



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

سال پانزدهم، شماره ۴۹
بهار ۱۳۹۴، صفحات ۲۸۸-۲۵۹

ابوالقاسم امیراحمدی^۱
مجید ابراهیمی^۲

تأثیر تکتونیک فعال بر مورفولوژی مخروطافکنه‌ها با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در مرز ساختاری البرز جنوبی

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۲۱

چکیده

مطالعه فرم‌ها و چشم اندازهای قابل اندازه‌گیری به وجود آمده به وسیله فعالیت‌های تکتونیک موضوع علم تکتونیک ژئومورفولوژی است. مخروطافکنه‌ها از جمله‌ی این اشکال ژئومورفولوژیکی هستند که فعالیت‌های تکتونیک در کنار تغییرات آب و هوایی مهم‌ترین عامل کنترل کننده‌ی آن‌ها می‌باشد. به دلیل فعال بودن تکتونیک البرز، لندفرم‌های کواترنری در این محدوده تا اندازه زیادی تحت تأثیر گسل‌های اصلی و فعال منطقه قرار دارند. هدف از این پژوهش بررسی نقش عوامل تکتونیک در شکل‌گیری و تحول مورفولوژی مخروطافکنه‌های جاجرود، حبله رود و ایوانکی می‌باشد. در این پژوهش نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) به عنوان داده‌های اصلی تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. سپس با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک که شامل؛ شاخص سینوسی جبهه کوهستان (S_{mf})، شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن (V_f)، عامل عدم تقارن حوضه (A_f)، گرادیان طولی رودخانه (SL)، عامل تقارن توپوگرافی (T) و شاخص ضریب مخروط‌گرایی (FCI) وضعیت منطقه از نظر میزان فعالیت‌های تکتونیک مورد ارزیابی قرار گرفت. از ترکیب این شاخص‌ها با یکدیگر رابطه

E-mail: amirahmadi1388@gmail.com

E-mail: majid_ebrahimi2@yahoo.com

۱- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه حکیم سبزواری.

۲- دانشجوی دکترای جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه حکیم سبزواری.

شاخص فعالیت‌های تکتونیکی (Iat) به‌دست آمد. نتایج بررسی نشان داد که طبق مقادیر شاخص فعالیت‌های تکتونیکی (Iat) منطقه از لحاظ فعالیت‌های تکتونیکی فعال می‌باشد. به‌طوری‌که مخروط‌افکنه حبله‌رود در کلاس فعالیت‌های تکتونیکی زیاد و مخروط‌افکنه‌های جاجرود و ایوانکی در کلاس فعالیت‌های تکتونیکی متوسط قرار دارند. داده‌های ثبت شده زلزله طی سال‌های ۱۹۷۳ تا ۲۰۱۲ میلادی در منطقه نیز نشان از فعالیت بالای تکتونیک در محدوده‌ی مورد مطالعه دارد. داده‌های موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران بیش‌ترین زمین‌لرزه را در حوالی گسل گرمسار، به‌ویژه قسمت‌های غربی آن ثبت کرده است و این‌گونه به‌نظر می‌رسد که نسبت به بخش شرقی خود فعالیت بیش‌تری دارد.

کلید واژه‌ها: مورفولوژی، مخروط‌افکنه‌ها، تکتونیک فعال، شاخص‌های ژئومورفیک، البرز جنوبی.

مقدمه

در سال‌های اخیر ژئومورفولوژی تکتونیکی به‌طور چشم‌گیر، یکی از ابزارهای عمده و اساسی و مؤثر در تشخیص شکل‌های تکتونیکی فعال و تهیه نقشه‌های خطر لرزه‌ای و همچنین درک و فهم تاریخچه چشم اندازه‌های کنونی سطح زمین بوده است (بوربانک و آندرسون^۳، ۲۰۰۱؛ ۷؛ کِلِر و پینتر^۴، ۲۰۰۲؛ ۱). ارزیابی ساختمان‌ها و لندفرم‌های زمین در طول تاریخ پیدایش آن‌ها، موضوع دانش ژئومورفولوژی تکتونیکی می‌باشد (استانلی^۵ و همکاران، ۲۰۰۰؛ ۲). مخروط‌افکنه‌ها اغلب در پلیوکواترنر ایجاد شده و بیانگر نکات جالبی در مورد روند عملکرد و تاریخچه تحولات تکتونیکی می‌باشد. به‌ویژه با توجه به مشخصات آن از نظر مطالعه لرزه‌خیزی نواحی مختلف ایران بسیار با ارزش است (عباسی نژاد، ۱۳۷۵: ۳۸). برخی از شاخص‌های ژئومورفیک، به عنوان ابزارهای اساسی برای تشخیص تغییر شکل‌های سریع تکتونیکی تجربه و آزمون شده و به‌طور وسیع مورد استفاده قرار گرفته‌اند، آن‌گاه نتایج حاصل در طرح‌های تحقیقاتی جهت کسب اطلاعاتی جامع و کامل درباره تکتونیک فعال مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شاخص‌های ژئومورفیک به‌طور خاص برای مطالعات تکتونیک فعال استفاده می‌شوند (بوربانک و آندرسون، ۲۰۰۱: ۱۷؛ ایوانیس^۶ و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۱۳).

3- Burbank and Anderson

4- Keller and Pinter

5- Stanley

6- Ioannis

در محدوده‌ی مورد مطالعه گسل‌های متعددی وجود دارد که نقش اساسی در فعالیت‌های تکتونیکی منطقه دارند که از جمله آن می‌توان به گسل ایوانکی با ساز و کار فشاری و روند شمال غرب-جنوب شرق در بالای مخروط افکنه ایوانکی، گسل پارچین با روند شمال غربی-جنوب شرقی در محل خروجی رودخانه جاجرود به دشت ورامین، گسل کهریزک با سازوکار راندگی در شمال غرب دشت ورامین و گسل گرمسار با راستای شمال شرقی-جنوب غربی و در ازای بیش از ۱۰۰ کیلومتر در بخش شمال شرقی گرمسار اشاره کرد. گسل گرمسار که گسلی رورونده مربوط به کواترنر است، در قسمت شمالی مخروط افکنه، مرز روشنی میان سازندهای شمالی و آبرفت‌های دشت را تشکیل می‌دهد. گسل گرمسار بسیار فعال بوده و محققین زمین لرزه‌های اخیر گرمسار را ناشی از فعالیت گسل گرمسار دانسته‌اند (بونت^۷ و همکاران، ۲۰۰۱: ۷۳).

با توجه به وجود حرکات تکتونیکی فعال در دوران پلیو-کواترنر و ادامه این حرکات در عهد حاضر (هولوسن)، در البرز و منطقه مورد مطالعه، مورفولوژی مخروط افکنه‌ها در مرز ساختاری البرز جنوبی می‌تواند راهنمای خوبی برای شناسایی این حرکات باشند. به همین لحاظ، ارزیابی و بررسی فرآیندهای تکتونیکی فعال و اثرات ناشی از آن هم چون زمین لرزه‌ها برای بسیاری از فعالیت‌های بشری همچون طراحی و احداث شهرها، نیروگاهها، سدها، تاسیسات صنعتی و ... از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد تا به واسطه آن بتوان خطرات و خسارات ناشی از این گونه فرآیندهای فعال را به حداقل ممکن رساند. از آن جا که اندازه‌گیری‌های کیفی جوابگوی ارزیابی این فعالیت‌ها نخواهد بود، کمی نمودن رفتار حرکات تکتونیک ضروری به نظر می‌رسد. لذا از طریق مطالعات تکتونیک فعال می‌توان محل احتمالی وقایع آینده را پیش‌بینی کرد و نتایج حاصل از این مطالعات را در راستای شناخت مخاطرات طبیعی، برنامه‌ریزی کاربری زمین و مدیریت مناطق مسکونی به کار برد.

استفاده از شاخص‌های مورفومتريک در تشخیص حرکات فعال و جوان، در ایران و جهان سابقه‌ی چندانی نداشته و سابقه آن در جهان به دهه‌ی ۱۹۶۰ بر می‌گردد. هاروی^۸ و همکاران (۲۰۰۲) در تحقیقی نقش تغییرات اقلیمی سطح اساس در تقطیع مخروط افکنه‌ها را مورد توجه قرار داده و بریده شدن قاعده مخروط افکنه‌ها را ناشی از پایین رفتن سطح اساس و فعالیت‌های نئوتکتونیکی ذکر می‌کند. ویسراس^۹ و همکاران (۲۰۰۵) تأثیر بالا راندگی و فرونشست بر تحول مخروط افکنه‌ها را مورد مطالعه قرار داده است. ریتز^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۰) به نقش غالب تغییرات اقلیمی در تحول مخروط افکنه‌ها پرداخته است. در این پژوهش تأثیر تکتونیک، تغییرات سطح اساس و سنگ‌شناسی حوضه در

7- Bunte
8- Harvey
9- Viseras
10- Ritter

تحول مخروط‌افکنه‌ها ناچیز دانسته شده است. همدونی و همکاران^{۱۱} (۲۰۰۸) با استفاده از شاخص‌های گرادیان طولی رودخانه (SL)، انتگرال هیپسومتری (Hi)، شاخص پهنای دره به ارتفاع آن (Vf)، شاخص سینوسی جبهه کوهستان (Smf) و شیب حوضه (S)، چهار کلاس فعالیت‌تکتونیکی (Iat) شامل فعالیت‌کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد را برای جنوب غرب سیرا^{۱۲} در جنوب اسپانیا تعریف کردند. ده‌بزرگی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک ناحیه سروستان در بخش زاگرس مرکزی را مطالعه و این ناحیه را به چهار کلاس به لحاظ فعالیت‌تکتونیکی طبقه‌بندی نمودند. مطالعات فیگورا^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از شاخص‌های سینوزیته جبهه‌ی کوهستان (Smf)، نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن (Vf) و انتگرال هیپسومتری (Hi) در جنوب سیرا نودا در کالیفرنیا آمریکا نشان داد که فعالیت‌تکتونیکی در جنوب منطقه مذکور در حوالی گسل کرن و یورکورج^{۱۴} بیش‌تر است. برای اولین بار زائولاین^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۳) با بهره‌مندی از داده‌های پیمایشی استاندارد شده سنجش از دور LIDAR با قدرت تفکیک ۰/۲۵ تا ۱۰ متر موفق به شناسایی و تشخیص مناطق فعال نو زمین ساختی شدند. در خصوص استفاده از شاخص‌های مورفومتریکی در ایران می‌توان به موارد چند اشاره کرد: رامشت و همکاران (۱۳۸۸)، تأثیرات تکتونیک جنبه را بر مورفولوژیک مخروط‌افکنه‌ی درختنگان در منطقه‌ی شهداد کرمان بررسی نمودند. فعالیت‌های تکتونیکی با تأثیرگذاری در محل استقرار مخروط‌افکنه، افزایش رسوب‌دهی، افزایش شیب و در نتیجه افزایش توان حمل و مقدار رسوب رودخانه‌ای درختنگان، نقش خود را در تحول و تکامل امروزی آن ایفا کرده است. با استناد به ارزیابی روش‌های متعدد تکتونیک جنبه، این منطقه جزو مناطق فعال تکتونیکی قلمداد می‌شود. روستایی و نیری (۱۳۹۰) در مورد فعالیت‌های تکتونیک فعال به تجزیه و تحلیل نیمرخ طولی رودخانه مه‌باد با بهره‌مندی از شاخص‌های ژئومورفولوژیک پرداختند و بالا آمدگی بخش جنوبی و جنوب غرب در ارتباط با گسل فعال پیرانشهر و زون خرد شده زاگرس را بررسی نموده‌اند. سیف و خسروی (۱۳۸۹)، تکنوتیک‌های فعال را در قلمرو تراست منطقه فارس، مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج شاخص‌های متفاوت تبدیل به شاخص (Iat) شده‌اند و نقشه‌ی پهنه‌بندی تکنوتیکی حوضه‌ی فارس در چهار کلاس بسیار فعال، فعال، نیمه فعال و غیر فعال ترسیم گردیده است. عابدینی و شبرنگ (۱۳۹۳) به ارزیابی فعالیت‌های تکتونیکی در حوضه‌ی آبخیز مشکین‌چای از طریق شاخص‌های ژئومورفولوژی پرداختند. نتایج نشان داد که کل حوضه مورد مطالعه از لحاظ فعالیت‌های تکتونیکی فعال است. کرمی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی به مطالعه تحلیل فعالیت‌های نئوتکتونیکی دامنه شمالی رشته‌کوه

11- Hamdoni et al

12- Sierra

13- Figueroa

14- Kern river gorge

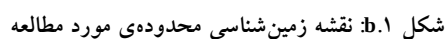
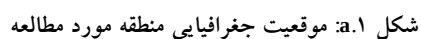
15- Zhou lina

بزقوش با استفاده از روش‌های ژئومورفولوژیکی پرداختند و با استفاده از شواهد مورفوتکتونیکی تأثیر تکتونیک بر منطقه مورد مطالعه را اثبات کردند.

هدف از این پژوهش بررسی نقش تکتونیک در شکل‌گیری و تحول مخروطافکنه‌های حبله‌رود، جاجرود و ایوانکی در مرز ساختاری البرز جنوبی و اثبات وجود حرکات تکتونیکی در دوران کواترنر و ادامه آن‌ها در زمان حاضر در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. آگاهی از شرایط نئوتکتونیکی منطقه می‌تواند نقش مهمی در مکان‌گزینی و مدیریت بهتر طرح‌ها و پروژه‌های گوناگون محیطی ایفا کند و تا حدود زیادی از خسارات جانی و مالی زمین لرزه‌ها کاسته و در کاهش خسارات ناشی از بلایای طبیعی دیگر نظیر حرکات دامنه‌ای، مؤثر واقع شود.

منطقه مورد مطالعه

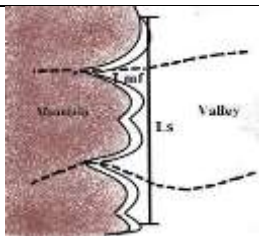
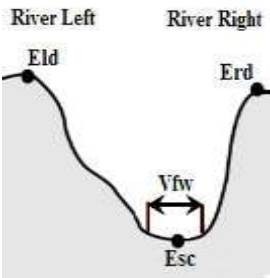
منطقه مورد مطالعه در یال جنوبی البرز مرکزی و از نظر مختصات جغرافیایی، در بین $36^{\circ} 2' 30''$ تا $35^{\circ} 8' 7''$ عرض شمالی و $51^{\circ} 26' 30''$ تا $53^{\circ} 5' 10''$ طول شرقی قرار دارد. اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقاط، برابر با ۴۲۸۰ متر در خط الرأس حوضه جاجرود و ۹۸۰ متر در اراضی جنوب گرمسار دیده می‌شود. این محدوده مساحتی بالغ بر ۸۴۷/۲ کیلومترمربع را در بر می‌گیرد (شکل ۱.۱). جاده تهران-مشهد از نزدیکی رأس مخروطافکنه‌های جاجرود، حبله‌رود و ایوانکی و هم‌چنین خط راه آهن تهران به گرمسار نیز تقریباً به موازات همین جاده عبور می‌کند. از آن جا که منطقه مورد مطالعه، در بخش خمیده البرز قرار دارد، ساختارهای زمین‌شناسی مانند، چین خوردگی و گسلش به وفور در آن دیده می‌شود. بخش زیادی از رسوبات منطقه، مربوط به دوره سنوزوئیک است. ساختار این گسترده از قدیم به جدید شامل سازند زیارت (پالئوسن)، کند، کرج (ائوسن)، سرخ پایین، قم (الیگوسن)، سرخ بالا (میوسن)، هزاردره (پلیو-پلیوستوسن)، کهریزک و آبرفت‌های کواترنری است که از دیدگاه سنگ‌شناسی، به طور عمده متشکل از مارن، شیل، سنگ آهک، نمک، گچ، سنگ ماسه، کنگلومرا، توف و نهشته‌های آبرفتی است (شکل ۱.۲). در محدوده‌ی مورد مطالعه گسل‌های متعددی وجود دارد که نقش اساسی در فعالیت‌های تکتونیکی منطقه دارند که از جمله آن می‌توان به گسل ایوانکی با ساز و کار فشاری و روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق در بالای مخروطافکنه ایوانکی، گسل پارچین با روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی در محل خروجی رودخانه جاجرود به دشت ورامین، گسل کهریزک با سازوکار راندگی در شمال‌غرب دشت ورامین و گسل گرمسار با راستای شمال‌شرقی-جنوب‌غربی و درازای بیش از ۱۰۰ کیلومتر در بخش شمال‌شرقی گرمسار اشاره کرد (شکل ۱.۲).

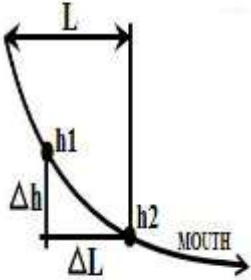
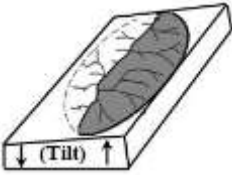
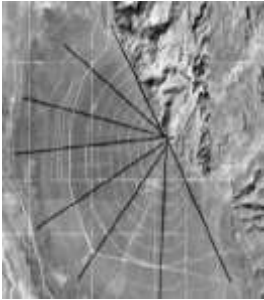


مواد و روش‌ها

- الف) مواد:** برای شناسایی دقیق و مطالعه منطقه و انجام محاسبات از منابع و اطلاعات زیر استفاده گردید:
- نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ شامل: ورامین، فشم، گرمسار، دماوند، کهن‌آباد، فیروزآباد و نقشه‌هایی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ شامل: بام، لوسان بزرگ، لشکرک، شرق تهران، سراب رود، ایستگاه کویر، شبگلده، ریشه، دماوند، کهن‌آباد، برسک، ارجمند، فیروزه، سبزداران.
 - نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، ۱:۱۰۰۰۰۰ شامل: تهران، دماوند، فشم، گرمسار ورامین.
 - تصاویر ماهواره‌ای (TM) لندست پنج با مشخصات فریم ۳۵-۱۶۴.
- ب) روش‌ها:** پس از تعیین حوضه‌ها شاخص‌های ژئومورفیک که شامل: شاخص سینوسی جبهه کوهستان (Smf)، شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن (Vf)، عامل عدم تقارن حوضه (Af)، گرادیان طولی رودخانه (Sl)، عامل تقارن توپوگرافی (T)، شاخص ضریب مخروط گرایی (FCI) و شاخص فعالیت‌های تکتونیکی (Iat) بودند مطابق جدول (۱) محاسبه شدند.

جدول ۱- شاخص‌های ارزیابی شده در منطقه مورد مطالعه

شاخص‌ها	فرمول	تعریف اجزای معادله	روش اندازه‌گیری	منبع
سینوزیته جبهه کوهستان	$Smf = Lmf / Ls$	Lmf: طول جبهه کوهستان در محل تلاقی پایکوه و کوهستان Ls: طول خط مستقیم جبهه کوهستان		Bull and McFadden, 1977
نسبت پهنای دره به ارتفاع آن	$Vf = 2vfw / (Eld - Esc) + (Erd - Esc)$	Vfw: عرض کف دره Eld: ارتفاع کف دره از سمت چپ Erd: ارتفاع کف دره از سمت راست Esc: ارتفاع کف دره		Bull, 1984
تقارن توپوگرافی عرضی	$T = Da / Dd$	Da: فاصله خط میانی حوضه زهکشی تا کمربند فعال Dd: فاصله خط میانی حوضه و خط تقسیم آب		Cox, 1994

Hack, 1973		ΔH : اختلاف ارتفاع قطعه موردنظر ΔL : طول شاخه مورد نظر L : مجموع طول آبراهه از مرکز نقطه‌ای که شاخص محاسبه می‌شود تا مرتفع‌ترین نقطه‌ی آبراهه در بالادست	$SI = (\Delta H / \Delta L)L$	گرادیان طولی رودخانه
Kellerand Pinter, 1996		A_f : شاخص عدم تقارن A_r : مساحت حوضه آبریز در سمت راست آبراهه اصلی A_t : مساحت کل حوضه	$A_f = 100(A_r / A_t)$	عدم تقارن آبراهه‌ها
Mukerji, 1976		ATF : مساحت مخروط ایده‌آل که از فرمول $\pi^2 \times dfA / 360$ محاسبه می‌شود، dfA زاویه رأس مخروط و r^2 شعاع مخروط افکنه ATF : مساحت واقعی مخروط افکنه	$FCI = AIF / ATF$	ضریب مخروط‌گرایی
Hamdouninet al., 2008	-----	S : مجموع کلاس‌های شاخص‌های ژئومورفیک محاسبه شده N : تعداد شاخص‌های محاسبه شده	$I_{at} = S / N$	ارزیابی تکتونیکی

یافته‌ها و بحث

شاخص سینوسی (سینوزیته) یا پیچ و خم جبهه کوهستان، از جمله شاخص‌های ژئومورفیک برای ارزیابی تکتونیک فعال می‌باشد. این شاخص تعادل بین نیروهای فرسایشی و نیروهای تکتونیکی را نشان می‌دهد (سیلوا^{۱۶} و همکاران، ۲۰۰۳: ۲۰۷). در این روش با اندازه‌گیری پیچ و خم‌های ایجاد شده توسط آبراهه‌ها در جبهه‌ی کوهستان و تقسیم آن بر طول افقی در راستای گسل و جبهه کوهستان، می‌توان وضعیت یک منطقه را از نظر فعال بودن تکتونیکی مشخص نمود. شاخص مربوط به صورت رابطه‌ی ذیل بیان می‌گردد (کلر و پینتر، ۱۹۹۶: ۱۳۸).

$$Smf = Lms/Ls$$

Smf : شاخص پیچ و خم جبهه کوهستان؛ Lmf : طول جبهه کوهستان در محل تلاقی پایکوه و کوهستان؛ Ls : طول خط مستقیم جبهه کوهستان می‌باشد. شاخص (Smf) برای جبهه‌های کوهستانی هر منطقه برحسب میزان فعالیت‌های تکتونیکی آن منطقه، متغیر است. چنانچه این مقدار به عدد یک نزدیک‌تر شود، منطقه دارای حرکات تکتونیکی فعال است و جبهه‌های کوهستان دارای نرخ فرسایش^{۱۷} می‌باشند. در کوهستان‌های که مقدار (Smf) بیش از عدد ۱/۵ باشد، با یک جبهه‌ی کوهستانی به شدت فرسایش یافته مواجه هستیم. جدول (۲) میزان فعالیت‌های تکتونیکی مناطق را بر اساس شاخص (Smf) نشان می‌دهند.

جدول ۲- تقسیم‌بندی فعالیت‌های تکتونیکی مناطق بر اساس میزان شاخص (Smf)

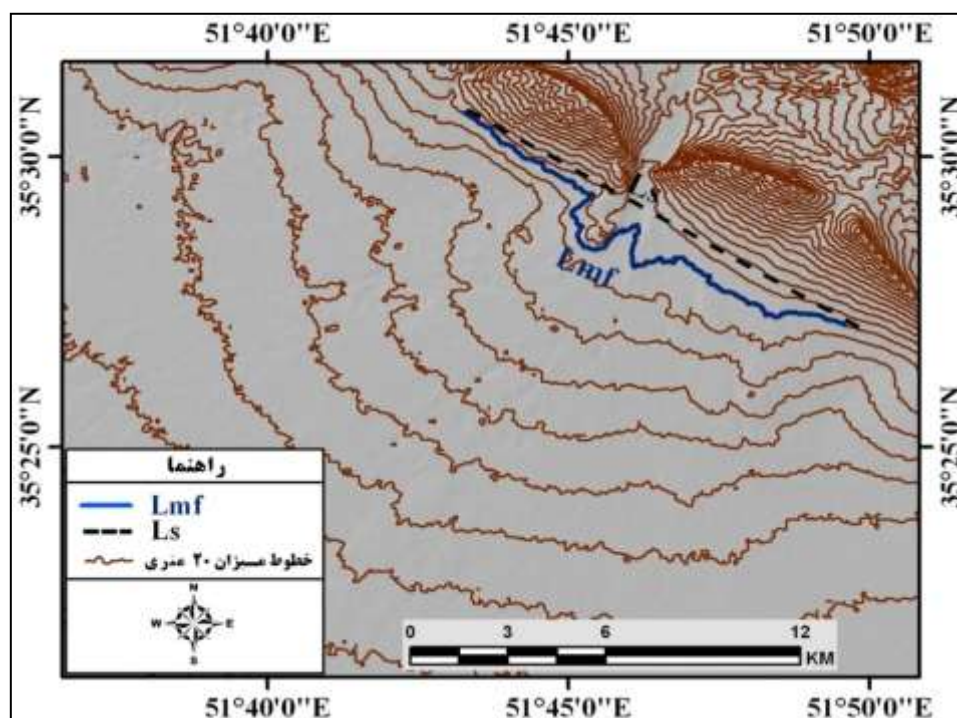
مناطق	بسیار فعال	با فعالیت متوسط	غیر فعال
میزان Smf	$Smf < 1/1$	$1/1 < Smf < 1/5$	$Smf > 1/5$

ماخذ: همدونی و همکاران، ۲۰۰۸

برای محاسبه میزان این شاخص در منطقه مورد مطالعه، بر روی نقشه‌ی توپوگرافی، مقاطعی مشخص گردید (شکل ۲) و سپس با استفاده از رابطه ذکر شده، میزان سینوزیته جبهه کوهستان محاسبه شد. شاخص به‌دست آمده و پارامترهای مربوط به آن در جدول شماره (۳) آمده است.

جدول ۳- شاخص (Smf) و پارامترهای آن در جبهه کوهستانی منطقه مورد مطالعه

مکان مقطع	$Lmf(m)$	$Ls(m)$	Smf	ارتفاع خط منحنی میزان (m)
شمال مخروط افکنه جاجرود	۲۱۲۴۹/۵	۱۴۷۸۲/۵	۱/۴	۱۱۴۰
شمال مخروط افکنه ایوانکی	۲۰۲۲۸/۱۹	۱۶۰۶۶۷	۱/۲	۱۱۲۰
شمال مخروط افکنه جبله‌رود	۱۵۵۱۶/۳	۱۳۷۸۷/۵	۱/۱	۹۸۰



شکل ۲: چگونگی اندازه‌گیری شاخص سینوسی جبهه کوهستان (smf) در مخروط افکنه جاجرود

طبق جدول شماره (۴) مشاهده می‌شود که، مقادیر به‌دست آمده از شاخص (Smf)، طبق کلاس‌بندی همدونی و همکارانش در کلاس ۲، یعنی مناطقی با فعالیت متوسط قرار می‌گیرند. بنابراین بر اساس این شاخص، منطقه مورد بررسی دارای فرسایش می‌باشد.

- شاخص پهنای دره به ارتفاع آن^{۱۸} (Vf)

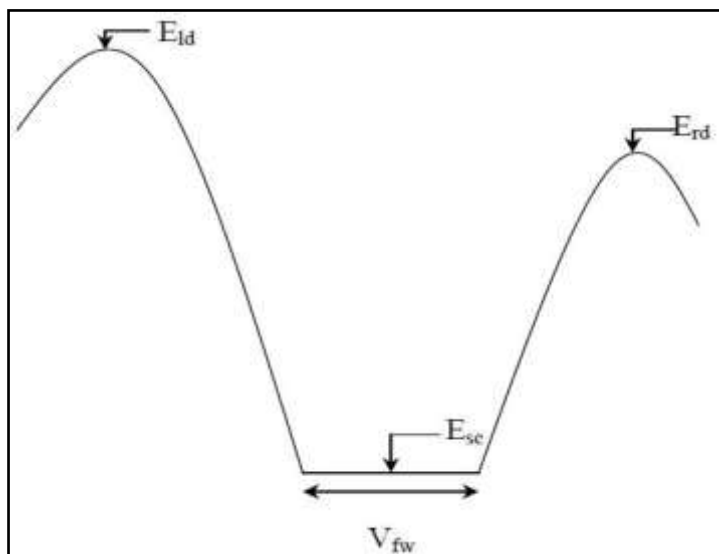
شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن، دره‌های (V) شکلی را که در پاسخ به بالاآمدگی، پایین دست خود را حفر می‌کنند، از دره‌های (U) شکلی که در اثر ثبات سطح اساس و آرامش تکتونیکی، فرسایش کناری در آن‌ها برتری دارد را متمایز می‌سازد (گارسیا-تورتاسا^{۱۹} و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۷۸). شاخص (Vf) به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (کلر و پیتر، ۱۹۹۶: ۱۴۰).

$$Vf = 2vfw / (E_{ld} - E_{sc}) + (E_{rd} - E_{sc})$$

Vf: نسبت پهنای دره به عمق آن؛ Vfw: عرض بستر دره؛ Esc: ارتفاع کف دره؛ Eld: ارتفاع خط مستقیم آب در سمت چپ دره؛ Erd: ارتفاع خط تقسیم آب در سمت راست دره می باشد (شکل ۳).

18- Valley Floor width to height

19- Garcia-tortosa et al



شکل ۳: تصویر شماتیک از پارامترهای لازم برای محاسبه شاخص (Vf)

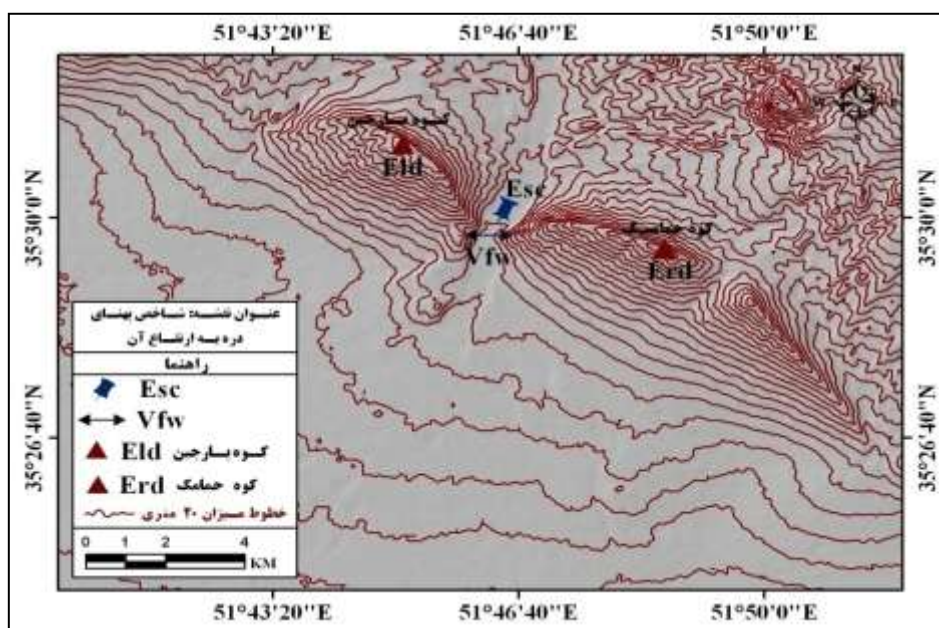
شاخص (Vf) را معمولاً در فاصله معینی از جبهه کوهستان، به سمت بالا دست رودخانه اندازه‌گیری می‌کنند (بول و مک‌فادن، ۱۹۷۷: ۱۷۸). با محاسبه شاخص (Vf) برای قسمت‌های نزدیک‌تر دره به جبهه کوهستان، می‌توان در مورد فعال یا غیر فعال بودن جبهه کوهستان قضاوت نمود. دره‌های با بستر پهن دارای مقادیر عددی زیاد و دره‌های عمیق و (V) شکل، مقادیر کم‌تری را نشان می‌دهند. در واقع تشکیل دره‌های (V) شکل در پاسخ به حرکات قائم و جوان است. در جدول (۴) میزان فعالیت‌های تکتونیکی مناطق بر اساس شاخص (Vf) ارائه شده است.

جدول ۴- تقسیم‌بندی فعالیت‌های تکتونیکی مناطق بر اساس میزان شاخص (Vf)

مناطق	بسیار فعال	با فعالیت متوسط	غیر فعال
میزان Vf	$Vf < 0/5$	$0/5 < Vf < 1$	$Vf > 1$

جدول ۵- میزان شاخص (Vf) و پارامترهای آن در منطقه مورد مطالعه

مکان مقطع	Vfm(m)	Esc(m)	Eld	Erd(m)	Vf
بین کوه حمامک و کوه پارچین	۵۵۱	۱۱۴۰	۱۳۸۰	۱۴۲۰	۱/۹
بین کوه ایوانکی و کوه کلوت درک	۶۰۰/۲	۱۱۲۰	۱۴۶۰	۱۳۸۰	۲
بین کوه سولک و کوه کلرز	۲۲۶/۱۵	۱۰۰۰	۱۱۸۰	۱۲۸۰	۰/۹



شکل ۴: چگونگی اندازه‌گیری شاخص پهنای دره به ارتفاع آن (Vf) در مخروط افکنه جاجرود

طبق جدول (۵) مقادیر به دست آمده از شاخص (Vf) در منطقه مورد مطالعه را، می‌توان به این صورت تحلیل نمود. جبهه کوهستانی در شمال مخروط افکنه حبله‌رود (بین کوه سولک و کوه کلرز) جزو کلاس ۲ یعنی مناطقی با فعالیت متوسط، که مشخصه مناطقی است که دره‌های (V) شکل دارند و رودخانه‌ها به‌طور فعال بستر خود را حفر می‌کنند بنابراین این دره‌ها در پاسخ به حرکات قائم و جوان ایجاد شده‌اند. و جبهه‌های کوهستانی در شمال مخروط افکنه‌های جاجرود (بین کوه حمامک و کوه پارچین) و ایوانکی (بین کوه ایوانکی و کوه کلوت‌درک) به کلاس ۳ این دسته‌بندی یعنی مناطق غیرفعال تعلق دارند که نشان دهنده آرامش نسبی تکتونیک و نزدیک شدن رودخانه به سطح اساس خود است که معرف دره‌های عریض (U) شکل هستند.

- شاخص عدم تقارن آبراهه‌ها در حوضه آبریز^{۲۰} (Af)

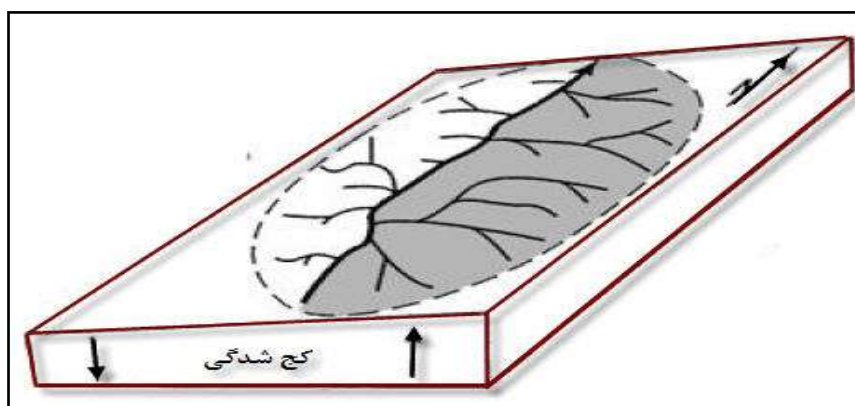
شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی، کج‌شدگی جانبی حوضه را نسبت به مسیر رودخانه اصلی، در اثر نیروهای تکتونیکی نشان می‌دهد (گوارنری و پیروتا^{۲۱}، ۲۰۰۸: ۲۶۵). در مناطق دارای تکتونیک فعال، به دلیل ظاهر شدن اثر این حرکات بر توپوگرافی محل، در یک سوی منطقه بالاآمدگی و در سوی دیگر فرونشست ایجاد می‌گردد. بنابراین طول آبراهه‌های فرعی در سوی فرسایش یافته بیش از طول آبراهه‌های منطقه فرونشست خواهد بود (مولین و همکاران، ۲۰۰۴). شاخص (Af) به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

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

20- Drainage Asymmetry Factor

21- Guarnieri and Pirrotta

Af: شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی؛ Ar: مساحت حوضه در سمت راست آبراهه اصلی در جهت پایین رود؛ At: مساحت کل حوضه زهکشی می‌باشد (شکل ۵). هرگاه مقادیر عددی این شاخص در حدود ۵۰ باشد، بیانگر وجود تقارن زهکش‌های فرعی نسبت به آبراهه اصلی و در نتیجه عدم وجود کج‌شدگی بر اثر فرسایش خواهد بود. مقادیر عددی بیش‌تر از ۵۰ نشان‌دهنده عملکرد فرسایش در ساحل سمت راست و مقدار کم‌تر از ۵۰، فرسایش را در ساحل سمت چپ نمایش می‌دهد. مساحت حوضه در برگیرنده‌ی زهکش‌های فرعی در سمت راست و مساحت کل حوضه‌های زهکشی طبق شکل شماره (۷) محاسبه گردید. در جدول شماره (۶) تقسیم‌بندی مناطق، براساس شاخص (Af) آمده است. نتایج بررسی این شاخص در منطقه مورد مطالعه به شرح جدول شماره (۷) است.



شکل ۵: بلوک دیاگرام یک حوضه زهکشی متاثر از حرکات فرسایشی

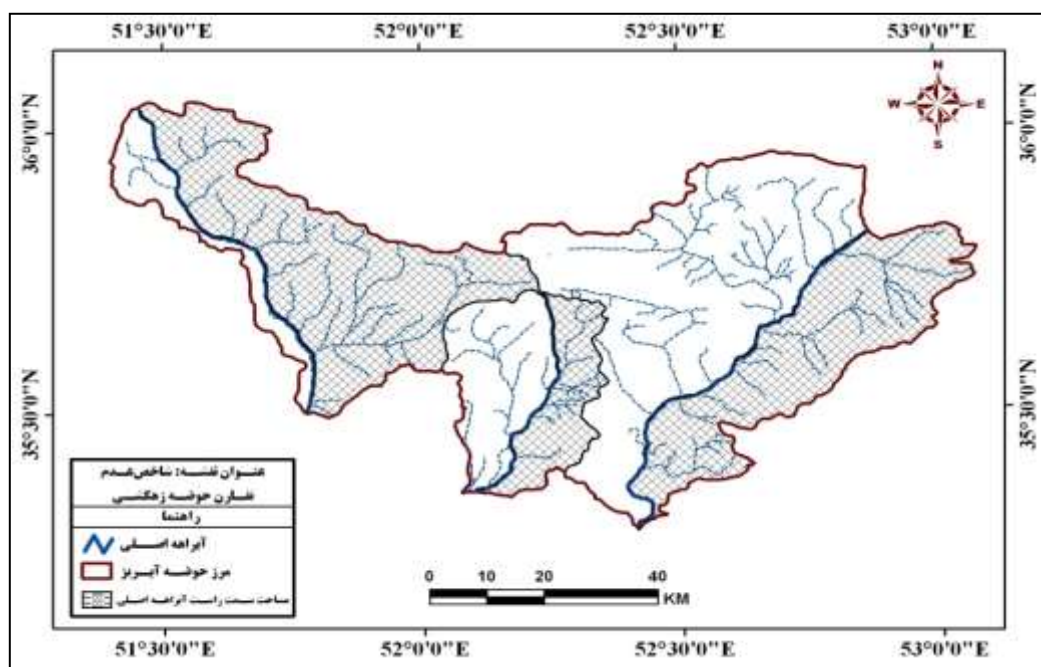
جدول ۶- تقسیم‌بندی فعالیت‌های تکتونیکی مناطق بر اساس میزان شاخص (Af)

مناطق	بسیار فعال	با فعالیت متوسط	غیرفعال
میزان Af	$Af-50 > 15$	$7 < Af-50 < 15$	$Af-50 < 7$

ماخذ: همدونی و همکاران، ۲۰۰۸

جدول ۷- میزان شاخص (Af) و پارامترهای آن در منطقه مورد مطالعه

مکان مقطع	At(km ²)	Ar(km ²)	Af	Af-50
حوضه آبریز جاجرود	۱۷۶۸/۹	۱۴۷۴/۳۲	۸۳/۳	۳۳/۳
حوضه آبریز ایوانکی	۸۸۶/۴	۳۶۳/۳۲	۴۰/۹	۹/۱
حوضه آبریز حبله رود	۳۰۸۸/۸	۱۱۱۵/۵	۳۶/۱	۱۳/۹



شکل ۶: نقشه موقعیت اندازه‌گیری شاخص عدم تقارن آبراهه اصلی در حوضه‌های مورد مطالعه

از نتایج به‌دست آمده این طور استنباط می‌شود که در حوضه آبریز جاجرود فرسایش در ساحل سمت راست ادامه دارد، در حالی که در حوضه‌های حبله‌رود و ایوانکی فرسایش در ساحل سمت چپ در جریان است. هم‌چنین بر اساس کلاس‌بندی ارائه شده توسط همدونی و همکارانش، حوضه جاجرود در کلاس ۱ که بیانگر مناطق فعال هستند، قرار می‌گیرد و حوضه‌های حبله‌رود و ایوانکی جزو مناطق با فعالیت متوسط معرفی می‌شوند.

- شاخص گرادیان طولی رودخانه^{۲۲} (SL)

شاخص شیب طولی رودخانه به تغییرات شیب آبراهه حساس است و می‌تواند هرگونه بی‌نظمی را که در اثر فعالیت‌های تکتونیکی یا مقاومت سنگ در شیب طولی آبراهه ایجاد شده است، نشان دهد (رامیرز-هررا^{۲۳}، ۱۹۹۸: ۳۲۳). این شاخص به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

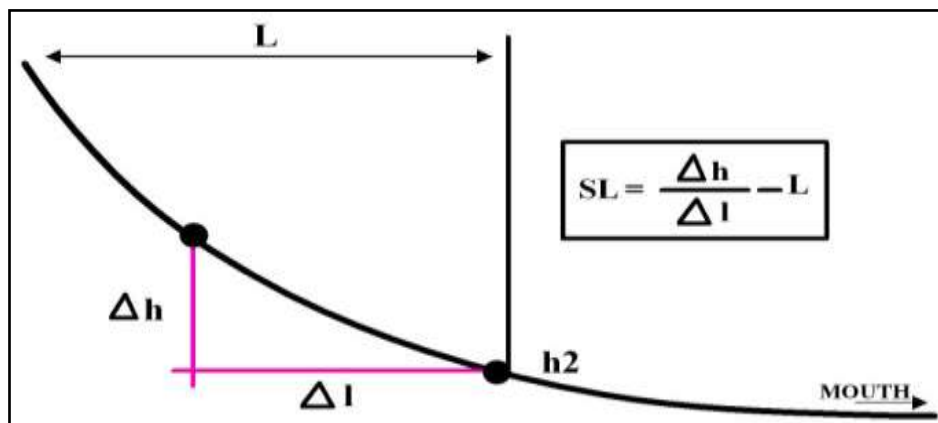
$$SL = (\Delta H / \Delta L)L$$

SL: شاخص گرادیان طولی رودخانه؛ $\Delta H / \Delta L$: شیب آبراهه یا گرادیان یک قطعه؛ ΔH : اختلاف ارتفاع قطعه مورد نظر؛ ΔL : طول شاخه مورد نظر؛ L: مجموع طول آبراهه از نقطه‌ای که شاخص محاسبه می‌شود تا مرتفع‌ترین نقطه‌ی آبراهه در بالادست می‌باشد (شکل ۷) (گارسیا-تورتاسا و همکاران^{۲۴}، ۲۰۰۸: ۳۸۰؛ ده‌بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰: ۵).

22- Stream Length Gradient Index

23- Ramirez-Herra

24- Garcia-Tortosa et al



شکل ۷: تصویر شماتیک پارامترهای لازم جهت محاسبه شاخص (SL)

مقادیر زیاد (SL) در سنگ‌های دارای مقاومت کم و یا در سنگ‌های از لحاظ مقاومت یکسان، می‌تواند بیانگر حرکات تکتونیکی فعال و جوان باشد. برای محاسبه شاخص (SL) در رودخانه‌های اصلی جاجرود، ایوانکی و حبله‌رود با استفاده از مدل ارتفاع رقومی مقطعی با اختلاف ارتفاع ۱۰۰ متر طبق مشخص گردید که با توجه به ارتفاع هر حوضه، تعداد ۱۶ مقطع در حوضه جاجرود ۲۶ مقطع در حوضه ایوانکی و ۱۰ مقطع در حوضه حبله‌رود برای بررسی این شاخص در نظر گرفته شدند و مقدار متوسط این شاخص برای هر ۳ حوضه محاسبه گردید. نتایج طبقه‌بندی در جداول (۹، ۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است. در جدول (۸) میزان فعالیت‌های تکتونیکی مناطق بر اساس شاخص (SL) ارائه شده است.

جدول ۸- تقسیم‌بندی فعالیت‌های تکتونیکی مناطق بر اساس میزان شاخص (SL)

مناطق	بسیار فعال	با فعالیت متوسط	غیر فعال
میزان SL	$SL > 500$	$300 < SL < 500$	$SL < 300$

ماخذ: ده‌بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰

جدول ۹- پارامترهای لازم برای محاسبه شاخص (SL) و وضعیت تکتونیکی آن‌ها در حوضه جاجرود

وضعیت تکتونیکی	SL	L(m)	$\Delta H / \Delta L$	$\Delta L(m)$	$\Delta H(m)$	منحنی میزان
بسیار فعال	۶۰۹/۸۳	۶۷۶۰۰	۰/۰۰۹	۱۱۰۸۵	۱۰۰	۱۱۴۰-۱۲۴۰
بسیار فعال	۵۶۵/۶۸	۵۷۷۰۰	۰/۰۰۹	۱۰۲۰۰	۱۰۰	۱۲۴۰-۱۳۴۰
بسیار فعال	۵۵۶/۹۳	۴۹۰۱۰	۰/۰۱۱	۸۸۰۰	۱۰۰	۱۳۴۰-۱۴۴۰
بسیار فعال	۷۸۳/۰۱	۴۱۵۰۰	۰/۰۱۸	۵۳۰۰	۱۰۰	۱۴۴۰-۱۵۴۰
با فعالیت متوسط	۴۱۲/۹۴	۳۵۱۰۰	۰/۰۱۱	۸۵۰۰	۱۰۰	۱۵۴۰-۱۶۴۰

با فعالیت متوسط	۴۵۵/۷۳	۲۷۸۰۰	۰/۰۱۶	۶۱۰۰	۱۰۰	۱۶۴۰-۱۷۴۰
با فعالیت متوسط	۴۳۵/۱۲	۲۱۸۰۰	۰/۰۱۹	۵۰۱۰	۱۰۰	۱۷۴۰-۱۸۴۰
با فعالیت متوسط	۳۷۱/۰۸	۱۷۰۷۰	۰/۰۲۱	۴۶۰۰	۱۰۰	۱۸۴۰-۱۹۴۰
با فعالیت متوسط	۴۶۵/۵۱	۱۳۵۰۰	۰/۰۳۴	۲۹۰۰	۱۰۰	۱۹۴۰-۲۰۴۰
با فعالیت متوسط	۳۳۶/۵۶	۱۰۴۰۰	۰/۰۳۲	۳۰۹۰	۱۰۰	۲۰۴۰-۲۱۴۰
بسیار فعال	۷۴۵/۴۵	۸۲۰۰	۰/۰۹	۱۱۰۰	۱۰۰	۲۱۴۰-۲۲۴۰
با فعالیت متوسط	۴۲۵	۶۸۰۰	۰/۰۶	۱۶۰۰	۱۰۰	۲۲۴۰-۲۳۴۰
غیر فعال	۲۸۸/۸۸	۵۲۰۰	۰/۰۵	۱۸۰۰	۱۰۰	۲۳۴۰-۲۴۴۰
غیر فعال	۲۴۲/۸۵	۳۴۰۰	۰/۰۷	۱۴۰۰	۱۰۰	۲۴۴۰-۲۵۴۰
غیر فعال	۱۶۶/۶۶	۲۰۰۰	۰/۰۸	۱۲۰۰	۱۰۰	۲۵۴۰-۲۶۴۰
غیر فعال	۵۰	۴۰۰	۰/۱۲	۸۰۰	۱۰۰	۲۶۴۰-۲۷۴۰

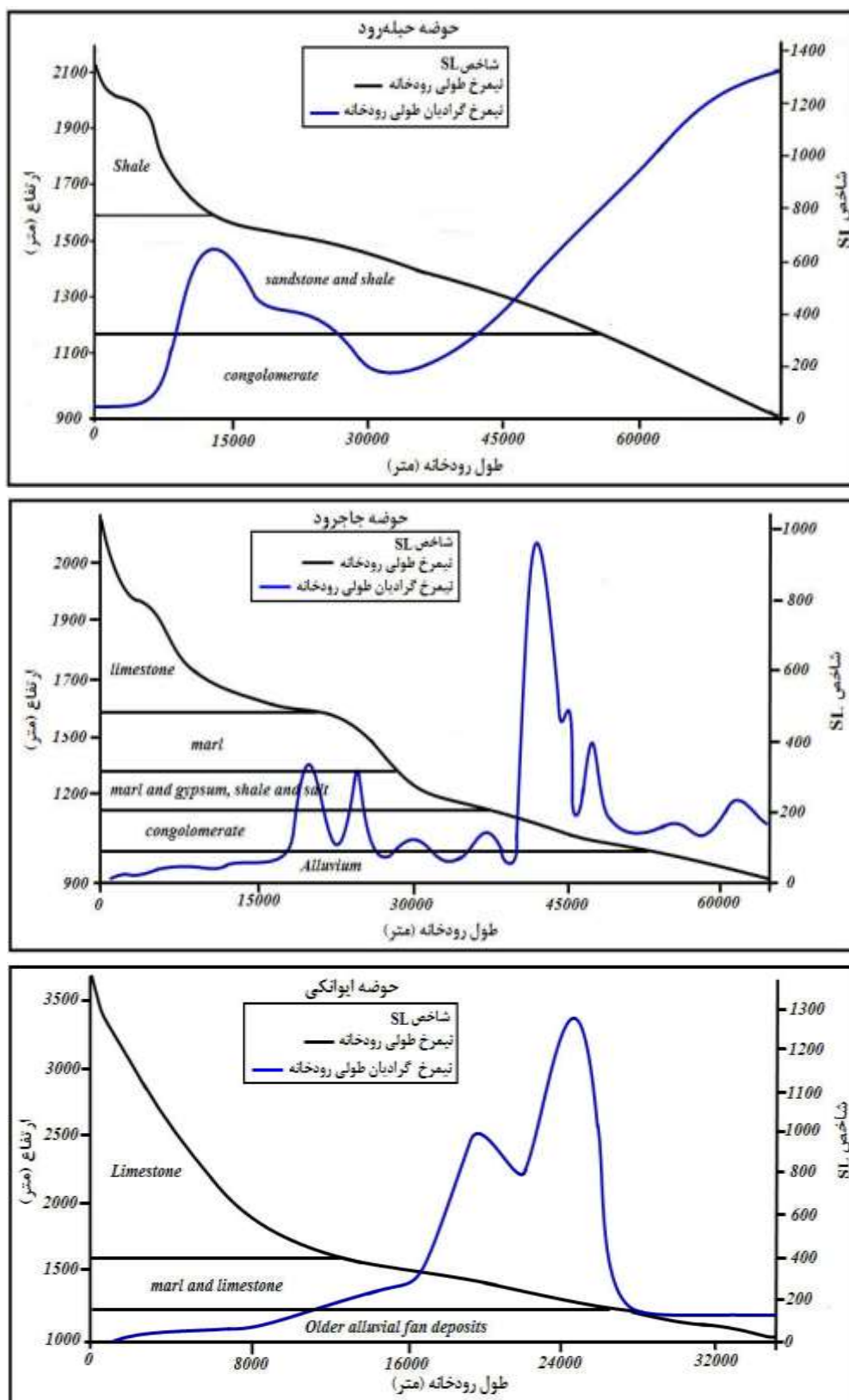
جدول ۱۰- پارامترهای لازم برای محاسبه شاخص (SL) و وضعیت تکتونیکی آنها در حوضه ایوانکی

وضعیت تکتونیکی	SL	L(m)	$\Delta H / \Delta L$	$\Delta L(m)$	$\Delta H(m)$	منحنی میزان
بسیار فعال	۷۱۸/۱۶	۴۷۱۲۶	۰/۰۱۵	۶۵۶۲	۱۰۰	۱۱۰۰-۱۲۰۰
بسیار فعال	۶۹۰/۲۶	۴۱۵۴۰	۰/۰۱۶	۶۰۱۸	۱۰۰	۱۲۰۰-۱۳۰۰
بسیار فعال	۶۱۲/۹۸	۳۴۹۴۰	۰/۰۱۷	۵۷۰۰	۱۰۰	۱۳۰۰-۱۴۰۰
بسیار فعال	۷۱۱/۳۹	۳۰۵۹۰	۰/۰۲۳	۴۳۰۰	۱۰۰	۱۴۰۰-۱۵۰۰
بسیار فعال	۷۴۵/۵۵	۲۶۸۴۰	۰/۰۲۷	۳۶۰۰	۱۰۰	۱۵۰۰-۱۶۰۰
بسیار فعال	۵۲۸/۱۳	۲۲۷۱۰	۰/۰۲۳	۴۳۰۰	۱۰۰	۱۶۰۰-۱۷۰۰
بسیار فعال	۴۹۴/۷۳	۱۸۸۰۰	۰/۰۲۶	۳۸۰۰	۱۰۰	۱۷۰۰-۱۸۰۰
بسیار فعال	۶۷۳/۹۱	۱۵۵۰۰	۰/۰۴۳	۲۳۰۰	۱۰۰	۱۸۰۰-۱۹۰۰
بسیار فعال	۱۰۴۶/۱۵	۱۳۶۰۰	۰/۰۷۶	۱۳۰۰	۱۰۰	۱۹۰۰-۲۰۰۰
با فعالیت متوسط	۳۷۲/۵۴	۱۱۴۰۰	۰/۰۳۲	۳۰۶۰	۱۰۰	۲۰۰۰-۲۱۰۰
با فعالیت متوسط	۴۶۸/۴۲	۸۹۰۰	۰/۰۵۲	۱۹۰۰	۱۰۰	۲۱۰۰-۲۲۰۰
بسیار فعال	۵۶۹/۲۳	۷۴۰۰	۰/۰۷۶	۱۳۰۰	۱۰۰	۲۲۰۰-۲۳۰۰
با فعالیت متوسط	۴۵۳/۸۴	۵۹۰۰	۰/۰۷۶	۱۳۰۰	۱۰۰	۲۳۰۰-۲۴۰۰
با فعالیت متوسط	۳۸۳/۳۳	۴۶۰۰	۰/۰۸۳	۱۲۰۰	۱۰۰	۲۴۰۰-۲۵۰۰

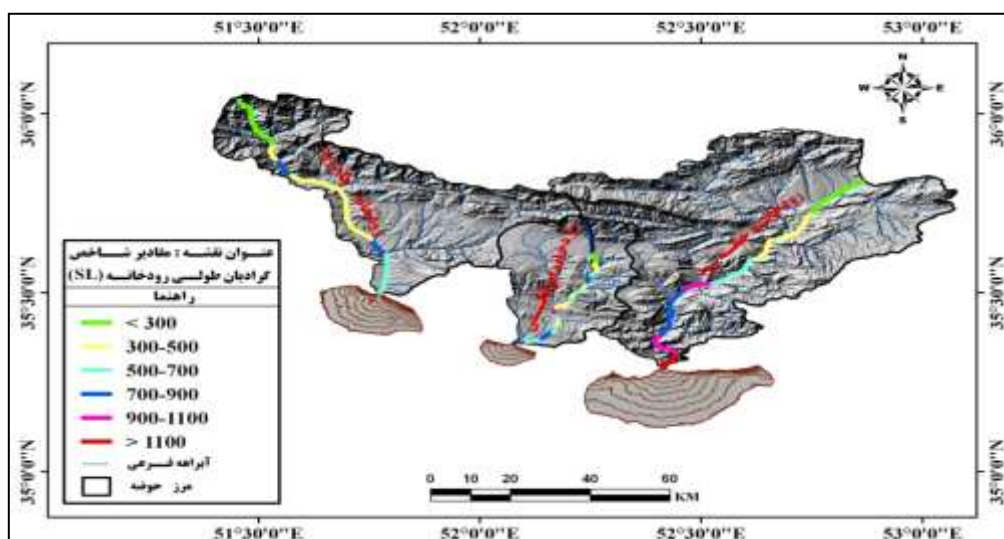
بسیار فعال	۵۲۹/۴۱	۳۶۰۰	۰/۱۴	۶۸۰	۱۰۰	۲۵۰۰-۲۶۰۰
با فعالیت متوسط	۵۰۰	۳۱۰۰	۰/۱۶	۶۲۰	۱۰۰	۲۶۰۰-۲۷۰۰
بسیار فعال	۷۳۵/۲۹	۲۵۰۰	۰/۲۹	۳۴۰	۱۰۰	۲۷۰۰-۲۸۰۰
بسیار فعال	۷۳۳/۳۳	۲۲۰۰	۰/۳۳	۳۰۰	۱۰۰	۲۸۰۰-۲۹۰۰
بسیار فعال	۵۸۰/۶۴	۱۸۰۰	۰/۳۲	۳۱۰	۱۰۰	۲۹۰۰-۳۰۰۰
بسیار فعال	۶۰۷/۶۹	۱۵۸۰	۰/۳۸	۲۶۰	۱۰۰	۳۰۰۰-۳۱۰۰
بسیار فعال	۶۷۵	۱۳۵۰	۰/۵	۲۰۰	۱۰۰	۳۱۰۰-۳۲۰۰
بسیار فعال	۵۰۲/۵	۱۱۱۰	۰/۴۵	۲۲۰	۱۰۰	۳۲۰۰-۳۳۰۰
با فعالیت متوسط	۳۹۰/۹	۸۶۰	۰/۴۵	۲۲۰	۱۰۰	۳۳۰۰-۳۴۰۰
با فعالیت متوسط	۳۲۳/۸	۶۸۰	۰/۴۷	۲۱۰	۱۰۰	۳۴۰۰-۳۵۰۰
غیر فعال	۲۳۵	۴۷۰	۰/۵	۲۰۰	۱۰۰	۳۵۰۰-۳۶۰۰
غیر فعال	۱۵۸/۸۲	۱۷۰	۰/۵۸	۱۷۰	۱۰۰	۳۶۰۰-۳۷۰۰

جدول ۱۱- پارامترهای لازم برای محاسبه شاخص (SL) و وضعیت تکنیکی آن‌ها در حوضه حبله رود

وضعیت تکنیکی	SL	L(m)	$\Delta H / \Delta L$	$\Delta L(m)$	$\Delta H(m)$	منحنی میزان
بسیار فعال	۱۱۴۲/۶۵	۸۱۷۰۰	۰/۰۱۳	۷۱۵۰	۱۰۰	۹۸۰-۱۰۸۰
بسیار فعال	۹۱۸/۸۱	۷۴۷۰۰	۰/۰۱۲	۸۱۳۰	۱۰۰	۱۰۸۰-۱۱۸۰
بسیار فعال	۸۸۰/۲۶	۶۶۹۰۰	۰/۰۱۳	۷۶۰۰	۱۰۰	۱۱۸۰-۱۲۸۰
بسیار فعال	۹۰۴/۵۴	۵۹۷۰۰	۰/۰۱۵	۶۶۰۰	۱۰۰	۱۲۸۰-۱۳۸۰
بسیار فعال	۵۸۴/۴۳	۵۱۴۳۰	۰/۰۱۱	۸۸۰۰	۱۰۰	۱۳۸۰-۱۴۸۰
با فعالیت متوسط	۴۸۸/۴۴	۴۴۴۰۰	۰/۰۱۱	۹۰۹۰	۱۰۰	۱۴۸۰-۱۵۸۰
با فعالیت متوسط	۴۲۲/۶۱	۳۵۵۰۰	۰/۰۱۱	۸۴۰۰	۱۰۰	۱۵۸۰-۱۶۸۰
با فعالیت متوسط	۳۱۶/۸۶	۲۶۳۰۰	۰/۰۱۲	۸۳۰۰	۱۰۰	۱۶۸۰-۱۷۸۰
غیر فعال	۲۷۳/۵	۱۹۲۰۰	۰/۰۱۴	۷۰۲۰	۱۰۰	۱۷۸۰-۱۸۸۰
غیر فعال	۱۰۰/۹۷	۱۰۴۰۰	۰/۰۰۹	۱۰۳۰۰	۱۰۰	۱۸۸۰-۱۹۸۰



شکل ۸: نیمرخ و گرادبان طولی رودخانه‌های حبلرود، جاجرود و ایوانکی



شکل ۹: نقشه موقعیت مقاطع در حوضه‌های مورد مطالعه جهت محاسبه شاخص (SL)

با توجه به جدول (۹) ملاحظه می‌شود که متوسط مقدار این شاخص در حوضه‌های ایوانکی (۵۵۵/۴۲) و حبله‌رود (۶۰۳/۳۰) بیش‌تر است و لذا این حوضه‌ها در کلاس ۱ فعالیت‌های تکتونیکی قرار می‌گیرند و حوضه جاجرود با متوسط (۴۳۱/۳۸) به کلاس ۲ یعنی مناطق با فعالیت متوسط تعلق دارد. این در حالی است که حوضه‌های جاجرود، حبله‌رود و ایوانکی به علت قرارگیری در زون البرز مرکزی پوشیده از سنگ‌های مقاوم می‌باشند. از سوی دیگر این رودخانه‌ها، دارای طول زیادی هستند در نتیجه می‌توان علت بالابودن مقادیر این شاخص را به فعالیت‌های تکتونیکی حوضه نسبت داد.

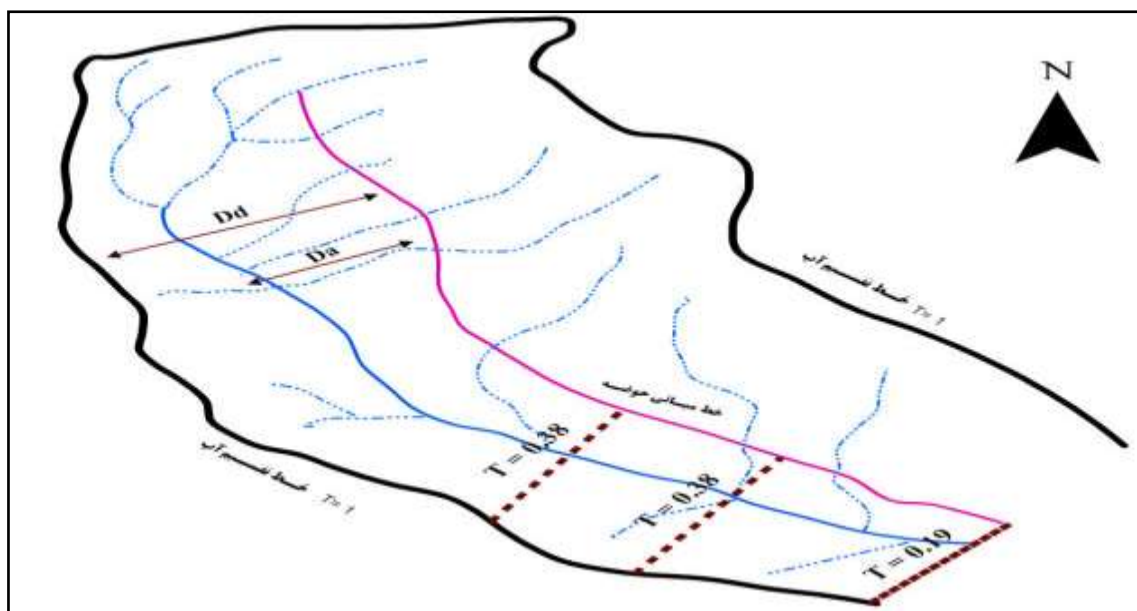
- شاخص تقارن توپوگرافی عرضی T^0

شاخص دیگری که می‌توان برای ارزیابی نامتقارن بودن حوضه و متعاقب آن، در بررسی حرکات تکتونیکی فعال از آن سود جست، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی می‌باشد. این شاخص به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (کلر و پیتر، ۱۹۹۶: ۱۲۷).

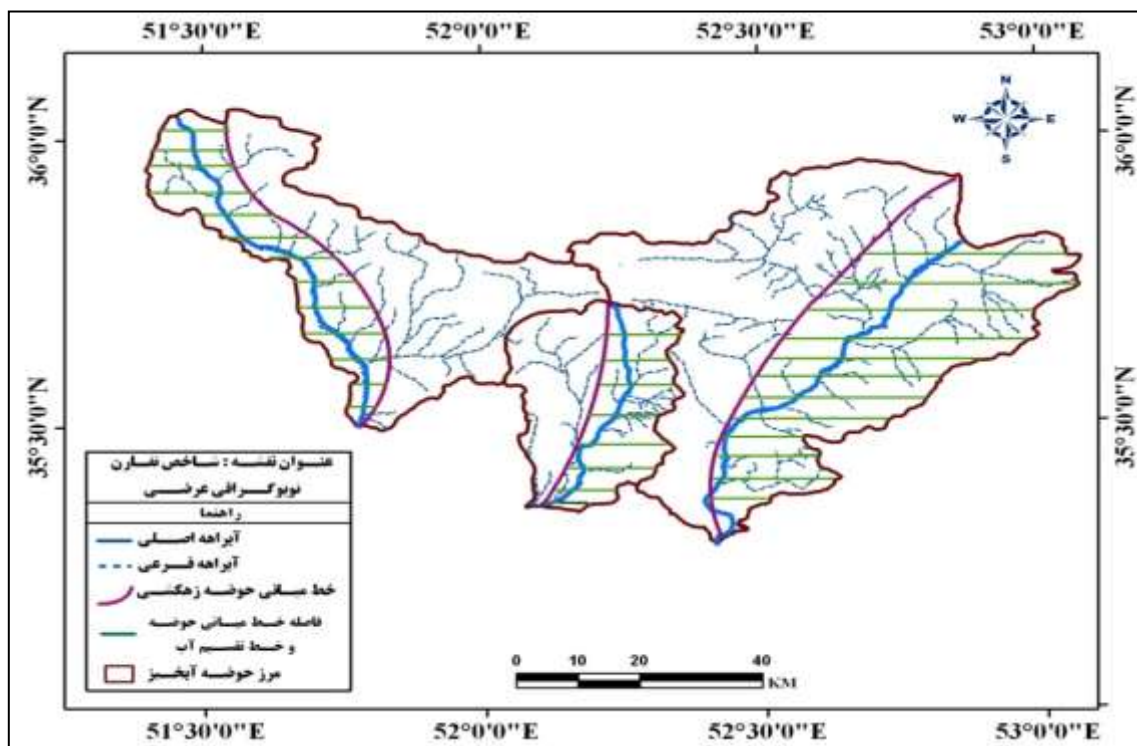
$$T = Da/Dd$$

Da: فاصله خط میانی حوضه زهکشی تا کمربند فعال مئاندري؛ Dd: فاصله خط میانی حوضه و خط تقسیم آب می‌باشد. مقدار عددی این شاخص در حوضه‌های متقارن برابر با صفر است و هرچه به عدد یک نزدیک‌تر شود، تقارن حوضه کاهش می‌یابد. فرض بر این است که شیب طبقات بر مهاجرت کانال اصلی رودخانه تأثیر ناچیزی دارد، در این صورت مهاجرت ناحیه‌ای کانال رودها دلیلی بر کج‌شدگی زمین بر اثر فعالیت‌های تکتونیکی می‌باشد.

بنابراین (T) بیانگر یک بردار با جهت و مقدار ۰-۱ می‌باشد (کلر و پیتر، ۱۹۹۶: ۱۲۷). در شکل (۱۰) مقادیر (T) محاسبه شده برای بخش‌های مختلف دره‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱۰: تصویر شماتیک پارامترهای لازم جهت محاسبه شاخص (T)



شکل ۱۱: نقشه موقعیت مقاطع جهت محاسبه شاخص (T) در حوضه‌های مورد مطالعه

برای برآورد پارامترهای موردنیاز شاخص (T) در منطقه مورد مطالعه، مقادیر (Da) و (Dd) برای هر سه حوضه در فواصل ۵ کیلومتری اندازه‌گیری شد. بنابراین با توجه به وسعت حوضه‌های مورد مطالعه، در حوضه‌ی جاجرود ۱۳ مقطع، در حوضه حبله‌رود ۱۲ و در حوضه ایوانکی ۸ مقطع، بررسی شد (شکل ۱۱).

در جداول (۱۲، ۱۳ و ۱۴) مقادیر عددی شاخص (T) به همراه سایر پارامترهای لازم برای منطقه مورد مطالعه آمده است. مقادیر عددی شاخص (T) در هر سه حوضه، نشان‌دهنده نامتقارن بودن این حوضه‌ها بر اثر فعالیت‌های تکتونیکی است، اما میزان این نامتقارنی در هر حوضه متفاوت می‌باشد. مقادیر این شاخص در حوضه جاجرود تقریباً نزدیک به یک بوده و میانگین مقطع‌های ذکر شده، برابر با ۰/۶۲ می‌باشد و لذا در این حوضه تقارن توپوگرافی وجود دارد. میزان شاخص (T) در حوضه‌های حبله‌رود و ایوانکی، نشان‌دهنده عدم تقارن نسبی این حوضه‌ها می‌باشد. میانگین این شاخص در حوضه حبله‌رود ۰/۲۲ و در حوضه ایوانکی ۰/۱۸ است و از لحاظ تکتونیک فعال می‌باشند.

جدول ۱۲- مقاطع اندازه‌گیری شده شاخص (T) در حوضه جاجرود

شماره مقطع	Da(m)	Dd(m)	T
۱	۲۰۵۸/۸	۴۶۱۸/۴	۰/۴۴
۲	۳۶۷۲/۵	۵۲۸۶/۱	۰/۶۹
۳	۶۱۷۶/۴	۱۰۲۳۸/۵	۰/۶۰
۴	۹۳۴۸/۳	۱۳۵۷۷/۶	۰/۶۸
۵	۹۸۴۸/۹	۱۲۷۴۲/۴	۰/۷۷
۶	۷۱۲۲/۴	۱۰۳۴۹/۷	۰/۶۸
۷	۵۶۷۵/۶	۸۴۵۷/۸	۰/۶۷
۸	۱۱۸۵۲/۱	۱۳۹۱۱	۰/۸۵
۹	۱۰۷۳۹/۳	۱۵۴۱۳/۵	۰/۶۹
۱۰	۹۶۲۶/۴	۲۰۲۵۴/۵	۰/۴۷
۱۱	۷۰۶۶/۷	۱۸۳۶۲/۵	۰/۳۸
۱۲	۸۶۸۰/۴	۱۵۸۵۸/۵	۰/۵۴
۱۳	۷۹۰۱/۴	۱۲۷۹۸/۱	۰/۶۱
میانگین	۷۶۷۴/۵	۱۲۴۵۱/۴	۰/۶۲

جدول ۱۳- مقاطع اندازه‌گیری شده شاخص (T) در حوضه حبله‌رود

شماره مقطع	Da(m)	Dd(m)	T
۱	۲۵۵۹/۶	۵۲۸۶/۴	۰/۴۸
۲	۲۲۹/۴	۱۸۰۸۴/۳	۰/۰۱
۳	۷۲۳/۳	۱۶۱۳۶/۸	۰/۰۴
۴	۱۱۱/۲	۱۲۲۴۱/۶	۰/۰۰۹
۵	۱۶۱۳/۶	۲۷۳۲۱/۲	۰/۰۵
۶	۷۴۰۰/۶	۲۸۴۳۴/۱	۰/۲۶
۷	۷۷۳۴/۵	۲۸۲۱/۵	۰/۲۷
۸	۸۹۵۸/۶	۳۷۱۱۴/۵	۰/۲۴
۹	۱۲۸۵۳/۷	۳۷۵۵۹/۷	۰/۳۴
۱۰	۱۲۰۷۴/۷	۳۵۸۳۴/۸	۰/۳۳
۱۱	۱۱۹۰۷/۸	۳۹۶۱۸/۵	۰/۳۰
۱۲	۱۳۳۵۴/۵	۳۶۹۴۷/۶	۰/۳۶
میانگین	۶۶۱۸/۴	۲۴۷۸۳/۴	۰/۲۲

جدول ۱۴- مقاطع اندازه‌گیری شده شاخص (T) در حوضه ایوانکی

شماره مقطع	Da(m)	Dd(m)	T
۱	۲۹۴۲/۱	۱۰۹۲۳/۶	۰/۲۶
۲	۲۱۵۹/۹	۱۳۷۷۱/۹	۰/۱۵
۳	۰	۱۴۵۵۴/۴	۰
۴	۱۰۰۱/۵	۹۵۱۵/۱	۰/۱۰
۵	۲۴۴۱/۵	۱۱۰۴۸/۸	۰/۲۲
۶	۳۱۳۰/۱	۱۰۸۹۲/۳	۰/۲۸
۷	۲۷۸۵/۶	۱۰۱۰۹/۸	۰/۲۷
۸	۳۰۰۴/۷	۱۲۵۵۱/۲	۰/۲۳
میانگین	۲۱۸۳/۱	۱۱۶۷۰/۸	۰/۱۸

- شاخص ضریب مخروط‌گرایی^{۲۶} (FCI)

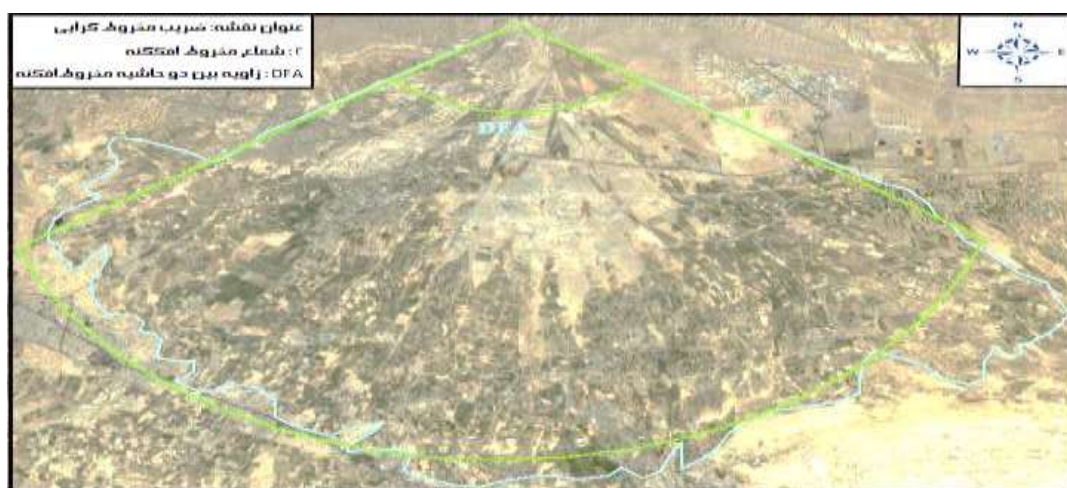
شکل واقعی یک مخروط افکنه شباهت زیادی به مخروط دارد. معیار سنجش شکل واقعی یک مخروط افکنه، نخستین بار توسط موکرچی^{۲۷} در سال ۱۹۷۶ ارائه شد. ضریب مخروط‌گرایی برای یک مخروط افکنه مشخص و تبیین می‌باشد. مخروط افکنه‌ای که دارای ضریب مخروط‌گرایی یک باشد، کم‌تر تحت تأثیر عوامل مخرب و محدودکننده قرار گرفته است و به شکل یک مخروط واقعی نزدیک‌تر است. هرچه میزان این شاخص از عدد یک کم‌تر باشد نشان‌دهنده این است که مخروط افکنه کم‌تر اجازه رشد و تکامل یافته است که علت این امر فعالیت‌های فرسایشی و یا فعالیت‌های تکتونیکی می‌باشد. این شاخص با استفاده از رابط زیر محاسبه می‌شود (موکرچی، ۱۹۷۶: ۱۹۹).

$$FCI = \frac{AIF}{ATF}$$

AIF^{۲۸}: مساحت مخروط ایده‌آل؛ ATF^{۲۹}: مساحت واقعی مخروط افکنه است. برای محاسبه‌ی مخروط ایده‌آل نیز رابطه زیر بیان می‌شود:

$$ALF = \pi r^2 \times DFA / 360$$

π : عدد پی معادل ۳/۱۴؛ r^2 : شعاع مخروط افکنه؛ DFA: زاویه بین دو حاشیه‌ی مخروط افکنه که در محل رأس آن اندازه‌گیری می‌شود. در شکل (۱۲) پارامترهای لازم جهت محاسبه و بررسی این شاخص، در منطقه مورد مطالعه آمده است.



شکل ۱۲: چگونگی اندازه‌گیری شاخص ضریب مخروط‌گرایی (FCI) در مخروط افکنه جاجرد

26- Fan Conicality Index

27- Mukerji

28- Area of Equivalent Ideal Fan

29- Area of Terminal Fan

جدول ۱۵- پارامترهای لازم برای محاسبه ضریب مخروط‌گرایی (FCI)

مخروط‌افکنه	$r^2(km)$	DFA	$AIF(km^2)$	$ATF(km^2)$	FCI
جاجرود	۲۹۴/۹۸	۸۰	۲۰۵/۷۴	۲۱۶/۶۱	۰/۹۵
حبله‌رود	۲۶۰/۶۷	۸۸	۲۰۰/۰۷	۳۱۵/۱۳	۰/۶۳
ایوانکی	۶۹/۲۱	۶۷	۴۰/۴۴	۵۵/۹۷	۰/۷۲

طبق جدول (۱۵) مشاهده می‌شود که ضرایب مخروط‌گرایی در هر سه مخروط‌افکنه، ارقام کم‌تر از یک را نمایش می‌دهند. پس می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که گسترش مخروط‌افکنه‌های منطقه مورد مطالعه، تحت تأثیر تکتونیک و سایر عوامل فرسایش مانند آب و هوا، دچار تغییر شده و به تکامل واقعی خود نرسیده‌اند.

- شاخص ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیکی $(Iat)^{30}$

شاخص ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیکی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Iat = S/N$$

Iat : شاخص فعالیت‌های نسبی تکتونیکی؛ S : مجموع کلاس‌های شاخص‌های ژئومورفیک محاسبه شده؛ N : تعداد شاخص‌های محاسبه شده می‌باشد. طبقات مختلف شاخص (Iat) به صورت جدول زیر است (همدونی و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۷۱).

جدول ۱۶- طبقه‌بندی شاخص فعالیت‌های تکتونیکی (Iat)

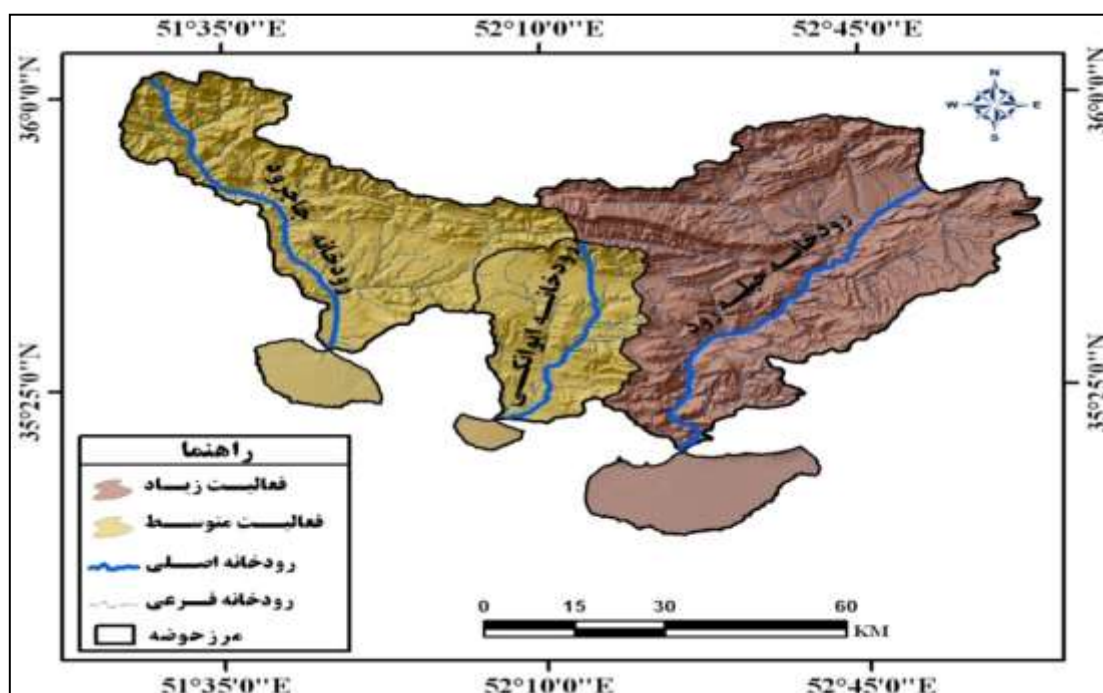
فعالیت تکتونیکی شدید	فعالیت تکتونیکی زیاد	فعالیت تکتونیکی متوسط	فعالیت تکتونیکی کم
$1 < Iat < 1/5$	$1/5 < Iat < 2$	$2 < Iat < 2/5$	$2/5 > Iat$

برای محاسبه این شاخص، از بین ۶ شاخص محاسبه شده در منطقه مورد مطالعه، تعداد ۵ شاخص که دارای کلاس‌بندی بودند انتخاب گردید. در جدول (۱۷) نتایج ارزیابی شاخص فعالیت‌های تکتونیکی (Iat) قابل مشاهده است.

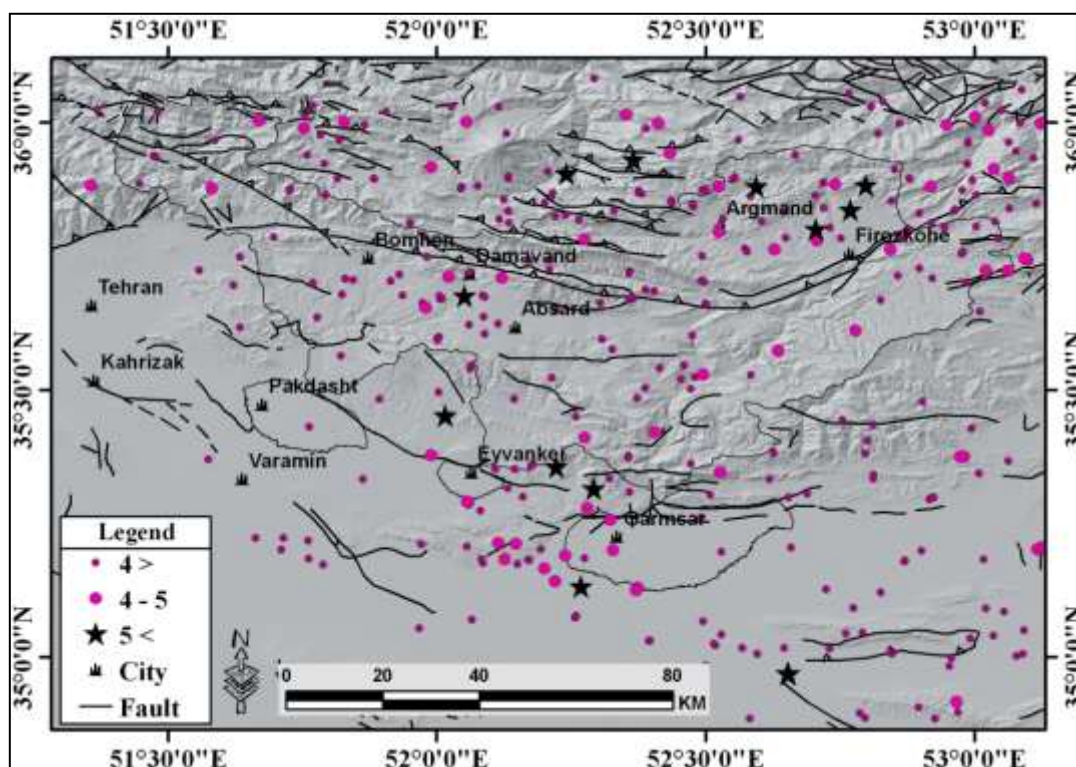
جدول ۱۷- مقدار شاخص فعالیت‌های تکتونیکی (Iat) در منطقه مورد مطالعه

موقعیت	Smf	Vf	Af	T	SL	Iat	کلاس فعالیت
حوضه جاجرود	۲	۳	۱	۳	۲	۲/۲	متوسط
حوضه حبله‌رود	۲	۲	۳	۱	۱	۱/۸	زیاد
حوضه ایوانکی	۲	۳	۳	۱	۱	۲	متوسط

با ارزیابی شاخص مزبور در منطقه مورد مطالعه مشخص شد، در حوضه جاجرود کلاس فعالیت‌های تکتونیکی زیاد و حوضه‌های ایوانکی و حبله‌رود در کلاس فعالیت‌های تکتونیکی متوسط قرار دارند (شکل ۱۳). داده‌های موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران^{۳۱} (۲۰۱۲-۱۹۳۷)، نیز بیش‌ترین زمین‌لرزه را در حوالی گسل گرمسار، به‌ویژه قسمت‌های غربی آن ثبت کرده است و این‌گونه به نظر می‌رسد که نسبت به بخش شرقی خود فعالیت بیش‌تری دارد (شکل ۱۴).



شکل ۱۳: کلاس‌های ارزیابی نسبی فعالیت‌های تکتونیکی (Iat)



شکل ۱۴: پراکندگی زمین لرزه‌های رخ داده در منطقه طی سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۳۷، نشان دهنده‌ی فعال بودن تکتونیک در البرز جنوبی است (اطلاعات لرزه‌شناسی بر اساس داده‌های موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران است).

نتیجه‌گیری

پایه‌ی سنگ‌های رسوبی البرز مرکزی، به‌شکل ده‌ها تاقدیس و ناودیس چین خورده‌اند که گسل‌های بزرگ موازی با محور چین‌ها، دیواره‌های عظیم گسلی در آن ایجاد کرده‌اند. بررسی و تحلیل داده‌های GPS در این بخش از ایران میزان کوتاه‌شدگی شمالی-جنوبی آن را 2 ± 5 میلی‌متر در سال نشان می‌دهد که نشان از فعالیت بالای نوزمین ساخت در محدوده‌ی مورد مطالعه دارد. که با ارزیابی شاخص‌های مورفومتریک نتایج فوق به‌دست آمد، مقادیر به‌دست آمده از شاخص (Smf) در جبهه کوهستانی مخروط‌افکنه‌های حبله‌رود، ایوانکی و جاجرود در مرز ساختاری البرز جنوبی بر اساس کلاس‌بندی همدونی و همکارانش در کلاس ۲، یعنی مناطقی با فعالیت متوسط فعال جای می‌دهد. بنابراین بر اساس این شاخص، منطقه مورد مطالعه دارای فرسایش می‌باشد. از دیگر شاخص‌های ژئومورفیک مورد استفاده در این مطالعه، شاخص نسبت پهنای کف دره به ارتفاع آن (Vf) است که مخروط‌افکنه حبله‌رود جزو کلاس ۲ یعنی مناطقی با فعالیت متوسط و مخروط‌افکنه‌های جاجرود و ایوانکی به کلاس ۳ این دسته‌بندی یعنی مناطق غیر فعال تعلق دارند. سومین شاخصی که در منطقه مورد مطالعه ارزیابی گردید، شاخص عدم تقارن حوضه زهکشی (Af) بود از نتایج به‌دست آمده از این شاخص این گونه استنباط می‌شود که در حوضه

جاجرود فرسایش در ساحل سمت راست ادامه دارد، در حالی که در حوضه‌های حبله‌رود و ایوانکی فرسایش در ساحل سمت چپ در جریان است. همچنین بر اساس کلاس‌بندی ارائه شده توسط همدونی و همکارانش، حوضه جاجرود در کلاس ۱ که بیانگر مناطق فعال هستند، قرار می‌گیرد و حوضه‌های حبله‌رود و ایوانکی جزو مناطق غیرفعال معرفی می‌شوند. دیگر شاخص مورد بررسی در این پژوهش شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL) است. متوسط مقدار این شاخص در حوضه‌های ایوانکی (۵۵۵/۴۲) و حبله‌رود (۶۰۳/۳۰) بیش‌تر است و لذا این حوضه‌ها در کلاس ۱ فعالیت‌های تکتونیکی قرار می‌گیرند و حوضه جاجرود با متوسط (۴۳۱/۳۸) به کلاس ۲ یعنی مناطق با فعالیت متوسط تعلق دارد. این در حالی است که حوضه‌های جاجرود، حبله‌رود و ایوانکی به‌علت قرارگیری در زون البرز مرکزی پوشیده از سنگ‌های مقاوم می‌باشند. از سوی دیگر این رودخانه‌ها، دارای طول زیادی هستند در نتیجه می‌توان علت بالا بودن مقادیر این شاخص را به فعالیت‌های تکتونیکی حوضه نسبت داد. شاخص دیگری که می‌توان برای ارزیابی نامتقارن بودن حوضه و متعاقب آن، در بررسی حرکات زمین‌ساختی فعال از آن سود جست، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (T) می‌باشد. مقادیر این شاخص در حوضه جاجرود تقریباً نزدیک به یک بوده و میانگین مقطع‌های ذکر شده، برابر با ۰/۶۲ می‌باشد و لذا در این حوضه تقارن وجود دارد. میزان شاخص (T) در حوضه‌های حبله‌رود و ایوانکی، نشان‌دهنده عدم تقارن نسبی این حوضه‌ها می‌باشد. میانگین این شاخص در حوضه حبله‌رود ۰/۲۲ و در حوضه ایوانکی ۰/۱۸ است و از لحاظ زمین‌ساخت فعال می‌باشند. شاخص ضریب مخروط‌گرایی (FCI) از دیگر شاخص‌های مورد بررسی در این تحقیق می‌باشد. ضرایب مخروط‌گرایی در هر سه مخروطافکنه، ارقام کم‌تر از یک را نمایش می‌دهند. پس می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که گسترش مخروطافکنه‌های منطقه مورد مطالعه، تحت تأثیر تکتونیک و سایر عوامل فرسایش مانند آب و هوا، دچار محدودیت شده و به تکامل واقعی خود نرسیده‌اند. در نهایت با ارزیابی نسبی فعالیت‌های زمین‌ساختی (Iat) در منطقه مورد مطالعه دریافتیم در حوضه حبله‌رود کلاس فعالیت‌زمین‌ساختی زیاد و حوضه‌های ایوانکی و جاجرود در کلاس فعالیت‌های زمین‌ساختی متوسط قرار دارند. در مجموع می‌توان گفت شاخص‌های ژئومورفولوژیکی وجود حرکات نئوتکتونیک را اثبات می‌نماید هر چند میزان آن در هر حوضه دارای اختلافاتی است.

منابع

- رامشت، محمدحسین؛ سیف، عبدالله؛ شاه‌زیدی، سمیه سادات؛ انتظاری، مژگان (۱۳۸۸)، «تأثیر تکتونیک جنب‌ا‌بر مورفولوژی مخروط افکنه‌ی درختگان در منطقه‌ی شهداد کرمان»، *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، شماره ۱۶، صص ۲۹-۴۶.
- روستایی، شهرام؛ نیری، هادی (۱۳۹۰)، «ارزیابی فعالیت‌های تکتونیک با استفاده از نیمرخ طولی در حوضه‌ی آبریز مهاباد»، *جغرافیا و برنامه ریزی*، شماره ۳۶، صص ۵۲-۶۷.
- سیف، عبدالله؛ خسروی، قاسم (۱۳۸۹)، «بررسی تکتونیک فعال در قلمرو تراست زاگرس منطقه فارسان»، *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی*، شماره ۷۴، صص ۱۲۸-۱۴۶.
- عباس‌نژاد، احمد (۱۳۷۵)، «پژوهش‌های ژئومورفولوژی در دشت رفسنجان»، پایان‌نامه دکتری، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز.
- عابدینی، موسی؛ شبرنگ، شنو (۱۳۹۳)، «ارزیابی فعالیت‌های نو زمین‌ساخت در حوضه‌ی آبخیز مشکین‌چای از طریق شاخص‌های ژئومورفولوژی»، *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، شماره ۳۵، صص ۴۹-۶۶.
- کرمی، فریبا؛ رجبی، معصومه؛ عسگری، مریم (۱۳۹۲)، «تحلیل فعالیت‌های نئوتکتونیک دامنه شمالی رشته کوه بزقوش با استفاده از روش‌های ژئومورفولوژیکی»، *فصلنامه تحقیقات جغرافیایی*، شماره ۲، صص ۱۵۸-۱۴۱.
- مقصودی، مهران؛ باقری، سجاد (۱۳۸۸)، «بررسی نقش تکتونیک در شکل‌گیری و تحول مخروط افکنه‌ها (مطالعه موردی: مخروط افکنه‌های تاقدیس قلاجه)»، *فصلنامه جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای*، شماره ۱۲، صص ۹۹-۱۲۲.
- Bull, W.B., McFadden, L., (1977), "Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault", California, In *Geomorphology*, State University of New York, Binghamton.
- Bunte, K., Abt, S.R., (2001), "Sampling surface and subsurface particle- size distributions in wadable gravel and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and stream bed monitoring", *National System Technology Center*, 12: 42-78.
- Burbank, D.W., Anderson, R.S., (2001), "*Tectonic Geomorphology*", Blackwell Science, London 274 p.
- Cox, R.T., (1994), "Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: An example from the Mississippi embayment", *Geological Society of America Bulletin*, 106: 571-581.

- 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", *Geomorphology*, 121:329–341.
- Figueroa, A.M., Knott, J.R., (2010), "Tectonic geomorphology of the southern Sierra Nevada Mountains (California): Evidence for uplift and basin formation", *Geomorphology*, 123:1-12.
- Garcia-tortosa, F.J., Alfaro, P., Galindo-Zaldivar, J., Gibert, Lopez-Garrido, A.C., Sanz de Galdeano, C., Urena, M., (2008), "Geomorphology Evidence of the Active Baza Fault (Betic Cordillera, South Spain)", *Geomorphology*, 97: 374-391.
- Guarnieri, P., Pirrotta, C., (2008), "The Response of Drainage Basins to the Late Quaternary Tectonics in the Sicilian Side of the Messina Strait(NE)", *Geomorphology*, 95: 260-273.
- Hack, J.T., (1973), "Drainage adjustment in the Appalachians", *Fluvial Geomorphology*, Publications in Geomorphology. State University of New York, Binghamton, New York.
- Hamdouni, R.E., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J., Keller, E.A., (2008), "Assessment of Relative Active Tectonic", South West Border of the Sierra Nevada (Southern Spain), *Geomorphology*, 96: 150-173.
- Harvey, A.M., (2002), "The Role of base-level Change in the Dissection of Alluvial fans: Case Studies from Southeast Spain and Nevada", *Geomorphology*, 45: 67-87.
- Ioannis, M.T., Ioannis, K.K., Pavlides, S., (2006), "Tectonic geomorphology of the easternmost extension of the Gulf Corinth (Beotia central Greece)", *Tectonophysics*, 453: 211-232.
- Kale, V.S., Shejwalkar, N., (2008), "Uplift along the western margin of the Deccan Basalt Province: Is there any geomorphometric evidence?" *J, Earth Syst. Sci.* 6: 959-971.
- Keller, E.A., Pinter, N., (1996), "*Active Tectonics*", EngleWood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall Inc.
- Keller E.A., Pinter, N., (2002), "*Active Tectonics Earth quakes*", Uplift and Landscape, New Jersey: Prentice Hall, Pub.
- Molin, P., Pazzaglia, F.J., Dramis, F., (2004), "Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc", Silamassif, Calabria.
- Mukerji, A.B., (1976), "Teminal fans of Inlands Streams in Sutlej –Yamuna Plain, India", *Zeitschrift for Geomorphology*, 20:190-204.
- Ramirez-Herrera, M.A., (1998), "Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt", *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 317-332.
- Siva, P.G., Zazo, C., Bardji, T., (2003), "Fault Generated Mountain Fronts in Southwest Spain: Geomorphology Assessment of Tectonic and Seismic Activity", *Geomorphology*, 50: 203-225.
- Stanley, A., Schumm, F., Holbrook, M., (2000), "*Active Tectonics and Alluvial Rivers*", Cambridge University Press combridge.

- Viseras, C., Altan, B.N., (2003), "Differential Features af alluvial fans Controlled by Tectonic or Eustatic Accommodation Spce", *Geomorphology*, 50: 181-202.
- 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.