

بررسی ریخت‌زمین‌ساختی پهنه انته‌ای گسلی اطراف قوزلو (جنوب شرقی گسل شمال تبریز)

علیرضا یوسفی باویل^(۱)، محسن موید^(۲)

۱. دکتری ژئوتکتونیک و ژئودینامیک، دپارتمان ژئوتکتونیک و زمین‌شناسی منطقه‌ای، انستیتو زمین‌شناسی آذربایجان، باکو، آذربایجان
۲. استاد گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۹۲/۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۹

چکیده

اثر سطحی گسل‌ها در پهنه انته‌ای گسلی قوزلو، واقع در انته‌ای جنوب شرقی قطعه‌ای از گسل شمال تبریز که به پهنه تغییر شکل بزقوش منتهی می‌گردد، نشان از تشکیل یک ساختار دم‌اسبی است. هر چند که در مورد نوع این ساختار دم‌اسبی و یا الگوی تغییر شکل آن اطلاعاتی در دست نیست. در این راستا بررسی‌های مربوط به توپوگرافی (مطالعه تغییرات نسبی ارتفاع در دو مقیاس در پهنه‌های حائل کل پهنه تغییر شکل و پهنه‌های اطراف آبراهه‌های جاری درون پهنه)، شیب سطح، شاخص عدم تقارن و اطلاعات زمین‌شناسی نشان می‌دهد که: (۱) پهنه انته‌ای گسلی از نوع ساختار دم‌اسبی انقباضی است. (۲) درون پهنه انته‌ای گسلی رژیم زمین‌ساختی از نوع فشارشی حاکم بوده و روند حداکثر فشارش N۲۰W-S۲۰E است. (۳) در درون پهنه انته‌ای گسلی در طول دو آبراهه، دو پهنه گسلی متفاوت با حداکثر و حداقل فعالیت زمین‌ساختی شناسایی گردید. (۴) در داخل پهنه‌های گسلی مرتبط با آبراهه‌ها مولفه شیب‌لغز کلی از نوع معکوس یا رانده است. این نتایج اطلاعات مهمی در باره زمین‌ساخت پهنه انته‌ای گسلی قوزلو فراهم کرده و دانش ما در مورد تغییر شکل درون پهنه گسلی شمال تبریز را بهبود می‌بخشد. این بررسی همچنین اهمیت کاربرد پروفیل‌های حائل‌دار طولی آبراهه‌ها جهت حصول مستقیم داده‌های زمین‌ساختی از توپوگرافی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پروفیل حائل‌دار، پروفیل طولی آبراهه، پهنه انته‌ای گسلی، ریخت‌زمین‌ساخت، گسل شمال تبریز.

مقدمه

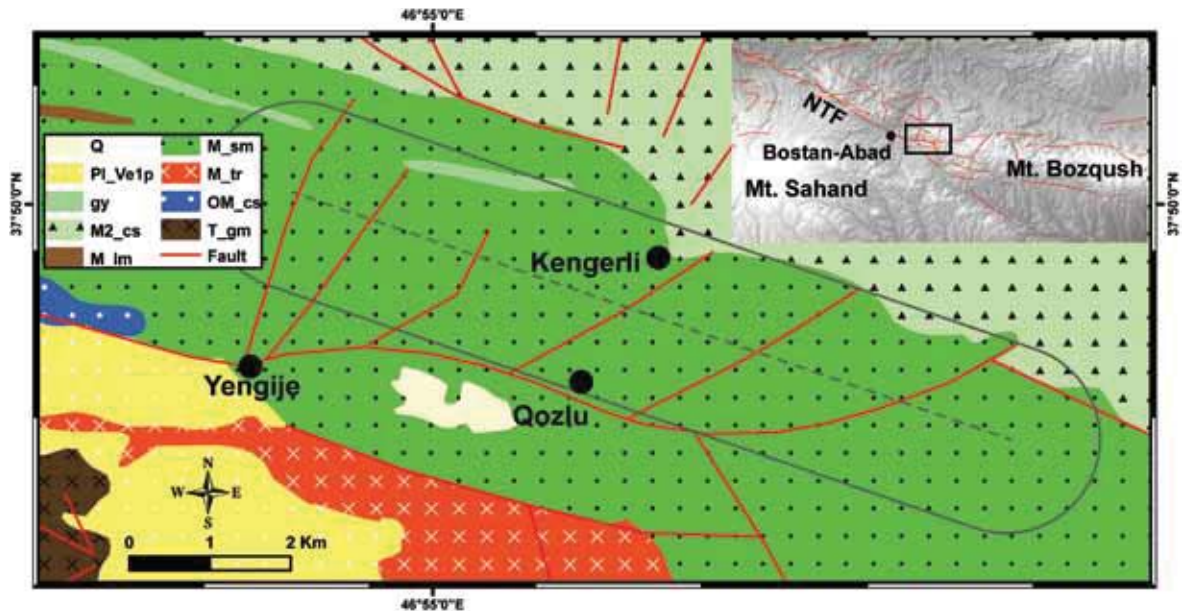
پهنه‌ها به‌واسطه قطعه‌بندی گسلی، در هم‌کنش این قطعات و نیز ایجاد، رشد و تکامل گسل‌های فرعی‌تر ایجاد می‌شوند (برای مثال، Cartwright and Mansfield, 1998; Kim, et al., 2001; De Joussineau and Aydin, 2009).

پهنه‌های انته‌ای گسلی یکی از ساختارهای رایج زمین‌شناسی در طول گسل‌های امتدادلغز می‌باشند. این

* نویسنده مرتبط: ayousefi@gia.ab.az ; ayousefibaivil@gmail.com

که در انتهای جنوب شرقی قطعه‌ای از گسل تبریز (قطعه "بستان آباد"، مابین قوروگل و ینگجه) واقع شده است (شکل ۱) برای درک بهتر تغییر شکل قطعه گسلی مرتبط با گسل شمال تبریز در نظر گرفته شد.

با توجه به مکانیسم تشکیل این پهنه‌ها که به صورت ایجاد ساختارهای گسلی فرعی‌تر (رده بالاتر) نسبت به گسل اصلی یا رده پایین‌تر است، تعیین خصوصیات این پهنه‌ها می‌تواند به درک مکانیسم و الگوی تغییر شکل ساختارهای اصلی‌تر کمک کند. بر این اساس، بررسی پهنه انتهایی گسلی قوزلو



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی در اطراف پهنه انتهایی گسلی قوزلو؛ نقشه و نیز شرح و اختصارات آن برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بستان آباد است (بهروزی و همکاران، ۱۳۵۶). چندضلعی توخالی با رنگ خاکستری پهنه حائل (درجه اول) در اطراف خط مرکزی (خط چین) که در آن مطالعات توپوگرافیک صورت گرفته را نشان می‌دهد. نقشه فرعی، پهنه گسلی را در انتهای جنوب شرقی گسل شمال تبریز (قبل از عبور گسل از غرب کوه بزقوش) نشان می‌دهد؛ NTF نشان‌گر گسل شمال تبریز است

مثال، مرادی سیاهکلی و همکاران، ۱۳۸۷ و Yousefi-Bavil, 2013). اطلاعات زمین‌شناسی و صحرایی مربوط به پهنه انتهایی گسلی قوزلو محدود به نقشه‌های زمین‌شناسی است (بهروزی و همکاران، ۱۳۵۶) که بررسی اثر سطحی گسل‌های تعیین‌شده حاکی از وجود یک ساختار دم‌اسبی می‌باشد ولی در مورد فعالیت زمین‌ساختی غالب در این پهنه تغییر شکل از جمله فعالیت گسل‌های اصلی اطلاعات چندانی موجود نمی‌باشد. این ساختار دم‌اسبی در انتهای جنوب شرقی خود به پهنه تغییر شکل بزقوش منتهی می‌گردد (بهروزی و همکاران، ۱۳۵۶). در محدوده دربرگیرنده پهنه تغییر شکل قوزلو، در امتداد گسل شمال تبریز واحدهای سنگ‌شناسی الیگوسن و میوسن (جنح شمال شرقی گسل) در مجاورت و بالاتر از واحدهای سنگ‌شناسی

به دلیل جای‌گیری فعالیت‌های زمین‌ساختی عمده در محل گسل شمال تبریز، این گسل نقش مهمی در تکامل زمین‌ساختی (Eftekhari-Nezhad, 1975 ; Alavi, 1991) و متعاقباً ریخت‌شناسی (Yousefi-Bavil, 2012) در مقیاس منطقه‌ای و نیز محلی ایفا می‌کند. بدین خاطر، مطالعه این گسل از جنبه‌های مختلف همواره مد نظر بوده است. گسل مذکور که یک پهنه گسلی از نوع امتدادلغز راست‌گرد می‌باشد (آقناباتی، ۱۳۸۵) متشکل از قطعات متعدد همراه با پهنه‌های انتهایی گسلی مختلفی است. این گسل دارای امتداد عمومی شمال غرب- جنوب شرق بوده و شیب عمومی آن قائم می‌باشد (آقناباتی، ۱۳۸۵)؛ هر چند که در مقیاس ریزتر، شیب قطعات مختلف آن در جهات مختلف به مقدار اندکی از حالت قائم انحراف نشان می‌دهند (برای

قرار گرفت تا درکی بهتر از نوع و الگوی تغییرشکل در پهنه انتهایی گسلی قوزلو به دست آید. نتایج به دست آمده از این مطالعه، اطلاعات ارزشمندی در مورد الگوی توزیع تغییر شکل (بالآمدگی) در سطح پهنه تغییر شکل و نیز نوع و میزان فعالیت زمین‌ساختی در طول گسل‌های موجود در پهنه انتهایی گسلی ارائه می‌کند.

داده‌ها و روش‌ها

برای بررسی‌های ریخت‌شناسی، وجود داده‌های توپوگرافی ضروری می‌باشد. این داده‌ها را می‌توان از نقشه‌های توپوگرافی و یا از داده‌های مدل رقومی ارتفاع به دست آورد. در این مطالعه، داده‌های مدل رقومی ارتفاع آستر^۲ که دارای دقت ۳۰ متر هستند برای استخراج داده‌های توپوگرافی و نیز استخراج شبکه آبراهه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها را می‌توان به کمک هر یک از نرم‌افزارهای سیستم اطلاعاتی جغرافیایی^۳ استخراج کرد.

اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع

پس از استخراج داده‌های مربوط به شبکه آبراهه‌ها، ۶ آبراهه (آبراهه‌های شماره ۳ تا ۸) که در درون پهنه انتهایی گسلی جریان داشتند، انتخاب گردیدند (شکل ۲). برای این‌که تاثیر عامل تغییر سنگ‌شناسی به حداقل رسانده شود، داده‌های مربوط به آن قسمت از آبراهه‌ها که در روی یک واحد سنگ‌شناسی جریان داشتند، انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، یک پهنه حائل به طول تقریباً ۷/۵ کیلومتر و عرض ۲۲۰۰ متر در راستای تقریبی ۱۱۳° تشکیل داده شد (شکل ۱). در این پهنه حائل تغییرات ارتفاع به دو صورت اندازه‌گیری و ارزیابی گردید:

پلیوسن- کواترن (جناح جنوب غربی گسل) قرار گرفته‌اند. سطح پهنه انتهایی گسلی توسط واحد سنگ‌شناسی مربوط به میوسن (ماسه‌سنگ، مارن و سیلت‌سنگ) پوشیده می‌شود. این سنگ‌ها به سمت شمال شرق شیب‌دار هستند.

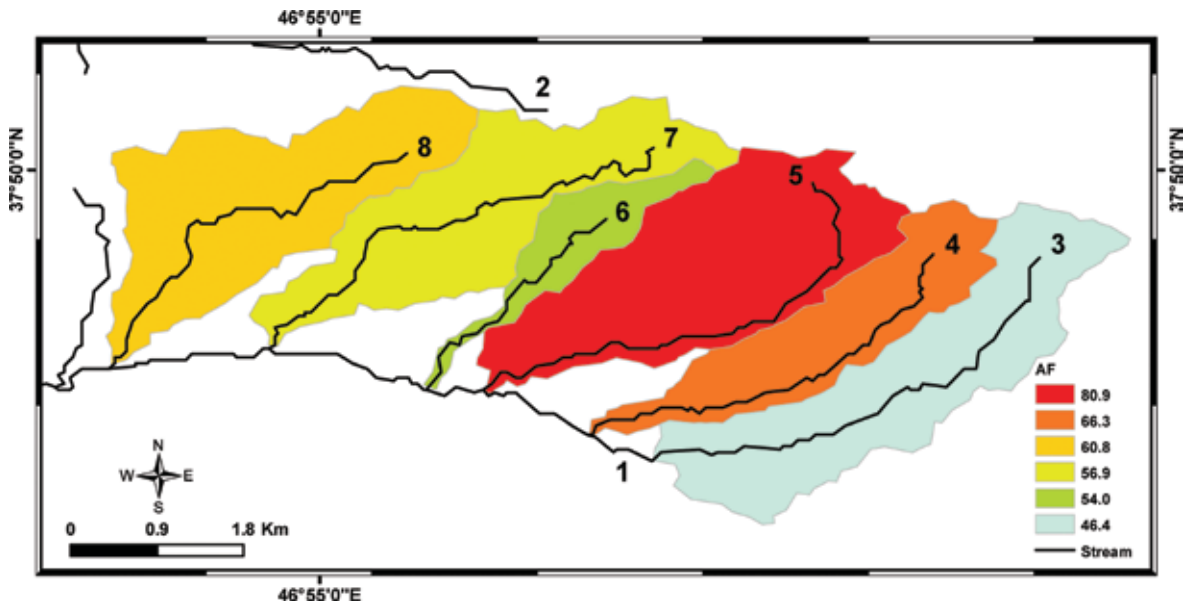
پهنه‌های انتهایی گسلی به دلیل تمرکز زیاد تنش ناشی از فعالیت‌های مربوط به رشد قطعات مختلف گسلی محل تشکیل پهنه‌های تغییر شکل فعال می‌باشند (Chinnery, 1966; Katz et al., 2003; de Jossineau and Aydin, 2009). به دلیل فعال بودن و تشدید مقدار فعالیت در این پهنه‌ها، عموماً ساختارهای زمین‌ساختی ایجاد شده به مرحله تکامل نرسیده و این ساختارها در مقیاس‌های مختلف دارای روابط زمانی و مکانی پیچیده می‌باشند (Cartwright and Mansfield, 1998; Kim et al., 2001; Shipton and Cowie, 2001). بررسی جنبشی این پهنه‌ها بدون آگاهی از ساختار و زمین‌ساخت عمومی آن‌ها در مقیاس مناسب می‌تواند باعث سردرگمی و سوء تفسیر در مرحله مطالعات صحرایی گردد. بررسی ریخت‌زمین‌ساختی این پهنه‌ها می‌تواند به محقق، بینشی عمومی در مورد فعالیت‌های زمین‌ساختی پهنه‌های مذکور ارائه کند.

وجود ارتباط مستقیم بین فعالیت گسل اصلی و گسل‌های فرعی‌تر همراهی‌کننده آن با شکل‌گیری عوارض طبیعی و توپوگرافی پهنه درگیر با گسل‌ها، امکان استفاده از شاخص‌های ریخت‌شناسی برای تفسیر فعالیت‌های زمین‌ساختی را فراهم می‌سازد. در این راستا، شاخص‌های ریخت‌شناسی همچون تغییرات ارتفاع در سطح پهنه تغییر شکل، تغییرات ارتفاع و شیب سطحی در مجاورت امتداد طولی آبراهه‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی موجود مورد بررسی

1. Digital Elevation Model

2. Aster

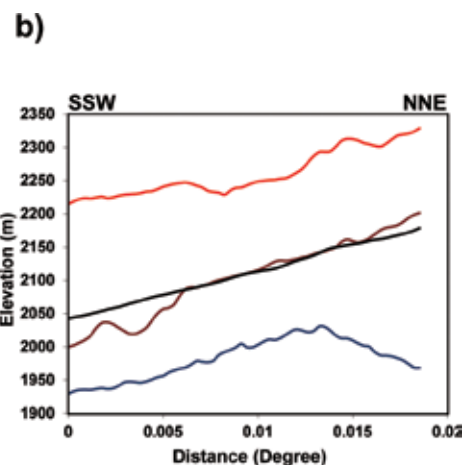
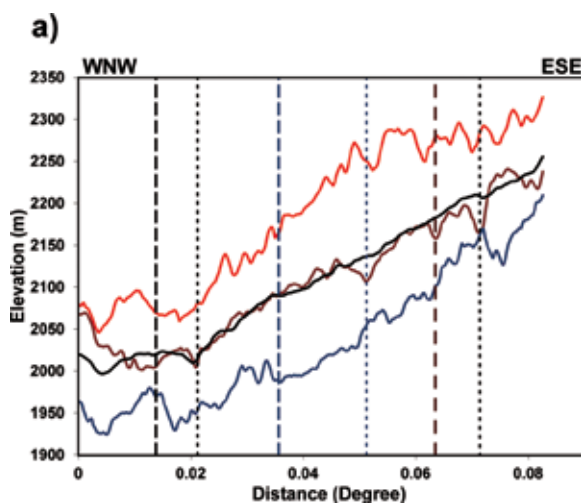
3. Geographic Information System (GIS)



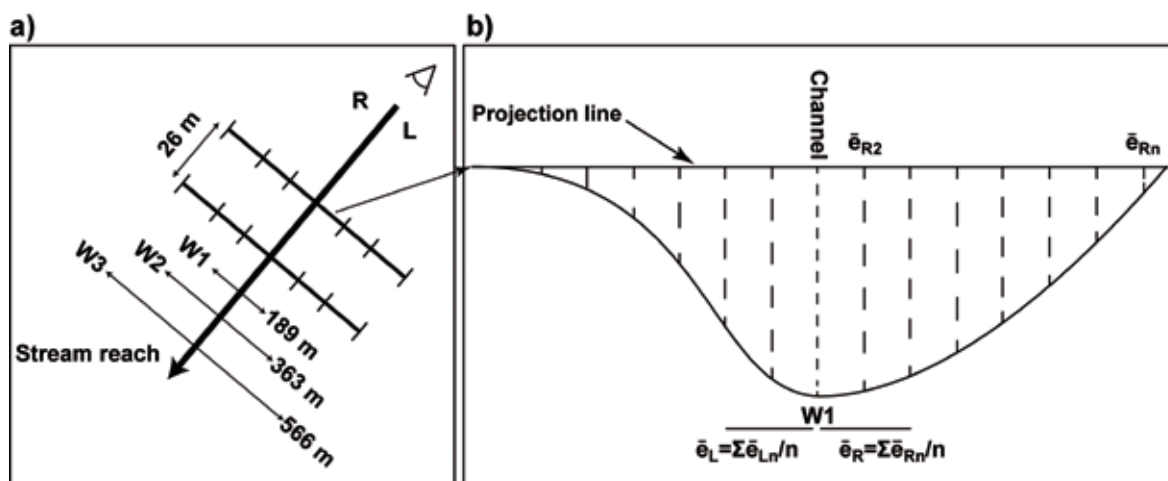
شکل ۲. آبراهه‌های انتخاب‌شده در پهنه انتهایی گسلی قوزلو و حوضه آبریز مربوطه؛ اعداد درون نقشه شماره آبراهه را نشان می‌دهند. اعداد درج‌شده در شرح و اختصارات نقشه و رنگ‌های مربوطه، مقادیر شاخص عدم تقارن را نشان می‌دهند

۲. تغییر ارتفاع در سطح پهنه‌هایی که در امتداد پروفیل طولی آبراهه‌ها (پهنه حائل درجه دوم) تشکیل گردیدند (شکل ۴). تشکیل این پروفیل‌های حائل دار اجازه ارزیابی دقیق‌تر توپوگرافی و نهایتاً تعبیر و تفسیر فرایندهای زمین‌ساختی و فرسایشی را در امتداد ساختارهای زمین‌شناسی- عوارض توپوگرافیک (آبراهه‌ها) فراهم می‌سازد.

۱. تغییر ارتفاع در کل سطح پهنه حائل (پهنه حائل درجه اول). در امتداد طولی این پهنه، داده‌های ارتفاع در روی خط پروفیل و نیز ارتفاع حدافل، متوسط و حداکثر مربوط به سطح پهنه حائل اندازه‌گیری شد. به‌عنوان مکان‌های استناد، موقعیت آبراهه‌ها در محل قطع شدنشان با خط مرکزی پروفیل محاسبه و لحاظ گردید (شکل ۳).



شکل ۳. تغییرات ارتفاع در کل سطح پهنه حائل (درجه اول) در امتداد WNW-ESE و SSW-NNE که موازی با، به ترتیب خط مرکزی پهنه حائل (a) و عمود بر آن (b) هستند؛ منحنی ارتفاع روی خط پروفیل و منحنی‌های حدافل، متوسط و حداکثر Z به ترتیب ارتفاع مربوطه در پهنه حائل را نشان می‌دهند. خطوط مربوط به اعداد ۳ تا ۸ موقعیت آبراهه‌ها را نشان می‌دهند



شکل ۴. تصویر شماتیک قسمت‌های سازنده مربوط به (a) پهنه‌های حائل‌دار (درجه دوم) در اطراف پروفیل طولی آبراهه و (b) مقطعی عرضی از پهنه حائل که در آن \bar{e}_L و \bar{e}_R به ترتیب نحوه محاسبه ارتفاع میانگین توپوگرافی در سمت راست و چپ آبراهه را نشان می‌دهند (W : عرض پنجره در پهنه حائل درجه دوم؛ n : تعداد نقاط نمونه‌برداری ارتفاع در طول خط تصویر)

لغزش کنترل می‌شود (Jaeger, 2009). با توجه به این‌که عموماً عوامل تغییر شیب مذکور، سنگ‌شناسی و نیز دیگر پارامترهای زمین‌شناسی (چسبندگی موثر، زاویه اصطکاک، فشار موثر) و اقلیمی در طرفین یک پهنه گسلی معین مشابه است، وجود توپوگرافی غیرمتقارن را می‌توان به هندسه، نوع حرکت و عملکرد گسل‌ها در پهنه گسلی نسبت داد. در این مطالعه، اهمیت اثر تغییرات اقلیمی خرده مقیاس در مقابل اثر فعالیت‌های زمین‌ساختی در شکل‌گیری توپوگرافی ناچیز در نظر گرفته شد.

فرایند خروج ماده و فروسایی بعد از تشکیل سطح شیب‌دار یا پرتگاه (گسلی) فرایند غالب می‌باشد که عموماً از سطح آزاد در قسمت فوقانی پرتگاه گسلی شروع و به سمت پایین به محدوده‌های سقوط واریزه و تجمع مواد منتهی می‌شود (Barrow-Huribert (1985). Huggett, 2007). به تفاوت و تاخیر در فروسایی و کاهش شیب پرتگاه گسلی معکوس نسبت به نرمال اشاره می‌کند. در دو مدل پرتگاه گسلی مربوط به گسل‌های معکوس (مدل‌های "قائم تا آویزان" و "تانک-پاشنه") این تاخیر در فروسایی و کاهش شیب در ارتباط با تاخیر در تشکیل و رخنمون‌یافتگی سطح آزاد و

فرایندهای تغییر شکل در مجاورت آبراهه

آبراهه‌ها را می‌توان به‌عنوان ساختارهای ریخت‌شناسی در نظر گرفت که حاصل فعالیت‌های زمین‌شناسی/زمین‌ساختی بوده و در بازه وسیعی (از نظر مقیاس مکانی) در حجم یک توده زمین‌شناسی تغییر شکل یافته، نفوذ کرده‌اند. درزه‌ها، رایج‌ترین ساختار زمین‌شناسی در سطح زمین بوده و به همراه گسل‌ها با ایجاد سطوح مسطح باعث از هم جدا شدن توده‌های سنگی بکر می‌شوند (Jaeger et al., 2007). این ساختارها می‌توانند مسیر جریان آب را فراهم کنند. پهنه‌های گسلی (که دارای ضخامت متغیری بین چند سانتیمتر تا یک کیلومتر یا بیشتر هستند) متشکل از صفحات بی‌شمار سطوح گسلی نزدیک به هم بوده که جابجایی در طول آن‌ها صورت می‌گیرد. پهنه‌های ضخیم‌تر، جابجایی بیشتری را در خود جای می‌دهند و جابجایی بیشتر سبب خردشدگی و ضعیف شدن بیشتر توده سنگ‌ها می‌گردد. دیواره دره‌های ایجادشده توسط این ساختارهای شکننده در مرحله بعدی در معرض فرایندهای فرسایش و تغییر شیب قرار می‌گیرد. این تغییر شیب توسط عواملی همچون شیب سطوح سنگی، وجود و یا نبود لایه‌بندی و ارتباط آن با شیب سطوح آزاد ناشی از ایجاد ساختارهای شکننده، عمق این ساختارها و نیز شکل عمومی سطوح

1. Degradation
2. Vertical to Overhanging Model
3. Tank-tread Model

پروفیل حائل‌دار در امتداد طولی آبراهه پهنه‌های حائل درجه دوم (پروفیل‌های حائل‌دار) به‌صورت متقارن نسبت به مسیر کانال آبراهه‌ها و با عرض کلی ۵۶۶ متر تشکیل گردیدند (شکل ۴). داده‌های ارتفاع در این پروفیل‌های حائل‌دار در سه پنجره با عرض‌های تقریبی $W1 = 189$ ، $W2 = 363$ و $W3 = 566$ مورد ارزیابی قرار گرفتند (عرض پنجره‌ها به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد و اعداد برحسب متر می‌باشند). فاصله بین نقاط نمونه‌برداری در طول مسیر آبراهه‌ها تقریباً ۲۶ متر و در عرض مقاطع (در پنجره‌ها) ۱۴/۵ متر می‌باشد. سمت راست و چپ آبراهه‌ها براساس نگاه از بالا دست به سمت پایین دست رودخانه تعیین گردید. در طول هر آبراهه و برای هر یک از سه پنجره تعیین‌شده ارتفاع میانگین توپوگرافی در طرف راست \bar{e}_R و چپ \bar{e}_L آبراهه در روی مقاطع عرضی به‌طور مجزا و به‌صورت روابط ۱ و ۲ محاسبه گردید:

$$\bar{e}_R = \sum \bar{e}_{Rn} / n \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\bar{e}_L = \sum \bar{e}_{Ln} / n$$

که در این روابط n تعداد نقاط نمونه‌برداری در طول خط تصویر در مقاطع عرضی را نشان می‌دهد؛ سپس اختلاف به‌دست آمده برای هر پنجره در هر مقطع عرضی به نقطه تلاقی خط پروفیل عرضی با خط پروفیل آبراهه اختصاص داده شد. به‌طور نظری اختلاف نسبی ارتفاع میانگین طرفین آبراهه‌ها δ_e در روی مقطع عرضی مابین صفر و بی‌نهایت تغییر می‌کند، اما در عمل مقدار این پارامتر با تغییرات اندک در اطراف عدد ۱ نوسان می‌کند. بنابراین می‌توان مقادیر ارتفاع میانگین سمت راست و چپ در طول آبراهه‌های مختلف را در یک نمودار رسم کرده و با استفاده از برزاش خطی که عرض از مبداء آن از صفر عبور می‌کند، مقدار شیب (b) خط راست برزاش شده را به‌دست آورد. در صورتی که \bar{E}_R و \bar{E}_L به ترتیب ارتفاع میانگین سمت راست و چپ پروفیل حائل‌دار در نظر گرفته شود، $b > 1$ و $b < 1$ خواهد بود اگر به ترتیب $\bar{E}_L \bar{E}_R >$ و $\bar{E}_L \bar{E}_R <$ باشد.

استمرار طولانی‌تر آن می‌باشد؛ زیرا هندسه گسل معکوس و نوع حرکت در امتداد سطح گسلی باعث کوتاه‌شدگی پوسته و جایگیری توده سنگی بیشتر در راستای شاقولی در محل گسلس می‌شود (McLeish, 1992; Moores and Twiss, 1995). در نتیجه، فرایندهای فرسایشی نیاز به مدت زمان بیشتری جهت فرسایش ماده بالآمده و فرسایشی سطح آزاد توده سنگی (دیواره دره) دارند. بنابراین هندسه و عملکرد گسل‌ها ایجاب می‌کند، گسل‌هایی که مولفه شیب‌لغز در آن‌ها از نوع معکوس یا راندگی است در مقایسه با آن‌هایی که دارای مولفه از نوع نرمال می‌باشند، در تعامل با فرایندهای فرسایشی باعث ایجاد دره‌هایی با شیب بیشتر و دیواره مرتفع‌تر می‌شوند.

با توجه به این‌که حوضه‌های مورد بررسی مربوط به قسمت‌های بالادستی رودخانه و نزدیک به آب‌پخش‌شان هستند، انرژی آب در این آبراهه‌ها خصوصاً در جهت عمود بر آبراهه‌ها زیاد نبوده و فرایند فرسایشی و کاهش شیب در دیواره‌های دره به‌صورت فرایندهای "تامین-محدود" (Huggett, 2007) خواهد بود. در این شرایط تغییر شیب عمدتاً از طریق سقوط و لغزش توده‌های سنگی صورت می‌گیرد. در نتیجه، تغییرات ارتفاع در طرفین آبراهه‌ها بیشتر در ارتباط با فعالیت‌های فیزیکی (زمین‌ساختی، نیروی ثقل، تغییر حجم مایع بین منفذی و باد) خواهد بود. بنابراین فضایابی پهنه‌های ضعیف‌شده با منشأ زمین‌ساختی، تغییرات محلی ارتفاع در اطراف پهنه‌های حائل درجه دوم را تحت تاثیر قرار خواهد داد. بدین صورت که فعالیت متمرکزتر در پهنه‌های گسلی باعث ضعیف‌شدگی بیشتر، تاثیر بیشتر فرایندهای فرسایشی و در نتیجه کاهش محلی ارتفاع می‌شود. تغییر در تنگ‌شدگی یا عریض‌شدگی پهنه تغییر شکل فعال، در ارتباط با نرم‌شدگی و اتنش و یا سخت‌شدگی و اتنش در محل پهنه‌های برشی می‌باشد. درحالی‌که نرم‌شدگی و اتنش باعث تمرکز تغییر شکل و تشدید آن می‌شود، سخت‌شدگی و اتنش باعث کاهش تمرکز تغییر شکل و عریض شدن محدوده پهنه تغییر شکل (با تغییر محل تمرکز فعالیت از درون پهنه برشی به سمت دیواره‌های آن) می‌شود (Davis and Reynolds, 1996; Wibberley et al., 2008)

1. Watershed
2. Supply-limited

شاخص عدم تقارن

علاوه بر مطالعه مربوط به ارتفاع توپوگرافی، شاخص عدم تقارن (AF) برای حوضه زهکشی آبراهه‌های انتخاب شده با محاسبه مساحت کل حوضه و نیز سمت راست حوضه (سمت راست آبراهه با نگاه به سمت پایین دست آبراهه) و براساس رابطه ۳ تعیین گردید:

$$\text{رابطه (۳)} \quad AF=100(A_r/A_l)$$

در این رابطه A_r مساحت سمت راست حوضه و A_l مساحت کل حوضه می‌باشد. این شاخص می‌تواند اطلاعاتی در مورد کج‌شدگی زمین‌ساختی در مقیاس حوضه زهکشی و یا مناطق بزرگ‌تر ارائه کند (Keller and Pinter, 1996).

نتایج

بررسی پروفیل حائل دار درجه اول (مربوط به کل سطح پهنه تغییر شکل) بیان‌گر تغییر محسوس ارتفاع در امتداد W-NW-E-SE است، به طوری که ارتفاع به سمت E-SE افزایش می‌یابد (شکل ۳). در حالی که تغییرات مربوط به ارتفاع حداکثر بین آبراهه‌های شماره ۸ تا ۵ به صورت تیز و مثبت (افزایش ارتفاع) است، مقدار این تغییر مثبت بین آبراهه‌های ۵ تا ۳ کم می‌باشد. از طرف دیگر، تغییرات مربوط به ارتفاع حداقل دارای روند عمومی مثبت ولی غیر یکنواخت است. بررسی اختلاف ارتفاع مابین ارتفاع حداکثر و حداقل نشان می‌دهد که این اختلاف در حدفاصل بین آبراهه‌های شماره ۶ تا ۴ نسبت به دیگر مناطق زیاد می‌باشد. منحنی مربوط به ارتفاع متوسط نیز نشان‌گر افزایش مداوم و نرم (برجستگی ملایم) ارتفاع در پهنه انتهایی گسلی به سمت E-SE می‌باشد.

بررسی کل منحنی‌های به دست آمده حاکی از آن است که به غیر از منحنی مربوط به ارتفاع در روی خط پروفیل که محل آبراهه‌ها و دره‌های مربوطه را نشان می‌دهد، نمی‌توان ارتباطی مستقیم و سیستماتیک بین دیگر منحنی‌ها و

عوارض ساختاری- توپوگرافیک (مناطق ضعیف‌شدگی ناشی از فعالیت‌های زمین‌ساختی- آبراهه‌ها) مشاهده کرد. در کل می‌توان گفت که تشکیل پروفیل حائل دار برای کل پهنه تغییر شکل علی‌رغم این که الگوی تغییر ارتفاع را برای پهنه مشخص می‌کند ولی به دلیل اعمال تجمیع و میانگین‌گیری، جزئیات الگوی تغییر ارتفاع را آشکار نمی‌کند.

در بررسی پروفیل‌های حائل دار درجه دوم (مربوط به پهنه‌های اطراف آبراهه‌ها) مشاهدات مربوط به توزیع b (شکل ۵) منحنی‌های مربوط به δ برای تمامی آبراهه‌ها و در سه پنجره متفاوت (شکل ۶) حاکی از آن است که:

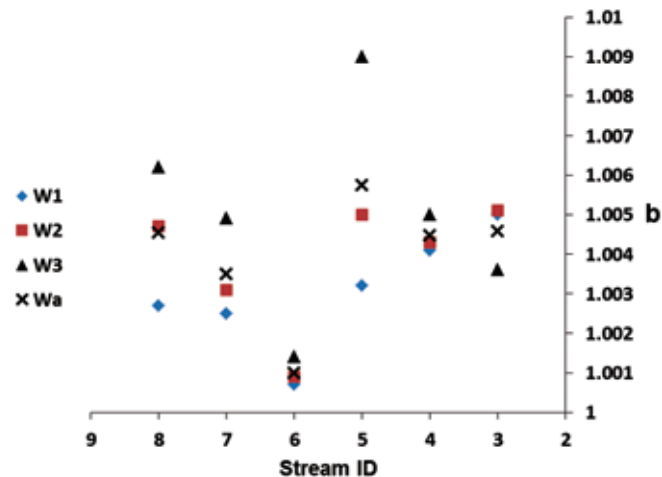
۱. مقدار b برای تمامی آبراهه‌ها در هر سه پنجره بیشتر از ۱ بوده و علامت آن مثبت می‌باشد. به عبارت دیگر، طرف راست آبراهه‌ها نسبت به طرف چپ دارای ارتفاع بیشتری است.

۲. در امتداد آبراهه‌های مورد بررسی به غیر از آبراهه شماره ۳ (شماره ۴ تا ۸)، مقدار b با افزایش عرض پنجره افزایش می‌یابد. در آبراهه شماره ۳، مقدار b پنجره سوم به جای افزایش، کاهش می‌یابد.

۳. با در نظر گرفتن تغییرات b در مورد هر یک از آبراهه‌ها، بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین تغییر b به ترتیب مربوط به آبراهه شماره ۵ و شماره ۶ می‌باشند. بیشترین مقدار تغییر b در میان پنجره‌ها مربوط به پنجره سوم می‌باشد.

۴. مقادیر b متوسط به دست آمده از میانگین‌گیری b هر سه پنجره (W_a) برای تمامی آبراهه‌ها روندی نزدیک به افق را نشان می‌دهد. این مقادیر متوسط به مقادیر b پنجره دوم نزدیک هستند. مقدار متوسط b به دست آمده از داده‌های پنجره متوسط برابر با ۱/۰۰۴ می‌باشد.

۵. در حالی که مقادیر b مربوط به پنجره اول روندی عموماً صعودی از سمت شمال غرب به سمت جنوب شرق نشان می‌دهند، داده‌های پنجره سوم روند عمومی نزولی را نشان می‌دهند.



شکل ۵. توزیع شیب b منحنی مربوط به اختلاف نسبی ارتفاع میانگین طرفین آبراهه‌ها (δ) برای سه پنجره با عرض متفاوت (W1, W2, W3)، به علاوه مقادیر b متوسط به دست آمده از میانگین‌گیری b برای هر سه پنجره (Wa)

زمین ساختی از نوع فشارشی در جهت شرق جنوب شرق و یا به افزایش فعالیت‌های زمین ساختی از نوع کششی در جهت غرب شمال غرب نسبت داد. افزایش اختلاف ارتفاع بین منحنی‌های مربوط به ارتفاع حداقل و حداکثر در منطقه مابین آبراهه‌های شماره ۴ تا ۶ و نیز وجود اختلاف ارتفاع مشابه (با یکدیگر) ولی کمتر در طرفین این منطقه حاکی از تشدید فعالیت زمین ساختی در این محدوده میانی می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت که مطالعه تغییرات توپوگرافی در کل سطح پهنه حائل (پهنه حائل درجه اول) علی‌رغم تعیین الگوی فعالیت زمین ساختی، در مورد مکانیسم تشکیل آن (نوع گسل‌های موثر در داخل پهنه تغییر شکل) اطلاعات تعیین‌کننده در اختیار قرار نمی‌دهد.

بررسی شاخص عدم تقارن حوضه‌های آبریز، اختلاف نسبی ارتفاع میانگین و شیب سطحی در طرفین آبراهه‌ها از روش‌هایی هستند که می‌توان از آن‌ها برای تعیین توپوگرافی نامتقارن و متعاقباً شناسایی فعالیت گسل‌های درگیر (در مجاور مسیر آبراهه) استفاده کرد. در مقیاس پهنه حائل درجه اول، مقادیر شاخص عدم تقارن محاسبه شده حاکی از کج‌شدگی حوضه‌ها به سمت جنوب شرق می‌باشند (شکل ۲). با توجه به این‌که در محدوده این پهنه حائل، ارتفاع از سمت غرب شمال غرب به سمت شرق جنوب شرق (موازی با پهنه حائل 293° - 113°) و نیز از سمت جنوب جنوب غرب به

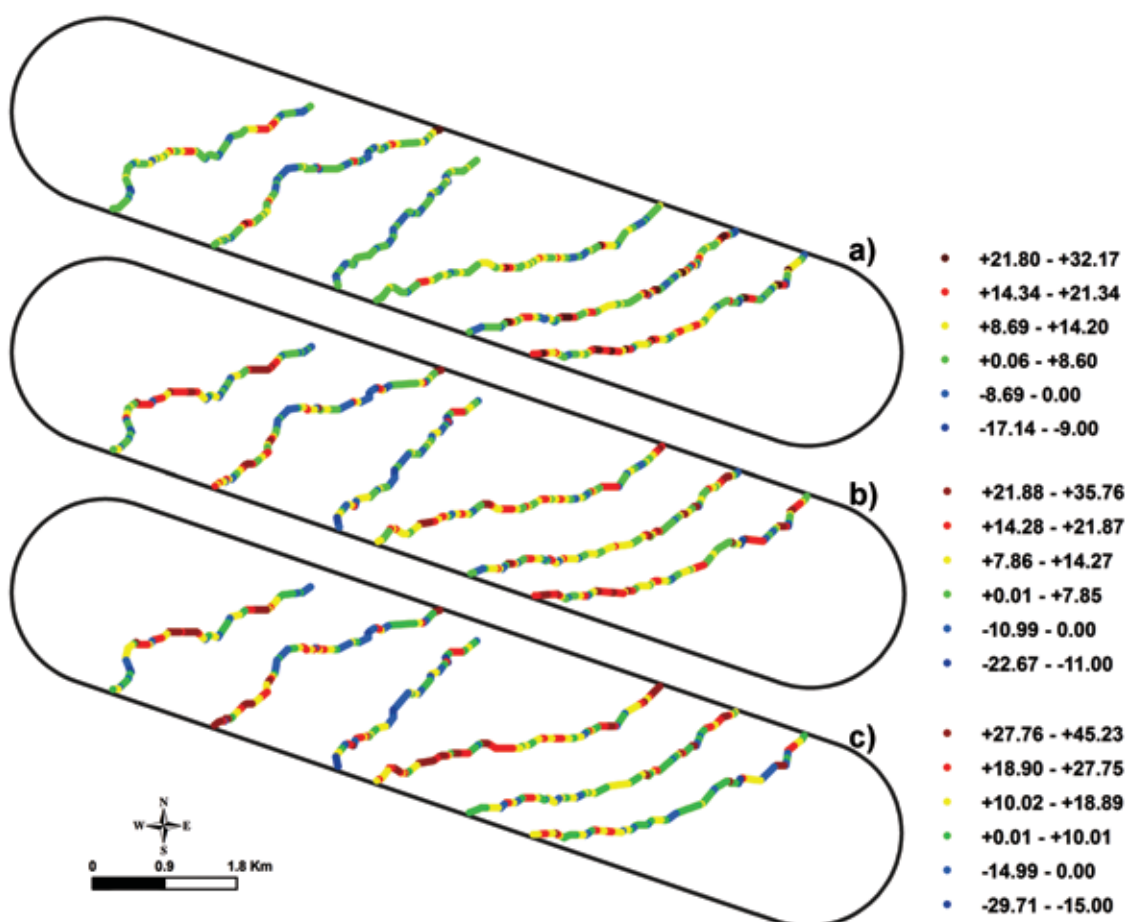
محاسبه شاخص عدم تقارن حوضه‌های مربوط به آبراهه‌های انتخاب شده نشان می‌دهد که به غیر از حوضه مربوط به آبراهه شماره ۳، تمامی حوضه‌ها دارای مقدار شاخص عدم تقارن بیشتر از ۵۰ می‌باشند (شکل ۲). به عبارت دیگر، نسبت به آبراهه‌ها، سمت راست حوضه‌ها در مقایسه با سمت چپ دارای مساحت بیشتری است. در میان حوضه‌های آبریز کمترین و بیشترین مقدار عدم تقارن به ترتیب مربوط به حوضه‌های شماره ۳ و ۵ می‌باشد.

بحث

با توجه به این‌که توپوگرافی، برآیند فرایندهای بالآمدگی و فرسایش می‌باشد، افزایش ارتفاع توپوگرافیک بیان‌گر چیرگی فرایندهای بالآمدگی نسبت به فرسایشی می‌باشد. در همین راستا، در پهنه انتهایی گسلی اطراف قوزلو (پهنه حائل درجه اول)، روند مثبت تغییر ارتفاع از سمت غرب شمال غرب به سمت شرق جنوب شرق پهنه می‌تواند نشان‌گر افزایش نسبی در شدت نیروهای بالآمدگی نسبت به نیروهای فرسایشی باشد (شکل ۳). این افزایش نسبی را می‌توان از روند مثبت ارتفاع حداقل مشاهده شده نیز استنباط کرد؛ بدین نحو که روند صعودی مقدار ارتفاع حداقل، نشان‌گر بالآمدگی نسبی سطح تراز محلی به سمت شرق جنوب شرق است. این افزایش را می‌توان به افزایش فعالیت‌های

آن‌ها در بلافصل کانال آبراهه‌ها بیشتر می‌باشد (شکل ۷). نظر به شیب سطحی مذکور و اختلاف در مقادیر بالآمدگی (بالآمدگی بیشتر سمت راست)، افزایش ارتفاع نسبی در جهت شرق جنوب شرق در کل پهنه تغییر شکل (شکل ۳) و همچنین شواهد زمین‌شناسی (مرتبط بودن پهنه گسلی با گسل راست‌گرد شمال تبریز و نیز شیب لایه‌بندی به سمت شمال شرق در داخل پهنه گسلی) می‌توان تشکیل دره‌های گسلی (پرتگاه‌های گسلی) را مرتبط با گسل‌هایی با مولفه معکوس و یا رانده دانست و مکان هندسی این آبراهه‌ها را به‌عنوان پهنه‌های گسلی دارای مولفه معکوس در نظر گرفت که در اطراف آن‌ها بلوک سمت راست پهنه گسلی (آبراهه) روی بلوک سمت چپ رانده می‌شود. بنابراین در کل می‌توان مکانیسم موثر در شکل‌گیری توپوگرافی مشاهده‌شده را به رژیم فشارشی و گسلش معکوس و یا رانده مرتبط با تغییر شکل برشی ساده نسبت داد.

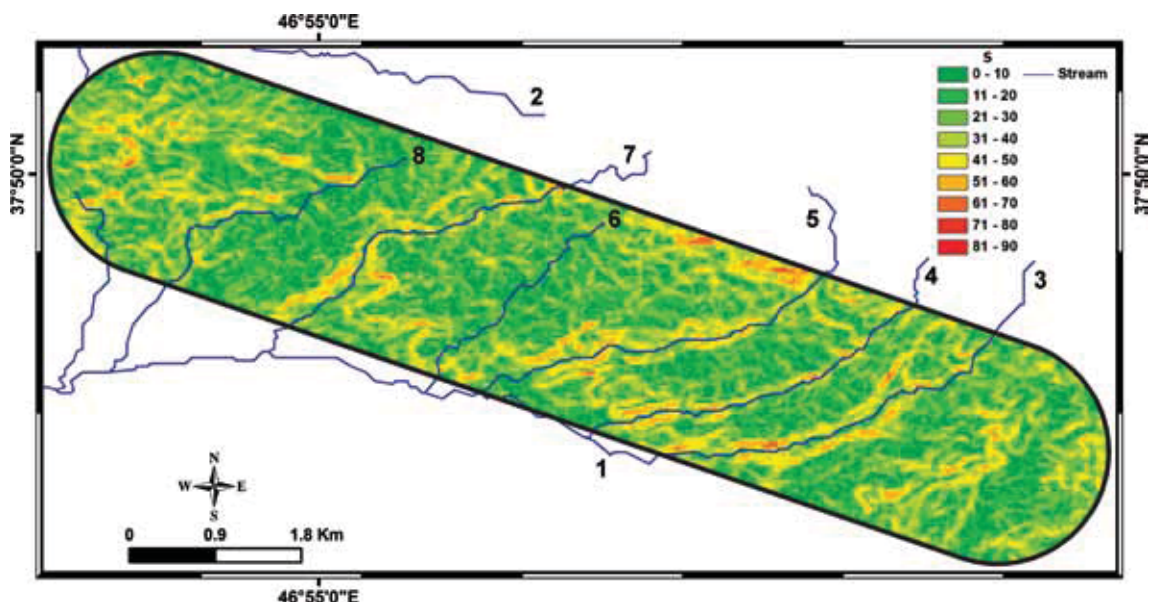
شمال شمال شرق (عمود بر امتداد پهنه حائل 203° - 233°) افزایش می‌یابد (شکل ۳)، می‌توان گفت که در سطح کل پهنه، ارتفاع به سمت شرق شمال شرق افزایش می‌یابد. بنابراین الگوی کج‌شدگی و افزایش ارتفاع مذکور نشان می‌دهد که بالآمدگی در سمت راست حوضه‌ها نسبت به سمت چپ آن‌ها بیشتر است. در ارتباط با پهنه‌های حائل درجه دوم نیز چیرگی مقادیر مثبت δ در طول آبراهه‌ها (شکل ۶) و نیز مقادیر b بالاتر از ۱ برای تمامی آبراهه‌ها در تمامی پنجره‌ها (شکل ۵) نشان‌گر غلبه داشتن نیروهای بالآمدگی نسبت به نیروهای فرسایشی در سمت راست محدوده حائل اطراف آبراهه‌ها است که خود را در وجود توپوگرافی مرتفع‌تر و به‌عبارت دیگر در وجود بیشتر مواد تشکیل‌دهنده زمین نسبت به فضای خالی نشان می‌دهد. از طرف دیگر، بررسی شیب سطحی در کل پهنه نشان می‌دهد که عموماً شیب دیواره دره‌ها در سمت راست آبراهه‌ها نسبت به سمت چپ



شکل ۶. تغییرات نقطه به نقطه اختلاف نسبی ارتفاع میانگین طرفین آبراهه‌ها (δ) برای سه پنجره با عرض متفاوت؛ a، b و c به ترتیب مربوط به W1، W2 و W3 هستند. اعداد نشان داده‌شده در شرح و اختصارات هر نقشه مربوط به مقادیر δ بوده و برحسب متر هستند

فعالیت در محدوده حدفاصل آبراهه‌های مذکور است، مقدار پایین b در هر سه پنجره برای آبراهه شماره ۶ نشان‌گر جوان بودن فعالیت‌های زمین‌ساختی و فرسایش در اطراف این آبراهه بوده که خود حاکی از جوان بودن پهنه گسلی مربوطه می‌باشد. فعالیت‌های زمین‌ساختی در مجاور آبراهه شماره ۴ نیز با توجه به مقادیر بالا (با b تقریبی $1/004$) و نزدیک به هم b حائز اهمیت است. این نزدیکی مقادیر می‌تواند اشاره به مشابه بودن شرایط زمین‌ساختی در عرض هر سه پنجره باشد.

در صورتی که مقدار متوسط b حاصل از پنجره متوسط به کل پهنه انتهایی گسلی تعمیم داده شود، می‌توان گفت که اختلاف نسبی بالآمدگی در طرفین آبراهه‌ها در حدود $1/004$ است (شکل ۵). در نگاه جزئی‌تر، براساس مقادیر پارامتر b ، می‌توان گفت که بیشترین مقدار فعالیت‌های زمین‌ساختی در مجاور آبراهه شماره ۵ (با b تقریبی $1/005$) و کمترین آن‌ها در اطراف آبراهه شماره ۶ (با b تقریبی $1/001$) صورت می‌پذیرد. در حالی که، وجود بیشترین اختلاف بین منحنی ارتفاع حداکثر و حداقل مابین آبراهه‌های ۶ تا ۴ موید افزایش



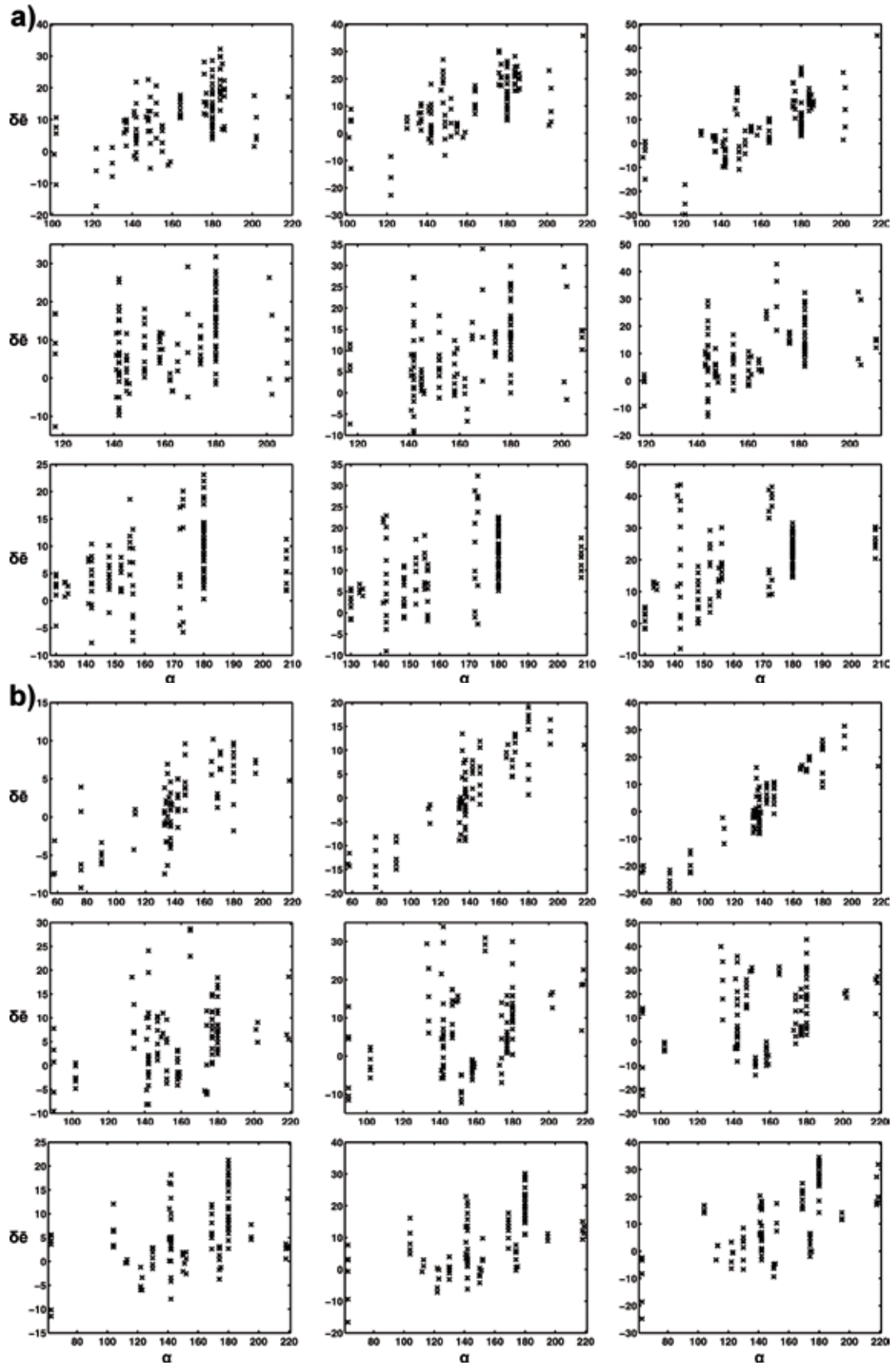
شکل ۷. تغییرات شیب سطحی در داخل پهنه حائل درجه اول؛ S درجه شیب سطحی را نشان می‌دهد

آبراهه به‌واسطه افزایش فعالیت‌های زمین‌ساختی متمرکز (پهنه‌های با نرم‌شدگی و آتشنش)، (۳) تاثیر هم‌زمان دو فرایند بالا و (۴) وجود سنگ‌شناسی مقاوم در سمت راست آبراهه نسبت به سمت چپ آن نسبت داد. به‌عنوان مثال این تغییر شدید را می‌توان در آبراهه شماره ۵ مشاهده کرد، جایی که b مربوط به پنجره سوم نسبت به دو پنجره قبلی خیلی افزایش یافته است. این افزایش مربوط به کاهش ارتفاع توپوگرافی به دلیل قرار گرفتن حاشیه پنجره در حوضه مجاور (حوضه‌ای خیلی کوچک مابین حوضه‌های مربوط به آبراهه‌های ۴ و ۵) (شکل ۲) که در نزدیکی گسل رده پایین‌تر است) در جایی می‌باشد که فعالیت‌های شدید و متمرکز زمین‌ساختی در

با توجه به این که تغییر در توپوگرافی و یا در نسبت مواد تشکیل‌دهنده زمین به فضای خالی حاصل برآیند فرایندهای زمین‌شناسی/ زمین‌ساختی و فرسایش است، تفسیر داده‌ها براساس هر دو نوع فرآیند بایستی به‌صورت هم‌زمان صورت گیرد. برای مثال، در این بررسی با توجه به این که تغییرات ارتفاع در طرفین آبراهه‌ها در پنجره‌هایی با عرض فزاینده مورد بررسی قرار گرفته است، افزایش شدید مقدار b برای پنجره‌ای با عرض بیشتر را می‌توان به (۱) افزایش شدید ارتفاع در سمت راست آبراهه به موجب کمی نرخ هوازدگی که در کل باعث چیرگی بالآمدگی زمین‌ساختی بر فرسایش می‌شود. (۲) افزایش فرسایشی و کاهش شیب در سمت چپ

بیان‌گر اعمال یک نیروی فشارشی در امتداد NNW-SSE می‌باشد. این امتداد با امتداد قطعه مجاور گسل شمال تبریز (120°) و گسل اصلی جنوبی محدودکننده پهنه انتهایی گسلی قوزلو (115°) به ترتیب زاویه 40° و 45° تشکیل می‌دهد. این زوایا با امتداد حداکثر تنش فشاری ایده‌آل جهت تشکیل پهنه برشی گسل شمال تبریز و نیز پهنه انتهایی گسلی قوزلو کاملاً انطباق دارد. امتداد N20W-S20E همچنین در مقیاسی بزرگ‌تر با امتداد حداکثر کوتاه‌شدگی تقریبی N-S به دست آمده از بررسی داده‌های (GPS (Vernant et al., 2004)، امتداد عمومی NW-SE به دست آمده از حل مکانیسم کانونی زلزله‌ها (Talebian and Jackson, 2002) مرادی سیاهکلی و همکاران، 1387) و در مقیاس محلی نیز با جهت‌یافتگی ماکزیم تنش فشارشی ($355^\circ/11^\circ$) به دست آمده از مطالعات دیرینه‌تنش در ارتفاعات مشرف به گسل شمال تبریز و بستان آباد، واقع در سمت شمال غرب پهنه انتهایی گسلی قوزلو (Yousefi-Bavil, 2013) در تطابق می‌باشد.

کنار پهنه گسلی اصلی امری مورد انتظار است. بررسی توزیع آزیموتی پارامتر δ در هر سه پنجره و برای تمامی آبراهه‌ها (شکل 8) نشان‌گر تمرکز مقادیر بالای δ در طول قسمت‌هایی از آبراهه‌ها با امتداد شرق-غرب (پروفیل‌های عرضی با آزیموت 180°) و شمال شرق-جنوب غرب (پروفیل‌های عرضی با آزیموت 140°) است. علاوه بر این، توزیع آزیموتی δ اغلب بین این دو آزیموت می‌باشد. این بدان معناست که امتداد قسمت‌های مختلف آبراهه‌ها در پهنه انتهایی گسلی قوزلو عموماً بین 05° تا 09° در تغییر است. این تکرار و بالا بودن مقادیر بالآمدگی (مقادیر مثبت) در آزیموت‌های بین 140° تا 180° با در نظر گرفتن انطباق مکانی مابین آبراهه و گسل نشانه افزایش نیروهای فشارشی در راستای موازی با امتدادهای مرتبط می‌باشد. با توجه به توزیع آزیموتی مذکور می‌توان آزیموت 160° را به‌عنوان آزیموت عمومی و متوسط که در امتداد مربوط به آن ($160^\circ-340^\circ$) بیشترین مقدار بالآمدگی و کوتاه‌شدگی مشاهده می‌شود، محسوب کرد. بنابراین، الگوی بالآمدگی مذکور



شکل ۸. توزیع آزیموتی پارامتر δ در هر سه پنجره و برای تمامی آبراهه‌ها؛ α آزیموت را برحسب درجه نشان می‌دهد. نمودارها از چپ به راست به ترتیب مربوط به پنجره‌های اول تا سوم و از بالا به پایین مربوط به آبراهه‌های ۳ تا ۸ می‌باشند. (a) آبراهه‌های ۳-۵، (b) آبراهه‌های ۶-۸

نتیجه‌گیری

در پهنه انتهایی گسلی اطراف قوزلو بررسی‌های مربوط به توپوگرافی (به‌واسطه مطالعه تغییرات نسبی ارتفاع در پهنه‌های حائل دار در دو مقیاس کل پهنه و پهنه‌های اطراف آبراهه‌ها)، تغییرات شیب، شاخص عدم تقارن و اطلاعات زمین‌شناسی نشان می‌دهند که:

۱. الگوی آزیموتی بالآمدگی در پهنه مذکور بیان‌گر آن است که امتداد حداکثر جهت کوتاه‌شدگی و فشارش N20W-S20E می‌باشد که با نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری‌های GPS و حل مکانیسم کانونی زلزله‌ها (در مقیاسی بزرگ‌تر در منطقه شمال غرب ایران) و نیز نتایج حاصل از مطالعات دیرینه‌تنش در مجاور گسل شمال تبریز در نزدیکی پهنه انتهایی گسلی قوزلو (در مقیاسی کوچک‌تر) مطابق می‌باشد.

۲. ارتباط بین جهت‌گیری مذکور و امتداد گسل شمال تبریز به‌عنوان مرز جنوب غربی پهنه تغییر شکل موید تشکیل پهنه انتهایی گسلی در نتیجه برش ساده در پایانه فشاری آن است.

۳. افزایش هم‌زمان ارتفاع به سمت شمال شرق و جنوب شرق، کج‌شدگی حوضه‌ها به سمت جنوب شرق، شیب سطحی بیشتر در سمت راست آبراهه‌ها، شیب‌دار بودن لایه‌ها به سمت شمال شرق و نیز اثر سطحی گسل‌های معین‌شده در پهنه گسلی همگی اشاره بر این نکته دارند که پهنه انتهایی گسلی قوزلو به احتمال زیاد یک ساختار دم‌اسبی از نوع انقباضی است و گسل‌های منشعب‌شده از گسل رده پایین‌تر انتظار می‌رود تا دارای مولفه شیب‌لغز معکوس و یا رانده باشند؛ هر چند که تایید این استنباط نیازمند اندازه‌گیری‌های ساختاری در صحرا می‌باشد.

۴. در داخل پهنه انتهایی گسلی قوزلو انتظار می‌رود بیشترین فعالیت زمین‌ساختی در اطراف پهنه گسلی مربوط به آبراهه شماره ۵ باشد، جایی که متوسط اختلاف نسبی ارتفاع میانگین در طرفین آبراهه‌ها بیشترین مقدار را دارا می‌باشد (بزرگ‌ترین b). بیشترین انحراف مابین منحنی‌های حداکثر و حداقل ارتفاع نسبت به منحنی ارتفاع متوسط در طرفین این آبراهه نیز موید تشدید جابجایی نسبی شاقولی در اطراف پهنه گسلی مربوطه است. کمترین مقدار فعالیت نیز انتظار

می‌رود در اطراف پهنه گسلی مربوط به آبراهه شماره ۶ باشد، جایی که متوسط اختلاف نسبی ارتفاع میانگین کمترین مقدار را دارد (کوچک‌ترین b).

این نتایج اطلاعات مهمی در باره ساختار زمین‌ساختی پهنه انتهایی گسلی قوزلو فراهم کرده و دانش ما را در مورد تغییر شکل درون پهنه گسلی شمال تبریز بهبود می‌بخشد. از این اطلاعات می‌توان به‌عنوان داده‌های پایه برای دیگر مطالعات ساختاری و زمین‌ساختی استفاده کرد. همچنین این بررسی اهمیت کاربرد پروفیل‌های حائل دار طولی آبراهه‌ها جهت حصول مستقیم داده‌های زمین‌ساختی از توپوگرافی را نشان می‌دهد.

سپاسگزاری

ما تشکر و قدردانی خود را از داوران محترم که با ارائه نظرات سازنده باعث بهبود این مقاله شدند، ابراز می‌داریم.

منابع:

- آقا نباتی، آ.، ۱۳۸۵. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۶.
- بهروزی، آ.، امینی فضل، آ.، امینی آذر، ب.، امامی، م.ح.، عزتیان، ف.، داوری، م.، هادوی، ف. و پرتو آذر، ح.، ۱۳۵۶. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش بستان آباد- برگه ۵۳۶۵. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- مرادی سیاهکلی، ع.، تاتار، م.، هاتسفلد، د. و پل، آ.، ۱۳۸۷. مطالعه ساختار سرعتی پوسته و سازوکار گسلس در زون گسلی امتداد لغز تبریز. علوم زمین، ۷۰، ۱۵۳-۱۴۰.
- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. Geological Society of American Bulletin, 103, 8, 983-992.
- Barrow-Huribert, S.A., 1985. Geology and neotectonics of the Upper Nevis Basin, South Island, New Zealand. MSc thesis, Oregon State University, 161.
- Cartwright, J.A. and Mansfield, C.S., 1998. Lateral displacement variation and lateral tip geometry of normal faults in Canyonlands National Park, Utah. Journal of Structural Geol-

- ogy, 20, 1, 3-19.
- Chinnery, M.A., 1966. Secondary faulting: II. Geological aspects. Canadian Journal of Earth Sciences, 3, 2, 175-190.
 - Davis, G.H. and Reynolds, S.J., 1996. Structural Geology of Rocks and Regions. 2nd edition, John Wiley and Sons, Incorporated, 776.
 - de Joussineau, G. and Atilla, A., 2009. Segmentation along strike-slip faults revisited. Pure and Applied Geophysics, 166, 1575-1594.
 - Eftekhar-Nezhad, A., 1975. Brief description of tectonic history and structural development of Azarbaijan. Internal Report, Geological Survey of Iran, 1-8.
 - Huggett, R.J. 2007. Fundamentals of Geomorphology. 2nd edition, Routledge, London, 458.
 - Jaeger, C., 2009. Rock Mechanics and Engineering, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 523.
 - Jaeger, J.C., Cook, N.G.W. and Zimmerman, R.W., 2007. Fundamentals of Rock Mechanics. 4th edition, Blackwell Publishing, Oxford, UK, 475.
 - Karakhaniana, A.S., Trifonovb, V.G., Philip, H., Avagyana, A., Hessamid, K., Jamalie, F., Bayraktutan, M.S., Bagdassariana, H., Arakeliana, S., Davtian, V. and Adilkhanyan, A., 2004. Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and northwestern Iran. Tectonophysics, 380, 189-219.
 - Katz, O., Reches, Z., and Baer, G., 2003. Faults and their associated host rock deformation: Part I. Structure of small faults in a quartz-syenite body, southern Israel. Journal of Structural Geology, 25, 1675-1689.
 - Keller, E.A. and Pinter, N., 1996. Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape. Prentice Hall, New Jersey, USA, 338.
 - McLeish, A., 1992. Geological Science. Nelson Thornes, UK, 308.
 - Moores, E.M. and Twiss, R.J., 1995. Tectonics. Freeman and Company, New York, 415.
 - Shipton, Z. and Cowie, P., 2001. Damage zone and slip-surface evolution over μm to km scales in high-porosity Navajo sandstone, Utah. Journal of Structural Geology, 23, 1825-1844.
 - Talebian, M. and Jackson, J.A., 2002. Offset on the Main Recent Fault of the NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia-Eurasia collision zone. Geophysical Journal International, 150, 422-439.
 - Vernant, P., Nilforushan, F., Hatzfeld, D., Abbasi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinold, J., Ashtiani, A., Tavakoli, F. and Chery, J., 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. Geophysical Journal International, 157, 38-398.
 - Wibberley, C.A.J., Kurz, W., Imber, J., Holdsworth, R.E. and Colletini, C., 2008. The Internal Structure of Fault Zones: Implications for Mechanical and Fluid-Flow Properties. Geological Society, London, Special Publications, 367.
 - Kim, Y.S., Andrews J.R. and Sanderson, D.J., 2001. Reactivated strike-slip faults: examples from north Cornwall, UK. Tectonophysics, 340, 173-194.
 - Yousefi-Bavil, A., 2012. Longitudinal profiles of bedrock rivers around North Tabriz and North Misho faults: implications for geomorphic fault segmentation (Eastern Azerbaijan province, Iran). Academy of Sciences Malaysia's Science Journal 6, 2, 107-121.
 - Yousefi-Bavil, A., 2013. Kinematical and superficial-geometrical study of North Tabriz-North Misho faults (segmentation). Unpublished PhD thesis, Geology Institute of Azerbaijan, 233.