

# تأثیر واحد نمکی سازند سرخ زیرین روی ساختارهای جنوب البرز مرکزی "روش مدل سازی فیزیکی"

محسن رویوند<sup>۱\*</sup>، عباس بحرودی<sup>۲</sup>، منوچهر قرشی<sup>۳</sup>، محمدرضا قاسمی<sup>۴</sup>، سید احمد آقاحسینی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال؛ پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، تهران، ایران.

<sup>۴</sup> استادیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۶/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۱/۰۶

## چکیده

توده های نمکی با سن الیگوسن در فلات گرمسار و ایوانکی، جنوب البرز مرکزی روی رسوبات کواترنری بیرون ریزی داشته و یک نمک شار را شکل داده است. این نمک شار انگشت باز ابعاد ۱۷×۲۴ کیلومتر دارد که از نظر ابعاد یک نمک شار قاره ای بی همتا در جهان است. این لایه خمیری همچنین به عنوان یک سطح جدا کننده روی سبک های ساختمانی منطقه تأثیر گذار بوده است. با وجود این، کارهای سامان مند کمی روی آن صورت گرفته است. به منظور بررسی سبک های ساختمانی منطقه که تحت تأثیر لایه جدا کننده خمیری هستند و نواحی کناری که تحت تأثیر سطح جدا کننده اصطکاکی هستند، یک سری مدل ساخته شد که درون جعبه ماسه مقیاس بندی شده بودند. این مدل ها پیش روی تغییر شکل نازک پوسته را روی دو سطح جدا کننده خمیری و اصطکاکی که دو عضو پایانی از سطح جدا کننده هستند شبیه سازی کردند. نتایج مدل ها نشان می دهند که بالای سطح جدا کننده خمیری تغییر شکل سریع تر و بیشتر از سطح جدا کننده اصطکاکی پیش روی می کند که این قابل مقایسه با طبیعت است. به گونه ای که هر جا سطح جدا کننده از نوع خمیری باشد، پهن تر از ناحیه کناری خود با سطح جدا کننده اصطکاکی است. مانند مدل ها، به سوی شمال در منطقه با سطح جدا کننده اصطکاکی، از گسل شمال تهران به عنوان گسل پیشانی به گسل مشا و کندوان در هسته رشته کوه البرز، شیب گسل ها افزایش می یابد و تنها گسل های هم آغوش با تمایل به سمت جلو شکل می گیرند، در صورتی که بالای سطح جدا کننده خمیری شیب گسل ها الگوی مشخصی ندارد و هر دو گسل های هم آغوش به سمت پیش بوم و فرا بوم گسترش می یابند.

**کلیدواژه ها:** نمک شار، سطح جدا کننده، مدل سازی، گسل های هم آغوش، جنوب البرز مرکزی.

\* نویسنده مسئول: محسن رویوند

E-mai: mohsenroyatvand@gmail.com

## ۱- مقدمه

با ارتفاع میانگین ۳۰۰۰ متر است که دارای حرکت تفریقی میان پهنه سنج - سیرجان در ایران مرکزی و حوضه کاسپین جنوبی است (Vernant et al., 2004). رشته کوه های البرز را بر پایه ویژگی های ریخت شناسی و زمین شناسی به سه منطقه البرز باختری و آذربایجان، البرز مرکزی و البرز خاوری تقسیم می کنند که ساختار آن نتیجه کوهزایی های مهم آسنیتک (پرکامبرین)، سیمین و آلبی (مزوزویک و سنوزویک) است (Alavi, 1996; Berberian & King, 1981).

منطقه مورد مطالعه بخشی از رشته کوه البرز و در جنوب مرکزی آن است. این بخش از البرز ناحیه گرمسار و ایوانکی را که به عنوان دروازه کاسپین معروف است نیز در بر می گیرد. کهن ترین واحدهای قابل مشاهده در این ناحیه واحدهای ائوسن سازند کرج هستند. پس از آن واحد نمکی الیگوسن سازند سرخ زیرین و سازند سرخ بالایی با سن میوسن است. سازند هزاردره و رسوبات کواترنری در مراحل آخر نهشته شده اند. وجود واحد نمکی سازند سرخ زیرین به عنوان یک سطح جدا کننده خمیری روی لایه های رویی بسیار تأثیر گذار بوده است. همچنین در اثر زمین ساخت و عوامل دیگر مانند فرسایش و نیروی گرانش، این توده نمکی به صورت یک نمک شار بیرون ریزی داشته است که یکی از بزرگ ترین نمک شارهای قاره ای است. این بیرون ریزی نمک در محدوده میان گرمسار - ایوانکی سبب تشکیل یکی از گسترده ترین ورقه های نمکی ناهرجا در سطح خشکی شده است. این پدیده زمین شناسی نمایانگر لایه نمکی با اهمیتی در میان رسوبات سنوزویک است. گسل ها در منطقه مورد مطالعه به فراوانی دیده می شوند که در ادامه به صورت گذرا به تعدادی از آنها اشاره می شود.

### ۲-۱. گسل کل کوه

این گسل با سازوکار رانندگی، مؤلفه راستالغز، درازای تقریبی ۲۲ کیلومتر،

مدل سازی فیزیکی در حال حاضر یکی از راه های ساده برای تصور بهتر از فرایندهای زمین ساختی است که در پیرامون ما رخ می دهند. استفاده از مدل سازی فیزیکی برای توضیح چگونگی تکامل ساختارهای در ارتباط با نمک به شکل جدید آن از دهه ۹۰ مطرح شد. بحث های تئوری در مورد سطوح جدا کننده نمکی و خمیری و مدل سازی آنالوگ توسط زمین شناسان مختلف مورد توجه بوده است (Cotton & Koyi, 2000). تفاوت در این سطوح جدا کننده، سبب تفاوت در ساختارهای موجود در منطقه تحت تأثیر خود است (Davis & Engelder, 1985 & 1987; Bahroudi & Koyi, 2003; Warren, 2008; Cotton & Koyi, 2000).

در این مقاله با استفاده از مدل سازی فیزیکی سعی شده است که برخی از ساختارهای موجود در منطقه توجیه شود. در این مدل ها به منظور بررسی تأثیر نمک روی سنگ پوشش خود و سبک های ساختمانی موجود در منطقه، از یک جعبه ماسه استفاده و در حقیقت نقش نمک به عنوان یک جدا کننده بررسی شد. ساختارهای موجود در مدل در مقطع و دید نقشه توضیح داده می شوند و در پایان با بخش های مختلف البرز مقایسه می شوند.

## ۲- زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

فلات ایران را می توان از دید ساختاری و چینه شناسی به سه واحد ایران مرکزی، البرز و زاگرس تقسیم بندی کرد. این فلات دچار فازهای مختلفی از تغییر شکل شده است. رشته کوه البرز در بخش شمالی این فلات قرار دارد (شکل ۱). در این رشته کوه واحدهای سنگی مختلف از زمان پرکامبرین تا عهد حاضر رخنمون پیدا کرده است (Alavi, 1996). این رشته کوه بخشی از کوهزاد آلپ - هیمالیا است (Alavi, 1996; Allen et al., 2002). این رشته کوه یک پهنه باریک (۱۰۰ کیلومتر) و

باید به این نکته توجه داشت که نمک الیگوسن در یک محیط کششی نهشته شده است و بنابراین تنها موردی که از وضعیت پی‌سنگ در دست است وجود گسل‌های عادی اولیه به عنوان نقطه ضعف‌های اصلی در خروج نمک است. (Baikpour et al., 2010) محل لولای تغییر روند البرز را به طور دقیق در منطقه مورد بررسی در نظر گرفتند. در این مقاله لولای تغییر روند در محل بیرون‌ریزی نمک است در این صورت گسل‌های ایوانکی و گرمسار که به ترتیب معادل گسل‌های سمت چپ و راست مدل هستند، سازوکاری متفاوت از دید مؤلفه راستالغز نسبت به یکدیگر دارند، این برخلاف مطالعات جدید هروی (۱۳۹۰) است. در این مطالعات گسل‌های ایوانکی و گرمسار را به عنوان یک گسل در نظر می‌گیرند و بنابراین یک سازوکار واحد برای آن به دست می‌آید. بدین ترتیب از دید نقشه‌ای می‌توان این منطقه را به عنوان لولای تغییر روند در البرز در نظر گرفت ولی نمی‌توان آن را به بلوک‌های زیر آن تعمیم داد. با این وجود اگر وجود لولای تغییر روند در البرز را به یک پهنه چندین کیلومتری گسترش دهیم، ساختارهای موجود در منطقه را می‌توان بدین وسیله توجیه کرد. این نکته‌ای است که در مدل‌های که ساخته شده توسط نگارندگان رعایت شده است. بنابراین از پله برای شبیه‌سازی این گسل‌های پی‌سنگی استفاده شد. در یک سری این مدل‌ها یک پله (One-step) و در برخی دیگر دو پله (Two-step) به کار رفت (شکل ۳). در مدل‌هایی با به کارگیری دو پله از یک تخته طراحی شده برای این کار استفاده شد که دو گسل پی‌سنگی را نشان می‌دهند. وجود پله در وضعیت ساختارهایی که در مدل به وجود خواهد آمد تأثیر فراوانی دارد. تأثیر استفاده دو پله روی این ساختارها پیش‌تر توسط Ge et al. (1997) بررسی شده بود. با این تفاوت که در مدل‌هایی که آنها ساختند تأثیر نیروهای افقی مورد بررسی قرار نگرفت و تنها به بررسی تأثیر بارگذاری تفریقی در بیرون‌ریزی نمک پرداخته شد.

#### ۴- ویژگی‌های مواد

دو شکل از رفتار سنگ در مدل‌های کنونی شبیه‌سازی شده است، رفتار اصطکاکی رسوبات غیرتبخیری و رفتار خمیری سنگ نمک. به علت این که ماسه نرم رفتاری به طور کامل مشابه مواد مور-کولومی نشان می‌دهد، شایسته است که به جای رسوبات شکننده پوسته بالایی که آنها نیز این ویژگی را دارند، استفاده شود. برای شبیه‌سازی نمک سازند سرخ زیرین، از ژل سیلیکون شفاف اس جی ام ۳۶ (SGM36) استفاده شد. این ماده، توسط شرکت Dow Corning ساخته شده است و ویژگی ویسکو-نیوتنی با گرانروی (ویسکوزیته) وابسته به کرنش دارد.

#### ۵- آماده کردن مدل

در مدل‌هایی که ساخته شد، هر مدل به دو بخش با مرزی موازی کوتاه‌شدگی تقسیم شد که در یک بخش آن در هر دو نوع کف ماسه و در بخش دیگر سیلیکون قرار گرفت. در ادامه روی هر دو بخش به طور یک دست با ماسه پوشانده شد. برای این که بتوان ساختمان‌های شکل گرفته در مدل‌ها را مشخص کرد، ماسه‌ها با میان‌لایه‌های رنگی موازی لایه‌بندی پر می‌شوند. در پایان زمانی که ماسه به‌طور کامل ریخته شد، یک گرید غیرفعال (Passive grid) با ماسه رنگین در بالای مدل‌ها، برای ثبت کرنش سطحی و بررسی جنبش (کینماتیک) مدل، روی آنها ریخته شد. مراحلی که در بالا توضیح داده شد برای هر دو نوع مدل تک‌پله و دو پله انجام شد.

در طول هر مرحله از آزمایش سطح هر مدل در فواصل زمانی مشخص عکس‌برداری و تمام تغییر شکل‌های روی سطح به صورت عددی یادداشت شد. پس از پایان هر آزمایش، مدل با ماسه پوشانده و سپس با آب مدل آغشته شد. پس از پرشدگی کامل با آب و پس از این که چسبندگی به اندازه کافی رسید، برش‌های

راستای عمومی شمال‌باختر- جنوب‌خاور و شیب به سمت جنوب باختر است. این گسل در بخش شمال باختر خود موجب رانده شدن سازند سرخ بالایی روی واحدهای جوان‌تر سازند سرخ بالایی شده است. به نظر می‌رسد که در اثر عملکرد این گسل نمک در امتداد آن بیرون‌ریخته باشد. تاقدیس کوه خرس‌دره ممکن است که در ارتباط با عملکرد این گسل بوده باشد. کشیدگی لایه‌های تخریبی سازند سرخ بالایی در کنار گسل، نشانگر مؤلفه راستالغز این گسل است (شکل ۱).

#### ۲-۲ گسل کوه کلرز

این گسل با سازوکار راندگی، درازای حدود ۶ کیلومتر و راستای شمال‌خاور- جنوب‌باختر دارد. در بخش میانی و جنوب باختری حرکات امتدادلغز موجب کشیدگی لایه‌های سازند سرخ بالایی در کنار گسل شده است که چپ‌لغز بودن گسل را تداعی می‌کند. در اثر عملکرد این گسل بلوک‌هایی از سازند سرخ بالایی که به آن "شناور" (Raft) می‌گویند تشکیل شده است. این رفت‌ها به صورت شناور روی نمک هستند؛ بنابراین این توانایی را دارند که به صورت آزادانه بچرخند. این گسل در بخش شمال‌خاوری موجب رانده شدن سنگ‌های کربناتی سازند قم روی سازند سرخ بالایی شده است (شکل ۱). در سطح گسل لایه‌های رسوبی سازند سرخ بالایی به شدت چین‌خورده و در مواردی خرد شده است. ستبرای پهنه گسلی ۵ تا ۱۰ کیلومتر است (Amini et al., 2004).

#### ۲-۳ گسل گرمسار

گسل گرمسار با درازایی نزدیک به ۷۵ کیلومتر و با راستای تقریبی خاوری- باختری در شمال گرمسار و در دامنه جنوبی بخش خاوری البرز مرکزی با شیب رو به شمال، در ادامه خاوری گسل ایوانکی مشاهده می‌شود (هروی، ۱۳۹۰). برپایه مطالعات ریخت‌زمین‌ساختی انجام شده سامانه گسلی گرمسار، به ۵ قطعه ساختاری قابل تقسیم است که از خاور (روستای ده‌نمک) به باختر (ایوانکی) گسترش می‌یابد و با توجه به این قطعه‌بندی می‌توان پاره گسلی کوه سرخ در بخش باختری گرمسار در تاقدیس کوه‌سرخ را به عنوان گسلی مستقل با شیب به سوی شمال و سازوکار فشاری همراه با مؤلفه کوچک برشی چپ‌گرد در نظر گرفت. پیش از این گسل‌های گرمسار و ایوانکی را به عنوان دو گسل جدا از هم در نظر می‌گرفتند ولی مطالعات هروی (۱۳۹۰)، نشان داد که گسل ایوانکی در ادامه گسل گرمسار است.

#### ۲-۴ گسل جنوب کوه کلرز

این گسل با راستای عمومی خاور- باختر و سازوکار راندگی موجب رانده شدن سنگ‌های کربناتی سازند قم روی سازند سرخ زیرین و همچنین نهشته‌های تخریبی سازند سرخ بالایی روی سازند سرخ زیرین شده است (Amini et al., 2004). درازای تقریبی این گسل ۱۱ کیلومتر است و گسل‌های امتدادلغز با سازوکار چپ‌لغز و امتداد شمال‌خاور- جنوب‌باختر موجب جابه‌جایی این گسل شده‌اند. در مجموع ترکیب دو راستای خاور-باختر با سازوکار راندگی با امتداد شمال‌خاور- جنوب‌باختر (چپ‌لغز) شکل پله مانند به این گسل داده است (شکل ۱).

#### ۳- دستگاه و شکل اولیه مدل

دستگاهی که در آن مدل‌سازی صورت می‌گیرد شامل یک استپ موتور که تنظیمات سرعت آن با استفاده از یک کیت کامپیوتری انجام می‌گیرد، یک میله متحرک که نیروی محرکه را به مدل انتقال می‌دهد، دیواره‌های شیشه‌ای و پلاکسی گلس و صفحه آلومینیومی زیر آن است. پهنای مدل‌ها ۳۰ سانتی‌متر و طول آنها در راستای موازی کوتاه‌شدگی ۴۵ سانتی‌متر بود. فشارش تک‌محوری ثابت توسط یک صفحه متحرک صورت گرفت که از یک سو به موتور الکتریکی پیوسته است (شکل ۲). همه مدل‌ها در آزمایشگاه مدل‌سازی پژوهشکده علوم زمین ساخته شده‌اند.

## ۷-۲. سطح جداکننده خمیری

مدل‌های ساخته شده پیش‌روی گوه روی سطوح جداکننده را مدل سازی می‌کنند. این مدل‌ها نشان می‌دهند که گسترش ساختمان‌ها به گونه‌ای است که جهت‌یافتگی ترجیحی ندارند. زمانی که مقاومت برشی سطح جداکننده کاهش می‌یابد، زاویه گوه رانندگی کاهش می‌یابد. در ادامه زاویه نواری و زاویه میان تنش اصلی و سطح جداکننده کاهش می‌یابد. بر پایه معیار شکست کولومب، دو سطح شکست شامل محور شکست متوسط ( $\sigma_2$ ) مایل بر محور اصلی تنش ( $\sigma_1$ ) با زاویه  $\theta$  شکل خواهد گرفت. کاهش در تنش اصلی بیشینه با توجه پیش‌بوم، به شکل‌گیری ساختارها با هر دو سوی پیش‌بوم و فرابوم می‌انجامد (Cotton & Koyi, 2000; Davis & Engelder, 1987). ساختمان‌های با پیش‌روی رو به جلو با یک زاویه بالا از  $\theta$  شکل می‌گیرند (Cotton & Koyi, 2000; Davis & Engelder, 1987).

کوتاه‌شدگی توالی ماسه‌ای بالای سطح جداکننده خمیری با گسترش چین‌های جعبه‌ای که در اتصال به کینک‌های با روند رو به جلو و عقب هستند همراه است (شکل ۶). چین‌های جعبه‌ای با سطح جداکننده خمیری به وسیله گسترش همزمان کینک‌های به سمت جلو و عقب همراه هستند. در ادامه جایگیری لایه خمیری در هسته چین جعبه‌ای، کینک‌های نزدیک مورد انتظار است. به علت این که لایه خمیری نیز دچار خمش می‌شود، رانندگی در ماسه سبب کشیدگی یک صفحه نازک از سیلیکون در فرادیواره رانندگی و بنابراین سبب ضعیف‌شدگی پهنه گسلی و افزایش طول عمر (Long-lived) آن می‌شود. دامنه چین‌های جعبه‌ای (Box-folds) با کوتاه‌شدگی توده‌ای در ابتدا با یک نرخ ثابت افزایش می‌یابد. نرخ افزایش دامنه چین‌های جعبه‌ای کهن‌تر زمانی که کوتاه‌شدگی به هم‌آغوش (Imbricate) بعدی منتقل می‌شود، کاهش می‌یابد. طول موج چین‌ها در ابتدای تشکیل آنها زیاد است ولی پس از این که کوتاه‌شدگی ادامه پیدا می‌کند این طول موج کاهش می‌یابد. بر پایه نتایج مدل‌ها، جا به جایی روی همه گسل‌های موجود در مدل رخ می‌دهد. در حقیقت تفاوتی ندارد که گسل در بخش جلو مدل و یا در پایان آن باشد؛ این جابه‌جایی روی همه آنها رخ می‌دهد البته مقدار آن در گسل‌های جلویی بیشتر است. شیب گسل‌های شکل گرفته در این بخش الگوی مشخصی ندارد بلکه در جاهای مختلف از مدل می‌تواند شیب‌های مختلفی داشته باشد. البته، به طور میانگین شیب رانندگی‌ها از پس رانندگی‌ها بیشتر است. در کل، پیش‌روی گسل‌ها را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است در ناحیه‌ای که سطح جداکننده از نوع اصطکاکی است، بیشتر گسل‌های رانندگی به وجود آمده‌اند و در جایی که سطح جداکننده از نوع خمیری است در ابتدا گسل‌های رانندگی و در ادامه پس‌رانندگی‌ها شکل می‌گیرند (شکل ۷).

## ۸- میزان جابه‌جایی روی گسل‌ها

مبانی تئوری نشان داده‌اند که جابه‌جایی در مناطقی که سطح جداکننده خمیری وجود دارد در کل منطقه پخش می‌شود ولی در مناطقی که این نوع سطح جداکننده وجود ندارد بیشتر جابه‌جایی روی گسل جلویی رخ می‌دهد. بدین منظور اندازه‌گیری‌های مختلفی روی مدل‌ها انجام شد، تا روشن شود که آیا این مورد در مدل صدق می‌کند. روش کار به این صورت است که دو برش به موازات سوی کوتاه‌شدگی اولی در جایی که سیلیکون در کف آن قرار دارد و دومی در جایی که سیلیکون در پی آن قرار ندارد در نظر گرفته می‌شود (شکل ۸). سه نقطه در هر دو مقطع روی مدل به وسیله ماسه‌های رنگین علامت‌گذاری شد. دو عدد از این علامت‌ها در دو سوی گسل جلویی (Frontal Fault) و سومی در فاصله نزدیک به دیواره پشتی قرار داده شد. پس از علامت‌گذاری، در فواصل زمانی منظم اندازه‌گیری‌ها انجام شد. در این مرحله برای هر دو ناحیه چه برای بخش اصطکاکی و چه برای بخش خمیری سه بار اندازه‌گیری فاصله برای هر مرحله زمانی به دست آمد. با استفاده از داده‌هایی

عمودی از مدل زده شد. مقاطع در فواصل منظم زده و در هر برش عکس تهیه شد. همه مدل‌ها از یک سو با نرخ ثابت در حدود ۲۱ میلی‌متر در ساعت کوتاه شد و این کوتاه‌شدگی به تغییر شکل هر دو بخش با سطح جداکننده خمیری و اصطکاکی انجامید. سبک‌های تغییر شکل میان این دو ناحیه با سطح جداکننده اصطکاکی و خمیری در ادامه شرح داده خواهند شد.

## ۹- نتایج مدل‌ها

در این مقاله از نتایج مدل‌های جعبه ماسه که از یک سو کوتاه می‌شود برای توصیف تفاوت در توسعه ساختاری میان نواحی با یک سطح جداکننده خمیری و ناحیه بدون آن استفاده شد. سبک‌های ساختمانی (Structural Styles) که در این مدل‌ها به دست آمده با مشاهدات زمین‌شناسی در منطقه در ادامه مقایسه خواهند شد. در این ناحیه دو محدوده زمین‌شناسی جدا که یکی دارای سطح جداکننده خمیری و دیگری بدون آن است، وجود دارد. هر دو ناحیه از شمال به سمت جنوب به طور همزمان کوتاه می‌شوند. مدل‌های ساخته‌شده به وجود آمدن پهنه‌های انحرافی در پیشانی رانندگی را در نتیجه تغییرات جانبی در ویژگی‌های سطح جداکننده نشان می‌دهند.

در مدل‌های ساخته‌شده در این پژوهش، بارگذاری زمین‌ساختی به کار گرفته و نقش این نوع بارگذاری در بیرون‌ریزی نمک در منطقه مورد مطالعه بررسی خواهد شد. می‌توان گفت که در اثر جابه‌جایی دیواره پشتی به سوی پیش‌بوم یک توالی مولاسی با پیش‌روی به سوی پیش‌بوم شبیه‌سازی می‌شود. این دیواره گوه ممکن است در اثر رسوب‌گذاری و یا در اثر فعالیت‌های زمین‌ساختی باشد. در مدل‌هایی که ساخته شد این گوه با استفاده از جابه‌جایی دیواره پشتی شکل می‌گیرد که فعالیت‌های زمین‌ساختی را شبیه‌سازی می‌کند.

## ۷-۲ مدل‌های با یک پله

در این مدل‌ها، کف مدل‌ها به دو بخش با سطح جداکننده خمیری و سطح جداکننده اصطکاکی تقسیم شد (شکل ۴). ساختارهایی که در اثر کوتاه‌شدگی از یک سو به وجود آمدند، بررسی خواهند شد.

## ۷-۱. سطح جداکننده اصطکاکی

کوتاه‌شدگی ماسه بالای سطح جداکننده ماسه‌ای با رانندگی‌های به سوی پیش‌بوم، که زاویه ۳۰ تا ۳۵ درجه دارند، مشخص می‌شوند. تغییر شکل گریدهای مربع که در ابتدا روی سطح مدل گذاشته می‌شود نشان دهنده فشار عمود بر راستای رانندگی‌ها در طول کوتاه‌شدگی است. در حالی که تغییر شکل روی سطح جداکننده اصطکاکی پیش‌روی می‌کند، رانندگی‌ها دچار چرخش به پشت و پرشیب‌تر می‌شوند (شکل ۵). تغییر شکل بیشتر با شکل‌گیری چین‌های جعبه‌ای شروع می‌شود و حرکت صفحه به فشردگی و پیش‌روی گوه ماسه در جلو صفحه می‌انجامد. با ادامه کوتاه‌شدگی، کینک جلویی چین جعبه‌ای دچار برش و یک رانندگی رو به جلو را شکل می‌دهد. در ادامه کینک عقبی (back kink) این چین جعبه‌ای به وجود آمده و سپس تنها پس‌رانندگی بخش اصطکاکی شکل می‌گیرد. پیش‌روی تغییر شکل به شکل‌گیری رانندگی‌های پشت خوک با سوی پیش‌بوم می‌شود. در ادامه تشکیل رمپ‌های پشت خوک، جابه‌جایی به همراه ارتفاع گوه افزایش می‌یابد. شیب گسل‌ها در این بخش به سوی عقب مدل بیشتر می‌شود به گونه‌ای که جلوترین گسل در پیشانی تغییر شکل کمترین شیب را دارد. نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد که بالای سطح جداکننده اصطکاکی، جلوترین گسل بیشترین جابه‌جایی را دارد و برخلاف آن هر چه به سمت گسل‌های عقبی پیش‌روی این جابه‌جایی کمتر می‌شود. اگر چه فرونشینی چیره‌ای در جلوی ناحیه فرایش یافته که در زیر آن سطح اصطکاکی است، دیده نمی‌شود، چنین پله ناگهانی در جلوی پیشانی تغییر شکل به احتمال به فرونشینی در مثال طبیعی می‌انجامد (Cotton & Koyi, 2000; Bahroudi & Koyi, 2003).

## ۱۱- ناحیه با سطح جداکننده خمیری

بخشی از مدل که سطح جداکننده خمیری دارد قابل مقایسه با ناحیه گرمسار و ایوانکی است. در جایی که لایه‌های نمکی الیگوسن وجود دارند مانند برش زمین‌شناسی ناحیه گرمسار، پیش‌روی تغییر شکل به هر دو سو (Forward & Backward-vergent) (به سوی شمال و جنوب) است (شکل ۱۲).

گسل‌های فراوانی در منطقه وجود دارند. جهت راندگی شماری از این گسل‌ها به سوی جنوب است و شماری دیگر سوی شمال دارند. از گسل‌های مهم منطقه راندگی‌های گرمسار، سرخه کلوت و ایوانکی و پس راندگی‌های ویرانه، قریلیک و کیلان هستند. زاویه نواری در این بخش الگوی خاصی ندارد بلکه در بخش‌های مختلف از منطقه به طور متغیر است. شمار گسل‌ها در این بخش نسبت به نواحی همسایه خود در البرز کمتر است. شیب گسل‌ها در این بخش الگوی خاصی ندارد و انواع مختلفی از گسل‌ها را می‌توان در این بخش مشاهده کرد. روی هم‌رفته در مدل، راندگی‌ها شیب کم و پس‌راندگی‌ها شیب بیشتری دارند که این حالت در مورد منطقه مورد مطالعه نیز مشاهده شد. از دید تئوری این پدیده اثبات شده است (Davis & Engelder, 1985). این مورد در مدل‌های ساخته‌شده توسط زمین‌شناسان مختلف (Bahroudi & Koyi, 2003; Marques, 2008) نیز گزارش شده است. با وجود این که شمار گسل‌ها در این بخش کمتر است، ولی این گسل‌ها تغییر شکل و جابه‌جایی بیشتری را نسبت به بخشی که در آن سطح جداکننده از نوع اصطکاکی است در خود جای داده‌اند؛ به گونه‌ای که در بسیاری از نقاط در منطقه می‌توان رسوبات مختلفی را که از ژرفای خیلی زیاد به صورت راندگی بالا آمده‌اند، مشاهده کرد. چین‌های با طول موج بالا را می‌توان در منطقه مشاهده کرد. بیرون‌ریزی نمک را در هسته تاقدیس‌ها و فرودپوراه گسل‌های راندگی در منطقه می‌توان مشاهده کرد ولی بیشترین بیرون‌ریزی نمک در راندگی‌های نزدیک به دشت دیده می‌شود. در دید نقشه‌ای بیرون‌ریزی نمک به صورت یک‌دست نیست بلکه در یک ناحیه پیشینه است که سبب شده است به صورت نمک‌شار از آن پهنه ضعف بیرون‌ریزی داشته باشد. نمک‌شاری که در اثر این بیرون‌ریزی به وجود آمده است قطعات آتشفشانی را با خود به سطح آورده است. در مدل نیز در بخشی که لایه خمیری وجود دارد ساختارهای به سوی جلو و عقب دیده می‌شوند. در این بخش نیز زاویه نواری به طور ثابت نیست بلکه در مقاطع مختلف از جایی که لایه خمیری وجود دارد زوایای نواری متفاوتی وجود دارد که به طور میانگین این زاویه در حدود ۷ درجه است. شمار گسل‌های این بخش همچون طبیعت به علت این که از یک ماده ویسکو-نیوتن استفاده شده است، کمتر از بخش کناری خود با یک سطح جداکننده اصطکاکی است. همانند منطقه، نتایج مدل نشان می‌دهد که شیب گسیختگی‌ها در بخشی که سیلیکون در آن به کار رفته است الگویی ندارد بلکه در بخش‌های مختلف از یک برش می‌تواند شیب‌های متفاوتی داشته باشد ولی روی هم‌رفته شیب گسیختگی‌های به سوی جلو کمتر از گسیختگی به سوی عقب است. در مدل‌ها خمش‌های در ارتباط با گسیختگی را می‌توان دید. این خمش‌ها خیلی در ارتباط با سیلیکونی هستند که مانند یک سطح لغزنده رفتار می‌کند. از جمله ساختارهایی که می‌توان هم در مدل‌ها و هم در طبیعت مشاهده کرد ساختمان‌های فراجسته و فروجسته هستند. این ساختمان‌ها در ارتباط با گسل‌های راندگی موجود در منطقه هستند. بیشترین خروج سیلیکون در بخش جلو مدل است. در منطقه نیز این حالت با وجود آمدن گسل‌های راندگی و امتداد لغز خود را نشان می‌دهد.

بر پایه نتایج به‌دست آمده از مدل، تغییر شکل در همه گسل‌های به وجود آمده در مدل روی می‌دهد. به گونه‌ای که همه گسل‌های درون مدل جابه‌جایی نشان می‌دهند. این مورد قابل تطابق با طبیعت است. توزیع نقاط لرزه‌ای روی نقشه در طبیعت نشان می‌دهد که تقریباً همه گسل‌های موجود در منطقه نشانه‌هایی از لرزه‌زایی نشان

که به‌دست آمد اول نسبت کوتاه‌شدگی روی گسل جلویی با گسل‌هایی که در پشت آن داشت مقایسه و دوم نموداری بر پایه داده‌های فاصله شماره ۲ رسم شد (شکل ۹). محور عمودی این نمودار کوتاه‌شدگی جمع‌گسیختگی‌های پیش از گسل پیشانی و محور افقی آن مقدار کوتاه‌شدگی را برای هر دو ناحیه (خمیری و اصطکاکی) نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است خط برازش شده نقاط مربوط به ناحیه‌ای که سطح جداکننده خمیری است شیب بسیار بیشتری نسبت به ناحیه دارای سطح اصطکاکی دارد. بر پایه این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که در جایی که سیلیکون وجود دارد تغییر شکل در کل گسل‌ها و چین‌های منطقه جذب می‌شود. در حالی که اگر سیلیکون وجود نداشته باشد تغییر شکل به طور چیره روی گسل جلویی است و روی گسل‌های به سمت فرابوم تغییر شکل ناچیزی جذب می‌شود.

## ۹- مدل‌های با دو پله

در این مدل‌ها همچون مدل‌های با یک پله، کف مدل‌ها به دو بخش با سطح جداکننده اصطکاکی و سطح جداکننده خمیری تقسیم شد. به منظور شبیه‌سازی گسل‌های پی‌سنگی از یک تخته چوبی با دو پله استفاده شد. ستبرای این تخته چوبی یک سانتی‌متر و ابعاد آن  $30 \times 20$  سانتی‌متر بود. در این مدل‌ها پله جلویی نقش مهم‌تری دارد و تغییر شکل بیشتری روی آن صورت می‌گیرد با این وجود تأثیر پله اول روی سبک تغییر شکل و حرکت رو به بالا سیلیکون غیر قابل چشم‌پوشی است. پیش‌تر (Ge et al., 1997)، تأثیر پله‌ها روی بیرون‌ریزی سیلیکون در سامانه‌هایی که نیروی اعمالی بارگذاری تفریقی است، بررسی کرده بود. در آن مدل‌ها تأثیر نیروهای افقی بحث‌ناشد. در مدل‌های کنونی بیشتر تأثیر نیروهای افقی مورد بررسی قرار گرفت. این نیروها سبب می‌شوند که سیلیکون به سوی جلو جریان پیدا کند و زمانی که جریان سیلیکون به پله رسید، حرکت افقی متوقف و جریان رو به بالا می‌شود.

روی هم‌رفته ساختارهایی که به‌وجود آمد بسیار شبیه به مدل‌های تک پله بود. همانند مدل‌هایی که در آنها از یک پله استفاده شد ساختارهای با هر دو جهت در جایی که سطح جداکننده خمیری به کار رفت، دیده شد. زاویه نواری در این مدل‌ها نیز به همین ترتیب قابل مقایسه با مدل‌های تک پله است (شکل ۱۰).

## ۱۰- بحث

مدل‌های فیزیکی نواحی زمین‌شناسی در ایران توسط زمین‌شناسان مختلف ساخته شده است. در البرز مرکزی می‌توان به صفایی (۱۳۷۹) اشاره کرد. او در پایان نامه خود بخشی از منطقه مورد مطالعه و ایران مرکزی را مدل‌سازی کرد. مدل‌هایی که او ساخت، از دید هندسی تا حدودی شبیه به منطقه مورد مطالعه است ولی به دلیل این که مواد مورد استفاده شباهتی به نهشته‌های منطقه ندارند، مدل‌های ساخته شده شباهت دینامیکی و کینماتیکی ندارد. کار دیگری که در منطقه مورد مطالعه صورت گرفته است (Baikpour et al., 2010) است. در مدلی که ایشان ارائه دادند هندسه صفحات پی‌سنگی را عامل اصلی بیرون‌ریزی توده‌های نمکی در منطقه گرمسار و ایوانکی پیشنهاد کرده‌اند.

توجه ساختارهای موجود در روبراه با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی از اهداف این مقاله است. از مهم‌ترین مشاهداتی که در مدل‌ها به‌دست آمد می‌توان به تفاوت در سبک ساختمانی مانند تفاوت در نوع و تعداد گسل‌ها و همچنین در زاویه نواری (شکل ۱۱) اشاره کرد. از موارد دیگر تفاوت در پهنای تغییر شکل در اثر استفاده از یک ماده خمیری است. در ادامه، به طور جزء به جزء به تحلیل و مقایسه ساختارهای اصلی منطقه با مدل پرداخته می‌شود.

است؛ بنابراین در این آزمایشات به طور میانگین این ستبرای در حدود ۵۰۰۰ متر در نظر گرفته شد. برای این که بتوان بیرون‌ریزی سیلیکون را به طور کامل در مدل دید، نرخ فرسایش در مدل در نظر گرفته شد. بدین صورت که اگر نرخ فرسایش برای ۶/۲ میلیون سال در حدود ۰/۲ میلی‌متر در سال در نظر گرفته شود در حدود ۱۲۴۰ متر فرسایش رخ داده در منطقه را می‌توان به دست آورد. اگر این عدد در مقیاس قرار بگیرد در حدود یک سانتی‌متر برای مدل به دست می‌آید. بنابراین این مقدار، از رسوبات رویی مدل کم می‌شود. به منظور به دست آوردن شباهت رئولوژیکی، در مدل‌ها برای شبیه‌سازی نمک الیگوسن از سیلیکون اس جی ام ۳۶ (SGM-36) و برای سطح اصطکاکی پوشش از ماسه نرم استفاده شد. جابه‌جایی گسل‌ها و ساختارهای دیگر شباهت کینماتیکی مدل‌ها را تعیین می‌کند که به طور کامل بحث شده است. مقاومت برشی در مواردی که ماده گرانرو (ویسکوز) (سیلیکون و نمک) استفاده شود از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_v = \eta(v/\dot{\epsilon}_v) = \eta\dot{\gamma}_v$$

که در آن  $\tau_v$  تنش برشی لایه گرانرو،  $\eta$  گرانروی (ویسکوزیته)،  $v$  سرعت،  $\dot{\epsilon}_v$  سبترای لایه گرانرو و  $\dot{\gamma}_v$  نرخ کرنش برشی مهندسی (Engineering Strain Rate) که نرخ کنش مدل فرض می‌شود است.

برای به دست آوردن شباهت دینامیکی میان مدل‌ها و طبیعت که در آن لایه گرانرو استفاده شده است، عدد رمبرگ (R) که نشان‌دهنده نسبت میان گرانش و نیروهای گرانرو است باید در مدل و طبیعت برابر باشد. عدد رمبرگ در مدل برابر است با:

$$R_m = \rho_{vm} g h_{vm} / \eta_{vm} \dot{\epsilon}_m$$

که در آن  $\rho_{vm}$  برابر ۹۸۷ کیلوگرم بر متر مکعب و  $\eta_{vm}$  برابر  $5 \times 10^4$  پاسکال ثانیه است که به ترتیب چگالی و گرانروی لایه گرانرو هستند. شتاب گرانش ۹/۸۷ متر بر مجذور ثانیه و نرخ کرنش  $\dot{\epsilon}_m$  برای مدل با توجه به این که سرعت دیواره پشتی ۲۱ میلی‌متر بر ساعت و سبترای سیلیکون ۷ میلی‌متر است،  $8.3 \times 10^{-6}$  بر ثانیه و بنابراین عدد رمبرگ برای مدل ۱/۶ است.

همین مراحل برای طبیعت صورت گرفت به طوری که چگالی نمک ۲۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سبترای آن ۱۰۰۰ متر و گرانروی  $10^{19}$  در نظر گرفته شد. با توجه به این که میدان سرعت در ایستگاه‌های مختلف در منطقه متفاوت است، به طور میانگین، نرخ ۹/۳ میلی‌متر در سال برای منطقه در نظر گرفته شد بنابراین نرخ کرنش  $9 \times 10^{-13}$  بر ثانیه و عدد رمبرگ ۷/۴۸ به دست آمد. عددهای رمبرگ به دست آمده برای مدل و طبیعت اختلاف کمی با یکدیگر دارند، که قابل چشم‌پوشی است و می‌توان نتیجه گرفت که مدل شباهت دینامیکی دارد.

اگر از متغیرهای مقیاسی برای محاسبه مدت تغییر شکل در طبیعت استفاده شود به این صورت خواهد بود:

$$T_f = T_m / T_p = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_m$$

این نسبت در مدل شماره ۱۲،  $4 \times 10^{-11}$  به دست آمد اگر این عدد را در عدد ۱۷ ساعت ضرب کنیم که مدت زمان طول کشیدن مدل است، ۵/۷ میلیون سال مدت زمان تغییر شکل در طبیعت به دست می‌آید. این عدد خیلی نزدیک به فاز اصلی تغییر شکل در فاز کوهزایی پلیوسن - پلیوستوسن (Stocklin, 1968; Alavi, 1996; Guest et al., 2006; Axen, et al., 2001) است. بدین ترتیب می‌توان با استفاده از نتایج مدل‌ها نتیجه‌گیری کرد که کوتاه‌شدگی در ناحیه گرمسار از حدود ۵/۷ میلیون سال پیش تا کنون تقریباً ۳۵ درصد بوده است.

#### ۱۴- نتیجه‌گیری

مشاهدات مدل‌سازی مشخص کردند که تفاوت در رفتار مکانیکی سطح جدا کننده سبب تفاوت در سبک تغییر شکل در منطقه مورد مطالعه شده است. همانند

می‌دهند. گسل پیشانی در مدل قابل مقایسه با گسل گرمسار و ایوانکی در طبیعت است. در فرودواره این گسل بیرون‌ریزی نمک رخ می‌دهد این حالت در مدل نیز دیده می‌شود. به گونه‌ای که خروج سیلیکون جایی که این گسیختگی رخ می‌دهد دیده می‌شود.

پرسشی که مطرح می‌شود این است که آیا با توجه به مدل که راندگی‌هایی را نشان می‌دهد که در آنها پی‌ماسه‌ها توانسته‌اند به سطح برسند، آیا این حالت در مورد گرمسار نیز مشاهده می‌شود؟ یعنی آیا گسل‌هایی توانسته‌اند رسوبات زیرین (مثلاً سازند قم) را به سطح برسانند؟ پاسخ آری است. سازند قم در برخی از نقاط در منطقه پرونزد داشته است. برای نمونه گسل‌های سرخ کلوت و ویرانه توانسته‌اند این رسوبات را به سطح برسانند. همچنین در برخی از نقاط مانند شمال ایوانکی در اثر چین‌خوردگی صورت گرفته رسوبات بالایی دچار فرسایش شده‌اند و رسوبات زیرین مانند سازند قم توانسته‌اند خود را به سطح برسانند. با توجه به نتایجی که از مدل‌ها به دست آمده است می‌توان نتیجه گرفت که در حوضه گرمسار شبیه مدل، زمانی لایه نمکی در جایی بالاتر در نزدیک فرابوم قرار داشته است و در اثر فشردگی ساقه، این توده‌های نمکی توانسته‌اند خود را به فرابوم برسانند.

#### ۱۲- زمین ساخت شناوری (Raft Tectonics)

از جمله ساختارهایی که می‌توان در منطقه مشاهده کرد زمین ساخت شناوری است که بلوک‌هایی هستند که به گونه شناور روی توده‌های نمکی در حرکت هستند. در بخش جنوبی کوه‌های گرمسار این ساختارها دیده می‌شود. در مدل‌ها نیز می‌توان این ساختارها را دید (شکل ۱۳). از جمله گسل‌هایی که توانسته‌اند در اثر عملکرد این پدیده به وجود آیند، گسل‌های کوه حسین‌خانی و گسل پایین قلعه هستند. این دو گسل سبب جابه‌جایی سازند سرخ بالایی بیش از ۴ کیلومتر شده‌اند. همچنین در اثر جابه‌جایی این دو، گسل راندگی در بخش جلویی بلوک شکل گرفته است (شکل ۱۳).

این شناورها در بخش جلویی مدل نیز دیده می‌شوند به گونه‌ای که تکه‌های ماسه روی سیلیکون شناور و دچار چرخش شده‌اند این تکه پس از کوتاه‌شدگی در حدود ۳۰ درصد به وجود آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در ناحیه گرمسار نیز این بلوک‌ها در مراحل پایانی تغییر شکل به وجود آمده‌اند. حرکت این بلوک‌های شناور روی توده‌های نمکی لرزه‌زا نیست.

#### ۱۳- مقیاس مدل‌ها

برای این که هر تغییر شکل طبیعی را به وسیله مدل‌سازی فیزیکی شبیه‌سازی کنیم، به وسیله اصولی که (Hubbert (1937) آنها را شرح داد مدل‌ها باید در مقیاس قرار بگیرند. یک مدل مقیاس‌بندی شده باید با طبیعت از نظر هندسی، دینامیک و کینماتیک و رفتار مواد (رئولوژی) شبیه باشد. برای شباهت هندسی، از نسبت  $6/521 \times 10^{-4}$  برای بعد عمودی و افقی استفاده شد. به گونه‌ای که ۱ سانتی‌متر در مدل ۱۵۳۸ متر در طبیعت می‌شود. برای سبترای نمک افراد مختلف (Stocklin, 1964; Jackson et al., 1990; Schelder & Urai, 2006; Ballato et al., 2008) پیشنهاد کرده‌اند. بدیهی است که هیچ‌کدام از این سبترای نامی توان سبترای واقعی نمک در نظر گرفت چرا که این نمک به طور کامل رخنمون پیدا نکرده است و همچنین هیچ مقطع لرزه‌ای از این واحدها در دست نبوده است، بنابراین دقیق نیستند. در این مدل‌ها به منظور مقیاس‌بندی، سبترای ۱۰۰۰ متر برای نمک در منطقه در نظر گرفته شد. چون به طور جانبی سبترای نمک در منطقه تغییر می‌کند، مدل‌هایی که ساخته شد به طور کامل با طبیعت شباهت ندارند. در منطقه مورد مطالعه سبترای روباره که سازندهای قم، سرخ بالایی و هزار دره هستند در جاهای مختلف متفاوت

شدن نمک مهم‌ترین فاز تغییر شکل در حدود ۵ میلیون سال پیش بوده می‌توان گفت که مهم‌ترین مرحله از فعالیت نمک در حدود این زمان بوده است

با استفاده از نتایج مدل‌ها می‌توان چنین گفت که مدل‌های با یک پله تطابق بیشتری با طبیعت دارند.

با توجه به اطلاعاتی که از مدل‌سازی به دست آمد می‌توان حدس زد که نمک، زمانی در جایی شمالی‌تر نسبت از حال بوده و پیش‌روی زمین‌ساختی یک نقش اساسی در این حرکت افقی نمک داشته و سبب شده است که نمک از بخش شمالی به سوی جنوب حرکت کند.

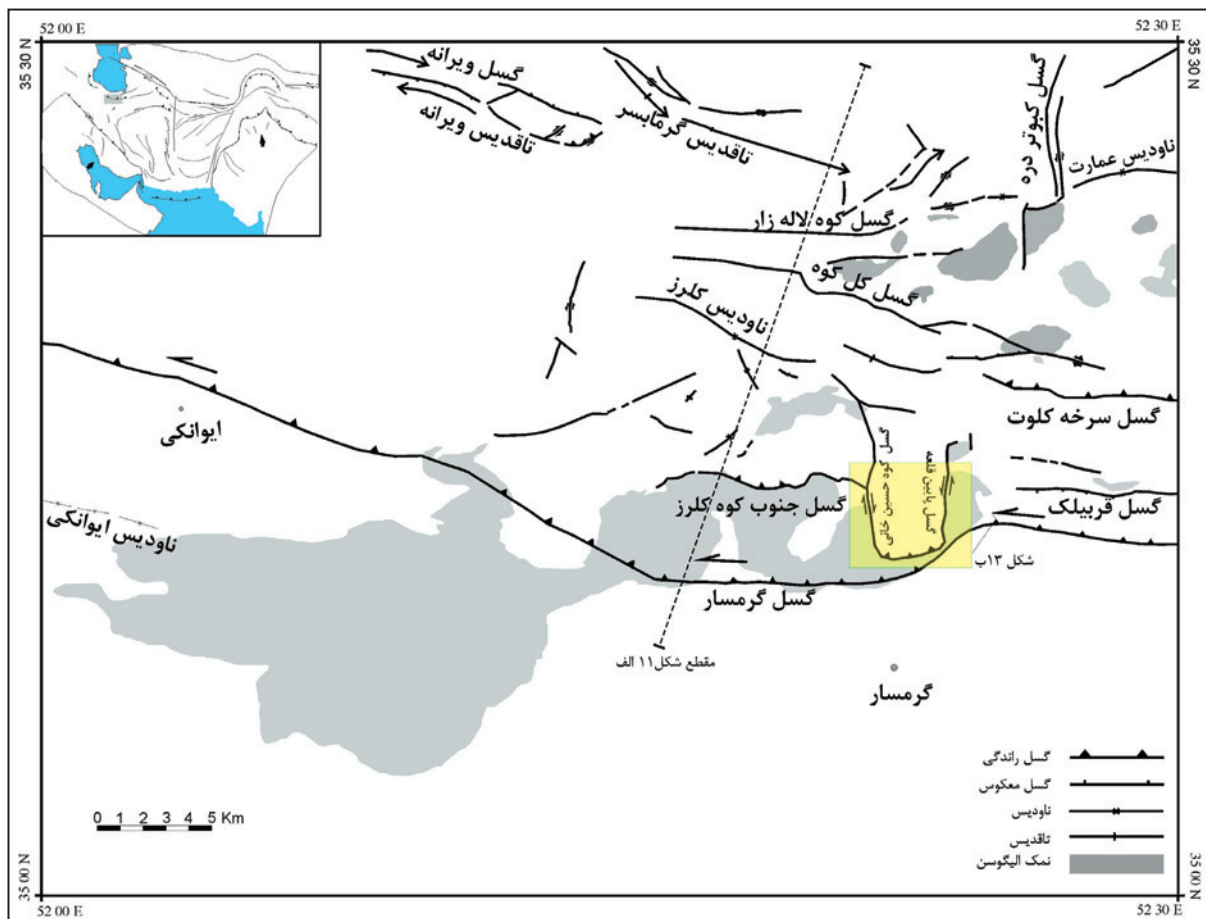
مشاهدات مدل‌سازی روشن کردند که شناور شدن بلوک‌ها روی سیلیکون در مراحل آخر تغییر شکل به وجود آمد، بنابراین بلوک‌های شناور در پیشانی کوه‌های گرمسار به احتمال در زمان‌هایی نزدیک به زمان حال شکل گرفته‌اند.

به مدل، گسل‌های راندگی با پیش‌روی با هر دو سو و درجه شیب‌هایی که از یک الگوی خاص پیروی نمی‌کنند از ویژگی‌های ناحیه با سطح جداکننده خمیری است. راندگی‌های به سوی پیش‌بوم و درجه شیبی که به سوی هسته کوهستان زیاد است از ویژگی‌های اصلی ناحیه با سطح جداکننده اصطکاکی است.

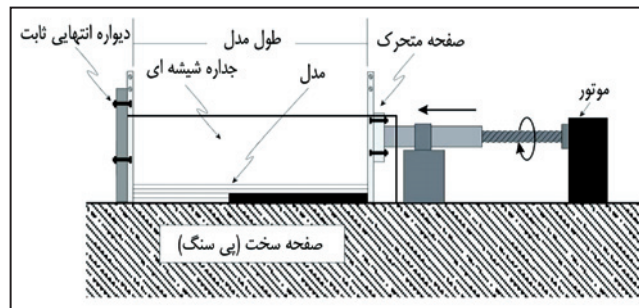
با استفاده از داده‌های مدل‌سازی می‌توان به این نتیجه رسید که وجود این لایه جداکننده یک عامل مهم برای رخنمون سازند قم در پیشانی تغییر شکل است.

زمین‌ساخت شناوری سبب شده است که بلوک‌هایی روی نمک شناور و دچار چرخش شوند. در اثر این جابه‌جایی گسل‌هایی به وجود آمده‌اند. میزان جابه‌جایی روی شماری از این گسل‌ها به چندین کیلومتر می‌رسد.

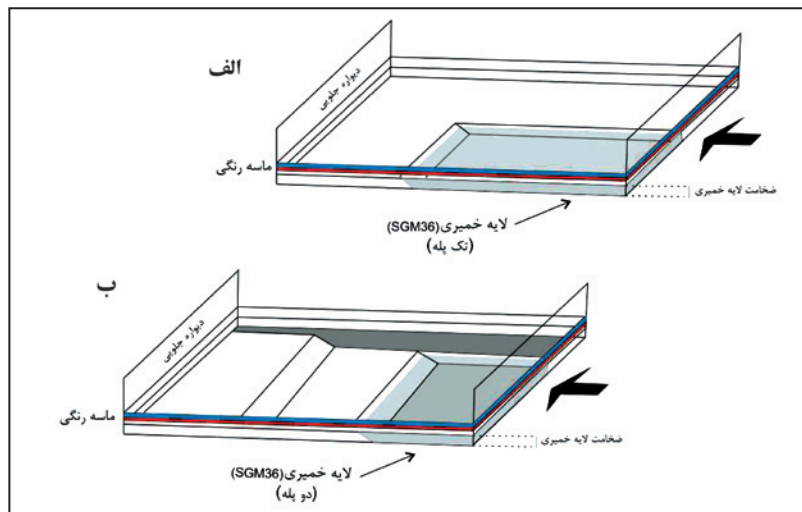
با توجه به این که نمک‌شماره‌های موجود در منطقه رسوبات کواترنر را می‌پوشانند، می‌توان به این نتیجه رسید که بیرون‌ریزی نمک در دوران کواترنر وجود داشته است. از سوی دیگر، با توجه به این که پس از نهشته



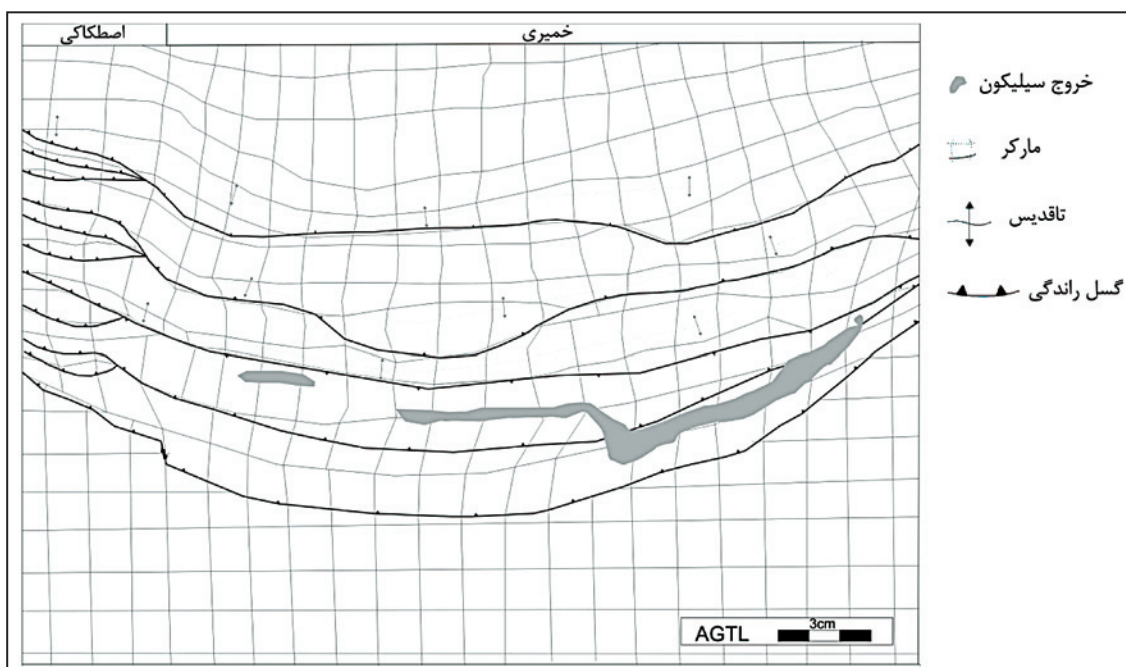
شکل ۱- نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه (با تغییرات از Amini et al., 2004). در این نقشه می‌توان گسل گرمسار را مشاهده کرد. همان‌گونه که مشخص است این گسل یک گسل راندگی با مؤلفه راست‌الغز چپ‌بر است. در نقشه بالا سمت چپ موقعیت منطقه مورد مطالعه در البرز را با مستطیل خاکستری رنگ می‌توان مشاهده کرد.



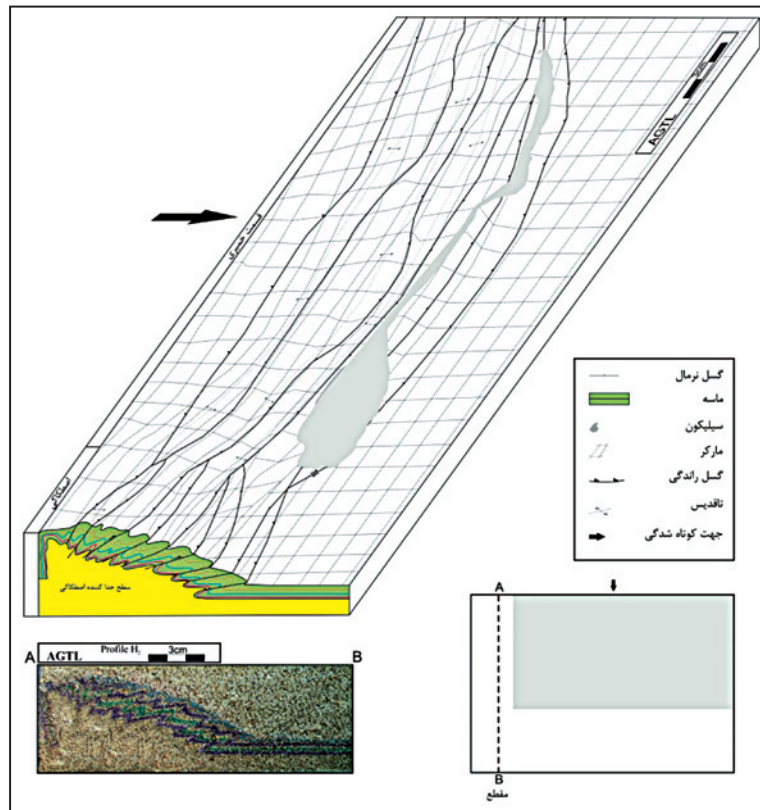
شکل ۲- تصویر نمادین از دستگاه مدل سازی که بخش های مختلف آن در این شکل مشاهده می شود.



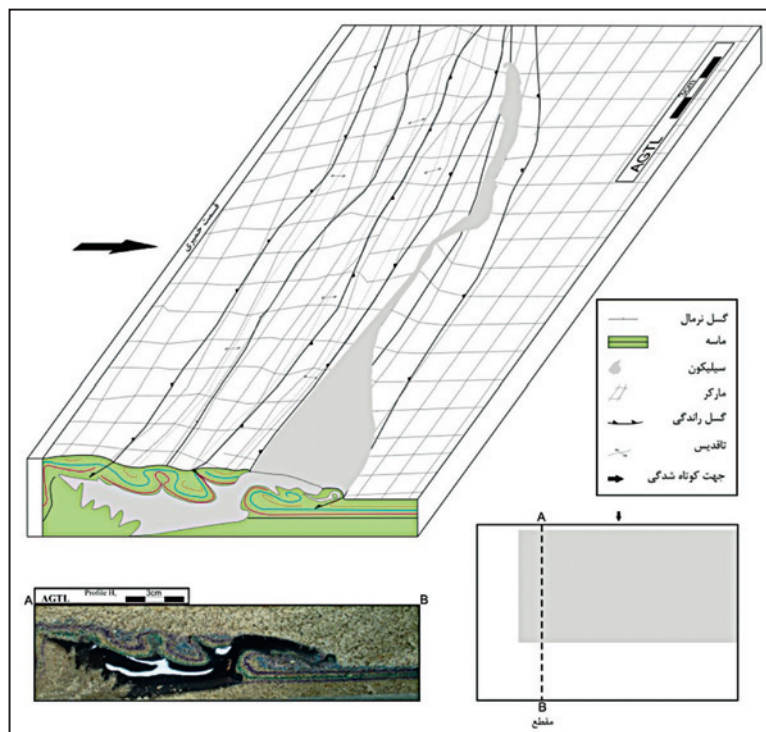
شکل ۳- تصویری نمادین از مدل که یک دید کلی از آن ارائه می دهد. الف) تک پله و ب) دو پله.



شکل ۴- دید نقشه ای در پایان آزمایش مدل شماره ۱۲. این شکل پهنه انحرافی را در پیشانی تغییر شکل بالای لایه های زیرین اصطکاکی و خمیری نشان می دهد. این اختلاف جابه جایی سبب اختلاف در سبک ساختمانی این دو بخش می شود.

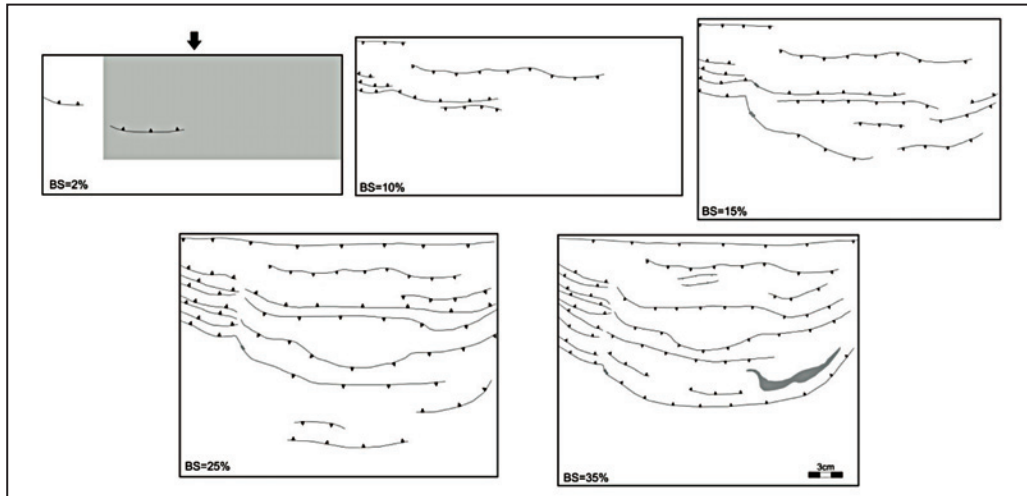


شکل ۵- وجود ساختارهای با یک سو از مهم‌ترین ویژگی‌های ناحیه با سطح جداکننده اصطکاکی است. همان‌گونه که در این شکل نیز مشخص است زاویه نواری بالا ولی پیش‌روی تغییر شکل کمتر از ناحیه با سطح جداکننده خمیری است.

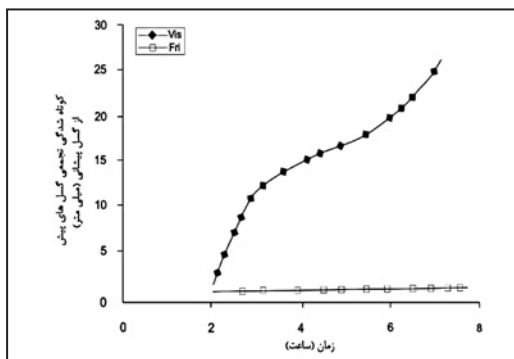


شکل ۶- بیرون‌ریزی سیلیکون و روان شدن بر سطح مدل به همراه ساختمان‌های دیگر در این شکل نشان داده شده است. از جمله این ساختارها می‌توان به چین‌خوردگی با هسته پر شده از سیلیکون، راندگی‌ها و پس‌راندگی‌ها اشاره کرد.

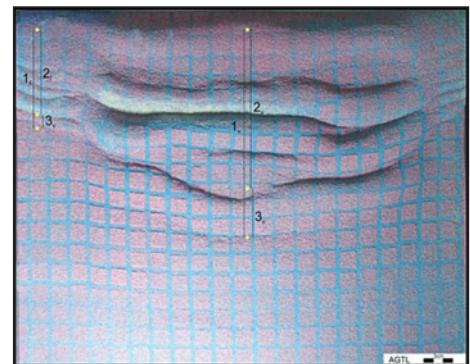




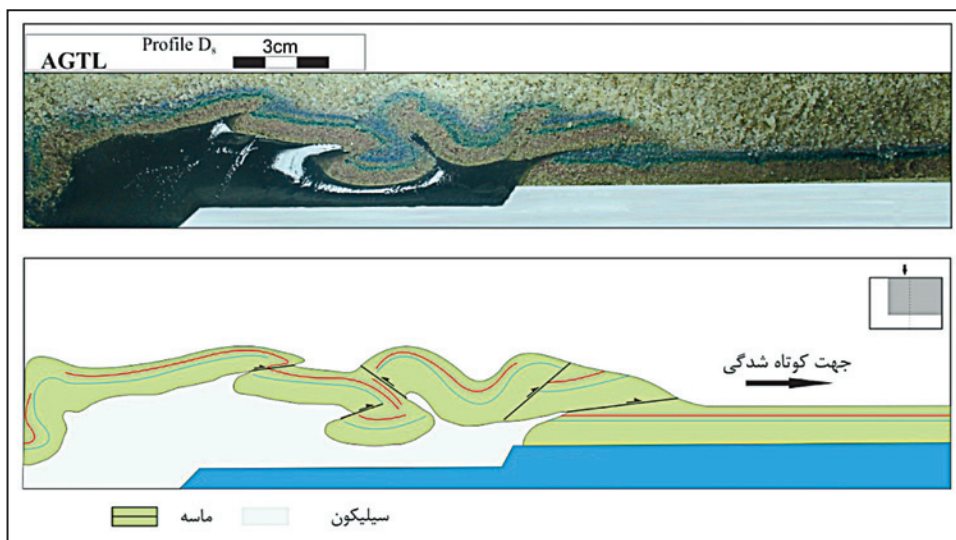
شکل ۷- وضعیت گسل‌ها در مراحل مختلف کوتاه‌شدگی (به ترتیب از چپ به راست ۲، ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد) که نشان‌دهنده شکل‌گیری ساختمان‌ها و پیش‌روی پیشانی تغییر شکل است. سایه خاکستری در مرحله اول نشان‌دهنده توزیع سیلیکون در مدل است. پیکان سوی کوتاه‌شدگی را نشان می‌دهد.



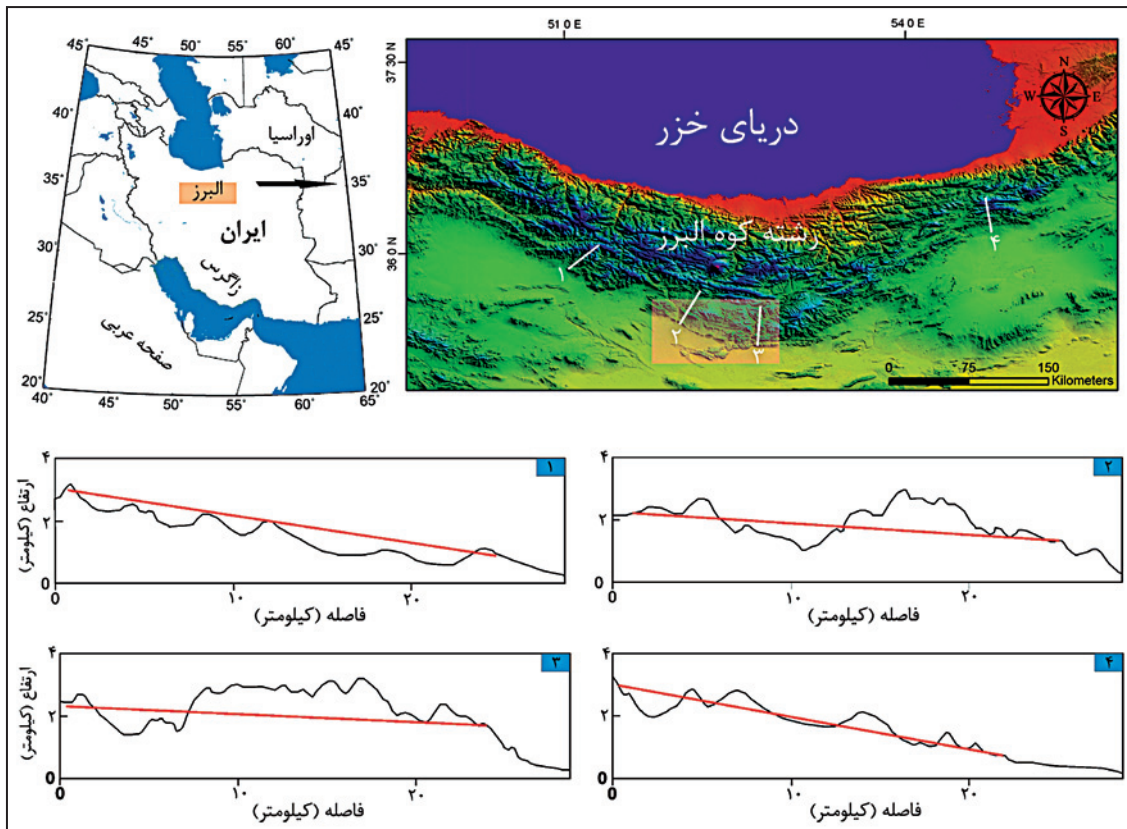
شکل ۹- نموداری که اندازه‌گیری آن از مدل به دست آمده است. در این نمودار محور افقی زمان و محور عمودی کوتاه‌شدگی جمع‌گسلی‌های پیش از گسل‌پیشانی است. تغییر شکل در بخشی که لایه جداکننده خمیری است پخش شده است.



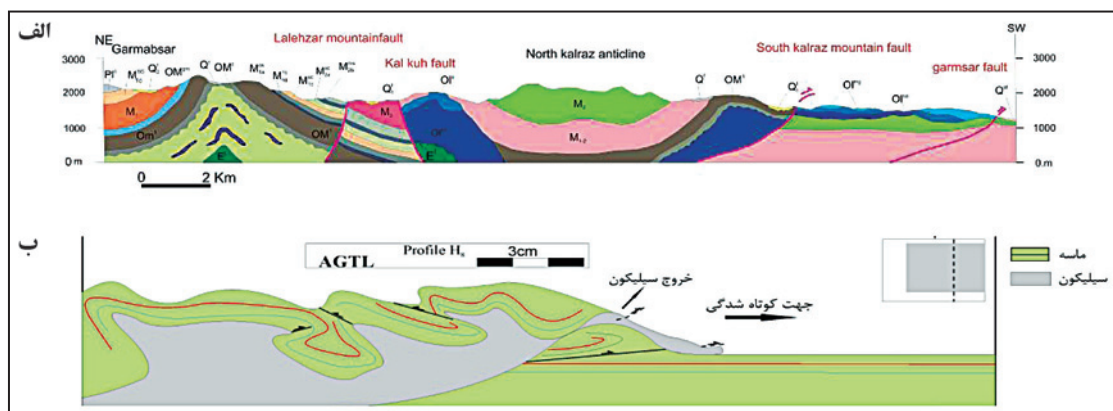
شکل ۸- اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی روی گسل‌پیشانی. اندازه‌گیری روی هر دو بخش انجام می‌شود



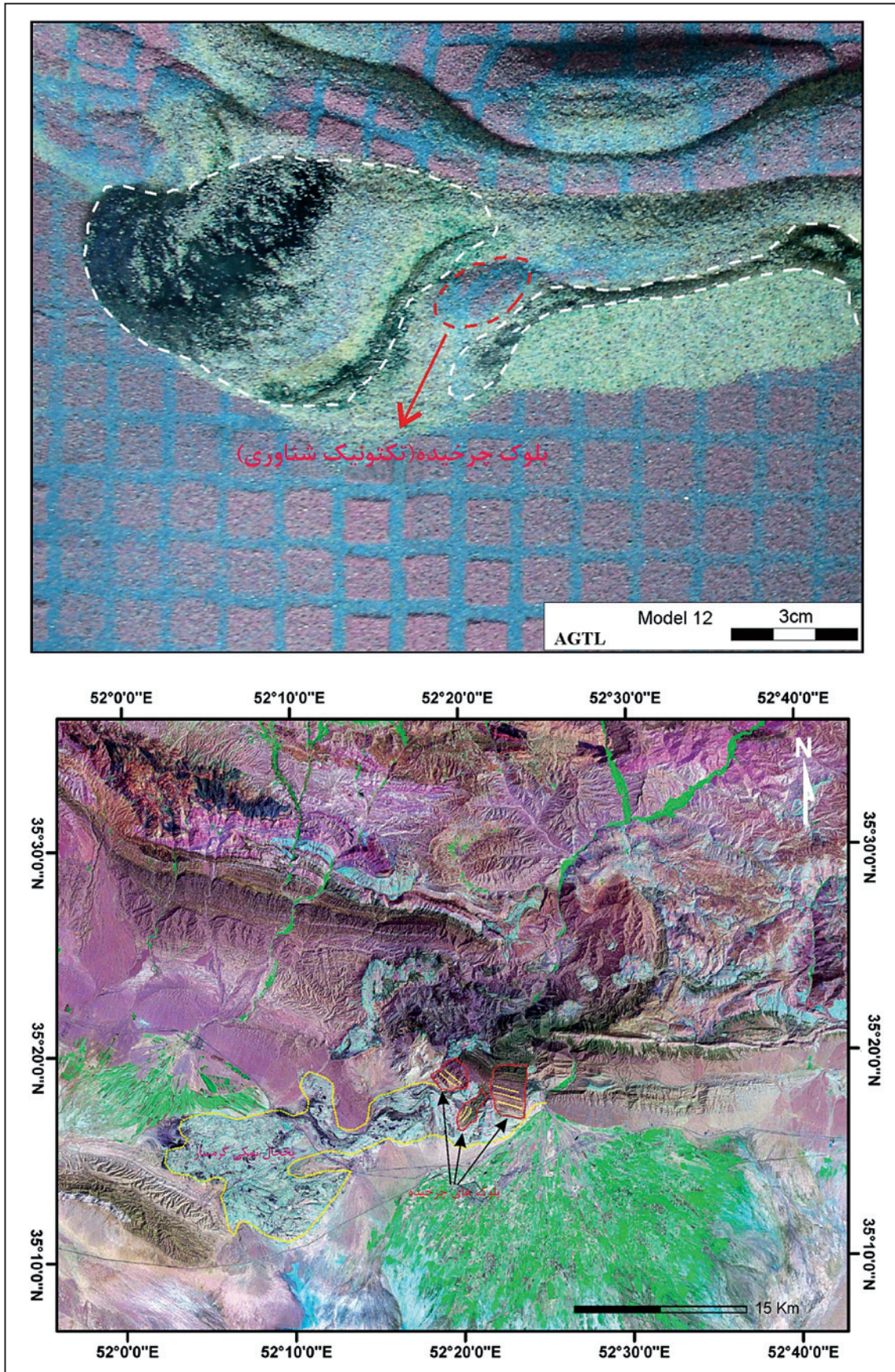
شکل ۱۰- این شکل مدلی را نشان داده است که دو پله دارد. ساختارهای با هر دو سو را می‌توان در این مدل مشاهده کرد.



شکل ۱۱- مقاطع مختلف دامنه جنوبی رشته کوه البرز با استفاده از مدل ارتفاعی رقمی (DEM) ۸۵ متر. برپایه مبانی تئوری، مناطقی که در آن نمک به عنوان لایه زیرین قرار گرفته است، زاویه نواری کمتری نسبت به مناطق کناری خود دارند که بدون این لایه هستند. برش شماره دو و سه در جایی هستند که لایه نمکی در آن منطقه وجود دارد. همان گونه که مشخص است زاویه نواری در این دو برش کمتر از دو برش دیگر است.



شکل ۱۲- الف) برشی زمین‌شناسی از منطقه گرمسار (با تغییرات از Amini et al., 2004) و ب) مقطعی از مدل شماره ۱۲ که موازی سوی کوتاه‌شدگی است. در حاشیه سمت راست شکل موقعیت مقطع در مدل را می‌توان دید.



شکل ۱۳- الف) بخشی از مدل که در آن تکه‌هایی از مدل دچار چرخش شده‌اند، ب) بخشی از یک تصویر ماهواره‌ای (Landsat) که در آن بلوک‌هایی دیده می‌شوند که دچار به هم ریختگی و چرخش شده‌اند.

**کتابنگاری**

صفایی، ه.، ۱۳۷۹- تحلیل ساختاری و ژئودینامیکی تغییر روند البرز مرکزی، پایان نامه دکتری، دانشگاه شهید بهشتی.  
 هروی، آ.، ۱۳۹۰- فرگشت ساختاری گسل گرمسار از دوره نئوژن تا به امروز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علم و تحقیقات، ۱۵۵ص.

**References**

- Alavi, M., 1996- Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz Mountain System in Iran. *Journal of Geodynamics* 21/1, 1-33.
- Allen, M. B., Jones, S., Ismail-Zadeh, A., Simmons, M. D. & Anderson, L., 2002- Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian Basin, *Geology*, 30, 775 – 778.
- Amini, B., Rashid, H., Rezaian, M., Allahmadadi, S., Zabihi, M. R., Vahdati Daneshmand, B. & Haddadan, M., 2004- Geological map of Iran, Garmsar sheet, scale 1:100000, *Geol. Surv. Of Iran, Tehran*.
- Axen, G. J., Lam, P. J., Grove, M., Stockli, D. F. & Hassanzadeh, J., 2001- Exhumation of the westcentral Alborz mountains, Iran, Caspian subsidence, and collision-related tectonics, *Geology*, 29, 559 – 562.
- Baikpour, Sh., Zulauf, G., Sebt, A., Kheirolahi, H. & Diet, C., 2010- Analogue and geophysical modelling of the Garmsar Salt Nappe, Iran: constraints on the evolution of the Alborz Mountains *Journal of J. Int.*
- Bahroudi, A. & Koyi, H. A., 2003- The effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold and thrust belt: an analog modeling approach, *J. Geol. Soc. Lond.*, 160, 719–733.
- Ballato, P., Nowaczyk, N. R., Landgraf, A., Strecker, M. R., Friedrich, A. & Tabatabaei, S. H., 2008- Tectonic control on sedimentary facies pattern and sediment accumulation rates in the Miocene foreland basin of the southern Alborz mountains, northern Iran, *Tectonics*, vol. 27.
- Berberian, M. & King, G. C. P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, *Can. J. Earth Sci.*, 18(2), 210 – 265.
- Cotton, J. T. & Koyi, H. A., 2000- Modelling of thrust fronts above ductile and frictional decollements: application to structures in the salt range and Potwar plateau, Pakistan. *Geological Society of America Bulletin*, 112, 351-363.
- Davis, D. M. & Engelder, T., 1985- The role of salt in fold-and-thrust belts. *Tectonophysics* 119, 67-88.
- Davis, D. M. & Engelder, T., 1987- Thin-skinned deformation over salt. In: Lerche, I. & O'Brien, J.J. (eds) *Dynamical Geology of Salt and Related Structures*. Academic Press, New York, 301–337.
- Ge, H., Jackson, M. P. A. & Vendeville, B. C., 1997- Kinematics and dynamics of salt tectonics driven by progradation, *AAPG Bull.*, 81(3), 398–423.
- Guest, B., Axen, G. J., Lam, P. S. & Hassanzadeh, J., 2006- Late Cenozoic shortening in the westcentral Alborz mountains, northern Iran, by combined conjugate strike-slip and thin-skinned deformation, *Geosphere*, 2, 35 – 52.
- Hubbert, M. K., 1937- Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geological Society of America Bulletin*, 48, 1459–1520.
- Jackson, M. P. A., Cornelius, R. R., Craig, C. H., Gansser, A., Stocklin, J. & Talbot, C. J., 1990- Salt diapirs of the Great Kavir, central Iran, *Mem. Geol. Soc. Am.*, 177, 139 pp.
- Marques, F., 2008- Thrust initiation and propagation during shortening of a 2-layer model lithosphere. *Journal of Structural Geology*, 30, 29-38.
- Schlöder, Z. & Urai, J. L., 2006- Deformation and recrystallization mechanisms in mylonitic shear zones in naturally deformed extrusive Eocene–Oligocene rocksalt from Eyvanekey plateau and Garmsar hills (central Iran). *Journal of Structural Geology*.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin*, 52, 1229–1258.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, F., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F. & Chery, J., 2004- Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophys. J. Int.*, 157, 381 – 398.
- Warren, J. K., 2008- *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer. 1035pp.

## The Effect of Upper Red Formation Salt Unit on Structures of South Central Alborz “An Analogue Modelling Approach”

M. Royatvand <sup>1\*</sup>, A. Bahroudi <sup>2</sup>, M. Ghorashi <sup>3</sup>, M. R. Ghasemi <sup>4</sup> & S. A. Aghahosseini <sup>1</sup>

<sup>1</sup> M.Sc., Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Mine Department, Faculty of Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Basic Science Faculty, Islamic Azad University, North Tehran Branch; Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Assistant Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2011 March 26

Accepted: 2011 September 17

### Abstract

The Oligocene salt in the Garmsar and Eyvankey plateau, south–central Alborz, has extruded on the quaternary sediments and formed a salt glacier. This open-toe salt glacier is about 24×17 km that is unique continental salt glacier in the world, dimensionally. Also, this ductile substrate has affected on structural styles of this region. However, little systematic work has done on it. To investigate the structural styles of the region that affected by a ductile substrate and adjacent region with a frictional decollement, and also the structures of the salt glacier, series of models were done which were scaled sandbox models. These sandbox models simulated the propagation of deformation of thin-skinned simultaneous shortening above adjacent ductile and frictional of two end member of decollement. Model results illustrate that above a ductile substrate, deformation propagates further and more rapidly than above a frictional substrate as we can see in the nature that the region with a ductile substrate is so broader than the adjacent region with a frictional decollement. Like the models, toward the north in the nature where the Decollement is frictional, from North Tehran Fault as a frontal fault to Mosha and Kandovan Faults in the core of Alborz Mountain, the dip of the faults are increased and only forward-vergent imbricate faults, whereas above the ductile substrate the dip of faults has not a definite pattern of dip and also, both foreland and hinterland imbricate faults develop.

**Keywords:** Salt Glacier, Decollement, Modelling, Imbricate fault, South central alborz.

For Persian Version see pages 87 to 98

\*Corresponding author: M. Royatvand; E-mail: mohsenroyatvand@gmail.com