

## آهنگ لغزش چپگرد گسل چوپانان در زمان کواترنری (پلیستوسن)

فاطمه برزی، کارشناس ارشد تکتونیک، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان  
علیرضا ندیمی\*، استادیار گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

پذیرش: ۱۳۹۵/۳/۹

دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۴

### چکیده

منطقه مورد مطالعه در خردقاره ایران مرکزی، بلوک یزد، زیر زون انارک- خور و در حاشیه گسل بزرگ کویر قرار دارد. گسل چوپانان از شاخه های فرعی گسل بزرگ کویر است که گسل اصلی منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. به دلیل کافی نبودن داده های زمین لرزه های دستگاهی بزرگ روی گسل جنبای چوپانان، بررسی توان لرزه ای این گسل، بر اساس کاتالوگ زمین لرزه ای، ناممکن است. در این پژوهش، با توجه به وجود شواهد ریخت زمین ساختی متعدد در امتداد گسل چوپانان و شاخه های فرعی آن، از جمله جابه جایی آبراهه های کوچک و بزرگ و مخروط افکنه ها، حرکت جنبای گسل در بازه زمانی کواترنری بررسی شد. شواهد ریخت زمین ساختی درباره گستره جغرافیایی خور نشان از حرکت گسل چوپانان در بازه زمانی پلیستوسن به صورت امتداد لغز چپگرد است. با در نظر گرفتن حرکات افقی در امتداد سامانه گسلی چوپانان در بخش های مختلف آن، بیشترین آهنگ لغزش در شمال روستای عروسان در حدود ۴ میلی متر بر سال محاسبه شد.

کلیدواژه ها: ایران مرکزی، حرکت جنبای، کواترنری.

### مقدمه

آهنگ لغزش گسل های جنبای یکی از پارامترهای مهم در بازخوانی حرکات گسل هاست. به منظور برآورد آهنگ کوتاه مدت (بازه چند ساله در زمان حاضر)، میان مدت (از یکصد هزار سال تا دو میلیون سال) و درازمدت (بیش از دو میلیون سال گذشته) به ترتیب از روش های زمین مینا (Insar, GPS)، زمین ریخت شناسی و زمین شناسی ساختی استفاده می شود. آهنگ همگرایی صفحه های عربی- اوراسیا که شاخص اصلی در دگرشکلی جنبای فلات ایران به شمار می رود به نظر می رسد از ابتدا تا زمان حال تغییر کرده باشد (آلن و همکاران، ۲۰۰۴). با توجه به اهمیت موضوع تکتونیک فعال و آهنگ لغزش، تاکنون پژوهش های متعددی درباره این بخش از مطالعات علوم زمین صورت گرفته است. میانگین آهنگ لغزش در بازه زمانی کواترنری روی برخی گسل های امتداد لغز در پهنه ایران مرکزی و شرق آن اندازه گیری شده است، از جمله پژوهش های می یو و لی در تنز (۲۰۰۷) و می یو و همکاران (۲۰۰۶). شواهد ریخت زمین ساختی و داده های GPS واکر و جکسون (۲۰۰۲) و می یو و همکاران (۲۰۰۶) به منظور اندازه گیری آهنگ لغزش گسل های درونه، ده شیر و انار استفاده شد. آهنگ جابه جایی گسل درونه در بخش های مختلف آن را جوادی و همکاران (۲۰۱۳) محاسبه کرده اند. در این گونه مطالعات به منظور دستیابی به آهنگ لغزش گسل، دو پارامتر مقدار جابه جایی و سن واحدهای جابه جاشده (در این پژوهش سن نسبی واحدها در نظر گرفته شده است) محاسبه می شود. با توجه به نزدیک بودن منطقه مورد مطالعه به گسل بزرگ کویر (درونه) و نبود شواهد لرزه ای، به منظور پی بردن به پویایی منطقه در زمان کواترنری از شواهد ریخت زمین ساختی استفاده شد. در این پژوهش تلاش شد تا تأثیر حرکت گسل ها روی واحدهای رسوبی و میزان جابه جایی آن ها در بخش های مختلف گسل های اصلی و فرعی منطقه بررسی و میزان آهنگ لغزش گسل ها اندازه گیری شود.

## روش مطالعه

با توجه به نوع پژوهش، روش کار را می‌توان در بخش‌های مختلف کتابخانه‌ای، صحرایی و آزمایشگاهی تقسیم کرد. گسل‌های منطقه مورد مطالعه در مقیاس‌های مختلف به کمک تصاویر ماهواره‌ای و اعمال فیلترهای مختلف در پردازش داده‌های رقومی ماهواره‌ای شناسایی شد و نوع حرکت امتدادلغز آن‌ها به کمک شواهد ریخت‌زمین‌ساختی در قسمت‌های مختلف تعیین شد. در بخش مطالعات صحرایی مشخصات ساختاری گسل‌ها برداشت شد و با استفاده از پله‌های گسلی، رشد بلورها و سایر ویژگی‌های ساختاری گسل‌ها، سازوکار آن‌ها مشخص شد. بررسی داده‌های لرزه‌ای ثبت‌شده در بازه زمانی ۱۹۵۸-۲۰۱۵ (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله) مربوط به مختصات مورد مطالعه، و پلات کردن آن‌ها روی نقشه گسل‌های شناسایی‌شده این امکان را فراهم کرد تا با مقایسه زمین‌لرزه‌های ثبت‌شده و پراکندگی گسل‌ها، فعالیت تکتونیکی منطقه ارزیابی شود.

در این پژوهش به منظور شناسایی گسل‌ها از تصاویر ماهواره‌ای ETM، Google Earth، SAS Planet و DEM استفاده شد. برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و بارزسازی گسل‌ها از نرم‌افزارهای ER Mapper، Oasis Montaj و Global Mapper استفاده شد. به کمک نرم‌افزارهای Dips و FaultKinwin5 داده‌ها تجزیه و تحلیل شد. نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ عروسان، مصر، فرخی و خور (انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور) به کار رفت. به منظور آماده‌سازی داده‌ها از نرم‌افزار Arc GIS و Corel Draw استفاده شد.

## یافته‌های پژوهشی

### موقعیت زمین‌شناسی

ایران در بخش میانی کوهزاد آلپ-همیالیا قرار دارد. این کمربند کوهزایی از غرب اروپا آغاز و از ترکیه، ایران و افغانستان عبور می‌کند و تا جنوب شرق آسیا ادامه دارد. ایران بر اساس پیچیدگی‌های ساختاری و شرایط متفاوت رسوبی به پهنه‌های رسوبی-ساختاری مختلفی تقسیم شده است. نخستین بار اشتوکلین (۱۹۶۸) با توجه به پیچیدگی‌های مذکور ایران را به چند حوضه رسوبی-ساختاری جداگانه تقسیم کرد. این تقسیم‌بندی مبنایی برای کار پژوهشگران بعدی شد. با آگاهی‌های بیشتر از ویژگی‌های رسوبی-زمین‌ساختی تقسیم‌بندی‌های دقیق‌تری به دست آمد، از جمله نبوی (۱۳۵۵)، افتخارنژاد (۱۳۵۹)، بربریان (۱۹۸۱)، علوی (۱۹۹۱)، نوگل‌سادات (۱۹۹۳) و آقانباتی (۱۳۸۳).

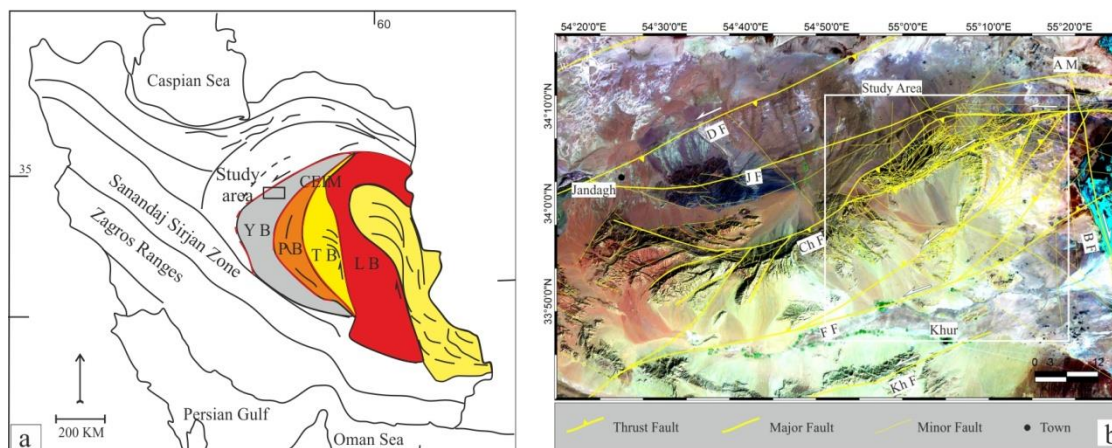
خردقاره ایران مرکزی بخشی از ایران میانی است که با زمین‌درزه‌های افیولیتی سیستان، نایین، بافت و گسل درونه و افیولیت‌های کاشمر-سبزوار احاطه شده است. این خردقاره را گسل‌های طویلی که به سمت غرب خمیدگی دارد و از نوع امتدادلغز راستگرد است، به زیرزون‌های بلوک لوت، طبس، پشت بادام و یزد تقسیم می‌کند (قاسمی و تالوت، ۲۰۰۶؛ شکل ۱a).

منطقه مورد مطالعه در محدود  $۵۴^{\circ}۳۰'$  تا  $۵۵^{\circ}۴۵'$  طول شرقی و  $۳۳^{\circ}۱۵'$  تا  $۳۴^{\circ}۴۵'$  عرض شمالی در استان اصفهان، شمال شهرستان خور واقع شده است. خور از نظر ساختاری در پهنه ایران مرکزی، بلوک یزد (آقانباتی، ۱۳۸۳)، زیر زون انارک-خور قرار دارد (شکل ۱). ارتفاعات شمال خور دارای تنوع زمانی واحدهای سنگی از پروتروزوییک تا کواترنری است و مرز واحدها را بیشتر گسل جدا کرده است. در این پژوهش به منظور بررسی فعالیت جدید منطقه، واحدهای کواترنری جابه‌جاشده در امتداد گسل چوپانان و شاخه‌های فرعی آن ارزیابی شده است. گسل چوپانان در جنوب‌شرق گسل درونه و شمال گسل ترکمنی-اردیب قرار دارد. این گسل دارای راستای کلی شمال‌شرقی-جنوب‌غربی است و از جمله گسل‌ها و شاخه‌های فرعی گسل درونه به شمار می‌رود.

### مطالعات دورسنجی

عدم شناسایی دقیق گسل‌های فعال از مهم‌ترین مشکلاتی است که غالباً در خصوص تعیین لرزه‌خیزی مناطق مختلف وجود دارد. مسلماً مطالعات دقیق و بنیادی در زمینه شناسایی گسل‌های جدید منطقه، در کنار داده‌های آماری در تعیین میزان فعالیت تکتونیکی منطقه مفید است. به منظور مشخص کردن الگوی گسلی منطقه از تصاویر سنجنده OLI ماهواره

لندست ۸ با گذر ۱۶۴ و ردیف ۳۷ استفاده شد. ترکیب‌های باندی مختلف و فیلترهای بالاگذر (High Pass)، پایین‌گذر (Low Pass)، لبه (Edge) و زاویه تابش خورشید (Sun Angle) به منظور پردازش تصاویر استفاده شد. در فیلتر زاویه تابش به منظور بارزسازی خطواره‌ها جهت‌های مختلفی بررسی و در هر جهت بخشی از خطواره‌ها بارزسازی و تأیید شد. خطواره‌های مغناطیسی به کمک نرم‌افزار Oasis Montaj و اعمال فیلترهای مختلف رسم شد. خطواره‌های گسلی شناسایی شده که نتیجه تلفیقی از پردازش‌های مختلف است در انتها بر تصاویر ماهواره‌ای SAS Planet با بزرگ‌نمایی ۱۹ منطبق شد و خطواره‌هایی مانند جاده، خط‌الرأس‌ها و آبراهه‌ها حذف و نتایج آن با مطالعات صحرایی کنترل شد. نتیجه این پردازش‌ها به دست‌آوردن الگوی گسلی منطقه مورد مطالعه است (شکل ۱b).



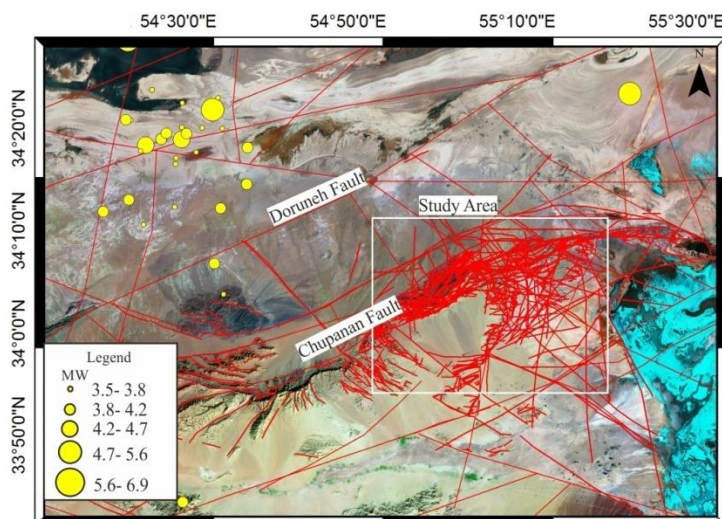
شکل ۱. (a) منطقه مورد مطالعه در شمال شرق استان اصفهان با کادر مشکی مشخص شده است. CEIM: خردقاره شرقی ایران مرکزی، YB: بلوک یزد، PB: بلوک پشت بادام، TB: بلوک طبس، LB: بلوک لوت. (b) موقعیت گسل چوپانان در حاشیه جنوبی گسل درونه. خط‌های تیره‌تر، گسل‌های شناسایی شده در منطقه است. D F: گسل درونه، Ch F: گسل جندق، J F: گسل فرخی، Kh F: گسل خور، B F: گسل برزوویه، A M: کوه آیرکان. کادر سفید منطقه مورد مطالعه را روی تصویر ماهواره‌ای TM نشان می‌دهد.

### داده‌های لرزه‌ای منطقه

به کمک داده‌های لرزه‌ای استخراج شده از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، نقشه پراکندگی زمین‌لرزه‌ها با وسعتی فراتر از منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۵ به دست آمد. در شکل ۲ مشاهده می‌شود که در منطقه مورد مطالعه زمین‌لرزه مهمی ثبت نشده است، در حالی که در امتداد برخی گسل‌ها و خطواره‌های شناسایی شده، زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی‌های متفاوت ثبت شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در امتداد گسل اصلی و شاخه‌های فرعی موازی با گسل درونه، در نواحی شمالی گسل درونه زمین‌لرزه‌های متعددی با بزرگی حدود ۵ ثبت شده است. برخلاف نواحی شمالی گسل درونه، در نواحی جنوبی و حوالی گسل چوپانان و نواحی شمال خور زمین‌لرزه مهمی ثبت نشده است. با توجه به همبستگی زمین‌ساختی گسل‌ها، فعالیت یک گسل ممکن است سبب فعال شدن گسل‌های مرتبط با آن شود. وجود گسل‌های با طول زیاد در اطراف منطقه مورد مطالعه احتمال فعالیت ناگهانی و مخرب آن‌ها را تشدید می‌کند (برزی و همکاران، ۱۳۹۴).

### مطالعات ساختاری

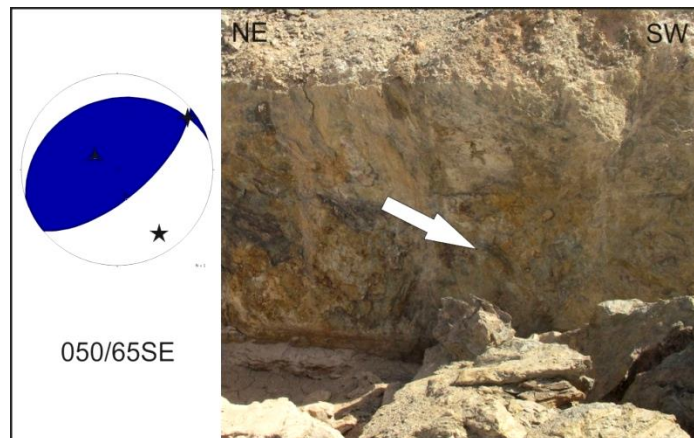
در این پژوهش، طی عملیات صحرایی در منطقه مورد مطالعه، اطلاعات لازم از صفحه گسل‌ها (امتداد، شیب و سمت شیب) به همراه خش‌لغز و نوع حرکت آن‌ها برداشت شد (شکل ۳ تا ۵). به کمک نرم‌افزار FaultKin5WinBeta و روش وارون‌سازی (آنزلیه، ۱۹۷۹)، موقعیت محورها، فشار (P) و کشش (T) داده‌های گسلی محاسبه شد (شکل ۵). به منظور مستند کردن اطلاعات، داده‌های صحرایی به همراه GPS برداشت‌شده و سازوکار گسل‌ها، با گسل‌های



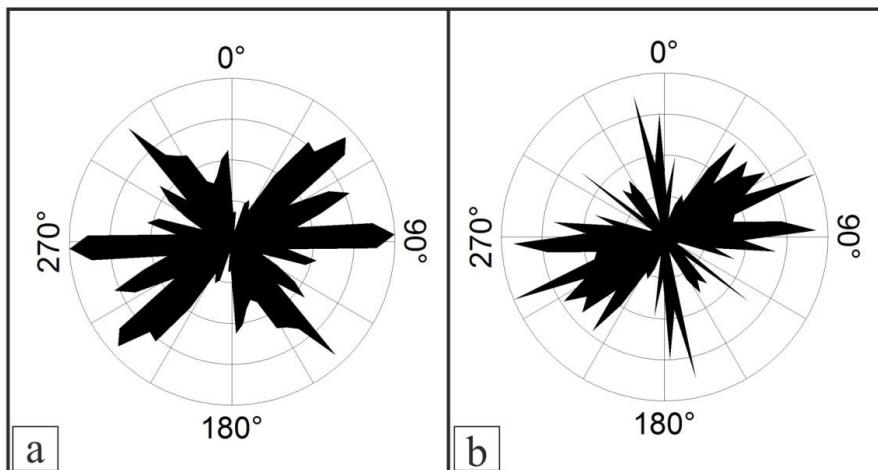
شکل ۲. در تصویر ماهواره‌ای TM موقعیت مکانی زمین‌لرزه‌های رخ داده در بازه زمانی ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۵ مشاهده می‌شود (پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله). خطواره‌ها به کمک پردازش داده‌های مغناطیسی و تصاویر ماهواره‌ای ترسیم شد. منطقه مورد مطالعه با کادر سفید مشخص است. در منطقه مورد مطالعه داده لرزه‌ای ثبت نشده است اما در اطراف آن زمین‌لرزه‌های با بزرگی متفاوت رخ داده است.

شناسایی شده به کمک دورسنگ تطابق داده شد. با توجه به سازوکار گسل‌های بررسی شده، چنین استنباط می‌شود که بیشتر گسل‌ها در این منطقه، دارای سازوکار امتدادلغز چپگرد است. برای مثال، طی مطالعات صورت گرفته در معدن تالک عروسان شاخه‌های موازی چوپانان با مشخصات Az050/65SE و ریک 80SW برداشت شد. این گسل دارای سازوکار معکوس با مؤلفه امتداد لغز چپگرد است (شکل ۳b). رزدياگرام رسم شده از امتداد گسل‌های شناسایی شده نشان می‌دهد که گسل‌های با امتداد شرقی - غربی، شمال شرقی - جنوب غرب و شمال غرب - جنوب شرق دارای بیشترین فراوانی است (شکل ۴a). همچنین، رزدياگرام رسم شده از گسل‌ها بر اساس طول آن‌ها بیانگر آن است که گسل‌های با امتداد تقریباً شمال شرق - جنوب غرب، شمالی - جنوبی و شرقی - غربی به ترتیب بیشترین طول را دارد (شکل ۴b). وضعیت پراکنندگی به دست آمده روی رزدياگرام در تشخیص گسل‌های اصلی و فرعی کمک می‌کند. بیشترین فراوانی و طول گسل‌ها در امتداد گسل چوپانان (شمال شرق - جنوب غرب) و شاخه‌های فرعی آن قرار دارد.

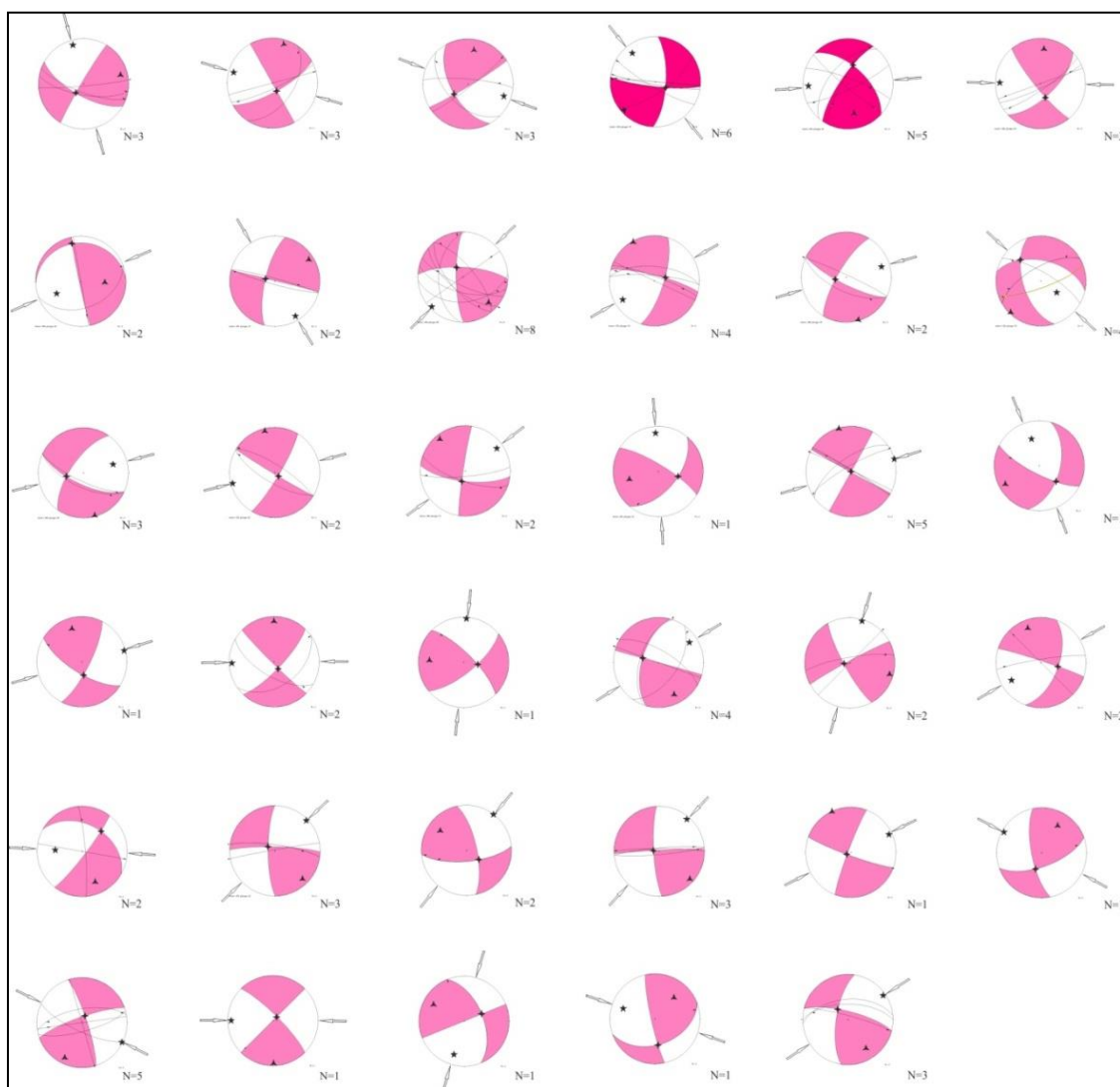
گسل‌های طولی (موازی با گسل درونه) که با امتداد شمال شرق - جنوب غرب در منطقه گسترش یافته است، بیشترین طول را دارد. از جمله این گسل‌ها می‌توان به گسل درونه، چوپانان و ترکمنی - اردیب اشاره کرد. گسل درونه گسلی پی‌سنگی است با طول حدود ۷۰۰ کیلومتر که از شمال غرب انارک شروع می‌شود و تا مرزهای افغانستان ادامه دارد و مرز شمالی خردقاره شرق ایران مرکزی به شمار می‌رود (آقاباتی، ۱۳۸۳). در امتداد بخش غربی این گسل واحدهای کواترنری به صورت چپگرد جابه‌جا شده است که حاکی از آخرین حرکت گسل چوپانان موازی با گسل درونه است. گسل چوپانان از نواحی انارک شروع می‌شود و پس از گذر از انارک و چوپانان به نواحی آیرکان می‌رسد. حرکت چپگرد این گسل باعث جابه‌جایی واحدهای کواترنری و قدیمی شده است (برزی، ۱۳۹۴). این گسل باعث جابه‌جایی چپگرد گسل کالکافی با امتداد شمال غرب - جنوب شرق (گسل‌های عرضی در منطقه) شد و آن را به محل کنونی منتقل کرده است. گسل چوپانان در منطقه مورد مطالعه با توجه به هندسه گسل به دو قطعه شمالی و جنوبی تقسیم می‌شود. قطعه شمالی دارای امتداد ENE-WSW و قطعه جنوبی دارای امتداد NE-SW است (شکل ۷a). گسل ترکمنی - اردیب با طول حدود ۱۶۰ کیلومتر موازی با گسل درونه است. این گسل گسلی پی‌سنگی است که با رسوبات کواترنری پوشیده شده است (سهرابی و ندیمی، ۱۳۹۳؛ سهرابی، ۱۳۹۳).



شکل ۳. نمایی از صفحه گسل. (a) گسل دارای موقعیت  $300/87NE$  و زاویه ریک  $40NW$  با سازوکار امتدادلغز چپگرد با مؤلفه شیبی نرمال. دید عکس به سمت شمال شرق. (B) گسلی با مشخصات  $Az050/65SE$  و ریک  $80SW$  موازی با گسل چوپان برداشت شده است. این گسل دارای سازوکار معکوس با مؤلفه چپگرد است.



شکل ۴. رزدياگرام گسل‌های شناسایی شده. (a) رزدياگرام گسل‌های شناسایی شده بر اساس امتداد با وزن‌دهی بر حسب فراوانی، رزدياگرام گسل‌های شناسایی شده بر اساس امتداد با وزن‌دهی بر حسب طول، تعداد داده‌ها ۴۲۳ (b)



شکل ۵. موقعیت گسل‌های برداشت‌شده روی استریونوت و تعیین محورهای اصلی تنش به کمک نرم افزار Fault Kin. فلش‌ها در شکل سمت همگرایی را در هر استریونوت نشان می‌دهد.

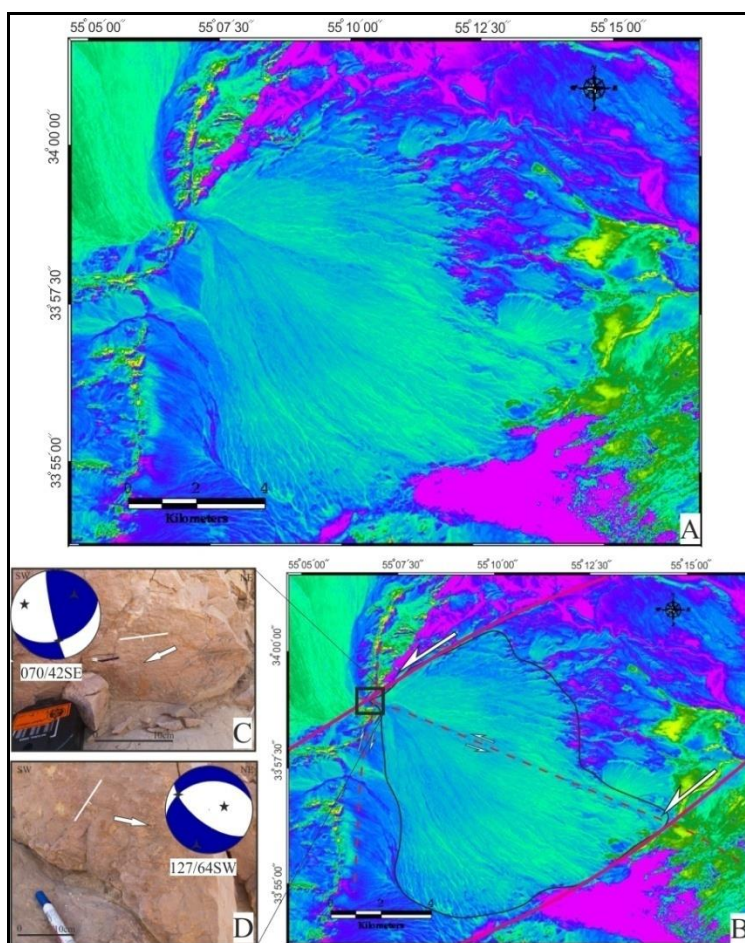
### حرکت‌های اخیر گسل

تعیین میزان جابه‌جایی زمین‌شناسی ناشی از جنبش گسل‌ها و برآورد نوع لغزش زمین‌شناسی بر پایه شواهد ریخت‌زمین‌ساختی روی گسل‌های متعددی انجام پذیرفته است (طالبیان و جکسون، ۲۰۰۲؛ واکر و جکسون، ۲۰۰۲). حرکت‌های اخیر گسل باعث ایجاد تغییر شکل‌هایی در واحدهای رسوبی از جمله جابه‌جایی آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها در منطقه مورد مطالعه شده است. با توجه به نوع سازوکار گسل‌ها، فعالیت آن‌ها سبب ایجاد ساختارهای متفاوتی روی مخروط‌افکنه‌ها می‌شود. گسل‌های با سازوکار شیب لغز نرمال باعث ایجاد مخروط‌افکنه‌های بزرگ و واگرا می‌شود، در حالی که گسل‌های با سازوکار شیب لغز معکوس، مخروط‌افکنه‌های کشیده و همگرا را به وجود می‌آورد. همچنین، گسل‌های امتداد لغز باعث قطع مخروط‌افکنه‌ها و جابه‌جایی آن‌ها به صورت راستگرد یا چپگرد می‌شود. در شمال خور به علت حرکت امتداد لغز چپگرد گسل، جابه‌جایی بارز مخروط‌افکنه در امتداد گسل به‌وجود آمده است (شکل ۶).

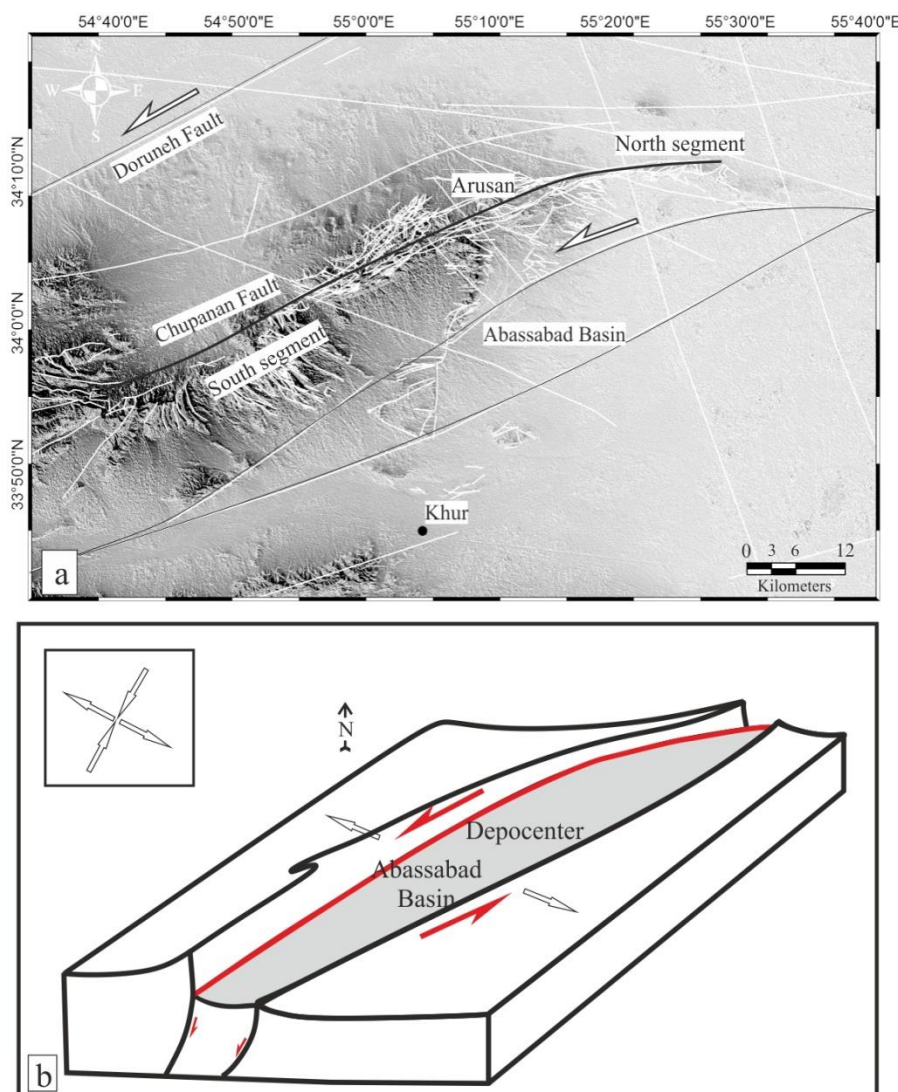
حرکت راستالغز در طول گسل باعث ایجاد ساختارهای پیچیده‌ای در پوسته زمین می‌شود (نیلور و همکاران، ۱۹۸۶). جالب‌ترین ساختارها در امتداد گسل‌های امتداد لغز زمانی به‌وجود می‌آید که گسل دچار خمش یا پله شده باشد. خمش‌ها محل تمرکز بالای استرین است (کرول، ۱۹۷۴). در محیط‌های کششی، در محل خمش‌ها و پله‌ها

فروافتادگی‌هایی تشکیل می‌شود، به نام حوضه‌های کششی - جدایشی. این حوضه‌ها به دلیل فروافتادگی، محل مناسبی برای تجمع آب و رسوبات است و با گذشت زمان باعث تشکیل گودال‌ها و دریاچه‌هایی در امتداد گسل اصلی منطقه می‌شود (تویس و مر، ۱۹۹۲). جابه‌جایی‌های امتداد لغز و شیب لغز گسل‌ها در منطقه مورد مطالعه باعث ایجاد و گسترش حوضه‌های رسوبی متعددی شده است. از جمله این حوضه‌های رسوبی می‌توان به حوضه رسوبی شمال عباس آباد اشاره کرد که با گسل‌های چپگرد موازی با چوپانان کنترل می‌شود (شکل ۷a). این حوضه تحت تأثیر نیروی کششی در امتداد شمال غرب - جنوب شرق به وجود آمده است (شکل ۷b).

جابه‌جایی الگوی آبراهه‌ها، بریده‌شدن و جابه‌جایی سامانه پادگانه‌های رودخانه‌ای و جابه‌جایی مخروط‌افکنه‌ها در بخش‌های مختلف سامانه گسل چوپانان دیده می‌شود (شکل ۸). با استفاده از شواهد ریخت‌زمین‌ساختی و سن نسبی واحدهای زمین‌شناسی جابه‌جاشده می‌توان میزان جابه‌جایی افقی و نرخ نسبی لغزشی افقی را برای این سامانه گسلی محاسبه کرد که در ادامه آمده است.



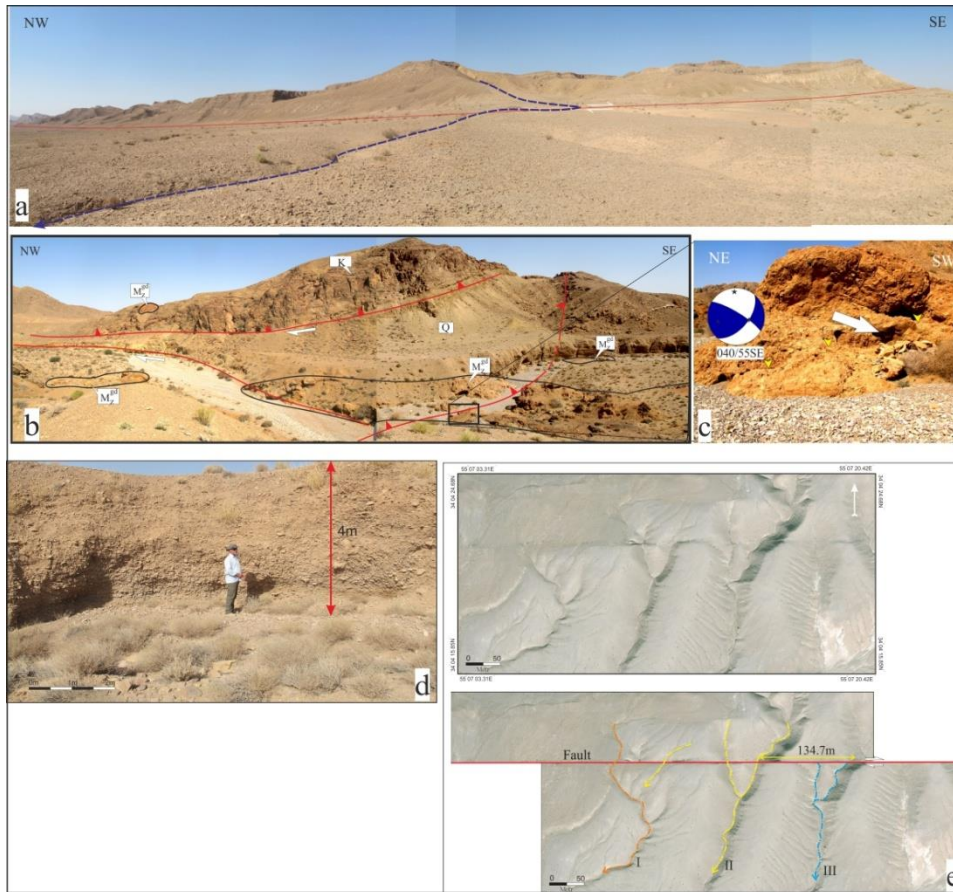
شکل ۶. حرکت چپگرد گسل باعث جابه‌جایی مخروط‌افکنه در امتداد گسل شده است. (A) تصویر ماهواره‌ای سنجنده ETM باند ۷: b و سیستم رنگی کاذب Pseudocolor پردازش شد. (B) ترسیم گسل‌ها بارز شد. در این تصویر گسل امتداد لغز چپگرد با مؤلفه شمال باعث رشد مخروط‌افکنه و عدم تقارن آن در قسمت جنوبی شده است. (C) گسل معکوس با مؤلفه راستگرد با Az070/42SE و ریک ۱۰ درجه در خلاف عقربه‌های ساعت، (D) گسل شمال با مؤلفه چپگرد دارای Az127/64SW و ریک ۶۵ درجه موافق عقربه‌های ساعت



شکل ۷. (a) موقعیت حوضه رسوبی عباس آباد و گسل‌های محصورکننده و تقسیم‌بندی گسل چوپانان به دو قطعه شمالی و جنوبی. (b) شمایی از حوضه کششی - جدایشی عباس آباد. فلش‌های سفید و تیره به ترتیب نشان‌دهنده سمت کشش محلی و جهت حرکت گسل است. جهت‌های اعمال تنش‌های اصلی  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  در کادر حاشیه شکل نشان داده شده است.

### قطعه شمالی گسل چوپانان

قطعه شمالی گسل چوپانان با امتداد ENE-WSW واحدهای پروتروزوییک، کرتاسه، میوسن، پلیوسن و کواترنری را قطع می‌کند. شکل ۹A تصویر ماهواره‌ای از قطعه شمالی گسل چوپانان است که واحدهای پروتروزوییک، میوسن و کواترنری به وسیله جنبش چپگرد گسل چوپانان قطع و جابه‌جا شده است. این شکل وضعیت ریخت‌زمین‌شناسی آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها را روی واحدهای پروتروزوییک، میوسن و کواترنری نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۹A مشاهده می‌شود، آبراهه‌های سرازیر شده از واحدهای جنوبی با جابه‌جایی چپگرد، به سمت شمال جریان یافته است. پس از بازسازی حدود ۷۱ متر جابه‌جایی، آبراهه‌ها در جنوب ارتباط قابل‌توجهی با خروجی‌های شمالی برقرار می‌کند. بدین ترتیب، پس از بازسازی، خروجی آبراهه a از  $a_1$  به  $a_2$ ، آبراهه b از  $b_1$  به  $b_2$  و آبراهه e از  $e_1$  به  $e_2$  منتقل می‌شود. پس از بازسازی ۷۱ متر، مخروط‌افکنه‌ها و آبراهه‌ها انطباق بیشتری با یکدیگر نشان می‌دهد (شکل ۹B).



شکل ۸. شواهد ریخت‌زمین‌ساختی در امتداد شاخه‌های فرعی گسل چوپانان. (a) جابه‌جایی راستگرد آبراهه در امتداد شاخه فرعی گسل چوپانان. (b) مرز واحدها به صورت گسله. واحدهای مختلف با حروف اختصاری مشخص شد؛ K آهک‌های کرتاسه،  $M_g^{gd}$  گرانودیوریت مزوزوییک، Q کواترنری. (c) صفحه گسلی با موقعیت Az040/55SE با ریک 15SW برداشت شده است. (d) نمایش یادگانه آبرفتی به ارتفاع حدود ۴ متر در شرق منطقه مورد مطالعه، دید عکس  $AZ270^\circ$  (e) جابه‌جایی مخروطافکنه‌ها و آبراهه‌ها در امتداد شاخه‌های فرعی گسل چوپانان (برزی و همکاران، ۱۳۹۴)

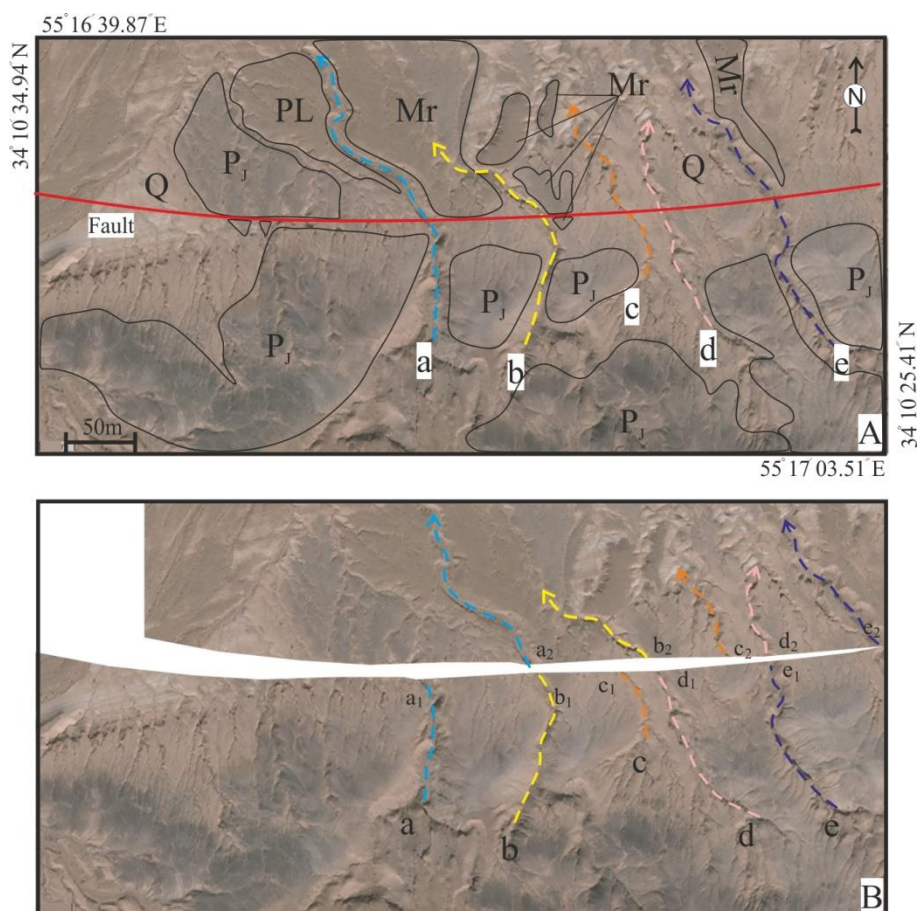
### تعیین نرخ لغزش قطعه شمالی گسل چوپانان

جوان‌ترین رسوبات جابه‌جاشده مربوط به زمان پلیستوسن آغازی است (نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ عروسان). سن این رسوبات ۰/۷۹۰ میلیون سال (بال، ۲۰۰۷) تخمین زده می‌شود. با توجه به سن رسوبات که توسط قطعه شمالی گسل چوپانان به صورت چپگرد قطع و جابه‌جا شده است، نرخ پیشینه لغزش بر اساس نسبت کل فاصله جابه‌جاشده توسط گسل به کل زمان تغییر شکل، برای ۷۱ متر جابه‌جایی، ۰/۰۹ میلی‌متر بر سال محاسبه شد.

### شمال روستای عروسان

شکل ۱۰A وضعیت آبراهه‌ها و مخروطافکنه‌ها در شمال روستای عروسان را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۰A مشاهده می‌شود، آبراهه‌های سرازیر شده از بلوک‌های شمالی با جابه‌جایی‌های چپگرد به سمت شمال جریان یافته است. پس از بازسازی و جابه‌جایی‌های چپگرد آبراهه‌ها توسط گسل‌هایی با راستای NW-SE، آبراهه‌های a و c به ترتیب با خروجی‌های ۱ و ۳ ارتباط خود را حفظ کرده است. آبراهه b به سمت شمال قطع شده است و با خروجی ۲ ارتباطی نشان نمی‌دهد. شکل ۱۰B وضعیت ریخت آبراهه‌ها و مخروطافکنه‌ها را بعد از بازسازی نشان می‌دهد. طبق جابه‌جایی‌های انجام‌شده، مشاهده می‌شود که ورودی مخروطافکنه‌های A, B, C انطباق قابل توجهی نسبت به هم پیدامی‌کند. ضمن

اینکه آبراهه‌های a و c نیز بعد از بازسازی انحراف چپگرد، با موقعیت جدیدی که در شکل B ۱۰ با خطچین رسم شده است منطبق می‌شود.



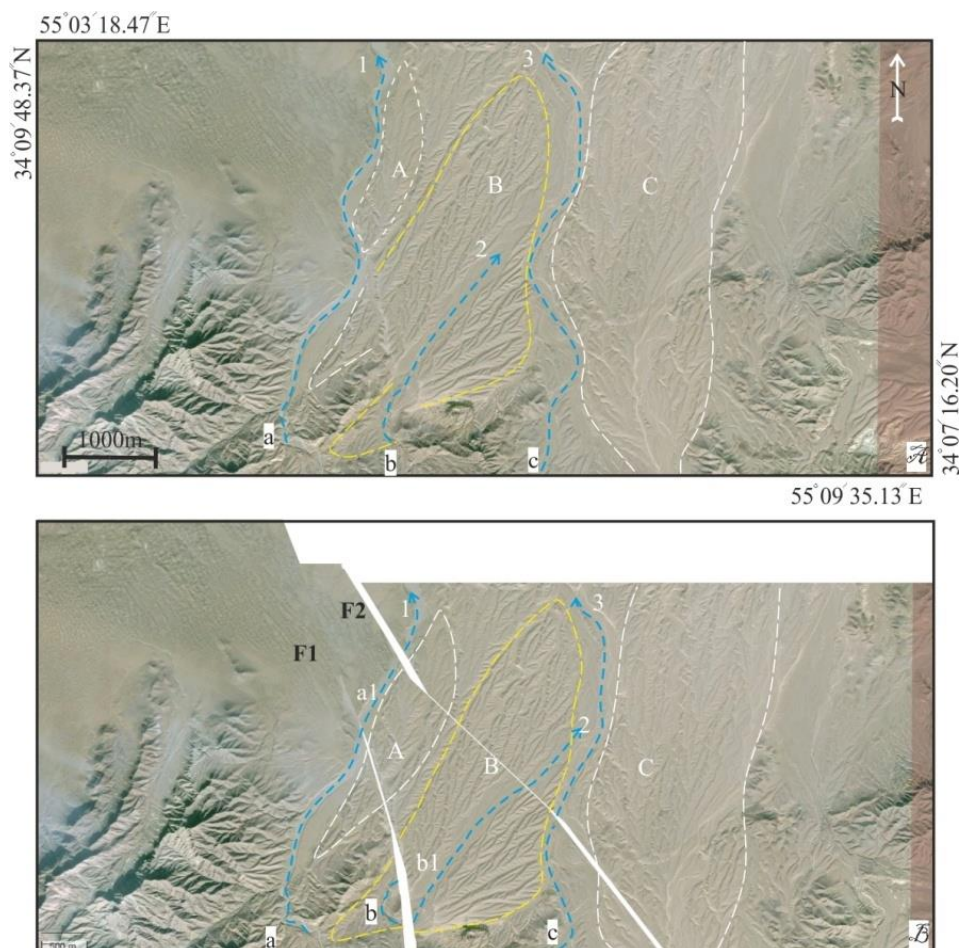
شکل ۹. A) موقعیت آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها قبل از بازسازی قطعه شمالی گسل چوپانان. B) بازسازی تقریباً ۷۱ متری قطعه شمالی گسل چوپانان و انطباق بیشتر آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها بعد از جابه‌جایی. علامت‌های اختصاری نشان‌دهنده زمان‌های زمین‌شناسی است: P<sub>1</sub> پروتروزویک، Mr میوسن، PL پلیوسن، Q کواترنری. تصویر ماهواره‌ای SAS.Planet با بزرگ‌نمایی ۱۹

### تعیین میزان لغزش در شمال روستای عروسان

رسوبات مخروط‌افکنه‌ای جابه‌جاشده توسط جنبش چپگرد در این بخش عمدتاً از جنس رسوباتی به سن تقریبی پلیستوسن میانی تا پایانی است (نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ عروسان). با در نظر گرفتن سن ۱۲۵ هزار سال (بال، ۲۰۰۷) برای این نهشته‌ها، میزان جابه‌جایی ۵۰۰ متری گسل F1، سرعت لغزش افقی ۴ میلی‌متر بر سال، و با میزان جابه‌جایی ۲۵۰ متری گسل F2، سرعت لغزش افقی ۲ میلی‌متر بر سال برآورد می‌شود. جابه‌جایی آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه با مقادیر متفاوت به دفعات در امتداد گسل‌های NE-SE نیز دیده می‌شود.

### بحث و نتیجه‌گیری

گسل چوپانان از جمله گسل‌های مهم سیستم گسلی درون‌ه در ایران مرکزی به شمار می‌رود که در طول مسیر خود به همراه دیگر شاخه‌های فرعی خود باعث جابه‌جایی چپگرد مخروط‌افکنه‌ها و آبراهه‌ها به سن پلیستوسن شده است. گسل چوپانان در منطقه مورد مطالعه با توجه به هندسه گسل به دو قطعه شمالی با امتداد ENE-WSW و قطعه جنوبی با امتداد NE-SW تقسیم می‌شود. منطقه مورد مطالعه با توجه به قرارگیری در حاشیه گسل بزرگ کویر و سایر گسل‌های



شکل ۱. A) موقعیت آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها قبل از بازسازی گسل‌ها، B) بازسازی ۵۰۰ متری در راستای گسل F1، و بازسازی ۲۵۰ متری در راستای گسل F2، شمال روستای عروسان

بزرگ ایران مرکزی اهمیت دارد، ولی شواهد زمین‌لرزه مهمی در منطقه مورد مطالعه ثبت نشده است. در این راستا، به مطالعه و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و برداشت خصوصیات گسل‌های منطقه پرداختیم. داده‌های برداشت‌شده از صفحه گسل‌ها حاکی از آن است که بیشتر گسل‌ها دارای سازوکار امتداد لغز است. گسل‌های با امتداد شمال شرق - جنوب غرب و تقریباً شرقی - غربی دارای بیشترین طول و فراوانی است که هم‌راستا با گسل چوپانان و شاخه‌های فرعی آن است. حرکت گسل چوپانان و شاخه‌های فرعی آن باعث جابه‌جایی آبراهه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها شده است. بر اساس هندسه گسل‌ها در محل خمش گسل حوضه کششی ایجاد شده است. حوضه عباس‌آباد در شرق منطقه مورد مطالعه نمونه بارزی از حوضه کششی - جدایشی است. تعیین میزان جابه‌جایی زمین‌شناسی ناشی از جنبش گسل‌ها و برآورد آهنگ لغزش زمین‌شناسی بر پایه شواهد ریخت‌زمین‌ساختی روی گسل چوپانان و شاخه‌های فرعی آن انجام پذیرفته است. آهنگ لغزش با توجه به نسبت کل فاصله جابه‌جاشده توسط گسل به کل زمان تغییر شکل برآورد و آبراهه‌ها و واحدهای جابه‌جاشده در طول گسل‌ها بازسازی شد.

حرکات اخیر قطعه شمالی گسل چوپانان باعث جابه‌جایی افقی به میزان ۷۱ متر در واحدهای پلیستوسن به سن ۰/۷۹۰ میلیون سال شده است. آهنگ لغزش در این بخش از گسل برابر با ۰/۰۹ میلی‌متر در سال برآورد شده است. حرکت شاخه‌های فرعی این گسل با امتداد شمال غرب - جنوب شرق باعث جابه‌جایی چپگرد ۵۰۰ متری واحدهای پلیستوسن پایانی شده که آهنگ لغزش حدود ۴ میلی‌متر بر سال است. با توجه به آهنگ لغزش بالای گسل‌ها، وجود گسل‌های طویل در منطقه مورد مطالعه و ثبت زمین‌لرزه‌های بزرگ در اطراف منطقه مورد مطالعه، احتمال وجود زمین‌لرزه‌های بزرگ و مخرب با دوره‌های بازگشت طولانی وجود دارد. این منطقه، برخلاف تصور، از نظر تکتونیکی فعال و دارای حرکات جدید در زمان کواترنری است.

## سپاسگزاری

این مقاله بخشی از پایان نامه کارشناسی ارشد تکتونیک دانشگاه اصفهان نویسنده اول است. نویسندگان از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه اصفهان برای حمایت‌های به عمل آمده بسیار سپاسگزارند.

## پیوست

جدول ۱. اطلاعات گسل‌های برداشت شده در عملیات صحرایی؛ ستون NO: شماره گسل‌های برداشت شده، Strike: امتداد گسل طبق قانون دست راست، Dip: شیب گسل، Dip direction: جهت شیب گسل، Rack: مقدار ریک گسل، Rack direction: جهت ریک گسل با توجه به قرارگیری آن در جهت عقربه‌های ساعت یا مخالف آن، Quality: کیفیت داده‌های برداشت شده

Column1 NO	Column2 Strike (Azimuth)	Column3 Dip	Column4 Dip direction	Column5 Rake	Column6 Rake direction	Column7 Mechanis m	Column8 Column9 GPS		Column10 Quality
							E	N	
1	100	70	S	0	-	D	322790.93452	3750952.86416	C
2	110	75	S	0	-	D	322755.48232	3750981.26006	C
3	85	86	S	0	-	S	322712.20767	3751003.63884	C
4	75	90	-	0	-	D	322959.96049	3750644.63331	C
5	34	51	E	10	موافق	D+R	322959.96049	3750644.63331	C
6	45	12	SE	10	مخالف	S+R	322959.96049	3750644.63331	C
7	275	81	N	35	مخالف	D+N	323039.04841	3750751.01633	C
8	52	84	S	0	-	D	323002.67654	3750730.12257	C
9	135	50	SW	15	مخالف	S+R	323002.67654	3750730.12257	C
10	95	90	-	44	مخالف	D	323202.61352	3750563.07490	A+
11	95	90	-	18	مخالف	D	323202.61352	3750563.07490	A+
12	120	80	S	10	مخالف	D+N	323202.61352	3750563.07490	A+
13	55	70	S	15	مخالف	D+N	323202.61352	3750563.07490	A+
14	100	85	S	10	مخالف	D+N	323202.61352	3750563.07490	A+
15	95	80	SW	10	مخالف	D+N	323202.61352	3750563.07490	A
16	290	80	N	45	مخالف	S+R	323781.96469	3743957.73477	A+
17	130	84	SW	20	موافق	D+R	323781.96469	3743957.73477	B
18	209	80	W	40	موافق	D+R	323781.96469	3743957.73477	B
19	220	55	NW	15	مخالف	D+N	323758.71055	3743952.00198	B
20	65	80	S	20	مخالف	D+N	323758.71055	3743952.00198	B
21	65	82	S	25	موافق	D+R	310809.01471	3767320.73534	B
22	70	90	S	15	مخالف	S	310809.01471	3767320.73534	B
23	248	74	s	45	مخالف	S+R	310809.01471	3767320.73534	-
24	55	79	SE	20	مخالف	D+N	310826.06984	3767403.60613	B
25	70	40	S	0	-	D	306976.17649	3769494.03869	B
26	170	90	W	20	موافق	D	306976.17649	3769494.03869	B
27	105	84	S	15	مخالف	D+N	306444.68065	3770848.69073	B
28	140	65	SW	25	موافق	D+R	306444.68065	3770848.69073	B
29	86	44	S	15	موافق	S+N	306444.68065	3770848.69073	C
30	130	65	S	0	-	S	306444.68065	3770848.69073	C
31	183	45	NE	15	مخالف	D+N	306444.68065	3770848.69073	B
32	320	70	NE	18	موافق	S+N	306444.68065	3770848.69073	C
33	40	41	S	15	مخالف	D+N	313541.38574	3772108.06989	C
34	290	82	NE	30	مخالف	S+R	314849.99829	3772220.36125	C
35	275	80	NE	45	موافق	S+N	315227.51921	3772299.86709	C
36	275	64	N	20	موافق	S+N	315217.50645	3772312.39073	B
37	115	90		30	مخالف	S	315574.82253	3772749.18586	A

Column1 NO	Column2 Strike (Azimuth)	Column3 Dip	Column4 Dip direction	Column5 Strike	Column6 Strike direction	Column7 Mechanis m	Column8 Column9 GPS		Column10 Quality
							E	N	
38	115	64	S	35	موافق	S+N	324758.04508	3774567.92522	A
39	295	86	N	0	-	S	324758.04508	3774567.92522	C
40	70	78	S	15	مخالف	D+N	325115.63844	3776015.84029	C
41	300	74	NE	20	موافق	D+R	325115.63844	3776015.84029	C
42	240	65	NW	35	موافق	S+N	325115.63844	3776015.84029	C
43	240	65	NW	30	مخالف	D+N	325115.63844	3776015.84029	C
44	115	64	S	30	موافق	S+N	325037.91996	3776109.73432	C
45	115	75	S	20	موافق	S+N	325037.91996	3776109.73432	B
46	120	71	S	10	مخالف	S+R	324854.06232	3776698.67411	B
47	302	76	N	10	موافق	S+N	324854.06232	3776698.67411	B
48	109	71	S	19	موافق	S+N	324875.76319	3776762.98628	C
49	85	80	S	10	مخالف	S+R	324875.76319	3776762.98628	B
50	40	55	SE	15	مخالف	S+R	324182.50727	3777946.95591	C
51	295	88	N	3	موافق	S	324087.65617	3778068.91506	C
52	300	87	N	40	موافق	S+N	324087.65617	3778068.91506	C
53	240	80	N	5	مخالف	D	324087.65617	3778068.91506	A+
54	235	65	N	10	موافق	S+N	324087.65617	3778068.91506	A+
55	117	75	S	40	مخالف	D+N	323972.89033	3778098.79596	B
56	122	70	S	15	مخالف	S+R	322590.76084	3780910.65324	C
57	120	63	S	22	موافق	S+N	322585.28991	3780892.26585	C
58	55	45	SE	0	-	D	322585.28991	3780892.26585	C
59	7	90	-	3	موافق	S	321889.73945	3780150.37749	B
60	7	90	-	80	موافق	S	321889.73945	3780150.37749	B
61	315	74	NE	20	موافق	D+R	325684.56103	3778224.11022	B
62	300	68	NE	0	-	S	325671.20003	3773900.75704	B
63	198	56	NE	0	-	D	325724.41231	3772063.09991	C
64	35	55	S	15	موافق	S+N	325783.25875	3772055.84953	C
65	290	90		0	-	S	325783.25875	3772055.84953	C
66	45	90		0	-	S	325905.85140	3772028.93281	A
67	260	80	N	15	مخالف	S+R	325905.85140	3772028.93281	C
68	261	84	N	24	موافق	S+N	325820.77441	3761703.94523	D
69	315	90	-	20	موافق	S	325753.99389	3761702.09268	C
70	100	90	-	10	موافق	S	340081.09068	3771284.94132	C
71	255	84	N	35	موافق	S+N	340081.09068	3771284.94132	C
72	260	88	N	0	-	S	340070.99314	3771294.35667	C
73	278	79	N	0	-	S	340070.99314	3771294.35667	C
74	278	79	n	35	مخالف	S+R	340070.99314	3771294.35667	C
75	85	70	S	5	مخالف	S+R	340068.53403	3771300.56114	C
76	85	70	s	35	مخالف	S+R	340068.53403	3771300.56114	B
77	265	84	N	20	مخالف	S+R	340161.65044	3771499.27369	A
78	270	85	N	10	موافق	S+N	340161.65044	3771499.27369	B
79	85	84	S	20	موافق	S+N	340161.65044	3771499.27369	C
80	110	84	SW	5	موافق	S+N	340171.64346	3771483.69742	C
81	70	65	S	20	موافق	D+R	340184.30437	3771474.23876	C
82	164	90	-	5	موافق	S	340186.65914	3771461.87329	B
83	75	74	S	5	موافق	D+R	340193.44321	3771862.33958	B
84	260	65	N	25	موافق	D+R	340193.44321	3771862.33958	A

Column1 NO	Column2 Strike (Azimuth)	Column3 Dip	Column4 Dip direction	Column5 Strike	Column6 Strike direction	Column7 Mechanism	Column8 Column9 GPS		Column10 Quality
							E	N	
85	82	90	-	30	مخالف	D	340190.87982	3771862.38301	C
86	115	74	SW	5	موافق	S+N	340190.87982	3771862.38301	C
87	225	90	N	10	موافق	D	325563.17926	3761656.30131	A
88	225	90	n	80	مخالف	D	325563.17926	3761656.30131	A
89	338	55	NE	0	-	D	325462.92253	3761648.90452	C
90	70	42	S	10	موافق	D+R	325326.39601	3761623.68827	A
91	270	62	N	0	-	S	325305.80854	3761620.98657	D
92	265	53	NW	26	موافق	D+R	325298.10955	3761621.12866	C
93	285	83	N	5	مخالف	S+R	325298.10955	3761621.12866	C

## منابع

- آقائاتی، علی (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، ۵۸۶ ص.
- افتخارنژاد، جمشید (۱۳۵۹). تفکیک بخش‌های گوناگون ایران از نظر وضع ساختمانی و ارتباط با حوضه‌های رسوبی، *مجله انجمن نفت ایران*، ۱۹-۲۸: ۸۲.
- برزی، فاطمه (۱۳۹۴). تحلیل ساختاری منطقه شمال خور در حاشیه گسل درونه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تکتونیک، دانشگاه اصفهان، ۱۳۸ ص.
- برزی، فاطمه، ندیمی، علیرضا و مکی‌زاده، محمدعلی، (۱۳۹۴). ارزیابی شاخص‌های تکتونیک فعال در پهنه گسلی چوپانان، شمال خور، ایران مرکزی، *نشریه بین‌المللی پژوهشی-تحلیلی زمین پویا، ویژه‌نامه زلزله ۲۵ شهر یورطیس*، ۳(۲): ۱-۱۵.
- سهرابی، آرش (۱۳۹۳). تحلیل ساختاری گسل اردیب و بررسی نقش آن در تکامل تکتونیک جنوب خور-ایران مرکزی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، تکتونیک، دانشگاه اصفهان، ۹۴ ص.
- سهرابی، آرش و ندیمی، علیرضا (۱۳۹۳). بررسی شاخص‌های مورفوتکتونیک در راستای پهنه گسلی اردیب، جنوب خور، ایران مرکزی، *نشریه بین‌المللی پژوهشی-تحلیلی زمین پویا، زمستان*.
- نبوی، محمدحسین (۱۳۵۵). دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۵۱۹ ص.
- Aghanabati A. (2004). *Geology of Iran*, Publications Geological Survey and Mineral Exploration Iran, p.586.
- Alavi, M. (1991). Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran, *Geological Society of America Bulletin*, 103: 983-992.
- 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: 17.
- Angelier, J. (1979). Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population, *Tectonophysics*, 56: 17-26.
- Berberian, M. and King, G. (1981). Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18: 210-265.
- Borzi, F. (2016). Structural analysis of the Khur region on the Doruneh Fault margin. MSc thesis, Tectonic, Supervisor: Dr. Alireza Nadimi, University of Isfahan, Iran, 134pp.
- Borzi, F.; Nadimi, A.R. and Makizadeh, M.A. (2015). The Evaluation Indicators of Active Tectonics in the Chupanan Fault Zone, North of Khur, Central Iran, *Geodynamics Research International Bulletin*, 3(2), SN:10, Special Issue on Tabas Earthquake, Autumn, 2015 3<sup>rd</sup> Article: 1-15.
- Bull, W.B. (2007). *Tectonically Active Landscapes*, Blackwell, 333pp.
- Crowell, J.C. (1974). Origin of late Cenozoic basins in southern California, 531pp.
- Eftekharnjad, J. (1980). Separating of different zones of Iran according to structural condition and relationship with sedimentary basins, *Journal of Iranian oil*, 82: 19-28.
- Ghasemi, A., and Talbot, C. (2006). A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran), *Journal of Asian Earth Sciences*, 26: 683-693.
- Javadi, H.R.; Ghassemi, M.R.; Shahpasandzadeh, M.; Guest, B.; Ashtiani, M.E.; Yassaghi, A. and Kouhpeyma, M. (2013). History of faulting on the Doruneh Fault System: implications for the kinematic changes of the Central Iranian Microplate, *Geological Magazine*, 150: 651-672.
- Meyer, B. and Le Dortz, K. (2007). Strike-slip kinematics in central and eastern Iran: Estimating fault slip-rates averaged over the Holocene, *Tectonics*, 26: 20.
- Meyer, B., Mouthereau, F., Lacombe, O. and Agard, P. (2006). Evidence of Quaternary activity along the Deshir Fault: implication for the Tertiary tectonics of Central Iran, *Geophysical Journal International*, 164: 192-201.
- Nabavi, M.H. (1976). *An introduction to Iran Geological*, Geological Survey Iran, 519 pp.
- Naylor, M.A., Mandl, G. and Sijpesteijn, C.H.K. (1986). Fault geometries in basement-induced wrench faulting under

- different initial stress states, *Journal of Structural Geology*, 8: 737-752.
- Nogol- Sadat, M.A.A. and Almasian, A. (1993). *Tectonic map of Iran, scale 1/1,000,000*, Treatise on the geology of Iran, Tehran.
- Perfilliev, Yu.; Aistov, L.; Selivanov, E.; Remizov, N. and Melnikov, B. (1984). *Geological Map of Khur, Scale 1:100000*, Geological Survey of Iran.
- Ponikarov, V.; Protasevich, L.; Maximov, A. and Tkachev, G. (1964). *Geological Map of Syria 1: 100 000*, VO Technoexport: Contract, v. 944.
- Sohrabi, A. (2015). Structural analysis Ordib Fault and investigating role of Tectonic evolution of the southern Khur-Central Iran, MSc thesis, Tectonic, Supervisor: Dr. Alireza Nadimi, University of Isfahan, Iran, 94pp.
- Sohrabi, A. and Nadimi, A.R. (2015). An investigation of morphotectonic indices along the Ordib fault zone, south Khur, Central Iran, *Geodynamics Research International Bulletin*, 2(5): 14-25.
- Stocklin, J. (1968). Structural history and tectonics of Iran: a review, *AAPG Bulletin*, 52: 1229-1258.
- Susov, M.; Dvoryankin, A.; Selivanov, E. and Desyaterik, N. (1984). *Geological Map of Mesr, Scale 1:100000*, Geological Survey of Iran.
- Talebian, M. and Jackson, J. (2002). Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia-Eurasia collision zone, *Geophysical Journal International*, 150: 422-439.
- Twiss, R.J. and Moores, E. (1992). *Structural Geology*, WH Freeman, New York, 532 pp.
- Walker, R. and Jackson, J. (2002). Offset and evolution of the Gowk fault, SE Iran: a major intra-continental strike-slip system, *Journal of Structural Geology*, 24: 1677-1698.