

بررسی زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در حوضه سعادت‌آباد، زاگرس مرتفع

دنیا رابطی- کارشناسی ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی تهران.
محمد خلیج*- استادیار دانشگاه پیام نور، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی، تهران.
علی یآوری فرد- کارشناسی ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه خوارزمی تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۱۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱

چکیده

مطالعات بسیاری در مناطق مختلف جهان بر روی حوضه‌ها و شبکه‌های آبراهه‌ها با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی صورت گرفته است که حکایت از کارایی آن‌ها در شناسایی مناطق فعال دارد. تحلیل‌های مورفوتکتونیک ابزار مفیدی جهت شناسایی اشکال ایجاد شده بر روی زمین است که توسط فرآیندهای زمین‌ساختی ایجاد شده‌اند. هدف از این مطالعه تعیین زمین‌ساخت فعال در قسمتی از زاگرس مرتفع به نام حوضه سعادت‌آباد با استفاده از پنج شاخص ریخت‌سنجی عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)، برجستگی نسبی (Bh)، ضریب شکل (Ff)، انتگرال و منحنی فرازسنجی (Hi) و گرادیان طولی رود (SL) می‌باشد. برای انجام این پژوهش از نرم‌افزار GIS، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر و نقشه‌های زمین‌شناسی، برای استخراج زیرحوضه‌ها، آبراهه‌ها و ساختارهای اصلی منطقه استفاده شده است و سپس به محاسبه شاخص و تهیه نقشه پهنه‌بندی پرداخته شد. در نهایت نیز شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) جهت تعیین سطح فعالیت زمین‌ساختی کل منطقه به دست آمد. بررسی و تجزیه و تحلیل این شاخص‌ها همراه با گسل‌های واقع در منطقه، فعالیت زمین‌ساختی اخیر این منطقه را تایید می‌کند. به گونه‌ای که در زیرحوضه ۶ منطبق بر گسل اونجان، زیرحوضه ۸ منطبق بر گسل موسی‌خانی، زیرحوضه‌های ۱ و ۵ منطبق بر بخش‌هایی از گسل رودخانه سیوند و زیرحوضه‌های ۱۲ و ۱۹ منطبق بر گسل‌های واقع در جنوب گستره مورد بررسی، مقادیر بالایی از شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی را شاهد هستیم که به دلیل فعالیت گسل‌های مذکور و تأثیر آن‌ها بر منطقه می‌باشد. در حدود ۳۷/۸ درصد از مساحت گستره مورد مطالعه فعالیت زمین‌ساختی نسبی بالا و ۱۹/۸ درصد فعالیت زمین‌ساختی نسبی متوسط را دارا می‌باشد. در کل میتوان گفت حوضه آبریز سعادت‌آباد دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط به بالا است و بخش‌های شمالی، شمال غربی، میانی و جنوبی منطقه فعال‌تر از بخش‌های دیگر هستند.

واژگان کلیدی: زمین‌ساخت فعال، شاخص ژئومورفیک، حوضه زهکشی، گسلش، زاگرس مرتفع.

مقدمه

تقریباً هیچ ناحیه‌ای را در جهان نمی‌توان یافت که تحت تاثیر تغییرات تکتونیکی قرار نگرفته باشد. زمین سیستمی پویاست و تغییر و تحول از جمله ویژگی‌های آن می‌باشد (رامشت و همکاران، ۱۳۸۸: ۲۹-۴۶). بسیاری از سیماهای کنونی طی رخدادهای جوان زمین‌ساختی شکل گرفته‌اند (فوسن^۱، ۲۰۱۶: ۴۸۱). تکتونیک ژئومورفولوژی، دانش مطالعه اشکال و سیماهای ایجاد شده بر روی زمین است که بر اثر مکانیسم‌های تکتونیکی ایجاد شده‌اند. بررسی تکتونیک ژئومورفولوژی حوضه آبریز اطلاعات با ارزشی را در مورد شرایط تکتونیکی منطقه و میزان فعالیت اخیر آن، در اختیار ما قرار می‌دهد (بوربنک و اندرسون^۲، ۲۰۱۲: ۴۳۸). مهمترین ویژگی استفاده از شاخص‌های مورفومتریکی، سادگی نسبی روش محاسبه و همچنین سرعت عمل بالا در به کارگیری آن‌ها برای بررسی میزان فعالیت تکتونیکی مناطق بزرگ است (جباری و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۸) و داده‌های ضروری آن‌ها اغلب از نقشه‌های رقومی ارتفاعی و تصاویر ماهواره‌ای به دست می‌آیند و می‌توانند آشکارکننده ساختارهای فعال در منطقه باشد (کلر و پینتر^۳، ۱۹۹۶: ۵۶۴). شواهد زمین‌ریختی به دو صورت کمی و کیفی قابل ارزیابی است که ارزیابی کمی تحت عنوان ریخت‌سنجی^۴ مرسوم می‌باشد (علی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷: ۳۲) و اندازه‌گیری‌های کمی امکان مقایسه زمین‌ریخت‌های مختلف و شناسایی ویژگی‌های خاص شامل سطح فعالیت زمین‌ساختی یک منطقه را برای ما فراهم می‌سازد (کلر^۵، ۱۹۸۶: ۱۳۶-۱۴۷). فرآیندهای زمین‌ساخت فعال بر شکل و عملکرد رودخانه‌ها تاثیر می‌گذارد. بررسی رودها، برش و انحراف آن‌ها، اطلاعات مهمی در مورد گسترش و تکامل گسل‌های منطقه فراهم می‌آورد (واکر^۶، ۲۰۰۶: ۶۶۶-۶۵۴). همچنین حفر سنگ بستر رودخانه‌ها که موجب ایجاد تغییر شکل و تغییر در توپوگرافی رودخانه‌ها می‌شود؛ به طور عمده توسط فرآیندهای زمین‌ساختی ایجاد شده است (اسنیدر و همکاران^۷، ۲۰۰۹: ۱۲۵۰-۱۲۶۳). استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی به منظور بررسی فعالیت‌های نو زمین‌ساختی توسط (هورتن^۸، ۱۹۴۵: ۳۷۰-۲۷۵) آغاز شده و توسط محققین دیگری مانند (استراهلر^۹، ۱۹۵۲: ۱۱۴۲-۱۱۱۷) و (بول و مک فادن^{۱۰}، ۱۹۷۷: ۱۳۸-۱۱۵) دنبال شده است و تا کنون نیز ادامه یافته است. از تحقیقات انجام شده در زمینه ریخت‌زمین‌ساخت می‌توان به یمانی و همکاران (۱۳۹۱) اشاره کرد که این محققین شواهد کیفی ریخت‌زمین‌ساختی و شاخص‌های کمی ریخت‌سنجی حاصل از زمین‌ساخت فعال بر مخروطه افکنه‌های شمال دامغان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق فعال بودن گسل‌ها در دوره کواترنری را تایید می‌کند. آبدیده و همکاران (۱۳۹۰) به ارزیابی نسبی زمین‌ساخت فعال با استفاده از تحلیل ریخت‌سنجی در حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی دز پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که برخورد قاره‌ای بین صفحه عربی و بلوک ایران موجب گستردگی نرخ زمین‌ساخت در این منطقه شده است. همچنین میتوان به کارهای ولز و همکاران^{۱۱} (۱۹۸۸)، ملوش و کلر^{۱۲} (۲۰۱۳)، خدابخش‌نژاد و همکاران (۱۳۹۵)، بابایی و همکاران (۱۳۹۶) رابطی و همکاران (۱۳۹۷) اشاره کرد.

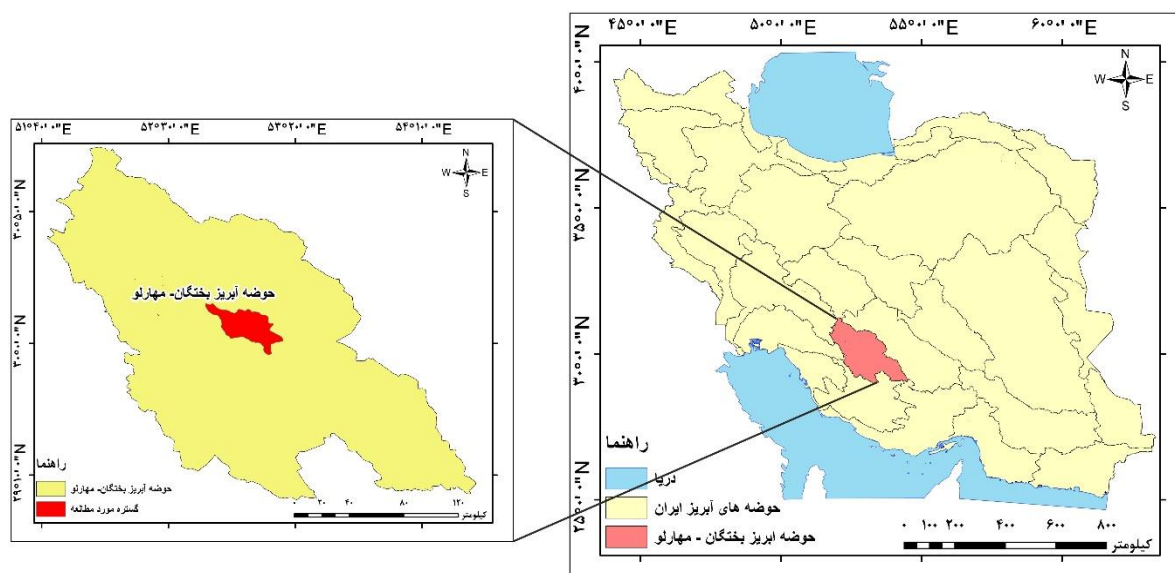
از آنجا که تاکنون ارتباط بین زمین‌ساخت فعال و ژئومورفولوژی در حوضه سعادت آباد به طور دقیق مورد مطالعه قرار نگرفته است، بنابراین بررسی مورفومتری به‌منظور شناسایی تأثیر زمین‌ساخت فعال بر تکامل تکتونیکی حوضه‌های زهکشی

1. Fossen
 2. Burbank and Anderson
 3. Keller and Pinter
 4. Morphometry
 5. Keller
 6. Walker
 7. Snyder et al
 8. Horton
 9. Strahler
 10. Bull and McFadden
 11. Wells et al
 12. Melosh and Keller

و رودخانه‌های این منطقه ضروری به نظر می‌رسد. هدف از این مطالعه، مشخص نمودن فعالیت زمین‌ساختی اخیر با استفاده از شاخص‌های کمی ژئومورفیک عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)، برجستگی نسبی (Bh)، ضریب شکل (Ff)، انتگرال و منحنی فراسنجی (Hi) و گرادیان طولی رود (SL) در حوضه سعادت آباد می‌باشد و سپس شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی اخیر (Iat) به منظور تعیین فعالیت نوزمین‌ساختی کل منطقه محاسبه می‌گردد.

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

از دید جغرافیایی حوضه آبریز سعادت آباد با مساحت ۶۸۵,۱۱۹ کیلومتر مربع در جنوب ایران و در استان فارس واقع شده و یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز بختگان - مهاباد می‌باشد. منطقه مورد بررسی بین طول‌های جغرافیایی $30^{\circ} 15' 4''$ تا $53^{\circ} 35' 44''$ شرقی و عرض جغرافیایی $29^{\circ} 55' 41''$ تا $30^{\circ} 15' 17''$ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

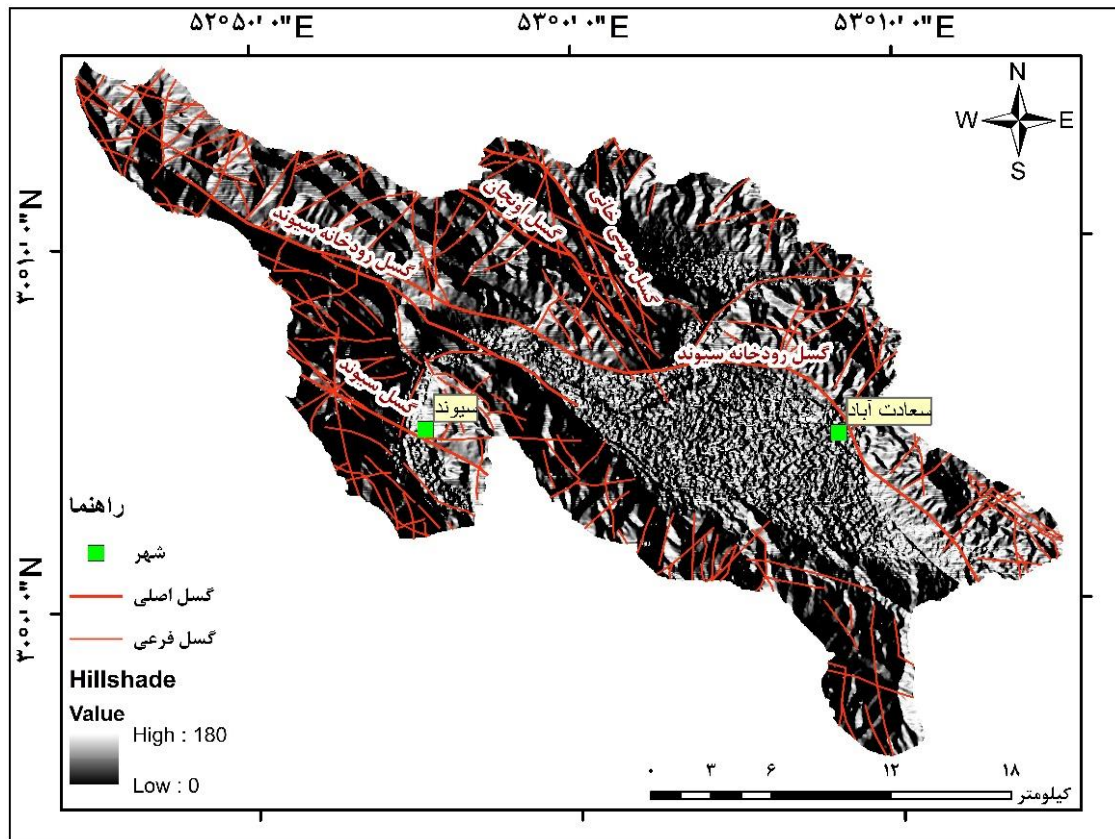
گستره مورد بررسی در تقسیم‌بندی ساختمانی - رسوبی ایران (اشتوکلین^۱، ۱۹۶۸: ۱۲۲۹-۱۲۵۸) در محدوده زاگرس مرتفع واقع شده و گسل‌های متعددی در منطقه وجود دارد که شامل گسل‌های رودخانه سیوند، گسل سیوند، موسی‌خانی و گسل اونجان می‌باشد (شکل ۲). نحوه حرکت صفحه‌ی عربی و صفحه ایران نسبت به هم و برخورد آن‌ها به همدیگر پس از بسته شدن اقیانوس نئوتتیس موجب به وجود آمدن کوهزاد زاگرس شده است. این کمربند کوهزایی از شمال باختری تا جنوب مرکز ایران امتداد یافته است و در بخش میانی کوهزایی آلبی قرار گرفته و بنا بر نظر بسیاری از زمین‌شناسان از شمال خاوری به خرد قاره^۲ ایران مرکزی و از جنوب باختری به سپر عربستان محدود شده است. (بربریان^۳، ۱۹۹۵: ۱۹۳-۲۲۴). زاگرس مرتفع بلندترین کوه‌های زاگرس شامل دنا، اشتران کوه و زردکوه را در بر می‌گیرد. پهنای زاگرس مرتفع زیاد نیست (۱۰ تا ۷۰ کیلومتر) اما چهره برجسته همراه با پرتگاه‌های قائم موجب شده تا عوارض مجاور را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. گسل‌های طولی زیادی در زاگرس مرتفع قرار دارد که عملکرد این گسل‌ها موجب شده تا طبقات آهکی زاگرس مرتفع چه در جهت قائم و چه در جهت افقی جابجا شوند و در نتیجه پرتگاه‌های بلند کوهستانی را ایجاد کنند. در قسمت‌هایی از زاگرس مرتفع از اشتران کوه تا دنا، دیواره‌های گسلی در امتداد شکستگی‌ها بالا آمده‌اند و بزرگترین کوه‌های منطقه را

1. Stocklin

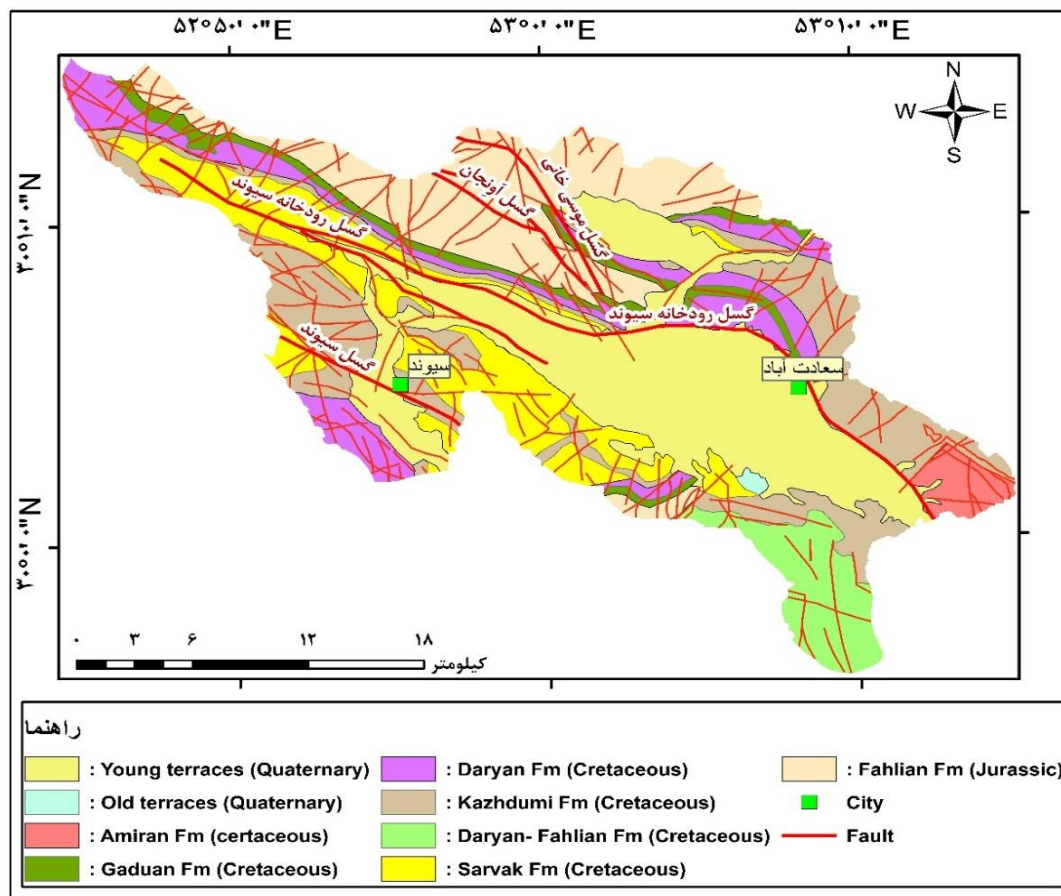
2. Micro-continent

3. Berberian

به وجود آورده اند (علایی طالقانی، ۱۳۸۴: ۱۵۵-۱۷۲). بنابراین مطالعه شاخص های ریخت سنجی در حوضه آبریز سعادت آباد کمک شایانی در شناخت مناطق فعال از دید زمین ساختی خواهد نمود. منطقه مورد مطالعه در محدوده نقشه های ۱:۲۵۰۰۰۰ اقلید و سعادت شهر واقع شده است. از لحاظ زمین شناسی منطقه شامل سازندهای امیران، فهلیان، گدوان، داریان، کزدمی و سروک می باشد (شکل ۳).



شکل ۲: نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه.



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی گستره مورد بررسی (برگرفته از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ اقلید و سعادت شهر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور).

روش تحقیق

با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) می‌توان ویژگی‌ها و شاخص‌های رودخانه‌ای را به‌طور دقیق استخراج کرد و به تحلیل حوضه‌های زهکشی پرداخت (متیوس و وانگ^۱، ۲۰۰۶: ۲۶-۲۱). در این مطالعه به منظور تعیین زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی در منطقه مورد مطالعه به صورت زیر عمل شده است:

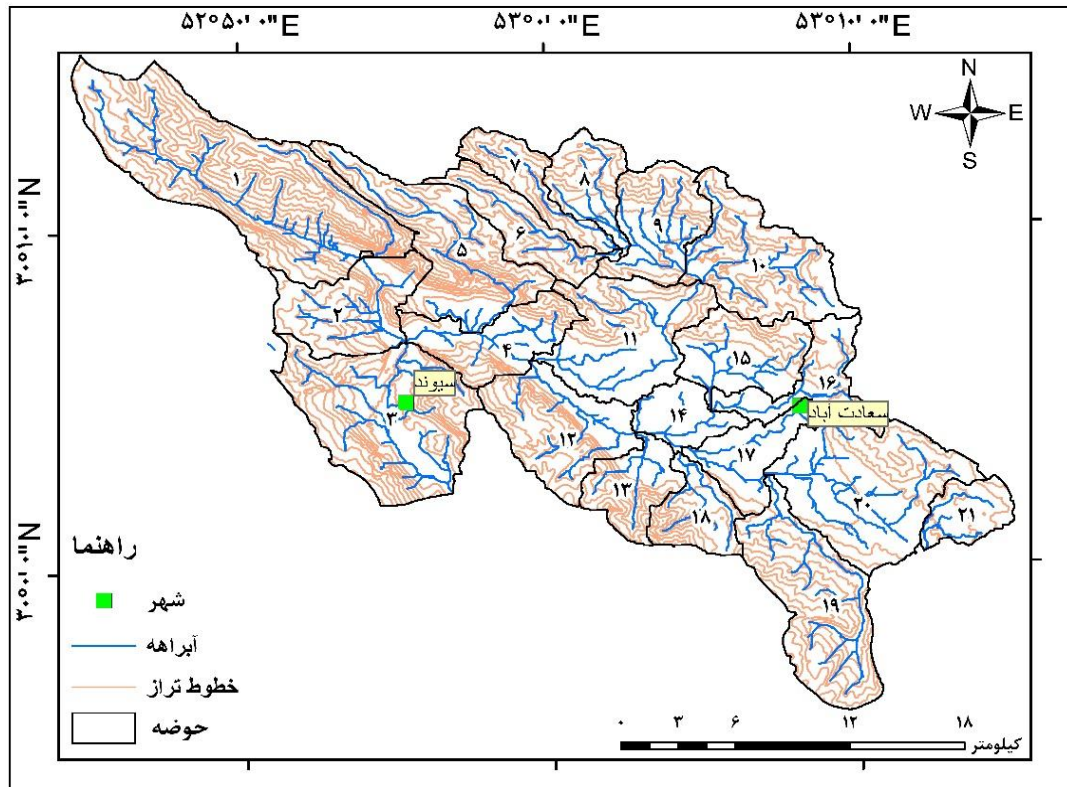
(۱) ابتدا با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر در محیط GIS و همچنین به کارگیری افزونه جانبی نرم‌افزار GIS به نام Arc Hydro، زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه‌ها استخراج گردید و حوضه سعادت آباد به ۲۱ زیرحوضه تقسیم شد (شکل ۴).

(۲) برای هر کدام از زیرحوضه‌ها به صورت مجزا به محاسبه شاخص پرداختیم. شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: عدم تقارن حوضه زهکشی، برجستگی نسبی، ضریب شکل، انتگرال و منحنی فراسنجی و گرادیان طولی رود. سپس برای هر شاخص نقشه پهنه‌بندی در مقیاس حوضه رسم شد.

(۳) در مرحله بعد، واحدهای زمین‌شناسی و گسل‌های واقع در منطقه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور در گستره مورد مطالعه تعیین شد.

^۱. Maathuis and Wang

(۴) در مرحله آخر به منظور تعیین سطح فعالیت زمین ساختی کل، شاخص زمین ساخت فعال نسبی (Af) محاسبه و نقشه این شاخص رسم شد. سپس نتایج حاصل از اندازه گیری شاخص ها همراه با ساختارهای اصلی منطقه، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



شکل ۴: حوضه ها و آبراهه های استخراج شده در منطقه مورد مطالعه.

بحث و یافته های تحقیق

شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)

شاخص عدم تقارن میزان کج شدگی زمین ساختی جهت جریان را در حوضه زهکشی نشان می دهد و برای درک ارتباط کج شدگی زمین ساختی در نواحی با مقیاس حوضه زهکشی و بزرگ تر ارتباط داده شده است (هر و گاردنر^۱، ۱۹۸۵: ۷۵-۱۰۴؛ کلر و پینتر^۲، ۲۰۰۲: ۳۶۲). این شاخص از رابطه (۱) محاسبه می شود:

$$\text{رابطه (۱)} \quad Af = 100 (Ar/At)$$

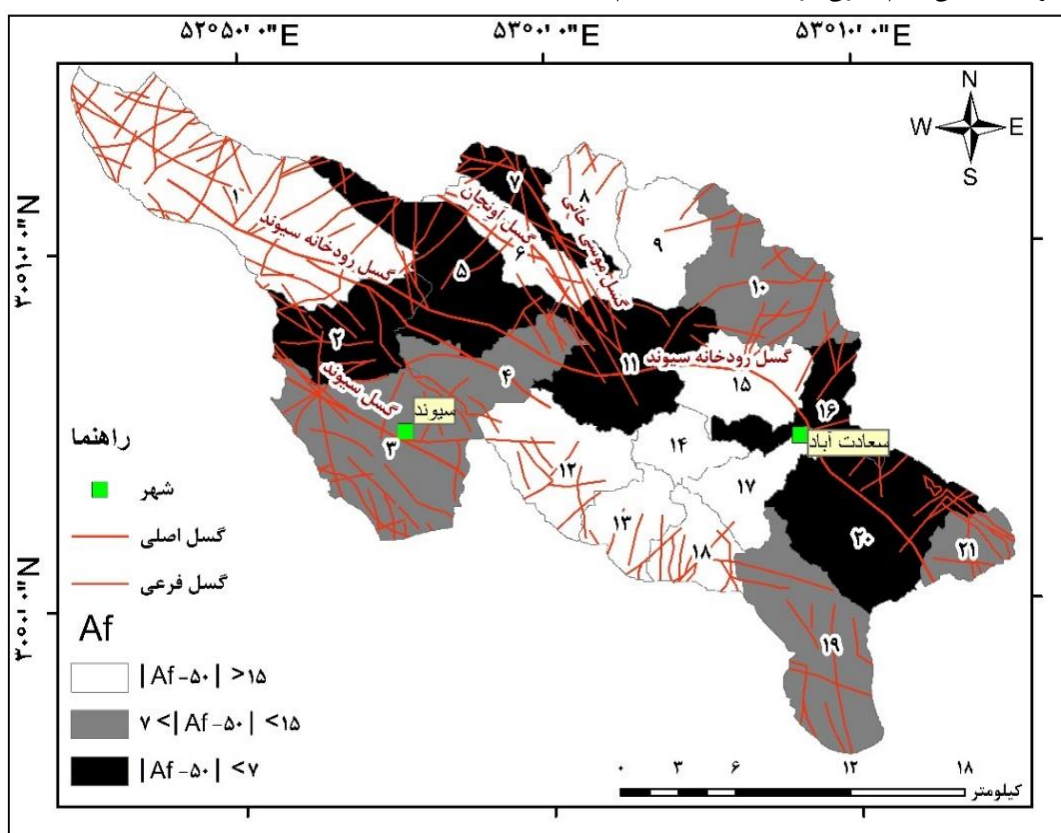
در این رابطه Ar مساحت حوضه در سمت راست آبراهه اصلی در جهت پایین دست رود و At مساحت کل حوضه زهکشی می باشد. این شاخص نسبت به کج شدگی عمود بر جهت آبراهه حساس است. در این پژوهش مقادیر Af به صورت $|Af - 50|$ بیان شده که قدر مطلق تفاضل بین مقدار مشاهده شده و مقدار خنثی ۵۰ می باشد (حمدونی و همکاران^۳، ۲۰۰۸: ۱۵۰-۱۷۳). به منظور محاسبه شاخص عدم تقارن با استفاده از نرم افزار Arc GIS، مساحت کل حوضه و مساحت سمت راست آبراهه اصلی به تفکیک برای ۲۱ زیر حوضه واقع در گستره مورد مطالعه محاسبه گردید (جدول ۱) و سپس نقشه میزان کج شدگی با ثبت مقادیر شاخص عدم تقارن و ساختارهای اصلی منطقه ترسیم شد. این شاخص از لحاظ فعالیت زمین ساختی در ۳ رده طبقه بندی شده است (شکل ۵): رده ۱ فعالیت زمین ساختی بسیار بالا ($|Af - 50| > 15$)، رده ۲ فعالیت

1. Hare and Gardner

2. Keller and Pinter

3. El Hamdouni et al

زمین‌ساختی متوسط ($7 \leq |Af - 50| < 15$)، رده ۳ فعالیت زمین‌ساختی کم ($|Af - 50| < 7$)، نتایج عددی حاصل از محاسبه شاخص عدم تقارن نشان می‌دهد که مقدار این شاخص بین ۰/۱ تا ۳۲/۰۳ متغیر است. بیشترین مقدار و بیشترین کج‌شدگی این شاخص مربوط به حوضه ۱۳ با مقدار ۳۲/۰۳ و کمترین مقدار نیز مربوط به حوضه ۵ با مقدار ۰/۱ می‌باشد. فعالیت گسل‌های سیوند، گسل رودخانه سیوند، گسل موسی‌خانی و آونجان موجب شده که بیشتر زیرحوضه‌های واقع در این گسل‌ها دارای کج‌شدگی بوده و فعالیت زمین‌ساختی متوسط به بالا را نشان دهند. بر اساس شاخص عدم تقارن، در امتداد بخش‌هایی از گسل رودخانه سیوند واقع در حوضه‌های ۱ و ۱۵ فعالیت زمین‌ساختی بالا دیده می‌شود که بیانگر فعالیت اخیر این گسل است. همچنین در حوضه ۶ فعالیت گسل آونجان، در حوضه‌های ۸ و ۹ فعالیت گسل‌های واقع در شمال منطقه، در حوضه‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۸ فعالیت گسل‌های واقع در جنوب گستره مورد مطالعه موجب شده که رده ۱ فعالیت زمین‌ساختی را برای شاخص عدم تقارن در منطقه شاهد باشیم.



شکل ۵: نقشه پراکندگی شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی در منطقه مورد مطالعه.

شاخص برجستگی نسبی (Bh)

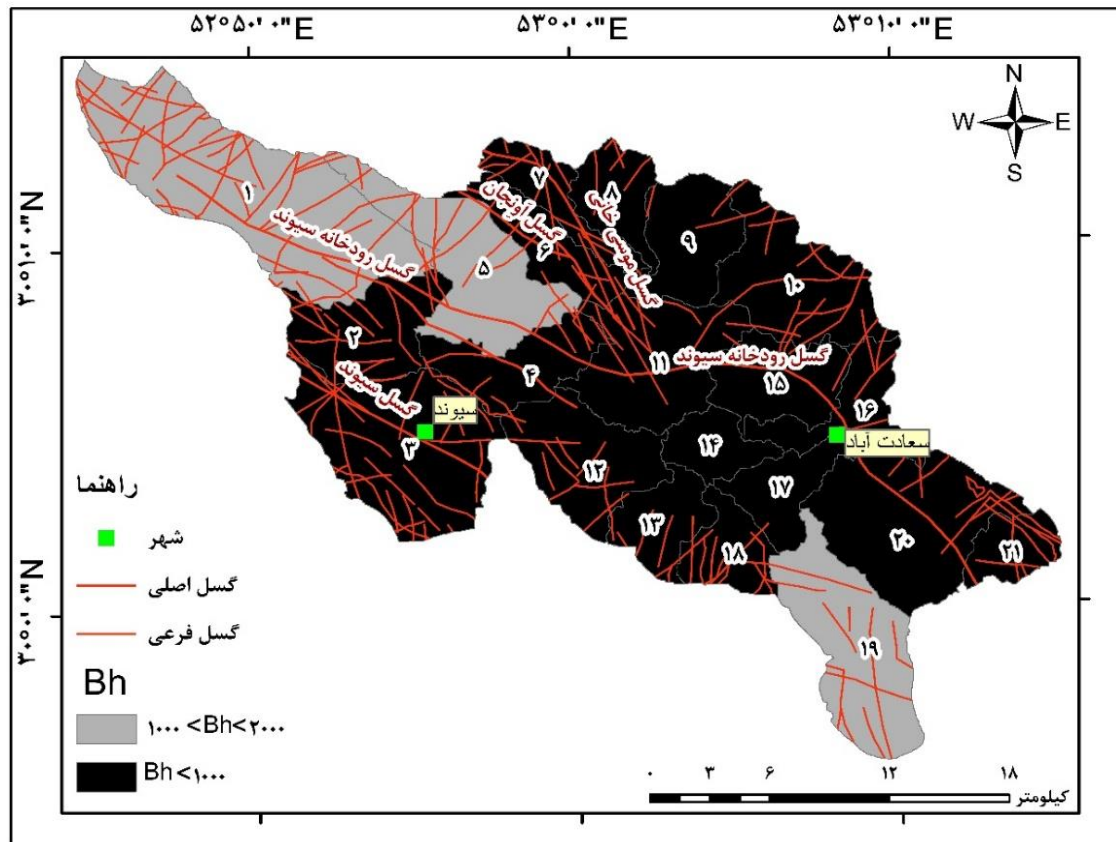
برجستگی نسبی نشان‌دهنده ارتفاع نسبی حوضه بوده و از اختلاف میان مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقطه در حوضه محاسبه می‌شود.

مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقطه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی در محیط Arc GIS برای هر زیر حوضه به صورت مجزا به دست می‌آید و با توجه به رابطه (۲) محاسبه می‌شود (کلر و پینتر، ۲۰۰۲: ۳۶۲):

$$\text{رابطه (۲)} \quad Bh = H_{\max} - H_{\min}$$

در این رابطه، Bh برجستگی نسبی، H_{\max} بالاترین ارتفاع حوضه و H_{\min} پایین‌ترین ارتفاع حوضه می‌باشد. نتایج عددی حاصل از محاسبه این شاخص در جدول (۱) آمده است. مقادیر بالای برجستگی نسبی، بیانگر نرخ بالاآمدگی بیشتر، شدت جریان آب و نفوذ پایین می‌باشد که به دلیل فعالیت زمین‌ساختی بیشتر است. همچنین می‌توان گفت که هر چه ارتفاع بیشتر

باشد نشان دهنده فرسایش کمتر و در نتیجه فعالیت زمین ساختی بیشتر است. نقشه پهنبندی حاصل از شاخص برجستگی نسبی در گستره مورد مطالعه رسم شده (شکل ۶) و به لحاظ فعالیت زمین ساختی در دو رده طبقه بندی شده است: رده ۲ فعالیت زمین ساختی متوسط ($1000 < Bh < 2000$) و رده ۳ فعالیت زمین ساختی کم ($Bh < 1000$). این منطقه رده ۱ فعالیت زمین ساختی ($Bh > 2000$) برای شاخص برجستگی نسبی را دارا نمی باشد زیرا نرخ بالآمدگی در این منطقه متوسط و کم بوده و نرخ بالآمدگی بالا در این منطقه مشاهده نمی شود. با توجه به نقشه پهنبندی متوجه می شویم که حوضه های ۱ و ۵ به دلیل فعالیت بخشی از گسل رودخانه سیوند و حوضه ۱۹ به دلیل فعالیت گسل های واقع در جنوب منطقه دارای فعالیت متوسط هستند. بیشتر مساحت حوضه ها فعالیت زمین ساختی پایین را برای این شاخص نشان می دهند.



شکل ۶: نقشه پراکندگی شاخص برجستگی نسبی در منطقه مورد مطالعه.

شاخص ضریب شکل (Ff)

شاخص ضریب شکل با توجه به رابطه زیر محاسبه می شود (هورتن^۱، ۱۹۴۵: ۲۷۵-۳۷۰):

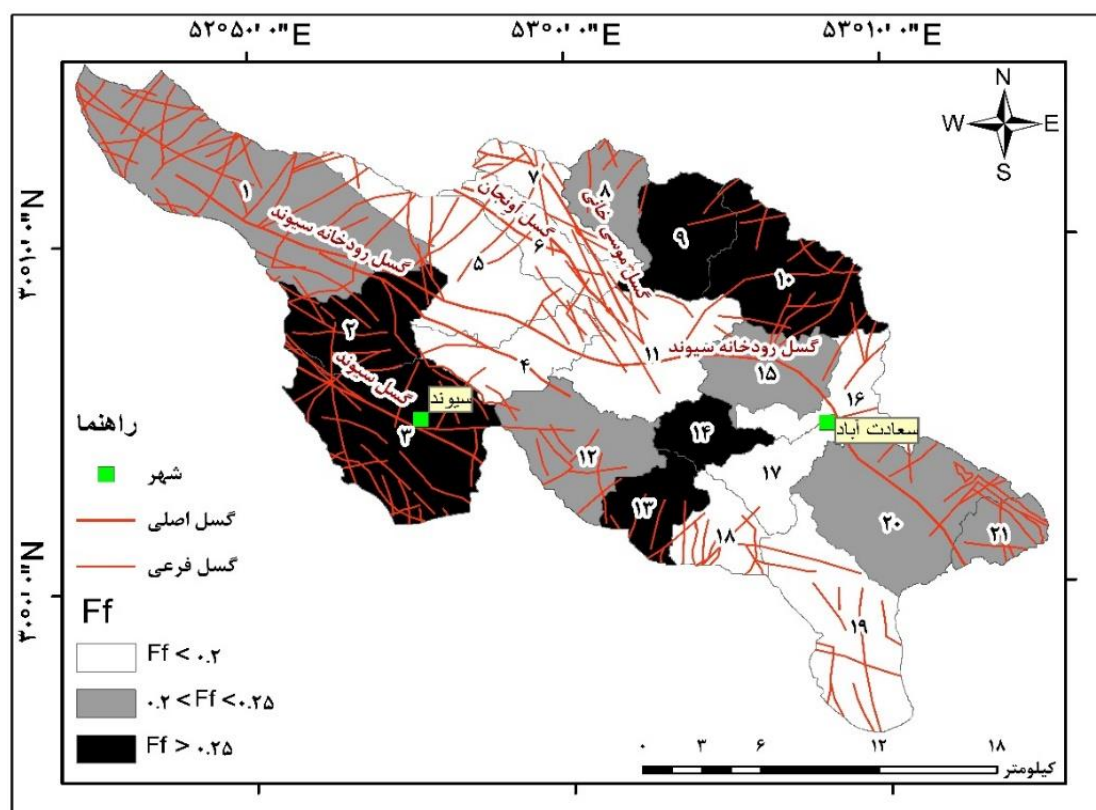
$$Ff = A / L^2 \quad (3)$$

در این رابطه A مساحت حوضه و L^2 مجذور طول حوضه است. طول حوضه از محل خروج آبراهه اصلی تا مرتفع ترین نقطه در حوضه محاسبه می شود. هر چه مقدار ضریب شکل به عدد ۱ نزدیکتر باشد حوضه مذکور به مربع نزدیکتر است و هر چه ضریب شکل کوچکتر از یک باشد حوزه کشیده تر می باشد. حوضه های زهکشی در مناطق فعال از نظر زمین ساختی، دارای شکل کشیده تر هستند (سینگ و همکاران^۲، ۲۰۱۴: ۱۱۱-۱۲۱). با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر و

1. Horton

2. Singh et al

آبراهه اصلی هر حوضه، مساحت و طول برای تمامی حوضه‌ها به صورت مجزا به دست آمد و شاخص ضریب شکل برای ۲۱ حوضه زهکشی اندازه‌گیری شد (جدول ۱) و در نهایت نقشه پهنه‌بندی این شاخص در مقیاس حوضه ترسیم گردید (شکل ۷). شاخص مذکور به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به سه رده طبقه‌بندی شده است: رده ۱ مقادیر کمتر از $0/2$ ($Ff < 0/2$) دارای فعالیت زمین‌ساختی بالا، رده ۲ مقادیر بین $0/2$ تا $0/25$ ($0/2 < Ff < 0/25$) دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط و رده ۳ شامل مقادیر بیشتر از $0/25$ ($Ff > 0/25$) که دارای فعالیت زمین‌ساختی کم می‌باشد. بیشترین کشیدگی حوضه‌ها و بیشترین فعالیت زمین‌ساختی این شاخص با مقدار $0/12$ مربوط به حوضه ۵ و ۱۶ ناشی از فعالیت گسل رودخانه سیوند و کمترین فعالیت زمین‌ساختی نیز با مقدار $0/39$ مربوط به حوضه ۱۰ است. همچنین گسل رودخانه سیوند در امتداد خود موجب شده در حوضه‌های ۴ و ۱۱ نیز رده ۱ فعالیت زمین‌ساختی را شاهد باشیم. فعالیت گسل آنجان و موسی‌خانی موجب فعالیت بالا به ترتیب در حوضه‌های ۶ و ۷ شده است. همچنین فعالیت گسل‌های واقع در جنوب منطقه نیز بر حوضه‌های ۱۸ و ۱۹ اثر گذار بوده و موجب شده این حوضه‌ها فعالیت بالای زمین‌ساختی را دارا باشند.



شکل ۷: نقشه پراکنده شاخص ضریب شکل در منطقه مورد مطالعه.

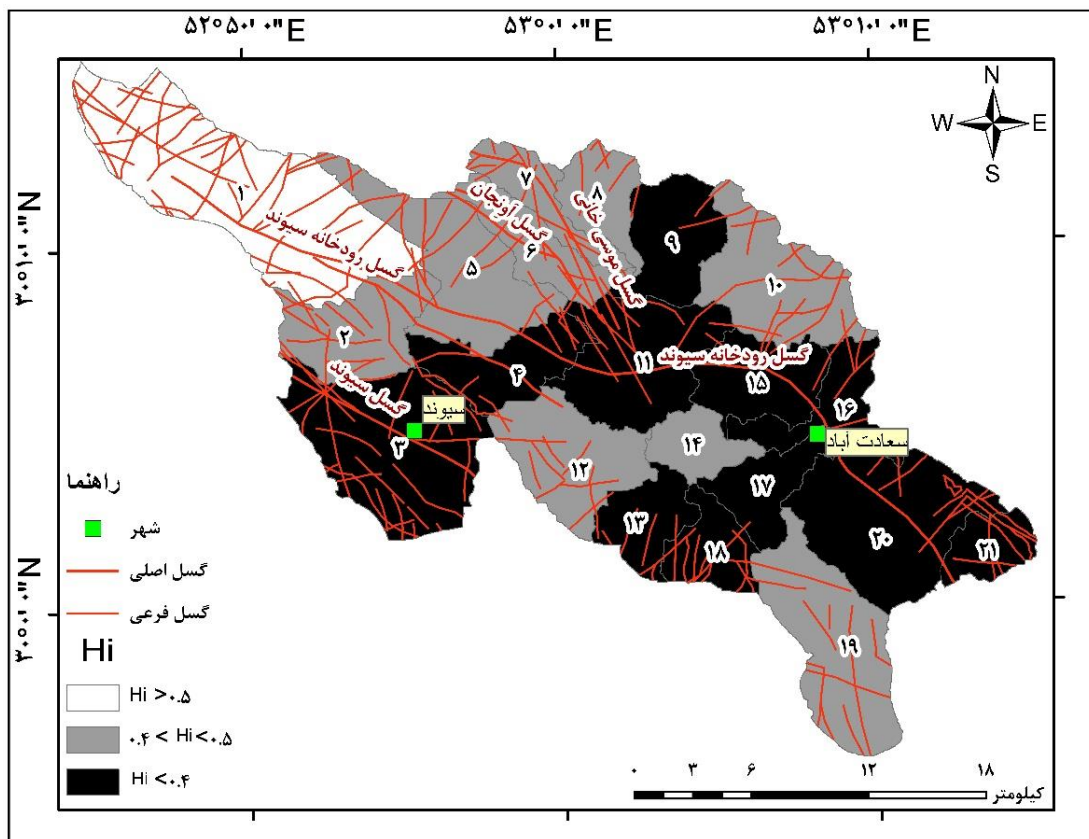
انتگرال و منحنی فرازسنجی (Hi)

شاخص انتگرال فرازسنجی بیانگر حجم فرسایش نیافته حوضه بوده و توصیف‌کننده توزیع نسبی ارتفاع در یک منطقه به ویژه حوضه آبریز است و از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (استراهلر، ۱۹۵۲: ۱۱۴۲-۱۱۱۷):

$$\text{رابطه (۴)} \quad Hi = (\text{average elevation} - \text{min elevation}) / (\text{max elevation} - \text{min elevation})$$

مقادیر بالای شاخص مذکور مربوط به نواحی فعال زمین‌ساختی است، در حالیکه مقادیر پائین آن مربوط به نواحی قدیمی است که کمتر تحت تأثیر زمین‌ساخت فعال اخیر قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر می‌توان گفت مقادیر بالای انتگرال فرازسنجی به دلیل وجود پستی و بلندی و توپوگرافی مرتفع نسبت به میانگین حوضه زهکشی و مقادیر متوسط تا کم این شاخص

دلالت بر برش شبکه زهکشی در یک سطح هموارتر می باشد (سینگ^۱، ۲۰۰۹: ۵۳-۵۹). با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر، ارتفاع میانگین، کمینه و بیشینه برای هر زیر حوضه به صورت مجزا در گستره مورد مطالعه تعیین و مقدار شاخص مذکور محاسبه گردید (جدول ۱). سپس نقشه پهنه بندی سطح فعالیت زمین ساختی رسم شد (شکل ۸). این شاخص را براساس مقدار انتگرال و میزان تحدب و تقعر منحنی می توان از لحاظ فعالیت زمین ساختی به سه رده تقسیم کرد (حمدونی و همکاران^۲، ۲۰۰۸: ۱۵۰-۱۷۳): رده ۱ با مقدار انتگرال $0/5$ و بیشتر ($Hi > 0/5$) شامل منحنی فرازسنجی محدب و بیان کننده توپوگرافی بالا نسبت به مقدار میانگین آن در حوضه زهکشی است، رده ۲ با مقدار انتگرال فرازسنجی $0/4$ تا $0/5$ ($0/4 < Hi < 0/5$) که حد واسط رده ۱ و ۳ بوده و شامل منحنی فرازسنجی محدب- مقعر می باشد، رده ۳ با مقدار انتگرال فرازسنجی کمتر از $0/4$ ($Hi < 0/4$) و منحنی های مقعر را شامل می شود. بیشترین مقدار این شاخص و بالاترین فعالیت زمین ساختی مربوط به حوضه ۱ با مقدار $0/51$ به دلیل فعالیت گسل رودخانه سیوند است. فعالیت گسل های موسی خانی، آونجان و تعدادی از گسل های واقع در جنوب منطقه، موجب شده که حوضه های واقع در این مناطق فعالیت متوسط را دارا باشند. با توجه به شاخص انتگرال فرازسنجی اکثر حوضه ها در رده فعالیت متوسط و پایین قرار دارند.



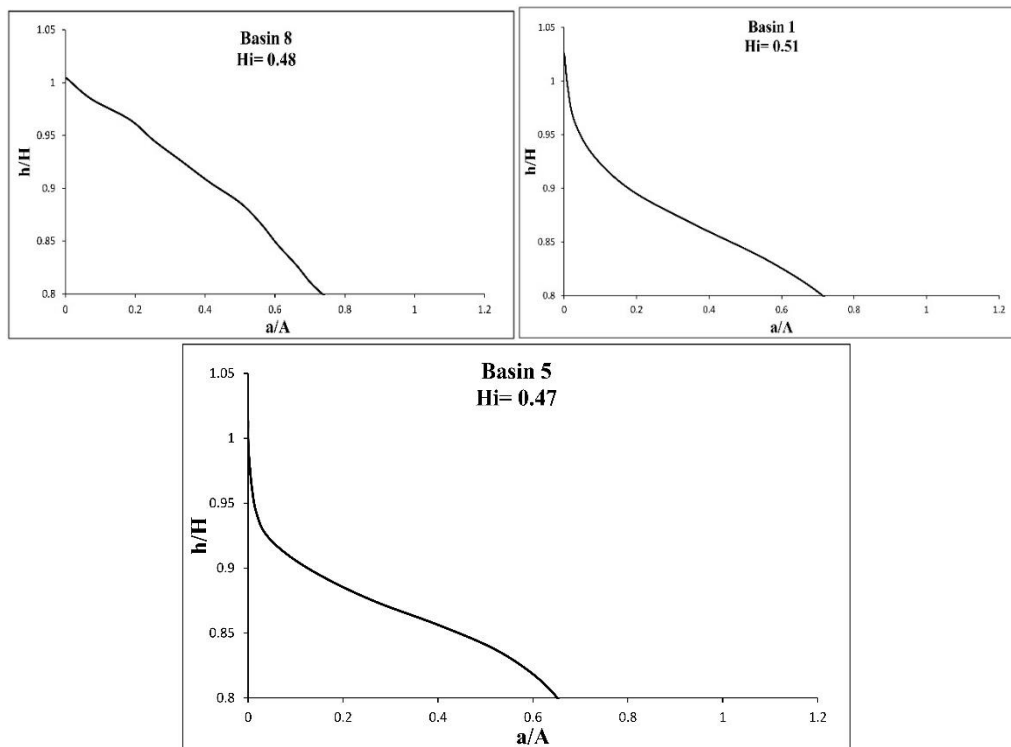
شکل ۸: نقشه پراکندگی شاخص انتگرال فرازسنجی در منطقه مورد مطالعه.

منحنی فرازسنجی همراه با شاخص انتگرال فرازسنجی در تعیین وضعیت زمین ساختی منطقه کمک شایانی به ما خواهد کرد و مرحله تکامل یک حوضه زهکشی را مشخص می نماید. این منحنی با ترسیم ارتفاع نسبی در محور قائم در مقابل مساحت نسبی در محور افقی حوضه رسم می شود و نشان دهنده توزیع مساحت، ارتفاع و برجستگی ها در یک حوضه زهکشی است (سلیمانی، ۱۳۷۸: ۱۵۶-۱۴۸). منحنی فرازسنجی تعدادی از حوضه هایی که بیشترین مقدار عددی این شاخص را در

¹. Singh

². El Hamdouni et al

گستره مورد مطالعه دارا هستند، در زیر آمده است (شکل ۹) که شامل حوضه‌ی ۱ با مقدار 0.51 و حوضه‌های ۸ و ۵ به ترتیب با مقادیر 0.48 و 0.47 می‌باشد که فعالیت زمین‌ساختی بالا و متوسط را نشان می‌دهند.



شکل ۹: منحنی پیشینه فراسنجی در حوضه‌های ۱، ۸ و ۵.

شاخص گرادیان طولی رود (SL)

شاخص گرادیان طولی رود ابزار مفیدی برای ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی است و تأثیر تغییرات محیطی بر روی پروفیل طولی رودخانه را نشان می‌دهد و از رابطه زیر به دست می‌آید (هک^۱، ۱۹۷۳: ۴۲۱-۴۲۹):

$$SL = (\Delta H / \Delta L) L \quad (5)$$

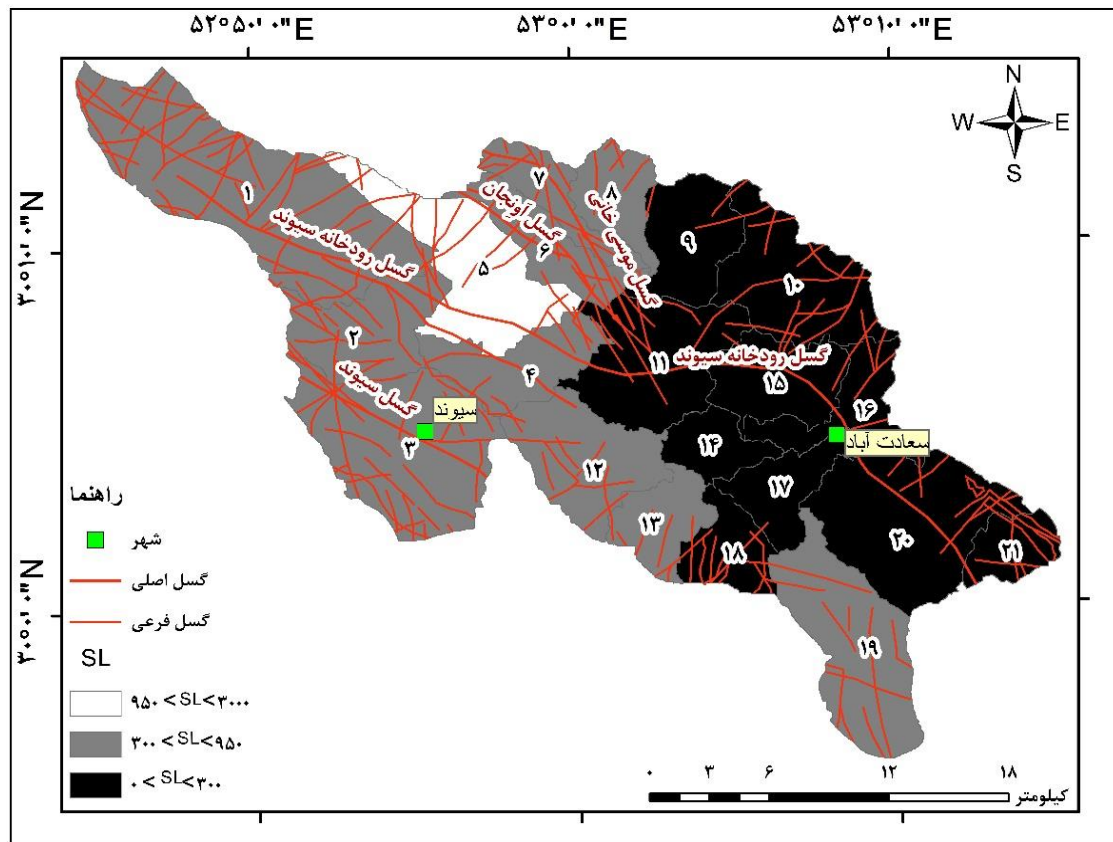
در این رابطه، SL گرادیان طولی رود، $(\Delta H / \Delta L)$ شیب مسیر کانال رود، (ΔH) اختلاف ارتفاع در یک مقطع خاص از رودخانه، (ΔL) فاصله افقی همان محل و L طول کلی کانال رودخانه از نقطه‌ای که این شاخص محاسبه می‌شود تا سرچشمه رودخانه می‌باشد. برای محاسبه این شاخص از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰ متر در امتداد هر مسیر جریان برای تمامی حوضه‌ها، طولانی‌ترین آبراهه موجود در هر حوضه و لایه توپوگرافی استفاده شده است و در نهایت میانگین مقادیر این شاخص برای هر حوضه محاسبه شد (جدول ۱). در مناطقی که گسل آبراهه را قطع می‌کند، بیشترین مقدار شاخص مشاهده می‌شود و این مناطق فعال هستند (فونت و همکاران^۲، ۲۰۱۰: ۱۷۲-۱۸۰). هنگامی که رودخانه و آبراهه‌ها در نواحی با نرخ بالآمدگی زیاد جریان دارند، مقدار SL افزایش می‌یابد اما هنگامی که جریان رودخانه به موازات ساختارهایی مانند دره‌های حاصل از گسل راستالغز صورت می‌گیرد، میزان SL کاهش پیدا می‌کند (کلر و پینتر^۳، ۲۰۰۲: ۳۶۲). نقشه پهنه‌بندی حاصل از این شاخص در زیر آمده است (شکل ۱۰). این شاخص از لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به سه رده تقسیم‌بندی شده است که عبارتند از: رده ۱ فعالیت زمین‌ساختی بالا ($950 < SL < 3000$)، رده ۲ فعالیت زمین‌ساختی

1. Hack

2. Font et al

3. Keller and Pinter

متوسط ($950 < SL < 300$) و رده ۳ فعالیت زمین ساختی کم ($0 < SL < 300$). بالاترین مقدار این شاخص و بالاترین فعالیت زمین ساختی مربوط به حوضه ۵ با مقدار ۱۷۸۶ است زیرا گسل رودخانه سیوند در منطقه‌ای که به آبراهه واقع در این حوضه برخورد کرده، موجب ایجاد آنومالی در آبراهه شده و بالاترین فعالیت زمین ساختی را در این حوضه شاهد هستیم. تلاقی گسل آنجان با آبراهه‌های واقع در حوضه‌های ۶ و ۷، تلاقی گسل موسی‌خانی با آبراهه واقع در حوضه ۸، فعالیت گسل سیوند و قطع شدن آبراهه واقع در حوضه‌های ۲ و ۳ و همچنین فعالیت گسل‌های واقع در جنوب گستره مورد مطالعه، موجب شده آبراهه واقع در این حوضه‌ها تا حدودی آنومالی داشته و رده ۲ فعالیت زمین ساختی (فعالیت متوسط) را در این حوضه‌ها شاهد باشیم.



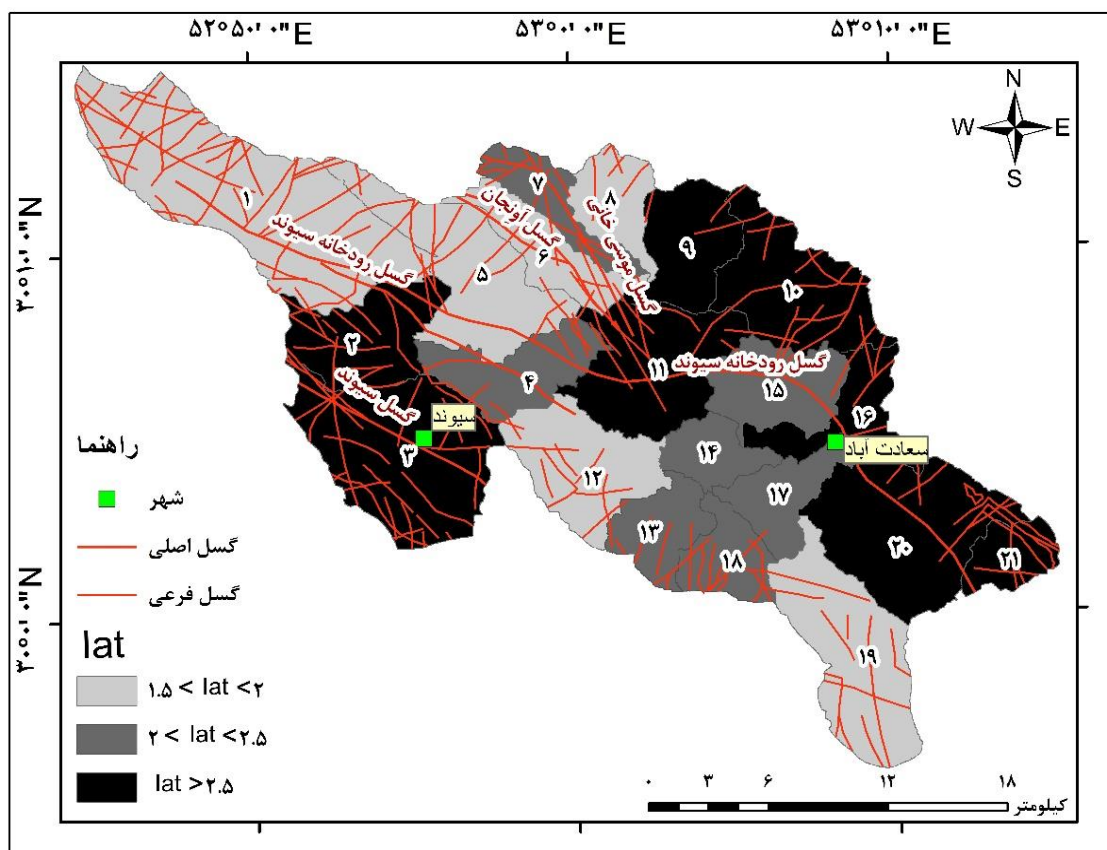
شکل ۱۰: نقشه‌ی پراکنده‌ی مقادیر شاخص گرادیان طولی رود در منطقه‌ی مورد مطالعه.

شاخص زمین ساخت فعال نسبی (Iat)

تمامی شاخص‌هایی که ذکر شد به منظور تعیین زمین ساخت فعال اخیر در حوضه آبریز سعادت آباد مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس نتایج حاصل از محاسبه و رده‌بندی شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی عدم تقارن حوضه زهکشی، برجستگی نسبی، ضریب شکل، انتگرال فراسنجی و گرادیان طولی رود به ارزیابی زمین ساخت فعال نسبی می‌پردازیم. بدین صورت که هر کدام از شاخص‌های مذکور با توجه به مقادیری که دارا هستند به سه رده تقسیم می‌شوند و سپس بنا به روش حمدونی و همکاران^۱ (۲۰۰۸) با میانگین‌گیری از رده کل شاخص‌ها (S/n)، شاخص نهایی زمین ساخت فعال نسبی (Iat) برای ۲۱ حوضه به دست می‌آید (جدول ۱) و به ۴ رده زمین ساختی تقسیم‌بندی می‌شود: رده ۱ فعالیت زمین ساختی بسیار بالا ($1 < S/n < 1/5$)، رده ۲ فعالیت بالا ($1/5 < S/n < 2$)، رده ۳ فعالیت متوسط ($2 < S/n < 2/5$) و رده ۴

^۱. El Hamdouni et al

فعالیت زمین‌ساختی کم ($S/n > 2/5$). با توجه به نتایج حاصل از محاسبه شاخص (Iat)، حوضه سعادت آباد رده ۱ این تقسیم‌بندی را دارا نمی‌باشد. در نهایت نیز نقشه توزیع سطح فعالیت زمین‌ساختی کل در منطقه رسم شد (شکل ۱۱). حوضه‌های ۱ و ۵ به دلیل فعالیت بخش‌هایی از گسل رودخانه سیوند، حوضه ۶ به دلیل فعالیت گسل آونجان، حوضه ۸ به دلیل فعالیت گسل موسی‌خانی، حوضه‌های ۱۲ و ۱۹ که تحت تاثیر فعالیت گسل‌های واقع در جنوب منطقه قرار گرفته‌اند، رده فعالیت زمین‌ساختی بالا را دارا هستند. در کل میتوان گفت فعالیت گسل‌های مذکور موجب شده بیشتر مساحت منطقه مورد مطالعه رده ۲ و ۳ فعالیت زمین‌ساختی را نشان دهند.



شکل ۱۱: نقشه توزیع سطح فعالیت زمین‌ساخت نسبی در منطقه مورد مطالعه

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

Basin no.	Af- 50	Bh	Ff	Hi	SL	Iat	Class Iat
۱	۱۹/۳۷	۱۲۹۵	-۰/۲۴	-۰/۵۱	۸۰۹/۸	۱/۶	۲
۲	۰/۲۱	۹۳۰	-۰/۳۷	-۰/۴۴	۷۵۸	۲/۶	۴
۳	۱۴/۶	۹۸۹	-۰/۲۸	-۰/۳۴	۷۰۲/۴	۲/۶	۴
۴	۱۲/۶۹	۸۰۰	-۰/۱۸	-۰/۲۲	۳۱۱/۵	۲/۲	۳
۵	۰/۱	۱۱۵۰	-۰/۱۲	-۰/۴۷	۱۷۸۶/۷	۱/۸	۲
۶	۱۶/۷۵	۹۳۹	-۰/۱۴	-۰/۴۸	۳۳۰/۴	۱/۸	۲
۷	۵/۸۱	۹۳۹	-۰/۱۳	-۰/۴۸	۴۲۳/۲	۲/۲	۳
۸	۱۹/۷۸	۷۱۳	-۰/۲۴	-۰/۴۸	۶۳۵/۹	۲	۲
۹	۲۳/۰۲	۶۹۱	-۰/۳۸	-۰/۳۲	۲۶۷/۲	۲/۶	۴

۱۰	۹/۹۳	۸۱۱	۰/۳۹	۰/۴	۲۲۳	۲/۶	۴
۱۱	۰/۲۷	۷۵۵	۰/۱۳	۰/۲۲	۲۸۲/۸	۲/۶	۴
۱۲	۱۸/۴۹	۹۰۸	۰/۲۲	۰/۴۱	۶۶۱/۴	۲	۲
۱۳	۳۲/۰۳	۸۱۰	۰/۳۳	۰/۳۶	۶۵۹/۹	۲/۴	۳
۱۴	۲۷/۳۵	۲۸	۰/۳۲	۰/۴۳	۱۵۷/۶	۲/۴	۳
۱۵	۲۴/۱۱	۵۸۰	۰/۲۴	۰/۱۸	۲۹۲/۵	۲/۴	۳
۱۶	۱/۰۹	۵۴۲	۰/۱۲	۰/۲۸	۲۸۷/۷	۲/۶	۴
۱۷	۲۳/۶۳	۴۱۴	۰/۱۵	۰/۰۸	۱۹۵/۷	۲/۲	۳
۱۸	۳۰/۸۱	۸۱۱	۰/۱۶	۰/۳۷	۱۹۹/۲	۲/۲	۳
۱۹	۱۰/۸۵	۱۰۶۱	۰/۱۶	۰/۴۵	۳۸۵	۱/۸	۲
۲۰	۳/۷۹	۵۴۴	۰/۲۱	۰/۲۵	۱۳۷	۲/۸	۴
۲۱	۱۳/۴۴	۴۵۲	۰/۲۱	۰/۳۹	۱۲۳/۷	۲/۶	۴

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ارزیابی میزان زمین‌ساخت فعال با استفاده از پنج شاخص ریخت‌سنجی عدم تقارن حوضه زهکشی، برجستگی نسبی، ضریب شکل، انتگرال و منحنی فرازنسجی و گرادیان طولی رود در حوضه آبریز سعادت آباد واقع در استان فارس به انجام رسید. بدین منظور منطقه مورد مطالعه به ۲۱ زیرحوضه تقسیم شد و به محاسبه شاخص پرداختیم. در ایران و در مناطق مختلف جهان پژوهش‌های زیادی با استفاده از شاخص‌های ریخت‌سنجی برای تعیین مناطق فعال از لحاظ زمین‌ساختی انجام شده است زیرا از این طریق میتوان تا حدود زیادی از خسارات ناشی از بلایای طبیعی مانند سیل و زلزله جلوگیری کرد. این پژوهش‌ها تاییدی بر نتایج حاصل از تحقیق ما می‌باشد. با توجه به شاخص‌های ذکر شده در این پژوهش، در کل میتوان گفت هر چه منطقه از لحاظ زمین‌ساختی فعال‌تر باشد، دارای مقادیر عددی بیشتر شاخص‌های Ff ، SL ، Hi ، Bh ، Af است. نتایج حاصل از نقشه پهنه‌بندی شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) نشان می‌دهد که فعالیت بخش‌هایی از گسل رودخانه سیوند، گسل موسی‌خانی، گسل آونجان و تعدادی از گسل‌های واقع در جنوب منطقه مورد مطالعه، موجب شده حوضه آبریز سعادت آباد دارای فعالیت زمین‌ساختی نسبی اخیر متوسط به بالا باشد. به گونه‌ای که با توجه به نقشه حاصل از (Iat) حوضه‌های ۱، ۵، ۶، ۸، ۱۲ و ۱۹ فعالیت بالا را نشان می‌دهند. در حدود ۳۷/۸ درصد از مساحت گستره مورد مطالعه فعالیت زمین‌ساختی بالا، ۱۹/۸ درصد از مساحت دارای فعالیت زمین‌ساختی متوسط و ۴۲/۴ درصد فعالیت کم را دارا می‌باشد و بخش‌های شمالی، شمال غربی، میانی و جنوبی منطقه فعال‌تر از بخش‌های دیگر هستند. نتایج حاصل محاسبه از شاخص‌های ریخت‌سنجی و تجزیه و تحلیل آن‌ها با گسل‌های واقع در حوضه آبریز سعادت آباد، فعالیت زمین‌ساختی اخیر متوسط به بالای این منطقه را تایید می‌کند.

منابع

- آبدیده، محمد؛ قرشی، منوچهر؛ رنگزن، کاظم؛ آراین، مهران، ۱۳۹۰، ارزیابی نسبی زمین‌ساخت فعال با استفاده از تحلیل ریخت‌سنجی، بررسی موردی حوضه آبریز رودخانه دز، جنوب باختری ایران. علوم زمین، سال بیستم، شماره ۸۰، صص ۳۳ تا ۴۶.
- بابایی، شیما؛ ده بزرگی، مریم؛ حکیمی آسیابار، سعید؛ حسینی اصل، امین، ۱۳۹۷، بررسی زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در البرز مرکز. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال ششم، شماره ۱، صص ۴۰-۵۶.

- جباری، ندا؛ حسین‌زاده، محمد مهدی؛ ثروتی، محمد رضا؛ حسین‌زاده، محمد مهدی، ۱۳۹۷، مطالعه مورفوتکتونیک فعال حوضه آبخیز حصارک (شمال غرب تهران) با استفاده از شاخص‌های مورفومتریک. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال یکم، شماره ۲، صص ۱۷-۳۴.
- خدابخش‌نژاد، آذر؛ پورکرمانی، محسن؛ آرین، مهران؛ متکان، علی‌اکبر؛ چرچی، عباس، ۱۳۹۴، زمین‌ساخت فعال حوضه رودخانه کارون بزرگ. علوم زمین، سال بیست و چهارم، شماره ۹۵، صص ۱۳-۲۸.
- رابطی، دنیا؛ ده بزرگی، مریم؛ حکیمی‌اسیابر، سعید؛ نوزعیم، رضا، ۱۳۹۷، بررسی زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در حوضه سپیدرود، البرز غربی. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هفتم، شماره ۲، صص ۱۴۰-۱۵۷.
- رامشت، محمدحسین؛ سیف، عبدالله؛ شاهزیدی، سمیه سادات؛ انتظاری، مژگان، ۱۳۸۸، تاثیر تکتونیک جنبا بر مورفولوژی مخروط افکنه‌ی درختگان در منطقه‌ی شهداد کرمان، جغرافیا و توسعه، زمستان ۱۳۸۸، سال هفتم، شماره ۱۶، صص ۲۹-۴۶.
- سلیمانی، شهریار، ۱۳۷۸، رهنمودهایی در شناسایی حرکات تکتونیک‌ی فعال و جوان با نگرشی بر مقدمات دیرینه لرزه‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، شماره ۸، صص ۱۴۸-۱۵۶.
- علایی طالقانی، محمود، ۱۳۸۴، ژئومورفولوژی ایران، تهران، نشر قومس، صص ۱۵۵-۱۷۲.
- علی‌پور، رضا؛ صدر، امیرحسین؛ نظری دبیر، حسین؛ قمریان، سحر، ۱۳۹۷، ارزیابی زمین‌ساخت فعال نسبی کوه‌های گرین با استفاده از شاخص‌های مورفومتری و تحلیل الگوی فرکتالی (نپاوند، باختر ایران). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هفتم، شماره ۳، صص ۳۱-۵۶.
- یمانی، مجتبی؛ مقصودی، مهران؛ قاسمی، محمدرضا؛ محمدنژاد، وحید، ۱۳۹۱، شواهد مورفولوژیکی و مورفومتریکی تاثیر تکتونیک فعال بر مخروطه افکنه‌های شمال دامغان، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال چهل و چهارم، شماره ۲، صص ۱-۱۸.
- Berberian, M., 1995. Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241(3-4), pp. 193-224.
- 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*, pp. 115-138.
- Burbank, D.W. and Anderson, R.S., 2012. *Tectonic Geomorphology. Blackwell Science, Oxford*, pp. 438.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., Keller, E.A., 2008. Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), pp. 150-173.
- 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). *Geomorphology*, 119(3-4), pp. 172-180.
- Fossen, H., 2016. *Structural Geology. Cambridge University Press*, pp. 481.
- Hack, J.T., 1973. Stream-profiles analysis and stream-gradient index, *Journal of Research of the U.S Geological Survey*, 1(4), pp. 421-429.
- Hare, P.W. and Gardner, T.W., 1985. Geomorph indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. *Tectonic Geomorphology*, 4, pp. 75-104.

- Horton, R.E., 1945. *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*, *Geological Society of America Bulletin*, 56 (3), pp. 275- 370.
- Keller, E.A., 1986. *Investigation of active tectonics: use of surficial Earth processes*, *Active Tectonics, Studies in Geophysics*. National Academy Press, Washington, DC, pp. 136-147.
- Keller, E.A. and Pinter, N., 1996. *Active tectonics*, Prentice Hall Upper Seddle River, NJ, USA, pp. 564.
- Keller, E.A. and Pinter, N., 2002. *Earthquakes, Uplift, and Landscape*, pp. 362.
- Maathuis, B.H.P. and Wang, L., 2006. *Digital elevation model based hydro-processing*. *Geocarto International*, 21(1), pp. 21-26.
- Melosh, B.L. and Keller, E.A., 2013. *Effects of active folding and reverse faulting on stream channel evolution, Santa Barbara Fold Belt, California*. *Journal of Geomorphology*, 186, pp. 119-135.
- Singh, O.M., 2009. *Hypsometry and erosion proneness: a case study in the lesser Himalayan Watersheds*. *Journal of Soil and Water conservation*, 8(2), pp. 53- 59.
- Singh, P., Gupta, A., Singh, M., 2014. *Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques*, *The Egyptian journal of Remote Sensing and Space Science*, 17(2), pp. 111-121.
- Snyder, N.P., Whipple, K.X., Tucker, G.E., Merritts, D.J., 2009. *Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California*. *Geological Society of America Bulletin*, 112(8), pp. 1250-1263.
- Stocklin, J., 1968. *Structural history and tectonics of Iran: a review*: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52(7), pp. 1229- 1258.
- Strahler, A.N., 1952. *Hypsometric (area–altitude) analysis of erosional topography*, *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 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(4), pp. 654-666.
- Wells, S.G., Bullard, T.F., Menges, C.M., Drake, P.G., Karas, P.A, Kelson, K.I., Ritter, J.B., Wesling, J.R., 1988. *Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary. Pacific Coast of Costa Rica*. *Geomorphology*.