

شبیه‌سازی آزمایشگاهی زون‌های برخوردی و تشکیل کمربندهای چین - راندگی به روش مدل‌سازی فیزیکی

صبا خدرزاده^{۱*} و عباس بحرودی^۲

^۱ مرکز مطالعات کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، کرج، ایران.

^۲ دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۴/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۰/۰۷

چکیده

مدل‌های جعبه ماسه به منظور پژوهش و بررسی چگونگی ایجاد دگرشکلی در خلال کوهزایی است. جسم سخت پیشرونده، به عنوان پوسته قاره‌ای غیر شکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شود که از یک طرف به سمت فرادیواره ماسه، که نشانگر پوسته ضعیف‌تر و شکل‌پذیر است، حرکت می‌کند. ستبرای اولیه ماسه و نیز زاویه سطح گوه سخت (rigid indenter) قابل تغییر است. در همه مدل‌ها در دو طرف سطح گوه بین پیش‌شکنج‌ها و پس‌شکنج‌ها و در بالای لبه پیشرو گوه پیشرونده، ماسه بالا رانده می‌شود. سرعت شکل‌گیری چین‌های شکنجی وابسته به ستبرای فرادیواره ماسه‌ای، شکل گوه فرورونده و نرخ ریزش سطحی پشت شبی است. تغییر ستبرای اولیه فرادیواره ماسه‌ای، کنترل‌کننده فاصله و سرعت به وجود آمدن چین‌های شکنجی است. هدف از انجام این کار آزمایشگاهی، بررسی و پژوهش در مورد کمربندهای رورانده، گوه‌های پیشرونده و نیز بررسی اثر شیب در زون‌های برخوردی و ایجاد راندگی‌ها و چین‌های مرتبط با آنها است و نیز مقایسه مدل آزمایشگاهی با مدل‌های طبیعی است.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی فیزیکی، گوه سخت، کوه‌شدگی، کمر بند چین - راندگی، زاگرس، ایران.

E-mail: saba_nika@yahoo.com

* نویسنده مسئول: صبا خدرزاده

۱- مقدمه

اوروژنی (Orogenesis) یک اصطلاح زمین‌شناسی از ریشه یونانی به معنی کوهزایی است که یکی از پیچیده‌ترین فرایندهای زمین‌ساختی شناخته شده در علوم زمین است. از نظر زمین‌شناسان صحرایی این واژه بیانگر دگرریختی نافذ پوسته زمین همراه با فازهای دگرگونی و فعالیت‌های آذرین مربوط به آن است (Dennis, 1967). طی برخورد قاره‌ای، پوسته بالایی شکننده و دگرریخت شده موجب توسعه یک گوه بالا آمده در مقطع عرضی می‌شود در حالی که سنگ‌های شکل‌پذیرتر در زیر سبب توسعه یک ریشه به سمت پایین می‌شوند. دو نوع برخورد در کوهزایی وجود دارد، یکی برخوردی که در آن پوسته کوهزاد که همگن و شکل‌پذیر است در صورتی که به سمت بالا حرکت کند، به عنوان کوه و بخش فرو رانده به سمت پایین، ریشه به شمار می‌آید (England et al., 1985). نوع دیگر برخورد، پوسته شکننده بالایی را که در یک محدوده گسل خوردگی بالا می‌آید، از پوسته شکل‌پذیر پایینی که به سمت پایین در حرکت است متمایز می‌کند (Davy & Cobbold, 1988).

مدل‌سازی فیزیکی از قرن نوزدهم برای بررسی ساختارهای زمین‌شناسی به کار برده شده، تا شناخت کمی و کیفی پیرامون مباحث زمین به دست آید. برتری مدل‌سازی فیزیکی این است که فرصت و امکان مناسب را برای پژوهشگر فراهم می‌کند تا پارامترهای مختلف در زمین‌شناسی را تحت اختیار و نفوذ خود قرار دهد. همچنین بررسی شرایط مرزها، اعم از واگرا یا همگرا، بسته به نیاز آزمایشگر می‌تواند مورد آزمایش قرار گیرد و بنابراین این روش‌ها فرصت مناسبی را برای بررسی تکامل ساختارهای سه‌بعدی یک مدل خاص پدید می‌آورند. تصاویر پی‌درپی از کینماتیک مدل، کمک قابل توجهی به تفسیر نمونه‌های اصلی در طبیعت خواهد کرد.

مدل‌های فیزیکی، در صورتی نمایانگر نمونه واقعی هستند، که مقیاس به کار برده شده برای آنها مناسب بوده و موادی که استفاده می‌شوند، رفتار رئولوژیکی مانند نمونه اصلی نشان دهند. از لحاظ مکانیکی، این نیاز وجود دارد که نیروهای سطحی (تنش‌ها) به تناسب نیروهای پیکره‌ای (گرانشی) به کار رود. از دیگر پارامترهایی که نیاز است به طور مناسبی شبیه‌سازی شوند عبارتند از چسبندگی، گرانشی، زمان،

چگالی و طول. مطابق موارد یاد شده تنها مواد خاصی برای استفاده در مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی پدیده‌های زمین‌شناسی مناسب هستند. این انتخاب به طور عمده بستگی به طول و مقیاس زمان بین نمونه اصلی و مدل دارد.

۲- روش بررسی

روش‌های مختلفی برای ساخت مدل‌های فیزیکی فرایندهای زمین‌ساختی بزرگ مقیاس مانند فرورانش، کافت‌زایی، گسترش در اثر نیروی گرانش، زمین‌ساخت دندان‌های و... به کار گرفته می‌شوند. برای مثال مدل‌سازی به روش گریز از مرکز سبب فهم بهتر نقش نیروی گرانش در دگرریختی پوسته زمین و سنگ‌کره می‌شود (Ramberg, 1967; 1981). برای مدل‌سازی ساختارهایی که در اثر فشارش (compression) پدید می‌آیند، روش‌های دیگری موجود است. به کارگیری روش‌های مدل‌سازی در یک قرن پیش، سبب فهم بهتر ساختارهای زمین‌شناسی شده است. تشابه زیاد بین چین‌هایی که به روش آزمایشگاهی به وجود می‌آیند با نوع طبیعی آنها، توانست اهمیت نیروی فشارش جانبی را در تشکیل رشته کوه‌های ژورا و آپالاش (Appalachian & Jura Montains) برای پژوهشگران آشکار سازد. با توسعه روش‌های مدل‌سازی، امروزه پژوهشگران قادرند دگرریختی شکننده و شکل‌پذیر را به طور جداگانه شبیه‌سازی کنند، البته تفاوت چندانی در روش مدل‌سازی آنها وجود ندارد بلکه تفاوت در نوع مواد مورد استفاده است.

در مدل‌سازی عددی یا فیزیکی فرایندهای زمین‌شناسی، به منظور ساخت یک مدل فیزیکی خوب از نمونه طبیعی لازم است قوانین مقیاس‌بندی رعایت شوند. اگر فقط مواد ترد (Brittle) در آزمایش به کار رود (مانند ماسه)، آزمایش‌ها مستقل از نرخ کرنش خواهند بود. مناسب‌ترین مواد برای مدل‌سازی دگرریختی شکننده در سنگ‌ها، مواد غیر چسبنده یا دانه‌ای (مانند ماسه، ذرات شیشه، شکر و...) هستند، که این مواد بر اساس نظریه شکستگی موهر کولومب دگرریخت می‌شوند.

در مدل‌سازی فیزیکی فرایندهای زمین‌ساختی بزرگ مقیاس، بیشتر مواد دانه‌ای

۳- بررسی مراحل مختلف کوتاه‌شدگی و مقایسه تصاویر

۳-۱- مرحله پیش از کوتاه‌شدگی

در این مرحله سطح مدل را با ماسه سیاه رنگ به طور کاملاً صاف پوشانده و سپس سطح مدل، با ماسه رنگی به شبکه‌هایی با ابعاد 1×1 سانتی متر تقسیم‌بندی شده است (شکل ۲).

۳-۲- کوتاه‌شدگی ۵٪ (Shortening 5%)

با شروع فشارش، کم‌کم لایه‌ها شروع به فشرده‌گی و بالا آمدن می‌کنند و آثار چین‌خوردگی در مدل آشکار می‌شود. با گذشت زمان ۲۳ دقیقه و ۵۴ ثانیه مدل به ۵٪ کوتاه‌شدگی می‌رسد. در این مرحله اولین گسل شکل گرفته و از دو طرف دچار خمیدگی شده و در انتها شاخه‌ای فرعی از آن منشعب می‌شود. در بخش جلوی گوه سخت، آثار فشرده‌گی و خمش ناشی از چین‌خوردگی به خوبی دیده می‌شود. دو طرف خط گسل به صورت دو نقطه با ماسه رنگی علامت‌گذاری شده است تا کوتاه‌شدگی در مراحل بعدی محسوس تر و با کولیس قابل اندازه‌گیری باشد (نقاط ۱ و ۲ در تصویر گرافیکی). تشکیل گوه رورانده در مقطع مدل دیده می‌شود. طول کل

مدل در این مرحله ۲۸/۵ سانتی متر بوده است. (شکل ۳- a, b, c)

۳-۳- کوتاه‌شدگی ۱۰٪ (Shortening 10%)

در این مرحله سه راندگی به خوبی مشهود است و گوه رورانده رشد بیشتری یافته است. در بخش جلوی گوه سخت، کشیدگی دیده می‌شود. طول کل مدل در این مرحله ۲۷ سانتی متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۴).

۳-۴- کوتاه‌شدگی ۱۵٪ (Shortening 15%)

در این مرحله چهار راندگی به خوبی دیده می‌شود. در اثر اعمال فشارش، مدل به تدریج بالا آمده و در مقطع عرضی شکلی محدب به خود می‌گیرد که این تحدب خود سبب ریزش ماسه‌ها به روی گوه سخت شده و در جلوی آن واریزه‌ها جمع می‌شوند. در جلوی گوه آثار کشیدگی و تبدیل مربع‌های شبکه به مستطیل کاملاً آشکار است. طول کل مدل در این حالت به ۲۵/۵ سانتی متر رسید (شکل ۵- a, b, c).

۳-۵- کوتاه‌شدگی ۲۰٪ (Shortening 20%)

در این مرحله چهار راندگی تکامل بیشتری یافته و به طور مشخص تری دیده می‌شوند. واریزه‌ها توسعه بیشتری یافته و کشیدگی شبکه‌های جلوی گوه سخت نمایان تر است و گسلش عادی در این بخش دیده می‌شود. در مقطع، مدل تحدب بیشتری را نسبت به مرحله پیش نشان می‌دهد. طول کل مدل در این مرحله ۲۴ سانتی متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۶- a, b, c).

۳-۶- کوتاه‌شدگی ۲۵٪ (Shortening 25%)

در این مرحله پنجمین گسل رانده نیز شکل گرفته، واریزه‌ها حجم بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند. باز هم در بخش جلوی گوه کشیدگی و گسلش عادی در شبکه‌ها دیده می‌شود. همچنین مدل در مقطع شکلی محدب و متقارن را نشان می‌دهد. طول کل مدل در این حالت ۲۲/۵ سانتی متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۷- a, b, c).

۳-۷- کوتاه‌شدگی ۳۰٪ (Shortening 30%)

در آخرین مرحله از کوتاه‌شدگی شش گسل راندگی و تعدادی گسل عادی در اثر کشیدگی یال چین، دیده می‌شوند. در این مرحله واریزه‌ها به بیشترین مقدار خود نسبت به مراحل پیشین رسیده‌اند. طول کل مدل در این مرحله ۲۱ سانتی متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۸- a, b, c).

۳-۸- بررسی برش‌های مختلف کوتاه‌شدگی ۳۰٪: بعد از آماده‌سازی نمونه، برای بررسی بیشتر چین‌ها و شکن‌هایی که طی ۳۰٪ کوتاه‌شدگی در این آزمایش ایجاد شدند، مقاطع عرضی از آن تهیه شده است. فواصل برش به دلخواه بوده و در این آزمایش ۱ سانتی متر در نظر گرفته شده که در مجموع ۱۰ مقطع از مدل به دست آمده که با قرار دادن مقیاس از هر مقطع عکس برداری شده است که دگرریختی ایجاد

مانند ماسه، برای شبیه‌سازی تغییر شکل شکننده سنگ‌ها به کار می‌رود. دلیل استفاده از مواد دانه‌ای این است که این گونه مواد رفتار نوع موهر-کولومب را نشان می‌دهند که در آن با افزایش فشار محصورکننده، مقاومت افزایش می‌یابد. از ویژگی‌های ماسه این است که در حضور تنش که گسل‌ها را پدید می‌آورد، کاهش چسبندگی مواد را به دنبال دارد (Krantz, 1991). افزون بر این، مواد دانه‌ای دارای ضریب اصطکاکی قابل قیاس با ضریب اصطکاک سنگ‌ها هستند و وجود چسبندگی ناچیز، آنها را برای مدل‌سازی فیزیکی مناسب می‌کند بویژه هنگامی که در آزمایش‌های مقیاس کوچک از جمله مدل‌های مقیاس پوسته‌ای و سنگ‌کره‌ای (و با نسبت تنش کوچک) استفاده می‌شوند. یکی از معایب مواد دانه‌ای این است که پهنه زون برش در مواد دانه‌ای، در مقایسه با پهنه برش در طبیعت، به نسبت بزرگ است و با افزایش اندازه دانه، افزایش می‌یابد و به همین منظور، هرچه اندازه دانه کوچک‌تر باشد مناسب‌تر است. افزون‌بر این، باید به خاطر داشته باشیم که رویداد گسلش در مواد دانه‌ای، پس از کرنش بیشتری نسبت به سنگ‌ها پدید می‌آید. برای مثال، ماسه خشک پس از تمرکز کرنش می‌تواند بالغ بر ۱۰٪ دگرریختی پراکنده شده را در پهنه‌های گسل خوردگی یا پهنه‌های برش بپذیرد (Benes & Davy, 1996)، در حالی که سنگ‌ها به طور معمول پس از تحمل حدود ۲٪ کرنش شروع به گسیختگی می‌کنند. بنابراین مواد دانه‌ای، می‌توانند مقدار قابل توجهی از کرنش پراکنده شده را پیش از ایجاد گسل خوردگی بپذیرند، که این امر را به دلیل سازماندهی دوباره دانه‌ها در فرارگیری آنها پیش از ایجاد گسلش می‌توان دانست.

۲-۱- مواد و ابزارهای مورد استفاده در این آزمایش

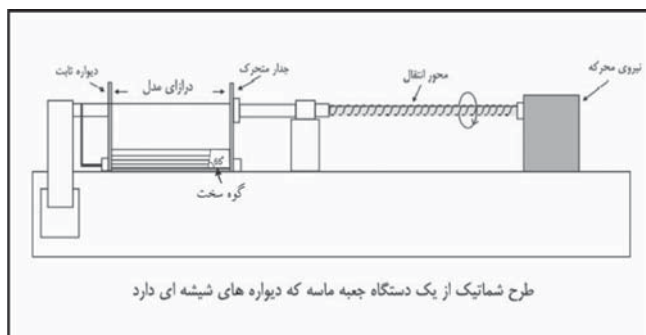
برای انجام این آزمایش از یک دستگاه فشارشی ساده شامل یک جعبه شیشه‌ای، یک گوه سخت با شیب ۶۵ درجه، ماسه ریزدانه با ضریب اصطکاک داخلی ۳۰ درجه، ماسه ریزدانه رنگ شده، کرومومتر، دوربین عکاسی و ابزارهای اندازه‌گیری مانند خط‌کش و کولیس استفاده شده است. ماسه‌های رنگی به منظور شاخصی برای تشخیص میزان تغییرات ایجاد شده ضروری است.

۲-۲- شرح آزمایش

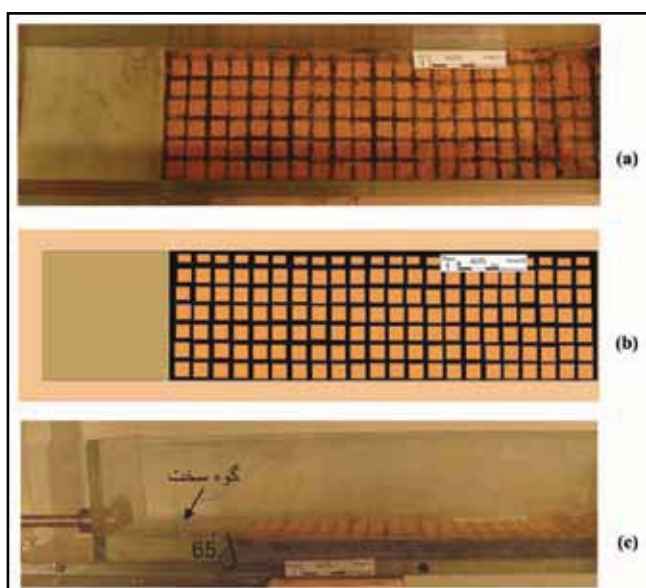
پس از آماده‌سازی جعبه شیشه‌ای، در کف جعبه دستگاه، ماسه‌های سفید به ستبراهای ۲-۳ میلی‌متر با دقت بسیار و به طور کامل یکنواخت و افقی ریخته شده است. در میان ماسه‌ها به منظور ایجاد تباين هر چه بیشتر و تشخیص تغییرات ایجاد شده، از ماسه‌های رنگی استفاده و سعی شده به طور کامل افقی و یکنواخت ریخته شوند تا بیانگر لایه‌های افقی در سطح زمین باشند. در نهایت ستبرای کل لایه‌های ماسه ۱۴ میلی‌متر، و ابعاد مدل ساخته شده در این آزمایش $10 \times 30 \times 1/4$ سانتی متر اندازه‌گیری شده است. همزمان با روشن کردن دستگاه، زمان آزمایش نیز توسط کرومومتر اندازه‌گیری می‌شود. هرچه سرعت کوتاه‌شدگی بیشتر باشد، میزان شباهت مدل با طبیعت و دقت انجام کار کاهش می‌یابد اگرچه زمان‌های زمین‌شناسی برای ایجاد تغییرات گسترده در طبیعت بسیار طولانی هستند به طوری که ایجاد شرایط زمانی در مدل‌سازی را مشکل می‌کند و سرعت انجام فرایندها در طبیعت بسیار طولانی است، اما با توجه به محدودیت ابعاد مدل، سرعت کوتاه‌شدگی 0.1 mm/s در نظر گرفته شد که کمترین حالت ممکن در دستگاه انجام این آزمایش است. با این سرعت، مدت زمان انجام آزمایش ۲ ساعت و ۲۸ دقیقه و ۵۵ ثانیه بود. میزان کوتاه‌شدگی که با اندازه‌گیری طول اولیه و طول ثانویه قابل برآورد است، در این آزمایش ۳۰٪ در نظر گرفته شد. به منظور ایجاد چسبندگی در ماسه، آب به مدل اضافه شد تا بتوان مدل را برش زده و مقاطع عرضی مدل را به خوبی بررسی کرد.

همانطور که در بالا اشاره شد، برای مقایسه بیشتر مراحل دگرریختی و کوتاه‌شدگی، در هر مرحله از مدل عکس برداری شده که در زیر به توضیح آنها پرداخته شده است. شکل ۱ طرح نمادین مدل و شکل ۲- نمونه را پیش از شروع فشارش نشان می‌دهد.

دگرریختی سطحی در پهنه‌های برخوردی را نمایش می‌دهد. مقاطع عرضی مدل حاکی از تمرکز بیشترین نیرو در بخش‌های میانی مدل است و همان‌طور که انتظار می‌رود با ادامه حرکت بر تعداد چین‌ها و گسل‌ها افزوده می‌شود. بررسی نمودارهای نرخ لغزش در این آزمایش بیانگر ثابت شدن میزان جابه‌جایی گسل‌ها با گذشت زمان است. بیشتر ساختارهایی که از داده‌های لرزه‌ای ژرف و بررسی‌های زمین‌شناسی سطحی بر روی رشته کوه آلپ به سن Eoalpine-Mesoalpine (۵۰ تا ۱۰۰ میلیون سال پیش)، در سوئیس و ایتالیا استنباط شده بودند (Bernoulli et al., 1990; Pfiffner et al., 1990; Schmid et al., 1996) سرانجام توسط Bonini et al. (1999) موردی طبیعی از نفوذ گوه سخت با شیب ۷۵ درجه پس از ۴۰٪ کوتاه‌شدگی حجمی را نشان دادند. بنابراین می‌توان این مدل آزمایشگاهی را با فاز کوهزایی آلپ پیشین و میانی قابل قیاس دانست اگرچه ۱۰ درجه تفاوت در میزان شیب آنها وجود دارد اما به طور کل هر دو از روند یکسانی در کوتاه‌شدگی پیروی می‌کنند و $\Phi > 45$ دارند (بر اساس شکل ۱۵). در ایران نیز می‌توان این مدل را به کمربند چین-راندگی زاگرس و نیز مکران نسبت داد چرا که بر اثر باز شدن دریای سرخ و خلیج عدن، صفحه عربی به مانند گوه سخت در این آزمایش عمل کرده و به سوی صفحه ایران در حرکت است (شکل‌های ۱۹ و ۱۸).



شکل ۱- طرح نمادین از مدل



شکل ۲- (a) سطح نمونه پیش از کوتاه‌شدگی (b) تصویر گرافیکی سطح مدل پیش از کوتاه‌شدگی و (c) مقطع نمونه

شده در مدل را به خوبی نشان می‌دهند. به منظور نمایش بهتر گسل‌ها و چین‌ها تصویر گرافیکی مربوط به هر مقطع نیز در کنار آن آمده است (شکل ۱۰). همان‌طور که دیده می‌شود، در مقاطع a و d از شکل ۱۰ که به ترتیب اولین و آخرین مقاطع هستند چین‌های تشکیل شده کوچک‌تر، و فاصله بین آنها کمتر است و این به دلیل کاهش تمرکز نیرو در بخش‌های کناری است. با توجه به مقاطع شکل ۱۰ همان‌گونه که انتظار می‌رود، اولین گسل دارای بیشترین شیب و آخرین گسل تشکیل شده دارای کمترین مقدار شیب هستند و به تدریج با افزایش کوتاه‌شدگی شیب گسل‌های قدیمی‌تر افزایش می‌یابد. بنابراین چنان‌که در نمودار شکل ۱۱ دیده می‌شود با کاهش سن گسل شیب سطح گسل نیز به تدریج سیری نزولی را نشان می‌دهد.

۴- رابطه بین ارتفاع گوه رورانده و درصد کوتاه‌شدگی

در اثر توسعه چین‌های مرتبط با گسل‌های معکوس، کوتاه‌شدگی جانبی ماسه منجر به بالا آمدن یک گوه رانده در جلوی جسم سخت می‌شود. تشکیل این گوه رانده به نسبت سریع به نظر می‌رسد، اما با گذشت زمان به آرامی توسعه می‌یابد و در این مدل به ستبرای فرادیواره (hanging-wall) و زاویه گوه سخت فرورونده بستگی دارد. در شکل ۱۲، رابطه بین ارتفاع گوه رانده (dh) و درصد کوتاه‌شدگی در این آزمایش به صورت نمودار نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود ارتفاع گوه رانده از بالای جسم سخت فرورونده اندازه‌گیری می‌شود.

۵- معرفی بخش‌های مختلف یک گوه رانده

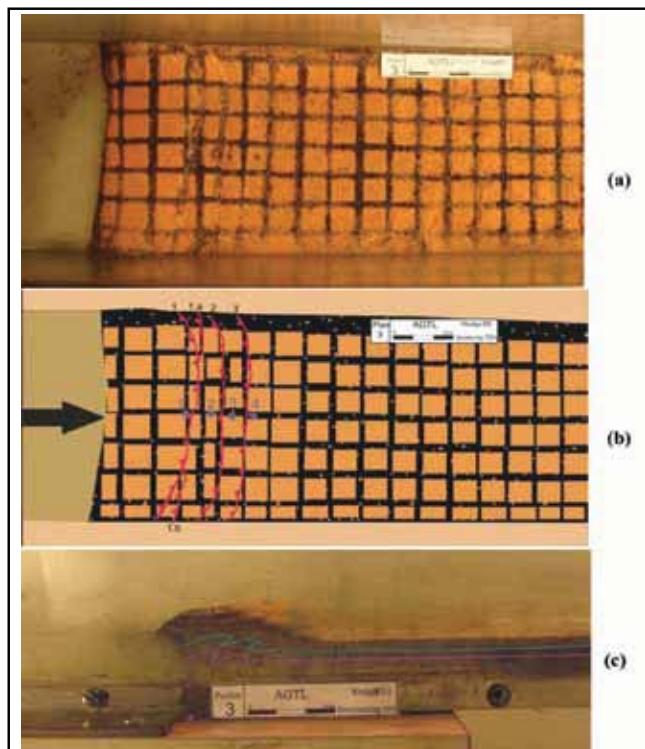
بخش‌های مختلف یک گوه رانده در شکل ۱۴ نامگذاری شده‌اند. با توجه به شکل، هر گوه رانده از دو بخش پیش‌شیب (Foreslop) و پس‌شیب (Backslop) تشکیل شده است، که منظور از پیش‌شیب، شیب توپوگرافی گوه رانده در بخش جلوی آن و پس‌شیب، شیب توپوگرافی گوه در بخش پشتی آن است. در اثر کوتاه‌شدگی و نفوذ جسم سخت، در هر گوه رانده دو نوع چین تشکیل می‌شود، Backkink یا چینی که در خلاف جهت حرکت گوه سخت پدید می‌آید و Forekink یا چینی که در جهت حرکت گوه سخت پدید می‌آید. با تداوم کوتاه‌شدگی، در بخش بالای گوه سخت، مقداری ماسه بر اثر نیروی گراویتی ریزش می‌کند و واریزه‌ها (Debris) را تشکیل می‌دهند. Φ زاویه شیب گوه سخت است که در این آزمایش ۶۵ درجه در نظر گرفته شده است. در شکل دو نقطه P و S وجود دارد، نقطه S نشانگر نوک گوه سخت و نقطه P (Propagation) نقطه انتشار راندگی‌ها (Forethrust, Bachthrust) را نشان می‌دهد. بسته به شیب گوه سخت فرورونده، این دو نقطه می‌توانند بر هم منطبق و یا غیرمنطبق باشند. اگر $\Phi < 30$ یا $30 < \Phi < 45$ باشد، این دو نقطه بر هم منطبق و $\Phi > 45$ مانند این آزمایش ($\Phi = 65$)، P بر هم منطبق نبوده و P جلوتر از S قرار می‌گیرد (شکل ۱۵).

۶- نرخ لغزش (Slip rate)

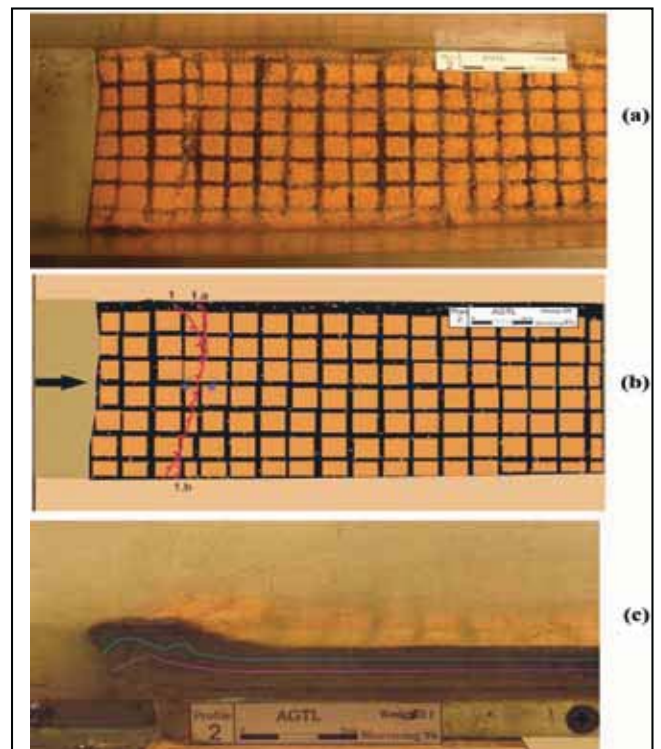
نرخ لغزش گسل‌ها، به میزان جابه‌جایی گسل‌ها در واحد زمان می‌گویند. در این آزمایش پس از ایجاد هر گسل میزان جابه‌جایی گسل اندازه‌گیری شده است. نرخ لغزش با گذشت زمان ثابت می‌شود و در اصطلاح گسل میرا می‌شود. این کار برای تمامی ۶ گسل موجود در این آزمایش انجام شده است و منحنی جابه‌جایی هر گسل نسبت به زمان در نمودار شکل ۱۶ نشان داده شده است که شیب این منحنی‌ها بیانگر نرخ لغزش است.

۷- نتیجه‌گیری (مقایسه مدل با نمونه‌های طبیعی)

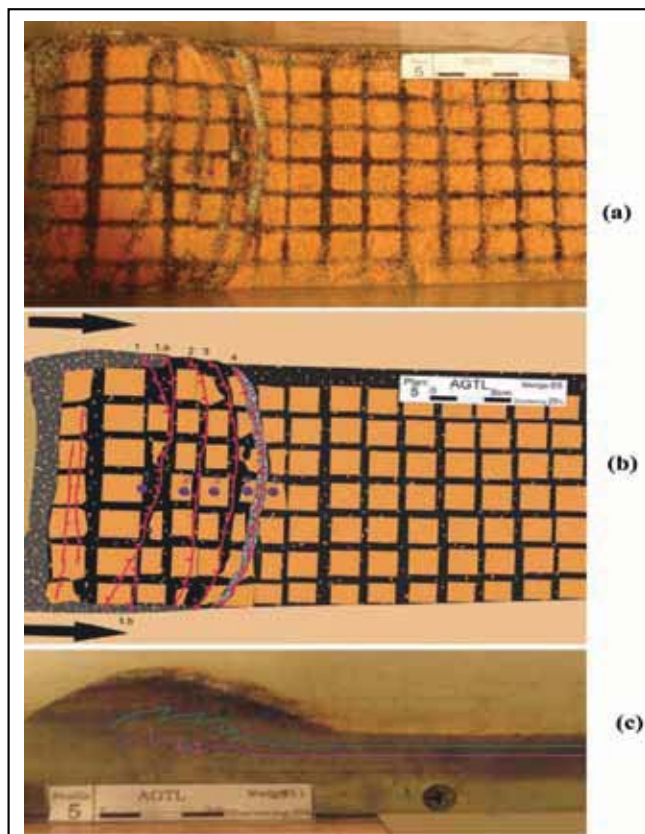
این آزمایش به فهم زمین‌ساخت در نواحی برخوردی در ایران (نظیر زاگرس و مکران) و دنیا و نیز پیدایش منشورهای افزاینده (accretionary prism) کمک می‌کند و



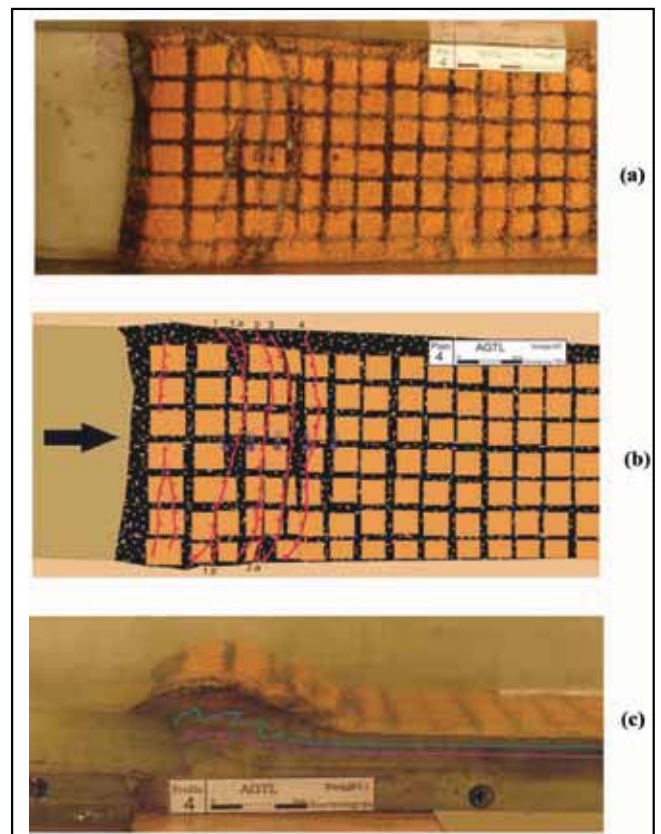
شکل ۴_ (a) سطح مدل در حالت کوتاه شدگی ۱۰٪ (b) طرح گرافیکی سطح مدل و نمایش گسل‌ها (c) مقطع مدل در حالت کوتاه شدگی ۱۰٪



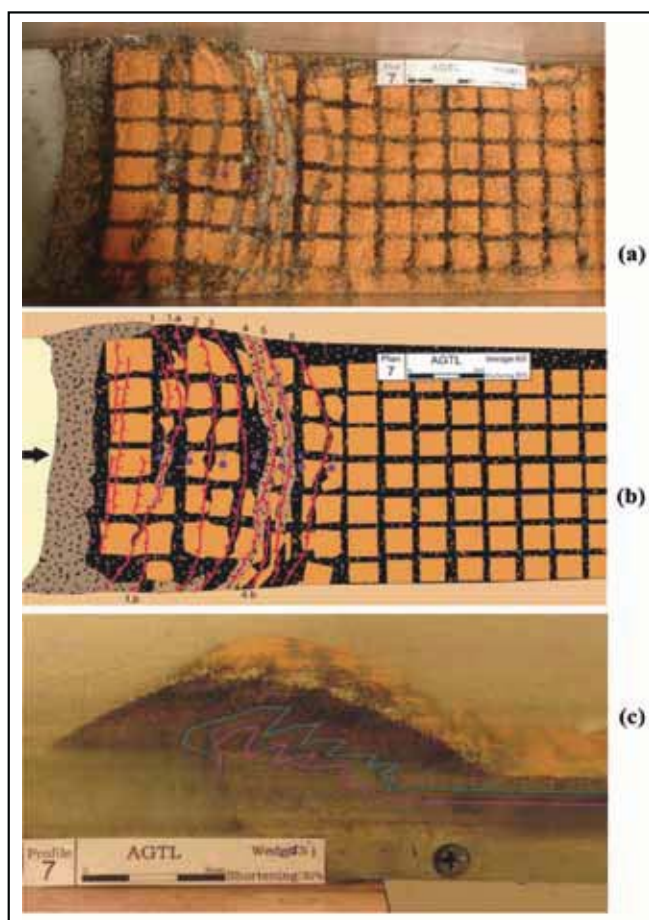
شکل ۳_ (a) سطح نمونه در کوتاه شدگی ۵٪ (b) طرح گرافیکی نمونه و نمایش گسل‌ها (c) مقطع مدل در زمان کوتاه شدگی ۵٪



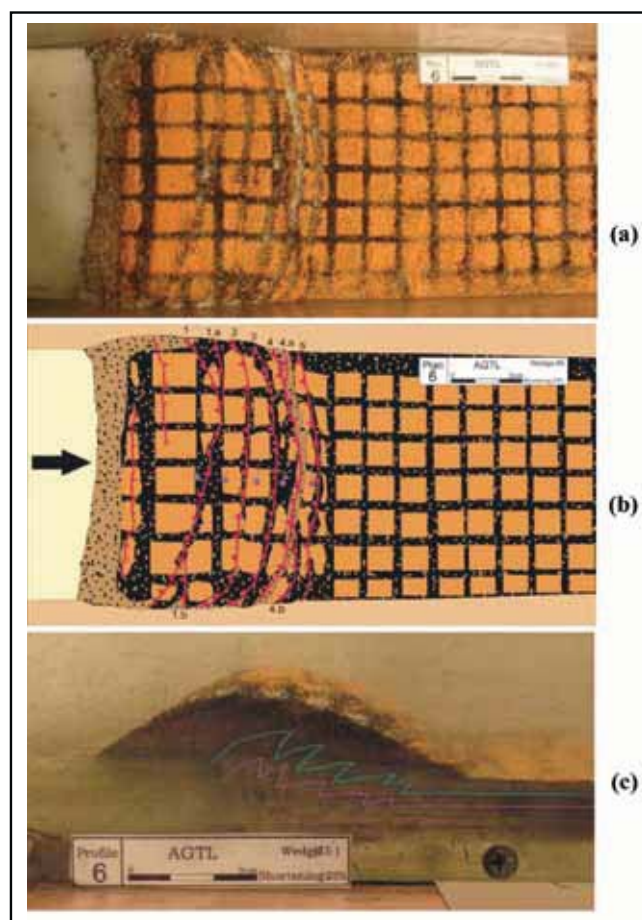
شکل ۶_ (a) سطح مدل در حالت کوتاه شدگی ۲۰٪ (b) طرح گرافیکی مدل و نمایش گسل‌ها (c) مقطع مدل در حالت کوتاه شدگی ۲۰٪



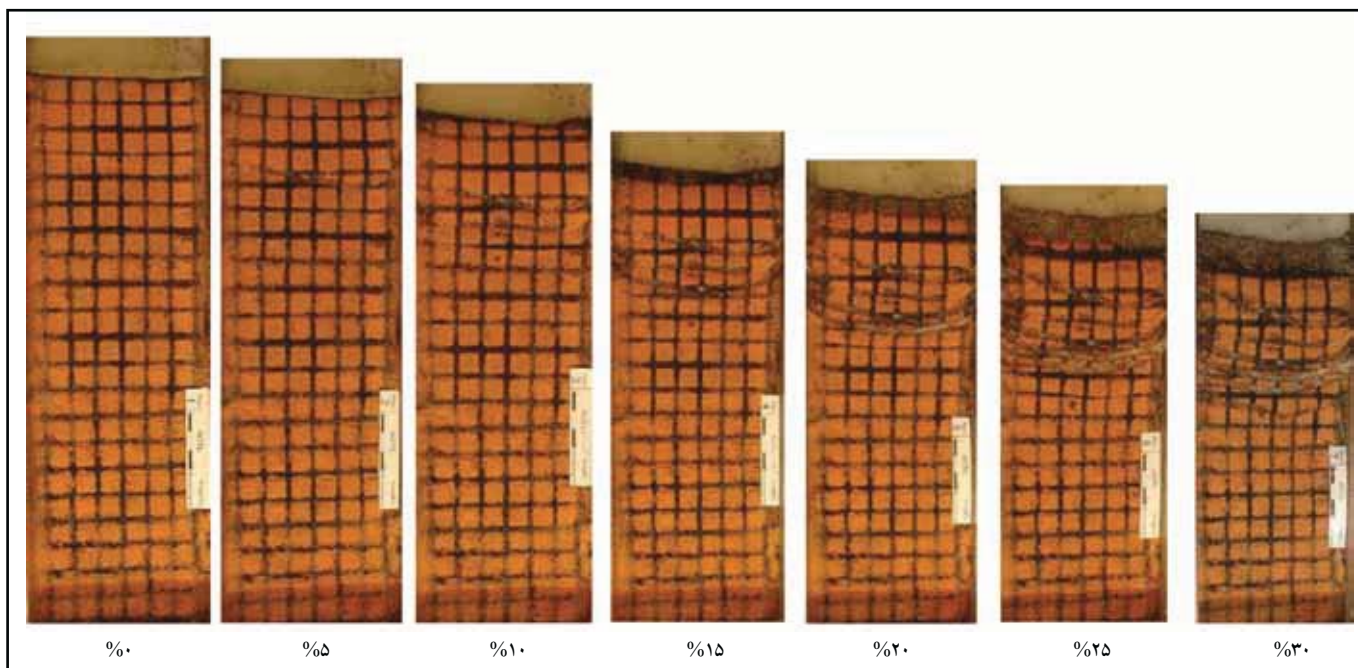
شکل ۵_ (a) سطح مدل در حالت کوتاه شدگی ۱۵٪ (b) طرح گرافیکی مدل و نمایش گسل‌ها (c) مقطع مدل در حالت کوتاه شدگی ۱۵٪



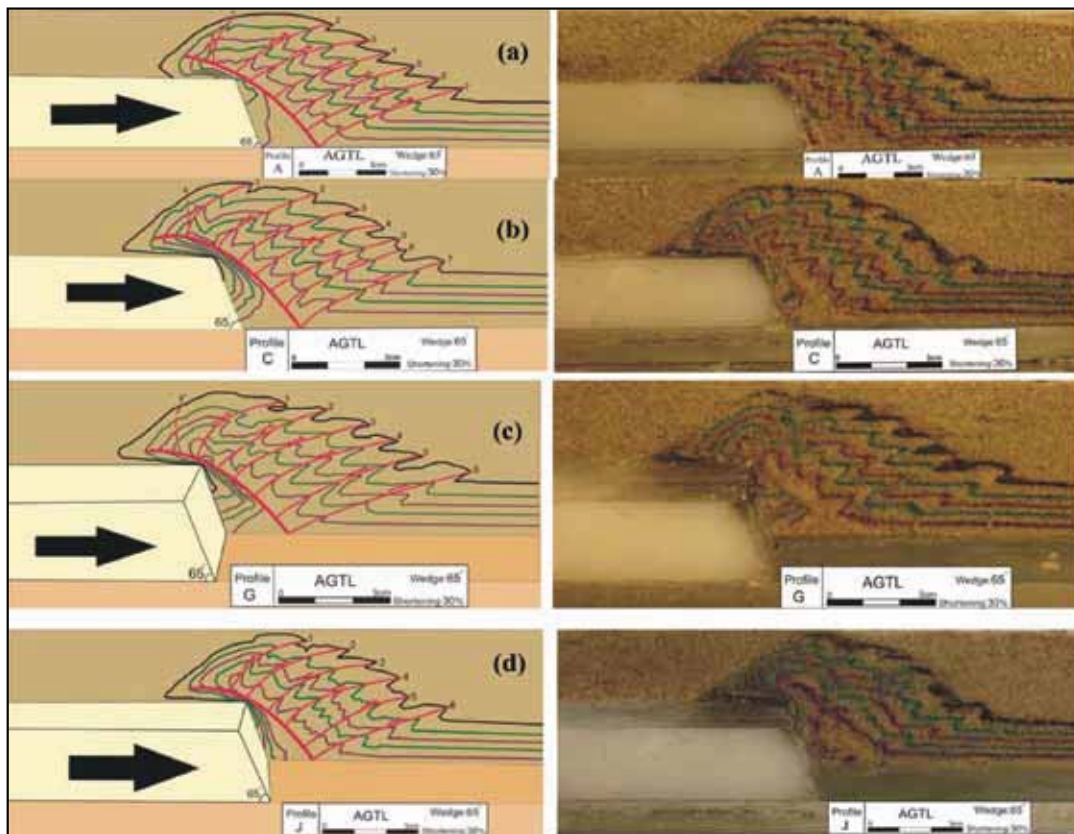
شکل ۸- (a) سطح مدل در حالت کوتاه شدگی ۳۰٪ (b) طرح گرافیکی مدل و نمایش گسل‌ها (c) مقطع مدل در حالت کوتاه شدگی ۳۰٪



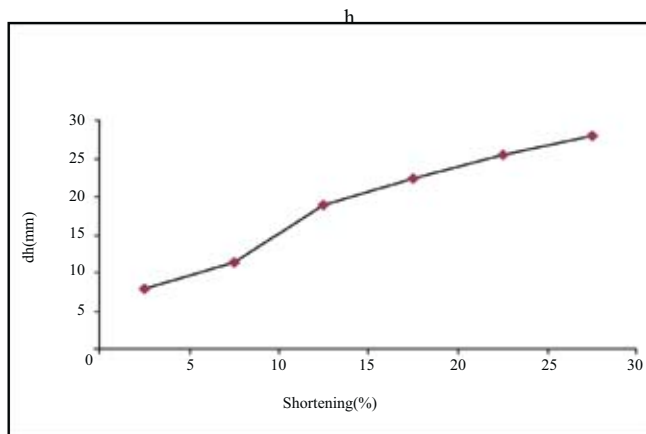
شکل ۷- (a) سطح مدل در حالت کوتاه شدگی ۲۵٪ (b) طرح گرافیکی مدل و نمایش گسل‌ها (c) مقطع مدل در حالت کوتاه شدگی ۲۵٪



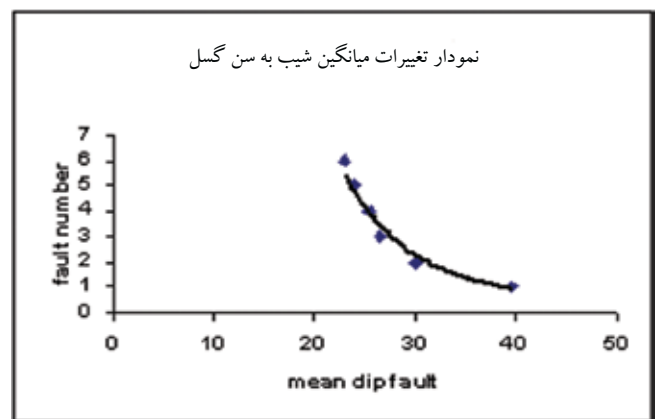
شکل ۹- مراحل کوتاه شدگی در یک نگاه



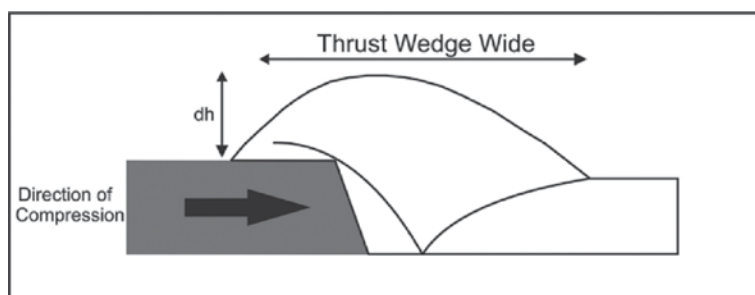
شکل ۱۰. مقطع‌های a و d به ترتیب اولین و آخرین مقطع از نمونه اصلی و سمت چپ تصویر گرافیکی مربوط به هر مقطع را نشان می‌دهد.



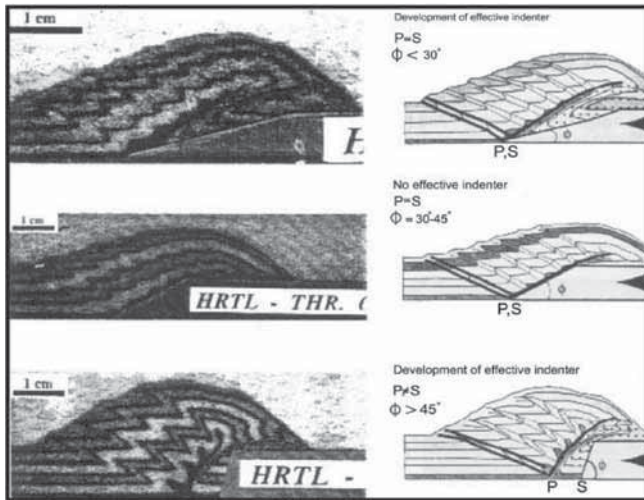
شکل ۱۲. نمودار رابطه بین درصد کوتاه شدگی و ارتفاع گوه رورانده (dh)



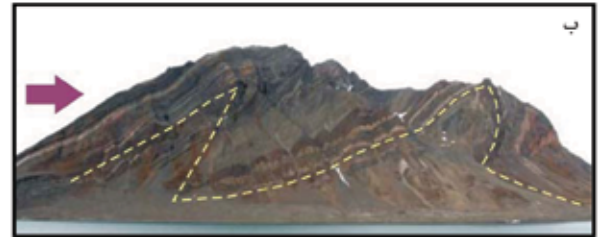
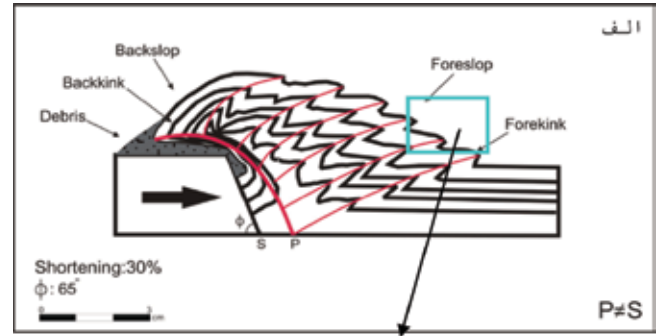
شکل ۱۱. نمودار رابطه بین شیب و سن گسل‌ها (گسل ۶ جوان‌ترین گسل است)



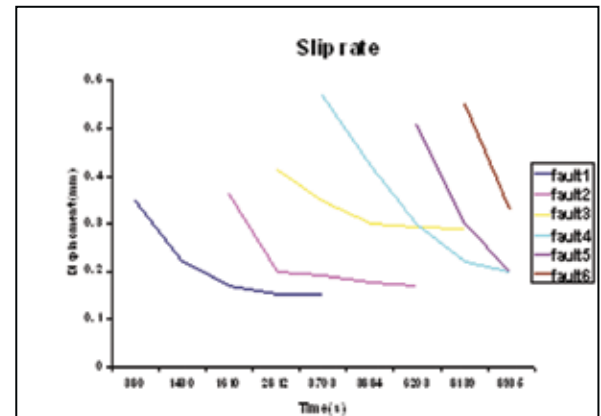
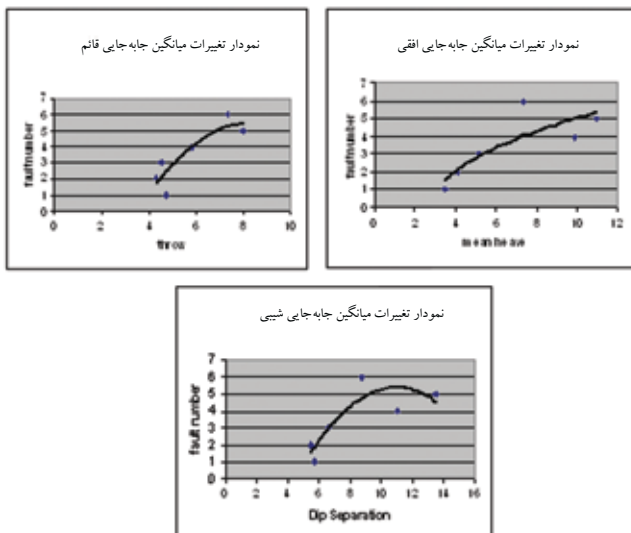
شکل ۱۳. نمایش پهنا و ارتفاع گوه رانده



شکل ۱۵_ تشکیل گوه‌های رورانده در سه حالت مختلف، با زوایای Φ متفاوت $\Phi < 30^\circ$ ، $\Phi = 30-45^\circ$ و $\Phi > 45^\circ$ ، در حالت اول و دوم نقاط S و P بر هم منطبق هستند (Persson, 2001).



شکل ۱۴_ الف) نمایش و نامگذاری قسمت‌های مختلف یک گوه رانده و ب) در طبیعت



شکل ۱۶- نمودار جابه‌جایی گسل‌ها نسبت به زمان (گسل ۱، قدیمی‌ترین گسل است)

شکل ۱۷- نمودارهای تغییرات میانگین جابه‌جایی افقی، جابه‌جایی قائم و جدایش شیبی گسل‌ها



شکل ۱۹- نمونه طبیعی مدل در ایران: یک کمربند چین-راندگی در رشته کوه زاگرس (حوالی شیراز)



شکل ۱۸- مکان‌های مستعد ایجاد کمربند چین-راندگی در زاگرس و مکران، (پیکان‌ها نمایانگر جهت نیرو)

References

- Analogue modeling of large-scale tectonic processes. Edited by W.P.Schellart and C. Passchier. Journal of the Virtual explorer, V.7, 2002- (<http://www.virtualexplorer.com.au/2002/Schellart/content.html>).
- Benes, V. and Davy, P., 1996- Modes of continental lithospheric extension: experimental verification of strain localization processes, *Tectonophysics*, 254, 69-87.
- Bernoulli, B., Heitzmann, P. and Zingy, A., 1990- Central and Southern Alps in southern Switzerland: Tectonic evolution and first results of reflection seismi: *Memoires de la societ Geologique de France*, v. 156. p. 289-302.
- Bonini, M., Sokoutis, D., Talbot, C. J., Boccaletti, M. and Milnes, A. G., 1999- Indenter growth in analogue models of Alpine- type deformation: *Tectonics*, v, 18, p.119-128.
- Davy, C. and Cobbold, P. R., 1988- Indentation tectonics in nature and experiment, 1. Experiments scaled for gravity: *Uppsala University Geological Institutions Bulletin* v. 14, p. 129-144.
- Dennis, J. G., 1967- International tectonic dictionary. American Association of Petroleum Geologists Memoir 7196p.
- Dixon, J. M., 1974- A new method of determinig finite strain in models of geological structures, *Tectonophysics*, 24, 99-114.
- England, P., Houseman, G. and Sonder, L., 1985- Length scales for continental deformation in convergent, divergent, and strike-slip environments: Analytical and approximate solutions for a thin viscous sheet model: *Journal of Geophysical Research*, v. 90. p. 3551-3557.
- Hall, J., 1815- On the vertical position ship with granite, *Transaction of the Royal Society of Edinburgh*, 7, 79-108.
- Hubbert, M. K., 1937- Theory of scale models as applied to the study of geologic structures, *Geological society of America Bulletin*, 48, 1459-1520.
- Koyi, H., 1997- Analogue modeling from a qualitative to a quantitative technique- A historical outline, *Journal of Petroleum Geology*, vol 20(2), pp.223-238.
- Krantz, R. W., 1991- Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures, *Tectonophysics*, 188, 203-207.
- Person, K. S., 2001- Effective indenters and the development of double-vergent orogens: Insights from analogue sand models, in Koyi, H.A., and Mancktelow, N.S., eds., *Tectonic Modeling: A volume in Honor of Hans Ramberg: Boulder, Colorado, Geological Society of America Memoir 193*, P.191-206.
- Pfiffner, O. A., Frey, M., Valasek, M., Stauble, L., Levato, L., Dubois, S. M., Schmid, S. and Smithson, S. B., 1990- Crustal shortening in the alpine orogene: Results from deep seismic reflection profiling in the eastern Swiss Alp, Line NFP 20- East: *Tectonics*, v. 9, p. 1327-1355.
- Ramberg, H., 1967- Model experimentation of the effect of gravity on tectonic processes, *The Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 14, 307-329.
- Ramberg, H., 1981- Gravity, deformation and the Earth's crust, Academic press, London
- Schmid, S. M., Pfiffner, O. A., Froitzheim, N., Schonborn, G., and Kissling, E., 1996- Geophysical- geological transect and tectonic evolution of the Swiss- Italian Alps: *Tectonics*, v. 15. p. 1036-1064.