

تحلیل جنبش شناختی امتداد لغز در یک پهنه برشی با نرخ لغزش ناهمسان: مطالعه موردی پهنه لوت، خاور ایران

حسام یزدان‌پناه^{۱*}، محمد مهدی خطیب^۲، حمید نظری^۳ و ابراهیم غلامی^۴

^۱ دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
^۳ استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران
^۴ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۷

چکیده

سازوکار راستالغزی خاور ایران در طی ۵ میلیون سال گذشته موجب ایجاد گسل‌های راستالغز فعال در پیرامون و درون بلوک لوت شده است. مقدار نرخ لغزش در طی کواترنر سامانه گسلی نهندان شامل نه خاوری و باختری در خاور پهنه لوت حدود ۵ mm/year و روی سامانه گسلی نایند در باختر پهنه لوت حدود ۰/۳ ± ۱/۷ mm/year اندازه‌گیری شده است. بر این اساس میزان نرخ لغزش از باختر به خاور پهنه لوت نسبت افزایشی قابل توجهی دارد. شرایط جنبشی بالا موجب ایجاد یک سامانه برشی راست‌بر با نرخ لغزش ناهمسان روی پهنه لوت شده است. در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مشاهدات صحرایی، تغییرات بی‌هنجاری مغناطیسی و مدل‌سازی آزمایشگاهی، چگونگی توزیع کرنش سنوزویک و تغییرات نرخ لغزش در پهنه لوت بررسی شده است. نتایج بیانگر ارتباط مستقیم توزیع دگرریختی‌ها با تغییرات نرخ لغزش در دو سوی پهنه لوت است.

کلیدواژه‌ها: خاور ایران، پهنه لوت، جابه‌جایی زمین‌شناسی، نرخ لغزش گسل.

*نویسنده مسئول: حسام یزدان‌پناه

E-mail: hesam.yazdanpanah@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

به دلیل اهمیت رفتارسنجی آهنگ جنبشی دگرشکلی سنگ کره، تا به حال مطالعات زیادی روی ماهیت دگرشکلی در درون پهنه‌های همگرایی فعال درون قاره‌ای انجام شده است. به باور Walker & Jackson (2002) و Allen et al. (2004) شکل فعلی گسلسل فعال در ایران از حدود ۵ میلیون سال پیش و یا حتی کمتر شروع شده است. آهنگ همگرایی میان صفحه‌های عربی و اوراسیا با استفاده از داده‌های GPS حدود ۲۳ تا ۲۵ mm/year برآورد شده است (Vernant et al., 2004; Bayer et al., 2006; Masson et al., 2007). نرخ لغزش در طی کواترنر روی سامانه گسلی خاور پهنه لوت حدود ۲/۶ mm/year و روی سامانه گسلی باختر پهنه لوت حدود ۱/۳ mm/year اندازه‌گیری شده است (Meyer & Le Dortz, 2007; Le Dortz et al., 2009; Walpersdorf et al., 2014; Foroutan et al., 2014). خاور ایران بیشتر انرژی صرف کرنش امتداد لغز روی گسل‌های شمالی-جنوبی می‌شود (Jackson et al., 1995). بررسی دقیق سامانه‌های گسلی فعال، داده‌های بسیار مناسبی برای مطالعات حرکت پوسته‌ای در اختیار ما قرار می‌دهد. با وجود مطالعات بسیار در پهنه لوت، که بیشتر به صورت موردی در بخش‌هایی از پهنه لوت انجام شده است، تا به حال تکوین ساختاری این پهنه نامشخص است. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات صحرایی، جابه‌جایی‌های افقی زمین‌شناسی روی سامانه‌های گسلی موجود در لبه و درون پهنه لوت اندازه‌گیری شده است. سپس با استفاده از مطالعه میزان بی‌هنجاری مغناطیسی و مدل‌سازی آزمایشگاهی، توزیع روند‌های ساختاری در این پهنه مورد کنکاش قرار گرفته است. در پایان با تلفیق نتایج حاصل، چگونگی توزیع کرنش سنوزویک و تغییرات نرخ لغزش و برخواستگی در پهنه لوت بررسی شده است.

و مقاوم با روند شمالی-جنوبی که بیشتر از سنگ‌های آتشفشانی مانند آندزیت و داسیت متعلق به دوره ترشیر و همچنین رسوبات خشکی نوژن-کواترنری تشکیل شده‌اند. سنگ‌های رسوبی مربوط به رسوبات کم‌ژرفا و تخریبی دوران مزوزویک نیز به مقدار کم در این پهنه یافت می‌شوند. از سنگ‌های دوران پالئوزویک تنها سنگ‌های آهکی پرمین در برخی نقاط بیرون‌زدگی دارند. چگونگی فعالیت گسل‌های امتداد لغز شمالی-جنوبی در خاور ایران نشان از همگرایی مایل میان بلوک‌های ایران مرکزی و افغانستان دارد. این گسل‌های شمالی-جنوبی با سازوکار امتداد لغز راست‌بر در پایانه‌ها، به گسل‌های شمال باختری-جنوب خاوری با مؤلفه چپ‌رانندگی منتهی می‌شوند (Berberian et al., 2000). همچنین اعمال رژیم زمین‌ساختی فشاری در اواخر کرتاسه عامل ایجاد سامانه‌های فشاری-برشی (یکی با راستای N-S و دیگری با راستای NW-SE) در خاور ایران است (خطیب، ۱۳۷۷) (شکل ۱).

۳- بررسی جنبش‌شناختی و ریخت‌زمین‌ساختی گستره لوت

گسل‌های امتداد لغز راست‌بر شمالی-جنوبی عامل اصلی دگرریختی فعال جدید در گستره لوت است، به گونه‌ای که این روند ساختاری به عنوان شاخص اصلی زمین‌ساخت این منطقه معرفی شده‌اند (Berberian, 1976; Berberian & Yeats, 2001). بر پایه داده‌های نوین ماهواره‌ای (GPS)، نرخ لغزش راستالغز ۵/۶ ± ۰/۴ mm/year برای گسل‌های خاور لوت و ۴/۴ ± ۰/۴ mm/year برای گسل‌های باختر لوت به دست آمده است (Walpersdorf et al., 2014). این در حالی است که نرخ لغزش زمین‌شناسی در هولوسن برای گسل‌های خاور لوت ۸ ± ۴ mm/year و برای گسل‌های باختر لوت ۳ ± ۱/۵ mm/year برآورد شده است (Walker & Jackson, 2004; Meyer & Le Dortz, 2007; Le Dortz et al., 2009; Walker et al., 2013; Foroutan et al., 2014). بر این اساس میزان جابه‌جایی زمین‌شناسی و نرخ لغزش از باختر به خاور پهنه لوت نسبت افزایشی محسوسی از خود نشان می‌دهد. در این پژوهش، با بررسی تغییرات میزان جابه‌جایی زمین‌شناسی

۲- جایگاه زمین‌شناختی و زمین‌ساختی محدوده مورد مطالعه

پهنه لوت، با درازایی حدود ۹۰۰ کیلومتر، خاوری‌ترین بخش خردقاره ایران مرکزی است. مرز خاوری آن با گسل نهندان و حوضه فلیشی خاور ایران و مرز باختری آن با گسل نایند و بلوک طبس مشخص می‌شود. این پهنه به صورت توده‌ای است کشیده

و نرخ لغزش در گستره لوت به کمک تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات صحرائی، این مسئله بحث شده است.

۳-۱. گسلی امتدادلغز در لبه باختری پهنه لوت؛ گسل نایبند

گسل نایبند اصلی‌ترین گسل موجود در لبه باختری پهنه لوت است که با ۳۵۰ کیلومتر طول یکی از طولی‌ترین گسل‌های امتدادلغز فلات ایران بوده و با سازوکار امتدادلغز راست‌بر و شیب نزدیک به قائم، جداکننده پهنه لوت از پهنه طبس است (Berberian, 1976). از جمله شواهد فعالیت جوان این گسل می‌توان به وجود افزای‌های گسلی در رسوبات آبرفتی، چشمه‌های آب گرم در راستای گسل، رخنمون دایک‌هایی از مواد آتشفشانی در رسوبات آبرفتی، انحراف مسیر آبراهه‌ها، بریدگی مخروط‌افکنه‌ها و تراورتن‌زایی اشاره کرد (شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵؛ Walker et al., 2009 & 2013).

با توجه به وضعیت توپوگرافی منطقه، بیشتر آبراهه‌هایی که از بخش باختری گسل نایبند سرچشمه می‌گیرند، روی بلوک خاوری این گسل نیز ادامه دارند. بنابراین از این مسئله می‌توان برای محاسبه میزان جابه‌جایی افقی ناشی از عملکرد راست‌بر گسل نایبند استفاده کرد. روی سامانه گسلی نایبند، ۱۳۱ مکان برای بررسی جابه‌جایی‌های راست‌بر انتخاب شده است. بر پایه این اندازه‌گیری‌ها، آهنگ لغزش برابر با ۱/۳ تا ۱/۹ میلی‌متر در سال برای این گسل به دست آمده است.

۳-۲. گسلی امتدادلغز در خاور پهنه لوت؛ سامانه گسلی نهبندان

سامانه گسلی نهبندان حدود ۶۰۰ کیلومتر طول و شامل گسل‌های امتدادلغز راست‌بر نه‌خاوری و باختری، دو گسل نیمه موازی با فاصله ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر و طول حدود ۲۰۰ کیلومتر در کنار هم و با روند کلی شمالی-جنوبی است که زمین‌های پست لوت و افغانستان و رشته‌کوه‌های خاور ایران را قطع می‌کند (Walker & Jackson, 2004).

سامانه گسلی نهبندان در پایانه شمالی خود وارد یک پهنه متشکل از چندین گسل رانندگی و امتدادلغز از جمله اسماعیل‌آباد، قلعه‌سرخ (شکل ۶- A)، گزیک، آواز و پورنگ می‌شود. شاخه اصلی گسل نه‌باختری در سوی شمال از کوه‌های باختر چهار فرسخ با امتداد شمال‌باختر-جنوب خاور می‌گذرد.

در پایانه جنوبی، گسل باختر آساجی (شکل ۶- A) مهم‌ترین انشعابات فرعی، گسل نه‌خاوری است که در بخش‌هایی نیز با گسل اصلی همپوشانی دارد. طول آن ۱۱۸ کیلومتر و دارای سازوکار امتدادلغز راست‌بر است. همچنین در پایانه جنوبی گسل نه‌باختری و در ۵۰ کیلومتری شمال نصرت‌آباد، دو شاخه اصلی گسل به تدریج از هم دور می‌شوند. شاخه جنوب‌خاوری، گسل نصرت‌آباد نامیده شده است که با روند شمال‌باختر-جنوب‌خاور و طول ۱۷۰ کیلومتر، حد جداکننده فیولیت و فلیش‌های خاور ایران از بلوک لوت است. شاخه جنوب‌باختری، گسل کهورک با حدود ۱۱۵ کیلومتر طول و سازوکار امتدادلغز با مؤلفه وارون و روند N17E است که تا شمال آتشفشان‌های بزمان ادامه دارد (شکل ۶).

برای بررسی جابه‌جایی زمین‌شناسی لبه خاوری لوت ۱۴۹ مکان روی سامانه گسلی نهبندان انتخاب شده است. بر پایه اندازه‌گیری این جابه‌جایی‌ها، آهنگ لغزش برابر با حدود ۲/۷ میلی‌متر در سال برای گسل نه‌خاوری و حدود ۲/۳ میلی‌متر در سال برای گسل نه‌باختری به دست آمده است.

۳-۳. گسلی امتدادلغز درون پهنه لوت؛ گسل اسماعیل‌آباد

گسل اسماعیل‌آباد یکی از سرشاخه‌های اصلی سامانه گسلی نهبندان و در بخش میانی پهنه زمین‌درز سیستان است که با طول ۴۰ کیلومتر سازوکار امتدادلغز راست‌بر دارد. این گسل یک گسل فعال کواترنری بوده و در راستای آن بیشتر رسوبات عهد حاضر گسلیده شده‌اند (اسدی، ۱۳۹۱). به دلیل برش رسوبات کواترنری توسط گسل، بیشتر در راستای گسل، انحراف مسیر آبراهه‌ها و ایجاد اسکارپ گسلی از چند متر تا چند صد متر وجود دارد (شکل ۷). بر پایه نتایج بازدیدهای میدانی، تصاویر

ماهواره‌ای و مدل‌های رقومی برگرفته از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی SRTM و نقشه‌برداری دقیق با GPS تفاضلی، امکان بررسی ریخت‌زمین‌ساختی برای پردازش هندسه و سازوکار گسل اسماعیل‌آباد فراهم شده است (شکل ۸). برای بررسی جابه‌جایی زمین‌شناسی روی گسل اسماعیل‌آباد، ۴۸ نقطه انتخاب شده است. بر پایه اندازه‌گیری این جابه‌جایی‌ها، آهنگ لغزش برابر با ۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر در سال برای این گسل به دست آمده است.

۳-۴. گسلی امتدادلغز درون پهنه لوت؛ گسل قلعه‌سرخ و پورنگ

گسل قلعه‌سرخ به دلیل نزدیکی به گسل پورنگ در برخی از پژوهش‌ها به این نام عنوان شده است. این گسل با طول ۵۷ کیلومتر، دارای سازوکار امتدادلغز راست‌بر و روند شمالی-جنوبی است. گسل پورنگ دارای امتداد N154 و سازوکار راستالغزی راست‌بر و طول تقریبی ۴۰ کیلومتر است (شکل ۱۰). به استناد مشاهدات میدانی شیب گسل قلعه‌سرخ به سوی خاور است. برش‌های توپوگرافی رسم شده روی داده‌های مدل رقومی ارتفاعی داده‌های SRTM و بررسی‌های دقیق و بزرگ مقیاس میدانی در راستای بخش‌های مختلف گسل قلعه‌سرخ امکان برآورد میزان جابه‌جایی قائم و افقی را در محل عبور گسل فراهم کرده است. بر این اساس، بیشینه جابه‌جایی قائم و افقی راست‌بر اندازه‌گیری شده روی ستیغی عمود بر راستای گسل برابر ۲۰±۱۰ متر و ۱۵۰±۱۰ متر است. بر پایه تهیه مدل رقومی برگرفته از نقشه برداری دقیق با GPS تفاضلی، در ناحیه‌ای موسوم به جنت‌آباد، جابه‌جایی قائم و افقی راست‌بر اندازه‌گیری شده روی پشته‌های گسلی و آبراهه‌های جابه‌جا شده در مسیر عملکرد پهنه گسلی برابر ۲/۵±۰/۰۳ متر و ۱۴±۰/۰۳ متر است. بنابراین گسل قلعه‌سرخ، یک گسل با سازوکار امتدادلغز راست‌بر است که جابه‌جایی قائم آن ناشی از مؤلفه فشاری (وارون) خاور به باختر گسل است. برای بررسی جابه‌جایی زمین‌شناسی روی گسل قلعه‌سرخ، ۶۸ نقطه انتخاب شده است. بر پایه اندازه‌گیری این جابه‌جایی‌ها، آهنگ لغزش برابر با ۰/۱ تا ۰/۲ میلی‌متر در سال برای این گسل به دست آمده است.

۴- بررسی چگونگی توزیع بی‌هنجاری مغناطیسی در پهنه لوت

پی‌جویی مغناطیسی از کهن‌ترین روش‌های اکتشافی بوده که سال‌هاست در پی‌جویی روندهای ساختاری زیرسطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. داده‌های مورد استفاده برداشت‌های مغناطیس هوایی شرکت تگزاس هوستون (Houston Texas) آمریکا در سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۷۷ با فاصله میان خطوط پرواز ۷/۵ کیلومتر و فاصله میان خطوط کنترل عمود بر پرواز ۴۰ کیلومتر است که پس از تصحیح منطقه‌ای و اعمال فیلترهای لازم، مورد تفسیر قرار گرفته‌اند. در اینجا با بررسی میزان بی‌هنجاری مغناطیسی در پهنه لوت، روند و چگونگی توزیع دگرریختی‌های زیرسطحی شناسایی و مطالعه شده است. بنابراین برای تحلیل چگونگی توزیع خطواره‌های ساختاری در پهنه لوت، نتایج تفسیر نقشه‌های مغناطیسی حاصل از اعمال فیلترهای مختلف از جمله برگردان به قطب (Reduction to pole)، ادامه فراسو (Upward continuation) و ادامه فروسو (Downward continuation)، مشتق افقی (Horizontal derivative)، مشتق قائم اول و دوم (First and second vertical derivative) بررسی شده است (شکل ۱۱؛ یزدان‌پناه و همکاران، ۱۳۹۳).

با استفاده از بررسی نقشه‌های حاصل از اعمال این فیلترها می‌توان در ارتباط با چگونگی توزیع خطواره‌های مغناطیسی در پهنه لوت اظهار نظر کرد. خطواره‌های شناسایی شده در سوی خاوری پهنه لوت، در مقایسه با سوی باختری پهنه لوت از دید تعداد و میزان گسترش، بیشتر است (شکل ۱۱-ت). این مسئله می‌تواند گویای رشد و توسعه بیشتر مناطق کرنش یافته در خاور نسبت به باختر پهنه لوت باشد. از این رو، نقشه توزیع خطواره‌های زیرسطحی در پهنه لوت، گواه مناسبی بر بالا بودن میزان تنش اعمالی در سوی خاوری پهنه لوت است. از سوی دیگر در این نقشه‌ها، توسعه

۶- خمیدگی ساختاری در لوت شمالی

سامانه گسل درونه یا گسل بزرگ کویر، با طول حدود ۹۰۰ کیلومتر، دارای سازوکار چیره امتداد لغز چپ بر همراه با مؤلفه شیب لغز وارون، در شمال خردقاره ایران مرکزی جای گرفته است. بررسی این گسل در تصاویر ماهواره‌ای، خمیدگی مشخص در روند را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که راستای آن از ESE-WNW در خاور به WSW-ESE در باختر $58^{\circ}E$ تبدیل می‌شود. از سوی دیگر چین‌های موجود در نهشته‌های جوان پلیوسن و کوآترنری جنوب کاشمر و نزدیک خواف نیز این تغییر روند و خمیدگی را نشان می‌دهند (شکل ۱۳). برش راست بر روی گسل‌های خاور ایران سبب ایجاد چرخش ساعت‌گرد روی گسل درونه می‌شود. به گونه‌ای که با افزایش مقدار برش راست بر از باختر به خاور، میزان چرخش نیز به سوی خاور افزایش می‌یابد (Walker & Jackson, 2004) که به عنوان یکی از عوامل مؤثر در جهت‌یابی هندسی گسل درونه (شکل خمیده آن) و چین‌های همراه با آن تأثیرگذار است. بر این اساس میزان تجمع برش راست بر شمالی-جنوبی در خاور ایران، نقش کلیدی در خمیدگی ساختاری لوت شمالی دارد. مسئله‌ای که در مدل‌سازی آزمایشگاهی و همچنین در بررسی داده‌های مغناطیسی هم قابل تشخیص است.

۷- نتیجه‌گیری

بررسی روابط هندسی و جنبشی ساختارها در خاور ایران بیانگر وابستگی دگرشکلی اصلی این منطقه به فعالیت پهنه‌های گسلی شمالی-جنوبی با سازوکار امتدادلغزی راست بر و فعالیت گسل‌های شمال باختری-جنوب خاوری با سازوکار چیره رانندگی در محل همپوشانی آنهاست. نسبت‌های جابه‌جایی زمین‌شناختی برآورد شده در این پژوهش برای گسل‌های نه خاوری، نه باختری، اسماعیل‌آباد، قلعه سرخ، پورنگ و نایند نشان از وجود یک انتظام نسبی خوب از باختر به خاور در پهنه لوت دارد. مقدار تنش اعمالی بیشتر در سوی خاوری نسبت به سوی باختری پهنه موجب افزایش دگرریختی و ارتفاع توپوگرافی در سوی خاوری است. همچنین بررسی بی‌هنجاری مغناطیسی زمین و مدل‌سازی آزمایشگاهی، افزایش دگرریختی در پهنه لوت از باختر به سوی خاور را نشان می‌دهد. از این رو، یکی از عوامل اصلی در توسعه ساختارها و شکل‌گیری ارتفاعات در بخش شمالی پهنه لوت، افزایش نرخ حرکتی حاکم بر سامانه‌های گسلی موجود در این بخش از فلات ایران با حرکت به سوی خاور است. از سوی دیگر، تغییر میزان جابه‌جایی زمین‌شناسی در خاور و باختر پهنه لوت موجب تشکیل یک پهنه برشی با نرخ لغزش ناهمسان در دو سوی پهنه لوت شده است. این تغییر نقش بنیادین در توزیع کرنش سنوزوییک، تغییرات نرخ لغزش و برخاستگی در پهنه لوت دارد.

سپاسگزاری

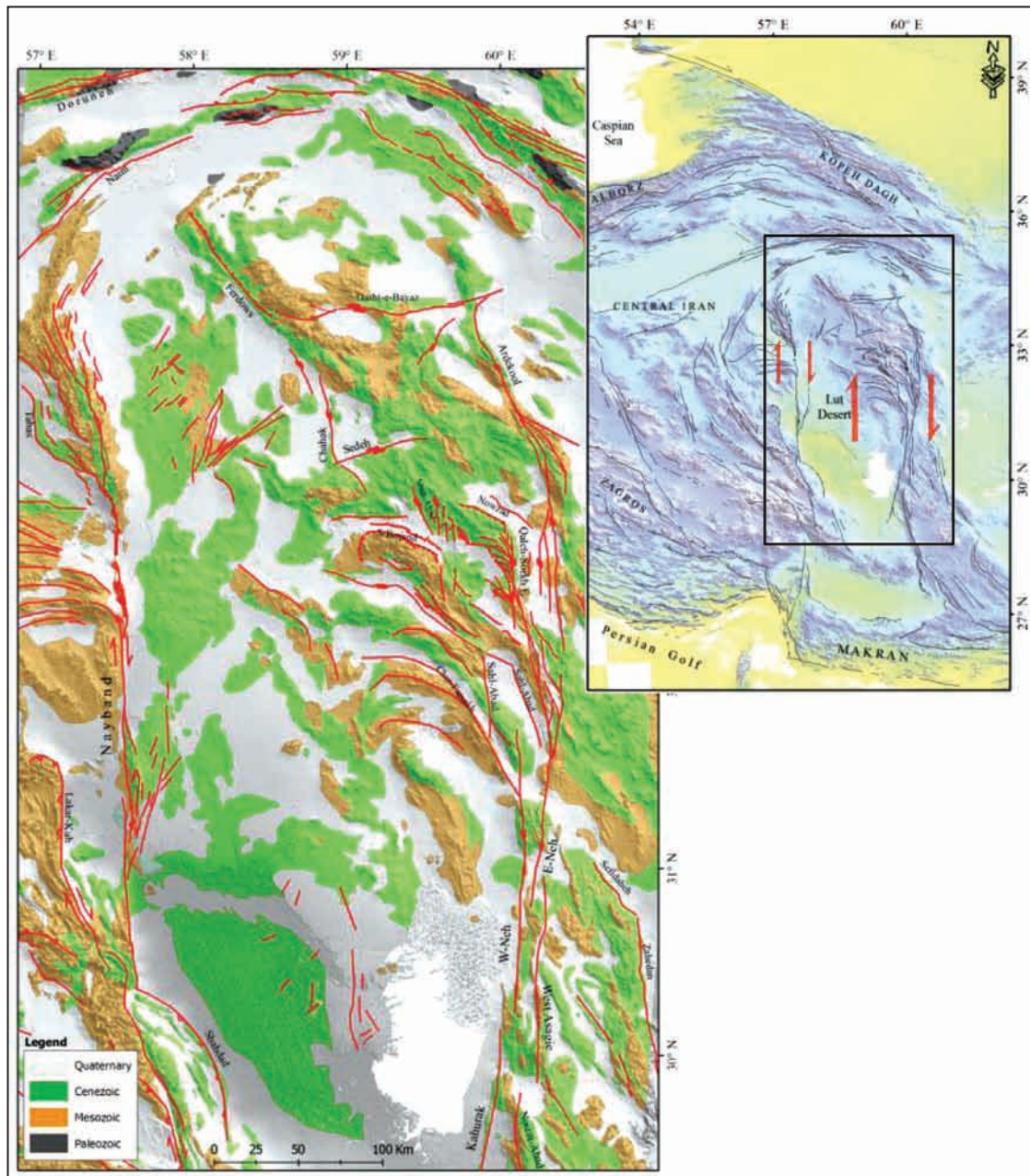
از گروه زمین‌شناسی دانشگاه بیرجند که امکانات این پژوهش را فراهم آورده‌اند و همچنین از آقای دکتر محمدمیرعلیمی که در مطالعات صحرایی این پژوهش همکاری داشته‌اند، سپاسگزاری می‌شود.

بیشتر روند‌های خطی شمالی-جنوبی در بخش خاوری دیده می‌شود. به گونه‌ای که خطوط‌ها در بخش خاوری به حد شمالی لوت رسیده است. در این حالت با حرکت به سوی باختر، این میزان کاسته می‌شود. به گونه‌ای که خطوط‌های باختری‌تر تا عرض‌های پایین‌تر جغرافیایی رسیده است (شکل ۱۱-پ).

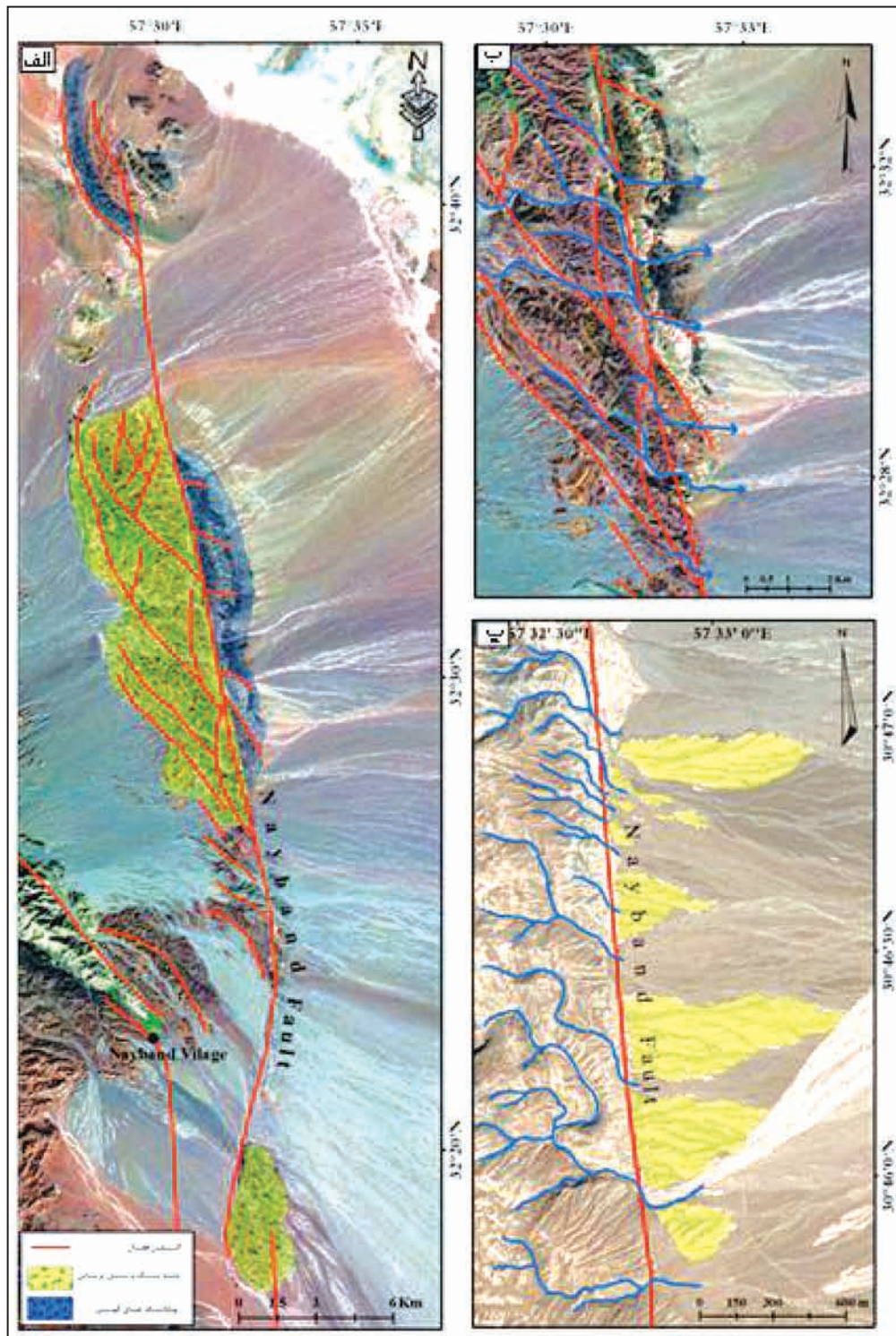
۵- مدل‌سازی آزمایشگاهی

مدل‌سازی آزمایشگاهی برای بررسی درستی الگوهای جنبشی حاصل از مطالعات زمین‌ساختی، چگونگی ایجاد مناطق کرنش یافته، چگونگی تکامل و در نتیجه ارتباط آنها با هم و شناخت مراحل مختلف دگرشکلی و پیدایش خمیدگی‌های ساختاری در پهنه لوت استفاده شده است. به منظور بررسی نقش میزان تغییرات نرخ لغزش و جابه‌جایی زمین‌شناسی در چگونگی توزیع دگرشکلی‌های موجود در حاشیه و درون پهنه لوت، دستگاه مدل‌سازی طراحی و ساخته شده است. با توجه به نتایج داده‌های GPS، مقادیر جابه‌جایی زمین‌شناسی و نرخ لغزش حاصل از مطالعات پیشین و این پژوهش، دستگاه با ابعاد 90×70 سانتی‌متر و نسبت حرکت ۱ به ۳ فک باختری به خاوری، مورد آزمایش قرار گرفته است (شکل ۱۲). به کمک این دستگاه جنبشی همانند آنچه در واقعیت و تحت تأثیر حرکت راست بر گسل‌های نهندان در خاور و نایند در باختر بر پهنه لوت اعمال شده است، بر مواد موجود در جعبه آزمایش اعمال و از این راه شرایط زمین‌ساختی پهنه لوت شبیه‌سازی شد (یزدان پناه و همکاران، ۱۳۹۳).

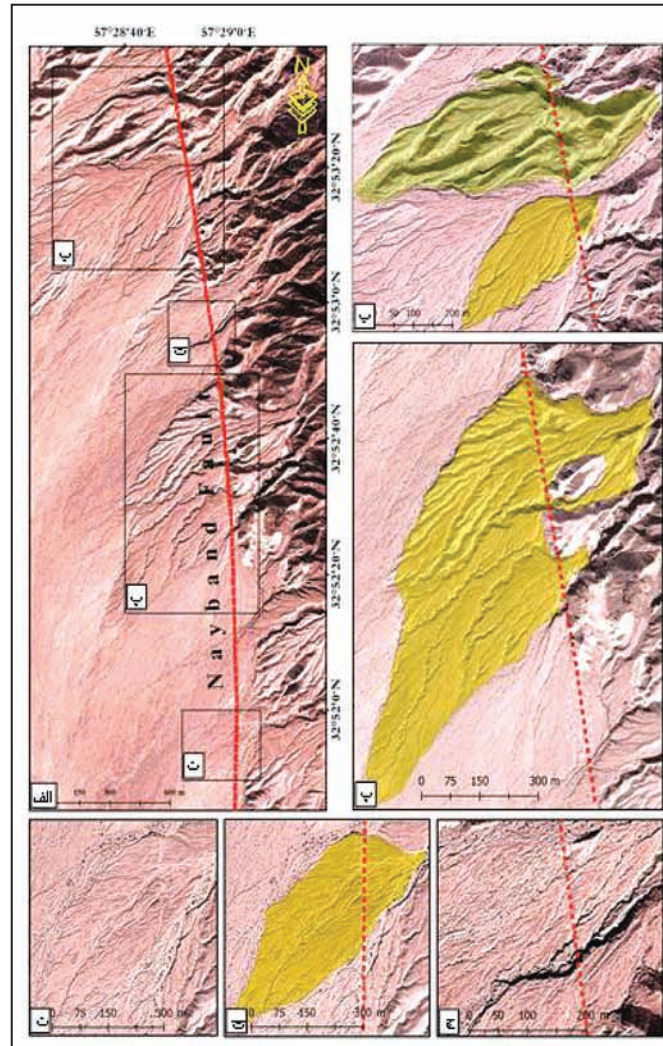
بر پایه فرضیه این پژوهش، تفاوت در نرخ لغزش و میزان جابه‌جایی زمین‌شناسی در خاور و باختر پهنه لوت، موجب تشکیل یک پهنه برشی با نرخ لغزش ناهمسان در دو سوی پهنه لوت شده است. از آنجا که در راستای روند‌های شمالی-جنوبی موجود در سوی خاوری دستگاه برش بیشتری اعمال می‌شود، بنابراین در این سمت، پهنه گسلی دارای عرض بیشتری است. در نتیجه در این سو از پهنه، مناطق کرنش یافته رشد بیشتری می‌یابند. از دید ساختاری و هندسی، الگوی کلی دگرریختی دیده شده روی دستگاه مدل‌سازی از تغییر نرخ حرکت کفه‌های چپ و راست دستگاه بسیار تأثیرپذیر است. از دید تشکیل، ساختارهای با روند شمالی-جنوبی دارای اولویت زمانی هستند. تداوم اعمال تنش در دو سوی دستگاه، در ابتدا موجب رشد و گسترش گسل‌های شمالی-جنوبی به ویژه در دو سوی آن می‌شود. سپس در اثر اعمال تنش بیشتر، ساختارهای با روند‌های شمال باختری-جنوب خاوری و در بخش‌هایی نیز روند‌های خاوری-باختری دیده می‌شود. در محل همپوشانی روند‌های شمالی-جنوبی تشکیل مناطق فشاری را داریم که در این محدوده‌ها، بیشترین میزان اوج‌گیری رسوبات دیده می‌شود. از سوی دیگر در محل تشکیل سرشاخه‌های گسلی در پایانه روند‌های شمالی-جنوبی اصلی، تنش اعمالی بیشتر صرف تغییر شکل به صورت سبترشدگی و برخاستگی می‌شود. توزیع تنش، روند‌های ساختاری و برخاستگی‌ها در نتایج آزمایش مدل‌سازی دستگاه همخوانی زیادی با واقعیت زمینی دیده شده در تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های ارتفاعی از پهنه لوت دارد (مقایسه شکل‌های ۱ و ۱۲).



شکل ۱- نقشه ساده شده واحدهای سنگ‌شناسی و توزیع گسل‌های فعال در گستره خاور ایران. این نقشه چگونگی توزیع سامانه‌های گسلی در لبه‌های خاوری و باختری و درون گستره لوت را نشان می‌دهند.



شکل ۲- الف) جدایش واحدهای سنگی ماسه سنگ و شیل تریاس و همچنین آتشفشانی های اتوسن در اثر عملکرد راستالغزی راست بر گسل نایبند به ترتیب به میزان ۱۷ و ۱۲/۵ کیلومتر؛ ب) جابه‌جایی افقی آبراهه‌های کهن (خطوط آبی رنگ) در محل تقاطع گسل نایبند؛ پ) جابه‌جایی راست بر آبراهه‌ها (خطوط آبی رنگ) و مخروط افکنه‌ها در اثر عملکرد راستالغز گسل نایبند.



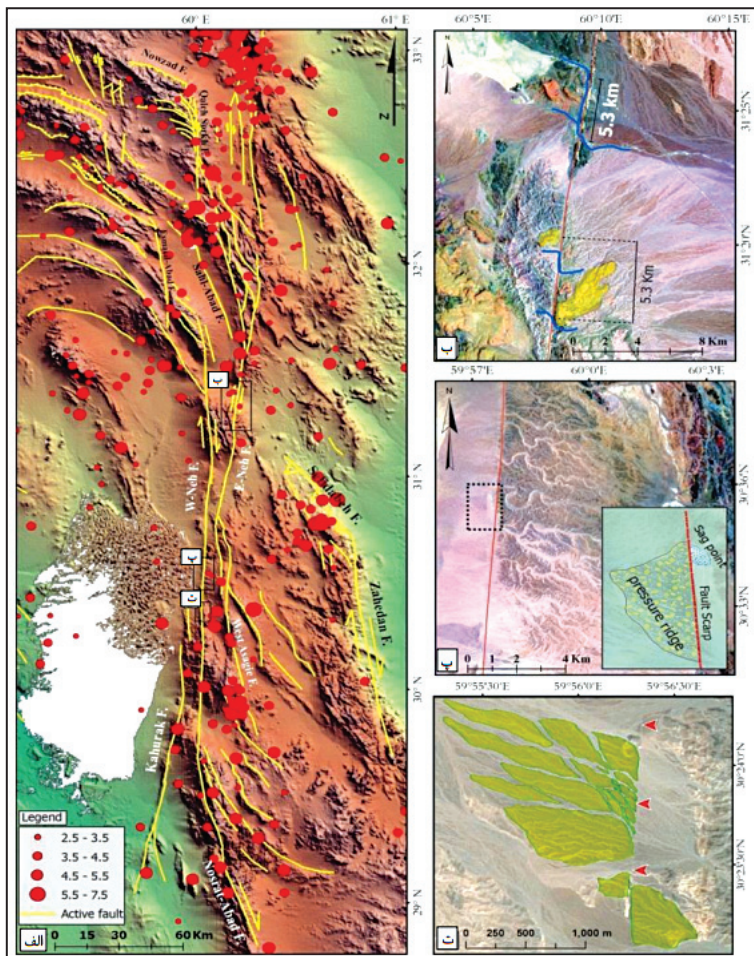
شکل ۳- جابه‌جایی راست‌بر و پریده شدن مخروط افکنه‌ها در محل عبور گسل نایبند در دامنه جنوب باختری رشته‌کوه شتری. در تصویر الف نمای کلی این نقاط نشان داده شده است. ب، پ، ت و ث) جابه‌جایی‌های راست‌بر در مسیر آبراهه‌ها و مخروط افکنه‌ها؛ ج) جابه‌جایی راست‌بر مسیر رودخانه فصلی و حفر بستر رود را در محل عبور گسل نشان می‌دهد.



شکل ۴- جابه‌جایی راست‌بر مسیر رودخانه فصلی و آبراهه کهن در محل عبور گسل نایبند در مکانی با موقعیت جغرافیایی تقریبی $57^{\circ} 54'$ خاوری و $33^{\circ} 01'$ شمالی. پیکان‌های سرخ رنگ، مسیر عبور گسل را نشان می‌دهد.

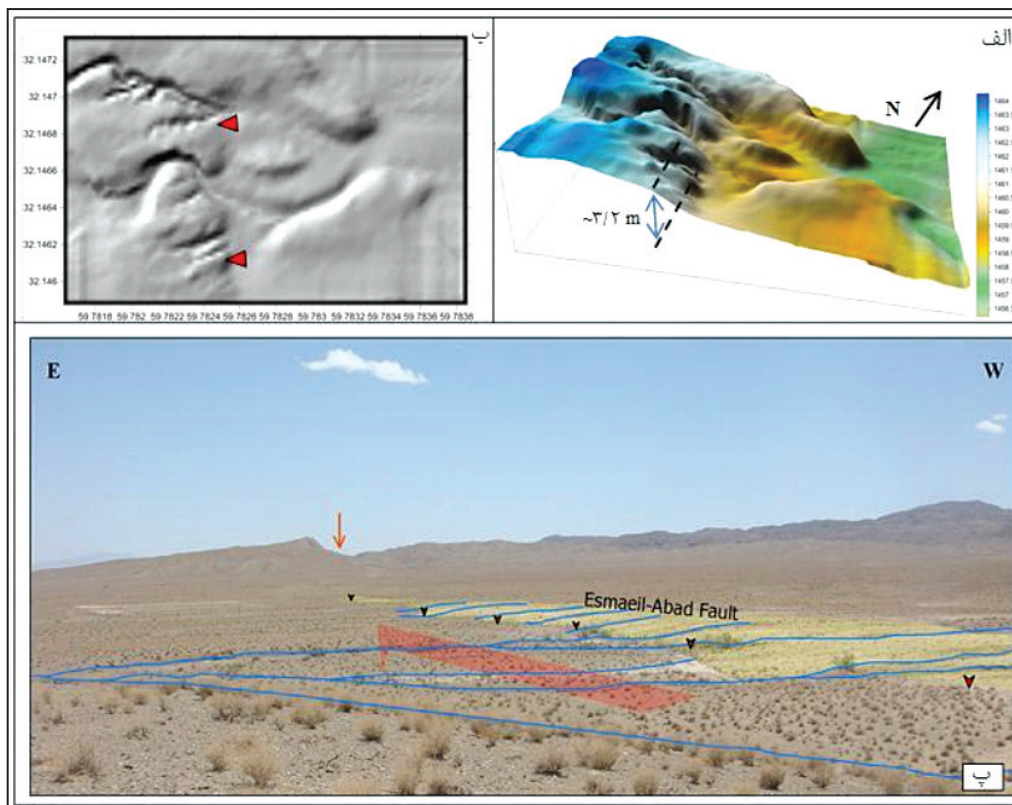
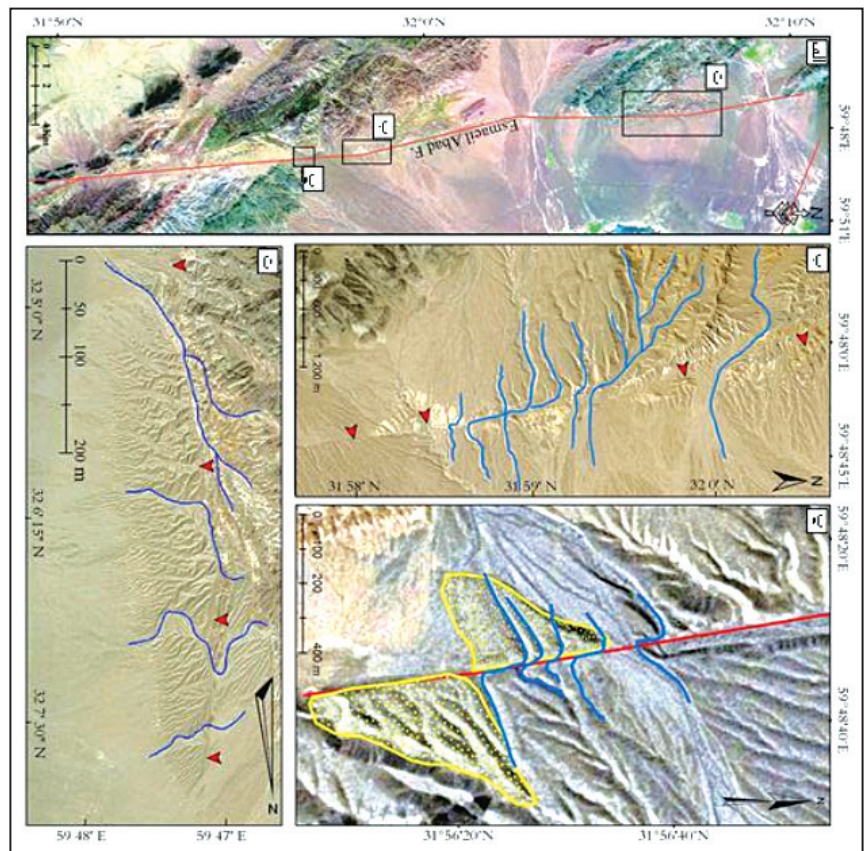


شکل ۵- افراز گسلی در محل عبور گسل نایبند در نزدیکی روستای دیگ رستم با موقعیت جغرافیایی تقریبی ۵۰° ۵۷' خاوری و ۲۸° ۳۲' شمالی.



شکل ۶- الف) گسلس امتدادلغز در خاور پهنه لوت متشکل از گسل‌های نه خاوری، نه باختری و سرشاخه‌های گسلی منتسب به آنها؛ ب) جابه‌جایی مسیر آبراهه در راستای عملکرد گسل نه خاوری. در این محل انحراف مسیر آبراهه و واحد پلیوسن (که با رنگ زرد مشخص شده است) به میزان ۵/۳ کیلومتر دیده می‌شود؛ پ) بالاآمدگی سمت خاوری گسل و قطع شدن ناگهانی سیسونستی آبراهه‌ها در محل برخورد با گسل نه باختری. در این محل دریاچه گسلی نیز دیده شده است که در گوشه تصویر بزرگنمایی شده است؛ ت) نمونه‌ای از بریدگی در مخروط‌افکنه‌ها در اثر عملکرد گسل نه باختری.

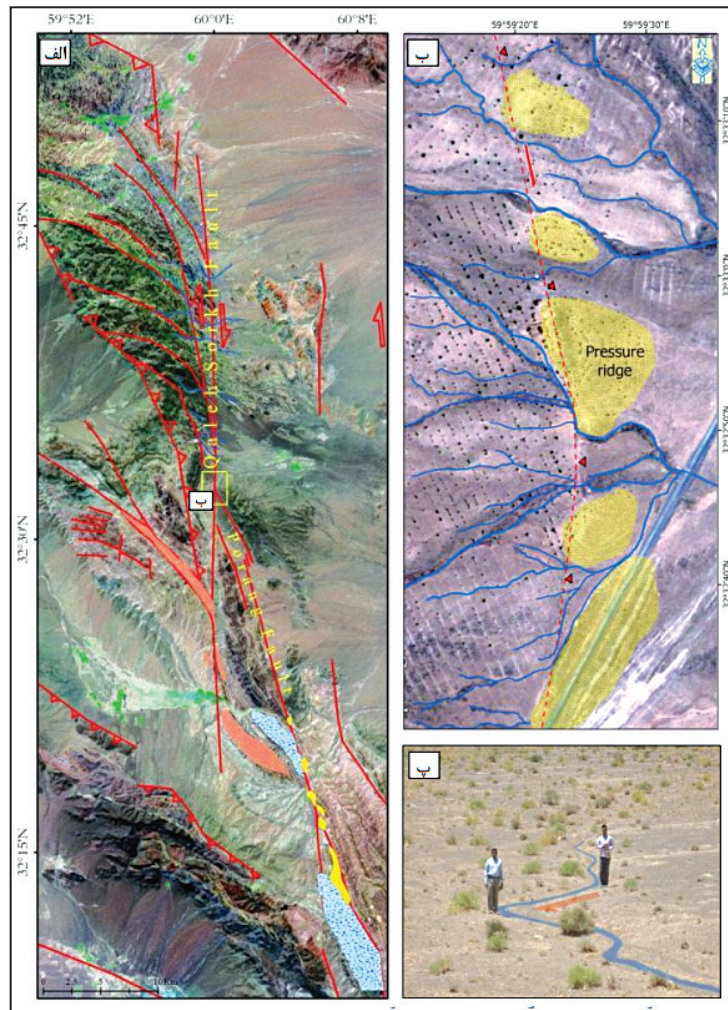
شکل ۷- الف) نمای کلی از راستای گسل اسماعیل آباد؛ ب) انحراف مسیر آبراهه‌ها به صورت راست‌بر در محل عبور از گسل اسماعیل آباد؛ پ) بریدگی راست‌بر مخروط افکنه به میزان ۴۱۰ متر. در این محل جابه‌جایی راست‌الغز راست‌بر آبراهه‌ها نیز قابل اندازه‌گیری است؛ ت) ایجاد پشته فشاری و جابه‌جایی مسیر آبراهه‌ها در راستای گسل.



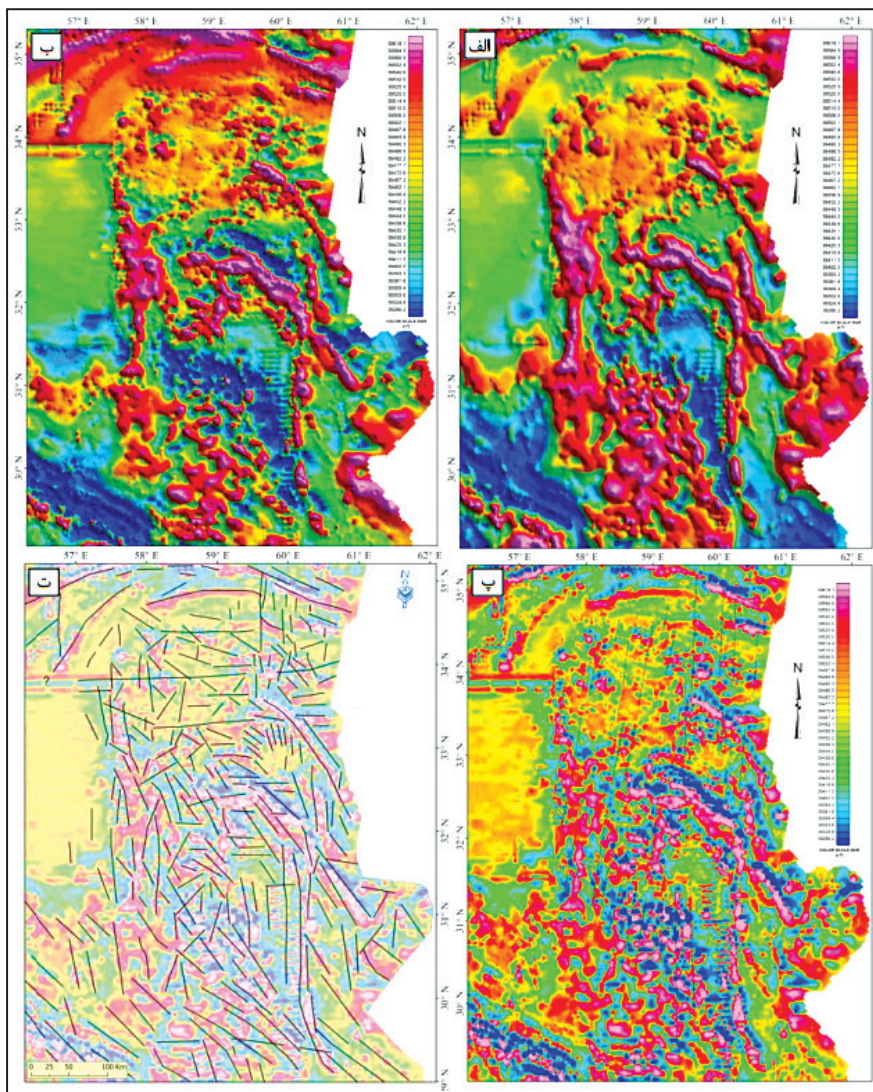
شکل ۸- شواهد جابه‌جایی راست‌الغز راست‌بر و افزایش گسلی در محل عبور گسل اسماعیل آباد از نزدیک روستای تیغ‌درو با موقعیت جغرافیایی تقریبی $56^{\circ} 46' 56''$ خاوری و $32^{\circ} 08' 47''$ شمالی. الف و ب) مدل توپوگرافی تهیه شده با GPS Kinematic، برای بررسی سازوکار گسل و مقدار دقیق جابه‌جایی افقی و قائم در راستای گسل. پیکان‌های سرخ رنگ مسیر عبور گسل است؛ پ) تصویر صحرایی از محل عبور گسل اسماعیل آباد. تغییر رنگ رسوبات و بالا آمدگی سمت باختری گسل موجب تشکیل افزایش گسل در راستای عبور گسل شده است.



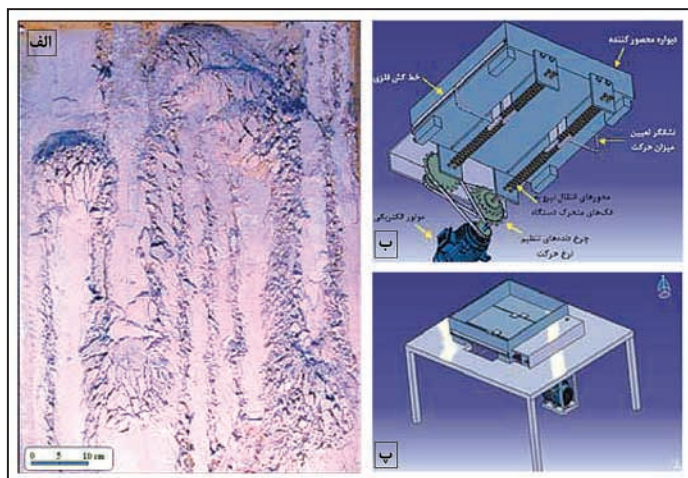
شکل ۹-برخاستگی رسوبات در محل عبور گسل اسماعیل آباد در مکانی با موقعیت جغرافیایی تقریبی $51^{\circ}59'59''$ خاوری و $31^{\circ}59'$ شمالی. در این تصویر مقادیر ارتفاع دیواره رودخانه فصلی عمود بر روند گسل اسماعیل آباد به دست آمده است. همچنین در یادگانه رودخانه‌ای بسیار جوان در بستر رودخانه نیز این تغییر دیده می‌شود.



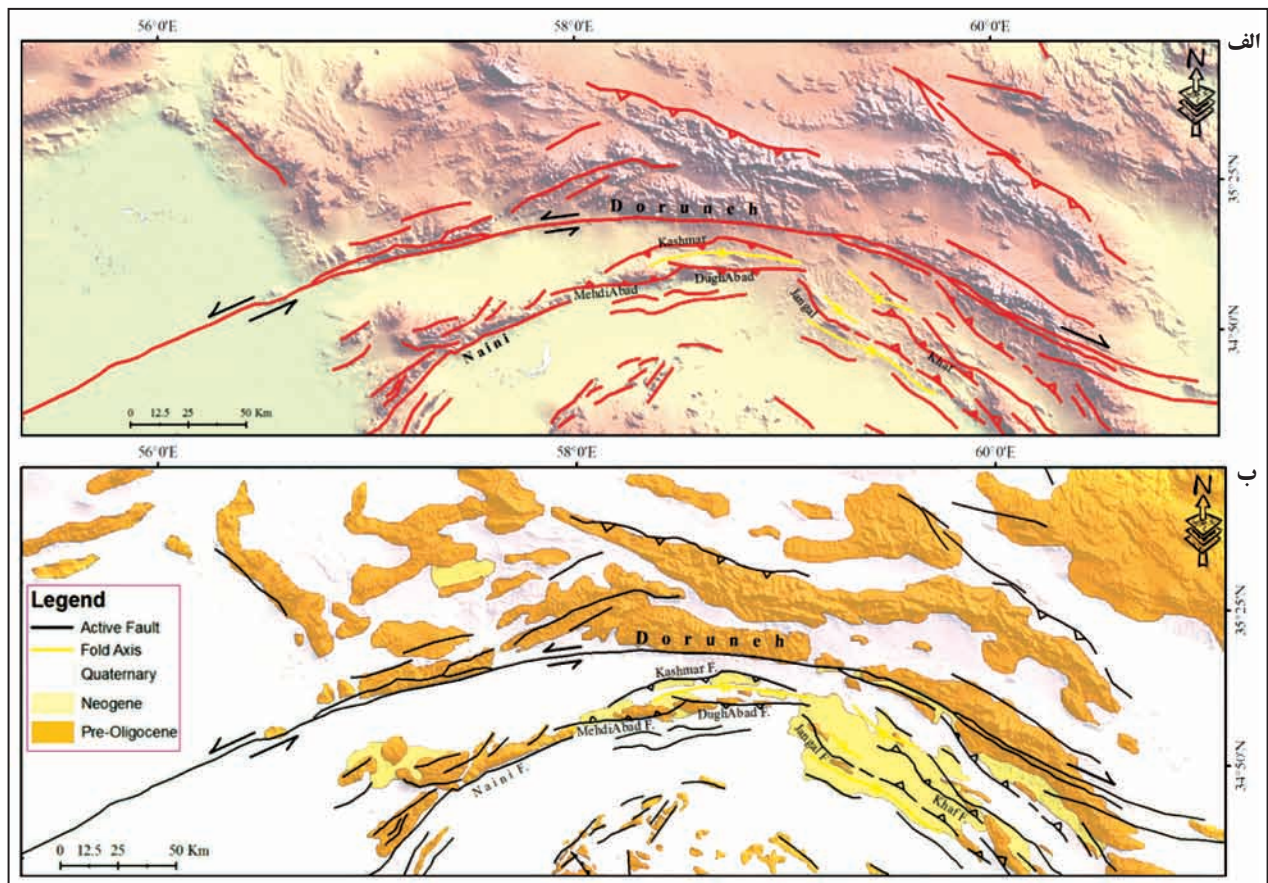
شکل ۱۰- الف) نمای کلی از گسل قلعه سرخ و پورنگ. در بخش‌های بالایی گسل قلعه سرخ که دارای امتداد شمالی- جنوبی است، جابه‌جایی راست‌بر در مسیر آبراهه‌ها به خوبی دیده می‌شود. در بخش پایینی تصویر، جابه‌جایی واحدهای سنگی (واحدهای مشخص شده با رنگ‌های صورتی و آبی آسمانی) در راستای گسل‌های قلعه سرخ و پورنگ به میزان ۱۰ کیلومتر دیده می‌شود؛ ب) رسم مسیر آبراهه‌ها و پشته‌های گسلی ایجاد شده در اثر عملکرد گسل قلعه سرخ؛ پ) جابه‌جایی جوان در مسیر آبراهه در راستای گسل قلعه سرخ با موقعیت جغرافیایی تقریبی $20^{\circ}59'59''$ خاوری و $33^{\circ}33'40''$ شمالی.



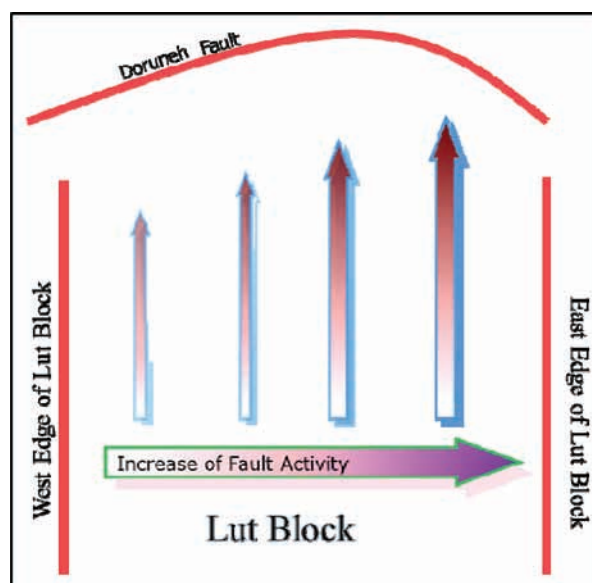
شکل ۱۱- نقشه‌های مغناطیسی حاصل از اعمال فیلترهای مختلف روی داده نقشه شدت کل میدان مغناطیسی (TMA) در گستره لوت. الف) نقشه برگردان به قطب؛ ب) ادامه فروسو؛ پ) مشتق قائم؛ ت) خطواره‌های مغناطیسی شناسایی شده در پهنه لوت. این خطواره‌ها با بیشترین تطبیق ممکن از نتایج تفسیر فیلترهای اعمال شده بر داده شدت میدان کل مغناطیسی استخراج شده است. تصویر پس‌زمینه نقشه حاصل از اعمال فیلتر مشتق قائم مرتبه اول است.



شکل ۱۲- الف) نمایی از توزیع دگربرختی و پیدایش ساختارها در طی مرحله نهایی مدل‌سازی آزمایشگاهی با شرایط پهنه برشی ناهمگن. در این تصویر به روشنی توزیع بیشتر ساختارهای فعال در بخش خاوری نسبت به بخش باختری پهنه لوت دیده می‌شود؛ ب و پ) شکل نمادین از اجزای اصلی سازنده دستگاه مدل‌سازی مورد استفاده در این پژوهش است.



شکل ۱۳- تصویر ارتفاعی (الف) و ساده شده زمین شناسی (ب) از گسل ها و ساختارهای پیرامون گسل درونه. در این تصویر تغییر روند ساختارهای موجود (اعم از گسل و چین) از شمال خاور- جنوب باختر در سمت باختر به شمال باختر- جنوب خاور در سمت خاور، راستای ساختارها دارای میزان انحنای بیشتری نسبت به سمت باختر است.



شکل ۱۴- مدل نمادین از نقش میزان تجمعی برش راست بر شمالی- جنوبی در خمیدگی ساختاری لوت شمالی. بر این اساس افزایش تدریجی مقدار تنش اعمالی بر بخش شمالی پهنه لوت از سوی باختر به خاور، نقش مهمی در خمیدگی ساختاری لوت شمالی و تغییر روند گسل درونه در بخش های مختلف دارد.

کتابنگاری

- اسدی، م.، ۱۳۹۱- تحلیل ارتباط قطعات گسلی در گسل فعال اسماعیل آباد با روش‌های هندسی- جنبشی (خاور ایران)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، صص ۴۱ تا ۶۹.
- خطیب، م. م.، ۱۳۷۷- هندسه پایانه گسل‌های امتداد لغز، پایان‌نامه دکتر، صص ۱۸ تا ۴۵.
- یزدان‌پناه، ح.، خطیب، م. م.، نظری، ح. و غلامی، ا.، ۱۳۹۳ الف- تحلیل جنبش‌شناختی امتدادلغز پهنه لوت با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی، سی و سومین گردهمایی ملی علوم زمین. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- یزدان‌پناه، ح.، خطیب، م. م.، نظری، ح. و غلامی، ا.، ۱۳۹۳ ب- شناسایی ساختارهای زیرسطحی به کمک شواهد مغناطیسی در پهنه لوت (خاور ایران)، سی و سومین گردهمایی ملی علوم زمین. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

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, TC2008.
- Bayer, R., Chery, J., Tatar, M., Vernant, P., Abbassi, M., Masson, F., Nilforoushan, F., Doerflinger, E., Regard, V. & Bellier, O., 2006- Active deformation in Zagros-Makran transition zone inferred from GPS measurements. *Geophysical Journal International* 165, 373-381.
- Berberian, M. & Yeats, R. S., 2001- Contribution of archaeological data to studies of earthquake history in the Iranian Plateau. *Journal of Structural Geology* 23, 563-584.
- Berberian, M., 1976- Quaternary faults in Iran. In: Berberian, M. (Ed.), *Contribution to the Seismotectonics of Iran. Part II*. 39. *Geol. Surv. Iran*, 187-258.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Qorashi, M., Talebian, M., Khatib, M. M. & Priestley, K., 2000- The 1994 Sefidabeh earthquakes in eastern Iran: Blind thrusting and bedding-plane slip on a growing anticline, and active tectonics of the Sistan Suture zone, *Geophys. J. Int.*, 142, 283 – 299.
- Foroutan, M., Meyer, B., Sébrier, M., Nazari, H., Murray, A. S., Le Dortz, K., Shokri, M. A., Arnold, M., Aumaitre, G., Bourlès, D., Keddadouche, K., Solaymani Azad, S. & Bolourchi, M. J., 2014- Late Pleistocene-Holocene right slip rate and paleoseismology of the Nayband fault, western margin of the Lut block, Iran, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119(4), 3517-3560.
- Jackson, J. A., Haines, J. & Holt, W., 1995- The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran, *J. Geophys. Res.*, 100, 15,205–15,219.
- LeDortz, K., Meyer, B., Sébrier, M., Nazari, H., Braucher, R., Fattahi, M., Benedetti, L., Foroutan, M., Siame, L., Bourlès, D., Talebian, M., Bateman, M. D. & Ghoraishi, M., 2009- Holocene right-slip rate determined by cosmogenic and OSL dating on the Anar fault, Central Iran. *Geophysical Journal International* 179, 700–710.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignieres, M., Nankali, H. & Van Gorp, S., 2007- Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran. *Geophysical Journal International* 170, 436-440.
- Meyer, B. & Le Dortz, K., 2007- Strike-slip kinematics in Central and Eastern Iran: estimating fault slip-rates averaged over the Holocene. *Tectonics*, 26, TC5009, doi:10.1029/2006TC002073.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. & Chéry, 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, 381-398.
- Walker, R. & Jackson, J., 2002- Offset and evolution of the Gowk fault, SE Iran; a major intra-continental strike-slip system, *J. Struct. Geol.*, 24, 1677–1698.
- Walker, R. & Jackson, J., 2004- Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics*, 23, TC5010, doi:10.1029/2003TC001529.
- Walker, R. T., Gans, P., Allen, M. B., Jackson, J., Khatib, M. M., Marsh, N. & Zarrinkoub, M., 2009- Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran. *Geophysical Journal International* 177, 783–805.
- Walker, R. T., Khatib, M. M., Bahroudi, A., Rodés, A., Schnabel, C., Fattahi, M., Talebian, M. & Bergman, E., 2013- Co-seismic, geomorphic, and geologic fold growth associated with the 1978 Tabas-e-Golshan earthquake fault in eastern Iran, *Geomorphology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.02.016>.
- Walpersdorf, A., Manighetti, I., Mousavi, Z., Tavakoli, F., Vergnolle, M., Jadidi, A., Hatzfeld, D., Aghamohammadi, A., Bigot, A., Djamour, Y., Nankali, H. & Sedighi, M., 2014- Present-day kinematics and fault slip rates in eastern Iran, derived from 11 years of GPS data. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 1-25.

Analysis of Strike-Slip Kinematics in a Shear Zone with Heterogeneous Slip Rate: Case Study Lut Area, Eastern Iran

H. Yazdanpanah ^{1*}, M. M. Khatib ², H. Nazari ³ & E. Gholami ⁴

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

² Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

³ Assistant Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

Received: 2014 December 14

Accepted: 2015 March 08

Abstract

A model suggests the current shear, which originated about 5 Ma ago, has been accommodated by strike-slip faulting within and along the margins of the Lut area. The measured Quaternary slip rate along the Nehbandan fault system to the east and the Nayband fault system to the west margins of the Lut area is ~ 5 and $\sim 1.7 \pm 0.3$ mm/year, respectively. Therefore, the observed slip rate is shown to increase from west to the east margin. This has resulted in the development of a dextral strike-slip shear system with heterogeneous slip rate across the Lut area. We have used satellite images, field observations, aeromagnetic data and analogue modeling to measure Cenozoic strain distribution and slip-rate changes in the Lut area. Results show direct linkage between deformation distribution and slip rate changes along the margins of the Lut area.

Keywords: East of Iran, Lut area, Geological offset, Fault slip rate.

For Persian Version see pages 279 to 290

*Corresponding author: H. Yazdanpanah; E-mail: hesam.yazdanpanah@yahoo.com