

مورفومتری و ارزیابی فعالیت‌های نئوتکتونیک در حوضه آبریز صدرآباد - تفت با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک

محمد شریفی^۱، استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی دانشگاه یزد، ایران
فاطمه زارع، کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه یزد، ایران
کاظم طاهری نژاد، کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه یزد، ایران

چکیده

حوضه آبریز صدرآباد یکی از حوضه‌های آبریز شیرکوه بوده که در دامنه‌های غربی آن قرار دارد. این حوضه دارای گسل‌های متعدد بوده که به نظر در کوتاه‌تر فعالیت داشته و احتمالاً موجب تغییر در سطوح رسوبهای جدید شده است. این پژوهش به دنبال بررسی عملکرد گسل‌ها در کوتاه‌تر با استفاده از هفت شاخص ژئومورفیک شامل گرادیان طول رودخانه، عدم تقارن حوضه آبریز، سینوزیته جبهه کوهستان، تقارن توپوگرافی معکوس زهکشی، پیچ و خم رودخانه اصلی، انتگرال هیپسومتریک و شکل حوضه است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که بر اساس شاخص‌های به کار گرفته شده در پلیو-کواترنر گسلها فعالیت داشته و تغییرات زیادی را در نیمرخ طولی رودخانه، بالاآمدگی کوه‌ها، شکل حوضه و تغییرات در سطح رسوبها بوجود آورده‌اند. برای مثال، شاخص SL حاکی از تغییرات عمودی قابل توجه در نیمرخ طولی رودخانه اصلی بویژه در بخش‌های میانی حوضه دارد به گونه‌ای که مقدار آن در این بخش به حدود ۷۵۰ می‌رسد. نیمرخ طولی رودخانه نیز چنین وضعیتی را نشان می‌دهد. شاخص Smr مقدار ۱/۸ را نشان می‌دهد. محاسبه شاخص Bs مقدار ۲/۱ را در حوضه صدرآباد نشان داد که بیانگر کشیدگی حوضه در اثر عملکرد گسل‌هاست. همچنین بررسی شاخص Itsf در ۲۰ مقطع اندازه‌گیری شده در امتداد طول حوضه مقدار ۰/۲۷ را نشان داد که بیانگر عدم تقارن حوضه است. شاخص Smf برای جبهه کوهستان‌های شرقی مقدار ۱/۸ را نشان داد که مقدار بالایی به شمار می‌رود. نتایج مشاهدات زمینی نیز حاکی از تغییر در رسوبات آبرفتی کوتاه‌تر، تراورتن‌ها و بریدگی و شکستگی در امتداد نیمرخ طولی رودخانه می‌باشد.

کلمات کلیدی: حوضه آبریز صدرآباد، نئوتکتونیک، شاخص‌های ژئومورفیک، مورفومتری

مقدمه

موضوع علم تکتونیک ژئومورفولوژی مطالعه فرم‌ها و چشم اندازهای قابل اندازه‌گیری به وجود آمده به وسیله فعالیت‌های تکتونیک است (آندرسن و بوربانک^۱، ۲۰۰۱). شواهد مورفوتکتونیک در ارزیابی تکتونیک فعال و فعالیت گسل‌ها ابزاری مفید و مطمئن به شمار می‌رود، زیرا از طریق مطالعه این شواهد می‌توان نواحی‌ای را شناسایی کرد که در گذشته فعالیت‌های سریع یا حتی کند تکتونیک را پشت سر گذاشته‌اند (رامیرز و هیرا^۲، ۱۹۹۸). شواهد تکتونیک فعال معمولاً رابطه بین گسل‌های فعال و توسعه لندفرم‌ها را تا حد زیادی مشخص می‌سازند. مطالعاتی که در حدود دو دهه اخیر در ایران انجام پذیرفته است، نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از بررسی‌های ژئومورفولوژی محلی، به فعالیت گسل‌ها پی برد (والکر و جکسون^۳، ۲۰۰۲). تکتونیک فعال در ایران بر اساس مدل جهانی تکتونیک صفحه‌ای حاصل همگرایی پوسته‌های قاره‌ای اوراسیا و عربستان می‌باشد. این همگرایی باعث فشردگی سپر فلات ایران بین دو پوسته و حرکت رو به شمال سپر عربستان به سمت اوراسیا می‌شود (والکر^۴، ۲۰۰۶). ارمنستان، شمال غرب ایران و شرق ترکیه در بخش میانی منطقه برخورد دو سپر قرار دارند (کرخینین^۵، ۲۰۰۴). برخی از شاخص‌های ژئومورفیک، به عنوان ابزارهای اساسی برای تشخیص تغییر شکل‌های سریع تکتونیک تجربه و آزمون شده و به طور وسیع مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از این رو نتایج حاصل در طرح‌های تحقیقاتی جهت کسب اطلاعاتی کامل و جامع در باره تکتونیک فعال مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شاخص‌های ژئومورفیک برای مطالعات تکتونیک فعال استفاده می‌شوند (داگلاس و دیگران^۶، ۲۰۰۱). در این زمینه تحقیقات نسبتاً خوبی در چند دهه اخیر در

¹ Burbank and Anderson

² Ramirez and Herrera

³ Walker and Jackson

⁴ Walker

⁵ Karakhanian

⁶ Douglas et al

خارج و داخل ایران انجام گرفته است. کِلر^۱ (۱۹۷۷) در مطالعه کوه‌های سن گابریل در جنوب کالیفرنیا به این نتیجه رسید که در مکان‌هایی با نرخ بالاآمدگی زیاد، مقادیر شاخص (sl) نیز زیاد می‌باشد. بال و مک فادن^۲ (۱۹۷۷) از شاخص نسبت پهنا به عمق یا ارتفاع دره (Vf) برای شناسایی عامل فرسایش استفاده کردند و ایجاد ژئومورفولوژی دره‌ها را توجیه کردند. ولز و همکاران^۳ (۱۹۸۸) شاخص‌هایی مانند سطوح مثلثی، شاخص سینوسی شدن جبهه کوهستان، تقعر نمیرخ رودخانه را در سواحل کاستاریکا بررسی کردند. زوجیویکز و مک کالپین^۴ (۲۰۰۰) اندازه، شیب و قدمت سطوح مثلثی شکل را در رابطه با یک گسل عادی در یوتای آمریکا به طور منسجم و دقیق بررسی کردند. مطالعه آنها نشان داد که ویژگی‌های هندسی سطوح مثلثی شکل کاملاً تحت تاثیر تکتونیک منطقه است. چیچ و همکاران^۵ (۲۰۰۶)، در پژوهشی تحت عنوان بررسی تاثیر دگر شیئی فعال به وسیله تحلیل الگوی زهکشی در جلگه ساحلی تایوان به این نتیجه رسیدند که حرکت‌های تراس‌ها^۶ بر اثر حرکت‌های نئوتکتونیک باعث شکل گیری حرکت‌های موجی رودخانه شده است و حرکت‌های غیرعادی موجی رودخانه نتیجه تکتونیک فعال می‌باشد. مالیک و همکاران^۷ (۲۰۰۶) در هیمالیای هند به مطالعه‌ی تاثیر تکتونیک در تکامل شبکه‌ی زهکشی و چشم اندازها با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که جنبه‌های اصلی تکتونیک و تراس‌های موجود در منطقه نقش مهمی در شکل‌دهی لندفرم‌ها دارند. سینگ و تاندون^۸ (۲۰۰۸) با استفاده از شاخص‌هایی مانند تراکم زهکشی، منحنی هیپسومتری، تقارن حوضه زهکشی و نسبت پهنای دره به ارتفاع در شمال غرب هیمالیا نشان دادند که

¹ Keller

² Bull and McFadden

³ Wells et al

⁴ Zuchiewicz, and McCaplin

⁵ Chich et al

⁶ Teraces

⁷ Malik et al

⁸ Singh and Tandon

جبهه کوهستانی مورد مطالعه از نظر تکتونیکی فعال است. گوانیری و پیروتا^۱ (۲۰۰۸) در جنوب شرق سیلیسی در ایتالیا با استفاده از شاخص‌هایی مانند انتگرال هیپسومتری، عدم تقارن حوضه و تداوم میزان بالاآمدگی و فعالیت‌های تکتونیکی در کواترنری را بررسی کردند. برای نخستین بار زائولاین و همکاران^۲ (۲۰۱۳) با بهره‌گیری از داده‌های پیمایشی استاندارد شده سنجش از دور LIDAR با قدرت تفکیک ۰/۲۵ تا ۱۰ متر موفق به شناسایی و تشخیص مناطق نو زمین‌ساختی شدند. توپال و همکاران^۳ (۲۰۱۶) در پژوهشی تحت عنوان ژئومورفولوژی زمین ساخت یک گسل نرمال بزرگ (گسل آقشهر در ترکیه) به این نتیجه رسیدند که گسل آقشهر فعال است و زمین لرزه آن در یک دوره‌ی تاریخی یک تهدید بالقوه به حساب می‌آید. نیوار و همکاران^۴ (۲۰۱۶) در مقاله تکامل از اواخر پلیستوسن رودخانه اسپ (پیرنه غربی، فرانسه) اثری از حوادث آب و هوا و تکتونیک فعال به این نتیجه رسیدند که در اواخر پلیستوسن گسلی که مجدد در منطقه تکتونیکی پیرنه غربی فعال شده از نوع محوری بوده است. همچنین، در مورد فعالیت‌های نئوتکتونیک و شواهد ژئومورفیک آن در ایران نیز پژوهش‌هایی صورت گرفته است از جمله: پور کرمانی و همکاران (۱۳۸۲) در پژوهشی جابجایی و قطع شدگی آبراهه‌ها را از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی گسل تبریز دانسته‌اند. مددی و همکاران (۱۳۸۳) برای آگاهی از میزان فعالیت‌های نیروهای درونی و تکتونیکی در دامنه‌های شمال غربی تالش از شاخص‌های ژئومورفیک نظیر سینوزیته جبهه کوهستان، نسبت به کف دره به ارتفاع، شاخص گرادیان رودخانه استفاده کرده‌اند. نتایج حاکی از آن است که در شمال غربی ارتفاعات تالش از نظر تکتونیکی هنوز هم فعالیت وجود دارد، اما در بخش جنوب شرقی منطقه این نیروها دارای شدت بیشتری می‌باشند. مختاری (۱۳۸۵) با استفاده از داده‌های حاصل از تحلیل‌های توپوگرافی، بررسی

¹ Guarnieri and Pirrotta

² Zhou Lina et al

³ Topal et al

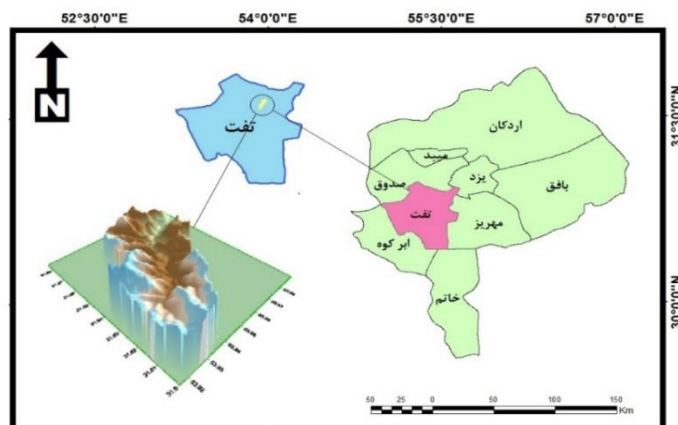
⁴ Nivière et al

سامانه‌های رودخانه‌ای منطقه و شواهد زمین ریخت شناسی حاصل از مشاهدات میدانی را نشان می‌دهد که دست کم در اواخر پلیستوسن و هولوسن، حرکت‌های اریب لغز با مولفه افقی راستگرد گسل بیشتر از حرکات بالاآمدگی و فعالیت گسل در میشو باختری بیشتر از میشو خاوری بوده است. در حال حاضر، دامنه شمالی میشو داغ در حال تطبیق تدریجی خود با شرایط زمین‌ساختی فعالی است که چشم انداز کلی آن را تحت تاثیر قرار داده است. گورابی و نوحه گر (۱۳۸۶) در مقاله شواهد ژئومورفولوژیکی تکتونیک فعال حوضه آبخیز درکه به این نتیجه رسیدند که این حوضه از مناطق فعال تکتونیکی می‌باشد. شفیع‌ی و همکاران (۱۳۸۸) در مقاله تکتونیک فعال در رشته کوه بینالود با تکیه بر بررسی‌های مورفوتکتونیکی به این نتیجه رسیدند که منطقه مورد مطالعه به طور کلی از نظر تکتونیکی فعال است، ولی با توجه به تقسیم‌بندی انجام شده، فعالیت نسبی در همه جا یکسان نیست. وجود آبراهه‌های گسلی و مخروط افکنه‌های جوان در رأس مخروط افکنه‌های قدیمی، گواه بالاآمدگی شدید در امتداد گسل‌های جوان مجاور دشت است، و این نظر را تحکیم و تقویت می‌کند که بینالود به به خاطر موقعیت خاص زمین‌ساختی که دارد از لحاظ تکتونیکی فعال و در حال بالا آمدن است. مقصودی و همکاران (۱۳۹۰) در مقاله بررسی تکتونیک فعال حوضه‌ی آبخیز کفرآور با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و شواهد ژئومورفولوژیکی به این نتیجه رسیدند که حوضه مورد نظر از نظر نئوتکتونیک فعال بوده و حوضه بر اساس طبقه‌بندی شاخص IAT در کلاس یک قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده فعالیت‌های نئوتکتونیکی شدید در حوضه می‌باشد. مقادیر کمی به دست آمده از شاخص‌های ژئومورفیک توسط شواهد ژئومورفولوژیکی منطقه تأیید می‌گردد. عزتی و آق آتابای (۱۳۹۳) در مقاله تحلیل زمین‌ساخت فعال حوضه‌ی بجنورد با کمک شاخص‌های مورفوتکتونیکی به این نتیجه رسیدند که بیشترین فعالیت تکتونیکی و پرخطرترین بخش منطقه‌ی مورد مطالعه قسمت شرقی حوضه‌ی بجنورد می‌باشد. مقصودی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی تاثیر نوزمین‌ساخت و تغییر اقلیم در تحول پهنه‌های ماسه‌ای شمال خاوری اهواز پرداختند و

دریافتند که تکامل پهنه‌های ماسه‌ای بخش خاوری اهواز به وسیله زمین ساخت و تغییر اقلیم می‌باشد.

محدوده و قلمرو پژوهش

حوضه آبریز صدرآباد یکی از حوضه‌های آبریز شیرکوه بوده که در دامنه‌های غربی آن با وسعتی بالغ بر ۳۲٫۲ کیلومتر مربع واقع شده است. این حوضه از نظر موقعیت جغرافیایی در زون ساختمانی ایران مرکزی در محدوده‌ی $31^{\circ} 53' 68''$ تا $31^{\circ} 59' 94''$ عرض شمالی و $53^{\circ} 57' 91''$ تا $53^{\circ} 51' 80''$ طول شرقی با ارتفاع متوسط ۱۶۰۰ متر واقع شده است. حداکثر ارتفاع آن ۳۱۰۰ متر و حداقل ارتفاع آن ۲۱۰۰ متر می‌باشد (شکل ۱).

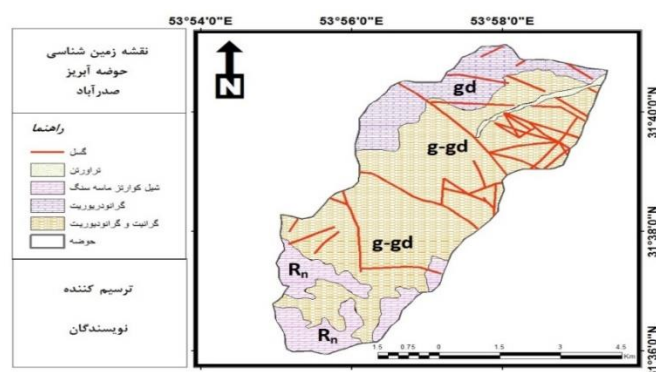


شکل شماره ۱- موقعیت حوضه صدر آباد

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از نظر ساختمانی در زون ایران مرکزی قرار گرفته است. حوضه آبریز صدرآباد در دامنه‌های غربی شیرکوه قرار داشته و از نظر زمین‌شناسی چه ساختمانی و چه سنگ‌شناسی از ویژگی‌های کوه بزرگ شیرکوه برخوردار است. شاخصه منطقه مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی وجود توده‌های نفوذی گرانیت و گرانودیوریت‌های دوران دوم است که سبب بالا آمدگی رسوب‌های ماسه سنگ‌ها و

شیل‌های تریاس و ژوراسیک شده است. احتمالاً همین توده‌های نفوذی شکستگی‌ها یا گسل‌هایی را در سطح پوسته زمین منطقه مورد مطالعه ایجاد کرده‌اند. این گسل‌ها اغلب عمود بر امتداد حوضه و رودخانه ایجاد شده و حوضه را به شکل عرضی بریده‌اند و به همین دلیل اثرات فعالیت آنها در امتداد نیمرخ طولی رودخانه بسیار چشمگیر است. این گسل‌ها تحت تاثیر فازهای کوهزایی سنوزوئیک و همینطور فشار پلیت عربستان به اوراسیا تحریک شده و فعالیت داشته‌اند. چشمه‌های تراورتن نیز در نتیجه فعالیت این گسل‌ها شکل گرفته و سبب شکل‌گیری حجم زیادی از رسوبات تراورتن در بخش‌های پایین دست حوضه شده است.



شکل شماره ۲- نقشه زمین‌شناسی و گسل‌های مربوط به حوضه صدرآباد

داده‌ها و روش

مواد مورد نیاز برای انجام پژوهش شامل نقشه‌های توپوگرافی (۱/۵۰۰۰۰)، زمین‌شناسی (۱/۱۰۰۰۰۰)، نقشه رقومی ارتفاعی زمین (با قدرت تفکیک ۲۰ متر) به منظور شناسایی منطقه مورد مطالعه، بررسی عوارض سطح زمین، ساختار زمین‌شناسی و لیتولوژی و سایر موارد می‌باشد. در همین راستا، ابتدا نقشه‌های توپوگرافی، DEM و نقشه زمین‌شناسی به عنوان داده پایه وارد نرم افزار Arc GIS ۱۰٫۳ شده و نقشه‌ها رقومی و داده‌های مورد نیاز استخراج شدند. سپس شش شاخص ژئومورفولوژیک یعنی

شاخص گرادیان طول رودخانه، عدم تقارن حوضه آبریز، تقارن توپوگرافی معکوس زهکشی، پیچ و خم رودخانه اصلی، انتگرال هیپسومتریک و شکل حوضه در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی و اندازه گیری قرار گرفتند و در ادامه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و همچنین نرم افزار Excel نقشه‌ها و نمودارهای مربوطه ترسیم گردید.

نتایج و بحث

همانطور که اشاره گردید برای بررسی وضعیت نئوتکتونیک در حوضه آبریز صدر آباداز شش شاخص ژئومورفیک استفاده شده است که به شرح زیر این شاخص‌ها و مقادیر آنها پس از محاسبه و اندازه گیری آورده شده‌اند:

شاخص گرادیان طولی رودخانه SL^۱

شاخص گرادیان طولی رود (SL) بر اساس رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$SL = (\Delta H / \Delta Lr) * Lsc$$

SL: شاخص گرادیان طولی رود

ΔH : اختلاف ارتفاع بین دو نقطه اندازه گیری شده

ΔLr : فاصله افقی بین دو نقطه اندازه گیری شده

Lsc: طول رودخانه از نقطه مرکزی مقطع اندازه‌گیری شده تا مرتفع ترین نقطه کانال شاخص SL با قدرت رود ارتباط دارد. نیروی قابل دسترس رود در یک محدوده مشخص کانال متغیر هیدرولوژیکی مهمی می‌باشد؛ زیرا توانایی یک رود در فرسایش کف بستر آن و همچنین حمل مواد حاصل از فرسایش به مقدار این شاخص ارتباط دارد. نیروی کل یا نیروی قابل دسترس رود متناسب با شیب سطح آب و دبی می‌باشد. شیب سطح آب معمولا ارتباط زیادی با شیب کانال دارد و همچنین ارتباط خوبی بین

¹ Stream Length – Gradient Index

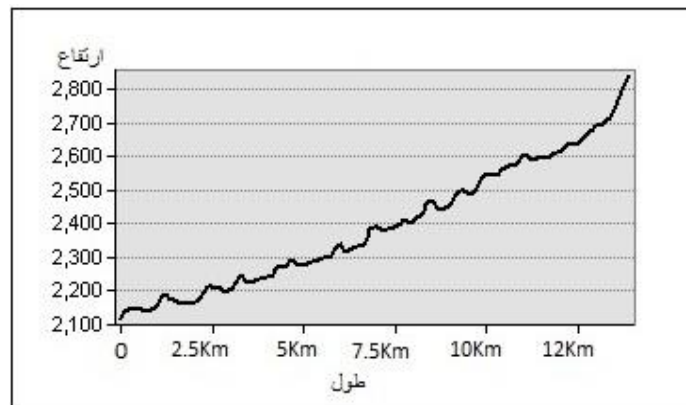
طول کل کانال به طرف بالا و دبی سرریز (دبی مورد نیاز برای پر شدن کامل کانال) که تصور می‌شود در شکل‌گیری و تداوم رودهای جاری مهم می‌باشد، وجود دارد. این شاخص در مناطقی که بستر رودخانه در سنگ‌های سخت قرار دارد افزایش می‌یابد. از این نظر، هر اندازه طول رودخانه بیشتر باشد، رودخانه مورد نظر کمتر تحت تاثیر ساختمان سنگ شناسی بستر خود است و هر چه طول رودخانه کمتر باشد بیشتر تحت تاثیر ساختمان سنگ شناسی بستر رودخانه است. همچنین، میزان SL در مناطق فعال تکتونیکی زیاد است. برای ارزیابی این شاخص در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی زمین، نیمرخ طولی رود تهیه و منحنی‌های ۱۰۰ متری از آن ترسیم گردید. سپس، در فواصل معین 100 متری میزان شاخص SL برای تمامی مسیر رودخانه از خروجی تا سرچشمه محاسبه گردید. بر حسب محاسبات انجام گرفته، مقادیر این شاخص در حوضه مورد نظر بین ۷۸٫۲ تا ۶۶۹٫۶ است. متوسط SL کل رودخانه حوضه صدر آباد در حدود ۶۶۹٫۶ به دست آمد (جدول ۱).

جدول ۱- محاسبه شاخص گرادیان طولی منطقه مورد مطالعه

ارتفاع به متر	نقطه میانی	ΔH (m)	ΔL (m)	L(m)	SL
۲۱۰۰-۲۲۰۰	۲۱۵۰	۱۰۰	۲۰۳۷/۴	۱۵۹۳/۷	۷۸/۲
۲۲۰۰-۲۳۰۰	۲۲۵۰	۱۰۰	۱۹۸۰/۸	۳۷۹۴	۱۹۱/۵
۲۳۰۰-۲۴۰۰	۲۳۵۰	۱۰۰	۱۹۲۵/۸	۵۷۰۷	۲۹۶/۳
۲۴۰۰-۲۵۰۰	۲۴۵۰	۱۰۰	۱۴۲۸	۷۷۵۶/۴	۵۴۳/۱
۲۵۰۰-۲۶۰۰	۲۵۵۰	۱۰۰	۱۲۵۶	۹۴۱۷/۴	۷۴۹/۷
۲۶۰۰-۲۷۰۰	۲۶۵۰	۱۰۰	۱۶۰۳	۱۰۷۳۴	۶۶۹/۶
۲۷۰۰-۲۸۰۰	۲۷۵۰	۱۰۰	۰	۱۱۷۰۰/۸	۰
۲۸۰۰-۲۹۰۰	۲۸۵۰	۱۰۰	۰	۰	۰
میانگین					

مقایسه میزان SL های بدست آمده و تغییرات شدید مقادیر آنها در مسیر رودخانه و همچنین مقدار بالای این شاخص، با توجه به اینکه رودخانه در طول مسیر خود در

نهشته‌های کواترنری جریان دارد، نشان دهنده بالاآمدگی و فعالیت‌های نسبتاً شدید نو زمین ساختی در منطقه است. نیمرخ طولی رودخانه صدر آباد با توجه به شکل شماره (۳) در طول مسیر، شیب یکسانی ندارد و شکست‌های زیادی در طول نیمرخ رودخانه بوجود آمده است. با این وجود، رودخانه طول زیادی نیز پیدا نکرده است. با توجه به نقشه زمین‌شناسی حوضه (شکل ۲) می‌توان دریافت که شاخص گرادیان طولی رود، ارتباط نزدیکی با شاخص تکتونیکی منطقه دارد و در مسیر اصلی رود گسل طویل و بزرگی بر روی نقشه قابل مشاهده است.



شکل شماره ۳- نیمرخ مربوط به طول رودخانه اصلی

شاخص پیچ و خم رودخانه اصلی (Smr)^۱

این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S=C/V$$

S: شاخص سینوزیته یا پیچ و خم رودخانه اصلی

C: طول مسیر رودخانه،

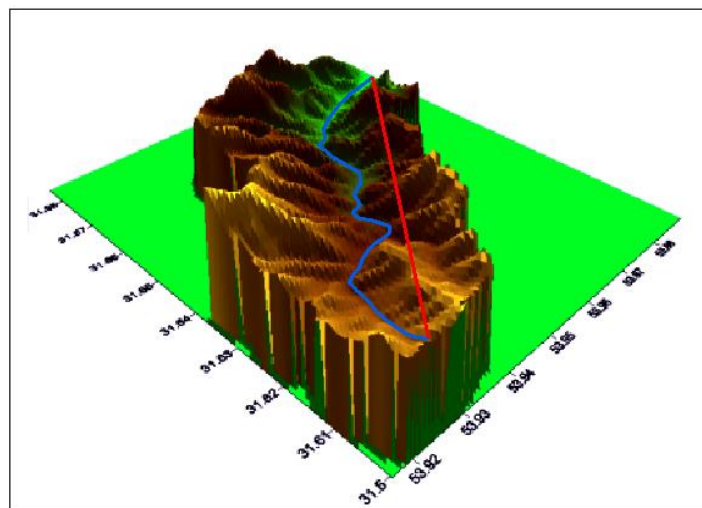
V: طول دره به خط مستقیم

^۱ Sinuosity of main river

هر چه مقدار شاخص Smr بیشتر باشد بیانگر فعال بودن تکتونیک در منطقه است. طرح‌های مئاندری در حال حفر بستر می‌توانند یکی از نشانه‌های تکتونیک فعال باشد، زیرا در اصل، رودخانه‌ای با طرح مئاندری نشان‌گر محلی است که رودخانه به سطح اساس خود نزدیک شده است. سپس بر اثر وقوع یک یا چند جابجایی قائم همان نقطه، بالا آمده و رودخانه در پاسخ به این تغییر ارتفاع و در نتیجه تغییر گرادیان، مجدداً شروع به حفر بستر می‌کند و در اینجا است که رودخانه‌ای با طرح مئاندری و دارای دیواره‌های جانبی مرتفع و در حال حفر بستر مشاهده می‌شود (سلیمانی، ۱۳۷۷). مقدار شاخص Smr (جدول شماره ۲) نشان می‌دهد که صدرآباد هنوز به حالت تعادل نرسیده و این حوضه دارای حرکت‌های نئوتکتونیک فعال است.

جدول ۲- مقادیر شاخص Smr در حوضه آبریز صدرآباد

نام حوضه	C	V	S
صدرآباد	۱۲۴۱۰	۱۰۴۵۰	۱/۱۸



شکل ۴- شاخص پیچ و خم رودخانه منطقه مورد مطالعه

۷. شاخص شکل حوضه زهکشی^۱

حوضه‌های فعال تکتونیکی، شکل کشیده‌ای دارند. شکل حوضه در طول زمان با توقف میزان بالا آمدگی، به تدریج دایره می‌شود (بوربانگ و آندرسون^۲، ۲۰۰۱). این شاخص از طریق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$BS = B_f / B_w$$

B_s : شاخص شکل حوضه

B_f : طول حوضه آبریز (از نقطه خروجی تا انتهایی‌ترین بخش حوضه)

B_w : عرض حوضه آبریز (طول پهن‌ترین بخش حوضه)

در نواحی فعال زمین ساختی مقدار زیاد این شاخص مربوط به حوضه‌های کشیده می‌باشد در حالی که حوضه‌های دایره‌ای شکل مقدار این شاخص کم بوده و از نظر زمین ساخت غیر فعال می‌باشد. زمانی که فعالیت زمین ساختی کم یا متوقف می‌شود پهن شدگی اتفاق می‌افتد و هنگامی که پیشانی کوهستانی سریع بالا می‌آیند حوضه‌های تند و کشیده را سبب می‌شوند (ده بزرگی و همکاران^۳، ۲۰۱۰، ترسا و هررا^۴، ۱۹۹۸). در حوضه آبریز صدر آباد مقدار این شاخص برابر با ۲٫۱ بوده که بیانگر نسبتاً فعال بودن حرکات نئوتکتونیک در آن است (جدول ۳ و شکل ۵).

جدول ۳- شاخص شکل حوضه آبریز صدرآباد

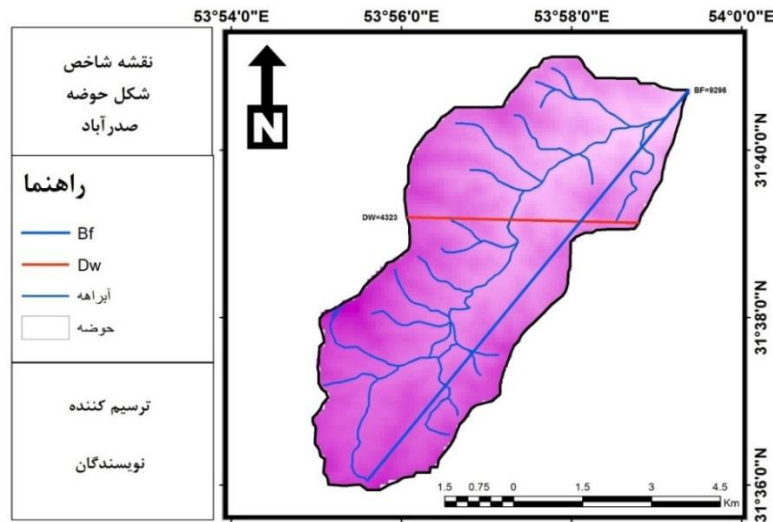
نام حوضه	$B_f(M)$	$B_w(M)$	B_s
صدرآباد	۹۲۹۶	۴۳۲۳	۲/۱

^۱ Index of Drainage Basin Shape

^۲ Burbank and Anderson

^۳ Dehbozorgi et al

^۴ Teresa and Herrera



شکل شماره ۵- شاخص شکل حوضه در منطقه صدرآباد

شاخص تقارن توپوگرافی معکوس (ITSF)^۱

دیگر شاخص کمی برای ارزیابی عدم تقارن حوضه، عامل تقارن توپوگرافی معکوس (T) است. شاخص تقارن توپوگرافی معکوس از رابطه زیر بدست می آید.

$$T = Da/Dd$$

T: عامل تقارن توپوگرافی

Da: فاصله بین خط میانی حوضه زهکشی تا رود اصلی حوضه

Dd: فاصله ی خط میانی حوضه تا مرز حوضه

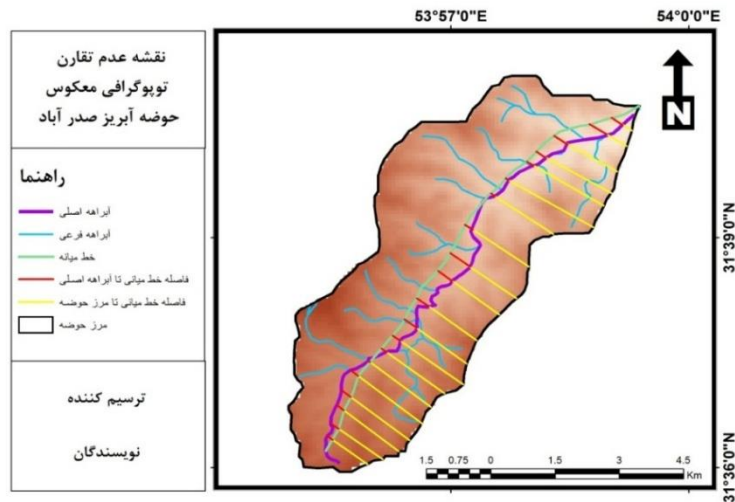
شاخص T برداری است جهت‌دار و مقدار آن بین ۰ و ۱ است. در صورتی‌که حوضه به طور کامل متقارن باشد، این شاخص صفر خواهد بود و هر چه این مقدار به یک نزدیک شود حاکی از عدم تقارن بیشتر حوضه است. این شاخص اغلب برای حوضه های زهکشی با الگوی دندرتیک مناسب است. برای محاسبه شاخص تقارن توپوگرافی معکوس ابتدا خط میای حوضه آبریز ترسیم گردید. در ادامه پارامترهای Da

¹ Inverse Topographic symmetry Factor

و Dd در ۲۰ مقطع تعیین و با استفاده از رابطه فوق محاسبه و نتایج آن در جدول (۴) آمده است:

جدول ۴- محاسبه شاخص T در مقاطع مختلف در حوضه آبریز صدرآباد

T	Dd	Da	تعداد نقاط مورد بررسی
۰/۵۵	۵۲۰/۱	۲۸۶/۱	۱
۲/۰۵	۲۰۴/۹	۴۱۹/۴	۲
۰/۲۲	۱۵۲۱/۸	۳۳۴/۳۸	۳
۰/۱۴	۱۷۹۹/۷	۲۴۶/۳	۴
۰/۳۷	۱۷۷۰/۷	۶۵۹/۵	۵
۰/۰۴	۲۱۰۷/۸	۷۷/۷	۶
۰/۰۶	۱۵۸۱/۴	۹۹/۸	۷
۰/۱۲	۱۶۲۴/۹	۱۹۳/۴	۸
۰/۳۰	۱۷۱۰/۷	۵۱۱/۱	۹
۰/۲۳	۱۶۱۰/۸	۳۶۸/۳	۱۰
۰/۲۰	۱۵۵۷/۸	۳۱۳/۱	۱۱
۰/۲۰	۱۶۳۸/۲	۳۲۴/۵	۱۲
۰/۱۱	۱۸۳۷/۴	۱۹۷/۲	۱۳
۰/۰۸	۱۶۶۱/۴	۱۳۲/۴	۱۴
۰/۰۳	۱۶۷۴/۴	۴۵/۸	۱۵
۰/۰۱	۱۹۲۷/۸	۱۹۵/۶	۱۶
۰/۱۴	۱۸۲۴/۵	۲۶۰/۲	۱۷
۰/۱۱	۱۶۶۰/۴	۱۸۹/۶	۱۸
۰/۱۵	۱۳۴۶/۱	۱۹۶/۴	۱۹
۰/۱۳	۱۰۵۴/۲	۱۳۹/۶	۲۰
۰/۲۷	۱۵۳۱/۷	۲۵۹/۴	میانگین



شکل ۶- نقشه عدم تقارن توپوگرافی معکوس

شاخص سینوزیته جبهه کوهستان (Smf)^۱

شاخص سینوسی جبهه کوهستان به صورت زیر بدست می آید:

$$Smf = Lmf/LS$$

Smf: شاخص سینوسی جبهه کوهستان

Lmf: طول جبهه کوهستان در مرز بین کوه و دشت

LS: طول جبهه کوهستان در امتداد یک خط مستقیم

در رابطه فوق Smf شاخص سینوسی جبهه کوهستان، Lmf طول جبهه کوهستان در امتداد کوهپایه و در محل شکست مشخص شیب (کنیک) و LS طول خط مستقیم جبهه کوهستان را نشان می دهند. شاخص سینوسی جبهه کوهستان شاخصی است که بیانگر تعادل بین نیروهای فرسایش دهنده که تمایل به بریدن و ایجاد شکل‌های خلیجی شکل و برش به داخل جبهه کوهستان را دارد از یک طرف و نیروهای تکتونیکی که تمایل به ایجاد یک جبهه کوهستانی مستقیم به طور همزمان با گسل خوردگی متوالی و

¹ Mountain Front Sinuosity

مرحله به مرحله را دارند، می‌باشد. این جبهه‌های کوهستانی با بالا آمدگی تکتونیک فعال که به طور نسبی مستقیم هستند، با مقادیر کم Smf همراه می‌باشند. اگر نرخ بالا آمدگی کاهش یافته یا متوقف شده باشد، در نتیجه فرایندهای فرسایش جبهه کوهستان را به طور قهقرایی حفر خواهند کرد و Smf افزایش پیدا خواهد کرد (گورابی، ۱۳۸۶).

در حوضه صدرآباد مقدار smf برای جبهه شرقی محاسبه گردید. همانطور که در جدول شماره (۳) مشاهده می‌شود smf برای جبهه کوهستان شرقی برابر با ۱٫۸ است.

جدول ۵- مقادیر smf برای حوضه آبریز صدر آباد

نام حوضه	Imf	Is	Smf
کوهستان شرقی	۱۱۱۸۴	۹۷۳۳	۱/۸

منحنی هیپسومتریک و شاخص انتگرال هیپسومتری (Hi)

منحنی‌های هیپسومتریک، توزیع سطوحی ارتفاعی یک منطقه از زمین، یک حوضه آبخیز تا تمام سطح سیاره زمین را می‌توانند ارزیابی و توصیف کنند. منحنی هیپسومتریک حوضه با ترسیم ارتفاع کل (ارتفاع نسبی) در مقابل مساحت کل (مساحت نسبی) حوضه ترسیم می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۰).

$$Hi = H_{mean} - H_{min} / H_{max} - H_{min}$$

کمینه ی ارتفاع _ بیشینه ی ارتفاع / کمینه ارتفاع _ میانگین ارتفاع = انتگرال هیپسومتریک

این شاخص برای حوضه صدرآباد برابر است با:

$$.5 = 2100 - 2100 / 3100 - 2100 = \text{هیپسومتریک انتگرال شاخص}$$

اصولاً شاخص انتگرال هیپسومتریک بالا بیانگر فعالیت تکتونیک و مرحله‌ی جوانی در یک منطقه بوده و مقادیر پایین بیانگر فعالیت فرسایشی و مرحله‌ی پیری و آرامش می‌باشد. با توجه به مقدار به دست آمده در حوضه صدر آباد (پنجاه درصد) می‌توان بیان داشت که حوضه از نظر تکتونیک در شرایط فعال و جوان (بالا آمدگی‌ها و

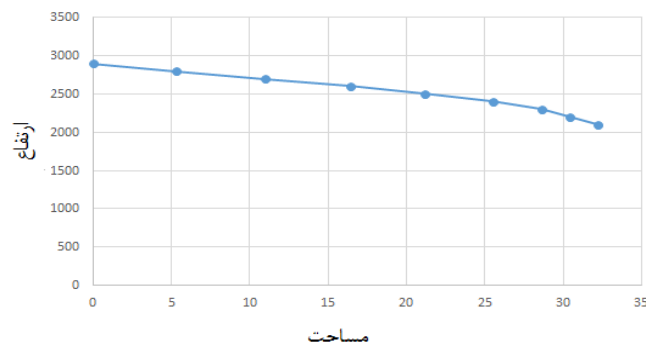
شکل‌گیری توپوگرافی جدید) می‌باشد. در این شاخص A مساحت کل حوضه برابر با جمع مساحت بین خطوط میزان موجود در حوضه می‌باشد و a مساحتی از حوضه که بالاتر از ارتفاع (h) قرار دارد. مقدار مساحت نسبی (a/A) بین ۱ در پایین‌ترین نقطه حوضه $(h/H=0)$ تا ۰ در بالاترین نقطه حوضه $(h/H=1)$ تغییر می‌کند (جدول ۶)

شکل منحنی‌های هیپسومتریک (H_c) مقدار مواد فرسایش یافته را به تصویر می‌کشند. تحدب منحنی هیپسومتریک مشخص‌کننده نواحی با فرسایش ضعیف (جوان) شکل منحنی S نواحی با فرسایش آرام (بلوغ) و منحنی تعقر مشخص‌کننده نواحی با فرسایش بالا و مرحله‌ی پیری می‌باشد (Pena, ۲۰۱۰: ۸۰). در تحلیل منحنی هیپسومتریک حوضه‌ی صدرآباد می‌توان اشاره کرد که بخش بالایی حوضه محدب بوده و در بخش پایینی آن مقعر است.

جدول ۶- محاسبه منحنی هیپسومتریک

$a/A^*(\%)$	$h/H^*(\%)$	$H(M)$	$A(KM)^2$
۰	۰	۰	۳۲/۲
۹۴/۴	۷۲/۴	۲۲۰۰-۲۱۰۰	۳۰/۴
۸۸/۸	۷۵/۸	۲۳۰۰-۲۲۰۰	۲۸/۶
۷۹/۱	۷۹/۳	۲۴۰۰-۲۳۰۰	۲۵/۵
۶۵/۵	۸۲/۷	۲۵۰۰-۲۴۰۰	۲۱/۱
۵۰/۹	۸۶/۲	۲۶۰۰-۲۵۰۰	۱۴/۴
۳۴/۱	۸۹/۶	۲۷۰۰-۲۶۰۰	۱۱
۱۶/۴	۹۳/۱	۲۸۰۰-۲۷۰۰	۵/۳
۰	۱	۲۹۰۰	۰

$$*A = 32/2 \text{ KM}^2, H^* = 2900 \text{ M}$$



شکل شماره ۷- منحنی هیپسومتریک حوضه صدرآباد

شاخص عدم تقارن حوضه آبریز (Af)

شکل هندسی شبکه رودها را می‌توان از نظر کیفی و کمی با روش‌های متعددی توصیف کرد. در مناطقی که شبکه زهکشی در حضور تغییر شکل‌های تکتونیکی توسعه پیدا می‌کند، شبکه زهکشی اغلب دارای شکل هندسی و الگوی متمایزی می‌باشد. عامل عدم تقارن، برای توصیف و درک ارتباط کج شدگی تکتونیکی در نواحی‌ای با مقیاس حوضه زهکشی و بزرگ تر ارتباط داده شده است.

$$Af = (Ar/At) * 100$$

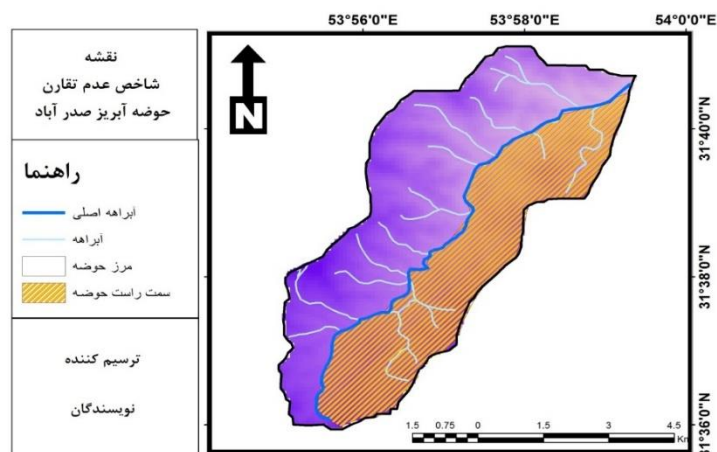
Af: شاخص عدم تقارن حوضه

Ar: مساحت سمت راست حوضه در سمت راست آبراهه‌ی اصلی (جهت پایین رود)

At: مساحت کل حوضه‌ی زهکشی

$$Af = 13,24/32,27 * 100 \longrightarrow 41$$

مقادیر بالاتر و پایین تر از عدد حدود ۵۰ نشان دهنده عدم تقارن حوضه و کج شدگی آنها به سمت غرب یا شرق می‌باشد. البته باید در نظر داشت که در این روش فرض بر این است که عوامل سنگ شناسی و اقلیمی موجب عدم تقارن حوضه‌ی زهکشی نشده‌اند. مقدار شاخص Af در حوضه‌ی مورد مطالعه ۴۱ است که از نظر تکتونیکی در رده‌ی بسیار ناپایدار و فعال قرار می‌گیرد (شکل ۸).



شکل شماره ۸- شاخص عدم تقارن در منطقه صدرآباد

نتیجه‌گیری

منطقه مورد مطالعه از نظر تکتونیکی منطقه کاملاً تکتونیزه با گسل خوردگی و شکستگی‌های متعدد است. این گسل‌ها اغلب عمود بر امتداد حوضه و رودخانه ایجاد شده و حوضه را به شکل عرضی بریده‌اند. به همین دلیل اثر فعالیت آنها در امتداد نیمرخ طولی رودخانه بسیار چشمگیر است. این گسل‌ها احتمالاً تحت تاثیر فازهای کوهزایی مختلف و بویژه سنوزوئیک تحریک شده و فعالیت داشته‌اند. چشمه‌های تراورتن نیز در نتیجه فعالیت این گسل‌ها شکل گرفته و سبب شکل‌گیری حجم زیادی از رسوبات تراورتن در بخش‌های پایین دست حوضه شده است. بر این اساس، حوضه آبریز صدرآباد بر مبنای شاخص‌های ژئومورفیک به منظور بررسی فعالیت گسل‌ها در پلیو-پلئستوسن مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه از هفت شاخص ژئومورفیک شامل شاخص‌های گرادیان طولی رودخانه، عدم تقارن حوضه آبریز، سینوزیته جبهه کوهستان، تقارن توپوگرافی معکوس حوضه زهکشی، پیچ و خم رودخانه اصلی، انتگرال هیپسومتریک و شکل حوضه استفاده شد. همه این شاخص‌ها به نوعی حاکی از فعالیت‌های تکتونیکی و فعالیت گسل‌ها در دوران کوتاه‌تر دارند. با این وجود، سه تا از

این شاخص‌ها به ترتیب اهمیت شامل گرادیان طولی رودخانه، سینوزیته جبهه کوهستان و انتگرال هیپسومتریک بیش از شاخص‌های دیگر بیانگر فعالیت‌های تکتونیکی و تغییرات سطح زمین در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. نیمرخ طولی رودخانه به تنهایی می‌تواند تغییرات ارتفاعی را در امتداد رودخانه تحت تاثیر بریدگی‌های گسلی نشان دهد. همانطور که از شکل نیمرخ طولی رودخانه پیداست رودخانه در امتداد طولی به شدت بریده شده و اغلب این بریدگی‌ها با گسل‌های موجود در نقشه زمین‌شناسی انطباق دارند. بعلاوه، سنگ‌های رسوبی به شکل پرتگاه‌های نسبتاً بلند بر گرانیته‌ها و گرانودیوریت‌های زیرین قرار گرفته و ارتفاعات خشنی را بوجود آورده است که این امر نیز به دلیل فعالیت مکرر گسل‌ها و تجدید جوانی دامنه‌ها بوده است. همچنین، منحنی هیپسومتریک ترسیم شده از منطقه به شکل محدب بوده و بر مبنای آن بیشتر کوه‌های منطقه بالای ارتفاعات ۲۰۰۰ متری قرار گرفته‌اند و فرسایش هنوز آنها را به شکل جدی تحت تاثیر قرار نداده است. تغییرات در نیمرخ طولی رودخانه اصلی و شکستگی در امتداد آن، وجود تراس‌های آبرفتی و سنگی در بخش‌هایی از دامنه‌ها، بریدگی رسوبات نئوژن و پیدایش آثار رسوبی و سنگی جابجایی گسل‌ها در سطح زمین و به شکل عینی حاکی از عملکرد و فعالیت گسل‌ها در دوران جدید دارد. نتایج این تحقیق با نتایج بسیاری از پژوهش‌های دیگر از جمله سینگ و تاندون (۲۰۰۸)، نیوار و همکاران (۲۰۰۶)، شفیع‌ی و همکاران (۱۳۸۸)، شریفی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد.

منابع

پورکرمانی، محسن، حمید، صدیق (۱۳۸۲)، پدیده‌های ژئومورفولوژیکی حاصل از گسل تبریز، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۲، صص ۳۷-۴۴

شفیعی، الهه، علوی، سیداحمد، نادری‌مقان، نصیر (۱۳۸۸)، تکتونیک فعال در رشته کوه بینالود با تکیه بر بررسی‌های مورفوتکتونیکی، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۰، صص ۹۱-۷۹

شریفی، محمد، زارع، فاطمه، طاهری‌نژاد، کاظم (۱۳۹۶) ارزیابی فعالیت‌های نئوتکتونیک با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک (نمونه موردی: حوضه آبریز کذاب-یزد) مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۶، شماره ۱۱، صص. ۱۵-۳۲

گورابی، ابوالقاسم، نوحه‌گر، احمد (۱۳۸۶)، شواهد ژئومورفولوژیکی تکتونیک فعال حوضه آبخیز درکه، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۰، صص ۱۹۶-۱۷۷

علیزاده، امین (۱۳۸۰)، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات آستان قدس عزتی، مریم، آق‌آتابای، مریم (۱۳۹۳)، تحلیل زمین ساخت فعال حوضه‌ی بجنورد با کمک شاخص‌های مورفوتکتونیکی، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دوم، شماره ۴، صص ۱۴۴-۱۳۰

مددی، عقیل، رضایی مقدم، محمد حسین، رجایی، عبدالحمید (۱۳۸۳)، تحلیل فعالیت‌های نئوتکتونیکی با استفاده از روش‌های ژئومورفولوژی در دامنه‌های شمال غربی (باغروداغ)، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۴۸

مختاری، داود (۱۳۸۵)، کاربرد شاخص‌های ریخت‌سنجی در تعیین میزان فعالیت گسل‌ها، نمونه موردی: گسل شمالی میشو، مجله علوم زمین شماره ۵۹، صص ۸۰-

۷۳

مقصودی، مهران، جعفری اقدم، مریم، سیدشکری، سجاد، مینایی، مسعود (۱۳۹۰)، بررسی تکتونیک فعال حوضه‌ی آبخیز کفرآور با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و شواهد ژئومورفولوژیکی، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۲۵، صص ۱۳۶-۱۱۱

مقصودی، مهران، احمدی، امیر، شایان، سیاوش (۱۳۹۵)، تاثیر نو زمین ساخت و تغییر اقلیم در تحول پهنه‌های ماسه‌ای شمال خاوری اهواز، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم، شماره ۱، صص ۱۸۰-۱۶۰

- Bull W., and McFadden L (1977). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault, California, *Geomorphology in Arid regions*, D. O. Doehring, ed., Publications in Geomorphology, State University of New York at Binghamton, 115-138.
- Burbank, D.W., Anderson, R.S., (2001), "Tectonic Geomorphology", Blackwell Science, London 274 p
- Chich, C.shanchen, W. Wu, L. Lin. C. (2006): Active Deformation Front Delineated by Drainage Pattern Analysis and Vertical Movement Rates, South Western Coastal Plain Taiwan, *Journal of Asian Earth Sciences* .
- Dehbozorgi, M., Pourkermani, M., Arian, M., Matkan, A.A., Motamedi H., Hosseinias, H., (2010), "Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran, GEOMOR-03284; No of Pages 13,0169-555
- Duglas W.burbank, Robert Anderson, S., (2001). *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science, Ltd.
- 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 .
- Keller, E. A (1977). Fluvial systems: selected observations. In *Riparian Forests in California: Their Ecology and Conservation*, Anne Sands (ed.), University of California, Davis, Institute of Ecology, Publication No. 15, Chapter 5.
- Karakhanian, A., (2004), " Tectonophysics, 380:189-219.
- Malik, J.Mahanty, C. (2006) Active tectonic influence on the evolution of drainage and Landscape: Geomorphic signatures From Frontal and hinterland areas along the Northwestern Himalaya, India. *Journal of Asian Earth Sciences* .
- Masaki Kanao, Vladimir D. Suvorov, Shigeru Toda, Seiji Tsuboi (2015), Seismicity, structure and tectonics in the Arctic region, *Geoscience Frontiers*, pp665-677
- Nivière, Pierre Lacan, Vincent Regard, Magali Delmas, Marc Calvet, Damien Huyghe, Bernard Roddaz (2016), Evolution of the Late Pleistocene Aspe River (Western Pyrenees, France). Signature of climatic events and active tectonics 2016, Bertrand. • *Comptes Rendus Geoscience*, Issues 3–4, 2016, PP 203-212
- Ramirez- Herrera, M.T., (1998). Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay graben, Mexican Volcanic belt. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 317-322.
- Singh, v and Tandon, S. K (2008). The Pinjaur dun (intermontane longitudinal valley) and associated active mountain fronts. *NW Himalaya: tectonic geomorphology and morphotectonic evolution, India, geomorphology*, 106.

- Teresa, M., Herrera, R., (1998), "Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt", *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 317-332
- Topal, S., Keller, K., Bufer, A., Koçyiğit, A., (2016), Tectonic geomorphology of a large normal fault: Akşehir fault, SW Turkey Original Research Article *Geomorphology*, Volume 259, 15 April 2016, Pages 55-69
- Wells, S. G., Bullard, T. F., Menges, C. M., Drake, P. G., Karas, P. A., Kelson, K. I., Ritter, J. B. and Wesling, J. R., (1988), Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary, Pacific coast of Costa Rica. *Geomorphology*, 1, 239-265
- Walker, R.; Jackson, J. (2002). Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike-slip system. *Journal of Structural Geology*, 24: 1677-1698.
- 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: 654-668
- Zuchiewicz, W.A and McCaplin, J.P., (2000), Geometry of faceted spurs on an active normal fault: case study of the Central Wasatch Fault, Utah, U.S.A. *Annals Societatis Geologorum Poloniae*, 70, 231-249.
- Zhou Lina, B., Heitaro Kanedac, B., Sakae Mukoyamad., N. A., Tatsuro, C., (2013), "Detection of Subtle tectonic-Geomorphic Features in Densely Forested Mountains by very High-Resolution Airborne LiDAR Survey", *Geomorphology*, 182: 170-293.