

بررسی ارتباط شاخص‌های ریخت زمین ساختی با شتاب زمین لرزه در پهنه‌های گسلی ایندس، ایپک، آوج و کوشک نصرت (شمال باختر ساوه)

بهار رضایی نهال^۱، محسن پورکرمانی^{۲*}، مهدی زارع^۳، مریم ده بزرگی^۴ و رضا نوزعی^۵

۱. دانشجوی دکتری، تکتونیک، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

۲. استاد تکتونیک، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

۳. استاد گروه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله جنبش شدید زمین، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۴. استادیار تکتونیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی

۵. استادیار تکتونیک، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۴

چکیده

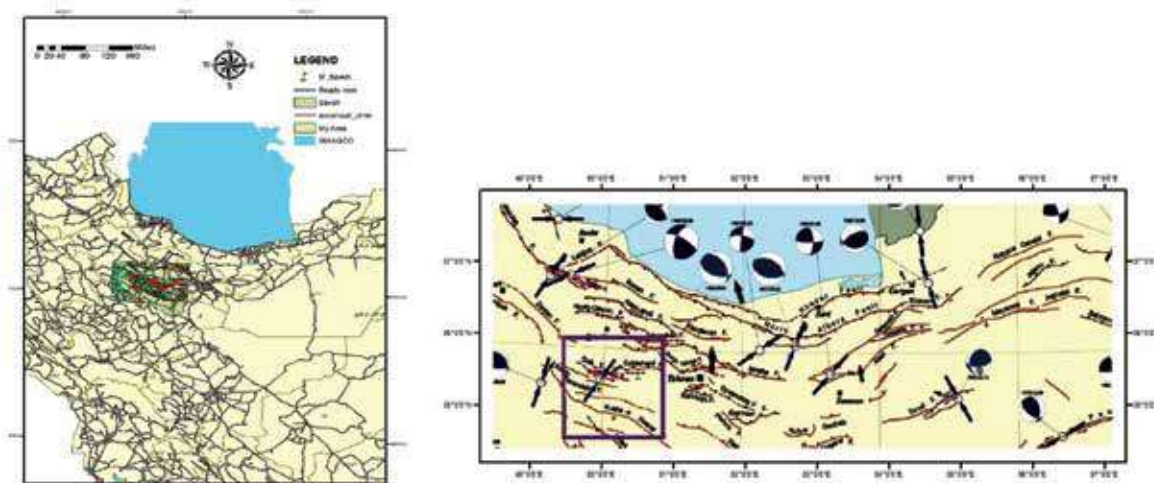
گستره شمال غرب شهرستان ساوه در پهنه گسلی ایندس، کوشک نصرت، آوج و ایپک قرار دارد. گسل‌های ایندس، کوشک نصرت، آوج و ایپک از گسل‌های مهم ایران مرکزی به شمار می‌روند و در کواترنری نیز فعال می‌باشند. آخرین حرکات این گسل‌ها را به عهد حاضر نسبت داده‌اند، بنابراین برآورد شاخص‌های مورفومتری به منظور شناسایی تأثیر تکتونیک فعال آن بر تکامل تکتونیکی حوضه‌های زهکشی ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این مطالعه به تجزیه و تحلیل شش شاخص مورفوتکتونیکی مهم نظیر گرادیان طولی رودخانه، نبود تقارن حوضه زهکشی، انتگرال هیپسومتریک، شکل حوضه زهکشی، نسبت عرض کف به ارتفاع دره و پیشانی کوهستان پرداخته شده است. برای تشکیل حوضه‌ها بر روی پهنه مورد مطالعه از نرم‌افزار (از Arc Hydro افزونه‌های نرم‌افزار Arc GIS) بر پایه داده‌های حاصل از مدل رقومی ارتفاعی استفاده شده است، سپس شش شاخص مورفوتکتونیکی بر روی هر یک از حوضه‌ها مورد محاسبه و رده‌بندی قرار گرفته است. در نهایت، شاخص تکتونیک فعال (Iat) محاسبه شده که بر اساس آن پهنه در چهار رده فعالیت تکتونیکی بسیار بالا، بالا، متوسط و پایین قرار گرفته است. بر اساس شاخص IAT، پنج درصد از محدوده مورد مطالعه، فعالیت تکتونیکی بسیار بالا نشان می‌دهند، ۲۵ درصد از پهنه مورد مطالعه فعالیت تکتونیکی بالا، ۶۵ درصد فعالیت تکتونیکی متوسط و حدود پنج درصد هم فعالیت تکتونیکی پایین را نشان می‌دهند. در گستره مطالعاتی بیشترین سطح فعالیت تکتونیکی در بخش شمال شرق پهنه می‌باشد. در اکثر بخش‌ها میزان سطح فعالیت بالا و متوسط می‌باشد و مرتبط با فعالیت گسل‌های کوشک نصرت، ایپک، آوج در نظر گرفته شده است.

واژه‌های کلیدی: ایران مرکزی، تکتونیک فعال، شاخص‌های مورفومتری، گسل کوشک نصرت، گسل ایندس، گسل آوج، گسل ایپک.

مقدمه

در بین گسل‌های فعالی از قبیل ایندس و کوشک نصرت و به دلیل تداوم همگرایی صفحه عربی و ایران، از نظر لرزه‌خیزی فعال است. به طوری که در نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله ایران، جز پهنه‌های با خطر بالا و خیلی بالا قرار دارد (Nowroozi and Mohajer-Ashjai, 1985) و شواهد بریدگی و جابجایی رسوبات کواترنری توسط گسل‌های پهنه موید آن می‌باشد (Babaahmadi, A., Safaei, H., Yassaghi, A., Vafa, H., Naeimi, A. and Madanipour, S., 2010). راه‌های دسترسی به پهنه، از شمال غرب شهرستان ساوه، جنوب غرب شهر کرج و ... می‌باشد (شکل ۱).

ایران مرکزی، به صورت مثلثی در مرکز ایران قرار دارد، از اطراف به ارتفاعات البرز و یک رشته فروافتادگی و کمربندی از گسل‌های مستقیم و پرشیب کمربند سنجند-سیرجان محدود می‌شود (نبوی، ۱۳۵۵) در کل پهنه ایران مرکزی به خصوص در بخش‌های حاشیه‌ای، شدت فعالیت‌های تکتونیکی به دلیل برخوردی همگرایی بین کمربندهای مختلف بالا است (Alavi, 1991 و Alavi, 1994) و (Alavi, 1996). به همین دلیل خردشدگی‌ها و گسلش‌های بیشتری در حاشیه ایران مرکزی، به عنوان حاشیه خرده قاره، انتظار می‌رود. پهنه مورد مطالعه به دلیل قرار گرفتن



شکل ۱. راه‌های دسترسی و موقعیت جغرافیایی پهنه مورد مطالعه (Google earth)

(Altin, T.b, Altin, B.N., 2011 و Reddy, G.P.O.) بنابراین این شاخص‌ها می‌توانند به عنوان یک ابزار سودمند در برآوردهای تکتونیک فعال شناخته و به کار گرفته شوند. (Keller, E.A., Pinter, N., 2002) و (Molin, P., Pazzaglia, F.J., Dramis, F. 2004, Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., Bardajm, T., 2003). همچنین مقایسه بین چندین شاخص مورفوتکتونیکی با نرم‌افزارهایی مانند Arc GIS می‌تواند یک روش عددی دقیق را در تعیین فعالیت تکتونیکی پهنه فراهم کند (Keller, E. and pinter, N., 1996) بنابراین برای برآورد تکتونیک فعال گستره مطالعاتی با استفاده از

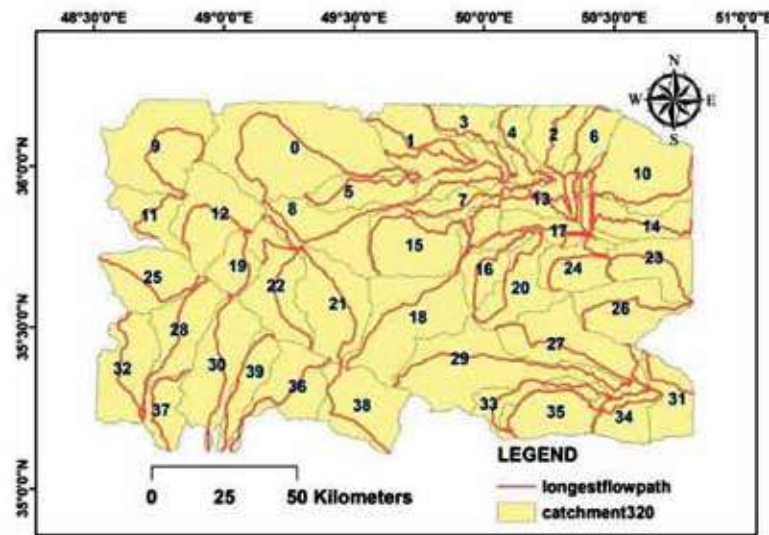
این پهنه در بخشی از زون تکتونیکی تبریز-ساوه قرار گرفته است (Alavi, M., 1991). گسل‌های ایندس، ایپک، آوج و کوشک نصرت در پهنه گسلی مورد مطالعه جزو گسل‌های اصلی پهنه است. با توجه به فعالیت‌های لرزه‌خیزی و سایر فعالیت‌های نوزمین ساختی مشاهده شده جزو گسل‌های فعال در کواترنری شناخته می‌شوند. برای بررسی تأثیر فعالیت اخیر این پهنه گسلی، از تجزیه و تحلیل حوضه‌های زهکشی واقع بر پهنه شمال غرب ساوه به وسیله شاخص‌های مورفومتری استفاده شده است. ویژگی‌های مورفوتکتونیکی حوضه‌های زهکشی در بیشتر نقطه‌های جهان به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند

محاسبه می‌شود. در این محاسبه از لایه رستری تجمع جریان به‌عنوان داده ورودی استفاده می‌شود. در ادامه، یک شبکه جریان ایجاد و سپس رده جریان تعیین گردیده تا مشخص شود هرکدام از زهکش‌ها در چه رده‌ای قرار دارند. با این کار یک رده عددی برای هر قطعه از شاخه‌های شبکه خطی به دست آمد. برای انجام این کار دو نوع رده‌بندی STRAHLER و SHREVE وجود دارد که در این مطالعه از روش STRAHLER استفاده شده است. در این روش رده جریان فقط وقتی افزایش می‌یابد که جریان‌های دیگر با رده مشابه آن را قطع کنند. بنابراین اتصال یک جریان رده اول با یک جریان رده دوم به‌جای اینکه یک اتصال رده سوم ایجاد کند یک جریان رده دوم باقی خواهد ماند. درنهایت، به‌منظور استخراج شبکه رودخانه‌ای، فایل رستری به شبکه خطی تبدیل شده است (شکل ۳). در نتیجه با استفاده از نتایج مراحل قبل، ۴۰ حوضه زهکشی و رودخانه‌های اصلی آنها در پهنه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.1 تعریف و تشکیل شد (شکل ۳). شاخص‌های مورفومتریک در آنها با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی و نقشه‌های توپوگرافی به‌دست‌آمده از آن اندازه‌گیری شده‌اند. در مرحله بعد، به‌منظور تعیین واحدهای زمین‌شناسی و گسل‌های اصلی پهنه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ پهنه استفاده گردیده و در ادامه برای مشخص نمودن فعالیت عناصر ساختاری پهنه در واحدهای کواترنری نظیر مخروط‌افکنه‌ها تصویر ماهواره‌ای IRS P5 سازمان جغرافیایی ارتش به کار گرفته شده است، سپس با انجام مطالعات صحرایی گسترده در تمام بخش‌های پهنه مورد مطالعه صحت داده‌های فوق تأیید شده است. درنهایت، ارتباط بین داده‌های کمی مورفومتریک اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار، ساختارهای به‌دست‌آمده از مطالعات صحرایی و خطواره‌های تعیین شده توسط تصاویر ماهواره‌ای در پهنه، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و از تلفیق آنها در پهنه شاخص زمین ریختی نهایی (Iat) تهیه شده و زمین‌ساخت فعال نسبی در سرتاسر گستره مورد مطالعه تعیین شده است.

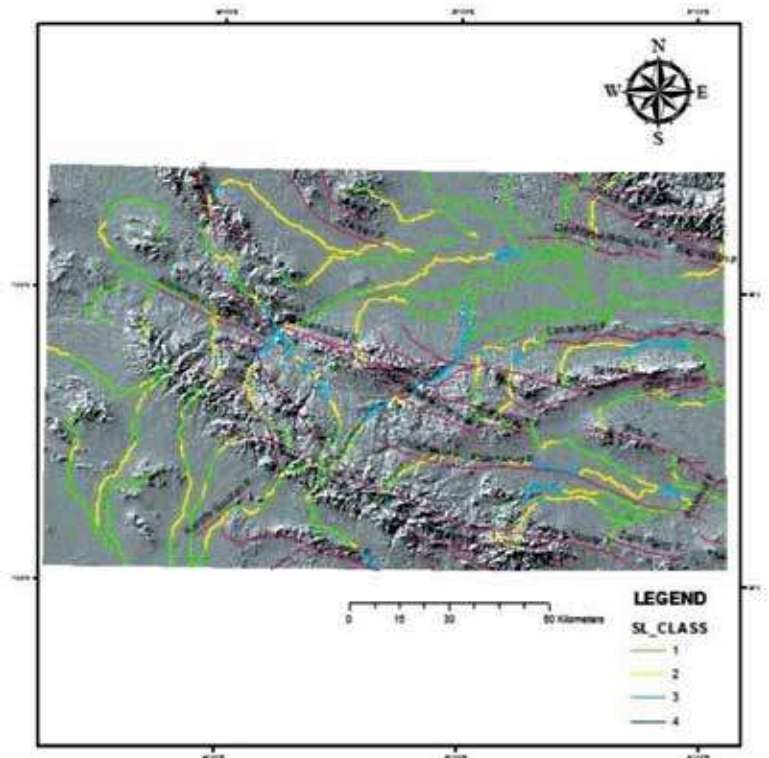
افزونه ArcHydro در محیط نرم‌افزار ArcGIS حوضه‌های زهکشی و رودخانه‌های اصلی هر حوضه استخراج شده‌اند (شکل ۲) و به بررسی شش شاخص مهم نکتونیک پرداخته شده است که عبارتند از: گرادیان طولی رودخانه، نبود تقارن حوضه زهکشی، انتگرال هیپسومتریک، نسبت شکل حوضه زهکشی، نسبت عرض کف دره به ارتفاع دره و پیچ‌وخم پیشانی کوهستان. علاوه بر این به‌منظور تعیین دقت همه شاخص‌ها و مشاهده لند فرم‌های نکتونیک مرتبط با گسل و چین و همچنین تکمیل کردن نتیجه‌های این مطالعه، عملیات صحرایی انجام شد و داده‌های حاصل از آن با تجزیه و تحلیل‌های مورفونکتونیک مورد مقایسه قرار گرفت.

روش مطالعه

به‌منظور تعیین نکتونیک فعال در مقیاس حوضه زهکشی و با استفاده از شاخص‌های مورفومتری در پهنه مورد مطالعه، در ابتدا حوضه‌های زهکشی با به‌کارگیری افزونه Arc Hydro در نرم‌افزار Arc GIS 10.1 استخراج پهنه به ۴۰ حوضه مجزا تقسیم‌بندی شد. سپس اقدام به ساخت شبکه رودخانه‌های اصلی در پهنه مورد مطالعه شده و درنهایت، بر روی حوضه‌های تشکیل شده شاخص‌های مورفومتری اندازه‌گیری شده است. برای ایجاد شبکه زهکشی ابتدا حفره‌های موجود در مدل رقومی ارتفاعی خام پر می‌شود، در واقع این گودی یا چاهک‌ها، سلول‌هایی بدون مسیر زهکش تعریف شده هستند و هیچ‌کدام از سلول‌های اطراف پایین تر از آن قرار ندارند، نتیجه این کار یک خروجی رستری با چاهک‌های پر شده است. در مرحله بعد جهت جریان زهکش‌ها محاسبه شده و یک خروجی رستری از هر سلول نسبت به پرشیب‌ترین سلول مجاورش در جهت پایین شیب ایجاد شده است آنگاه تجمع جریان در نقطه‌های مختلف مدل رقومی ارتفاعی محاسبه شده و یک خروجی رستری از جریان تجمع یافته برای هر سلول به‌دست‌آمده است. سپس این قابل رستری تجمع جریان تغییر اندازه یافته است، این تغییر اندازه با محاسبه لگاریتم بر مبنای ۱۰ برای همه سلول‌ها در یک نقشه رستری



شکل ۲. حوضه‌های زهکشی ایجاد شده در پهنه مورد مطالعه



شکل ۳. رده‌بندی آبراهه‌های استخراج شده از مدل ارتفاعی رقومی پهنه مورد مطالعه

شاخص‌های مورفوتکتونیک

شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL)

ارتباط دارد (Hack, J.T., 1973 و Hack, J.T., 1982) به دلیل حساسیت شاخص SL به تغییرات شیب بستر کانال رودخانه این شاخص می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر و مناسب برای برآورد آشفتنگی جریان رودخانه مورد استفاده قرار گیرد

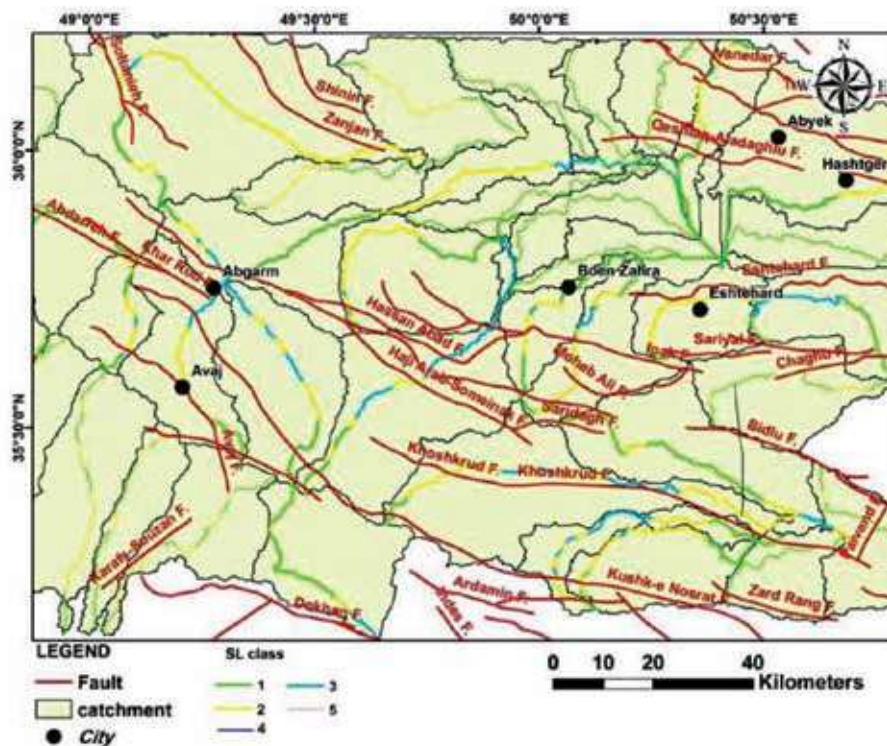
شاخص گرادیان طولی رود (SL) یکی از شاخص‌های مورفومتری است که ارتباط بین فرسایش و جریان رودخانه را مشخص می‌کند، این شاخص همچنین با قدرت رود نیز

متر به لایه آبراهه‌ها در محیط Arc GIS 10.1 افزوده شده و مقادیر L_{sc} و $(H/\Delta Lr\Delta)$ اندازه‌گیری شده‌اند. آنگاه، بر اساس میزان شاخص SL به هر قطعه آبراهه که شامل فاصله بین نقطه میانی دو خط تراز مجاور با ارتفاع معین (مکانی که اندازه‌گیری شاخص از آنجا شروع شده است) تا مرتفع‌ترین نقطه کانال می‌باشد، یک‌رنگ مشخص اختصاص یافته است، به طوری که مقادیر SL کوچک‌تر از ۳۰۰ رنگ سبز، ۳۰۰-۵۰۰ رنگ زرد، ۵۰۰-۹۵۰ رنگ آبی روشن، ۹۵۰-۱۵۵۰ رنگ آبی تیره، ۱۵۵۰-۳۰۰۰ رنگ بنفش و بیشتر از ۳۰۰۰ رنگ قرمز دارند (El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., Keller, E.A., 2007). در پایان، لایه آبراهه‌ها با مقادیر معین شاخص SL، بر روی مدل ارتفاع رقومی قرار داده شد و نقشه شاخص گرادیان طولی رودخانه در گستره مورد مطالعه تهیه گردید (شکل ۴). با توجه به نقشه تهیه شده بیشترین مقادیر SL در حوضه‌های (صفر و شش و ۱۲ و ۲۲ و ۲۹) اندازه‌گیری شده است که تحت تاثیر فعالیت گسل‌های کوشک نصرت، حسن‌آباد، ایپک و سلطانیه می‌باشند.

[۱۵]. معادله شاخص SL به‌وسیله رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Hack, J.T., 1957 Hack, J.T., 1973, Hack, J.T., 1982, Bull, W.B., 2007):

$$SL = (\Delta H / \Delta Lr) L_{sc} \quad (1)$$

در رابطه ۱ شاخص گرادیان طولی رودخانه، $(H/\Delta Lr\Delta)$ گرادیان مسیر کانال رودخانه و L_{sc} طول کلی کانال رودخانه از نقطه شروع شاخص تا مرتفع‌ترین نقطه کانال می‌باشد. علاوه بر مواردی که در بالا برای کاربرد شاخص SL گفته شد، این شاخص همچنین می‌تواند برای برآورد فعالیت تکتونیکی نسبی به کار گرفته شود (Keller, E.A., Pinter, N., 2002). برای محاسبه این شاخص از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر در امتداد هر مسیر جریان و برای تمامی حوضه‌ها در نرم‌افزار Arc GIS 10.1 استفاده شده است. درنهایت میانگین مقادیر این شاخص برای هر زیرحوضه نیز محاسبه شده است. در اینجا، به‌منظور محاسبه شاخص SL برای هر کدام از آبراهه‌های موجود در ۴۰ زیر حوضه گستره مورد مطالعه، لایه توپوگرافی تهیه شده از مدل رقومی ارتفاعی با دقت ۳۰

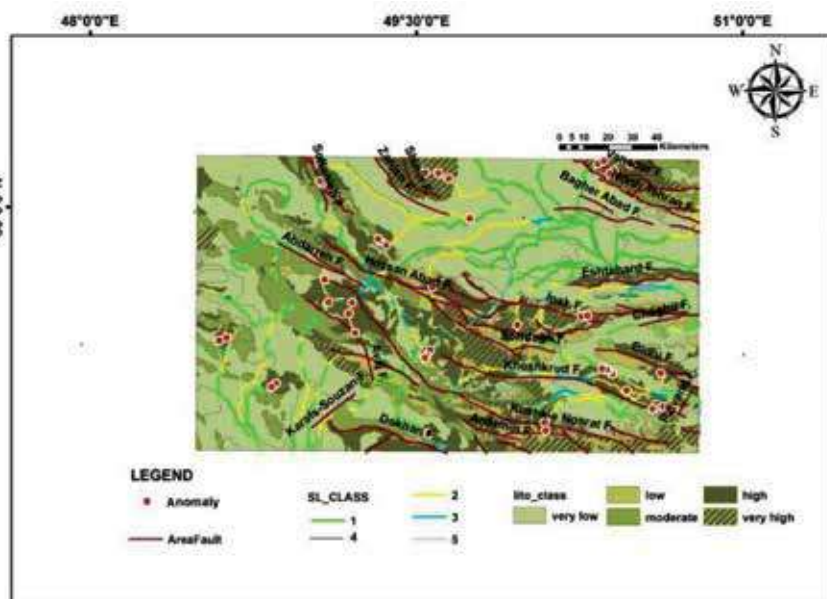


شکل ۴. نقشه شاخص SL بر روی مدل ارتفاعی رقومی گستره مورد مطالعه

بررسی ارتباط شاخص‌های ریخت زمین ساختی با شتاب زمین لرزه...

مقادیر زیاد آنومالی شاخص SL فوق می‌توانند به‌عنوان علائم زمین ساختی تفسیر شوند. با توجه به داده‌های موجود و نقشه زمین‌شناسی مقادیر بالای آنومالی شاخص SL با روند گسل‌های کوشک نصرت و حسن‌آباد همخوانی دارند.

در شکل ۵، نقشه توزیع مقادیر آنومالی شاخص SL بر روی سنگ‌های با مقاومت مختلف، با ثبت مقادیر آنومالی بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ رقومی شده (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)؛ رسم شده است. با در نظر گرفتن جنس سنگ دره‌های رودخانه‌ای مذکور،



شکل ۵. نقشه توزیع مقادیر آنومالی شاخص SL بر روی سنگ‌های با مقاومت مختلف

دارد و یا اینکه تحت تاثیر ویژگی‌های سنگ‌شناسی پهنه است. به‌طور کلی برای شبکه زهکشی و حوضه‌ای که تداوم جریان در حالت ثابتی وجود دارد، مقدار این شاخص باید برابر ۵۰ باشد. این شاخص به خم‌شدگی عمود بر امتداد زهکش اصلی در حوضه تأثیرپذیر مرتبط می‌باشد. مقادیر بیشتر اگر خم‌شدگی در جهت عکس باشد، Af کمتر از ۵۰ می‌باشد. بیشتر شاخص‌های مورفوتکتونیک در مناطق و حوضه‌هایی که وضعیت سنگ‌شناسی مشابه دارند، نتایج بهتری را ارائه می‌دهند. در محاسبه شاخص Af و تجزیه و تحلیل نتایج، تأثیرات کنترل‌کننده‌های سنگ‌شناسی و شرایط اقلیمی را در نظر نمی‌گیرند.

در این مطالعه، شاخص نبود تقارن حوضه زهکشی و مقادیر مساحت سمت راست حوضه (Ar) و مساحت کل حوضه زهکشی (At) در نرم‌افزار Arc GIS 10.1 محاسبه شده و شاخص Af در ۴۰ حوضه زهکشی در پهنه مورد مطالعه مورد بررسی و اندازه‌گیری قرار گرفته است. مقدار

نبود تقارن حوضه زهکشی (Af)

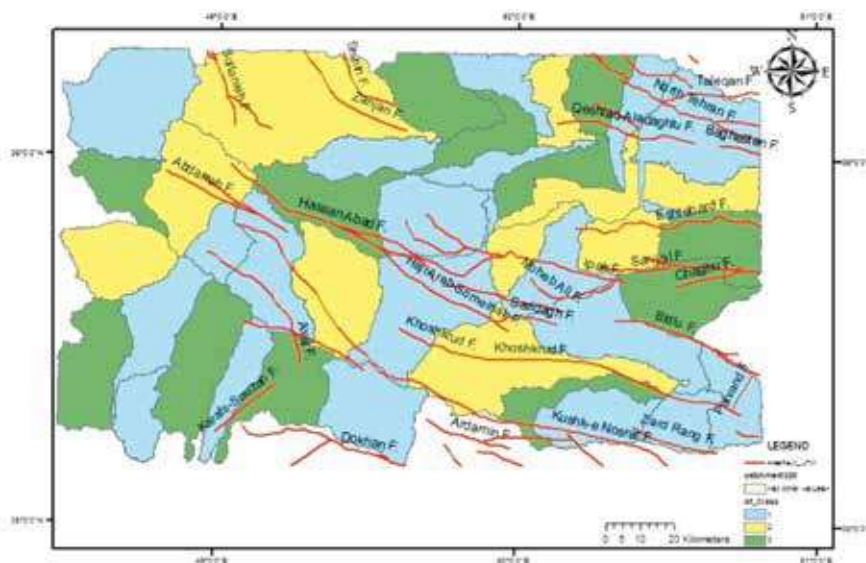
شاخص نبود تقارن حوضه زهکشی (Af) برای ارزیابی و بررسی کج‌شدگی حوضه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل هندسی شبکه رودها را می‌توان از نظر کیفی و کمی با روش‌های متعددی توصیف کرد. عامل نبود تقارن از رابطه ۲ عنوان شده در اینجا محاسبه می‌شود (Hare, P.W., Gardner, E.A., Pinter, N., 2002):

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

در رابطه ۲، Ar مساحت سمت راست حوضه نسبت به رود اصلی (در جهت پایین رود) و Ar مساحت کل حوضه زهکشی می‌باشد. اگر نتیجه محاسبه شاخص نبود تقارن حوضه زهکشی نزدیک به ۵۰ باشد حاکی از آن است که حوضه دارای یک شرایط ثابت و بدون کج‌شدگی یا کج‌شدگی اندک است. اگر مقدار این شاخص بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از ۵۰ باشد در این صورت حوضه کج شده است و می‌توان استنباط کرد که حوضه تحت تاثیر فعالیت تکتونیک قرار

سه با بازه $43 \leq Af < 57$ نشان دهنده مقادیر پایین کج شدگی حوضه هستند [۲۳]. در نتیجه، نقشه نبود تقارن حوضه با استفاده از نرم افزار Arc GIS 10.1 تهیه و تولید شده است (شکل ۶). بیشترین مقادیر این شاخص در حوضه‌های (۳) و ۵ و ۶ و ۹ و ۱۰ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۲ و ۲۷ و ۲۸ و ۳۱ و ۳۴ و ۳۵ و ۳۷ و ۳۸ و ۳۹ اندازه‌گیری شده است.

این شاخص از ۱۵ (در حوضه ۶) تا ۸۵ (در حوضه ۱۰) متغیر است. پس از محاسبه این شاخص برای تمامی حوضه‌ها، نتایج این مقادیر در سه رده ۱ و ۲ و ۳ طبقه‌بندی شدند. رده یک با بازه $Af \geq 65$ یا $Af < 35$ نشان دهنده مقادیر بالای کج شدگی حوضه، رده دو با بازه $35 \leq Af < 43$ یا $57 \leq Af < 65$ نشان دهنده مقادیر متوسط کج شدگی و رده



شکل ۶. نقشه نبود تقارن حوضه زهکشی در پهنه مورد مطالعه

در این شاخص ارتفاع کمینه، بیشینه و میانگین، از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر با استفاده از نرم افزار Arc GIS نسخه ۱۰/۱ محاسبه شده است. بعد از محاسبه شاخص H_i برای تمامی حوضه‌های زهکشی این شاخص در سه رده قرار گرفته است [۲۰]. رده یک شامل منحنی‌های محدب یا کوژ با مقدار انتگرال هیپسومتری بیشتر و برابر با $0.5 \leq H_i$ این رده از منحنی‌های هیپسومتری که مقادیر بالایی دارند نشان دهنده توپوگرافی بالای حوضه نسبت به مقدار میانگین آن است، مانند سطوح بالآمده و فلات‌هایی که توسط رودها بریده شده‌اند. رده ۲ شامل منحنی‌های محدب-مقعر $(0.4 \leq H_i < 0.5)$ این رده حالت حدواسط بین رده یک و دو است و رده سه شامل منحنی‌های مقعر یا کاو با مقدار انتگرال هیپسومتری کمتر از $(H_i < 0.4)$ است، این رده بیان کننده بریده شدن شبکه آبریز در سطوحی با توپوگرافی ملایم‌تر نسبت به رده یک است. برای

منحنی هیپسومتری و انتگرال هیپسومتری (H_i)

انتگرال هیپسومتری، توزیع سطوح ارتفاعی در یک پهنه و حوضه آبریز را نشان می‌دهد (Strahler, A.N., 1952). شاخص H_i مساحت سطح زیرین منحنی هیپسومتری را توصیف می‌کند بنابراین نشان دهنده ظرفیت یک حوضه بدون فرسایش است. یکی از روش‌های ساده برای توصیف شکل منحنی هیپسومتری یک حوضه، محاسبه انتگرال هیپسومتری آن است. انتگرال هیپسومتری حوضه آبریز با استفاده از مساحت سطح زیرین منحنی هیپسومتری که دست می‌آید. معادله‌ای که برای محاسبه انتگرال هیپسومتری استفاده می‌شود به صورت رابطه ۳ است (Bull, W.B., 2007, Keller, E.A., Pinter, N., 2002. Mayer, L., 1990):

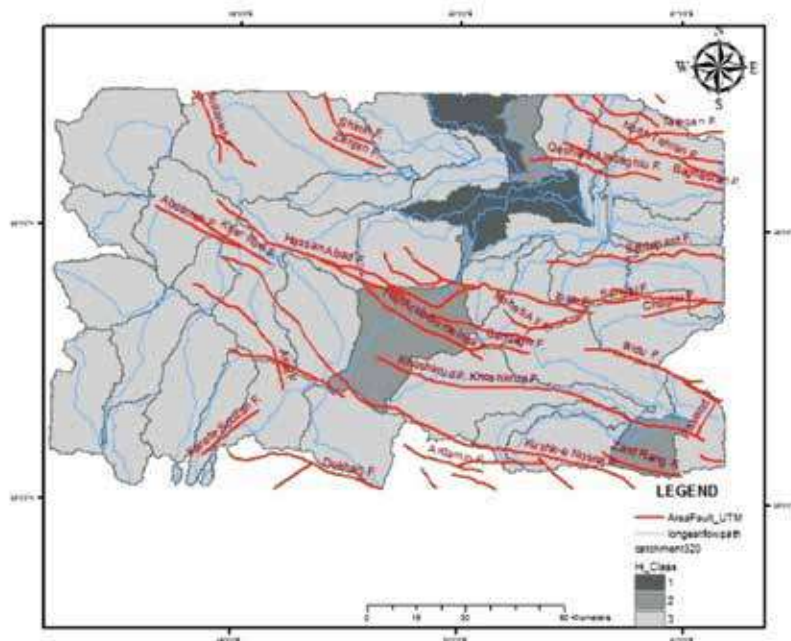
$$H_i = \frac{\text{Average elevation} - \text{min elevation}}{\text{max elevation} - \text{min elevation}} \quad (3)$$

بلندی‌ها بسیار مهم هستند به‌عنوان یک روش کارآمد برای تشخیص مناطق فعال و غیرفعال زمین ساختی اهمیت ویژه‌ای دارند. انتگرال هیپسومترى در ۴۰ حوضه مورد مطالعه اندازه‌گیری شده است. کمترین مقدار انتگرال هیپسومترى اندازه‌گیری شده متعلق به حوضه شماره ۲۳ با مقدار (۰/۱۱) است که شکل منحنی مربوط به آن مقعر است و بیشترین مقدار این انتگرال در حوضه شماره ۷ با مقدار (۰/۵۵) و منحنی به شکل محدب به‌دست‌آمده است. در شکل ۷ زیرحوضه‌ها بر اساس سطح Hi به سه رده یک، دو و سه تقسیم‌بندی شده‌اند که به ترتیب نمایانگر فعالیت زمین ساختی بالا، متوسط و پایین هستند. همان‌طور که از این شکل مشخص است؛ حوضه‌های با رده فعالیت یک و دو در محدوده گسل‌های قشلاق آاداغ لو، کوشک نصرت، حسن‌آباد، خشک‌رود، حاج عرب، کورچشمه، ساری دره- حاج عرب قرار گرفته‌اند.

به‌صورت کلی بخش بزرگی از پهنه، رده فعالیت پایین را نشان می‌دهد که بیانگر این موضوع است که پهنه مورد مطالعه نسبت به اندیس هیپسومترى حساسیت پایین را داشته است به‌عبارت‌دیگر اختلاف ارتفاع زیادى در زیر حوضه‌ها دیده نمی‌شود.

تشکیل منحنی هیپسومترى یک حوضه زهکشی، ارتفاع کل حوضه در برابر مساحت کل حوضه رسم می‌شود. به دلیل اینکه در منحنی هیپسومترى، مساحت و ارتفاع حوضه بر مساحت و ارتفاع کل حوضه تقسیم می‌شود، اعداد به‌صورت بی بعد هستند، بنابراین منحنی‌های هیپسومترى، مستقل از مساحت و ارتفاع می‌باشند، بنابراین می‌توان این نوع منحنی‌ها را در حوضه‌هایی که از نظر اندازه، ارتفاع و مساحت باهم تفاوت دارند با یکدیگر مقایسه کرد. از این رو با توجه به این خاصیت منحنی‌های هیپسومترى می‌توان از نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس‌های مختلف استفاده کرد. از رابطه بین انتگرال هیپسومترى و مقدار بریدگی شبکه‌های زهکشی به‌عنوان یک شاخص برای تشخیص چرخه فرسایش چشم‌اندازها در پهنه استفاده می‌شود. این چرخه در خلال چند مرحله به وقوع می‌پیوندد که عبارت‌اند از: مرحله جوانی، بلوغ و پیری.

مرحله جوانی در این چرخه با بریدگی‌های عمیق و برجستگی‌های ناهموار تعریف می‌شود. در مرحله بلوغ شاهد یک تعادل و توازن در فرآیندهای ژئومورفولوژى هستیم. مرحله پیری با مناظری که نزدیک به سطح اساس هستند و برجستگی‌های بسیار هموار شده دارند توصیف می‌شود. بنابراین منحنی‌های هیپسومترى که در ارزیابی پستی و



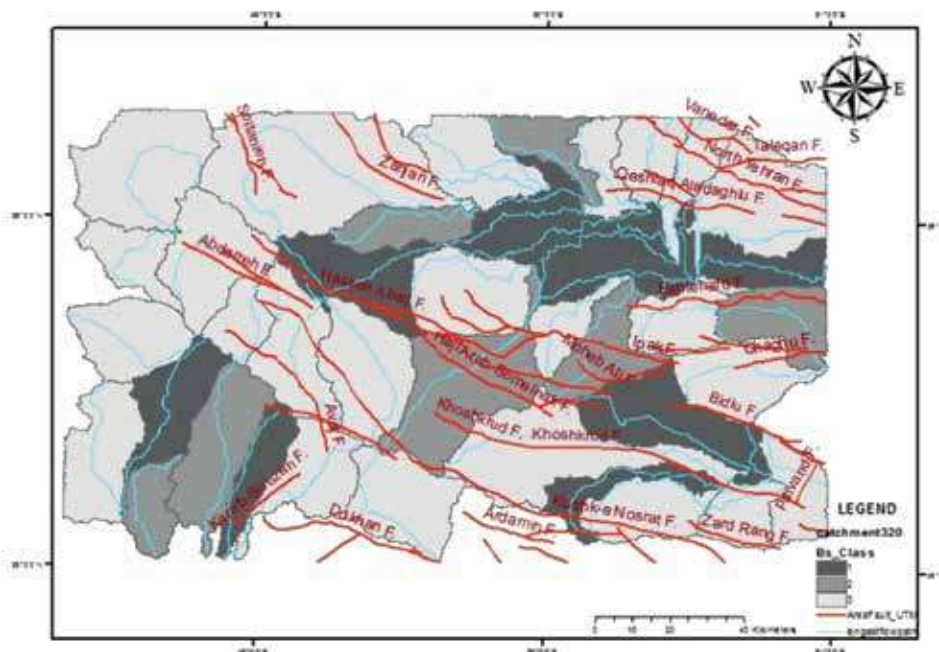
شکل ۷. نقشه رده‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس اندیس Hi در پهنه مورد مطالعه

می‌شود. شاخص B_s برای تمامی حوضه‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و نتایج آن در سه رده قرار گرفته‌اند، این سه رده عبارت‌اند از: رده یک فعالیت تکتونیکی ($B_s \geq 4$)، رده دو فعالیت تکتونیکی ($3 \leq B_s < 4$) و رده سه فعالیت تکتونیکی (El Hamdouni, R., Irigaray, C., (Bs \leq 3) (Fernandez, T., Chacón, J., Keller, E.A., 2007). مقدار فعالیت زمین ساختی در رده یک بیشترین مقدار در رده سه کمترین مقدار است. نتایج محاسبه شاخص B_s در گستره مطالعاتی در ۴۰ حوضه مورد بررسی قرار گرفته است. محدوده نتایج این شاخص از ۱/۶۹ (در حوضه ۱۹) تا ۱۱/۳۵ (در حوضه ۳۳) متغیر است. کم و بیش ۶۰ درصد از حوضه‌های مورد مطالعه شکلی نزدیک به دایره می‌باشند و به رده سه فعالیت زمین ساختی تعلق دارند. در نقشه به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری اندیس شکل حوضه (شکل ۸) چندین مرکز تمرکز زیرحوضه‌های کشیده دیده می‌شود. از آنجا که زیرحوضه‌های کشیده که با رده ۱ نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی بالا در آن حوضه‌اند، تمرکز این زیرحوضه‌ها در اطراف یک گسل را می‌توان به فعالیت بالای کواترنری آن گسل نسبت داد. بالاترین تمرکز زیر حوضه‌های کشیده در مجاورت گسل‌های کوشک نصرت، خشک‌رود، حسن‌آباد،

شکل حوضه زهکشی (B_s)

در طی فرآیندهای تکتونیکی شکل حوضه ممکن است دچار تغییر شود. شاخص شکل حوضه، تفاوت میان حوضه‌های با کشیدگی قابل توجه و حوضه‌هایی که شکل آنها نزدیک به دایره است را مشخص می‌کند. تصویر افقی یک حوضه می‌تواند به‌وسیله شاخص شکل حوضه یا نسبت کشیدگی توصیف شود (Ramírez-Herrera, M.T., 1998). در مناطقی که از نظر تکتونیکی فعال هستند حوضه‌ها کشیده‌تر و با مقادیر بالای این شاخص همراه هستند و در مناطق با فعالیت تکتونیکی پایین‌تر، کشیدگی حوضه‌ها کمتر شده و شکل آنها به دایره نزدیک‌تر می‌شود و مقدار شاخص B_s نیز کاهش می‌یابد (Bull, W.B., 2007). شاخص شکل حوضه زهکشی (B_s) با استفاده از رابطه ۴ تعیین می‌شود (Ramírez-Herrera, 1998, Cannon, P.J., 1976, (M.T., 1998, Cannon, P.J., 1976,

$B_s = BI/B_w$ (۴)
در رابطه ۴ طول یک حوضه در مسیر زهکش اصلی است که از نقطه خروج زهکش از حوضه تا مرتفع‌ترین نقطه در حوضه محاسبه می‌شود، همچنین B_w نیز پهنای حوضه است، این مقدار در عریض‌ترین بخش حوضه که هم‌زمان عمود بر طول حوضه (BI) باشد اندازه‌گیری



شکل ۸. نقشه رده‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس اندیس B_s در پهنه مورد مطالعه

بالای شاخص V_f با نرخ‌های پایین بالآمدگی تکتونیکی هم‌خوانی دارد (Keller, E.A., Pinter, N., 2002) پس از محاسبه شاخص V_f در گستره مطالعاتی، این شاخص در سه رده می‌باشند. این سه رده عبارت‌اند از: رده ۱ ($V_f \leq 0.5$)، این رده از شاخص V_f نشان‌دهنده دره‌های V شکل است، رده دو ($0.5 < V_f < 1.0$)، این رده از V_f بیانگر یک حالت حد واسط از شکل دره بین رده‌های یک و سه است و در نهایت رده سه ($V_f \geq 1$) که نشان‌دهنده دره‌های U شکل است (El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., 2007). محدودده شاخص V_f در پهنه مورد مطالعه از ۲/۶۵ (در حوضه ۳۶) تا ۱۵/۲۷ (در حوضه ۱۶) متغیر است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری این شاخص نشان‌دهنده آن است که اکثر دره‌های اندازه‌گیری شده در پهنه مورد مطالعه U شکل هستند. شکل ۹ نقشه رده‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس اندیس V_f در پهنه مورد مطالعه می‌باشد و همان‌طور که نشان داده شده است، با توجه به رده‌بندی این اندیس، پهنه دارای دره‌های U شکل

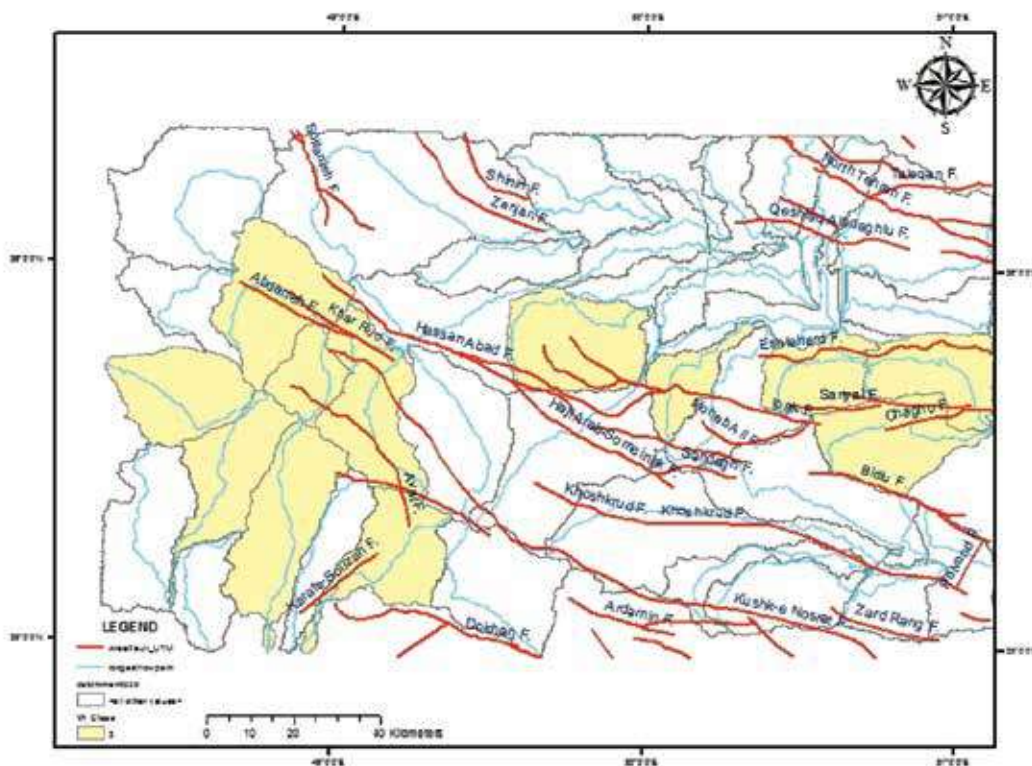
کرفس-سوزن، بیدو، کورچشمه، حاج عرب-سمینک، محب علی، اشتهاارد و قشلاق آاداغ لو می‌باشد. به‌طور کلی و با توجه به نتیجه‌های حاصل از اندازه‌گیری اندیس کشیدگی حوضه، فعالیت گسل‌های کوشک‌نصرت و حسن‌آباد در به وجود آوردن حوضه‌های به‌شدت فعال و کشیده بسیار بیشتر بوده است و نشان از فعالیت بیشتر این گسل‌ها نسبت به سایر گسل‌ها در پهنه مورد مطالعه است.

نسبت عرض کف دره به ارتفاع دره (V_f)

این شاخص یکی از شاخص‌های مورفومتری است که بالآمدگی تکتونیکی بر روی آن تأثیر می‌گذارد و نسبت به این عامل حساس است. این شاخص از نسبت عرض کف دره به ارتفاع دره به‌صورت رابطه ۵ مشخص می‌شود:

$$V_f = V_{fw} / [(A_{ld} - A_{sc}) + (A_{rd} - A_{sc}) / 2] \quad (5)$$

در رابطه ۵ (V_f) نسبت عرض به ارتفاع دره، (V_{fw}) پهنای دره، (A_{rd})، (A_{ld})، (A_{sc}) به ترتیب، ارتفاع خط تقسیم آب در بخش راست و چپ دره و کف بستر دره می‌باشند (Bull, W.B., 2007). به‌طور معمول مقادیر



شکل ۹. نقشه رده‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس اندیس V_f در پهنه مورد مطالعه

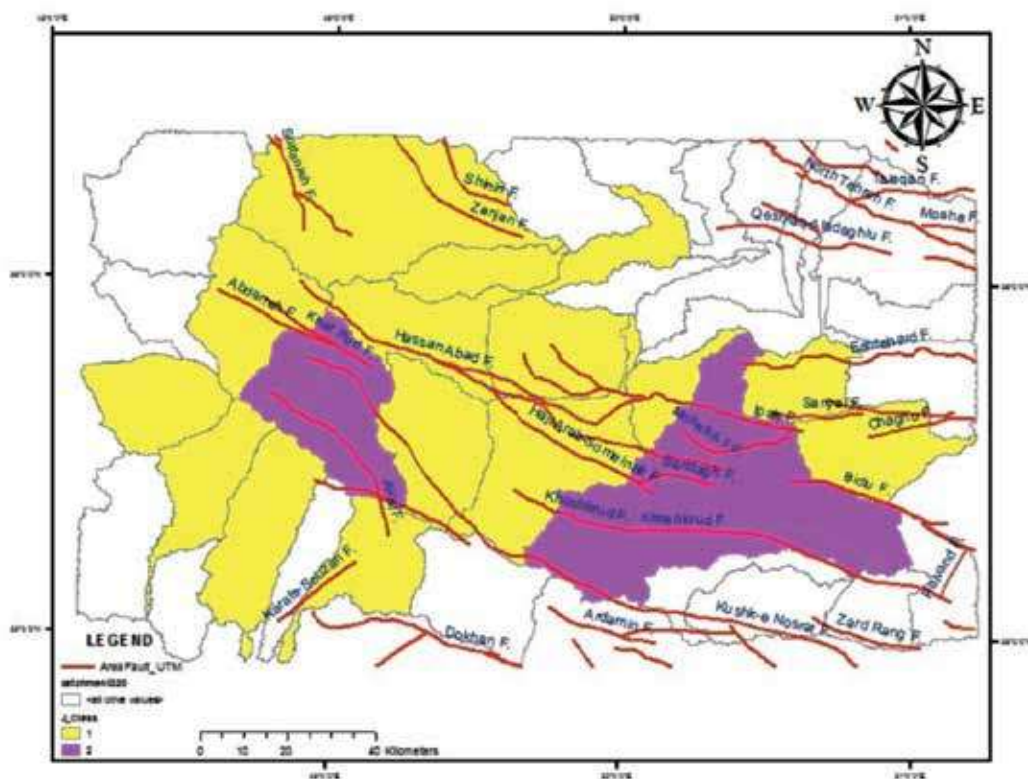
پیچ‌وخم پیشانی کوهستان (Smf) (J)

شود، پیشانی کوهستان تحت تأثیر فرآیندهای فرسایشی قرار می‌گیرد و شکل سینوسی پیدا می‌کند و پیچ‌وخم آن افزایش می‌یابد، در نتیجه مقدار شاخص J نیز افزایش پیدا خواهد کرد. محاسبه مقدار این شاخص به وسیله نقشه‌های توپوگرافی و یا تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند انجام شود، نقشه‌های بزرگ مقیاس و تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا می‌توانند برای اندازه‌گیری دقیق و مؤثر این شاخص مورد استفاده قرار گیرند. این شاخص برای ۳۱ پیشانی کوهستان مورد بررسی قرار گرفته است و پس از محاسبه این شاخص در سه رده زمین ساختی دسته‌بندی شده است. در این تقسیم‌بندی، رده ۱ $J < 1.10$ ، رده ۲ $1.10 \leq J < 1.50$ و رده ۳ $J \geq 1.50$ نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی پهنه هستند (El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., Keller, E.A., 2007). کمترین مقدار شاخص پیچ‌وخم پیشانی کوهستان در پهنه مورد مطالعه یک است که مربوط به حوضه‌های (۰ و ۸، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۸، ۳۰، ۳۶) است (شکل ۱۰).

این شاخص تعادل بین فرآیندهای فرسایشی رودخانه که تمایل به برش درون پیشانی کوهستان را دارند و نیروهای فعال تکتونیکی که تمایل به ایجاد پیشانی کوهستان مستقیم همراه با گسلش را دارند توصیف می‌کند (Bull, W.B., 1986; McFadden, L.D., Keller, E.A., 1986). شاخص پیچ‌وخم پیشانی کوهستان با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود (Bull, W.B., 2007):

$$(۶) \quad (J) \text{ (Smf)} = L_j / L_s$$

در رابطه ۶ Smf شاخص سینوسیته پیشانی کوهستان، L_j طول پیشانی کوهستان در امتداد کوهپایه و L_s طول خط مستقیم پیشانی کوهستان می‌باشد. این شاخص همواره کمتر از سه و نزدیک به یک است که کوهستان با شیب تند به صورت ناگهانی در امتداد پیشانی کوهستان بالا می‌آید (Bull, W.B., 2007). پیشانی‌های کوهستان بالا آمده در اثر فعالیت‌های تکتونیکی، مستقیم و صاف هستند و مقدار این شاخص در آنها پایین است اما اگر سرعت بالآمدگی پیشانی کوهستان کم شود و یا بالآمدگی متوقف



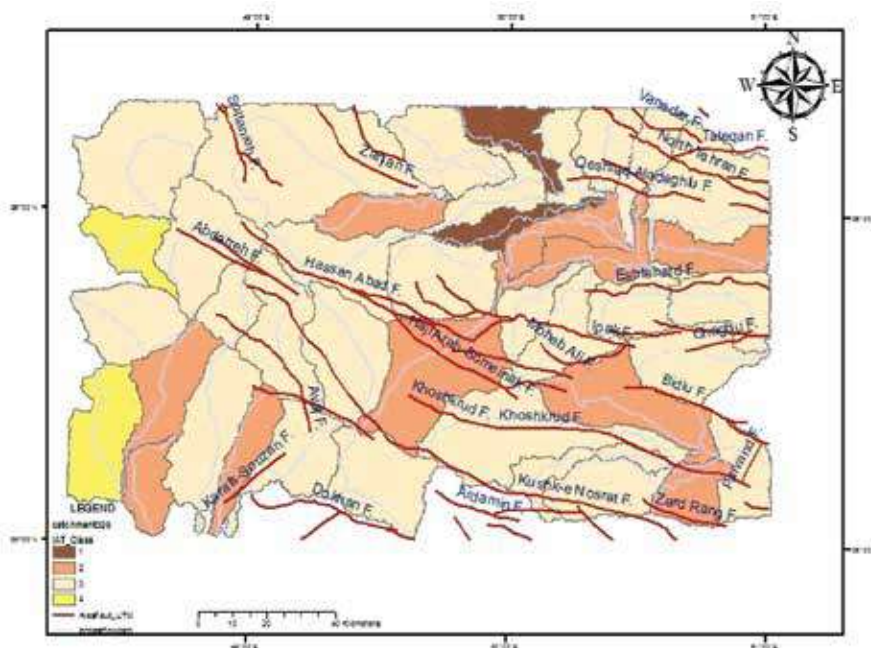
شکل ۱۰. نقشه رده‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس اندیس شاخص سینوسیته پیشانی کوهستان J

زمین ساخت فعال نسبی (Iat)

بیانگر فعالیت تکتونیکی نسبی بالا است. رده سه شاخص زمین ساخت فعال نسبی با مقادیر $(2.0 \leq Iat < 2.5)$ ، فعالیت تکتونیکی متوسط را نشان می‌دهد و رده چهار با مقدار $(2.5 \leq Iat)$ ، فعالیت زمین ساخت نسبی کم را نشان می‌دهد [۲۰]. در نهایت بعد از رده بندی مقادیر زمین ساخت فعال نسبی، نقشه توزیع سطح فعالیت تکتونیکی پهنه در محیط نرم افزاری Arc GIS 10.1 تهیه شد و پهنه مورد مطالعه به چهار بخش خیلی فعال، فعال، فعالیت متوسط و فعالیت کم تفکیک شد (شکل ۱۱). تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از رده بندی شاخص زمین ساخت فعال نسبی نشان دهنده آن است که ۳۰ درصد از گستره مطالعاتی فعالیت تکتونیکی بسیار بالا و بالا را در پهنه نشان می‌دهند و در رده یک و دو از شاخص Iat قرار می‌گیرند و حدود ۶۵ درصد مربوط به رده سه هستند و نشان دهنده فعالیت تکتونیکی متوسط در پهنه است. حدود ۵ درصد از پهنه مورد مطالعه نیز در رده چهار شاخص Iat قرار می‌گیرند که بیانگر مقادیر پایینی از فعالیت تکتونیکی نسبی در گستره مورد مطالعه است (جدول ۱).

شکل ۱۲ تصویری از گسل‌های اشاره شده در پهنه مورد مطالعه می‌باشد که در این عکس‌ها برای درک بهتر گویا سازی شده‌اند.

در اغلب مطالعات تکتونیک، شاخص زمین ساخت فعال نسبی با ارزیابی دو شاخص اصلی صورت می‌گیرد و تحقیقات اغلب به مطالعات بر روی پیشانی کوهستان و یا حوضه‌های رودخانه‌ای تأکید دارند (Bull, W.B., McFadden, L.D., 1977 Rockwell, T.K., Keller, E.A., Johnson, D.L., 1985, Azor, A., Keller, E.A., Yeats, R.S., 2002, Molin, P., Pazzaglia, F.J., Dramis, F., 2004). در این پژوهش برای برآورد فعالیت تکتونیک نسبی تعدادی از شاخص‌های ژئومورفیک را در سرتاسر پهنه، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، این شاخص‌ها عبارت‌اند از: گرادیان طولی رودخانه، نبود تقارن حوضه زهکشی، انتگرال هیپسومتریک، نسبت شکل حوضه زهکشی، نسبت عرض بستر دره به ارتفاع دره و شاخص پیچ‌وخم پیشانی کوهستان. زمین ساخت فعال نسبی از رابطه (S/n) با استفاده از میانگین مقادیر هر رده از شاخص‌های مورفوتکتونیکی در تمامی حوضه‌ها به دست آید. برای توصیف شدت و درجه فعالیت‌های تکتونیکی این شاخص در چهار رده تکتونیکی توزیع شده است، رده یک زمین ساخت فعال نسبی $(1.0 \leq Iat < 1.5)$ این رده نشان دهنده فعالیت تکتونیکی بسیار بالا است. رده دو این شاخص با بازه $(1.5 \leq Iat < 2.0)$ ،

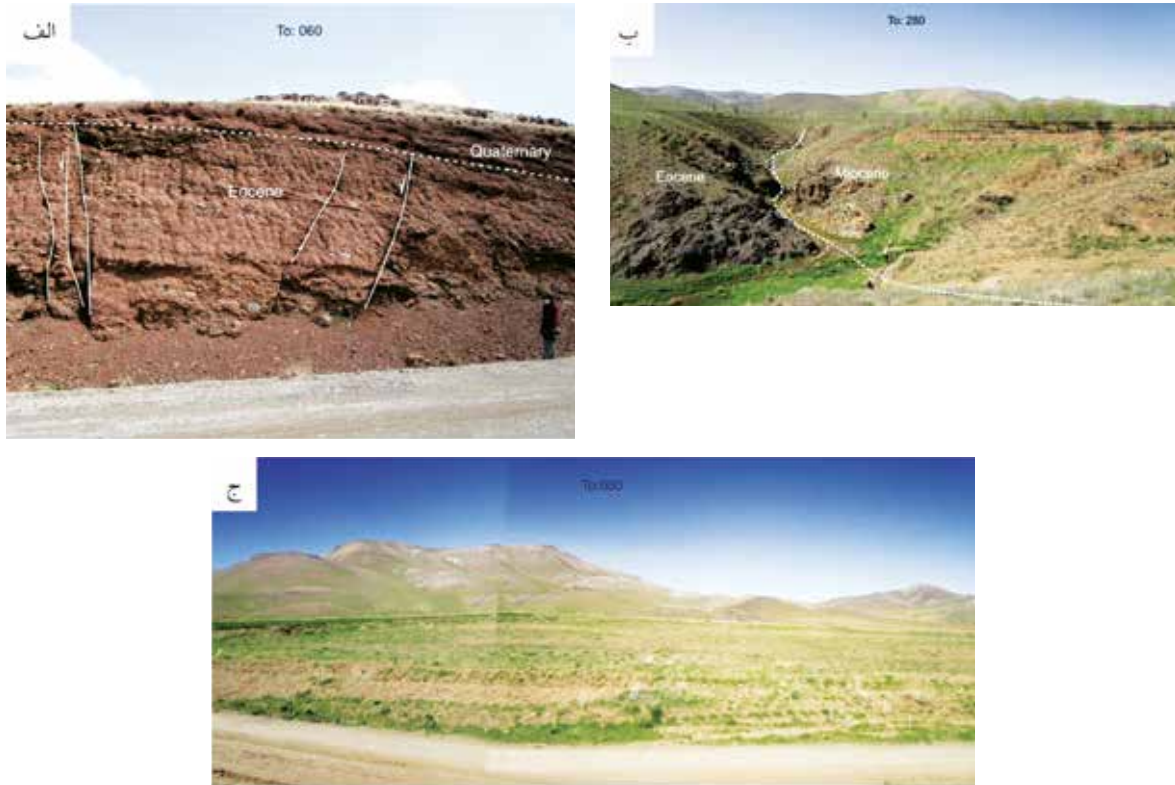


شکل ۱۱. نقشه توزیع سطح فعالیت تکتونیکی نسبی (Iat) در پهنه مورد مطالعه

جدول ۱. مقادیر و رده فعالیت نکتونیکي شاخص‌های مورفونکتونیکي در ۴۰ حوضه زهکشی

| FID* | Area | Af_Class | Bs_Class | Hi_Class | J_Class | SL_Class | Vf_Class | IAT | IAT_Class |
|------|-------------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|------|-----------|
| ۰ | ۱۶۴/۲۱۲۵۲۴ | ۲ | ۳ | ۳ | ۱ | ۲ | - | ۲/۲ | ۳ |
| ۱ | ۵۴۵/۷۰۲۲۸۹ | ۳ | ۳ | ۳ | - | ۱ | - | ۵/۲ | ۳ |
| ۲ | ۳۵۰/۶۳۹۳۶۶ | ۳ | ۳ | ۳ | - | ۱ | - | ۵/۲ | ۳ |
| ۳ | ۳۱۷/۶۱۷۶۳۶ | ۱ | ۲ | ۱ | - | ۱ | - | ۲۵/۱ | ۱ |
| ۴ | ۲۶۴/۴۳۴۹۹۲ | ۲ | ۳ | ۲ | - | ۱ | - | ۲ | ۳ |
| ۵ | ۳۵۸/۵۹۹۱۱۴ | ۱ | ۲ | ۳ | ۱ | ۲ | - | ۸/۱ | ۲ |
| ۶ | ۳۰۹/۷۷۳۶۸۶ | ۱ | ۳ | ۳ | - | ۲ | - | ۲۵/۲ | ۳ |
| ۷ | ۲۴۱/۳۰۴۸۴۶ | ۱ | ۱ | ۱ | - | ۱ | - | ۱ | ۱ |
| ۸ | ۹۵۶/۵۲۴۹۱۶ | ۳ | ۱ | ۳ | ۱ | ۲ | - | ۲ | ۳ |
| ۹ | ۹۴۴/۱۹۸۳۶۹ | ۱ | ۳ | ۳ | - | ۱ | - | ۲ | ۳ |
| ۱۰ | ۸۹۴/۵۶۵۵۴۷ | ۱ | ۳ | ۳ | - | ۲ | - | ۲۵/۲ | ۳ |
| ۱۱ | ۳۴۳/۷۸۶۴۹۳ | ۳ | ۳ | ۳ | - | ۱ | - | ۵/۲ | ۴ |
| ۱۲ | ۶۹۵/۶۰۲۲۱۲ | ۲ | ۳ | ۳ | ۱ | ۲ | ۳ | ۳۳/۲ | ۳ |
| ۱۳ | ۳۶۴/۱۹۷۳۷۱ | ۳ | ۱ | ۱ | - | ۱ | - | ۵/۱ | ۲ |
| ۱۴ | ۳۵۴/۹۷۷۴۱۶ | ۲ | ۱ | ۳ | - | ۱ | - | ۷۵/۱ | ۲ |
| ۱۵ | ۶۵۴/۵۰۶۵۳۲ | ۱ | ۳ | ۳ | ۱ | ۲ | ۳ | ۱۷/۲ | ۳ |
| ۱۶ | ۲۷۳/۱۵۰۲۲۴ | ۲ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۱۷/۲ | ۳ |
| ۱۷ | ۳۶۶/۷۰۸۲۰۱ | ۲ | ۱ | ۳ | - | ۱ | - | ۷۵/۱ | ۲ |
| ۱۸ | ۱۰۰۸/۱۷۱۰۳۴ | ۱ | ۲ | ۲ | ۱ | ۲ | - | ۷۵/۱ | ۲ |
| ۱۹ | ۲۵۹/۹۰۶۰۷۴ | ۱ | ۳ | ۳ | ۲ | ۲ | ۳ | ۳۳/۲ | ۳ |
| ۲۰ | ۴۷۴/۴۹۵۰۱۵ | ۱ | ۲ | ۳ | ۲ | ۲ | - | ۲ | ۳ |
| ۲۱ | ۷۰۳/۸۰۷۱۳۳ | ۲ | ۳ | ۳ | ۱ | ۲ | - | ۲/۲ | ۳ |
| ۲۲ | ۶۲۵/۴۹۳۰۲۶ | ۱ | ۳ | ۳ | ۲ | ۲ | ۳ | ۳۳/۲ | ۳ |
| ۲۳ | ۴۷۴/۶۲۵۱۸۸ | ۳ | ۲ | ۳ | - | ۲ | ۳ | ۱۷/۲ | ۳ |
| ۲۴ | ۳۸۲/۱۹۱۶۵۴ | ۲ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۱۷/۲ | ۳ |
| ۲۵ | ۵۴۲/۴۰۲۴۳۲ | ۲ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۱۷/۲ | ۳ |
| ۲۶ | ۵۶۶/۷۰۰۹۴۵ | ۳ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳۳/۲ | ۳ |
| ۲۷ | ۷۶۱/۱۴۰۹۵۲ | ۱ | ۱ | ۳ | ۲ | ۱ | - | ۶/۱ | ۲ |
| ۲۸ | ۵۱۶/۵۷۸۵۷۵ | ۱ | ۱ | ۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۶۷/۱ | ۲ |
| ۲۹ | ۱۰۵۸/۹۴۵۰۷ | ۲ | ۳ | ۳ | ۲ | ۲ | - | ۴/۲ | ۳ |
| ۳۰ | ۷۱۱/۳۵۹۵۸۸ | ۳ | ۲ | ۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۱۷/۲ | ۳ |
| ۳۱ | ۳۷۲/۰۳۴۹۳ | ۱ | ۳ | ۳ | - | ۱ | - | ۲ | ۳ |
| ۳۲ | ۵۹۹/۴۹۳۴۷۴ | ۳ | ۳ | ۳ | - | ۱ | - | ۵/۲ | ۴ |
| ۳۳ | ۲۸۹/۰۶۴۹۲۷ | ۳ | ۱ | ۳ | - | ۲ | - | ۲۵/۲ | ۳ |
| ۳۴ | ۳۰۳/۵۴۴۵۲۷ | ۱ | ۳ | ۲ | - | ۱ | - | ۷۵/۱ | ۲ |
| ۳۵ | ۴۵۸/۷۵۹۹۹۹ | ۱ | ۳ | ۳ | - | ۲ | - | ۲۵/۲ | ۳ |
| ۳۶ | ۵۲۴/۹۸۵۵۴۴ | ۳ | ۳ | ۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳۳/۲ | ۳ |
| ۳۷ | ۲۸۷/۰۴۴۴۴۴ | ۱ | ۲ | ۳ | - | ۱ | - | ۷۵/۱ | ۲ |
| ۳۸ | ۶۲۲/۴۴۶۳۲۸ | ۱ | ۳ | ۳ | - | ۱ | - | ۲ | ۳ |
| ۳۹ | ۳۲۴/۱۵۴۲۶ | ۱ | ۱ | ۳ | - | ۱ | - | ۵/۱ | ۲ |

* Field



شکل ۱۲. الف-ج) تصاویری از گسل‌های پهنه

نتیجه‌گیری

- بر اساس اندازه‌گیری اندیس SL، حوضه‌های شماره (۰ و ۵ و ۶ و ۸ و ۱۰ و ۱۲ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۹ و ۳۳ و ۳۵) دارای سطح فعالیت یک بوده و بالاترین نرخ SL را نشان می‌دهند.
- این حوضه‌ها روی گسل‌های ایپک، حسن‌آباد، کوشک نصرت و سلطانیه واقع شده‌اند. سایر حوضه‌ها دارای سطح فعالیت دو و نرخ پایین‌تر SL می‌باشند.
- بیشترین مقادیر SL در حوضه‌های (صفر و شش و ۱۲ و ۲۲ و ۲۹) اندازه‌گیری شده است که تحت تاثیر فعالیت گسل‌های کوشک نصرت، حسن‌آباد، ایپک و سلطانیه می‌باشند. از آنجاکه رودخانه‌های پهنه به‌طور کامل منطبق بر نواحی گسلی هستند و از طرفی در مناطقی که گسله اصلی و مهمی نداریم، رودخانه با SL بالا نیز دیده نمی‌شود بیشتر می‌توان به این نتیجه‌های اعتماد کرد.
- بر اساس نتیجه‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری Af، حوضه‌های با رده فعالیت یک در بیشتر پهنه مورد مطالعه، چه دشت و چه نواحی مرتفع، گسترش دارد. تمرکز بیشتر حوضه‌های رده یک و با بیشترین کج شدگی در اطراف گسل‌های اصلی مثل کوشک نصرت، حسن‌آباد، آوج، ایپک می‌باشد که خود حاکی از فعالیت‌های اخیر (کوآترنری) آنها است.
- بررسی‌های مربوط به اندیس هیپسومتری در پهنه نشان می‌دهد که بخش اعظمی از پهنه، رده فعالیت پایین را نشان می‌دهد و این مطلب بیانگر این موضوع خواهد بود که پهنه مورد مطالعه نسبت به اندیس هیپسومتری حساسیت پایین را داشته است به‌عبارت‌دیگر اختلاف ارتفاع زیادی در زیر حوضه‌ها دیده نمی‌شود.
- با توجه به نتیجه‌های حاصل از اندازه‌گیری اندیس کشیدگی حوضه (BS)، فعالیت گسل‌های کوشک نصرت و حسن‌آباد در به وجود آوردن حوضه‌های به‌شدت فعال و کشیده بسیار بیشتر بوده است و نشان از فعالیت بیشتر این گسل‌ها نسبت به سایر گسل‌ها در پهنه مورد مطالعه است.

- نتایج محاسبه شاخص BS در گستره مطالعاتی نشان می‌دهد که تقریباً ۶۰ درصد از حوضه‌های مورد مطالعه شکلی نزدیک به دایره داشته و به رده سه فعالیت زمین ساختی تعلق دارند.
- رده‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس اندیس Vf در گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد که پهنه دارای دره‌های U شکل می‌باشد.
- بررسی پیشانی‌های کوهستان به‌وسیله تصویر هیل شید و کنتورهای ارتفاعی حاصل از آن نشان می‌دهد که زیرحوضه‌هایی که مجاور و یا در امتداد گسل‌های اصلی هستند دارای بالاترین نرخ فعالیت J هستند، همچنین بیشترین تمرکز زیرحوضه‌های فعال از نظر نرخ سینوسی پیشانی کوهستان در امتداد گسل‌های کوشک نصرت، حسن‌آباد، آوج، حاج عرب سمینک، سلطانیه و زنجان است.
- تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از رده‌بندی شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی نشان‌دهنده آن است که ۳۰ درصد از گستره مطالعاتی فعالیت تکتونیکی بسیار بالا و بالا را در پهنه نشان می‌دهند و در رده یک و دو از شاخص Iat قرار می‌گیرند و حدود ۶۵ درصد مربوط به رده سه هستند و نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی متوسط در پهنه است. حدود ۵ درصد از پهنه مورد مطالعه نیز در رده چهار شاخص Iat قرار می‌گیرند که بیانگر مقادیر پایینی از فعالیت تکتونیکی نسبی در گستره مورد مطالعه است.
- با توجه به بررسی‌های شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی در گستره مورد مطالعه، گسل‌های آلاداغ لو، اشتهارد، کوشک نصرت، خشک‌رود، حسن‌آباد، ایپک، حاج عرب سمینک، محب‌علی، بیدو، زردرنگ، احمدآباد کاروانسرا، کرفس-سوزن، دارای فعالیت نسبی خیلی زیاد تا زیاد و گسل‌های سلطانیه-درجزین، زنجان، آبدره، آوج، باقرآباد فعالیت زمین ساختی نسبی متوسط دارند. در این بین گسلی با فعالیت زمین ساختی نسبی کم مشاهده نشده است و در کل می‌توان کل پهنه را از لحاظ تکتونیکی فعال دانست.
- از بین اندیس‌های اندازه‌گیری شده برای گستره مورد مطالعه، اندیس‌های AF، SL و J دارای بیشترین نرخ فعالیت بودند که نشان‌دهنده حساسیت این اندیس‌ها به نوع حرکت غالب در پهنه است. تقریباً تمام گسل‌های پهنه دارای حرکت امتدادلغز غالب و حرکت رانندگی هستند، مثل گسل کوشک-نصرت که رانندگی با مولفه امتدادلغز غالب است.
- گسل‌های اصلی و بزرگ پهنه شامل کوشک نصرت، حسن‌آباد، ایپک، خشک‌رود، حاج عرب سمینک هستند و حوضه‌های منطبق بر این گسل‌ها که تعداد زیادی از حوضه‌های پهنه را در برمی‌گیرند، همگی دارای سطح فعالیت تکتونیکی نسبی بالا یا خیلی بالا هستند که حاکی از بالا بودن فعالیت تکتونیکی این گسل‌ها در کواترنری است. گسل کوشک نصرت و حسن‌آباد و حاج عرب سمینک و خشک‌رود و زردرنگ بزرگ‌ترین و فعال‌ترین گسل‌های پهنه هستند زیرا تقریباً تمام حوضه‌های منطبق بر آنها دارای Iat بالایی هستند.
- در حوضه ۱۸ که محل خمش گسل کوشک نصرت به جنوب خاوری است بالاترین نرخ فعالیت کواترنری در تمامی اندیس‌های اندازه‌گیری شده، نشان داده است.
- بر اساس اندازه‌گیری اندیس SL، حوضه‌های شماره (۰ و ۵ و ۶ و ۸ و ۱۰ و ۱۲ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۹ و ۳۳ و ۳۵) دارای سطح فعالیت یک بوده و بالاترین نرخ SL را نشان می‌دهند.
- این حوضه‌ها روی گسل‌های ایپک، حسن‌آباد، کوشک نصرت و سلطانیه واقع شده‌اند. سایر حوضه‌ها دارای سطح فعالیت ۲ و نرخ پایین‌تر SL می‌باشند.
- بیشترین مقادیر SL در حوضه‌های (صفر و شش و ۱۲ و ۲۲ و ۲۹) اندازه‌گیری شده است که تحت تاثیر فعالیت گسل‌های کوشک نصرت، حسن‌آباد، ایپک و سلطانیه می‌باشند. از آنجاکه رودخانه‌های پهنه کاملاً منطبق بر نواحی گسلی هستند و از طرفی در مناطقی که گسله اصلی و مهمی وجود ندارد، رودخانه با SL بالا نیز دیده نمی‌شود بیشتر می‌توان به این نتیجه‌ها اعتماد کرد.
- بر اساس نتیجه‌های به دست آمده از اندازه‌گیری Af،

درصد از گستره مطالعاتی فعالیت تکتونیکی بسیار بالا و بالا را در پهنه نشان می‌دهند و در رده یک و دو از شاخص Iat قرار می‌گیرند و حدود ۶۵ درصد مربوط به رده سه هستند و نشان‌دهنده فعالیت تکتونیکی متوسط در پهنه است. حدود ۵ درصد از پهنه مورد مطالعه نیز در رده چهار شاخص Iat قرار می‌گیرند که بیانگر مقادیر پایینی از فعالیت تکتونیکی نسبی در گستره مورد مطالعه است.

با توجه به بررسی‌های شاخص زمین ساخت فعال نسبی در گستره مورد مطالعه، گسل‌های آلاداغ لو، اشتهارد، کوشک نصرت، خشک‌رود، حسن‌آباد، ایپک، حاج عرب سُمینک، محب علی، بیدو، زردرنگ، احمدآباد کاروانسرا، کرفس-سوزن، دارای فعالیت نسبی خیلی زیاد تا زیاد و گسل‌های سلطانیه-درجزین، زنجان، آبدره، آوج، باقرآباد فعالیت زمین ساختی نسبی متوسط دارند. در این بین گسلی با فعالیت زمین ساختی نسبی کم مشاهده نشده است و در کل می‌توان کل پهنه را از لحاظ تکتونیکی فعال دانست.

از بین اندیس‌های اندازه‌گیری شده برای گستره مورد مطالعه، اندیس‌های SL، AF، J و دارای بیشترین نرخ فعالیت بودند که نشان‌دهنده حساسیت این اندیس‌ها به نوع حرکت غالب در پهنه است. کم و بیش تمام گسل‌های پهنه دارای حرکت امتدادلغز غالب و حرکت راندگی هستند مثل گسل کوشک-نصرت که راندگی با مولفه امتدادلغز غالب است.

گسل‌های اصلی و بزرگ پهنه شامل کوشک نصرت، حسن‌آباد، ایپک، خشک‌رود، حاج عرب سُمینک هستند و حوضه‌های منطبق بر این گسل‌ها که تعداد زیادی از حوضه‌های پهنه را در برمی‌گیرند، همگی دارای سطح فعالیت تکتونیکی نسبی بالا یا خیلی بالا هستند که حاکی از بالا بودن فعالیت تکتونیکی این گسل‌ها در کواترنری است. گسل کوشک نصرت و حسن‌آباد و حاج عرب سُمینک و خشک‌رود و زردرنگ بزرگ‌ترین و فعال‌ترین گسل‌های پهنه هستند زیرا تقریباً تمام حوضه‌های منطبق بر آنها دارای Iat بالایی هستند.

حوضه‌های با رده فعالیت ۱ در بیشتر پهنه مورد مطالعه، چه دشت و چه نواحی مرتفع، گسترش دارد. تمرکز بیشتر حوضه‌های رده یک و با بیشترین کج شدگی در اطراف گسل‌های اصلی مثل کوشک نصرت، حسن‌آباد، آوج، ایپک می‌باشد که خود حاکی از فعالیت‌های اخیر (کواترنری) آنها است.

- بررسی‌های مربوط به اندیس هیپسومتری در پهنه نشان می‌دهد که بخش بزرگی از پهنه، رده فعالیت پایین را نشان می‌دهد و این مطلب بیانگر این موضوع خواهد بود که پهنه مورد مطالعه نسبت به اندیس هیپسومتری حساسیت پایین را داشته است به عبارت دیگر اختلاف ارتفاع زیادی در زیر حوضه‌ها دیده نمی‌شود.

- با توجه به نتیجه‌های حاصل از اندازه‌گیری اندیس کشیدگی حوضه (Bs)، فعالیت گسل‌های کوشک نصرت و حسن‌آباد در به وجود آوردن حوضه‌های به شدت فعال و کشیده بسیار بیشتر بوده است و نشان از فعالیت بیشتر این گسل‌ها نسبت به سایر گسل‌ها در پهنه مورد مطالعه است.

- نتایج محاسبه شاخص Bs در گستره مطالعاتی نشان می‌دهد که کم و بیش ۶۰ درصد از حوضه‌های مورد مطالعه شکلی نزدیک به دایره داشته و به رده ۳ فعالیت زمین ساختی تعلق دارند.

- رده‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس اندیس Vf در گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد که پهنه دارای دره‌های U شکل می‌باشد.

- بررسی پیشانی‌های کوهستان به وسیله تصویر هیل شید و کنتورهای ارتفاعی حاصل از آن نشان می‌دهد که زیرحوضه‌هایی که مجاور و یا در امتداد گسل‌های اصلی هستند دارای بالاترین نرخ فعالیت J هستند، همچنین بیشترین تمرکز زیرحوضه‌های فعال از نظر نرخ سینوسی پیشانی کوهستان در امتداد گسل‌های کوشک نصرت، حسن‌آباد، آوج، حاج عرب سُمینک، سلطانیه و زنجان است.

- تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از رده‌بندی شاخص زمین ساخت فعال نسبی نشان‌دهنده آن است که ۳۰

- Keller, E.A. and Pinter, N., 2002. Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape (2ndEd.) Prentice Hall, New Jersey.
- Molin, P. and Pazzaglia, F.J. and Dramis, F., 2004. Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, sila massif, Calabria, southern Italy, American Journal of Science 304, 559-589.
- Silva, P.G., Goy and J.L., Zazo, C. and Bardajm, T., 2003. Fault generated mountain fronts in Southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and earthquake activity, Geomorphology 250, 203-226.
- Hack, J.T., 1973. Stream-profiles analysis and stream-gradient index, Journal of Research of the U.S. Geological Survey 1, 421-429.
- Hack, J.T., 1982. Physiographic division and differential uplift in the piedmont and Blue Ridge. U.S. Geological Survey Professional Paper 1265, 1-49.
- Troiani, F. and Della Seta, M., 2008. The use of the stream length-gradient index in morphotectonic analysis of small catchments: a case study from Central Italy, Geomorphology 102, 159-168.
- Hack, J.T., 1957. Studies of longitudinal stream-profiles in Virginia and Maryland: U.S. Geological Survey Professional Paper 294B, 45-97.
- Hack, J.T., 1973. Stream-profiles analysis and stream-gradient index, Journal of Research of the U.S. Geological Survey 1, 421-429.
- Hack, J.T., 1982. Physiographic division and differential uplift in the piedmont and Blue Ridge. U.S. Geological Survey Professional Paper 1265, 1-49.
- Bull, W.B., 2007. Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology, Blackwell, Malden.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J. and Keller, E.A., 2007. Assessment of the geomorphic evolution of the Iberian Massif: a new approach to paleoseismology, Earth and Planetary Science Letters 255, 1-16.
- Keller, E.A. and Pinter, N., 2002. Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape (2ndEd.) Prentice Hall, New Jersey.
- در حوضه ۱۸ که محل خمش گسل کوشک نصرت به جنوب خاوری است بالاترین نرخ فعالیت کواترنری در تمامی اندیس‌های اندازه‌گیری شده، نشان داده است.

منابع

- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵، دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، ۱۰۹.

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and Structural characteristics of the Pale-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of America Bulletin, 103, 983.

- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations: Tectonophysics, 229, 211-238.

- Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. journal Geodyn., 21, 1-33.

- Nowroozi, A.A. and Mohajer-Ashjai, A., 1985. Fault movements and tectonics of Eastern Iran: boundaries of the Lut plate Geophys. J. R. astr. Soc., 83, 215-237.

- Babaahmadi, A. and Safaei, H. and Yasaghi, A. and Vafa, H. and Naeimi, A. and Madanipour, S., 2010. A study of Quaternary structures in the Qom region, west central Iran, Journal of Geodynamics, 50 (5), 355-367.

- Altin, T.B. and Altin, B.N., 2011. Development and morphometry of drainage network in volcanic terrain, Central Anatolia, Turkey, Geomorphology 125, 485-503.

- Reddy, G.P.O. and Maji, A.K. and Gajbhiye, K.S., 2004. Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India—a remote sensing and GIS approach, International Journal of Applied Earth Observation and Geo information 6, 1-16.

- Keller, E. and Pinter, N., 1996. Active tectonics, Earth quakes, uplift and Earth sciences series, Prentice-Hall, New Jersey.

ment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain), *Geomorphology*, 96, 150-173.

- Hare, P.W. and Gardner, T.W., 1985. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: Morisawa, M., Hack, J.T.

- Keller, E.A. and Pinter, N., 2002. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape* (2nd Ed.) Prentice Hall, New Jersey.

- Dehbozorgi, M. and Pourkermani, M. and Arian, M. and Matkan, A. A. and Motamedi, H. and Hosseiniasl, A., 2010. Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran, *Geomorphology*, 121(3), 329-341.

- Strahler, A.N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography, *Geological Society of America Bulletin* 63, 1117-1142.

- Mayer, L., 1990. *Introduction to Quantitative Geomorphology*, Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ.

- Ramírez-Herrera, M.T., 1998. Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt, *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 317-332.

- Cannon, P.J., 1976. Generation of explicit parameters for a quantitative geomorphic study of Mill Creek drainage basin, *Oklahoma Geology*

Notes 36 (1), 3-16.

- Bull, W.B. and McFadden, L.D., 1977. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California, In: Doehring, D.O. (Ed.), *Geomorphology in Arid Regions*, Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton, 115-138.

- Keller, E.A., 1986. Investigation of active tectonics: use of surficial Earth processes. In: Wallace, R.E. (Ed.), *Active tectonics Studies in Geophysics*, National Academy Press, Washington DC, 136-147.

- Rockwell, T.K. and 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 15th Annual Geomorphology Symposium. Allen and Unwin Publishers, Boston, 183-207.

- Azor, A., Keller, E.A. and Yeats, R.S., 2002. Geomorphic indicators of active fold growth: South Mountain-Oak Ridge Ventura basin, Southern California, *Geological Society of America Bulletin* 114, 745-753.

- Molin, P., Pazzaglia, F.J. and Dramis, F., 2004. Geomorphic expression of active tectonics in a rapidly-deforming forearc, sila massif, Calabria, southern Italy, *American Journal of Science* 304, 559-589.