

تحلیل ساختاری گسل اصلی جوان زاگرس و ارتباط آن با گسل وارون اصلی زاگرس در کردستان

شهریار صادقی^۱، علی یساقی^۲، محمد فتح الهی^۱

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۲ دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۹/۰۸

چکیده

در این نوشتار ارتباط ساختاری دو سیمای ساختاری مهم زمین درز زاگرس یعنی گسل اصلی جوان زاگرس (MRF) و گسل وارون اصلی زاگرس (MZRF) در کردستان مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی این ارتباط به حل مسائل مرتبط با زمین درز زاگرس همچون تکامل ساختاری و لرزه زمین ساخت آن کمک می کند. بر پایه این بررسی، در حدود عرض جغرافیایی ۳۶°، قطعه سردشت گسل اصلی جوان زاگرس به گسل وارون اصلی زاگرس برخورد می کند و به سمت جنوب خاور این محل برخورد، تنها گسل اصلی جوان زاگرس مرز میان کمر بند چین خورده-رانده زاگرس و پهنه سنندج-سیرجان را تشکیل می دهد. در این محل قطعات بریده شده از گسل وارون اصلی زاگرس در پهنه گسل اصلی جوان زاگرس دیده می شود که این امر دیرین تر بودن گسل وارون اصلی زاگرس را نشان می دهد. این بررسی نشان می دهد که گسل اصلی جوان زاگرس در حد واسط گسل های پیرانشهر در شمال باختر و گسل مریوان در جنوب خاور، یعنی در میان عرض های جغرافیایی ۳۵° ۳۰' و ۳۶° ۳۰' تغییر روند داده به گونه ای که در راستای گسل خمیدگی ایجاد شده است. در حاشیه های جنوب باختری و شمال خاوری این خمیدگی به ترتیب گسل های سردشت و بانه برداشت شده اند که سازوکار آنها دارای مؤلفه حرکتی عادی است. با در نظر گرفتن ویژگی های هندسی و جنبشی و میدان تنش دیرینه بخش خمش یافته گسل اصلی جوان زاگرس (گسل سردشت) می توان گفت که این گسل بخشی از گسل اصلی جوان زاگرس با راستای N30W است و به دلیل انحراف نسبت به بردار جابه جایی اصلی N60W دارای مؤلفه کشش شده است. بنابراین گسل سردشت به طور همزمان جنبش های امتدادلغز و ترافشارشی مرز میان پهنه سنندج-سیرجان و زاگرس چین خورده-رانده و جنبش های کششی حاصل از خمش به سمت راست گسل اصلی جوان زاگرس را تحمل کرده است. تحلیل تنش دیرینه (با استفاده از روش برگشتی چند مرحله ای) برای جنبش های مختلف، میدان های تنش مجزایی را نشان می دهد؛ میدان های تنش دیرینه با میدان های تنش حاصل از حل کانونی زمین لرزه های مرتبط با راستای زمین درز زاگرس هماهنگی دارند که نشان دهنده جوان بودن میدان تنش به دست آمده از روش برگشتی است. در اثر جابه جایی گسل وارون اصلی زاگرس توسط گسل سردشت، افت قائم قابل توجهی در گسل وارون اصلی زاگرس ایجاد شده است که به این دلیل، در شمال باختر گسل اصلی جوان زاگرس، میان عرض های جغرافیایی ۳۵° ۲۰' و ۳۶° ۰۰'، گسل وارون اصلی زاگرس در سطح زمین بروز نداشت.

کلیدواژه ها: گسل اصلی جوان زاگرس، گسل وارون اصلی زاگرس، تنش دیرینه، زمین درز زاگرس.

*نویسنده مسئول: علی یساقی

E-mail: yassaghi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

راست بر و وارون با مؤلفه امتدادلغز رخ داده است. حرکت امتدادلغز این گسل به دلیل مورب بودن بردار جابه جایی این گسل نسبت به خط درز زاگرس است. به این ترتیب که کوتاه شدگی به دو مؤلفه عمود بر راستای زاگرس و به موازات آن قابل جدایش می شود که بردار عمود بر راستای زاگرس، گسل های راندگی و رشد چین ها را موجب می شود و بردار در راستای زاگرس، حرکتی راستالغز راست گرد را در راستای گسل اصلی جوان زاگرس و قطعات آن ایجاد می کند (Jackson et al., 1995). به باور Talebian & Jackson (2002) جابه جایی عادی در امتداد گسل اصلی جوان زاگرس در اثر انحراف از امتداد N60W (که روی آن جابه جایی امتدادلغز کامل رخ می دهد) است.

گسل اصلی جوان زاگرس در باختر ایران بر پایه شواهد دورسنجی و ریخت زمین ساختی توسط Berberian (1995) و Talebian & Jackson (2002) رسم شده است و اختلاف قابل ملاحظه ای میان موقعیت این گسل بر پایه نظر این دو پژوهشگر وجود دارد (شکل ۲). به گونه ای که بخشی از گسل اصلی جوان زاگرس که توسط Talebian & Jackson (2002) رسم شده، با گسل وارون اصلی زاگرس که توسط Berberian (1995) معرفی شده است، منطبق است. بنابراین پرسشی که پیش می آید این است که وضعیت گسل اصلی جوان زاگرس نسبت به گسل راندگی اصلی زاگرس چگونه است. پاسخ به این پرسش در یافتن پاسخی برای مسائل مختلف مرتبط با پهنه زمین درز کوهزاد زاگرس، شامل تقدم و تأخر ساختارها و لرزه زمین ساخت آن مفید خواهد بود. در این پژوهش شواهد گسل اصلی جوان زاگرس و گسل وارون

گسل اصلی جوان زاگرس یکی از گسل های مهم زاگرس است که از گسل آنا تولی شمالی در ترکیه شروع می شود و با راستای شمال باختر- جنوب خاور ادامه می یابد (شکل ۱). پایین تر از عرض ۳۰' ۳۷° شمالی این گسل وارد مرز جغرافیایی ایران با عراق می شود و با طولی در حدود ۸۰۰ کیلومتر در خاک ایران ادامه می یابد. این گسل، فعال و لرزه زا به شمار می آید و رومرکز چند زمین لرزه دستگاهی در امتداد این گسل در کردستان ایران و عراق به ثبت رسیده است. به باور Berberian (1976) زمین لرزه های زیر در ارتباط با فعالیت این گسل هستند:

- زمین لرزه های ۲۲ جولای و ۱۷ آگوست ۱۹۶۴ میلادی با بزرگای حدود ۵/۵ که سبب تخریب بخش هایی از شهر پنجوبین (شمال باختری مریوان، در عراق) و کشته شدن ۶ نفر شد.

- زمین لرزه ۲۵ اکتبر ۱۹۷۰ با بزرگای ۵ در نزدیکی پیرانشهر که به خسارت دیدن ۱۵۰ خانه و مجروح شدن ۲۰ نفر انجامید.

- زمین لرزه ۲۸ نوامبر ۱۹۶۹ با بزرگای ۴ تا ۵ در جنوب پیرانشهر.

اگرچه در گذشته قطعه شمال باختری گسل اصلی جوان زاگرس (گسل پیرانشهر) را قطعه ای از گسل وارون اصلی زاگرس نامیده بودند (Gansser, 1960)، بررسی های اخیر انجام شده روی این گسل، سازوکار چیره امتدادلغز راست بر آن را تأیید می کند (Berberian, 1995; Talebian & Jackson, 2002). افزون بر این، سازوکار کانونی زمین لرزه های رخ داده در فاصله زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۶ میلادی (شکل ۱) نشان دهنده این است که در راستای گسل اصلی جوان زاگرس جابه جایی عادی، امتدادلغز

اصلی جوان زاگرس در این بخش با تشکیل پهنه عدسی شکل همراه است. گسل‌های سردشت و بانه به ترتیب حدود باختری و خاوری آن را تشکیل می‌دهند و گسل‌های آرموده و تازان در بخش میانی آن تشکیل شده‌اند. این پهنه عدسی شکل و گسل‌های مرز و درون آن برای اولین بار در این پژوهش معرفی و ویژگی‌های ساختاری آنها تحلیل می‌شود (شکل ۵).

۳-۱. گسل وارون اصلی زاگرس

گسل وارون اصلی زاگرس (Berberian, 1995) در شمال باختر و جنوب باختر گستره مورد بررسی قابل مشاهده است. گسل وارون اصلی زاگرس در شمال باختر گستره مورد بررسی به صورت یک سامانه راندگی فلسی با پهنه‌ای حدود ۵۰۰ متر از گسل‌های راندگی با شیب به سمت شمال خاور (شکل‌های ۴- الف و ۶) مرز میان پهنه سنندج- سیرجان در شمال خاور و کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس در جنوب باختر است. امتداد این پهنه راندگی فلسی N30W است و گسل‌های این پهنه شیبی میان ۳۵ تا ۶۰ درجه به سمت شمال باختر دارند. در این سامانه راندگی فلسی، ورقه‌های راندگی از جنس‌های مختلف شامل آهک، سنگ‌های آذرین، اسلیت و ماسه‌سنگ‌های سرخ‌رنگ قابل مشاهده است.

۳-۲. گسل اصلی جوان زاگرس

گسل اصلی جوان زاگرس به صورت یک گسل منفرد نیست؛ بلکه شامل قطعاتی از گسل‌های امتدادلغز است. این گسل در شمال باختر و جنوب خاور گستره توسط دیگر پژوهشگران مطالعه (Berberian, 1995; Talebian & Jackson, 2002) و به ترتیب پیرانشهر و مریوان نام‌گذاری شده‌اند. این قطعات گسلی امتداد N60W دارند و در راستای یکدیگر نیستند. بلکه میان عرض‌های جغرافیایی $30^{\circ} 35'$ و $30^{\circ} 36'$ قطعه‌ای گسلی با امتداد N30W ارتباط میان دو گسل را ایجاد می‌کند که با نام گسل سردشت برای اولین بار در این نوشتار معرفی شده است. وضعیت موجود سبب به وجود آمدن خمش به سمت راست (Right Hand Bending) در راستای گسل اصلی جوان زاگرس شده است که گسل‌های تازان، آرموده و بانه در اثر این وضعیت ایجاد شده‌اند.

- **گسل تازان (TF):** این گسل در این مطالعه شناسایی و تحلیل شده است، جابه‌جایی امتدادلغز راست‌بر گسل تازان در دو قطعه در جنوب خاوری گستره مورد مطالعه برداشت شده است. این گسل‌ها راستای N40W و شیبی ۸۰ تا ۸۵ درجه به سمت شمال خاور دارند (شکل ۷) و نشان‌دهنده جابه‌جایی چیره امتدادلغز راست‌بر آنها دوپلکس‌های امتدادلغز هستند (شکل ۸).

- **گسل آرموده (AF):** این گسل نیز که در این پژوهش شناسایی، برداشت و تحلیل شده است، امتداد N40W و شیبی نزدیک به قائم دارد. گسل آرموده بخشی از گسل اصلی جوان زاگرس، معرفی شده توسط Berberian (1995) است. اما از آنجا که میزان جابه‌جایی امتدادلغز راست‌بر این گسل کمتر از میزان جابه‌جایی برآورد شده برای گسل اصلی جوان زاگرس است، نمی‌تواند بخشی از آن گسل باشد. بهترین رودخانه‌های باشوان و اشترمل در اثر این گسل به میزان ۱۷۰۰ متر است (شکل ۹). این مقدار بسیار کمتر از جابه‌جایی ۵۰ کیلومتری گسل اصلی جوان زاگرس است.

- **سامانه گسلی بانه (BF):** این گسل در نقشه زمین‌شناسی چهارگوش بانه (فنودی و صادقی، ۱۳۷۴) معرفی شده است. بررسی‌های دقیق‌تر در این پژوهش نشان می‌دهد که این گسل در محدوده مورد بررسی آرایه‌ای پلکانی دارد (شکل ۱۰) که در این وضعیت هندسی گسل بانه، قطعات گسلی به وجود آمده‌اند که تقریباً هم‌راستا با گسل بانه هستند و جابه‌جایی امتدادلغز راست‌بر آنها در بررسی‌های دورسنجی و صحرائی قابل مشاهده است. این قطعات گسلی عبارتند از گسل سرقل، گسل شوی، گسل خشکه‌دره و گسل شرق ساوان.

- **گسل سردشت (SF):** گسل سردشت که در این مطالعه به طور دقیق‌تر بررسی و

اصلی زاگرس شامل یافته‌های جدید حاصل از مشاهدات دقیق صحرائی همراه با اطلاعات چینه‌شناسی نقشه زمین‌شناسی چهارگوش بانه (فنودی و صادقی، ۱۳۷۴) ارائه شده است. همچنین از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده لندست (ETM+) و تنش دیرینه به روش برگشتی چندمرحله‌ای (Yamaji et al., 2005) در تحلیل ساختاری گسل‌های برداشت‌شده در گستره مورد بررسی استفاده شده است. بر پایه این یافته‌ها تحلیل ساختاری این گسل‌ها صورت گرفته و مدل ساختاری، توجیه‌کننده ارتباط میان گسل اصلی جوان زاگرس و گسل وارون اصلی زاگرس ارائه شده است.

۲- زمین‌شناسی

ارتباط میان گسل اصلی جوان زاگرس و گسل وارون اصلی زاگرس در گستره‌ای بررسی شده است که در مرز میان پهنه سنندج- سیرجان در شمال خاور و کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس در جنوب باختر قرار گرفته است (شکل ۱). مطالعات دقیق‌تر زمین‌شناسی که توسط نگارندگان روی بخشی از گستره انجام و نقشه آن در شکل ۳ ارائه شده است، نشان می‌دهد که از دیدگاه سنگ‌شناختی، بخشی از گستره مورد بررسی که در پهنه سنندج- سیرجان قرار گرفته از فلیت‌های خاکستری تیره و سطح هوازده به رنگ سبز تیره به سن کرتاسه تشکیل شده است که ستبرای زیادی در حدود ۲۰۰۰ متر دارند (فنودی و صادقی، ۱۳۷۴). در میان فلیت‌های کرتاسه لایه‌های سنگ آهک بلورین وجود دارند. در این فلیت‌ها توده گرانیتی- دیوریتی بانه با شکل هندسی باتولیت نفوذ کرده که در حاشیه خود هورنفلس‌های حاصل از دگرگونی مجاورتی را به وجود آورده است. بخشی دیگر از گستره که در کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس قرار دارد، شامل توالی رسوبی و آذرین بیرونی به سن اتوسن است (شکل ۴) که با راستای شمال باختر- جنوب خاور و شیب به سوی شمال خاور در گستره قرار گرفته‌اند (شکل ۴). بررسی‌های زمین‌شناسی که در این پژوهش انجام شده نشان می‌دهند که این توالی از پایین به بالا شامل تناوب چرت‌های رادیولاریتی و آهک در قاعده است که روی آن به ترتیب ۱۲۰ متر سنگ آهک خاکستری تیره متوسط تا ستبرالایه، ۱۷۰ متر شیل سبز مایل به خاکستری و ۱۷۰ متر سیلت خاکستری نازک‌لایه با میان‌لایه‌های شیل قرار گرفته است. در بالایی‌ترین بخش این توالی، سنگ‌های آتشفشانی با جنس آندزیت تا داسیت دیده می‌شوند که ستبرایی در حدود ۱۲۰ متر از آنها در گستره مورد بررسی شناخته شده است. در شمال باختر نقشه ارائه شده در شکل ۳، گسل وارون اصلی زاگرس که به‌عنوان مرز میان پهنه سنندج- سیرجان و کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس در نظر گرفته شده است (Berberian, 1995) به‌صورت پهنه راندگی فلسی به پهنای نزدیک به ۵۰۰ متر است.

۳- گسل‌ها

دو سامانه گسلی شامل گسل اصلی وارون زاگرس و گسل اصلی جوان زاگرس در گستره مورد بررسی قابل مشاهده است. گسل اصلی جوان زاگرس در شمال باختر با نام گسل پیرانشهر و در جنوب خاور با نام گسل مریوان معرفی شده است که راستایی برابر با N60W دارند. در حد واسط این دو گسل یعنی در میان عرض‌های جغرافیایی $30^{\circ} 35'$ و $30^{\circ} 36'$ گسل اصلی جوان زاگرس دارای روند N30W است که در این نوشتار با نام گسل سردشت معرفی می‌شود (شکل ۵). بنابراین یک خمش به سمت راست در راستای گسل اصلی جوان زاگرس پدید می‌آید. بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که در حدود عرض جغرافیایی $30^{\circ} 36'$ گسل اصلی جوان زاگرس به گسل وارون اصلی زاگرس برخورد می‌کند و به سمت جنوب خاور این محل برخورد، تنها گسل اصلی جوان زاگرس در مرز میان کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس و پهنه سنندج- سیرجان وجود دارد، به‌گونه‌ای که قطعات بریده شده از گسل وارون اصلی زاگرس در پهنه آن دیده می‌شود. خمش به سمت راست گسل

تنش بیشینه در آنها زاویه میل نزدیک به افق در راستای NNW و SSE دارد. سطوح گسلی دارای جابه‌جایی عادی نیز با وضعیت تنش A با بردار تنش بیشینه دارای تمایل زیاد انطباق دارند. این مطلب می‌تواند بیانگر تغییر وضعیت تنش محلی در راستای گسل باشد؛ به گونه‌ای که در بخش‌هایی از گسل در میانه تاریخ حرکتی آن، تنش بیشینه به‌طور محلی نزدیک به قائم و موجب توسعه محلی گسلش عادی شده است؛ در حالی که در دیگر بخش‌های گسل تنش بیشینه دارای زاویه میل به سمت NNW یا SSE بوده که سبب جابه‌جایی امتدادلغز شده است.

مطالب بالا نشان‌دهنده ویژگی‌های بی‌همتای گسل سردشت است و بنابراین باید مدلی ارائه شود که توجیه‌کننده وضعیت‌های مختلف تنش در محل این گسل باشد. با در نظر گرفتن ویژگی‌های هندسی و جنبشی این گسل می‌توان گفت که این گسل بخشی از گسل اصلی جوان زاگرس با راستای N30W است و به دلیل انحراف نسبت به بردار جابه‌جایی اصلی (N60W) بر پایه نظر Talebian & Jackson (2002) دارای مؤلفه کشش شده است.

۵- مقایسه نتایج تنش دیرینه و سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها

حل کانونی زمین‌لرزه‌های دستگاهی رخ داده در بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۶ میلادی در اثر جنبش گسل اصلی جوان زاگرس در شکل ۱ و محورهای فشارش و کشش (جهت‌های تنش‌های اصلی) تحلیلی از این زمین‌لرزه‌ها نیز در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. مقایسه سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها نشان می‌دهد که در راستای گسل اصلی جوان زاگرس زمین‌لرزه‌های با سازوکار راستالغز (نمودارهای ۱، ۲، ۴ و ۶ در شکل ۱)، عادی (نمودارهای شماره ۳ و ۷ در شکل ۱) و وارون با مؤلفه راستالغز (نمودار شماره ۵ در شکل ۱) ایجاد شده‌اند.

گرچه جهت‌یابی محور تنش کمینه که به‌وسیله سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها به‌دست آمده است با جهت‌های محور تنش‌های کمینه حاصل از تحلیل تنش دیرینه اختلاف دارد، ولی جهت‌یافتگی تنش بیشینه (که تأثیر بیشتری در ایجاد نوع گسل‌ها دارد) در دو روش بالا شباهت قابل توجهی دارد (شکل ۱۴). جهت‌یابی میانگین تنش بیشینه‌ای که به‌وسیله تحلیل تنش دیرینه یعنی روند تنش‌های بیشینه وضعیت‌های A و B (σ_{IC} و σ_{IB} در شکل ۱۴-الف) به‌دست آمده است با جهت‌یابی میانگین تنش بیشینه حاصل از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های با سازوکار امتدادلغز و وارون با مؤلفه امتدادلغز (شکل ۱۴-ب) همخوانی دارد. در حالی که جهت‌یابی میانگین تنش بیشینه‌ای که با روند تنش‌های بیشینه وضعیت A (σ_{IA} در شکل ۱۵-الف) که به‌وسیله تحلیل تنش دیرینه به‌دست آمده است با جهت‌یابی میانگین تنش بیشینه حاصل از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های با سازوکار عادی و زاویه میل زیاد (شکل ۱۵-ب) برابر است.

۶- بحث

گسل اصلی جوان زاگرس مهم‌ترین گسل امتدادلغز راست‌بر زاگرس است که پیش از این توسط پژوهشگرانی همچون Talebian & Jackson (2002) و Berberian (1995) بررسی شده است (شکل ۱). به باور Berberian (1995) گسل اصلی جوان زاگرس با راستای شمال باختر- جنوب خاور هم‌راستا با گسل اصلی وارون زاگرس است. این در حالی است که بررسی‌های جدیدتر گسل اصلی جوان زاگرس توسط Talebian & Jackson (2002) نشان می‌دهد که این گسل با راستایی متغیر از N60W تا N30W در گستره مورد بررسی وجود دارد و تنها جابه‌جایی امتدادلغز راست‌بر کامل در راستای امتداد N60W رخ می‌دهد. بنابراین در بخشی از گسل که راستا N30W است، باید مؤلفه‌ای از کشش اعمال شود. راستای گسل اصلی جوان زاگرس گرچه در بخش‌های شمال باختری و جنوب خاوری N60W است ولی میان عرض‌های جغرافیایی $20^{\circ} 35'$ و $20^{\circ} 36'$ این راستا به N30W تغییر

تحلیل شده، قطعه‌ای از گسل اصلی جوان زاگرس است. این گسل روند N30W و طولی نزدیک به ۱۲۰ کیلومتر دارد و شامل پهنه‌های گسترده (با عرض حدود ۵۰ متر) از برش گسلی و سطوح مختلف گسلی با سازوکارهای متفاوت است (جدول ۱). در شکل ۱۱ نمونه‌ای از گسل‌های با سازوکار راستالغز راست‌بر ارائه شده است. قطعاتی از پهنه گسل وارون اصلی زاگرس در راستای این گسل مشاهده می‌شود (بخش‌های هاشورخورده سرخ‌رنگ در شکل ۳).

۴- تنش دیرینه

داده‌های سطوح گسلی پهنه گسل سردشت در تحلیل تنش دیرینه مورد استفاده قرار گرفته است. برای دست‌یابی به تنش دیرینه از نرم‌افزاری استفاده شده که توسط Yamaji et al. (2005) و بر پایه روش برگشتی چندمرحله‌ای (Multiple Inverse Method) طراحی شده است. در این نرم‌افزار نیز زاویه ناهمخوانی کمتر از ۳۰ درجه پذیرفتنی است. داده‌های ورودی این روش سطوح گسلی و خش‌لغزهای روی آنهاست که از بخش‌های شمال باختری گسل برداشت شده‌اند و ویژگی‌های آنها در جدول ۱ ارائه شده است. روش برگشتی چندمرحله‌ای روشی عددی برای مجزا کردن وضعیت‌های مختلف تنش از داده‌های ناهمگن گسلی است. داده‌های ناهمگن گسلی در اثر چند فاز مختلف تنش ایجاد می‌شوند. با استفاده از این روش می‌توان فازهای مختلف تنش یک منطقه را جدا کرد.

نسبت R با تعریف‌های گوناگونی که توسط پژوهشگران ارائه شده، بیانگر شکل بیضوی تنش و یا به عبارت بهتر بیانگر تنش تفاضلی در سه بعد است $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. بر پایه تعریف‌های مختلف، نسبت R میان عدد صفر و یک تغییر می‌کند. در حالی که $0 \leq R < 0.5$ باشد شکل بیضوی تنش کشیده و در حالتی که $0.5 < R \leq 1$ باشد شکل بیضوی تنش پهن است.

نمودارهای رسم‌شده با استفاده از این داده‌ها در شکل ۱۲ ارائه شده‌اند، نسبت R و جهت‌یابی محورهای اصلی تنش به‌دست آمده از آنها در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده این است که سه وضعیت تنش A، B و C در پهنه گسل تاژان تأثیر گذاشته‌اند. از دیدگاه جهت‌یافتگی تانسورهای اصلی تنش، وضعیت تنش B و C مشابه یکدیگر است و با وضعیت تنش A که تنش بیشینه آن میل زیادی (۵۷ درجه) دارد، متفاوت هستند.

نمودار ارائه شده در شکل ۱۳ نشانگر شماره گسل‌های جدول ۱ است که زاویه ناهمخوانی (Misfit) مناسبی برای هر یک از وضعیت‌های تنش در تحلیل برگشتی دارند. طبق قاعده‌ای که برای تشخیص یک وضعیت تنش در روش برگشتی چندمرحله‌ای وجود دارد، سطوح گسلی تنها باید در این وضعیت تنش، زاویه ناهمخوانی مناسب داشته باشند. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که هر کدام از فازهای تنش، گسل‌های با زاویه ناهمخوانی ویژه خود دارند، برای نمونه سطوح گسلی شماره ۹، ۱۳، ۱۸، ۲۵، ۳۵ و ۳۶ منحصراً زاویه ناهمخوانی مناسب با وضعیت تنش A دارند. طبیعی است که برخی از گسل‌ها وضعیت مناسبی برای حرکت در دو فاز تنش و یا هر سه فاز تنش داشته‌اند.

اگرچه جدیدترین واحدهای زمین‌شناسی قطع‌شده توسط گسل سردشت توالی‌های اتوسن هستند و تاکنون قطع شدن آبرفت توسط این گسل در جایی دیده نشده است، ولی از آنجا که این گسل، گسل وارون اصلی زاگرس را بریده است، از آن گسل (با سن میوسن) جوان‌تر است. بنابراین شروع به حرکت گسل سردشت به زمانی پس از میوسن یعنی پلیوسن باز می‌گردد. از آنجا که راستای تنش وارد بر زاگرس از این زمان تغییر نکرده است (برای نمونه Allen et al., 2004 و Lacombe et al., 2006)، وضعیت تنش تحلیل شده می‌تواند نشان‌دهنده آخرین وضعیت تنش وارد بر گستره مورد بررسی باشد.

سطوح گسلی دارای جابه‌جایی امتدادلغز با وضعیت تنش B و C منطبق هستند که

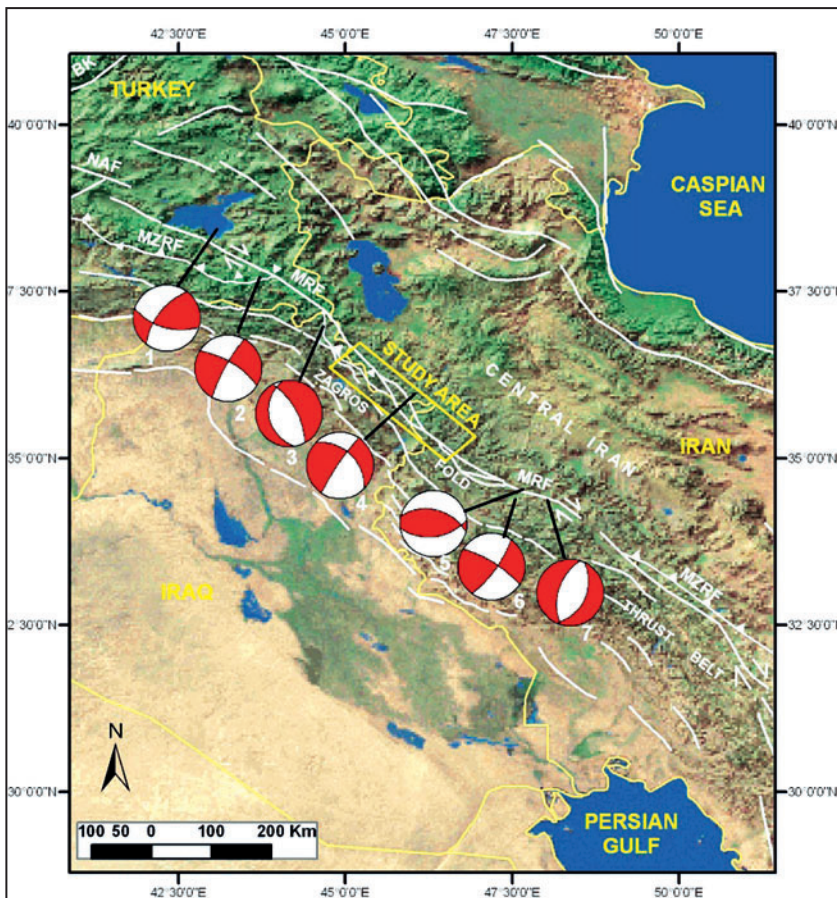
رهایی همراه شده است. این پهنه رهایی پهنه‌ای ویژه است که حرکات عادی تنها در لبه جنوب باختری و شمال خاوری آن، جایی که پاره‌گسل‌های سردشت و بانه وجود دارند ایجاد شده است، ولی در بخش‌های میانی آن گسلش عادی گسترش نیافته است (شکل ۱۶). در امتداد پاره‌گسل سردشت توزیع دگرریختی (Strain Partitioning) اعمال شده است و ساختارهای کششی و امتدادلغز جداگانه جابه‌جا شده‌اند. به این ترتیب وضعیت‌های تنش B و C با جنبش‌های گسلی در رژیم راستالغز راست‌بر سازگارند (شکل ۱۴-الف)؛ در حالی که وضعیت تنش A با جنبش‌های گسلی در رژیم کششی سازگاری دارد (شکل ۱۵-الف). مقایسه راستای تنش دیرینه تحلیل‌شده با تنش به‌دست آمده از حل کانونی زمین‌لرزه رخ داده برای پاره‌گسل‌های سردشت و بانه نشان می‌دهد که این راستا تقریباً یکسان و به سوی شمال-شمال باختر است (شکل ۵). بنابراین می‌توان دریافت که سطوح گسلی پهنه گسلی سردشت در میدان تنش مشابه با میدان تنش کنونی جابه‌جا شده‌اند. در نتیجه حرکات عادی، وارون و امتدادلغز در راستای این گسل حرکاتی جوان هستند که در ارتباط با جابه‌جایی گسل اصلی جوان زاگرس رخ داده‌اند. بنابراین این گسل به‌طور همزمان جنبش‌های امتدادلغز و ترفاشاری مرز میان پهنه سندج-سیرجان و زاگرس و جنبش‌های کششی حاصل از خمش به سمت گسل پیرانشهر را متحمل شده است. مدل ارائه شده در توضیح لرزه‌زمین‌ساخت گستره مورد بررسی نیز کاربرد دارد. با فرض اینکه ژرفای لایه لرزه‌زا در فلات ایران و زاگرس کم است و در جنوب ایران و زاگرس از ۲۰ کیلومتر بیشتر نیست (Maggi et al., 2000)، به دلیل اینکه گسل وارون اصلی زاگرس در پهنه رهایی میان گسل‌های بانه و سردشت و همچنین در جنوب خاور گستره در ژرفایی بیش از ژرفای لایه لرزه‌زا قرار گرفته است، احتمال جابه‌جایی لرزه‌ای در آن کم است و بنابراین تنها در شمال باختر گستره مورد بررسی می‌تواند جابه‌جایی لرزه‌ای داشته باشد (شکل ۱۶).

می‌باید که در این مطالعه با نام گسل سردشت نام‌گذاری شده است. این تغییر روند سبب ایجاد وضعیت خمیدگی در راستای گسل اصلی جوان زاگرس و ایجاد پهنه رهایی (Releasing Bend) (Silvester, 1988; Woodcock & Schubert, 1994) و گسترش گسل‌های با مؤلفه‌ای از کشش شده است. بدین ترتیب که جابه‌جایی‌های عادی بر پایه سطوح گسلی عادی روی پاره‌گسل‌های سردشت و بانه که راستای N30W دارند، شناسایی شده است (جدول ۱). نتایج حاصل از این بررسی به الگوی گسل اصلی جوان زاگرس و ارتباط آن با گسل وارون اصلی زاگرس انجامیده است (شکل ۱۶). مطابق این الگو، وضعیت گسل اصلی جوان زاگرس با آنچه که توسط (Talebian & Jackson, 2002) معرفی شده است سازگاری بیشتری دارد. ساختارهای دیگر مانند گسل‌های تاژان و آرموده با سازوکار راستالغز راست‌بر در اثر این وضعیت گسل اصلی جوان زاگرس در این پهنه ایجاد شده‌اند (شکل ۱۶)؛ ولی ساختارهای کششی تنها در راستای پاره‌گسل‌های سردشت و بانه ایجاد شده‌اند و در گسل‌های تاژان، آرموده دیده نمی‌شوند.

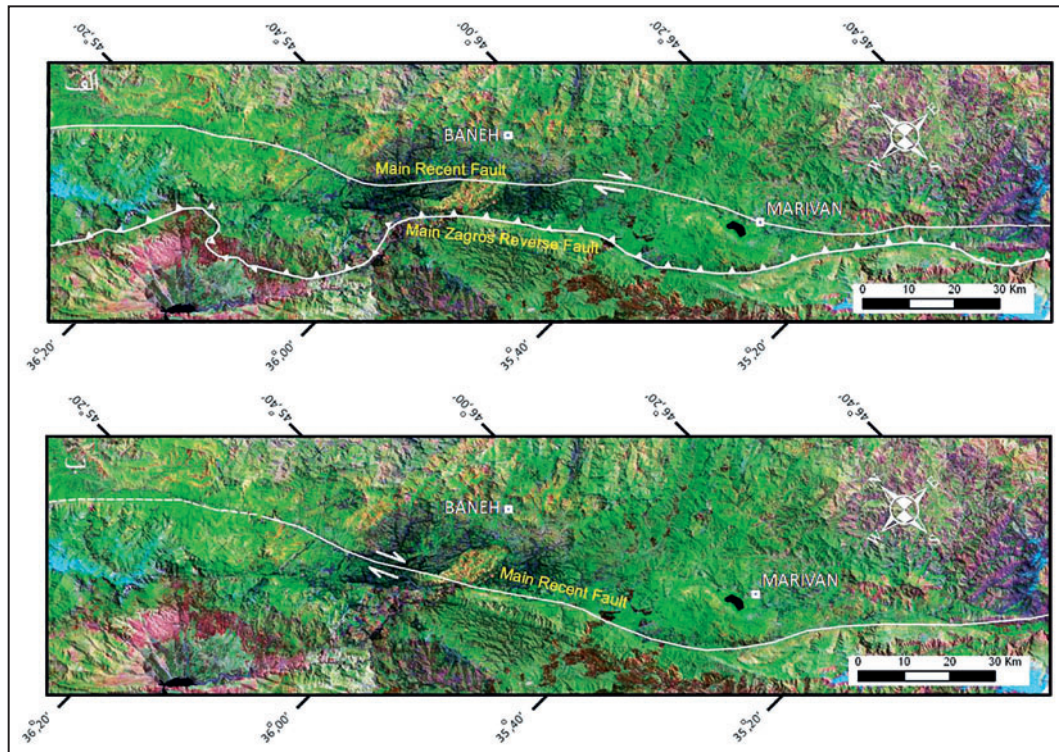
نکته اساسی در ارتباط میان گسل‌های اصلی وارون و جوان زاگرس رخ‌نمون نیافتن گسل وارون اصلی زاگرس میان عرض‌های جغرافیایی $35^{\circ}20'$ و $36^{\circ}00'$ است. بدین ترتیب که در اثر جنبش‌های عادی پاره‌گسل سردشت و همچنین اختلاف امتداد این پاره‌گسل با گسل وارون اصلی زاگرس، افت قائم قابل توجهی در گسل وارون اصلی زاگرس ایجاد شده است که در نتیجه آن، در شمال باختر گسل اصلی جوان زاگرس، شواهدی از اثر گسل وارون اصلی زاگرس در سطح زمین دیده نمی‌شود (شکل ۱۶).

۷- نتیجه‌گیری

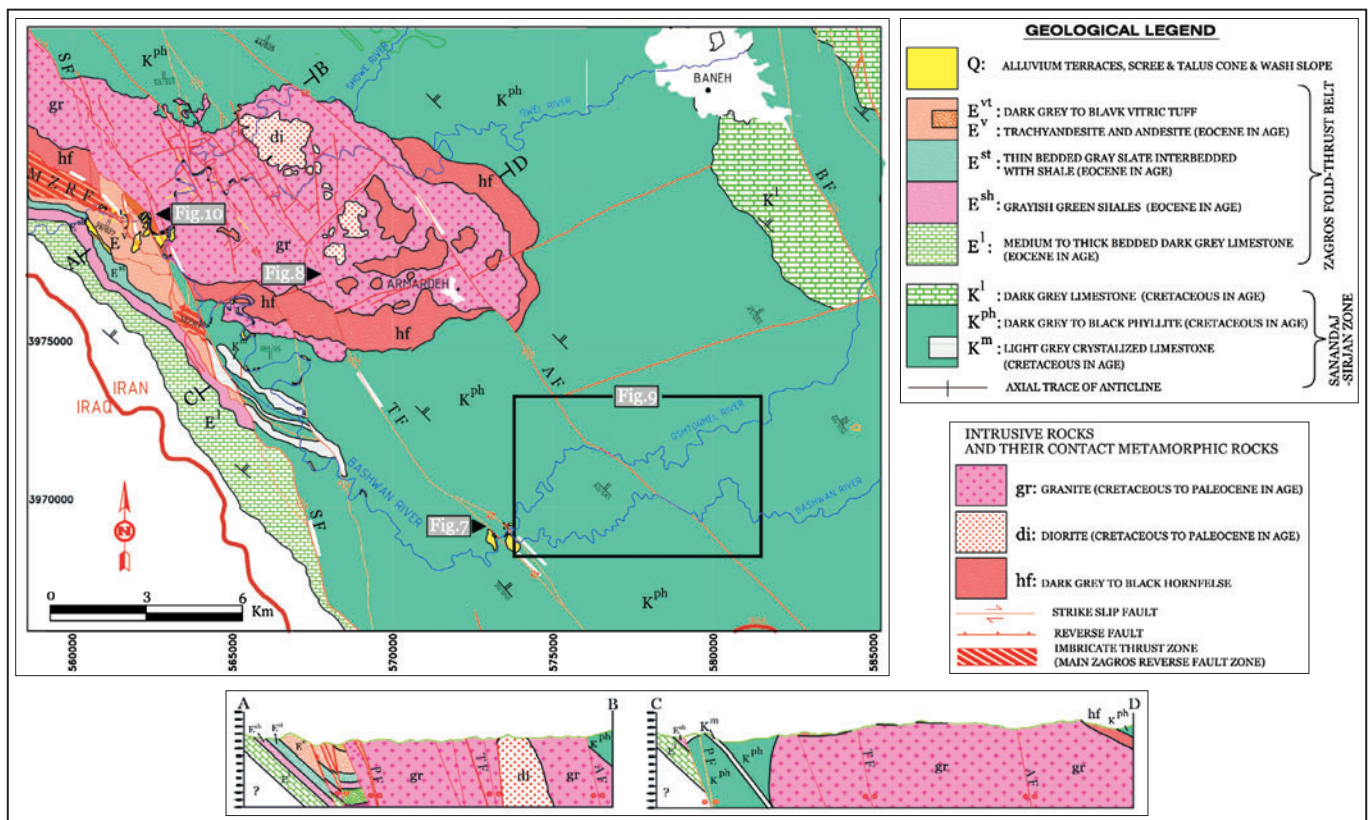
این مطالعه نشان می‌دهد که گسل اصلی جوان زاگرس در حد واسط پاره‌گسل‌های پیرانشهر در شمال باختر و مریوان در جنوب خاور، خمیده و با گسترش پهنه



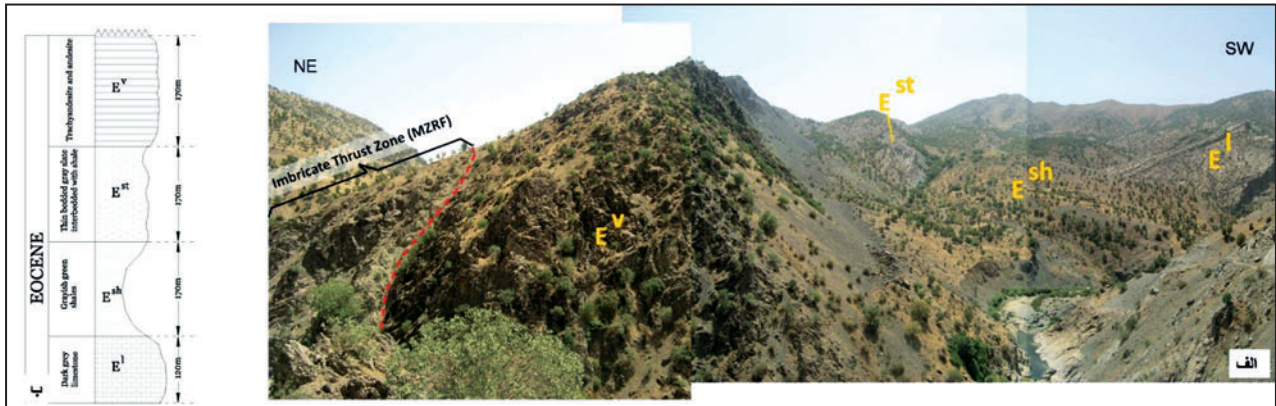
شکل ۱- جایگاه گستره مورد بررسی (مستطیل زرد رنگ) که در مرز میان دو پهنه زمین‌ساختاری سندج-سیرجان و زاگرس چین‌خورده-رانده قرار گرفته است. به سازوکار کانونی ۷ زمین‌لرزه رخ داده در امتداد گسل اصلی جوان زاگرس (برگرفته از سایت اینترنتی www.usgs.gov) توجه شود. گسل‌ها برگرفته از Vernant et al. (2004) با کمی تغییرات هستند. علائم اختصاری شکل: MZRF) گسل وارون اصلی زاگرس؛ MRF) گسل اصلی جوان زاگرس؛ NAF) گسل آناتولی شمالی.



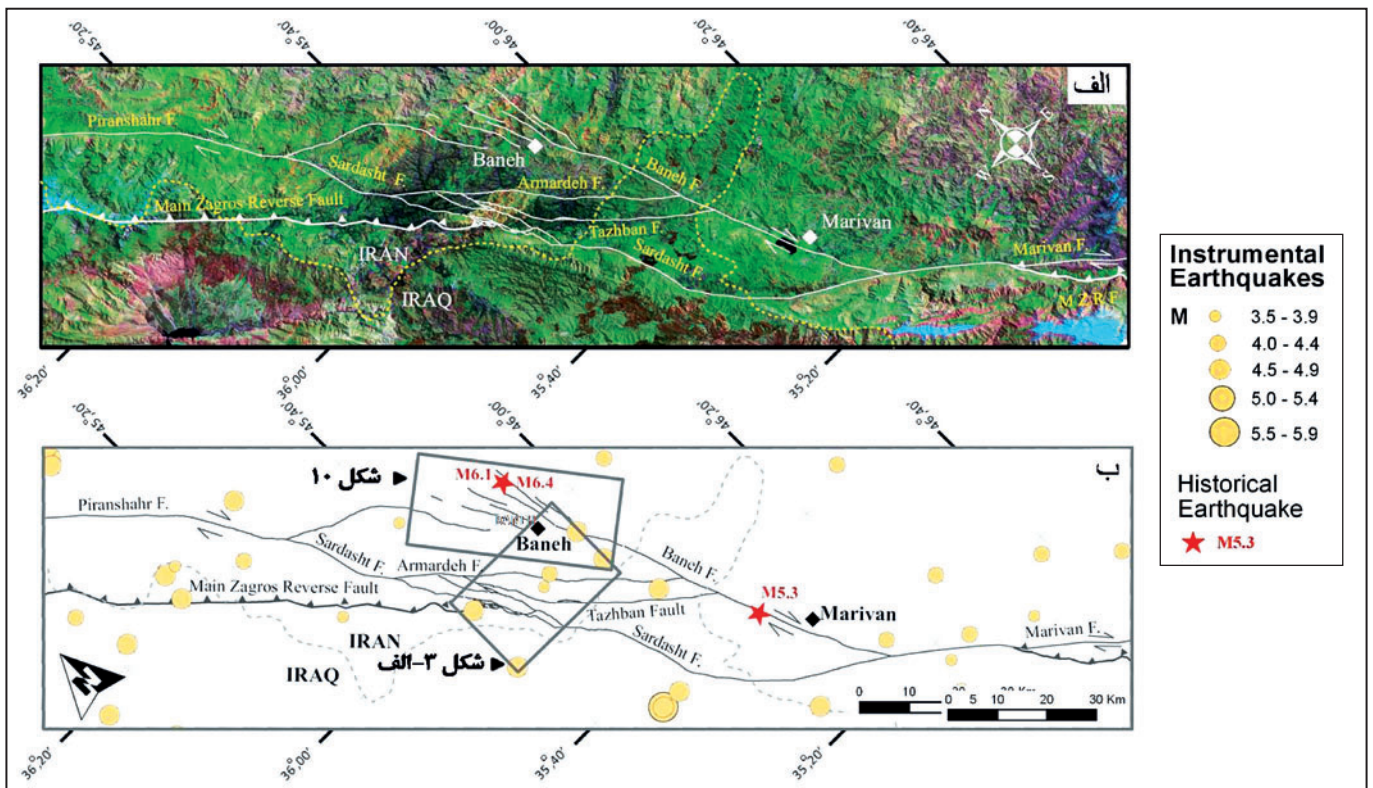
شکل ۲- تصویر ماهواره‌ای سنجنده Landsat از گستره گسل‌های اصلی وارون و جوان (گسل پیرانشهر) زاگرس. الف) وضعیت این گسل‌ها بر پایه نظر Berberian (1995) و ب) وضعیت گسل اصلی جوان زاگرس (گسل پیرانشهر بر پایه نظر (Talebian & Jackson (2002). همان‌گونه که در تصاویر آشکار است بخشی از گسل وارون اصلی زاگرس در شکل الف منطبق بر گسل اصلی جوان زاگرس در شکل ب است.



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی ساختاری بخشی از گستره مورد بررسی. راهنمای سنی واحدهای سنگی از فنودی و صادقی (۱۳۷۴) گرفته شده است. گسل‌های پهنه گسل وارون اصلی زاگرس به ستبرای ۵۰۰ متر در شمال باختر شکل توسط گسل پیرانشهر (قطعه‌ای از گسل اصلی جوان زاگرس) قطع شده است و قطعاتی از آن در پهنه گسل پیرانشهر دیده می‌شود. علائم اختصاری شکل: (MZR) گسل وارون اصلی زاگرس. (SF) گسل سردشت (قطعه‌ای از گسل اصلی جوان زاگرس). (BF) گسل بانه. (AF) گسل آرمرد. (TF) گسل تازان. محل شکل‌های ۷ تا ۱۰ روی این نقشه نشان داده شده است.



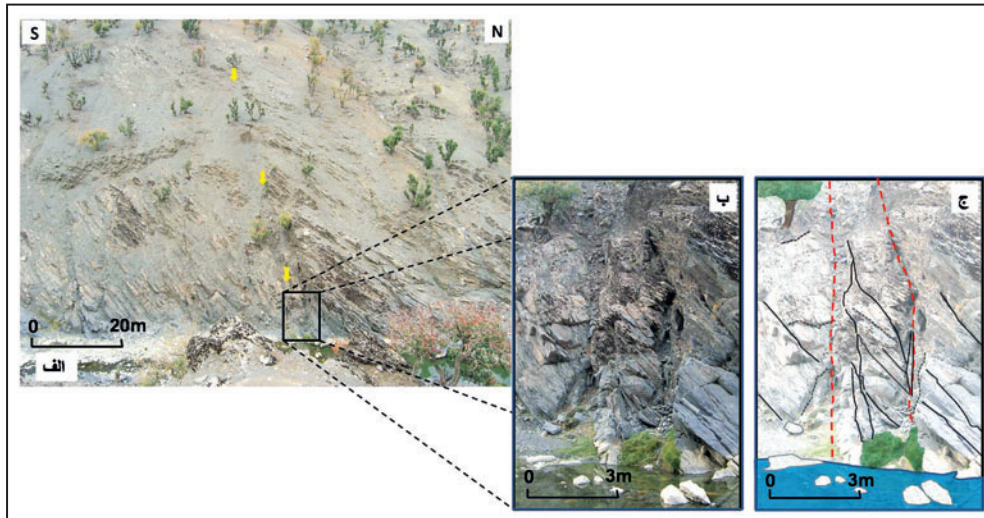
شکل ۴- الف) رخنمون توالی سنگ‌های زاگرس در فرودپواره پهنه راندگی فلسی گسل وارون اصلی زاگرس و ب) ستون چینه‌شناسی توالی ائوسن کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس در گستره.



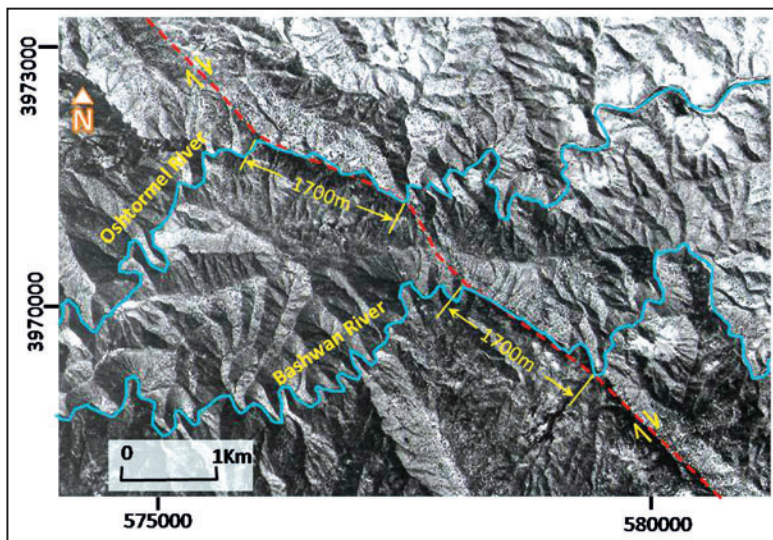
شکل ۵- الف) گسل‌های گستره مورد بررسی روی تصویر ماهواره‌ای سنجنده Landsat و ب) نقشه لرزه‌زمین‌ساختی گستره مورد بررسی، زمین‌لرزه‌های دستگاهی برگرفته از سایت اینترنتی www.usgs.gov و زمین‌لرزه‌های تاریخی برگرفته از Amberaseys & Melville (1982) هستند. مستطیل‌ها موقعیت دیگر شکل‌ها را نشان می‌دهند.



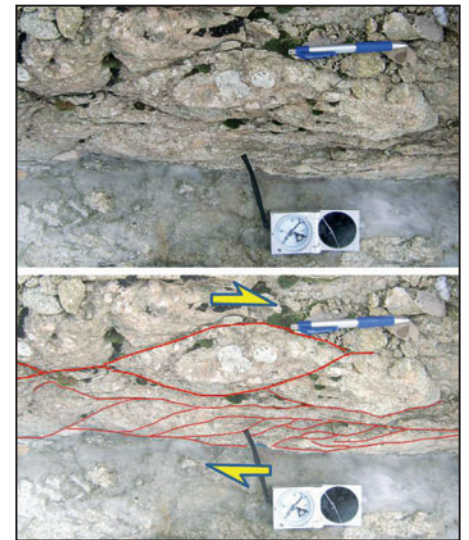
شکل ۶- پهنه راندگی فلسی گسل وارون اصلی زاگرس، دید به سمت خاور.



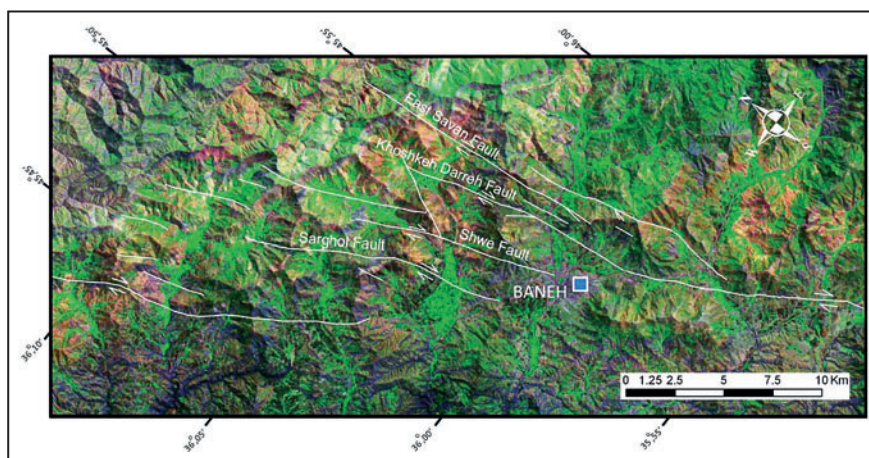
شکل ۷- الف و ب) پهنه گسله تاژان در جنوب گستره مورد بررسی. برای مشاهده موقعیت شکل در گستره مورد مطالعه به شکل ۳ مراجعه شود. ج) شکل نمادین رسم شده از موقعیت پهنه گسل و لنزهای گسلی توسعه یافته در آن.



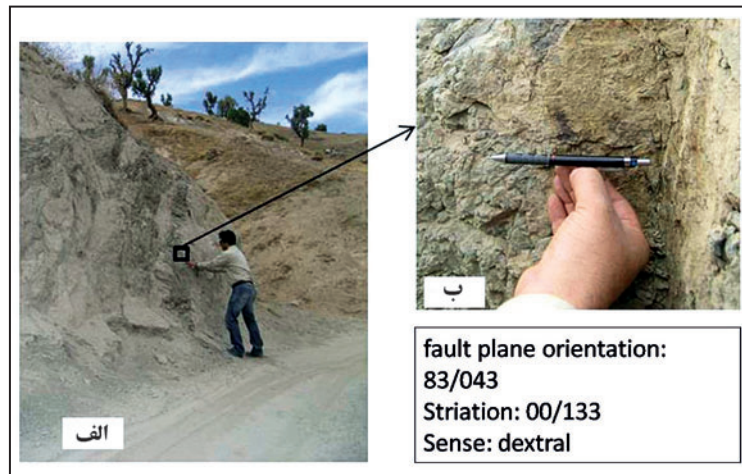
شکل ۹- عکس هوایی (در مقیاس ۱:۵۵۰۰۰ سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۹۵۵) که نشان می‌دهد که میزان جدایش گسل آرمرده بر پایه جدایش رودخانه‌های باشوان و اشترمل حدود ۱۷۰۰ متر است.



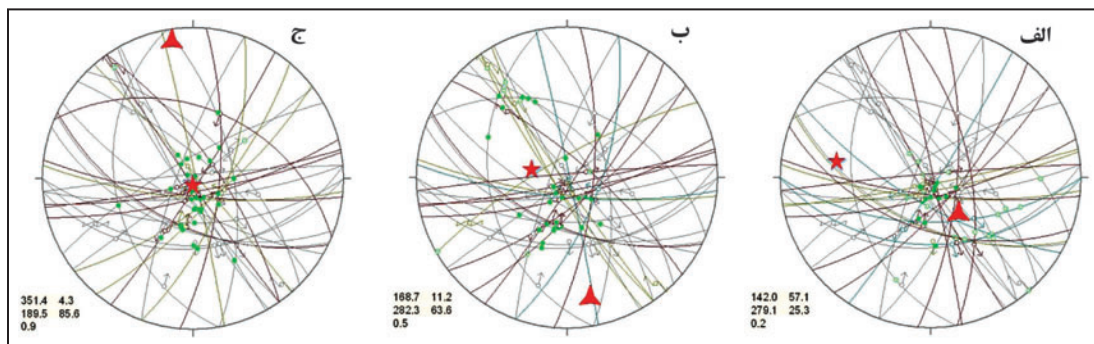
شکل ۸- آثار دوپلکس امتدادلغز راست بر روی سطح زمین در گرانیت بانه.



شکل ۱۰- تصویر ماهواره‌ای سنجنده Landsat از وضعیت پله‌ای شدن به سمت چپ در راستای گسل بانه که سبب به وجود آمدن قطعات گسلی دیگری با نام‌های سرقل، شوی، خشک‌دره و شرق ساوان شده است.

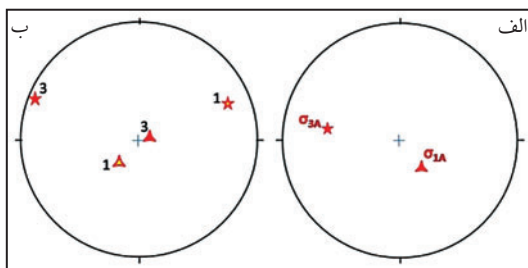
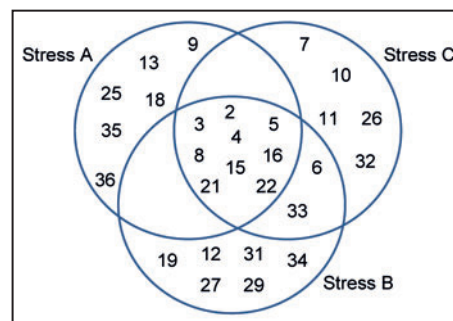


شکل ۱۱- الف) پهنه گسله سردشت و ب) نمای نزدیک از سطح گسل (مداد موازی راستای خش لغزهاست).

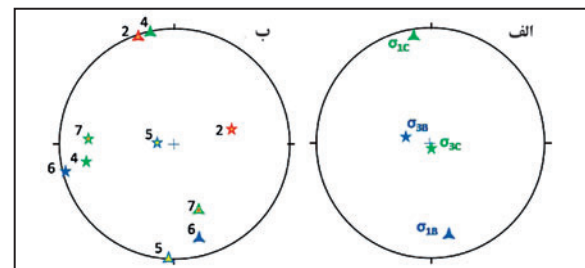


شکل ۱۲- تصویر استریوگرافیک صفحه‌های گسلی و خش لغزهای آنها در پهنه گسلی تاژیان در سه وضعیت الف) وضعیت تنش A، ب) وضعیت تنش B و ج) وضعیت تنش C. این تصاویر مستقیماً از نرم‌افزار استخراج شده است. نقاط سبز رنگ موقعیت خش لغزها هستند. موقعیت محور σ_3 با ستاره پنج‌پر و موقعیت محور σ_1 با ستاره سه‌پر نشان داده شده است.

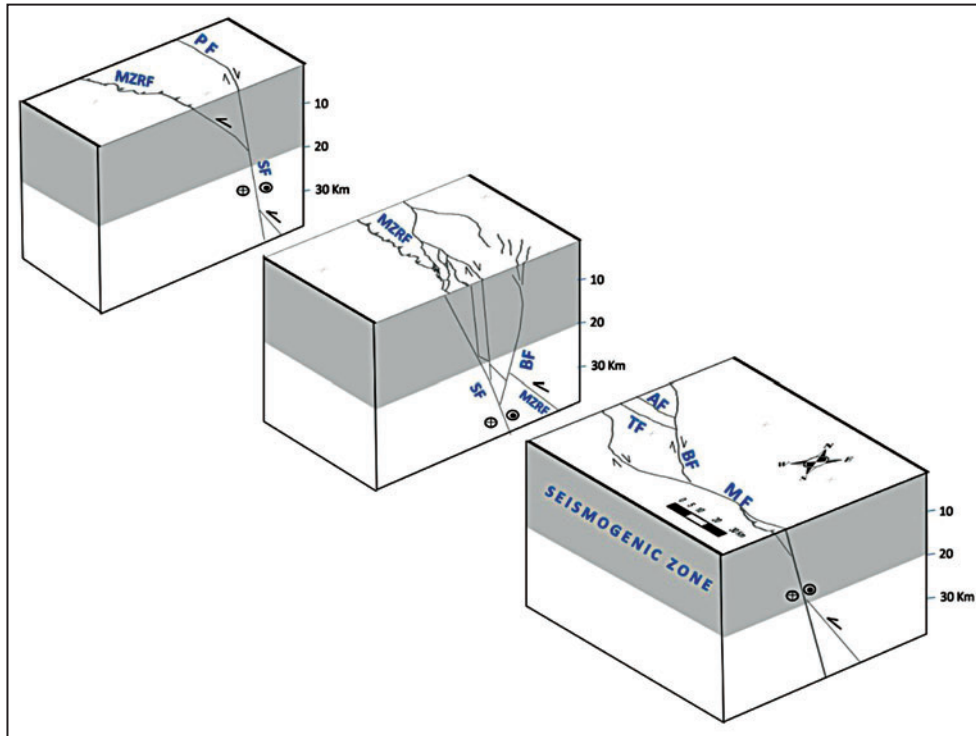
شکل ۱۳- نمودار نشان‌دهنده اشتراک سطوح گسلی جدول ۲ در تحلیل برگشتی که به تشخیص سه فاز تنش A، B و C انجامید. شماره‌های نشان داده شده نشانگر شماره گسل‌های دارای زاویه ناهمخوانی (Misfit) مناسب در تحلیل برگشتی است.



شکل ۱۵- الف) تصویر استریوگرافیک محورهای تنش بیشینه (σ_{1A}) و کمینه (σ_{3A}) به‌دست آمده از تحلیل تنش دیرینه و ب) تصویر استریوگرافیک محورهای تنش بیشینه (ستاره‌های سه‌پر) و کمینه (ستاره‌های پنج‌پر) به‌دست آمده به‌وسیله سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های عادی (شکل ۱).



شکل ۱۴- الف) تصویر استریوگرافیک محورهای تنش بیشینه (σ_{1B} و σ_{3B}) و کمینه (σ_{2B}) به‌دست آمده از تحلیل تنش دیرینه و ب) تصویر استریوگرافیک محورهای تنش بیشینه (ستاره‌های سه‌پر) و کمینه (ستاره‌های پنج‌پر) به‌دست آمده به‌وسیله سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های امتدادلغز و مورب‌لغز (شکل ۱).



شکل ۱۶- مدل سه بعدی گستره مورد بررسی که نشان دهنده ارتباط ساختاری گسل پیرانشهر و گسل اصلی جوان زاگرس است. لایه لرزه‌زا (Seismogenic Zone) با رنگ خاکستری در نظر گرفته شده است. علائم اختصاری شکل: (MZRF) گسل وارون اصلی زاگرس. (PF) گسل پیرانشهر (گسل اصلی جوان زاگرس). (MF) گسل مریوان (گسل اصلی جوان زاگرس). (BF) گسل بانه. (AF) گسل آرموده. (TF) گسل تازان. (SF) گسل سردشت.

جدول ۱- جهت‌یافتگی سطوح گسلی و وضعیت خشن‌لغز موجود روی آنها و زاویه خارج از اندازه (Misfit) هر یک از سطوح گسلی نسبت به جهت‌های تنش دیرینه محاسبه شده. خانه‌های زردرنگ نشان‌دهنده گسل‌های دارای زاویه خارج از اندازه مناسب برای هر یک از وضعیت‌های تنش A، B و C هستند.

No.	Fault Plane		Slickenlines Orientation			Misfit Angle		
	Dip	Dir.	Dip	Trend	Plunge	Sense	Stress A	Stress B
1	45	60	104	42	Reverse	169	95	41.6
2	95	70	128	63	Reverse	9	3	5.8
3	169	85	241	76	Reverse	17.3	2	4.8
4	142	70	199	55	Reverse	3.7	3.3	17
5	123	85	208	47	Reverse	24.1	0.3	4.9
6	206	55	187	54	Reverse	158.8	0.5	4.2
7	55	72	55	72	Reverse	121.4	55.2	3.2
8	78	88	157	80	Reverse	2.8	24.3	11.3
9	205	54	178	44	Normal	15.2	168.3	165.9
10	49	87	336	80	Reverse	80.7	60.7	11
11	235	80	177	78	Reverse	170.6	86.1	13.7
12	235	80	140	5	Dextral	95.5	11.8	62.7
13	241	86	214	86	Normal	6.9	63.3	119.1
14	290	78	211	43	Reverse	154.6	167.1	52.7
15	170	80	215	76	Reverse	10.8	0.5	7.2
16	187	77	160	77	Reverse	7.4	10.2	4.2
17	143	89	53	55	Reverse	45.7	78.7	168.9
18	210	70	245	65	Normal	22.6	128.6	153.8
19	175	40	232	24	Reverse	95.3	30.6	49.1
20	180	57	133	47	Normal	29	142.8	151.1
21	185	75	219	72	Reverse	17.5	20.1	16.8
22	165	75	199	72	Reverse	2	7	4.9
23	355	87	74	75	Normal	1	3	161.5
24	175	75	129	69	Normal	163.8	160.4	166
25	80	60	147	34	Normal	7.6	104.7	135.5
26	23	40	23	40	Reverse	118.2	44.3	1.5
27	240	80	325	28	Normal	68.3	12.1	98
28	260	35	195	17	Reverse	176.2	91.9	52
29	330	75	245	19	Sinistral	68.2	18.8	106.2
30	130	70	189	54	Reverse	2.3	4.9	16.6
31	40	75	318	29	Reverse	67.2	3.4	53.2
32	110	65	110	65	Reverse	43.5	29.8	11.4
33	235	87	325	5	Dextral	61.1	14.2	1
34	240	80	325	28	Normal	68.3	12.1	98
35	180	42	162	40	Normal	22.7	151	166.7
36	200	52	158	40	Normal	5.4	153.1	154.4

جدول ۲- جهت‌یافتگی و نسبت R تنش‌های اصلی به دست آمده از روش برگشتی چندمرحله‌ای.

سوی تنش‌های اصلی		R	وضعیت تنش
σ_3	σ_1		
25/279	57/142	0.2	A
64/282	11/169	0.5	B
86/190	4/351	0.9	C

کتابنگاری

سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، ۱۹۵۵ - عکس هوایی با مقیاس ۱:۵۵۰۰۰، شماره عکس ۸۳۴۹، ورقه ۸، پروژه شماره ۱۵۸. فوندی، م. و صادقی، ا.، ۱۳۷۴ - نقشه زمین‌شناسی چارگوش بانه، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

- Allen, M., Jackson, J. & Walker, R., 2004- Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates, *Tectonics*, 23.
- Ambraseys, N. N. & Melville, C. P., 1982- "A history of Persian earthquakes". Cambridge Univ. Press, 219 pp.
- Berberian, M., 1976- Contribution to the seismotectonics of Iran, part II. *Geological Survey of Iran* 39, 518.
- Berberian, M., 1995- Master "blind" thrust faults hidden under the Zagros folds; active basement tectonic and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241, 193-224.
- Gansser, A., 1960- Auseralpine ophiolith problem, *Eclogae geologicae Helvetiae*; Vol. 52, No. 2, pp. 659-680.
- Jackson, J., Hains, A. J. & Holt, W. E., 1995- "The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran" *J. Geophys. Res.* 100, 15205-15219.
- Lacombe, O., Mouthereau, F., Kargar, S. & Meyer, B., 2006- Late Cenozoic and modern stress fields in the western Fars (Iran): Implications for the tectonic and kinematic evolution of central Zagros, *Tectonics*, 25.
- Maggi, A., Jackson, J., Priestley, K. & Baker, C., 2000- A reassessment of focal depth distribution in southern Iran, the Tien Shan and northern India: do earthquakes really occur in the continental mantle? *Geophys. J. Int.*, 143, 629-661.
- Sylvester, A. G., 1988- Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1666-1703.
- Talebian, M. & Jackson, J., 2002- Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia-Eurasia collision zone. *Geophys. J. Int.* 150, 422-439
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. & Chery, J., 2004- Contemporary crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophys. J. Int.* 157, 381- 398.
- Woodcock, N. H. & Schubert, C., 1994- Continental Strike-Slip Tectonics. In Honcock, P. L. (Editor), *Continental deformation*. Pergamon Press, New York., 251-263.
- www.usgs.gov.
- Yamaji, A., Tomita, S. & Otsubo, M., 2005- Bedding tilt test for paleostress analysis. *Journal of Structural Geology*, 27, 161-170.

Structural Analysis of the Main Recent Fault and its Relation with the Main Zagros Reverse Fault in Kurdistan

S. Sadeghi ¹, A. Yassaghi ^{2*} & M. Fathollahi ¹

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2010 June 07

Accepted: 2011 November 29

Abstract

In this paper, the structural relationship between two main structural features of the Zagros suture zone, that is, the Main Zagros Reverse Fault (MZRF) and the Main Recent Fault (MRF) in Kurdistan area has been studied in more detail. This provides information as to the structural evolution and seismotectonics of the Zagros suture zone. Around latitude 36, the Sardasht segment of the MRF cut the MZRF and toward southeast part of this intersection, the MRF is the only major fault between the Zagros fold- thrust belt and the Sanandaj- Sirjan zone. Here, segments of the MZRF can be seen in the MRF zone, which represents the younger activity of the MRF. Our investigation show that there is a right- hand bending between the Piranshahr Fault in the northwest and the Marivan Fault in the southeast (between latitudes 35° , 30' and 36° , 30'). On the southwest and northeast edges of this releasing bend, the Sardasht and Baneh faults are located that have both strike-slip and normal components. Considering geometric and kinematic aspects of the curved segment of the MRF (Sardasht Fault), as well as the paleostress studies of this segment, it can be said that the Sardasht Fault with N30W trending fault has deviated from the main displacement vector (N60W) and hence has a normal component. Therefore, this fault accommodates dextral and transpressional movements between the Zagros fold- thrust belt and the Sanandaj-Sirjan zone and its normal movements arising from the right hand bending of the MRF. Paleostress analysis (using the Multiple Inverse Method) shows separate stress fields for different movements. Paleostress fields have a close correlation with the stress fields obtained from the focal mechanism of the earthquakes located along the Zagros suture zone. This correlation shows that the obtained stress fields are belong to younger activity. Displacement of the MZRF by the MRF caused significant heave in the MZRF and thus it does not expose at the surface between latitudes 35° , 20' and 36° , 00'.

Keywords: Main Zagros Recent Fault, Main Zagros Reverse Fault, Paleostress, Zagros suture zone.

For Persian Version see pages 41 to 50

*Corresponding author: A. Yassaghi; E-mail: yassaghi@modares.ac.ir