

تحلیل کمی تأثیر فعالیت های نوزمین ساختی بر شاخص های ریخت زمین ساختی در حوضه آبریز زیارت

چکیده

پژوهش کنونی به منظور شناخت فعالیت های نوزمین ساختی حوضه آبریز زیارت (واقع در دامنه شمالی البرز خاوری در جنوب گرگان)، با استفاده از محاسبه شاخص های ریخت زمین ساختی و شواهد زمین ساختی موجود در این منطقه، صورت گرفته است. در این راستا شش شاخص زمین ریختی محاسبه و نتایج به دست آمده از آنها تحلیل شد. نتایج کلی بررسی این ویژگی ها، به عنوان شاخص زمین ساخت فعال نسبی محاسبه شد و به چهار رده، شامل: مناطق خیلی فعال، فعال، متوسط تا مناطقی با فعالیت کم، تقسیم بندی شد. رده های بالای فعالیت زمین ساختی اغلب در خاور و جنوب خاوری حوضه زیارت به دست آمد؛ در حالی که بقیه نواحی دارای رده های متوسط است. افزایش میزان فعالیت زمین ساختی در بخش های این حوضه می تواند وابسته به موقعیت نقاط اوج شاخص شیب رودخانه ها در راستای گسل ها و پاره های گسلی باشد. از سوی دیگر، بالا بودن مقادیر نامتقارنی حوضه زهکشی در شاخه اصلی رودخانه زیارت به طور واضح حاصل عملکرد گسل های کاسپین و در بخش های جنوب و جنوب خاوری این حوضه تحت تأثیر فعالیت گسل های رادکان و تل انبار است. همچنین، نتایج به دست آمده از بررسی شاخص زمین ساخت فعال نسبی در ناحیه مذکور، بیانگر تمرکز مناطقی با فعالیت بالای زمین-ساختی در بخش مرکزی و جنوب خاوری حوضه زیارت است. در حالی که سایر مناطق دارای رده های متوسط فعالیت زمین-ساختی هستند، این امر مؤید فعال بودن منطقه مذکور از نظر نوزمین ساختی است. مطالعات انجام شده بر روی روند مطلب است که ارتباط نزدیکی بین خطواره ها، عناصر ساختاری و روابط هندسی موجود بین آنها و موقعیت قرارگیری آبشارها و چشمه ها وجود دارد.

واژه های کلیدی: نوزمین ساخت، شاخص ریخت زمین ساخت، حوضه آبریز زیارت

مقدمه

از بین مناظر طبیعی، رودخانه ها اولین اشکال محیطی هستند که نسبت به وقوع تغییرات در بستر جریان و یا بروز تغییرات در حواشی بستر جریان، عکس العمل نسبتاً سریعی نشان می دهند. با توجه به عکس العمل های اثبات شده رودخانه ها نسبت به وقوع تغییرات عادی، می توان با تحلیل آنها با استفاده از شاخص های زمین ریختی، در بررسی اثرهای زمین ساخت بر مسیر رودخانه ها به نتایج حاصل از آنها استناد نمود (آجار و دینسر^۱، ۲۰۰۵: ۲ و آمرسون^۱ و همکاران، ۲۰۰۷: ۲۲).

بیشتر شاخص‌های مورد استفاده در این مطالعه، قبلاً توسط محققان دیگر در نواحی خشک و نیمه‌خشک جنوب باختری ایالات متحده (بال^۲، ۱۹۸۴)، همچنین در جنوب‌باختر ایالات متحده (راکول^۳ و همکاران، ۱۹۸۵)، سواحل مدیترانه از اسپانیا (سیلوا^۴، ۱۹۹۴)، چاله آکامبای در مکزیک (رامیرز^۵، ۱۹۹۸)، کالابریا در جنوب ایتالیا (مولین^۶ و همکاران، ۲۰۰۲)، شمال باختر نیومکزیکو (ویسنیوسکی^۷ و همکاران، ۲۰۰۲) صورت پذیرفته است. همدونی^۸ و همکاران (۲۰۰۸) نیز برای نخستین بار با استفاده از شش شاخص ریخت‌زمین‌ساختی به ارزیابی نسبی زمین‌ساخت فعال در حوضه نوادا در جنوب اسپانیا پرداخت. وی با محاسبه و رده‌بندی شاخص‌های مذکور و گرفتن میانگین (شاخص S/N)، در نهایت در چارچوب مدل IAT به رده‌بندی زمین‌ساخت فعال به چهار رده بسیار فعال تا فعالیت نسبتاً کم پرداخت که بعدها این مدل در بسیاری از مناطق استفاده شد و نتایج قابل قبولی را به‌دست آورد (خاوری و همکاران، ۲۰۰۹؛ خسروی، ۱۳۸۹؛ مقصودی، ۱۳۹۰؛ ده‌بزرگی و همکاران، ۲۰۱۰). پژوهش‌های دیگری نیز در قالب شاخص شیب رود و نیمرخ طولی رودخانه براساس مدل هافمن^۹ (۲۰۰۶)، استفانچیکوا^{۱۰} و همکاران (۲۰۰۸)، بیاتی خطیبی (۱۳۸۸)، کرمی (۱۳۸۸) و یا به صورت ترکیب و رده‌بندی شاخص‌های مربوط به پیشانی کوهستان مانند پژوهش‌های ارفع‌نیا (۱۳۸۹) و خادمی (۱۳۸۹) صورت گرفته است.

در این پژوهش سعی شده است، از شاخص‌های زمین‌ریختی برای بررسی فعالیت زمین‌ساختی حوضه آبریز زیارت واقع در استان گلستان (جنوب‌گراگان) و تأثیر آن بر ویژگی‌های رودخانه‌ها، استفاده شود. حوضه زیارت یکی از فعال‌ترین زیرحوضه‌های منطقه گراگان (حوضه آبریز قره‌سو) محسوب می‌شود که زمین‌ساخت فعال نسبی آن تحت تأثیر گسل‌های کاسپین و رادکان است (روستائی و همکاران، ۱۳۹۱: ۵۹). این پژوهش از این لحاظ حائز اهمیت است که در این ناحیه هیچ‌گونه تحقیقی در رابطه با روش‌های نامبرده صورت نگرفته است. این روش به صورت کمی برای تعیین میزان فعالیت زمین‌ساختی حوضه آبریز زیارت استفاده شده است. البته، با توجه به عملکرد گسل‌های این منطقه می‌توان به ارتباط تنگاتنگ بین ساختارهای گسلی و فعالیت زمین‌ریختی مربوط به آنها بر روی گسترش حوضه آبریز پی‌برد.

داده‌ها و روش پژوهش

جایگاه زمین‌شناسی و زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه

حوضه زیارت یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز در بخش جنوبی گراگان (استان گلستان) است که در دامنه شمالی پهنه زمین‌ساختی البرز خاوری جای گرفته است. گستره مورد مطالعه در حد فاصل عرض‌های جغرافیایی ۴۰° ۳۶' و ۵۵'

۲- Amerson et al

2 - Bull et al

۲- Rockwell et al

4- Silva

5- Ramirez

6- Molin et al

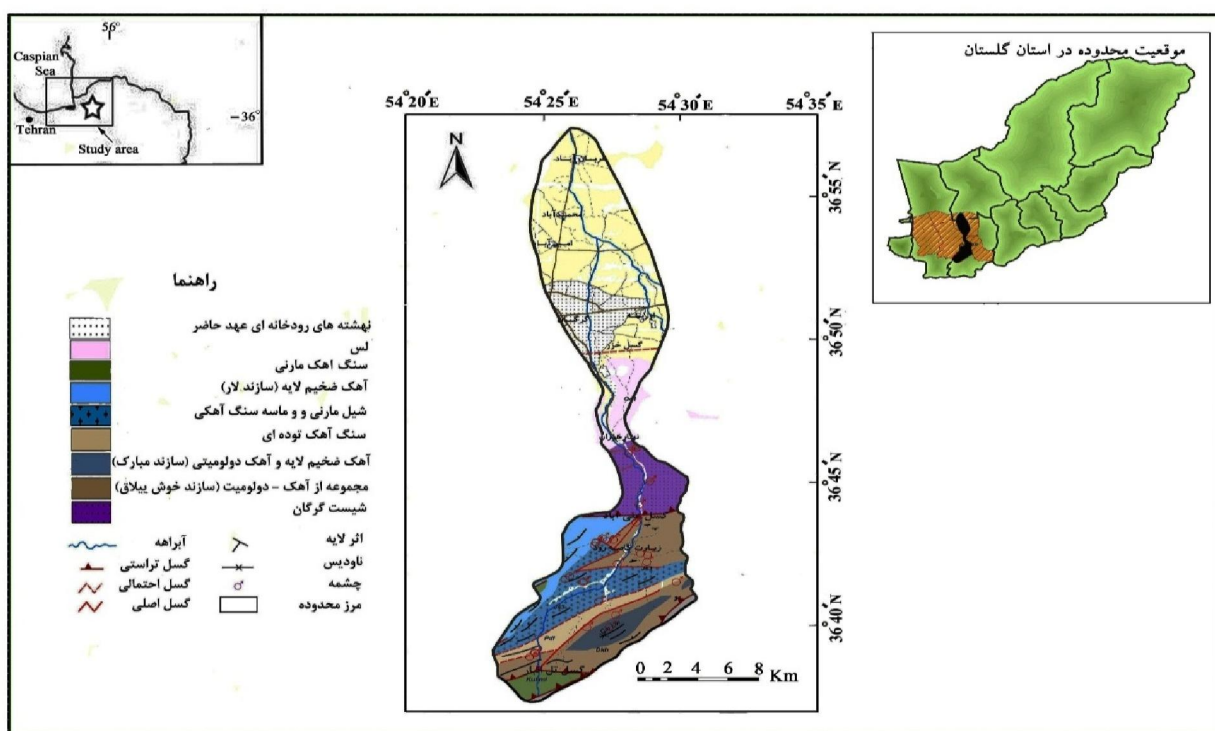
7- Wisniewski et al

۷- El Hamdouni et al

۸- Hafmann

۹- Stepancikova

۳۶° شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۴° ۲۰' و ۵۴° ۳۵' خاوری جای گرفته است. با توجه به نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه (شکل ۱)، مجموعه سازندهای پالئوزوئیک، شیست‌های سبز گران، از مهمترین واحدهای سنگ‌چینه‌ای در این منطقه هستند. در این میان، سازندهای خوش‌یلاق، مبارک و لار بیشترین برونزد را در منطقه مورد مطالعه دارند. در کوهپایه‌ها، نهشته‌های پراکنده لس را می‌توان مشاهده نمود که ضخامت آنها از جنوب به شمال افزایش می‌یابد. این نهشته‌ها از گسترده‌ترین رسوبات دوران چهارم است که در این ناحیه به صورت تپه ماهورهای برونزد دارد (شمعانیان و همکاران، ۱۳۸۴: ۱۹۳). مهمترین ساختارهای فعال منطقه مورد مطالعه را بخش‌هایی از گسل‌های کاسپین (خزر)، علی آباد (رادکان) و تل انبار تشکیل می‌دهند.



شکل ۱) نقشه زمین‌شناسی ساده شده از گستره مورد مطالعه (با تغییراتی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ گرگان).

شاخص‌های ریخت زمین‌ساختی

به منظور بالا بردن دقت در محاسبه شاخص‌های زمین‌ریختی حوضه آبریز زیارت، برای ارزیابی فعالیت‌های نوزمین‌ساختی در بخش‌های مختلف، از مدل ارتفاعی رقومی^۱ (DEM) با قدرت تفکیک ۱۰ متر و دقت ارتفاعی بیش از ۶ متر بر مبنای نقشه‌های ارتفاعی رقومی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده شده است. همچنین، برای استخراج شبکه آبراهه‌ها و رتبه‌بندی آنها برای استفاده در محاسبات شاخص‌های نوزمین‌ساختی، از مدل رقومی ارتفاعی منطقه و براساس روش استرال^۲ از ۱ تا ۵ رتبه‌بندی شد.

۱- Digital Elevation Model (DEM)

۲- Strahler

با استفاده از این مدل، شاخص‌های زمین‌ریختی برای منطقه مورد مطالعه محاسبه شد که عبارتند از: شاخص شیب رود^۱ (SL)، نامتقارنی حوضه زهکشی^۲ (Af)، انتگرال فرازسنجی^۳ (Hi)، منحنی فرازسنجی^۴ (Hc)، شکل حوضه^۵ (BS) و پیچ و خم پیشانی کوهستان^۶ (Smf). در انتها، با محاسبه و رده‌بندی شاخص‌های مذکور و گرفتن میانگین (شاخص S/N). در نهایت، براساس روش ارائه شده توسط همدونی و همکاران (۲۰۰۸) در چارچوب مدل IAT به رده‌بندی زمین‌ساخت فعال به چهار رده بسیار فعال تا نسبتاً دارای فعالیت کم ارزیابی شد.

شاخص طول - شیب رود

برای تعیین این که آیا رودخانه به تعادل رسیده است یا نه، می‌توان از شاخصی با عنوان شاخص شیب رود استفاده نمود. این شاخص که تأثیر تغییرات محیطی بر روی نیمرخ‌های طولی رودخانه را نشان می‌دهد، از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

در این رابطه SL: شاخص شیب رودخانه؛ ΔH : اختلاف ارتفاع در یک مقطع خاص از رودخانه؛ ΔL : فاصله افقی همان محل و یا $(\Delta H / \Delta L)$ شیب بخشی از مجراست و L: طول رودخانه از نقطه مرکزی همان محل تا سرچشمه رودخانه است. این شاخص برای ارزیابی زمین‌ساخت فعال‌نسی مفید است (کلر و پنتر، ۲۰۰۲: ۱۲۶ و ۱۲۷).

برای محاسبه این شاخص، ابتدا نیمرخ طولی آبراهه اصلی سه حوضه از روی نقشه توپوگرافی تهیه و در فواصل ۱۰۰ متر شاخص شیب رود آن محاسبه گردید. برای تمام مسیر رودخانه این کار از سرچشمه تا خروجی حوضه به ترتیب ۱۰۰ متر ۱۰۰ متر انجام گرفت و از تمام شاخص‌های به دست آمده، میانگین گرفته شد تا SL کل رودخانه به دست آید. مقادیر این شاخص توسط همدونی و همکاران (۲۰۰۸) به سه دسته طبقه‌بندی شده است: رده ۱ ($SL \geq 500$) با بی-هنجاری بالا، رده ۲ ($300 \leq SL < 500$) با بی‌هنجاری کم و رده ۳ ($SL < 300$) بدون بی‌هنجاری (جدول ۱).

نامتقارنی حوضه زهکشی

برای اثبات زمین‌ساخت فعال و ارزیابی کج‌شدگی زمین‌ساختی در حوضه آبریز یک منطقه از شاخص نامتقارنی حوضه زهکشی استفاده می‌شود. این شاخص براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

در این رابطه At مساحت کل حوضه و Ar مساحت سمت راست حوضه (دید به سمت پایین دست) است. این شاخص به تغییر میزان کج‌شدگی در راستای عمود بر روند مجرا حساس است. اگر حوضه‌ای در شرایط پایدار، بدون کج‌شدگی یا با مقدار کم باشد، شاخص Af برابر ۵۰ است. مقادیر بیشتر یا کمتر از ۵۰ بیانگر کج‌شدگی حوضه است،

1-Stream- gradient index

2-Drainage basin asymmetry

3-hypsometric integral

4-hypsometric curves

5-Drainage basin shape

6- Mountain- front sinuosity

که می‌تواند در نتیجه فعالیت زمین‌ساختی یا ساختارهای حاصل از خصوصیات سنگ‌شناسی باشد (کلر و پنتر، ۲۰۰۲: ۱۲۳ و ۱۲۵) (جدول ۱).

پیچ و خم پیشانی کوه

تبادل بین نیروهای فرسایشی که میل به ایجاد سینوسیته دارند و نیروهای زمین‌ساختی که تمایل به ایجاد خط مستقیم دارند، توسط این شاخص بیان می‌شود که براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود (کلر و پنتر، ۲۰۰۲: ۱۳۴).

$$Smf = Lmf/Ls \quad (۳)$$

در این رابطه Lmf طول پیشانی کوه در طول معینی از دامنه کوه، جایی که شیب بین کوه و حوضه پیشانی تغییر می‌کند و Ls طول خط مستقیمی است که ابتدا و انتهای همان پیشانی کوه را به هم متصل می‌کند. بدیهی است هر چه پیشانی کوه مستقیم‌تر باشد، مقادیر Ls و Smf به هم نزدیک‌تر بوده، شاخص سینوسیته کوچک‌تر خواهد شد و به ۱ نزدیک‌تر می‌شود که این مقدار خاص نواحی فعال زمین‌ساختی است؛ در حالی که، اگر نرخ بالاآمدگی کاهش یابد، فرایندهای فرسایشی شروع به تشکیل یک پیشانی نامنظم می‌کنند. در این صورت، مقدار Smf افزایش می‌یابد. مقادیر کمتر از ۱/۴ پیشانی‌های فعال زمین‌ساختی را نشان می‌دهد؛ در حالی که مقادیر بیشتر از ۳ به پیشانی‌های غیر فعال مربوط می‌شود (کلر و پنتر، ۲۰۰۲، ۱۳۶). در این روش نتایج مربوط به هر شاخص، به سه رده فعالیت زمین‌ریختی تقسیم‌بندی شده است. میانگین رده‌های تمام شاخص‌های محاسبه شده برای هر زیرحوضه خود به سه رده فعالیت زمین‌ساختی تقسیم شد (جدول ۱).

شاخص شکل حوضه

تصویر افقی شکل حوضه توسط نسبت طولی‌شدگی یا شاخص شکل حوضه توصیف می‌شود. این شاخص توسط (رامیرز، ۱۹۹۸) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$Bs = Bl/Bw \quad (۴)$$

به طوری که Bl طول حوضه از بالای رودخانه (سرچشمه) تا مصب و Bw عریض‌ترین نقطه در حوضه آبریز است. این شاخص میزان زمین‌ساخت فعال را نشان می‌دهد. در مناطق فعال زمین‌ساختی، عرض حوضه‌های آبریز باریک‌تر است؛ زیرا در چنین مناطقی، نیروی رودخانه صرف عمیق کردن بستر رودخانه می‌شود؛ در حالی که پایداری زمین‌ساختی باعث می‌شود رودخانه فرصت تعریض حوضه خود را داشته باشد (مختاری، ۱۳۸۴: ۶۹). شکل کشیده حوضه‌های آبریز از خصوصیات حوضه‌هایی است که در مناطق کوهستانی با فعالیت‌های زمین‌ساختی واقع شده‌اند و با دور شدن از زمان بالاآمدگی منطقه شکل آن به دایره نزدیک‌تر می‌شود (رامیرز، ۱۹۹۸) (جدول ۱).

انتگرال و منحنی فراسنجی

تشخیص وضعیت فرسایش برای تمام حوضه‌های زهکشی اصلی مهم و ضروری است. تحلیل فرازسنجی به عنوان یک شاخص برای مراحل فرسایش حوضه‌های زهکشی به کار برده می‌شود (سینگ^۱، ۲۰۰۹: ۵۳). انتگرال فرازسنجی یکی از پارامترهای رده‌بندی شده زمین‌ریخت‌شناختی در توسعه مراحل زمین‌شناسی یک حوضه زهکشی است. این شاخص به عنوان مساحت نسبی زیر منحنی فرازسنجی تعریف شده است، که بیانگر حجم فرسایش نیافته حوضه است و به صورت درصدی بیان می‌شود (کلر و پتر، ۲۰۰۲: ۱۲۲). مقادیر بالای این شاخص مربوط به نواحی فعال و جوان زمین‌ساختی است، در صورتی که مقادیر پایین آن مربوط به نواحی قدیمی است که دچار فرسایش شده و کمتر تحت تأثیر زمین‌ساخت فعال قرار گرفته‌اند (همدونی و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۵۸).

منحنی فرازسنجی با پیاده کردن نسبت ارتفاع کل حوضه (ارتفاع نسبی) در مقابل مساحت کل حوضه (مساحت نسبی) حاصل می‌شود (استراهلر، ۱۹۵۲). در شکل شماره ۵، A: مساحت کل حوضه است که بیانگر مجموع مساحت بین خطوط تراز است؛ H: نیز ارتفاع بلندترین نقطه در حوضه و a: مساحت بخشی از حوضه در بالای یک خط تراز فرضی با ارتفاع h است. مقدار مساحت نسبی (a/A) همیشه بین ۱ در پایین‌ترین نقطه حوضه (جایی که h/H=0) تا صفر در بالاترین نقطه در حوضه (جایی که h/H=1) متغیر است. براساس شکلشان و مقادیر انتگرال فرازسنجی حوضه‌ها به سه گروه طبقه‌بندی شده‌اند که مربوط به منحنی‌های محدب یا مقعر است: رده ۱ مربوط به منحنی فرازسنجی محدب و جوان ($H_i \geq 0.5$)؛ رده ۳ مربوط به منحنی‌های مقعر و فرسوده ($H_i < 0.4$) و رده ۲ منحنی‌های مقعر-محدب و بالغ (منحنی‌های به شکل S که قسمت‌های مقعر در ارتفاعات بالا و قسمت‌های محدب در ارتفاعات پایین قرار دارند) ($0.4 \leq H_i < 0.5$) (همدونی و همکاران، ۲۰۰۸، ۱۵۹) (جدول ۱).

جدول ۱) طبقه‌بندی شاخص‌های زمین‌ریختی توسط (همدونی و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۶۸)

رده	پیچ‌وخم کوهستان (Smf)	طول شیب رودخانه (SL)	عدم تقارن حوضه زهکشی (Af)	شکل حوضه زهکشی (Bs)	انتگرال هیپسومتری (Hi)
۱	$1/1 >$	بی‌هنجاری بالا	$ Af - 50 > 15$	$4 <$	$H_i \geq 0.5$
۲	$1/1 - 1/5$	بی‌هنجاری کم	$ Af - 50 = 7 - 15$	$3 - 4$	$0.4 \leq H_i < 0.5$
۳	$1/5 <$	بدون بی‌هنجاری	$ Af - 50 < 7$	$3 >$	$H_i < 0.4$

یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از بررسی زمین‌ریخت‌ساختی گستره مورد مطالعه گویای این است که این گستره تا حد زیادی از فعالیت ساختارهای منطقه؛ بویژه گسل کاسپین، علی‌آباد (رادکان) و تل انبار تأثیر پذیرفته است. مهمترین نقش فعالیت این گسل‌ها در شکل‌گیری روند رودخانه زیارت در این منطقه بوده است؛ به گونه‌ای که جبهه کوهستان با مسیر گسل کاسپین منطبق است و به نظر می‌رسد انحراف و عدم تقارن رودخانه اصلی زیارت از فعالیت گسل کاسپین و رادکان در دشت و کوهستان پیروی می‌کند.

در این پژوهش نتایج مربوط به هر شاخص، به سه رده فعالیت زمین‌ریختی تقسیم‌بندی شده است. میزان متوسط شاخص شیب‌رود در حوضه آبریز زیارت برای آبراهه‌های اصلی سه زیرحوضه از نواحی مرتفع تا مصب رودخانه

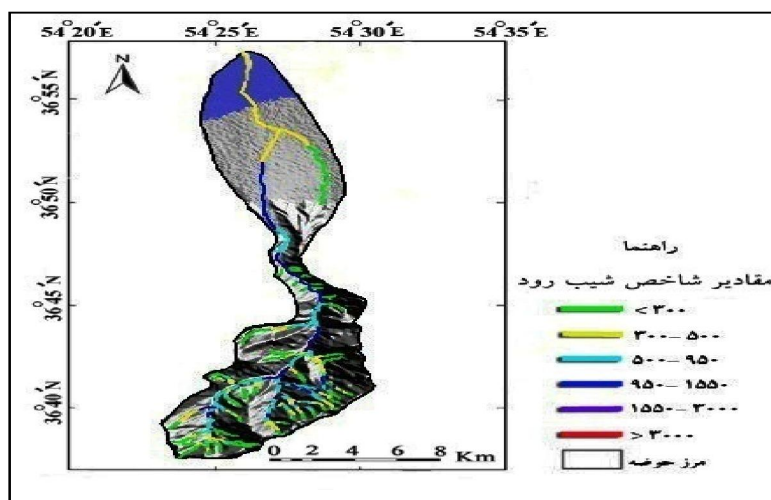
محاسبه شد (جدول ۲). این میزان متوسط بین ۶۹۸/۲۷ در زیرحوضه ۳ تا ۸۰۷/۶۲ در زیرحوضه ۱ متغیر است. در یک ارزیابی کلی می‌توان بیان نمود که میزان بی‌هنجاری این شاخص در رودخانه اصلی زیارت است؛ به خصوص در بخش‌های جنوبی بیشتر از بخش‌های شمالی و باختری این حوضه به خوبی مشهود است. برای نمایش تغییرات این شاخص در این ناحیه، نقشه این شاخص ترسیم شد (شکل ۲). با توجه به شکل (۲) می‌توان بیان نمود که میزان SL در جنوب‌خاوری و بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه (مسیر رود اصلی) بیش از بخش‌های دیگر آن است. کمترین مقدار SL در آبرفت‌های مخروط افکنه شمال پیشانی کوه دیده می‌شود. مقدار این شاخص به یکباره در فاصله اندکی از گسل کاسپین به طرف بالادست حوضه‌ها، افزایش می‌یابد.

برای درک روشن‌تر تغییرات شاخص SL نیمرخ‌هایی از گرادیان چند آبراهه تهیه شده است (شکل ۳). در این نیمرخ‌ها SL بیشینه، مربوط به بخش مرکزی در ارتفاعات حدود ۲۵۰۰ متر قرار دارد. در این بخش، افزون بر گرادیان بالا، تغییر مسیر آبراهه‌ها نیز به سمت باختر- جنوب باختر به خوبی آشکار است. البته، این بی‌هنجاری در نواحی جنوبی نسبت به نواحی شمالی این حوضه بالاتر است. شاخص شیب‌رود در بخش خاوری و جنوبی حوضه آبریز زیارت می‌تواند در ارتباط با فعالیت گسل‌های منطقه و یا تحت تأثیر سنگ‌شناسی این منطقه زیاد باشد.

مقادیر شاخص نامتقارنی حوضه زهکشی با توجه به جدول (۲) نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های ۱ و ۲ در بخش خاوری گستره مورد مطالعه، بیشترین میزان انحراف را دارا هستند. این مقادیر بیانگر شرایط ناپایدار زیرحوضه‌هاست که این ناپایداری می‌تواند در نتیجه فعالیت زمین‌ساختی یا ساختارهای حاصل از ویژگی‌های سنگ‌شناسی منطقه باشد.

میزان و جهت کج‌شدگی در آبراهه‌های فرعی با توجه به موقعیت خود نسبت به ساختارهای گسلی منطقه متفاوت است. از سوی دیگر، می‌توان این میزان کج‌شدگی را، به طور احتمالی مربوط به برخورد رود اصلی زیارت با مجموعه سنگ‌های دگرگون شده گران دانست که در زیر سنگ‌های مزوزوئیک واقع شده‌اند (شکل ۴).

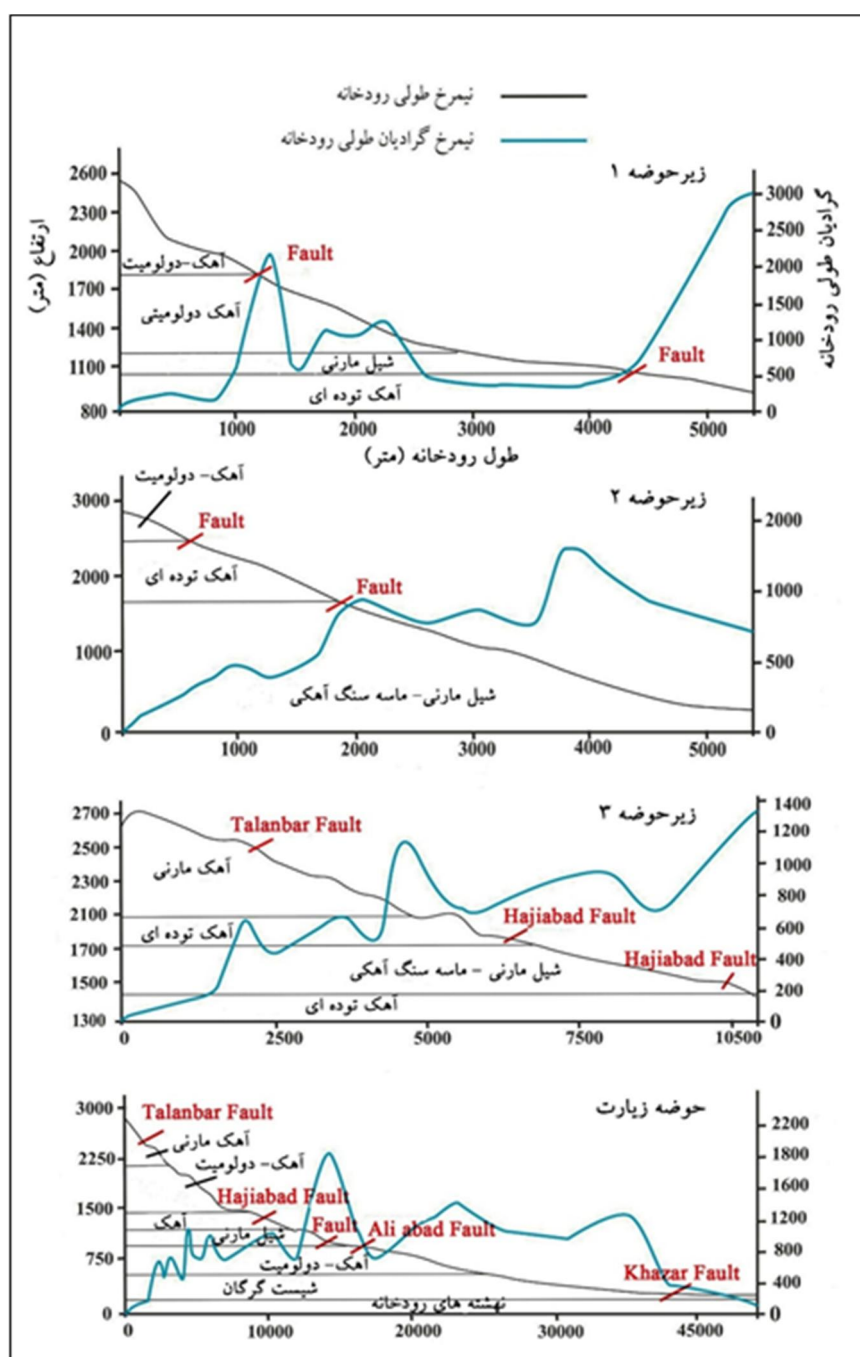
همچنین، براساس محاسبه شاخص شکل حوضه، بیشتر زیرحوضه‌های این منطقه در محدوده غیرفعال قرار دارند (جدول ۲). با تجزیه و تحلیل شاخص فرازونجی، مناطق فعال از غیرفعال (از لحاظ زمین‌ساختی) در این حوضه قابل تفکیک است (جدول ۲). اجرای این شاخص برای شاخه اصلی رودخانه زیارت و همچنین سه زیرحوضه آن، براساس روش همدونی و همکاران نشان داد که شاخه اصلی این رودخانه و زیرحوضه ۱ در بخش خاوری منطقه بیشترین فعالیت را دارند که این امر ناشی از فعالیت گسل‌های جنبای موجود در این منطقه است.



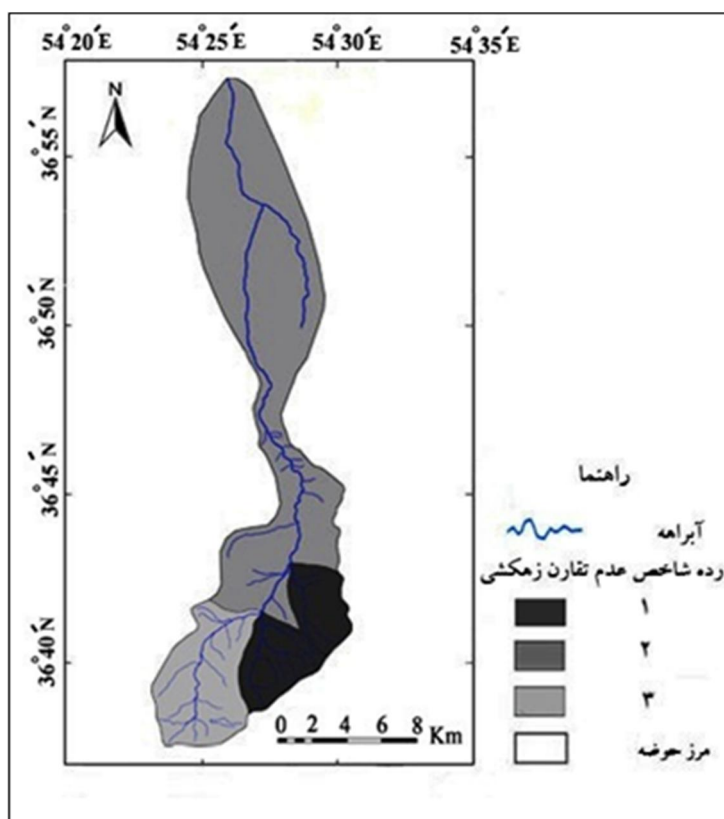
شکل ۲) شاخص گرادیان طولی حوضه رودخانه زیارت و ناهنجاری‌های ایجاد شده در مسیر رودخانه همچنین، مقدار شاخص پیشانی کوهستان برای شاخه اصلی رودخانه زیارت، برابر با ۱/۳۵ به دست آمد که بر اساس طبقه‌بندی همدونی و همکاران (۲۰۰۸)، این ناحیه در رده ۲ قرار گرفت. بر این اساس، می‌توان اظهار کرد که فعالیت بالای زمین‌ساختی این ناحیه با فعالیت گسل کاسپین مرتبط است (شکل ۵). همچنین، براساس طبقه‌بندی منحنی‌های فرازسنجی توسط هورتز^۱ در سال (۱۹۹۹) نشان داد که منحنی فرازسنجی این زیرحوضه به صورت محدب است که حاکی از مستعد بودن این زیرحوضه نسبت به فرایندهای زمین‌ساختی است. همچنین، شکل منحنی در زیرحوضه ۱ نشان می‌دهد که این زیرحوضه در مرحله جوانی قرار دارد؛ اما منحنی فرازسنجی در زیرحوضه‌های ۲ و ۳ بیانگر این مطلب است که این دو زیرحوضه در مرحله بلوغ جای گرفته‌اند و فرایند زمین‌ساختی و فرسایشی به طور یکسان بر این دو زیرحوضه اعمال شده است (شکل ۶).

با بررسی فرازسنجی در این منطقه می‌توان نتیجه گرفت که فرازسنجی به عوامل مختلفی چون: مقیاس حوضه، زمین‌ساخت، سنگ‌شناسی و حتی آب و هوا بستگی دارد.

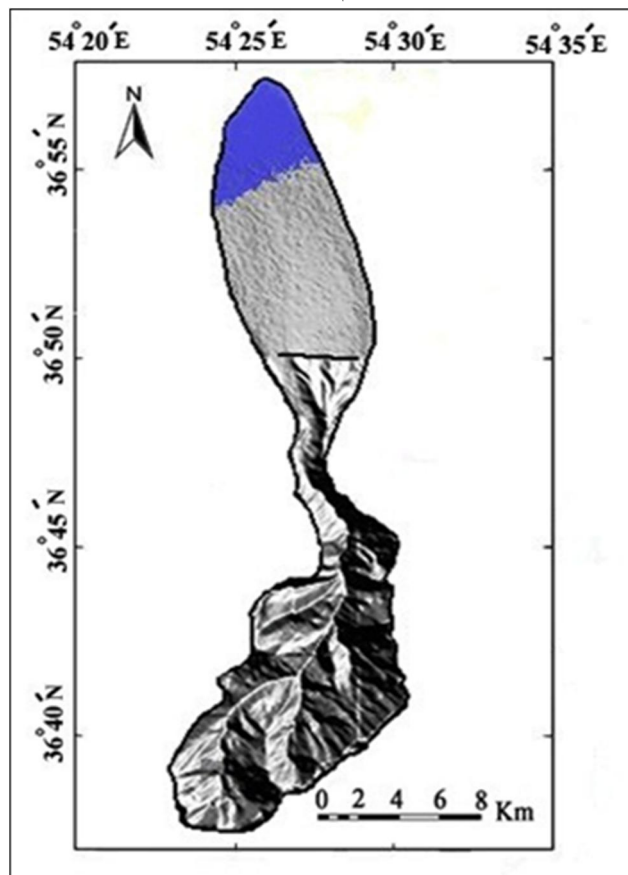
در انتها براساس روشی که توسط (همدونی و همکاران، ۲۰۰۸) ارائه شده، شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی حوضه رودخانه زیارت ارزیابی شد. این شاخص با میانگین‌گیری از رده‌های شاخص‌های زمین‌ریختی (s/n) در هر زیرحوضه محاسبه می‌شود که خود شامل چهار رده است: رده ۱ فعالیت زمین‌ساختی خیلی بالا با میزان s/n بین ۱ تا ۱/۵، رده ۲ فعالیت زمین‌ساختی بالا با s/n بین ۱/۵ تا ۲، رده ۳ فعالیت زمین‌ساختی متوسط با s/n بین ۲ تا ۲/۵ و رده ۴ فعالیت زمین‌ساختی پایین با s/n بیشتر از ۲/۵ را نشان می‌دهد (همدونی و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۶۶). شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (I_{at}) برای سه زیر حوضه در ناحیه مورد مطالعه محاسبه (جدول ۲) و نتایج آن در شکل (۷) ترسیم شده است. در ناحیه مورد مطالعه، بیش از نیمی از مساحت کل حوضه آبریز زیارت در رده فعالیت زمین‌ساختی نسبی بالا و متوسط قرار گرفته است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که محدوده حوضه آبریز زیارت از نظر زمین‌ساختی فعال است.



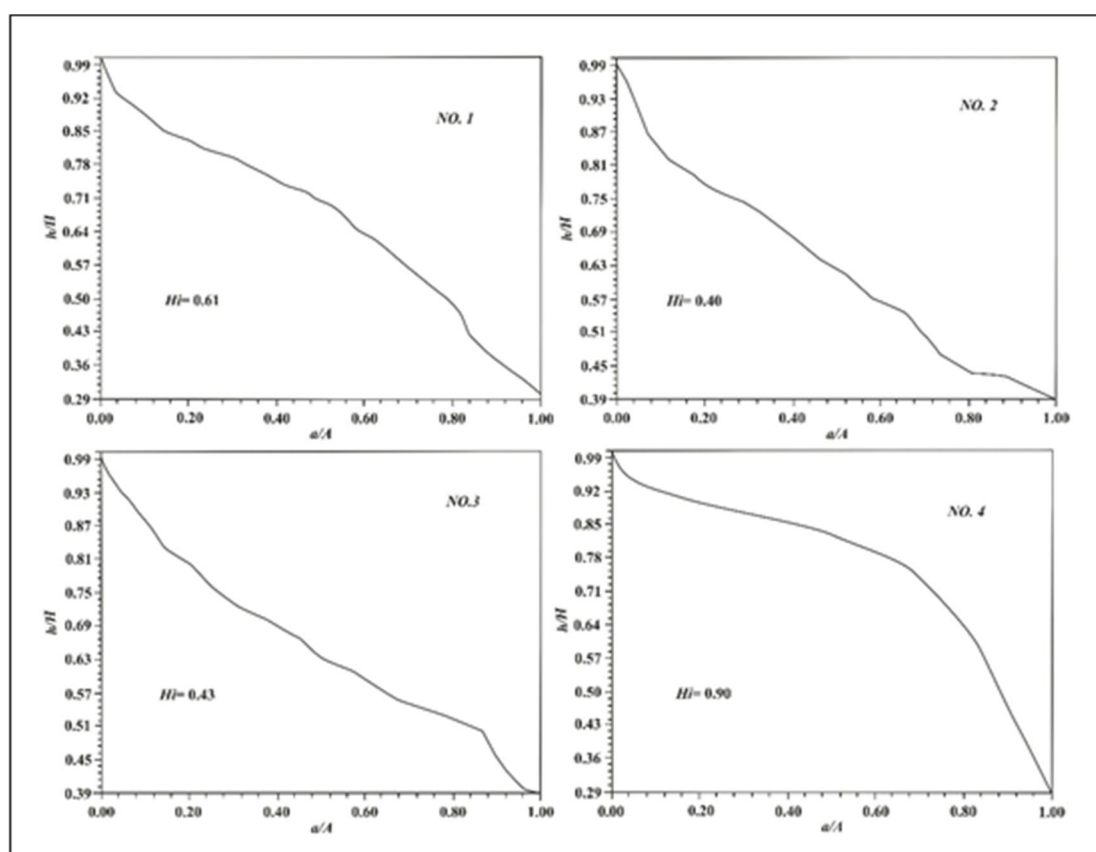
شکل ۳) نمایش نیمرخ طولی همراه با گرادیان طولی رودخانه (SL)، در زیر حوضه‌های رودخانه زیارت



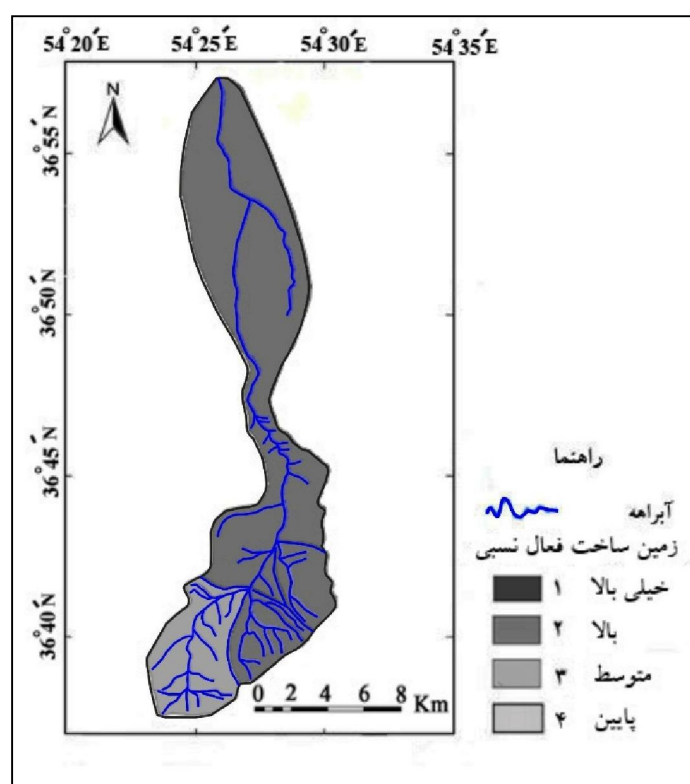
شکل ۴) رده‌بندی شاخص عدم تقارن حوضه‌های رودخانه زیارت



شکل ۵) شاخص اندازه‌گیری شده جبهه پیشانی کوهستان



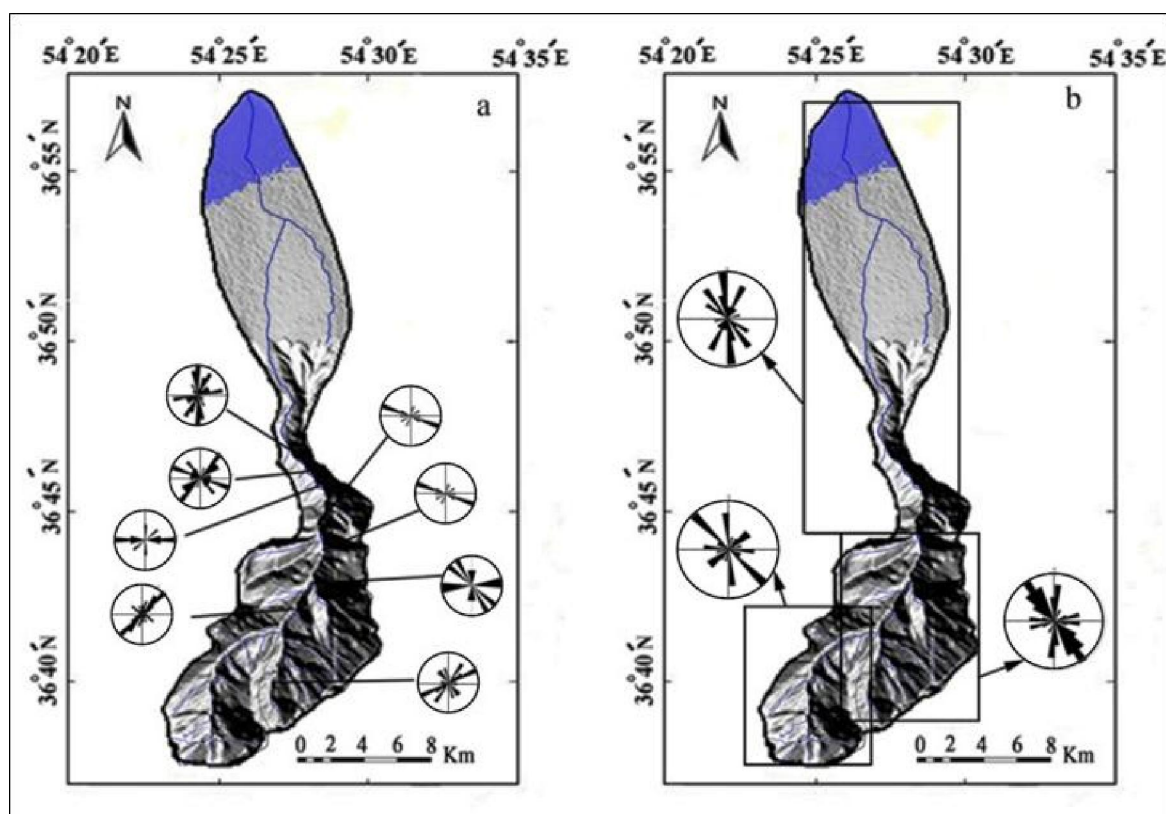
شکل ۶) منحنی‌های فرازسنجی زیرحوضه‌های رودخانه زیارت



شکل ۷) نقشه ترکیبی شاخص‌های فعالیت‌های نوزمین‌ساختی در حوضه رودخانه زیارت

در نهایت با مطالعات صحرایی صورت گرفته، این منطقه به ۳ بخش عمده تقسیم‌بندی شد و برای هر بخش (که شامل چندین ایستگاه بود) نمودار گل‌سرخ از روند شکستگی‌ها و آبراهه‌های منطقه تهیه گردید (شکل ۸). نتایج حاصل از نمودار گل‌سرخ روند شکستگی‌ها، حاکی از آن است که در ایستگاه‌های بخش شمالی روندهای ۶۰-۴۰N، شمالی-جنوبی و شرقی-غربی بیشترین فراوانی تکرار را دارند. در حالی که، در ایستگاه‌های مرکزی بیشترین فراوانی تکرار مربوط به روند ۱۱۰-۱۲۰N و در ایستگاه‌های جنوبی مربوط به روندهای ۶۰-۴۰N، روند شرقی-غربی و ۱۴۰-۱۳۰N است (شکل ۸-۲). با توجه به نمودارهای گل‌سرخ تهیه شده از روند درزه‌های این منطقه می‌توان سه روند عمده را در درزه‌ها و آبراهه‌های منطقه مشاهده نمود که تقریباً مشابه روندهای گسلی موجود در منطقه بوده و شامل روندهای ۸۰-۷۰N، ۵۰-۴۰N و ۱۵۰-۱۴۰N است (شکل ۸-۲).

مطالعات انجام شده بر روی روند شکستگی‌ها، آثار گسلی و آبراهه‌ها در ایستگاه‌های شمالی و مرکزی این منطقه بیانگر این مطلب است که ارتباط نزدیکی بین خطواره‌ها، عناصر ساختاری و روابط هندسی موجود بین آنها و موقعیت قرارگیری آبشارها و چشمه‌ها وجود دارد. بدین معنا که اغلب آبراهه‌های این ناحیه گسلی بوده و در اثر فعالیت پاره‌های گسلی و درزه‌ها و شکستگی‌هایی که در ارتباط با گسل‌های اصلی منطقه است، پدید آمده‌اند. البته در نقشه زمین‌شناسی این منطقه پراکنش چشمه‌ها نشان داده شده است که بالاترین میزان تجمع چشمه‌ها در پهنه گسلش مربوط به گسل رادکان دیده می‌شود، جایی که این گسل توسط گسل‌های عرضی موجود در منطقه قطع شده است. وجود آبشار و چشمه‌های متعدد در این ناحیه بیانگر فعالیت نسبتاً بالای زمین‌ساختی است (شکل ۱).



شکل ۸) نمودار گل‌سرخ شکستگی‌ها (a) و رودخانه‌ها (b) در حوضه زیارت

نتیجه‌گیری

شاخص‌های زمین‌ریختی، روش مفیدی برای بررسی میزان فعالیت زمین‌ساختی فراهم می‌آورند. براساس مقدار شاخص‌های زمین‌ریختی طول-شیب رودخانه (SL)، نامتقارنی حوضه زهکشی (Af)، انتگرال فرازونجی (Hi)، منحنی فرازونجی (Hc)، شکل حوضه (Bs) و پیچ و خم پیشانی کوهستان (Smf)، شاخص کلی زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) برای حوضه رودخانه زیارت محاسبه شد، که براساس آن دو پهنه زمین‌ساختی در منطقه مشخص شد. با تحلیل و تجزیه این شاخص‌ها برای هر زیرحوضه در این منطقه می‌توان تفاوت بین مناطقی با فعالیت زمین‌ساختی بالا را از مناطقی با فعالیت زمین‌ساختی پایین تشخیص داد.

مسیر اصلی رودخانه زیارت بیشترین میزان فعالیت زمین‌ساختی را داراست. در ناحیه مورد مطالعه، بیش از نیمی از مساحت کل حوضه آبریز زیارت در رده فعالیت زمین‌ساختی نسبی بالا و متوسط (رده ۲ و ۳) هستند، که نشان‌دهنده فعال و نیمه‌فعال بودن حوضه زیارت است. فعالیت گسل کاسپین، رادکان و سایر گسل‌های فرعی منطقه در عهد حاضر نقش بسزایی را در ساختار زمین‌ریخت شناسی این منطقه ایفا نموده‌اند. مقایسه مسیر آبراهه با نقشه زمین‌شناسی بیانگر این مطلب است که مقادیر بالای شاخص شیب رودخانه منطبق با گسل‌های موجود و متقاطع با آبراهه است. می‌توان افزایش میزان فعالیت زمین‌ساختی (امتداد گسل‌ها و پاره‌های گسلی) در نواحی جنوبی و باختری این حوضه را مرتبط با بی‌هنجاری بالای شاخص شیب‌رود این بخش از گستره دانست. از سوی دیگر، شکل‌گیری روند رودخانه‌های این منطقه، به گونه‌ای است که با راستای گسل‌های فعال منطقه منطبق است، همچنین جبهه کوهستان با راستای گسل کاسپین منطبق است. به نظر می‌رسد انحراف و عدم تقارن رودخانه اصلی زیارت از فعالیت گسل کاسپین و رادکان در دشت و کوهستان پیروی می‌کند. نکته قابل توجه این است که اکثر زیرحوضه‌های خاوری این گستره نسبت به بخش جنوبی آن کج‌شدگی بالاتری نشان می‌دهد که به احتمال زیاد مربوط به فعالیت گسل‌های منطقه؛ به خصوص گسل‌های عرضی در بخش‌های خاوری است. مقایسه بردارهای نامتقارنی در حوضه زهکشی زیارت به طور آشکار با میزان و رده فعالیت زمین‌ساختی نسبی همخوانی دارد و فعالیت بالای زمین‌ساخت نسبی با نواحی که رودخانه‌ها میزان خیلی بالا و بالای کج‌شدگی را نشان می‌دهند، منطبق است.

همچنین، با مطالعات انجام شده بر روی روند شکستگی‌ها، آثار گسلی و آبراهه‌ها در ایستگاه‌های شمالی و مرکزی این منطقه بیانگر این مطلب است که ارتباط نزدیکی بین خطواره‌ها، عناصر ساختاری و روابط هندسی موجود بین آنها و موقعیت قرارگیری آبشارها و چشمه‌ها وجود دارد.

جدول ۲) تقسیم‌بندی شاخص‌های زمین‌ریختی و زمین‌ساخت فعال نسبی در زیر حوضه‌های رودخانه زیارت

شماره	SL	رده (SL)	AF-۵۰	رده (AF)	smf	رده (smf)	BS	رده BS	Hi	رده Hi	(s/n)	رده (Iat)
۱	۸۰۷/۶۲	۱	-۲۳/۲۷	۱	-	-	۱/۴۷	۳	۰/۶	۱	۱/۵	۲
۲	۷۲۷/۰۹	۱	-۲۶/۳۲	۱	-	-	۱/۰۹	۳	۰/۴	۲	۱/۷۵	۲
۳	۶۹۸/۲۷	۱	-۵/۵۲	۳	-	-	۱/۶۳	۳	۰/۴۳	۲	۲/۲۵	۳
زیارت	۷۱۸/۲۲	۱	-۱۰/۴۳	۲	۱/۳۵	۲	۳/۷۴	۲	۰/۹	۱	۱/۶	۲

منابع

- ۱- ارفع نیا رامین. (۱۳۸۹). تکتونیک فعال در منطقه اقلید، کاربرد مدل رقومی سرزمین (DTM) در مورفوتکتونیک، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، ش ۴، صص ۲۴۵-۲۴۶.
- ۲- بیاتی خطیبی مریم. (۱۳۸۸). تشخیص فعالیت‌های نئوتکتونیک در حوضه آبریز قرقوچای با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و مورفوتکتونیک، مجله علمی- پژوهشی فضای جغرافیایی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، ۲۵، صص ۲۳-۵۰.
- ۳- خادمی محسن. (۱۳۸۹). محاسبه و تفسیر برخی شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی پیرامون گسل طرود، جنوب دامغان، مجله علوم زمین، ش ۷۵، صص ۴۷-۵۶.
- ۴- خسروی، قاسم و سیف، عبدالله. (۱۳۸۹). بررسی تکتونیک فعال در قلمرو تراست زاگرس منطقه فارس، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ش ۷۴، صص ۱۲۵-۱۴۶.
- ۵- روستائی، معصومه؛ آق‌آتابای، مریم؛ رقیمی، مصطفی؛ رحیمی چاکدل، عزیز و نعمتی، مجید (۱۳۹۱). تحلیل فعالیت‌های نوزمین‌ساختی با استفاده از شواهد ریخت‌زمین‌ساختی در حوضه آبریز قره‌سو، جنوب باختر استان گلستان، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ش ۲۴، صص ۵۵-۶۵.
- ۶- شمعیان، غلامحسین؛ رقیمی، مصطفی؛ یخکشی، ابراهیم؛ احمدی، محمدحسن؛ یارمحمدی، محمد و دهقان، حسین (۱۳۸۴). هیدروژئوشیمی منابع آب زیرزمینی در حوزه آبریز گرگان‌رود- قره‌سو، استان گلستان، مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران. دانشگاه تربیت معلم تهران. صص ۱۹۰-۱۹۸.
- ۷- کرمی فریا. (۱۳۸۸)، ارزیابی فعالیت‌های تکتونیک در حوضه زهکشی سعیدآبادچای، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، ش ۶۹، صص ۶۷-۸۲.
- ۸- مختاری، داوود. (۱۳۸۴). نقش نوزمین‌ساخت در تکامل سامانه‌های رودخانه‌ای در کواترنر؛ مطالعه موردی رودخانه‌های دامنه شمالی میشوداغ، مجله علوم زمین؛ ش ۷۵، ۶۲-۷۵.
- ۹- مقصودی، مهران؛ جعفری اقدم، مریم؛ باقری سید شکری، سجاد و مینایی، مسعود. (۱۳۹۰). بررسی تکتونیک فعال حوضه آبخیز کفرآور با استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک و شواهد ژئومورفولوژیکی، مجله جغرافیا و توسعه، ش ۲۵، صص ۱۱۱-۱۳۶.
- 10- Acar. A. and Dincer, I., (2005). Left upstream slope design for the Catalan Dam, Adana Turkey and its behavior under actual earthquake loading. Engineering Geology, 82, 1-11.
- 11- Amerson, B.E., Montgomery, D.R and Meyer, G., (2007). Relative size of fluvial and glaciated valleys in cenreral Idaho. Geomorphology, 50, 20-23.
- 12- Bull, W.B., (1984). Tectonic geomorphology. Journal of Geological Education, 32, 310- 324.
- 13- Dehbozorgi, M., Pourkermani M., Arian M., Matkan A. A., Motamedi H., and Hosseiniasl A., (2010). Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran. Geomorphology, 1- 13.
- 14- EL Hamdouni R., Irigaray C., Fernandez T., Chacon, J, and Keller, E. A., (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). Geomorphology, 969, 150-173.

- 15- Hofmann M.H., Hendrix M.S., Sperazza M., Moore J.N., (2006), Neotectonic Evolution and Fault Geometry Change Along a Major Extensional Fault System in the Mission and Flathead valleys, NW- Montana, *Journal of Structural Geology*. 28, 1244- 1260.
- 16- Hurtrez J. E., Lucazean F., Lave J., And Avouac J. P., (1999). Investigation of the relationships between basin morphology, tectonic uplift and denudation from the study of an active fold belt in Siwalik Hills, Central Nepal. *Journal of Geophysical Research* 104: 12/779-12/796.
- 17- Keller, E. A and Pinter, N., (2002). *Active tectonics, Earthquakes, Uplift and Landscape*. Prentice Hall: New. 362.
- 18- Khavari R., Arian, M. and Ghorashi, M., (2009). Neotectonics of the Soyth Central Alborz Drainage Basine, in NW Tehran, N Iran. *Journal of Applied Sciences*. 23, 4115 – 4126.
- 19- Molin, P., Pazzaglia, F. J and Dramis, F., (2002). Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly- deforming arc, Sila Massif, Calabria, southern Italy. *Palazzo Ducale- Sala della Muta*. 45, 559-589.
- 20- 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.
- 21- Rockwell, T. K., Keller E. A., and Johnson D. L., (1985). Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California. In: Morisawa, M. (Ed), *Tectonic Geomorphology*. Proceedings of the 15 th Annual Geomorphology Symposium. Allen and Unwin Publishers, Boston, MA, 183-207.
- 22- Silva, P G., (1994). Evolucion geodinamica dela depression del Guadalentin desde el Mioceno Superion hasta la Actualidad: Neotectonica y geomorfologia. Dissertation, Complutense University, Madrid, Ph.D.
- 23- Singh O., (2009). Hypsometry and erosion proneness: a case study in the lesser Himalayan Watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*. 8, 53-59.
- 24- Stepancikova P. J., Stemberh J., Vilimeh V., and Kostak B., (2008), Neotectonic development of drainage networks in the East Sudeten Mountains and monitoring of recent fault displacements (Czech Republic). *Geomorphology*. 102, 68-80.
- 25- Strahler A. N., (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*. 63, 1117-1142.
- 26- Wisniewski, P. A and Pazzaglia, F.J., (2002). Epeirogenic Controls on Canadian River Incision and Landscape Evolution, Great Plains of Northeastern New Mexico. *The Journal of Geology*. 110, 437- 456.

