

تاثیر نوزمین ساخت در مورفولوژی شبکه زهکشی حوضه آبخیزنچی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و مورفومتریک

چکیده

شاخص‌های ژئومورفیکی از ابزارهای مفید در ارزیابی و شناسایی آثار فعالیت‌های زمین‌ساختی نسبتاً سریع و یا حتی کند به‌شمار می‌آیند. از آنجا که مورفولوژی و رفتار شبکه‌های زهکشی به تغییرات حاصل از فعالیت‌های زمین‌ساختی بسیار حساس است؛ به نظر می‌رسد وجود شواهدی مانند عبور از خط گسلی و تغییرات عرض بستر رودخانه متأثر از حرکات نئوتکتونیک فعال در حوضه نچی (قرلچه‌سو) باشد. از این‌رو، برای شناخت نحوه عملکرد و میزان اثرگذاری فعالیت‌های نوزمین‌ساختی در مورفولوژی و رفتار این رودخانه با اتکا به یافته‌های میدانی از شاخص‌های مورفومتریک مانند SL, Hi, S, Vf, Br, AF, P و Smf به‌عنوان تکنیک‌های مدلی و مفهومی استفاده شده است. عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی سایر ابزارهای فیزیکی این تحقیق را تشکیل داده‌اند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها در قالب شاخص‌های ژئومورفیکی و با استفاده از ابزارهای مذکور نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه به‌شدت از فعالیت‌های نئوتکتونیک تاثیر پذیرفته است؛ با این تفاوت که میزان تاثیرگذاری این حرکات در تمامی زیر حوضه‌ها یکسان نبوده؛ به طوری که در قسمت‌های شمالی (زیر حوضه انجیران) تاثیر این فعالیت‌ها بیشتر است. بدیهی است، ارزیابی واکنش رودخانه به‌منظور دستیابی به روشی برای تعیین میزان پایداری آبراهه می‌تواند اطلاعات پایه را برای مطالعات آمایش سرزمین فراهم کند.

واژه‌های کلیدی: شبکه زهکشی، نئوتکتونیک، شاخص‌های ژئومورفیک، مورفوتکتونیک، حوضه نچی

مقدمه

شبکه‌های زهکشی به اشکال مختلف نسبت به وقوع تغییرات در بستر جریان عکس‌العمل نشان می‌دهند. تشکیل پادگانه‌های رودخانه‌ای، تغییر نیمرخ طولی و مقطع عرضی، برش‌بستر و همچنین جابه‌جایی‌های جانبی در مسیر جریان رودخانه‌ها، از جمله این واکنش‌ها محسوب می‌شوند که عمدتاً ناشی از تکتونیک بوده، با استفاده از شاخص‌هایی مانند گرادیان طولی رودخانه^۱، عدم تقارن حوضه زهکشی^۲، پیچ و خم پیشانی کوهستان^۳، انتگرال هیسومتریک^۴، انشعاب-

1- Stream Length-gradient index (SL)

پذیری^۵، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره^۶، ضریب سینوسیته^۷ و تراکم شبکه زهکشی^۸ می‌توان اطلاعات بسیار مهمی را درباره فعالیت‌های نئوتکتونیک به دست آورد. از این نظر، در بررسی‌های تکتونیک منطقه‌ای، به کارگیری و توجه به نتایج حاصل از به کارگیری آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج حاصل از شاخص‌های ژئومورفیک به خصوص در مواردی که تحلیل‌ها بر روی مسیر جریان رودخانه‌ها متمرکز شده است، ابزار مهمی برای ارزیابی درجه فعالیت‌های تکتونیک و تشخیص مناطق با دگرشکلی تکتونیک به شمار می‌روند. اندازه‌گیری‌های کمی امکان مقایسه و ارزیابی لندفرم‌ها را تسهیل نموده و با محاسبه الگوها و شاخص‌های ژئومورفیک، می‌توان میزان فعالیت تکتونیک یک منطقه را ارزیابی و به تشخیص توصیفی از محدوده اقدام نمود.

برای تشخیص فعالیت‌های نئوتکتونیک در حوضه‌های آبخیز با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و مورفومتریک تحقیقاتی انجام شده، در این میان کرزيسکويچ و همکاران^۹ (۲۰۰۰) تشکیل پادگانه‌های یخچالی رود نیسا کودزکای^{۱۰} لهستان و لاترویس و آلسورانس^{۱۱} رسوب‌گذاری در قسمت‌های جنوب غربی رودخانه آمازون را ناشی از فعالیت‌های نئوتکتونیک ارزیابی نمودند. روس‌جی و همکاران^{۱۲} (۲۰۰۲) با سن‌سنجی رسوبات، تکامل رودخانه نورفولک^{۱۳} انگلستان را در دوره اخیر زمین‌شناسی و در ارتباط با فعالیت‌های نئوتکتونیک بررسی نمودند. فورتنس و همکاران^{۱۴} (۲۰۰۵) تکامل آبراهه‌های فرعی بالادست رودخانه پرانا^{۱۵} در برزیل را ناشی از تکتونیک فعال دانستند. پتروسکی و تیمار^{۱۶} (۲۰۰۹) با تجزیه و تحلیل شاخص S، نقش گسلش را در تکامل و شکل‌گیری کانال رودخانه کوروس^{۱۷} واقع در مرز رومانی و مجارستان مؤثر دانستند. همچنین، لاترویس^{۱۸}، شارما و راجامانی^{۱۹} (۲۰۰۰)، اسکورل و ولدکمپ^{۲۰} (۲۰۰۳)، سریواسترا و میسر^{۲۱} (۲۰۰۸) پژوهش‌های ارزشمندی در این رابطه به انجام رسانیدند. از میان دیگر محققان، کرمی و رجایی‌اصل (۱۳۸۳)، مختاری (۱۳۸۴)، گورابی و نوحه‌گر (۱۳۸۶)، وحدتی (۱۳۸۶)، مفاخریان (۱۳۸۶)، مقصودی و کامرانی (۱۳۸۷)، یمانی، مقیمی و تقیان (۱۳۸۷) با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک به بررسی اثر فعالیت‌های تکتونیک بر مورفولوژی سامانه رودخانه‌ای پرداختند و این شاخص‌ها را ابزاری مفید در این زمینه ارزیابی نمودند. در این پژوهش به منظور بررسی فعالیت‌های تکتونیک در حوضه نچی و تاثیر آن بر ویژگی‌های شبکه زهکشی، سعی

2- Drainage Basin Asymmetry (Asymmetric Factor)

3- Mountain front sinuosity (Smf)

4- Hypsometric Integral (Hi)

5- Bifurcation ratio (Br)

6- Ratio of valley floor width to valley height (Vf)

7- Sinuosity (S)

8- Drainage Density (P)

9- Krzyszkowski, D. et. al

10- Nysa Kodzka River

11- Latrubesse, E., Alceu Rancy. A

12- Rose, J. et. al

13- Norfolk

14- Fortes, E. et. al

15- Parana

16- Petrovski, J., Timár, G

17- Koros

18- Latrubesse, E.

19- Sharma, A., Rajamani, V.

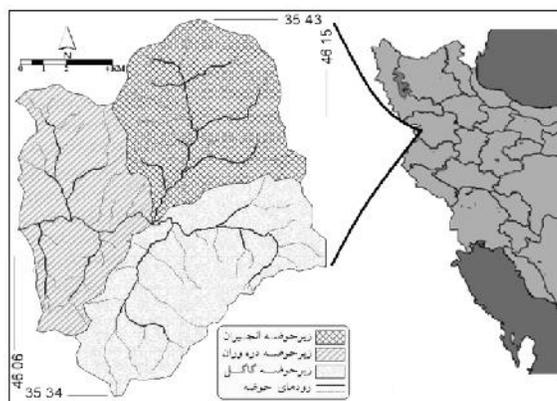
20- Schoorl, J. M., Veldkamp, A.

21- Srivastava, P., Misra D. K.

شده است که از مهم‌ترین شاخص‌های ژئومورفیک استفاده شود و نتایج حاصل از آنها در سطح حوضه مورد مقایسه قرار گیرد. رابطه الگوی زهکشی محدوده با فعالیت‌های نئوتکتونیک کواترنر، موضوع اصلی این تحقیق است و تغییرات مورفولوژی رودخانه قزلچه سو و ارتباط آن با عملکرد فعالیت‌های نئوتکتونیک بررسی شده است.

حوضه مورد مطالعه

حوضه نچی در ۱۱ کیلومتری شمال شهرستان مریوان واقع شده و به سه واحد هیدرولوژیک انجیران، گاگل و دره-وران تقسیم شده است (شکل ۱ و جدول ۱). متوسط ارتفاع حوضه ۱۶۷۰ متر، پایین‌ترین نقطه ارتفاعی آن ۱۳۲۰ متر در خروجی حوضه و بالاترین نقطه ارتفاعی در شمال شرقی حوضه با ۲۵۰۲ متر ارتفاع از سطح دریاست. شیب متوسط حوضه ۳۱/۱۸ درصد و جهت شیب عمومی روبه غرب است و ۱۴۴ کیلومتر مربع مساحت دارد. از نظر اقلیمی در منطقه سرد و مرطوب واقع شده و ۱۰۰ روز سال دارای یخبندان است. میانگین بارش آن ۹۹۷ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۳/۸ درجه سانتیگراد است. شکل حوضه از نوع درختی و رودخانه اصلی آن با شیب متوسط ۴ درصد، ۱۶/۸ کیلومتر طول دارد.



شکل ۱) حوضه آبخیز مورد مطالعه در استان کردستان

جدول ۱) ویژگی‌های حوضه مورد مطالعه

زیرحوضه	انجیران	گاگل	دره وران	کل حوضه
مساحت به کیلومتر مربع	۴۷,۱۷	۴۲,۹۷	۵۴,۰۸	۱۴۴,۲۲
محیط به کیلومتر	۳۰,۹۰	۳۵,۳۰	۳۲,۵۴	۵۵,۱۹

داده‌ها و روش پژوهش

در این پژوهش برای سهولت و امکان انجام محاسبات و مقایسه نتایج حاصل از به‌کارگیری شاخص‌های مورفوتکتونیک، حوضه نچی به سه زیرحوضه تقسیم شده است (شکل ۱). سپس با استفاده از این شاخص‌ها، اثر فعالیت‌های تکتونیک بر دره‌ها و مسیر رودخانه‌ها بررسی شده است. برای نیل به این هدف در مرحله نخست، مهم‌ترین

شاخص‌های ژئومورفیک مانند Smf, P, AF, Br, Vf, S, Hi, SL برای تشخیص تکنیک فعال منطقه، از روی نقشه-های توپوگرافی و عکس‌های هوایی منطقه اندازه‌گیری شده و برای برقراری ارتباط میان حرکات زمین‌ساختی و شبکه-زهکشی، داده‌های زمین‌شناسی و ژئومورفیک لازم از طریق تفسیر نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و به ویژه بازدیدهای میدانی مکرر به‌دست آمد. در مرحله بعدی این تحقیق، شواهدی از اثرهای نوزمین‌ساخت در شبکه زهکشی منطقه آورده و به روش تحلیلی-مقایسه‌ای و با استفاده از تکنیک‌های ژئومورفولوژی به تجزیه و تحلیل نتوکتونیک در حوضه نچی پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا لایه‌های اطلاعاتی نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ به سیستم اطلاعاتی GIS در محیط ArcGIS(9.3) انتقال داده شده و با استفاده از آن لایه‌هایی مانند شبکه‌زهکشی، شیب، مدل رقمی ارتفاع^{۲۲} و TIN استخراج گردید و با استفاده از نقشه زمین‌شناسی منطقه، لایه‌های خطی گسل‌ها و سازندهای تشکیل‌دهنده بستر رودخانه مورد مطالعه استخراج و به لایه‌های فوق اضافه گردید. سپس نتایج حاصله تجزیه و تحلیل شده‌اند. در ادامه، با توجه به مقادیر شاخص‌های تکنیکی به‌دست آمده، مورفولوژی رودخانه در محدوده مورد مطالعه از نظر میزان فعالیت تکنونیک نسبی ارزیابی و تجزیه و تحلیل شده‌است.

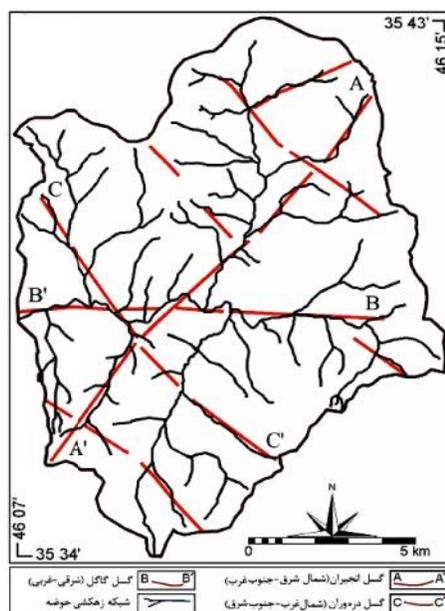
یافته‌های پژوهش

لرزه- زمین‌ساخت و تحول ساختمانی حوضه

حوضه نچی جزء کوچکی از قلمرو شمالی زون دگرگونی سندرچ- سیرجان است. با مطالعه ناهمواری‌های موجود از طریق عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی می‌توان آثار حرکات زمین‌ساختی را شناسایی نمود. شواهد زمینی نشان می‌دهند که محور ساختمانی تغییر شکل‌ها در امتداد شمال‌غربی- جنوب‌شرقی؛ یعنی موازی با جهت ناهمواری‌های زاگرس شکل گرفته‌اند، اما گسل‌های فرعی غالباً روند شرقی- غربی دارند. علاوه بر دگرگونی سازندهای قدیمتر، تغییر شکل‌های محلی بر اثر ایجاد گسل‌های متعدد هم قابل ذکر است. روندهای ساختاری حوضه تابع روندهای حاکم بر زون ساختاری سندرچ- سیرجان، شمال‌غرب- جنوب‌شرقی است و گسل‌هایی که عمود بر امتداد مذکور هستند نیز تابع نیروهای حاکم بر سیستم و روند اصلی هستند. عناصر ساختاری شامل چین، گسل، درزه و ساختمان‌های حاصل از فعالیت‌های ماگمایی، در بخش‌های مختلف موجب تنوع مورفولوژی در منطقه شده‌اند. این عناصر ساختاری عوامل کنترل‌کننده شکل ظاهری زمین بوده و همچنین، فرایندهای فرسایشی و ژئومورفیکی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند؛ به-طوری که عوامل طبیعی فرساینده نظیر شبکه زهکشی اغلب در مسیرهای خاصی که توسط این عناصر به‌وجود آمده‌اند، روان هستند. بزرگترین گسلی که از نزدیکی حوضه نچی می‌گذرد، گسل زاگرس است. فروافتادگی دریاچه زریوار در جنوب غربی حوضه که کشیدگی آن به موازات روند زاگرس است، از نتایج عملکرد این گسل است. این فروافتادگی بر حوضه نچی تأثیر گذاشته است. مشاهدات زمین‌شناسی حرکات راست‌گرد گسل زاگرس را تایید می‌کند و احتمالاً این حرکات باعث انحنای لایه‌های شیلی و آهکی حاشیه آبراهه‌ها و رودخانه‌های داخل حوضه شده است. مطابق (شکل ۲) در حوضه نچی سه گسل اصلی وجود دارد که در آن دو سیستم گسلی تقریباً عمود بر هم دیده می‌شود که بر

مسیر آبراهه‌های اصلی منطبق است. اولین گسل مهم و بزرگ حوضه از نظر طول گسل انجیران با امتداد شمال شرق - جنوب غرب و طول ۱۴ کیلومتر است. حرکت این گسل نرمال و راست گرد است و از دره شمال روستای انجیران شروع و به روستای محمده واقع در جنوب حوضه ختم می‌شود. این گسل در خارج از حوضه به طرف جنوب ادامه داشته، به زیر دریاچه زیوار می‌رسد. احتمالاً راست گرد بودن این گسل به علت ارتباط مستقیم آن با گسل زاگرس است. دومین گسل مهم حوضه از نظر طول، گسل گاگل با امتداد شرقی - غربی و طول ۱۱ کیلومتر است. حرکت آن نرمال، ولی چپ گرد است. این گسل از دره شرق گاگل شروع و به خروجی حوضه ختم می‌شود و احتمالاً در زیر دشت قزلچه سو ادامه دارد. گسل گاگل از گسل انجیران جواتر است، زیرا آن را قطع و جابه‌جا نموده، همچنین انحناهای لایه‌های کنار آبراهه آن مؤید این قضیه است. سومین گسل حوضه، گسل دره‌وران با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی و طول ۶ کیلومتر است. تمامی چین‌های مجاور آبراهه‌های منطبق بر این گسل‌ها، دارای انحنا مشخصی هستند که حرکت آنها را تایید می‌کند؛ به طوری که در برخی از نقاط (شرق و مرکز حوضه)، آبراهه‌ها در مسیر گسل‌ها قرار گرفته‌اند (شکل ۲).

از نظر لرزه‌خیزی حوضه نچی جزو کمربند غربی و جنوب غربی ایران (زاگرس) است که دارای فرکانس بالایی بوده و حدود ۵۱ درصد از زمین لرزه‌های یکصد سال اخیر ایران را در برداشته است (آرین و هاشمی، ۱۳۸۷: ۶۵). ثبت زلزله‌های تاریخی در این منطقه از وقوع زلزله‌های فراوان حکایت دارد که بیشتر این زلزله‌ها دارای کانون سطحی و در عمق صفر تا ۵۰ کیلومتری رخ داده‌اند. با توجه به توزیع آماری زمین لرزه‌های ثبت شده تا شعاع ۳۵ کیلومتری مرکز حوضه، مقدار شتاب ثقل افقی زمین در این گستره برای زمین لرزه‌های به بزرگی ۶/۵ تا ۶ ریشتر برای یک دوره ۵۰ ساله محاسبه شده و شتاب افقی برابر با ۰/۴۱ و شتاب قائم برابر با ۰/۲۶۵ با احتمال $R = 50\%$ برآورد شده است (علمی زاده، ۱۳۸۵: ۱۷).



شکل ۲) نقشه ارتباط گسل‌ها با شبکه زهکشی در محدوده مورد مطالعه

شاخص های ژئومورفولوژیک

شاخص گرادیان طولی رودخانه^۳ (SL):

این شاخص که نشان دهنده تغییر ارتفاع و معرف طول کانال است، برای مسیر مشخص شبکه زهکشی بر اساس رابطه زیر محاسبه و مشخص می شود:

$$SL = (H / L) \cdot L \quad (1)$$

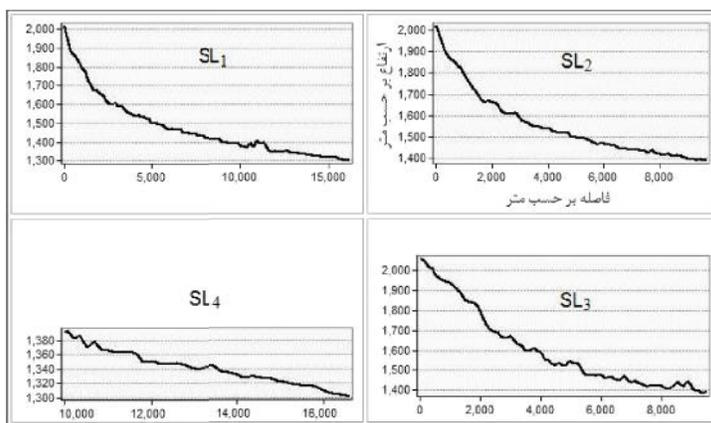
که در آن، SL شاخص گرادیان طولی رود؛ H اختلاف ارتفاع بین دو نقطه اندازه گیری شده و L فاصله افقی بین دو نقطه اندازه گیری شده؛ و L طول رودخانه از نقطه اندازه گیری شده تا مرتفع ترین نقطه کانال است. بالا بودن مقدار این شاخص، نشان دهنده مناطق با فعالیت تکتونیکی بالا و قدرت فرسایشی شدید آبراهها و مقدار پایین آن مناطق با فعالیت کم را نشان می دهد. این شاخص با قدرت رود ارتباط دارد و به تغییرات شیب رودخانه نیز بسیار حساس است. این حساسیت، شرایط لازم برای ارزیابی مقدار ارتباط فعالیت تکتونیکی با مقاومت سنگ و توپوگرافی را فراهم می کند. نیروی قابل دسترس رود در یک محدوده مشخص کانال، متغیر هیدرولوژیکی مهمی است؛ زیرا به توانایی یک رود در فرسایش کف بستر آن و همچنین، حمل مواد حاصل از فرسایش ارتباط دارد. این نیرو متناسب با شیب سطح آب و دبی است که ارتباط زیادی با شیب کانال دارد.

جدول ۲) مقادیر میانگین شاخص SL در حوضه آبخیز نجی

SL	L(m)	L(m)	h(m)	نقطه میانی	زیرحوضه ها
۱۰۳۰,۴	۸۷۸۴	۹۹۱۴	۱۱۶۳	۱۹۲۰,۵	انجیران
۳۴۸,۵	۴۹۶۸	۹۸۹۶	۶۹۴	۱۷۴۵	گاگل
۶۶۳,۱	۱۱۴۹۲	۱۶۸۱۲	۹۷۰	۱۸۰۵	دره وران
۸۰۷,۹	۱۱۴۹۲	۱۶۸۱۲	۱۱۸۲	۱۹۱۱	کل حوضه

شکل ۳ مقادیر شاخص SL را در امتداد نیمرخ طولی رود قزلچه سو نشان می دهد. همان طور که در شکل دیده می شود، روند این شاخص در طول مسیر با شیب یکسانی تداوم ندارد، بلکه در قسمت های مختلف مسیر با تغییر همراه است (مقادیر میانگین شاخص در جدول ۲ نشان داده شده است). بررسی های میدانی و داده های زمین شناسی نشان می دهد که شاخص SL به ساختمان سنگ شناسی بسیار حساس است. مقادیر بالای SL در حوضه نجی، به ویژه در زیرحوضه انجیران که به ۱۰۳۰ می رسد، حاکی از بالا آمدگی و فعالیت های شدید تکتونیکی در منطقه است. تغییر قابل توجه SL_۱ (مربوط به کل حوضه) در ۱۲ کیلومتر ناشی از تغییر لیتولوژیکی بستر رودخانه در تقاطع گسل دره وران و گسل انجیران است. گسلی شدن مسیر آبراهه در این قسمت باعث افزایش شاخص شده است. شیب زیاد نیمرخ طولی در ابتدای مسیر SL_۱ و SL_۲ ناشی از وجود سازند ولکانیکی (آندزیت) در بخش های شمالی حوضه است. تغییر ناگهانی شیب نیمرخ طولی آبراهه در SL_۳ در ۲ کیلومتر نیز به علت برخورد به سنگ های سست و فرسایش پذیر شیل است. همچنین، تغییرات شیب ملایم در SL_۴ به علت وجود سازندهای سست آبرفتی در انتهای حوضه است. بررسی ها و مطالعه شاخص

گرادبان طولی رود در حوضه نچی، وجود ارتباط بین سنگ‌های مقاوم و شاخص گرادبان طولی رود را اثبات می‌کند و از طرف دیگر، لندفرم‌های زمین با مقاومت سنگ‌ها تطابق خوبی دارد.



شکل ۳) نیمرخ طولی رودخانه قزلچه‌سو به همراه مقادیر شاخص SL شماره ۱ تا ۴ به ترتیب مربوط به کل حوضه، زیر حوضه‌های انجیران، دره‌وران و گاگل است)

شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی^{۲۴} (AF):

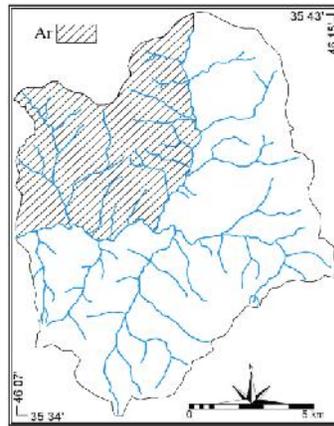
این شاخص برای تجزیه و تحلیل وجود کج‌شدگی تکتونیکی در حوضه‌های زهکشی ارزیابی می‌شود. در مناطقی که شبکه زهکشی بر اثر تغییر شکل‌های تکتونیکی توسعه پیدا می‌کند، شبکه زهکشی اغلب دارای شکل هندسی و الگوی متمایزی است. شاخص عدم تقارن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$AF = 100(Ar / At) \quad (2)$$

در رابطه فوق Ar مساحت قسمت راست حوضه (در جهت پایین‌رود) نسبت به رود اصلی و At مساحت کل حوضه زهکشی است. برای شبکه‌های زهکشی در حالت پایدار و عدم کج‌شدگی بر اثر بالا آمدگی، AF برابر ۵۰ است. این شاخص به خم‌شدگی عمودی بر امتداد رود اصلی در حوضه زهکشی حساس است. مقادیر بیشتر یا کمتر از ۵۰ ممکن است حاکی از کج‌شدگی حوضه زهکشی باشد. در حوضه زهکشی مورد مطالعه که جهت جریان به طرف غرب است، چرخش تکتونیکی به طرف شمال‌غرب است (شکل ۴)، شاخه‌های روی کناره‌های سمت راست نسبت به شاخه‌های کناره‌های جانب چپ رود اصلی، کوتاه‌تر هستند و AF کوچکتر از ۵۰ است (جدول ۳). این شاخص مانند اغلب شاخص‌های ژئومورفیک که در مناطق و حوضه‌های زهکشی در سنگ‌های یکسانی گسترده‌اند، بهترین عملکرد را دارد. در روش AF برای تجزیه و تحلیل‌های ژئومورفیک فرض بر این است که کنترل‌کننده‌های سنگ‌شناسی (مانند شیب طبقات-رسوبی) و شرایط اقلیمی و اکولوژیک (همچون اختلاف پوشش گیاهی بین شمال و جنوب دامنه‌ها) در منطقه باعث عدم تقارن نمی‌شوند.

جدول ۳) مقادیر میانگین شاخص AF در حوضه آبخیز نجی

زیر حوضه‌ها	At	Ar	%Af
انجیران	۴۷,۱۷	۱۷,۸۵	۳۷,۸۴٪
گاگل	۴۲,۹۷	۱۶,۱۱	۳۷,۴۹٪
دره‌وران	۵۴,۰۸	۲۷,۲۷	۵۰,۴۲٪
کل حوضه	۱۴۴,۲۲	۴۴,۶۵	۳۰,۹۵٪



شکل ۴) ارزیابی شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (AF)

شاخص پیچ و خم رودخانه اصلی^{۲۵} (S):

ضریب سینوسیته شاخص دیگری است که برای بررسی تغییرات بستر رودخانه و فعالیت‌های نئوتکتونیک استفاده می‌شود. تغییرات سینوسیته در یک سامانه رودخانه‌ای به طور معمول ناشی از افزایش و فرونشست‌هایی است که در بستر رودخانه روی می‌دهد؛ حتی مقادیر اندک دگرشکلی می‌تواند سینوسیته یک رودخانه را تغییر دهد (زامولی و همکاران، ۲۰۰۹، ۵). هر دگرشکلی زمین‌ساختی که نشیب دره رودخانه را تغییر دهد، سینوسیته رود هم‌تراز آن و برای حفظ تعادل نشیب کانال تغییر می‌کند. متناسب با تغییرات تکتونیکی که به تغییر شیب دره رودخانه منجر می‌شود، برای حفظ تعادل شیب رودخانه، پیچ و خم رودخانه نیز جابه‌جا می‌شود. این شاخص از نسبت طول کانال به فاصله مستقیم همان مسیر به دست می‌آید:

$$S = La / Ls \quad (۳)$$

در رابطه بالا؛ S ضریب سینوسیته، La طول رودخانه و Ls طول مستقیم دره است.

هر گاه مقدار این پارامتر به یک نزدیکتر باشد، بیانگر زون فعال از نظر تکتونیکی است. افزایش در مقدار آن ($S > 1$)، بیانگر کاهش در فعالیت تکتونیکی منطقه و حاکی از نزدیک شدن رودخانه به حالت تعادلی است. با بررسی‌های انجام گرفته میزان سینوسیته رودخانه از ۱/۱۳ در زیر حوضه انجیران تا ۱/۹۹ در زیر حوضه گاگل تغییر می‌کند (جدول ۴). با توجه به مقادیر به دست آمده فوق می‌توان نتیجه گرفت که منطقه مورد مطالعه از نظر تکتونیکی فعال بوده و به حالت تعادل

نرسیده و این مسأله در مناطق شمالی حوضه مشهودتر است؛ همچنین، نیروهای درونی و زمین ساختی هنوز در تحول مورفولوژی منطقه نقش بسزایی دارند.

جدول ۴) محاسبه شاخص سینوسیته رودخانه در زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه

S	La	Li	زیرحوضه
۱,۱۳	۸۷۸۴	۹۹۱۴	انجیران
۱,۹۹	۴۹۶۸	۹۸۹۶	گاگل
۱,۲۵	۵۴۷۹	۶۸۹۸	خروجی
۱,۴۶	۱۱۴۹۲	۱۶۸۱۲	کل حوضه

شاخص تراکم سطحی آبراهه‌ها^{۲۶} (P):

این عامل از تقسیم طول شبکه هیدروگرافی حوضه (شامل شبکه‌های اصلی و فرعی) به مساحت حوضه به دست می‌آید و شاخص مفیدی برای ارزیابی و شناسایی نئوتکتونیک در حوضه‌های زهکشی به شمار می‌آید. در این شاخص هرچه ضریب تراکم بیشتر باشد، بیانگر تکتونیک فعال و حساسیت زیاد سازندها و تشکیلات زمین‌شناسی موجود در حوضه است. همچنین، نشان از جوان بودن و نرسیدن به مرحله تعادل حوضه زهکشی دارد. این شاخص از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{\sum Li}{A} \quad (۴)$$

در رابطه بالا؛ P: تراکم زهکشی؛ Li: طول آبراهه‌ها به کیلومتر و A: مساحت حوضه به کیلومتر مربع است. با توجه به نتایج به دست آمده برای زیرحوضه‌های مختلف، زیرحوضه انجیران فعالیت تکتونیک بیشتری دارد (جدول ۵).

جدول ۵) شاخص P محاسبه شده برای زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه

واحد هیدرولوژیکی	انجیران	گاگل	دره‌وران	کل حوضه
Li	۹۴,۸۱	۷۲,۶۱	۹۷,۸۸	۲۶۶,۸
A	۴۷,۱۷	۴۲,۹۷	۵۴,۰۸	۱۴۴,۲۲
P	۲,۰۱	۱,۶۹	۱,۸۱	۱,۸۵

شاخص انشعاب پذیری^{۲۷} (Br):

انشعاب‌پذیری به نسبت تعداد قطعات یک‌رده به تعداد قطعات مرتبه بالاتر گفته می‌شود. این شاخص به علت تغییرات تصادفی در هندسه حوضه آبریز از مرتبه‌ای به مرتبه دیگر یکسان نخواهد بود؛ اما تمایل دارد که در تمام سری‌ها ثابت باشد. هر قدر نسبت انشعابات بزرگتر باشد، بیانگر فعالیت‌های تکتونیک بیشتری و جوان بودن حوضه است، این شرایط باعث افزایش آبراهه‌های رتبه پایین می‌گردد. نسبت انشعاب پایین از خصوصیات حوضه‌هایی است که آشفته‌گی‌های

ساختاری کمتری دارند و الگوی زهکشی در آنها غیر طبیعی نیست. شاخص مورد بحث از رابطه زیر به دست می آید:

$$BR = \left(\frac{N_1}{N_2} + \frac{N_2}{N_3} + \dots + \frac{N_{n-1}}{N_n} \right) \left(\frac{1}{n-1} \right) \quad (5)$$

که در آن: N1 تعداد شاخه‌های رده یکم، N2 تعداد شاخه‌های رده دوم، N3 تعداد شاخه‌های رده سوم و، n تعداد شاخه‌های رده n ام است.

با توجه به محاسبات صورت گرفته زیر حوضه انجیران با بیشترین نسبت انشعاب (۵,۴۴) به عنوان فعالترین زیر حوضه و حوضه دره‌وران با کمترین نسبت انشعاب (۳,۱)، کمترین فعالیت تکتونیکی را نشان می‌دهند (جدول ۶).

جدول ۶) محاسبه شاخص BR برای حوضه نجی

واحد هیدرولوژیکی	انجیران	گاگل	دره‌وران	کل حوضه
نسبت انشعابات (BR)	۵,۴۴	۴,۵۹	۳,۱۰	۴,۰۴

شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان^{۲۸} (Smf):

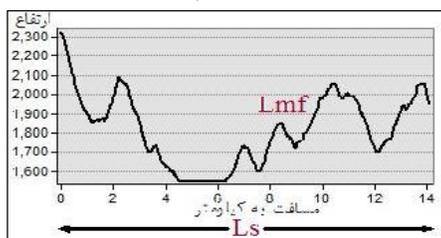
این شاخص تعادل بین نیروهای فرسایش دهنده و تکتونیکی را منعکس می‌کند. سینوسیته پایین در یک جبهه کوهستانی مستقیم و صاف با یک گسل مرزی فعال دیده می‌شود. اگر نرخ بالا آمدگی^{۲۹} کم یا متوقف شود، فرایندهای فرسایشی، جبهه کوهستان را با بی‌نظمی بیشتر تخریب خواهند کرد و مقدار شاخص افزایش می‌یابد. هرگاه مقدار این پارامتر با یک برابر باشد، بیانگر زون فعال از نظر تکتونیکی است و افزایش در مقدار آن، بیانگر کاهش در فعالیت تکتونیکی منطقه است. شاخص سینوسی جبهه کوهستان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Smf = Lmf / Ls \quad (6)$$

در رابطه فوق، Smf شاخص سینوسی پیشانی کوهستان، Lmf طول جبهه کوهستان در امتداد کوهپایه و در محل شکست شیب (کنیک) و Ls طول خط مستقیم جبهه کوهستان است.

با استفاده از این شاخص در محدوده‌هایی از منطقه مورد مطالعه که مقدار پیچ و خم پیشانی کوهستان کمتر را نشان می‌دهند، مناطق فعال تکتونیکی هستند. با توجه به مقادیر میانگین شاخص Smf حوضه مورد مطالعه جزو مناطق با فعالیت زیاد تکتونیکی محسوب می‌گردد. در این میان، زیر حوضه انجیران با میزان شاخص ۱/۶۹ فعالترین جبهه کوهستانی از نظر تکتونیکی محسوب می‌شود (جدول ۷).

جدول ۷) مقادیر میانگین شاخص Smf برای زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه (با رسم شکل شماتیک)



زیر حوضه	Lmf(m)	Ls(m)	Smf
انجیران	۱۱۰۸۹	۶۵۶۲	۱/۶۹
گاگل	۱۱۸۴۸	۵۸۹۵	۲/۰۱
دره‌وران	۱۰۰۶۹	۵۳۸۵	۱/۸۷
کل حوضه	۱۰۹۶۱	۵۷۳۹	۱/۹۱

شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع دره $(Vf)^2$:

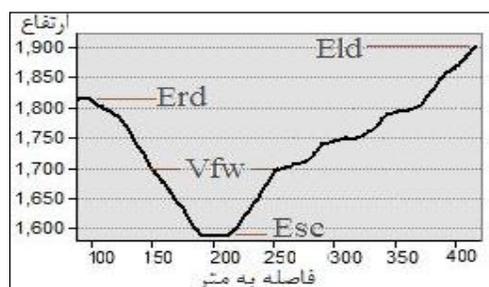
از دیگر شاخص‌های ژئومورفیک که برای مطالعه و تشخیص فعالیت‌های تکتونیک به کار می‌رود، نسبت عرض کف

بستر دره به ارتفاع دره (Vf) است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$VF = 2VFW / [(Eld - Esc) + (Erd - Esc)] \quad (۷)$$

در رابطه فوق؛ Vf نسبت عرض به ارتفاع دره، Vfw پهنای کف دره، Eld و Erd ارتفاع خط تقسیم آب (دیواره‌ها) در

قسمت راست و چپ دره و ESC ارتفاع کف دره است (شکل ۵).



شکل ۵) روش ارزیابی شاخص Vf در حوضه مورد مطالعه

این پارامتر در فواصل مختلف از جبهه کوهستان برای هر دره بررسی می‌شود. این شاخص دره‌های پهن (با مقادیر زیاد VF) را از دره‌های V شکل (مقادیر کم VF) تفکیک می‌کند. مقادیر زیاد VF مرتبط با بالا آمدگی کم است. در این حالت، آبراهه‌ها پهنای بستر خود را فرسایش داده، پهنای دره افزایش می‌یابد. مقادیر کم شاخص بیانگر دره‌های عمیق و V شکل و رودهایی است که به طور عمیقی کف بستر خود را حفر می‌کنند و معمولاً با بالا آمدگی همراه است. این شاخص برای محدوده مورد مطالعه، در دره‌های اصلی و مقطعی که شاخص SL به دست آمده بود، محاسبه گردید. مقدار این شاخص از ۱,۵۴۹ در مناطق فعال تکتونیک (شمال حوضه) تا ۱,۸۰۵ در مناطق نسبتاً غیر فعال (خروجی حوضه) متغیر است که دامنه تغییر پذیری کمی را نشان می‌دهد. نتایج در (جدول ۸) نشان داده شده است.

جدول ۸) مقادیر میانگین شاخص VF برای محدوده مورد مطالعه

VF	VFW	Erd	Eld	Esc	زیر حوضه‌ها
۱,۵۴۹	۳۷۸	۱۸۹۲	۱۹۶۸	۱۶۸۵	انجیران
۱,۶۲۸	۴۱۲	۱۷۹۶	۱۸۲۲	۱۵۵۶	گاگل
۱,۸۰۵	۶۰۹	۱۷۲۶	۱۷۴۵	۱۳۹۸	دره‌وران
۱,۶۲۰	۴۱۴	۱۷۹۰	۱۸۲۵	۱۵۵۲	کل حوضه

شاخص انتگرال هیپسومتری^{۳۱} (Hi):

تجزیه و تحلیل سطوح ارتفاعی از طریق محاسبه انتگرال هیپسومتریک از ساده‌ترین راه‌ها برای شناخت میزان فعالیت-های تکتونیکی در حوضه‌های زهکشی به‌شمار می‌آید. انتگرال هیپسومتریک حوضه به وسیله مساحت زیر منحنی-هیپسومتریک مشخص می‌شود. این شاخص از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Hi = (h - H_{min}) / (H_{max} - H_{min}) \quad (۸)$$

که در آن؛ Hi انتگرال هیپسومتریک، H_{min} و H_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل ارتفاع و h میانگین ارتفاع حوضه است.

مقادیر بالای انتگرال هیپسومتریک (نزدیک ۰/۵)^{۳۲} بیانگر توپوگرافی جوان و وجود پستی و بلندی زیاد نسبت به میانگین حوضه زهکشی است و با برش‌های عمیق، برجستگی‌های ناهموار، سطوح بالاآمده و بریده شده توسط شبکه زهکشی مشخص می‌شود و هرچه این رقم به صفر نزدیکتر باشد، گذر از مرحله بلوغ به پیری را شاهد هستیم که تعادل در فرایندهای ژئومورفیک و برجستگی‌های نسبتاً هموار از ویژگی‌های آن است. ارتباط بین انتگرال هیپسومتریک و درجه بریدگی باعث شده تا از این شاخص به‌عنوان معیاری برای تشخیص چرخه مرحله فرسایشی چشم انداز استفاده شود. با توجه به محاسبات صورت گرفته در (جدول ۹) قسمت‌های شمالی حوضه (زیرحوضه انجیران) فعالترین بخش از نظر فعالیت‌های تکتونیکی است. همچنین، در بخش‌های جنوب‌شرقی (زیرحوضه گاگل) شاهد گذر از مرحله بلوغ هستیم و بین فرایندهای ژئومورفیک تعادل نسبی در مقایسه با سایر مناطق برقرار است. شاخص Hi به‌طور کلی بر جوانی حوضه آبخیز نچی دلالت دارد.

جدول ۹) شاخص Hi محاسبه شده برای زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه

Hi	h	H_{min}	H_{max}	زیر حوضه
۰,۳۹۳	۱۷۹۷	۱۳۳۹	۲۵۰۲	انجیران
۰,۱۸۱	۱۶۷۱	۱۳۹۸	۲۹۰۲	گاگل
۰,۲۱۶	۱۵۳۰	۱۳۲۰	۲۲۹۰	دره‌وران
۰,۲۹۶	۱۶۷۰	۱۳۲۰	۲۵۰۲	کل حوضه

نتیجه‌گیری

بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که تحت تأثیر فرایندهای زمین‌ساختی شدید، طاقدیس‌ها بر اثر فشار گسل‌های

31- Hypsometric Integral (Hi)

۳۲- شایان ذکر است که مقادیر بالاتر از این عدد در حوضه‌های زهکشی کمتر مشاهده شده‌است.

موجود بریده و جابه‌جا شده‌اند. همچنین، وجود گسل‌های فراوان در جهت‌های مختلف، رورانندی‌های شدید و آشفته‌گی و درهم‌ریختگی‌هایی که در وضع چین‌ها و محورهای آنها به‌وجود آمده، به‌خوبی نشان می‌دهند که حوضه نجی به شدت با فعالیت‌های تکتونیکی همراه بوده‌است. انعکاس این فعالیت‌ها به‌صورت سیستم‌های مختلف گسلش و درز و شکاف مشخص است و عملکرد رانندگی‌ها و نقش آنها در ریخت‌شناسی منطقه چشمگیر است. حرکات تکتونیکی باعث به‌وجود آمدن گسل‌های متعدد در جهات مختلف شده و تداوم این حرکات، رورانندی‌های زیادی را موجب شده‌است. فعالیت گسل‌های منطقه، پیدایش پدیده‌های ژئومورفیکی و شکل‌گیری سیمای توپوگرافیک و شبکه‌های زهکشی فعلی منطقه را به‌دنبال داشته‌است. در این منطقه تکتونیکی و کوهزایی تأثیر چشمگیری در ایجاد آبراهه‌ها داشته‌است. به همین دلیل است که بالادست نمرخ طولی اکثر آبراهه‌های حوضه دارای شیب تندی است. سیستم آبراهه‌های موجود و رودخانه‌های اصلی سازگاری زیادی با روندهای شکستگی و گسلش منطقه دارد، همچنین از نشانه‌های فعالیت گسل‌ها، تشکیل و ظهور چشمه‌های گسلی در راستای شکستگی‌های موجود است؛ به‌طوری که تعداد ۱۲۴ دهنه چشمه دایمی و ۷۰ دهنه چشمه فصلی در حوضه تشکیل داده‌است^{۳۳}.

به‌طور کلی، براساس نتایج این پژوهش سیمای توپوگرافیک و ژئومورفیک فعلی به‌شدت از فعالیت‌های زمین‌ساختی کوتاه‌تر متأثر شده و بر اساس شواهد موجود، فعالیت‌های زمین‌ساختی کوتاه‌تر مهم‌ترین نقش را در مورفولوژی شبکه آبراهه‌ها داشته‌اند. ارقام حاصل از به‌کارگیری شاخص‌های مختلف نیز نشان‌دهنده فعال بودن تکتونیکی در بخش‌های مختلف حوضه، به‌ویژه در بخش‌های بالادست (مربوط به زیرحوضه انجیران) است. به‌این ترتیب، بین حرکات زمین‌ساخت و تغییرات شبکه زهکشی نوعی تعامل وجود دارد و واکنش سامانه‌های رودخانه‌ای به شدت و نوع این فعالیت‌ها و مورفومتری رودخانه وابسته است.

در نهایت، شایان ذکر است که مدیریت پایدار سامانه رودخانه‌ای بدون توجه به نحوه عملکرد فرایندهای ژئومورفیکی و نیز عدم مطالعه پیامدهای فعالیت‌های تکتونیکی نمی‌تواند به نتیجه قابل‌انتظار دست یابد. درک درست تغییرات در مسیر جریان رودخانه‌ها، مستلزم نگرش سیستمی به حوضه‌های آبخیز و اعتقاد به سوق یافتن کل سیستم به ایجاد برقراری تعادل است که گاه به‌علت تغییرات طبیعی به‌هم می‌خورد.

منابع

- ۱- آراین، مهران و فرانک فیضی. (۱۳۸۴). «کاربرد شاخص‌های زمین‌ریختی در تشخیص سطح فعالیت زمین‌ساختی نسبی در مرز البرز- ایران مرکزی»، علوم پایه (دانشگاه آزاد اسلامی)، ۱۵(۵۷)، صص ۳۷۸-۴۰۳.
- ۲- آراین، مهران و سیداحمد هاشمی. (۱۳۸۷). «پهنه‌بندی لرزه زمین‌ساختی زاگرس»، علوم پایه (دانشگاه آزاد اسلامی)، ۱۸(۶۹)، صص ۶۳-۷۶.
- ۳- شهریاری، سهراب و حمید ثمری. (۱۳۸۲). «تفسیر زمین‌ساختی زاگرس در قالب مطالعه هندسه حرکت»، مجله پژوهشی علوم پایه دانشگاه اصفهان، ۱۸(۲)، صص ۱۹-۳۶.

۳۳- متوسط آبدی چشمه‌های دایمی ۱/۵ لیتر در ثانیه و چشمه‌های فصلی ۰/۷ لیتر در ثانیه است. حجم کل آبدی سالانه چشمه‌های دایمی ۵/۹ میلیون متر مکعب و چشمه‌های فصلی (که ۶ ماه در سال آب دارند) ۰/۶ میلیون متر مکعب است.

- ۴- علمی زاده، هیوا. (۱۳۸۵). هیدروژئومورفولوژی حوضه نجی با تاکید بر رسوب، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، صص ۱-۱۴۵.
- ۵- کرمی، فریبا و عبدالحمید رجایی اصل. (۱۳۸۳). «نقش زمین ساخت در تحول زمین ریخت شناسی پایکوه‌های شمالی کوه بزقوش»، علوم زمین، ۱۱(۵۲-۵۱)، صص ۶۸-۷۷.
- ۶- گورابی، ابوالقاسم و احمد نوحه گر. (۱۳۸۶). «شواهد ژئومورفولوژیکی تکتونیک فعال حوضه آبخیز در که»، پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۹(۶۰)، صص ۱۷۷-۱۹۶.
- ۷- مختاری کشکی، داوود. (۱۳۸۴). «نقش نوزمین ساخت در تکامل سامانه‌های رودخانه‌ای در کواترنر (مطالعه موردی رودخانه-های دامنه شمالی میشو)»، علوم زمین، ۱۵(۵۷)، صص ۶۴-۷۷.
- ۸- مفاخریان، سیدعلی و محسن پور کرمانی. (۱۳۸۶). «اثرات تکتونیک پویا در منطقه خرم آباد»، علوم پایه (دانشگاه آزاد اسلامی)، ۱۷(۶۵)، صص ۸۱-۹۰.
- ۹- مقصودی، مهران و حمید کامرانی. (۱۳۸۷). «ارزیابی نقش تکتونیک فعال در تنظیم کانال رودخانه تجن»، پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۹(۶۰)، صص ۳۷-۵۵.
- ۱۰- وحدتی، دانشمند و همکاران. (۱۳۸۶). «نوزمین ساخت سپیدرود و دشت گیلان»، علوم زمین، ۱۷(۶۵)، صص ۱۲-۲۵.
- ۱۱- یمانی، مجتبی، ابراهیم مقیمی و علیرضا تقیان. (۱۳۸۷). «ارزیابی تاثیرات نوزمین ساخت فعال در دامنه‌های کرکس با استفاده از روش‌های ژئومورفولوژی»، تحقیقات جغرافیایی، ۲۳(پیاپی ۸۸): ۱۱۷-۱۳۶.
- 12-Fortes, E., & et.al(2005):Neotectonics and channel evolution of the Lower Ivinhema River: A right-bank tributary of the upper Paraná River, Brazil, *Geomorphology*, Volume 70, Issues 3-4, pp325-338.
- 13-Krzyszowski, D., Przybylski, B., Badura, J. (2000):The role of neotectonics and glaciation on terrace formation along the Nysa Kodzka River in the Sudeten Mountains (southwestern Poland),*Geomorphology*, Volume 33, Issues 3-4, pp149-166.
- 14-Latrubesse, E., Alceu Rancy.A(2000):Neotectonic influence on tropical rivers of southwestern Amazon during the late quaternary: the Moa and Ipixuna river basins, Brazil,*Quaternary International*, Volume 72, Issue 1, pp67-72.
- 15-Srivastava, P., Misra D. K.(2008):Morpho-sedimentary records of active tectonics at the Kameng river exit, NE Himalaya, *Geomorphology*, Volume 96, Issues 1-2,pp187-198.
- 16-Petrovszki, J., Timár.G(2009):Channel sinuosity of the Körös River system, Hungary/Romania, as possible indicator of the neotectonic activity, *Geomorphology*, In Press, Corrected Proof, Available online.
- 17-Rose, J., & et.al(2002):Early and early Middle Pleistocene river, coastal and neotectonic processes, southeast Norfolk, England, *Proceedings of the Geologists' Association*, Volume 113, Issue 1, pp 47-67.
- 18-Schoorl, J., M., Veldkamp, A. (2003): Late Cenozoic landscape development and its tectonic implications for the Guadalhorce valley near Alora (Southern Spain): *Geomorphology*50.pp 43-57.
- 19-Sharma, A., Rajamani,V. (2000):Weathering of gneissic rocks in the upper reaches of Cauvery river, south India: implications to neotectonics of the region, *Chemical Geology*, Volume 166, Issues 3-4, Pages 203-223.
- 20-Zámolyi, A., Székely, B., Draganits.E, Timár.G(2009): Neotectonic control on river sinuosity at the western margin of the Little Hungarian Plain, *Geomorphology*, In Press, Corrected Proof, Available online. Pages1-13.