

مدل سازی آزمایشگاهی برهم کنش گسل ها در تکامل ساختاری تاقدیس های رگ سفید و تنگو (جنوب غرب ایران)

مهدی یوسفی*؛ سید مرتضی موسوی^۱، محمد مهدی خطیب^۱

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(علمی - پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۶/۱۲ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱

چکیده

در فروبار دزفول جنوبی با توجه به توالی فازهای دگرشکلی زاگرس و رخداد وارونگی تکتونیکی در گسل راندگی رگ سفید و همچنین تجدید فعالیت گسل پی سنگی هندیجان، برهم کنش عمودی بین گسل ها در پیش بوم زاگرس اتفاق افتاده است؛ که این اثر متقابل تاثیراتی مهم بر الگوی ساختاری و تشکیل تاقدیس های رگ سفید و تنگو دارد. فاز چین خوردگی اصلی در پیش بوم زاگرس و در تاقدیس رگ سفید در پلیوسن رخ داده است. جهت مدل سازی آزمایشگاهی تکامل تکتونیکی، با توجه به محاسبه میزان کوتاه شدگی عمود بر بخش مرکزی تاقدیس رگ سفید، با اعمال فشردگی به میزان ۱۶ درصد و با حرکت فک های متحرک دستگاه برش با سرعت ثابت، وارونگی تکتونیکی و تبدیل حرکت از کشش به راندگی در گسل رگ سفید سبب می شود توالی لایه ها دگرشکل شوند و چین خوردگی وابسته به گسل در تاقدیس رگ سفید تشکیل گردد. با ورود جبهه دگرشکلی زاگرس به پیش بوم منطقه کوهزایی در پلیوسن، علاوه بر برخاستگی تاقدیس تنگو در راس گسل هندیجان، محور تاقدیس رگ سفید به علت حرکت امتداد لغز راستگرد در گسل هندیجان، به میزان ۳۰ درجه به صورت ساعتگرد می چرخد. مدل سازی ما نشان می دهد که دلیل طول موج بیشتر بخش باختری تاقدیس رگ سفید به علت ضخامت زیاد لایه نمکی سازند گچساران و همچنین مقدار بالای نسبت ضخامت لایه نامقاوم به لایه مقاوم است که در اثر واقع شدن بخش باختری تاقدیس رگ سفید در یک پهنه گسلی راستگرد و چرخش ساختاری حاصل از آن، پهن شدگی و افزایش طول موج تاقدیس تسهیل شده است.

واژه های کلیدی: برهم کنش گسلی، مدل سازی، تاقدیس رگ سفید، گسل هندیجان.

مقدمه

اثر وجود هندسه حوضه در تشکیل یک کمربند کوهزایی به وسیله ماسدو و مارشاک (Macedo and Marshak, 1999) با استفاده از مدل‌سازی آنالوگ نشان داده شده است. علاوه بر آن مدل‌سازی عناصر محدود نشان می‌دهد که گسل‌های از قبل موجود ممکن است به عنوان ناهمواری‌های هندسی، تمرکز نقاط شکل‌گیری گسل‌های جدید یا توسعه پیچیدگی‌ها در آنها را کنترل کنند (Molliex et al, 2010; McMechan, 2012; Burberry, 2015). مدل‌سازی‌های آنالوگ پیشین عمدتاً روی برگشتگی گسل‌های نرمال موجود در سیستم فشارشی متمرکز شده‌اند. در مقیاس پوسته‌ای، مدل‌های آنالوگ مشخص می‌کنند که وجود یک پهنه ضعف در یک سیستم برخورد ورقه-ای، زمانی که اختلاف مقاومت زیاد باشد، می‌تواند دگرشکلی را در پهنه ضعف متمرکز کند (Willingshofer et al, 2005). ایسین استاد و ویتجاک (Eisenstadt and Withjack, 1995) با انجام مدل‌سازی‌هایی نشان دادند که برگشتگی تکتونیکی، چرخش گسل‌های از قبل موجود و توسعه چین خوردگی و همچنین رشد گسل‌های جدید را شامل می‌شود. این نتایج به وسیله دیگر محققین از جمله دوبویز و همکاران (Dubois et al, 2002) و و پنین و همکاران (Panien et al, 2005) با استفاده از ماسه و رس مرطوب تکرار شد. در پیش بوم زاگرس چندین خطواره گسلی با امتداد و با سازوکارهای مختلف وجود دارد که در طی فاز برخورد ورقه‌های ایران و عربی تجدید فعالیت کرده‌اند. مطالعه حاضر تلاش دارد با استفاده از انجام یک مدل‌سازی آنالوگ، تاثیر برهم‌کنش گسل‌های راندگی زاگرسی و امتداد لغز عربی را بر توسعه و تکامل ساختاری تاقدیس‌های رگ سفید و تنگو نشان دهد.

برهم‌کنش گسلی^۱، مناطقی از تمرکز محلی تنش و آشفتگی‌ها را ایجاد می‌کند که هندسه و جنبش شناختی گسل‌ها را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد (Kattenhorn et al, 2000; Maerten et al, 2002; Peacock et al, 2017). فهم ویژگی‌های برهم‌کنش گسل‌ها از آنجایی که آنها می‌توانند اطلاعات مفیدی را درباره تاریخچه دگرشکلی ارائه دهند، حائز اهمیت می‌باشد (Jolley et al, 2010). سیستم‌های فرورانشی که در مرحله برخورد ورقه-های قاره‌ای قرار دارند، به دلیل برگشت رژیم تکتونیکی از فاز کشش به فاز فشارش و در اثر تجدید فعالیت گسل‌های پی‌سنگی طولی با روند-های موازی محور کافت و گسل‌های انتقالی عرضی با روندهای عمود بر محور کافت، کمربندهای چین-خورده را تشکیل می‌دهند که در تکامل تکتونیکی خود برهم‌کنش‌های چند گانه ناشی از فعالیت این روندهای گسلی مختلف را تجربه نموده‌اند. لذا بسته به زاویه محور کوتاه‌شدگی پس از برخورد نسبت به هرکدام از این روندهای قدیمی از قبل موجود، تجدید فعالیت آنها در قالب مولفه‌های راندگی یا امتدادلغز و نحوه تاثیر آن بر الگوی ساختاری چین خوردگی‌ها توجیه می‌گردد (Del Ventisette et al, 2006). مفهوم به ارث رسیدگی تکتونیکی که در آن ساختارهای از قبل موجود و پهنه‌های ضعیف در یک سیستم، توسعه ساختارهای متعاقب را کنترل می‌کنند، برای توضیح تغییرات بزرگ مقیاس در هندسه کمربندهای کوهزایی یا موقعیت حاشیه‌های ریف‌ت در چرخه ابرقاره‌ها استفاده می‌گردد (Butler et al, 2006; Audet and Burgmann 2011; Huerta and Harry, 2012). به علاوه این مفهوم می‌تواند برای توضیح پیدایش چین‌ها و گسل‌ها یا پهنه‌های برخاسته در مناطقی که از پهنه‌های برخوردی دور هستند، به کار رود.

منطقه مورد مطالعه

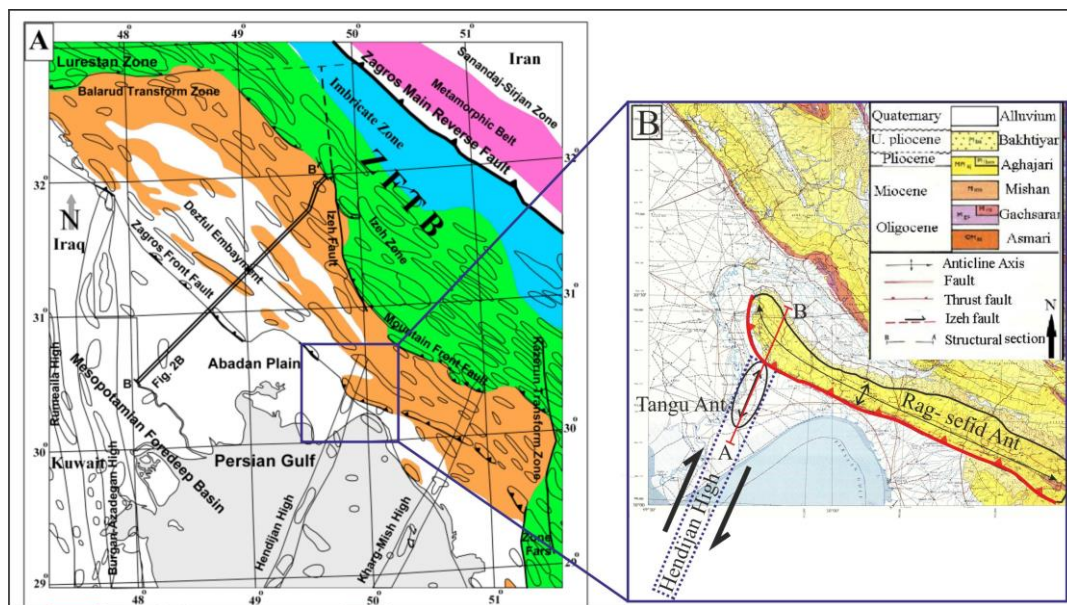
زمین شناسی منطقه

کمر بند چین- خورده رانده زاگرس با روند کلی شمال غرب- جنوب شرق توسط یک سری از گسل‌های پی سنگی عرضی با راستای شمال شرقی- جنوب غربی و شمالی جنوبی از جمله گسل‌های سبزویشان، سروستان، کازرون، خارک میش، هندیجان- ایزه و ... بریده شده است؛ که عملکرد این گسل‌های مورب، کنترل کننده حوضه- های رسوبی و تغییرات ضخامت در کمر بند چین خورده-رانده زاگرس می‌باشد. پس از برخورد ورقه- های ایران و عربی، تجدید فعالیت این گسل‌های پی سنگی مورب به صورت گسل‌های راستالغز راست بر و چپ بر، هندسه ساختارهای تشکیل شده در پوشش رسوبی را به شکل بریدگی و جابجایی در محور ساختارها و تشکیل ساختارهای با روندهایی متفاوت از روند زاگرسی، تحت تاثیر قرار داده است. ما در این مطالعه تاثیر برهم کنش گسل‌های پیش گودال زاگرس (Zagros foredeep fault) و گسل هندیجان را بر الگوی ساختاری چین‌خوردگی‌های رگ سفید و تنگو بررسی و مدل‌سازی می‌کنیم. تفسیر مقاطع لرزه‌ای بازتابی بیانگر این است که راندگی پرشیب اصلی در تاقدیس رگ سفید (شکل ۱) که در واقع قطعه‌ای از گسل پیش گودال (Zagros Foredeep Fault) است، و همچنین مقطع ساختاری ترسیمی توسط (Sherkati et al, 2006) نشان می‌دهند گسل رگ سفید از لایه جدایشی پالتوزوئیک پایینی ریشه‌دار شده و تا بخش میانی سازند گچساران، لایه‌ها را دچار برش خوردگی کرده است. همچنین هندسه چین‌های بزرگ مقیاس و توزیع آنها در دید نقشه‌ای، پیشنهاد می‌دهند که فروافتادگی دزفول، بالای یک افق متحرک موثر عمقی جدایش یافته است (Vergés et al, 2011). براساس مطالعه تصاویر ماهواره‌ای و

تغییر روند ساختاری و ناپیوستگی‌های هندسی، خطواره گسلی هندیجان- ایزه یک پهنه گسلی عرضی - برشی راست بر با روند شمال - جنوبی است که دارای طولی بیش از ۳۸۰ کیلومتر و همچنین دارای پهنای متغییر از ۱۵ تا ۸ کیلومتر می‌باشد. ادامه جنوبی این خطواره گسلی در شمال غرب خلیج فارس، گسل پی سنگی هندیجان است که دارای امتداد N20E می‌باشد (شکل ۱). به علت خطی شدن روند تاقدیس‌ها و بروز بی‌هنجاری‌هایی در نقشه‌های پی سنگی و مغناطیسی و همچنین به علت تشکیل اختلاف ارتفاع ساختاری در شمال خلیج فارس، عنوان بلندی قدیمه هندیجان - بهرگانسر برای این بخش گسل هندیجان - ایزه در نظر گرفته شده است. از لحاظ ساختاری تاقدیس رگ سفید در بخش جنوبی فرو افتادگی دزفول از زیر پهنه زاگرس چین خورده قرار دارد. این تاقدیس به شکل بومرنگ در جنوب غرب ایران و در ۱۵۰ کیلومتری جنوب شرق اهواز واقع شده است. رخنمون‌های سطح الارضی در این منطقه متشکل از تپه ماهوری‌های کم ارتفاع از سازند آغاچاری می‌باشد. سازند میشان فقط در دو پنجره فرسایشی در امتداد بخش جنوب باختری ساختار دیده می‌شود و سازندهای قدیمی‌تر از میشان در سطح زمین رخنمون ندارند. این تاقدیس در افق مخزنی آسماری دارای طول تقریبی ۵۴ کیلومتر و عرض متغیر ۴ تا ۵/۵ کیلومتر در بخش جنوب خاور و ۵ تا ۸/۳ کیلومتر در بخش شمال باختر می‌باشد. تاقدیس مذکور از نوع نامتقارن، و شیب زیاد در یال جنوب غربی متأثر از گسل‌های تراستی فراوان در یال جلویی می‌باشد (شکل ۱). تاقدیس آمیبی شکل تنگو در ۱۶۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر اهواز، بر روی بلندای قدیمی هندیجان قرار گرفته است. این تاقدیس پایین تر از یال جنوبی تاقدیس رگ سفید و در ۵ کیلومتری شمال خاور شهر هندیجان

قرار گرفته است. طول و عرض تقریبی تاقدیس بر روی افق آسماری به ترتیب ۱۵ و ۸ کیلومتر می‌باشد. وجود این ساختار از طریق مطالعات لرزه‌نگاری در سال ۱۳۴۸ با تجزیه و تحلیل انجام شده بر روی خطوط لرزه‌ای مشخص گردید و در آن زمان به نام تاقدیس رگ سفید جنوبی نامیده شده است. ساختمان تنگو به وسیله یک گسل تراستی با روند شمال باختر - جنوب خاور از میدان رگ سفید جدا می‌شود و حدود ۱۲۰۰ متر نسبت به آن پایین افتادگی دارد؛ به گونه‌ای که مخزن آسماری تاقدیس تنگو تقریباً مقابل مخزن خامی تاقدیس جنوب جنوب باختر می‌باشد.

قرار گرفته است. طول و عرض تقریبی تاقدیس بر روی افق آسماری به ترتیب ۱۵ و ۸ کیلومتر می‌باشد. وجود این ساختار از طریق مطالعات لرزه‌نگاری در سال ۱۳۴۸ با تجزیه و تحلیل انجام شده بر روی خطوط لرزه‌ای مشخص گردید و در آن زمان به نام تاقدیس رگ سفید جنوبی نامیده شده است. ساختمان تنگو به وسیله یک گسل تراستی با روند شمال باختر - جنوب خاور از میدان رگ سفید جدا می‌شود و حدود ۱۲۰۰ متر نسبت به آن پایین افتادگی دارد؛ به گونه‌ای که مخزن آسماری تاقدیس تنگو تقریباً مقابل مخزن خامی تاقدیس



شکل ۱: (A) نقشه زمین‌شناسی بخش جنوبی کمربند زاگرس و موقعیت تاقدیس‌های فروبار دزفول (Abdollahi Fard et al, 2006)، (B) نقشه زمین‌شناسی پیرامون تاقدیس‌های تنگو و رگ سفید. محل بلندی هندیمان با مستطیل آبی رنگ نشان داده شده است.

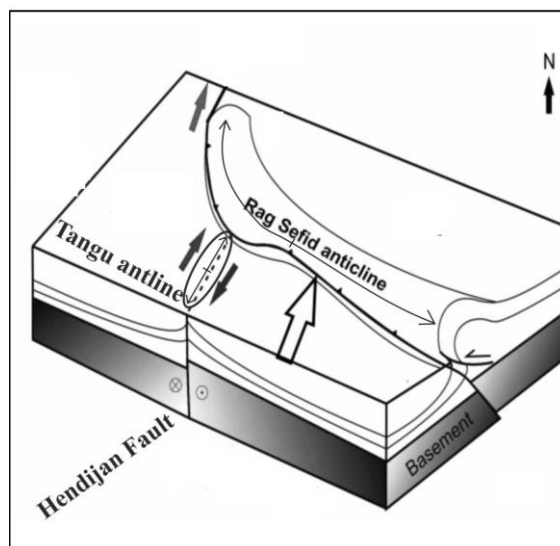
بخش باختری این ساختار ضمن تحمل خمشی راست گرد، دارای روند N160-170 می‌باشد. تاقدیس تنگو پایین تر از یال جنوبی میدان رگ سفید و چسبیده به آن و در ۵ کیلومتری شمال شرق شهر هندیمان قرار گرفته است. طول تاقدیس ۱۵ و عرض آن ۸ کیلومتر است. همگرایی پس از

مواد و روش‌ها

هندسه ساختاری تاقدیس‌های رگ سفید و تنگو تاقدیس رگ سفید به طول ۵۴ و عرض ۵ کیلومتر با روند N110-115 به عنوان یکی از میداین نفتی اصلی زاگرس، در بخش جنوبی فروافتادگی دزفول و در ساحل شمالی خلیج فارس واقع شده است.

تشکیل این پهنه برشی باعث چرخش ساعتگرد محور تاقدیس رگ سفید به میزان ۳۰ درجه، برخاستگی بیشتر در سرسازند آسماری کوهانک شمال باختری نسبت به کوهانک جنوب خاوری به میزان ۴۰۰ متر، تغییر در جهت‌گیری شکستگی‌ها و همچنین افزایش تراکم شکستگی‌ها در منطقه خمیده تاقدیس شده است. با توجه به توالی فازهای دگرشکلی زاگرس و رخداد وارونگی تکتونیکی در گسل‌های راندگی شمال باختری - جنوب خاوری کمربند زاگرس، در این مطالعه تاثیر بر هم کنش این گسل‌های راندگی و امتداد لغز عمود برهم بر الگوی ساختاری چین‌ها در تاقدیس‌های رگ سفید و تنگو بررسی و مدل‌سازی می‌گردد.

برخورد در زاگرس باعث تجدید فعالیت گسل‌ها به شکل راندگی در گسل‌های واقع در یال جلویی تاقدیس رگ سفید و به شکل امتداد لغز راستگرد در روندهای پی سنگی ایزه و هنديجان شده است. با توجه به تشکیل خم چپ پله ناشی از حرکات امتداد لغز راستگرد در قطعه جنوبی گسل ایزه و گسل هنديجان، بخش باختری تاقدیس رگ سفید به علت واقع شدن در ناحیه خم فشارشی بین این گسل‌ها، دچار تشدید فشردگی و افزایش برخاستگی شده است. در نتیجه برهم کنش گسل‌ها و همگرایی محورهای تنش ناشی از فعالیت این گسل‌ها، پهنه برشی راستگرد در بخش باختری تاقدیس رگ سفید ایجاد شده است (شکل ۲).



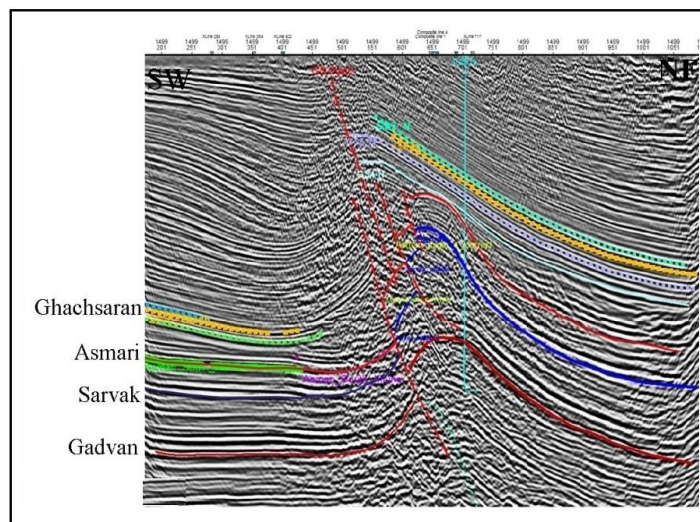
شکل ۲: مدل سه بعدی شماتیکی پیرامون تاقدیس‌های رگ سفید و تنگو. برهم کنش گسل‌ها و همگرایی محورهای تنش ناشی از تجدید فعالیت گسل هنديجان باعث چرخش ساعتگرد محور تاقدیس رگ سفید به میزان ۳۰ درجه شده است.

صورتی که منطبق بر تکامل تکتونیکی تاقدیس‌های رگ سفید و تنگو در پیش بوم زاگرس باشد، بازسازی و مدل‌سازی می‌گردد. برای این منظور ابتدا توضیحاتی پیرامون سازوکار تشکیل گسل‌های رگ سفید و هنديجان ارائه می‌گردد:

با توجه به ویژگی‌های ساختاری چین‌ها و سیستم‌های گسلی موجود در فروافتادگی دزفول جنوبی و همچنین به دلیل بروز برهم کنش عمودی ناهم زمان در گسل‌های منطقه و با توجه به سازوکار گسل‌ها در این پهنه، الگوی هندسی گسترش گسل‌ها و تاقدیس‌های همراه با آن به

دچار جابجایی شده است. در نیمرخ‌های لرزه‌ای تفسیر شده از تاقدیس رگ سفید، محدوده‌ای بهم ریخته در یال جنوب باختری مشاهده می‌شود و نشان می‌دهد که در اثر عملکرد گسلش راندگی شمال باختری - جنوب خاوری، این گسیختگی‌ها رخ داده است؛ که در نتیجه یال جنوبی بسیار پر شیب گشته است (شکل ۳). یال شمالی این تاقدیس چندان پر شیب نیست و شیب قائم و بر گشتگی ساختاری در آن دیده نمی‌شود. به دلیل توسعه و انتشار راندگی‌ها در یال جنوب باختری تاقدیس و همچنین نسبت بالای ۱۰ از متغیر هندسی، این چین خوردگی از نوع تحمیلی و وابسته به انتشار گسل می‌باشد.

کششی بوده است که در طی باز شدگی اقیانوس نئوتتیس در پرمین تریاس با امتداد شمال باختر - جنوب خاور ایجاد شده است و در فاز برخوردی زاگرس حرکت راندگی را تجربه کرده است. یال عقبی تاقدیس رگ سفید با شیب کمتر و فرادپواره مسطح (شکل ۳)، نشانه‌ای از ساختار درگیر در پی سنگ می‌باشد (Sepehr and Cosgrove 2004). تاقدیس رگ سفید بر پایه متغیر هندسی نسبت طول محور به پهنا (Aspect Ratio)، به دلیل دارا بودن این نسبت به میزان بالاتر از ۱۰، به عنوان چین‌های تحمیلی (Forced Folds) که بیشتر از نوع نامتقارن‌اند، تفسیر می‌شود و ناشی از فشردگی مرتبط با گسل‌های راندگی می‌باشد که در اثر فعالیت دوباره گسل هندیمان محور آنها



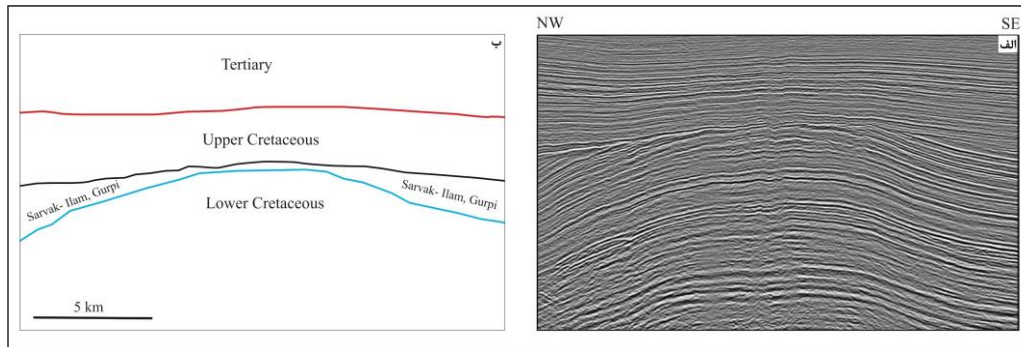
شکل ۳: مقطع لرزه‌ای عمود بر تاقدیس رگ سفید. در این تصویر یال پیشانی پر شیب و انتشار گسلی مشاهده می‌شود.

حوضه زاگرس عملکرد داشته است (Koop and Stoneley, 1982). در انتهای کرتاسه میانی، همزمان با برخاستگی افیولیت‌ها به علت عملکرد فاز برخورد در ورقه‌های ایران و عربی در اثر بسته شدن اقیانوس نئوتتیس، تجدید فعالیت گسل پی سنگی هندیمان به شکل امتداد لغز راستگرد همراه با مولفه راندگی رخ داده است که قرارگیری

در طی پرمین - تریاس در اثر فاز کششی، خطواره گسلی هندیمان از سری گسل‌های شمالی - جنوبی واقع در پیش بوم زاگرس با شیب به طرف جنوب خاور ایجاد شده است که می‌توان احتمال داد با توجه به حرکت عادی گسل هندیمان در پرمین - تریاس، این گسل در این زمان به عنوان انتقال دهنده دگرشکلی میان گسل‌های عادی

عرضی پی سنگی هندوچان در تغییر روند تاقدیس‌ها و کنترل چینه‌شناسی منطقه تأثیر بسزایی دارد به نحوی که در ایجاد ناپیوستگی رسوبی در مرز بالایی سازند سروک و نبود چینه‌ای در سازندهای ایلام و گورپی نقش اصلی را ایفا کرده است (شکل ۴).

بخش باختری این گسل پی سنگی و رسوبات رویی آن در ارتفاع بیشتر نسبت به بخش باختری، منجر به تشکیل بلندای هندوچان شده است. این توپوگرافی ناهموار در پی سنگ منجر به کاهش ضخامت رسوبات بر روی بلندای هندوچان شده است (شکل ۴). در شمال غرب خلیج فارس گسل

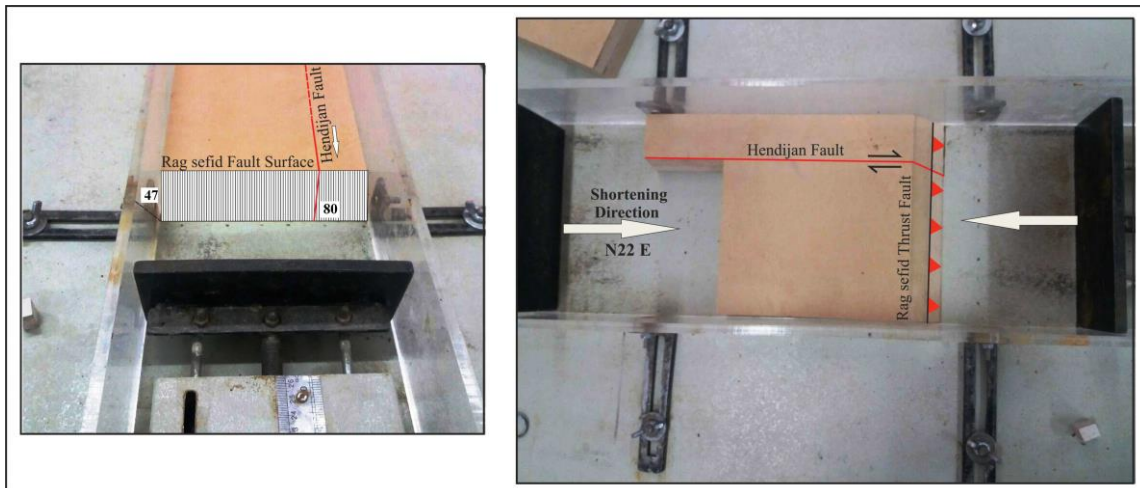


شکل ۴: الف) مقطع لرزه‌نگاری بازتابی عمود بر تاقدیس تنگو. ب) تفسیر زمین‌شناسی این مقطع بازتابی. ناپیوستگی کرتاسه بالایی که سبب حذف یا کاهش ضخامت رسوبات شده است، تجدید فعالیت گسل هندوچان در کرتاسه بالایی را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی

برای انجام مدل‌سازی بر هم کنش گسل‌های پی سنگی در فروافتادگی دزفول جنوبی، ابتدا منطبق با واقعیت‌های ساختاری منطقه، با استفاده از برش تخته‌های چوبی، توپوگرافی پی سنگ شبیه‌سازی می‌شود. نحوه چیدمان و بریدگی تخته‌ها به گونه‌ای است که با توجه به شیب گسل راندگی رگ سفید، ابتدا تخته چوبی با زاویه ۴۷ درجه برش داده می‌شود. همچنین با توجه به اینکه حدود یک سوم تاقدیس رگ سفید دچار خمیدگی محوری شده است، و با توجه به شیب تقریباً ۸۰ درجه‌ای گسل هندوچان که عمود بر گسل رگ سفید است، تخته چوبی مطابق شکل ۵ به دو قسمت نامساوی با شیب ۸۰ درجه بریده می‌شود.

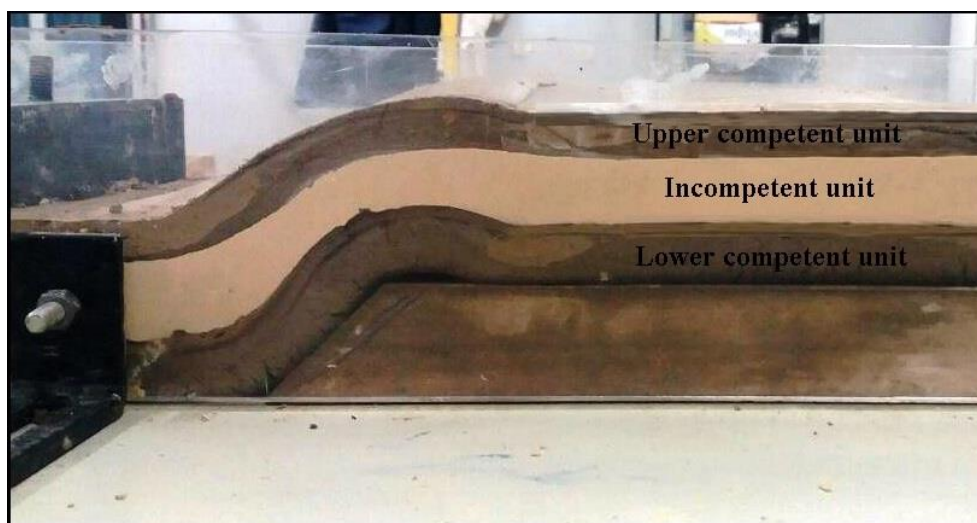
با توجه به جهت فشردگی کلی N22E در جنوب غرب ایران و امتداد قطعه جنوبی گسل هندوچان (N20E)، چین خوردگی در ابعاد کوچک در تاقدیس تنگو واقع بر روی گسل هندوچان به دلیل موازی بودن امتداد این گسل عرضی و امتداد فشردگی کلی می‌باشد. ولی بر خلاف آن در تاقدیس رگ سفید که امتداد گسل اصلی رگ سفید تقریباً عمود بر جهت فشردگی کلی است (N110)، چین خوردگی واضح با ابعاد ساختاری بزرگ در تاقدیس رگ سفید ایجاد شده است (شکل ۲). در پیش بوم زاگرس، تجدید فعالیت گسل پی سنگی هندوچان به شکل امتدادلغز راستگرد همراه با مولفه راندگی علاوه بر برخاستگی در تاقدیس تنگو (شکل ۴)، سبب چرخش ساعتگرد محور تاقدیس رگ سفید به میزان ۳۰ درجه شده است.



شکل ۵: نحوه چیدمان تخته‌های چوبی در شروع مدل‌سازی جهت شبیه‌سازی توپوگرافی در کف حوضه. الف) دید به موازات گسل هندیمان. ب) دید به موازات گسل رگ سفید.

میان‌ی حدفاصل سازند آسماری تا گدوان می‌باشد. لذا به جهت شبیه‌سازی این واحدهای سنگی از گل رس به ضخامت ۳ و ۲ سانتیمتر به ترتیب برای واحدهای مقاوم بالایی و میانی و برای شبیه‌سازی سازند متحرک گچساران از ترکیب پودر سنگ الک شده و روغن موتور به ضخامت ۳ سانتیمتر در شروع مدل‌سازی استفاده گردید (شکل ۶).

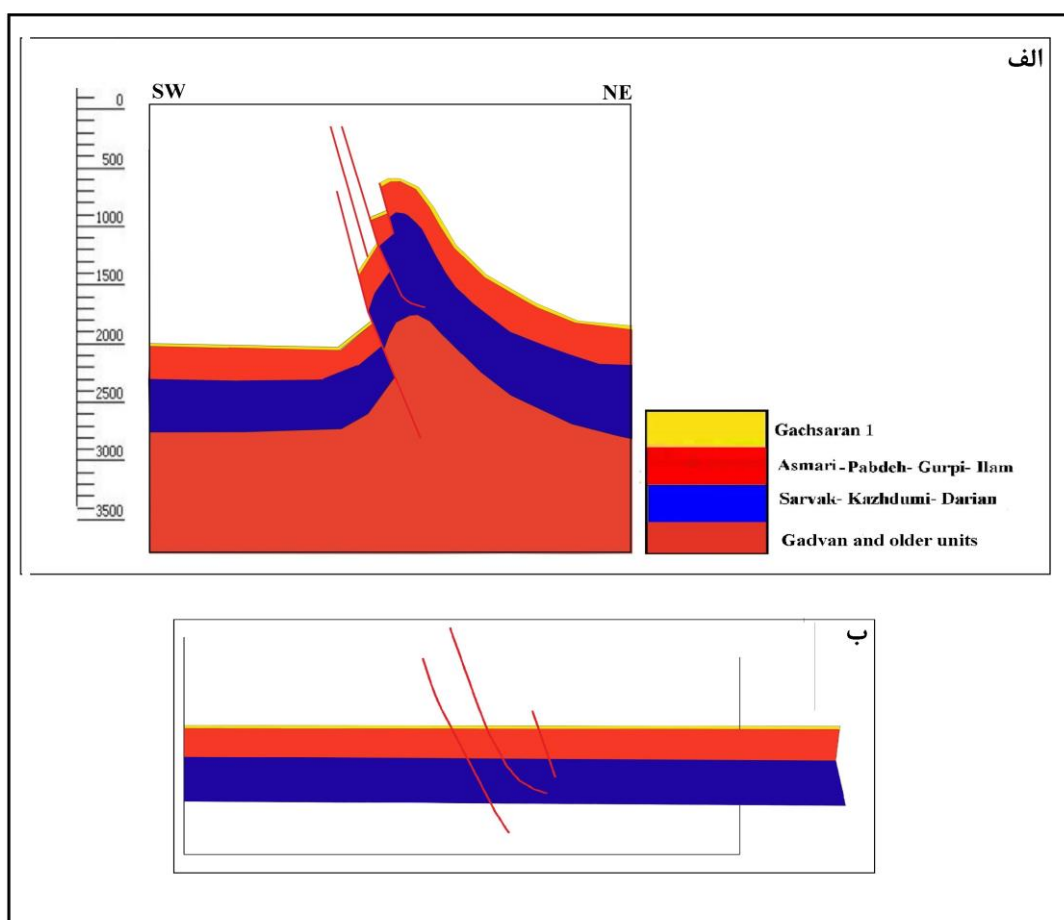
در ستون چینه‌شناسی زاگرس سطوح مقاومی وجود دارد که توسط سطوح جدایش تبخیری و شیلی تفکیک می‌شوند و در طی دگرشکلی به عنوان افق‌های متحرک‌های میانی درگیر می‌شوند (Sherkati et al, 2006). با توجه به تفسیر مقاطع لرزه‌نگاری بازتابی و داده‌های چاه‌های حفاری شده، توالی چینه‌شناسی قابل تشخیص در فروافتادگی دزفول جنوبی به ترتیب سازندهای مقاوم بالایی آغاجری، سازند متحرک گچساران و گروه مقاوم



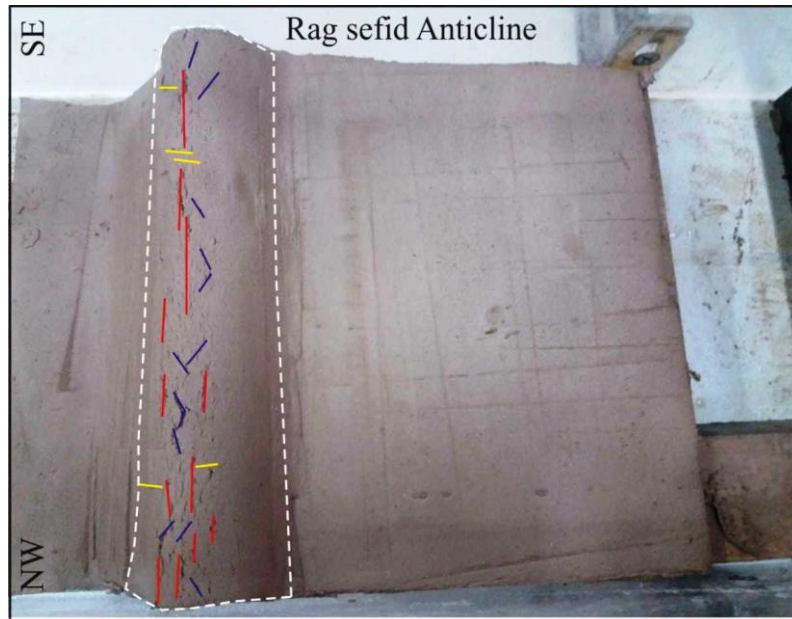
شکل ۶: توالی لایه‌ها قبل از شروع آزمایش

به میزان ۱۶ درصد (شکل ۷)، و با حرکت فک‌های متحرک دستگاه برش با سرعت ثابت ۱۵mm/min، وارونگی تکتونیکی و تبدیل حرکت از کشش به فشارش در گسل رگ سفید سبب می‌شود توالی لایه‌ها دگرشکل شوند و چین خوردگی وابسته به گسل در تاقدیس رگ سفید تشکیل گردد (شکل ۸). در این مدل با ادامه اعمال کوتاه شدگی، دسته شکستگی‌های طولی به موازات محور تاقدیس به میزان گسترده‌ای به دلیل کشش ایجاد شده در کمان بیرونی تاقدیس و هم چنین دسته‌های شکستگی عرضی و مورب با جهت‌گیری‌هایی به ترتیب عمود و زاویه‌دار نسبت به محور تاقدیس ایجاد می‌شوند (شکل ۸).

پس از برخورد ورقه‌های ایران و عربی از ائوسن بالایی به بعد چین خوردگی‌های پیشرونده در زاگرس وابسته به حرکت راندگی در گسل‌های اصلی زاگرس رخ داده است؛ که از شمال خاور به طرف جنوب باختر مهاجرت و انتقال دگر شکلی به طرف پیش بوم مشاهده می‌شود. سن چین خوردگی منطقه مطالعاتی به دلیل واقع شدن در منطقه پیش بوم زاگرس و در اثر حرکت در گسل پیش گودال زاگرس (ZFF)، پلیوسن در نظر گرفته می‌شود (Hessami et al, 2001). در این مرحله عمود بر بخش مرکزی تاقدیس رگ سفید با استفاده از نرم‌افزار 2D MOVE، با اعمال فشردگی



شکل ۷: الف) تفسیر زمین‌شناسی مقطع لرزه‌نگاری بازتابی عمود بر بخش میانی تاقدیس رگ سفید. ب) بر گرداندن لایه‌ها به پیش از دگرشکلی با حذف اثر گسل خوردگی و چین خوردگی (۱۶ درصد کوتاه شدگی) در تاقدیس رگ سفید.



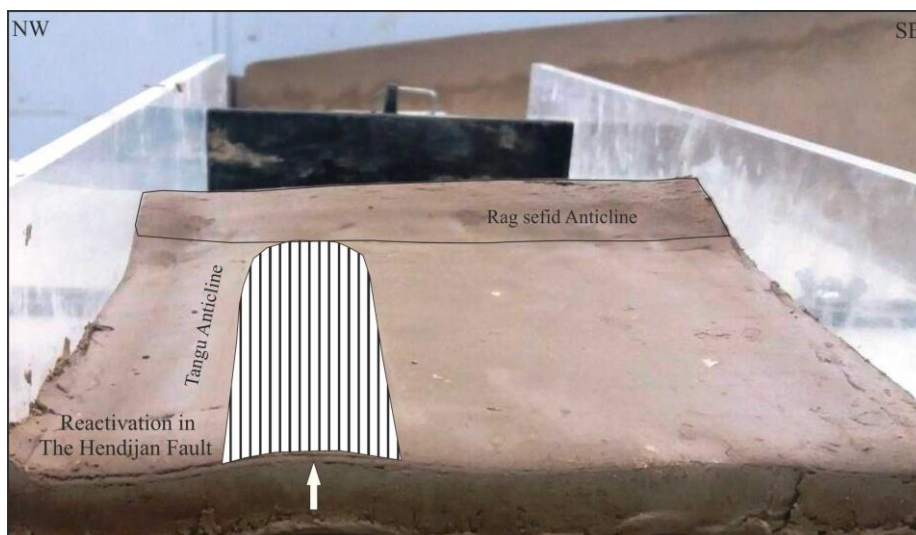
شکل ۸: اعمال کوتاه شدگی ۱۶ درصد و تشکیل چین خوردگی وابسته به گسل در تاقدیس رگ سفید. شکستگی های وابسته به چین خوردگی طولی با خطوط قرمز، مورب با خطوط آبی و شکستگی های عرضی با خطوط زرد نمایش داده شده است.

تشکیل کافت به شکل کششی بوده اند، اکنون راندگی های پی سنگی طولی را در این کمربند تشکیل می دهند. گسل های با امتداد شمال-جنوبی که دارای روندهای شبیه روندهای پی سنگی شمالی-جنوبی در بلوک شرقی عربی هستند، در اثر این فشارش مایل به صورت امتداد لغز راست گرد تجدید فعالیت می کنند. تجدید فعالیت گسل پی سنگی هندیدجان ضمن برخاستگی در تاقدیس مدفون تنگو سبب شده است که محور تاقدیس رگ سفید به میزان ۳۰ درجه به شکل ساعتگرد دچار چرخش گردد. چیدمان و فواصل تخته های چوبی به گونه ای است که در این مرحله از مدل سازی، پس از اعمال ۱۶ درصد کوتاه شدگی، حرکت امتداد لغز راستگرد بین تخته های چوبی به جهت شبیه سازی حرکت گسل هندیدجان اعمال می گردد. به دلیل شیب ۸۰ درجه گسل هندیدجان به طرف خاور، پس برخاستگی در تاقدیس تنگو (شکل ۹)، و با ادامه

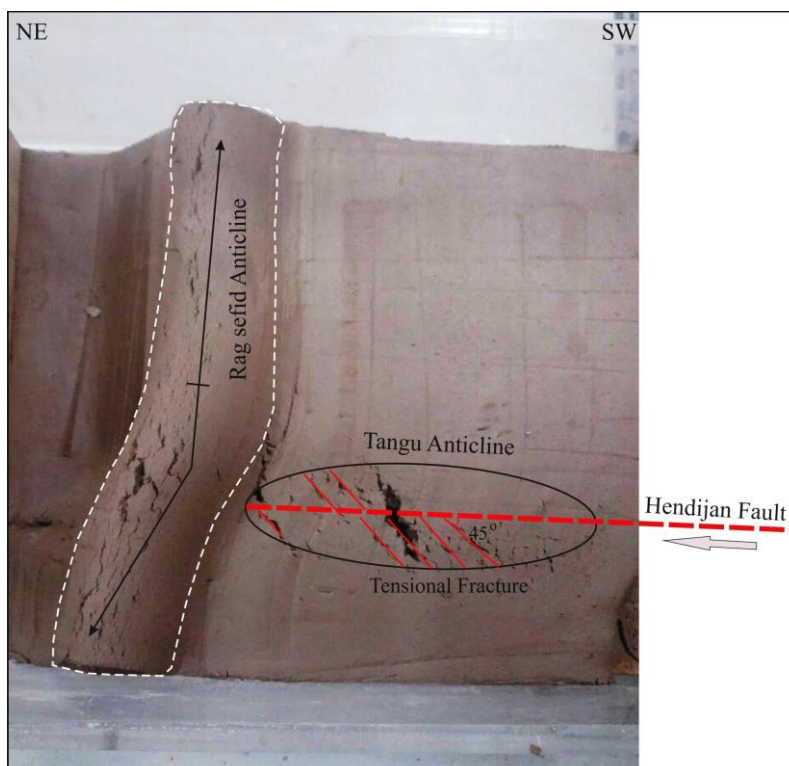
در طی تکامل چین خوردگی های کمربند زاگرس، پس از برخورد ورقه های ایران و عربی همزمان با برخاستگی افیولیت ها در اثر بسته شدن اقیانوس نئوتتیس، از ائوسن پایانی به بعد، علاوه بر چین خوردگی پیشرونده وابسته به گسل های راندگی شمال باختری-جنوب خاوری، گسل های شمال-جنوبی پی سنگی مثل هندیدجان در خلال سنوزوئیک پایانی به وسیله ورود جبهه دگرشکلی زاگرس درون منطقه مطالعاتی تجدید فعالیت می کنند. تجدید فعالیت این گسل ها باعث ایجاد تغییراتی در پوشش رسوبی مثل تجدید فعالیت چین های شمالی جنوبی (تاقدیس تنگو) به شکل تنگ شدن و برخاستگی بیشتر و همچنین چرخش محور تاقدیس های شمال باختری-جنوب خاوری شده است. همگرایی مورب پس از برخورد بین ایران و ورقه عربی باعث کوتاه شدگی پی سنگ زاگرس شده است به نحوی که گسل های طولی با امتداد شمال باختری-جنوب خاوری که در زمان

حرکت در گسل هنديجان، بخش غربی تاقدیس رگ سفید در جهت ساعتگرد چرخیده می شود (شکل ۱۰). همچنین در اثر تجدید فعالیت گسل هنديجان، شکستگی های کششی (Tensional

fractures) با زاویه ۴۵ درجه نسبت به گسل هنديجان در راس تاقدیس تنگو توسعه پیدا می کنند (شکل ۱۰).



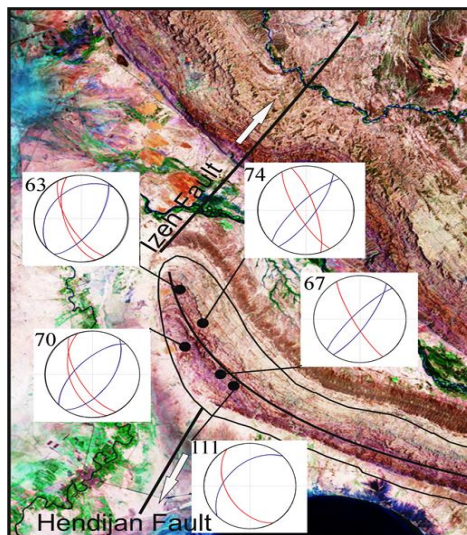
شکل ۹: تشکیل تاقدیس تنگو در اثر تجدید فعالیت گسل هنديجان



شکل ۱۰: در اثر تجدید فعالیت گسل هنديجان، محور تاقدیس رگ سفید به میزان ۳۰ درجه در جهت ساعتگرد می چرخد. همچنین توسعه شکستگی های کششی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به گسل هنديجان در راس تاقدیس تنگو قابل مشاهده است.

درجه، باعث توسعه شکستگی‌های طولی با روند N160 و شکستگی عرضی با روند N35 در بخش باختری تاقدیس رگ سفید شده است. همچنین عملکرد گسل هندیدجان بر توسعه و تراکم شکستگی‌های تاقدیس رگ سفید، باعث افزایش و توسعه دسته شکستگی‌هایی با امتداد N45 در ناحیه خمیش یافته (چاه‌های شماره ۶۷، ۷۰ و ۱۱۱) تاقدیس رگ سفید شده است. شکل ۱۱ توسعه شکستگی‌های بخش باختری تاقدیس رگ سفید را نشان می‌دهد.

اطلاعات چاه‌های حفاری شده و تفسیر نمودارهای تصویرگر نشان می‌دهد که در بخش باختری تاقدیس رگ سفید (چاه‌های حفاری شده شماره ۶۳، ۷۴)، به علت چرخش محوری چین، شکستگی‌های طولی و عرضی و هم‌چنین مورب با تغییر جهت مواجه شده‌اند و حاکی از آن است که الگوی توزیع شکستگی‌ها متأثر از عملکرد گسل عرضی هندیدجان می‌باشد. گسل پی سنگی هندیدجان علاوه بر تغییر در روند اثر سطح محوری تاقدیس رگ سفید به سمت شمال به میزان ۳۰



شکل ۱۱: جهت‌گیری شکستگی‌ها در بخش باختری و خمیش یافته تاقدیس رگ سفید تحت تاثیر تجدید فعالیت گسل پی سنگی هندیدجان. اعداد شماره چاه‌های حفاری شده در تاقدیس تنگو هستند. (شکستگی‌های طولی با کمان قرمز و شکستگی‌های عرضی با کمان آبی مشخص شده‌اند).

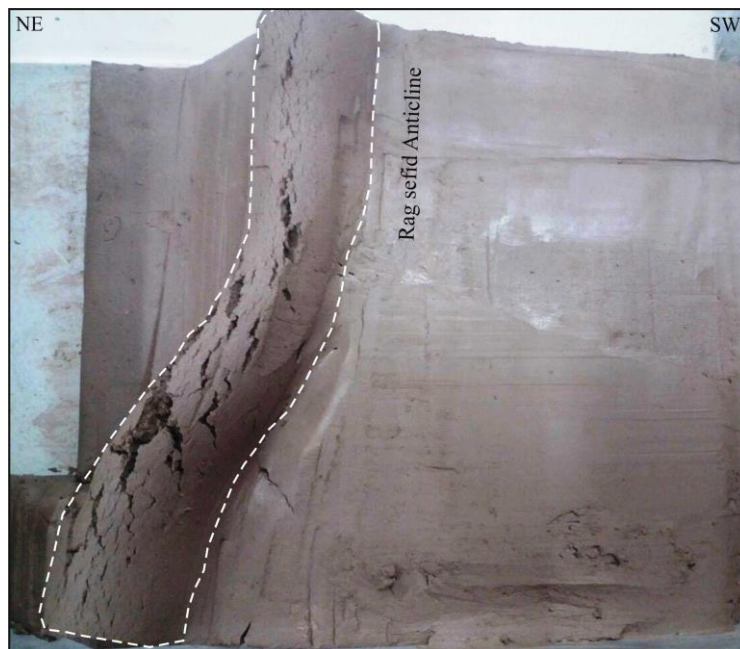
ضخامت پیدا کند. چنانچه ضخامت لایه نامقاوم کم شود و نسبت n از عدد یک کمتر شود، ضخامت منطقه لولایی کمتر می‌شود و چین‌هایی جناعی ایجاد می‌شوند (Twiss and Moores, 1992). در این مرحله از مدل‌سازی تاثیر ضخامت لایه نمکی بر الگوی چین خوردگی بررسی گردید. در این مرحله ضخامت لایه نمکی که در مرحله قبل ۳ سانتی‌متر بود ($n=1.2$)، این بار $1/5$ سانتیمتر لحاظ گردید ($n=0.75 < 1$). با کاهش

تاثیر ضخامت لایه نمکی گچساران بر الگوی چین خوردگی

در یک توالی چین خورده، نسبت ضخامت لایه کم مقاوم به ضخامت لایه مقاوم ($n=d_2/d_1$) تاثیر زیادی بر دامنه چین‌های ایجاد شده دارد. به نحوی که اگر این نسبت به عدد یک نزدیک باشد و ضخامت لایه‌های نامقاوم و مقاوم یکسان باشد، چین خوردگی مشابه ایجاد می‌شود و باعث می‌شود لایه نامقاوم در محل لولای چین افزایش

ضخامت زیاد لایه نمکی سازند و همچنین مقدار بالای نسبت n است که در اثر واقع شدن بخش باختری تاقدیس رگ سفید در یک پهنه گسلی را ستگرد و چرخش ساختاری حاصل از آن، پهن شدگی و افزایش طول موج تاقدیس تسهیل شده است (شکل ۱۰ و ۱۱).

ضخامت نمک، و با کاهش پارامتر n ، مشاهده می شود که چین حاصله دارای طول موج کمتر و دامنه بیشتر نسبت به حالتی است که لایه نمکی ۳ سانتیمتر ضخامت داشته است (شکل ۱۲). بنابراین می توان نتیجه گرفت که دلیل طول موج بیشتر بخش باختری تاقدیس رگ سفید به علت



شکل ۱۲: تاثیر کاهش ضخامت نمک در مدل سازی که منجر به ایجاد تاقدیس با دامنه بیشتر و طول موج کمتر شده است.

بلوک ایرانی و عربی تفسیر می شود (Soleimany and Sàbat, 2010). حادثه دگرشکلی سنوزوئیک پایانی با کوهزایی زاگرس هم زمان است. رشته کوه زاگرس شامل چین‌هایی با امتداد شمال غرب - جنوب شرق و کمربند راندگی است که از کوتاه شدگی ناشی از همگرایی بین ورقه عربی و بلوک ایرانی ایجاد شده است (Agard et al, 2005). علاوه بر این، حسامی و همکاران (Hessami et al, 2001) یک تعدادی از ناپیوستگی محلی و چینه‌های رشدی همراه را تشریح کرد و پیشنهاد داد که چین خوردگی پیشرونده در زاگرس چین خورده ساده قبل از ائوسن پایانی شروع شده است و تا

بحث و نتایج

در شمال غرب خلیج فارس دو فاز دگرشکلی وجود دارد: یک فاز قدیمی در انتهای کرتاسه پایانی (سنومانین، سنتونین، کامپانین و ماستریشتین) که قدیمی‌تر از برخورد بین بلوک‌های عربی و ایرانی (ائوسن پایانی) است و به فرایش ورقه‌های راندگی اقیانوس نئوتتیس روی حاشیه غیرفعال عربی نسبت داده می‌شود که باعث شده است چین‌های شمالی- جنوبی و شمال خاوری- باختری مثل تاقدیس تنگو ایجاد شوند. فاز جدیدتر که از لحاظ سنی جوانتر از برخورد (میوسن پایانی، پلیوسن و پلیستوسن) است و به عنوان نتیجه همگرایی بین

رگ سفید از سری گسل‌های پی سنگی کششی است که در طی بازشدگی اقیانوس نئوتتیس در پرمین تریاس با امتداد شمال غرب جنوب شرق ایجاد شده است. فاز چین خوردگی تحمیلی در پیش بوم زاگرس و تاقدیس رگ سفید در پلیوسن رخ داده است. به جهت مدل‌سازی آزمایشگاهی تکامل تکتونیکی، با توجه به محاسبه میزان کوتاه‌شدگی عمود بر بخش مرکزی تاقدیس رگ سفید، با اعمال فشردگی به میزان ۱۶ درصد و با حرکت فک‌های متحرک دستگاه برش با سرعت ثابت، وارونگی تکتونیکی و تبدیل حرکت از کشش به راندگی در گسل رگ سفید سبب می‌شود توالی لایه‌ها دگرشکل شوند و چین خوردگی وابسته به گسل در تاقدیس رگ سفید تشکیل گردد. پس از زمان برخورد از ائوسن به بعد، با توجه به موازی بودن کوتاه شدگی زاگرس و امتداد گسل شمال باختری- جنوب خاوری هندیجان، این گسل به صورت امتداد لغز راستگرد تجدید فعالیت کرده است. با ورود جبهه دگرشکلی زاگرس به پیش بوم منطقه کوهزایی در پلیوسن، تجدید علاوه بر برخاستگی تاقدیس تنگو در راس گسل هندیجان، تاقدیس رگ سفید به علت حرکت امتداد لغز راستگرد در گسل هندیجان، به میزان ۳۰ درجه به صورت ساعتگرد دچار چرخش محوری شده است. همچنین نتایج ما نشان می‌دهد که با توجه به جهت کلی فشردگی N22E در جنوب غرب ایران و امتداد قطعه جنوبی گسل هندیجان (N20E)، چین خوردگی غیر واضح در ابعاد کوچک در تاقدیس تنگو واقع بر روی گسل هندیجان، به دلیل موازی بودن این گسل عرضی و امتداد فشردگی کلی می‌باشد. ولی بر خلاف آن در تاقدیس رگ سفید که امتداد گسل اصلی تقریباً عمود بر جهت فشردگی کلی است (N110)، چین خوردگی واضح با ابعاد ساختاری بزرگ در تاقدیس رگ سفید ایجاد شده

پلیستوسن در شمال خلیج فارس ادامه داشته است. تاقدیس رگ سفید واقع در پیش گودال زاگرس با امتداد کلی شمال باختر- جنوب خاور در اثر فاز کوهزایی زاگرس در پلیوسن برافراشته شده است. پس از برخورد ورقه‌ها از ائوسن پایانی به بعد، علاوه بر چین خوردگی بر روی گسل‌های شمال باختری- جنوب خاوری، گسل‌های شمال- جنوبی پی سنگ در خلال سنوزوئیک پایانی به وسیله ورود جبهه دگرشکلی زاگرس درون منطقه مطالعاتی تجدید فعالیت کرده‌اند؛ که تجدید فعالیت این گسل‌ها باعث ایجاد تغییراتی در پوشش رسوبی مثل تغییر رخساره و ضخامت رسوبات و همچنین بروز تغییر در امتداد محور تاقدیس‌های رویی شده است. همگرایی مورب پس از برخورد بین ایران و ورقه عربی باعث کوتاه شدگی پی سنگ زاگرس شده است به نحوی که گسل‌های طولی با امتداد شمال باختری- جنوب خاوری که در زمان تشکیل کافت به شکل کششی بوده‌اند، اکنون راندگی‌های پی سنگی طولی را در این کمربند تشکیل می‌دهند. گسل‌های با امتداد شمال- جنوبی که دارای روند-های شبیه روندهای پی سنگی شمالی- جنوبی در بلوک شرقی عربی هستند، در اثر این فشارش مایل به صورت امتداد لغز راست گرد تجدید فعالیت کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

نتایج ما نشان می‌دهد که در فروبار دزفول جنوبی با توجه به توالی فازهای دگرشکلی زاگرس و رخداد وارونگی تکتونیکی در گسل راندگی شمال باختری- جنوب خاوری رگ سفید و همچنین تجدید فعالیت گسل پی سنگی هندیجان، برهم‌کنش عمودی بین گسل‌ها در پیش بوم زاگرس اتفاق افتاده است؛ که این اثر متقابل تاثیراتی مهم بر الگوی ساختاری و تشکیل تاقدیس‌های رگ سفید و تنگو دارد. راندگی

بالای نسبت n است که در اثر واقع شدن بخش باختری تاقدیس رگ سفید در یک پهنه گسلی راستگرد و چرخش ساختاری حاصل از آن، پهن شدگی و افزایش طول موج تاقدیس تسهیل شده است.

است. در این مطالعه تاثیر ضخامت لایه کم مقاوم و شکل پذیر بر الگوی چین خوردگی بررسی شد. مدل سازی ما نشان می دهد که دلیل طول موج بیشتر بخش باختری تاقدیس رگ سفید به علت ضخامت زیاد لایه نمکی سازند و همچنین مقدار

پانویس

1-Fault Interaction

منابع

-Abdollahi Fard, I., Braathen, A., Mokhtari, M. and Alavi, S.A., 2006. Interaction of the Zagros Fold thrust belt and the Arabian type, deep-seated folds in the Abadan Plain and the Dezful Embayment, SW Iran: *Petroleum Geoscience*, v. 12, p. 347-362.

-Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): Constraints from collisional an earlier deformation: *International Journal of Earth Science*, v. 94, p. 401-419.

-Audet, P. and Burgmann, R., 2011. Dominant role of tectonic inheritance in supercontinent cycles: *Natral Geoscience*, v. 4, p. 184-187.

-Butler, R.W.H., Tavarnelli, E. and Grasso, M., 2006. Structural inheritance in mountain belts: an Alpine-Apennine perspective: *Journal of Structural Geology*, v. 28, p. 1893-1908.

-Burberry, C.M., 2015a. The effect of basement fault reactivation on the Triassic- Recent geology of Kurdistan, N Iraq: *Journal of Petroleum Geology*, v. 38 (1), p. 37-58.

-Del Ventisette, C., Montanari, D., Sani, F. and Bonini, M., 2006. Basin inversion and fault reactivation in laboratory experiments: *Journal of Structural Geology*, v. 28, p. 2067-2083.

-Dubois, A., Odonne, F., Massonnat, G., Lebourg, T. and Fabre, R., 2002.

Analogue modelling of fault reactivation: tectonic inversion and oblique remobilization of grabens: *J. Struct. Geol*, v. 24, p. 1741-1752.

-Eisenstadt, G. and Withjack, M.O., 1995. Estimating inversion: results from clay models. In: Buchanan, J.G. and Buchanan, P.G. (Eds.), *Basin Inversion*, 88: Geological Society of London Special Publication, p. 119-136.

-Hessami, K., Koyi, K.A. and Talbot, C.J., 2001. The significance of strike-slip faulting in the basement of the Zagros fold and thrust belt: *journal of petroleum geology*, v. 24, p. 5-28.

-Huerta, A.D. and Harry, D.L., 2012. Wilson cycles, tectonic inheritance, and rifting of the North American Gulf of Mexico continental margin: *Geosphere*, v. 8, p. 374-385.

-Jolley, S.J., Fisher, Q.J. and Ainsworth, R.B., 2010. Reservoir compartmentalization: an introduction. In: Jolley, S.J., Fisher, Q.J., Ainsworth, R.B., Vrolijk, P.J. and Delisle, S.(Eds.): *Geological Society of London*, v. 347, p. 1-8.

-Kattenhorn, S.A., Aydin, A. and Pollard, D.D., 2000. Joints at high angles to normal fault strike: an explanation using 3-D numerical models of fault-perturbed stress fields: *Journal of Structural Geology*, v. 22, p. 1-23.

- Koop, W. and Stoneley, R., 1982. Subsidence history of the Middle East Zagros basin, Permian to Recent: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 305, p. 149-168.
- Macedo, J. and Marshak, S., 1999. Controls on the geometry of fold-thrust belt salient: *Geological Society of American Bulletin*, v. 111(12), p. 1808-1822.
- Maerten, L., Gillespie, P. and Pollard, D.D., 2002. Effects of local stress perturbation on secondary fault development: *Journal of Structural Geology*, v. 24, p. 145-153.
- McMechan, M.E., 2012. Deep transverse basement structural control of mineral systems in the southeastern Canadian Cordillera. *Canadian Journal of Earth Science*, v. 49 (5), p. 693-708.
- Molliex, S., Bellier, O., Terrier, M., Lamarche, J., Martelet, G. and Espurta, N., 2010. Tectonic and sedimentary inheritance on the structural framework of Provence (SE France): importance of the Salon-Cavaillon fault: *Tectonophysics*, v. 501, p. 1-16.
- Panien, M., Schreurs, G. and Pfiffner, A., 2005. Sandbox experiments on basin inversion: testing the influence of basin orientation and basin fill: *Journal of Structural Geology*, v. 27, p. 433-445.
- Peacock, D.C.P., Nixon, C.W., Rotevatn, A., Sanderson, D.J. and Zuluaga, L.F., 2017- Interacting faults: *Journal of Structural Geology*, v. 97, p. 1-22.
- Sepehr, M. and Cosgrove, J.W., 2004. Structural framework of the Zagros fold-thrust belt, Iran: *Marine and Petroleum Geology*, v. 21, p. 829-843.
- Sherkati, S., Letouzey, J. and Frizon de Lamotte, D., 2006. The Central Zagros fold-thrust belt (Iran): New insights from seismic data, field observation and sandbox modeling: *Tectonics*, v. 25, p. 1-27.
- Soleimany, B. and Sàbat, F., 2010. Style and age of deformation in the Northwest Persian Gulf: *Petroleum Geosciences*, v. 15, p. 1-10. DOI: 10.1144/1354-079309-837.
- Twiss, R.J. and Moores, E.M., 1992. *Structural Geology*: W.H. Freedman & Company, New York, 532 p.
- Verges, J., Goodarzi, M.G.H., Emami, H., Karpuz, R., Efstathiou, J. and Gillespie, P., 2011. Multiple detachment folding in Pusht-e Kuh arc, Zagros: role of mechanical stratigraphy. In *Thrust Fault Related Folding: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, v. 94, p. 1-26.
- Willingshofer, E., Sokoutis, D. and Burg, J.P., 2005. Lithospheric-scale analogue modelling of collision zones with a pre-existing weak zone. In: Gapais, D., Brun, J.P., Cobbold, P.R. (Eds.), *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: from Minerals to the Lithosphere*: Geological Society of London, Special Publication, v. 243, p. 277-294.