

## عنوان گسلش فعال، زمین لرزه‌ها و فرگشت ساختاری وابسته به فراگام دوگانه (مطالعه موردی محمدآباد در خاور ایران)

محمدامیر علیمی<sup>۱</sup>

استادیار، گروه معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۲۸

### چکیده

لرزه خیزی پایبی، شامل ۳ زمین لرزه مخرب در یک دوره زمانی نزدیک به ۳۰ ساله، گستره محمدآباد در خاور ایران را یکی از برجسته ترین مناطق فعال لرزه‌ای در ایران ساخته است. به منظور رسیدن به یک الگوی ساده زمین ساختی، سامانه گسلی محمدآباد با استفاده از اطلاعات زمین لرزه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای توصیف شده است. برهم کنش سامانه گسلی راستالغز محمدآباد و ساختارهای پی سنگی و نیز آرایش تریبانی قطعات گسلی سبب شکل گیری حوضه واپچاکیده محمدآباد و منطقه فشارشی تاجکوه شده است. حوضه دق محمدآباد، فروآفتنی است که در یک فراگام رهایی راست گام در سامانه گسلی راستالغز راست بر محمدآباد- طالب شکل گرفته است. ارزیابی زمین ریخت شناسی پهنه دگرریختی محمدآباد در سطح شامل هر دو گسلش عادی و وارون است. گسلش عادی در حاشیه حوضه و گسلش وارون در پهنه فشاری فراگام گرفتاری چپ گام طالب- تاجکوه و نیز پایانه گسل های اصلی فراگام آشکار است. الگوی ارائه شده برای شکل گیری ساختارهای کششی و فشارشی بر پایه اثر سامانه گسلی راستالغز محمدآباد، حوضه و بالا آمدگی های جنوب گستره، فراگام دوگانه (رهایی و گرفتاری) است. قطعات گسلی مرتبط با این فراگام ها توانایی شکست های زمین لرزه‌ای را دارند. اتصال پهنه های امتدادلغز اصلی (محمدآباد- طالب و طالب- تاجکوه) توسط گسل های عرضی حوضه، قابلیت ایجاد زمین لرزه های بزرگ و نیز فعالیت گسل های همدرد را افزایش می دهد.

**کلیدواژه‌ها:** فراگام دوگانه، حوضه واپچاکیده، لرزه خیزی، سامانه گسلی محمدآباد، خاور ایران.

**توسنده سنوئل:** محمد امیر علیمی

E-mail: malimi@birjandut.ac.ir

### ۱- پیش نوشتار

گستره محمدآباد در خاور ایران طی قرن گذشته شاهد زمین لرزه های مخربی بوده است که در سال های (M<sub>s</sub> ۶/۴)، ۱۹۴۱، (M<sub>s</sub> ۶/۸)، ۱۹۴۷ و (M<sub>s</sub> ۵/۸)، ۱۹۶۷ رخ داده اند. لرزه خیزی مناطق پیرامون این گستره نیز قابل تأمل است؛ چرا که تنها در یک دوره زمانی ۳۰ ساله ۱۱ زمین لرزه مخرب در امتداد گسل های دشت بیاض در شمال و آبیز در خاور رخ داده و این منطقه را به عنوان یکی از مکان های فعال با قابلیت ایجاد زمین لرزه های خوشه ای با بزرگی های متوسط و بالا شاخص کرده است (شکل های ۱ الف و ب). گستره محمدآباد از دید ساختاری شامل آرایه ای از گسل های شمالی جنوبی راستالغز با آرایش تریبانی است که دگرشکلی شکستنده شکل پذیر پوسته و تکوین آن متأثر از فرایندهای حاکم بر پهنه های برشی راستالغز و راندگی های پایانه ای آنهاست. این آرایه گسلی در این پژوهش سامانه گسلی محمدآباد نامیده شده است. در امتداد این سامانه متناسب با هندسه، آرایش فضایی و جنبش گسل ها، خم ها یا فراگام هایی ایجاد شده است که نتیجه آن شکل گیری ساخت های فشارشی (گسترش چین ها و راندگی های شمالی و جنوبی) با ساخت های کششی (حوضه واپچاکیده دق محمدآباد) است. این ساخت ها در تحلیل خطر لرزه ای گستره محمدآباد از دو دیدگاه اهمیت دارند؛ نخست هسته زایی زمین لرزه در مناطق کششی با فشارشی میان قطعات گسلی و دوم قطعات مستعد شکست و ارتباط میان آنها در یک رویداد لرزه ای. این موضوع به فراوانی در مطالعه لرزه زمین ساختی زمین لرزه های مخرب، به صورت الگوهای شکست در خم ها و فراگام های رهایی فعال آشکار شده که به پاره ای از آنها در جدول ۱ اشاره شده است. همچنین زمین لرزه های ۲۰۰۳ بم با بزرگی M<sub>s</sub> ۶/۶ (Fu et al., 2004) و ۱۹۹۹ دوزه ترکیه با بزرگی M<sub>s</sub> ۷/۱ (Duman et al., 2005) نیز نمونه ای از زمین لرزه هایی هستند که در خم و فراگام های گرفتاری هسته بندی و ایجاد شده اند.

در این نوشتار مطالعات لرزه خیزی، تغییرات عارضه نگاری و الگوی آبراهه ها در سطح با استفاده از تصاویر ماهواره ای صورت گرفته و اطلاعاتی درباره فرگشت گسلش فعال در گستره محمدآباد به دست آمده است.

### ۲- زمین ریخت شناسی، لرزه خیزی گستره محمدآباد

گستره محمدآباد از دید ساختاری بخشی از پهنه فلیش های خاور ایران و بلوک لوت است (شکل ۱ ج). از دید ریخت شناسی منطقه را می توان به ۳ بخش تقسیم کرد: الف) بخش مرتفع جنوبی شامل رشته کوه های مولی نخ کوه، با روند تقریبی خاوری باختری و مرتفع ترین بلندی ۲۴۶۵ متر از سطح دریای آزاد است؛ ب) در بخش مرکزی، دشت های هموار و رسوبات ریزدانه (دق محمدآباد و کفه دوست آباد) با پست ترین نقطه ۱۲۸۸ متر و آتشفشان های با بلندی زیاد (کوه قومنجان و چنگ رخس) و گهگاه تپه ماهوری دیده می شوند که روند شمالی باختری دارند؛ ج) بخش مرتفع شمالی شامل رشته کوه های مسعودی و وارز، با روند چیره شمال باختر جنوب خاور به شدت چین خورده و بریده شده اند. مرتفع ترین بلندی آنها ۲۸۱۹ متر است (شکل ۲). نکاپوهای زمین ساختی سبب پیدایش افزایش های گسلی، برش سنگ های سخت و حوضه های رسوبی کنونی منطقه شده اند. پهنه های فرافتاده در حال حاضر جایگاه رسوب گذاری جوان ترین نهشته های کوتاه تر منطقه هستند و بخش های برجسته به وسیله گسل هایی همروند با ساختار عمومی، از بخش های فرافتاده جدا می شوند. کهن ترین سنگ های منطقه مربوط به تراس میانی و جوان ترین آنها نهشته های آبرفتی و تخیری بخش های فرافتاده هستند. بیشترین گوناگونی رخساره سنگی، واحدهای ژوراسیک و کرتاسه هستند که با سنگ های آتشفشانی و آتشفشانی رسوبی ائوسن همراهی می شوند.

دگرشکلی در ایران نتیجه همگرایی صفحات عربستان اوراسیاست که احتمالاً در ۳۵ میلیون سال پیش آغاز شده است (Agard et al., 2005). توزیع گسلش فعال و شکل گیری زمین ساختی امروزی ایران نیز از ۵±۲ Ma آغاز شده است (Allen et al., 2004). همگرایی در خاور ایران ۲۰ تا ۲۵ میلی متر در سال برآورد می شود (Walker et al., 2004). در این میان ۱۳ تا ۱۶ میلی متر در سال برش راستالغز شمالی جنوبی میان ایران مرکزی و خاور افغانستان در سامانه های گسلی لوت باختری و سیستان توزیع می شود (Meyer and Le Dortz, 2007). بررسی سازوکار کاتونی زمین لرزه های ثبت شده در خاور ایران نشان می دهد که گسل های اصلی راستالغز شمالی جنوبی با خاوری باختری به همراه پایانه ایشان مسبب زمین لرزه های مخرب بوده اند. زمین لرزه های دشت بیاض (۱۹۶۸) و فردوس (۱۹۶۸)

موازات گسل چاهک کشیده شده است. در بخش شمالی افزون بر تأثیر بر واحدهای کوآرتنر<sub>۲</sub> (Qt<sub>۲</sub>) در مرز با واحدهای رسی و نمکی کفه محمدآباد قرار می‌گیرد و در جنوب در مرز با کوهستان تاجکوه با یک مؤلفه فشارشی همراه می‌شود (شکل ۲ الف).

– **گسل دوست‌آباد:** این گسل با سازوکار راست‌لغز راست‌بر، ۲۰ کیلومتر طول دارد که راستای چیره آن شمالی جنوبی است و در شمال دق محمدآباد واقع شده است. پیشینه لرزه‌خیزی این گسل به زمین‌لرزه ۱۹۴۷/۹/۲۳ بر می‌گردد که کانون رومرکزی زمین‌لرزه در پیرامون کوه شکسته تعیین محل دوباره شده است (Walker et al., 2011) (شکل ۲ ب). در حالی که پیش از این کانون زمین‌لرزه در حدود ۲۰ کیلومتری خاور محل جدید تعیین شده بود. گسیختگی‌های ناپیوسته‌ای که به آنها استناد شده، شکست‌هایی به طول ۲۰ کیلومتر و با روند حدود ۳۵۰ درجه است که یک متر جابه‌جایی راست‌بر و ۳۰ تا ۸۰ سانتی‌متر جابه‌جایی عمودی در طول آن دیده می‌شود (Ambraseys and Melville, 1982). اطلاعات محلی بیانگر آن است که دگرشکلی در سطح زمین به سوی شمال تا پهنه آبرفتی استخر ادامه یافته است (Walker et al., 2003).

– **گسل آفریژه:** این گسل با سازوکار راست‌لغز راست‌بر و به طول ۱۳ کیلومتر در راستای شمالی جنوبی کشیده شده و در خاور گسل چاهک و جنوب گسل فردوس قرار دارد. با وجود اینکه هیچ زمین‌لرزه تاریخی از این گسل گزارش نشده است؛ اما شواهد فعالیت آن در تصاویر ماهواره‌ای به‌صورت مجموعه‌ای از افزایش منقطع و جابه‌جایی راست‌بر آبراهه‌ها مشهود است. در انتهای شمالی گسل، شواهد آشکاری از چین‌خوردگی فعال دیده می‌شود که به سوی شمال باختر گسل گسترده شده و بیانگر آن است که این گسل در انتهای خود به یک گسل راندگی متصل می‌شود (شکل ۲ الف). گسل آفریژه به وسیله کوه‌هایی در سه طرف محاصره شده و رسوب‌گذاری سریع آبرفتی ممکن است به پوشاندن افزایش‌های تجمعی مرتبط با گسلش کمک کند که در نقاط دیگر دیده می‌شوند (Walker et al., 2003).

– **گسل طالب:** این گسل با سازوکار راست‌لغز راست‌بر و به طول تقریبی ۳۰ کیلومتر در راستای شمالی جنوبی کشیده شده و در باختر گسل چاهک در مرز با واحدهای رسی و نمکی کفه محمدآباد و کوهستان کُل کُلی قرار گرفته است (شکل ۲ الف). این گسل در شمال به واحدهای پی‌سنگی کهن (با سن ژوراسیک و کرتاسه) می‌رسد و رشد آن به سوی جنوب در واحدهای کوآرتنر به‌صورت انحراف آبراهه‌ها و فروافتادگی مشهود است (شکل ۴ الف).

– **گسل تاجکوه:** این گسل با ساز و کار راست‌لغز راست‌بر، به طول ۱۸ کیلومتر، در راستای شمالی جنوبی و در انتهای جنوبی گسل چاهک قرار گرفته است. گسل اصلی و شاخه‌هایی از آن به سوی شمال، سبب جابه‌جایی و برخاستگی واحدهای کوآرتنر شده و به سمت جنوب در کوهستان دو چنگت ادامه یافته است (شکل ۲ الف).

#### ۴ – شکل‌گیری فراگام دوگانه محمدآباد

الگوی دگرشکلی چیره در گستره محمدآباد، متأثر از سامانه گسلی راست‌لغز اصلی شمالی جنوبی شامل گسل‌های محمدآباد، دوست‌آباد، چاهک، طالب، تاجکوه و آفریژه است. بردارهای سرعتی ایستگاه‌های بیرجند (BIJD)، قاین (QAEN)، گناباد (GONA) و فردوس (FERD) از شبکه سراسری ژئودینامیک ایران (IPGN: Iranian Permanent Global Positioning System) در پیرامون منطقه، راستای شمال شمال باختری شمال خاوری را نشان می‌دهد (سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۹۲) (شکل ۳ الف). از سوی دیگر منطقه تحت تأثیر همزمان برش و فشار ناشی از همگرایی مایل شمال خاوری ایران مرکزی و افغانستان قرار دارند. بنابراین آرایش موازی و نردبانی سامانه گسلی یاد شده و تنش مایل حاکم بر منطقه، مکان مناسبی برای تشکیل خم‌ها با فراگام‌های رهایی و گرفتاری فراهم ساخته است. شواهد ریخت‌زمین‌ساختی بازشدگی پوسته‌ای میان

در شمال و زمین‌لرزه آبیژ (۱۹۹۷) در خاور منطقه از جمله این زمین‌لرزه‌ها هستند (شکل ۱). افزون بر این، زمین‌لرزه‌هایی مانند محمدآباد (۱۹۴۱ و ۱۹۶۲)، دوست‌آباد (۱۹۴۷)، آرین‌شهر (۲۰۰۸) و زهان (۲۰۱۲) نتیجه فعالیت گسل‌هایی هستند که نسبت به گسل‌های اصلی منطقه طول و نرخ لغزش پایین‌تری دارند (جدول ۱).

زمین‌لرزه‌های دستگاهی بالای  $M_p 3/5$  در فاصله زمانی ۱۹۴۶ تا ۲۰۰۸، در خاور ایران تعیین مکان دوباره شده است (Walker et al., 2011). نتیجه تغییراتی در کانون رومرکز زمین‌لرزه‌هاست (شکل ۱ ب). برای نمونه رومرکز زمین‌لرزه ۱۹۴۷ دوست‌آباد، حدود ۲۰ کیلومتر جابه‌جایی به سوی باختر داشته که نسبت این زمین‌لرزه از گسل دوست‌آباد را به گسل ناشناخته‌ای در خاور سه فله تغییر می‌دهد (شکل ۲ ب). کانون رومرکزی خردلرزه‌ها در گستره محمدآباد، در فاصله زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵، پراکنده بوده و فعالیت لرزه‌ای کم منطقه را نشان می‌دهد که منحصر به فعالیت گسل خاصی نیست. خوشه‌ای شدن زمین‌لرزه‌ها در باختر منطقه نیز به گمان بیانگر پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۲۰۰۸ آرین‌شهر ( $M_p 5$ ) است (شکل ۲ ب).

### ۳ – گسلش فعال در گستره محمدآباد

#### ۳-۱. گسل فردوس و سراب

در شمال گستره محمدآباد سامانه‌ای متشکل از چند گسل وارون و رانده، به طول حدود ۱۲۱ کیلومتر و راستای شمال باختری جنوب خاوری با شیب به سوی شمال خاور، تشکیل شده است (شکل ۲ الف) که سنگ‌های رسوبی ژوراسیک، سنگ آهک‌های کهن تر از ژوراسیک و سنگ‌های آذرین تشریری (شامل سنگ‌های داسیتی، آذرآواری و گرانیت) مربوط به کوه مسعودی، کوه سیاه و کوه وارز را از سوی خاور روی نهشته‌های کوآرتنری دشت رانده است. بلندی‌های کوه سیاه در فرادواره گسل‌های این سامانه قرار دارد و ارتفاع زیاد آن بیانگر جنبش یویا در رابطه با این گسل است. همچنین نهشته‌های آبرفتی و سیلابی در کنه‌های باختر گسل چین‌خوردگی‌های فعالی را در خود ثبت کرده‌اند که در اثر جنبش گسلش راندگی در ژرفا و در زیر این چین‌خوردگی‌ها به‌وجود آمده‌اند. میزان این فرایش در بخش جنوب خاوری گسل بیشتر است (Walker et al., 2003). در بلوک شمال خاوری گسل فردوس، گسل وارون دیگری به نام گسل سراب وجود دارد که به طول ۷۶ کیلومتر و به موازات آن کشیده شده است (شکل ۲). فاصله میان این دو گسل در پاره‌ای نقاط به حدود ۱ کیلومتر هم می‌رسد. بخش شمال خاوری این گسل در زمین‌لرزه ۱۹۶۸/۰۹/۰۱ با بزرگی  $M_p 6/3$  گسیخته شده است.

#### ۳-۲. سامانه گسلی محمدآباد

این سامانه مجموعه‌ای از گسل‌های راست‌لغز راست‌بر با راستای شمالی جنوبی است که زمین‌لرزه‌های مخرب ۱۹۴۱، ۱۹۴۶ و ۱۹۶۲ را سبب شده‌اند و دگرریختی‌های فعال آنها در کوآرتنر مشهود است. نکته قابل توجه اینست که این سامانه گسلی به راندگی‌ها با چین‌خوردگی‌هایی در شمال و جنوب می‌رسد و در ریخت‌زمین‌ساخت منطقه نقش مؤثری دارد.

– **گسل چاهک:** این گسل با سازوکار راست‌لغز راست‌بر، در راستای غالب شمالی جنوبی حدود ۳۰ کیلومتر طول دارد. این گسل در انتهای شمالی، سنگ‌آهک‌های کرتاسه را بریده اما به سوی جنوب از میان نهشته‌های کوآرتنر گذشته و گاه مرز سنگ‌های آتشفشانی اتوسن و سنگ جوش پلیوسن را در سوی باختر با نهشته‌های آبرفتی کوآرتنر در خاور تشکیل داده است. به نظر می‌رسد گسل چاهک در شمال به چین‌خوردگی‌هایی که در ۲۰ کیلومتری آن دیده می‌شود پیوسته است (Walker et al., 2003) و در جنوب به افزایش‌های گسلی هولوسن در منطقه چلونک می‌رسد که به گمان راندگی‌های پابانه‌ای این گسل به شمار می‌رود (شکل ۲ الف). زمین‌لرزه‌های ۱۹۴۱/۶/۰۲ چاهک با بزرگای  $M_p 6/4$  و ۱۹۶۲/۰۴/۰۱ موسوبه با بزرگای  $M_p 5/5$  به این گسل نسبت داده می‌شود (Ambraseys and Melville, 1982; Walker et al., 2011) که در شکل ۲ به نمایش درآمده‌اند.

– **گسل محمدآباد:** این گسل با سازوکار راست‌لغز راست‌بر و به طول ۳۵ کیلومتر به

گراول‌های مخروط افکنه‌ای دیده می‌شود که گویای برش راست‌بر است (شکل ۶). به نظر می‌رسد واتنش کلی در این بخش به دو مؤلفه راست‌الغز و فشاری تقسیم شده که به صورت راندگی‌های حاشیه کوهستان و گسلش راست‌الغز نمود یافته است و بیانگر جزبندی واتنش است.

#### ۷- بحث

یافتن ارتباط هندسی و جنبشی میان ساختارها اهمیت ویژه‌ای دارد؛ چرا که امکان تبیین چگونگی فرگشت ساختارها را فراهم می‌سازد. الگوهای دگرشکلی به تناسب چگونگی ارتباط گسل‌ها، چین‌ها و شکستگی‌های همراه آنها می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین چگونگی آرایش ساختارها در شکل‌گیری مناطق فشاری و کششی محلی و برهمکنش گسل‌های پیرامونی مهم است. در پهنه‌های برشی؛ چگونگی فرارگیری قطعات گسلی نسبت به هم، میزان همپوشانی آنها، شکل‌گیری شکستگی‌های برشی همراه و چگونگی فرگشت پایانه‌های گسلی راست‌الغز نقش مهمی در درک دگرشکلی کنونی و رفتار گسل‌ها در آینده دارند. فرگشت ساختاری گستره محمدآباد در شکل ۷ ارائه شده است. در گستره مورد مطالعه، ساختارهای از پیش موجود به سن کرتاسه بالایی تا ائوسن، زاویه‌ای حدود ۵۰ درجه با سامانه گسلی محمدآباد می‌سازند. این سامانه گسلی سبب برش واحدهای سنگی کهن در شمال و جنوب منطقه شده است. ایجاد تعدادی قطعه گسلی با روند شمالی جنوبی که در ساختارهای پوسته‌ای از پیش موجود نفوذ کرده‌اند از اولین مراحل شکل‌گیری سامانه گسلی محمدآباد است (شکل ۷ الف). در واقع بخش‌های ضعیف پوسته‌ای در ساختارهای کهن منطقه سبب قطعه‌بندی در امتداد گسل‌های راست‌الغز شمالی جنوبی شده است. آرایش نردبانی این قطعات گسلی به صورت راست‌گام حوضه وچاکیده و فروافت دق محمدآباد را ایجاد کرده است که به گسل‌های حاشیه‌ای حوضه محدود شده‌اند (شکل ۷ ب). جابه‌جایی راست‌الغز پیش‌رونده در گسل‌های طالب و محمدآباد سبب گسترش و فروافت دق محمدآباد شده است. پوسته تغییر حجم یافته در این حوضه کششی باید با سترشدگی پوسته مجاور به حالت توازن برسد. جلوه افزایش ستبرای پوسته با بالاآمدگی سطحی زمین و ایجاد گسلش وارون در جنوب منطقه نمایان است. همچنین آرایش راست‌گام گسل‌های طالب تاجکوه و حرکت راست‌بر این گسل‌ها سبب همگرایی این منطقه و ایجاد فراگام فشاری شده است (شکل ۷ ج). سامانه گسلی محمدآباد شامل مجموعه‌ای از قطعات گسلی با اندازه‌های مختلف است که انتهای برخی از آنها مانند گسل‌های چاهک و آفریز به راندگی‌های پایانه‌ای ختم می‌شوند. رشد گسل‌های محمدآباد و چاهک در انتهای شمالی آنها به روشنی مشخص نیست و شواهد سطحی آن در کواترنر نامشهود است. گسل دوست‌آباد نیز در شمال دق محمدآباد و بخش جنوبی کوهستان پی‌سنگی چنگ رخس جای دارد ولی در تصاویر ماهواره‌ای نمود ندارد. با وجود این در زمین‌لرزه ۱۹۴۷ میلادی شکست‌هایی ظاهر شده که تا راندگی‌های شمالی (به موازات کوه تن) کشیده شده‌اند (Ambraseys and Melville, 1982). به نظر می‌رسد، رشد گسل راست‌الغز دوست‌آباد به سوی راندگی‌های شمالی عامل ایجاد زمین‌لرزه ۱۹۴۷ بوده که با فعالیت دوباره روی بخشی از گسل دوست‌آباد همراهی شده است. در شمال منطقه، به موازات گسل فردوس راندگی‌های پنهان به صورت چین‌هایی در واحدهای کواترنر ظاهر شده‌اند (شکل‌های ۵ و ۷ د). مطابق با الگوی انتقالی تغییر سبک گسلش راست‌الغز در پهنه سیستان (Walker and Khatib, 2006) زمین‌ساخت فعال در گستره محمدآباد حاصل تأثیر متقابل روندهای گسلی اصلی شمالی جنوبی است که در نتیجه فرایند انتقال از گسلش راست‌الغز راست‌بر در جنوب، به گسلش راست‌الغز چپ‌بر (دشت بیاض) در شمال، راندگی‌های فعال در مناطق میان آنها گسترده شده‌اند.

در تحلیل خطر زمین‌لرزه گستره محمدآباد، شناسایی خم‌ها یا فراگام‌های گرفتاری و رهایی میان قطعات گسلی امتدادلغز از دو جنبه اهمیت دارد. نخست اینکه گسل‌های راست‌الغز اصلی (محمدآباد، چاهک، طالب و تاجکوه) مسبب زمین‌لرزه هستند و

گسل‌های محمدآباد و طالب را نشان می‌دهد که اشاره به شکل‌گیری فراگام رهایی محمدآباد طالب دارد که در ادامه بحث می‌شود.

#### ۴-۱. ساختار فراگام رهایی محمدآباد - طالب

دق محمدآباد با رسوبات رسی به رنگ روشن در تصاویر ماهواره‌ای نمود دارد که تداعی‌کننده فروافت و ایجاد بک حوضه کششی در منطقه است. سامانه گسلی راست‌الغز راست‌بر محمدآباد طالب، با روند چیره شمالی جنوبی و آرایش راست‌گام، در پیرامون این دق قرار دارد که جنبش ناشی از این گسل‌ها و حرکت نسبی بلوک‌های پوسته‌ای ایجاد فراگام رهایی کرده است. در واقع گسل‌های محمدآباد و طالب، گسل‌های مرزی فراگام (Principal Displacement Zones: PDZs) را تشکیل می‌دهند. آرایش نردبانی راست‌گام و فشارش مایل محلی عامل دگرریختی تراکشی و شکل‌گیری فراگام رهایی در دق محمدآباد است (شکل ۳). بررسی نقشه زمین‌شناسی منطقه وجود واحدهای سنگی کهن به سن کرتاسه بالایی شامل سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ و فلیش در خاور گسل محمدآباد و شمال گسل چاهک را نشان می‌دهد. همچنین سنگ‌ها و برش‌های آتشفشانی ژوراسیک (سازند شمشک)، سنگ آهک‌های بادامو، مارن و شیل‌های سازند بغمشاه، آندزیت و ماسه‌سنگ‌های سبز ائوسن در کوهستان چنگ رخس (باختر گسل محمدآباد)، در راستای گسل دوست‌آباد و باختر گسل طالب رخنمون دارند.

وجود پوسته‌های ناهمگن یا ساختارهای پی‌سنگی از پیش موجود بر امتداد گسل‌های راست‌الغز در حال رشد منطقه سبب قفل‌شدگی این گسل‌ها شده است. چنان که گسل طالب در شمال به آندزیت و بازالت‌های ائوسن می‌رسد و ادامه فعالیت آن به سوی جنوب در رسوبات آبرفتی و مخروط افکنه‌های جوان کواترنری ( $Q_t$ )، با خمش آبراهه‌ها جلوه‌گر می‌شود (شکل ۴ الف). با ادامه روند همگرایی در کواترنر فراگام رهایی محمدآباد طالب تکامل می‌یابد؛ به گونه‌ای که بازشدگی پوسته‌ای در میان این سامانه گسلی به صورت فرونشست محمدآباد و شکل‌گیری گسل‌های عادی حاشیه حوضه‌ای آشکار می‌شود.

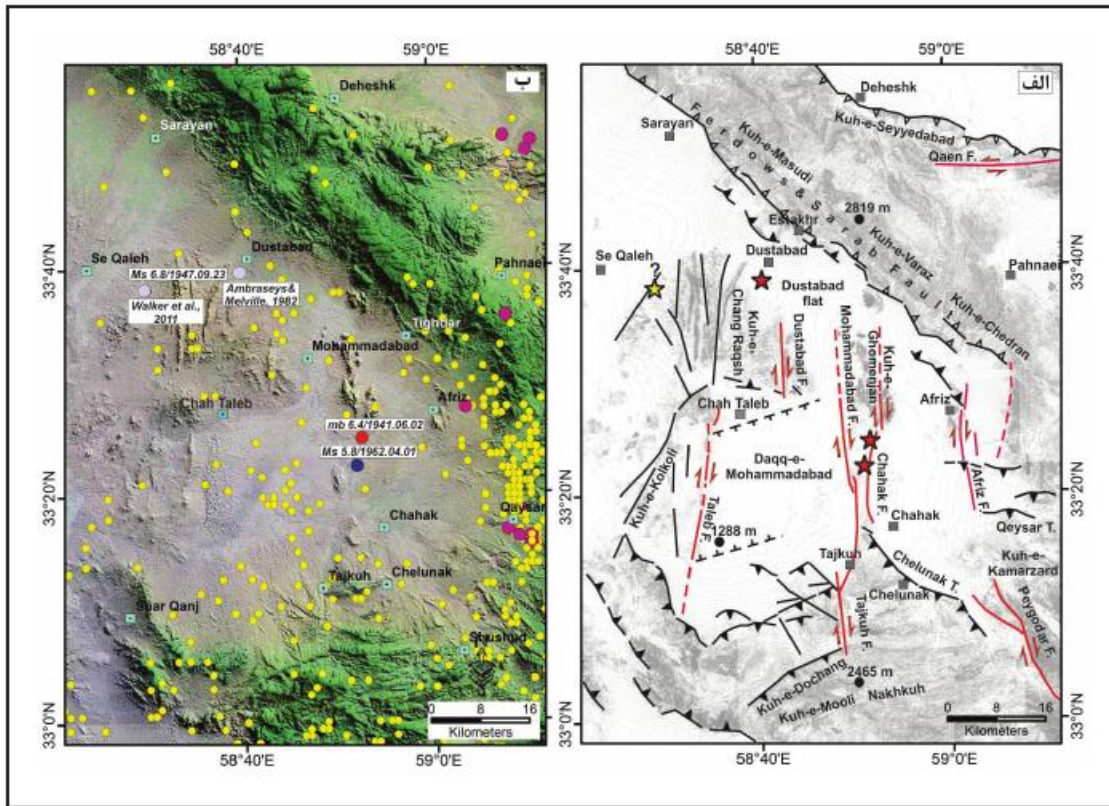
#### ۵- گسلش فعال در جنوب فراگام رهایی محمدآباد

در جنوب فراگام رهایی محمدآباد در مرز کنگلومرا، ماسه‌سنگ‌های ائوسن و مخروط افکنه‌های جوان کواترنری، گسلش‌هایی با روند خاوری باختری و شمال شمال باختری وجود دارند که دگرریختی‌های سطحی آن در تصاویر ماهواره‌ای نمود دارند (شکل ۴). عملکرد این گسل‌ها به ویژه در روندهای خاوری باختری به صورت وارون است. گسل‌های شمال شمال باختری با عملکرد راست‌الغز افزون بر متأثر کردن رسوبات  $Q_t$  به درون کوهستان دو چنگ کشیده شده‌اند. گسل راست‌الغز راست‌بر تاجکوه با روند تقریبی شمالی جنوبی، رسوبات مخروط افکنه‌ای جوان را برش داده و ارب‌هایی از آن نیز جدا شده است. به نظر می‌رسد آرایش چپ‌گام گسل‌های طالب تاجکوه و حرکت راست‌الغز راست‌بر آنها سبب ایجاد منطقه فشاری و فراگام گرفتاری شده باشد.

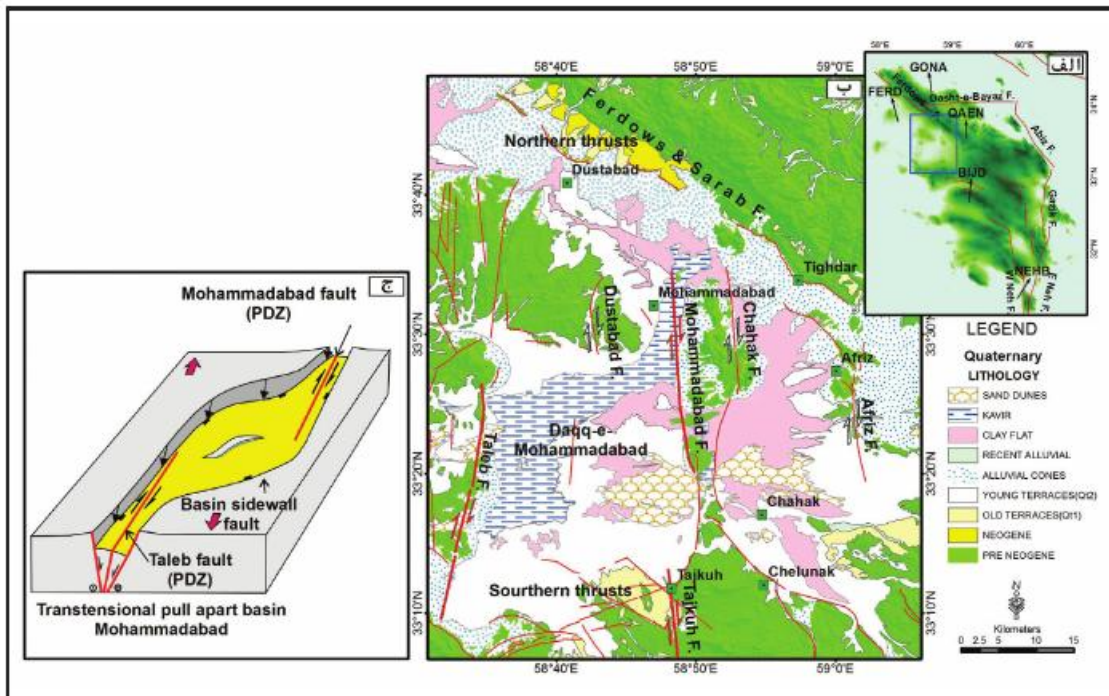
#### ۶- گسلش فعال در شمال فراگام رهایی محمدآباد

تغییر الگوی گسلش از شمالی جنوبی در سامانه گسلی محمدآباد به سامانه راندگی پراکنده با روند شمال باختر جنوب خاور در شمال منطقه صورت می‌گیرد. این گسل‌ها ارتباط نزدیکی با ساختارهای زمین‌شناسی کهن دارند؛ به طوری که در تصاویر ماهواره‌ای چین‌خوردگی‌های مرتبط با گسلش در واحدهای نئوزن و  $Q_t$  به موازات جنوب رشته‌کوه مسعودی نمایان شده‌اند. اینها چین‌های مرتبط با گسلش هستند که به سوی کوهستان شیب دارند و سبب کج‌شدگی و برخاستگی لایه‌های گراول به سن کواترنر پسین شده‌اند (شکل‌های ۵ و ۶). این راندگی‌ها در بخش‌هایی به صورت پنهان رفتار کرده و در بخش‌هایی به سطح رسیده و به صورت افزاینده گسلی گراول‌های آبرفتی را بریده و نمایان شده‌اند (شکل ۵). در خاور تیغدر و به موازات کوهستان چدران انحراف مسیر رودخانه در

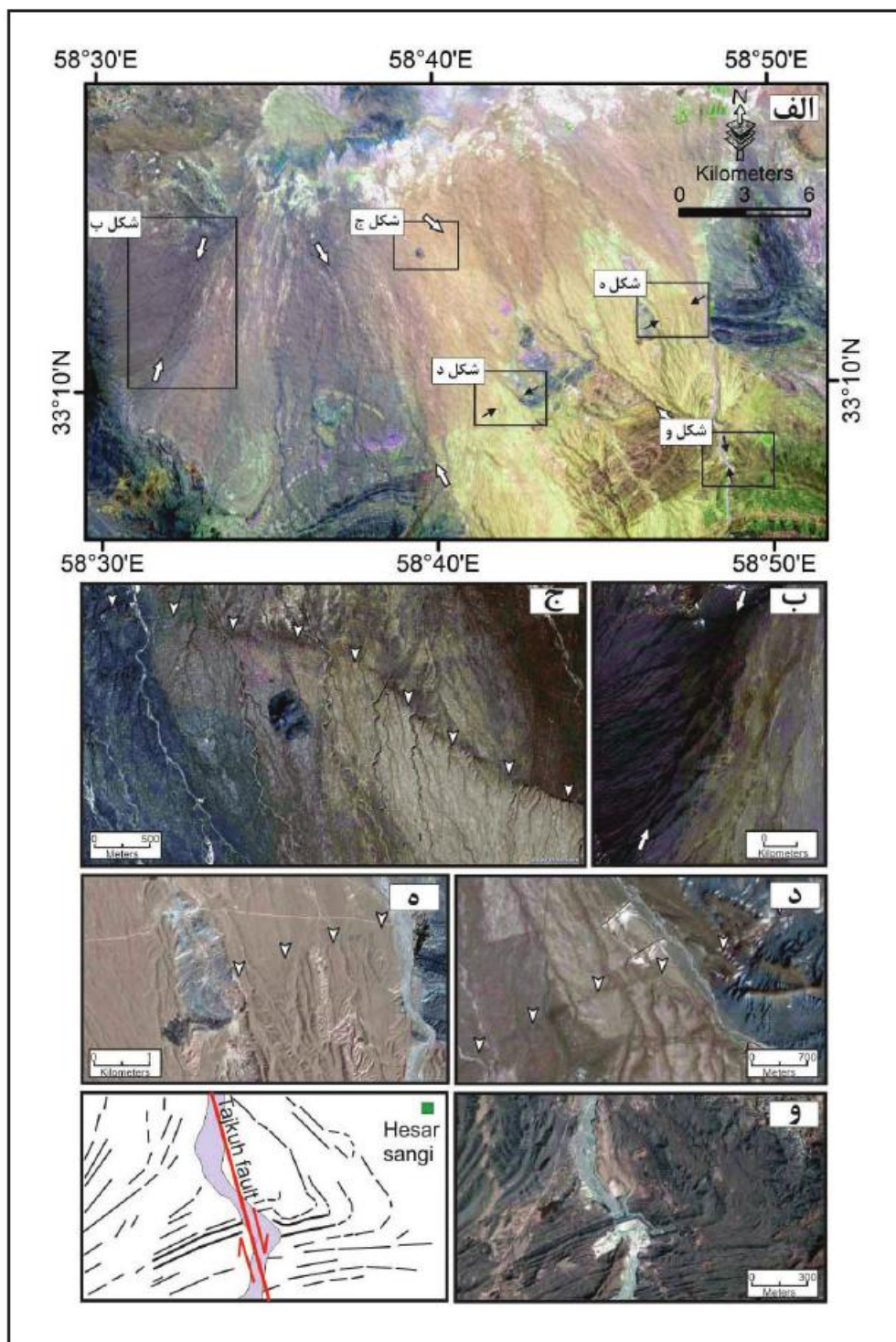




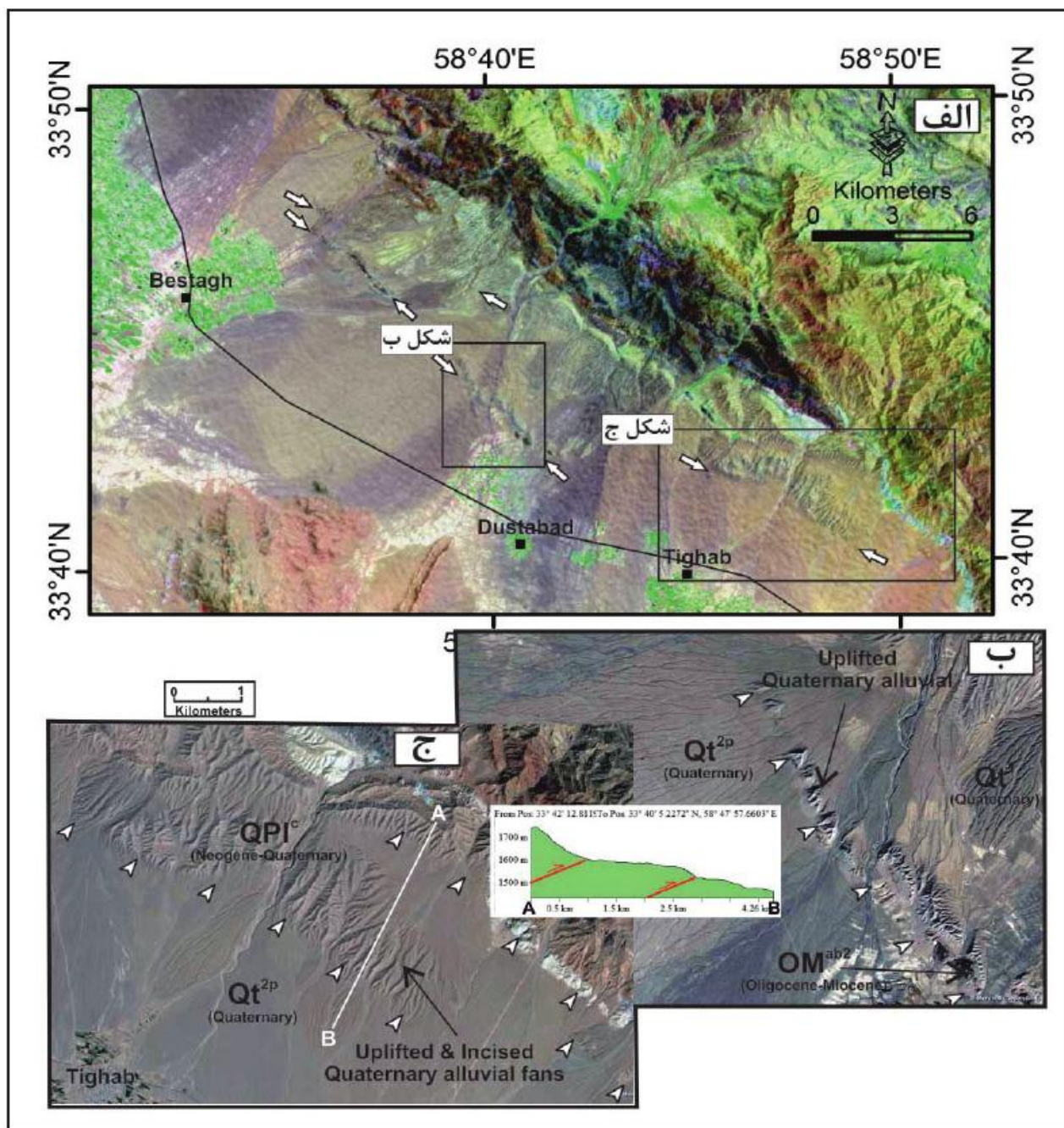
شکل ۲- الف) گسلش فعال در گستره محمدآباد. کانون رومرکز زمین لرزه های مغرب با ستاره مشخص شده اند؛ ب) تصویر عارضه نگاری SRTM از گستره محمدآباد. کانون رومرکز حرد لرزه ها (IGUT) به همراه زمین لرزه های مغرب آمده است. زمین لرزه (M<sub>s</sub> ۶/۸) ۱۹۶۷ دوست آباد در تعیین محل دوباره جابه جایی ۲۰ کیلومتری به سوی باختر را نشان می دهد (Walker et al., 2011).



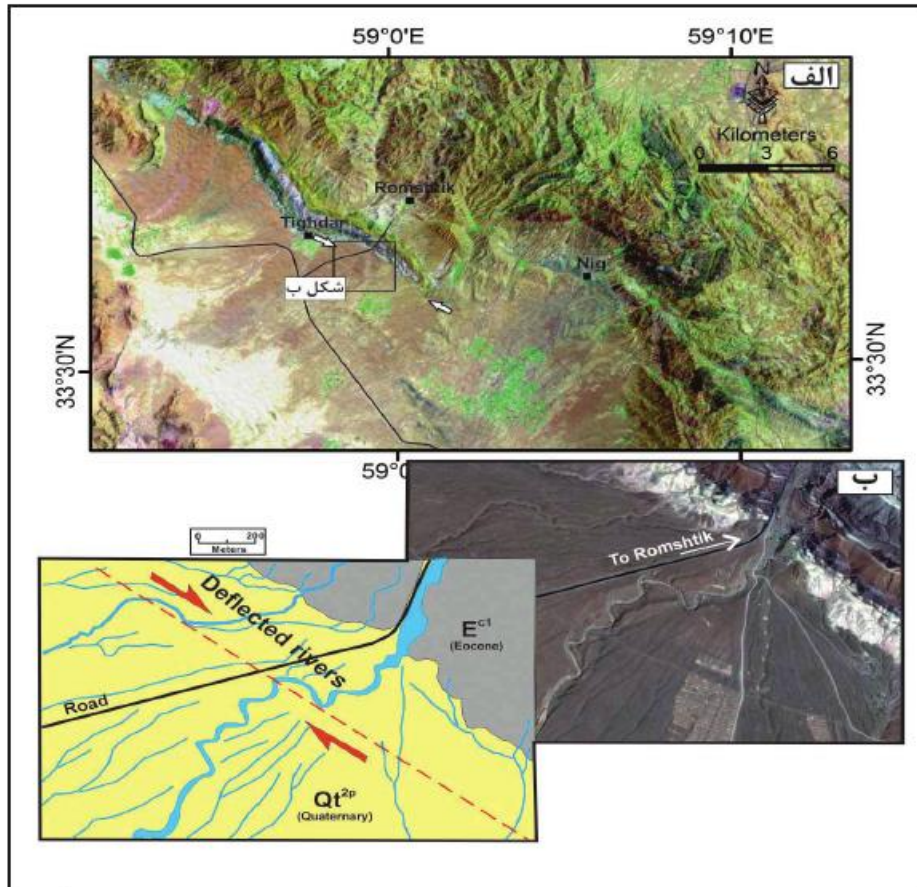
شکل ۳- الف) گسل های ساده شده خاور ایران به همراه بردارهای سرعتی شبکه ژئودینامیک سراسری ایران. کادری رنگ موقعیت گستره محمدآباد را نمایش می دهد؛ ب) واحدهای کوآترنری و نیز ساختارهای پوسته ای کهن (رنگ سبز)؛ برگرفته از نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ قاین (تلفیق از انتشار نواد، ۱۳۷۰)، به همراه گسل های فعال در گستره محمدآباد. گسل های فراگام های رهایی و گرفتاری با خطوط سبز آمده است؛ ج) نمایش سه بعدی از فراگام رهایی محمدآباد- طالب و شکل گیری حوضه و اچا کیده محمدآباد.



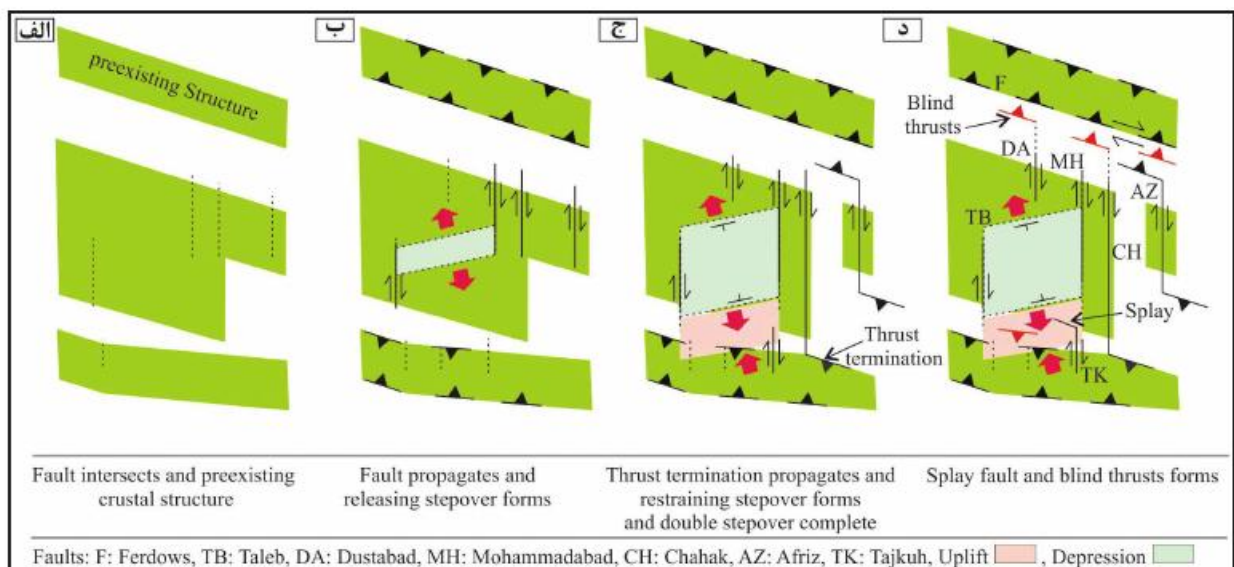
شکل ۴- الف) تصویر ماهواره‌ای Landsat (ترکیب باندی ۴۲۱: RGB) از راندگی‌های جنوب منطقه؛ ب) خط اثر انتهای جنوبی گسل طالب یا انحراف آبراهه‌ها در واحدهای کواترنری آشکار است؛ ج تا ه) افزایش‌های گسلی با بالا آمدگی رسوبات مخروط‌افکنه‌ای در کواترنری (سه گوش‌های سفید)؛ و) جنبش راست بر گسل تاجکوه سبب جابه‌جایی یال چین در واحدهای اوسن شده است.



شکل ۵- الف) تصویر ماهواره‌ای LANDSAT (ترکیب باندی ۴۲۱ RGB) از راندگی‌های شمال منطقه؛ ب و ج) گسل‌های راندگی کم‌زاویه جوانی که به موازات دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های شمالی کشیده شده‌اند و سوی رانش آنها از شمال خاور به جنوب باختر است و نهشته‌های مخروط‌افکنه‌ای را روی نهشته‌های آبرفتی جوان‌تر رانده‌اند.



شکل ۶- الف) تصویر ماهواره‌ای Landsat (ترکیب باندهای ۴۲ RGB) از کوهستان چدران؛ ب) انحراف مسیر رودخانه نشانگر برش راست‌بر در واحدهای کواترنر به موازات دامنه جنوبی کوهستان چدران.



شکل ۷- فرگشت ساختاری گستره محمدآباد. الف) تقاطع گسلش و ساختارهای پوسته‌ای کهن؛ ب) رشد گسلش و شکل‌گیری حوضه و اچاکیده محمدآباد؛ ج) رشد راندگی‌های پایانه‌ای، توسعه حوضه کششی و شکل‌گیری ساختارهای فشاری در جنوب منطقه؛ د) رشد راندگی‌های پنهان به موازات پیشانی کوهستان‌های شمالی و جنوبی.



جدول ۱- زمین لرزه های مرتبط با گسل های راستالغزی که خم ها یا فراگام های رهایی در امتداد آنها گسیخته شده اند.

شماره	گسل	کشور	حوضه واچاکیده	زمین لرزه	بزرگی ( $M_w$ )	تاریخ	طول شکست (km)	قطعات شکسته شده	مرجع
۱	سن آندریاس	آمریکا	گلدن گیت	سان فرانسیسکو	۷/۸	۱۹۰۶	۴۷۰-۴۳۵		Lawson et al., 1908
۲	هایون	چین	سالت لیک	هایون	۸/۷	۱۹۲۰	۲۰۰	۲	Weiqi et al., 1987
۳	تولت ایل	مغولستان	هولجین	موگاد	۷/۴	۱۹۶۷	۳۶		Baljinnyam et al., 1993
۴	دشت بیاض	ایران	نیمبلوک	دشت بیاض	۷/۲	۱۹۶۸	۸۰		Tchalenko and Ambraseys, 1970
۵	آناطولی شمالی	ترکیه	ارزینکن	ارزینکن	۶/۸	۱۹۹۲	۸۵	۵	Bernard et al., 1997
۶	لاندوز	آمریکا	هوم استید	لاندوز	۷/۳	۱۹۹۲	۸۵	۵	Sowers et al., 1994
۷	سوما	ژاپن	ژاپن	کوبه	۷/۲	۱۹۹۵	۵۰-۳۰		Holzer, 1996
۸	آبیز	ایران	پلایای زیرکوه	زیرکوه	۷/۲	۱۹۹۷	۱۲۵	۵	Berberian et al., 1999
۹	آناطولی شمالی	ترکیه	کاراموسل	ایزمیت	۷/۴	۱۹۹۹	۱۲۶	۴	Letis et al., 2002
۱۰	گریندل	نیوزیلند		دارفیلد	۷/۱	۲۰۱۰	۳۰	۳	Duffy et al., 2013

جدول ۲- زمین لرزه های دستگاهی در گستره محمدآباد (Ambraseys and Melville, 1982; Walker et al., 2011).

تاریخ	زمان	محل (طول - عرض)	بزرگی ( $M_w$ )	مرجع	گسل
۱۹۴۱/۰۶/۰۲	۱۶:۳۶	۳۳/۴۱-۵۸/۸۷	۶/۴	۱	چاهک
۱۹۴۷/۰۹/۲۳	۱۲:۲۸	۳۳/۶۷-۵۸/۶۷ ۳۳/۶۴-۵۸/۵۰	$M_w$ ۶/۸	۱ ۲	دست آباد
۱۹۶۲/۰۴/۰۱	۰۰:۴۵	۳۳/۲۱-۵۸/۸۷ ۳۳/۳۷-۵۸/۸۷	۵/۵ $M_w$ ۵/۸	۱ ۲	چاهک

## کتابنگاری

آقاباتی، س.ع. ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۵ ص.  
 انخارنژاد، ج. ۱۳۷۰- نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ فاین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.  
 سازمان نقشه برداری کشور، ۱۳۹۲- چهارمین گزارش تصویری شبکه IPGN حاور کشور (تا پایان سال ۲۰۱۳ میلادی).

## References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005- Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional and earlier deformation. *Int. J. Earth Sci.* V. 94, pp. 401-419.
- Allen, M. B., Jackson, J. and Walker, R. T., 2004- Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, V. 23, TC2008.
- Ambraseys, N. N. and Melville, C. P., 1982- A History of Persian Earthquakes. Cambridge University Press. Cambridge, 219 p.
- Baljinnyam, I., Bayasgalan, A., Borisov, B. A., Cisternas, A., Dem'yanovich, M. G., Ganbaatar, L., Kochetkov, V. M., Kurushin, R. A., Molnar, P., Philip, H. and Vashchilov, Y. Y., 1993- Ruptures of major earthquakes and active deformation in Mongolia and its surroundings. *Geol. Soc. Am. Memoir*, V. 181, 62 pp.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Qorashi, M., Khatib, M. M., Priestley, K., Talebian, M. and Ghafuri-Ashtiani, M., 1999- The 1997 May 10 Zirkuh (Qa' enat) earthquake ( $M_w$  7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran. *Geophys. J. Int.* V. 136, pp. 671-694.

- Bernard, P., Gariel, J. and Dorbath, L., 1997- Fault location and rupture kinematics of the magnitude 6.8, 1992 Erzincan earthquake, Turkey, from strong ground motion and regional records, *Bull. Seism. Soc. Am.* V. 87, pp. 1230-1243.
- Duffy, B., Quigley, M., Barrell, D. J. A., Dissen, R. V., Stahl, T., Leprince, S., McInnes, C. and Bilderback, E., 2013- Fault kinematics and surface deformation across a releasing bend during the 2010 MW 7.1 Darfield, New Zealand, earthquake revealed by differential LiDAR and cadastral surveying. *GSA Bulletin*. V. 125, pp. 420-431.
- Duman, T. Y., Emre, O., Dogan, A. and Ozalp, S., 2005- Stepover and bend structures along the 1999 Duzce earthquake surface rupture, north Anatolian fault. Turkey, *Bull. Seism. Soc. Am.*, V. 95, pp. 1250-1262.
- Engdahl, E. R., Jackson, J. A., Myers, S. C., Bergman, E. A. and Priestley, K., 2006- Relocation and assessment of seismicity in the Iran region: *Geophys. J. Int.* V. 167, pp. 761-778.
- Engdahl, E. R., van der Hilst, R. and Buland, R., 1998- Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination: *Bull. Seismol. Soc. Am.* V. 88, pp. 722-743.
- Fu, B., Ninomiya, Y., Lei, X., Toda, S. and Awata, Y., 2004- Mapping active fault associated with the 2003 Mw 6.6 Bam (SE Iran) earthquake with ASTER 3D images. *Remote Sens. Environ.* V. 92, pp. 153-157.
- Holzer, T., 1996- The 1995 Hanshin-Awaji (Kobe), Japan, earthquake. *Geological Society of America Today*. 95, pp. 153-154.
- IGUT, 2015- Institute of Geophysics University of Tehran Catalog Online Data Set.
- Lawson, A. C., Leuschner, A. O., Gilbert, G. K., Davidson, G., Reid, H. F., Burckhalter, C., Branner, J. C. and Campbell, W. W., 1908- California earthquake of April 18, 1906. Carnegie Institution of Washington, Publication Number 87, Atlas, Washington D.C.
- Lettis, W., Bachhuber, J., Witter, R., Brankman, C., Randolph, C. E., Barka, A., Page, W. D. and Kaya, A., 2002- Influence of Releasing Step-Overs on Surface Fault Rupture and Fault Segmentation: Examples from the 17 August 1999 Izmit Earthquake on the North Anatolian Fault, Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America*, V. 92, pp. 19-42.
- Meyer, B. and Le Dortz, K., 2007- Strike-slip kinematics in Central and eastern Iran: Estimating fault slip-rates averaged over the Holocene. *Tectonics*. V. 26, TC5009.
- NEIC (National Earthquake Information Center) U.S. Geological Survey Stop 967, National Earthquake Information Center, DFC, Denver, CO 80225-0046, USA.
- Shaw, B., 2006- Initiation propagation and termination of elastodynamic ruptures associated with segmentation of faults and shaking hazard. *Journal of Geophysical Research*, V. 111.
- Sowers, J. M., Unruh, J. R., Lettis, W. R. and Rubin, T. D., 1994- Relationship of the Kickapoo fault to the Johnson Valley and Homestead Valley faults, San Bernardino County. California, *Bull. Seism. Soc. Am.* V. 84, pp. 528-536.
- Tchalenko, J. S. and Ambraseys, N. N., 1970- Structural analysis of the Dashat-e - Bayaz (Iran) earthquake fractures. *Geological Society of America Bulletin*. V. 81, pp. 41- 60.
- Walker, R. T. and Khatib, M. M., 2006- Active faulting in the Birjand region of NE Iran. *Tectonics*. V. 25, TC4016.
- Walker, R. T., Bergman, E. A., Szeliga, W. and Fielding, E. J., 2011- Insights into the 1968-1997 Dasht-e-Bayaz and Zirkuh earthquake sequences, eastern Iran, from calibrated relocations, InSAR and high-resolution satellite imagery: *Geophys. J. Int.* V. 187, pp. 1577-1603.
- Walker, R. T., Jackson, J. A. and Baker, C., 2003- Surface expression of thrust faulting in eastern Iran: source parameters and surface deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows earthquake sequences: *Geophys. J. Int.* V. 152, pp. 749-765.
- Walker, R. T., Jackson, J. A. and Baker, C., 2004- Active faulting and seismicity of the Dasht-e Bayaz region, eastern Iran. *Geophys. J. Int.* V. 157, pp. 265-285.
- Weiqi, Z., Decheng, J., Peizhen, Z., Molnar, P., Burchfiel, B. C., Qidong, D., Yipeng, W. and Fangmin, S., 1987- Displacement along the Haiyuan fault associated with the great 1920 Haiyun, China, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* V. 77, pp. 117-131.

## Active faulting, earthquakes and structural evolution related to double step-over (case study of Mohammadabad in eastern Iran)

M. A. Alimi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Mining, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

Received: 2016 March 15

Accepted: 2016 July 18

### Abstract

The sequence of seismicity including three earthquakes in the Mohammadabad region, eastern Iran, within a period of 30 years has made it one of the most outstanding seismically active regions in the country. The Mohammadabad fault system is described using earthquake and satellite imagery data to support a simple tectonic model. The interaction between the Mohammadabad strike-slip fault system and basement structures and also the en-echelon array of fault segments have resulted in formation of the Mohammadabad pull-apart basin and Tajkuh contractional zone. The Daqq-e-Mohammadabad basin is a topographic depression formed in a right-step releasing step-over related to the Mohammadabad-Taleb dextral strike-slip fault system. Geomorphologic evaluation of the Mohammadabad deformation zone at surface indicates both normal and reverse faulting. Normal faulting is obvious in the margin of the basin and reverse faulting is seen in the zone of contraction at the Taleb-Tajkuh left-step restraining step-over. The model presented for the formation of adjacent extensional and contractional structures based on traces of the Mohammadabad strike-slip fault system, basin, and uplifts to the south of the area is a double step-over (releasing and restraining) model. Fault segments associated with this step-over may be capable of earthquake ruptures. The linkage of main strike-slip zones (Mohammadabad-Taleb and Taleb-Tajkuh) by transverse faults could increase potential generation of large earthquakes and activity of sympathetic faults.

**Keywords:** Double step-over, Pull-apart basin, Seismicity, Mohammadabad fault system, Eastern Iran.

For Persian Version see pages 63 to 72

\*Corresponding author: M. A. Alimi; E-mail: malimi@birjandut.ac.ir