



مدل سازی تجربی تغییرات کوتاه شدگی در ارتباط با ضخامت متفاوت سری نمکی هرمز، زاگرس

بابک سامانی^{۱*}، عباس چرچی^۲، سید یوسف موسوی^۳

- ۱- دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۲- استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۶



تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹

چکیده

مدل سازی تجربی یکی از راهکارهای کاربردی در فهم فرآیندهای پیچیده زمین ساختی به ویژه در ساختارهای به شدت پیچیده نمکی است. در این مطالعه، با استفاده از یک مدل ساز جعبه ماسه آنالوگ، نقش تغییرات ضخامت سری نمکی هرمز بر روی میزان کوتاه شدگی زاگرس، با توجه به چگالی پایین و خزش نمک شبیه سازی شده است. در این مطالعه پهنه ساختاری زاگرس بر اساس حضور یا عدم حضور ساختارهای نمکی و ضخامت متفاوت سری نمکی هرمز به سه بخش لرستان، پهنه مرکزی و فارس تقسیم گردیده است. بر این اساس بخش غربی منطقه فاقد حضور سری نمکی هرمز بوده و به طور تدریجی به سمت سیستم گسلی قطر-کازرون بر ضخامت آن افزوده شده و در شرق این سیستم گسلی ضخامت سری نمکی هرمز به حداکثر خود می رسد. برای هر کدام از این بخش ها یک مدل طراحی گردید و در این مدل ها ضخامت متفاوت سری نمکی، چگالی پایین نمک و رفتار خزشی آن مورد توجه قرار گرفته است. در نهایت یک طرح شماتیک کلی برای توضیح وجود و پراکنش ساختارهای نمکی در زاگرس پیشنهاد گردید. بر اساس این طرح کلی، سیستم گسلی قطر-کازرون یک عامل مهم در تغییرات جانبی ضخامت نمک در قاعده است. به گونه ای که در بخش شرقی آن ساختارهای نمکی زیادی وجود دارند، ولی به طور عکس، در بخش غربی آن به جز چند ساختار کوچک مدفون اثری از ساختارهای نمکی هرمز دیده نمی شود.

کلید واژه ها: مدل سازی تجربی، زمین ساخت نمک، نمک هرمز، سیستم گسلی قطر-کازرون، زاگرس.



مقدمه

استفاده از داده‌های صحرایی، به تنهایی نمی‌تواند در فهم فرآیندهای پیچیده تکامل ساختاری و ژئودینامیکی در زمین‌شناسی راهگشا باشد. بر این اساس استفاده از یک مدل تجربی می‌تواند به محققین این رشته کمک کند (Ritter et al., 2018) به منظور آزمایش سیستم‌های بزرگ و پیچیده، معمولاً دانشمندان از یک سیستم مشابه در ابعاد کوچکتر استفاده می‌کنند، به این سیستم‌های مشابه مدل گفته می‌شود. به‌طور معمول استفاده از چنین مدل‌هایی به منظور صرفه‌جویی در منابع، ابزارها و زمان صورت می‌گیرد (David and Nolle, 1982). استفاده از مدل‌ها، به‌ویژه مدل‌های تجربی در زمین‌شناسی بسیار متداول است. در حقیقت از زمان ویلیام اسمیت (۱۷۹۳-۱۸۴۱)، زمین‌شناسان زیادی علاقه‌مندی خود به این مدل‌ها و مدل‌سازی را نشان داده‌اند (Schellart and Strak, 2016). زمین‌شناسان معمولاً از مدل‌های تجربی آنالوگ برای آزمایش عوامل طبیعی درگیر در به‌وجود آمدن و تغییر ساختارها و فرآیندهای زمین‌شناسی استفاده می‌کنند.

(Bonini et al., 2003; Corti et al., 2010; Daniel, 2013; Deng et al., 2019; Dooley and Schreurs, 2012; Merten et al., 2006; Nabavi et al., 2017; Waf et al., 2016; Wellmann et al., 2014).

به‌طور کلی مدل‌هایی که توسط جعبه ماسه آنالوگ اجرا می‌شوند از مهمترین ابزارها برای شبیه‌سازی ساختارهای زمین‌شناسی بوده، و بطور خاص در فرآیندهای زمین‌ساختی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Ritter et al., 2017). وقوع چین خوردگی، گسلش و شکستگی در نتیجه کوتاه‌شدگی پوسته شکننده امری بدیهی بوده که بررسی زمانی و تغییرات چنین ساختارهایی در طول زمان به فهم کینماتیک مناطق دگرشکل شده کمک خواهد نمود. استفاده از مدل‌های همگن نتایج را قابل پیش‌بینی و متفاوت‌تر از ساختارهای طبیعی نشان می‌دهد. از این رو بهتر است تا حدودی تاثیر برخی ناهمگونی‌های طبیعی را بر روی مدل اعمال نماییم تا نتایج حاصل با شرایط طبیعی مشابه‌تر گردد (Bonanno et al., 2017).

در میان تمام ساختارهای زمین‌شناسی آنهایی که با رفتار نمک درگیر هستند دارای بیشترین پیچیدگی می‌باشند. این پیچیدگی بر اثر دو ویژگی مهم نمک بوجود می‌آید: چگالی پایین و رفتار غیر قابل تراکم نمک در پاسخ به وزن زیاد طبقات بالایی که به صورت خزش دیده می‌شود. این دو ویژگی سیستم‌های نمکی را

پیچیده نموده و پیش‌بینی رفتار آنها را سخت می‌نمایند (Jack-son and Hudec, 2017). همراهی لایه‌های نمکی با ساختارهای زمین‌شناسی فهم عوامل کینماتیکی چنین ساختارهایی را سخت می‌کند؛ به عبارت دیگر: وجود نمک در زمین‌شناسی منطقه تقریباً همیشه گمراه‌کننده است.

وجود نمک و تأثیر چگالی و رفتار متفاوت آن تأثیر به‌سزایی بر میزان کوتاه‌شدگی خواهد داشت (Jackson and Hudec, 2017)، از این رو در این مطالعه تأثیر ضخامت متفاوت نمک بر روی تغییرات کوتاه‌شدگی در زاگرس با استفاده از آزمایش جعبه ماسه آنالوگ مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش در پی پاسخ این سؤال‌ها خواهیم بود: چگونه تغییرات جانبی ضخامت نمک بر روی کوتاه‌شدگی زاگرس اثر گذاشته است؟ نقش سیستم گسلی قطر-کازرون در ایجاد تغییرات جانبی ضخامت نمک چه بوده است؟ اختلاف ضخامت لایه‌های نمکی چه اثری بر روی توپوگرافی و تراکم ساختارها در منطقه دارد؟ برای پاسخ به این سؤال‌ها چندین مدل مورد آزمایش قرار گرفت تا تغییرات را در دو طرف منطقه مورد مطالعه و مرز میانی مورد بررسی قرار دهیم.

مهم‌ترین فرضیات موجود در این پژوهش عبارتند از:

۱. سری نمکی هرمز از غرب به شرق دچار تغییرات ضخامت شده است، به‌طوری که در غرب کمترین مقدار ضخامت و قسمت‌های شرقی بیشترین ضخامت را دارا می‌باشند. هرچند این موضوع در بسیاری از مطالعات مورد توجه قرار گرفته است اما تاکنون به عنوان یک حقیقت از ویژگی‌های زمین‌شناختی زاگرس مورد اتفاق نظر نمی‌باشد.

۲. از آنجایی که همگرایی زاگرس تحت تأثیر یک حرکت قیچی (movement Sphenochasm) مانند بوده و قطب اولر آن در ناحیه‌ای در شمال آفریقا قرار می‌گیرد (قطب اولر صفحات آفریقا-عربستان در $13^{\circ}N, 62^{\circ}E$) (Westaway, 2003)، بنابراین در نواحی مختلف مقدار کوتاه‌شدگی به‌طور طبیعی متفاوت است، این اثر در کنار کوتاه‌شدگی‌های محلی ناشی از دگرشکلی درون کمربند زاگرس و تغییرات ضخامت سطح جدایشی نمکی هرمز در قاعده، اختلاف مقادیر کوتاه‌شدگی در منطقه را برجسته‌تر نموده است.

به منظور آزمایش این فرضیات چندین مدل تجربی بر اساس واقعیت‌های زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در برخی نواحی کمربند کوه‌زایی زاگرس طراحی گردید. هدف از این مطالعه، مقایسه مدل‌ها با زمین‌شناسی منطقه، بر اساس وجود ساختارهای



طبیعی و ساختارهایی است که در مدل به وجود آمده‌اند.

جایگاه ساختاری و زمین شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه بخشی از کمربند چین-راندگی زاگرس (Zagros fold-thrust belt) می‌باشد. تصور می‌شود این کمربند کوه‌زایی روی سری نمکی هرمز قرار گرفته باشد، و از برخورد صفحه عربی و ایران به وجود آمده است (Alavi, 2007). مرز شمال غربی زاگرس گسل امتداد لغز آنا تولی شرقی واقع در جنوب شرق ترکیه در نظر گرفته شده است و مرز جنوب شرقی آن خط عمان است. این مرز توسط فعالیت شدید لرزه‌ای، آنومالی‌های گرانشی منفی، تغییرات ناگهانی رخساره‌ها در واحدهای چینه‌شناسی فانروزوئیک، تغییر در الگوهای ساختاری، و تغییر پوسته قاره‌ای زیر کمربند زاگرس به پوسته اقیانوسی در زیر منشور برافزایشی مکران تشخیص داده شده است (Alavi, 2007; McQuarrie, 2004).

کمربند کوه‌زایی زاگرس در ایران از شمال غرب به جنوب شرق به سه پهنه لرستان، پهنه مرکزی و پهنه فارس قابل تقسیم می‌باشد (Farzipour-Saein et al., 2013). در این مطالعه به منظور مدل‌سازی رفتار سیستم گسلی قطر-کازرون فرض بر این است که پهنه مرکزی زاگرس به وسیله سیستم گسلی قطر-کازرون به دو بخش شرقی و غربی تقسیم شده است. گسل قطر-کازرون با طول تقریبی ۴۵۰ کیلومتر، به علت همگرایی مایل صفحات عربی و ایران در طی برخورد، به عنوان یک مرز بین نواحی مجاور هم در دگرشکلی فعال زاگرس دارای اهمیت بسیار زیادی است (Authemayou et al., 2005; Dana et al., 2015)؛ همچنین حداقل یک اثر با اهمیت برای این گسل در این مطالعه مورد توجه قرار گرفته است و آن فقدان ساختارهای نمکی رخنمون یافته در بخش‌های غربی گسل قطر-کازرون و فراوانی چنین ساختارهایی در نواحی شرقی آن است.

پوشش رسوبی پی سنگ در بخش‌های مختلف زاگرس یکسان نبوده و ضخامت این پوشش رسوبی در بخش‌های لرستان در حدود ۶ الی ۱۱ کیلومتر، در نواحی مرکزی حدود ۵/۷ الی ۱۱/۳ کیلومتر و در پهنه فارس در حدود ۵ الی ۱۰ کیلومتر می‌باشد. جدول ۱ ضخامت پوشش رسوبی به تفکیک زمانی در هر یک از بخش‌های نام برده را نشان می‌دهد (Alavi, 2007). بر اساس جدول شماره ۱ در قاعده ستون چینه‌شناسی، سازندهای پالئوزوئیک و قدیمی‌تر از آنها قرار می‌گیرند، مهم‌ترین افق این بخش در این مطالعه سری نمکی هرمز است که در بخش‌های قاعده‌ای این ستون نهشته شده است.

با توجه به سیمای ساختاری زاگرس، یک اتفاق نظر عمومی وجود دارد که پوشش رسوبی در امتداد تبخیری‌های اینفراکامبرین سازند هرمز از پیسنگ جدا شده است، که تغذیه کننده دیاپیرهای بزرگ در منطقه فارس می‌باشد (Bigi et al., 2018) با وجود اینکه قبلاً عقیده بر این بود که نمک هرمز قدیمی‌ترین واحد رسوبی کمربند زاگرس است، مقاطع لرزه‌ای جدید با وضوح بالا نشان داده‌اند ضخامت قابل توجهی از طبقات پیش از هرمز به طور مستقیم بر روی پیسنگ شکافدار پرکامبرین قرار گرفته‌اند (Hassanpour et al., 2018).

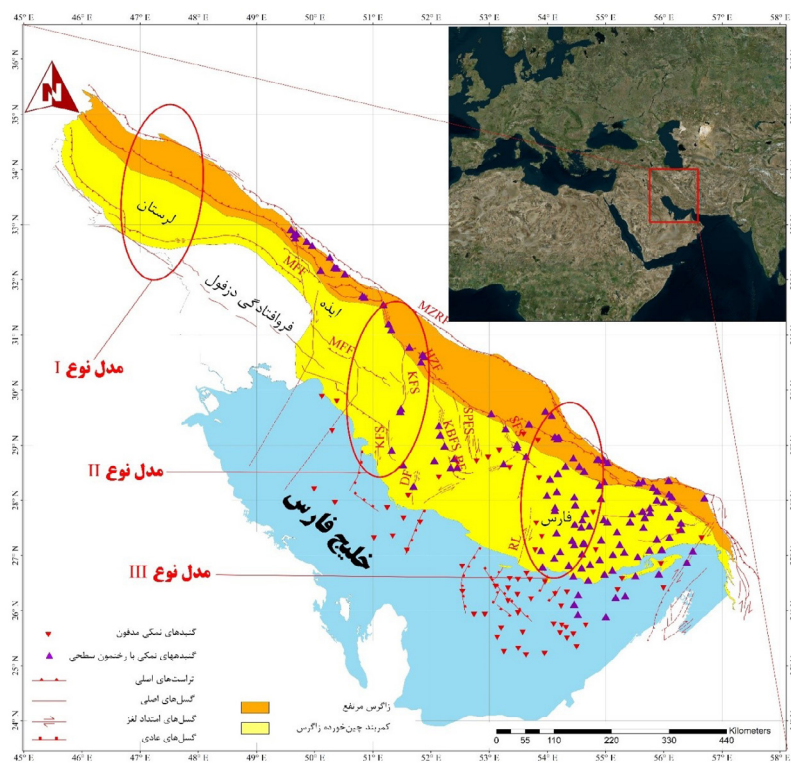
مطالعات صورت گرفته بر اساس مقاطع عرضی متعادل شده (Balanced cross section) و داده‌های حاصل از شبکه‌های GPS نشان می‌دهد که مقادیر کوتاه شدگی در بخش‌های مختلف زاگرس یکسان نبوده و دارای مقادیر متفاوتی می‌باشد (Alavi, 2007; Austermann and Iaffaldano, 2013; Mouthereau et al., 2007; Tavakoli et al., 2008; Walpersdorf et al., 2006). مقادیر کوتاه شدگی در بخش‌های مختلف زاگرس بر اساس نتایج مطالعات صورت گرفته در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- خلاصه ضخامت ستون چینه‌شناسی زاگرس در مناطق مورد مطالعه (بر اساس مطالعه Alavi, ۲۰۰۷)

سن زمین‌شناسی	فارس (معادل مدل نوع III)	سیستم گسلی کازرون (معادل مدل نوع II)	لرستان (معادل مدل نوع I)
سنوزوئیک	۱۰۰۰-۴۳۰۰	۸۰۰-۴۲۵۰	۱۳۵۰-۳۵۰۰
مزوزوئیک	۱۷۵۰-۳۱۵۰	۲۹۵۰-۵۰۵۰	۲۷۰۰-۵۳۵۳
پالئوزوئیک و قدیمی‌تر	۲۴۰۰-۲۴۵۰	۲۰۰۰	۱۹۰۰
مجموع	۵۱۵۰-۹۹۰۰	۵۷۵۰-۱۱۳۰۰	۵۹۵۰-۱۰۷۵۰

جدول ۲- خلاصه مقادیر کوتاه شدگی در نواحی مختلف زاگرس و نواحی مطابق آنها براساس مطالعات پیشین

منابع	نرخ کوتاه شدگی (mm/yr)	ناحیه
(Alavi, 2007; Allen et al., 2004; Walpersdorf et al., 2006)	۱۸	لرستان (معادل مدل نوع I)
(Austermann and Iaffaldano, 2013)	۲۰	
(Mouthereau et al., 2007)	۲۸	
(Talebian and Jackson, 2004)	۱۸-۳۰	
(Authemayou et al., 2005)	۱۰	سیستم گسلی کازرون (معادل مدل نوع II)
(Hessami et al., 2006)	۸-۱۲	
(Authemayou et al., 2009; Walpersdorf et al., 2006)	۲۱	
(Allen et al., 2004)	۲۲	فارس (معادل مدل نوع III)
(Authemayou et al., 2009)	۲۳	
(Austermann and Iaffaldano, 2013; Walpersdorf et al., 2006)	۲۵	
(Alavi, 2007)	۲۸	
(Talebian and Jackson, 2004)	۲۲-۳۴	
(Mouthereau et al., 2007)	۳۵	



شکل ۱- نقشه زمین شناسی و پراکندگی گنبد‌های نمکی منطقه مورد مطالعه، بیضی‌های قرمز محل هر مدل را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشهود است مدل I که فاقد نمک استروی لرستان قرار گرفته است، در بخش مرزی میانی که به صورت گسل قطر-کازرون نشان داده شده است مدل نوع II با دو بخش غربی و شرقی خود قرار می‌گیرد و مدل سوم روی ناحیه غنی از نمک فارس قرار گرفته است، گنبد‌های نمکی رخنمون پیدا کرده به صورت مثلث‌های کوچک بنفش و گنبد‌های نمکی مدفون با مثلث‌های قرمز رنگ معکوس نشان داده شده‌اند، (نقشه بر اساس این مطالعات تهیه شده است: Alavi, 2007; Jahani et al., 2017; Pollastro (compiler) et al., 1997).
 MZRF: راندگی اصلی زاگرس، MFF: گسل جبهی کوهستان، KFS: سیستم گسلی قطر-کازرون، DF: گسل دشتی، KBFS: سیستم گسلی کره‌بس، SPFS: سیستم گسلی سبزپوشان، SFS: سیستم گسلی سروستان و RL: گسل رازک.



آماده سازی مدل و انتخاب مواد

شرایط اجرای مدل در هر بخش در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است، برای اجرای مدل تجربی، سه مدل جعبه ماسه آنالوگ مختلف طراحی شد، جزئیات مدل ها در یک طرح شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. توصیف جزئیات مدل ها و نواحی تقریبی متناظر آنها در جدول های ۳ و ۴ درج گردیده است. جعبه ماسه مورد استفاده دارای ۰۲ سانتیمتر عرض و ۷۴ سانتیمتر طول در قاعده بوده و با لایه هایی با ضخامت کلی کمتر از ۵ سانتیمتر از لایه هایی متشکل از رزین جامد تبادل یونی (از اینجا به بعد رزین) و ماسه کوارتزی خشک پر گردیده (ضخامت متوسط ۴/۵ سانتیمتر). آهنگ حرکت فک متحرک جعبه ماسه در تمامی مدل های اجرا شده به طور نسبی یکنواخت است.

به منظور شبیه سازی منطقه بر اساس توضیحات فوق، ناحیه به سه زون تقسیم گردید (شکل ۱). تقسیم بندی این نواحی بر اساس تغییرات ضخامت لایه های نمک صورت گرفته است، و زون ها از قرار زیر هستند:

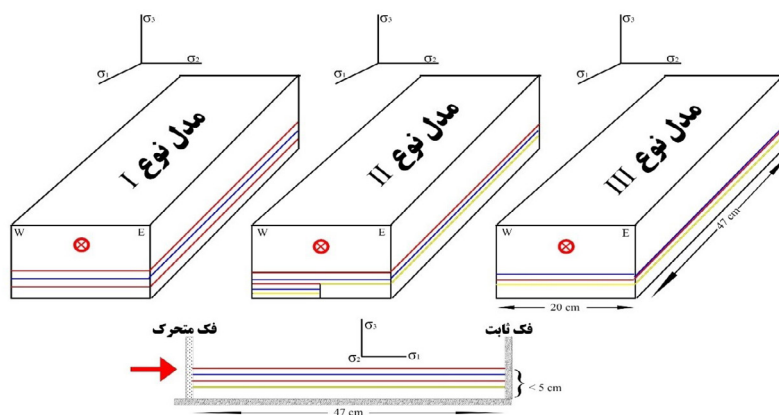
۱. قسمت غربی که فاقد نمک یا دارای مقدار ناچیزی نمک در قاعده است (مدل نوع I).
۲. قسمت میانی که شامل گسل امتداد لغز اصلی است (نماینده گسل قطر-کازرون؛ مدل نوع II).
۳. قسمت شرقی که شامل لایه ضخیم نمک در قاعده است (مدل نوع III).

جدول ۳- کوتاه شدگی کلی زاگرس طبق مطالعه (Alavi, 2007) و مدل های مطابق آنها در این مطالعه.

مقدار کوتاه شدگی	طول نهایی (km)		طول اولیه (km)	مدل معادل	ناحیه
	%	km			
۲۹/۳	۶۲	۱۴۹	۲۱۱	نوع I	لرستان
۳۰/۲	۷۲/۵	۱۶۷/۵	۲۴۰	نوع II	سیستم گسلی کازرون
۲۷	۹۴	۳۴۸	۴۴۲	نوع III	فارس

جدول ۴- خلاصه شرایط مدل های مورد استفاده در این مطالعه.

مدل	ضخامت کل (mm)	طول کل (mm)	تعداد مراحل	سایر ویژگی ها
نوع I	۴۵	۴۷۰	۷	بدون حضور نمک
نوع II غرب	۴۵	۴۷۰	۷	ضخامت کم نمک در قاعده
نوع II شرق	۴۵	۴۷۰	۷	ضخامت زیاد نمک در قاعده
نوع III	۴۵	۴۷۰	۷	ضخامت زیاد نمک در قاعده



شکل ۲- طرح شماتیکی از مدل های اجرا شده، هیچ لایه رزینی در قاعده مدل نوع آدیده نمی شود، مدل نوع II به دو بخش تقسیم شده است که در بخش غربی یک لایه نازک رزین وجود دارد و در بخش شرقی طبقه رزینی ضخیم است، و در مدل نوع III تمام قاعده یک لایه ضخیم رزین است. پیکان قرمز نشان دهنده جهت حرکت نسبی مدل ها است.



که تا حد ممکن با شرایط سیستم طبیعی خوانایی داشته باشند (Brizzi et al., 2016).

به منظور شبیه‌سازی سری نمکی هرمز در قاعده، از رزین استفاده شد که به‌طور گسترده‌ای در فرآیند تصفیه آب استفاده می‌گردد (Dow Chemical Company, 1999)، دلیل استفاده از این ماده بنا بر دو خصوصیت رزین است: اول چگالی پایین و دوم گردش‌دگی ذرات آن (شکل ۳). در شکل ۳ رزین با ماسه کوارتزی خشک مقایسه شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، ذرات رزین گرد شدگی بالایی دارند و اندازه خیلی بزرگتری نسبت به ذرات ماسه دارند (برای جزئیات بیشتر به جدول ۵ مراجعه شود)، برای مقایسه، ویژگی‌های نمک طعام نیز ارائه شده است.

برای طبقات بالایی از ماسه کوارتزی خشک استفاده شده است (برای بررسی ویژگی‌ها جدول ۵ را ببینید). این ماده به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی پوسته شکننده فوقانی توسط زمین‌شناسان مورد استفاده قرار گرفته است (Schellart and Strak, 2016).

بر اساس رئولوژی مواد آنالوگ، در فرآیند مدل‌سازی مواد را به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای مدنظر انتخاب می‌نمایند، Schellart and Strak, 2016 برخی مواد متداول که توسط مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند را مورد بررسی قرار داده‌اند، آنها مواد را به دو دسته اصلی تقسیم نموده‌اند: ۱. مواد شکننده و ۲. مواد ویسکوز خطی که به‌طور رئولوژیکی به چهار صورت: ویسکوز-خطی، ویسکوز-غیرخطی، ویسکوپلاستیک و شکل پذیر پیچیده دیده می‌شوند (Schellart and Strak, 2016).

قاعده اساسی در مدل‌سازی آنالوگ، که یکی از چالش‌های بزرگ برای تجربیات آزمایشگاهی نیز به‌شمار می‌رود، انتخاب و کالیبراسیون موادی است که از لحاظ هندسی، کینماتیکی، دینامیکی و رئولوژیکی با همتایان طبیعی خود قابل مقایسه باشند. کاربرد معیار مشابهت باعث تشخیص مواد آنالوگ متناسبی می‌گردد که تحت شرایط آزمایشگاهی بتوانند به بهترین وجه ممکن فرآیندهای طبیعی را شبیه‌سازی نمایند. از این رو، نکته کلیدی برای مدل‌سازی، اطلاعات کافی از ویژگی‌های رئولوژیکی مواد مورد استفاده در آزمایشگاه است، به‌طوری

جدول ۵- ویژگی‌های مواد مورد استفاده در این مطالعه. ویژگی‌های نمک طعام فقط برای مقایسه ذکر شده است.

چگالی (g/mm ³)	اندازه ذرات (mm)	ماده
۱/۰۵	۰/۲۵-۰/۵۰	رزین
۱/۸۰	۰/۰۶-۰/۲۵	ماسه کوارتزی خشک
۱/۴۴	۰/۱۰-۰/۲۰	نمک طعام

مقیاس

حدود $\rho_n = 40,2 \text{ cm/g}$ (برای هالیت خالص است Jackson and Hudec, 2017)، براساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته چگالی ماسه کوارتزی خشک استفاده شده در این مطالعه

$$\frac{\rho_c}{\rho_n} = \frac{\rho_s}{\rho_r} \Rightarrow \frac{2.70}{2.04} = \frac{1.80}{\rho_r} \Rightarrow \rho_r = 1.36 \text{ g/cm}^3$$

حدود $\rho_s = 0,8,1 \text{ cm/g}$ است، بنابراین براساس رابطه زیر چگالی ماده‌ای که باید نماینده لایه نمکی قاعده باشد چیزی حدود $\rho_r = 63,1 \text{ cm/g}$ می‌باشد:

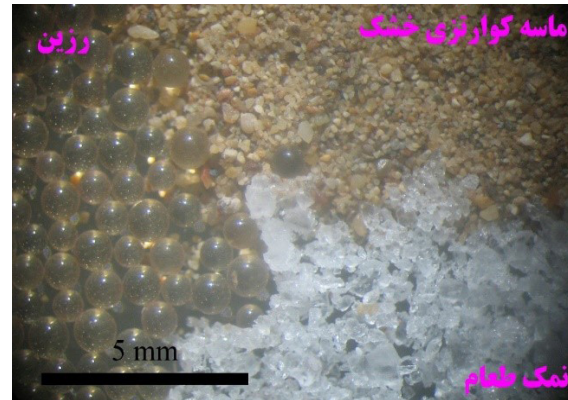
آشکارا معلوم است که این عدد با چگالی پودر نمک

بعد از مطالعات (King Hubbert, 1937) بسیاری از زمین‌شناسان روش‌هایی را برای مقیاس بندی مدل‌های تجربی آنالوگ ابداع نمودند. این مقیاس بندی معمولاً براساس هندسه، کینماتیک و دینامیک پدیده و مدل مورد مطالعه صورت می‌گیرد (Schellart and Strak, 2016). تعریف مقیاس مناسب برای سیستم در طی تحقیق، در واقع مرحله اساسی برای طراحی یک مدل آزمایشگاهی است به‌طوری که می‌تواند نتایج آزمایش را شدیداً تحت تأثیر خود قرار دهد (Brizzi et al., 2016). به‌طور فرضی چگالی متوسط پوسته فوقانی حدود $\rho_c = 0,7,2 \text{ cm/g}$ ، و چگالی سنگ نمک

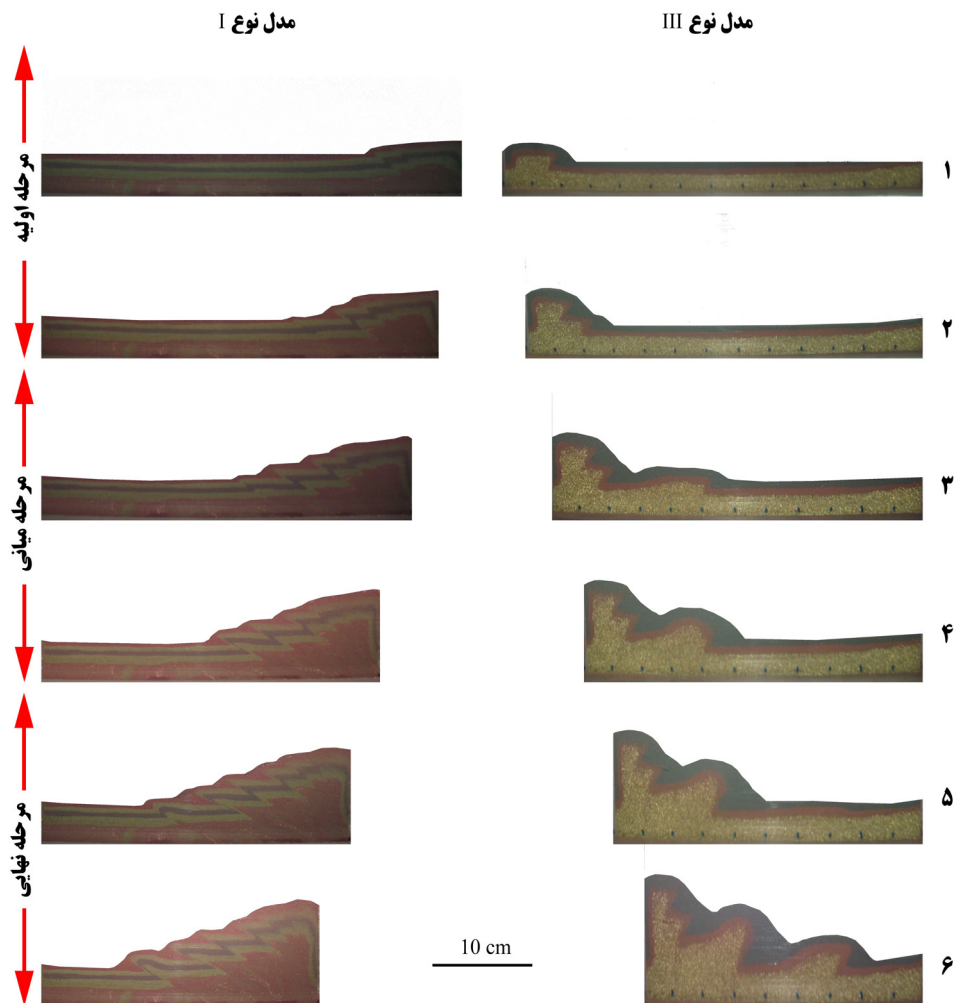


همان‌طور که از نتایج مطالعات Alavi, 2007 و جدول ۳ برداشت می‌شود، عرض متوسط اولیه زاگرس چیزی در حدود ۳۰۰ کیلومتر بوده است، بنابراین با طول مدل مورد استفاده در این مطالعه که ۷۴ سانتیمتر است، به‌طور هندسی زاگرس در مقیاس ۱/۰۰۰۰۴۶ شبیه‌سازی گردیده است، بنابراین در این مدل هر ذره رزین نشان‌دهنده ۰۲۳-۰۶۱ متر روی زمین است.

طعام همخوانی دارد (Anval Valves PVT LTD, 2015)، ولی به منظور برجسته‌سازی چگالی پایین لایه‌های قاعده‌ای نمک و خزش آن از رزین با ذرات خوب گرد شده استفاده گردید (شکل ۳) که دارای چگالی ۱،۵۰ g/cm^۳ است.



شکل ۳- مقایسه بین ماسه کوارتزی خشک، رزین و نمک طعام. به گردش‌دهی ذرات رزین توجه گردد.

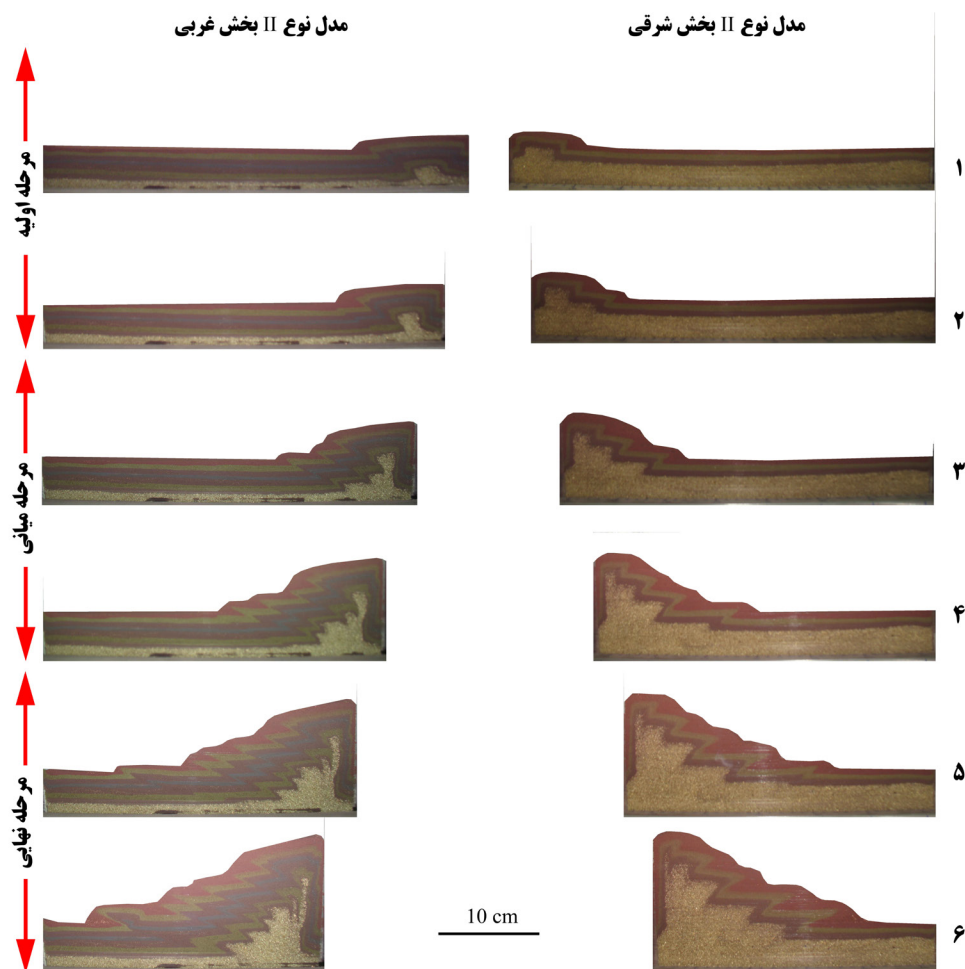


شکل ۴ - مقایسه بین مقطع عرضی مدل‌های نوع I و نوع III

کینماتیک مدل و بحث

علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا گردیدند (به منظور مقایسه مدل‌ها با همدیگر تصاویر مراحل مختلف در کنار هم قرار داده شده‌اند، همچنین مدل‌ها براساس تغییرات زمانی به سه بخش مرحله اولیه، مرحله میانی و مرحله نهایی تقسیم شده‌اند (اشکال ۴ و ۵):

به منظور شبیه‌سازی الگوی ساختارهای نمکی در زاگرس با توجه به وجود یا عدم وجود لایه قاعده‌ای نمک، منطقه مورد مطالعه به سه ناحیه تقسیم شد و برای هر ناحیه مدل‌سازی صورت پذیرفت، مدل‌ها در آزمایشگاه مدل‌سازی دانشکده‌ی



شکل ۵- مقایسه بین مقطع عرضی مدل‌های نوع II در دو بخش شرقی و غربی. به شباهت الگوها و همچنین اختلاف در میزان ارتفاع بیشینه مدل‌ها توجه گردد.

مناطق از زاگرس صورت پذیرفت که فاقد ساختارهای نمکی مربوط به سری هرمز هم به صورت مدفون و هم به صورت رخنمون یافته می‌باشند. با اجرای این مدل ساختارهای گسل رانندگی و همچنین چین‌های مرتبط با گسل‌ها تشکیل گردیدند. همچنین در این شکل این مدل با مدل نوع III قابل مقایسه است، که تفاوت آنها در ادامه بیشتر مورد توجه قرار خواهد گرفت.

مدل نوع I

در این مدل، فرض بر آن است که ضخامت سری نمکی هرمز آنقدر کم است که می‌توانیم آن را حذف نماییم. در شکل ۴ این مدل در کنار مدل نوع III دیده می‌شود. در این شکل که مقطع عرضی مدل را نشان می‌دهد تنها از لایه‌های ماسه خشک استفاده شده است. این کار به منظور شبیه‌سازی

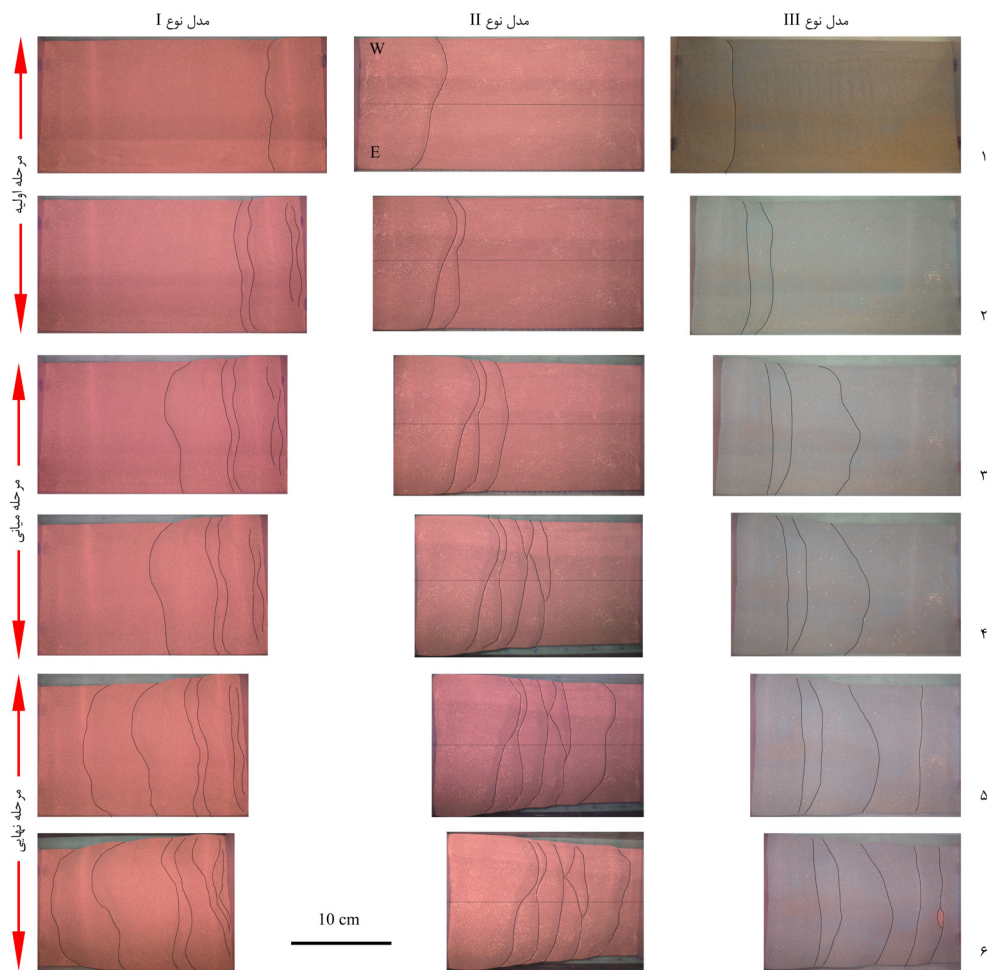
**مدل نوع II**

به خوبی از روی تصاویر سطحی (شکل ۶) و تفاوت در تعداد و تراکم ساختارهای گسلی قابل مشاهده هستند همچنین در شکل ۷-ب اختلاف میزان ارتفاع بیشینه در مراحل مختلف به طور واضحی دیده می شود، این اختلاف ارتفاع با شکل ۷-الف که مربوط به دو مدل I و III است، قابل مقایسه می باشد.

این مدل در لایه قاعده به صورت عمودی از شمال به جنوب به دو بخش تقسیم شده است، قسمت غربی دارای مقدار ناچیزی رزین (به عنوان نماینده سری نمکی هرمز در قاعده زاگرس به عنوان یک سطح جدایشی) بوده، و بخش شرقی دارای لایه ضخیمی از رزین می باشد. در شکل ۵ دو قسمت این مدل در کنار همدیگر دیده می شوند. در این شکل قسمت های شرقی و غربی دارای اختلاف قابل توجهی در ساختارهای ایجاد شده هستند. این اختلاف به علت تفاوت در ضخامت لایه رزینی در قاعده مدل به وجود آمده است. همچنین ساختارهای رانندگی و چین های مرتبط با گسلی که در این مدل به وجود آمده اند کاملاً با مدل نوع I تفاوت نشان می دهد. به علاوه در دو طرف مدل به علت وجود اختلاف در ضخامت لایه رزینی ساختارها، میزان ارتفاع بیشینه، تراکم و تعداد ساختارهای چین و گسلی شکل گرفته و میزان کوتاه شدگی نیز متفاوت است. تفاوت مقادیر کوتاه شدگی

مدل نوع III

این مدل معادل ناحیه فارس زاگرس در نظر گرفته شده است، به طوری که در این مدل از یک لایه ضخیم رزین به عنوان سری نمکی هرمز استفاده گردیده است (شکل ۴). در این مدل تشکیل ساختارهای رخنمون یافته نمکی به خوبی قابل مشاهده می باشند، به طوری که در مرحله میانی شروع رخنمون لایه های زیرین دیده می شود و در مراحل نهایی ساختارهای نمکی در سطح نیز دیده می شوند.

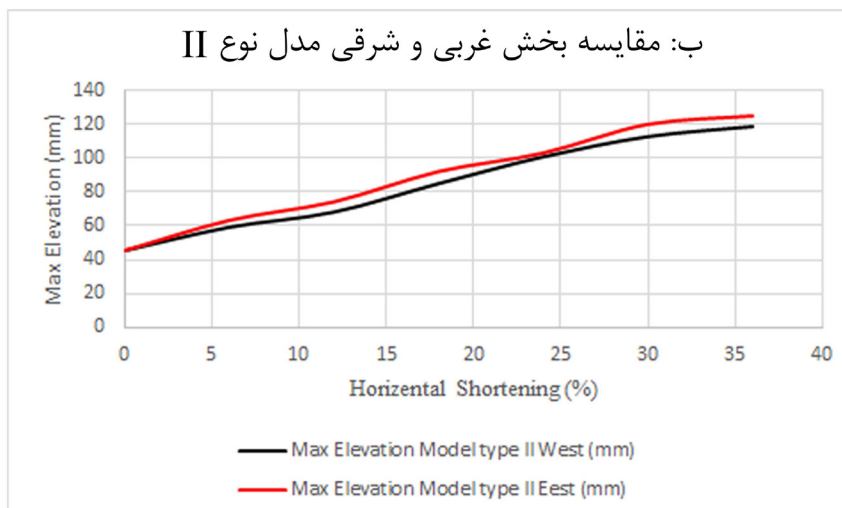
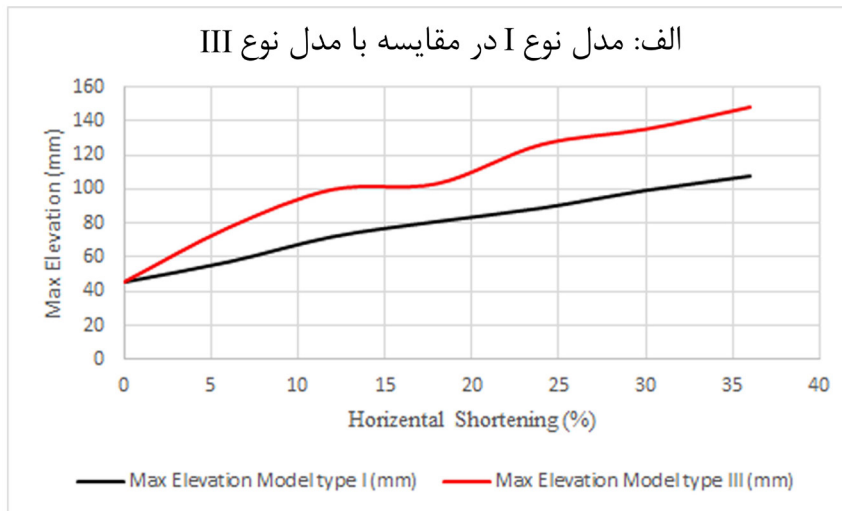


شکل ۶- مقایسه بین توپوگرافی تشکیل شده در مدل های اجرا شده در مطالعه، به اختلاف الگوهای تشکیل شده توجه گردد، به ویژه ظهور ساختارهای شبیه گنبد های نمکی رخنمون یافته در مرحله ۶ مدل نوع III، همچنین اختلاف در شکل گسل های مدل نوع II به طوری که در بخش شرقی و غربی مقادیر مختلفی از کوتاه شدگی دیده می شود



رفتار تراکم ناپذیر نمک، در مدل با افزایش ارتفاع جبران می‌گردد. همچنین مقایسه بین ارتفاع بیشینه بین قسمت‌های غربی (دارای لایه‌ی نمکی کم ضخامت) و شرقی (دارای لایه‌ی ضخیم نمکی) در مدل نوع II نشان می‌دهد که، مدل دارای لایه‌ی نمکی ضخیم دارای ارتفاع بیشتری نسبت به مدل دارای لایه‌ی نمک کم ضخامت است (نمودار شکل ۷-ب).

یک مقایسه بین ارتفاع بیشینه مدل نوع I (بدون نمک) و مدل نوع III (دارای نمک) در نمودار شکل ۷-الف صورت گرفته است، مدل‌ها با ضخامت مشابه شروع شده‌اند، مدل نوع III نسبت به مدل نوع I افزایش ارتفاع بیشتری را نشان می‌دهد. در مدل نوع III به علت چگالی پایین رزین و گردشگی بالای ذرات آن، لایه با چگالی پایین قاعده‌ای تمایل به صعود پیدا می‌کند، این بدین معناست که



شکل ۷-الف - مقایسه بین ارتفاع بیشینه مدل نوع I (بدون نمک) و مدل نوع III (دارای نمک)، آغاز آزمایش با ضخامت مساوی، مدل دارای نمک نشان دهنده ارتفاع بیشتری نسبت به مدل بدون نمک است. ب- مقایسه بین ضخامت بیشینه مدل نوع II در بخش غربی (دارای لایه‌ی نمک کم ضخامت) و بخش شرقی (دارای لایه‌ی ضخیم نمکی)، آزمایش با ضخامت یکسان شروع شده، مدل دارای لایه‌ی ضخیم نمکی نشان دهنده ارتفاع بیشتری نسبت به مدل دارای لایه‌ی نمک کم ضخامت است.

شدگی در بخش‌های مختلف می‌باشد. آنها در مطالعات خود نشان دادند که کوتاه شدگی در رسوبات فوقانی نمک، همراه با تکامل برخی ساختارهای گسلی عرضی همراه خواهد بود

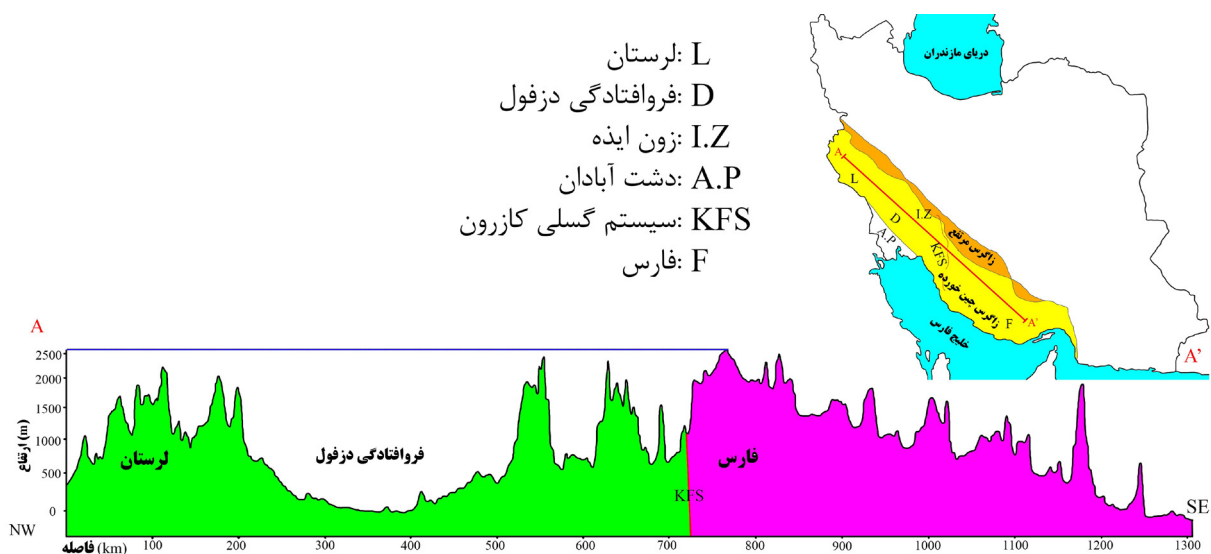
قابل انکار می‌باشد. بر اساس مطالعات Bahroudi and Koyi (2003) و Sherkat et al (2005) نقش نمک در رژیم‌های تکتونیکی نازک پوسته به صورت تفاوت در مقادیر کوتاه

در این مدل لایه‌های فوقانی در منطقه حذف شده و تنها لایه‌های سری نمکی هرمز نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در طرح شماتیک شکل ۹ نشان داده شده است، در ابتدا یک لایه گوه مانند از نمک هرمز اولیه وجود داشته، با توجه به اینکه پیش از برخورد زاگرس در زمان کرتاسه (Alavi, 2007)، پی سنگ در ناحیه‌ای که امروزه تحت عنوان سیستم گسلی قطر-کازرون می‌شناسیم شکسته شده است، این شکستگی باعث شده که نمک هرمز بر اثر بالا آمدگی منطقه در بخش شرقی برجستگی بیشتری پیدا کند. در ادامه برخورد، ساختارهای نمکی تکامل یافته و بلوغ بیشتری یافته‌اند. این پدیده باعث به وجود آمدن ساختارهای عظیم نمکی مدفون و رخنمون یافته در بخش شرقی گسل قطر-کازرون شده است. با وجود مقدار ناچیزی نمک در بخش غربی این گسل تنها چند ساختار مدفون در نواحی مجاور در نزدیکی بخش غربی گسل قطر-کازرون به وجود آمده است. اثر این اختلاف ضخامت نمک را می‌توان در طول موج ساختارهای زمین‌شناختی زاگرس مشاهده نمود. به طوری که مشابه آنچه که در شکل ۶ دیده می‌شود طول موج ساختارهای زاگرس در لرستان به مراتب کمتر از طول موج ساختارهای ناحیه فارس است. این موضوع می‌تواند ناشی از خاصیت تراکم ناپذیری نمک باشد که در زیر ناحیه فارس دارای بیشترین ضخامت خود می‌باشد.

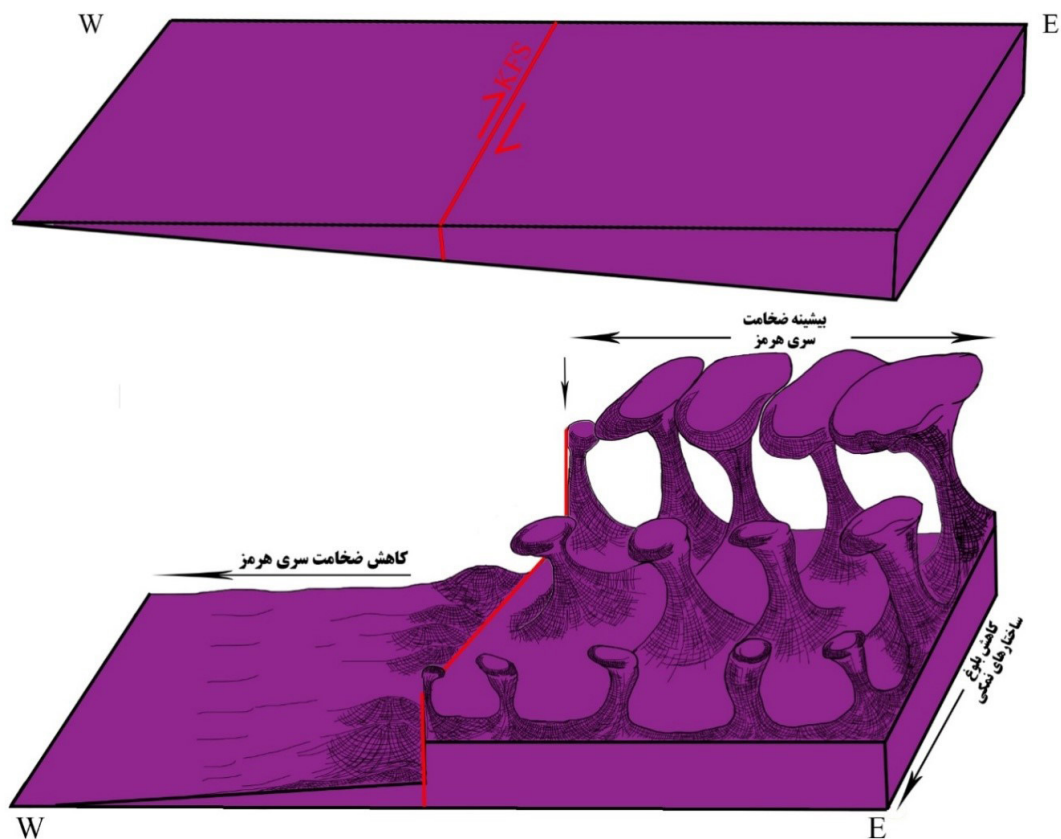
که گسل‌های حاصله به نوبه خود نقش مهمی در مقادیر متفاوت کوتاه شدگی بازی خواهند نمود. در مدل سازی‌های صورت گرفته در این مطالعه نقش تکتونیک ضخیم پوسته و کوتاه شدگی همزمان نمک و رسوبات فوقانی مورد توجه قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده تأثیر ضخامت نمک بر میزان کوتاه شدگی‌های متفاوت می‌باشد.

شکل ۸ نشان دهنده یک مقطع عرضی از زاگرس بوده که از غرب به شرق دربرگیرنده مناطق لرستان، فروافتادگی دزفول، سیستم گسلی قطر-کازرون و فارس می‌باشد. در این مقطع پس از گسل قطر-کازرون یک اختلاف ناگهانی ارتفاع دیده می‌شود؛ همچنین بیشینه ارتفاع در بخش فارس دیده می‌شود. مقایسه این مقطع با مدل‌های اجرا شده حاکی از بیشتر بودن ارتفاع میانگین در بخش‌های فارس و به ویژه در مناطقی است که بیشترین تمرکز گنبد‌های نمکی در آنجا وجود دارد.

پس از مطالعه مدل‌ها و در کنار هم قرار دادن و مقایسه مدل نهایی با زمین‌شناسی منطقه، نتیجه گرفته شد که مدل نهایی می‌تواند به صورت طرح شماتیکی باشد که در شکل ۹ نشان داده شده است. بخش مهمی از این شکل در نتیجه مطالعات سطحی و زیرسطحی صورت گرفته توسط محققین پیشین بوده است و در اینجا جهت پررنگ کردن نقش گسل کازرون در ایجاد ضخامت متفاوت نمک ارائه شده است.



شکل ۸- مقطع عرضی از زاگرس که از غرب به شرق شامل لرستان، فروافتادگی دزفول، سیستم گسلی قطر-کازرون و فارس می‌باشد. به اختلاف ناگهانی ارتفاع پس از گسل قطر-کازرون و همچنین بیشینه ارتفاع در بخش فارس توجه شود.



شکل ۹- مدل نتیجه گیری شده از این مطالعه؛ پس از مطالعه تمامی مدل ها و در کنار هم قرار دادن نتایج می توان به نقش گسل پی سنگی در برجسته تر شدن نقش اختلاف ضخامت لایه نمکی قاعده ای پی برد، به طور که در ناحیه غربی به جز چند ساختار مدفون کوچک، اثری از ساختارهای عظیم نمکی یافت نمی شود، این ساختارها در قسمت شرقی به وفور دیده می شوند.

نتیجه گیری

در میزان کوتاه شدگی در زاگرس شدیداً در ارتباط با اختلاف در ضخامت سری نمکی هرمز در بخش های مختلف می باشد. با این وجود نقش گسل های عرضی زاگرس به عنوان عواملی در کوتاه شدگی های متفاوت را نباید نادیده گرفت.

۴. بر اساس نتایج این پژوهش اختلاف در طول موج ساختارهایی همچون چین ها و تراکم ساختارهای راندگی و گسل ها را می توان در ارتباط با تأثیر ضخامت متفاوت سری نمکی هرمز در نواحی مختلف زاگرس دانست. همچنین نقش ضخامت متفاوت سری نمکی هرمز بر الگوی ساختاری تأثیر به سزایی داشته که توسط محققین مختلف به اثبات رسیده است.

قدردانی

بدین وسیله نویسندگان مقاله از حمایت های مالی و معنوی صورت گرفته توسط معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.EG98.341) در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را می نمایند.

برخی از مهم ترین نتایج این پژوهش را می توان به صورت زیر ارائه نمود:

۱. به نظر می رسد ضخامت سری نمکی هرمز در بخش های مختلف زاگرس یکسان نبوده و این تغییر ضخامت در میزان توسعه ساختارهای نمکی در بخش های مختلف تأثیر گذار بوده است. هر چند در توسعه ساختارهای نمکی عوامل مهم دیگری همچون ضخامت طبقات فوقانی، نقش شکستگی های عمق و میزان اختلاف در چگالی مواد را نباید نادیده گرفت.

۲. ساختارهای گسلی قدیمی و پی سنگی در تحولات حوضه رسوبی تأثیرات مهمی داشته و در برخی موارد مؤلفه های حرکتی قائم گسل ها بر میزان ضخامت متفاوت رسوبات تأثیر گذار می باشد. از این رو احتمالاً می توان برخی از گسل های پی سنگی زاگرس را به عنوان عامل مهمی در ضخامت متفاوت سری نمکی هرمز در بخش های مختلف زاگرس دانست.

۳. بر اساس نتایج این پژوهش و مطالعات پیشین، اختلاف



References

- Alavi, M., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *Am. J. Sci.* 307, 1064–1095. <https://doi.org/10.2475/09.2007.02>
- Allen, M., Jackson, J., Walker, R., 2004. Late Cenozoic reorganisation of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics* 23, 1–16. <https://doi.org/doi:10.1029/2003TC001530>
- Anval Valves PVT LTD, 2015. Bulk Density Chart. *Géotechnique* 29, 47–65. <https://doi.org/10.6088/ijes.2012030133002>
- Austermann, J., Iaffaldano, G., 2013. The role of the Zagros orogeny in slowing down Arabia-Eurasia convergence since 5 Ma. *Tectonics* 32, 351–363. <https://doi.org/10.1002/tect.20027>
- Authemayou, C., Bellier, O., Chardon, D., Benedetti, L., Malekzade, Z., Claude, C., Angeletti, B., Shabanian, E., Abbassi, M.R., 2009. Quaternary slip-rates of the Kazerun and the main recent faults: Active strike-slip partitioning in the Zagros fold-and-thrust belt. *Geophys. J. Int.* 178, 524–540. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04191.x>
- Authemayou, C., Bellier, O., Chardon, D., Malekzade, Z., Abassi, M., 2005. Role of the Kazerun fault system in active deformation of the Zagros fold-and-thrust belt (Iran). *Comptes Rendus Geosci.* 337, 539–545. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.12.007>
- Bigi, S., Carminati, E., Aldega, L., Trippetta, F., Kavooosi, M.A., 2018. Zagros fold and thrust belt in the Fars province (Iran) I: Control of thickness/rheology of sediments and pre-thrusting tectonics on structural style and shortening. *Mar. Pet. Geol.* 91, 211–224. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.01.005>
- Bonanno, E., Bonini, L., Basili, R., Toscani, G., Seno, S., 2017. How do horizontal, frictional discontinuities affect reverse fault-propagation folding? *J. Struct. Geol.* 102, 147–167. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.08.001>
- Bonini, M., Corti, G., Sokoutis, D., Vannucci, G., Gasperini, P., Cloetingh, S., 2003. Insights from scaled analogue modelling into the seismotectonics of the Iranian region. *Tectonophysics* 376, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.07.002>
- Brizzi, S., Funicello, F., Corbi, F., Di Giuseppe, E., Mojoli, G., 2016. Salt matters: How salt affects the rheological and physical properties of gelatine for analogue modelling. *Tectonophysics* 679, 88–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.021>
- Cello, G., Tondi, E., Van Dijk, J.P., Mattioni, L., Micarelli, L., Pinti, S., 2003. Geometry, kinematics and scaling properties of faults and fractures as tools for modelling geofluid reservoirs: examples from the Apennines, Italy. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 212, 7 LP – 22. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.02>
- Corti, G., Ranalli, G., Sokoutis, D., 2010. Quantitative modelling of geological processes. *Tectonophysics* 484, 1–3. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.004>
- Crook, A.J.L., Willson, S.M., Yu, J.G., Owen, D.R.J., 2006. Predictive modelling of structure evolution in sandbox experiments. *J. Struct. Geol.* 28, 729–744. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.02.002>
- Dana, S., Almasian, M., Soltani, M., Kamel, S.R., 2015. Structural Analysis of a Segment in Qatar-Kazerun Fault Using Satellite Images of Landsat 8. *Open J. Geol.* 05, 499–513. <https://doi.org/10.4236/ojg.2015.57046>
- Daniel, J., 2013. Structural Geology and Geomechanics : New Frontiers for Basin Modelling *. AAPG Hedb. Conf. Pet. Syst. Model. Past, Plan. Futur. 120110.
- Bahroudi, A., Koyi, H.A., 2003. Effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold and thrust belt: an analogue modelling approach. *Journal of the Geological Society*; 160 (5): 719–733. doi: <https://doi.org/10.1144/0016-764902-135>.
- David, F.W., Nolle, H., 1982. 1 - Introduction: Modelling Based on Conditions of Similarity, in: David, F.W., Nolle, H.B.T.-E.M. in E. (Eds.), . Butterworth-Heinemann, pp. 1–2. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01139-6.50005-9>
- Deng, H., Koyi, H.A., Zhang, J., 2019. Modelling oblique inversion of pre-existing grabens. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* SP487.5. <https://doi.org/10.1144/sp487.5>
- Dooley, T.P., Schreurs, G., 2012. Tectonophysics Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics : A review and new experimental results. *Tectonophysics* 574–575, 1–71. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.05.030>
- Dow Chemical Company, 1999. Ion exchange resins. *Met. Finish.* 97, 69–70. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(00\)81191-5](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(00)81191-5)
- Farzipour-Saein, A., Nilfouroushan, F., Koyi, H., 2013. The effect of basement step/topography on the geometry of the Zagros fold and thrust belt (SW Iran): an analog modeling approach. *Int. J. Earth Sci.*
- Hans, T., Tectonic, R., Mulugeta, G., 1988. Modelling the geometry of Coulomb thrust wedges. *J. Struct. Geol.* 10, 847–859. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0191-8141\(88\)90099-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0191-8141(88)90099-5)
- Hassanpour, J., Jahani, S., Ghassemi, M.R., Alavi, S.A., Zeinali, F., 2018. Evolution of the Karebas Fault System and adjacent folds, central Zagros fold-and-thrust belt, Iran: Role of pre-existing halokinesis (salt structures and minibasins) and detachment levels. *J. Asian Earth Sci.* 164, 125–142. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.06.024>
- Hessami, K., Nilfouroushan, F., Talbot, C.J., 2006. Active deformation within the Zagros Mountains deduced from GPS measurements. *J. Geol. Soc. London.* 163, 143–148. <https://doi.org/10.1144/0016-764905-031>
- Hobbs, R., Tong, C.H., Pye, J., 2003. Modelling and processing of 3D seismic data collected over the overlapping spreading centre on the East Pacific Rise at 9° 03' N. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 212, 251 LP – 259. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.16>
- Jackson, M.P.A.P.A., Hudec, M.R.R., 2017. Salt tectonics :



- principles and practice. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Jahani, S., Hassanpour, J., Mohammadi-firouz, S., Letouzey, J., Frizon de Lamotte, D., Alavi, S.A., Soleimany, B., Belt, T., Jahani, S., Hassanpour, J., Mohammadi-firouz, S., Letouzey, J., Frizon de Lamotte, D., Alavi, S.A., Soleimany, B., 2017. Salt tectonics and tear faulting in the central part of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Mar. Pet. Geol.* 86, 426–446. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.06.003>
 - King Hubbert, M., 1937. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Bull. Geol. Soc. Am.* 48, 1459–1520. <https://doi.org/10.1130/GSAB-48-1459>
 - Marques, F.G., Cobbold, P.R., Marques, G., 1995. Development of highly non-cylindrical folds around rigid ellipsoidal inclusions in bulk simple shear regimes: natural examples and experimental modelling. *J. Struct. Geol.* 17, 589–602. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(94\)00081-A](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)00081-A)
 - McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold–thrust belt, Iran. *J. Struct. Geol.* 26, 519–535. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.009>
 - Merten, S., Smit, W.G., Nieuwland, D.A., Rondeel, H.E., 2006. Analogue modelling of a reactivated, basement controlled strike-slip zone, Sierra de Albarracín, Spain: application of sandbox modelling to polyphase deformation. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 253, 135 LP – 152. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.253.01.07>
 - Mouthereau, F., Tensi, J., Bellahsen, N., Lacombe, O., De Boisgrollier, T., Kargar, S., 2007. Tertiary sequence of deformation in a thin-skinned/thick-skinned collision belt: The Zagros Folded Belt (Fars, Iran). *Tectonics* 26. <https://doi.org/10.1029/2007TC002098>
 - Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Frehner, M., Paper, C., 2017. 3D FE-modelling of inclined, brittle-ductile transpression. 15th Swiss Geosci. Meet.
 - Pollastro (compiler), R.M., Persits, F.M., Steinshouer, D.W., 1997. Map Showing Geology, Oil and Gas Fields, and Geologic Provinces of Iran, Open-File Report. <https://doi.org/10.3133/ofr97470G>
 - Ritter, M.C., Rosenau, M., Oncken, O., 2017. Growing Faults in the Lab: Insights Into the Scale Dependence of the Fault Zone Evolution Process. *Tectonics* 37, n/a–n/a. <https://doi.org/10.1002/2017TC004787>
 - Ritter, M.C., Santimano, T., Rosenau, M., Leever, K., Oncken, O., 2018. Sandbox rheometry: Co-evolution of stress and strain in Riedel– and Critical Wedge–experiments. *Tectonophysics* 722, 400–409. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.018>
 - Schellart, W.P., Strak, V., 2016. A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *J. Geodyn.* 100, 7–32. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.03.009>
 - Sherkat, S., Molinaro, M., de Lamotte, D. F., Letouzey, J., 2005. Detachment folding in the Central and Eastern Zagros fold-belt (Iran): salt mobility, multiple detachments and late basement control. *Journal of Structural Geology.* 27 (9), 1680–1696. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.05.010>
 - Skar, T., Beekman, F., 2003. Modelling the influence of tectonic compression on the &emdash;in situ&emdash; stress field with implications for seal integrity: the Haltenbanken area, offshore mid-Norway. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 212, 295 LP – 311. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.20>
 - Talebian, M., Jackson, J., 2004. A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran. *Geophys. J. Int.* 156, 506–526.
 - Tavakoli, F., Walpersdorf, A., Authemayou, C., Nankali, H.R., Hatzfeld, D., Tatar, M., Djamour, Y., Nilforoushan, F., Cotte, N., 2008. Distribution of the right-lateral strike-slip motion from the Main Recent Fault to the Kazerun Fault System (Zagros, Iran): Evidence from present-day GPS velocities. *Earth Planet. Sci. Lett.* 275, 342–347.
 - Tentler, T., Temperley, S., 2003. Segment linkage during evolution of intracontinental rift systems: insights from analogue modelling. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 212, 181 LP – 196. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.12>
 - Uexner, 2005. Analogue Modelling of Flanking Structures. Universität Wien. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005024011>
 - Van Wees, J.D., Orlic, B., Van Eijs, R., Zijl, W., Jongerius, P., Schreppers, G.J., Hendriks, M., Cornu, T., 2003. Integrated 3D geomechanical modelling for deep subsurface deformation: a case study of tectonic and human-induced deformation in the eastern Netherlands. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 212, 313 LP – 328. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.212.01.21>
 - Waf, L., Godin, L., Harris, L.B., Kontopoulou, M., Waffle, L., Godin, L., Harris, L.B., Kontopoulou, M., 2016. Rheological and physical characteristics of crustal-scaled materials for centrifuge analogue modelling. *J. Struct. Geol.* 86, 181–199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.02.014>
 - Walpersdorf, A., Hatzfeld, D., Nankali, H., Tavakoli, F., Nilforoushan, F., Tatar, M., Vernant, P., Chéry, J., Masson, F., 2006. Difference in the GPS deformation pattern of North and Central Zagros (Iran). *Geophys. J. Int.* 167, 1077–1088.
 - Wellmann, J.F., Finsterle, S., Croucher, A., 2014. Integrating structural geological data into the inverse modelling framework of iTOUGH2. *Comput. Geosci.* 65, 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.014>
 - Westaway, R., 2003. Kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean updated. *Turkish J. Earth Sci.* 12, 5–46.

Experimental Modelling of Shortening variation related to different thickness of Hormuz salt series, Zagros

Babak Samani^{1*}, Abbas Charchi², Seyed Yoseph Mousavi³

1. Associate Professor of Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz.

2. Assistant Professor of Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz.

3. MsC student of Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz.



Abstract:

The application of Experimental modeling is an important key to understanding the complex tectonic phenomena, specially the extremely complex salt structures. In this study, using an analogue sandbox modeler, the salt structures of Zagros and their effect on the general shortening of Zagros had been simulated, considering the low density and creep of the salt. The study area was divided into three subregions, according to the existence or the lack of salt structures and the thickness of Hormuz salt series. At the western part of the region the lack of salt series was assumed, and gradually the thickness of Hormuz salt series increases until it reaches the Qatar-Kazerun Fault System (KFS), then at the eastern part there is a thick layer of Hormuz salt series. For every subregion, a model was designed, considering the low density of salt and its creep. Finally, a schematic outline proposed to describe the existence and distribution of salt structures at Zagros. According to this outline the KFS is an important agent of general thickness changes at the base, because at its eastern part there is an abundance of salt structures, but conversely, at its western part except of a few buried small salt structures there is no sign of Hormuz salt structures.

Keywords: Experimental Modelling, Salt tectonics, Hormuz salt series, Qatar-Kazerun Fault System, Zagros.

* b.samani@scu.ac.ir