



فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۴۰۲، سال هفتم، شماره ۲۶

doi 10.22077/jt.2025.8491.1193

مطالعه ساختارها و زمین ساخت بخش غربی گسل لادار واقع در شهرستان خور، بلوک یزد، ایران مرکزی

سهیلا ابراهیم^{۱*}، علیرضا ندیمی^۲

۱- کارشناسی ارشد تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳

گسل لادار به عنوان یکی از ساختارهای اصلی در منطقه شرق ایران، تأثیرات ژئومورفولوژیکی گسترده‌ای بر چشم‌انداز طبیعی شهرستان خور داشته است. داده‌های حاصل از مطالعات صحرایی، مشاهدات میدانی، و پردازش تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که امتداد غربی این گسل باعث تغییرات قابل توجهی در الگوهای رسوب‌گذاری و شکل‌گیری نهشته‌های کواترنری شده است؛ از جمله جابه‌جایی بسترهای آبرفتی، تغییر جهت و انشعاب مجدد آبراهه‌ها، و اختلال در توزیع رسوبات سطحی. بررسی‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد که در مناطق مشخصی مانند حاشیه جنوبی دشت خور، آبراهه‌ها به صورت مورب قطع شده و در برخی نقاط، پدیده‌ی انباشت یا فرسایش شدید ایجاد شده که بیانگر فعالیت مداوم این گسل در دوره‌های زمین‌ساختی اخیر است. همچنین، تغییرات ارتفاعی در ترانشه‌های طبیعی، ایجاد نوارهای خطی در چشم‌انداز، و ناهنجاری در توزیع مخروط‌های افکنه، نشان‌دهنده‌ی تأثیر مستقیم گسل بر تحول ژئومورفیک منطقه است. شکل دم‌اسبی مشاهده‌شده در پایانه غربی گسل لادار، گواهی بر پویایی ساختاری آن در این بخش بوده و می‌تواند نشانه‌ای از پراکندگی تنش‌ها به ساختارهای جانبی و پایان تدریجی حرکت گسل باشد.

کلیدواژه‌ها: گسل لادار، مغناطیس هوابرد، نهشته‌های کواترنری، پایانه گسلی با ساختارهای دم‌اسبی، ساختارهای زمین‌شناسی.

*ایمیل: soheilaebrahim3@gmail.com

تلفن تماس: ۰۹۳۶۰ ۲۷۸۳۸۸



Structural and tectonic analysis of the western section of the Ladar Fault in Khur County, Yazd Block, Central Iran

Soheila Ebrahim^{1*}, Alireza Nadimi²

1- M.Sc. in Tectonics, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

2- Associate Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Abstract

The Ladar Fault, as one of the main structural features in eastern Iran, has exerted significant geomorphological impacts on the natural landscape of Khur County. Data derived from field studies, ground observations, and satellite image processing indicate that the western extension of this fault has caused considerable changes in sedimentation patterns and the development of Quaternary deposits. These include displacement of alluvial beds, diversion and re-branching of drainage networks, and disturbances in the distribution of surface sediments. More detailed analyses reveal that in specific areas, such as the southern margin of the Khur plain, drainage channels have been obliquely truncated, and in certain zones, intense deposition or erosion has occurred—reflecting ongoing tectonic activity along the fault in recent geological periods. Moreover, elevation variations in natural trenches, the formation of linear features in the landscape, and anomalies in the distribution of alluvial fans further illustrate the direct influence of the fault on regional geomorphic evolution. The observed horsetail termination at the western end of the Ladar Fault serves as evidence of its structural dynamism in this sector and may indicate a dispersion of tectonic stress into adjacent structures and a gradual cessation of fault movement.

Keywords: Ladar Fault, Airborne magnetics, Quaternary deposits, Horsetail splay, Geological structures.

*Email: soheilaebrahim[✉]@gmail.com

Tel: +989360278388

۱- مقدمه

گسل لادار در منطقه خور یکی از ساختارهای تکتونیکی مهم ایران مرکزی است که نقش اساسی در جابه‌جایی رسوبات و تغییرات ساختاری در نهشته‌های کوآترنری دارد. درحالی‌که دنباله شمال‌شرقی این گسل در مطالعات زمین‌شناسی شناسایی شده، رهگیری دنباله جنوب‌غربی آن همچنان با ابهام همراه است. فعالیت‌های تکتونیکی گسل لادار تحت تأثیر همگرایی صفحات عربی و اوراسیا قرار داشته و به‌ویژه در شکل‌گیری ساختارهای منطقه‌ای تأثیرگذار بوده است (Allen et al., 2004). با توجه به اهمیت گسل‌های امتدادلغز در ساختارهای ایران مرکزی، پژوهش‌های متعددی بر روی این پهنه و دیگر گسل‌های مشابه صورت گرفته است.

در انتهای گسل‌های امتداد لغز دو نوع هندسه انشعاب دیده می‌شود: انشعاب تکی و مجموعه‌ای از انشعاب‌ها که به دم اسب شباهت دارند (de Joussineau and Aydin, 2007; Kirkpatrick et al., 2008; Xu et al., 2024). گسل لادار با امتداد شمال شرقی-جنوب غربی کشیده شده و پایانه گسلی با ساختارهای دم اسبی را در انتهای خود ایجاد کرده است. پایانه گسلی با ساختارهای دم اسبی به مجموعه‌ای از شکستگی‌ها و ترک‌های موازی گفته می‌شود که از یک گسل اصلی منشعب می‌شوند. این ترک‌ها معمولاً در انتهای گسل‌ها یا در مناطقی که تغییرات اصطکاکی و تنش‌های محلی وجود دارد، شکل می‌گیرند و به‌طور زایه‌دار نسبت به گسل اصلی قرار دارند. این ساختارها می‌توانند به طول چندین کیلومتر گسترش یابند و نقشی مهم در جابه‌جایی رسوبات، تغییرات در چین‌خوردگی‌ها، جابه‌جایی آبرفت‌ها و انحراف آبراهه‌ها در نواحی گسلی دارند (Mulchrone et al., 2005; Kim & Sanderson, 2006; Saber et al., 2021). Fossen (2010) معتقد است که پایانه گسلی با ساختارهای دم اسبی در انتهای گسل‌های امتدادلغز تشکیل می‌شود، (Berberian 2014) ذکر کرده‌است که این ساختار می‌تواند در یک یا هر دو انتهای گسل‌های امتدادلغز تشکیل شوند. در این پژوهش تلاش شده است تا با بهره‌گیری از بررسی‌های سنجش از دور و تحلیل ساختاری، امتداد گسل لادار در منطقه

شهرستان خور شناسایی و مطالعه شود. همچنین، با معرفی شاخه‌های فرعی، پایانه گسلی با ساختارهای دم اسبی مرتبط با آن تعریف و تبیین شده است (شکل ۱).

۲- روش مطالعه

با توجه به ماهیت ساختاری این پژوهش، در مرحله اول و قبل از هرگونه بررسی ساختاری، مطالعات کتابخانه‌ای و آزمایشگاهی انجام شد. به منظور سهولت در شناسایی و رهگیری ساختارهای زمین‌شناسی در مقیاس بزرگ، از تصاویر ماهواره‌ای و پردازش آن‌ها در نرم‌افزارهای مختلف کمک گرفته شد. اعمال فیلترهای مختلف بر این داده‌ها همچنین مطالعه آماری شکستگی‌های منطقه را آسان‌تر کرد. در بخش کتابخانه‌ای مطالعات، با بررسی نقشه‌ها و مطالعات پیشین زمینه‌ی تکمیل نظریات قبلی در مورد ایران مرکزی به ویژه بلوک لوت، فراهم شد. در نهایت مطالعات صحرایی سبب برداشت مشخصات صفحات گسلی متعدد شد و با استفاده از ساختارهای گسلی مانند پله‌های گسلی و رشد بلورها، سازوکار آن‌ها مشخص شد.

در این مطالعه، به منظور شناسایی شکستگی‌ها در مقیاس بزرگ از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 9، Sasplanet و Google Earth pro استفاده شد. علاوه بر این، داده‌های DEM (Digital Elevation Models) بر این، به ویژه Oli به بررسی ژئومورفولوژی منطقه کمک کرده‌است. پردازش این داده‌ها به کمک نرم‌افزارهای Arc map 10.4.1، ENVI 5.3.1، 7.0Er mapper و Global Mapper صورت گرفت. علاوه بر این، با نرم‌افزارهای FaultKin8.0 و Rock work20.0 به تجزیه و تحلیل داده‌های برداشت شده، انجام شد. مطالعات مغناطیس هوابرد نیز، با نرم‌افزار Oasis montaj 8.6 به شناسایی ساختارهای پی سنگی منطقه کمک کرد. در نهایت برای آماده سازی تصاویر از نرم‌افزار Corel Draw 25.0 استفاده شد.

نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱/۲۵۰،۰۰۰ خور، انارک و جندق، ۱/۱،۰۰۰،۰۰۰ نقشه تکتونیکی ایران (Nogole sadat and Almasian., 1993) و در نهایت ۱/۲۵۰،۰۰۰ مغناطیس هوابرد خور به کار گرفته شد. این نقشه‌ها و ساختارهای مشخص شده در آن‌ها به عنوان مبنایی برای بررسی بیشتر ساختارها استفاده شد.



۳- موقعیت زمین‌شناسی و زمین ساخت منطقه

ایران مرکزی به عنوان یکی از خرده‌قاره‌های کیمریایی در پهنه برخورد قاره‌ای عربی-آفریقایی گندوانایی با اوراسیا، نقش کلیدی در تاریخچه زمین‌شناسی منطقه ایفا کرده است (Tucker, 2018؛ یساقی و همکاران، ۱۴۰۱). این پهنه، از شرق آناتولی تا شرق ایران، ارتفاعی بین ۱.۵-۲ کیلومتر تا ۵۰۰ متر بالای سطح دریا دارد (Sengor and Kidd, 1979; Keskin, 2007) و با گسل‌های اصلی و افیولیت‌های مزوزوئیک و ترشیری مرتبط با اقیانوس نئوتتیس احاطه شده است (Torabi, 2011).

ایران مرکزی به زیر بلوک‌های لوت، کرمان، طبس، یزد، و خور-انار تقسیم می‌شود که توسط گسل‌های اصلی از جمله درونه، نهندان، دهشیر و بشاگرد از هم جدا شده‌اند (Davoudzadeh and Weber Diefenbach, 1987). تکامل زمین‌ساختی این خرده‌قاره شامل سه مرحله اصلی است: ریف‌زایی (ژوراسیک پسین تا الیگوسن) که به شکل‌گیری اقیانوس اولیه و گسل‌هایی مانند اردیب و درونه منجر شد؛ حرکت‌های فشاری (اواخر ائوسن تا اوایل الیگوسن) که ناشی از همگرایی صفحات عربی و اوراسیا و تشکیل کمربندهای چین‌خورده زاگرس بود (Allen, 2004; Stocklin, 1968)؛ و بسته شدن حوضه‌ها با پایان فروانش زون نئوتتیس (Allen et al., 2011; Bagheri et al., 2009).

از دیدگاه چینه‌شناسی، سازند شاه‌کوه در ناحیه خور نشان‌دهنده یک پلتفرم کربناته کم‌عمق دریایی مربوط به بarmینین تا آپتین اولیه است که بخشی از چرخه رسوبی پیش‌رونده شامل رسوبات ساحلی (سازند نقره) تا حوضه‌ای (سازند بازیاب) است (Seyed-Emami and Wilmsen, 2016). همچنین، رسوبات دریایی عمیق آپتین بالایی تا آلین، شامل مارن‌های سیلتی و سنگ‌های آهکی اسکلتی‌شنی، تکمیل‌کننده تغییرات رسوبی این دوره‌اند (Wilmsen et al., 2013).

چهارچوب مورد مطالعه، در محدوده غرب شهرستان خور تا شرق آن در دشت‌های بین عروسان و چاه‌ملک، و فراتر از چوپانان واقع شده‌است (شکل ۱). چینه‌شناسی غرب و جنوب غربی شهرستان خور عمدتاً شامل واحدهای سنگی کرتاسه زیرین، ائوسن، پالئوسن و نهشته‌های کواترنری می‌باشد. همچنین از دیدگاه

تکتونیک منطقه‌ای خور در شمال غرب خرد قاره‌ی ایران مرکزی، شمال شرق کمان ماگمایی ارومیه دختر و در بلوک یزد واقع شده‌است.

این منطقه، منطقه‌ای استثنایی است زیرا حوادث تکتونیک مختلفی از جمله ریف‌ت حوضه پشت کمانی نئوتتیس، مراحل همگرایی و برخوردهای تکتونیک در نهشته‌های ژوراسیک-ائوسن و سنگ‌های دگرگونی و آذرین به خوبی مشاهده می‌شود. از ساختارهای منطقه می‌توان به، گسل‌های امتدادلغز بزرگی اشاره کرد که در بسیاری از نواحی چین‌خورده و کوتاه شده خرد قاره شرق ایران مرکزی حضور دارند و می‌توانند به عنوان کرنش‌های ناشی از حرکات تکتونیک در نظر گرفته شوند (Kargaranbafghi et al. 2011).

گسل لادار در پایانه‌ی غربی خود در منطقه‌ی نخلک-انارک با پایانه‌ی غربی گسل درونه تداخل دارد. این منطقه شامل گسل‌های راست‌لغز و چپ‌لغز است که تغییرات ساختاری و جابه‌جایی‌های قابل‌توجهی در سنگ‌های متامورفیک و اولترامافیک، مانند هارزبورژیت‌های سرپانتینی و بازالت‌های متامورفیک ایجاد کرده‌اند. این ساختارها، نشان‌دهنده فعالیت‌های تکتونیک شدید و تغییرات فشار در دوره‌های کوهزایی مختلف هستند. فعالیت‌های تکتونیک در پایانه گسلی درونه و لادار، به تشکیل چین‌خوردگی‌ها، گسل‌های معکوس و رسوبات متنوعی مانند ماسه-سنگ‌ها، کنگلومراها و سنگ‌های آتشفشانی منجر شده است. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده نقش این پایانه در تنظیم فشارهای تکتونیک و تغییرات زمین‌شناسی منطقه است (استراتی آشتیانی و همکاران، ۱۳۹۰؛ جوادی و همکاران، ۱۳۸۹؛ Tadayon et al., 2019).

در این پژوهش به منظور رهگیری و معرفی گسل لادار و شاخه‌های فرعی آن در منطقه، واحدهای کواترنری جابه‌جا شده در امتداد این گسل و شاخه‌های فرعی آن ارزیابی شده‌است. گسل لادار در منطقه خور به موازات و در شمال گسل اردیب قرار دارد. علاوه بر این، دارای راستای کلی شمال‌شرقی-جنوب غربی است که به موازات گسل مهم درونه و چوپانان در شمال است.

۴- روش‌های جمع‌آوری اطلاعات

۴-۱- مطالعات دورسنجی

شناسایی دقیق گسل‌ها و شکستگی‌ها، علاوه بر

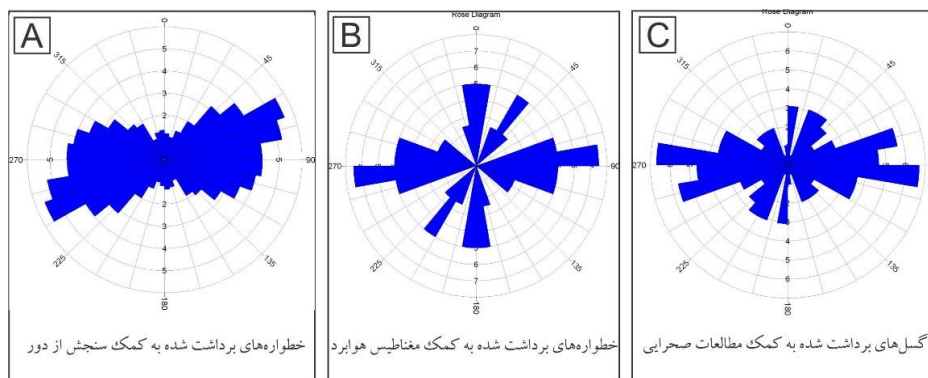


بیشترین فراوانی هستند (شکل ۲-۲-B).

۴-۳- مطالعات ساختاری

در طی مطالعات صحرایی در امتداد گسل لادار و شاخه‌های فرعی آن در منطقه‌ی خور، اطلاعات لازم برای صفحه‌های گسلی (امداد، شیب و سمت شیب) به همراه خش‌لغزهای تعیین کننده نوع ساز و کار گسل‌ها برداشت شد. این داده‌ها به کمک نرم‌افزار WinTensor و FaultKin ارزیابی و مورد بررسی قرار گرفت. نرم‌افزارهای یاد شده به ترتیب برای تحلیل صفحه‌ی گسلی و تحلیل تنش دیرینه در منطقه‌ی مورد نظر استفاده شد. در این وهله همچنین، کلیه‌ی داده‌های برداشت شده در عملیات صحرایی، از نظر امتداد با استفاده از رزیدیاگرام در نرم‌افزار Rockwork با رز دیاگرام حاصل از مطالعات پردازش تصاویر ماهواره‌ای و مغناطیس هوابرد مقایسه شد (شکل ۲-۲-C). مطابق با این رزیدیاگرام، بیشتر گسل‌های منطقه‌س مورد مطالعه، امتداد E-W را نشان می‌دهند. در مراتب بعدی گسل‌های با امتداد E-W و NE-SW دارای بیشترین داده هستند. مشخص است که سمت امتداد NE-SW دارای بیشترین داده‌ها در مطالعات صحرایی و مغناطیس هوابرد هستند.

حداقل رساندن اثرات ناهنجاری‌های قطبی دقت شناسایی را بالا می‌برد. این دو فیلتر، موثرترین فیلترها در شناسایی لبه‌ها و تقویت روند گسل‌ها هستند (Razavi Pash et al., 2021; Oladejo and Ogun-). در آخر نتایج خطواره‌های حاصله در این مرحله، با خطواره‌های حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای مقایسه شد که در بخش‌های پیشرو به آن پرداخته می‌شود. در بررسی داده‌های مغناطیس هوابرد، مرز مشخص بین نواحی قرمز که نمایانگر سنگ‌های درونی با که دارای قابلیت مغناطیس بالا هستند و نواحی آبی که سنگ‌های با قابلیت مغناطیسی ضعیفتر را مشخص می‌کنند، به عنوان خطواره‌های گسلی برداشت گردید. اگرچه عمق گسل‌های پی‌سنگی در نقاط مختلف بین ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر متغیر است، به‌طور کلی، رهگیری این خطواره‌ها تا عمق ۱۵ کیلومتری نشان‌دهنده پی‌سنگی بودن گسل‌های مذکور است (Mousavi and Ebbing, 2018). رزیدیاگرام حاصل از پردازش این داده‌ها در نرم‌افزار Rockwork نشان دهنده‌ی سمت غالب NEE-SWW است. در مراحل بعدی، خطواره‌های با امتداد N-S و NE-SW دارای



شکل ۲: رزیدیاگرام ترسیم شده برای امتداد خطواره‌های شناسایی شده به کمک سنجش از دور و مغناطیس هوابرد و گسل‌های شناسایی شده در عملیات صحرایی.

این نواحی دشتی طیف گسترده‌ای از نهشته‌های قدیمی، جدید و عهد حاضر را در برمی‌گیرد که شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ، رسوبات تبخیری و کفه‌های رسی و ماسه‌های بادی است. فعالیت‌های زمین ساختی همچنین در منطقه‌ی مورد بررسی سبب به وجود آمدن نسل‌های متمادی از مخروط افکنه‌ها، انحراف و کشیدگی آبراهه‌ها شده است.

۴-۴- بررسی فعالیت‌های کواترنری

از جمله تأثیرات تکتونیک تغییرنمای ریخت‌شناسی منطقه است. نرخ بالا آمدن تکتونیک در تقابل با نرخ فرسایش می‌تواند چهره‌ی ریخت‌شناسی منطقه را با ایجاد و یا تغییر ساختارها دگرگون کند. از ویژگی‌های بارز منطقه‌ی مورد مطالعه گسترده‌ی نواحی کم ارتفاع و دشت در مجاورت با مناطق مرتفع و کوهستانی است.

و تغییر شکل حوضه‌های رسوبی در دشت‌های غربی قابل مشاهده است.

با توجه مطالعات انجام شده توسط Vernant et al. (2004) بر اساس داده‌های جی پی اس و آخرین سمت همگرایی، انتظار می‌رود که گسل لادار دارای سازوکار شیب لغز معکوس با مولفه‌ی امتدادلغز چپگرد و سمت شیب شمال غربی باشد اما مطالعات صحرایی و سنجش از دور نشان دهنده‌ی حرکات راستگرد این گسل در کواترنری بوده است. این حرکت به ویژه در آبراهه‌ها به صورت انحراف مسیر و به هم ریختگی در مخروط‌افکنه‌ها قابل تشخیص است. این بررسی‌ها نشان می‌دهد که گسل لادار علاوه بر مولفه‌ی حرکتی چپگرد دارای مولفه‌ی حرکتی راستگرد نیز بوده است. به نظر می‌رسد از میان دو حرکت یاد شده، مولفه‌ی حرکتی راستگرد قدیمی‌تر بوده و آثار این حرکت قدیمی در طی آخرین مراحل تکامل این ناحیه نیز دیده می‌شود (Ebrahim and Nadimi, 2019).

۵-۲- مطالعات صحرایی و مطالعات سنجش از دور

آنالیز مشخصات صفحه‌های گسلی برداشت شده برای ۷ محدوده ایستگاهی در محدوده سه شاخه فرعی گسل، نتایج قابل توجهی را ارائه داده است. این تحلیل‌ها که در شکل ۳ نشان داده شده‌اند، الگوهای کینماتیکی و هندسی گسل‌ها را آشکار کرده است. مطابق با نتایج بدست آمده، سه محدوده‌ی ایستگاهی یک، شش و هفت سمت همگرایی و مابقی سمت واگرایی در منطقه را نشان می‌دهند. ایستگاه‌های یک و شش در امتداد گسل خور سمت همگرایی شمال غربی-جنوب شرقی و ایستگاه هفت سمت همگرایی شمال شرقی-جنوب غربی را مشخص می‌کنند. سمت واگرایی نشان داده شده برای دو محدوده‌ی سه و چهار، NW-SE و دو و پنج، NE-SW است. باید در نظر گرفت که این برداشت‌های محدوده‌ای همواره تحت تاثیر ساختارها و تکتونیک محلی هستند (شکل ۳).

علاوه بر این، با دسته‌بندی داده‌های صحرایی بر اساس امتداد آن‌ها در جهات NW-SE، NE-SW، E-W، N-S چنین برآورد می‌شود که گسل‌های دارای امتداد N-S سمت همگرایی شمال شرقی-جنوب غربی، صفحه‌های گسلی NE-SW سمت همگرایی شمال غربی بوده‌اند. این در حالی است که صفحه‌های گسلی E-W و NW-

۵- نتایج

۵-۱- گسل لادار و پایانه گسلی با ساختارهای دم

اسبی

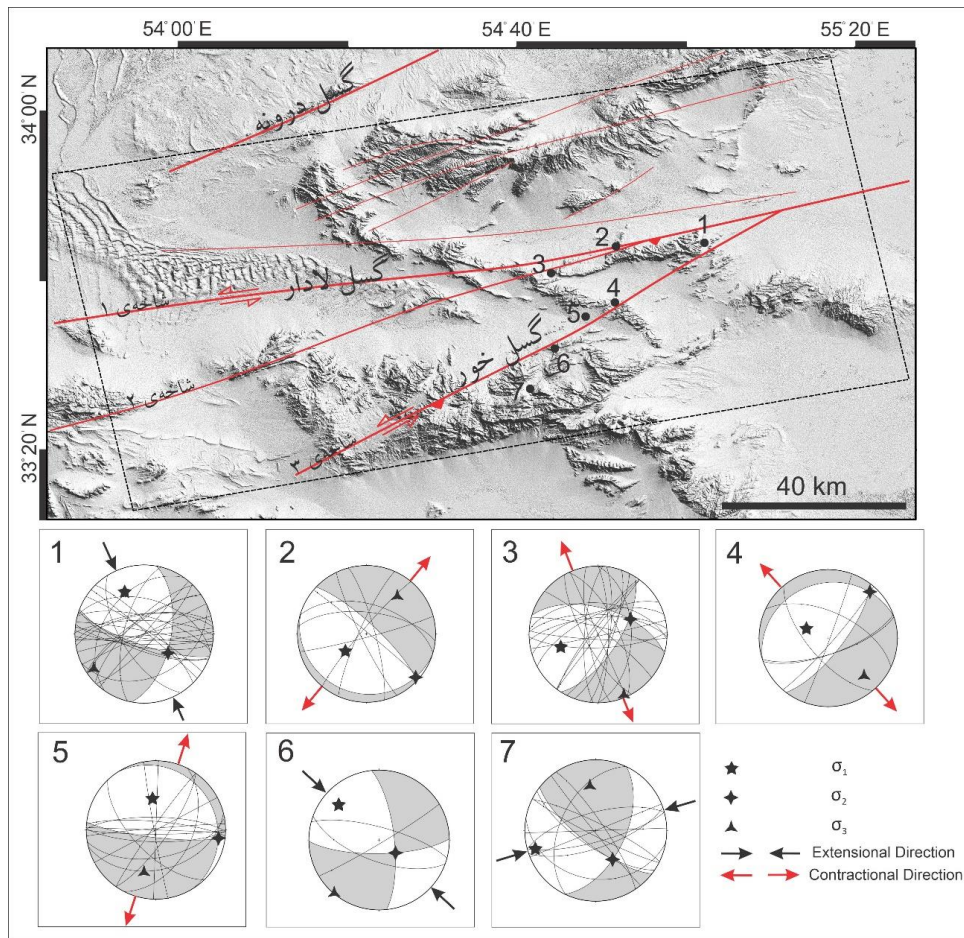
اگرچه شواهد وجود گسل لادار در داده‌های سنجش از دور و مغناطیس هوابرد مشهود است اما این گسل در نقشه‌های زمین شناسی ۱/۱۰۰،۰۰۰ خور و فرخی معرفی نشده است. با این وجود دنباله‌های شمال شرقی این گسل را می‌توان در نقشه‌ی زمین ساختی ۱/۱،۰۰۰،۰۰۰ تهیه شده توسط نوگل سادات و الماسیان در (۱۹۹۳) رهگیری کرد.

گسل لادار در منطقه‌ی خور، دارای امتداد شمال شرقی جنوب غربی و تقریباً به موازات بلوک غربی گسل درونه است. این گسل ضمن عبور از شهرستان خور، مرز بین نواحی مرتفع و دشت در مناطق غربی است و نقش به سزایی در شکل دهی حوضه‌های رسوبی در مناطق غربی دارد. مطابق با بررسی‌های سنجش از دور و داده‌های Landsat 9 و DEM این گسل در انتهای غربی خود با چندین امتداد متفاوت قابل رهگیری است که در نهایت همگی به گسل درونه ختم می‌شوند.

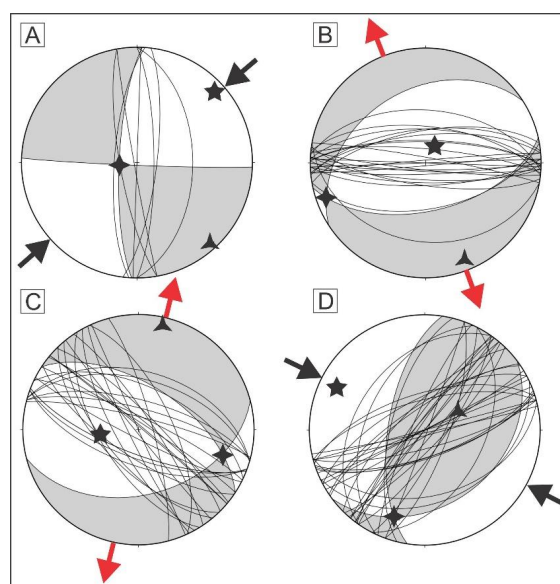
گسل‌های امتدادلغز در پوسته می‌توانند وابسته به محل زون دگرشکلی نسبت به بردار لغزش گسلی به یک زون دگرشکلی انبساطی یا انقباضی خاتمه یابند. از جمله ساختارهای مهم که در انتهای یک گسل امتدادلغز تشکیل می‌شود، پایانه گسلی با ساختارهای دم اسبی هستند. این ساختارها زمانی تشکیل می‌شود که گسل امتدادلغز در انتها به بادبزی از گسل‌های با زاویه‌ی بازشو منشعب شود و معمولاً به سمت بلوک گسلی دورشونده انحنا می‌یابند و حرکت افقی گسل در انتها ممکن است به شیب لغز تبدیل می‌شود. اگرچه جابجایی بر روی هر کدام از این شاخه‌ها کم است اما مجموع جابجایی بر روی کلیه‌ی شاخه‌ها برابر با جابجایی گسل امتدادلغز اصلی است در نتیجه باعث توزیع دگرشکلی در حجم وسیعی از پوسته می‌شود (Fossen, 2010).

در انتهای غربی گسل امتداد لغز لادار نیز پدیده مشابهی مشاهده می‌شود (شکل ۳). در این ناحیه، گسل لادار به چندین شاخه با امتدادهای متفاوت تقسیم می‌شود که تأثیر فعالیت این شاخه‌ها بر روی ساختارهایی همچون در هم ریختگی توالی لایه‌ها، تشکیل دره‌های V شکل

SE به ترتیب سمت واگرایی شمال غربی - جنوب شرقی و شمال شرقی - جنوب غربی را نشان داده‌اند (شکل ۴).



شکل ۳: گسل لادار و شاخه‌های فرعی آن بر روی داده‌های DEM نشان داده شده‌است. محدوده‌های ایستگاهی ۱ الی ۷ و آنالیز داده‌های برداشت شده در آن‌ها، توسط Faultkin که در بخش‌های ۱ الی ۷ مشخص شده‌اند. از میان این هفت محدوده‌ی ایستگاهی ایستگاه‌های یک، شش و هفت، سمت همگرایی و مابقی سمت واگرایی را مشخص می‌کنند.

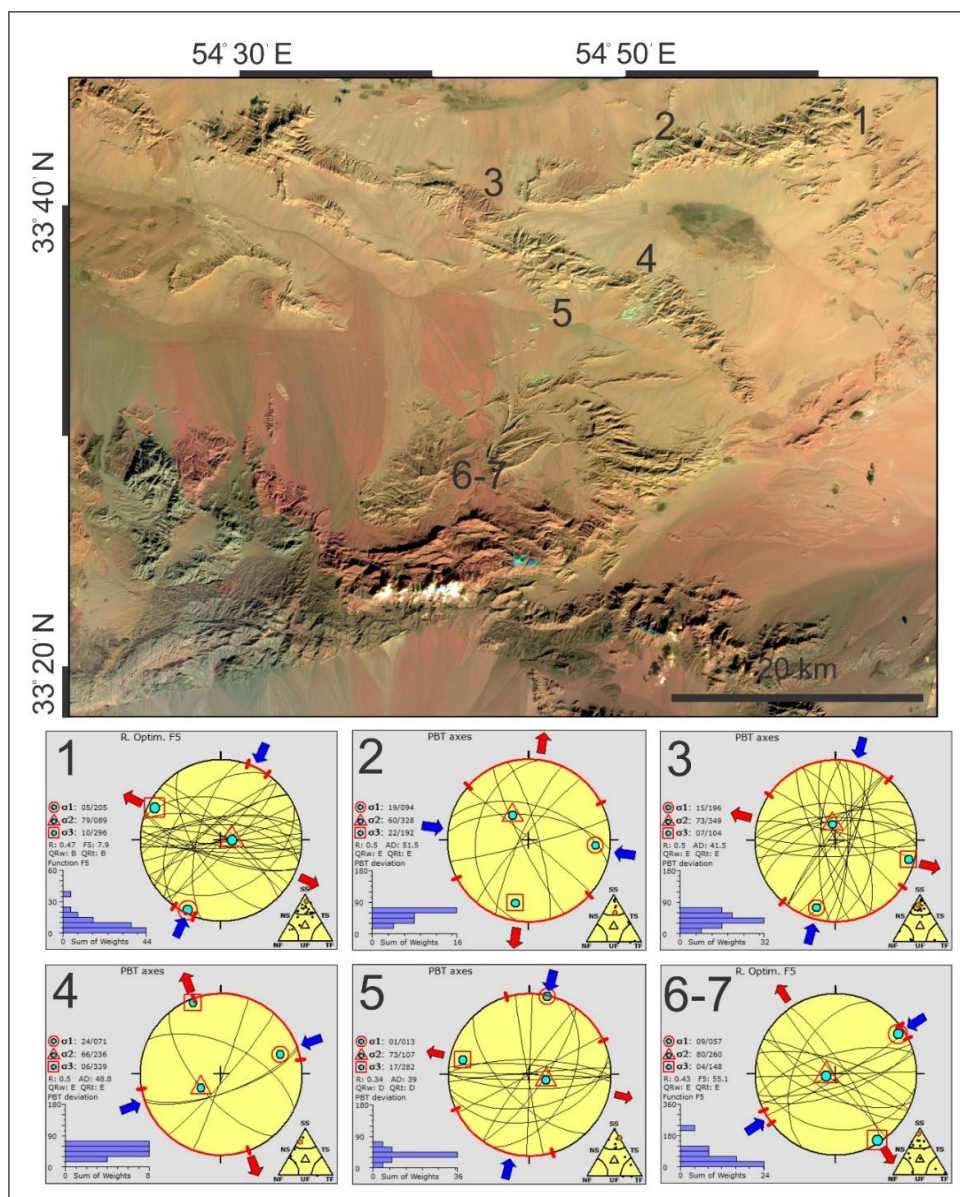


شکل ۴: (A) گسل‌های با امتداد N-S بیشترین سمت همگرایی NE-SW را نشان می‌دهند. (B) بیشترین سمت واگرایی برای گسل‌های با امتداد E-W، NW-SE است. (C) بیشترین سمت واگرایی برای گسل‌های با امتداد NW-SE به NE-SW تغییر می‌کند. (D) گسل‌های با امتداد NE-SW نشان دهنده‌ی بیشترین سمت همگرایی در جهت NW-SE هستند.

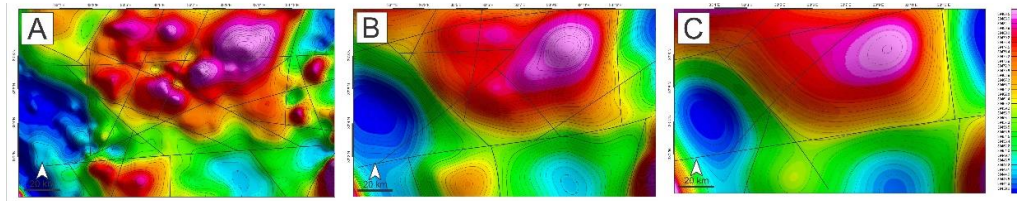
اصلی لادار-شاخه‌ی یک است و این سمت همگرایی متفاوت بر ساختارهای منطقه تاثیر داشته است. آنالیز داده‌های مغناطیس هواپرد در ژرفای ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ متری شکل ۶ نشان داده شده است. بررسی‌های داده‌های مغناطیس هواپرد در منطقه علاوه بر این که پی‌سنجی بودن گسل‌های منطقه را نشان می‌دهد، امکان رهگیری گسل لادار و خور را در ژرفای بیشتر فراهم می‌کند.

۵-۳- مطالعات پالتواسترس و مغناطیس هواپرد

شکل ۵ تنش دیرینه منطقه‌ی مورد بررسی را بر بستر LANDSAT 9 و ترکیب رنگی ۷۴۱ نشان می‌دهد. تمامی محدوده‌های ایستگاهی در این منطقه، چه در امتداد گسل اصلی لادار و چه در امتداد شاخه‌ی فرعی آن، جهت ماکزیمم تنش دیرینه‌ی NE-SW را نشان می‌دهند به غیر از محدوده‌ی ایستگاهی دو که سمت ماکزیمم تنش دیرینه در آن کاملاً متفاوت و در راستای NW-SE است. محدوده‌ی ایستگاهی یاد شده در امتداد گسل



شکل ۵: تصویر Landsat 9 که از موزاییک سه چهارچوب تهیه شده با ترکیب باندی ۷۴۱. این ترکیب کاذب رنگی، به شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی کمک می‌کند. تصاویر یک الی هفت پالتواسترس ایستگاه‌های برداشت شده را بررسی می‌کند که نشان دهنده‌ی غلبه‌ی جهت همگرایی دیرینه‌ی NE-SW است. برای این ناحیه از گسل لادار جهت همگرایی دیرینه‌ی NW-SE نیز مشخص شده است.



شکل ۶: (A) داده‌های مغناطیس هوابرد در ژرفای ۱۰۰۰ متری به همراه خطواره‌های شناسایی شده در این ژرفا. (B) داده‌های مغناطیس هوابرد در ژرفای ۱۰۰۰۰ متری به همراه خطواره‌های شناسایی شده در این ژرفا. (C) داده‌های مغناطیس هوابرد در ژرفای ۱۵۰۰۰ متری به همراه خطواره‌های شناسایی شده در این ژرفا. تداوم این خطواره‌ها تا این ژرفا، نشان از پیوستگی بودن ساختارهای مذکور است.

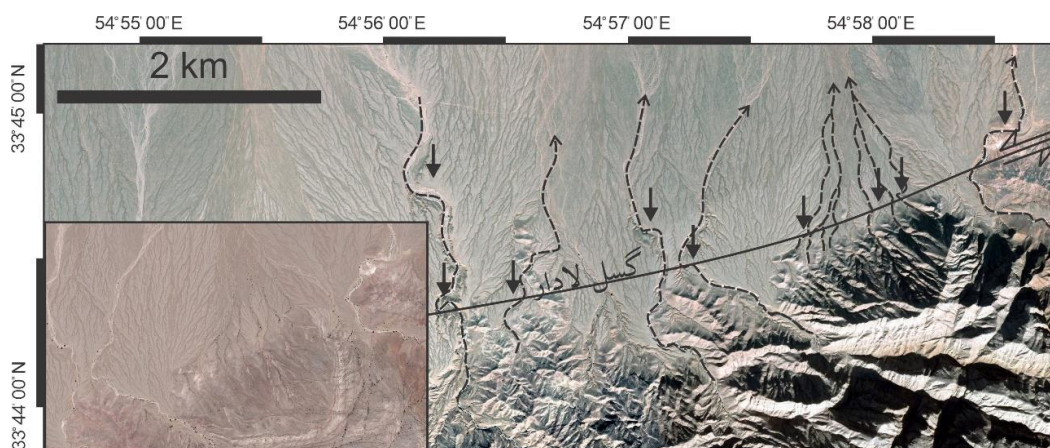
۵-۴- فعالیت‌های تکتونیکی در کواترنر

منطقه مورد بررسی از جمله مناطق فعال ایران مرکزی است. آثار این فعالیت در ساختارهای مختلف منطقه به خوبی مشاهده هستند. شواهد فعالیت اخیر گسل لادار در شرق شهرستان خور در امتداد این گسل و در مجاورت محدوده‌ی ایستگاهی دو قابل مشاهده است. مطابق با آخرین سمت همگرایی در ایران مرکزی (Ver-nant et al. 2004) انتظار می‌رود این گسل دارای حرکت امتداد لغز چپگرد باشد. بررسی مکانیسم صفحه‌های گسلی برداشت شده و پالئواسترس در همین محدوده‌ی ایستگاهی سمت واگرایی NE-SW را نشان می‌دهند. این در حالی است که آبراهه‌های قرار گرفته در امتداد گسل لادار بیانگر انحراف مسیر بستر به هر دو سمت راست و چپ هستند که نشانگر حفظ حرکت فرعی راستگرد در کواترنری برای گسل لادار است (شکل ۷). انحراف مسیر آبراهه‌ها علاوه بر آشکاری در تصاویر ماهواره‌ای، در مطالعات میدانی نیز به خوبی قابل شناسایی است. این پدیده معمولاً نتیجه فعالیت‌های گسلی و تغییرات تکتونیکی است (شکل ۸).

فعالیت گسل لادار و شاخه خور آن، علاوه بر ایجاد نسل‌های متعدد مخروط‌افکنه‌ها، باعث فرسایش قائم بستر آبراهه‌ها و تشکیل دیواره‌هایی از نهشته‌های کواترنری شده است که در برخی نقاط ارتفاع آن‌ها به ۱۲.۵ متر می‌رسد (شکل ۹-B). این دیواره‌ها و فرسایش قائم، نشانه‌ای از بالا آمدگی فعال منطقه هستند که از ویژگی‌های برجسته زمین ساختی شرق و جنوب شرق شهرستان خور به شمار می‌آیند. همچنین، وجود شکستگی‌ها، درزه‌ها و شکاف‌های مشخص در نهشته‌های کواترنری، بیانگر فعالیت قابل توجه گسل لادار در دوره‌های اخیر است (شکل ۹-C).

گسل خور از شاخه‌های فرعی گسل لادار به طور ویژه در ساختارهای این منطقه تاثیر گذاشته است. این شاخه‌ی گسلی با جدا شدن از گسل اصلی لادار و عبور از شهرستان خور، در امتداد جنوب غربی خود، ساختار حوضه‌ی رسوبی عشق آباد را تحت تاثیر قرار داده و با عبور از کوه‌های حوضه احمد و شاه کوه به سمت جنوب غربی متمایل شده و به گسل اردیب می‌رسد. در این ناحیه‌ی کوه‌های حوضه احمد، بیرون زدگی واحدهای کرتاسه در میان رسوبات جوان‌تر کواترنری به همراه حفر قائم در آبراهه‌ها و به هم ریختگی مخروط‌افکنه‌های جدید و قدیمی با همدیگر دیده می‌شوند. کلیه‌ی این نشانه‌ها دال بر فعالیت تکتونیکی بالای منطقه است. در این محل تداخل نیروهای تکتونیکی سبب ایجاد مولفه‌ی فشاری و در نتیجه بالا آمدگی واحدهای سنگ‌شناسی شده است. به دنبال آن فرسایش سبب تخریب واحدهای رویی و ظهور واحدهای کرتاسه در دشت می‌شود. تاثیرات این شاخه از گسل لادار بر روی آبراهه‌های منطقه نیز مشخص است. همچنین آثار این بهم ریختگی در مخروط‌افکنه‌های قدیمی در بزرگنمایی بالاتر منطقه، مشخص است (شکل ۱۰).

چرخش بلوک‌ها به واسطه فعالیت شاخه‌های موازی از گسل لادار در تصویر شکل ۱۱-A مشخص است. حرکت چپگرد این گسل‌ها در این ناحیه باعث چرخش بلوک‌های مجاور یکدیگر در جهت ساعتگرد شده است. این چرخش بلوک‌ها که در مجاورت محدوده‌ی ایستگاهی ۳ واقع شده است با شواهد صحرایی مانند دره‌های ۷ شکل که نشان از فعالیت تکتونیکی زیاد و بالا آمدگی قائم منطقه است همراهی می‌شود (شکل ۱۱-B).



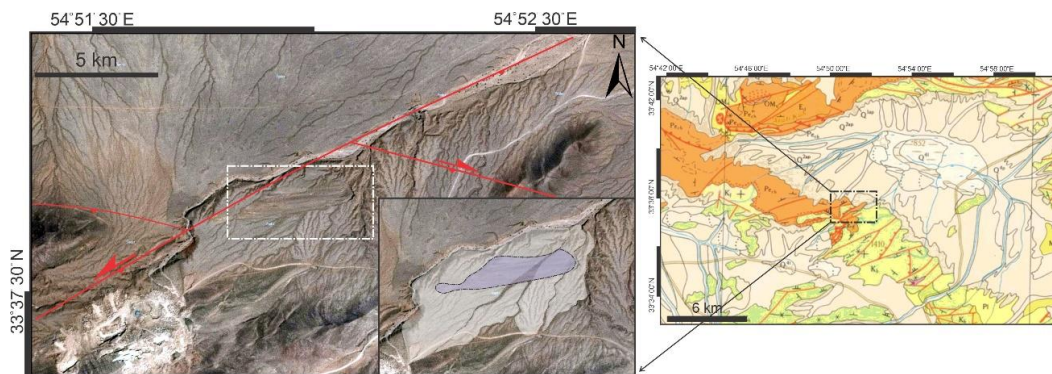
شکل ۷: مطابق با سازوکار گسل لادار انتظار می‌رود که ساختارهای کواترنری منطقه سمت امتداد لغز چپ گرد را نشان دهند، این در حالی است که بررسی آبراهه‌های متممادی، در امتداد گسل لادار هر دو سمت حرکتی راست گرد و چپگرد را مشخص می‌کنند.



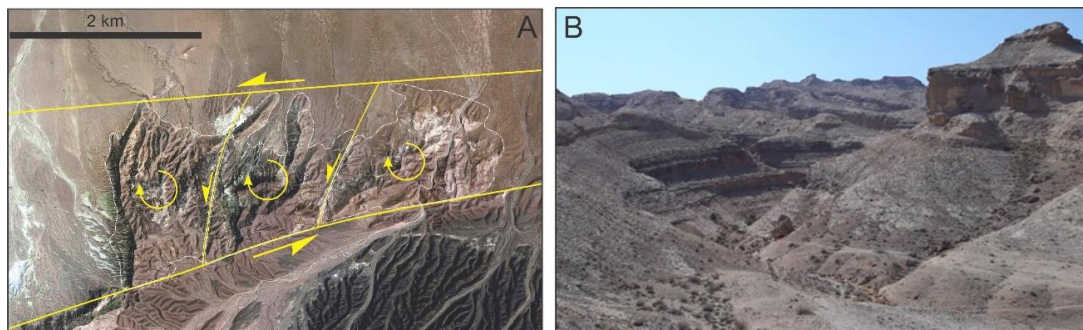
شکل ۸: حفرقائم رسوبات دشتی و ایجاد دیواره‌های مرتفع. آبراهه‌ی واقع در امتداد شاخه‌ی یک گسل لادار به خوبی جهت حرکت چپگرد را نشان می‌دهد که خود، شاهد دیگری بر فعالیت تکتونیکی منطقه و بالا آمدگی مداوم آن است.



شکل ۹: (A) موقعیت شاخه‌ی یک گسل لادار در نهشته‌های پالتوسن جنوب چاه ملک. (B) بالا آمدگی فعال منطقه سبب ایجاد دیواره‌هایی مرتفع و حفرقائم شده‌است. (C) شکستگی در رسوبات کواترنری نشان دهنده‌ی فعالیت بالای تکتونیکی منطقه است.



شکل ۱۰: فعالیت بالای یکی از شاخه‌های فرعی گسل لادار (شاخه‌ی سوم-گسل خور) و هوازدگی و فرسایش سبب بیرون زدگی نهشته‌های کرتاسه از میان مخروط افکنه‌های نسل اول شده است.



شکل ۱۱: A) چرخش ساعتگرد بلوک‌هایی که در بین دو قطعه‌ی تقریباً موازی گسل لادار (شاخه‌ی یک) واقع شده‌اند. B) دره‌های V شکل که نشان دهنده‌ی تکنونیک فعال منطقه هستند.

۶- نتیجه گیری

رهگیری گسل لادار تا عمق حدود ۱۵ کیلومتری نیز نشانه‌ای از پی‌سنجی بودن این گسل و نقش اساسی آن در تکنونیک زیرسطحی منطقه است. یافته‌ی اصلی و جدید این پژوهش، شناسایی پایانه گسلی با ساختارهای دم‌اسبی در انتهای غربی گسل لادار و تبیین نقش آن در توزیع تنش و انشعاب گسل‌های فرعی است؛ پدیده‌ای که پیش از این در این مقیاس و با این دقت، در منطقه‌ی خور گزارش نشده بود. این ساختارهای دم‌اسبی نه تنها نشانه‌ای از پویایی ساختاری گسل لادار هستند، بلکه از منظر ژئومورفولوژیکی نیز باعث تحولات عمده‌ای در مورفولوژی سطحی و نهشته‌های آبرفتی شده‌اند.

در مجموع، گسل لادار و پایانه دم‌اسبی آن به عنوان یک سامانه‌ی پیچیده‌ی تکنونیک، نمایانگر فعالیت پویا و مداوم در بلوک خور هستند و بررسی جامع آن‌ها می‌تواند به عنوان الگوی جدیدی برای تحلیل تعامل میان فرایندهای زمین‌ساختی و ژئومورفولوژیکی در

علی‌رغم عدم حضور گسل لادار در نقشه‌های زمین‌شناسی رسمی، بررسی‌های چندلایه‌ی این پژوهش شامل داده‌های سنجش از دور، مطالعات مغناطیس هوابرد، و مشاهدات میدانی نشان می‌دهد که این گسل تا منطقه‌ی خور و فراتر از آن به سمت دشت ریگ جن ادامه داشته و در انتهای خود به پایانه‌ای با ساختارهای دم‌اسبی منشعب می‌شود. این پایانه که مشخصه‌ی گسل‌های امتدادلغز فعال است، تغییرات قابل توجهی در ساختارهای سطحی، جابه‌جایی نهشته‌های کواترنری، و انحراف آبراهه‌ها ایجاد کرده است.

تحلیل رزداگرام خطواره‌ها که از پردازش‌های پیشرفته‌ی تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مغناطیسی به‌دست آمده، امتداد غالب NE-SW تا NW-SE را نشان می‌دهد که با امتداد و عملکرد گسل‌های برداشت‌شده در مطالعات صحرائی مطابقت دارد.



- S. J., 2011. Right-lateral shear across Iran and kinematic changes in the Arabia-Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International*, 184, 555-574.
- Bagheri, S., Stampfli, G., Moix, P., and Bakhshi, M. R., 2009. Khur platform: Tectonic evolution of the Neo-Tethys back-arc basin in Central Iran. *Symposium 2: Structural Geology, Tectonics, and Geodynamics, 7th Swiss Geoscience Meeting, Neuchâtel, 20th-21st November*.
- Berberian, M., 2014. Active Tectonics and Geologic Setting of the Iranian Plateau. *Developments in Earth Surface Processes*, 17, 151-171.
- Berberian, M., 2014. Active tectonics and geologic setting of the Iranian Plateau. *Developments in Earth Surface Processes*, 17, 151-171.
- Davoudzadeh, M., Lensch, G., and Weber-Diefenbach, K., 1972. Contribution to the paleogeography, stratigraphy, and tectonics of the Infra cambrian and Lower Paleozoic of Iran. *Neues Jahrb. Geol. Palaont. Abh.*, 172, 245-269.
- de Joussineau, G., and Aydin, A., 2007. The evolution of the damage zone with fault growth in sandstone and its multiscale characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 112, B12401, doi:10.1029/2006JB004711.
- Ebrahim, S. and Nadimi, A., 2021. Changing the motion of Ladar fault during Quaternary, Khur area, Central Iran. In: *Proceedings of the International Conference on Quaternary Sciences, 2nd ed.*, Gorgan, Iran: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, pp. 39-44.
- Fossen, H., 2010. *Structural Geology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Gürsoy, Ö., Kaya, Ş., Çakir, Z., Tatar, O., and Canbaz, O., 2017. Determining lateral offsets of rocks along the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) using spe-
- پهنه‌ی ایران مرکزی معرفی شود.
- سپاسگزاری**
- این مقاله بخشی از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد تکتونیک دانشگاه اصفهان نویسنده‌ی اول است (ابراهیم، ۱۴۰۰). نویسندگان از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه اصفهان برای حمایت‌های به عمل آمده بسیار سپاسگزارند.
- منابع**
- استرابی آشتیانی، م.، یساقی، ع.، جوادی، ح.، شاه‌پسندزاده، م.، و قاسمی، م.، ۱۳۹۰. بررسی پایانه باختری سامانه گسل درونه در ناحیه جندق-طالمسی. فصلنامه علمی، سال بیستم، شماره ۷۹، صفحات ۲۰-۱۳.
- جوادی، ح.، قاسمی، م.، شاه‌پسندزاده، م.، و استرابی آشتیانی، م.، ۱۳۸۹. چین‌خوردگی فعال ناشی از جنبش جوان سامانه گسل درونه. فصلنامه علمی علوم زمین، ۲۰ (۷۷)، ۱۰۸-۹۹. doi: 10.22071/gsj.2010.55344.
- یساقی، ع.، نوزعیم، ر.، و مزینانی، م.، ۱۴۰۱. ساختار سامانه گسلی فغان شاهی بر جنبش‌شناختی سنوزویک پسین در شمال بلوک لوت، ایران مرکزی. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۲ (۳)، ۱۱۸-۱۰۳.
- ابراهیم، س.، ۱۴۰۰. تحلیل ساختاری دنباله شرقی گسل اردیب در منطقه جنوب خور، ایران مرکزی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، ۲۲۰ صفحه.
- Ali, H. Z., Karim, H. H., and Hamdullah, A. H., 2009. Lineaments analysis and mapping from satellite images for southern Iraq. *Engineering and Technology Journal*, 27(10), 1952-1965. <https://doi.org/10.30684/etj.27.10.5>.
- Allen, M., 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23, 1-16.
- Allen, M., Jackson, J., and Walker, R., 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23, 1-16. doi: 10.1029/2003tc001530.
- Allen, M., Kheirkhah, M., Emami, M. H., and Jones,

- org/10.51244/IJRSI.
- Nogol-sadat, M.A., and Almasian, A., 1993, Tectonic map of Iran: Treatise on the geology of Iran, scale 1:1,000,000, 4 sheets.
- Oladejo, O. P., and Ogunkoya, C. O., 2023. Evaluation of upward continuation and reduction to magnetic equator on airborne magnetic data. *FUDMA Journal of Sciences*, 7(5), 192–197. <https://doi.org/10.33003/fjs-2023-0705-1968>.
- Ramezani, J., & Tucker, R. D., 2003. The Saghand Region, Central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana Tectonics. *American Journal of Science*, 303(7), 622–665. <https://doi.org/10.2475/ajs.303.7.622>
- Razavi Pash, R., Davoodi, Z., Mukherjee, S., Hashemi Dehsarvi, L., and Ghasemi-Rozveh, T., 2021. Interpretation of aeromagnetic data to detect the deep-seated basement faults in fold thrust belts: NW part of the petroliferous Fars province, Zagros belt, Iran. *Mar. Petrol. Geol.*, 133, 1–12. doi: 10.1016/j.marpet-geo.2021.10592.
- Saber, R., Isik, V., and Caglayan, A., 2021. Structural styles of the Aras fault zone with implications for a transpressive fault system in NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 207, 104655. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104655>
- Saleh, R., 2006. Reprocessing of Aeromagnetic map of Iran. *M.S. thesis*, Institute of Advanced Studies in Basic Science, Zanjan, Iran, 169 p.
- Sengor, A. M. and Kidd, W. S., 1979. Post-collisional tectonics of the Turkish-Iranian plateau and a comparison with Tibet. *Tectonophysics*, 55, 361–376.
- Seyed-Emami, K., and Wilmsen, M., 2016. Leymeriellidae (Cretaceous ammonites) from the lower Albian of Esfahan and Khur (Central Iran). *Cretaceous Research*, 60, 78-90.
- tral classification of satellite images and field measurements. *Geocarto International*, 32(12), 1276–1288. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1318794>.
- Kargaranbafghi, F., Neubauer, F., and Genser, J., 2011. Cenozoic kinematic evolution of southwestern Central Iran: Strain partitioning and accommodation of Arabia-Eurasia convergence. *Tectonophysics*, 502, 221–243.
- Keskin, M., 2007. Eastern Anatolia: A hotspot in a collision zone without a mantle plume. In: Foulger, G. R., and Jurdy, D. M., editors, *Plates, Plumes and Planetary Processes*. Geological Society of America, p. 32. [https://doi.org/10.1130/2007.2430\(32\)](https://doi.org/10.1130/2007.2430(32)).
- Kirkpatrick, J. D., Shipton, Z. K., Evans, J. P., Micklethwaite, S., Lim, S. J., & McKillop, P., 2008. Strike-slip fault terminations at seismogenic depths: The structure and kinematics of the Glacier Lakes fault, Sierra Nevada, United States. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B4). <https://doi.org/10.1029/2007JB005311>
- Mousavi, N., and Ebbing, J., 2018. Basement characterization and crustal structure beneath the Arabia–Eurasia collision (Iran): A combined gravity and magnetic study. *Tectonophysics*, doi:10.1016/J.TECTO.2018.03.018.
- Mulchrone, K. F., and Grogan, S., De, P., 2005. The relationship of magmatic tiling, fluid flow, and crystal fraction. *Journal of Structural Geology* 27, 179-197.
- Nnaemeka, E. K., Egwuonwu, G. N., and Onyekwelu, C. C., 2023. Upward continuation and reduction to equator filters on aeromagnetic data of Nkalagu and Abakaliki regions of Lower Benue Trough, Southeastern Nigeria. *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI)*, 10(4), 50. <https://doi.org/10.51244/IJRSI>.



- Solomon, S. and Ghebreab, W., 2006. Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studied in the central highlands of Eritrea. *J. African Earth Sci.*, 46, 371–378. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2006.06.007.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: A review. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 52, 1229-1258.
- Tadayon, M., Rossetti, F., Zattin, M., Calzolari, G., Nozaem, R., Salvini, F., Faccenna, C., and Khodabakhshi, P., 2019. The long-term evolution of the Doruneh Fault region (Central Iran): A key to understanding the spatio-temporal tectonic evolution in the hinterland of the Zagros convergence zone. *Geological Journal*, 54(3), 1454-1479. doi:10.1002/gj.3241.
- Torabi, Gh., 2011. Causes of different composition of chromites in Naein and Ashin ophiolites, and its absence in Anarak and Jandaq ophiolites (Isfahan province). *Petrological J.*, 2(7), 1–20.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., and 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.
- Wilmsen, M., Fürsich, F. T., and Majidifard, M. R., 2013. The Shah Kuh Formation, a latest Barremian to Early Aptian carbonate platform of Central Iran (Khur area, Yazd Block). *Cretaceous Research*, 39, 183-194.
- Xu, H., Lao, H., Li, G., Dong, G., & Xia, S., 2024. Origin of horsetail faults in an extensional regime using physical experiments for the Linnan Sag. *Interpretation*, 12(3). <https://doi.org/10.1190/int-2023-0033.1>