Archive of SID

مهاجرت گسل در پهنه‌های گسلی امتدادلغز؛
مطالعه موردی: پهنه گسلی فعال اردکول – خاور ایران

نوشته: سید سعیدالرضا اسلامی* و دکتر محمد مهدی خطیب *

Fault Migration in Strike-Slip Fault Zones:
A Case Study of Ardekul Active Fault Zone – Eastern Iran

By: S. S. Eslami* & Dr. M. M. Khatib**

چکیده

مهاجرت گسل پدیده‌ای مهم در پهنه‌های گسلی است که نه تنها تا کنون درک لازم از آن به دست نیامده، بلکه تعریف ارائه شده از این پدیده نیز ناقص است. در این مقاله، بر اساس شواهد حاصل از پهنه امتدادلغز فعال اردکول، سیری برای تکامل پهنه گسلی امتدادلغز تبیین شده که بر اساس آن، چهار مرحله جنینی، جوانی، بلوغ و پیری برای پهنه امتدادلغز تعریف شده است. سیر پیشنهادی را می‌توان در مورد رفتار شکنای یک پهنه در مقیاسهای مختلف زمین‌شناسی ساختاری نیز صادق دانست. سپس پدیده مهاجرت گسل در روند آن سیر تکاملی، تعریف و تعقیب شده است. به این ترتیب، براساس شناخت حاصل از مهاجرت گسل، پهنه اردکول به طور موردی مطالعه و نتایج آن ارائه شده است. براساس نتایج این تحقیق، مهاجرت گسل در دو مرتبه نخستین و پسین قابل طرح است که جزئیات مربوط به مهاجرت نخستین نیز اعم از زمان وقوع، انواع و مراحل دوگانه، مقیاسها، عوامل مؤثر، ساز و کارها و ویژگیهای مهاجرت نخستین جزو نتایج حاصل است. همچنین مهاجرت پسین از دیدگاه مهاجرت نخستین مورد بررسی کلی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مهاجرت گسل در پهنه‌های امتدادلغز به طور جامع در دو مقوله تولید محور و توسعه محور تبیین می‌شود. شواهد آزمایشگاهی گل رس نیز دو نوع مهاجرت گسلی نخستین و پسین را نشان می‌دهند.

کلید واژه‌ها: مهاجرت، گسل امتدادلغز، دگرشکلی لرزه‌ای، دگرشکلی شکنا، ایران

Abstract

Fault migration, an important phenomenon in fault-zones, is neither fully investigated nor defined comprehensively. In this paper, based on observations on Ardekul active fault zone (Eastern Iran), an evolutionary path is considered for strike-slip fault zone. According to this evolutionary path four stages; namely embryonic, youth, maturity and declining have been recognized. This evolutionary path may be generalized over different scales of brittle deformation. The proposed evolutionary path makes the fault migration clear. A case study of Ardekul fault zone is chosen for applying defined fault zone evolution and fault migration. Based on the results, fault migration can be divided into two grades; first, the prior and second, the posterior fault migration. Details of prior migration are distinguished including time of occurrence, stages, types, scales and mechanisms of migration, effective factors on migration and its characteristic features. The posterior migration can be studied from the viewpoint of prior migration. Moreover, the fault migration can be comprehensively classified into two topics; production-oriented fault migration and development-oriented fault migration. Some clay cake experiments are also designed to show the prior and posterior fault migrations.

Keywords: Migration, Strike-slip fault, Seismic deformation, Brittle deformation, Iran.

۱– مقدمه

۱–۱– موضوع مورد مطالعه

مهاجرت گسل (fault migration) پدیده‌ای است که بدون درک کامل آن، شناخت دقیق موقعیت قطعات گسلی فعال و غیرفعال در پهنه گسل ممکن نخواهد بود. مهاجرت گسل تا کنون مورد بررسی و دقت لازم قرار نگرفته که یکی از دلایل آن، عدم دسترسی به اطلاعات لرزه‌خیزی مربوط به پهنه‌های مختلف گسلی از آغاز فعالیت تاکنون

www.SID.ir

Archive of SID

است. به‌همین جهت، امید می‌رود تعیین مکان و زمان زمین‌لرزه‌های شاخص یک پهنه گسلی در بازه زمانی زمین‌ساخت فعال (Berberian & Yeats, 2001; Homberg et al., 2004) کمک فراوانی به شناخت این پدیده مهم بنماید. البته در چنین شرایطی، هرگونه تلاش برای شناخت نحوه رخداد دگرشکلی لرزه‌ای (seismic deformation) در ابتدای وارد آمدن تنش (stress) به پهنه و نیز در ادامه با افزایش کرنش (strain) و زمان در پهنه، حائز اهمیت است.

Stewart & Hancock (1991 &1994) مهاجرت گسل را پدیده‌ای می‌دانند که طی آن سطوح گسلی جدید و به هم پیوسته در فرودیواره یا فرادیواره گسل اصلی گسترش می‌یابند. از سوی دیگر به نظر Stewart & Hancock (1994)، پدیده فعالیت دوباره قطعات گسل منجر به ظهور پرتگاههای گسلی مرکب یا چندگانه (composite or multiple-event scarps) می‌گردد. با جمع این دو مطلب و با توجه به اینکه ظهور چند پرتگاه گسلی نشان از ایجاد چند سطح گسلی در کنار یکدیگر دارد، می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی پدیده مهاجرت گسل با فعالیت دوباره گسل معنا یافته و هویت پیدا می‌کند. به این ترتیب باید دانست که سطح گسل مورد اشاره در موضوع مهاجرت گسل، سطح گسلی فرعی و محدود است در حالی که در موضوع فعالیت دوباره گسل، سطح گسل اصلی است، چنانکه براساس تعریف ذکرشده از مهاجرت گسل، سطوح گسلی جدید در فرادیواره یا فرودیواره گسل اصلی شکل می‌گیرند. اما آیا پدیده مهاجرت گسل محدود به سطوح گسلی فرعی است ؟ به عبارتی دیگر آیا می‌توان مهاجرت گسلی تعریف شده را برای سطوح گسلی اصلی نیز صادق دانست؟

به نظر Davison (1994) اگر آهنگ جابه جایی صفحات ناحیه‌ای ثابت باشد، تعداد گسلهای فعال با افزایش زمان کاهش خواهد یافت. به این ترتیب آیا کاهش تعداد گسلهای فعال در گذر زمان، مفهوم مهاجرت را داراست؟ به‌عبارتی آیا می‌توان نوعی مهاجرت گسل در پهنه گسلی در جهت کاهش سطوح گسلی تعریف کرد چنانکه Stewart & Hancock (1994) در جهت افزایش سطوح گسلی تعریف کرده‌اند؟

در این مقاله، تلاش شده است تا مسائل فوق با تأکید بر پهنه‌های گسلی امتداد لغز مورد بررسی قرار گیرد تا شناخت مناسب و دقیقی از پدیده مهاجرت گسلی در پهنه‌های امتداد لغز حاصل شود.

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

برای تحقق هدف تعیین شده در بخش ۱-۱، شواهد جمع آوری شده از پهنه گسلی امتدادلغز فعال اردکول- خاور ایران (عرض جغرافیایی ´ ۴۵ °۳۲ تا ´ ۱۵ °۳۴ و طول جغرافیایی ´ ۳۰ °۵۹ و ´ ۳۰ °۶۰ (شکل ۱) مورد استفاده قرار گرفت.

پهنه گسلی اردکول بخش شمال خاوری زمینددرز سیستان در خاور ایران است (Tirrul et al., 1983). این کمر بند با روند غالب شمالی- جنوبی بلوک لوت را در باختر را از بلوک افغان در خاور جدا می‌سازد، لذا ویژگیهای زمین‌شناسی این کمربند، تابع برخورد دو بلوک نامبرده در زمان ترشیری است. این پهنه گسلی از نظر ساختاری بخشی از سامانه گسلی نهبندان است. سازوکار اصلی این سامانه راستالغز، راستگرد بوده که در برخی نقاط مؤلفه معکوس به آن افزوده می‌شود (شکل ۱). پهنه گسلی اردکول از نظر لرزه‌خیزی فعال بوده و آخرین رخداد ویرانگر حاصل از این فعالیت، زمین لرزه سال ۱۳۷۶ شمسی (۱۹۹۷ میلادی) منطقه بیرجند- قاین (Mw=7.2) است (شکل ۲)(Berberian et al., 1999).

برای دستیابی به تعداد و نحوه توزیع قطعات گسلی در منطقه مورد مطالعه، داده‌های رقومی ماهواره‌ای لندست ETM+ 2002 و نیز عکسهای هوایی منطقه با مقیاس ۵۰۰۰۰ : ۱ بررسی شدند. داده‌های ماهواره‌ای با الگوی RGB: 541 پردازش شده و از این طریق، تصویری از منطقه مورد مطالعه در مناسب‌ترین وضوح تهیه شد به‌طوری که گویای خطواره‌های گسلی در منطقه مورد مطالعه باشد(شکل ۳). همچنین از روی عکسهای هوایی، نقشه گسلهای منطقه با مقیاس ۵۰۰۰۰ : ۱ در ۶ برگ تهیه شد. سپس با تلفیقی از اطلاعات تصویر ماهواره‌ای و نقشه گسلها (۵۰۰۰۰ : ۱) و نیز نقشه گسل زمین‌لرزه سال ۱۳۷۶ (Berberian et al.,1999)، نقشه گسلهای پهنه امتداد لغز اردکول تهیه گردید (شکل ۴).

با توجه به شکل ۲، زمین‌لرزه‌های بزرگ پهنه مورد مطالعه در بخش شمالی پهنه روی داده و لذا این بخش محل رهاشدن عمده تنش انباشته در پهنه در دهه‌های اخیر به شمار می‌آید. با توجه به شکل ۳، توده سنگی پهنه مورد مطالعه تقریبا یکنواخت و از جنس عمده آهک و ماسه‌سنگ و کنگلومرا برخوردار است که دو خطواره گسلی با روند NW-SE و NNW-SSE در آن مشخص است. با توجه به شکل ۲ و شکل ۳ رو مرکز زمین‌لرزه‌های سده اخیر در پهنه مورد مطالعه بر روند NNW-SSE فوق منطبق است.آنچه در شکل۴ مشخص است، تنوع و تعدد قطعات گسلی در پهنه مورد مطالعه است. همچنین جهتهایی را می‌توان یافت که رشد قطعات گسل در آن جهتها بیشتر صورت گرفته و در واقع قطعات گسلی در آن جهتها بیشتر منتشر شده‌اند. این جهتها NW-SE و NNW-SSE هستند، که خطواره آنها درتصویر ماهواره‌ای منطقه (شکل ۳) واضح است. به نظر Berberian et al. (1999)، پیوستگی جنبشی قطعات گسلی شکل دهنده خطواره با روند NNW-SSE طی رخداد ۱۳۷۶ قابل ملاحظه است.

www.SID.ir

Archive of SID

۲- مشاهدات صحرایی

با ملاحظه موارد فوق، چند مسیر در عرض پهنه گسلی برای جمع‌آوری شواهد قطعات گسلی هم عرض با گسل اصلی (مسبب رخداد ۱۳۷۶) پیمایش گردید(شکل ۴، Track A-H) که نتایج از این قرار است:

۲-۱- مقیاس ماکروسکوپی

در مسیر کریزان(Track A)، قطعات گسلی هم عرض با گسل اصلی (مسبب رخداد ۱۳۷۶) جابه‌جاییهای جوان نشان می‌دهند درصورتی که در رخدادهای دهه‌های اخیر پهنه فعال نشده‌اند (نگاره۱).

در مسیر اسفاد(Track B)، قطعات گسلی هم عرض با گسل اصلی در کوهستان، اندکی جابه‌جاییهای جوان نشان می‌دهند ولی بیشتر از آن خردشدگی و ریزش در امتداد آن قطعات مشهود است (نگاره ۲). خردشدگیها و یا ریزشها جلوه سرخ رنگی دارند (که می‌تواند ناشی از اکسید شدن آهن موجود درتوده سنگی باشد).

در مسیر کلاته نوده(Track C)، حضور پرتگاه گسلی مرکب نشان می‌دهد قطعات گسلی باختر آبیز در بازه‌ای از زمان فعالیت پیوسته داشته‌اند (نگاره ۳ و ۴).

در مسیر دوست آباد(Track D)، خردشدگیها و ریزشهای با جلوه سرخ رنگ در امتداد قطعات قدیمی واضح است (نگاره ۵). شکافهای گسلی در کوهستان که گویی با سنگهای خردشده پر شده است، نیز جالب توجه است.

در مسیر اردکول(Track E)، خردشدگیها یا ریزشهای سرخ رنگ در امتداد قطعات گسلی تازه فعال شده واضح است. همچنین حضور پرتگاه گسلی مرکب قابل توجه است که نشان از فعالیت دوباره قطعه گسلی مربوطه دارد(نگاره ۶). شکافهای گسلی در کوهستان نیز که گویی با سنگهای خرد شده پر شده است، جالب توجه است.

در مسیر محمدآباد(Track F)، حضور پرتگاه گسلی مرکب مشخص است و نشان از فعالیت دوباره قطعه گسلی مربوطه در بازه‌ای از زمان دارد(نگاره ۷).

در مسیر جنوب پهنه گسلی- مسیر آهنگران(Track G)، نبود شواهد فعالیت قطعات گسلی حاضر در مرز خاوری دشت و کوهستان جنوبی در فعالیتهای اخیر پهنه، به‌رغم فعالیت فوق العاده مرز خاوری دشت و کوهستان شمالی و نیز فعالیت بخش مرکزی کوهستان جنوبی (Berberian et al., 1999) قابل توجه است. در مسیر جنوب پهنه گسلی- مسیرزیدان(Track H) نیز نبود شواهد فعالیت قطعات گسلی حاضر در مرز باختری دشت و کوهستان جنوبی در فعالیتهای اخیر پهنه قابل توجه است.

۲-۲- مقیاس مزوسکوپی

تعدد شکستگیها در مقیاس مزوسکوپی در توده سنگی آشکار بوده و نیز جلوه سرخ رنگ شکستگیها در آن مقیاس جالب توجه است. علاوه براین، پیوند چند شکستگی با یکدیگر یک راستای شکستگی چیره آشکار را در مقیاس مزوسکوپی باعث شده است (نگاره ۸ و ۹).

۲-۳- نتا یج مشاهدات صحرایی

به این ترتیب خلاصه نتایج مشاهدات صحرایی منطقه در قالب یک دسته‌بندی هدفمند عبارتند از:

الف) در دید مگاسکوپی نبود شواهد فعالیت در قطعات گسلی حاضر در مرز خاوری و باختری دشت و کوهستان جنوبی در فعالیتهای اخیر پهنه، به رغم فعالیت فوق العاده مرز خاوری دشت و کوهستان شمالی و نیز بخش مرکزی کوهستان جنوبی قابل توجه است.

ب) در دید ماکروسکوپی قطعات گسلی هم عرض با گسل اصلی (مسبب رخداد ۱۳۷۶) جابه‌جاییهای جوان نشان می‌دهند در صورتی که در رخدادهای دهه‌های اخیر پهنه فعال نشده‌اند. در امتداد این قطعات گسلی، خردشدگیها و ریزشهای سنگی با جلوه سرخ رنگ کاملاً آشکار است.

ج) در دید مزوسکوپی، تعدد و تنوع شکستگیها در توده سنگی آشکار بوده و نیز جلوه سرخ رنگ شکستگیها در آن مقیاس نمایان است. این دو مورد در مقیاس مزوسکوپی از نظر تشابه با مقیاس ماکروسکوپی حائز اهمیت و توجه است. علاوه بر اینها، پیوند چند شکستگی با یکدیگر، یک راستای شکستگی چیره واضح را در مقیاس مزوسکوپی باعث شده است.

و علاوه بر موارد فوق :

د) مشاهده پرتگاه گسلی مرکب تنها در دو راستای غالب NW-SE و NNW-SSE نشان می‌دهد قطعات گسلی واقع در این دو راستا در بازه‌ای از زمان فعالیت پی در پی داشته‌اند.

ه) نزدیکی پرتگاههای گسلی به یکدیگر در محل پرتگاههای گسلی مرکب نشان از پیوستگی سطوح گسلی در عمق کم دارد و نیز گویای پیوستن آنها به گسل اصلی در عمق کم است.

و به این ترتیب با توجه به تمام موارد فوق و با در نظر داشتن بحث نظری بخش ۱-۱ می‌توان تأکید کرد:

و) تنوع و تعدد شکستگیهای رخداده در توده سنگی در مقیاسهای مزوسکوپی، ماکروسکوپی و مگاسکوپی قابل تعقیب است. همچنین در مقیاس ماکروسکوپی، دو نوع تنوع و تعدد قطعات گسلی در پهنه امتدادلغز مشهود است، یکی در سطوح گسلی اصلی دیده می‌شود و دیگری در سطوح گسلی فرعی. یکی بیشتر از ۹۰٪ عرض پهنه گسلی را اشغال می‌کند و دیگری در کمتر از ۵٪ عرض پهنه گسلی رخ می‌نمایاند.

www.SID.ir

Archive of SID

۳- بحث

در این بخش، تمام اطلاعات جمع آوری شده توسط نگارندگان و نیز اطلاعات دیگر، به‌کار گرفته شده تا نتیجه‌ای منطقی و منطبق با شواهد و اصول زمین‌ساخت حاصل گردد و از این رهگذر مسأله مهاجرت گسلی پاسخ داده شود.

۳-۱- گسیختگی اصلی همراه با رخداد۱۳۷۶ شمسی(۱۹۹۷ میلادی)

زمین‌لرزه سال ۱۳۷۶ در منطقه مورد مطالعه، ناشی از گسلشی به طول ۱۲۵ کیلومتر با راستای کلی NNW-SSE بوده است. همچنین شروع گسلش از شمال و گسترش آن به سمت جنوب در ۴ مرحله بوده است (Berberian et al., 1999).

با توجه به دو مورد فوق، ۳ نکته در رابطه با موضوع مهاجرت گسلی از شواهد حاضر در ۳ بخش شمال و مرکز و جنوب گسل مذکور (شکل ۴) مورد توجه است:

الف) در بخش شمالی(شکل ۴)، قسمتی از گسل واقع در منطقه کریزان (از آبیز تا کال شور) در فعالیتهای اخیر پهنه گسلی فعالیت دوباره نشان می‌دهد (شکل ۲) (Berberian et al., 1999). دلیل این امر آن است که بخش شمالی گسل اردکول (از آبیز تا کال شور) به‌دلیل به هم پیوستن قطعات گسلی از جهت طول ایجار یک بخش ضعیف‌ترین را در توده سنگی باعث شده است لذا گسیختگیهای دوباره و در نتیجه زمین‌لرزه‌های آینده روی همین بخش رخ خواهند داد(یعنی تمرکز دگرشکلی لرزه‌ای در آن بخش رخ داده است). بنابراین به‌هم پیوستن قطعات گسلی عامل مهمی در تمرکز دگرشکلی لرزه‌ای در پهنه‌های گسلی امتدادلغز و در نتیجه فعالیت دوباره همان قطعات گسلی است و در نتیجه نشانه پایان پدیده مهاجرت گسلی می‌باشد.

ب) در بخش مرکزی(شکل ۴)، شکافهای گسلی شمال دوست آباد از نظر جنس توده سنگ و ریخت‌شناسی و هندسه سطحی گسل (along-strike orientation) شبیه شکافهای گسلی باختر اردکول هستند (بخش ۱-۲) ولی در فعالیتهای اخیر پهنه گسلی، قطعات شمال دوست‌آباد فعالیت دوباره نداشته در حالی که قطعه گسلی باختر اردکول، فعالیت دوباره و بسیار جوان را از خود نشان می‌دهد. دلیل این امر آن است که قطعات گسلی باختر اردکول برخلاف قطعات گسلی شمال دوست آباد، به لحاظ موقعیت مکانی در امتداد قطعات به‌هم پیوسته مذکور در نکته الف، می‌باشند (یعنی دگرشکلی لرزه‌ای در قطعات باختر اردکول، برخلاف قطعات شمال دوست‌آباد، به‌دلیل موقعیت مکانی مناسب‌تر، متمرکز شده است). بنابراین، موقعیت مکانی قطعه گسلی در پهنه‌های گسلی امتدادلغز عامل مهمی در تمرکز دگرشکلی لرزه‌ای در آن قطعه گسلی و لذا فعالیتهای دوباره آینده آن قطعه است. در نتیجه، قطعات گسلی حاضر در امتداد سامانه به‌هم پیوسته (که دارای تشابه نسبی هندسه نیز می باشند) نامزدهای آینده برای پیوستن به سامانه به هم پیوسته قدیمی و در نتیجه نامزدهای آینده فعالیت دوباره خواهند بود که در این صورت با توجه به نکته الف، پایان پدیده مهاجرت گسلی در آن بخش از پهنه را باید انتظار داشت.

ج) در بخش جنوبی (شکل ۴)، دو قطعه گسلی سه پستان و النگ مرغ به موازات و در دو سوی گسیختگی اصلی فعال شده و جابه جایی قابل اشاره‌ای از خود نشان می‌دهند(Berberian et al.,1999)، به عبارت دیگر در بخش جنوبی، تعدد قطعات فعال شده به موازات یکدیگر (در عرض پهنه گسلی) مشاهده می‌شوند. دلیل این امر آن است که به‌دلیل توزیع تنش و لذا کرنش در بخش انتهایی گسل زمین‌لرزه (Davison, 1994) قطعات گسلی موازی در آن بخش فعال شده‌اند و در واقع گسل زمین‌لرزه در انتهای خود عریض شده است (یعنی دگرشکلی لرزه‌ای در این بخش از تمرکز خارج شده است). بنابراین، امکان فعالیت دوباره و نیز همزمان قطعات گسلی موازی در عرض پهنه گسلی به دلیلی همچون توزیع یافتگی یا عدم تمرکز دگرشکلی لرزه‌ای در انتهای گسل وجود دارد. در نتیجه گسترش سامانه به هم پیوسته باعث تمرکز دگرشکلی لرزه‌ای و در نتیجه تمرکز فعالیت در عرض پهنه گسلی بر روی یک قطعه و لذا غیر فعال ماندن دیگر قطعات موازی و هم عرض می‌شود.

۳-۲- سیر تکاملی پهنه گسلی امتدادلغز

با توجه به بخش ۲-۳ و بر اساس نتایج بخش۳-۱، می‌توان مراحل تکامل پهنه گسلی امتدادلغز را به گونه زیر پیشنهاد کرد:

۳-۲-۱- مرحله جنینی(*Embryonic Stage*)

در این مرحله، اولین قطعات گسلی در پهنه گسلی شکل می‌گیرد. قطعات گسلی شکل گیرنده، پراکنده و در صورت همگن (homogeneous) بودن محیط دارای الگوی شکستگی متنوع براساس شواهد آزمایشگاهی می‌باشند(Sylvester, 1988). البته در صورت ناهمگنی (inhomogeneous) محیط توده سنگی یعنی وجود سطوح ناپیوستگی قبلی در محیط (که در شرایط طبیعی معمول می‌باشد) این قطعات دارای پراکندگی بیشتر و نظم کمتری خواهند بود (بخش ۳-۷). بازه زمانی این مرحله از ابتدای ظهور اولین قطعات گسلی در پهنه تا زمانی است که پهنه گسلی پهنای کلی خود را نشان دهد، یا به‌عبارت دیگر تا زمانی که یک قطعه گسلی فعالیت دوباره از خود نشان دهد.

مطالعه این مرحله از تکامل گسل بیشتر بر مبنای شواهد آزمایشگاهی است، چون در بازه زمانی اطلاعات در دسترس، از طبیعت شواهد

www.SID.ir

Archive of SID

کارگشایی نمی‌شود. ممکن است در ظهور قطعات گسلی در طی این مرحله نظم خاصی وجود داشته باشد (Woodcock & Schubert, 1994). در این مرحله انرژی یا تنش انباشته شده به طور عمده صرف دگرشکلی توده سنگی (پیدایش قطعات گسلی) می شود.

۳-۲-۲- مرحله جوانی (*Youth Stage*)

در این مرحله، برخی از قطعات گسلی شکل گرفته در مرحله قبل، فرصت فعالیت دوباره می‌یابند که منجر به انتشار آن قطعات در بعد سطح و عمق می‌شود (Woodcock & Schubert, 1994). بنابراین در این مرحله می‌توان قطعات مشخصی را عهده دار عمده دگرشکلی لرزه‌ای منطقه دانست. از این رهگذر نمودهای سطحی قطعات گسلی (یعنی پرتگاههای گسلی) ایجاد شده در مرحله اول، در این مرحله به دو دسته تقسیم می‌شوند: یکم دسته‌ای که دگرشکلی لرزه‌ای قابل توجهی در آنها روی نمی‌دهد چرا که انتشار معنی داری ندارند. این دسته پرتگاههای گسلی نافرجام یا توسعه نیافتهٔ مرتبه اول نام می‌گیرند زیرا به‌لحاظ فعالیت نسبت به بقیه پرتگاهها و نیز نسبت به مرحله قبلی خود عقب افتاده‌اند و انتظار تولید زمین‌لرزه از آنها نمی‌رود.

دوم دسته‌ای که انتشار نسبی قابل توجهی دارند و تقریباً تمام دگرشکلی لرزه‌ای منطقه روی این قطعات اتفاق می‌افتد. این قطعات سهم دگرشکلی دسته اول را علاوه بر سهم خود برعهده دارند. این دسته پرتگاههای گسلی توسعه یافتهٔ مرتبه اول نامیده می‌شوند چرا که نسبت به بقیه پرتگاهها توسعه یافته‌تر می‌باشند و بر فعالیت آنها نسبت به مرحله قبلی خودشان افزوده شده است.

شروع این مرحله از زمان اولین فعالیت دوباره یک قطعه گسلی است. در این مرحله انرژی یا تنش انباشته شده هم صرف دگرشکلی توده سنگی (یعنی انتشار قطعات گسلی) می‌شود و هم صرف جابه‌جایی رخ داده روی قطعات گسلی می گردد.

۳-۲-۳- مرحله بلوغ (*Maturity Stage*)

در این مرحله برخی از قطعات گسلی حاضر در پهنه که نمودهای سطحی‌شان در مرحله دوم از نوع پرتگاههای گسلی توسعه یافته مرتبه اول خوانده شد از جهت طول به یکدیگر می‌پیوندند (پیوند امتدادی رخ می‌دهد) و لذا به‌دلیل ضعیف‌تر شدن این بخش از پهنه گسلی، قسمت اعظمی از انرژی یا تنشی که به‌تدریج در پهنه گسلی انباشته می‌شود، در بخش مذکور رها خواهد شد. به عبارت دیگر پرتگاههای گسلی توسعه یافته مرتبه اول، در این مرحله از تکامل پهنه گسلی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

یکم دسته‌ای که از فعالیت آنها نسبت به بقیه و نسبت به فعالیت مرحله قبلی خودشان کاسته شده است که به اینها می‌توان پرتگاههای گسلی نافرجام یا توسعه نیافتهٔ مرتبه دوم گفت.

دوم دسته‌ای که از جهت طول به‌هم پیوسته‌اند و بر فعالیتشان نسبت به مرحله قبل افزوده شده است. این دسته را می‌توان پرتگاههای گسلی توسعه یافتهٔ مرتبه دوم نامید.

با این توضیح می‌توان تنها قطعات گسلی به هم پیوسته را عهده‌دار دگرشکلی منطقه از این مرحله به بعد دانست، گرچه در این مرحله، دگرشکلی پهنه گسلی به حد کمال رسیده و انرژی یا تنش انباشته شده به طور عمده صرف جابه‌جایی رخ داده روی قطعات به هم پیوسته می‌شود و البته شاید در محلهای پیوند صرف دگرشکلی توده سنگی گردد تا زمانی که بهترین و راحت‌ترین پیوند برقرار شود.

می‌توان چنین نظر داشت که وقتی بهترین پیوند گسلی در محلهای مربوطه رخ داد، آنگاه پهنه گسلی وارد مرحله نهایی تکامل خود یعنی مرحله ضعف یا پیری شده است. با توجه به حضور سطح گسلی عظیم در این مرحله، می‌توان وقوع زمین‌لرزه‌های فراوان‌تر با قدرت کمتر در پهنه گسلی پیر را از شاخصهای آن پهنه نسبت به پهنه گسلی جوان دانست (Davison,1994).

۳-۳- سیر تکاملی پهنه برشی شکنا

با توجه به بند "و" از بخش ۲-۳ می‌توان مراحل پیشنهادی برای نحوه تکامل پهنه گسلی امتدادلغز (جنینی، جوانی و بلوغ) را به پهنه برشی شکنا تعمیم داد.

با توجه به ارتباط مقیاسهای مختلف رخداد شکستگی در توده سنگی (Engelder,1994)، می‌توان رخداد هر شکستگی را حاصل به‌هم پیوستن امتدادی شکستگیهای حاضر در مقیاس کوچک‌تر دانست. به این ترتیب، فرایند به‌هم پیوستن امتدادی شکستگیها به صورت Microlinkage (به‌هم پیوستن امتدادی چند شکاف و یا گسیختگی برشی در مقیاس میکروسکوپی) و Mesolinkage (به هم پیوستن امتدادی چند درزه و شکستگی برشی در مقیاس مزوسکوپی) و Macrolinkage (به هم پیوستن امتدادی چند قطعه گسلی در مقیاس ماکروسکوپی) و (به‌هم پیوستن امتدادی چند سامانه به‌هم پیوسته گسلی (در مقیاس مگاسکوپی) قابل طرح و بررسی است. حاصل هریک از فرایندهای نامبرده به‌ترتیب درزه و شکستگیهای برشی، قطعات گسلی، سامانه به‌هم پیوسته گسلی و بالاخره حاشیه صفحه می‌باشد.

از طرفی، با توجه به تشابه مراحل لغزش گسل در مقیاس ماکروسکوپی (لی و والاس، ۱۹۹۵) و مراحل فرایند شکاف خوردگی در مقیاس میکروسکوپی (Engelder,1994) و نیز موارد فوق، می‌توان مراحل

www.SID.ir

Archive of SID

پیشنهادی برای تکامل پهنه گسلی امتدادلغز (جنیی،جوانی،بلوغ) را در خصوص تک تک مقیاسهای زمین‌شناسی ساختاری درگیر در پهنه برشی شکنا بیان کرد. در این زمینه، نکات مهم و قابل توجه از این قرار است:

۱- مرحله بلوغ برای هر مقیاس معادل مرحله جنینی در مقیاس بعدی است.

۲ - مراحل پیشنهادی تکامل پهنه گسلی برای تکامل یک شکاف(یا گسیختگی برشی)، یک درزه(یا شکستگی برشی)، یک قطعه گسلی و بالاخره یک سامانه به هم پیوسته گسلی صدق می‌کند.

۳- با توجه به وحدت رفتار شکستگیهای حاضر در مقیاسهای مختلف پهنه برشی شکنا، این امکان فراهم شده است که سؤالات طرح شده در یک مقیاس که بیانگر ابهامات و کمبودهای موجود در آن مقیاس می‌باشند، توسط شناخت حاصل از مقیاسهای دیگر پاسخ داده شوند.

۴- از مقیاس میکروسکوپی تا مگاسکوپی، از تعداد شکستگیها کاسته شده و بر ابعاد شکستگیها و نیز ابعاد جا به جاییهای رخ داده روی شکستگیها افزوده می‌شود.

۵- شکل‌گیری یک قطعه گسلی(در مقیاس ماکروسکوپی) تحت کنترل نحوه توزیع و انتشار شکستگیهای برشی (در مقیاس مزوسکوپی) است. همچنان که شکل‌گیری یک سامانه به‌هم پیوسته گسلی (در مقیاس مگاسکوپی) تحت کنترل نحوه توزیع و انتشار قطعات گسلی (در مقیاس ماکروسکوپی) است.

۶- با توجه به بند قبل، شکل گیری یک قطعه گسل در مقیاس ماکروسکوپی، نتیجه "انتشار" شکستگیهای برشی در مقیاس مزوسکوپی است. این فرایند می‌تواند به دو حالت صورت گیرد، یکی انتشار درون محیط خالی از شکستگی برشی یا بکر که به دلیل دشواری این نوع فرایند و نیاز بیشتر آن به انرژی، آن را انتشار سخت می‌توان نامید. دیگری انتشار از طریق پیوند با شکستگیهای برشی موجود در محیط (که به لحاظ موقعیت مکانی و هندسی مناسب باشند) که به دلیل سهولت این نوع انتشار، آن را انتشار نرم می‌توان نامید. به این ترتیب، باید دانست که قطعات گسلی نیز برای رشد و انتشار در مراحل مختلف شکل‌گیری یک سامانه به هم پیوسته گسلی یکی از دو نوع ساز وکار ذکر شده را تجربه می‌کنند. یعنی یا با قطعات گسلی حاضر در امتداد خود پیوند برقرار می‌کنند (انتشار نرم) و یا در محیط خالی از قطعه گسلی (این محیط در مقیاس ماکروسکوپی بکر است) منتشر می‌شوند(انتشار سخت). به همین ترتیب، انتشار یک شکستگی عظیم همچون سامانه به‌هم پیوسته گسلی یا در محیط خالی از سامانه به هم پیوسته گسلی دیگر (این محیط در مقیاس مگاسکوپی بکر است) صورت می‌گیرد (انتشار سخت) و یا رشد آن شکستگی عظیم از طریق پیوند با سامانه‌های گسلی حاضر در امتداد آن انجام می شود (انتشار نرم). پس مشخص است که اول اینکه دو نوع انتشار سخت و نرم در تمام مقیاسها معنا و مفهوم یکسان دارد. دوم اینکه یک شکستگی (در هر مقیاس) برای رشد در توده سنگی ابتدا انتشار سخت و سپس انتشار نرم را تجربه می‌کند سوم اینکه انتشار نرم شکستگیها در هر مقیاس از طریق پیوند شکستگیها صورت می‌گیرد که آن پیوند در مقیاس ماکروسکوپی می تواند از نوع پیوند سخت یا پیوند نرم باشد (Davison, 1994).

به این ترتیب، فرضیه‌ای در خصوص تکامل پهنه گسلی امتدادلغز ارائه شده که نخست بر پایه مشاهدات صحرایی و نیز آزمایشگاهی در مقیاسهای مختلف بنا شده است، دوم برای شبکه شکستگی در تمام مقیاسها (یعنی تمام مقیاسهای پهنه برشی شکنا) قابل تعمیم است و سوم برای تک تک شکستگیهای حاضر در پهنه برشی شکنا کاربرد دارد.

براساس این فرضیه، پهنای پهنه گسلی امتدادلغز ابتدا افزایش وسپس کاهش تدریجی خواهد داشت (شکل ۵). به این ترتیب، روابط تجربی درازا - پهنا برای پهنه های گسلی امتدادلغز در مراحل تکاملی مختلف، تابع این امر خواهند بود.

همچنین، از آنجا که توزیع شکستگیها در پوسته زمین از هندسه فراکتالی (غیر اقلیدسی) پیروی می‌کنند (Turcotte,1992) براساس فرضیه پیشنهادی به‌نظر می‌رسد تحلیل فراکتالی شکستگیها باید در مقیاسهای متفاوت پهنه برشی شکنا به طور جداگانه صورت گیرد (Cello, 1997). به این ترتیب، پهنه‌های شکستگی در هر مقیاس با افزایش بعد فراکتالی در مرحله جنینی و کاهش بعد فراکتالی در مرحله جوانی و بویژه مرحله بلوغ روبه رو خواهند بود، چراکه با افزایش کرنش در پهنه گسلی، بعد فراکتالی کاهش می یابد (Cowie et al., 1996). بنابراین می‌توان گفت بعد فراکتالی قطعات (یا سامانه‌های) گسلی، با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی توسعه یافته مرتبه دوم به حدی کاهش می‌یابد که منحنی مربع شمار مربوطه، از توزیع اقلیدسی (غیرفراکتالی) پیروی می‌کند (یعنی بعد فراکتالی به ۱ نزدیک می شود). این در حالی است که پایانه‌های قطعات (یا سامانه‌های) گسلی مذکور به دلیل عقب ماندگی در سیر تکاملی نسبت به بخشهای مرکزی خود، از بعد فراکتالی بیشتری برخوردار خواهند بود (شهریاری و خطیب، ۱۳۷۶؛ خطیب، ۱۳۷۹).

۳-۴- مهاجرت گسل از دیدگاه سیر تکاملی پیشنهادی

حال می‌توان از دیدگاه فرضیه پیشنهادی در خصوص مراحل تکامل پهنه گسلی امتداد لغز (بخش ۳-۲ و ۳-۳) به پدیده مهاجرت گسل نگریست.

۳-۴-۱- مراحل مهاجرت گسل

طی تکامل پهنه گسلی (بخش۳-۲) دو مرحله مهاجرت گسل (یا به بیانی بهتر مهاجرت فعالیت گسل) قابل ذکر است:

www.SID.ir

Archive of SID

مرحله ۱ : در طی مرحله جوانی از تکامل پهنه گسلی که فعالیت قطعات گسلی با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی نافرجام مرتبه اول به سمت قطعات گسلی با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی توسعه یافته مرتبه اول مهاجرت می کند.

مرحله ۲ : درطی مرحله بلوغ از تکامل پهنه گسلی که فعالیت قطعات گسلی با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی نافرجام مرتبه دوم به سمت قطعات گسلی با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی توسعه یافته مرتبه دوم مهاجرت می کند.

البته شایان ذکر است مراحل تکاملی پهنه گسلی امتداد لغز و نیز مهاجرت تبیین شده براساس آن، با پذیرش شرط ثابت بودن آهنگ و جهت جابه‌جایی رخ داده روی پهنه گسل پیشنهاد شده است (که با توجه به بازه زمانی تعریف شده برای زمین ساخت فعال این شرط برقرار است).

۳-۴-۲- انواع مهاجرت گسل

با توجه به بخش ۳-۴-۱ می توان دو نوع مهاجرت گسل را معرفی کرد:

نخست : مهاجرت در طی مرحله جوانی تکامل پهنه گسل که به آن مهاجرت اولیه گفته می‌شود.

دوم : مهاجرت در طی مرحله بلوغ تکامل پهنه گسل که به آن مهاجرت ثانویه گفته می‌شود.

تفاوت این دو نوع مهاجرت در سازوکار مهاجرت است (بخش ۳-۴-۵).

۳-۴-۳- مقیاسهای مهاجرت گسلی

با توجه به وحدت سیر تکامل پهنه گسلی در مقیاسهای مختلف پهنه برشی شکنا (بند۳ از بخش ۳-۳)، مهاجرت تعریف شده در خصوص قطعات گسل، برای مقیاسهای دیگر شکستگی در پهنه برشی شکنا قابل تعمیم است. لذا مهاجرتی چهارگانه در مقیاسهای زمین‌شناسی ساختاری قابل تعریف است:

- مهاجرت میکروسکوپی: مهاجرت در شکافها یا گسیختگیهای برشی.
- مهاجرت مزوسکوپی: مهاجرت در درزه ها یا شکستگیهای برشی.
- مهاجرت ماکروسکوپی: مهاجرت در قطعات گسل.
- مهاجرت مگاسکوپی: مهاجرت در سامانه‌های به هم پیوسته گسلی.

البته مهاجرت گسل به طور اخص در دو مقیاس ماکروسکوپی و مگاسکوپی مطرح می‌شود، یعنی دو مقیاسی که درگیر با فعالیت لرزه‌ای در پهنه هستند.

۳-۴-۴- عوامل مؤثر بر مهاجرت گسل

با توجه به بخش۳-۴-۱، برای کلی مهاجرت گسل از حواشی پهنه گسل به سمت محل وقوع پیوند گسل، است. از طرفی، پدیده پیوند گسل خود ناشی از انتشار در شرایط بهینه است یعنی محل وقوع پیوند گسلی یا مقصد مهاجرت را مجموعه‌ای از عوامل مؤثر بر انتشار بهینه تعیین می کند:

عامل اول موقعیت هندسی قطعه گسل است، به این معنا که قطعه ای از انتشار بهتر برخوردار خواهد شد (و نامزد مقصد مهاجرت خواهد بود) که کمترین زاویه را با تنش اصلی بسازد.

عامل دوم، منطبق بودن قطعه گسل بر سطح ناپیوستگی مشخص و از قبل موجود است، به این معنا که قطعه‌ای انتشار بهتر خواهد داشت (و نامزد مقصد مهاجرت خواهد بود) که منطبق بر سطح ناپیوستگی ضعیف‌تر باشد. البته براساس شواهد آزمایشگاهی حضور سطوح ناپیوستگی در پی‌سنگ بسته به هندسه سطوح می‌تواند موقعیت مکانی قطعات گسل شکل گرفته و حتی پهنای پهنه گسلی را به میزان زیاد تحت تأثیر قرار دهد (بخش ۳-۷-۴).

عامل سوم موقعیت مکانی قطعه گسل است به این معنا که قطعه‌ای انتشار بیشتر خواهد داشت (و نامزد مقصد مهاجرت خواهد بود) که در امتداد چند قطعه دیگر با هندسه نسبتاً مشابه و بخصوص در امتداد سامانه به هم پیوسته قبلی قرار گیرد.

عامل چهارم جنس توده سنگی است که ضرایب کشسانی محیط در حالت گسل نخورده و مقاومت اصطکاکی سطح گسل در حالت گسل خورده به ترتیب بر زایش و میزان انتشار قطعه گسلی اثرگذار است.

عامل پنجم ناهمسانگرد بودن محیط توده سنگی، موافق انتشار قطعه گسلی است. یعنی اگر شکستگیهای میکروسکوپی و مزوسکوپی موجود در توده سنگی موافق با جهت انتشار گسل در محیط و بخصوص در امتداد قطعه گسلی پراکنده باشند، بر انتشار آسان‌تر و بیشتر گسل در توده سنگی مؤثر است (بند۶ بخش ۳-۳).

عامل ششم همگنی توده سنگ است که بر انتشار یکنواخت قطعه گسل در توده سنگ اثرگذار است. چنان که حضور توده‌های سنگی مانع در مسیر انتشار یک قطعه گسلی، انتشار همگن آن قطعه را مختل کرده و به منزله امتیاز منفی برای آن قطعه و امتیاز مثبت برای قطعات هم عرض آن قطعه (از دیدگاه نامزدی برای مقصد مهاجرت گسل) است. براساس شواهد آزمایشگاهی در این زمینه، حضور توده‌های سنگی شکل پذیر در مسیر انتشار قطعه گسل، باعث زایش ساختارهای شکل پذیر در توده سنگی شده و بسته به ابعاد توده می‌تواند مسیر انتشار قطعه گسل را به سمت سطح ناپیوستگی بین توده شکنا و شکل پذیر منحرف سازد (بخش ۳-۷-۴).

۳-۴-۵- سازوکارهای مهاجرت گسل

در مرحله اول مهاجرت گسل یعنی مهاجرت اولیه(بخش۳-۴-۱ و ۳-۴-۲)، انتشار عمده از نوع انتشار سخت است (بند ۶ از بخش۳-۳) و فعالیت پرتگاههای گسلی نافرجام مرتبه اول به‌تدریج به پرتگاههای گسلی توسعه

www.SID.ir

Archive of SID

یافته مرتبه اول منتقل می‌شود. در این مورد، هرچه بر میزان فعالیت قطعات گسل با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی توسعه یافته مرتبه اول افزوده می‌شود، از فعالیت قطعات گسل با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی نافرجام مرتبه اول کاسته می‌شود. بنابراین و با توجه به اینکه فعالیت دوباره گسلها باعث انتشار گسلهای موجود در بعد عمق و سطح می‌گردد(Woodcock & Schubert, 1994) می‌توان نتیجه گرفت که پس از پایان مرحله اول تکامل، گویی پرتگاههای گسلی نافرجام مرتبه اول خود به محل پرتگاههای گسلی توسعه یافته مرتبه اول مهاجرت کرده‌اند. به عبارت دیگر، یک قطعه گسل از پهنه فعال گسلی حذف شده و به همان میزان یک قطعه گسلی دیگر از همان پهنه، رشد کرده (یا منتشر شده) و بر فعالیتش افزوده شده است. از این جهت، می‌توان گفت مهاجرت فعالیت قطعه گسل، سرانجام منجر به مهاجرت قطعه گسل می‌گردد و لذا می‌توان آن را مهاجرت پیشرونده گسل (progressive fault migration) نامید.

در مرحله‌دوم مهاجرت گسل،یعنی مهاجرت‌ثانویه(بخش۳-۴-۱ و ۳-۴-۲)، به علت وقوع پیوند گسلی انتشار عمده از نوع انتشار نرم است (بند ۶ از بخش۳-۳) و لذا قطعات گسل با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی توسعه یافته مرتبه دوم، با سرعت بسیار بیشتر از قطعات گسلی با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی توسعه یافته مرتبه اول در مرحله قبل منتشر می شوند. در نتیجه، مهاجرت فعالیت قطعه گسلی (از قطعات با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی نافرجام مرتبه دوم به سمت قطعات گسلی با نمودهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی توسعه یافته مرتبه دوم) نیز با سرعت بسیار بیشتری در این مرحله صورت می‌گیرد (شکل ۵). در این وضعیت، قطعه گسلی برقرارکننده پیوند با قطعات حاضر در طول پهنه، تمام فعالیت قطعات گسلی حاضر در عرض خود را (علاوه بر سهم فعالیت خود) به طور ناگهانی (و نه تدریجی) به ارث خواهد برد! (چراکه وقوع پیوند گسل باعث مرگ یا نافرجام شدن قطعات هم عرض با قطعه برقرار کننده پیوند می‌شود). لذا می‌توان آن را مهاجرت گسلی ناپیشرونده یا ناگهانی گسل (none-progressive fault migration) نامید.

به این ترتیب، تنوع و تعدد قطعات گسل در مرحله جنینی (بخش ۳-۲-۱) با وقوع مهاجرت گسل به صفر می‌گراید، به‌طوری که تنوع قطعات گسل در پهنه با وقوع مهاجرت اولیه گسل و تعدد آنها با وقوع مهاجرت ثانویه گسل به صفر می‌گراید.

۳-۵- کاربرد مدل پیشهادی تکامل و مهاجرت گسل (برای پهنه‌های امتدادلغز) در طبیعت

در این بخش، ۳ مثال واقعی انتخاب شده تا از دیدگاه مدل پیشنهادی ارزیابی شوند و از این رهگذر، محکی بر اعتبار مدل پیشنهادی نیز زده شود. مبنای انتخاب، اولاً دسترسی به شواهد مورد نظر از پهنه گسلی انتخابی با توجه به هدف این بخش بوده است و دوم این که پهنه‌های انتخابی هر دو مقیاس درگیر در موضوع دگرشکلی لرزه‌ای (ماکروسکوپی و مگاسکوپی)را با توجه به هدف این بخش در برگیرند. این سه پهنه، به ترتیب مقیاس مطالعه عبارتند از :

- پهنه گسلی فعال اردکول – خاور ایران (خاور بلوک لوت)
- پهنه گسلی فعال گوک – خاور ایران (باختر بلوک لوت)
- پهنه گسلی فعال موتاگوآ – گواتمالا (آمریکای مرکزی)

دو مورد اول نوعی گسل تراگذر (transcurrent) و مورد سوم نوعی گسل ترادیس(transform) است (Freund, 1974).

۳-۵-۱- پهنه گسلی فعال اردکول – خاور ایران: براساس سیر پیشنهادی برای تکامل پهنه گسلی امتدادلغز(بخش ۳-۲) و نیز بر اساس دو مرحله ذکر شده برای مهاجرت گسل(بخش ۳-۴-۱)، تقسیم بندی گسلهای منطقه مورد مطالعه در دو مقیاس ماکروسکوپی و مگاسکوپی صورت گرفت تا گویای مراحل مهاجرت پرتگاههای گسلی در آن منطقه باشد (شکلهای ۶ و ۷).

با ملاحظه بند ۱ بخش۳-۳، چون پهنه گسلی اردکول با انجام پیوند میان برخی قطعات گسلی (منظور پیوند جنبشی است، بخش ۱-۲). در مقیاس ماکروسکوپی بالغ شده، لذا در مقیاس مگاسکوپی نیز قابل مطالعه است. شکل ۷ نقشه شکستگیهای منطقه در مقیاس مگاسکوپی است. در این شکل مشخص است که ۲ جهت غالب و برقرار کننده پیوند گسلی در پهنه وجود داشته است که باعث هسته‌زایی دست کم سه سامانه گسلی به هم پیوسته شده است. اما از این میان، تنها سامانه گسلی شماره ۲ فرصت انتشاری بیشتر از دو تای دیگر یافته و لذا بر اساس تعریف مهاجرت گسل و ملاحظه بخش ۳-۴-۳، این سه سامانه نامگذاری شدند (شکل ۷). چنانکه مشخص است در مرحله جوانی پهنه در مقیاس مگاسکوپی(یعنی پس از مرحله جنینی)، فعالیت سامانه‌های ۱ و ۳ به سامانه ۲ مهاجرت کرده و می‌کند(یادآور مهاجرت اولیه در بخش ۳-۴-۲).

با توجه به توضیحات فوق و بند ۲ از بخش ۳-۳ و نیز شکلهای ۶ و ۷ تأکید می‌شود که :

۱- قطعات گسلی حاضر در بخش شمالی پهنه گسلی اردکول (شکل ۴) که در طی رخداد ۱۳۷۶ و نیز رخدادهای ۱۳۵۷ و ۱۳۵۸ فعال شدند، در مرحله بلوغ (مقیاس ماکروسکوپی) قرار دارند و لذا فعالیت دوباره‌ای هم چون قبل در این قطعات قابل انتظار است. در این بخش، هسته‌زایی سامانه به‌هم پیوسته صورت گرفته است و با افزایش کرنش و زمان رشد کرده و خواهد کرد(منتشر خواهد شد).

www.SID.ir

Archive of SID

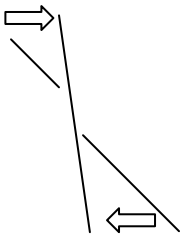
۲- قطعات گسلی حاضر در بخش مرکزی پهنه گسلی اردکول (شکل ۴) که در طی رخداد ۱۳۷۶ فعال شدند به دلیل این که در مسیر انتشار سامانه به هم پیوسته شمالی قرار گرفته‌اند، با این سامانه پیوند جنبشی برقرار کرده (بخش ۱-۲) و لذا پس از قطعات بند قبل، در ابتدای مرحله بلوغ(مقیاس ماکروسکوپی) قرار دارند.

۳- قطعات گسلی حاضر در بخش جنوبی پهنه گسلی اردکول (شکل ۴) که در طی رخداد ۱۳۷۶ فعال شدند، به‌دلیل قرارگرفتن در پایانه لغزش، هنوز باعث تمرکز دگرشکلی لرزه‌ای در بخش جنوبی نشده‌اند. انتظار می‌رود ادامه پیوند جنبشی این قطعات گسلی با سامانه به‌هم پیوسته شمالی و نیز برقراری پیوند جنبشی آنها با قطعات جنوبی‌تر (در طی رخدادهای آینده) باعث بلوغ این بخش از پهنه اردکول نیز شود.

۴- قطعات گسلی حاضر در بخش جنوبی پهنه گسلی اردکول (شکل ۴) که در طی زمین‌لرزه ۱۳۷۶ فعال نشدند نیز نشان از جوان بودن این بخش از پهنه دارند. بنابراین، فعالیتهای آیندهٔ این بخش از پهنه تحت تأثیر گسترش سامانه به‌هم پیوسته شمالی به‌سمت جنوب، شرایط تکامل این بخش از پهنه را فراهم خواهد آورد.

مقادیر جا به‌جایی مربوط به کواترنری پسین در بخشهای مختلف سامانه گسلی اردکول (Berberian et al., 1999-Table1) موارد فوق را تأیید می‌کنند. از طرفی، با توجه به بحث تحلیل فراکتالی (بخش ۳-۳)، از مطالب فوق نتیجه می‌شود که ابعاد فراکتالی در بخش شمالی و مرکزی گسل اردکول کاهش یافته ولی در بخش جنوبی افزایش می‌یابند(خطیب، ۱۳۷۹). افزون بر این، با توجه به موارد چهارگانه فوق، مشخص می‌شود که تکامل پهنه گسلی اردکول به اصطلاح (در جهت شمال کنترل شده) است، چراکه هسته‌زایی سامانه به هم پیوسته در شمال پهنه صورت گرفته است و به‌سمت جنوب در حال انتشار است. لذا قطعات گسلی جنوبی که به لحاظ موقعیت مکانی در امتداد سامانه به‌هم پیوسته قرار دارند، نامزدهای فعالیت آینده و پیوستن به سامانه به هم پیوسته‌اند (یادآور سازوکار انتشار نرم اشاره شده در بند ۶ بخش ۳-۳).

از طرفی با نگاهی دقیق‌تر به شکل ۷ و با توجه به انواع گسلهای نامگذاری شده در آن شکل، می‌توان فرضیه وقوع مهاجرت ساعتگرد را در این منطقه مطرح کرد. شکل زیر با یک ساده سازی، شمایی از نقشه گسلهای منطقه در مقیاس مگاسکوپی(شکل ۷) را نشان می‌دهدکه جهت مهاجرت نیز روی آن مشخص است: با توجه به بند ۳ از بخش ۳-۳، نتیجه حاصل از مقیاس مگاسکوپی را می‌توان به مقیاسهای دیگر تعمیم داد، چنان که به عنوان مثال می‌توان ادعا کرد که این ویژگی در مورد قطعات گسلی هم عرض نیز



وجود دارد. لذا از آن به عنوان ویژگی دیگر پدیده مهاجرت گسلی در پهنه‌های امتداد لغز یاد می‌شود.

به این ترتیب، مهاجرت گسل در پهنه امتداد لغز دو ویژگی دارد: یکی اینکه با توجه به بخش ۳-۴-۴، مهاجرت گسلی به سمت محل انتشار بهینه گسلی است و دیگری اینکه با توجه به فرضیه فوق، مهاجرت گسل هم جهت یا هم علامت با فرایند انتشار گسل است.

۳-۵-۲- پهنه گسلی فعال گوک - خاور ایران:

هرچند براساس شواهد در دسترس، حضور گسلش راندگی مجاور (Berberian et al., 2001) با تأثیر بر رفتار سامانه گسلی امتداد لغز گوک می‌تواند باعث تفاوت آن با موردی همچون سامانه گسلی اردکول گردد، اما سازوکار واضح راستگرد سامانه گسلی گوک ایجاب می‌کند که موقعیت آن پهنه گسلی، از دیدگاه مدل پیشنهادی در این تحقیق شناسایی شود. با توجه به میزان جا به‌جایی گزارش شده (۱۲ کیلومتر رخ داده در طی ۵ میلیون سال اخیر) و نیز پیوستگی جنبشی برخی قطعات گسلی حاضر در آن سامانه (Walker & Jackson,2002)، پهنه گسلی گوک در مقیاس ماکروسکوپی به مرحله بلوغ رسیده و سامانه گسلی به‌هم پیوسته گوک (چهارگوش A در شکل ۱) را در مقیاس مگاسکوپی ساخته است (بند ۱ از بخش ۳-۳). به این ترتیب، براساس مدل پیشنهادی باید انتظار انتشار سخت و نرم سامانه گسلی گوک را داشت. این سامانه در پایانه شمالی خود، علاوه بر گزینه انتشار سخت با دو گزینه جهت انتشار نرم (در مقیاس مگاسکوپی) روبه روست: یکی سامانه گسلی نایبند (چهارگوش B در شکل ۱) و دیگری سامانه گسلی کوهبنان (چهارگوش C در شکل ۱). در پایانه جنوبی سامانه گسلی گوک نیز گزینه سامانه گسلی سبزواران (چهارگوش D در شکل ۱) جهت انتشار نرم سامانه گوک (در مقیاس مگاسکوپی) حضور دارد. البته وقوع زمین لرزه بم در اثر فعالیت گسل بم (چهارگوش E در شکل ۱) که حکایت از انتشار نرم قطعه گسلی بم (در مقیاس ماکروسکوپی) دارد (Fu et al., 2004)، می‌تواند جلوه‌ای آنی از فرایند انتشار سخت سامانه گسلی گوک (در مقیاس مگاسکوپی) در جهت جنوب باشد. در این بحث شایان ذکر است، اولاً سامانه‌های گسلی نایبند، کوهبنان و سبزواران مورد اشاره با توجه به ابعاد گسترده پهنه‌ها (شکل ۱) و نیز جا به‌جاییهای رخداده در آن پهنه‌ها (Walker & Jackson, 2002) به

www.SID.ir

Archive of SID

عنوان شکستگیهای جنینی در مقیاس مگاسکوپی تلقی شوند ثانیاً گزینشهای فوق از نظر ساختاری تحت تاثیر عوامل مشروح در بخش ۳-۴-۴ است ولی عوامل کنترلی غیرساختاری نیز می‌توانند در این گزینشها مؤثر باشند (Bruhn et al., 1990).

۳-۵-۳- پهنه گسل فعال موتاگوآ - گواتمالا :

سامانه گسل موتاگوآ (Mutagoa fault) با سازوکار امتدادلغز چپگرد، گسیختگی سطحی عظیمی به‌طول ۲۳۰ کیلومتر را طی رخداد ۴ فوریه ۱۹۷۶ ایجاد کرده است (Plafker, 1976). این میزان گسیختگی، حکایت از پیوستگی جنبشی فوق‌العاده قطعات گسلی و سامانه‌های گسلی حاضر در پهنه موتاگوآ دارد. از طرفی سامانه‌های گسلی دیگر همچون سامانه گسل پلوچیک (Polochic fault)، سان آگوستین (San Agustin fault) و یوکوتان (Jocotan fault) تقریبا به موازات سامانه گسلی موتاگوآ در پهنه گواتمالا حضور دارند که در طی سنوزوییک پسین جا به‌جایی داشته‌اند (Plafker, 1976). با توجه به موارد فوق، می‌توان پهنه گسلیده موتاگوآ را نتیجه به هم پیوستن چند سامانه گسلی (megalinkage) دانست که براساس مدل تکاملی پیشنهادی، این پهنه گسلی در ابتدای مرحله بلوغ در مقیاس مگاسکوپی است. بنابراین، اولاً براساس مدل پیشنهادی مهاجرت گسل می‌تواند به‌عنوان مقصد مهاجرت فعالیت سامانه‌های گسلی حاضر در گواتمالا مطرح شود و دوم این که براساس بخش ۳-۳ می‌توان به آن حاشیه صفحه گفت چنانکه از آن سامانه گسلی به عنوان گسل ترادیس بین صفحات زمین‌ساختی کارائیب و آمریکای شمالی یاد شده است (Davis & Raynolds, 1996).

شایان ذکر است ۳ مثال فوق از سامانه‌های گسلی اردکول، گوک و موتاگوآ، براساس روند تکاملی یک پهنه گسلی امتدادلغز ارائه شده‌اند.

۳-۶- مهاجرت گسل از دیدگاه جامع

۳-۶-۱- مهاجرت گسلی نخستین و مهاجرت گسلی پسین

Stewart & Hancock (1994) مهاجرت گسل راچنین معرفی می‌کنند:

"... Fault migration, whereby new linked fault planes develop in either the hangingwall or footwall of an existing fault plane."

اما مهاجرت گسلی که در این تحقیق معرفی و از جهات متعددی بررسی شده است به این ترتیب تعریف می‌گردد:

"... Fault Migration, whereby some of existing fault planes develop and some of them fail. Development of some fault planes is due to failure of the others."

با دقت در این دو تعریف مشخص می‌شود که تعریف دوم مقدم بر تعریف یکم است چراکه وقتی در مرحله جنینی جهات متعددی از هندسه‌های گسلی (along-strike orientation) در پهنه حضور دارد (بخش۳-۲-۱) امکان انتشار همه آن قطعات وجود ندارد و لذا باید مهاجرت دوم رخ دهد تا امکان انتشار برخی قطعات فراهم آید و از این رهگذر، مهاجرت یکم امکان ظهور پیدا کند. پس مهاجرت تعریف شده در این تحقیق مهاجرت اولی یا نخستین (prior fault migration) است و مهاجرت تعریف شده توسط Stewart & Hancock (1994) مهاجرت اُخری یا پسین (posterior fault migration) می‌باشد.

با توجه به نتیجه (د) از بخش ۲-۳ و مکان چهار نقطه‌ای که در موقعیت آنها پرتگاه گسلی مرکب مشاهده شده است (شکل ۶)، مشخص می‌گردد که در هر چهارمورد، دو قطعه گسل با نمودارهای سطحی از نوع پرتگاههای گسلی توسعه یافته (مرتبه اول یا دوم) در نزدیکی یکدیگر حضور دارند. به این ترتیب و با توجه به بحث نظری اشاره شده در بخش۱-۱ مبنی براینکه سطح گسل مورد اشاره در تعریف مهاجرت گسلی (Stewart & Hancock, 1994) سطح گسل فرعی ومحدود است و با ملاحظه نتایج (ه) و (و) از بخش ۲-۳، این فرضیه مورد توجه قرار می‌گیرد که مهاجرت پسین در مرحله انتشار نرم قطعات گسلی (بند ۶ از بخش ۳-۳) و در محل پیوند سخت قطعات گسلی (Davison, 1994) رخ می‌دهد و به طور اخص در محل برقراری پیوند طولی قطعات گسلی (از نوع سخت) در شرایطی که تفاوت هندسه دو قطعه یا جابه‌جایی مکانی(عرضی) آنها یا هر دو مورد وجود داشته باشد. به طوری که در محل پیوند این قطعات گسلی، پهنه‌های فرعی (با ابعاد کوچک‌تر از پهنه اصلی) شکل می‌گیرد که تعدد پرتگاههای گسلی جزو شاخصه‌های این پهنه‌های فرعی خردشده به حساب می‌آید. پیگیری ساختارهای دوپلکس (duplex structures) در محل این پهنه‌های فرعی در شرایط ازدیاد فاصله عرضی بین دو قطعه گسلی یا برقراری پیوند بین دو سامانه گسلی به‌هم پیوسته (megalinkage)، میسر می‌باشد (مانند دوپلکس کششی حاضر در محل پیوند دو قطعه گسلی در سامانه گسلی دشت بیاض- خاور ایران (Twiss&Moores,1992) که در این صورت نوعی نظم (به لحاظ نظری) برای فرایند مهاجرت گسلی پسین قابل بیان است(Twiss&Moores,1992). ولی در صورت کوتاهی فاصله عرضی بین دو قطعه گسل یا صرفا تفاوت هندسه عمقی دو قطعه گسل، تراکم گسل در پهنه فرعی محدودتری رخ می‌دهد (مانند نگاره‌های ۱ و ۴ و ۶ و ۷) که پیگیری نظم حاکم بر فرایند مهاجرت گسلی پسین در چنین پهنه‌هایی با دشواری بسیار رو به‌روست بویژه که خردشدگی این پهنه‌ها (در مقیاس ماکروسکوپی) می‌تواند تحت تأثیر ارتعاشات شدید توده سنگی حاضر در این پهنه‌ها، حین فعالیت همزمان دو قطعه گسلی (حاضر در محل پیوند) طی یک رخداد باشد. با این توضیح باید گفت چنانکه مهاجرت نخستین در ابعاد پهنه گسلی طرح گردید، مهاجرت پسین در ابعاد قطعه گسل (یعنی ابعاد- طول T عرض و عمق- محدودتر نسبت به ابعاد پهنه

www.SID.ir

Archive of SID

گسل) قابل طرح است (شکل ۸).

۳-۶-۲- مهاجرت گسلی تولید محور و مهاجرت گسلی توسعه محور

با توجه به تفاوت مفهوم مهاجرت تعریف شده در این تحقیق و تعریف شده توسط Stewart & Hancock (1994) (بخش ۳-۶-۱) مهاجرت گسل در کل دارای دو مفهوم است:

۱- مهاجرت گسل با مفهوم تولید سطح گسل جدید (production-oriented fault migration)

۲- مهاجرت گسل با مفهوم گسترش سطح گسل موجود (development-oriented fault migration)

یک مهاجرت گسلی تولیدمحور است و دیگری توسعه‌محور، یکی در مرحله تولید سطح گسل تعریف می‌شود و دیگری در مرحله رشد سطوح گسلی، وبالاخره یکی مفهوم فزاینده دارد و دیگری مفهوم کاهنده.

به‌این ترتیب مهاجرت گسلی تولیدمحور (P-oriented) براساس توضیح مرحله جنینی از مراحل تکاملی پهنه گسلی امتدادلغز در ابعاد پهنه گسلی قابل تعریف است و براساس توضیح مهاجرت پسین در بخش ۳-۶-۱ در ابعاد قطعه گسلی تعریف می‌شود.

مهاجرت گسلی توسعه‌محور (D-oriented) نیز اگر چه در اصل و طبق توضیح مرحله جوانی و بلوغ از مراحل تکاملی پهنه گسلی امتدادلغز درابعاد پهنه گسلی تعریف می‌شود اما با توجه به تعمیم مراحل تکاملی پهنه امتدادلغز به قطعه گسلی امتدادلغز (بند ۲ از بخش۳-۳) قابل تعقیب در ابعاد قطعه گسلی نیز می باشد.

۳-۷- تبیین آزمایشگاهی مهاجرت گسل نخستین و پسین

اکنون تجربه آزمایشگاهی پدیده مهاجرت گسل در پهنه‌های امتدادلغز بعد از تجربه صحرایی آن پدیده انجام می‌گیرد تا از این رهگذر تاثیر برخی عوامل شناخته شده بر آن پدیده (بخش ۳-۴-۴) و نیز بعد چهارم (زمان) موضوع مورد بحث در حد شرایط آزمایشگاهی تحقیق گردد. با این هدف و با کمک دستگاه شبیه ساز حرکت امتدادلغز و با استفاده از گل رس به‌عنوان ماده مناسب آزمایشگاهی (Woodcock & Schubert, 1994; Davis & Raynolds, 1996) مراحل پیشنهادی در تکامل پهنه گسلی امتدادلغز (بخش ۳-۲) در شرایط مختلف مورد تحقیق قرار گرفتند که در ادامه این بخش به سه مورد اشاره شده است.

چهار نکته مشترک در خصوص شکلهای ارائه شده در این بخش لازم به‌ذکر است: یکم اینکه واحد مقدار عددی ارایه شده برای مقیاس خطی شکلها، سانتی‌متر است. دوم اینکه تفاوت آن مقدار عددی با ۲۶/۵ (که طول نمونه بکر به سانتی‌متر است) معرف مقدار جا به‌جایی راستگرد رخ‌داده روی نمونه است. سوم اینکه ضخامت نمونه گل رس ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. چهارم اینکه بخش A از شکلهای ارائه شده، وضعیت نمونه گل رس را نشان می‌دهد و بخش B، طرح شکستگیهای رخ‌داده در نمونه گل رس را به تصویر می‌کشد.

۳-۷-۱- آزمایش با گل رس همگن

۳-۷-۲- آزمایش با نمونه گل رس همگن (نمونه مورد استفاده در بخش ۳-۷-۱) در حالت حضور سطح ناپیوستگی

در این نمونه سطوح جدایشی به عمق ۷ میلی‌متر به منظور شبیه سازی سطوح ناپیوستگی طبیعی کم عمق تعبیه شده است.

به دلیل اختصار و نیز تشابه نتایج ادامه جابه‌جایی با نتایج بخش ۳-۷-۱، از ارائه نتایج مراحل بعدی آزمایش در این بخش صرفنظر می‌گردد.

۳-۷-۳- آزمایش با دو نمونه گل رس همگن با رطوبت مختلف در مجاورت یکدیگر

در این مرحله از دو نوع گل رس با خصوصیت نرم (مرطوب) و سخت (خشک) استفاده شده که با هندسه متنوع مرزی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.

۳-۷-۴-خلاصه نتایج تجربه آزمایشگاهی دو نوع مهاجرت گسلی نخستین و پسین

۱) در خلال مشاهده آزمایشگاهی سیر تکاملی پهنه گسلی امتدادلغز، شواهدی برای تبیین آزمایشگاهی مهاجرت گسلی نخستین به‌دست آمد به طوری‌که آزمایش بخش ۳-۷-۱ (شکلهای ۹ تا ۱۳) و بخش ۳-۷-۳ (شکلهای ۱۶ تا ۱۹) به‌خوبی معرف مهاجرت گسلی نخستین است. در آن بخشها مشخص است که پس از مرحله جنینی اولاً برخی شکستگیها بیشتر از برخی دیگر رشد می‌کنند و یا به سخنی دیگر، برخی شکستگیها ازنظر رشد از برخی دیگر عقب می‌مانند و دوم اینکه پس از وقوع پیوند شکستگیها، پاسخگوی مقدار جا به‌جایی وارده به نمونه عمدتاً شکستگیهای به‌هم پیوسته می باشند. این دو مورد تعریف مهاجرت گسلی نخستین(مهاجرت توسعه محور یا مهاجرت در جهت کاهش شکستگیها)است(بخش ۳-۶-۱و۳-۶-۲).

۲) با توجه به بخش ۳-۷-۲ (شکل ۱۴) و مقایسه آن با بخش ۳-۷-۱ (شکل ۹)، وابستگی تنوع و تعدد شکستگیهای رخ‌داده در مرحله جنینی به سطوح ناپیوستگی از قبل موجود در نمونه آزمایشگاهی واضح است به‌طوری که نحوه پاسخ نمونه به جا به‌جاییهای رخ‌داده در مرحله جوانی و بلوغ را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این زمینه باید توجه داشت که سطوح ناپیوستگی طبیعی در پی‌سنگ که منجر به رخداد قطعات گسلی متنوع در مرحله جنینی پهنه گسلی امتدادلغز می‌شود، منحصر به مقیاس ماکروسکوپی

www.SID.ir

Archive of SID

نیست، بلکه با توجه به بند ۴ بخش ۳-۳، سطوح ناپیوستگی مزوسکوپی ومیکروسکوپی نیز به تعداد بسیار زیادتر از مقیاس ماکروسکوپی، در اثر تحمل و تجربه تنشهای قبلی وارده بر پهنه شکل می‌گیرند که محیط سنگی را ناهمسانگرد می‌سازند. این مهم با توجه به بند ۵ بخش ۳-۳ باعث تفاوت در پاسخ توده سنگی در مقیاس ماکروسکوپی خواهد شد. پس چنانکه در بخش ۳-۲-۱ و نیز بخش ۳-۴-۴ ذکر شد، تنوع و تعدد قطعات گسلی در مرحله جنینی وابستگی شدیدی به تاریخچه دگرشکلی قبلی توده سنگی دارد چه این تاریخچه در مقیاس ماکروسکوپی واضح باشد و چه در مقیاس مزوسکوپی و میکروسکوپی مبهم و ناپیدا باشد.

۳) با توجه به بخش ۳-۷-۳ حضور توده‌های سنگی شکل پذیر در مسیر انتشار شکستگیها باعث شکل گیری ساختارهای شکل پذیر در آن توده می‌گردد و نیزدر صورت قابل ملاحظه بودن حجم توده شکل پذیر باعث انحراف تمرکز دگرشکلی لرزه‌ای به‌سمت سطح حد فاصل توده سنگی شکنا و شکل پذیر می‌شود (شکل ۱۹).

۴) در خلال مشاهده آزمایشگاهی سیر تکاملی پهنه گسلی امتدادلغز، شواهدی برای تبیین آزمایشگاهی مهاجرت گسلی پسین حاصل شد که در شکلهای ۱۱ تا ۱۳ آمده‌اند. در این شکلها اولاً تنوع و تعدد شکستگیها در محل برقراری پیوند میان شکستگیها واضح است و این همان مهاجرت تولید محور یا مهاجرت در جهت افزایش تعداد شکستگیهاست. دوم اینکه با توجه به بخش ۳-۶-۱، چنانچه ارتعاشات حاصل از رخداد دگرشکلی لرزه‌ای روی دو قطعه گسلی کنار هم به‌طور همزمان، در محل برقراری پیوند دو قطعه قابل شبیه سازی باشد، به یقین خردشدگی محل پیوند و در واقع تنوع و تعدد شکستگیها در آن محل بیشتر خواهد بود.

نتیجه‌گیری

موضوع مهاجرت گسل در پهنه‌های گسلی امتدادلغز در سه حیطه نظری، طبیعت و آزمایشگاه مورد شناسایی قرار گرفت. این موضوع با توجه به شواهد حاصل از طبیعت محدود به تعریف Stewart&Hancock(1994) نیست، بلکه در پهنه‌های امتدادلغز در ابتدا تعریفی از مهاجرت گسلی باید صورت گیرد، به این ترتیب که طی آن، یک سطح گسلی از پهنه فعال گسلی حذف شده و فعالیت آن به سطح گسلی دیگر هم عرض، منتقل می‌شود. این مهاجرت مقدم بر مهاجرت مطرح شده توسط Stewart&Hancock(1994) است و لذا به‌ترتیب مهاجرت گسلی نخستین و مهاجرت گسلی پسین نام می‌گیرند.

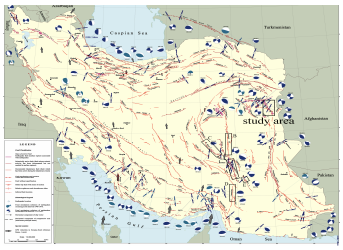
مهاجرت گسلی نخستین با در نظر گرفتن سیر تکاملی پهنه گسلی امتدادلغز، در دو مرحله جوانی و بلوغ و به دو نوع اولیه وثانویه با سازوکار پیشرونده و ناپیشرونده صورت می‌گیرد که به ترتیب منجر به حذف تنوع و تعدد قطعات گسلی و در نتیجه پایان نسبی بحث قطعه‌بندی گسل (fault segmentation) در آن پهنه می‌شود. مهاجرت گسلی مذکور در چهار مقیاس میکرو، مزو، ماکرو و مگاسکوپی در پهنه برشی شکنا نیز قابل تعریف است. مهاجرت گسلی نخستین دارای دو ویژگی است، اول اینکه برای آن مهاجرت به‌سوی محل وقوع انتشار بهینه است و دوم اینکه مهاجرت نخستین هم علامت با انتشار است، پس این مهاجرت گسلی بسته به انتشار گسلی است.

از دیدگاه مهاجرت گسلی نخستین، مهاجرت گسلی پسین در مناطق پیوند طولی دو قطعه گسلی (از نوع پیوند سخت) زمانی رخ می‌دهد که تفاوت هندسه و جا به‌جایی مکانی دو قطعه وجود داشته باشدکه منجر به تعدد سطوح گسلی می‌گردد. رخداد مهاجرت پسین در ابعاد قطعه گسلی است چنانکه مهاجرت نخستین در ابعاد پهنه گسلی رخ می‌دهد.

با نگرشی دیگر می‌توان موضوع مهاجرت گسل را به‌طور جامع‌تر در دو حیطه – یکی مهاجرت گسلی با جهت تولید سطح گسل جدید و دیگری مهاجرت گسلی با جهت توسعه سطح گسل موجود، بیان کرد. مهاجرت گسل تولیدمحور ناظر به مرحله ایجاد سطح گسل جدید است و مهاجرت گسلی توسعه محور ناظر به مرحله رشد و گسترش سطح گسل موجود است. به این ترتیب هر دو مهاجرت فوق در ابعاد پهنه و قطعه گسلی قابل تعقیب می‌باشند.

سپاسگزاری

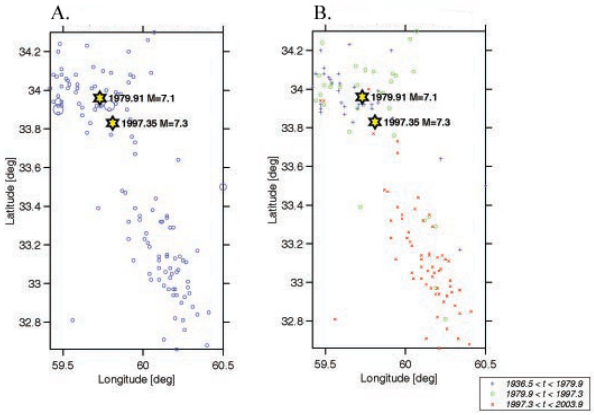
از بخش علوم زمین دانشگاه شیراز بویژه استاد ارجمند آقای دکتر احمد زمانی که امکان انجام این تحقیق را فراهم نموده و نیز زحمت بازبینی متن را به‌عهده داشتند قدردانی می‌گردد. همچنین از همراهی بیدریغ آقای مهندس جمال روشن روان ریاست محترم سازمان زمین شناسی- مرکز شمال خاور کشور در تصحیح نقشه گسلهای منطقه صمیمانه سپاسگزاری می گردد.



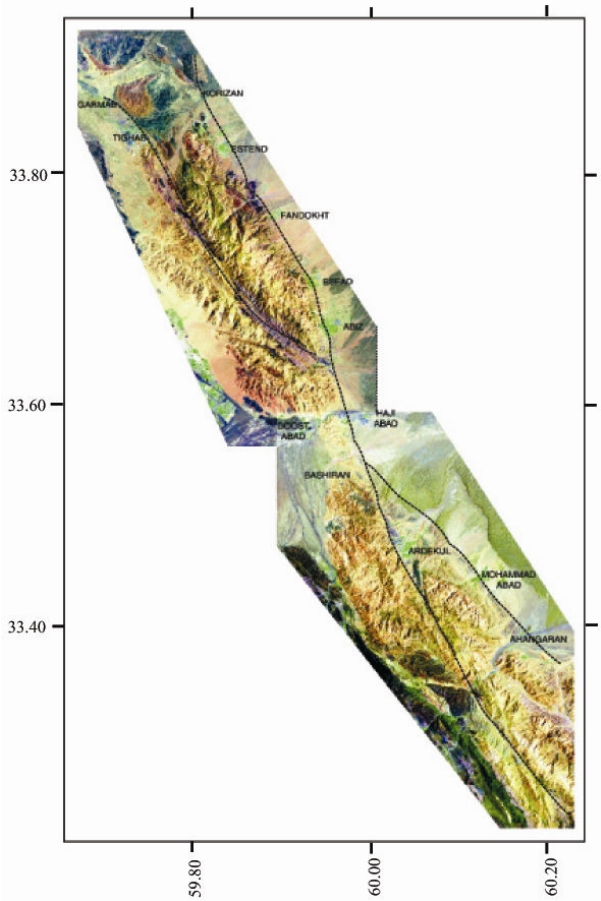
شکل ۱- نقشه گسلهای فعال ایران (حسامی و دیگران، ۱۳۸۲) براساس این نقشه، منطقه مورد مطالعه یکی از مناطق فعال و دارای گسل زمین لرزه در ایران است. توضیح چهارگوشهای A ، B ، C ، D و E در متن بخش ۳-۵-۲ آمده است.

www.SID.ir

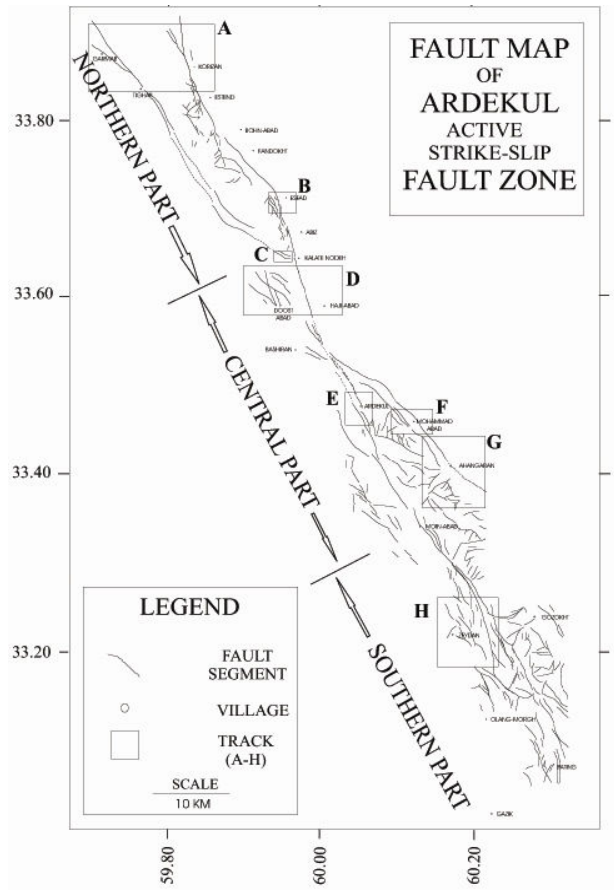
Archive of SID



شکل۲-زمین‌لرزه‌های‌رخداده در منطقه‌مورد مطالعه‌و اطراف (IIEES,ISC,USGS) (به‌دلیل خطای داده‌های لرزه‌ای در فلات ایران (Jackson&Mackenzie, 1984) جستجوی داده‌ها در محدوده‌ای فراتر از منطقه مورد مطالعه صورت گرفته است). A: در این بخش زمین‌لرزه‌ها براساس بزرگی با توجه به قطر دایره‌ها) به ۴ دسته تقسیم شده‌اند: ۱- زمین‌لرزه‌های با بزرگی کوچک‌تر از ۵/۵ ریشتر ۲- زمین‌لرزه‌های با بزرگی بزرگ‌تر از ۵/۵ ریشتر ۳- زمین‌لرزه‌های با بزرگی بزرگ‌تر از ۶/۵ ریشتر ۴- زمین‌لرزه‌هایبا بزرگی بزرگ‌تر از۷ ریشتر. B: در این بخش زمین‌لرزه‌ها براساس زمان رخداد طبق راهنمای نقشه به ۳ دسته تقسیم شده‌اند : ۱- رخدادهای پیش از زمین‌لرزه بزرگ سال ۱۹۷۹ میلادی، ۲ - رخدادهای بین زمین‌لرزه‌های بزرگ سال ۱۹۷۹ و ۱۹۹۷ میلادی که به عنوان پیش‌لرزه و پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه اصلی سال ۱۹۷۹ میلادی می‌توانند مطرح باشند، ۳- رخدادهای پس از زمین‌لرزه سال ۱۹۹۷ میلادی که به‌عنوان پیش‌لرزه و پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه اصلی سال ۱۹۹۷ میلادی می‌توانند مطرح باشند.



شکل۳- تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های لندست ETM +2002 در این تصویر، خطواره‌های غالب گسلی در دو روند NW-SE و NNW-SSE قابل مشاهده است.



شکل۴- نقشه گسلهای منطقه مورد مطالعه

www.SID.ir

Archive of SID

نگاره ۱- نمایی از تعدد پرتگاههای گسلی در خاور روستای گرماب
عرض پرتگاه گسلی مرکب کمتر از ۱۰۰ متر است

نگاره ۲- نمایی از جا به‌جایی و محل عبور قطعه گسل قدیمی در نزدیکی
گسل اصلی واقع در باختر روستای اسفاد

نگاره ۳ - نمایی از پرتگاه گسلی در باختر کلاته نوده

نگاره ۴- نمایی از تعدد پرتگاه گسلی در باختر کلاته نوده به موازات قطعه حاضر در نگاره ۳ عرض پرتگاه گسلی مرکب کمتر از ۲۰۰ متر است.

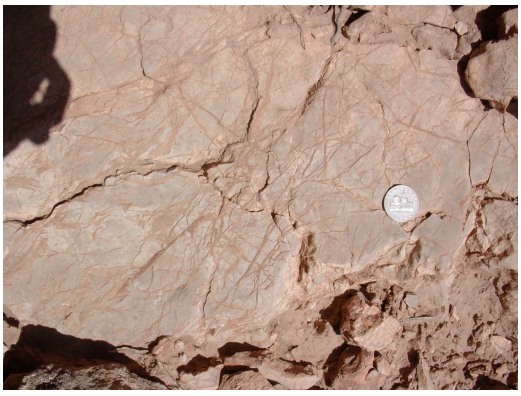
www.SID.ir

Archive of SID

نگاره ۵- نمایی از دوقطعه گسلی قدیمی در باختر گسل اصلی و شمال روستای دوست آباد

نگاره ۶- نمایی از ۳ پرتگاه گسلی در کوهستان در باختر روستای اردکول عرض پرتگاه گسلی مرکب کمتر از ۵۰ متر است.

نگاره ۷- نمایی از تعدد پرتگاههای گسلی در باختر روستای محمد آباد عرض پرتگاه گسلی مرکب کمتر از ۲۵۰ متر است

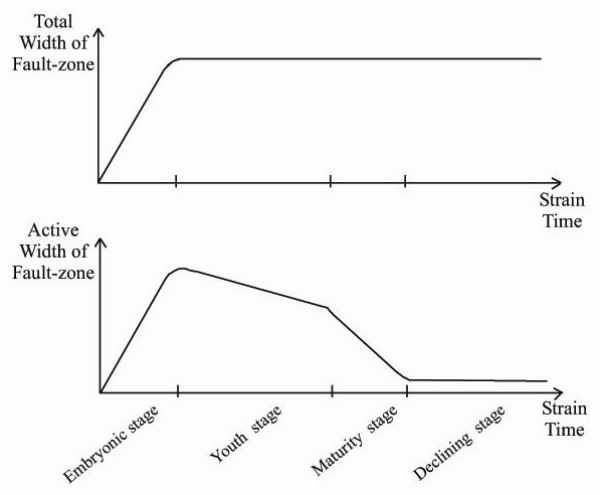


نگاره ۸- نمونه‌ای از گسل سنگ در محل گسل (باختر روستای اردکول)
(نمونه برداری شده از شمال روستای دوست آباد)

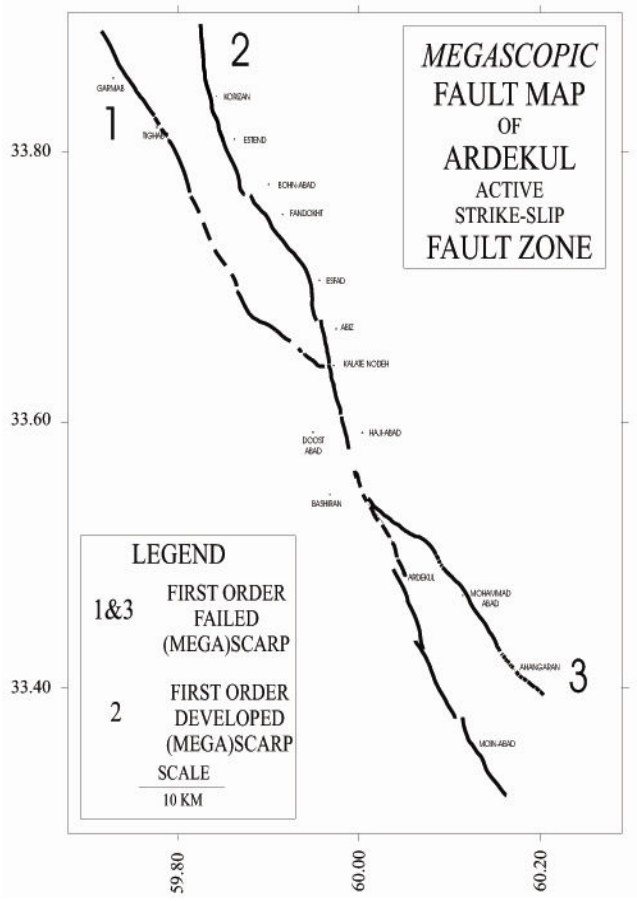
نگاره ۹- نمونه‌ای از یک گسل سنگ

www.SID.ir

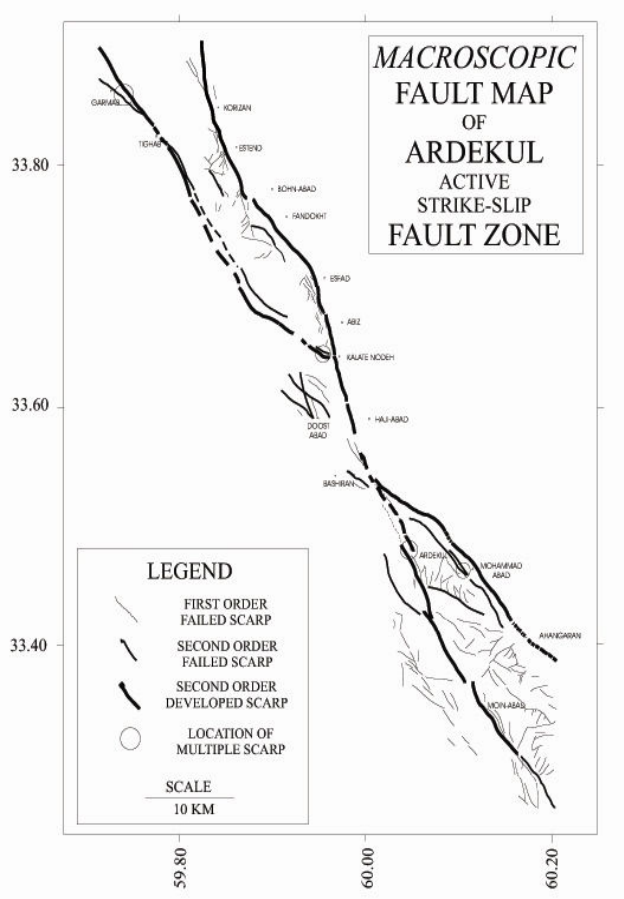
Archive of SID



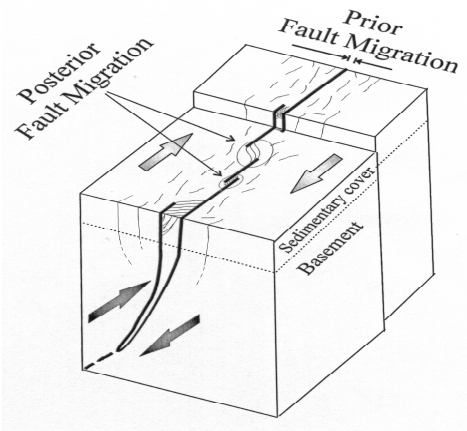
شکل ۵- تغییرات پهنای کلی و فعال پهنه گسلی در سیر تکاملی پیشنهادی. شیب خطوط و طول دوره‌های تکامل چهارگانه مبنای کمی ندارد و تنها به طور نسبی با توجه به بخش ۳-۴-۵ اختیار شده‌اند



شکل۶- انواع پرتگاههای گسلی منطقه مورد مطالعه از دیدگاه موضوع مهاجرت گسل در مقیاس ماکروسکوپی



شکل۷- انواع پرتگاههای گسلی منطقه مورد مطالعه از دیدگاه موضوع شکل مهاجرت گسل در مقیاس مگاسکوپی

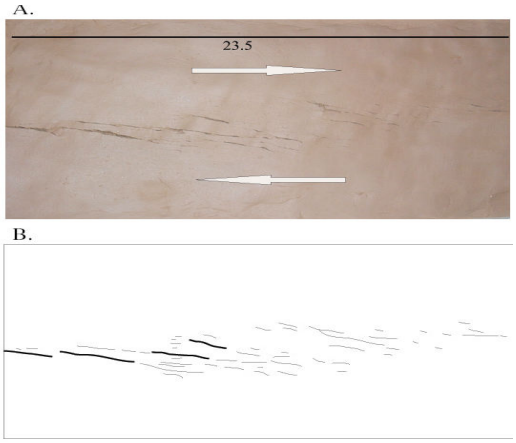


۸- محدوده مکانی رخداد مهاجرت گسلی نخستین و پسین در سه بعد (برای توضیح بیشتر به متن مراجعه شود)

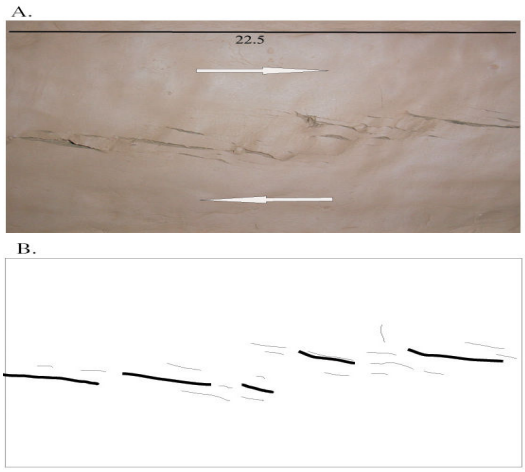
www.SID.ir

Archive of SID

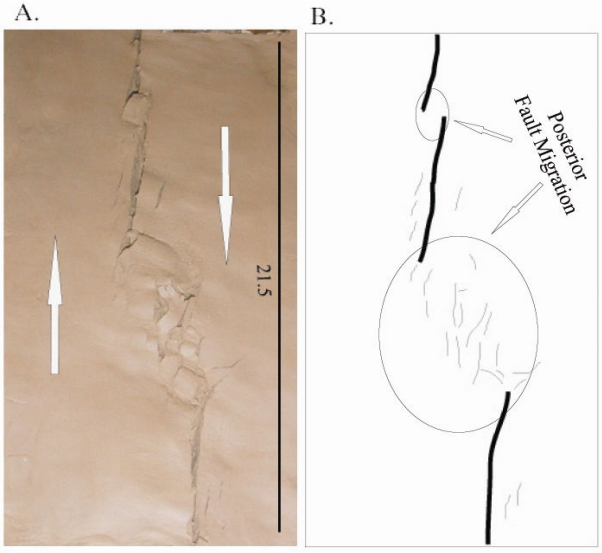
شکل ۹- مرحله جنینی یا مرحله زایش (هسته زایی) شکستگیها در این شکل تنوع و بخصوص تعدد شکستگیها واضح است.



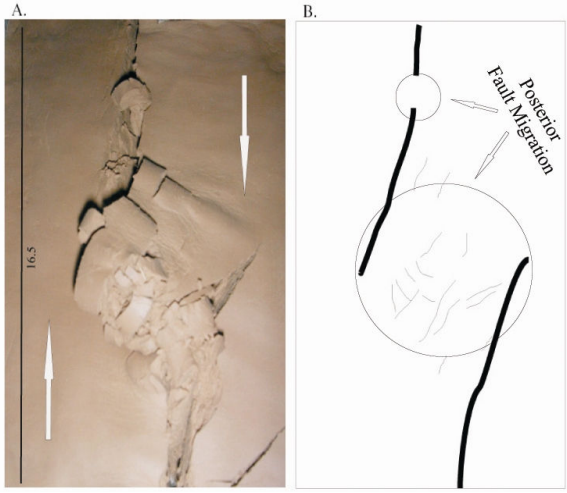
شکل ۱۰- مرحله جوانی یا مرحله رشد (انتشار سخت) شکستگیهادر این طور مرحله به مشخص برخی شکستگیها بیشتر از بقیه رشد کرده‌اند.



شکل ۱۱- مرحله بلوغ یا مرحله برقراری پیوند میان شکستگیها (انتشار نرم) در این مرحله به طور مشخص برخی شکستگیها با یکدیگر پیوند برقرار کرده و بالغ شده‌اند.



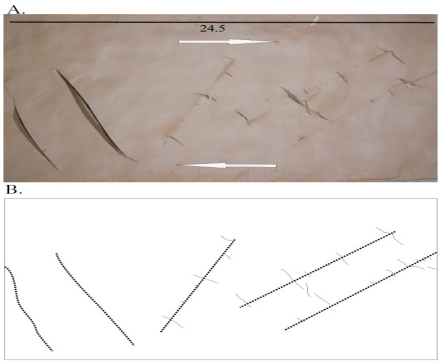
شکل ۱۲- پیشرفت در مرحله بلوغ یا فراگیر شدن پیوند شکستگیها در پهنه



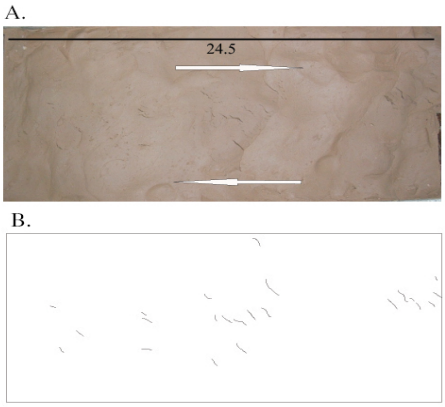
شکل ۱۳- مرحله پیری یا مرحله جدایش کامل بلوکهای دو طرف محل برش. در این مرحله نمونه مورد آزمایش مقاومت چندانی در برابر جابه‌جایی رخ‌داده انجام نمی‌دهد و این به معنای برقراری پیوند هندسی کامل میان شکستگیها است. نکته جالب توجه اینکه طرح سطحی شکستگیها هنوز ناپیوسته است.

www.SID.ir

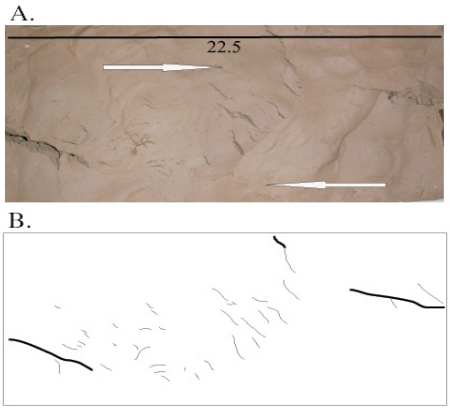
Archive of SID



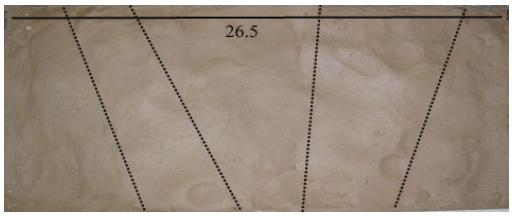
شکل ۱۴- مرحله جنینی یا مرحله زایش (هسته زایی) شکستگیها
در این شکل، تأثیر حضور سطوح جدایش و نیز هندسه آنها بر زایش شکستگیها (در مقایسه با شکل ۹) واضح است. دو سطح جدایش سمت چپ (که هندسه سطحی متفاوت از بقیه دارند) تنها بازشدگی نشان می‌دهند



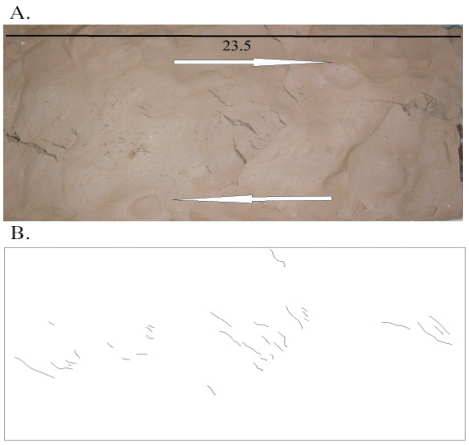
شکل ۱۶- مرحله جنینی یا مرحله زایش (هسته زایی) شکستگیها
در این شکل زایش شکستگیها همراه با جلوه ای از تنوع و تعدد تنها در نمونه گل رس سخت رخ داده است و علاوه بر آن هسته زایی برخی شکستگیها در محل مرز دو نوع گل رس انجام شده است.



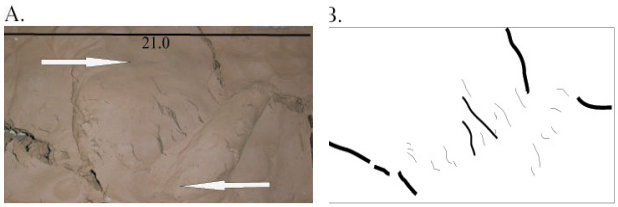
شکل ۱۸- آغاز مرحله بلوغ یا مرحله برقراری پیوند میان برخی شکستگیها (انتشار نرم)



شکل ۱۵- نمونه گل رس بکر و آماده برای آزمایش
مرز دو نوع گل رس نامبرده با خط چین نمایش داده شده است و مشابه سطوح ناپیوستگی بنیادی در پهنه است .
توضیح بیشتر اینکه در نمونه آماده شده دو نمونه گل رس نرم در میان سه نمونه گل رس سخت قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۷- مرحله جوانی یا مرحله رشد (انتشار سخت) شکستگیها
در این شکل دگرشکلی شکل پذیر نمونه گل رس نرم هنوز واضح است.



شکل ۱۹- پیشرفت مرحله بلوغ یا فراگیر شدن انتشار نرم شکستگیها در پهنه.
نکته جالب توجه اینکه شکستگی بالغ حاضر در بخش بالایی نمونه(شکلهای ۱۶تا۱۹) در محل مرز دو نوع گل رس زایش و انتشار یافته است و این در حالی است که این شکستگی کمترین همخوانی را با جهت جا به‌جایی رخداده دارد و نیز از دورترین مکان نسبت به محل رخداد جابه‌جایی برخوردار است. شایان ذکر است این مورد تأثیر حضور سطوح ناپیوستگیهای بنیادی در یک پهنه را بر پاسخ آن پهنه به تنش وارده نشان می‌دهد

www.SID.ir

Archive of SID

کتابنگاری

حسامی، خ.، جمالی، ف.، و طبسی، ه.، ۱۳۸۲- نقشه گسلهای فعال ایران، مقیاس: ۱/۲۵۰۰۰۰۰، پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

خطیب م. م.، ۱۳۷۹- تحلیل فرکتالی توزیع شکستگیها در گستره گسل لرزه‌زای اردکول، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال سوم، شماره سوم، صفحه ۱-۷.

شهریاری، س.، خطیب م. م.، ۱۳۷۶- تحلیل فرکتالی سیستم گسلی نهبندان، مجله علوم زمین، سال ششم، شماره ۲۳-۲۴، صفحه ۳۲-۳۹.

لی، ت.، و والاس ت.س.،۱۹۹۵- ترجمه: محمد رضا حیدریان شهری(۱۳۸۱)، لرزه‌شناسی مدرن جهانی، انتشارات دانشگاه فردوسی، مشهد.

References

Berberian, M., Jackson, J. A., Qorashi, M., Khatib, M. M., Priestly, K.,Talebian M., 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, Geoph.J.Int., 136, 671-694.

Berberian, M., Baker, C., Fielding, E., Jackson, J. A., Parsons, B.E., Priestly, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T.J., 2001- The March 14 1998 Fandoqa earthquake (Mw 6.6) in Kerman province, SE Iran : re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts, and the active tectonics of the Gowk fault zone, Geoph. J. Int., 146, 371-398.

Berberian, M.,Yeats, R.S., 2001- Contribution of archaeological data to studies of earthquake history in the Iranian plateau, JSG, 23, 563-584.

Bruhn, R. L., Yonkee, W. A., Parry, W.T., 1990- structural and fluid-chemical properties of seismogenic normal faults, Tectonophysics, 175, 139-157.

Cello, G., 1997- Fractal analysis of a Quaternary fault array in the central appenines, Italy, JSG, Vol:19, No:7, 945-953.

Cowie, P. A., Knipe, R. J., Main, I. G., Wojtal, S. F.,1996- Scaling laws for fault and fracture populations: analyses and applications, JSG, Vol:18, 135-383.

Davis, G. H., Raynolds S. J. ,1996- Structural Geology of Rocks and Regions, John Wiley, USA, 776p.

Davison, I., 1994 - Linked Fault Systems; Extensional, Strike-slip and Contractional, In: Continental deformation (edited by: P.L. Hancock), Pergamon Press, 121-142.

Engelder, T., 1994 - Brittle Crack Propagation, In: Continental deformation (edited by: P.L. Hancock), Pergamon Press, 43-52. Freund, R., 1974 - Kinematics of Transform and Transcurrent faults, Tectonophysics, 21, 93-134.

Fu, B., Ninomiya, Y., Lei, X., Awata, Y., 2004 - Mapping active fault associated with the 2003 Mw6.6 Bam (SE Iran) earthquake with ASTER 3D images, Remote Sensing of Environment, 92, 153-157.

Homberg, C., Angelier, J., Bergerat, F., Lacombe, O., 2004 - Using stress deflections to identify slip events in fault systems, Earth and Planetary Science letters, 217, Issues 3-4, 409-424.

IIEES, "International Institute of Earthquake Engineering and Seismology", Tehran, Iran, [on-line] <http://www.iiees.ac.ir/EQsearch> [07 march 2005].

ISC, "International Seismological Center", Newbury, Berkshire, UK, [on-line] <http://www.isc.ac.uk> [07 march 2005].

Jackson, J., Mckenzie, D., 1984- Actine tectonics of the Alpine-Himalayan belt between western Turkey and Pakistan, Geoph. J. R. Astr. Soc., 77, 185-264.

Plafker, G., 1976- Tectonic aspects of the Guatemala earthquake of 4 February 1976, Science, 193, 1201-1208.

Stewart, I.S. & Hancock, P.L., 1991- Scales of structural heterogeneity within neotectonic normal fault zones in the Aegean region. In: Characteristics of Active Faults (edited by Hancock, P. L., Yeats. R. S. & Sanderson, D. J.). JSG, 13, 191-204.

Stewart, I.S. & Hancock, P.L., 1994 - Neotectonics, In: Continental deformation (edited by: P.L. Hancock), Pergamon Press, 370-409.

Sylvester, A. G., 1988- Strike-slip Faults, Bull. Geol.soc. Am., 100, 1666-1703.

Tchalenko, J.S., 1970- Similarities between shear zones of different magnitudes, Bull. geol. soc. Am., 81, 1625-1640.

Tirrul R., Bell I.R., Griffis R.J., Camp, V.E., 1983- The Sistan suture zone of eastern Iran, Bull. geol. soc. Am., 94, 134-150.

Turcotte, D. L., 1992- Fractals and Chaos in Geology and Geophysics, Cambridge University Press, UK.

Twiss R.j., Moores E.M., 1992- Structural Geology, Freeeman and Company, USA, 532p.

USGS, "United States Geological Survey", USA, [on-line] <http://www.usgs.gov> [07 march 2005].

Walker, R., Jackson, J., 2002- Offset and evolution of the Gowk fault, S.E.Iran : a major intra-continental strike-slip system, JSG, 24, 1677-1698.

Woodcock, N. H., & Schubert, C., 1994- Continental strike-slip tectonics, In: Continental deformation (edited by: P.L. Hancock), Pergamon Press, 251-263.

* دانشکده علوم، بخش زمین شناسی، دانشگاه بیرجند، ایران

* Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Iran

www.SID.ir