

تحلیل ریخت زمین ساختی دامنه جنوبی البرز مرکزی

علی شمائلیان؛ دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه خوارزمی تهران
مریم ده‌بزرگی*؛ استادیار، تکتونیک، دانشگاه خوارزمی تهران
منوچهر قرشی؛ استاد، تکتونیک، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
رضا نوزعیم؛ استادیار، تکتونیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۲

چکیده

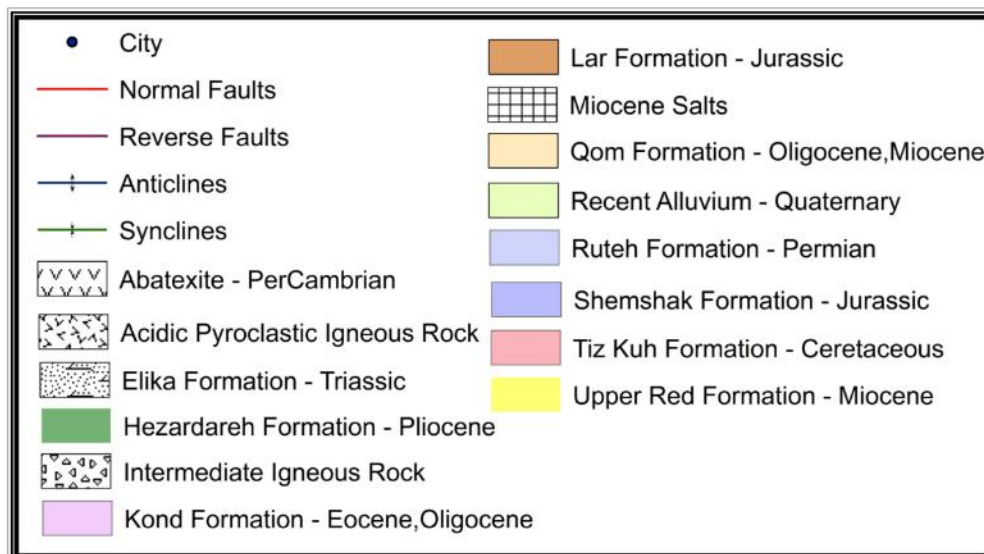
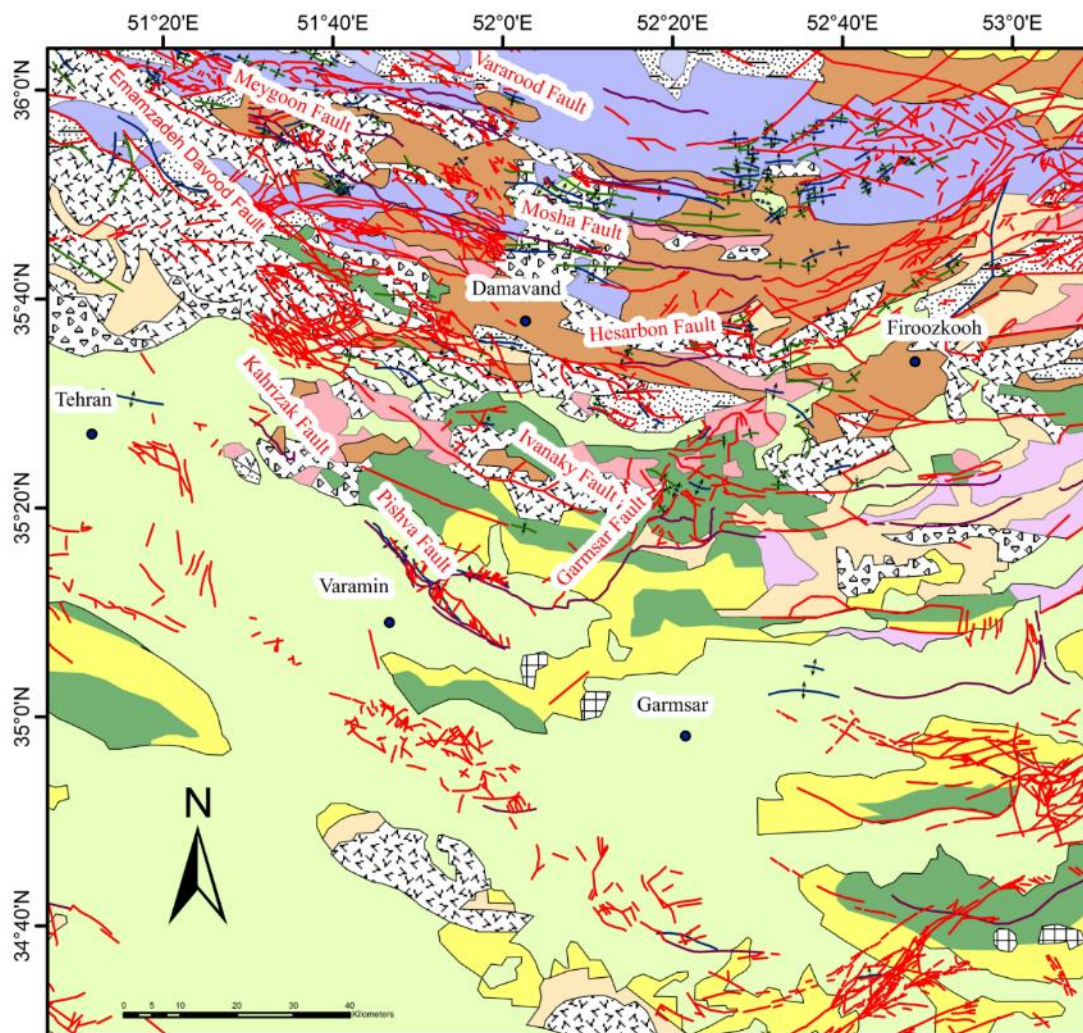
تحلیل و بررسی مورفوتکتونیک حوضه آبریز در شناخت تکتونیک فعال منطقه مفید است و اطلاعات مهم و ارزش‌مندی در مورد شرایط زمین‌ساختی منطقه و میزان فعالیت تکتونیک منطقه مورد نظر در اختیار ما قرار می‌دهد. در این مقاله زمین‌ساخت فعال دامنه جنوبی البرز مرکزی در حوضه‌های آبریز جاجرود، ایوانکی و حبله رود (گلوئسوت) با استفاده از شاخص‌های مورفومتری ناهنجاری سلسله‌مراتبی (H_a)، شاخص انشعابات (B_i)، انتگرال و منحنی هیپسومتر (H_i)، شکل حوضه (B_s)، برجستگی حوضه (B_h) و تراکم حوضه زهکشی (ρ) در محیط *Arc GIS 10.1* اندازه‌گیری شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در زیرحوضه‌های منطق بر گسل‌های مشا و امام‌زاده داوود در ناحیه شمالی منطقه و گرمسار و ایوانکی و حصاربن در ناحیه مرکزی و جنوبی منطقه، همچنین مناطق با تراکم گسلی بالا شاخص‌های اندازه‌گیری شده ناهنجاری‌های بالایی نتیجه می‌دهد. چنین ناهنجاری اشاره به امکان تأثیر گسل‌های مذکور بر منطقه و فعالیت تکتونیک بالا در ناحیه مورد مطالعه دارد.

کلیدواژه‌ها: البرز مرکزی، رودخانه، گسلش فعال، مورفوتکتونیک.

مقدمه

کمبرند کوه‌زایی فعال البرز، با روند کلی خاوری-باختری، قسمتی از کمربند کوه‌زایی آلپ-همیالیا و حاصل برخورد بخشی از گندوانا با اوراسیا در زمان تریاس پسین است. این برخورد ایجاد پهنه‌های گسلی فعال فراوانی را در شمال ایران در پی داشته است. بیشتر این پهنه‌های گسلی موازی با روند کوه‌های البرز است، از جمله گسل‌های شمال تهران، مشا، طالقان و آستانه (آلن و همکاران، ۲۰۰۳). منطقه مورد مطالعه در تقسیم‌بندی ساختمانی-رسوبی ایران (اشتوکلین، ۱۹۶۸) در جنوب البرز مرکزی بین طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱۰ دقیقه خاوری و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۶ درجه شمالی واقع شده است (شکل ۱).

مورفوتکتونیک مطالعه زمین‌منظرهای ایجادشده بر اثر فرایندهای تکتونیک و یا کاربرد اصول زمین‌ریختی در حل مسائل تکتونیک تعریف شده است (بوربانک و اندرسون، ۲۰۱۲). مورفولوژی کانال‌ها و پروفیل طولی رودخانه‌ها در پاسخ به شرایط تکتونیک تغییر می‌کند (شام و همکاران، ۲۰۰۲). بررسی شبکه زهکشی رودخانه‌ها، به‌ویژه در پهنه‌های گسلی راندگی، اهمیت بسیار زیادی دارد. این بدان دلیل است که این ساختارها به تکتونیک قائم (گسل‌های معکوس و عادی) و چین‌ها واکنش شدیدی نشان می‌دهد (آدمارد، ۱۹۹۹). به‌همین دلیل مطالعه بریدگی رودخانه‌ها و تغییر مسیر آن‌ها، اطلاعات ارزش‌مندی را در مورد عملکرد گسل‌های منطقه در اختیار ما قرار می‌دهد (جکسون و همکاران، ۱۹۹۶؛ بودیاف و همکاران، ۱۹۹۸؛ واکر، ۲۰۰۶؛ رمزی و همکاران، ۲۰۰۸).

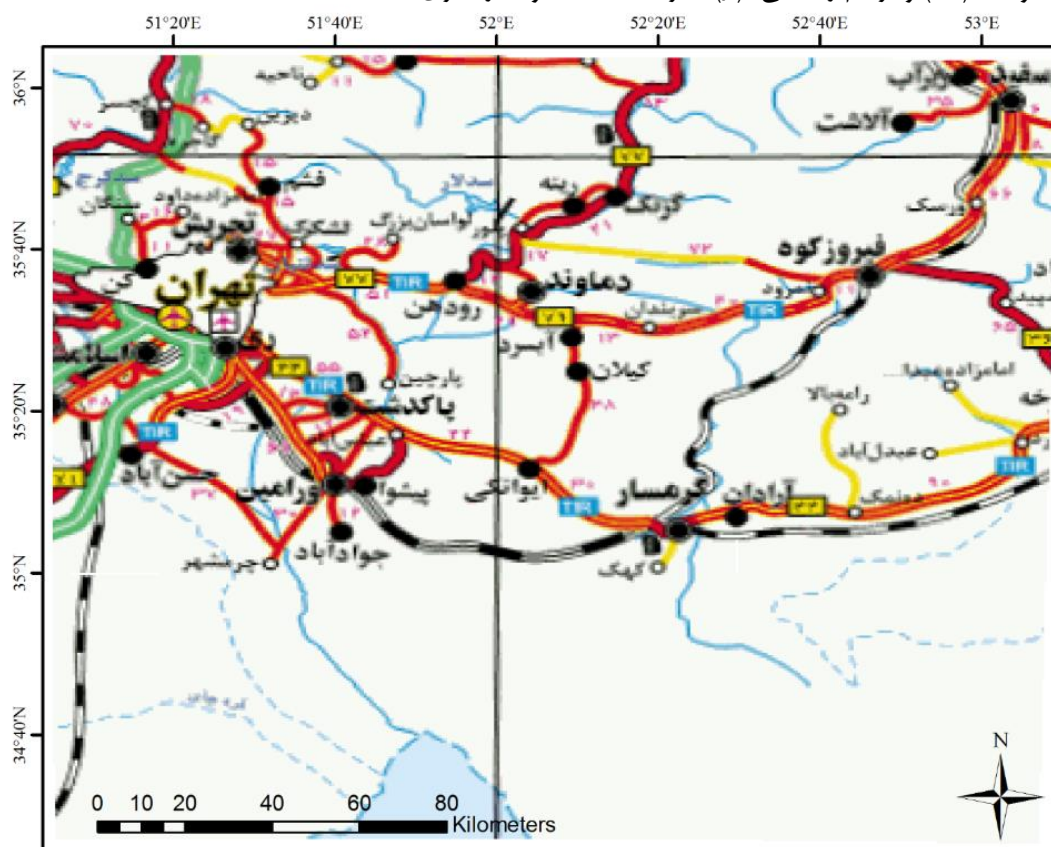


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در محدوده البرز جنوبی

مواد و روش‌ها

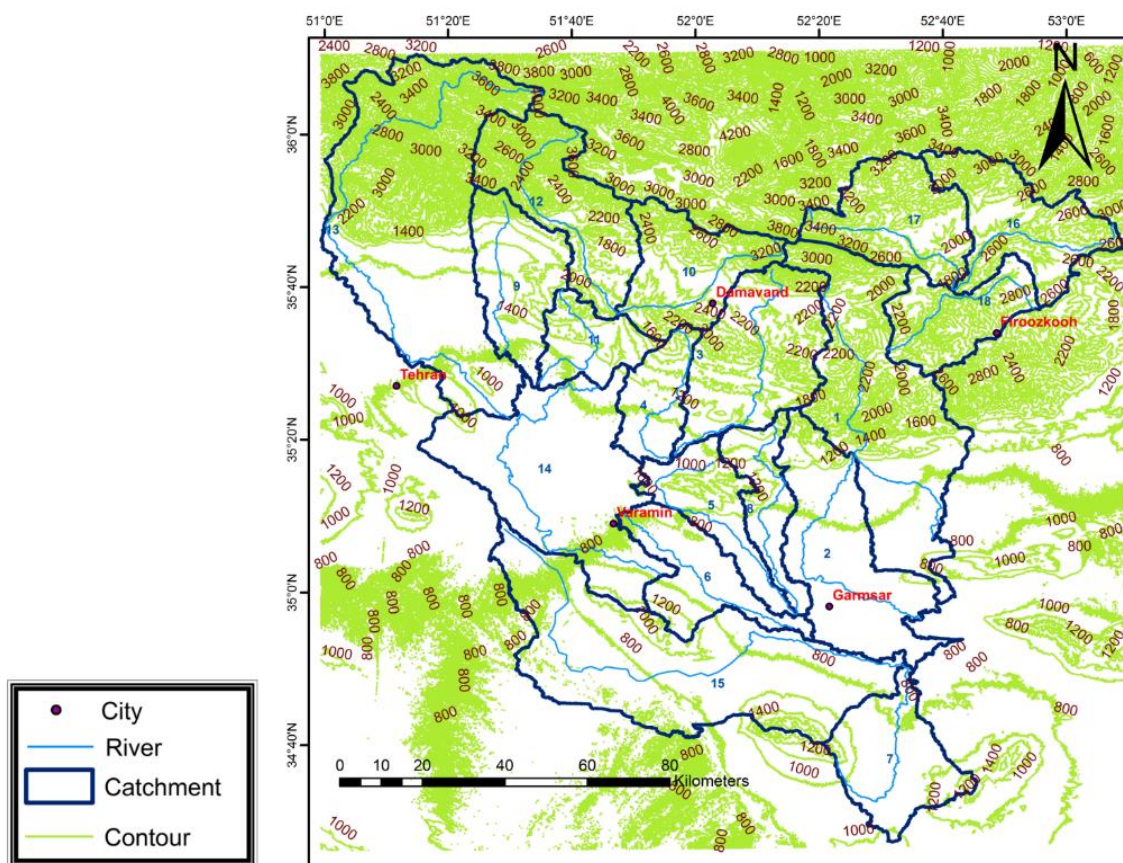
پهنه رسوبی - ساختاری البرز به واسطه حرکت به سمت جنوب صفحه خزر و همگرایی صفحه عربی - اوراسیایی به سمت ایران دچار کوتاه‌شدگی مایل شده است و گسل‌های راندگی و امتداد لغز چپ‌گرد بسیاری در این محدوده تشکیل شده است (آلن و همکاران، ۲۰۰۳). عواملی که در شکل‌گیری البرز نقش داشته است عبارت است از برخورد صفحه ایران با توران و پیدایش گسل‌های امتداد لغز و گسل‌های راندگی. در این بین راندگی‌ها نقش بسیار مهمی در شکل‌گیری البرز دارد و ساختارهای دوپلکس و گرده‌ای مرکب و حاصل از دو نسل راندگی را به وجود آورده است (علوی، ۱۹۹۱). منطقه مورد مطالعه در کوه‌های البرز، بین استان‌های تهران و سمنان واقع شده است. از شهرهای مهم موجود در این منطقه می‌توان به تهران، دماوند، ورامین، گرمسار، فیروزکوه، قم و ری اشاره کرد. برای دسترسی به منطقه مورد مطالعه باید از مسیرهای بین مناطق مذکور استفاده کرد (شکل ۲).

به منظور انجام این پژوهش، با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه که شامل نقشه‌های تهران، سمنان، کوه‌گرد، ورامین، گرمسار، آران، دماوند و آمل است، در محیط نرم‌افزار GIS، تمامی گسل‌ها و چین‌های منطقه رسم شده است. به منظور استفاده از داده‌های رودخانه‌ای، با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) ۳۰ متر، رودخانه‌ها و حوضه‌های زهکشی استخراج شد (شکل ۳). پس از ایجاد حوضه‌های زهکشی منطقه، شاخص‌های مورد نظر شامل شاخص آنومالی سلسله‌مراتبی^۱ (Ha)، انشعابات^۲ (Bi)، هیپسومتری^۳ (Hy)، برجستگی حوضه^۴ (Bh)، شکل حوضه^۵ (Bs) و تراکم زهکشی^۶ (p) به ترتیب محاسبه و اندازه‌گیری شد.



شکل ۲. مسیرهای دسترسی به منطقه مورد مطالعه

1. Hierarchical index
2. Bifurcation index
3. Hypsometry
4. Relative relief
5. Basin shape
6. Drainage density



شکل ۳. نقشه پراکنده‌گی حوضه‌های مورد مطالعه

یافته‌های پژوهش

شاخص آنومالی سلسله‌مراتبی (H_A)

این شاخص بر اساس تعداد انشعاباتی محاسبه می‌شود که از یک رده به انشعابات دو یا چند رده بالاتر از خود می‌پیوندد. این شاخص نشانگر خوبی بر فعالیت تکتونیکی منطقه و مقادیر بالای آن نشان‌دهنده فعالیت بالای تکتونیکی در حوضه زهکشی است. این شاخص به روش زیر محاسبه می‌شود (سیکاسی و همکاران، ۱۹۸۶).

$$Ha_{i \rightarrow j} = 2^{(j-2)} - 2^{(i-1)}$$

$$Ha_t = \sum (Ha_{i \rightarrow j} * N_{s_{i \rightarrow j}})$$

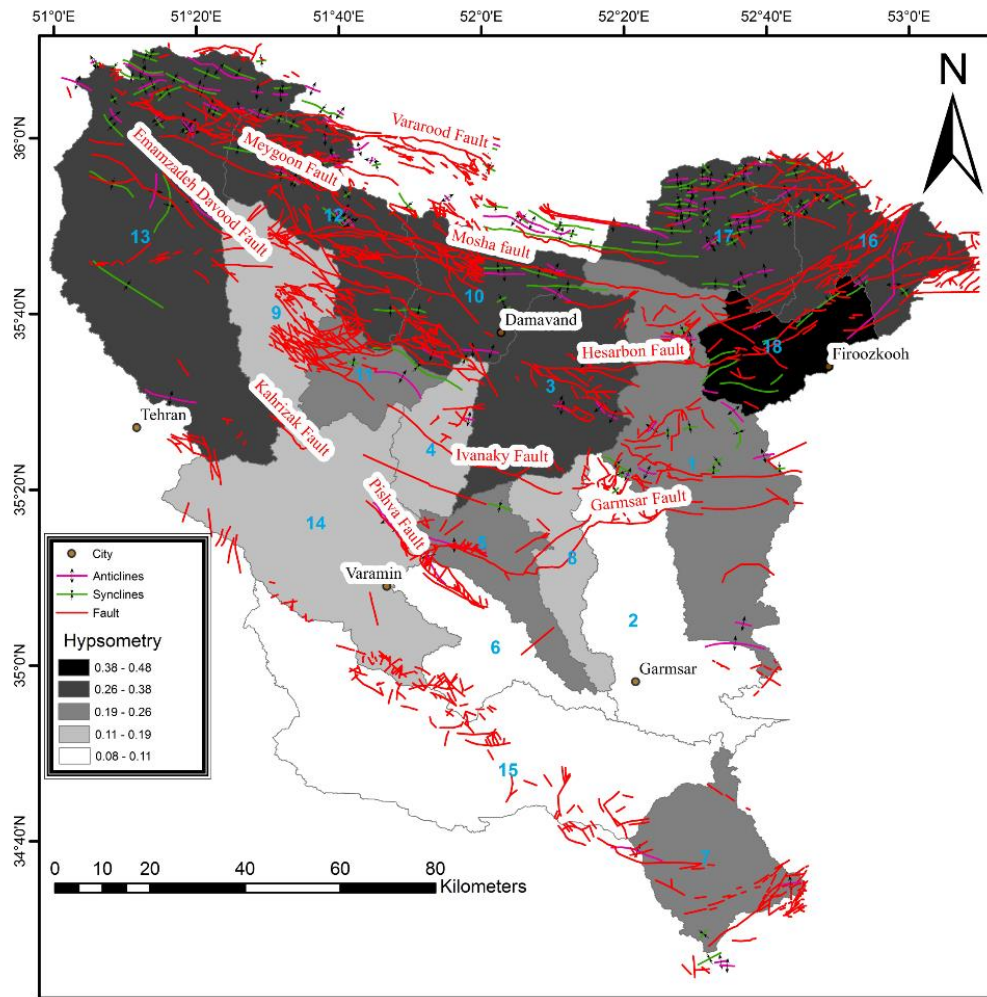
در این فرمول زرده رودخانه بالاتر، i رده رودخانه پایین‌تر و N_s رودخانه‌هایی است که به رودخانه‌های رده بالاتر وارد می‌شود.

بیشترین مقادیر این شاخص مربوط به حوضه‌های ۶ با مقدار ۴/۶۹ در نتیجه فعالیت اخیر گسل پیشوا، حوضه ۱۸ با مقدار ۴/۶۶ به علت عملکرد فعال گسل‌های محدوده فیروزکوه و دامنه خاوری البرز و حوضه ۲ با مقدار ۴/۵۸ ناشی از فعالیت گسل گرمسار است (شکل ۴، جدول ۱).

شاخص انشعابات (B_i)

در شاخص انشعابات (B_i)، رودخانه‌هایی محاسبه شده است که مستقیماً به رودخانه‌های یک رده بالاتر از خود می‌پیوندد. شاخص انشعابات (R_b) به روش زیر محاسبه می‌شود (هورتون، ۱۹۴۵).

$$R_b = 1/N-1 \{ \sum (N_u / N_u + 1) \}$$



شکل ۴. نقشه پراکندگی مقادیر شاخص آنومالی سلسله‌مراتبی در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص‌های مورفومتری در حوضه‌های موجود در منطقه

Hi	Bi	Hy	Bh (m)	Bs	Dd	شماره حوضه
۳.۵۵	۱.۱	-۰.۲۵	۳۳۱۴	۲.۳۶	۱.۲۴	۱
۴.۵۸	۱.۵۴	-۰.۰۸	۱۵۰۰	۲.۱۸	۴.۲۷	۲
۱.۴۹	-۰.۷۹	-۰.۳۱	۲۹۳۰	۲.۰۳	۱.۲۶	۳
-۰.۸۳	-۰.۴۵	-۰.۱۹	۱۷۴۰	۲.۸۵	۱.۳۷	۴
۳.۰۱	-۰.۹۷	-۰.۲۳	۶۸۳	۲.۲۸	۱.۳۳	۵
۴.۶۹	-۰.۷۵	-۰.۱۱	۵۸۹	۲.۱۲	۱.۳۲	۶
۱.۱	-۰.۸۵	-۰.۲۲	۸۶۶	۱.۶۶	۱.۴۳	۷
۲.۲۵	۱.۱۲	-۰.۱۵	۱۲۹۴	۴.۹۷	۱.۳۸	۸
۱.۴۴	-۰.۸۲	-۰.۱۷	۳۰۲۴	۱.۷۹	۱.۳۸	۹
۱.۳۶	-۰.۷۲	-۰.۳۲	۲۸۲۱	۱.۶	۱.۱۴	۱۰
۴.۵	-۰.۹۵	-۰.۲۶	۱۳۸۵	۱.۳۴	۱.۳۹	۱۱
۲.۵۸	۱.۱	-۰.۳۵	۳۰۷۵	۲.۴	۱.۰۷	۱۲
۱.۲۲	-۰.۹۲	-۰.۳	۳۴۷۱	۴۰.۴۶	-۰.۸۵	۱۳
۳.۵۷	۱.۵	-۰.۱۷	۷۰۲	۱.۹۷	۱.۳۳	۱۴
۱.۳۴	۱.۰۵	-۰.۱۱	۱۱۸۸	۴.۶۲	۱.۳۹	۱۵
۱.۳۷	-۰.۹۱	-۰.۳۷	۲۰۷۲	۱.۷۹	۱.۱۸	۱۶
۱.۵	-۰.۷۶	-۰.۳۷	۲۳۴۱	۱.۹۴	۱.۱۶	۱۷
۴.۶۶	-۰.۳۸	-۰.۳۸	۱۷۸۰	۲.۰۳	۱.۱۴	۱۸

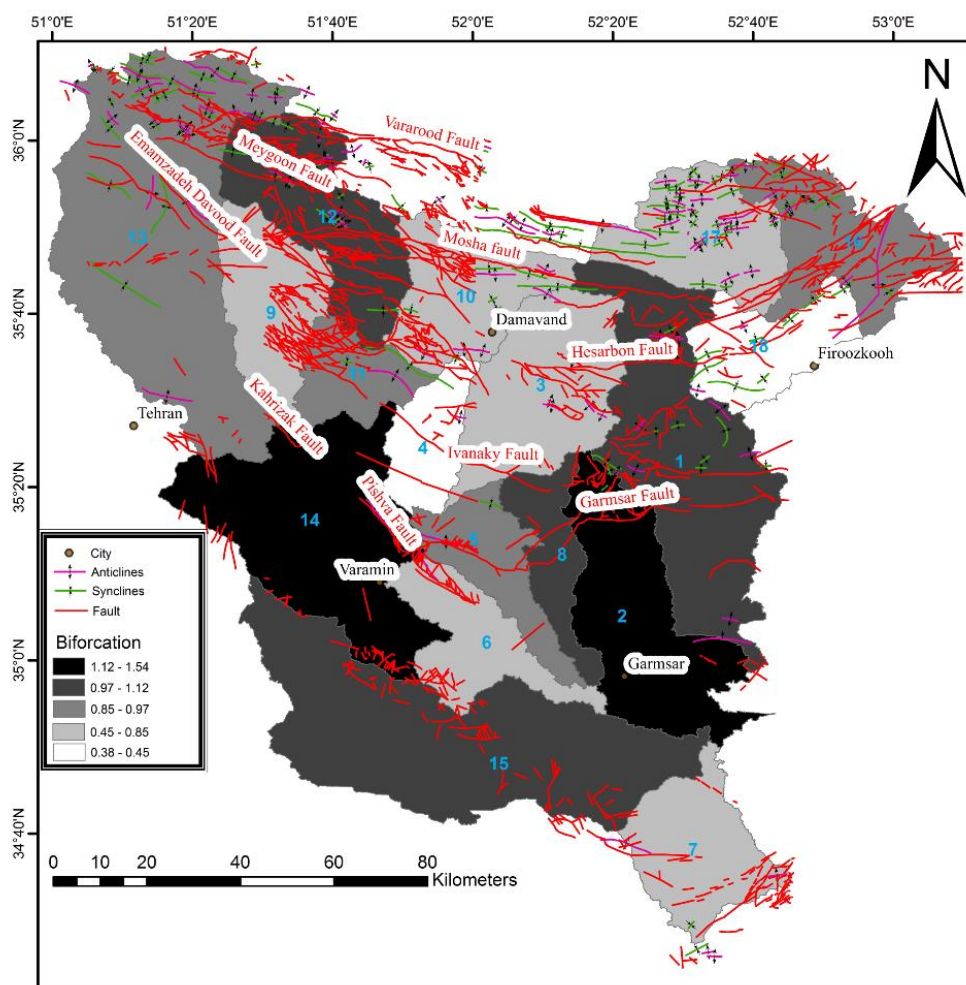
در این فرمول، N تعداد کل رده‌ها، N_u تعداد رودخانه‌های یک رده و (N_u+1) تعداد رودخانه‌های رده بالاتر است. سپس، نسبت مستقیم انشعابات به روش زیر محاسبه می‌شود (هورتون، ۱۹۴۵).

$$R_{bd} = 1/N-1 \{ \sum (N_{u \rightarrow u+1} / N_{u+1}) \}$$

در انتها برای محاسبه شاخص انشعابات، اختلاف بین نسبت انشعابات با نسبت مستقیم انشعابات محاسبه می‌شود.

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

مقادیر بالای شاخص انشعابات در کنار شاخص آنومالی سلسله‌مراتبی نشان‌دهنده فعالیت بالای تکتونیکی در منطقه مورد مطالعه است. این شاخص در حوضه ۲ با مقدار ۱/۵۴، در حوضه ۱۴ با مقدار ۱/۵ که مربوط به عملکرد فعال گسل پیشوا در آن حوضه است و در حوضه ۸ با مقدار ۱/۱۲ که در ارتباط با فعالیت کنونی گسل‌های گرمسار و ایوانکی است بالاترین مقدار را نشان داده است (شکل ۵، جدول ۱).



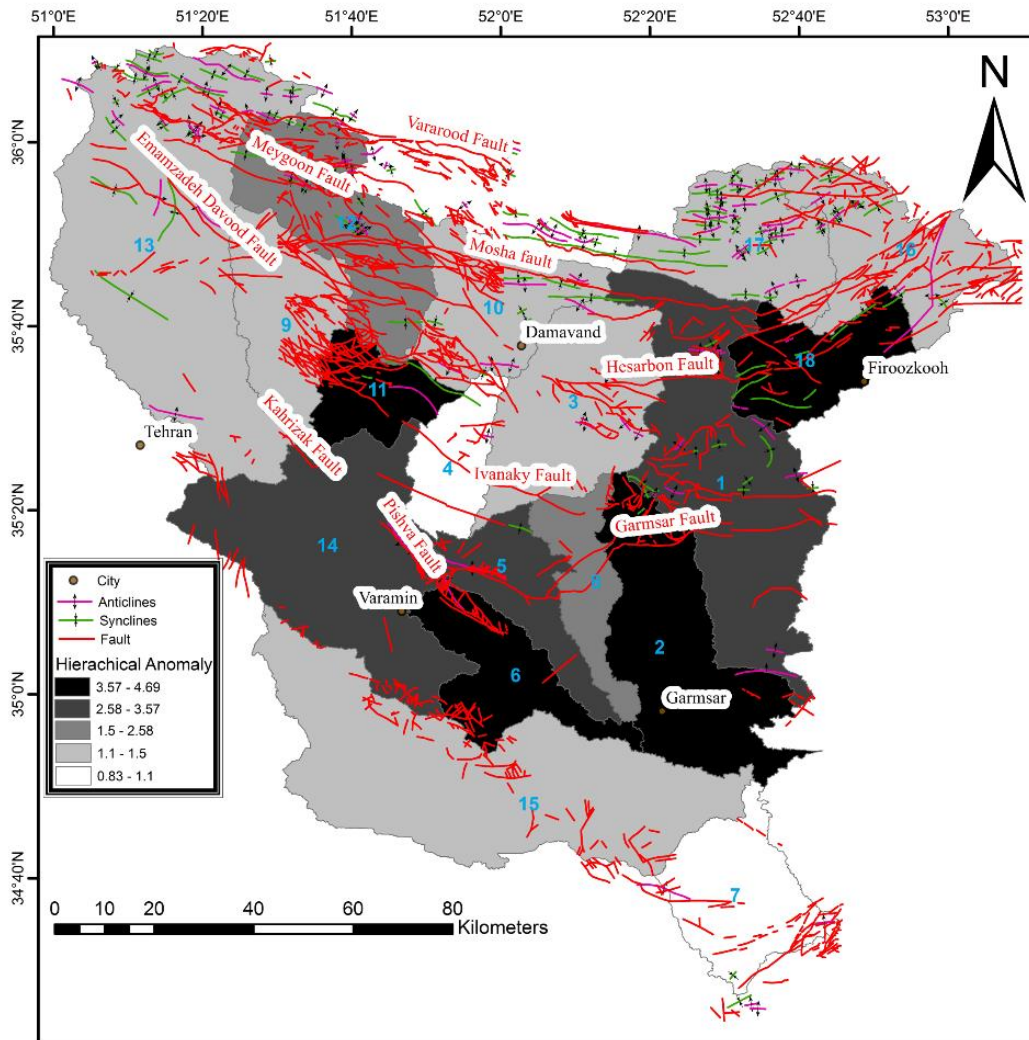
شکل ۵. نقشه پراکندگی مقادیر شاخص انشعابات حوضه در منطقه مورد مطالعه

انتگرال و منحنی هیپسومتری (Hi)

توزیع سطوح ارتفاعی منطقه‌ای از زمین، حوضه‌ای آبخیز تا تمام سطح سیاره زمین را ارزیابی و توصیف می‌کند. منحنی هیپسومتری حوضه با ترسیم ارتفاع کل (ارتفاع نسبی) در مقابل مساحت کل (مساحت نسبی) حوضه ترسیم می‌شود. در این منحنی ۱ بیشترین مقدار و ۰ کمترین مقدار را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه آن به صورت زیر است (کلر و پینتر، ۲۰۰۲).

(Average elevation – Min. elevation) / (Max. elevation – Min. elevation)

این شاخص در سه حوضه ۱۸ و ۱۷ و ۱۶ تحت تأثیر گسل‌های محدوده فیروزکوه و البرز خاوری به ترتیب مقادیر ۰/۳۸، ۰/۳۷ و بیشترین مقدار را داراست (شکل ۶، جدول ۱).



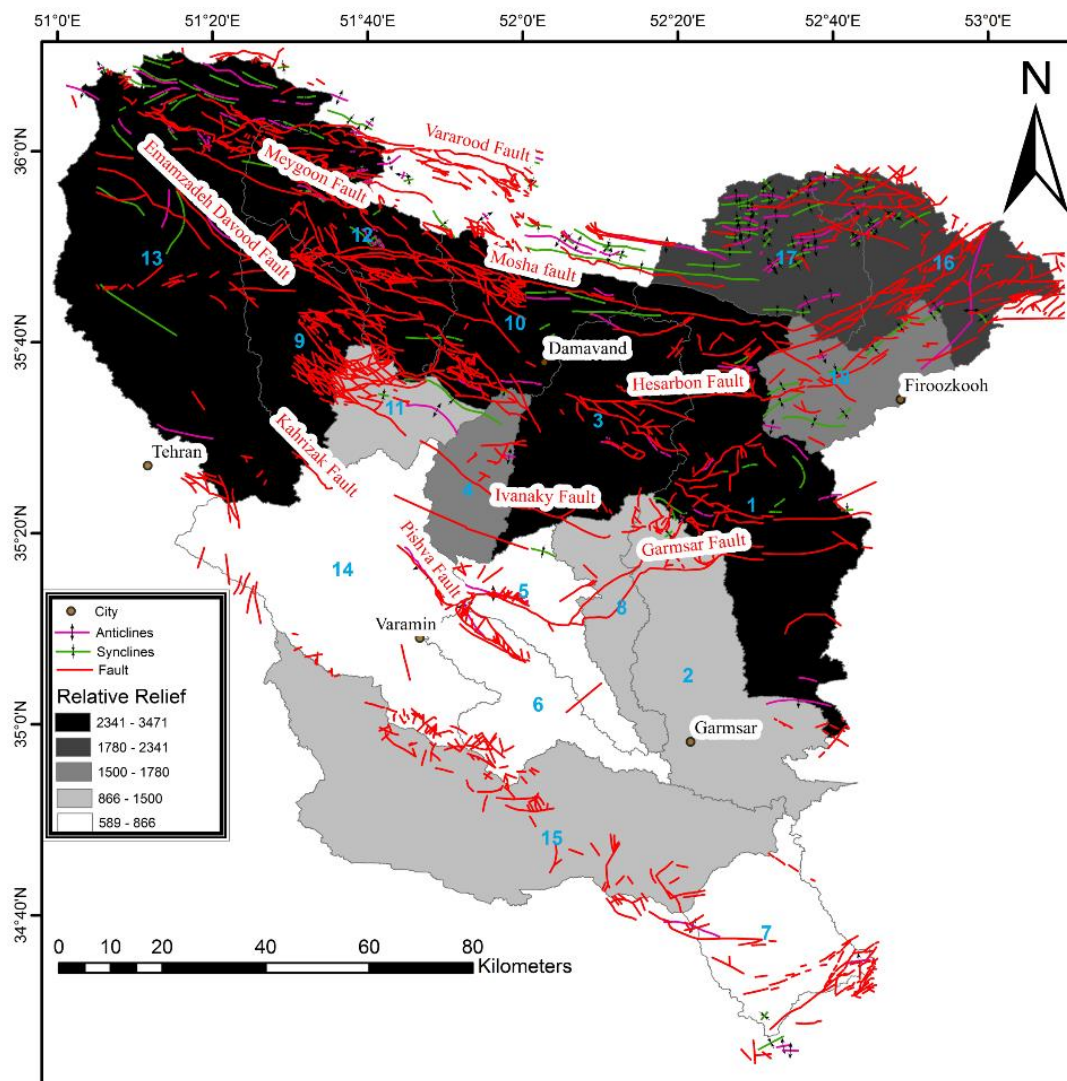
شکل ۶. نقشه پراکنده‌گی مقادیر هیپسومتری در منطقه مورد مطالعه

برجستگی نسبی (Bh)

برجستگی نسبی از اختلاف بین بیشترین و کمترین ارتفاعات حوضه به دست می‌آید. این شاخص از طریق فرمول زیر محاسبه می‌شود (کلر و پیتر، ۲۰۰۲).

$$Bh = H_{max} - H_{min}$$

در این فرمول مقدار ارتفاع بیشینه و H_{min} مقدار ارتفاع کمینه حوضه است. این شاخص در حوضه ۱۳ با مقدار ۳۴۷۱ متر در محدوده مرکزی البرز و تحت تأثیر فعالیت گسل امامزاده داوود، در حوضه ۱ با مقدار ۳۳۱۴ تحت تأثیر فعالیت چهارگسل مشا، پاقلعه، گرمسار و حصاربن و در حوضه ۱۲ با مقدار ۳۰۷۵ در ناحیه البرز مرکزی و تحت تأثیر دو گسل مهم مشا و امامزاده داوود بیشترین مقدار را نشان می‌دهد (شکل ۷، جدول ۱).



شکل ۷. نقشه پراکندگی مقادیر برجستگی نسبی حوضه در منطقه مورد مطالعه

شاخص تراکم حوضه زهکشی (ρ)

تراکم حوضه زهکشی از نسبت طول آبراهه به مساحت حوضه حاصل می‌شود. در مناطق با فعالیت تکتونیکی بالا، این شاخص مقادیر بالاتر را نشان می‌دهد و به روش زیر محاسبه می‌شود (هورتون، ۱۹۴۵).

$$\rho = L_{II} / A$$

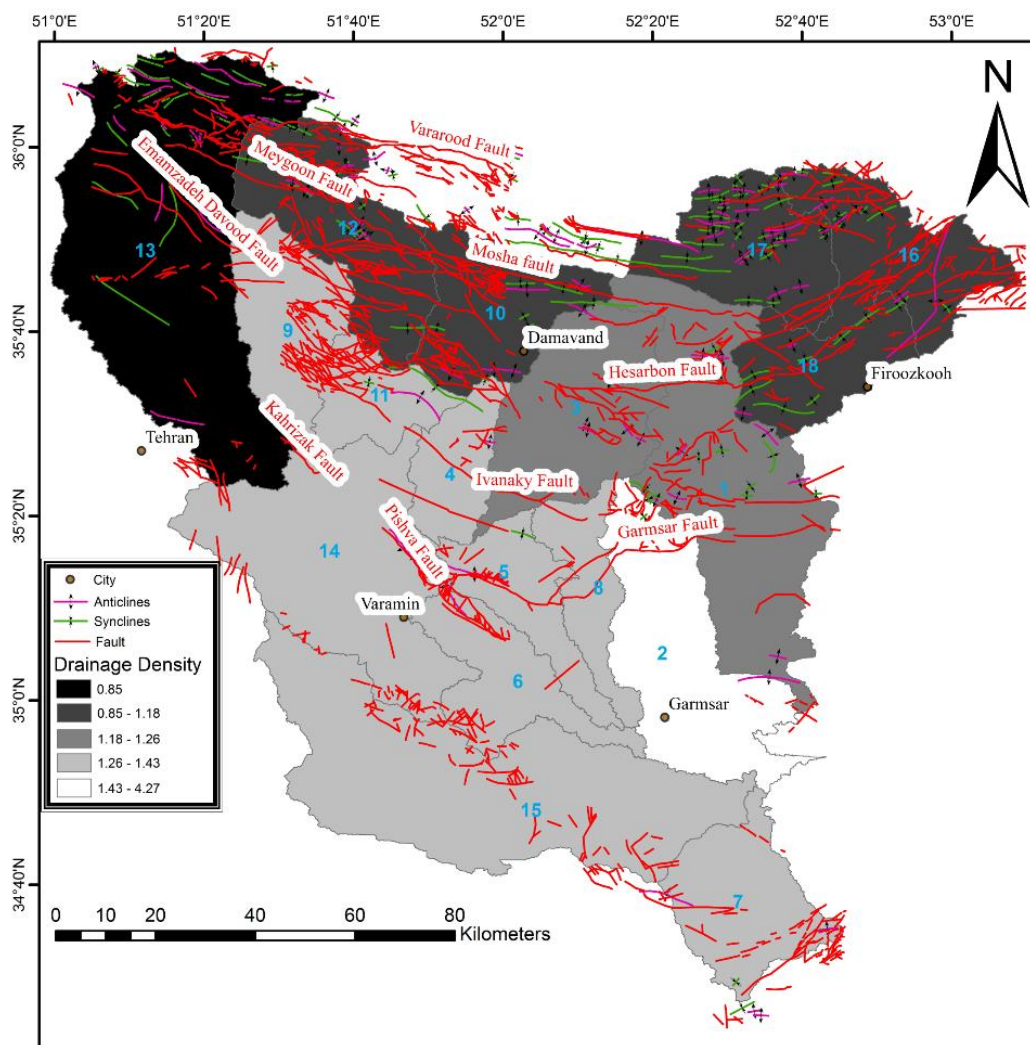
در این فرمول، L_{II} طول آبراهه و A مساحت حوضه مورد مطالعه است.

بیشترین مقدار این شاخص در حوضه ۱۳ با مقدار ۰/۸۵ ناشی از فعالیت گسل امامزاده داوود، در حوضه ۱۲ با مقدار ۱/۰۶ تحت تأثیر فعالیت گسل‌های مشا و امامزاده داوود و در حوضه ۱ با مقدار ۱/۱۲ تحت تأثیر فعالیت چهار گسل مهم مشا، حصاربن، پاقعه و گرمسار به ثبت رسیده است (شکل ۸، جدول ۱).

شاخص نسبت شکل حوضه زهکشی (Bs)

فعالیت‌های تکتونیکی تأثیر زیادی بر شکل حوضه دارد. از نظر زمین‌ساخت فعال، شکل این حوضه‌ها اهمیت دارد. این شاخص به روش زیر محاسبه می‌شود (کنون، ۱۹۷۶؛ رمیرز-هریرا، ۱۹۹۸).

$$Bs = Bl / Bw$$

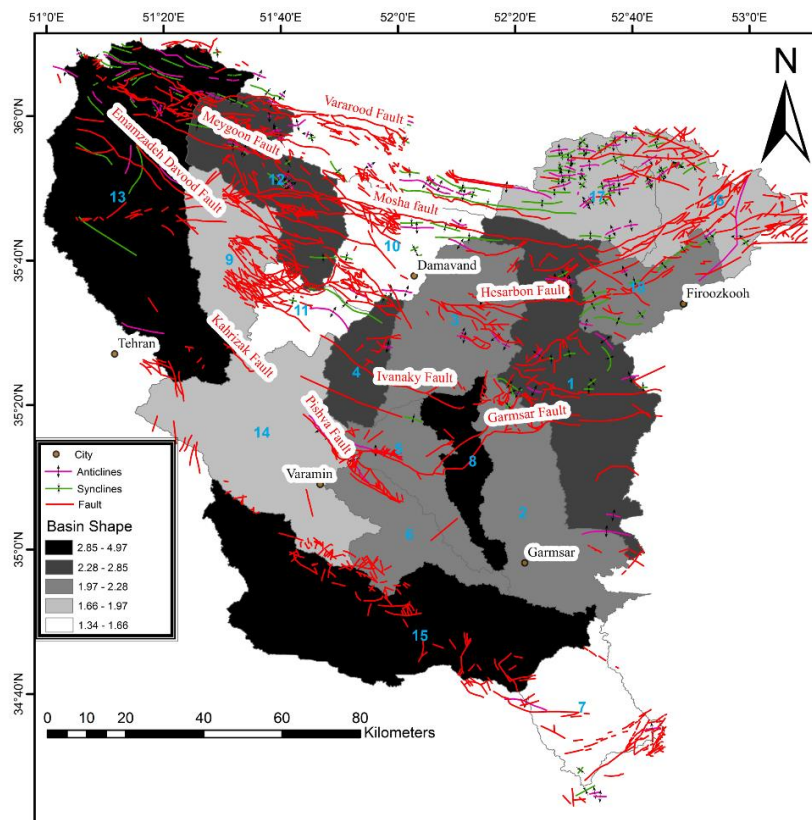


شکل ۸. نقشه پراکندگی مقادیر تراکم حوضه زهکشی در منطقه مورد مطالعه

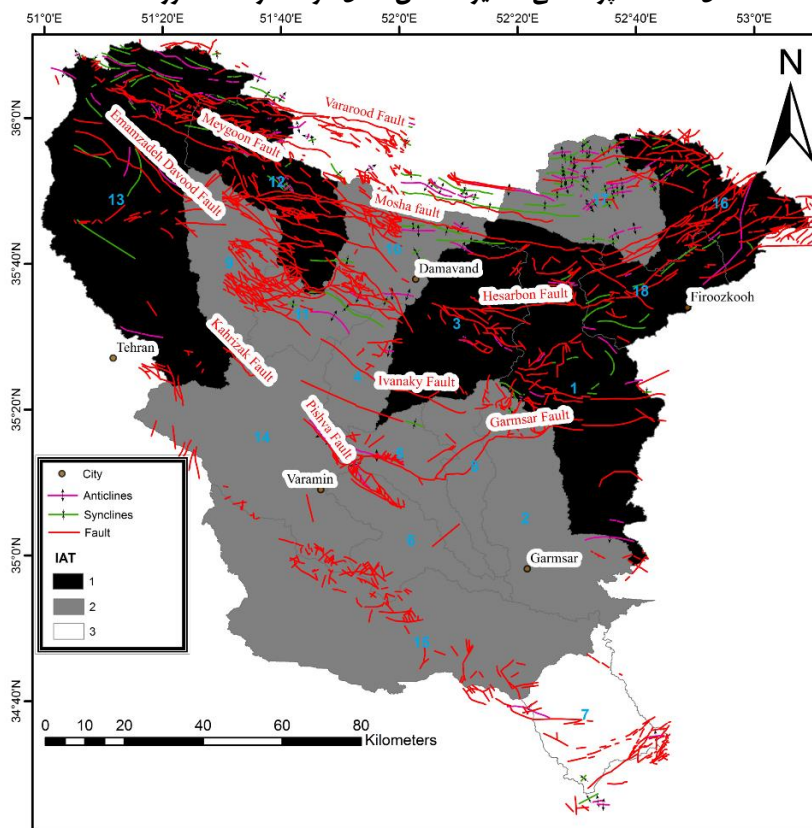
در این فرمول، B1 طول مسیر آبراهه اصلی از نقطه خروج تا دورترین نقطه روی خط تقسیم آب و Bw عرض حوضه است که در عریض‌ترین بخش آن عمود بر طول حوضه اندازه‌گیری می‌شود. بیشترین مقدار این شاخص در حوضه ۸ با مقدار ۴/۹۷ تحت فعالیت تکتونیکی گسل گرمسار، در حوضه ۱۵ با مقدار ۴/۶۲ و در حوضه ۱۳ با مقدار ۴/۴۶ در ناحیه مرکزی البرز واقع شده و تحت فعالیت تکتونیکی گسل امامزاده داوود است (شکل ۹، جدول ۱).

ارزیابی کلی منطقه

با توجه به نقشه پهنه‌بندی فعالیت تکتونیکی منطقه بر اساس شاخص‌های به‌دست‌آمده، تمامی حوضه‌های منطقه به سه دسته فعالیت بالا (رده ۱)، فعالیت متوسط (رده ۲) و فعالیت کم (رده ۳) تقسیم شده است (شکل ۱۰). بر این اساس، در حوضه‌های موجود در نیمه شمالی، شمال‌خاوری و خاوری منطقه (حوضه‌های ۱، ۳، ۱۲، ۱۳، ۱۶، ۱۸) و منطبق بر گسل‌های مهم و فعال - یعنی گسل‌های مشا، امامزاده‌داوود، فیروزکوه، ایوانکی، حصاربن و گرمسار - نرخ فعالیت تکتونیکی بالا و در بقیه حوضه‌های منطقه، به استثنای حوضه ۷، علی‌رغم اینکه برخی در نواحی کم‌ارتفاع دشت واقع است، میزان فعالیت تکتونیکی متوسط است. حوضه‌های موجود در نواحی کم‌ارتفاع دشت با توجه به قرارگیری روی گسل‌های این ناحیه - مثل گرمسار، پیشوا، ایوانکی و حصاربن - و با توجه به فعال بودن این گسل‌ها (داده‌های جدول ۱ و مشاهدات صحرائی) میزان فعالیت متوسطی نشان می‌دهد و در برخی شاخص‌ها تأثیر بالا و در برخی دیگر با توجه به تأثیر کمتر، نرخ فعالیت میزان متوسط (رده ۲) را به ثبت رسانده است.



شکل ۹. نقشه پراکندگی مقادیر شاخص شکل حوضه در منطقه مورد مطالعه

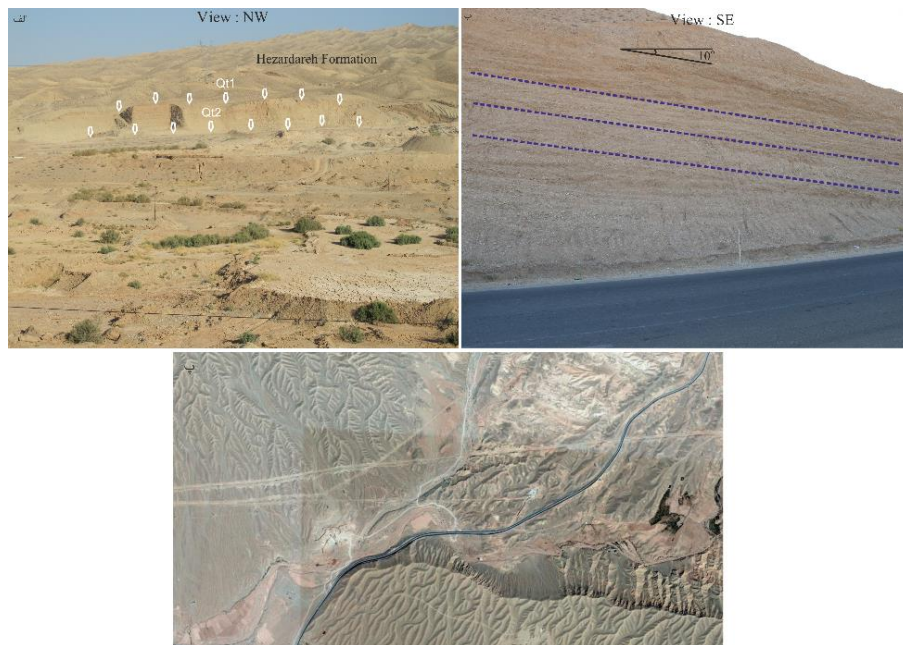


شکل ۱۰. نقشه پهنه‌بندی حوضه‌های منطقه

مشاهدات زمین‌ریختی

مشاهدات صحرایی در منطقه مورد مطالعه تأییدی بر نتایج شاخص‌های مورفومتری بوده است. حوضه‌های واقع بر روی گسل ایوانکی (حوضه‌های ۳، ۴ و ۸) نشان می‌دهد که این حوضه در تمام طول خود فعال است. مقادیر بالای شاخص‌های اندازه‌گیری شده روی این گسل (جدول ۱) گواه این ادعاست. مشاهدات انجام‌شده شامل دو نسل تراس آبرفتی (شکل ۱۱ الف) و کج‌شدگی رسوبات جوان مخروط‌افکنه‌ای است که به علت عملکرد فعال این گسل است (شکل ۱۱ ب). این پهنه به خوبی از روی تصاویر هوایی قابل مشاهده است (شکل ۱۱ پ).

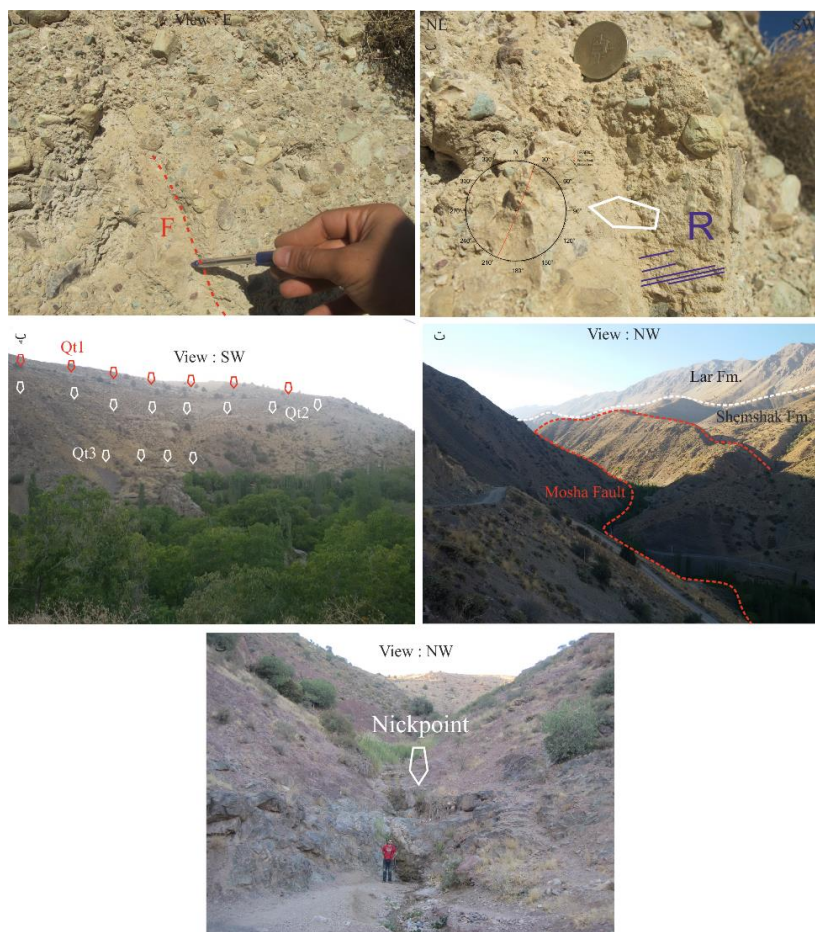
در پهنه گسلی مشا شواهد ریخت‌زمین‌ساختی بسیار مهمی مشاهده شده است. بر اثر فعالیت این گسل، گسل‌های فرعی مختلفی در منطقه تشکیل شده است (شکل ۱۲ الف و ب). در این پهنه سه نسل پادگانه آبرفتی مشاهده شد که نشان‌دهنده بالآمدگی در دوره‌های مختلف ناشی از فعالیت شدید تکتونیک در آن منطقه است (شکل ۱۲ پ). همچنین، بر اثر فعالیت گسل‌های مشا و امامزاده داوود، دره‌های ۷ شکل و رودشکن‌های متعددی به وجود آمده است و از جمله شواهد ریخت‌زمین‌ساختی مهم در منطقه است (شکل ۱۲ ت و شکل ۱۲ ث).



شکل ۱۱. شواهد مورفوتکتونیک پهنه گسلی ایوانکی. الف) پادگانه‌های آبرفتی ایجادشده بر اثر فعالیت گسل ایوانکی، ب) مخروط‌افکنه شیب‌دارشده بر اثر فعالیت گسل ایوانکی، پ) تصویر هوایی منطقه

بحث و نتیجه‌گیری

۱. مقادیر شاخص‌های مورفومتری به همراه مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که فعالیت تکتونیک در نیمه شمالی منطقه مورد مطالعه بالاست. این مناطق فعال منطبق بر فراخاست البرز و ناحیه فیروزکوه است. در مشاهدات صحرایی، وجود رودشکن‌های^۱ متعدد، کج‌شدگی و شیب‌دارشدن واحدهای کواترنری و وجود چند نسل پادگانه آبرفتی در حوضه‌های مختلف را نشان می‌دهد. اکثر گسل‌های منطقه فعال است و لندفرم‌های مختلفی را به وجود آورده است.



شکل ۱۲. شواهد مورفوتکتونیک مشاهده شده در پهنه گسلی مشا. الف) گسل فرعی ایجاد شده بر اثر عملکرد گسل مشا، ب) خش لغز برداشت شده بر روی گسل، پ) تراس های ایجاد شده توسط عملکرد گسل مشا، ت) دره شکل ایجاد شده بر اثر فعالیت گسل مشا، ث) رودشکن ایجاد شده بر اثر فعالیت گسل مشا

۲. مقادیر شاخص آنومالی سلسله مراتبی (Ha) در بخش میانی منطقه مورد مطالعه بالاست. دلیل آن ممکن است فعالیت چهار گسل مهم گرمسار، ایوانکی، حصاربن و پیشوا باشد. دومین محدوده ای که فعالیت نسبتاً بالایی را در این شاخص نشان می دهد، بخش شمالی منطقه و دامنه جنوبی البرز مرکزی است. فعالیت گسل های مشا و شمال تهران، این ناحیه را به ناحیه ای فعال از نظر تکتونیک تبدیل کرده است. مقادیر بالای شاخص انشعابات (Bi) در بخش میانی منطقه تحت تأثیر گسل های گرمسار، حصاربن، ایوانکی و پیشواست و بعد از آن به صورت نسبی در قسمت شمالی منطقه مشاهده می شود که در ارتباط با فراخاست البرز و گسل های مهم مشا و شمال تهران است. شاخص هیپسومتری (Hy) که در ارتباط مستقیم با تغییرات ارتفاع است، در بخش های شمالی و شمال خاوری، یعنی بخش جنوبی البرز و فیروزکوه، بالاترین مقادیر خود را نشان می دهد و به خوبی بیان می کند که این نواحی مرتفع و پرتراکم گسلی، فعالیت بسیار بالای تکتونیک دارد. به طور کلی، نقشه پراکندگی مقادیر برجستگی حوضه (Bh) در هجده حوضه مورد مطالعه نشان می دهد که در حوضه های ناحیه شمالی منطقه و تحت تأثیر فرایند فراخاست البرز و در ادامه تشکیل گسل های مهم ناحیه مانند مشا، شمال تهران و امامزاده داوود است. میزان برجستگی حوضه بالاست و نشان می دهد که این محدوده درگیر با فعالیت بالای تکتونیک است. پراکندگی شاخص تراکم حوضه زهکشی (ρ) در کل منطقه نشان می دهد که در قسمت مرکزی منطقه و تحت تأثیر فعالیت گسل های مشا، شمال تهران، گرمسار، پارچین، حصاربن و ایوانکی، این شاخص مقادیر بالایی را نشان داده است و بیان می کند که نیمه شمالی منطقه تحت تأثیر فعالیت بالای تکتونیک گسل های مذکور و سایر گسل های موجود

در این حوضه‌هاست. شاخص شکل حوضه (Bs) نشان می‌دهد که مناطق شمالی، شمال‌خاوری و مرکزی کشیده‌ترین حوضه‌ها و در نتیجه بالاترین میزان فعالیت تکتونیکی را داراست. این گستره منطبق بر گسل‌های اصلی منطقه است و به‌خوبی نشان می‌دهد که حوضه‌های پیرامون این گسل‌ها تحت تأثیر فعالیت آن‌هاست و حالت کشیده پیدا کرده است.

۳. مشاهدات صحرایی در پهنه‌های گسلی موجود در منطقه، نشان داد که در هر ناحیه‌ای که شاخص‌های اندازه‌گیری شده فعالیت بالای تکتونیکی را به ثبت رسانده است، گسل‌های مهم و اساسی منطقه تأثیر بسزایی بر لندفورم‌های منطقه دارد. در پهنه گسلی ایوانکی که یکی از گسل‌های مهم این محدوده است، مشاهده مخروط‌افکنه‌هایی که از حالت افقی خارج شده یا مشاهده چند نسل پادگانه آبرفتی گواهِ از تأثیر این گسل بر شکل‌گیری ریخت‌زمین‌ساخت منطقه است. در پهنه گسلی منطقه مرا مشاهده گسل‌های کواترنری یا فاصله زمانی ایجاد شده بین لایه‌های کواترنری و ائوسن نشان از فعالیت جوان گسل‌های منطقه دارد. در منطقه تحت تأثیر گسل مشا که شاید بتوان گفت مهم‌ترین گسل این ناحیه است، وجود دره‌های گسلی عمیق و ۷ شکل و ناشی از فعالیت این گسل، پادگانه‌های آبرفتی متفاوت، لایه‌های کج شده و در نهایت مهم‌ترین شاهد مورفوتکتونیکی، یعنی وجود رودشکن، همگی فعالیت بالا و البته جوان این گسل را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، برداشت‌ها و مشاهدات صحرایی تطابق بسیار بالایی با داده‌های نرم‌افزاری دارد. شواهد نشان می‌دهد که گسل‌های اصلی این ناحیه مثل مشا، امامزاده داوود، گرمسار و ایوانکی همگی گسل‌های فعال‌اند که یا فعالیت جوان دارند یا پتانسیل بالایی برای فعالیت در دوران اخیر.

۴. از نظر سنگ‌شناسی، منطقه از سازندهای متفاوتی تشکیل شده که از سازند لالون که قدیمی‌ترین است تا رسوبات کواترنری که جوان‌ترین در منطقه است متفاوت است. در نواحی‌ای که با رسوبات کواترنری مواجهیم، مانند آنچه در پهنه ایوانکی مشاهده می‌کنیم، عموماً لندفورم‌های کم‌ارتفاع و ملایم را مشاهده می‌کنیم، مانند پادگانه‌های آبرفتی کم‌ارتفاع یا مخروط‌افکنه‌های کم‌ارتفاع که از حالت افقی خارج شده‌اند، ولی در مناطقی که با لیتولوژی مقاوم روبه‌رویم مانند ناودیس ارنکه و یال شمالی آن که سیل در آن مشاهده شده است، یا در نزدیکی گسل امامزاده داوود که با توف و شیل‌های سازند کرج مواجهیم، لندفورم‌های مرتفع و سخت و خشن بیشتر خودنمایی می‌کند. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که به جز عوامل تکتونیکی، عوامل سنگ‌شناسی نیز تأثیر بسزایی بر شکل‌گیری زمین‌ریخت‌های منطقه داشته است.

منابع

- Alavi, M. (1991). Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geol. Soc. of amer, Bull*, 103: 983-992.
- Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Qorashi, M., Shahrabi, M. (2003). Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *Journal of Structural Geology*, 25: 659-672.
- Audemard, F. (1999). Morpho- structural expression of active thrust fault system on the tropical foothills of Colombia and Venezuela. *Z. Geomorph*, 118: 1-18.
- Boudiaf, A., Ritz, J.F., Philip, H. (1998). Drainage diversion as evidence of propagating active faults: examples of the El Asnam and Thenia faults. *Algeria, Terra Nova-Oxford*, 10: 236-244.
- Burbank, D.W., Anderson, R.S. (2012). *Tectonic geomorphology*. 2nd edition, Wiley Blackwell science, Oxford.
- 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.
- Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E., Pugliese, F. (1986). Indirect Evaluation of Erosion Entity in Drainage Basins through Geomorphic, Climatic and Hydrological Parameters. *International Geomorphology*, 233-248.
- Horton, R.E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull, Geo. Soc. Am*, 56: 275-370.
- Jackson, J., Noris, R., Youngson, J. (1996). The structural evolution of active fault and fold system in central Otago, New Zealand: Evidence revealed by drainage patterns. *Journal of Structural Geology*, 18: 217-234.
- Keller, E.A., Pinter, N. (2002). *Active tectonics: Earthquakes, uplifts and landscape*. Prentice hall earth science series. 2nd edition, Prentice hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- Ramirez-Herrera, M.T. (1998). Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 317-332.
- Ramsey, L.A., Walker, R.T., Jackson, J. (2008). Fold evolution and drainage development in the Zagros Mountains of Fars Province, SE Iran. *Basin Research*, 20: 23-48.
- Schumm, S.A., Dumont, J.F., Holbrook, J.M. (2002). *Active tectonics and alluvial rivers*. Cambridge University Press, Cambridge, 292 p.

- Stocklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: a review. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 52(7): 1229-1258.
- Walker, R.T. (2006.) A remote sensing study of active folding and faulting in southern Kerman province, S.E. Iran, Journal of Structural Geology, 28: 654-668.