

بررسی زمین‌ساخت فعال با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی در البرز مرکزی

شیمابائی - دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه خوارزمی تهران.

مریم ده بزرگی* - استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران.

سعید حکیمی آسیابر - استادیار دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد واحد لاهیجان.

امین حسینی اصل - مربی دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۶/۰۳/۲۸

چکیده

یکی از روش‌های بررسی حرکات زمین‌ساخت فعال، استفاده از اطلاعات ریخت‌زمین‌ساخت است. اندازه‌گیری کمی شاخص‌های ژئومورفولوژی، یک ابزار مهم برای تعیین سطح فعالیت زمین‌ساخت منطقه است. این اندازه‌گیری‌های کمی امکان مقایسه زمین‌ریخت‌های مختلف و محاسبه متغیرها را فراهم و شناسایی نرخ فعالیت زمین‌ساختی یک منطقه را امکان‌پذیر می‌سازد. در این مطالعه، زمین‌ساخت فعال البرز مرکزی در حوضه‌های هراز و نور - نوشهر با اندازه‌گیری شش شاخص ژئومورفولوژی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، انشعابات (R)، انتگرال و منحنی فراسنجی (Hi)، برجستگی نسبی (Bh)، تراکم زهکشی (Dd) و ضریب شکل (Ff) مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۳۰ متر در محیط GIS حوضه‌ها و آبراهه‌های منطقه مورد مطالعه استخراج شد، سپس شاخص‌های ژئومورفولوژی در هر زیرحوضه اندازه‌گیری شد. هر شاخص به سه رده به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی تقسیم شد و در نهایت براساس تقسیم‌بندی هر شاخص، سطح فعالیت زمین‌ساختی کل برمبنای شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) منطقه تعیین شد و گستره مورد بررسی به ۴ رده فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا، بالا، متوسط و کم تقسیم شد، سپس نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت زمین‌ساختی در گستره مورد مطالعه ترسیم شد. نتایج حاصل از شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی نشان می‌دهد که گستره مورد بررسی دارای فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا و بالا است به‌ویژه در مناطق منطبق با گسل‌های شمال البرز، خزر، گلنرود شمالی و جنوبی، بلده و گسل‌های جنوب باختری و چین‌خوردگی‌های جنوب خاوری محدوده مورد بررسی را تایید می‌کند، همچنین شواهد زمین‌ریختی حاصل از مشاهدات صحرائی اثبات‌کننده نتایج حاصل از شش شاخص ژئومورفولوژی در گستره مورد مطالعه است.

واژگان کلیدی: زمین‌ساخت فعال، شاخص ژئومورفولوژی، حوضه زهکشی، البرز مرکزی.

مقدمه

پهنه البرز شامل مجموع صفحه‌های رانده‌ای است که به‌وسیله تغییر شکل حاصل از نیروی فشارشی در زمان سنوزوئیک پایانی به وجود آمده است و از زمان تریاس تا کنون در طول کوهزایی سیمرین و آلپین در حال نمو و گسترش بوده است (علوی^۱، ۱۹۹۶). فعالیت زمین‌ساختی کنونی در پهنه البرز، به دلیل حرکت رو به شمال ایران مرکزی به سمت اوراسیا و حرکت به سمت شمال غرب حوضه خزر جنوبی در رابطه با چرخش چپ‌گرد اوراسیا در این محدوده است. این دو سازوکار باعث ایجاد رژیم ترفشارش با روند شمال-شمال شرق و جنوب-جنوب غرب در البرز شده است و اعتقاد بر این است که این سیستم فشاری از حدود 2 ± 5 میلیون سال قبل شروع شده و کل منطقه البرز را تحت تاثیر قرار داده است (ریتز و همکاران^۲، ۲۰۰۶). گسل‌های فعال متعددی به موازات کوه‌های البرز وجود دارد (آلن و همکاران^۳، ۲۰۰۳) و بررسی این پهنه به لحاظ سطح فعالیت زمین‌ساختی سودمند است. گستره مورد بررسی در البرز مرکزی و شمالی قرار دارد و گسل‌ها و چین‌خوردگی‌های متعددی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در بخش‌هایی از استان مازندران و تهران قرار دارد. شهرهای نور، نوشهر، آمل و بلده در منطقه واقع گردیده است (شکل ۲) و راه‌های ارتباطی منطقه شامل جاده هراز، بلده-هراز و رویان-بلده است. به منظور بررسی زمین‌ساخت فعال در گستره مورد مطالعه از شاخص‌های ریخت‌زمین‌ساختی حوضه آبریز استفاده شده است. فرآیندهای زمین‌ساخت فعال می‌تواند بر شکل و عملکرد رودها تاثیر گذارد (هال‌بورک و شوم^۴، ۱۹۹۹؛ شوم و همکاران^۵، ۲۰۰۲). تعیین نابه‌نجاری‌های حاصل از زمین‌ساخت فعال در رودها با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی بسیار سودمند است و می‌تواند آشکارکننده ساختارهای فعال در منطقه باشد (کلر و پینتر^۶، ۲۰۰۲)، بنابراین بررسی الگوی زهکشی و انحراف رودها، اطلاعات مهمی در مورد گسترش و تکامل ساختاری منطقه فراهم می‌آورد (کلر و همکاران^۷، ۱۹۹۸؛ واکر^۸، ۲۰۰۶).

با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) می‌توان ویژگی‌ها و شاخص‌های رودخانه را سریع و دقیق استخراج و به تحلیل حوضه‌های زهکشی پرداخت (مور و همکاران^۹، ۱۹۹۱؛ متیوس^{۱۰}، ۲۰۰۶). در این بررسی شش شاخص ژئومورفولوژی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، انشعابات (R)، انتگرال و منحنی فراسنجی (Hi)، برجستگی نسبی (Bh)، ضریب شکل (F_f) و تراکم زهکشی (D_d) اندازه‌گیری شد، سپس شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) در گستره مورد مطالعه تعیین شد.

با استفاده از نتایج حاصل، سطح فعالیت زمین‌ساخت نسبی (Iat) در گستره مورد مطالعه، مشخص و بررسی شد و در پایان با مشاهدات صحرایی مستند گردید.

¹ Alavi, 1996

² Ritz et al., 2006

³ Allen et al., 2003

⁴ Holbrook and Schumm, 1999

⁵ Schumm et al., 2002

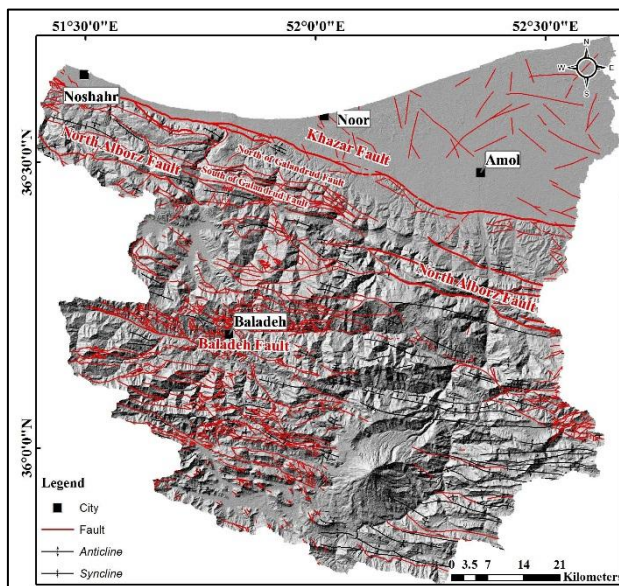
⁶ Keller and pinter, 2002

⁷ Keller et al., 1998

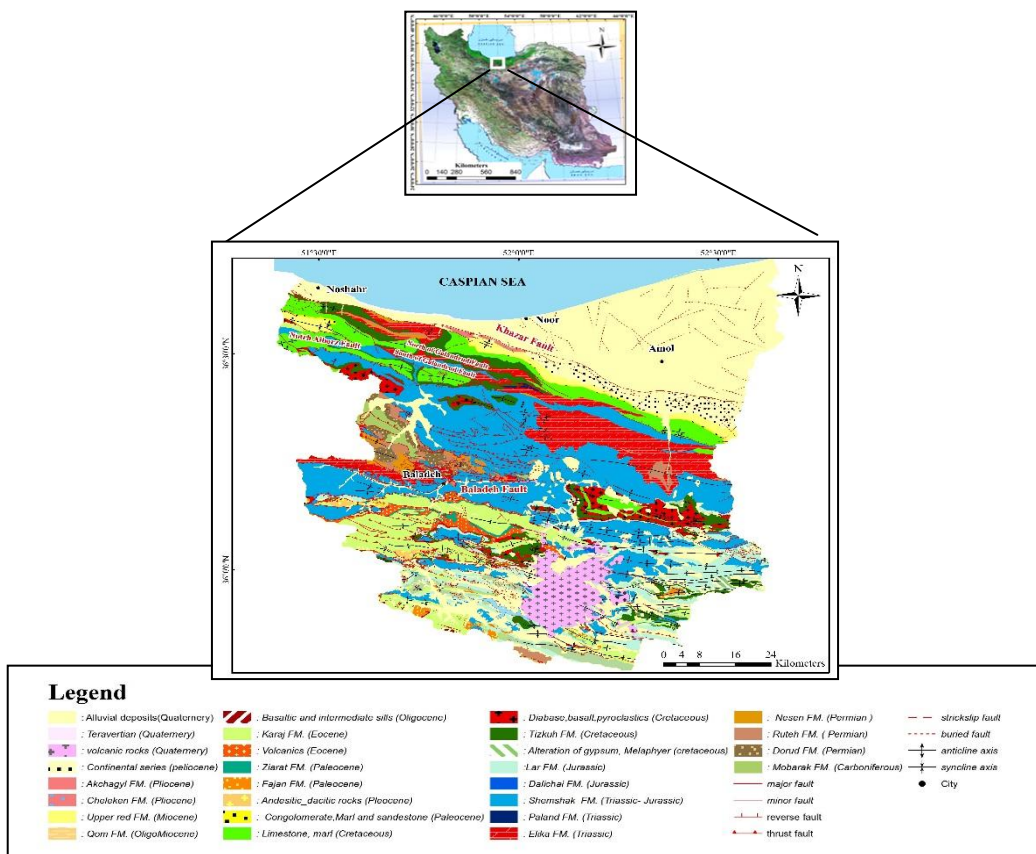
⁸ Walker, 2006

⁹ Moore et al., 1991

¹⁰ Mathuis, 2006



شکل ۱: نقشه ساختاری گستره مورد بررسی.

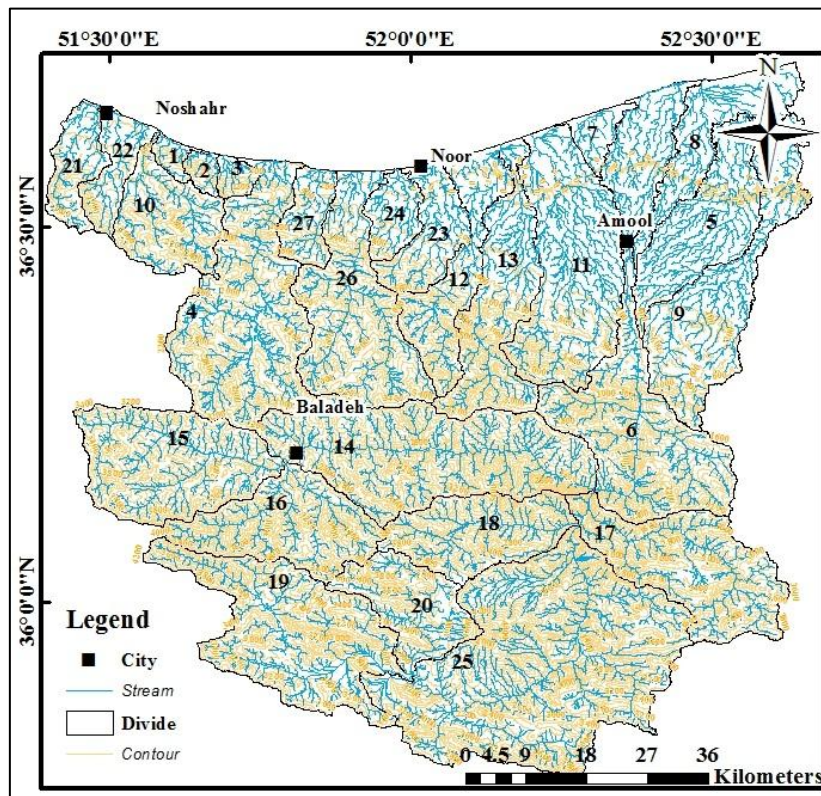


شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی گستره مورد بررسی (برگرفته از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نور، نوشهر، چالوس، قائم‌شهر، آمل، بلده، مرزن‌آباد، البرز مرکزی، دماوند و شرق تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور).

مواد و روش‌ها

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

- ۱- ابتدا حوضه‌های زهکشی و آبراهه‌ها با استفاده از مدل رقمی ارتفاعی (DEM) ۳۰ متر در محیط GIS و با به کارگیری افزونه Arc Hydro استخراج شد و پس از انجام اصلاحات مورد نیاز، ۲۷ حوضه زهکشی تشکیل گردید (شکل ۳). سپس شاخص‌های ژئومورفولوژی در هر حوضه اندازه‌گیری شد (شکل ۴).
- ۲- در مرحله بعد، واحدهای زمین شناسی و ساختارهای اصلی منطقه که شامل گسل‌ها و چین‌ها می‌باشد از نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی کشور در گستره مورد مطالعه تعیین گردید (شکل ۲).
- ۳- و در مرحله آخر، واحدهای زمین شناسی و ساختارهای اصلی منطقه با نتایج حاصل از اندازه‌گیری شاخص‌های ژئومورفولوژی و مشاهدات صحرایی، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



شکل ۳: حوضه‌ها و آبراهه‌های استخراج شده در گستره مورد مطالعه.



شکل ۴: مراحل تهیه حوضه‌ها و آبراهه‌ها به منظور اندازه‌گیری شاخص‌های ژئومورفولوژی.

شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی براساس تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی محاسبه می‌شود (سیکاسی و همکاران^۱، ۱۹۸۶). در یک حوضه زهکشی کوچک‌ترین انشعاب با رده ۱ مشخص می‌شود. در جایی که دو آبراهه رده ۱ به هم می‌پیوندند، یک آبراهه رده ۲ تشکیل می‌شود و در محل اتصال دو آبراهه رده ۲، آبراهه رده ۳ تشکیل می‌شود و این روند تا آخرین رده موجود ادامه می‌یابد. زمانی که یک آبراهه به یک رده بالاتر از خود وارد می‌شود نظم سلسله مراتبی دارد، برای مثال هر آبراهه رده ۱ که به آبراهه رده ۲ وارد شود دارای نظم سلسله مراتبی است (هورتن^۲، ۱۹۴۵). وارد شدن یک رده آبراهه به آبراهه دو یا چند رده بالاتر از خود، ناهنجاری سلسله مراتبی نامیده می‌شود. برای مثال زمانی که آبراهه رده ۱ وارد آبراهه‌های رده ۳، ۴ و بالاتر شود، ناهنجاری سلسله مراتبی دارد. تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی به صورت زیر محاسبه می‌شود (سیکاسی و همکاران^۳، ۱۹۸۶):

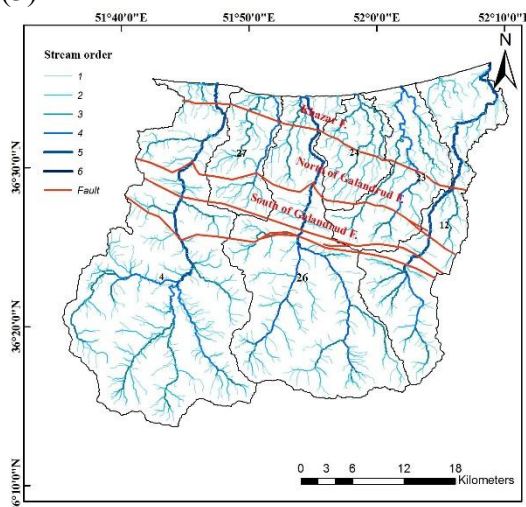
$$Ha_{i \rightarrow j} = 2^{(j-2)} - 2^{(i-1)} \quad (1)$$

در رابطه بالا، (Ha) تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی (i) رده آبراهه پایین‌تر و (j) رده آبراهه بالاتر است. پس از تعیین تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی برای هر رده، تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی کل حوضه محاسبه می‌شود:

$$Ha_t = \sum (Ha_{i \rightarrow j} \times N_{S_{i \rightarrow j}}) \quad (2)$$

در این رابطه $(N_{S_{i \rightarrow j}})$ تعداد کل آبراهه‌هایی است که به آبراهه‌های رده بالاتر از خود وارد شده‌اند. با استفاده از تعداد ناهنجاری سلسله مراتبی کل حوضه، شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی به صورت زیر محاسبه می‌شود (گارنیری و پیروتا^۴، ۲۰۰۸):

$$\Delta a = Ha_t / N_1 \quad (3)$$



شکل ۵: شبکه آبراهه در حوضه‌های ۴، ۱۲، ۲۳، ۲۴، ۲۶ و ۲۷ و افزایش ناهنجاری سلسله مراتبی در محل تلاقی گسل با آبراهه.

در رابطه بالا، (Δa) شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی و (N_1) تعداد کل آبراهه‌های رده ۱ حوضه است. این شاخص به فعالیت زمین‌ساختی بسیار حساس است و هرچه این شاخص دارای میزان بیشتری باشد، نشان‌دهنده تاثیر بیشتر زمین‌ساخت در حوضه زهکشی است (گارنیری و پیروتا، ۲۰۰۸). دامنه تغییرات شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی در گستره مورد مطالعه بین ۰ تا ۷/۸۴ است (جدول ۱). نتایج حاصل از شاخص ژئومورفولوژی فوق در حوضه‌های گستره مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این شاخص ۷/۸۳ در زیرحوضه شماره ۶ است که دوگسل شمال البرز و

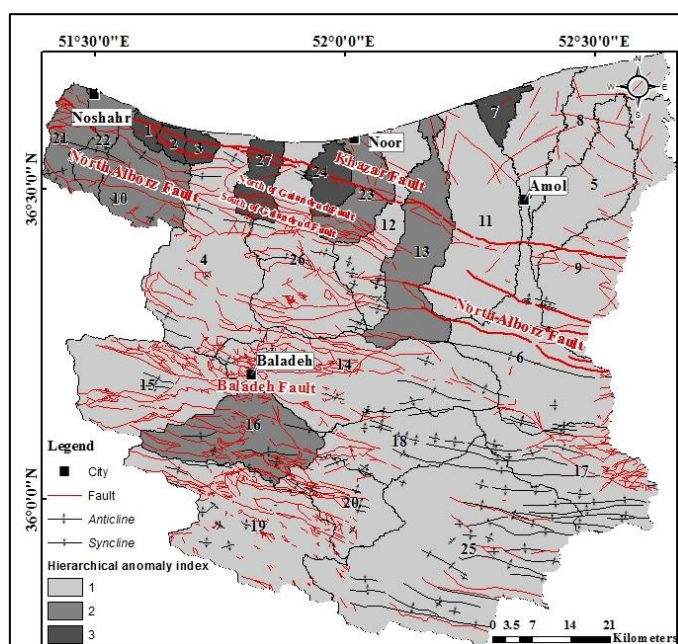
¹ Ciccacci et al., 1986

² Horton, 1945

³ Ciccacci et al., 1986

⁴ Guarnieri and Pirrotta, 2008

خزر در آن قرار دارد، همچنین حوضه هایی با شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی بالادر محل تقاطع رودخانه با گسل های فعالی مانند گلندرد شمالی و جنوبی و خزر دارای ناهنجاری بوده و آبراهه های رده پایین وارد آبراهه های چند رده بالاتر خود شده اند (شکل ۵). این شاخص در سه رده به لحاظ فعالیت زمین ساختی طبقه بندی شد: رده ۱ شامل مقادیر ۱ و بیشتر ($\Delta a \geq 1$) که فعالیت بالای زمین ساختی را نشان می دهد، رده ۲ شامل مقادیر ۱ تا ۰/۵ ($0.5 \leq \Delta a < 1$) که بیان گر فعالیت متوسط زمین ساختی است و رده ۳ شامل مقادیر کم تر از ۰/۵ ($\Delta a < 0.5$) که نشان دهنده حوضه های با فعالیت زمین ساختی کم است (شکل ۶).



شکل ۶: نقشه ی پراکنده ی مقادیر شاخص ناهنجاری سلسله مراتبی در منطقه ی مورد مطالعه.

شاخص انشعابات (R)

شاخص انشعابات، از اختلاف بین نسبت انشعابات و نسبت مستقیم انشعابات محاسبه می شود:

$$R = R_b - R_{db} \quad (4)$$

در رابطه بالا، (R) شاخص انشعابات، (R_b) نسبت انشعابات و (R_{db}) نسبت مستقیم انشعابات است. نسبت انشعابات برای هر رده یک حوضه به صورت زیر به دست می آید:

$$R_{b(u-u+1)} = N_u / N_{u+1} \quad (5)$$

در رابطه بالا، (N_u) تمام انشعابات یک رده و (N_{u+1}) تمام انشعابات یک رده بالاتر است. نسبت انشعابات پایین در حوضه هایی که ساختارهای زمین شناختی، کم تر تغییر کرده اند و الگوی زهکشی به حالت طبیعی است وجود دارد (استراهلر^۱، ۱۹۶۴). نسبت مستقیم انشعابات برای هر رده به صورت زیر محاسبه می شود (آونا و همکاران^۲، ۱۹۶۷):

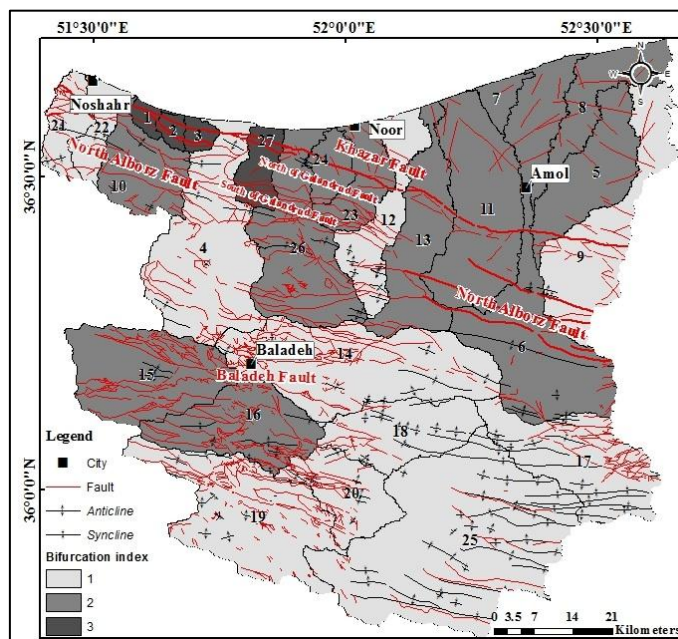
$$R_{db} = N_{du} / N_{u+1} \quad (6)$$

در رابطه بالا، (N_{du}) تعداد انشعابات یک رده که به آبراهه های رده بالاتر خود می ریزند و (N_{u+1}) تعداد انشعابات بالاتر است. این نسبت، ساختمان شبکه آب سطحی را بدون در نظر گرفتن ناهنجاری سلسله مراتبی توصیف می کند،

¹ Strahler, 1964

² Avena et al., 1967

شاخص انشعابات به ناهنجاری سلسله مراتبی وابسته است و اطلاعات مفیدی در مورد نوع فرآیند فرسایشی و درجه تکامل حوضه زهکشی ارائه می‌دهد (گارنیری و پیروتا، ۲۰۰۸). مقدار این شاخص از ۰ تا ۱/۶۶ در ۲۷ حوضه گستره مورد مطالعه است (جدول ۱). بیشترین مقدار این شاخص در حوضه شماره ۱۴ می‌باشد که منطبق با گسل بلده است (شکل ۷).



شکل ۷: نقشه‌ی پراکنده‌ی مقادیر شاخص انشعابات در منطقه‌ی مورد مطالعه.

شاخص انشعابات در سه رده به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی طبقه‌بندی شد: رده ۱ شامل مقادیر ۱ و بیشتر ($R \geq 1$) که فعالیت بالای زمین‌ساختی را نشان می‌دهد، رده ۲ شامل مقادیر ۱ تا ۰/۵ ($0.5 \leq R < 1$) که بیان‌گر فعالیت متوسط زمین‌ساختی است و رده ۳ شامل مقادیر کمتر از ۰/۵ ($R < 0.5$) که نشان‌دهنده حوضه‌هایی با فعالیت زمین‌ساختی کم است (شکل ۷).

انتگرال و منحنی فرازسنجی (Hi)

انتگرال فرازسنجی توصیف‌کننده توزیع نسبی ارتفاع در یک منطقه به ویژه حوضه آبریز است (استراهلر^۲، ۱۹۵۲). این شاخص با استفاده از مساحت سطح زیرین منحنی فرازسنجی مشخص می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (میر^۳، ۱۹۹۰؛ کلر و پینتر^۴، ۲۰۰۲):

$$Hi = (\text{average elevation} - \text{min elevation}) / (\text{max elevation} - \text{min elevation}) \quad (7)$$

منحنی فرازسنجی نشان‌دهنده توزیع مساحت ارتفاع و برجستگی‌ها در یک حوضه زهکشی است و مرحله تکامل یک حوضه زهکشی را مشخص می‌کند. این منحنی از ترسیم مساحت نسبی (a/A) در محور افقی به ارتفاع نسبی (h/H) در محور عمودی حاصل می‌شود. مساحت کلی حوضه (A) و ارتفاع کل (H) در طول خطوط توپوگرافی به سطوح (a) و ارتفاعات (h) تقسیم می‌شود. سطح (a) شامل مساحتی از حوضه است که بالای ارتفاع (h) قرار دارد. باتوجه به بی‌بعد بودن منحنی فرازسنجی، این منحنی‌ها در حوضه‌هایی با اندازه، ارتفاع و مساحت متفاوت جهت مقایسه با یکدیگر استفاده

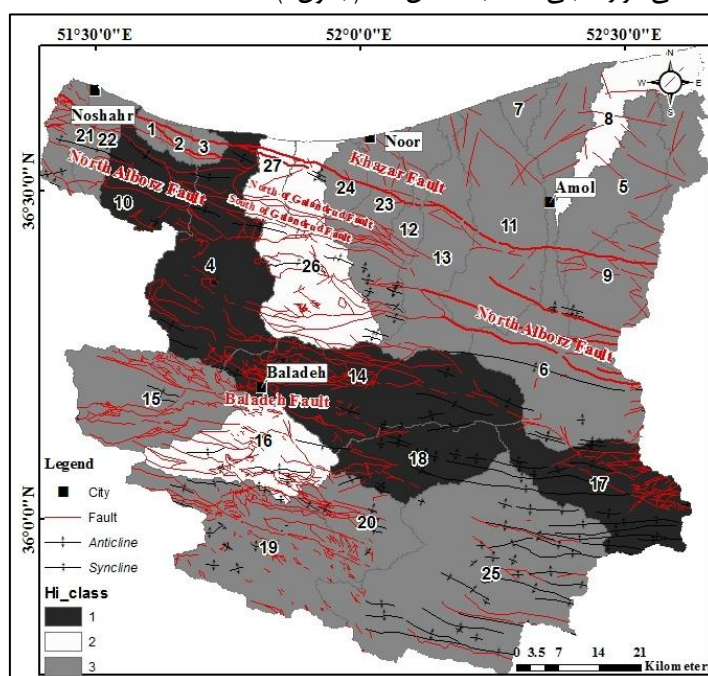
¹ Guarnieri and Pirrotta, 2008

² Strahler, 1952

³ Mayer, 1990

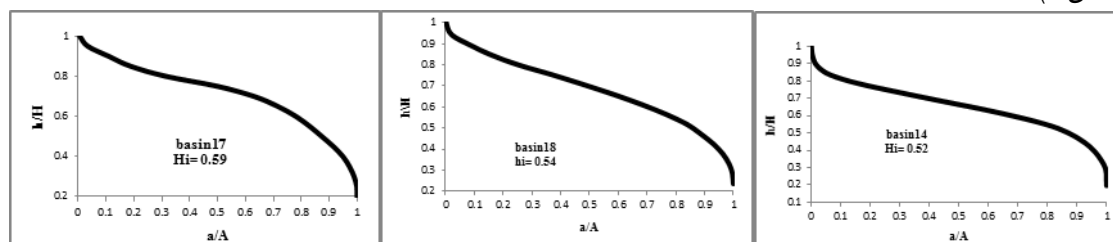
⁴ Keller and Pinter, 2002

شود. انتگرال و منحنی فراسنجی را براساس مقدار انتگرال و میزان تحدب و تقعر منحنی می توان به سه رده از لحاظ فعالیت زمین ساختی تقسیم کرد (حمدونی و همکاران^۱، ۲۰۰۷): رده ۱ شامل منحنی فراسنجی محدب با مقدار انتگرال $0.5 \leq Hi$ و بیشتر 0.5 است و بیان کننده توپوگرافی بالا نسبت به مقدار میانگین آن در حوضه زهکشی است، مانند سطوح بالا آمده و فلات هایی است که توسط رودها بریده شده اند. رده ۲ شامل منحنی فراسنجی محدب-مقعر با مقدار انتگرال فراسنجی $0.4 \leq Hi < 0.5$ تا 0.4 است که حد واسط رده ۱ و ۳ است. رده ۳ شامل منحنی های مقعر با مقدار انتگرال فراسنجی کمتر از 0.4 است، این رده نشان دهنده بریده شدن شبکه زهکشی در یک سطح هموارتر است. با استفاده از ارتفاع میانگین، کمینه و بیشینه به دست آمده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۳۰ متر برای هر زیرحوضه در گستره مورد مطالعه شاخص فراسنجی برای ۲۷ زیرحوضه محاسبه شد. مساحت نسبی و ارتفاع نسبی برای ترسیم منحنی فراسنجی با استفاده از نقشه توپوگرافی به دست آمد. بیشترین مقدار انتگرال فراسنجی 0.59 در زیرحوضه شماره ۱۷ با منحنی فراسنجی محدب حاصل شد (جدول ۱).



شکل ۸: نقشه رده بندی شاخص فراسنجی در منطقه مورد مطالعه.

رده ۱ فعالیت زمین ساختی با استفاده از شاخص فراسنجی در حوضه هایی که منطبق با گسل های گلندرود جنوبی، شمالی و بلده و چین خوردگی های جنوب خاوری به دست آمد (شکل ۸). همچنین منحنی این حوضه ها به صورت محدب می باشد (شکل ۹).



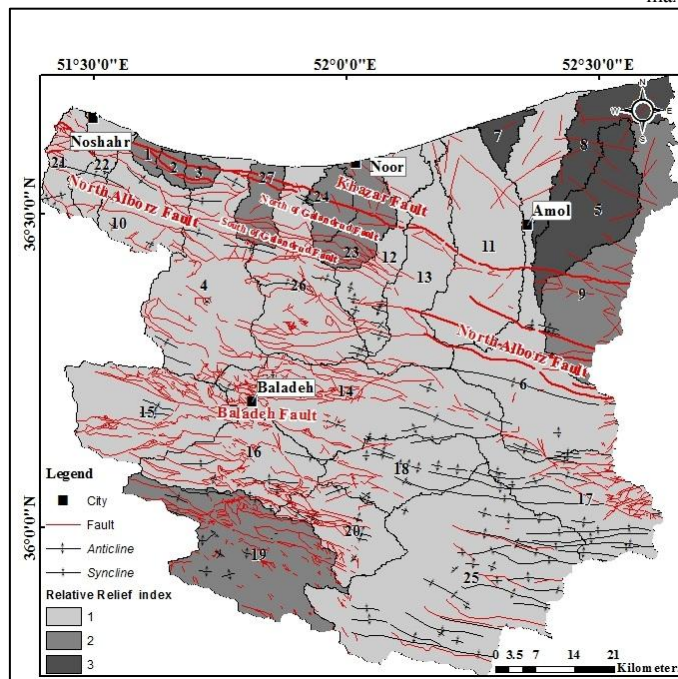
شکل ۹: منحنی بیشینه فراسنجی در حوضه شماره ۱۷، ۱۴، ۱۸.

¹ El Hamdouni et al., 2007

برجستگی نسبی (Bh)

شاخص برجستگی نسبی اختلاف میان مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقطه در یک حوضه زهکشی را نشان می‌دهد:

$$Bh = h_{\max} - h_{\min} \quad (8)$$



شکل ۱۰: نقشه‌ی پراکندگی مقادیر شاخص برجستگی نسبی در منطقه‌ی مورد مطالعه

برجستگی نسبی نقش مهمی در توسعه شبکه زهکشی، حرکت آب‌های سطحی و زیرزمینی، تراوایی، توسعه اشکال سطحی زمین و ویژگی‌های فرسایشی عوارض زمینی دارد و مقدار بالای آن نشان‌دهنده شدت جریان آب، نفوذ پایین و مقدار بالای رواناب است. این شاخص، نشان‌دهنده ارتفاع نسبی یک حوضه است و مقدار بالای برجستگی نسبی، بیان‌گر نرخ بالآمدگی بیشتر است که به دلیل فعالیت زمین‌ساختی بیشتر می‌باشد (کلر و پینتر^۱، ۲۰۰۲). مرتفع‌ترین و پست‌ترین نقطه در هر حوضه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی برای هر حوضه محاسبه شد. بیشترین مقدار این شاخص ۴۷۴۰ متر در زیرحوضه ۲۵ می‌باشد (جدول ۱). برای بررسی بهتر شاخص برجستگی نسبی در سه رده به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی طبقه‌بندی شد: مقادیر بیش از ۲۰۰۰ متر ($Bh \geq 2000$)، رده ۱ فعالیت زمین‌ساختی، مقادیر بین ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر ($1000 \leq Bh < 2000$) رده ۲ فعالیت زمین‌ساختی و مقادیر کم‌تر از ۱۰۰۰ ($Bh < 1000$) رده ۳ فعالیت زمین‌ساختی را نشان می‌دهند (شکل ۱۰).

تراکم زهکشی (Da)

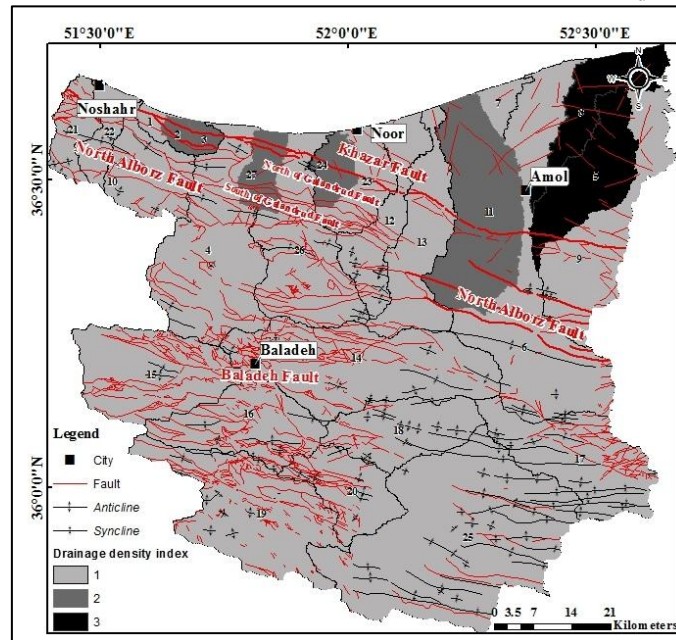
تراکم زهکشی یک شاخص ژئومورفولوژی مهم برای حوضه‌هایی است که آبراهه‌های آن، بازتاب‌کننده فرآیندهای حاکم بر حفر چشم‌اندازها است (شوم^۲، ۱۹۹۷). این شاخص ممکن است نشان‌دهنده تاثیر زمین‌ساخت فعال در منطقه باشد (تالینگ و سواتر^۳، ۱۹۹۹؛ دیوی و همکاران^۱، ۲۰۱۱). تراکم زهکشی از نسبت مجموع طول تمام آبراهه‌های یک حوضه به مساحت آن محاسبه می‌شود (هورتن^۲، ۱۹۴۵):

¹ Keller and Pinter, 2002

² Schumm, 1997

³ Talling and Sowter, 1999

$$D_d = L_u / A \quad (9)$$



شکل ۱۱: نقشه‌ی پراکندگی مقادیر تراکم زهکشی در منطقه مورد مطالعه

در رابطه بالا (D_d) تراکم زهکشی، (L_u) مجموع طول آبراهه و (A) مساحت حوضه زهکشی است. مقدار این شاخص به درجه فرسایش و میزان برش چشم‌اندازها در شبکه زهکشی بستگی دارد. شبکه زهکشی در چشم‌اندازهای قدیمی که در زمان طولانی در سطح زمین قرار دارند، گسترش بیشتری یافته و در نتیجه دارای مقدار تراکم زهکشی بیشتری است. مقدار تراکم زهکشی در حوضه‌هایی که دارای فعالیت زمین‌ساختی اخیر می‌باشند، کم‌تر است (کلر و پینتر^۳، ۲۰۰۲). برای محاسبه این شاخص، مساحت و طول تمام آبراهه‌های هر حوضه در محیط GIS اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از رابطه ارائه شده برای این شاخص (رابطه ۹) تراکم زهکشی هر حوضه محاسبه گردید. بیشترین مقدار این شاخص در زیرحوضه شماره ۵ با مقدار $1/50 \text{ Km}^{-1}$ و کم‌ترین آن در زیرحوضه شماره ۱۶ با مقدار $0/96 \text{ Km}^{-1}$ است (جدول ۱). نتایج حاصل از شاخص تراکم زهکشی را می‌توان به سه رده فعالیت زمین‌ساختی تقسیم کرد: رده ۱ شامل مقادیر کم‌تر از $1/2$ ($D_d \leq 1.2$)، رده ۲ مقادیر بین $1/2$ تا $1/3$ ($1.3 \leq D_d < 1.2$) و رده ۳ مقادیر بیشتر از $1/3$ ($D_d > 1.3$) است (شکل ۱۱).

ضریب شکل (F_f)

شاخص ضریب شکل از رابطه زیر محاسبه می‌شود (هورتن^۴، ۱۹۴۵):

$$F_f = A / L^2 \quad (10)$$

در رابطه بالا، (F_f) ضریب شکل، (A) مساحت حوضه و (L^2) مجذور طول حوضه است. طول حوضه از نقطه خروج آبراهه اصلی تا مرتفع‌ترین نقطه در حوضه محاسبه می‌شود. ضریب شکل نشان‌دهنده شدت جریان یک حوضه برای یک مساحت معین است. مقدار این شاخص معمولاً باید کم‌تر از $0/7884$ باشد. مقادیر کم‌تر این شاخص نشان‌دهنده حوضه‌هایی با شکل کشیده‌تر است. حوضه‌هایی با ضریب شکل بزرگ‌تر دارای دبی اوج بالا هستند (سینگ و همکاران^۵،

¹ Devi et al., 2011

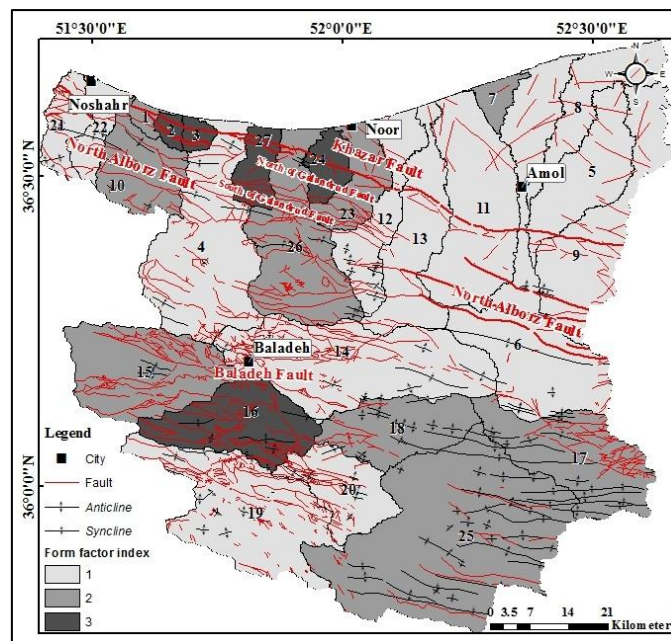
² Horton, 1945

³ Keller and Pinter, 2002

⁴ Horton, 1945

⁵ Singh et al., 2014

۲۰۱۴). حوضه‌های زهکشی در مناطق فعال از نظر زمین‌ساختی، دارای شکل کشیده‌تر می‌باشند (بال و مکافی^۱، ۱۹۷۷؛ حمدونی^۲، ۲۰۰۷). مساحت و طول هر حوضه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه و آبراهه اصلی هر حوضه به دست آمد و شاخص ژئومورفولوژی فوق در ۲۷ حوضه زهکشی گستره مورد مطالعه اندازه‌گیری شد. مقدار این شاخص در گستره مورد مطالعه بین ۰/۰۷ تا ۰/۴۴ می‌باشد (جدول ۱). نتایج حاصل از شاخص ژئومورفولوژی فوق را می‌توان به سه رده فعالیت زمین‌ساختی تقسیم کرد: رده ۱ شامل مقادیر کم‌تر از $0.2 (F_f \leq 0.2)$ ، رده ۲ مقادیر بین ۰/۲ تا ۰/۲۵ $(F_f < 0.2)$ و رده ۳ مقادیر بیشتر از $0.25 (F_f > 0.25)$ است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲: نقشه‌ی پراکندگی مقادیر ضریب شکل در منطقه‌ی مورد مطالعه

ارزیابی کل منطقه

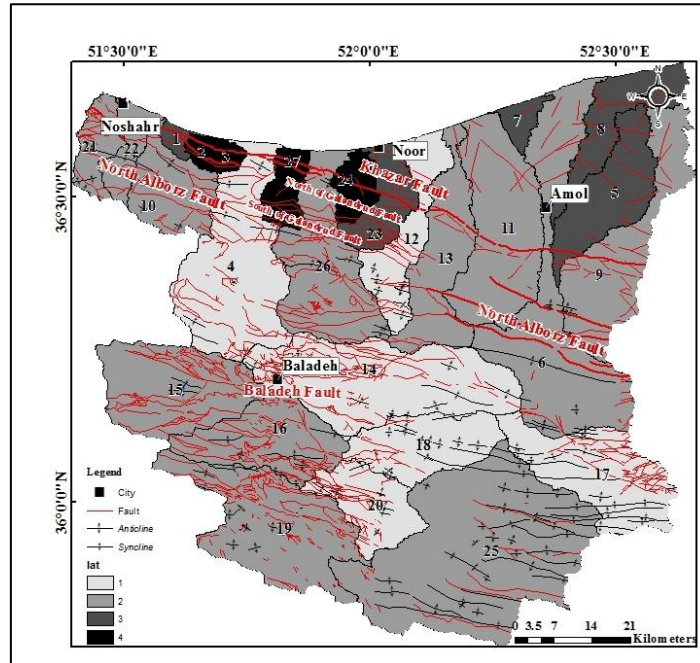
در این پژوهش به منظور طبقه‌بندی منطقه براساس شاخص زمین‌ساخت نسبی (I_{at})، هر شاخص به سه رده به لحاظ فعالیت زمین‌ساختی تقسیم شد. شاخص‌های ژئومورفولوژی ناهنجاری سلسله مراتبی (Δa)، انشعابات (R)، انتگرال و منحنی فراسنجی (H_i)، برجستگی نسبی (B_h)، تراکم زهکشی (D_d) و ضریب شکل (F_f) براساس مقادیری که دارا بودند، رده‌بندی شدند و در نهایت برای هر حوضه میانگین مقادیر رده شاخص‌های ژئومورفولوژی (S/n) اندازه‌گیری شد و به ۴ رده فعالیت زمین‌ساختی (I_{at}) تقسیم شد (جدول ۱). رده ۱ زمین‌ساخت فعال نسبی ($1.0 \leq I_{at} < 1.5$) که نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا است، رده ۲ زمین‌ساخت فعال نسبی ($1.5 \leq I_{at} < 2.0$)، بیان‌گر فعالیت زمین‌ساختی بالا است، رده ۳ زمین‌ساخت فعال نسبی ($2.0 \leq I_{at} < 2.5$)، فعالیت زمین‌ساختی متوسط را نشان می‌دهد و رده ۴ ($2.5 \leq I_{at}$)، نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی نسبی کم است (حمدونی و همکاران^۳، ۲۰۰۷). پس از رده‌بندی گستره مورد مطالعه براساس شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (جدول ۱)، نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت زمین‌ساختی (I_{at}) در گستره مورد مطالعه ترسیم شد، نتایج حاصل از نقشه پهنه‌بندی سطح فعالیت زمین‌ساختی (I_{at}) در گستره مورد مطالعه نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی بسیار بالا و بالا در زیرحوضه‌های واقع در گسل‌های بلده، خزر، شمال البرز،

¹ Bull and McFadden, 1977

² El Hamdouni et al., 2007

³ El Hamdouni et al., 2007

گلندرود جنوبی و شمالی و گسل های جنوب باختری و چین خوردگی های جنوب خاوری منطقه مورد مطالعه است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: نقشه ی توزیع سطح فعالیت زمین ساخت نسبی (Iat) در منطقه ی مورد مطالعه

جدول ۱: مقادیر شش شاخص اندازه گیری شده و سطح فعالیت زمین ساختی در گستره مورد مطالعه

Basin no.	Δa	R	Hi	Bh (m)	$D_d (Km^{-1})$	F_f	Iat
1	0.2	0.26	0.322239	1394	1.129773	0.23	3
2	0	0	0.388932	1501	1.215001	0.32	4
3	0.23	0.26	0.298368	1500	1.292116	0.32	4
4	1.25	1.23	0.54099	3493	1.111861	0.17	1
5	1.42	0.93	0.123426	626	1.496704	0.12	3
6	7.83	1.45	0.318237	3328	1.14425	0.10	2
7	0.3	0.30	0.11	77	1.175307	0.22	3
8	1.85	0.98	0.473404	188	1.351433	0.16	3
9	1.46	1.14	0.149632	1777	1.192383	0.07	2
10	0.93	0.75	0.508083	2668	1.076954	0.21	2
11	1.35	0.58	0.159615	2404	1.274288	0.17	2
12	2.04	1.06	0.240738	3436	1.112626	0.10	1
13	0.93	0.70	0.279601	3619	1.126304	0.12	2
14	4.08	1.66	0.519932	3352	1.042977	0.17	1
15	1.67	0.98	0.376861	2289	1.031911	0.23	2

16	0.78	0.76	0.425823	2200	0.958603	0.44	2
17	2	1.41	0.591561	3278	0.999856	0.18	1
18	1.82	1.11	0.544641	3391	0.988038	0.23	1
19	1.16	1.06	0.329252	1978	1.009458	0.18	2
20	1.60	1.20	0.314465	3126	1.131155	0.20	1
21	0.86	1.00	0.340097	2026	1.15329	0.17	2
22	0.65	1.04	0.231608	2335	1.10271	0.20	2
23	0.80	0.59	0.20772	1972	1.186758	0.22	3
24	0.36	0.63	0.165294	1430	1.298089	0.27	4
25	2.45	1.27	0.395549	4740	1.111693	0.24	2
26	1.20	0.99	0.48231	3614	1.028672	0.21	2
27	0.39	0.28	0.38077	1938	1.262383	0.27	4

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش از شاخص‌های نوین ژئومورفولوژی به منظور بررسی زمین‌ساخت فعال در گستره مورد مطالعه استفاده شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری شش شاخص ژئومورفولوژی اندازه‌گیری شده و تلفیق آن با مشاهدات صحرایی نشان‌دهنده فعالیت نوزمین‌ساختی در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۱۴ تا ۱۸).

مقادیر بالای شاخص‌های ناهنجاری سلسله مراتبی و انشعابات در مناطق منطبق با بخش‌های خاوری دو گسل خزر و شمال البرز، همچنین در گسل‌های گلندرد جنوبی و شمالی، بلده و گسل‌های احتمالی شمال خاوری و چین‌خوردگی‌های جنوب خاوری گستره مورد بررسی، ملاحظه گردید که می‌تواند نشان‌گر فعالیت زمین‌ساختی اخیر در امتداد ساختارهای مزبور باشد. انتگرال و منحنی فرازونجی که رابطه مستقیمی با توزیع ارتفاع دارد، در زیرحوضه‌هایی که گسل‌های بلده، گلندرد جنوبی و شمالی قرار دارند و همچنین زیرحوضه‌های واقع در چین‌خوردگی‌های جنوب خاوری رده ۱ فعالیت زمین‌ساختی را نشان می‌دهد و بیان‌گر فعالیت زمین‌ساختی بالا در این مناطق است (شکل ۸). شاخص برجستگی نسبی در محدوده چین‌خوردگی‌های جنوب خاوری و در قسمت خاوری گسل شمال البرز در گستره مورد بررسی و گسل‌های بلده، گلندرد جنوبی و شمالی بیان‌گر نرخ بالآمدگی بیشتر به دلیل فعالیت زمین‌ساختی بیشتر در این محدوده است. مقادیر کم شاخص تراکم زهکشی در جنوب باختری خصوصا در امتداد گسل بلده، گلندرد جنوبی و شمالی و چین‌خوردگی‌های جنوب خاوری گستره مورد مطالعه به دلیل فعالیت زمین‌ساختی اخیر ساختارهای زمین‌ساختی ذکر شده است. بیشترین کشیدگی حوضه در مجاورت گسل‌های شمال البرز، خزر و گسل‌های احتمالی شمال خاوری گستره مورد مطالعه است، همچنین زیرحوضه‌های واقع در گسل‌های بلده، گلندرد جنوبی و شمالی و چین‌خوردگی‌های جنوب خاوری گستره مورد مطالعه دارای ضریب شکل کم می‌باشد که نشان‌دهنده حوضه‌های کشیده است. نتایج حاصل از شاخص زمین‌ساخت فعال نسبی (Iat) در گستره مورد مطالعه نیز مقادیر بالا را در امتداد گسل خزر، شمال البرز، بلده، گلندرد شمالی و جنوبی و گسل‌های جنوب باختری و چین‌خوردگی‌های جنوب خاوری گستره مورد مطالعه تایید می‌کند (شکل ۱۳).



شکل ۱۴: کج شدگی لایه‌های مخروط‌افکنه بر اثر فعالیت گسل خزر.

همچنین مشاهدات صحرایی در گستره مورد بررسی نشان‌دهنده شواهد زمین‌ریختی فعال در گستره مورد مطالعه می‌باشد، که ثابت‌کننده نتایج حاصل از شاخص‌های ژئومورفولوژی است. کج شدگی لایه‌های مخروط‌افکنه بر اثر فعالیت گسل خزر نشانه فعالیت زمین‌ساختی کنونی این گسل و تایید کننده نتایج حاصل از شاخص‌های ژئومورفولوژی است (شکل ۱۴).



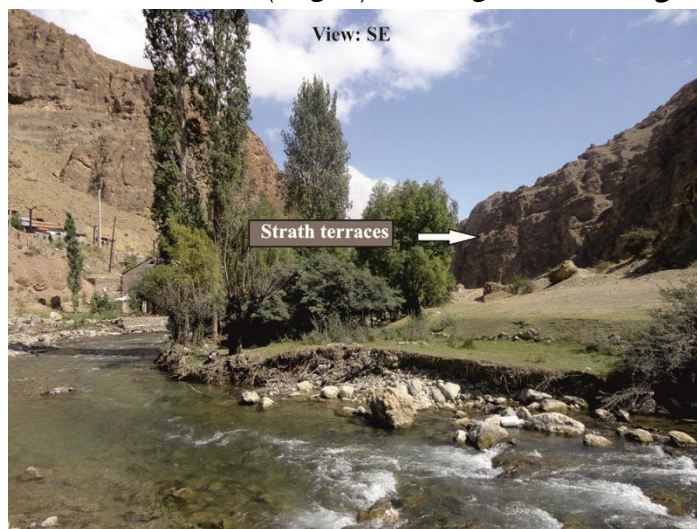
شکل ۱۵: پادگانه آبرفتی ایجاد شده در اثر فعالیت گسل شمال البرز در رود هراز.

دونسل پادگانه آبرفتی مرتفع از جمله شواهد زمین‌ریختی است که در نزدیکی گسل شمال البرز مشاهده شد (شکل ۱۵). گسل‌های گلندورد شمالی و جنوبی که مقادیر شاخص‌های ژئومورفولوژی نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی اخیر این دو گسل است در مشاهدات صحرایی به صورت راندگی مشاهده شد و در تصاویر ماهواره‌ای تغییر مسیر رودخانه بر روی خط گسل مشاهده شد (شکل ۱۶).



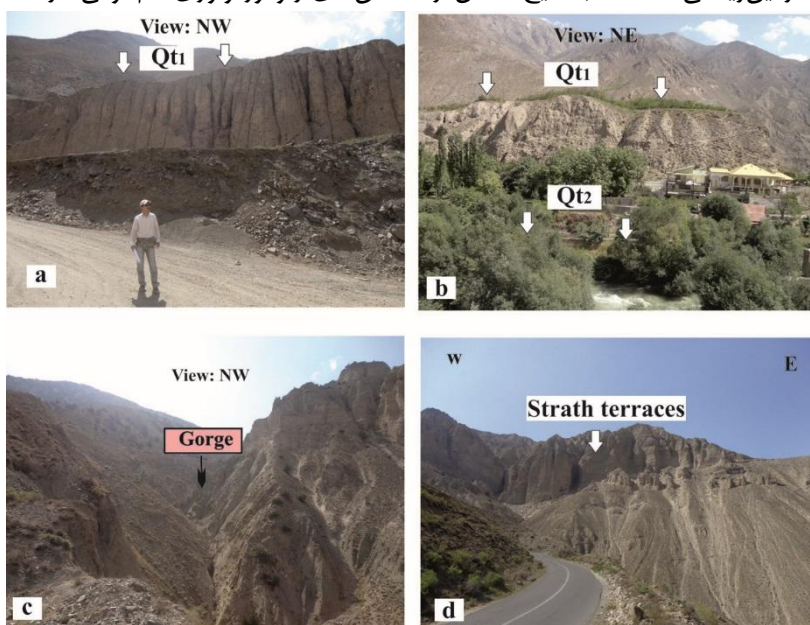
شکل ۱۶: مشاهدات صحرایی در گسل گلندورد: (a) گسل گلندورد شمالی که به صورت بریدگی می‌باشد، (b) تغییر مسیر رودخانه بر روی خط گسل گلندورد شمالی، (c) راندگی سازند شمشک بر روی سنگ آهک و مارن با سن کرتاسه، در امتداد گسل گلندورد جنوبی با جهت راندگی به سمت شمال، (d) انحراف در مسیر رودخانه بر اثر عملکرد گسل گلندورد شمالی.

مقادیر شاخص‌های ژئومورفولوژی و شواهد زمین‌ریختی که شامل پادگانه‌های سنگ بستری مرتفع در محدوده گسل بلده در مشاهدات صحرائی نشان‌دهنده فعالیت گسل بلده است (شکل ۱۷).



شکل ۱۷: پادگانه‌های سنگ بستری مرتفع (Strath terrace) بر اثر فعالیت گسل بلده.

وجود پادگانه‌های آبرفتی مرتفع و دره‌های تنگ (Gorge) در چین‌های فعال جنوب خاوری منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۸) از جمله شواهد زمین‌ریختی است که با نتایج حاصل از شاخص‌های ژئومورفولوژی هم‌خوانی دارد.



شکل ۱۸: شواهد زمین‌ریختی در ناودیس چنگیزکوه واقع در جنوب‌خاوری گستره مورد مطالعه: (a, b) پادگانه آبرفتی مرتفع در دو سمت رود (Paired terraces)، (c) نمایی از تنگ دره ایجاد شده (Gorge)، (d) پادگانه آبرفتی سخت شده در ارتفاعات.

نتایج حاصل از شاخص‌های ژئومورفولوژی و مشاهدات صحرائی نشان‌دهنده فعالیت زمین‌ساختی در گسل خزر، شمال البرز، بلده، گلندرود شمالی و جنوبی و گسل‌های جنوب باختری و چین‌خوردگی‌های جنوب خاوری گستره مورد مطالعه است. شاخص‌های ژئومورفولوژی در قسمت شمال خاوری گستره مورد مطالعه نیز فعالیت زمین‌ساختی متوسط را نشان

می‌دهد، اما در مشاهدات صحرایی این بخش به دلیل وجود مزارع کشاورزی و عدم وجود توپوگرافی مشخص، شواهد زمین‌ریختی مهم و اثری از فعالیت گسل‌های پنهان احتمالی دیده نشد.

منابع

- Alavi, M., 1996, *Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran*, *Journal of Geodynamics*, No. 21, pp. 1- 33.
- Allen, M.B., Ghassemi, M.R., Shahrabi, M., Qorashi, M., 2003, *Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran*, *Journal Of Structural Geology*, No. 25, PP. 659-672.
- Avena, G.C., Giuliano, G. and Lupia Palmieri, E., 1967, *Sulla valutazione quantitativa della gerarchizzazione ed evoluzione dei reticoli fluviali*. *Bollettino della Societa Geologica Italiana*, No. 86, pp. 81–796.
- 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 NewYork, Binghamton*, pp. 115- 138.
- Ciccacci, S., Fredi, P., Lupia Palmieri, E. and Pugliese, F., 1986, *Indirect Evaluation of Erosion Entity in Drainage Basins through Geomorphic, Climatic and Hydrological Parameters*, *International Geomorphology*, pp. 233- 248.
- Devi, R.K.M., Bhakuni and Bora, P.B., 2011. *Tectonic implication of drainage set-up in the Sub- Himalaya: a case study of Papumpare district, Arunachal Himalaya, India*, *Geomorphology*, No. 127, pp. 14–31.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., Keller, E.A., 2007, *Assessment of relative active tectonics, southwest border of Sierra Nevada (southern Spain)*, *Geomorphology*, No. 96, pp. 150–173.
- 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*, No. 95, pp. 260- 273.
- Holbrook, J. and Schumm, S.A., 1999, *Geomorphic and Sedimentary Response of Rivers to Tectonic Deformation: a Brief Review and Critique of a Tool For Recognizing Subtle Epeirogenic Deformation In Modern And Ancient Settings*. *Tectonophysics*, No. 305, pp. 287- 306.
- Horton, R.E., 1945, *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*, *Geological Society of America Bulletin*, No. 56, PP. 275- 370.
- Keller, E.A., Zepeda, R.L., Rockwell, T.K., Ku, T.L. and Dinklage, W.S., 1998, *Active tectonics at Wheeler Ridge, southern San Joaquin Valley, California*. *Geological Society of America Bulletin*, No. 110, pp. 298–310.

- Keller, E.A., Pinter, N., 2002, *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape (2ndEd.)*, Prentice Hall, New Jersey.
- Mathuis, B.H.P., 2006. *Digital elevation model based hydro-processing*, Geocarto International center, No. 21, pp. 21- 26.
- Mayer, L., 1990, *Introduction to Quantitative Geomorphology*, Prentice Hall, Englewood, Cliffs, NJ.
- Moore, I.D., Grayson, R.B. and Ladson, A.R., 1991, *Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications*, *Hydrological Process*, No. 5, pp. 3- 30.
- Ritz J. F., Nazari, H., Salamati, R., Shafeii, A., Solaymani, S. and Vernant, P., 2006. *Active transtension inside Central Alborz: a new insight into the Northern Iran–Southern Caspian geodynamics*, *Geology*, No. 34, pp. 477-480.
- Schumm, S.A., 1997, *Drainage density: problems of prediction*. In: Stoddart, D.R. (Ed.), *Process and Form in Geomorphology*, Routledge, London, pp. 15- 45.
- Schumm, S.A., Dumont, J.F. and Holbrook, J.M., 2002, *Active tectonics and alluvial rivers*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Singh, P., Gupta, A. and Singh, M., 2014, *Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques*, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, pp. 1- 11.
- Strahler, A.N., 1952, *Hypsometric (area–altitude) analysis of erosional topography*, *Geological Society of America Bulletin*, No. 63, pp. 1117–1142.
- Strahler, A. N., 1964, *Quantitative geomorphology of basins and channel networks*, In: Chow, V.T. (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology*. Mcgraw Hill Book Company, New York.
- Talling, P.J. and Sowter, M.J., 1999, *Drainage density on progressively tilted surfaces with different gradients*, *Wheeler Ridge, California, Earth Surface Processes and Landforms*, No. 24, pp. 809- 824.
- Walker, R.T., 2006, *A remote sensing study of active folding and faulting in southern Kerman province, S.E. Iran*, *Journal of Structural Geology*, No. 28, PP. 654-66.