

رابطه‌ی جابجایی و طول گسل به روش مقیاس‌بندی توان- قانون در بخش مرکزی تاقدیس سبزپوشان

کورس یزدجردی^۱، سیدکامل مسینی*^۲، قدرت‌اله فرهودی^۱ و عبدالمسین جاهدی^۳

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز، Skamelhosseini@gmail.com

(۲) گروه آمار و ریاضی، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی شیراز

(*) عهده‌دار مکاتبات

تاریخ دریافت: ۸۷/۷/۱۳؛ تاریخ دریافت اصلاح شده: ۸۸/۱۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۱/۲۰

چکیده

به منظور بررسی مقدار جابجایی و طول گسل و همچنین فواصل گسلی با توجه به روش مقیاس‌بندی توان- قانون (Power-law scaling). بخش مرکزی تاقدیس سبزپوشان مورد مطالعه قرار گرفت. برای دستیابی به نتایج بهتر، با توجه به متفاوت بودن وضعیت واتنش در کل منطقه، آن را به دو ناحیه‌ی جدا از هم تقسیم کرده (۱ و ۲) و در هر ناحیه، نمودار گل‌سرخ‌ی مربوط به گسل‌ها ترسیم گردید، سپس با توجه به جهت‌یافتگی گسل‌ها، پیمایش‌هایی در سراسر منطقه انجام گرفت. در این تحقیق ۲۱ پیمایش به طول ۵۳/۷۶۵ کیلومتر انجام گردید و در کل این مسیرها ۲۰۹ گسل همراه با مشخصات آن برداشت شد، که در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: تاقدیس سبزپوشان، مقیاس‌بندی توان- قانون، جمعیت گسل، گسترش گسل.

۱- مقدمه

فراهم می‌کند، که در برآورد گسل‌های Sub-Seismic (مربوط به داده‌های لرزه‌ای) برای ویژگی‌های مخازن نفتی کاربرد دارد (Watterson et al. 1996).

پس این مطالعات در ارزیابی خطرات لرزه‌ای، اکتشاف نفت و گاز، آب‌شناسی و همچنین در جلوگیری از اتلاف ذخایر موجود، مفید واقع می‌شود. برای پی‌بردن به این موضوع، این روابط را با استفاده از رابطه-ی توان- قانون مورد بررسی قرار می‌دهند.

پژوهش‌های پژوهش‌های بسیاری نشان می‌دهد، که جمعیت گسلی از رابطه‌ی توان- قانون تبعیت می‌کند (Manzocchi et al. 2009, Curewitz et al. 2010).

$$N = Cr^{-D}$$

N رتبه‌ی عددی هر گسل، که بر اساس پارامتر بزرگی (F) مرتب شده D بعد فرکتالی (هندسی) و C ثابت تناسب می‌باشد.
با رسم نمودارهای مختلف لگاریتمی، مقادیر D (شیب نمودار) و $\log C$ (عرض از مبدأ) قابل محاسبه می‌باشند.

بیش از یک دهه است، که پژوهش‌های قابل ملاحظه‌ای برای پیدا کردن عامل‌های مختلف کنترل‌کننده‌ی قوانین مقیاس‌بندی (scaling laws) انجام شده است (Billi 2007, Manzocchi et al. 2009). در واقع پیدا کردن ارتباط بین طول و بیشترین جابجایی و روابط توزیع اندازه، بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Curewitz et al 2010, Schlagenhauf et al. 2008) چون:

- امکان تحلیل کمی گسترش و تاریخچه‌ی لغزش گسل‌ها، یعنی مراحل رشد و تکامل سیستم‌های گسلی را فراهم می‌کند (Ackermann et al. 2001, Soliva & Benedicto 2005).
- محدودیت‌هایی را که برای برآورد دگرشکلی در پوسته‌ی بالایی وجود دارد، از بین می‌برد (Scholz & Cowie 1990).
- امکان برآورد ابعاد گسلی و پیوستگی بین آن‌ها را فراهم می‌کند (Hardacare & Cowie 2003).
- امکان پیش‌بینی ویژگی گسل‌ها را در خارج از محدوده‌ی داده‌ها

هندسی برای فرآیندهای فیزیکی و رشد گسل کوشش شده است. در این برداشت‌ها بیشترین مقدار جابجایی برابر با ۱۵۶ متر است، که مربوط به طویل‌ترین گسل برداشت شده در منطقه با طول ۳۳۲۰ متر می‌باشد. و کمترین مقدار جابجایی برابر با ۰/۰۵ متر و طول کوتاه‌ترین گسل برداشت شده برابر با ۱/۳۶ متر می‌باشد.

۱-۳- عوامل مؤثر بر مقدار جابجایی گسل

کاوای و شولز (Cowie & Scholz 1992-a) بیان کردند، که عامل تکنونیک و لیتولوژی در مقدار C (ثابت تناسب) تأثیرگذار می‌باشد، بنابراین نمی‌توان داده‌های مربوط به نقاط مختلف را با هم بررسی کرد، ولی با این حال مطالعات گسترده‌ای که در سراسر جهان بر روی گسل‌ها انجام شده، بیانگر یک رابطه‌ی خطی بین جابجایی و طول می‌باشد، درحالی‌که مقدار C تعیین شده بین ۱ تا ۰/۰۰۱ متغیر می‌باشد. مقدار جابجایی در طول سطح گسل متفاوت می‌باشد (Barnett et al. 1987, Kim & Sanderson 2005). و در دو انتهای آن، مقدار جابجایی تقریباً صفر و معمولاً با نزدیک شدن به مرکز، مقدار آن به بیشترین حد خود می‌رسد، بنابراین بسته به این‌که پیمایش کدام قسمت از گسل را قطع کرده باشد، مقدار جابجایی متفاوت می‌باشد (تصویر ۳). تجزیه و تحلیل درمورد این نوع داده‌ها در نقاط مختلف جهان قابل بحث می‌باشد و به‌وسیله‌ی محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است.

بنابراین تجزیه و تحلیل درمورد این نوع داده‌ها در نقاط مختلف جهان قابل بحث می‌باشد و به‌وسیله‌ی محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۳- عوامل مؤثر در اندازه‌گیری طول گسل

کیم و ساندرسن (Kim & Sanderson 2005) در این مورد به چند نکته اشاره کردند، که عبارتند از:

- موقعیت و جهت اندازه‌گیری طول گسل
 - مشخص نبودن انتهای واقعی گسل، مخصوصاً گسل‌هایی که جابجایی کمتری دارند.
 - محاسبه یا عدم محاسبه‌ی مناطق آسیب‌دیده (Damage zones) به‌عنوان طول گسل.
 - طول گسل معمولاً به دو روش تعیین می‌گردد (Kim & Sanderson 2005):
 - مقدار اندازه‌گیری شده در جهت بردار لغزش را طول و عمود بر آن را پهنای گسل می‌دانند.
- در این پژوهش روش دوم مورد استفاده قرار گرفت.

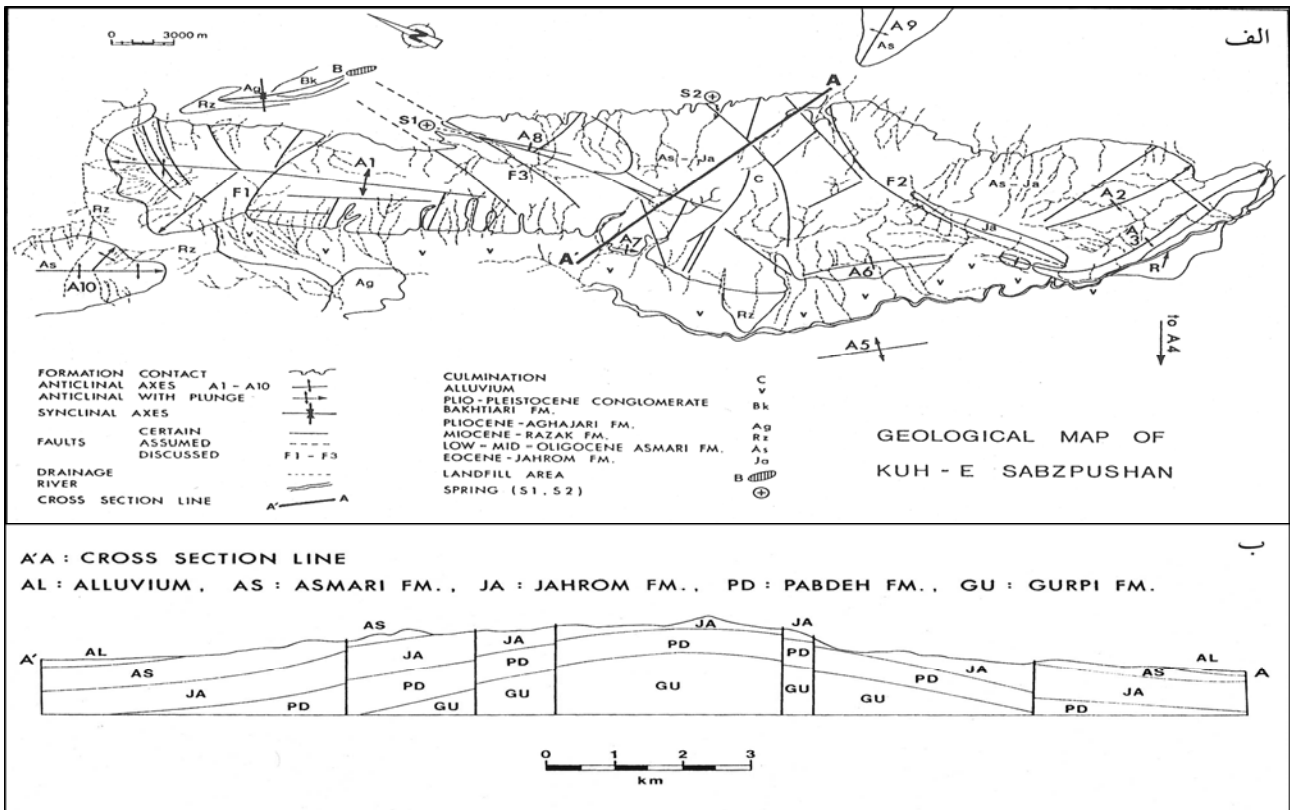
به‌علت پیچیدگی ذاتی گسل، در مورد روابط مقیاس‌بندی گسل‌ها اتفاق نظر وجود ندارد، که بیشتر به‌خاطر تفاوت در مقدار جابجایی و طول گسل در بین دسته‌های مختلف گسل‌ها می‌باشد (Cowie & Scholz 1992-b, Gillespie et al. 1992). در مورد رشد و توسعه‌ی گسل مدل‌های گوناگونی وجود دارد، که به آن اشاره خواهد شد.

۲- معرفی منطقه

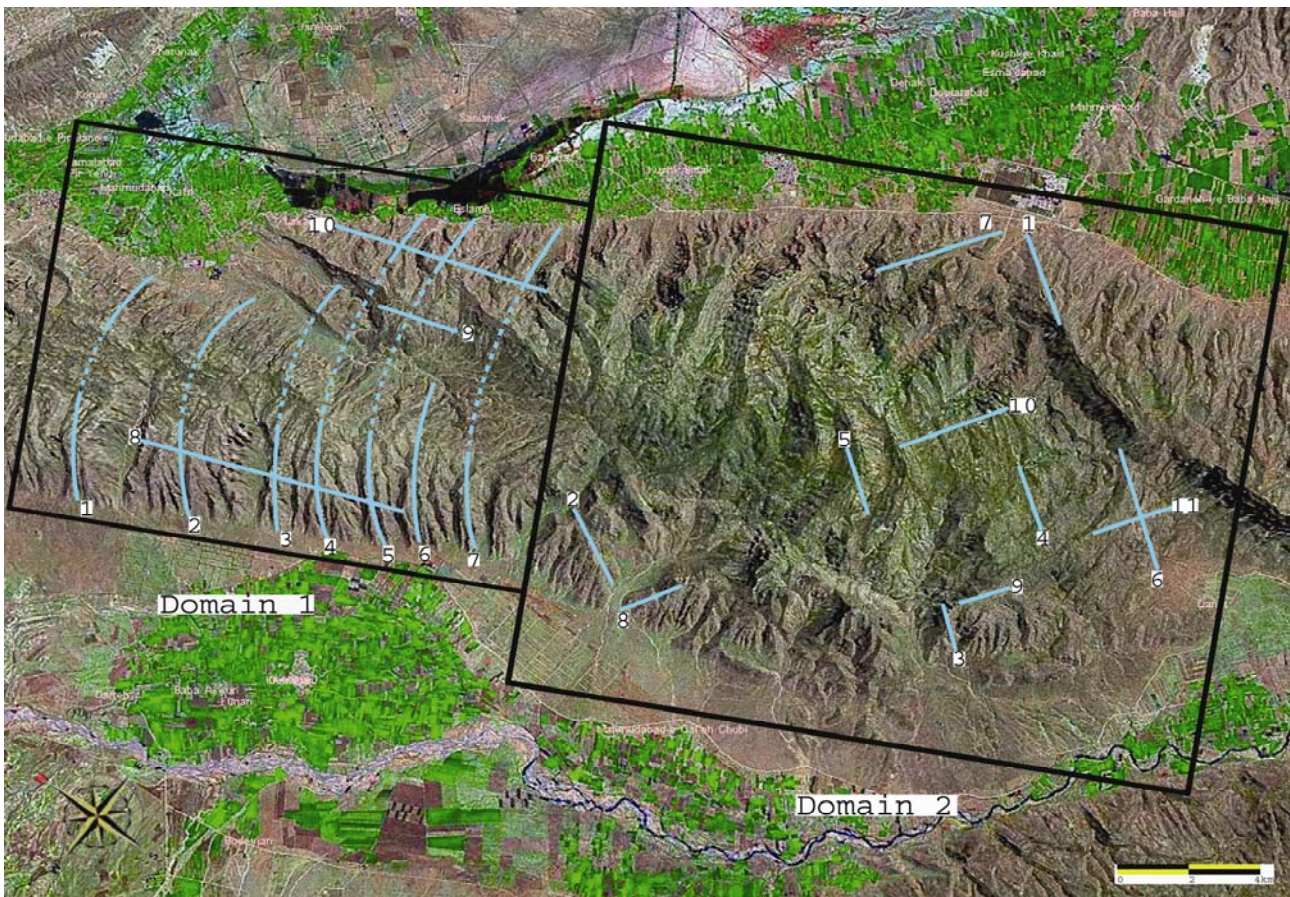
منطقه‌ی مورد مطالعه با طول جغرافیایی $25^{\circ} 52'$ تا $36^{\circ} 52'$ خاوری و عرض جغرافیایی $15^{\circ} 29'$ تا $30^{\circ} 29'$ شمالی، بخشی از کوه سبزپوشان می‌باشد، که با ۵۵ کیلومتر طول، جزء زاگرس چین‌خورده و در جنوب باختری شیراز واقع شده است. رخنمون‌های موجود شامل سازند دولومیتی جهرم با سن انوسن در هسته‌ی تاقدیس و در زیر آن سازند مارنی پابده با سن پالئوسن و بر روی آن ابتدا سازند آهکی آسماری با سن الیگوسن و میوسن پایینی و سپس سازند شنی، مارنی و تبخیری رازک و سازند آغاچاری و بختیاری می‌باشد. کوه سبزپوشان یک تاقدیس مرکب، متشکل از ۶ تاقدیس می‌باشد، که غالب آن‌ها در بخش جنوب خاوری آن واقع شده است (تصویر ۱). بخش‌های مختلف این تاقدیس دچار چرخش شده است و تنها انتهای شمال باختری تاقدیس سبزپوشان از روند واقعی زاگرس تبعیت می‌کند. قسمت مرکزی این تاقدیس، شکسته، عریض و به شکل یک گنبد بالا آمده است، که در واقع محل تشدید فعالیت تکنونیک می‌باشد. بعضی از پژوهشگران بر این عقیده هستند، که این فشار به‌خاطر بالا آمدن گنبد نمکی می‌باشد ولی اگر این فرضیه درست می‌بود، باید فشار در همه‌ی جهات به‌طور یکنواخت توزیع می‌شد. علاوه بر این ۳۰۰۰ متر حفاری توسط شرکت Deminex در سال ۱۹۷۵ برای اکتشاف نفت انجام شد، ولی به هیچ‌گونه نمکی برخورد نکردند (Farhoudi & Poll 1992).

۳- جمع‌آوری و تفسیر داده‌ها

با توجه به بررسی‌های آزمایشگاهی و صحرایی، پیمایش‌هایی به شکل عمود بر هم و به‌طور موازی (حالت شبکه‌ای) در فواصل تقریباً یکسان در هر منطقه از دو منطقه‌ی موجود و به‌طور جداگانه انجام گرفت (تصویر ۲) و مشخصات هر گسل: مقدار جابجایی، طول، مختصات فضایی و فواصل گسل‌ها از یکدیگر برداشت شد. برای انجام محاسبات و تجزیه و تحلیل، از نرم افزارهای Excel و SPSS (spss 15.0 for windows evaluation version) استفاده گردید و با ترسیم نمودارهای مختلف در جهت توسعه‌ی یک مدل

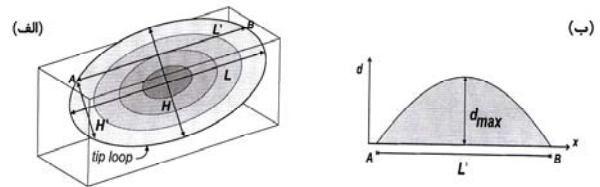


تصویر ۱- الف) نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه و گسل‌های اصلی با توجه به مطالعه‌ی عکس‌های هوایی و عملیات صحرایی (ب) برش عرضی در راستای نقطه A - A' تاقدیس سبزپوشان (Farhoudi & Poll 1992).



تصویر ۲- تصویر ماهواره‌ای منطقه‌ی مورد مطالعه و مسیرهای پیمایش در آن

یعنی نرمال و معکوس می‌باشد و علت این است، که طول گسل در جهت موازی با سمت لغزش اندازه‌گیری شده است. همچنین گفته شده که نسبت بیشترین جابجایی به طول، وابسته به اندازه‌ی گسل، متفاوت می‌باشد و با بزرگ‌تر شدن گسل، این نسبت نیز بزرگتر می‌شود (Clark & Cox 1996, Kim & Sanderson 2005) (تصویر ۴).



تصویر ۳- الف) طرحی برای نشان دادن توزیع جابجایی بر روی یک سطح گسل بیضوی، متشکل از L (طول گسل: طول‌ترین بعد افقی یا تقریباً افقی در امتداد صفحه گسلی)، L' (طول خط اثر گسل: طول گسل رخنمون شده بر روی سطح افقی اختیاری)، H (ارتفاع گسل: طول‌ترین بعد صفحه گسلی اندازه‌گیری شده در برش عرضی عمود بر امتداد گسل، H' (ارتفاع خط اثر گسل: طول رخنمون شده در مقطع عرضی). افزایش جابجایی به سمت مرکز گسل با افزایش تیرگی رنگ نشان داده شده است. گسل سطح بالای بلوک را در امتداد خط A-B قطع کرده است. ب) نمودار جابجایی (d) - فاصله (x) در امتداد خط اثر گسل (A - B) (Kim & Sanderson 2005).

۳-۴- مدل رشد و توسعه‌ی گسل‌ها

۳-۴-۱- گسیختگی بر اثر زمین لرزه و رویداد لغزش

گسل در واقع یک سطح صاف ممتد با جابجایی‌های ناپیوسته می‌باشد، که با افزایش مقدار لغزش، مدام بزرگ‌تر می‌شود (Cowie & Scholz 1992-a, Cowie & Scholz 1992-b, Kim & Sanderson 2005).

۳-۳- روابط بین جابجایی و طول گسل‌ها

روابط کلی بین بیشترین جابجایی (d_{max}) و طول گسل (L) به شکل زیر بیان می‌شود:

$$d_{max} = CL^n$$

n همان مؤلفه‌ی توان- قانون (Power law exponent) و C ثابت تناسب می‌باشد. مقدار n در تحقیقات مختلف بین ۰/۵ تا ۲ محاسبه شده است (Kim & Sanderson 2005).

۳-۴-۲- رشد و توسعه‌ی گسل همراه با اتصال قطعه‌های

منصربه‌فرد

اتصال بخش‌های گسل، یک ساز و کار مهم در زمینه‌ی گسترش گسل می‌باشد، که در سه مرحله قابل تشخیص است (Peacock & Sanderson 1991) (تصویر ۵).

۱- مرحله‌ی گسل‌های مجزاً (Isolated Faults): در واقع این گسل‌های جدا از هم می‌توانند به سمت یکدیگر گسترش پیدا کنند و در نهایت انتهای آن‌ها بر یکدیگر تأثیرگذار می‌باشد.

۲- مرحله‌ی اتصال نرم (Soft Linkage): در این مرحله گسل‌ها به سمت یکدیگر گسترش می‌یابند، ولی هیچ ارتباط مشخصی بین آن‌ها وجود ندارد.

۳- مرحله‌ی اتصال سخت (Hard Linkage): در این مرحله پهنه‌ی ریلی (Relay zone) شکسته می‌شود و اتصال بین بخش‌ها به وجود می‌آید.

مقدار n مهم می‌باشد، یعنی $n=1$ نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی خطی قانون مقیاس‌بندی و $n \neq 1$ نشان‌دهنده‌ی این است، که با تغییر در طول گسل، جابجایی‌ها به نسبت متفاوت تغییر می‌کند. عامل‌های مختلفی کنترل‌کننده‌ی نسبت بیشترین جابجایی به طول گسل (d_{max}/l) هستند، که از آن جمله می‌توان به جنس مواد، نوع گسل (موقعیت و جهت اندازه‌گیری)، گسیختگی بر اثر زمین لرزه و تاریخچه‌ی گسترش گسل یا لغزش‌ها، تکامل گسل (قطعه‌بندی و اتصال) و در نهایت به فعالیت دوباره‌ی گسل‌ها اشاره کرد (Kim & Sanderson 2005).

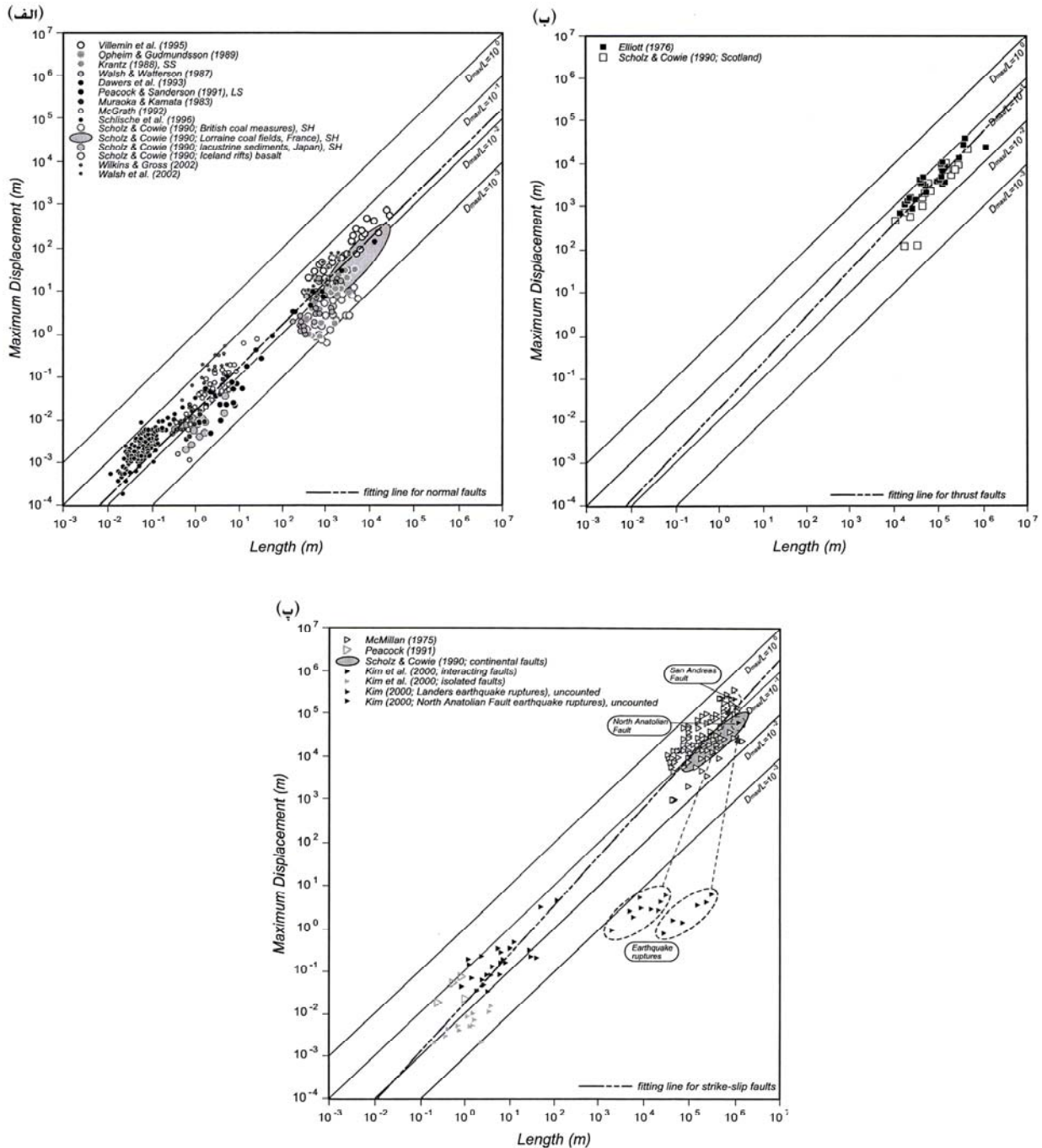
۳-۴-۳- فرآیند رشد و توسعه در یک گسل

گسترش گسل همراه با لغزش‌های متوالی اغلب با زمین لرزه‌هایی همراه می‌باشد، که ممکن است با افزایش جابجایی یا طول رخ دهد (Cowie & Scholz 1992-a, Cowie & Scholz 1992-b, Kim & Sanderson 2005).

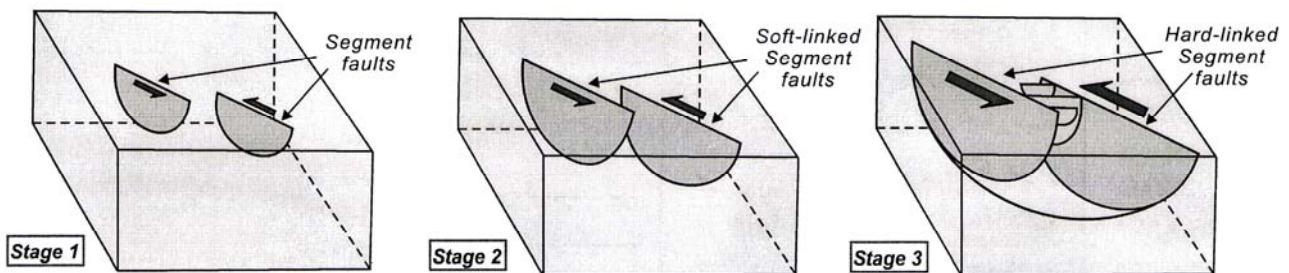
همچنان‌که یک گسل توسعه پیدا می‌کند، این لغزش‌ها ممکن است در یک بخش یا در همه بخش‌های گسل اتفاق بیفتد، پس همه‌ی آن‌ها باعث افزایش کلی طول سیستم گسلی نمی‌شود. مدل‌های مختلف رشد و توسعه‌ی گسل در تصویر ۶ مشخص می‌باشد.

کاوی و شولز (Cowie & Scholz 1992-a) پیشنهاد دادند، در مناطقی که $n=1$ می‌باشد، شکل‌گیری گسل به‌وسیله‌ی ساز و کار مکانیک شکستگی‌ها با بخش باقیمانده می‌باشد، ولی در صورتی که $n \neq 1$ باشد، شکل‌گیری گسل ممکن است به‌وسیله‌ی مکانیک‌های مختلف از لحاظ کیفی کنترل شوند. به‌عنوان مثال داده‌های به‌دست آمده از شکستگی‌های سطحی در جریان گدازه ممکن است، تحت تأثیر انقباض گرمایی (از بین رفتن حالت کشسان مواد) دچار انحرافات شوند.

در مقایسه‌ی بین انواع گسل‌ها مشخص گردید، که نسبت بیشترین جابجایی به طول در گسل‌های راست‌الغز بیشتر از گسل‌های شیب‌لغز



تصویر ۴- نمودار بیشترین جایجایی (dmax) در برابر طول گسل (L). الف) گسل‌های نرمال: SS: ماسه سنگ، LS: سنگ آهک، SH: شیل. ب) گسل‌های رانده. پ) گسل‌های راستا لغز (Kim & Sanderson 2005).



تصویر ۵- قطعه‌بندی و اتصال یک گسل راستالغز در مراحل مختلف گسترش گسل (Kim & Sanderson 2005).

۱۳-۱۴- بازفعال‌سازی معکوس (Reverse reactivation)

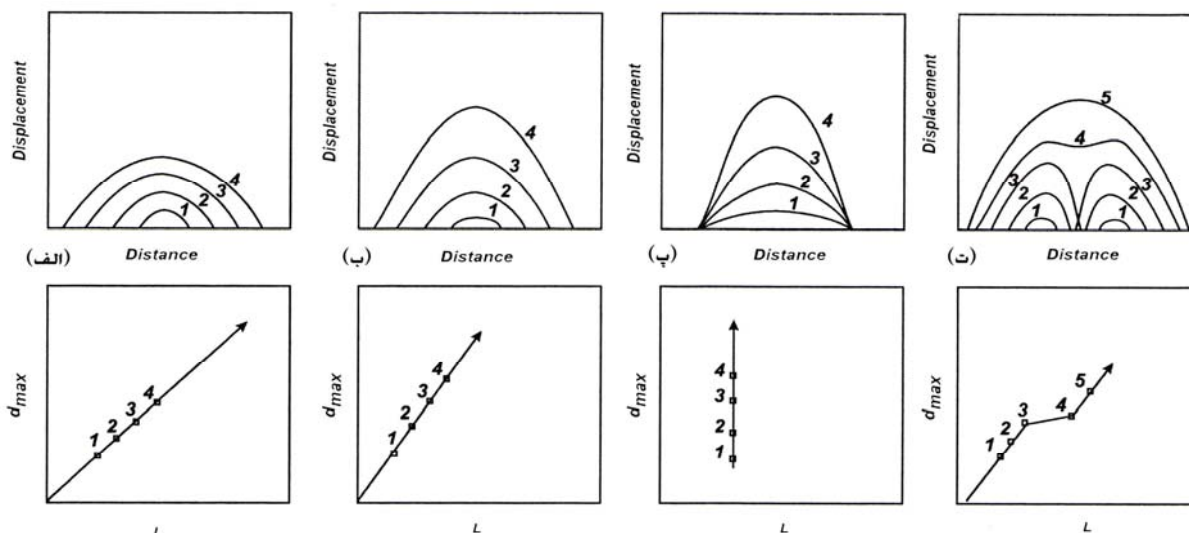
بعضی از گسل‌ها در پاسخ به معکوس شدن رژیم تکتونیکی، حرکتی در خلاف جهت لغزش از خود نشان می‌دهند، که باعث کم شدن نسبت بیشترین جابجایی به طول می‌شود، زیرا طول گسل ممکن است افزایش پیدا کند، درحالی‌که برآیند میزان جابجایی کاهش پیدا می‌کند (Kim et al. 2001).

۱۴- واکاوی گسل‌ها

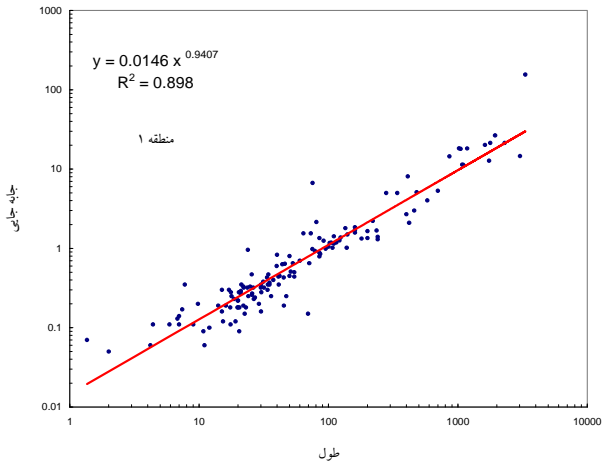
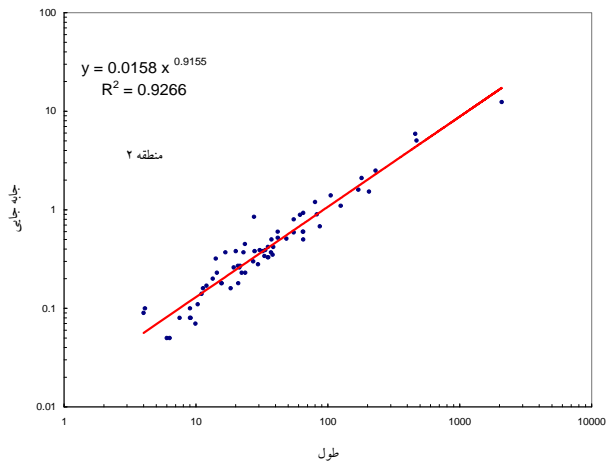
به‌طور کلی گسل‌های برداشت شده در منطقه، بیشتر راستای شمال خاوری و شمال شمال خاوری را نشان می‌دهد و اکثر شیب آن‌ها در جهت جنوب خاوری و به مقدار کمتر، در جهت شمال باختری می‌باشد. در منطقه‌ی ۱ با $37064/5$ متر پیمایش، 142 گسل با میانگین شیب $74/2^\circ$ و در منطقه‌ی ۲ با $16700/5$ متر پیمایش، 67 گسل با میانگین شیب $73/2^\circ$ برداشت شد. میانگین شیب لایه‌ی محاسبه شده در منطقه‌ی ۱ برابر با $20/5^\circ$ و در منطقه‌ی ۲ برابر با $16/1^\circ$ می‌باشد.

۱۴-۱- ارتباط بین طول و جابجایی گسل‌ها

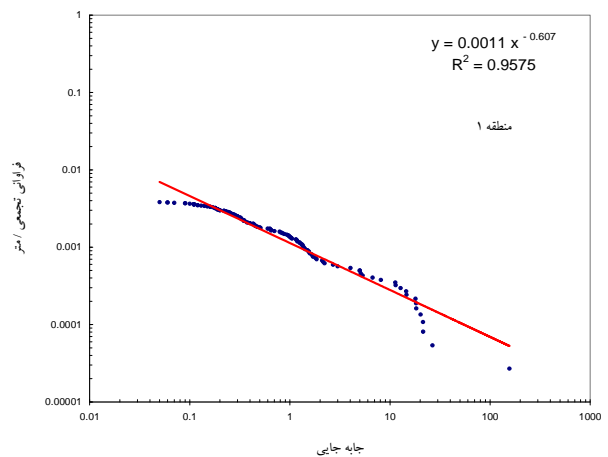
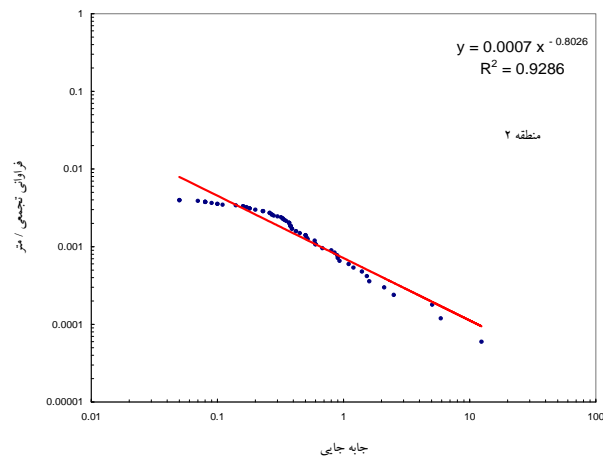
با توجه به این‌که هر گسل (داده‌های برداشت شده)، طول و جابجایی منحصر به فرد دارد، امکان ارزیابی کمی جمعیت اندازه‌ی گسل‌ها را فراهم می‌کند، که در تصویر ۷ آمده است. البته برای کم کردن خطا و برای این‌که نمودار، توزیع صحیحی از جمعیت گسلی را نشان دهد (Poulimenos 2000)، داده‌های مربوط به پیمایش‌های مختلف در هر منطقه، بررسی شده است.



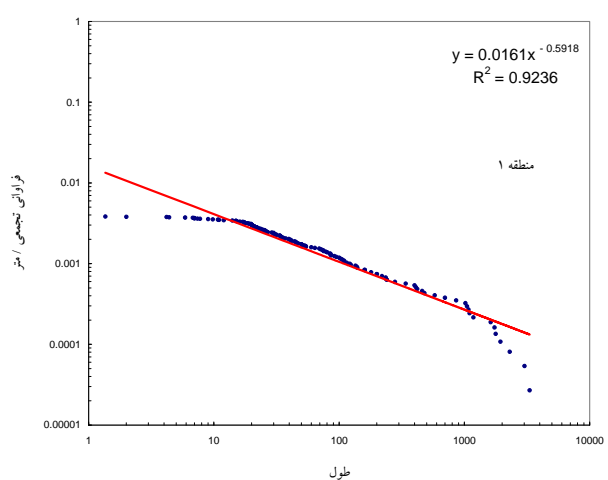
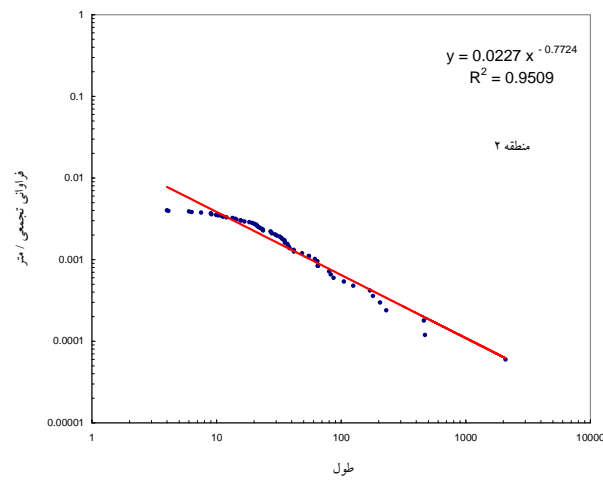
تصویر ۶- (الف): نسبت بیشترین جابجایی به طول، ثابت می‌باشد که در واقع برای گسل‌های کوچک و مجزاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. (ب): نسبت بیشترین جابجایی به طول، یک مقدار افزایشی را نشان می‌دهد که همراه با گسترش گسل اتفاق می‌افتد. (پ): مدل طول ثابت، که در مرحله‌ی اول توسعه خیلی سریع طول افزایش پیدا می‌کند ولی در ادامه با افزایش جابجایی طول تغییر نمی‌کند (Walsh et al. 2002) (ت): مدل اتصال گسل‌ها، در مراحل اول، توسعه و رشد گسل در یک گسل مجزاً اتفاق می‌افتد و در ادامه با اتصال به همدیگر موجب افزایش طول گسل می‌شود (Kim & Sanderson 2005).



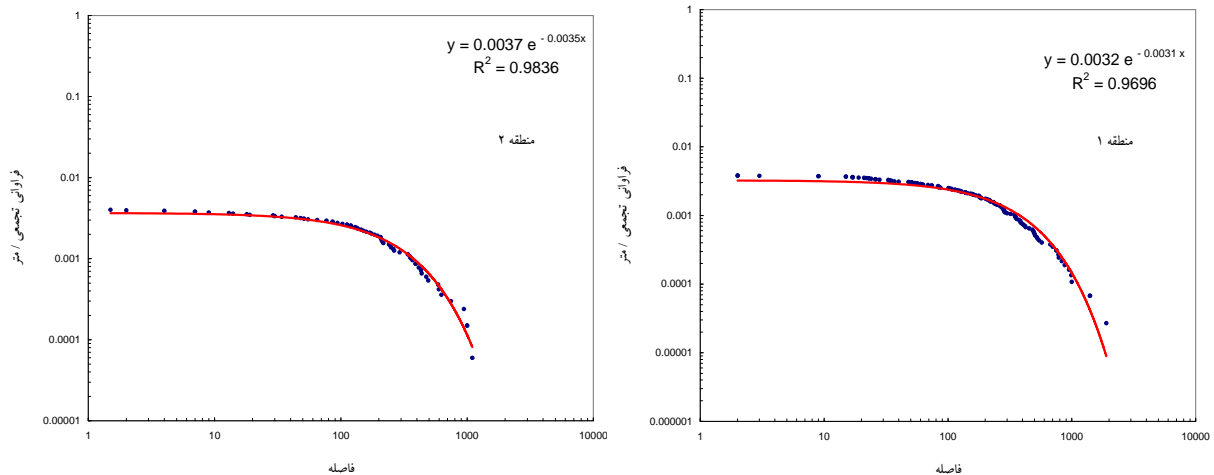
تصویر ۷- نمودارهای لگاریتمی جابجایی- طول مربوط به جمعیت‌های گسلی منطقه‌ی ۱ و ۲



تصویر ۸- نمودارهای لگاریتمی جابجایی- متر / فراوانی تجمعی مربوط به جمعیت‌های گسلی در منطقه‌ی ۱ و ۲



تصویر ۹- نمودارهای لگاریتمی طول- متر / فراوانی تجمعی مربوط به جمعیت‌های گسلی در منطقه‌ی ۱ و ۲



تصویر ۱۰- نمودارهای لگاریتمی فاصله- متر/ فراوانی تجمعی مربوط به جمعیت‌های گسلی منطقه‌ی ۱ و ۲

۳- بخش پایینی نمودار که پر شیب‌تر شده است، این انحراف ناشی از عملکرد گسل‌های بزرگ می‌باشد که در منطقه اتفاق افتاده است، ولی در خارج از محدوده‌ی مورد مطالعه، ادامه دارد. وجود انحراف در دو سر نمودارها، کار برآورد در مورد اندازه‌ی داده‌های گسلی را تا اندازه‌ای با خطا مواجه می‌سازد.

نمودارهای تصویر ۸ و ۹ ضریب همبستگی به نسبت بالایی را نشان می‌دهند و معادلات مربوط به هر یک از متغیرها در تصویر آمده است. برای پی بردن به هندسه‌ی شکستگی‌ها، نمودار مربوط به فواصل گسلی (فاصله‌ی هر گسل تا گسل بعدی در مسیر پیمایش) ترسیم گردید (تصویر ۱۰) و با بررسی آن‌ها مشخص گردید، که تابع تغییرات در هر نمودار، از یک خانواده و نمایی هستند و در واقع شکستگی‌هایی که فاصله‌ی آن‌ها کم می‌باشد (فاصله‌های کمتر از ۳۲۲ متر در منطقه‌ی ۱ و فاصله‌های کمتر از ۲۸۵ متر در منطقه‌ی ۲) دارای فراوانی بیشتری هستند. پس با افزایش پارامتر نمایی در معادله، میانگین فاصله‌ی شکستگی‌ها کم می‌شود و خوشه‌های نزدیک به هم (Tighter Clusters) تشکیل را می‌دهد.

مراجع

Ackermann, R. V., Schlische, R. W. & Withjack, M. O., 2001, "The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws", *Journal of Structural Geology*, Vol. 23 (11): 1803-1819.

Barnett, J. A. M., Mortimer, J., Rippon, J. H., Walsh, J. J. & Watterson, J., 1987, "Displacement Geometry in the volume containing a single normal fault", *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol. 71 (8): 925-937.

لگاریتمی- لگاریتمی (Log-log plot) متر/ فراوانی تجمعی (با توجه به این‌که طول مسیرهای پیمایش متفاوت می‌باشد، برای یکنواخت کردن داده‌ها، فراوانی تجمعی بر طول مسیر پیمایش تقسیم گردیده است) در مقابل دیگر متغیرها: جابجایی (تصویر ۸)، طول (تصویر ۹) و فاصله (تصویر ۱۰) ترسیم گردید.

۵- نتیجه‌گیری

مدل موجود، رابطه‌ی توان- قانون خطی بین طول و جابجایی با ضریب همبستگی به نسبت بالا، در هر دو منطقه را نشان می‌دهد و الگوی تقریباً یکسانی دارند. با دقت بیشتر در نمودارها، مخصوصاً منطقه‌ی ۱ (تصویر ۷)، ناهماهنگی‌هایی بین داده‌ها مشاهده می‌شود، که ناشی از عوامل مختلف، از قبیل حضور چند گسل که به نظر می‌رسد در خارج از محدوده‌ی مورد مطالعه ادامه داشته باشد، همچنین با وجود این‌که رژیم زمین‌ساختی اصلی حاکم بر منطقه یکسان می‌باشد، ولی تنش‌های محلی حاصل از برهم کنش بخش‌های مختلف گسلی، انحرافات را در ارتباط بین این متغیرها، ایجاد خواهد کرد. البته به این نکته نیز باید توجه داشت، که همیشه بیشترین مقدار طول و جابجایی اندازه‌گیری نشده است.

با بررسی بیشتر هر یک از این نمودارهای لگاریتمی دیده می‌شود، که همه‌ی آن‌ها از ۳ بخش تشکیل شده‌اند:

۱- بخش بالایی نمودار که دارای شیب کمتری است، این انحراف در نتیجه‌ی نمونه‌برداری ناقص از جمعیت گسلی می‌باشد، که بیشتر در مورد گسل‌های کوچک اتفاق افتاده است.

۲- بخش مرکزی نمودار که حالت خطی دارد و بیانگر توزیع توان- قانون داده‌ها و مقدار شیب آن بیانگر مؤلفه‌ی توان می‌باشد.

- Schlagenhauf, A., Manighetti, I., Malavieille, J. & Dominguez, S., 2008**, "Incremental growth of normal faults: Insights from a laser-equipped analog experiment", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 273 (3-4): 299-311.
- Scholz, C. H. & Cowie, P. A., 1990**, "Determination of total strain from faulting using slip measurements", *Nature* Vol. 346: 837-839.
- Soliva, R. & Benedicto, A. 2005**, "Geometry, scaling relations and spacing of vertically restricted normal faults", *Journal of structural Geology*, Vol. 27 (2): 317-325.
- Walsh, J. J., Nicol, A. & Childs, C. 2002**, "An alternative model for the growth of faults", *Journal of Structural Geology*, Vol. 24 (11): 1669-1675.
- Watterson, J., Walsh, J. J., Gillespie, P. A., & Easton, S., 1996**, "Scaling systematics of fault sizes on a large-scale range fault map", *Journal of Structural Geology*, Vol. 18 (2-3): 199-214.
- Billi, A., 2007**, "On the extent of size range and power law scaling for particles of natural carbonate fault cores", *Journal of Structural Geology*, Vol. 29 (9): 1512-1521.
- Clark, R. M. & Cox, S. J. D., 1996**, "A modern regression approach to determining fault displacement-length scaling relationships", *Journal of Structural Geology*, Vol. 18 (2-3): 147- 152.
- Cowie, P. A. & Scholz, C. H., 1992-a**, "Physical explanation for the displacement-length relationship of faults using a post-yield fracture mechanics model", *Journal of Structural Geology*, Vol. 14(10): 1133-1148.
- Cowie, P. A. & Scholz, C. H., 1992-b**, "Displacement-length scaling relationship for faults: data synthesis and discussion", *Journal of Structural Geology*, Vol. 14 (10): 1149-1156.
- Curewitz, D., Okino, K., Asada, M., Baranov, B., Gusev, E. & Tamaki, K., 2010**, "Structural analysis of fault populations along the oblique, ultra-slow spreading Knipovich Ridge, North Atlantic Ocean, 74°30'N-77°50'N", *Journal of Structural Geology*, Vol. 32 (6): 727-740.
- Farhudi, G. & Poll, K., 1992**, "A morphotectonic study of environmental impact on ground water in Southern Iran and under the Persian Gulf ", *Geologische Rundschau*, Vol. 81 (2): 581-587.
- Gillespie, P. A., Walsh, J. J. & Watterson, J., 1992**, "Limitations of dimension and displacement data from single faults and the consequences for data analysis and interpretation", *Journal of Structural Geology*, Vol. 14 (10): 1157-1172.
- Hardacre, K. M. & Cowie, P. A., 2003**, "Variability in fault size scaling due to rock strength heterogeneity: a finite element investigation", *Journal of Structural Geology*, Vol. 25 (10): 1735-1750.
- Kim, Y. -S., Andrews, J. R. & Sanderson, D. J., 2001**, "Reactivated strike-slip faults: examples from north Cornwall, UK", *Tectonophysics* Vol. 340 (3-4): 173-194.
- Kim, Y. -S. & Sanderson, D. J., 2005**, "The relationship between displacement and length of faults: a review", *Journal of Earth - Science Reviews*, Vol. 68 (3-4): 317-334.
- Manzocchi, T., Walsh, J. J. & Bailey, W. R., 2009**, "Population scaling biases in map samples of power-law fault systems", *Journal of Structural Geology*, Vol. 31 (12): 1612-1626.
- Peacock, D. C. P. & Sanderson, D. J., 1991**, "Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones", *Journal of Structural Geology*, Vol. 13 (6): 721-733.
- Pickering, G., Bull, J. M. & Sanderson, D., J., 1995**, "Sampling power-law distributions", *Tectonophysics*, Vol. 248 (1-2): 1-20.
- Poulimenos, G., 2000**, "Scaling properties of normal fault populations in the western Corinth graben, Greece: implications for fault growth in large strain settings", *Journal of Structural Geology*, Vol. 22(3): 307-322.