

ارزیابی فعالیت زمین‌ساختی بیستون- کامیاران بر اساس شاخص‌های مورفوتکتونیک

حامدعلیانپور - کارشناس ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.
سعید حکیمی آسیابار* - استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.
مریم ده‌بزرگی - استادیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.
رضا نوزعیم - استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، ایران.
نسیم رضانی - کارشناس ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶

چکیده

پهنه سنندج-سیرجان پرتکاپوترین پهنه ساختاری در ایران می‌باشد که به عنوان بخشی از کوهزاد زاگرس و سامانه کوهزاد آلپ-هیمالیا در اثر همگرایی بخش شمالی گندوانا و جنوب اوراسیا در انتهای مزوزوئیک، شکل گرفته است. مطالعه و شناخت تکتونیک فعال در ارزیابی خطرات زمین‌ساختی مخصوصاً در مناطقی که میزان فعالیت‌های تکتونیک در هولوسن و پلیستوسن بالایی، نسبتاً زیاد باشد بسیار مهم است. موقعیت تکتونیک فلات ایران، آن را با نا آرامی‌های زیادی مواجه کرده است. از جمله مناطق نا آرام این فلات، پهنه زاگرس و سنندج-سیرجان می‌باشد که طی سال‌های اخیر زمین‌لرزه‌های زیادی در آن روی داده است. کانون‌های زلزله و شاخص‌های ژئومورفولوژیکی از مهم‌ترین عوامل ارزیابی وضعیت تکتونیک هستند که در بسیاری از مناطق همبستگی زیادی دارند و در بعضی از مناطق نیز ممکن است بین آنها رابطه معناداری وجود نداشته باشد، شناخت تکتونیک فعال در یک منطقه می‌تواند خسارات ناشی از خطرات زمین‌شناسی را کاهش دهد. ریخت‌زمین‌ساخت معرف رابطه بین تکتونیک و عوارض سطحی بوده و شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی ابزارهای مقدماتی و پایه‌ای برای اندازه‌گیری و تشخیص سریع مناطق دچار دگرشکلی تکتونیک هستند. در این پژوهش زمین‌ساخت فعال بخشی از پهنه سنندج-سیرجان در شمال کرمانشاه مورد بررسی قرار گرفته است که بدین منظور شاخص‌های گرادیان طولی رودخانه (SL)، ناهنجاری سلسله مراتبی (Hi)، انشعابات (R)، شکل حوضه زهکشی (Bs) و پیچ و خم پیشانی کوهستان (Smf) در ۵۴ حوضه آبریز موجود در منطقه اندازه‌گیری شد. در نهایت نتایج حاصل از محاسبات کمی با مشاهدات صحرائی موجود در منطقه مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل شده بیانگر فعالیت زمین‌ساختی بالا در پهنه گسلی صحنه-مروارید به عنوان بخشی از گسل اصلی زاگرس (MZRF) و پهنه گسلی بیستون-طاقبستان و فعالیت نسبتاً بالا در پهنه گسلی کوه سفید به عنوان شاخه شمالی گسل تراستی زاگرس (ZTF) می‌باشند.

واژگان کلیدی: تکتونیک فعال، مورفوتکتونیک، ریخت زمین‌ساخت، سنندج-سیرجان.

مقدمه

ارزیابی ساختمان‌ها و اشکال سطح زمین در طول تاریخ پیدایش آن‌ها، موضوع اصلی دانش تکتونیک ژئومورفولوژی می‌باشد (شوم و همکاران^۱، ۲۰۰۲، ۲۷۶). تعیین ناهنجاری‌های حاصل از زمین‌ساخت فعال در رودها با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی بسیار سودمند بوده و می‌تواند با آشکار سازی ساختارهای فعال در منطقه همراه باشد (بابایی و همکاران^۲، ۲۰۱۷، ۵۶-۴۰). ریخت‌زمین ساخت یا تکتونیک ژئومورفولوژی، دانش مطالعه اشکال و سیماهای ایجاد شده بر زمین است که بر اثر سازوکارهای تکتونیکی ایجاد شده‌اند و از آن‌ها به معنای کاربرد اصول ژئومورفیک در تحلیل و تفسیر مسائل تکتونیکی تعبیر می‌شود (باربنک و اندرسون^۳، ۲۰۰۸، ۳۱۶). مطالعه زمین‌ساخت فعال در ارزیابی مخاطرات زمین‌شناسی از اهمیت بالایی برخوردار است که این موضوع در مناطقی که فعالیت‌های زمین‌ساختی شدیدی در هولوسن و پلیوستوسن بالایی دارند، اهمیت دوچندانی دارد که در نهایت با شناخت کافی از زمین‌ساخت فعال در یک منطقه می‌توان خطرات و خسارات ناشی از رویدادهای ناگهانی مانند زمین لرزه و زمین لغزش را کاهش داد (کلر و پینتر^۴، ۲۰۰۲، ۳۶۲). از آنجایی که با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژیکی می‌توان میزان فعالیت تکتونیکی را مشخص نمود، این شاخص‌ها ابزار مهم و قابل اطمینانی برای این کار هستند که می‌توانند تحول شبکه زهکشی و تغییرات جبهه کوهستان را به نمایش بگذارند (شکری و همکاران^۵، ۲۰۱۸، ۱۲۴-۱۰۵). با توجه به قرارگیری کشور ایران در کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا، ایران جز مناطق فعال از نظر زمین‌ساختی محسوب می‌شود که پهنه سندج-سیرجان نیز قسمتی از آن می‌باشد، مخاطرات محیطی به طور مستقیم با وضعیت تکتونیکی و ژئومورفولوژیکی منطقه در ارتباط (گودی^۶، ۲۰۰۴، ۴۲۳) می‌باشد، بنابراین ارزیابی و بررسی فرایندهای تکتونیکی فعال و شناخت الگو و پراکنش مکانی در مقیاس ملی، ناحیه‌ای و منطقه‌ای در ایران به منظور مدیریت مخاطرات ناشی از آن‌ها مانند زلزله‌ها و لغزش‌های بزرگ برای بسیاری از فعالیت‌های انسانی همچون طراحی و احداث شهرها، نیروگاه‌ها، بندرها و اسکله‌ها، فرودگاه‌ها، تأسیسات نظامی - امنیتی، سدها و مراکز صنعتی اهمیت زیادی دارد همین مسئله سبب شده است در این زمینه پژوهش‌های مختلفی صورت گیرد؛ تالامپاس و کاباهاگ^۷ (۲۰۱۸) با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و پارامترهای ژئومورفولوژی نشان داده‌اند که رودخانه ایپونان در کشور فیلیپین از لحاظ تکتونیکی فعال است، دو سانتوس و همکاران^۸ (۲۰۱۹) وضعیت مورفوتکتونیکی رودخانه‌های لاواتودو و پلاتوس را در برزیل ارزیابی کردند، لنگ کومر و همکاران^۹ (۲۰۱۹) مورفوتکتونیک و فعالیت تکتونیکی کمربند اسچوپین را در هندوستان ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان دهنده منطقه فعال تکتونیکی است که تغییر شکل رسوبات کواترنری و ویژگی‌های مختلف ژئومورفولوژی از جمله شواهد آن می‌باشند. تحقیقات مشابهی نیز توسط محققین مختلف (بابایی و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۷، ۲۰۲۰؛ رابتی و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۸؛ مصدق زاده و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۹) در پهنه البرز انجام گردیده که در این پژوهش تلاش بر این است که با استفاده از

1. Schumm et al, 2002

2. Babaei et al, 2017

3. Burbank and Anderson, 2008

4. Keller and Pinter, 2002

5. Shokri et al, 2018

6. Goudie, 2004

7. Talampas and Cabahug, 2018

8. Dos Santos et al, 2019

9. Longkumer et al, 2019

10. Babaei et al., 2017, 2020

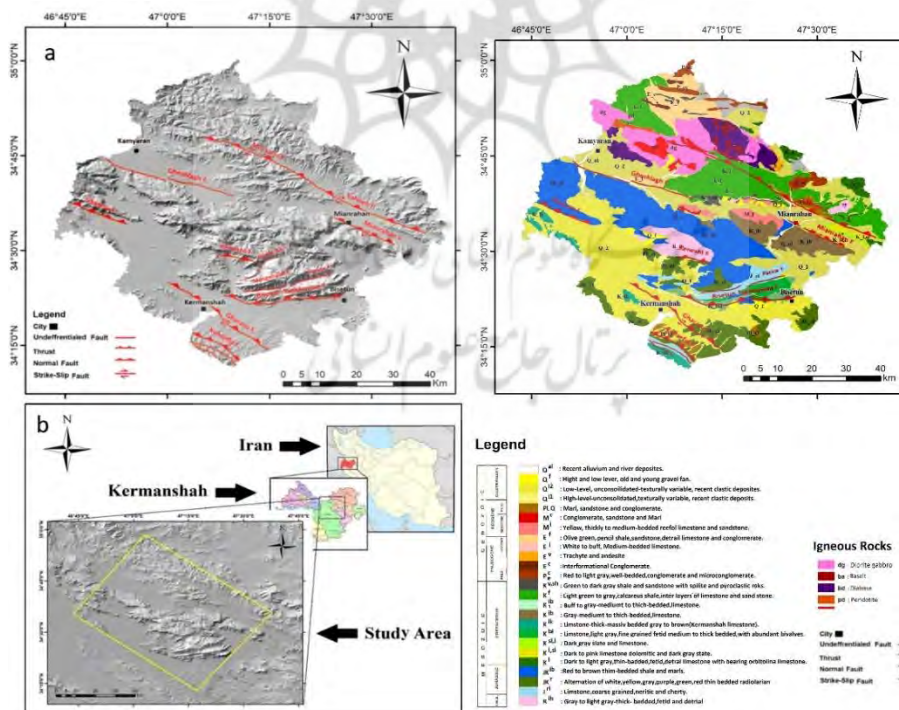
11. Rabeti et al., 2018

12. Mosadeghzadeh et al., 2019

بررسی شاخص‌های ریخت‌زمین ساختی و مطالعات صحرایی به تعیین فعالیت زمین ساختی قسمتی از پهنه سندج- سیرجان در شمال کرمانشاه پرداخته شود.

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

گستره مورد مطالعه با مساحت ۴۷۳۰ کیلومتر مربع در بین عرض‌های جغرافیایی ۳۵°۰۳' تا ۳۴°۱۱' شمالی و همچنین بین طول‌های جغرافیایی ۴۶°۴۲' تا ۴۷°۴۱' شرقی قرار گرفته است. بیش از نود درصد منطقه مورد مطالعه در استان کرمانشاه قرار دارد و از شمال به شهرستان کامیاران در استان کردستان محدود می‌گردد، از لحاظ ریخت‌شناسی بخش زیادی از منطقه مورد مطالعه از کوهستان‌های مرتفع از جمله کوه‌های پراو، بیستون، کوه سفید، قلعه هاجر و دالاخانی تشکیل شده است که در بین آن‌ها دشت‌هایی نیز از جمله دشت دینور، میانراهان و کرمانشاه دیده می‌شود، براساس تقسیم‌بندی قدیمی (علوی^۱، ۱۹۹۴)، ۲۳۸-۲۱۱) که راندگی اصلی زاگرس را مرز بین پهنه سندج - سیرجان و زاگرس بلند می‌داند، بخشی از گستره مورد مطالعه، شامل شمال و مرکز آن، در پهنه سندج - سیرجان قرار می‌گیرد و بخش‌های جنوبی آن نیز که شامل آهک‌های بیستون می‌شود به عنوان بخشی از پهنه زاگرس بلند دسته‌بندی می‌شود، اما در تقسیم‌بندی جدیدتر (محجل و همکاران^۲، ۲۰۰۳، ۳۳۲-۳۱۷) تمام گستره مورد مطالعه در پهنه سندج- سیرجان قرار می‌گیرد، از مهم‌ترین گسل‌های موجود در منطقه می‌توان به گسل‌های صحنه، مروارید، بیستون-طاقبستان و کوه سفید اشاره کرد. منطقه مورد مطالعه نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کرمانشاه، میانراهان، سنقر و کامیاران را شامل می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱: a: موقعیت گسل‌های اصلی منطقه مورد مطالعه b: موقعیت جغرافیایی منطقه c: نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ کرمانشاه، میانراهان، سنقر و کامیاران)

1. Alavi, 1994

2. Mohajjel et al., 2003

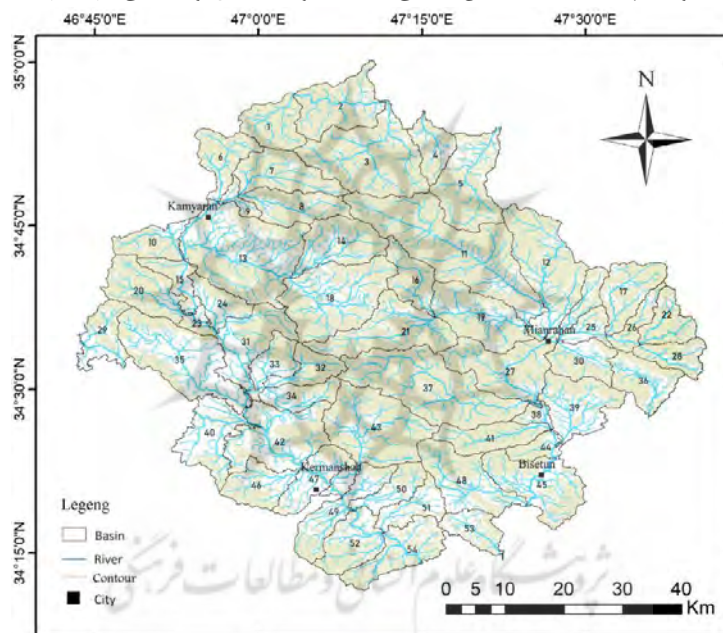
روش تحقیق

به منظور تعیین زمین‌ساخت فعال در گستره مورد بررسی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی :

۱- ابتدا حوضه‌های زهکشی و آبراهه‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی^۱ ۳۰ متر در محیط GIS و با به‌کارگیری افزونه Arc Hydro استخراج شد و پس از انجام اصلاحات مورد نیاز، ۵۴ حوضه زهکشی تشکیل گردید (شکل ۲)، سپس شاخص‌های ژئومورفولوژی در هر حوضه اندازه‌گیری شد.

۲- واحدهای زمین‌شناسی و ساختارهای اصلی منطقه که شامل گسل‌ها و چین‌ها می‌باشد از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور در گستره مورد مطالعه، تعیین گردید (شکل ۲).

۳- با بررسی تصاویر ماهواره‌ای، مطالعه تاریخچه لرزه‌ای و چندین نوبت مطالعات صحرایی گسترده، ابتدا ساختارهای تکتونیکی اصلی و سپس شواهد ساختاری و مورفولوژیکی موجود در حوضه‌های دارای مقادیر بالای شاخص‌های ریخت‌شناسی، مورد بازدید و در نهایت فعالیت زمین‌ساختی منطقه مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۲: حوضه‌ها و آبراهه‌های استخراج شده در منطقه مورد مطالعه

شاخص گرادیان طولی رود^۲ (SL)

این شاخص بیانگر تغییرات محیطی بر روی نیم‌رخ‌های طولی رودخانه می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود (هک^۳، ۱۹۸۲: ۴۹-۱):

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

در این رابطه SL شاخص گرادیان طولی رود، ΔH تغییرات ارتفاع تراز توپوگرافی و ΔLr فاصله کنتورهای توپوگرافی می‌باشد، $(\Delta H / \Delta Lr)$ شیب محلی کانال یا دروازه گرادیان مسیر بین دو خط کنتوری و Lsc نیز طول کانال از سرچشمه رود تا نقطه میانی دو خط تراز توپوگرافی می‌باشد. شاخص گرادیان طولی به طور کلی بیانگر شکستگی توپوگرافی در امتداد یک رود می‌باشند که معمولاً این شکستگی‌ها به علت بالآمدگی توسط نیروهای زمین‌ساختی یا تفاوت در سنگ‌شناسی

1. DEM

2. Stream-Length gradient

3. Hack, 1982

واحدهای مجار هم ایجاد می‌شوند (رابطی و همکاران^۱، ۲۰۱۸، ۱۵۷-۱۴۰). مقادیر بالای این شاخص در سنگ‌هایی که از نظر مقاومتی یکسان هستند بیانگر حرکات زمین‌ساختی جوان و فعال می‌باشند (کلر و پینتر^۲، ۲۰۰۲، ۳۶۲).

شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی^۳ (Δa)

در حالت منظم و پایدار رودخانه، هر رده از رودخانه به رده بالاتر خود متصل می‌شود که گاهی این نظم بر اثر عواملی همچون فعالیت‌های تکتونیکی از بین می‌رود، ناهنجاری سلسله مراتبی از تعداد انشعابات که از یک رده به رودخانه رده دو یا چند رده بالاتر از خود می‌ریزد محاسبه می‌شود و پس از بررسی مقادیر به دست آمده از تمام حوضه‌ها، تفاوت میزان فعالیت تکتونیکی بین حوضه‌های مختلف تعیین می‌گردد که هرچه قدر ناهنجاری انشعابات یک رودخانه بیشتر باشد بیانگر فعالیت تکتونیکی بالاتر می‌باشد که رابطه آن به صورت زیر است (یاوری و همکاران^۴، ۲۰۲۰، ۱۷۱-۱۴۹):

$$H_{ai} \rightarrow j = 2(j-2) - 2(i-1)$$

در این رابطه (HA) آنومالی سلسله مراتبی (i) رده رودخانه پایین‌تر و (j) رده رودخانه بالاتر است. پس از تعیین تعداد ناهنجاری‌های سلسله‌مراتبی برای هر رده باید تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی کل حوضه نیز از طریق رابطه زیر محاسبه شود:

$$H_{at} = \sum (H_{ai} \rightarrow j) \times$$

(j) $N_{si} \rightarrow j$

در این رابطه (Nsi → j) تعداد کل آبراهه‌هایی است که به آبراهه‌های رده بالاتر از خود وارد شده‌اند که در نهایت شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی با استفاده از ناهنجاری سلسله مراتبی کل حوضه، از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta a = H_{at} / N1$$

در رابطه بالا، (Δa) شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی و (N1) تعداد کل آبراهه‌های رده ۱ حوضه است. با توجه به حساسیت بالای این شاخص به فعالیت‌های زمین‌ساختی، مقدار بالای این شاخص نشان‌دهنده تاثیر بیشتر زمین‌ساخت در حوضه زهکشی می‌باشد (گارنیری و پیروتا^۵، ۲۰۰۸، ۲۷۳-۲۶۰).

شاخص انشعاب پذیری^۶ (R)

این شاخص بیانگر نسبت تعداد قطعات یک رده خاص از رودخانه در یک حوضه به تعداد قطعات مرتبه بالاتر در همان حوضه می‌باشد، این شاخص به طور کلی از اختلاف بین نسبت انشعابات و نسبت مستقیم انشعابات طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود (بارونی و همکاران^۷، ۲۰۰۵، ۲۱۸-۲۱۲):

$$R = R_b - R_{db}$$

در این رابطه (R) شاخص انشعابات، (Rb) نسبت انشعابات و (Rdb) نسبت مستقیم انشعابات می‌باشد. نسبت انشعابات نیز خود برای هر رده یک حوضه از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_b(u - u + 1) = N_u / N_{u+1}$$

¹. Rabeti et al., 2018

². Keller and Pinter, 2002

³. Hierarchical anomaly index

⁴. Yavari et al, 2020

⁵. Guarnieri and Pirrotta, 2008

⁶. Bifurcation

⁷. Baroni et al., 2005

در رابطه بالا، (Nu) تمام انشعابات یک رده و $(Nu+1)$ تمام انشعابات یک رده بالاتر است. نسبت مستقیم انشعابات دومین فاکتوری می‌باشد که برای محاسبه مقدار شاخص انشعابات به آن نیاز داریم، این نسبت برای هر رده از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Rdb = Ndu / Nu+1$$

در رابطه بالا (Ndu) تعداد انشعابات یک رده می‌باشد که به آبراهه‌های رده بالاتر خود ریخته می‌شوند و $(Nu+1)$ نیز تعداد انشعابات رده بالاتر می‌باشد، این نسبت ساختمان شبکه آب سطحی را بدون درن نظر گرفتن ناهنجاری سلسله مراتبی بررسی می‌کند. با محاسبه مقادیر شاخص انشعابات و شاخص آنومالی سلسله مراتبی می‌توان اطلاعات مفیدی از میزان فعالیت تکتونیکی منطقه به دست آورد (گارنیری و پیروتا^۱، ۲۰۰۸).

شاخص شکل حوضه^۲ (Bs)

این شاخص با بررسی نسبت طول به عرض یک حوضه محاسبه می‌شود که از آن برای بررسی سطح فعالیت تکتونیکی استفاده می‌گردد (ده بزرگی و مومنی^۳، ۲۰۱۶، ۱۲۹-۱۱۰). غالباً حوضه‌هایی که در مناطقی با فعالیت تکتونیکی بالا شکل می‌گیرند به صورت کشیده می‌باشند و در نتیجه مقادیر بالایی از این شاخص را نشان می‌دهند، در حالی که شکل حوضه‌های تشکیل شده در مناطقی با فعالیت تکتونیکی کمتر به حالت دایره‌وار با طول و عرض نسبتاً برابر، نزدیک‌تر می‌باشد (بول و مک فادن^۴، ۱۹۹۷، ۱۳۸-۱۱۵). این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$BS=BI/BW$$

در این رابطه Bs شاخص شکل حوضه آبریز، BI طول حوضه از سرچشمه تا دهانه و BW عرض حوضه در پهن‌ترین قسمت آن می‌باشد.

شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان^۵ (Smf)

این شاخص توازن بین شدت و تمایل رودها برای ایجاد یک پیشانی نامنظم و فعالیت تکتونیکی قائم جهت ایجاد یک پیشانی مستقیم برای کوه است. پیشانی کوه‌هایی که با بالا آمدگی فعال همراه هستند، تقریباً مستقیم است بنابراین خمش پایین در یک جبهه کوهستانی مستقیم و صاف با یک گسل مرزی فعال دیده می‌شود (بول^۶، ۲۰۰۷، ۳۱۵). بنابراین هرچقدر این پارامتر به یک نزدیک‌تر باشد بیانگر پهنه فعال تکتونیکی و افزایش در مقدار آن بیانگر کاهش در فعالیت تکتونیکی منطقه است. از سوی دیگر جنس سنگ‌های کوه و مقاومت آن‌ها در برابر عوامل فرسایش می‌تواند در مقدار شاخص Smf موثر باشد، مقدار شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود (بول، ۲۰۰۷، ۳۱۵):

$$Smf = Lmf / Ls$$

در این رابطه Smf پیچ و خم پیشانی کوهستان، Lmf طول پیشانی کوهستان در طول کوهپایه و انحنای مشخص در دامنه آن و Ls نیز طول خط مستقیم پیشانی کوهستان است.

1. Guarnieri and Pirrota, 2008

2. Basin shape Index

3. Dehbozorgy and Momeni, 2016

4. Bull and McFadden, 1977

5. Mountain front sinuosity

6. Bull, 2007

7. Iat

شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی^۱

یکی از روش‌های جدید برای ارزیابی و طبقه‌بندی نسبی از سطح فعالیت تکتونیکی به صورت ناحیه‌ای در یک منطقه، استفاده از شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) می‌باشد که در این روش به طور قرار دادی شاخص‌های مختلف به رده‌های یکسانی برای تمامی شاخص‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک از این رده‌ها بیانگر شدت خاصی از فعالیت تکتونیکی می‌باشند. سپس از یک شاخص کلی در سطح منطقه که فعالیت تکتونیکی نسبی را نشان می‌دهد استفاده می‌کنیم. شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) به وسیله میانگین گرفتن از رده‌های مختلف شاخص‌های ژئومورفیکی استفاده شده در یک منطقه از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد (حمدونی و همکاران^۲، ۲۰۰۸، ۱۷۳-۱۵۰):

$$Iat = S / n$$

در این رابطه S بیانگر مجموع رده‌های فعالیت تکتونیکی بدست آمده از شاخص‌های محاسبه شده و n تعداد شاخص‌ها می‌باشد.

نتایج

شاخص گرادیان طولی رود^۳ (SL)

فعالیت زمین‌ساختی هر حوضه بر اساس این شاخص با توجه به مقدار میانگین آن به رده‌های بسیار بالا، بالا، متوسط و پایین تقسیم گردید (شکل ۳a). حوضه‌های ۴۸، ۴۳، ۳۴، ۳۲، ۳۳، ۳۱ به ترتیب ذکر شده با روند جنوب‌خاوری-شمال‌باختری، هم‌روند با ساختارهای اصلی منطقه دارای مقادیر بالایی از میانگین SL می‌باشند. به نظر می‌رسد که این مقدار بالای SL در حوضه ۴۸ متأثر از عملکرد زون گسلی بیستون-طاقبستان و حوضه ۴۳ متأثر از عملکرد گسل قلعه‌علی می‌باشد، همچنین در حوضه‌های ۲۱ و ۳۱ تا ۳۴ نیز به دلیل عملکرد گسل‌های موازی گسل میانراهان و انشعبات آنها مقدار میانگین SL بالا رفته است. در حوضه شماره ۱۴ نیز وجود واحدهای آذرین با مقاومت بالا (دیوریت و گابرو) از عوامل بالا رفتن میانگین SL می‌باشد. دیگر حوضه‌های دارای فعالیت بسیار بالا در شرق منطقه قرار دارند که تحت تاثیر عملکرد گسل‌های منشعب شده از گسل صحنه می‌باشند.

شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی^۴ (Δa)

این شاخص از لحاظ فعالیت زمین‌ساختی به ۵ رده طبقه‌بندی شده است که نقشه شاخص‌های سلسله‌مراتبی برای هر حوضه طبق مقادیر به دست آمده بر اساس طبقه‌بندی ذکر شده رسم گردیده است (شکل ۳b). با بررسی دقیق نتایج حاصل شده از اندازه‌گیری شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی و نقشه تهیه شده از آن کاملاً مشخص می‌باشد که حوضه‌هایی که دارای بالاترین مقدار این شاخص هستند حوضه‌هایی می‌باشند که در امتداد رودهای اصلی منطقه قرار دارند. در جنوب منطقه رودخانه قره‌سو قرار دارد که دقیقاً منطبق بر گسل مسبب آن (گسل قره‌سو) از شمال باختر به جنوب خاور جریان دارد. شاخه اصلی این رودخانه (رده ۷) در جنوب منطقه حوضه‌های ۵۴، ۵۲، ۴۹، ۴۷، ۴۲ و ۴۰ را در برمی‌گیرد که همگی دارای مقادیر بالای شاخص آنومالی سلسله‌مراتبی می‌باشند که احتمالاً در اثر عملکرد گسل قره‌سو بوده که باعث ریخته شدن رده‌های پایین‌تر از ۵ و حتی رده ۱ به شاخه اصلی این رودخانه (رده ۷) گشته است. در غرب و شمال منطقه انشعابات رودخانه گاوهرود قرار دارند که فعالیت انشعابات جنوبی گسل قشلاق و گسل‌های شمال منطقه باعث ایجاد مقادیر بالایی

¹ . El Hamdouni et al., 2008

² Stream-Length gradient

³ Hierarchical anomaly index

از آنومالی سلسله‌مراتبی در حوضه‌های ۱۰ و ۱۳ شده است. در شمال خاوری منطقه رودخانه دینور به موازات گسل صحنه و برخی انشعابات آن جریان دارد که بالا رفتن آنومالی سلسله‌مراتبی در حوضه‌های ۱۲، ۱۹ و ۲۷ در اثر عملکرد گسل صحنه و میانراهان در این قسمت از منطقه مشاهده می‌گردد. در جنوب رودخانه دینور نیز گسل بیستون-طاقبستان باعث اضافه شدن رده‌های پایین تر به رودخانه گاماسیاب با رده‌ی ۷ و ۸ گشته‌اند که بالا رفتن آنومالی سلسله‌مراتبی را در حوضه‌های ۴۴ و ۴۵ همراه داشته‌است.

شاخص انشعاب پذیری^۱ (R)

شاخص انشعاب پذیری بر اساس فعالیت زمین‌ساختی به رده‌های بسیار بالا ($R > 1/2$)، بالا ($0/9 < R < 1/2$) متوسط ($0/9 < R < 0/6$)، پایین ($0/4 < R < 0/6$) و بسیار پایین ($R < 0/4$) طبقه‌بندی و نقشه مقدار میانگین این شاخص برای هر حوضه ترسیم گردید (شکل ۳c). براساس این شاخص، ۳۵ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا می‌باشد. به نظر می‌رسد عملکرد گسل‌های کوه‌سفید و قره‌سو در جنوب و گسل قشلاق و گسل‌های جنوبی آن در غرب منطقه به ترتیب باعث بالا رفتن مقدار این شاخص در حوضه‌های (۴۲، ۴۳، ۴۴، ۵۱، ۵۲، ۵۴) و (۱۰، ۱۳، ۲۳، ۳۱) گشته است، در شمال منطقه نیز برای این شاخص در حوضه ۱ احتمالاً بر اثر فعالیت گسل‌های شمال منطقه، مقدار نسبتاً بالایی ۱/۲۸ حاصل شده است. همچنین در شرق منطقه عملکرد گسل‌های صحنه و میانراهان و انشعابات آن‌ها افزایش این شاخص را در حوضه ۲۷ و ۲۸ و گسل مروارید در حوضه ۱۱ را به همراه داشته است.

شاخص شکل حوضه^۲ (Bs)

رده بندی این شاخص به این گونه می‌باشد که بر اساس مقادیر حاصل شده فعالیت هر حوضه به پنج رده با فعالیت خیلی زیاد ($Bs < 4$)، زیاد ($3 < Bs < 4$)، متوسط ($2.5 < Bs < 3$)، کم ($2 < Bs < 2.5$) و کم ($1 < Bs < 2$) تقسیم بندی می‌شود (حمدونی و همکاران^۳، ۲۰۰۷، ۱۷۳-۱۵۰)، که بر اساس این رده‌بندی نقشه مقدار شاخص Bs در منطقه مورد مطالعه تهیه گردید (شکل ۳d). همانطور که نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری این شاخص و نقشه پراکندگی آن حوضه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه مشخص است، حوضه ۴۷، ۴۹، ۵۰ و ۵۴ بر روی گسل قره‌سو و کوه‌سفید دارای مقادیر بالایی از این شاخص بوده که احتمالاً کشیدگی در این حوضه‌ها تحت تاثیر عملکرد این گسل‌ها می‌باشد. همچنین در حوضه‌های ۱۲ و ۲۶ در شمال گسل صحنه واقع در فرادیواره این گسل و حوضه‌های ۱۱ و ۸ که به موازات گسل مروارید قرار دارند مقادیر بالا و نسبتاً بالایی شاخص شکل حوضه مشاهده می‌شود. حوضه‌های ۳۷ و ۴۱ نیز که در جنوب گسل میانراهان و شمال گسل‌های کنشت، پراو و قلعه‌علی قرار دارند دیگر حوضه‌هایی هستند که دارای مقادیر بالایی از شاخص شکل حوضه می‌باشند.

شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان^۴ (Smf)

با توجه به نتایج به‌دست آمده مقدار شاخص پیشانی کوهستان در منطقه مورد مطالعه از ۰٫۹۶ تا ۱٫۱۳ متغیر می‌باشد که به طور کلی بیانگر فعالیت بالای تکتونیکی منطقه بر اساس این شاخص می‌باشد، به جز حوضه‌های ۱۰، ۱۲، ۲۹ و ۴۵ تمامی

1. Bifurcation

2. Basin shape Index

3. El Hamdouni et al., 2008

4. Mountain front sinuosity

5. Iat

تمامی حوضه‌هایی که دارای پیشانی کوهستان هستند براساس تقسیم‌بندی این شاخص در رده یک قرار گرفته و فعالیت بالای تکتونیکی را نشان می‌دهند (شکل ۳e).

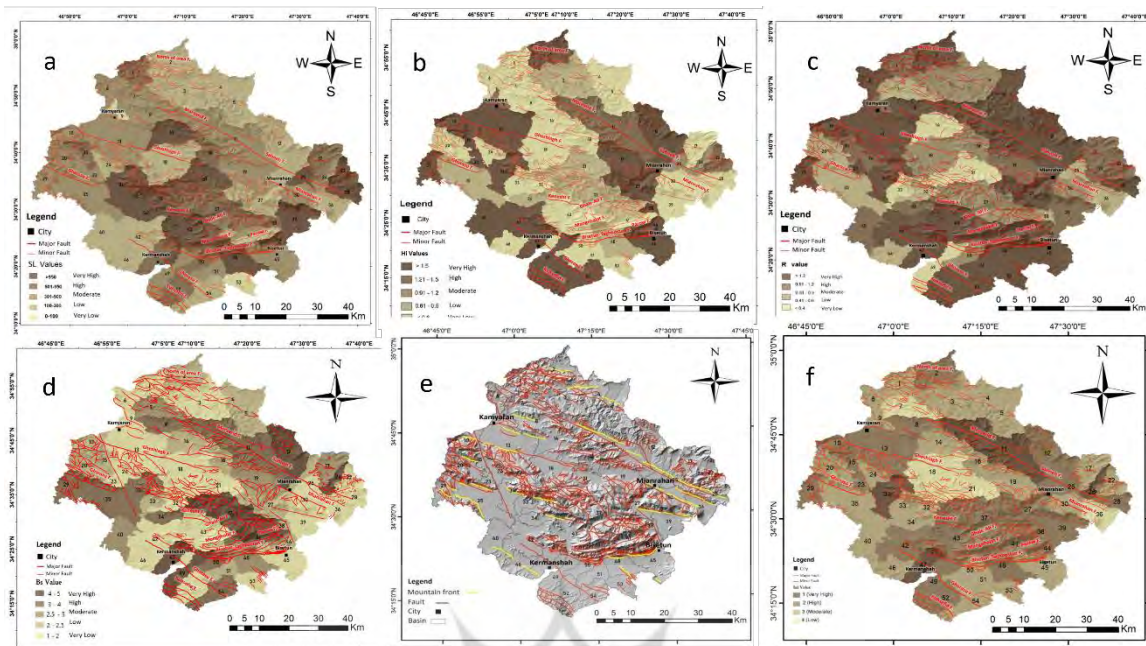
شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی^۱

در این مطالعه از شاخص‌های گرادیان طولی رود (SI)، شاخص آنومالی سلسله‌مراتبی (Δa)، شاخص انشغابات رود (R)، شاخص شکل حوضه (Bs) و شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان (Smf) استفاده شد و این شاخص‌ها بر اساس مقادیری که دارا بودند رده‌بندی شدند و در نهایت برای هر حوضه میانگین مقادیر رده شاخص‌های ریخت‌سنجی (S/n) اندازه‌گیری و به ۴ رده فعالیت زمین‌ساختی (Iat) تقسیم شدند (جدول ۱). رده ۱ سطح فعالیت زمین‌ساختی شامل مقادیر $1.0 \leq Iat$ و $1.5 < Iat$ بوده و نشانگر فعالیت نسبی خیلی زیاد می‌باشد، رده ۲ بیانگر فعالیت زمین‌ساختی نسبی زیاد با مقادیر $1.5 \leq Iat < 2.0$ ، رده ۳ بیانگر فعالیت زمین‌ساختی نسبی متوسط با مقادیر $2.0 \leq Iat < 2.5$ و رده ۴ با مقادیر $2.5 \leq Iat$ فعالیت زمین‌ساختی نسبی کم را ارائه می‌نماید. در ادامه جهت مشاهده نتایج حاصل از رده‌بندی انجام شده، نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت زمین‌ساختی (Iat) در گستره مورد مطالعه ترسیم گشت (شکل ۳f)، نتایج حاصل از این نقشه فعالیت تکتونیکی بالا را در بسیاری از حوضه‌های موجود در گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد. در نیمه جنوبی گستره مورد مطالعه حوضه‌های واقع در شمال راندگی بیستون-طاقبستان، حوضه‌های دربرگیرنده گسل‌های کنشت، قلعه‌علی، منگ‌هلات، پراو، حوضه‌های جنوبی گسل میانراهان و حوضه‌های واقع در فرادیاره گسل کوه‌سفید، فعالیت تکتونیکی بالا را نشان می‌دهند. همچنین در نیمه شمالی گستره مورد مطالعه حوضه‌های دربرگیرنده گسل‌های صحنه و مروارید بیانگر فعالیت تکتونیکی بالا و بسیار بالا هستند. حوضه ۲ و ۲۹ نیز در شمال و باختر گستره مورد مطالعه از دیگر حوضه‌هایی هستند که تحت تاثیر عملکرد احتمالی گسل‌های فرعی شمال و باختر منطقه، فعالیت تکتونیکی بالایی را نشان می‌دهند.

جدول ۱: رده‌بندی و مقادیر شاخص‌های اندازه‌گیری شده در حوضه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه

Basin No.	Value of					Class of					Value of Iat	Class of Iat
	SI	Δa	R	Bs	Smf	SI	Δa	R	Bs	Smf		
1	905.5333	0.2	1	1.19	-	1	3	1	3	-	2	3
2	291.7046	7.5	1.28	2.18	1.03	3	1	1	3	1	1.8	2
3	188.5479	0.75	0.9	1.42	1.02	3	2	2	3	1	2.2	3
4	217.2567	0.31	0.88	2.4	1.02	3	3	2	3	1	2.4	3
5	216.8707	0.6	1.18	1.95	1.03	3	2	1	3	1	2	3
6	466.4063	0.55	1.3	1.78	-	2	2	1	3	-	2	3
7	420.8663	0.22	0.5	2.52	-	2	3	2	3	-	2.5	4
8	308.7675	0.45	1.33	3.06	1.02	2	3	1	2	1	1.8	2
9	90.4141	1.25	1	1.58	-	3	1	2	3	-	2.25	3
10	317.5978	3.1	1.75	2.4	1.07	2	1	1	3	2	1.8	2
11	327.9255	1.21	2	3.01	1.04	2	1	1	2	1	1.4	1
12	281.4121	2.89	1.14	4.13	1.05	3	1	1	1	2	1.6	2
13	353.0721	2.17	2.22	1.69	1.01	2	1	1	3	1	1.6	2
14	1123.918	0.11	0.34	1.93	1.01	1	3	3	3	1	2.2	3
15	946.1361	9.8	1	2.31	-	1	1	1	3	-	1.5	2
16	772.5321	0.37	0.77	2.33	-	1	3	2	3	-	2.25	3
17	788.5912	0.45	1.17	2.53	-	1	3	1	3	-	2	3
18	179.0646	0.46	0.9	1.72	-	3	3	2	3	-	2.75	4

19	345.5444	1.63	0.96	2.51	-	2	1	2	3	-	2	3
20	486.6015	0.41	0.6	2.07	1.03	2	3	2	3	1	2.2	3
21	2362.55	0.746	0.19	1.51	-	3	2	3	3	-	2.75	4
22	1670.518	1.43	1.11	1.72	-	1	1	1	5	-	2	3
23	349.2575	8.57	1.5	1.6	-	2	1	1	3	-	1.75	2
24	267.5985	0.33	1.08	1.71	-	3	3	1	3	-	2.5	4
25	1498.909	1	0.51	1.42	1.03	1	1	2	3	1	1.6	2
26	516.3753	1	1.08	4.38	1.03	1	1	1	1	1	1	1
27	217.5727	5.52	1.37	2.1	1.03	3	1	1	3	1	1.8	2
28	1228.9	0.428	2	1.8	1.03	1	3	1	3	1	1.8	2
29	301.6982	6.94	2	2.64	1.06	2	1	1	3	2	1.8	2
30	524.0166	0.388	0.75	1.5	1.03	1	3	2	3	1	2	3
31	1121.687	3.95	2	3.38	1.06	1	1	1	2	2	1.4	1
32	953.1348	0.25	0.5	1.79	1.01	1	3	2	3	1	2	3
33	1734.269	0.307	0.34	2.48	-	1	3	3	3	-	2.5	4
34	1854.786	0.833	0.92	3.26	1.02	1	2	2	2	1	1.6	3
35	446.3869	0.884	0.5	3.06	1.01	2	2	2	2	1	1.8	2
36	102.8034	0.1	0.5	1.5	1.01	4	3	2	3	1	2.6	4
37	733.8567	0.69	0.83	4.04	-	1	2	2	1	-	1.5	2
38	676.8496	7	0.5	2.24	-	1	1	2	3	-	1.75	2
39	1289.425	0.387	1.04	1.52	1.01	1	3	1	3	-	2	3
40	157.5926	3.62	1.09	2.75	1.03	3	1	1	3	1	1.8	2
41	139.0778	0.55	2.17	4.37	-	3	2	1	1	-	1.75	2
42	163.0395	7.6	1.59	1.7	1.02	3	1	1	3	1	1.8	2
43	1450.847	0.46	1.52	1.36	1.03	1	3	1	3	1	1.8	2
44	1110.067	7.25	1	2.32	-	1	1	1	3	-	1.5	2
45	311.7761	4.79	1.33	1.38	1.12	2	1	1	3	3	2	3
46	109.8153	0.125	0.5	1.37	1.02	3	3	2	3	1	2.4	3
47	657.9363	7.89	2.2	4.71	1.02	1	1	1	1	1	1	1
48	970.5998	0.648	1.93	2.55	1.02	1	2	1	3	1	1.6	2
49	321.4669	5.24	0.21	4.53	-	2	1	3	1	-	1.75	2
50	654.4433	0.061	0.66	3.07	-	1	3	2	2	-	2	3
51	539.5629	0.25	1.5	2.16	-	1	3	1	3	-	2	3
52	618.7291	9.5	1.21	1.63	-	1	1	1	3	-	1.5	2
53	89.09994	0.5	1.33	1.4	-	3	2	1	3	-	2.25	3
54	247.7556	9.7	1.3	2.75	-	3	1	1	3	-	2	3



شکل ۳: نقشه پراکندگی مقادیر شاخص‌های مورفوتکتونکی در منطقه مورد مطالعه، a: شاخص گرادیان طولی رود، b: شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی، c: شاخص انشعاب پذیری، d: شاخص شکل حوضه، e: شاخص پیچ و خم پیشانی کوهستان، f: شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی.

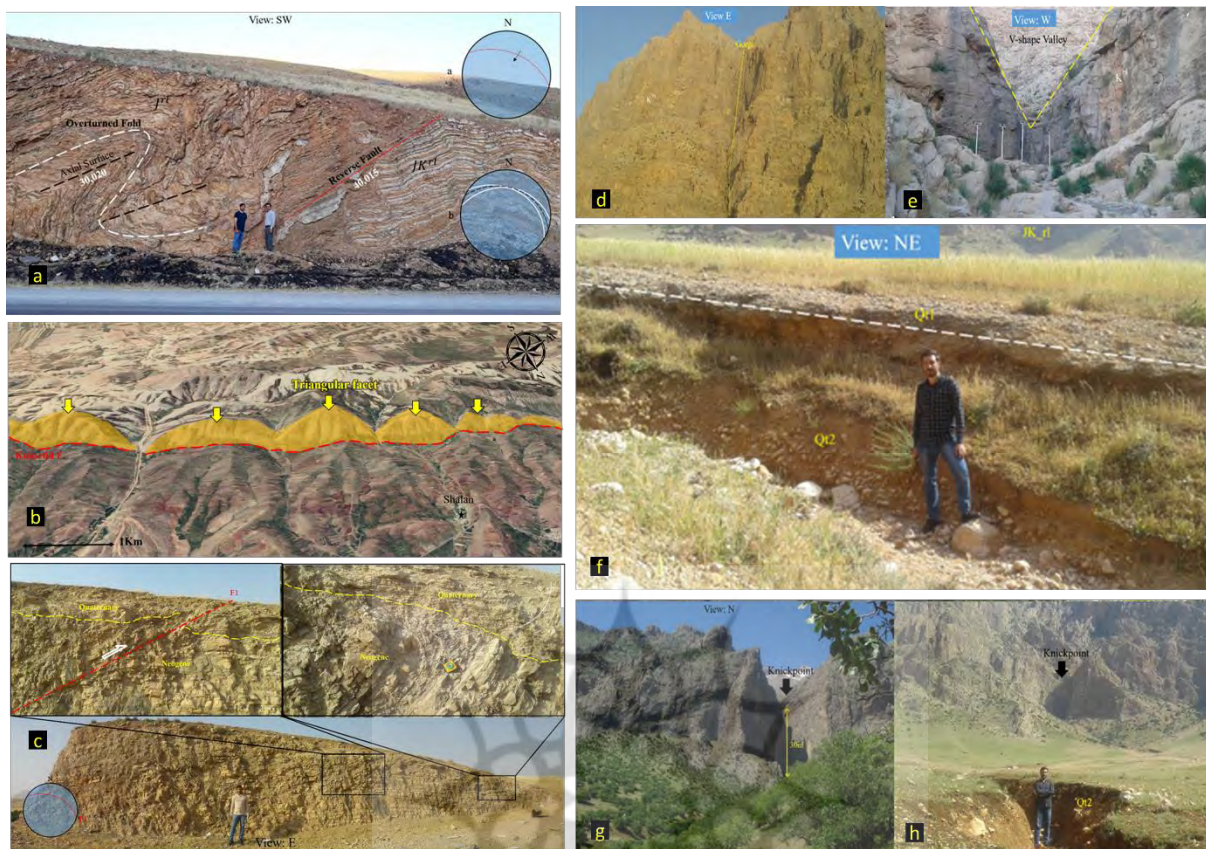
بحث و یافته‌ها

پس از تعیین و محاسبه شاخص‌های ریخت‌سنجی در محدوده مورد پژوهش و تهیه نقشه پهنه‌بندی زمین‌ساخت نسبی، مناطقی که نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی اخیر است، تعیین شدند و در ادامه به منظور تأیید نتایج شاخص‌های ریخت-سنجی محاسبه شده در مناطق فعال زمین‌ساختی، بازدیدهای صحرایی گسترده از ساختارهای تکتونیکی اصلی و حوضه‌های دارای مقادیر بالای شاخص‌ها صورت گرفت. در مشاهدات صحرایی شواهد ساختاری از جمله گسل‌های کواترنری متعدد و گسلش و چین خوردگی در واحدهای کواترنری و پلیوکواترنری و شواهد مورفوتکتونیکی شامل رودشکن‌ها، سطوح مثلثی، دره‌های تنگ، چند نسل پادگانه‌های آبرفتی، انحراف آبراهه و چشمه‌های گسلی در نزدیکی گسل‌های فعال منطقه مورد بازدید قرار گرفت. در جنوب منطقه مورد مطالعه در رخنمون کنار جاده کرمانشاه به اسلام‌آباد، راندگی‌های متعدد در واحدهای آهکی مشاهده شد که با توجه به هندسه ساختارها، می‌توان آن‌ها را ساختارهای مربوط به پهنه گسلی کوه سفید مدنظر قرار داد (شکل ۴a). از شواهد مورفولوژیکی فعالیت گسل کوه سفید می‌توان به سطوح مثلثی ایجاد شده در فرادیواره این گسل در حوضه‌های ۵۴ و ۴۹ اشاره کرد که بیانگر یک سطح فرسایش یافته گسلی در این بخش می‌باشد (شکل ۴b). علاوه بر سطوح مثلثی، کچ شدگی، چین خوردگی و شکستگی در واحدهای نئوژن و کواترنری در حوضه‌های ۵۹ و ۴۲ در نزدیکی گسل کوه سفید (شکل ۴c)، فعالیت نسبتاً بالا حاصل شده از بررسی شاخص‌های ریخت‌سنجی را تأیید می‌کند. شواهد ریخت‌شناسی متعددی در قسمت‌های مختلفی از پهنه گسلی بیستون-طاقبستان، فعالیت این گسل را نشان می‌دهند. از جمله این شواهد می‌توان به دره‌های خطی و دره‌های تنگ متعدد در اطراف گسل‌های کنشت، پراو و بیستون-طاقبستان اشاره کرد (شکل ۴d,e). بریدگی رسوبات کواترنری و ایجاد نسل‌های مختلف تراس‌های رودخانه‌ای (شکل ۴f) رودشکن‌های متعدد در مسیر رودخانه‌ها (شکل ۴g,h) از دیگر شواهد موجود می‌باشند. از شواهد مرتبط با فعالیت اخیر گسل میانراهان می‌توان به کچ شدگی و جایجایی واحدهای کواترنری تراس رودخانه در جنوب روستای کله‌جوب (شکل ۵a) و همچنین دره‌های تنگ فراوان و رودشکن‌های ایجاد شده در آن‌ها در فرودیواره گسل میانراهان در جاده بیستون به میانراهان اشاره کرد (شکل ۵b,c).

در بازدید صحرایی از حوضه‌های شمالی و شمال خاوری منطقه، ابتدا شواهد ساختاری مرتبط با گسل صحنه و مروارید جهت شناسایی و معرفی این گسل به عنوان عامل افزایش در ناهنجاری در شاخص‌های ریخت‌سنجی در این قسمت از منطقه، مورد بررسی قرار گرفتند و سپس تاثیر آن‌ها بر واحدهای جوان و همچنین شواهد ریخت‌شناسی مرتبط با فعالیت آن‌ها بررسی شدند. در چشم‌انداز باختر روستای کرکسار بالاآمدگی در واحدهای کرتاسه ناشی از عملکرد گسل صحنه قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۶a). در رخنمون عرضی از گسل صحنه در برش جاده پارسینه در باختر شهر صحنه، خط گسل صحنه با خرد شدگی شدید، تشکیل ساختار c-s، و تغییر امتداد لایه‌بندی در دوطرف گسل قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۶b). تاثیر این گسل در واحدهای بسیار جوان کواترنری فعالیت اخیر و نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های ریخت‌سنجی را، تایید می‌کند. در ترانشه حفر شده جاده گاز روستای کرج به روستای نظرآباد چندین مورد جابجایی در رسوبات پلیوکواترنری مشاهده شد که اغلب آن‌ها به صورت محلی دارای سازوکار نرمال می‌باشند (شکل ۶c). در اکثر مواردی که گسل‌های تراستی از فعالیت بالایی برخوردار هستند، بالاآمدگی شدیدی در فرادیواره گسل ایجاد می‌شود که در این مناطق به دلیل فزایش بالا گسل‌های نرمالی به صورت ثقلی ایجاد می‌شوند، نمونه ای از این گسل‌های نرمال در فرادیواره گسل تراستی مسبب زلزله Elsanam به ثبت رسیده‌اند (بوربنک و اندرسون، ۲۰۰۸)^۱. در خاور روستای امیرآباد نیز کج شدگی در رسوبات جوان در تراس‌های رودخانه‌ای مشاهده شد (شکل ۶g). علاوه بر شواهد ذکر شده، شواهد ریخت‌شناسی متعددی در محدوده عملکرد گسل صحنه، فعالیت اخیر این گسل را نشان می‌دهند. از جمله تراس‌های آبرفتی با ضخامت بالا، بریدگی رسوبات تازه نهشته شده (Q^f) توسط رودخانه، چشمه‌های گسلی اطراف گسل و رودشکن‌های ایجاد شده بر روی رودخانه‌های موجود در این قسمت از منطقه مورد مطالعه (شکل ۶f). علاوه بر این کج‌شدگی و انحراف آبراهه‌ها در برخورد با گسل صحنه، حرکت راست‌الغز راست‌بر اخیر این گسل را نشان می‌دهند (شکل ۶e). سطوح مثلثی (شکل ۶d)، دره‌های تنگ و انحراف آبراهه‌ها در اثر عملکرد گسل‌های امتدالغز (شکل ۶h,i)، از شواهد ریخت‌شناسی مرتبط با فعالیت اخیر گسل مروارید در شمال خاوری منطقه می‌باشند.

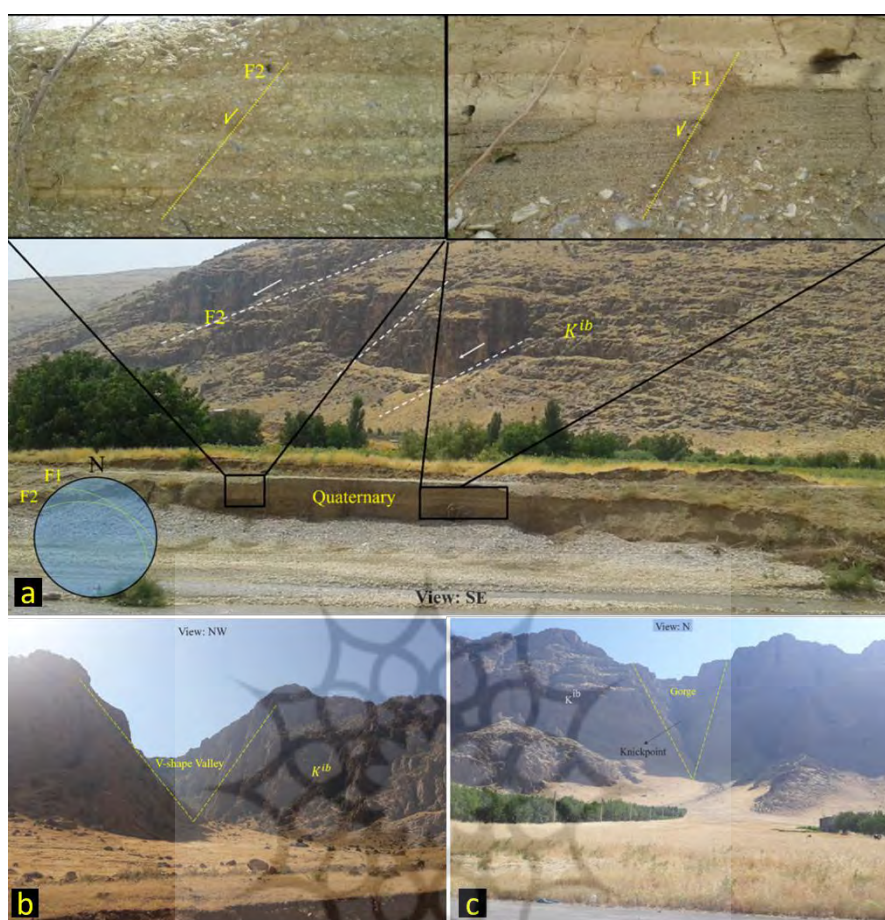
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

¹ Burbank and Anderson, 2008

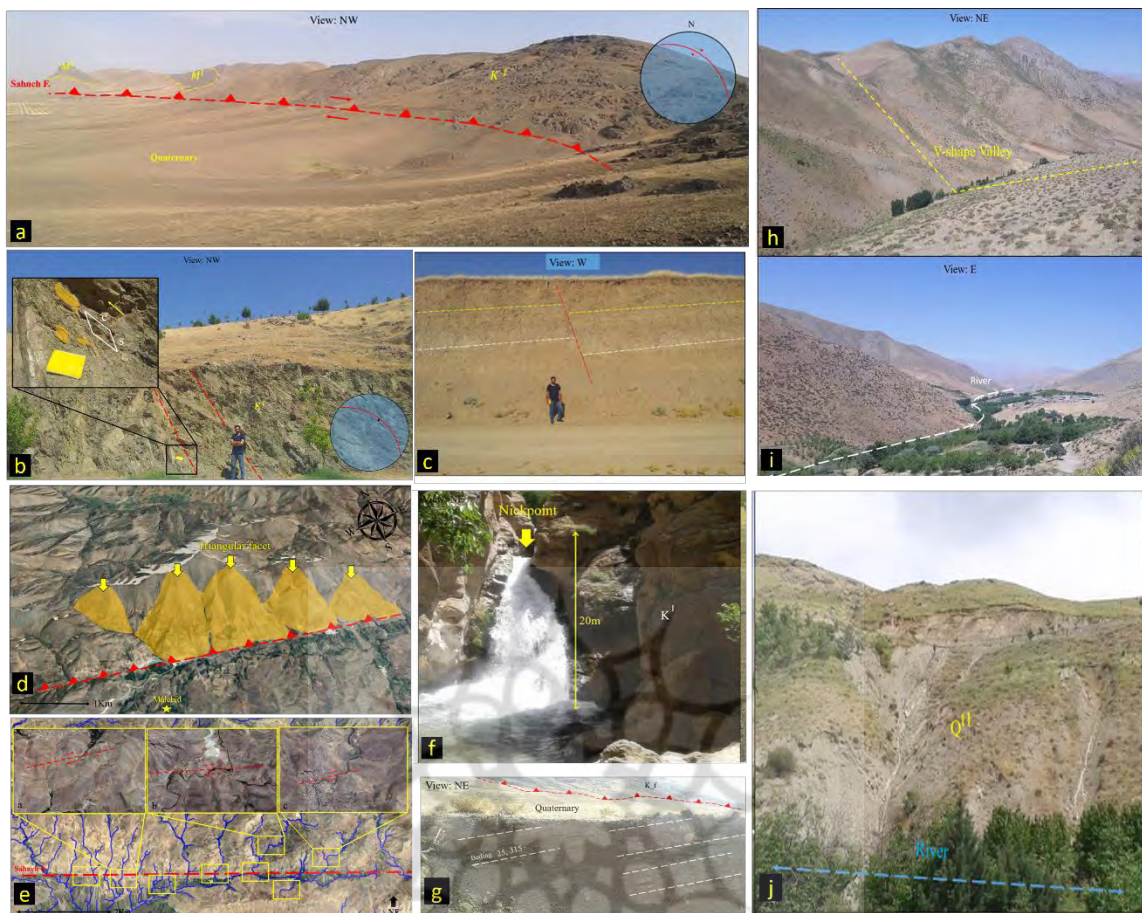


شکل ۴: شواهد صحرایی پهنه گسلی کوه سفید و بیستون-طاقبستان: a: رخنمون گسل کوه سفید و چین برگشته در آهک‌های زوراسیک (J^{r1}) و رادیولاریت کرتاسه (JK^{r1}) در شمال روستای شمشه b: سطوح مثلثی (Triangular facet) موجود در فرادیواره گسل کوه سفید در جنوب روستای شالان c: تاثیر تکتونیک بصورت گسلش و چین خوردگی بر واحدهای جوان نئوژن و کواترنری در حوضه‌های ۵۹ و ۴۲ در شمال روستای کهریز d و e: دره‌های تنگ تشکیل شده در محدوده عملکرد پهنه گسلی بیستون-طاقبستان f: پدیدگی رسوبات عهد حاضر توسط رودخانه و ایجاد دو نسل تراس رودخانه ای g و h: رودشکن‌های موجود در پهنه گسلی بیستون-طاقبستان در شمال روستای چالابه.

پروژه علوم انسانی و مطالعات زلزله‌شناسی
پرتال جامع علوم انسانی



شکل ۵: شواهد صحرائی گسل میانراهان: a: بریدگی واحدهای کواترنری توسط رودخانه و آثار جابجایی این واحدها با مشخصات مشابه به گسل میانراهان در آهک کرتاسه (K^{ib}) در جنوب روستای کله جوب b و c: تنگ‌دره و رودشکن در فرودپواره گسل میانراهان در خاور شهر میانراهان در آهک کرتاسه (K^{ib}).



شکل ۶: شواهد صحرایی پهنه گسلی صحنه-مروارید a: بالآمدگی واحدهای کرتاسه در اثر فعالیت گسل صحنه در باختر روستای کرکسار b: رخنمون گسل صحنه در آهک کرتاسه (K^1) در جاده پارسینه، به همراه استریوگرام گسل. ساختارهای لنزی شکل و سطوح c-s حرکت معکوس گسل را نشان می‌دهند c: گسلیش و کج شدگی در واحدهای کواترنری در اطراف گسل صحنه، جاده گاز روستای کرک. d: سطوح مثلثی تشکیل شده در فرادیواره گسل مروارید در شمال روستای ماله بید. e: تصویر ماهواره‌ای از انحراف از مسیر و قائم شدن آبراهه‌ها در برخورد با گسل صحنه f: رودشکن ایجاد شده در برخورد رودخانه با گسل صحنه در آهک کرتاسه (K^1). g: کج شدگی لایه‌های کواترنری در اثر فعالیت گسل صحنه در خاور روستای امیرآباد. h: دره تنگ تشکیل شده در آهک نازک لایه جنوب روستای تازه‌آباد i: نمونه‌ای از انحراف آبراهه در باختر روستای ماله بید j: تراس رودخانه‌ای با ضخامت بالا در شمال شهر صحنه.

مقادیر پنج شاخص ریخت‌سنجی شامل، گرادیان طولی رود^۱ (SL)، ناهنجاری سلسله‌مراتبی^۲ (Hi)، انشعابات^۳ (R)، حوضه زهکشی^۴ (Bs) و پیچ‌وخم پیشانی کوهستان^۵ (Smf)، برای ۵۴ حوضه موجود در منطقه مورد مطالعه به طور جداگانه محاسبه گردید و در نهایت نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت تکتونیکی با تلفیق مقادیر حاصل از شاخص‌های ریخت‌سنجی تهیه شد، شاخص گرادیان طولی رودخانه^۶ (SL)، در قسمت‌های خاوری و نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر

1. Stream-Length gradient
 2. Hierarchical anomaly index
 3. Bifurcation
 4. Basin shape Index
 5. Mountain front sinuosity
 6. Stream-Length gradient

بالایی می‌باشند. در خاور منطقه مورد مطالعه، حوضه‌های شمالی گسل صحنه و حوضه جنوبی گسل میانرهران مقادیر این شاخص فعالیت بالا و بسیار بالا را نشان می‌دهد که بیانگر تاثیر فعالیت گسل صحنه در این قسمت از منطقه بر روی شیب رودخانه می‌باشد. در جنوب منطقه مورد مطالعه در محدوده عملکرد پهنه‌گسلی بیستون-طاقبستان، حوضه‌های ۳۷، ۴۳، ۴۴، ۴۸ دارای مقادیر نسبتا بالایی از شاخص گرادیان طولی رود (SL) می‌باشند، عدم فرسایش در آهک مرتفع بیستون توسط رودخانه و بالا بودن مقدار شاخص گرادیان طولی رود در حوضه‌های ذکر شده می‌تواند بیانگر فعالیت کنونی گسل بیستون-طاقبستان و ادامه بالا آمدگی توسط گسل باشد. علاوه بر این حوضه ۱ در شمال منطقه، حوضه ۱۴ در جنوب گسل مروارید و حوضه‌های ۳۱، ۳۲، ۳۳ و ۳۴ نیز در شمال گسل کنشت دارای مقادیر بالایی از این شاخص هستند.

شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی^۱ (Hi) و شاخص انشعابات^۲ (R)، در حوضه‌های باختری و خاوری منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر بالا می‌باشند. حوضه ۲۲ و ۲۵ در شمال گسل صحنه و حوضه‌های دربرگیرنده گسل مروارید بر اساس این شاخص‌ها دارای فعالیت بالایی هستند. همچنین حوضه‌های جنوب منطقه در محدوده عملکرد گسل کوه سفید و گسل قره‌سو، پهنه‌گسلی بیستون-طاقبستان و همچنین حوضه‌های جنوبی گسل قشلاق در باختر منطقه مورد مطالعه مقادیر بالایی از این شاخص‌ها را نشان می‌دهند. شاخص شکل حوضه زهکشی^۳ (Bs)، بیشترین مقادیر را در حوضه‌های ۴۹ و ۴۷ در جنوب منطقه مورد مطالعه در محدوده عملکرد گسل کوه سفید و قره‌سو، حوضه ۲۶ در شمال گسل صحنه، حوضه ۱۲ در شمال گسل مروارید و حوضه ۳۷ در شمال پهنه‌گسلی بیستون-طاقبستان دارا می‌باشد. ارتفاعات تشکیل شده بر اثر فعالیت گسل‌های صحنه، میانرهران، مروارید و پهنه گسلی بیستون-طاقبستان با پیشانی کوهستان مستقیم بیشترین مقادیر شاخص پیچ‌وخم پیشانی کوهستان^۴ (Smf) را دارا هستند. بر اساس نتایج محاسبه شاخص‌های ذکر شده و تهیه نقشه فعالیت تکتونیکی با تلفیق مقادیر این شاخص‌ها به‌طور کلی نیمه جنوبی و خاوری منطقه مورد مطالعه دارای فعالیت تکتونیکی نسبی بالاتری نسبت به نیمه باختری و شمالی هستند. پهنه گسلی بیستون-طاقبستان در نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه و پهنه گسلی صحنه-مروارید در خاور منطقه مورد مطالعه دارای بیشترین فعالیت زمین‌ساختی می‌باشند. تمامی حوضه‌های شمال گسل صحنه بر اساس شاخص‌های گرادیان طولی رود (SL) و انشعابات (R) دارای فعالیت تکتونیکی نسبی بالایی هستند. همچنین حوضه‌های ۱۷ و ۲۶ مقادیر بالا از شاخص شکل حوضه (Bs) و حوضه‌های ۲۲ و ۲۶ مقادیر بالایی از شاخص (Hi) را دارا می‌باشند.

کج‌شدگی و گسلش در واحد پلیوکواترنری، راندگی واحدهای کرتاسه بر روی واحدهای میوسن و چین‌خوردگی و گسلش در آن‌ها، آبراهه‌های قائم و کج شده در محل برخورد با گسل صحنه، سطوح مثلثی، بریدگی رسوبات تازه نهشته شده توسط رودخانه و ضخامت بالایی تراس‌های رودخانه‌ای از شواهد صحرائی مشاهده شده مرتبط با گسل صحنه می‌باشد که نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های ریخت‌سنجی را تایید می‌کند. در حوضه‌های دربرگیرنده گسل مروارید نیز شاخص‌های انشعابات (R)، شکل حوضه زهکشی (Bs) و ناهنجاری سلسله‌مراتبی دارای مقادیر بالا می‌باشند که فعالیت بالای این گسل را نشان می‌دهند. از شواهد صحرائی مشاهده شده مرتبط با فعالیت گسل مروارید می‌توان به آبراهه‌های کج شده در برخورد با گسل و دره‌های ۷ شکل اشاره کرد. اغلب حوضه‌های دربرگیرنده پهنه‌گسلی بیستون-طاقبستان، به جز شاخص ناهنجاری سلسله‌مراتبی، در تمامی شاخص‌ها دارای فعالیت بالا می‌باشند هرچند که حوضه‌هایی با فعالیت متوسط نیز در برخی شاخص‌ها به چشم می‌خورد. شواهد ریخت‌شناسی متعددی از جمله دره‌های ۷ شکل، تنگ‌دره^۵، سطوح مثلثی، رودشکن‌های فراوان، تراس‌های آبرفتی، کج‌شدگی و عدم تقارن مخروط افکنه، زمین‌لغزش‌های اطراف گسل و چشمه‌های گسلی، صحت

1. Hierarchical anomaly index

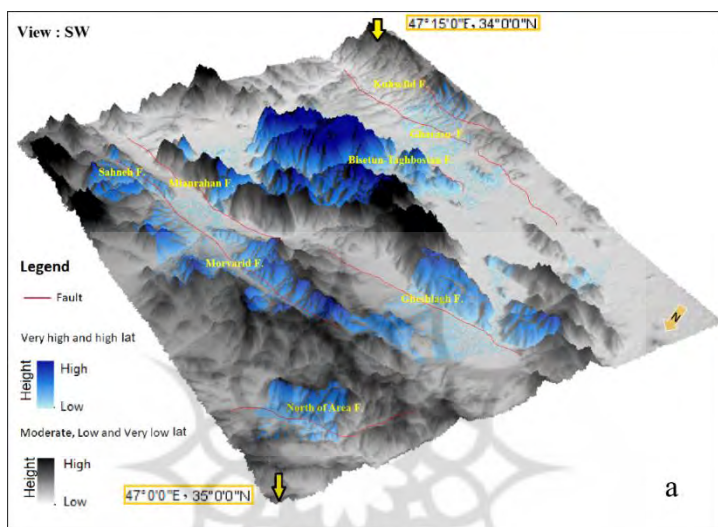
2. Bifurcation

3. Basin shape Index

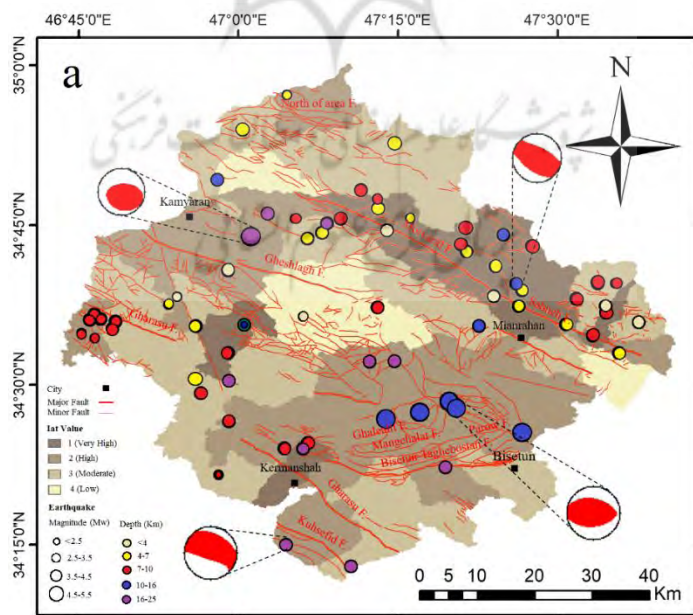
4. Mountain front sinuosity

5. Gorge

نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های ریخت‌سنجی و فعالیت پهنه گسلی بیستون-طاقبستان را تایید می‌کند. علاوه بر شاخص‌های ریخت‌سنجی، از زلزله‌های تاریخی و دستگاهی نیز به عنوان یک شاهد دیگر از فعالیت جوان گسل‌ها استفاده می‌شود. لذا با بررسی موقعیت زلزله‌های رخ داده در منطقه مورد مطالعه می‌توان تا حدودی حرکات اخیر گسل‌ها را شناسایی کرد. در این مطالعه از زلزله‌های دستگاهی بالای ۲/۵ ریشتر ثبت شده از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۵ استفاده شد و موقعیت رو مرکز زلزله‌ها بر روی نقشه‌های پهنه‌بندی فعالیت تکتونیکی قرار گرفت، با توجه به نقشه‌های تهیه شده، بیشترین تمرکز زلزله‌ها در خاور و باختر منطقه مورد مطالعه در اطراف پهنه‌های گسلی بیستون-طاقبستان، صحنه و میانراهان می‌باشد.



شکل ۱۱: موقعیت مناطقی با فعالیت تکتونیکی نسبی بالا و بسیار بالا بر روی مدل سه بعدی از پستی‌بلندی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۲: موقعیت رومرکز زلزله‌های دستگاهی موجود در منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه پهنه‌بندی فعالیت تکتونیکی

نتیجه‌گیری

۱- فعالیت زمین‌ساختی کنونی بسیار بالا و بالا در پهنه گسلی صحنه-مروراید به عنوان بخشی از گسل اصلی زاگرس (MRF) و پهنه راندگی بیستون-طاقبستان و فعالیت متوسط و نسبتا بالا در گسل میانراهان و پهنه گسلی کوه‌سفید به عنوان شاخه‌ای از گسل تراستی زاگرس (ZTF) در منطقه مورد مطالعه بر اساس نتایج حاصل از شاخص‌های ریخت‌سنجی و مطالعات صحرایی.

۲- انطباق بالای زمین‌لرزه‌های وقوعی با نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت تکتونیک‌ی نسبی بر اساس شاخص‌های ریخت‌سنجی (Iat) در منطقه مورد مطالعه و استفاده از (Iat) به عنوان مطالعات اولیه جهت شناسایی مناطق لرزه خیز و پیش بینی بلندمدت زمین‌لرزه در مناطق دارای فعالیت زمین‌ساختی بالا.

منابع

- اشراقی، ص.ع.، (۱۳۷۵)، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سنقر. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- رفیعا، ر.، شهیدی، ع.، (۱۳۷۸)، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ میانراهان (کرکسار). سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- صادقیان، م.، دلاور، س. ت.، (۱۳۸۵)، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ کامیاران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کریمی باوندپور. ع. ر.، حاج حسینی، ا.، (۱۳۷۸)، نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ کرمانشاه. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- Alavi, M., 1994. *Tectonics of the Zagros Orogenic Belt of Iran: New Data and Interpretations. Tectonophysics*, pp. 211-238.
- Babaei, S., Dehbozorgi, M., Hakimi Asiabar, S. 2017. "Assessment of active tectonics by using morphometric indices in Central Alborz" *Iranian Association of Geomorphology, Quarterly Quantitative Geomorphological researches*. 1, pp. 40-56.
- Babaei, S., Dehbozorgi, M., Hosseiniasl, A., Hakimi Asiabar, S. 2020. "New insights into the effect of the quaternary fault activity on river knickpoints in the Central Alborz (Iran)". *Quaternary International*. 562, pp. 104-120.
- Baroni, C., Noti, V. Ciccacci, S. Righini, G., and Salvatore, M. C. Eds. 2005. *Fluvial origin of the valley system in northern Victoria Land (Antarctica) from quantitative geomorphic analysis. Geological Society of America Bulletin* 117, pp. 1-2:212-228.
- Bull, W. B., and McFadden, L. D. 1977. *Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In Geomorphology in arid regions. Proceedings of the eighth annual geomorphology symposium. State University of New York, Binghamton*, pp. 115-138.
- Bull, W.B., 2007. *Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to paleoseismology. Blackwell, Malden*. pp. 315
- Burbank, D.W. and Anderson, R.S., (2008). "Tectonic Geomorphology". *Oxford: Blackwell Scien*, pp. 316.
- Dehbozorgy, M., Momeni, M. 2016. "Recent tectonic activity in Qom-Zefreh fault zone, Central Iran". *Journal of Quantitative Geomorphological researches* 5(2), pp. 110-129.
- Dos Santos, J.M., Salamuni, E., Dasilva, C.L., Sanches, E., Gimenez, V.B., Nascimento, E.R., (2019). *Morphotectonics in the Central-East Region of*

- South Brazil: Implications for Catchments of the Lava-Tudo and Pelotas Rivers, State of Santa Catarina, Geomorphology, Vol 328, pp 138-156.*
- Elhamdouni, R. E., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacon, J., Keller, E.A., 2008, *Assessment of Relative Active Tectonic, SouthWest Border of the Sierra Nevada (Southern Spain). Geomorphology, pp. 96, 150-173.*
 - Goudie, A.S., (2004). *Encyclopedia of Geomorphology, First published by Routledge, V 1, pp. 423.*
 - Guarnieri, P. and Pirrotta, C., (2008). "The Response of Drainage Basins to the Late Quaternary Tectonics in the Sicilian Side of the Messina Strait (NE Sicily)". *Geomorphology, pp. 95, 260- 273.*
 - Hack, John Tilton., 1982. *Physiographic division and differential uplift in the piedmont and Blue Ridge. U.S. Geological Survey Professional, pp. 1265:1-49.*
 - Keller, E. A., Pinter N., 2002. *Active tectonic, Earthquakes, Uplift and Landscape. Prentice Hall, New Jersey, pp. 362.*
 - Longkumer, L., Luirei, Kh., Moiya, J.N., Thong, G.T., (2019). *Morphotectonics and neotectonic activity of the Schuppen Belt of Mokokchung, Nagaland, India, Journal of Asian Earth Sciences, Vol 170, Pp 138-154*
 - Mohajjel, M., Fergusson, C. L., Sahandi., 2003. *Cretaceous-Tertiary Convergence and Continental Collision Sanandaj – Sirjan Zone, Western Iran. Journal of Asian Earth Sciences. 21, 397-412 p* Ramirez, M.T., 1998. *Geomorphologic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt. Earth Surface Processes and Landforms, pp. 23, 317 – 332.*
 - Mosadeghzadeh, E., Dehbozorgi, M., Hakimi Asiabar, S., 2019. "Morphotectonics of Eastern Part of Ramsar, North of Iran". *Journal of Quantitative Geomorphological researches 8(3), pp. 242-258.*
 - Rabeti, D., Dehbozorgy, M., Hakimi Asiabar, S. Nozaem, R. 2018. "Assessment of active tectonics by using morphometric indices in Sepidrud basin, Western Alborz". *Journal of Quantitative Geomorphological researches 7(2), pp. 140-157.*
 - Schumm, S.A., Dumont, J.F. and Holbrook, J.M., (2002). "Active tectonics and alluvial rivers". *Cambridge University Press, Cambridge, pp. 276.*
 - Shokri, P., Dehbozorgi, M., Hakimi Asiabar, S., 2018. "Assessment of active tectonics by using morphometric indices in the Western part of Central Alborz". *Journal of Quantitative Geomorphological researches 7(4), pp. 105-124.*
 - Shokri, P., Dehbozorgi, M., Hakimi Asiabar, S. 2020. *Recent tectonic activity in Central Alborz Mountain, Iran: Morphometric analysis and knickpoint identification, ". Journal of Mountain Science. V.17, n 12, p. 3137-3161.*
 - Talampas, W., Cabahug, R., (2018). *Morphotectonic Characteristics of the Iponan River Watershed in Cagayan de Oro City, Philippines, Mindanao Journal of Science and Technology Vol 16, pp 115-131.*
 - Yavari, A., Dehbozorgy, M., Nozaem., R, Hakimi Asiabar, S., Rabeti, D., 2020. "Assessment of active tectonics by using morphometric indices in Western and Central Alborz". *Journal of Quantitative Geomorphological researches 10(1), pp. 149-171.*