گسترده مورد مطالعه در رده فعال قرار می‌گیرند، چرا که بیشترین مقادیر محاسبه‌شده در حدود ۱/۶ و کمتر از آن است. لذا، تنها رده فعال در این منطقه وجود دارد.

**۸. شاخص پیچ‌وخم جبهه کوهستان (Smf)**

شاخص پیچ‌وخم جبهه کوهستان یا شاخص تضارس جبهه کوهستان بیانگر توازن بین نیروهای زمین‌ساختی و نیروهای فرسایش‌دهنده کوهستان است. نیروهای زمین‌ساختی اساساً عامل بالآمدگی جبهه کوهستان است و تمایل به ایجاد جبهه‌های خطی و مستقیم در پیشانی کوهستان دارد.

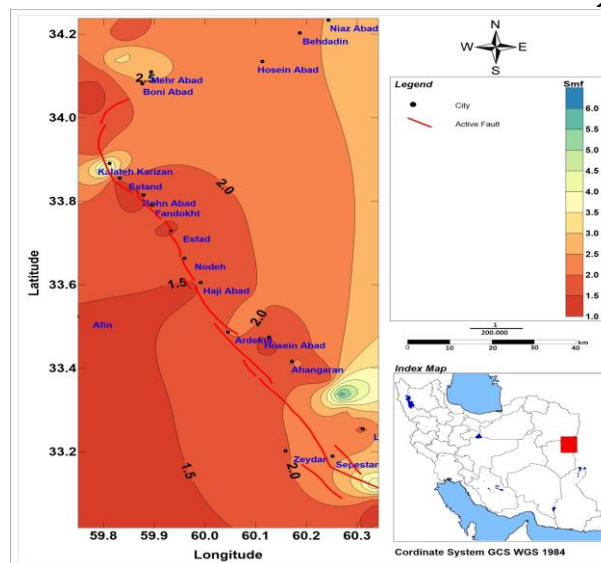


شکل ۵. الف) نقشه هم‌پتانسیل انتگرال هیپسومتری (Hi) محاسبه‌شده برای چهل حوضه آبریز در طول گسل آبیز، ب) نقشه هم‌پتانسیل شاخص پیچ‌وخم رودخانه (S) در طول گسل آبیز

برعکس، نیروهای فرسایش‌دهنده دائم در حال بردن این جبهه پیشانی و ایجاد ساختاری پیچ‌وخم‌دار است. بالا آمدگی در جبهه‌های کوهستان مرتبط با وجود گسلش فعال در این نواحی است. این شاخص در اصل با علامت  $S_{mf}$  مشخص و براساس رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

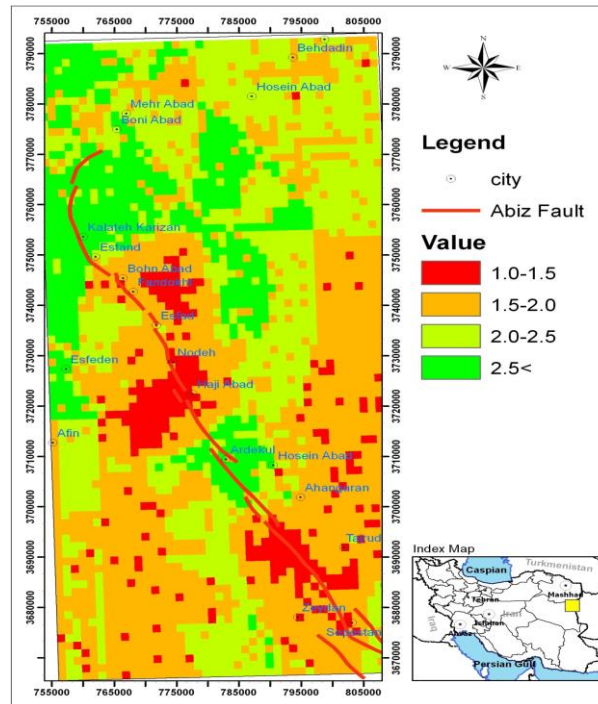
$$S_{mf} = L_{mf} / L_s \quad (7)$$

که در رابطه بالا،  $L_{mf}$  طول جبهه کوهستان در محل برخورد کوهستان به دشت و  $L_s$  طول مستقیم جبهه کوهستان است. بر اساس رابطه (۷)، هر چه میزان  $S_{mf}$  کمتر و به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، حاکی از فعال‌تر بودن نیروهای زمین‌ساختی در منطقه مورد مطالعه یا به تعبیر بهتر فعال‌تر بودن ناحیه از نظر نرخ فعالیت‌های زمین‌ساختی است. بررسی این شاخص، هر گاه  $S_{mf}$  کمتر از ۱/۰۵ باشد، بیانگر زون کاملاً فعال زمین‌ساختی است. مقادیر بین ۱/۰۵ تا ۱/۵ مناطقی با فعالیت متوسط و مقادیر بیش از ۱/۵ مناطق غیرفعال را نشان می‌دهد (Keller & Pinter, 2002). در بیش از ۱۰۵ نقطه، مقادیر این شاخص محاسبه و نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است. بر مبنای محاسبات انجام‌شده در خصوص این شاخص، مناطق شمال آهنگران تا جنوب اردکول، همچنین شمال حاجی‌آباد تا جنوب کوریزان، در رده مناطق فعال قرار می‌گیرد.



شکل ۶. نقشه هم‌پتانسیل شاخص پیچ‌وخم کوهستان ( $S_{mf}$ ) و محاسبه‌شده برای ۱۰۵ نقطه در طول گسل آبیز

در نهایت، شاخص‌های مختلف زمین‌ریختی اشاره شده در قالب شاخص نسبی زمین‌ساخت فعال (IRAT) که پیش‌تر با نام Iat هم شناخته می‌شد، به چهار رده شامل مناطق خیلی فعال ( $1 < IRAT < 1/5$ )، فعال ( $2 < IRAT < 1/5$ )، فعالیت متوسط ( $2 < IRAT < 2/5$ ) و غیرفعال ( $2/5 < IRAT$ ) تقسیم‌پذیر است (شکل ۶).



شکل ۷. نقشه هم‌پتانسیل شاخص IRAT حاصل از میانگین‌گیری تمامی شاخص‌های مورفوتکتونیکی

### بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی شاخص‌های مورفوتکتونیکی در محدوده گسل آبیز پرداختیم. در این راستا، هشت شاخص اصلی بررسی و اندازه‌گیری و نقشه هم‌پتانسیل برای هر یک از این شاخص‌ها تهیه شد. در نهایت، تمامی شاخص‌ها در قالب شاخص نسبی زمین‌ساخت فعال با یکدیگر مقایسه شد. نتایج زیر حاصل این مقایسه است.

- منطقه با فعالیت زمین‌ساختی خیلی بالا. دست‌کم سه منطقه در این رده در طول گسل آبیز قابل‌شناسایی است. این مناطق از جنوب‌شرق به شمال‌غرب، به ترتیب در حد فاصل شمال زیدان تا جنوب‌غرب آهنگران، غرب حاجی‌آباد تا جنوب‌نوده و در نهایت، شرق اسفاد تا شرق فندخت واقع شده است.
- منطقه با فعالیت زمین‌ساختی بالا. مناطقی که در این رده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از مناطق حد فاصل استند تا بهن‌آباد، منطقه اسفاد تا اسفدن، شمال‌غرب اردکول تا جنوب‌شرق حاجی‌آباد.
- منطقه با فعالیت زمین‌ساختی متوسط. مناطق واقع در غرب بنی‌آباد، شمال‌شرق اسفدن و غرب آهنگران از جمله بخش‌هایی است که فعالیت تکتونیکی متوسطی دارد.
- منطقه غیرفعال زمین‌ساختی. در دو منطقه اردکول و کال‌شور کمترین میزان شاخص IRAT وجود دارد. وجود توپوگرافی مسطح در منطقه کال‌شور و زمین‌های زراعی گسترده منطقه اردکول مانع از سنجش برخی شاخص‌های مورفوتکتونیکی است. همین امر سبب شده تا مقادیر عددی این منطقه پایین باشد.

با توجه به جمیع محاسبات و تحلیل‌های صورت‌گرفته در این مقاله، می‌توان گسل آبیز را از دیدگاه مورفوتکتونیکی به بخش‌های زیر قطعه‌بندی کرد: بخش نخست از پایانه جنوب‌شرقی گسل تا جنوب آهنگران، بخش دوم از جنوب‌شرقی آهنگران تا شمال‌غرب اردکول، بخش سوم از شمال‌غرب اردکول تا جنوب بهن‌آباد، و بخش آخر از

بهین آباد تا پایانه شمال غربی گسل. البته، باید توجه داشت که علی‌رغم یکنواخت بودن نقاطی که برای سنجش شاخص‌های مورفولوژیکی گزینش شده بود، توزیع غیریکنواخت مورفولوژی منطقه سبب شد تا در برخی مناطق امکان اندازه‌گیری برخی شاخص‌ها وجود نداشته باشد که از جمله آن‌ها می‌توان به منطقه اطراف اردکول و کال شور اشاره کرد. از طرفی، سنگ‌شناسی منطقه نیز بر دامنه تغییرات شاخص‌ها مؤثر است. از این رو، پیشنهاد می‌شود تا نتایج این مقاله با لحاظ کردن شواهد لرزه‌خیزی و برداشت‌های دورسنجی تغییر کند.

## منابع

عمرانی ج. و نظری ح. (۱۳۸۳). شرح نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سرچاه. سازمان زمین‌شناسی کشور.

- Alavi Naini M. and Behruzi A. (1981). Geological map of Ahangaran, 1:100,000 series.
- Azor, A., Keller, E.A. and Yeats, R.S. (2002). Geomorphic indicators of active fold growth: South Mountain–Oak Ridge Ventura basin, Southern California. Geological Society of America Bulletin, 114: 745-753.
- Berberian, M. (2014). Earthquake and coseismic surface faulting on the Iranian plateau; A historical, social, and physical approach. 1st Edition, Elsevier, ISBN: 9780444632920, 770 pp.
- Berberian, M. and Yeats, R.S. (1999). Patterns of historical rupture in the Iranian Plateau. Bull. Seism. Soc. Am., 89(1): 120-139.
- Bull, W.B. (1978). Geomorphic tectonic classes of the south front of the San Gabriel Mountain. California U.S. Geological Survey Contract Report, 14-08-001-G-394, Office of Earthquakes, Volcanoes and engineering, Menlo Park, CA.
- 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 8th Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton.
- Chorley, R.J. and Morley L.S.D. (1959). A simplified approximation for the hypsometric integral. J. Geology, 67(5): 566-571.
- El Handouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J. and Keller, E.A. (2008). Assessment of relative active tectonic, South west border of the Sierra Nevada (Southern Spain). Geomorphology, 96: 150-173.
- Jordan, G., Meijninger, B.M.L., Van Hinsbergen, D.J.J., Meulenkamp, J.E. and Van Dijk, P.M. (2005). Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas In Hungary and NW Greece. International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation, 65: 301-319.
- Keller, E.A. and Pinter, N. (Eds.) (2002). Active tectonics: earthquakes, uplift, and landscape. 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 362 pp.
- Keller, E.A. (1986). Investigation of active tectonics: use of surficial Earth processes. In: Wallace, R.E. (Ed.), Active Tectonics, Studies in Geophysics, National Academy Press, Washington, DC: 136-147.
- Langbein, W.B. (1947). Topographic characteristics of drainage basins. USGS, Water Supply Paper 968-C: 125-157.
- Mahmood S.A. and Gloaguen R. (2012). Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis. Geoscience Frontiers, 3(4): 407-428.
- Molin, P., Pazzaglia, F.J. and Dramis, F. (2004). Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, sila massif, Calabria, southern Italy. American Journal of Science, 304: 559-589.
- Omrani, J. and Nazari, H. (2004). Sarchah geological map report. Geological Survey of Iran. [in Persian]
- Rockwell, T.K., Keller, E.A. and Johnson, D.L. (1985). Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California. In: Morisawa, M. (Ed.), Tectonic Geomorphology, Proceedings of the 15th Annual Geomorphology Symposium, Allen and Unwin Publishers, Boston, MA: 183-207.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C. and Bardajm, T. (2003). Fault generated mountain fronts in Southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and earthquake activity. Geomorphology, 250: 203-226.
- Strahler, A.N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin, 63: 1117-1142.
- Tirrul, R., Bell, I.R. Griffis, R.J. and Camp, V.E. (1983). The Sistan suture zone of eastern Iran. Geological Soc. of Amer. Bull., 97: 134-150.