

# کنکاشی بر جابه‌جایی آبراهه‌ها در بخش‌هایی از گستره گسل درونه

حمیده امینی<sup>۱</sup>، مرتضی فتاحی<sup>۲</sup> و محمدرضا قاسمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، پژوهشکده زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۳/۲۶

## چکیده

گسل درونه دومین گسل طولانی ایران (پس از گسل معکوس اصلی زاگرس) است. طول تقریبی این گسل حدود ۷۰۰ کیلومتر است که از مرز ایران و افغانستان در خاور ایران تا نزدیک مرکز ایران امتداد دارد. با وجود درازای زیاد، قرارگیری در پهنه برخورد دو صفحه عربستان- اوراسیا و داشتن قابلیت لرزه‌خیزی بالا (به سبب حضور جابه‌جایی‌هایی در میان نهشته‌های جوان کواترنری)، تنها یک زمین‌لرزه تاریخی با بزرگای حدود ۷ و دو زمین‌لرزه دستگامی با بزرگای حدود ۶ و بیش از آن به این گسل نسبت داده شده است و بنابراین، تحلیل خطر لرزه‌ای در گستره این گسل ضروری به نظر می‌رسد. پایه مطالعات این نوشتار، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌های زمین‌شناسی و اطلاعات صحرایی منطقه شش تراز، برای شناسایی و برآورد میزان جابه‌جایی‌های ایجادشده در آبراهه‌ها، واحدهای زمین‌شناختی و برخی بادزن‌های آبرفتی در گستره گسل درونه است. با استناد به بررسی‌های انجام شده روی این گسل، می‌توان ۳ شاخه اصلی شمالی، جنوبی و میانی، مطابق با موقعیت جغرافیایی، در گستره گسل درونه در نظر گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده از بررسی جابه‌جایی‌های رخ داده در گستره گسل درونه، و با در نظر گرفتن فراوانی و مقادیر جابه‌جایی‌های دیده‌شده در راستای این گسل که احتمالاً طی رخداد زمین‌لرزه‌ها پدید آمده و سبب قطع‌شدگی رسوبات بادزن آبرفتی و آبراهه‌ای به سن کواترنر شده‌اند، شاخه جنوبی (شاخه اصلی)، به‌ویژه در حد فاصل ۵۸°۵۰' تا ۵۷°۰۰' خاوری، نسبت به دیگر بخش‌های این گسل، فعال‌تر و احتمالاً دارای نرخ لغزش بیشتری است. گرچه پیش‌تر برخی پژوهشگران و نویسندگان این نوشتار، نرخ لغزش‌هایی برای جابه‌جایی‌های ایجاد شده در برخی از پدیده‌های دیده‌شده، در بخش‌هایی از این گسل پیشنهاد کرده‌اند؛ برای برآورد و مقایسه دقیق‌تر نرخ‌های لغزش، استفاده از روش‌های سن‌یابی و ژئودیتیک در ناحیه‌های یکسان و بخش‌های مختلف این گسل پیشنهاد می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** گسل درونه، جابه‌جایی، نرخ لغزش، لومینسانس تحریک شده با نور (OSL)

\*نویسنده مسئول: حمیده امینی

E-mail: h.amini@iees.ac.ir

## ۱- پیش‌گفتار

داشتن پتانسیل لرزه‌خیزی بالا (به سبب حضور جابه‌جایی در میان نهشته‌های جوان کواترنری)، تحلیل خطر لرزه‌ای در این گستره اهمیت بالایی دارد. در این بررسی، پس از ارائه اطلاعاتی عمومی از منطقه (زمین‌شناسی و لرزه‌خیزی)، نتایج مطالعات انجام شده روی نقشه‌های زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی، تصاویر توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای (Landsat و QuickBird) در گستره گسل درونه ارائه می‌شود. مجموعه این تصاویر، به برنامه Global Mapper وارد و با یکدیگر مقایسه شد. در ادامه، پس از شرحی بر نرخ لغزش‌های برآورد شده توسط پژوهشگران مختلف در بخش‌هایی از این گسل، با توجه به جوان بودن جابه‌جایی‌های آبراهه‌ای در این گستره، جابه‌جایی برخی از آبراهه‌های قابل مشاهده در این امتداد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با مقایسه اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های دیده شده در گستره این گسل (احتمالاً ایجادشده طی رخداد زمین‌لرزه‌ها)، تعداد (فراوانی) و مقدار (میزان) آنها در هر یک از شاخه‌ها و در هر یک از طول‌های جغرافیایی این گسل بررسی می‌شود.

گسل درونه با طول تقریبی ۷۰۰ کیلومتر، از مرز ایران و افغانستان، در شمال خاور ایران با روند شمال باختر- جنوب خاور شروع می‌شود؛ در بخش میانی روندی تقریباً خاوری- باختری دارد؛ سپس تا نزدیک مرکز ایران، با روند شمال خاور- جنوب باختر، با تقعر به سمت جنوب ادامه پیدا می‌کند. انحنای موجود در امتداد این گسل، احتمالاً تحت تأثیر فشار ناشی از همگرایی دو صفحه عربستان- اوراسیا و حضور گسل‌های راست‌الغز راست‌بر در جنوب آن است (Walker & Jackson, 2004). شواهد زمان حاضر، بیانگر سازوکار راست‌الغز چپ‌بر در این گسل است؛ گرچه در گذشته برخی به احتمال وجود سازوکار راست‌بر در این گسل (به ویژه در بخش باختری آن) اشاره کرده‌اند (نبوی، ۱۳۵۵ و زارع، ۱۳۷۹). (Mohajer- Ashjai et al. (1975 نیز برای بخش مرکزی (شمال کاشمر) سازوکار شمال‌رمال و معکوس و برای بخش خاوری آن سازوکار معکوس و چپ‌بر را پیشنهاد کرده‌اند. با وجود آنکه گسل درونه، یکی از طولانی‌ترین گسل‌های ایران است، به باور Berberian (1976b)، میزان جنبایی این نواحی در مقایسه با دیگر مناطق ایران، کمتر و ملایم‌تر است و اثباتی بر این ادعا، تنها زمین‌لرزه تاریخی بزرگ‌تر از ۷ (زمین‌لرزه ۱۶۱۹، با بزرگای ۷ در دوغ‌آباد (Ambrasys & Melville, 1982)) در گستره این گسل است. فهرست زمین‌لرزه‌های دستگامی ثبت شده از سال ۱۹۰۰ میلادی توسط شبکه جهانی لرزه‌نگاری نیز، بیانگر رخداد تنها دو زمین‌لرزه با بزرگای حدود ۶ و بزرگ‌تر در نزدیکی این گسل است (جدول ۱ و شکل ۳)؛ ولی بر پایه شواهد ریخت‌شناسی جابه‌جایی‌ها در میان نهشته‌های جوان کواترنری، این گسل فعال است (امینی، ۱۳۸۷؛ جوادی، ۱۳۸۵ و Tchalenko et al., 1973). بنابراین با در نظر گرفتن درازای این گسل، قرارگیری در پهنه برخورد دو صفحه عربستان- اوراسیا

## ۲- زمین‌شناسی و لرزه‌خیزی گستره گسل درونه

### ۲-۱. زمین‌شناسی منطقه

در تقسیمات زمین‌شناسی ایران، گسل درونه در مرز میان بلوک‌های لوت و یزد در جنوب و کپه‌داغ در شمال قرار گرفته است (آقاباتی، ۱۳۸۳). با فرض آنکه سطح توپوگرافی اولیه در امتداد این گسل هموار بوده باشد، برجستگی‌های توپوگرافی ایجادشده در طول دوران‌های زمین‌شناسی، در طول تقریباً ۷۰۰ کیلومتری این گسل، تقریباً در حدفاصل بین ۷۵۰ تا ۱۵۰۰ متر قرار دارند و میانگین این تغییرات

#### ۴- نرخ لغزش‌های برآورد شده در گستره گسل درونه

از روش‌های سودمند در تحلیل خطر لرزه‌ای در یک منطقه خاص، اندازه‌گیری میزان حرکت سالانه گسل در آن منطقه است. از متغیرهایی که با برآورد آن می‌توان به میزان حرکت و جنبایی زمین در یک ناحیه پی برد، تعیین نرخ لغزش گسل‌های آن منطقه است. با توجه به اهمیت گسل درونه، تاکنون توسط برخی پژوهشگران، نرخ لغزش‌هایی، به چندین روش و در بخش‌هایی از این گسل برآورد شده است. (Tavakoli 2007) نرخ لغزش بخش خاوری گسل را (با به کارگیری روش ژئودتیک و استفاده از GPS)  $0.5-3.5 \text{ mm.yr}^{-1}$ ؛ جوادی (۱۳۸۵) نرخ لغزش بخش مرکزی آن را (با به کارگیری روش زمین‌شناختی استفاده از سن واحدهای زمین‌شناسی و جابه‌جایی آنها)  $4-1/5 \text{ mm.yr}^{-1}$  پیشنهاد کرده‌اند.

در رودخانه شش‌تراز که تقریباً در بخش مرکزی گسل قرار دارد، با توجه به نزدیک بودن آن به مناطق پرجمعیتی همانند کاشمر، خلیل‌آباد و روستاهای علیمردان‌خان و چنار و حضور جابه‌جایی‌هایی در بخش‌هایی از آن، از جمله در پادگانه‌های این رودخانه، با استفاده از سن‌یابی نهشته‌های بریده‌شده توسط گسل با به کارگیری لومینسانس برانگیخته‌شده با نور (OSL)، ۳ نرخ لغزش، برای این بخش از گسل برآورد شد. در این روش، از سن رسوبات منطقه (سن رسوب، از زمان دفن تا زمان نمونه‌برداری) و مقدار جابه‌جایی این رسوبات در مدت زمان دفن این رسوبات استفاده می‌شود. برای ذرات فلدسپار این بخش از گسل، (Fattahi et al. 2006) با بهره‌گیری از روش وزنی (Weighted)، نرخ لغزش  $2/7-2/1 \text{ mm.yr}^{-1}$  و امینی و همکاران (۱۳۹۰) برای سه نمونه  $T_1$ ،  $T_2$  و  $T_3$ ، به روش هیستوگرام به ترتیب نرخ لغزش را  $4/61 \pm 5/67$  و  $2/18 \pm 2/28$  و  $1/57 \pm 1/57$  میلی‌متر بر سال و به روش حداقل سن (Minimum Age) به ترتیب نرخ لغزش را  $3/53 \pm 0/31$  و  $3/38 \pm 1/03$  میلی‌متر بر سال برآورد کردند.

به طور کلی، نرخ لغزشی که با استفاده از روش ژئودتیک برآورد می‌شود، مقدار نرخ لغزش را از زمان نصب دستگاه‌های GPS ارائه می‌دهد؛ نرخ لغزشی که از روش زمین‌شناختی برآورد سن نسبی و جابه‌جایی، برآورد می‌شود، مقدار تقریبی نرخ لغزش را در طول دوران زمین‌شناسی ارائه می‌کند و نرخ لغزشی که از روش زمین‌شناختی تعیین سن مطلق رسوبات با به کارگیری OSL و میزان جابه‌جایی‌ها برآورد می‌شود، مقدار نرخ لغزش را در محل نمونه‌برداری شده، از زمان رخداد زمین‌لرزه (پس از دفن رسوبات) تا زمان نمونه‌برداری، ارائه می‌کند.

با توجه به آنکه در برآورد نرخ لغزش با استفاده از OSL، به طور مستقیم، از سن تعیین شده رسوبات منطقه استفاده می‌شود؛ احتمالاً سن پیشنهادشده به این روش (دست‌کم در منطقه نمونه‌برداری شده)، نسبت به روش‌های دیگر (با توجه به آنکه نرخ لغزش دقیق‌تری از زمان دفن رسوب (زمان رخداد زمین‌لرزه) ارائه می‌دهد) نرخ لغزش مناسب‌تری خواهد بود.

ناحیه رودخانه شش‌تراز را با استفاده از رابطه (Scholz 1982) می‌توان بخشی از قطعه شش‌تراز به طول حدود ۱۰۰ کیلومتر در نظر گرفت (Fattahi et al., 2006). با وجود آنکه، نرخ لغزش‌های به‌دست آمده به روش‌های مختلف، در بخش‌های مختلف گسل، اختلاف کمی با یکدیگر دارند؛ ولی در قطعه شش‌تراز (منطقه‌ای که سن مطلق رسوبات آن با OSL تعیین شده است)، مقدار میانگین این نرخ‌ها به روش‌های مختلف با مقدار برآورد شده آن با استفاده از OSL همخوانی دارد (شکل ۴). با توجه به نرخ لغزش‌های برآوردشده در این منطقه، به احتمال قوی قطعه شش‌تراز در طول دوران زمین‌شناسی با نرخ تقریباً ثابتی در حال تغییر بوده است.

#### ۵- جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در گستره گسل درونه

پس از هر رویداد زمین‌لرزه رخ داده در امتداد یک گسل، احتمال رخداد جابه‌جایی‌هایی در واحدهای زمین‌شناسی، آبراهه‌ها یا دیگر پدیده‌هایی که در امتداد

ارتفاع، افزایش تقریباً یکنواختی از باختر به خاور در گستره این گسل نشان می‌دهد (شکل ۱) (امینی، ۱۳۸۷).

بررسی واحدهای زمین‌شناسی گستره گسل درونه، بیانگر جوان بودن رسوبات کنونی، در پیرامون این گسل است. به جز در ناحیه‌هایی از بخش مرکزی گسل، در حد فاصل بین  $57^{\circ} 39'$  خاوری تا  $35^{\circ} 15'$  شمالی در باختر و  $58^{\circ} 22'$  خاوری تا  $35^{\circ} 18'$  شمالی در خاور که واحدهای زمین‌شناسی متعلق به رسوبات پالئوژن و نئوژن (متعلق به اوایل دوران سنوزویک) دیده می‌شوند؛ دیگر رسوبات، به نسبت جدید و از پادگانه‌های آبرفتی کهن و جدیدی به سن کواترنری (بیشتر دربردارنده رس، مارن، قطعات سنگ ماسه‌ای) هستند (شکل ۲) (امینی و همکاران، ۱۳۸۷).

#### ۲-۲. لرزه‌خیزی منطقه

از مواردی که در ارتباط با فعال بودن یک منطقه مورد بحث قرار می‌گیرد، مطالعه موقعیت گسل‌های منطقه و میزان فعال بودن هر یک از آنها است. با توجه به تعریف ارائه شده برای گسل‌های فعال، گسلی که در زمان زمین‌شناسی اخیر (هولوسن؛ حدود ده هزار سال گذشته) حرکت (فعالیت) داشته است و پتانسیل فعالیت دوباره در آینده را نیز داشته باشد، گسلی فعال است (California State Mining and Geology Board, 1982; Hessami & Jamali, 2006).

به طور کلی، حضور جابه‌جایی‌هایی با مقادیر چند ده متر تا چند صد متر، در واحدهای زمین‌شناسی (به سن پالئوژن و نئوژن) و آبراهه‌ها (به سن کواترنری)، در گستره گسل درونه، از مواردی هستند که با توجه به آنها می‌توان گسل درونه را یکی از گسل‌های فعال ایران در عهد حاضر دانست (امینی و همکاران، ۱۳۸۹).

با وجود آنکه گسل درونه، یکی از گسل‌های طولانی ایران است، از زمان ثبت زمین‌لرزه‌ها، تنها یک زمین‌لرزه تاریخی بزرگ‌تر از ۷ (زمین‌لرزه ۱۶۱۹، با بزرگای ۷ در دوغ‌آباد (Ambrasys & Melville, 1982)) و از سال ۱۹۰۰ که ثبت دستگاهی زمین‌لرزه‌ها آغاز شده است، نیز تنها دو زمین‌لرزه دستگاهی با بزرگای بیش از ۶ بر روی این گسل ثبت شده است (زمین‌لرزه‌های ۱۹۳۳ با بزرگای ۶ و ۱۹۴۰ با بزرگای ۶/۵، در پیرامون این گسل (Tchalenko et al., 1973)) (جدول ۱ و شکل ۳).

احتمالاً از جمله دلایل تغییر روند این گسل، از شمال باختر- جنوب خاور در مرز ایران و افغانستان تا شمال خاور- جنوب باختر در مرکز ایران، حضور فشار ناشی از همگرایی صفحات عربستان- اوراسیا و تأثیر مقاومت مکانیکی بلوک‌های درگیر در این پهنه برخوردی است؛ و افزون بر این، گسل درونه احتمالاً از جمله گسل‌هایی است که حرکت این صفحات در امتداد آنها از بین می‌رود.

حضور گسل‌های راست‌الغز راست‌بر در جنوب این گسل نیز می‌تواند از دلایل دیگر تغییر روند و چرخش در این گسل باشد (Walker & Jackson, 2004). با توجه به طولانی و فعال بودن گسل درونه و با توجه به آنکه در سده‌های اخیر، نه تنها شمار زمین‌لرزه‌های رخ داده در گستره این گسل، نسبت به طول آن کم بوده است بلکه بزرگای کمتر از ۶/۵ نیز داشته‌اند (جدول ۱)؛ احتمال رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ، در امتداد این گسل دور از انتظار نیست. بنابراین، انجام بررسی‌های بیشتر برای برآورد تحلیل خطر زمین‌لرزه، به ویژه در نواحی پرجمعیت پیرامون این گسل، امری ضروری است.

#### ۳- روش مطالعه

در این مطالعه، گسل درونه با توجه به پتانسیل لرزه‌خیزی بالا، به سبب حضور جابه‌جایی‌هایی در رسوبات عهد حاضر که بیانگر فعال بودن این گسل است، مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شواهد دورسنجی، جابه‌جایی‌های ایجادشده در گستره گسل، با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی (با مقیاس‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰)، عکس‌های هوایی (۱:۵۰۰۰۰)، تصاویر ماهواره‌ای لندست (۱۵ m ETM) و گوگل (۶۰cm) بررسی شد. در ادامه، نتایج به دست آمده از بررسی جابه‌جایی‌های دیده‌شده، در آبراهه‌های این گسل، ناشی از انطباق همه تصاویر با یکدیگر، ارائه شد.

و احتمالاً می‌توان این شاخه را به عنوان اصلی‌ترین شاخه گسل در نظر گرفت (فرضی که در کل این نوشتار به کار گرفته شده است).

با بررسی جابه‌جایی‌های دیده شده در مناطق دارای پهنه گسلی در گستره گسل درونه، نتایجی به دست می‌آید که احتمالاً در گسل‌های دیگر دارای پهنه گسلی نیز صدق می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده، طی هر رویداد زمین‌لرزه در این گستره (با توجه به بزرگی زمین‌لرزه‌ها)، مناطق دارای چندین شاخه گسلی، نسبت به مناطق دارای یک شاخه گسلی جابه‌جایی‌های بیشتری را متحمل شده‌اند (با توجه به آنکه در بخش‌های دارای پهنه گسلی، در هر رویداد، امکان ایجاد جابه‌جایی در تعداد شاخه‌های گسلی بیشتری وجود دارد)؛ ولی مقدار هر یک از جابه‌جایی‌ها در هر یک از شاخه‌های گسلی، در پهنه‌های گسلی، کمتر از مقدار جابه‌جایی‌ها در مناطق با یک شاخه گسلی است (شکل ۶). بنابراین، به طور کلی، می‌توان چنین گفت که طی رخداد زمین‌لرزه، پهنه‌های گسلی نسبت به مناطق بدون پهنه گسلی، تعداد جابه‌جایی‌های بیشتر، با جابه‌جایی کمتری را متحمل می‌شوند.

با توجه به آنچه که توسط (Meyer & Dortz 2007) بیان شده است؛ در شرایط ایده‌آل با رسم نموداری به صورت جابه‌جایی برحسب سن که خط رسم شده در آن بیانگر نرخ لغزش منطقه است، می‌توان سن تقریبی آغاز فعالیت گسل را در آن منطقه برآورد کرد. بنابراین، در بخش شش تراز گستره گسل درونه، با فرض آنکه مقادیر جابه‌جایی ایجاد شده طی رخداد زمین‌لرزه‌ها، در طول دوران زمین‌شناسی تغییرات قابل توجهی را متحمل نشده باشند و با فرض ثابت بودن نرخ لغزش از زمان آغاز فعالیت تاکنون (همان‌گونه که با سه روش تأیید شده است)، طبق آنچه که (Meyer & Dortz 2007) بیان کرده‌اند، با داشتن مقادیر جابه‌جایی در این منطقه، می‌توان سن تقریبی آغاز فعالیت دوباره در محل این جابه‌جایی‌ها را برآورد کرد. نرخ لغزش برآورد شده با استفاده از OSL سن مطلق رسوبات را ارائه می‌دهد و بنابراین نتایج آن دست کم در منطقه مورد نظر، دقیق‌تر از دیگر روش‌هاست. با توجه به آنکه در این بررسی، نتایج نرخ لغزش با استفاده از OSL، تنها در ناحیه رودخانه شش تراز برآورد شده است و مقدار نرخ لغزش این بخش، تقریباً با مقدار به دست آمده از روش‌های یاد شده دیگر همخوانی دارد (شکل ۴)، نرخ لغزش به دست آمده از تعیین سن مطلق رسوبات با OSL در این منطقه در نظر گرفته شد؛ و با فرض صحیح بودن مقادیر جابه‌جایی (به دست آمده از تجمع جابه‌جایی‌های ایجاد شده طی هر رخداد زمین‌لرزه در طول دوران زمین‌شناسی) و مقادیر نرخ لغزش برآورد شده، و با فرض (به احتمال ضعیف) ثابت بودن نرخ لغزش از زمان آغاز فعالیت تا کنون سن آغاز فعالیت دوباره گسل در آبراهه‌های این قطعه از گسل محاسبه شد (شکل ۹).

به طور کلی، با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی جابه‌جایی‌های رخ داده در گستره گسل درونه، تعداد و مقدار جابه‌جایی‌های دیده شده، بیانگر حضور کمترین و بیشترین جابه‌جایی‌ها در شاخه جنوبی این گسل، به‌ویژه در حد فاصل  $57^{\circ}00'$  تا  $58^{\circ}50'$  خاوری است. بنابراین، احتمالاً می‌توان چنین گفت که در طول دوران زمین‌شناسی شاخه جنوبی این گسل (در نظر گرفته شده در این نوشتار)، نسبت به دیگر شاخه‌های این گسل، فعال‌تر بوده است.

با توجه به مطالعات انجام شده در این بررسی، برای تعیین دوره بازگشت زمین‌لرزه‌ها در بخش‌های مختلف در این گستره، بررسی بیشتر شاخه شمالی گسل و به‌ویژه در حدفاصل  $57^{\circ}00'$  تا  $58^{\circ}50'$  خاوری است، نسبت به دیگر بخش‌های گسل در اولویت است. برای بررسی دقیق این مناطق استفاده از ایستگاه‌های GPS و نمونه‌برداری مستقیم از رسوبات این بخش از گسل پیشنهاد می‌شود.

یک گسل هستند، وجود دارد؛ مؤلفه افقی این جابه‌جایی‌ها، در گسل‌های راستالغز، نسبت به دیگر گسل‌ها، با وضوح بیشتری قابل تشخیص هستند. با توجه به آنکه گسل درونه، گسلی راستالغز چپ‌بر است، جابه‌جایی‌های افقی نسبتاً آشکاری در این گستره دیده می‌شود. در این بررسی، برخی از جابه‌جایی‌های این گستره (با فرض آنکه این جابه‌جایی‌ها احتمالاً ناشی از گسلش هستند)، با مطالعات دورسنجی، مطالعه شد و به‌طور کلی ۳ شاخه اصلی شمالی، جنوبی و میانی برای گسل درونه در نظر گرفته شد (شکل ۵).

شاخه‌های به موازات یکدیگر و به موازات خط اثر گسل که سازوکار کم و بیش همانندی دارند و از دید ساختاری به گسل اصلی وابسته هستند و فاصله آنها نیز به میزانی نیست که بتوان آنها را به صورت گسل‌های مستقل در نظر گرفت، پهنه گسلی نامگذاری می‌کنند. بنابراین، احتمالاً در یک از ۳ شاخه در نظر گرفته شده به عنوان شاخه اصلی گسل، می‌توانند به صورت پهنه گسلی شاخه اصلی گسل باشند؛ افزون بر این، در برخی بخش‌های دیگر گسل، مناطقی وجود دارند که بیشتر از سه شاخه دارند و احتمالاً می‌توان آنها را به طور قطع بخش‌هایی از پهنه گسل درونه در نظر گرفت (برای نمونه شکل‌های ۵ و ۶).

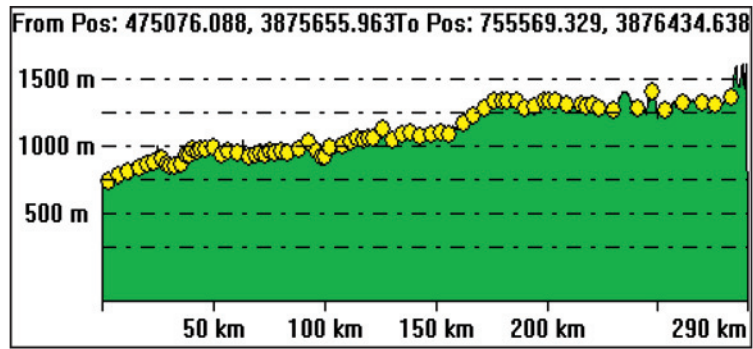
با توجه به آنکه مطالعات دورسنجی، اطلاعاتی کلی از منطقه را در اختیار قرار می‌دهند؛ در تکمیل مطالعات، بررسی‌های مستقیم صحرایی، برای بررسی دقیق‌تر جابه‌جایی‌ها در این مناطق گسلی ضروری است. بررسی‌های انجام شده در گستره مورد مطالعه، جابه‌جایی‌هایی را در واحدهای زمین‌شناسی، آبراهه‌ها و برخی بادن‌های آبرفتی در امتداد این گسل نشان می‌دهند. برخی از این جابه‌جایی‌ها به صورت جابه‌جایی سامانه‌ای از آبراهه‌ها در یک امتداد قرار دارند و گویا شاخه‌هایی از گسل، در آنها قرار دارد ولی در نقشه‌های زمین‌شناسی به آنها اشاره نشده است (شکل ۵).

برخی از مقادیر جابه‌جایی دیده شده در گستره این گسل، در این بررسی، اندازه‌گیری شد. در شکل ۷، نمودار مقادیر جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در هر یک از شاخه‌های شمالی، میانی و جنوبی گسل و در شکل ۸، نمودار مقادیر جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در هر درجه طول جغرافیایی (در حدفاصل  $56^{\circ}47'$  تا  $57^{\circ}00'$ ،  $58^{\circ}00'$  تا  $58^{\circ}58'$  و  $59^{\circ}00'$  تا  $59^{\circ}20'$  درجه خاوری) در گستره این گسل نشان داده شده است.

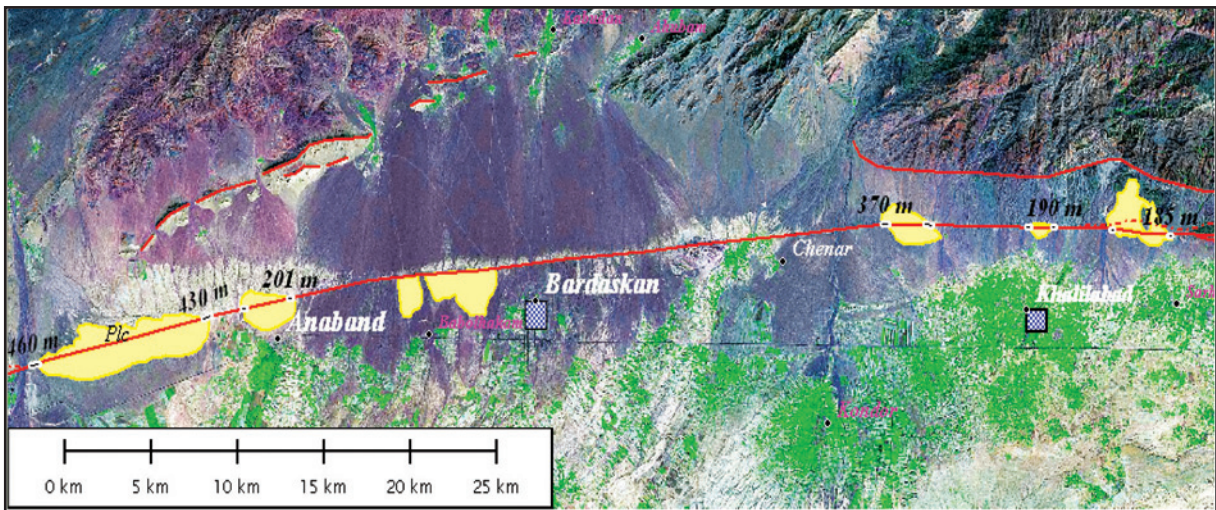
## ۶- بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به درازای گسل راستالغز چپ‌بر درونه، از مواردی که در گستره پهناور این گسل می‌توان مورد بررسی قرار داد، جابه‌جایی‌های ایجاد شده طی رخداد زمین‌لرزه‌ها، نرخ لغزش و سن آغاز فعالیت مجدد در بخش‌های مختلف این گسل است. در این مطالعه، با اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های دیده شده در امتداد این گسل، تعداد (فراوانی) و مقدار (میزان) این جابه‌جایی‌ها در هر یک از شاخه‌ها و در هر یک از طول‌های جغرافیایی بررسی شد (شکل‌های ۷ و ۸).

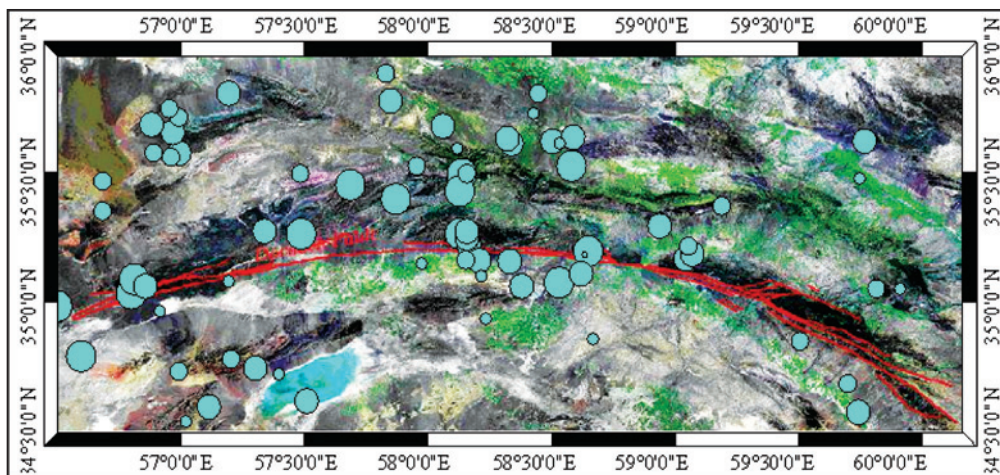
با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۷، نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های انجام شده در هر یک از شاخه‌های گسل، بیانگر تعداد و مقدار جابه‌جایی بیشتر در شاخه جنوبی گسل نسبت به دیگر شاخه‌های گسل است. با مقایسه جابه‌جایی‌ها در هر درجه طول جغرافیایی، همان‌گونه که در شکل ۸ ارائه شده است، بیشترین مقدار و تعداد جابه‌جایی‌ها در شاخه جنوبی و در حدفاصل میان  $58^{\circ}50'$  تا  $57^{\circ}00'$  خاوری دیده می‌شود. بنابراین، می‌توان بیان کرد که احتمالاً فعال‌ترین بخش این گسل، در شاخه جنوبی، به‌ویژه در حدفاصل  $58^{\circ}50'$  تا  $57^{\circ}00'$  خاوری است (شکل‌های ۷ و ۸).



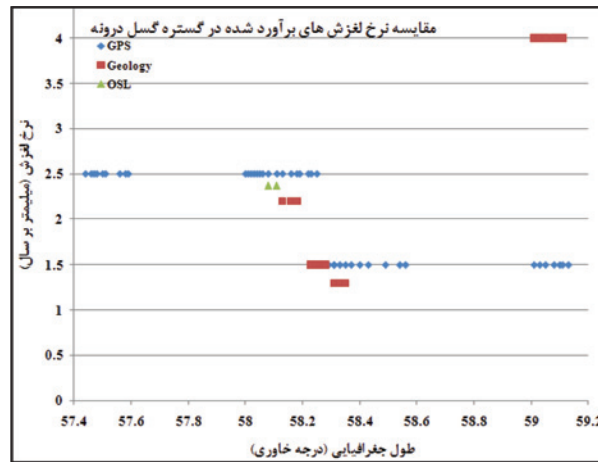
شکل ۱- تغییر ارتفاع در امتداد گسل درونه از باختر به خاور (رسم شده در برنامه Global Mapper).



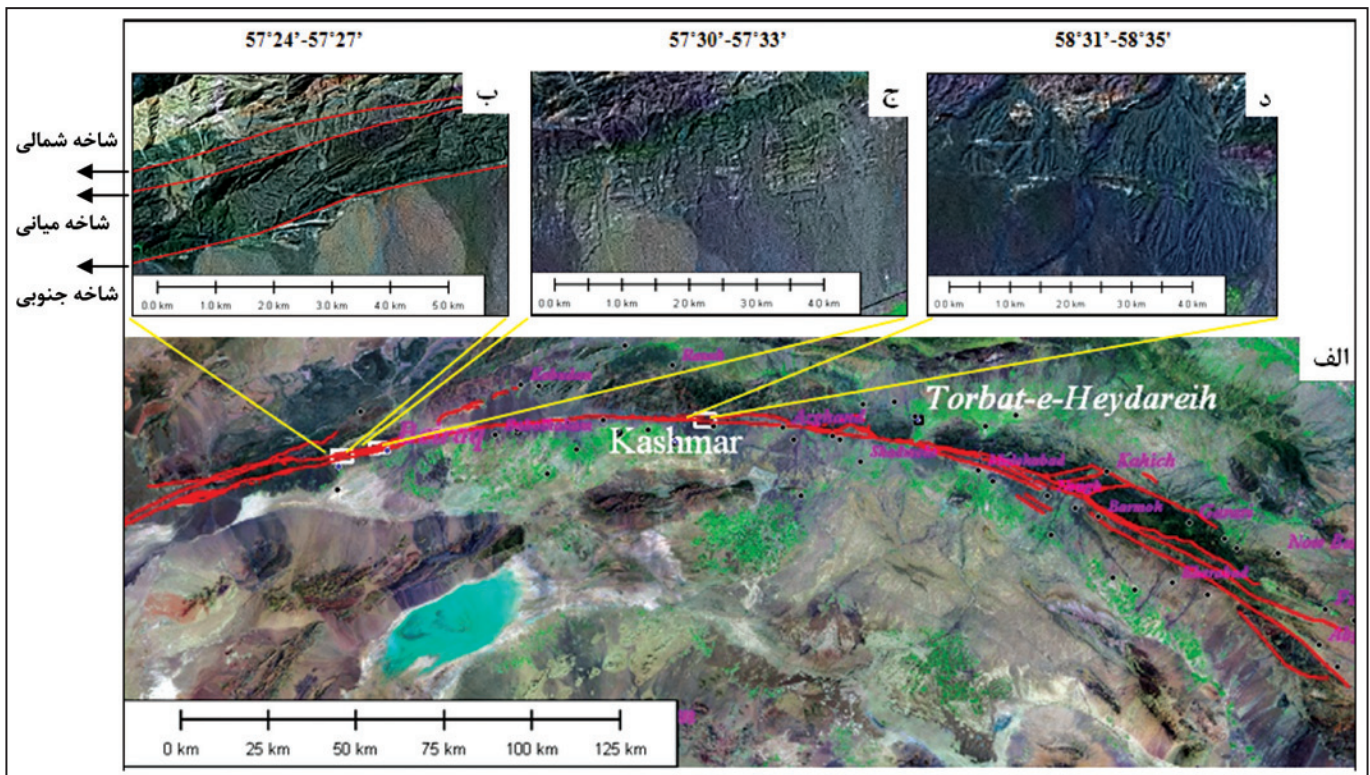
شکل ۲- جابه‌جایی واحدهای زمین‌شناسی نئوژن در تصویر ماهواره‌ای لندست ۷، در گستره گسل درونه، بین خلیل‌آباد و بیرق (۲۲°۵۸' تا ۳۹°۵۷' خاوری).



شکل ۳- پراکندگی کانون زمین‌لرزه‌های ثبت شده در گستره گسل درونه (این زمین‌لرزه‌ها از کاتالوگ‌های مختلف IRSC (<http://irsc.ut.ac.ir>), Harvard ([www.seismology.harvard.edu](http://www.seismology.harvard.edu)), IIEES (<http://www.iiees.ac.ir>) و ISC (<http://www.isc.ac.uk>) جمع‌آوری شده‌اند) (امینی، ۱۳۸۷).

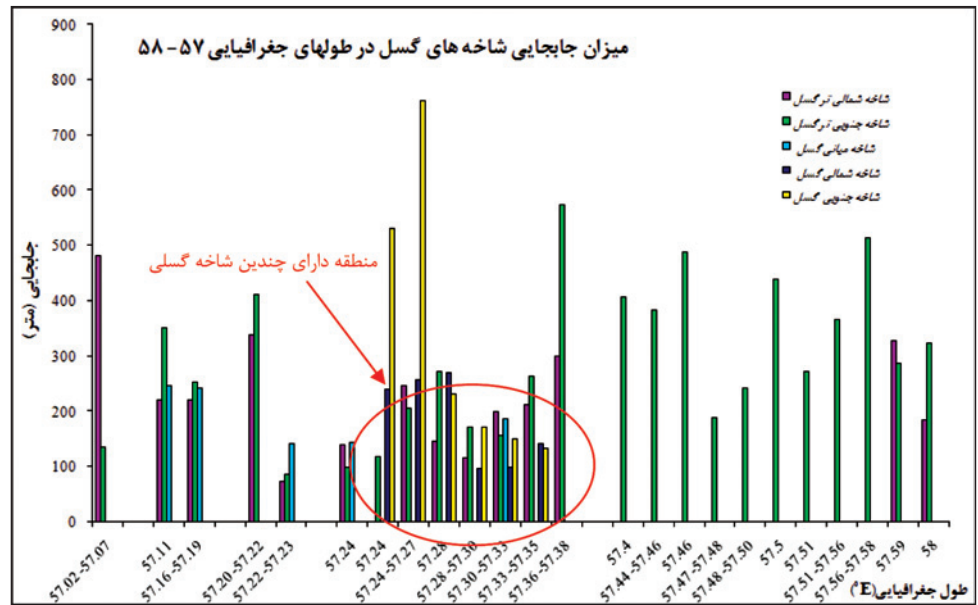


شکل ۴- مقایسه نرخ لغزش های برآورد شده در گستره گسل درونه به روش های زمین شناسی و ژئودتیکی. چنانچه دیده می شود در فاصله میان  $58^{\circ}20'$  تا  $58^{\circ}00'$  خاوری نتایج به دست آمده از سه روش تقریباً با یکدیگر منطبق هستند ( $2/2 - 2/5 \text{ mm.yr}^{-1}$ ).

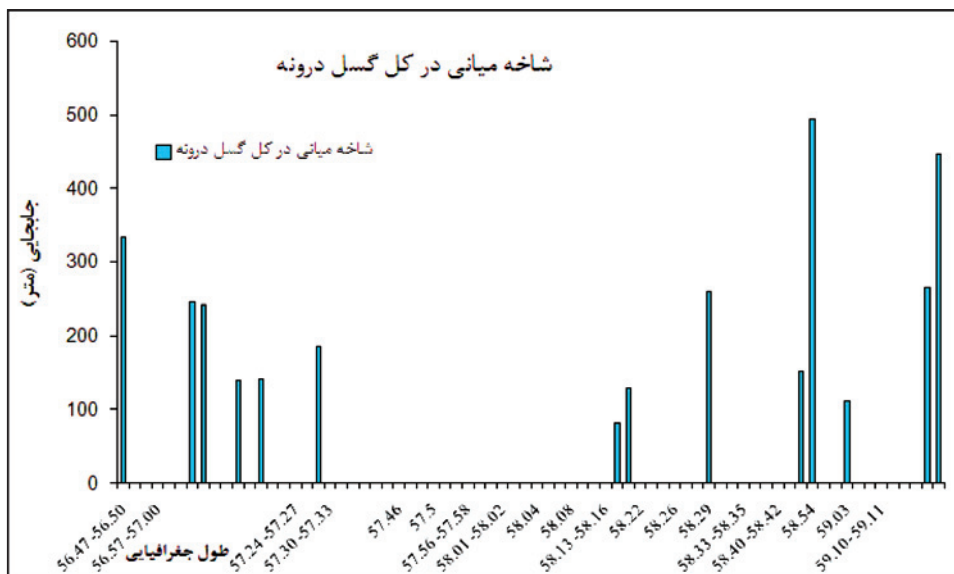
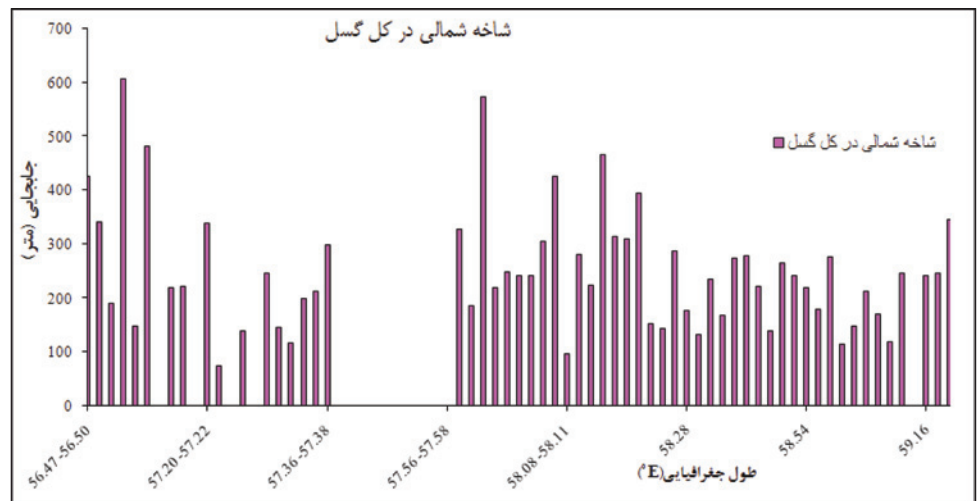


شکل ۵- الف) گستره مورد بررسی قرار گرفته گسل درونه؛ ب، ج و د) نمونه از بخش هایی از گسل درونه که احتمالاً به صورت پهنه گسلی هستند (فاصله میان  $34^{\circ}30'$  تا  $35^{\circ}30'$  شمالی و  $60^{\circ}30'$  تا  $56^{\circ}30'$  خاوری). شاخه های شمالی، میانی و جنوبی گسل در شکل ب نشان داده شده است.

شکل ۶- میزان جابه‌جایی شاخه‌های مختلف در گستره گسل درونه در حدفاصل طول جغرافیایی ۵۷ تا ۵۸ درجه. مقادیر جابه‌جایی مشخص شده در محدوده بیضی در تصویر، با جابه‌جایی آبراهه‌های دیده شده در بخش‌های "ب" و "ج" شکل ۵ منطبق هستند. همان‌گونه که دیده می‌شود، منطقه دارای چندین شاخه گسلی، افزون بر آنکه شمار جابه‌جایی‌های بیشتری دارد، مقدار هر یک از جابه‌جایی‌ها کمتر از مقدار جابه‌جایی‌ها در بخش‌های دارای یک شاخه گسلی است.

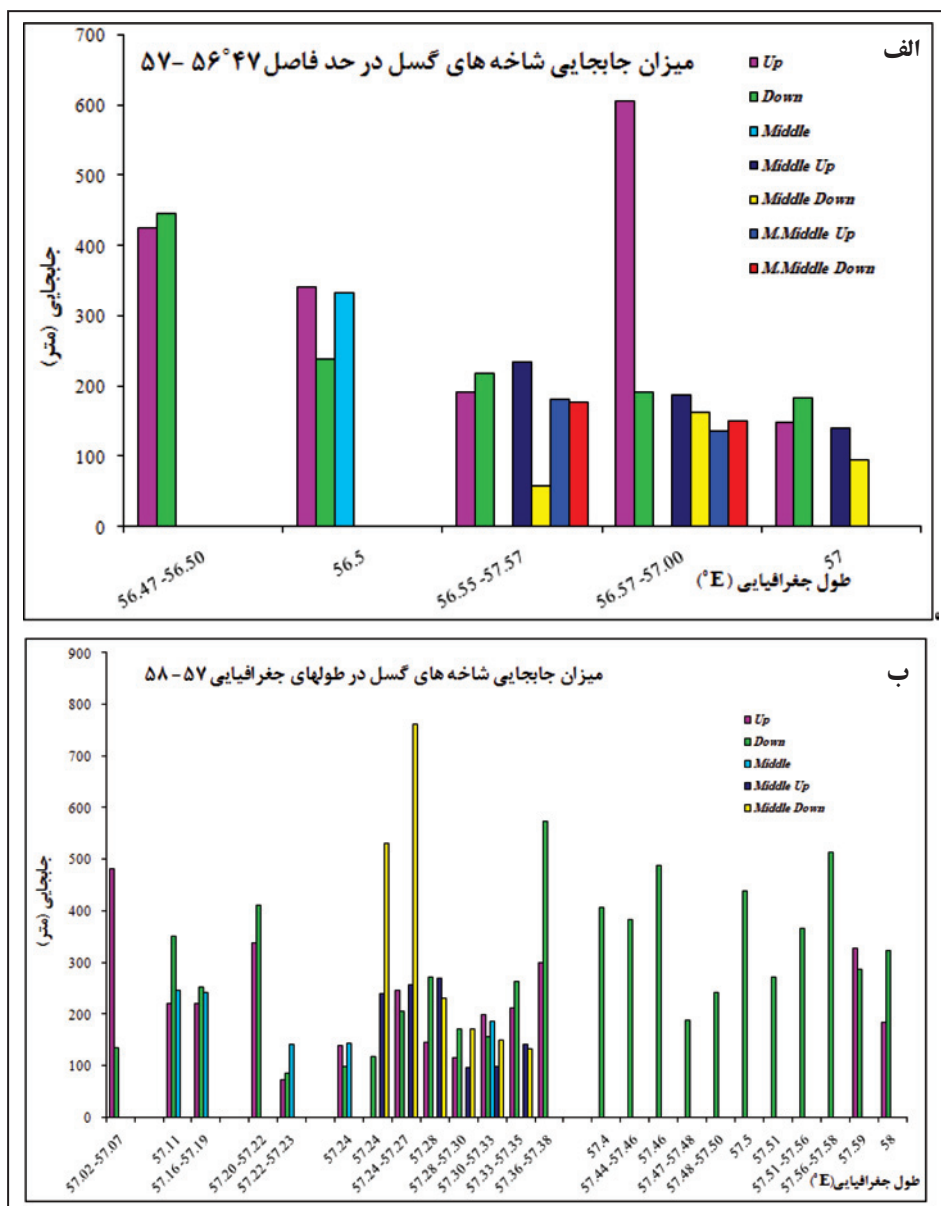
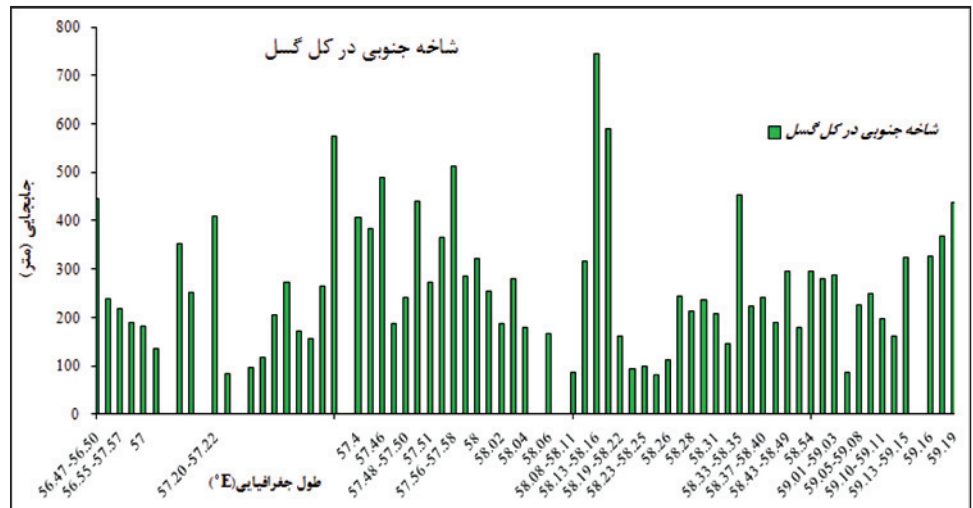


شکل ۷- مجموع جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در هر شاخه در گستره گسل درونه با استفاده از اندازه‌گیری تصاویر در دسترس منطقه؛ الف) فراوانی جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در شاخه شمالی گسل.

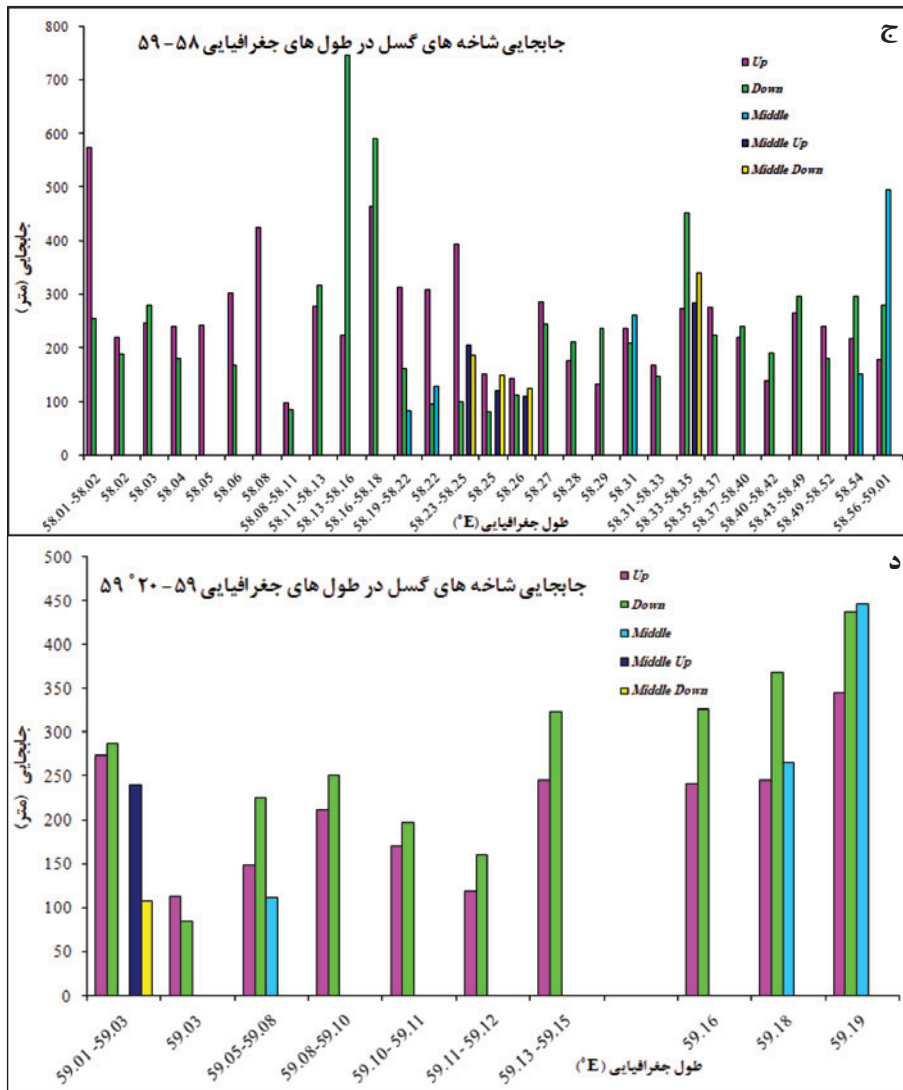


شکل ۷- مجموع جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در هر شاخه در گستره گسل درونه با استفاده از اندازه‌گیری تصاویر در دسترس منطقه؛ ب) فراوانی جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در شاخه میانی گسل.

شکل ۷- مجموع جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در هر شاخه در گستره گسل درونه با استفاده از اندازه‌گیری تصاویر در دسترس منطقه؛ (ج) فراوانی جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در شاخه جنوبی گسل.

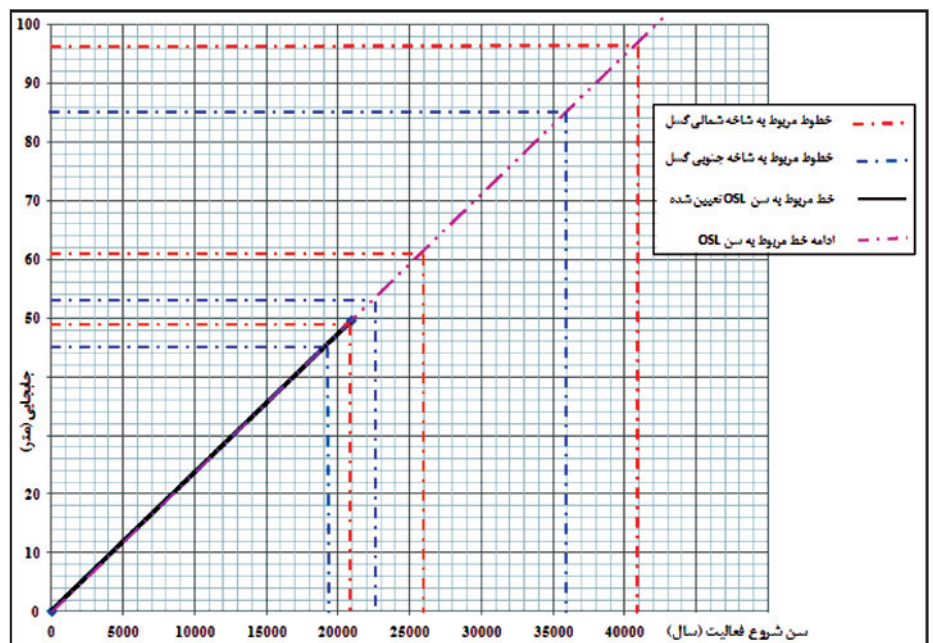


شکل ۸- مقایسه مقادیر جابه‌جایی شاخه‌های گسل در هر یک از طول‌های جغرافیایی مورد بررسی؛ الف) در حدفاصل ۴۷° تا ۵۷°؛ ب) در حدفاصل ۵۷° تا ۵۸°.



شکل ۸- مقایسه مقادیر جابه‌جایی شاخه‌های گسل در هر یک از طول‌های جغرافیایی مورد بررسی؛ (ج) در حدفاصل ۵۸° تا ۵۹°، (د) ۵۹°۲۰ تا ۵۹°.

شکل ۹- برآورد سن آغاز فعالیت در آبراهه‌های قطعه شش تراز. خط رسم شده در نمودار، مقدار نرخ لغزش در قطعه شش تراز را نشان می‌دهد (Fattahi et al., 2006). همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، با تعیین میزان جابه‌جایی‌های اندازه‌گیری شده در هر یک از آبراهه‌های این قطعه بر روی محور قائم، می‌توان سن تقریبی آغاز فعالیت آن آبراهه را با توجه به مقادیر محور افقی برآورد کرد.





جدول ۱- زمین لرزه‌های تاریخی و دستگای رخ داده در گستره گسل درونه.

کاتالوگ ثبت کننده	نوع بزرگی	بزرگی	ژرفا (km)	طول جغرافیایی (°E)	عرض جغرافیایی (°N)	زمان رخداد
<i>Ambraseys&amp;Melville</i>		۵/۹		۵۸° ۹۰'	۳۵° ۱۰'	۱۶۱۹م
<i>Ambraseys&amp;Moinfar</i>		۵/۸		۵۹° ۱۱'	۳۵° ۱۹'	۱۹۲۳/۰۵/۲۵
<i>Tchalenko et al, 1973</i>		۶				۱۹۳۳/۱۰/۱۵
<i>Tchalenko et al, 1973</i>		۶/۷				۱۹۴۰/۰۵/۰۴
<i>Berberian</i>		۵		۵۸° ۷'	۳۵° ۶'	۱۹۵۸
<i>Engdahl</i>		۵	۱۵	۵۸° ۷۱'	۳۵° ۲۰'	۱۹۶۲/۱۰/۰۵
<i>ISC</i>		۵/۱		۵۷° ۵۴'	۳۵° ۲۴'	۱۹۶۵/۰۲/۲۶
<i>Engdahl</i>		۵	۱۶/۳	۵۷° ۷۳'	۳۵° ۴۸'	۱۹۷۳/۰۵/۱۷
<i>Harvard</i>	<i>Mb</i>	۵/۲	۱۵	۵۶° ۶۰'	۳۴° ۸۰'	۱۹۷۹/۱۲/۰۹
<i>Engdahl</i>	<i>Mb</i>	۵/۲	۲۰	۵۸° ۶۰'	۳۵° ۰۹'	۱۹۹۴/۱۲/۱۴
<i>IRSC</i>	<i>Mb</i>	۵/۲	۱۳	۵۸° ۷۲'	۳۵° ۳۲'	۱۹۹۶/۰۲/۰۵
<i>Harvard</i>	<i>Mb</i>	۵/۱		۵۸° ۱۹'	۳۵° ۴۶'	۲۰۰۰/۰۲/۰۲
<i>Harvard</i>	<i>Mb</i>	۴/۲	۱۳	۵۹° ۵۶'	۳۵° ۰۴'	۲۰۰۲/۰۱/۲۲
<i>IRSC</i>	<i>MN</i>	۴/۴	۱۸	۵۶° ۸۴'	۳۵° ۰۴'	۲۰۰۶/۰۱/۱۴
<i>IRSC</i>	<i>MN</i>	۵/۱	۴	۵۸° ۷۶'	۳۵° ۵۴'	۲۰۰۸/۰۷/۰۳
<i>IRSC</i>	<i>MN</i>	۴/۳	۵	۵۸° ۳۱'	۳۵° ۰۲'	۲۰۱۰/۰۴/۱۲
<i>IRSC</i>	<i>MN</i>	۵/۷	۷/۱	۵۹° ۲۵'	۳۵° ۲۲'	۲۰۱۰/۰۷/۳۰

## کتابنگاری

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی ایران، ۵۸۶ صفحه.
- امینی، ح.، ۱۳۸۷- تحلیل خطر زلزله ناشی از گسل درونه به کمک سن یابی به روش لومینسانس و دورسنجی، پایان نامه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک، ۲۱۲ صفحه.
- امینی، ح.، فتاحی، م. و قاسمی، م. ر.، ۱۳۸۹- آشکارسازی پویایی نوین گسل درونه با کمک داده‌های دورسنجی و اطلاعات زمین شناسی، فصلنامه علوم زمین، شماره ۷۶، صفحه ۵۷-۶۲.
- امینی، ح.، فتاحی، م. و قاسمی، م. ر.، ۱۳۹۰- محاسبه نرخ لغزش در منطقه شش تراز گسل درونه به روش هیستوگرام و حداقل سن با استفاده از لومینسانس برانگیخته شده با نور، مجله انجمن ژئوفیزیک، شماره ۳، جلد ۵.
- جوادی، ح. ر.، ۱۳۸۵- زمین ساخت جنوبا، لرزه زمین ساخت و تحلیل ساختاری سامانه گسل درونه، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۲۱۰ صفحه.
- زارع، م.، ۱۳۷۹- تحلیل لرزه زمین ساختی سیستم گسله درونه و بررسی زلزله‌های زمستان ۱۳۷۸- بهار ۱۳۷۹ کاشمر، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ص ۳۲-۴۰.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵- دیباچه‌ای بر زمین شناسی ایران، وزارت صنایع و معادن کشور.

## References

- Berberian, M., 1976b- Contribution to the seismotectonic of Iran (Part II), Geological Survey Of Iran, Rep. No. 39.
- California State Mining and Geology Board, 1982- Mineral Land Classification Map, Aggregate Resources Only, Felton Quadrangle.

- Ambraseys, N. N. & Melville, C., 1982- A history of Persian earthquakes, Cambridge University Press, Cambridge.
- Fattahi, M., Walker, R. T., Khatib, M. M., Dolati, A. & Bahroudi, A., 2006- Slip-rate estimate and past earthquakes on the Doruneh fault, eastern Iran , *Geophys. J. Int.*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03248.x.
- Hessami, K. & Jamali, F., 2006- Explanatory Notes to the Map of Major Active Faults of Iran, *JSEE*: Vol. 8, No. 1.  
<http://irsc.ut.ac.ir/>  
<http://www.iiees.ac.ir/>
- Meyer, B. & Dortz, K., 2007- Strike- slip kinematics in Central and Eastern Iran: Estimating fault slip- rates averaged over the Holocene, *TECTONICS*, VOL. 26, TC5009, doi: 10.1029/2006TC002073.
- Mohajer- Ashjai, A., Behzadi, H. & Berberian, M., 1975- Reflections on the rigidity of the Lut Block and recent crustal deformation in eastern Iran, *Tectonophysics*, 25 281-301.
- Scholz, C., 1982- Scaling laws for large earthquakes: consequences for physical models, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 1–14.
- Tavakoli, F., 2007- Present-day deformation and kinematics of the active faults observed by GPS in the Zagros and east of Iran, Ph. D. Thesis, 313P.
- Tchalenko, J. S., Berberian, M. & Behzadi, H., 1973- Geomorphologic and seismic evidence for recent activity on the Doruneh Fault Iran, *Tectonophysics*, 19: 333-341.
- Walker, R. & Jackson, J., 2004- Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran, *TECTONICS*, VOL. 23, TC5010, doi:10.1029/2003TC001529.

# Investigation on Stream Displacements Along Parts of the Doruneh Fault

H. Amini <sup>1\*</sup>, M. Fattahi <sup>2</sup> & M. R. Ghassemi <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Institute of Seismology, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, Tehran University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2010 June 16

Accepted: 2012 March 05

## Abstract

The Doruneh fault is the second longest fault systems in Iran. This fault is 700 km long and extended from the Afghanistan-Iran border to the central Iran desert. Despite of its length, and position in the convergence zone between the Arabian and Eurasian plates and its seismic potential, only one historical earthquake ( $M>7$ ) and two instrumental ( $M>6$ ) earthquakes are recorded on this fault. Therefore, study of this fault is very important for evaluation of its seismic hazard. In our study, we used the Landsat images, aerial photographs, topography maps, geological maps and field work data to identify and estimate the amount of displacements of rivers, rock units, and some alluvial fans along this fault. Three branches of the Doruneh fault investigated in this study, named as the north, middle and south branches according to their geographical locations. This study demonstrates that both of the maximum and minimum fault displacements have occurred on the southern branch. Furthermore, the amount of displacements of the rivers, which have cut the alluvial fans during the Quaternary period, suggests that this branch, particularly between  $57^{\circ}00'$  and  $58^{\circ}50'E$ , is more active than the other branches. Although, several slip rates were previously determined using different methods for some parts of this fault by the authors and other researchers, we suggest further dating and geodetic methods in the same regions and other part of the fault to estimate and compare the slip rate of different branches of this important fault.

**Keywords:** Doruneh fault, Displacement, Slip rate, OSL.

For Persian Version see pages 209 to 218

\*Corresponding author: H. Amini; E-mail: [hiamini@ut.ac.ir](mailto:hiamini@ut.ac.ir)