

نقش چینه‌نگاری مکانیکی در هندسه چین خوردگی، با استفاده از داده‌های زیرسطحی؛ مطالعه موردی: تاقدیس‌های آغا‌جاری و پازنان (جنوب فروبار دزفول)

مهدی توکلی یرکی^۱، سید احمد علوی^۲، محمدرضا قاسمی^۳ و ایرج عبدالهی فرد^۴

^۱دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳دانشیار، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

^۴دکترا، مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۲۸

چکیده

اهمیت و نقش چینه‌نگاری مکانیکی سنگ‌ها در جنبش‌شناسی چین‌ها از دیرباز مورد توجه زمین‌شناسان ساختمانی بوده است. در کمربند‌های چین راندگی، توالی‌ای از لایه‌های کم‌قوام و پر‌قوام وجود دارند که در گذر زمان دچار نیروهای زمین‌ساختی شده و با گسلش و چین خوردگی دگرریخت شده‌اند. در این میان، دو پارامتر تغییرات رخساره رسوبی و ستبرای واحدهای کم‌قوام، نقش تعیین‌کننده‌ای در فعالیت توالی‌ها به عنوان افق‌های جدایشی ایفا می‌کنند. هدف این پژوهش، بررسی نقش چینه‌نگاری مکانیکی بر هندسه چین خوردگی در دو تاقدیس هیدروکربنی آغا‌جاری و پازنان در پهنه فروبار دزفول است. به همین منظور از برش‌های لرزه‌ای، اطلاعات چینه‌نگاری و نمودارهای پتروفیزیکی برخی از چاه‌های موجود در گستره و همچنین مطالعات چینه‌نگاری پیشین ناحیه دزفول استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که واحد کم‌قوام شیلی کرتاسه زیرین (سازند گرو) یکی از سطوح اصلی جدایشی میانی در ساختار آغا‌جاری به شمار می‌آید و تأثیر بسزایی در کنترل هندسه چین خوردگی توالی پر‌قوام کرتاسه زیرین تا الیگومیوسن (سازندهای فهلیان تا آسماری) داشته است. واحد تبخیری تریاس (سازند دشتک) و سایر سازندهای تبخیری کم‌قوام به سن ژوراسیک میانی-بالایی (عدایه، علن و سرگلو) نیز در ساختمان آغا‌جاری فعال بوده‌اند. در مقابل، در بیشتر بخش‌های ساختمان پازنان، سازند گرو با تغییر به رخساره کم‌ژرف‌تر همی‌پلاژیک و سازندهای ژوراسیک با تبدیل شدن به رخساره آهکی پر‌قوام سازند سورمه، ویژگی مکانیکی لازم را برای ایجاد سطوح جدایشی میانی نداشته‌اند. بر پایه شواهد تغییر ویژگی‌های هندسی ساختارهای نامبرده و همچنین ستون چینه‌نگاری چاه‌های منطقه، مرز تغییر رخساره سازندهای یاد شده در گستره مورد مطالعه، از بین دو تاقدیس پازنان و آغا‌جاری عبور می‌کند. افزون بر این، به نظر می‌رسد که فعالیت بلندای هندیمان-ایده نیز بر کنترل رخساره سازند گرو تأثیر داشته است. همچنین بر اساس ویژگی‌های هندسی و ارائه مدل مفهومی هندسی از نحوه تکوین این ساختارها، سبک چین خوردگی تاقدیس‌های یاد شده از نوع جدایشی گسل‌خورده نامتقارن پیشنهاد شده است.

کلیدواژه‌ها: زاگرس، چینه‌نگاری مکانیکی، تاقدیس آغا‌جاری، تاقدیس پازنان، افق جدایشی میانی، سازند سورمه، سازند گرو.

E-mail: me_tavakoli@sbu.ac.ir

*نویسنده مسئول: مهدی توکلی یرکی

۱- پیش‌نوشتار

نقش لایه‌های کم‌قوام بر هندسه چین خوردگی با مدل‌سازی‌های تجربی و رقومی (Buchanan and McClay, 1991; Dixon and Liu, 1992; Letouzey et al., 1995;) و همچنین استفاده از اطلاعات لرزه‌نگاری (Talbot, 1992; Ghanadian et al., 2017) بازتابی (Briggs et al., 2006; Iacopini and Butler, 2011; Dalton et al., 2017) به اثبات رسیده است. چینه‌نگاری مکانیکی مفهومی است که بر تفکیک لایه‌ها بر پایه ویژگی‌های مکانیکی مشابه تأکید دارد (Cooke, 1997; Corbett et al., 1987). هر چند که در برخی از منابع، این واژه به عنوان پاسخ سنگ‌ها به نیروهای اعمال شده نیز به کار رفته است (Gross et al., 1995).

پهنه فروبار دزفول در جنوب باختر کمربند زاگرس، حدود ۸ درصد از کل مخازن نفتی دنیا را در خود جای داده است (شکل ۱؛ Bordenave and Hegre, 2005). در این فروبار، سازندهای کربناته پر‌قوام آسماری (الیگوسن-میوسن آغازین)، سروک (سنومانین-تورونین) و فهلیان (نئوکومین) مخازن اصلی نفتی به شمار می‌آیند که به ترتیب به وسیله سازندهای کم‌قوام گچساران، گورپی و گدوان به عنوان پوش سنگ، پوشیده شده‌اند. سازندهای کم‌قوام دیگری همانند پایده (پالئوسن-ائوسن)، کژدمی (آلبین)، گرو (بریاسین) و سرگلو (باژوسین) نقش منشأ را در سامانه نفتی ناحیه داشته‌اند. بنابراین، ستون چینه‌نگاری گستره مورد مطالعه ترکیبی از توالی لایه‌های کم‌قوام و پر‌قوام بوده و لازمه شناخت بهتر الگوی دگرریختی در گستره فروبار دزفول، توجه خاص به مفهوم چینه‌نگاری مکانیکی است.

هدف این پژوهش، بررسی نقش چینه‌نگاری مکانیکی بر سبک چین خوردگی در دو تاقدیس آغا‌جاری و پازنان در جنوب فروبار دزفول است تا بتوان از آن به عنوان الگویی برای تحلیل سایر ساختارهای با شرایط مشابه بهره برد. این دو تاقدیس که در

تمامی کمربند‌های چین-راندگی (Fold-Thrust Belt) شامل تناوبی از لایه‌های رسوبی پر‌قوام (Competent) و کم‌قوام (Incompetent) هستند (Ghanadian et al., 2017) که در نتیجه نیروهای فشاری (Compressional) و یا ترفشاری (Transpressional) زمین‌ساختی به شکل چین و گسل خوردگی بر روی پی سنگ (Basement) تغییر شکل یافته‌اند (Nemcok et al., 2005). ته‌نشست رسوبات در حوضه رسوبی این کمربندها، همواره با تغییرات رخساره و ستبرای لایه‌ها همراه است. بنابراین، هنگامی که حوضه رسوبی تحت تأثیر نیروهای زمین‌ساختی قرار می‌گیرد، پاسخ لایه‌ها بسته به میزان قوام و ستبرای هر یک از آنها (Erickson, 1996) و همچنین اختلاف قوام (Competence contrast) بین لایه‌های متوالی، متفاوت خواهد بود. به طوری که طبقات کم‌قوام (مانند لایه‌های تبخیری یا شیلی) به شرطی که ستبرای مناسبی داشته باشند، می‌توانند به عنوان افق‌های جدایشی قاعده‌ای (Basal decollement) و یا میانی (Intermediate detachment) عمل کرده و نقشی اساسی در کنترل سبک چین خوردگی-گسلش لایه‌های بالای خود داشته باشند (Stewart, 1996; Briggs et al., 2006).

در برخی از مناطق مانند کمربند‌های راندگی آیداو-وایومینگ-یوتا (Armstrong and Oriel, 1965) و آپالاش جنوبی (Harris and Milici, 1977) شروع دگرریختی با گسل خوردگی بوده است. در بعضی دیگر مناطق چون زاگرس (Falcon, 1974)، فلات آپالاش مرکزی (Gwinn, 1964)، ژورا (Pierce, 1966) و جزایر پری (Harrison and Bally, 1988) دگرریختی ابتدا با چین خوردگی آغاز شده است. این تفاوت سبک دگرریختی می‌تواند در نتیجه اختلاف در چینه‌نگاری مکانیکی (Mechanical stratigraphy) باشد (Erickson, 1996).

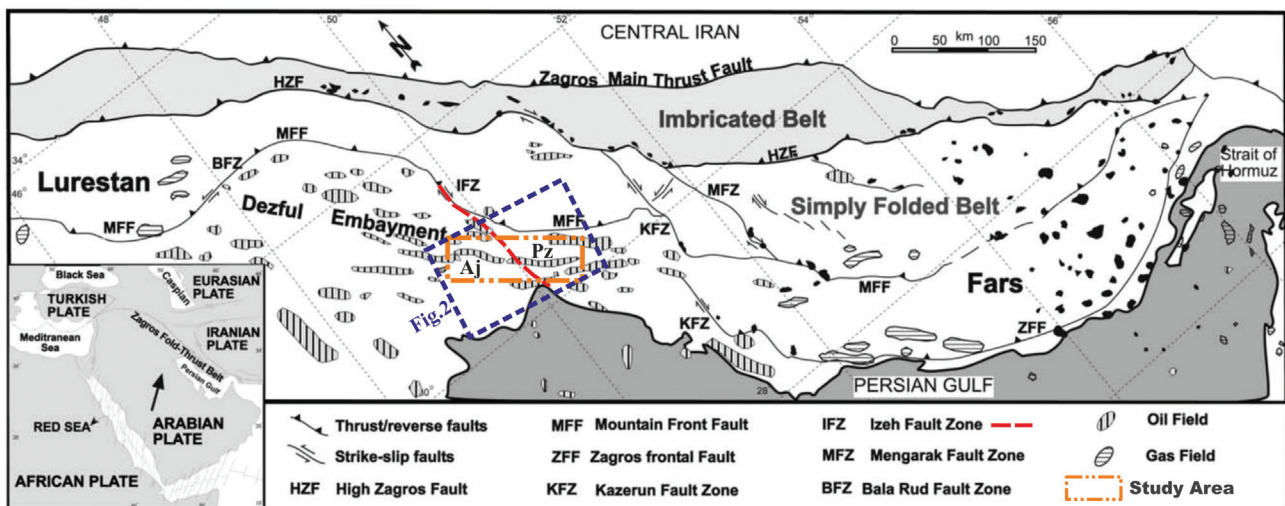
(Falcon, 1974). این فروبار از سمت خاور و شمال به ترتیب به وسیله پهنه‌ی گسلی کازرون و گسل پیشانی کوهستان محصور شده است. پهنه گسلی ایذه (Izeh Fault) با (Zone; Sepehr, 2001; Sepehr and Cosgrove, 2004; Sepehr et al., 2006) روند تقریبی شمالی-جنوبی، در درون فروبار دزفول سبب جابه‌جایی گسل پیشانی کوهستان به سمت جنوب شده است (شکل ۱). این پهنه گسلی که در مقیاسی ناحیه‌ای به گسل ایذه (هندیجان) نیز معرفی شده است (Blanc et al., 2003)، از میان گستره‌ی مورد مطالعه عبور می‌کند.

گستره مورد مطالعه شامل دو ساختمان آجاجاری و پازنان با روند شمال باختر- جنوب خاور در جنوب فروبار دزفول است. جوان‌ترین و قدیمی‌ترین سازندهای رخنمون یافته در این تاقدیس‌ها، به ترتیب سازندهای بختیاری (در ناودیس شمالی هر دو ساختمان) و گچساران (به صورت باریکه‌ای در یال جنوبی هر دو ساختار که به وسیله گسلی بر روی رسوبات عهد حاضر رانده شده) هستند. گسترده‌ترین رخنمون سطحی نیز سازند آجاجاری است (شکل ۲). ستون چین‌نگاری مکانیکی فروبار دزفول و ستبرای متوسط سازندها در گستره مورد مطالعه به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

مجاورت یکدیگر قرار دارند، الگوی دگرریختی (Deformation pattern) متفاوتی را در افق آسماری از خود نشان می‌دهند. پژوهش‌های ساختاری پیشین در خصوص تاقدیس‌های نامبرده (خرازی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ علی‌پور و همکاران، ۱۳۹۱؛ علی‌پور و همکاران، ۱۳۹۴)، هیچ‌کدام به نقش چین‌نگاری مکانیکی نپرداخته‌اند و آشکار است که هر چه شناخت دقیق‌تری از ارتباط بین الگوی چین‌خوردگی و چین‌نگاری مکانیکی در یک میدان هیدروکربنی وجود داشته باشد، امکان برنامه‌ریزی و برداشتن گام‌های مناسب‌تر در مرحله توسعه آن میدان، بیشتر فراهم می‌شود.

۲- جایگاه زمین‌شناسی و چین‌شناسی منطقه

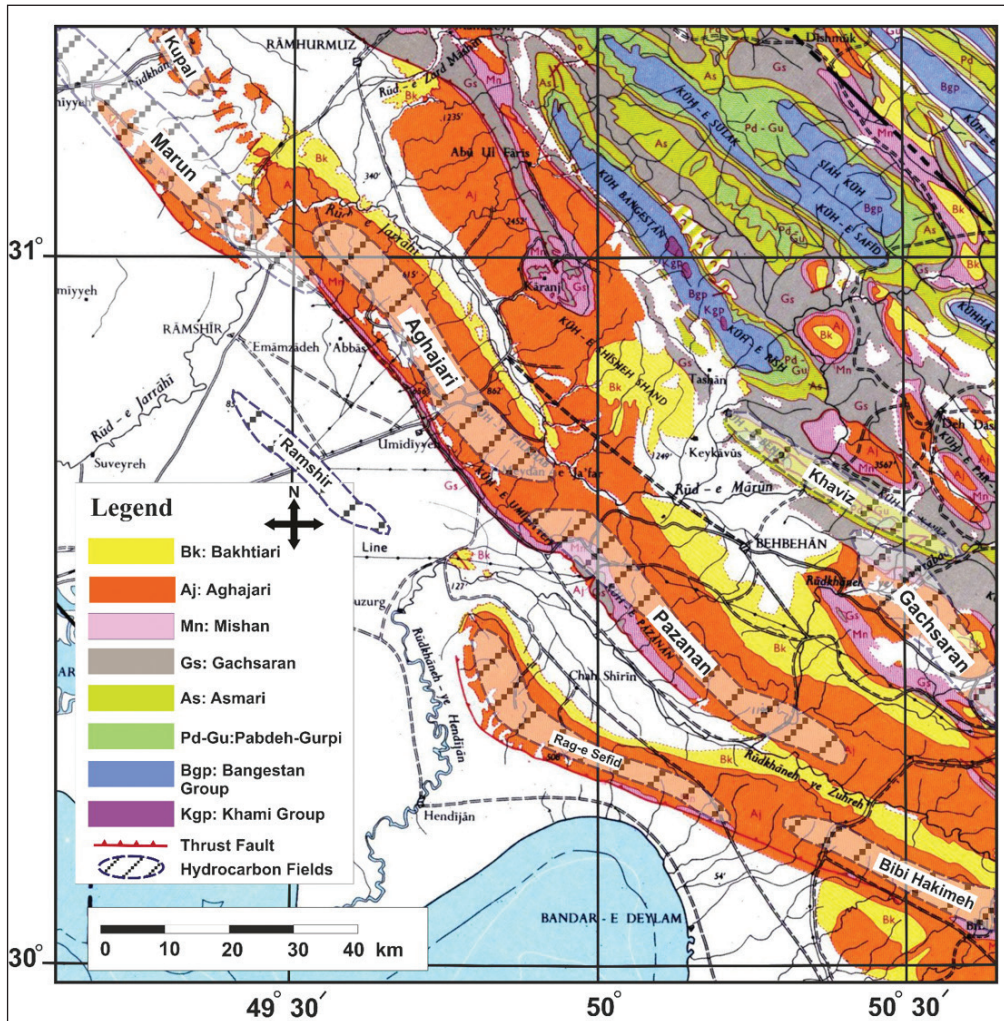
کمربند چین-راندگی زاگرس حاصل برخورد بین ورقه عربی و بلوک ایران است که با روند شمال باختر- جنوب خاور از ترکیه تا تنگه هرمز کشیده شده است (شکل ۱، Takin, 1972; Berberian and King, 1981). فروبار دزفول به عنوان یکی از پهنه‌های این کمربند، در واقع یک حوضه پیش بوم فرونشسته (Depressed Foreland basin) در پای گسل فعال پیشانی کوهستان (Mountain Front Fault: MFF) است



شکل ۱- نقشه ساختاری زاگرس به همراه محدوده مورد مطالعه برگرفته از (Sepehr and Cosgrove, 2004) با کمی تغییر.

جدول ۱- ستبرای متوسط سازندها در ناحیه مورد مطالعه بر اساس داده چاه‌های آجاجاری-۱۴۰، پازنان-۱۷ و پازنان-۲۳.

| ردیف | نام سازند | ستبرای (متر) | ردیف | نام سازند | ستبرای (متر) | ردیف | نام سازند | ستبرای (متر) |
|------|-----------|--------------|------|-----------|--------------|------|-----------|--------------|
| ۱ | آجاجاری | ۸۳۰ | ۵ | پابده | ۲۴۰ | ۹ | کژدمی | ۲۸۵ |
| ۲ | میشان | ۴۷۰ | ۶ | گورپی | ۱۴۵ | ۱۱ | گدوان | ۹۰ |
| ۳ | گچساران | ۴۶۰ | ۷ | ایلام | ۳۵ | ۱۰ | داریان | ۵۰ |
| ۴ | آسماری | ۴۷۰ | ۸ | سروک | ۱۰۶۰ | ۱۲ | فهلپان | ۴۳۰ |



شکل ۲- نقشه زمین شناسی گستره مورد مطالعه و پیرامون آن به همراه برخی از میدان‌های هیدروکربنی پهنه ساختاری دزفول.

۳- روش کار

تحلیل یک چین‌نازمند اندازه‌گیری شاخص‌های هندسی عناصر ساختاری آن (به مانند یال‌ها، سطح محوری، زوایای مرتبط با چین خوردگی و افق‌های جدایشی) است. در منطقه مورد مطالعه به علت حضور و عملکرد افق جدایشی گچساران، استفاده از رخنمون‌های سطحی کمک چندانی به درک وضعیت هندسی و چین خوردگی افق‌های مخزنی آسماری و قدیمی‌تر از آن نمی‌کند و بنابراین از اطلاعات زیرسطحی شامل داده‌های لرزه‌نگاری و چاه‌های موجود استفاده شده است. اگر چه داده‌های زیرسطحی محدودیت‌هایی نیز دارند، ولی بهترین روش موجود برای تشخیص هندسه عمقی تاقدیس‌ها، بهره‌گیری از اطلاعات لرزه‌نگاری بازتابی است.

برای بررسی ویژگی‌های ساختاری و تأثیر چین‌نگاری مکانیکی در هندسه چین خوردگی تاقدیس‌های آغاچاری و پازنان، ابتدا چندین برش لرزهای (Seismic profile) در بخش‌های مختلف این دو تاقدیس با در نظر گرفتن تغییرات جانبی رخساره‌ها و تغییر الگوی چین خوردگی انتخاب شده است. سپس ۵ افق کلیدی شامل پاره سازند ۶ سازند گچساران، آسماری، فهلیان، گوتنیا و احتمالاً راس کنگان که افق‌های کم‌قوام مابین آنها قرار داشتند، انتخاب و تفسیر ساختاری هر برش در حوزه زمان انجام شد. بعد از آن، داده‌های تفسیر شده از حوزه زمان به حوزه عمق تبدیل شدند. سپس ویژگی‌های هندسی چین خوردگی راس سازند آسماری، همراه با ارتباط الگوی آن با تغییرات رخساره و ستبرای واحدهای کم‌قوام (مانند سازند گرو) در هر تاقدیس تحلیل شد. در نهایت مدل مفهومی هندسی تکوین ساختاری

تاقدیس‌های یاد شده با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته در خصوص چین‌نگاری مکانیکی و تغییرات ستبرای لایه‌ها ارائه شده است.

۴- بررسی ویژگی‌های ساختاری تاقدیس‌های آغاچاری و پازنان

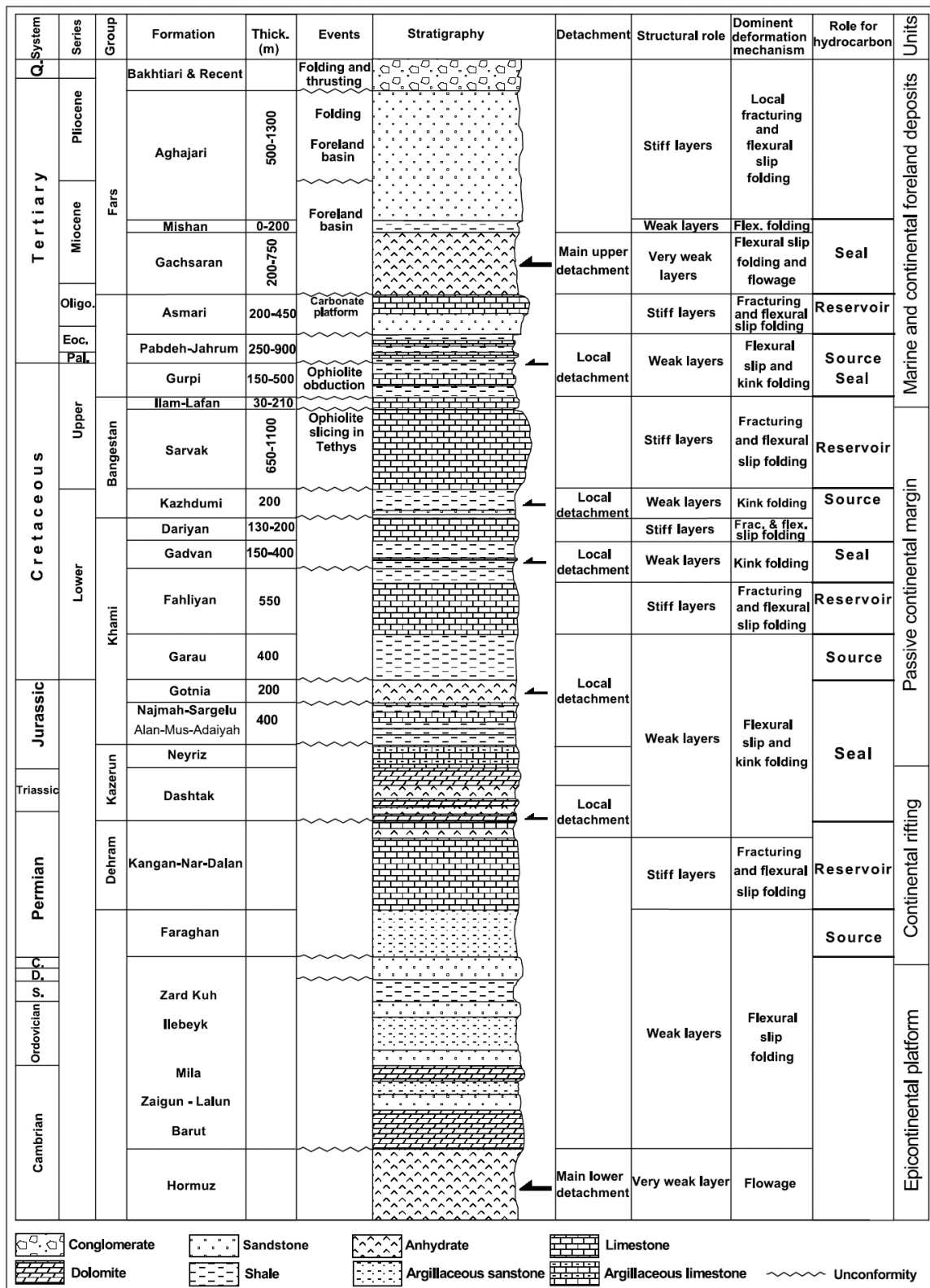
تاکنون حدود ۳۰۰ حلقه چاه اکتشافی و تولید هیدروکربنی بر روی میدان‌های آغاچاری و پازنان حفاری شده است. ژرف‌ترین چاه‌های این دو میدان، آغاچاری-۱۴۰ و پازنان-۱۷ هستند که با هدف ارزیابی گروه خامی به ترتیب تا افق‌های فهلیان و گرو حفاری شده‌اند (شکل ۴). برای پیدا کردن سر سازندها بر روی برش‌های لرزهای، از داده‌های این دو چاه به همراه مارون-۲۲۲ (حفاری شده تا فهلیان) استفاده شده است. موقعیت راس سازند گوتنیا نیز بر پایه اطلاعات چاه‌های حفاری شده در دشت آبادان بوده است.

۴-۱. ویژگی‌های ساختاری بر پایه نقشه عمقی افق آسماری

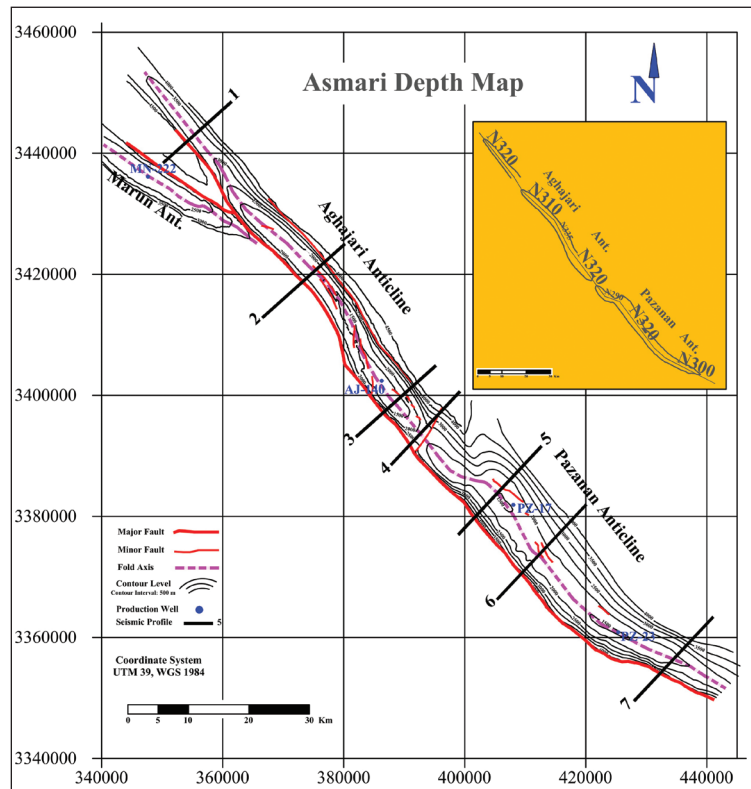
نقشه عمقی یکپارچه‌ی راس سازند آسماری، تغییرات عمده‌ای در ویژگی‌های چین خوردگی این سازند نشان می‌دهد (شکل ۴). میدان گاز میعانی پازنان در افق آسماری، یک تاقدیس نامتقارن و خمیده با سه بستگی (Culmination) جنوب خاوری، مرکزی و شمال باختری است که از سمت شمال باختر با ساختار زینی شکل (Saddle) از تاقدیس نفتی آغاچاری جدا شده است. محور هر دو تاقدیس در افق آسماری دارای روند کلی N300 تا N320 است و در طول هر دو تاقدیس پیشش‌های

می‌رسد. در ظاهر، تاقدیس آغاچاری درازتر از میدان پازنان است و پهنای کمتری نسبت به آن دارد ولی نسبت عددی درازا به پهنای (Aspect ratio) در ژرف‌ترین خط‌هم‌تراز ساختمانی مستقل (Closure) این دو ساختار (۲۰۰۰ متری)، با یکدیگر مساوی و برابر ۱۰/۶ است (جدول ۲). شباهت دیگر آن که هر دو ساختار نامتقارن با گرایش (Vergence) به سمت جنوب باختر بوده و کم ژرف‌ترین خط‌هم‌تراز آنها در لایه چین‌خورده‌ی آسماری تقریباً برابر ۱۵۰۰ متر زیر سطح اساس دریاست.

متعددی دیده می‌شود. روند محور تاقدیس پازنان در افق آسماری در بستگی‌های جنوب خاوری، مرکزی و شمال باختری آن به ترتیب حدود N300 (با تحدب به سمت جنوب باختر)، N320 (با تحدب به سمت شمال خاور) و N320 (به صورت مستقیم) است. در بخش جنوب خاوری تاقدیس آغاچاری، روند N320 حفظ شده است ولی بخش میانی این ساختمان، تحدب به سمت شمال خاور با روند N310 را نشان می‌دهد. در ادامه به سمت شمال باختر، دماغه‌ی تاقدیس آغاچاری با تغییر روند به حدود N320



شکل ۳- ستون چینه‌نگاری مکانیکی و سیستم نفتی فروبار دزفول و دشت آبادان برگرفته از (Abdollahie Fard et al. (2006) با اندکی تغییر.



شکل ۴- نقشه عمقی یکپارچه سرسازند آسماری در میدان‌های پازنان، آغاچاری و بخشی از مارون. خطوط هم‌تراز از سطح اساس دریا با فواصل ۵۰۰ متر هستند. تغییر روند محور آسماری در این ساختارها، در مربع نارنجی نشان داده شده است. برش‌های لرزه‌ای با شماره‌های ۱ تا ۷ به نمایش در آمده است.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های ساختاری دو تاق‌دیس پازنان و آغاچاری بر پایه نقشه عمقی افق آسماری.

| نسبت درازا به پهنا (Aspect Ratio) | پهنای چین (کیلومتر) | درازای محور (کیلومتر) | گرایش | تقارن | ژرف‌ترین خط هم‌تراز (متر، زیر سطح اساس دریا) | کم‌ژرف‌ترین خط هم‌تراز (متر، زیر سطح اساس دریا) | افق آسماری ساختمان |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|------------|----------|--|---|--------------------|
| ۱۰/۶ | ۵/۵ | ۵۸/۵ | جنوب باختر | نامتقارن | ۲۰۰۰ | ۱۵۰۰ | پازنان |
| ۱۰/۶ | ۴/۵ | ۴۸ | جنوب باختر | نامتقارن | ۲۰۰۰ | ۱۵۰۰ | آغاچاری |

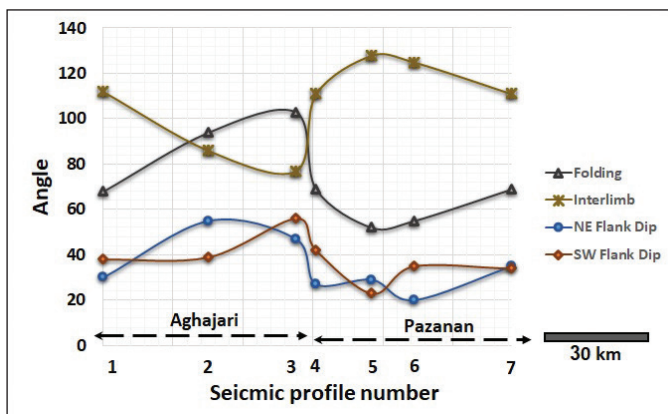
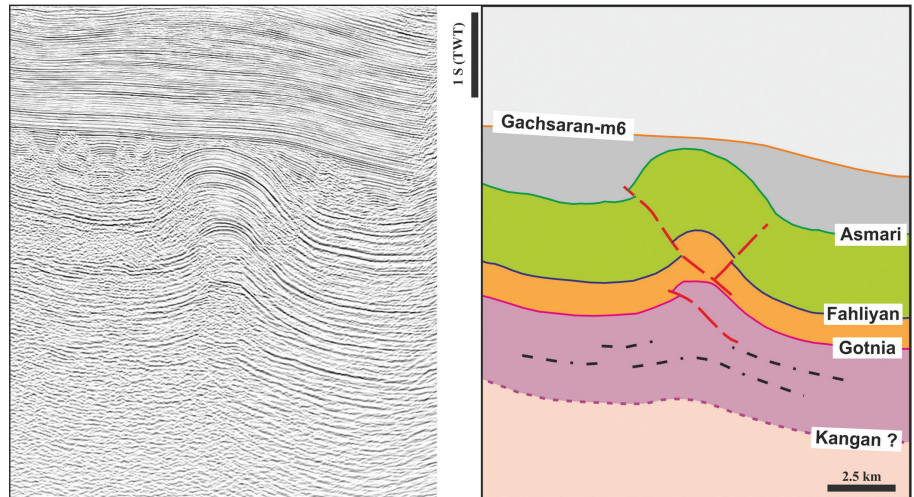
۲-۴. ویژگی‌های ساختاری بر پایه برش‌های لرزه‌ای

— **برش لرزه‌ای شماره ۱:** این برش در انتهای دماغه شمال باختر تاق‌دیس آغاچاری قرار داشته و تفسیر سرسازندهای آن از راس آسماری تا راس دشتک نمایانگر یک چین هماهنگ (Harmonic fold) و نسبتاً نامتقارن است که یال عقبی (Backlimb) آن طویل و یال جلویی (Forelimb) آن کوتاه‌تر است (شکل ۵). در این برش، دامنه چین خوردگی ساختمان آغاچاری از افق آسماری به سمت افق‌های با ژرفای بیشتر (به ترتیب فهلبان، گوتنیا تا احتمالاً کنگان) کاهش محسوسی نشان می‌دهد ولی طول موج چین در افق‌های یاد شده با یکدیگر برابر است. افزون بر این، موقعیت محور چین از راس گوتنیا به افق‌های کم‌ژرف‌تر به طور پیوسته به سمت جنوب باختر جابه‌جا شده و سطح محوری ساختمان نیز به همین سمت گرایش

یافته است. این شواهد، گواهی بر فعال شدن افق‌های جدایشی میانی به مقدار کم هستند.

در این برش، پاره‌سازند ۶ سازند گچساران، یک چین تک‌شیب (Monocline) بدون گسل خوردگی را نشان می‌دهد و مبین آن است که رشد چین در افق‌های آسماری و ژرف‌تر از آن، با جریان‌یافتگی (Flowage) بخش‌های نمکی و کم‌قوام سازند گچساران جبران شده و دگرریختی به افق‌های بالاتر (مانند سازندهای میشان و آغاچاری) منتقل نشده است. این الگوی ساختاری نشان می‌دهد که سازند تبخیری گچساران به عنوان یک افق جدایشی اصلی بالایی در گستره مورد مطالعه عمل کرده است. ویژگی‌های هندسی لایه چین‌خورده آسماری این برش در جدول ۳ و شکل ۶ آورده شده است.

شکل ۵- برش لرزه‌ای شماره ۱ که در آن چین‌خوردگی هماهنگ و نامقارن از آسماری تا راس دشتک در ساختمان آغاجاری دیده می‌شود. دامنه چین از افق آسماری به سمت کنگان کاهش یافته ولی طول موج ثابت است. عملکرد جدایشی بخش تبخیری سازند گچساران نیز مشاهده می‌شود.



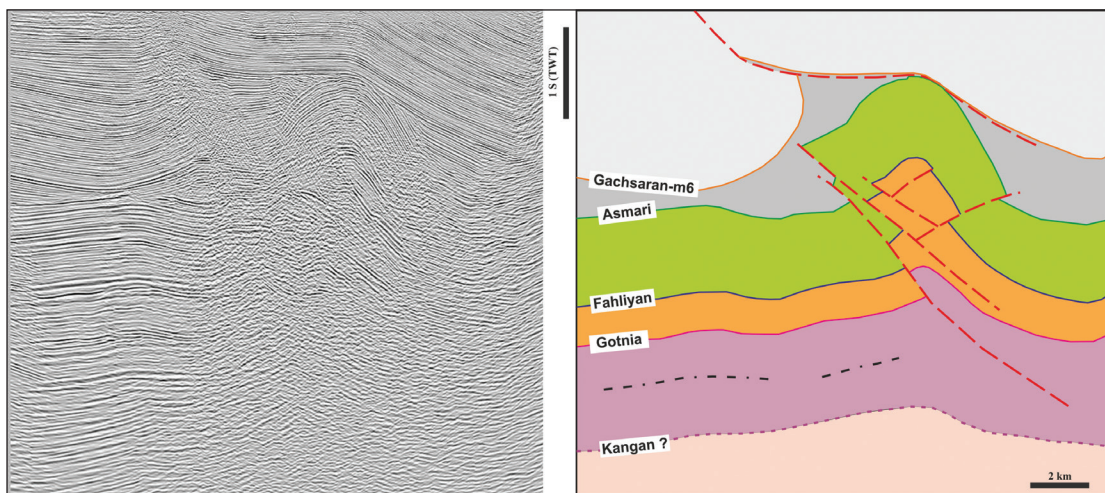
شکل ۶- نمودار تغییرات ویژگی‌های هندسی چین آسماری در تاق‌دیس‌های آغاجاری و پازنان. بازه تغییرات شیب یال شمال‌خاوری هر دو تاق‌دیس (به استثنای برش شماره ۲ که به علت عملکرد پس‌راندگی افزایش ناگهانی دارد) اندک بوده و اغلب از شیب جنوب‌باختری کمتر است. زاویه چین‌خوردگی در تاق‌دیس پازنان به‌طور مشخص کمتر از تاق‌دیس آغاجاری (و حتی دماغه آن در برش ۱) است.

جدول ۳- برخی از ویژگی‌های هندسی چین آسماری در تاق‌دیس‌های پازنان و آغاجاری بر پایه برش‌های لرزه‌ای.

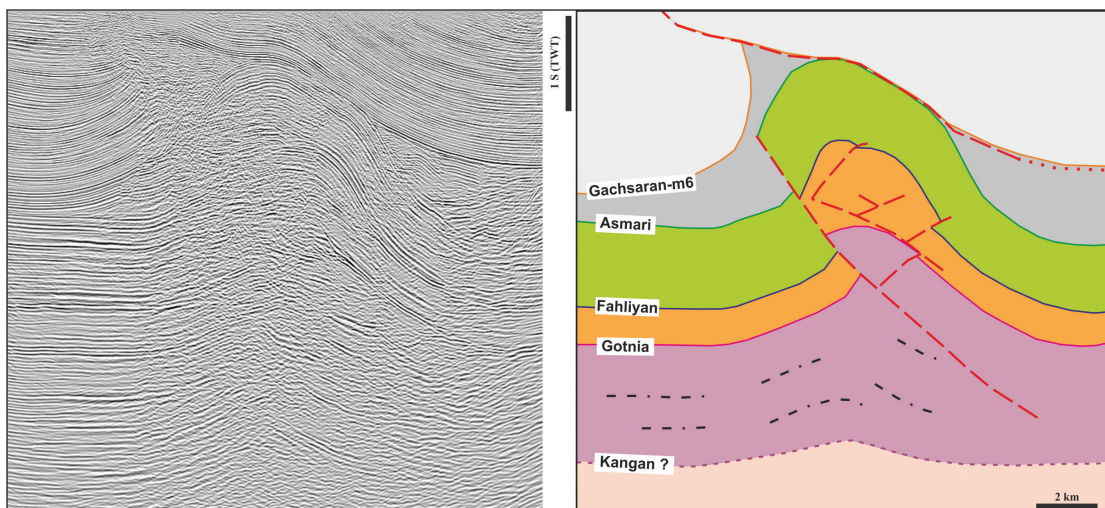
| ردیف | شماره برش / ویژگی هندسی | | | | | | | |
|------|-------------------------|----------------|-----|----------------|-----------------|-----|------------|------------------------------------|
| | ۷ | ۶ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | |
| ۱ | تاق‌دیس پازنان | | | بین دو تاق‌دیس | تاق‌دیس آغاجاری | | | شیب یال شمال‌خاور |
| ۲ | ۳۵ | ۲۱ | ۲۹ | ۲۷ | ۴۷ | ۵۵ | ۳۰ | شیب یال جنوب‌باختر |
| ۳ | ۱۱۱ | ۱۲۵ | ۱۲۸ | ۱۱۱ | ۷۷ | ۸۶ | ۱۱۲ | زاویه بین‌یالی (Interlimb angle) |
| ۴ | ۶۹ | ۵۵ | ۵۲ | ۶۹ | ۱۰۳ | ۹۴ | ۶۸ | زاویه چین‌خوردگی (Folding angle) |
| ۵ | باز (Open) | ملایم (Gentle) | | باز (Open) | | | | نوع چین بر پایه فشردگی (Tightness) |
| ۶ | ۸۷ | ۸۰ | ۸۹ | ۷۹ | ۸۰ | -۸۶ | ۸۶ | زاویه گرایش (Inclination Angle) |
| ۷ | جنوب‌باختر | | | | شمال‌خاور | | جنوب‌باختر | جهت گرایش (Vergence) |

— **برش لرزه‌ای شماره ۲:** این برش در بخش میانی تاقدیس آغاچاری و جایی که شدت دگرریختی پیش‌رونده (Progressive deformation) و پیچیدگی ساختاری بیش از برش پیشین است، انتخاب شده است (شکل ۷). ویژگی‌هایی مانند افزایش تعداد و میزان جابه‌جایی گسل‌ها، شیب پال‌ها، زاویه چین‌خوردگی (Folding angle: ϕ) و دامنه چین (Amplitude) و همچنین تشکیل پس‌راندگی (Back-thrust) نشان از دگرریختی بیشتر این بخش در مقایسه با برش پیشین دارد (جدول ۳ و شکل ۶). در اینجا افزایش کوتاه‌شدگی و در پی آن برش و توسعه گسل‌های راندگی در پال جنوبی سبب اوج‌گیری (Amplification) قله ساختمان و جابه‌جایی کامل لایه‌های کم‌قوام و تبخیری سازند گچساران شده است. در نتیجه، راس آسماری به لایه‌های پُر‌قوام پاره سازند ۶ سازند گچساران جوش خورده (Welded) و با ادامه رشد چین، در لایه‌های جوان‌تر (به مانند میشان و آغاچاری) نیز یک چین تک‌شیب حاصل شده است (شکل ۷). در اینجا نیز تاقدیس آغاچاری یک چین هماهنگ با طول موج ثابت و دامنه کاهش یابنده از افق آسماری به سمت افق‌های با ژرفای بیشتر است. بر

— **برش لرزه‌ای شماره ۳:** این برش در جنوب خاور تاقدیس آغاچاری انتخاب شده است (شکل ۸). شکل چین در این برش، تفاوت‌هایی با برش شماره ۲ دارد. اول این که توسعه پس‌راندگی در افق آسماری دیده نمی‌شود. دوم آن که موقعیت محور چین در افق آسماری به سمت جنوب باختر منتقل شده و سطح محوری چین، زاویه گرایش بیشتری در همین جهت نشان می‌دهد. سوم اینکه رشد چین، اوج‌گیری آن و زاویه چین‌خوردگی بیشتر شده و در نتیجه، محدوده جوش‌خوردگی راس آسماری با واحدهای بالاتر توسعه بیشتری یافته است (جدول ۳ و شکل ۶).



شکل ۷- برش لرزه‌ای شماره ۲ واقع در بخش میانی ساختمان آغاچاری نشان می‌دهد که افزایش دگرریختی با مواردی چون افزایش تعداد و میزان جابه‌جایی گسل‌ها، از یاد میزان فشردگی و دامنه چین و همچنین تشکیل پس‌راندگی همراه بوده است. همچنان چین‌خوردگی هماهنگ با طول موج برابر ولی با دامنه کاهش یابنده از افق آسماری به سمت راس کنگان دیده می‌شود.



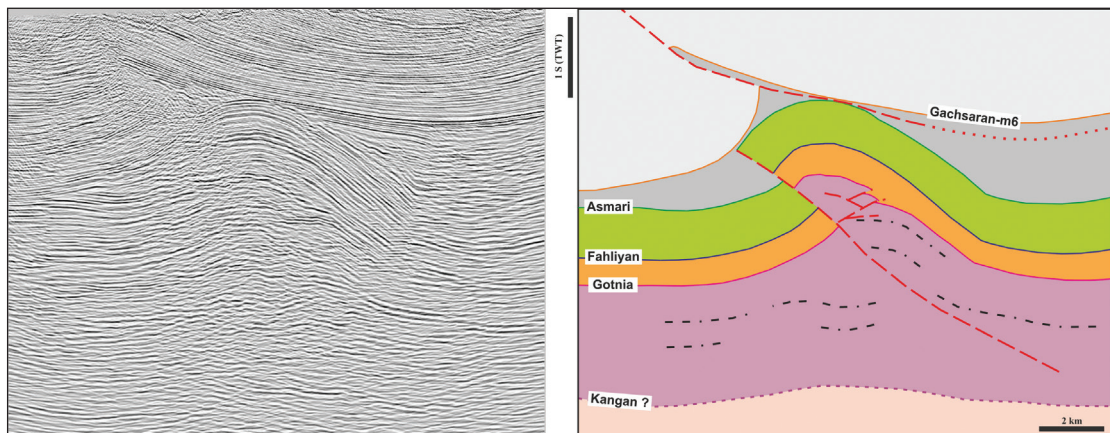
شکل ۸- برش لرزه‌ای شماره ۳ در جنوب خاور ساختمان آغاچاری که در آن بر خلاف برش شماره ۲، توسعه پس‌راندگی در افق آسماری دیده نمی‌شود، موقعیت محور چین در افق آسماری و قدیمی‌تر از آن به سمت جنوب باختر منتقل شده و رشد و اوج‌گیری چین افزایش یافته است.

ثابت است. افزون بر این، محور چین توسعه یافته در سازندهای جوان تر از پاره‌سازند ۶ گچساران، ارتفاع بیشتری داشته ولی جابه‌جایی کمتری نسبت به برش ۴ به سمت جنوب باختر نشان می‌دهد. کاهش شیب یال‌ها و زاویه چین‌خوردگی در افق آسماری نیز به وضوح دیده می‌شوند (جدول ۳ و شکل ۶).

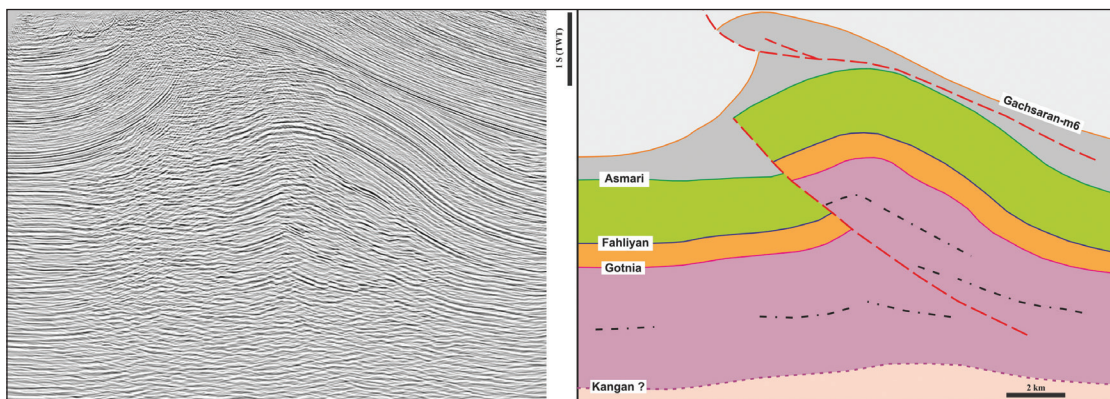
– **برش لرزه‌ای شماره ۷:** در این برش که در بستگی مستقل جنوب خاور تاقدیس پازنان قرار دارد، اگر چه موقعیت عمقی قله تاقدیس پازنان در افق آسماری نسبت به برش‌های ۵ و ۶ تقریباً یکسان است، ولی پهنای آن کاهش چشمگیری نشان می‌دهد (شکل ۱۲). در اینجا نیز طول موج چین‌ها در افق آسماری و قدیمی‌تر از آن تقریباً برابر هستند ولی دامنه چین در افق آسماری بیشتر از دامنه آن در افق گوتنیاست. بر خلاف برش‌های لرزه‌ای ۵ و ۶، در اینجا افزایش ستبرای لایه کم‌قوام گرو در هسته تاقدیس مشاهده می‌شود.

– **برش لرزه‌ای شماره ۴:** موقعیت این برش بین دو تاقدیس آغاچاری و پازنان قرار دارد (شکل ۹). اگر چه فاصله این برش از برش شماره ۳ نسبتاً کم بوده و سبک چین‌خوردگی نیز تغییر عمده‌ای نکرده است، ولی کاهش اوج‌گیری و زاویه چین‌خوردگی در افق آسماری کاملاً مشخص است (جدول ۳ و شکل ۶). افزون بر این، ستبرای لایه‌ها از راس آسماری تا راس گوتنیا کاهش عمده‌ای نسبت به برش شماره ۳ نشان می‌دهد.

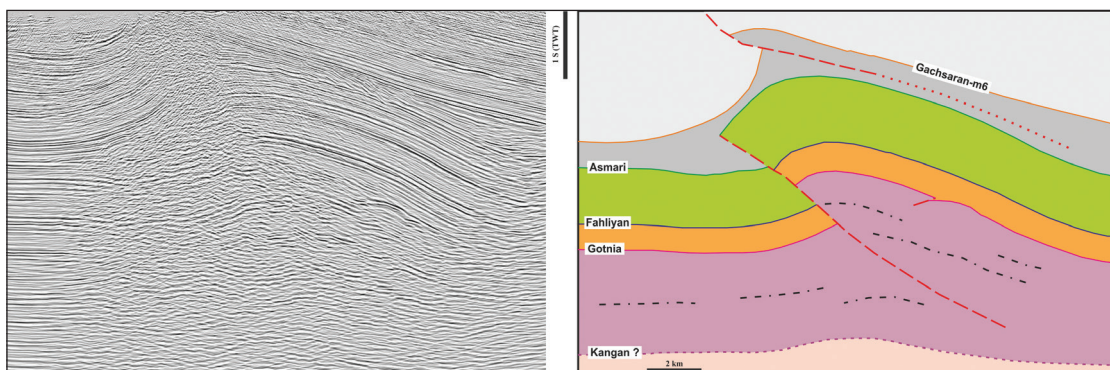
– **برش‌های لرزه‌ای شماره ۵ و ۶:** این برش‌ها به ترتیب در شمال باختر و بخش میانی تاقدیس پازنان واقع شده‌اند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). در این برش‌ها، تاقدیس پازنان یک چین ملایم (Gentle) با پهنای بیشتر و زاویه چین‌خوردگی کمتر نسبت به تاقدیس آغاچاری است (جدول ۳). در این برش‌ها نیز به مانند برش لرزه‌ای شماره ۴ (شکل ۹)، ستبرای لایه‌ها از راس آسماری تا راس گوتنیا در عرض مقطع چین تقریباً



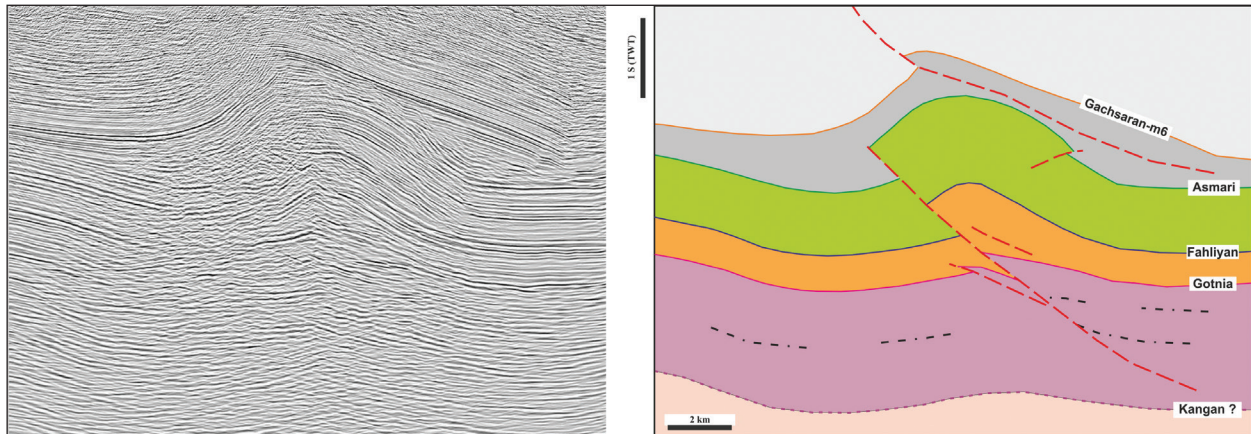
شکل ۹- برش لرزه‌ای شماره ۴ بین دو تاقدیس پازنان و آغاچاری. ستبرای لایه‌ها از راس فاهلیان تا راس آسماری کاهش محسوسی نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- برش لرزه‌ای شماره ۵ در شمال باختر تاقدیس پازنان که در آن این تاقدیس یک چین ملایم با فشرده‌گی کمتر نسبت به تاقدیس آغاچاری است. ستبرای سازندها نیز از راس آسماری تا راس گوتنیا در تمام طول مقطع تقریباً ثابت هستند.



شکل ۱۱- برش لرزه‌ای شماره ۶ در بخش میانی تاقدیس پازنان که در آن نیز این تاقدیس یک چین ملایم با منطقه لولای مدور و نامتقارن است و فشرده‌گی کمتری نسبت به تاقدیس آغاچاری نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- برش لرزه‌ای شماره ۷ در جنوب خاور تاقدیس پازنان قرار دارد که موقعیت آن در شکل ۴ مشخص است. تاقدیس پازنان در این برش نیز یک چین ملایم با منطقه لولای مدور و نامتقارن است که فشرده‌گی کمتری نسبت به تاقدیس آجاجاری دارد.

۵- بحث

۵-۱- تأثیر چینه‌نگاری ژوراسیک میانی - کرتاسه زیرین بر هندسه چین خوردگی

Setudehnia (1978) با ترسیم سه برش رسوبی از زاگرس در جهت شمال باختر- جنوب خاور (که یکی از آنها از مجاور گستره مورد مطالعه عبور می‌کند) نشان داد که پهنه انتقالی بیشتر سازندها در زمان ژوراسیک و کرتاسه زیرین در جایی بین دو پهنه گسلی ایذه و کازرون قرار دارد (شکل ۱۳). (2001) Sepehr پهنه حد فاصل دو گسل کازرون و ایذه را به نام پهنه کازرون- ایذه (Kazerun-Izeh zone) نامید، جایی که تغییر رخساره ژوراسیک میانی، از پلتفرم کربناته سازنده سورمه (نواحی فارس و بخش خاوری فروبار دزفول) به سازندهای تبحیری و کم‌قوام عدایه و علن و شیلی سرگلو (در باختر فروبار دزفول) صورت گرفته است (Sepehr and Cosgrove, 2004). در ژوراسیک بالایی، سازندهای تبحیری هیث و گوتیا به ترتیب در بخش‌های خاوری و باختری پهنه انتقالی یاد شده، نهشته شده‌اند. در زمان کرتاسه پائینی، در خاور و باختر این پهنه انتقالی، به ترتیب آهک‌های پُرقوام فهلیان و شیل‌های کم‌قوام گرو به همراه آهک فهلیان رسوب گذاری کرده است. با این توصیف، تغییرات چینه‌نگاری مکانیکی گسترده‌ای در زمان ژوراسیک میانی تا کرتاسه زیرین در پهنه دزفول وجود داشته است.

جدول ۳ و شکل ۶ تغییرات عمده شکل چین آسماری در تاقدیس‌های گستره مورد مطالعه را به وضوح نشان می‌دهند. بر پایه تفسیر برش‌های لرزه‌ای، به نظر می‌رسد که این تغییرات حاصل تفاوت ویژگی‌های مکانیکی لایه‌های موجود در هر دو ساختمان باشد. در ساختمان آجاجاری، عملکرد سازندهای کم‌قوام تبحیری دشتک و سری ژوراسیک و به خصوص شیلی گرو به عنوان سطوح جدایشی میانی بر شکل چین خوردگی افق‌ها کاملاً مشخص است (شکل‌های ۵، ۷ و ۸). فعالیت قابل توجه سازندهای کم‌قوام گرو، سبب اوج‌گیری چین آسماری (و برخورد راس آن به پاره‌سازنده ۶ سازندها گچساران) و پُر شیب شدن یال‌ها در افق‌های آسماری تا فهلیان شده است (شکل‌های ۶، ۷ و ۸). در مقابل، شکل چین افق آسماری در بخش‌های میانی و شمال باختری ساختمان پازنان ملایم بوده و هندسه مشابه ساختمان آجاجاری را نشان نمی‌دهد (شکل‌های ۶ و ۹ تا ۱۱) که این موضوع گویای آن است که سازندهای ژوراسیک و گرو در این بخش‌های ساختمان پازنان فعال نشده‌اند. ولی به سمت جنوب خاور، ظاهراً سازندها گرو دوباره فعال شده است (شکل ۱۲)، اگر چه میزان فعالیت آن به اندازه ساختمان آجاجاری نیست. افزون بر این، شواهد هندسی نشان می‌دهند که سازندها دشتک در سراسر ساختمان پازنان فعال بوده است (شکل‌های ۹ تا ۱۲).

ستون چینه‌نگاری و نمودارهای درون چاهی اشعه گامای تصحیح شده (Corrected Gama ray) و سرعت موج P (Sonic log) برداشت شده از چاه‌های اکتشافی گستره‌ی مورد مطالعه که حداقل تا بخش‌هایی از سازندها گرو حفاری شده‌اند (پازنان-۱۷، خويز-۱ و بنگستان-۱)، تغییرات عمده در سنگ‌شناسی سازندها گرو (از شیل تا شیل آهکی / آهک شیلی) را تأیید می‌کنند (شکل ۱۴). نمودار اشعه گامای تصحیح‌شده، میزان کانی‌های شیلی را در یک واحد سنگی نشان می‌دهد و بنابراین به‌طور غیر مستقیم می‌توان به قوام آن واحد پی‌برد. به عنوان نمونه با استفاده از این نمودارها، آهک‌های آب‌های کم‌ژرف (محیط پلتفرمی که محتوای شیل کمی دارند) به خوبی از آهک‌های شیلی محیط‌های ژرف‌تر و یا شیل‌ها قابل تفکیک هستند (اگر چه دانسته‌های زمین‌شناختی درباره حوضه رسوبی، نقش کلیدی در تفسیر این نمودارها دارد). در چاه‌های پازنان-۱۷ و بنگستان-۱، نمودار اشعه گاما، درصد شیل کمی را نسبت به چاه خويز-۱ که در آن میزان شیل سازندها گرو بسیار بیشتر است، نشان می‌دهد. به این ترتیب می‌توان عنوان نمود که محیط رسوبی سازندها گرو در محل این چاه‌ها، نسبت به خويز-۱ کم‌ژرف‌تر بوده و این سازندها ویژگی مکانیکی به نسبت کمتری برای عمل نمودن به عنوان افق جدایشی در این چاه‌ها دارد. نقشه محیط نهشتگی (Depositional environment) سازندها گرو در کرتاسه زیرین نیز نشان می‌دهد که محدوده مورد مطالعه در مرز تغییرات رخساره همی‌پلاژیک (سمت خاور) و پلاژیک (سمت باختر) قرار دارد (Bordenave and Huc, 1995; Kobraei et al., 2017). بنابراین، بر پایه شواهد ساختاری عملکرد گرو به عنوان سطح جدایشی در برش‌های لرزه‌ای و همچنین ستون چینه‌شناسی آن در چاه‌های یاد شده، به نظر می‌رسد که ویژگی چینه‌نگاری مکانیکی این سازندها و سازندهای ژوراسیک در بخش‌های میانی و شمال باختری تاقدیس پازنان (بر خلاف تاقدیس آجاجاری) به گونه‌ای نبوده است که به عنوان سطوح جدایشی عمل کنند. در اینجا پیشنهاد می‌شود تا مرز تغییرات در حوضه رسوبی ژوراسیک میانی - کرتاسه زیرین، از محدوده‌ی بین ساختمان‌های پازنان و آجاجاری عبور داده شود (شکل ۱۵).

افزون بر این، سبب راس فهلیان تا راس آسماری در محدوده بین ساختمان‌های پازنان و آجاجاری کاهش چشمگیری نسبت به سایر برش‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد (شکل ۹). این محدوده، جایی است که پهنه گسلی ایذه- هندیمان با روند شمالی- جنوبی از آن عبور می‌کند (شکل ۱). ساختارهای با جهت شمالی- جنوبی در عربستان به زمان پالئوژئوئیک نسبت داده شده‌اند که در آن زمان به شکل گسل‌های عادی فعال بوده‌اند (Edgell, 1996). برخی از پژوهشگران معتقدند که این گسل‌های

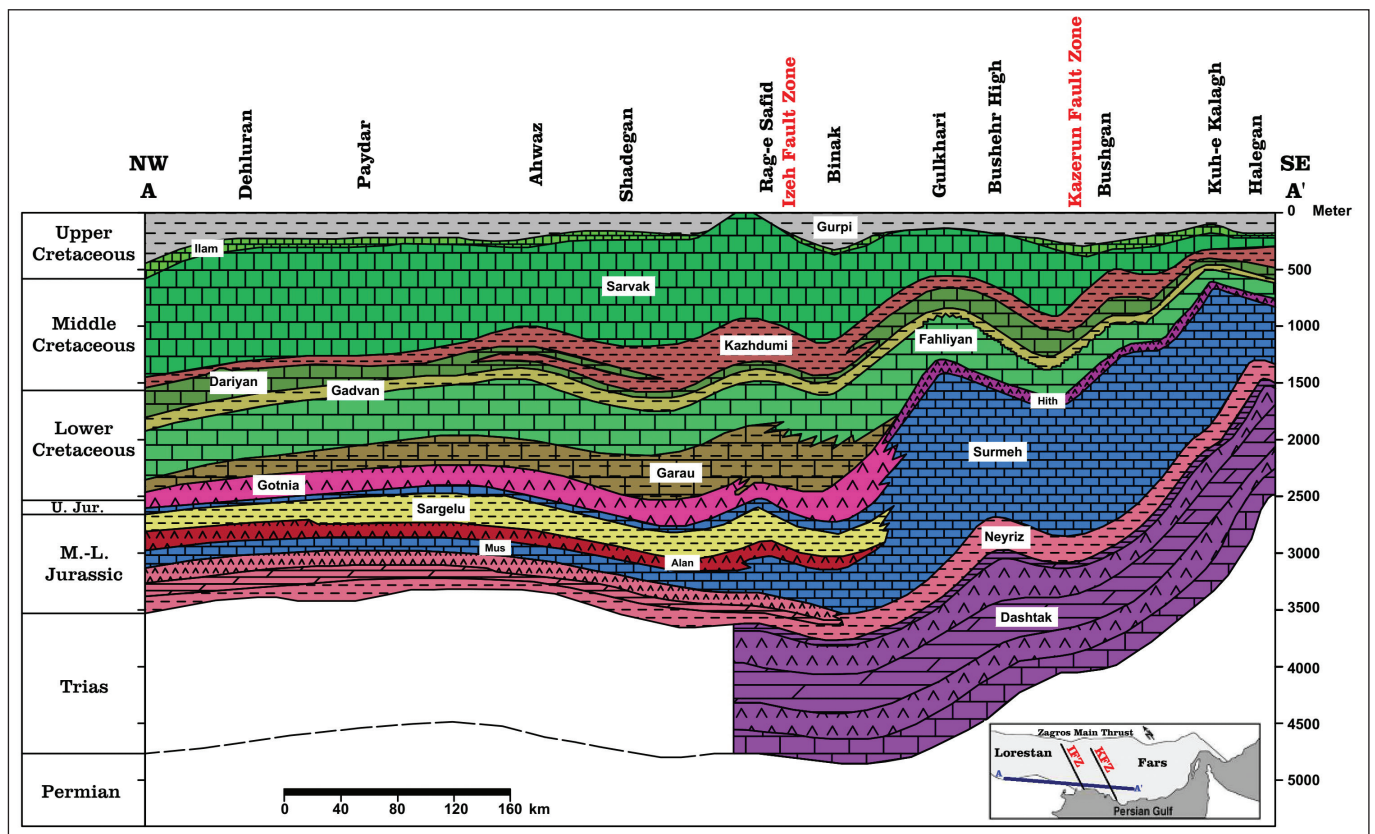
آسماری) به صورت واحد شکل گرفته و سپس با افزایش میزان دگرریختی، به تدریج افق‌های کم‌قوام میانی فعال شده‌اند. گسل‌های راندگی و پس‌راندگی از سطوح جدایشی کم‌قوام میانی رشد کرده‌اند و با توسعه هر چه بیشتر آنها، سازندهای گوتنیا تا آسماری پُریده شده‌اند تا در نهایت سبک چین‌خوردگی هر دو تاقدیس به جدایشی گسل‌خورده نامتقارن (Asymmetric Faulted Detachment Fold, Mitra, 2002) تبدیل شود. در ساختمان آغاچاری، با فعالیت شدید سازند کم‌قوام شیلی گرو، علاوه بر افزایش ستبرای در هسته تاقدیس و توسعه گسل‌های راندگی و پس‌راندگی متعدد، پرشیب شدن لایه‌های فلهلیان در مرکز تاقدیس روی داده است. به نظر می‌رسد که دلیل ستبرای غیرطبیعی سازند فلهلیان در چاه آغاچاری-۱۴۰ که به جای حدود ۴۰۰ متر پیش‌بینی، ۱۵۰۰ متر حفاری شد، نیز همین باشد (شکل ۱۴). نتایج نمودار شیب‌سنجی (Dip Metering) لایه‌های نامبرده در چاه یاد شده این موضوع را تأیید می‌کند.

مقابل، شکل چین افق آسماری ساختمان پازنان تفاوت فاحشی با نظیر خود در ساختمان آغاچاری دارد. مقایسه برش‌های لرزه‌ای ۴ تا ۶ (شکل‌های ۹ تا ۱۱) گویای آن است که اولاً ستبرای سازند گرو در تمام طول یک برش لرزه‌ای تقریباً ثابت بوده و این به معنای فعال نشدن این سازند در شکل یک لایه جدایشی است. ثانیاً بخش‌های بین راس دشتک تا گوتنیا (که معادل سری ژوراسیک هستند)، الگوی چین‌خوردگی مشابهی با رأس گوتنیا از خود نشان می‌دهند. این موضوع نیز گواهی بر فعال نشدن این لایه‌ها به عنوان افق‌های جدایشی در حین چین‌خوردگی است. بنابراین، تنها افق جدایشی میانی و کم‌قوام فعال در ساختمان پازنان، افق دشتک بوده است.

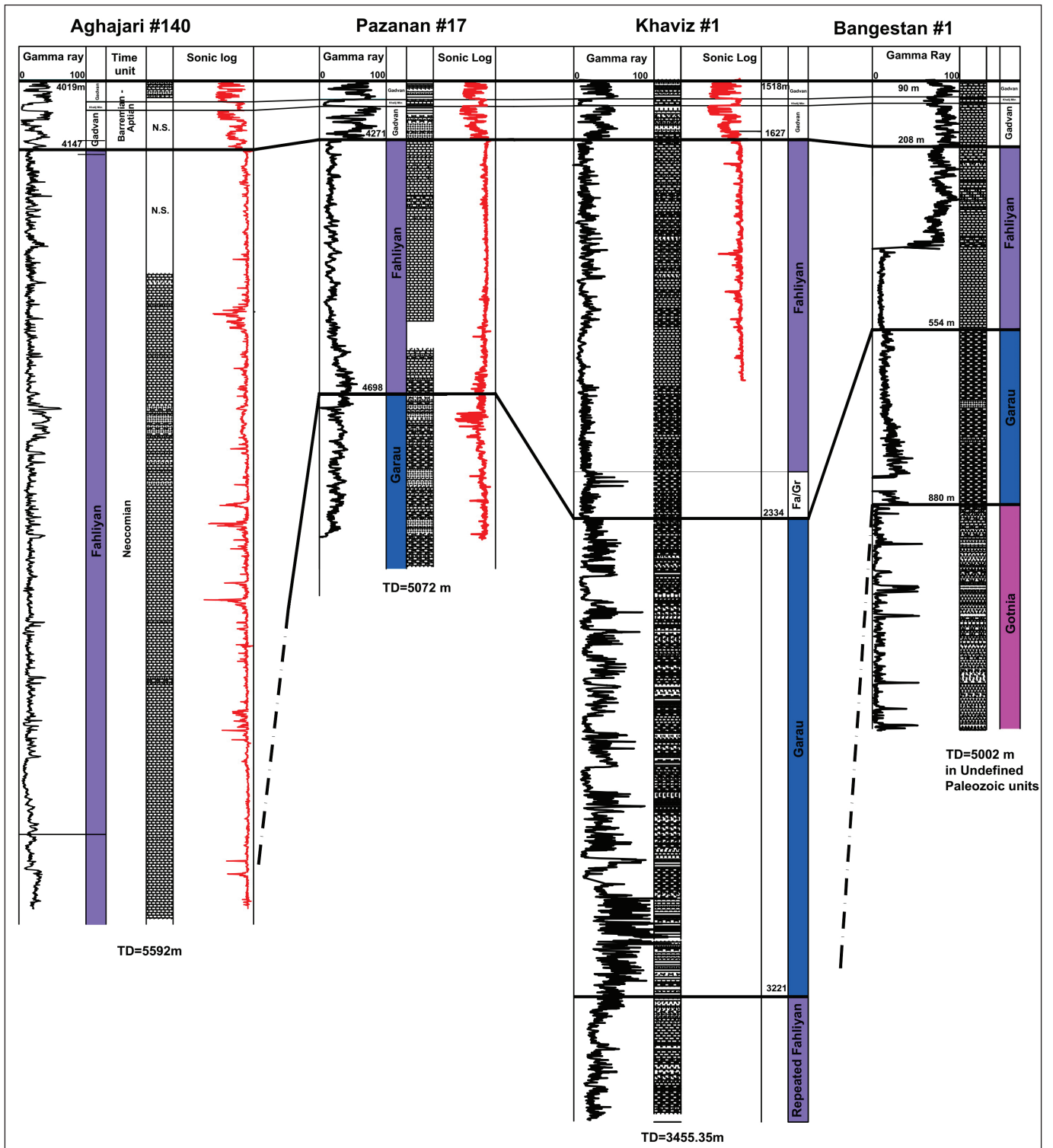
پی‌سنگی (از جمله گسل ایذه-هندیجان در گستره مورد مطالعه) در طی مزوزوئیک و به طور خاص در زمان تریاس و اواخر کرتاسه به صورت بالاآمدگی فعال شده‌اند (Edgell, 1992; Sherhati and Letouzey, 2004; Aqrabi et al., 2010). نقشه هم‌ضخامت کرتاسه میانی زاگرس نیز نشان می‌دهد که پهنه گسلی ایذه-هندیجان در این زمان فعال بوده و سبب تغییرات ضخامتی قابل توجهی شده است (شکل ۱۶، Sepehr and Cosgrove, 2004). بنابراین، دلیل کاهش ستبرای راس فلهلیان تا راس آسماری در محدوده بین دو تاقدیس آغاچاری و پازنان، به فعالیت بلندای قدیمی (Paleo-high; T'Hart, 1970) ایذه-هندیجان نسبت داده می‌شود. افزون بر این، با توجه به فعال شدن سازند گرو در بخش جنوب خاوری تاقدیس پازنان (شکل ۱۲، خاور بلندای قدیمی یاد شده)، به نظر می‌رسد که رخساره این سازند عمیق‌تر شده است و بنابراین پیشنهاد می‌شود که فعالیت بلندای قدیمی به زمان رسوب‌گذاری سازند گرو (کرتاسه‌زیرین) نیز نسبت داده شود.

۲-۵. سبک چین‌خوردگی و مدل مفهومی هندسی تکوین تاقدیس‌های آغاچاری و پازنان

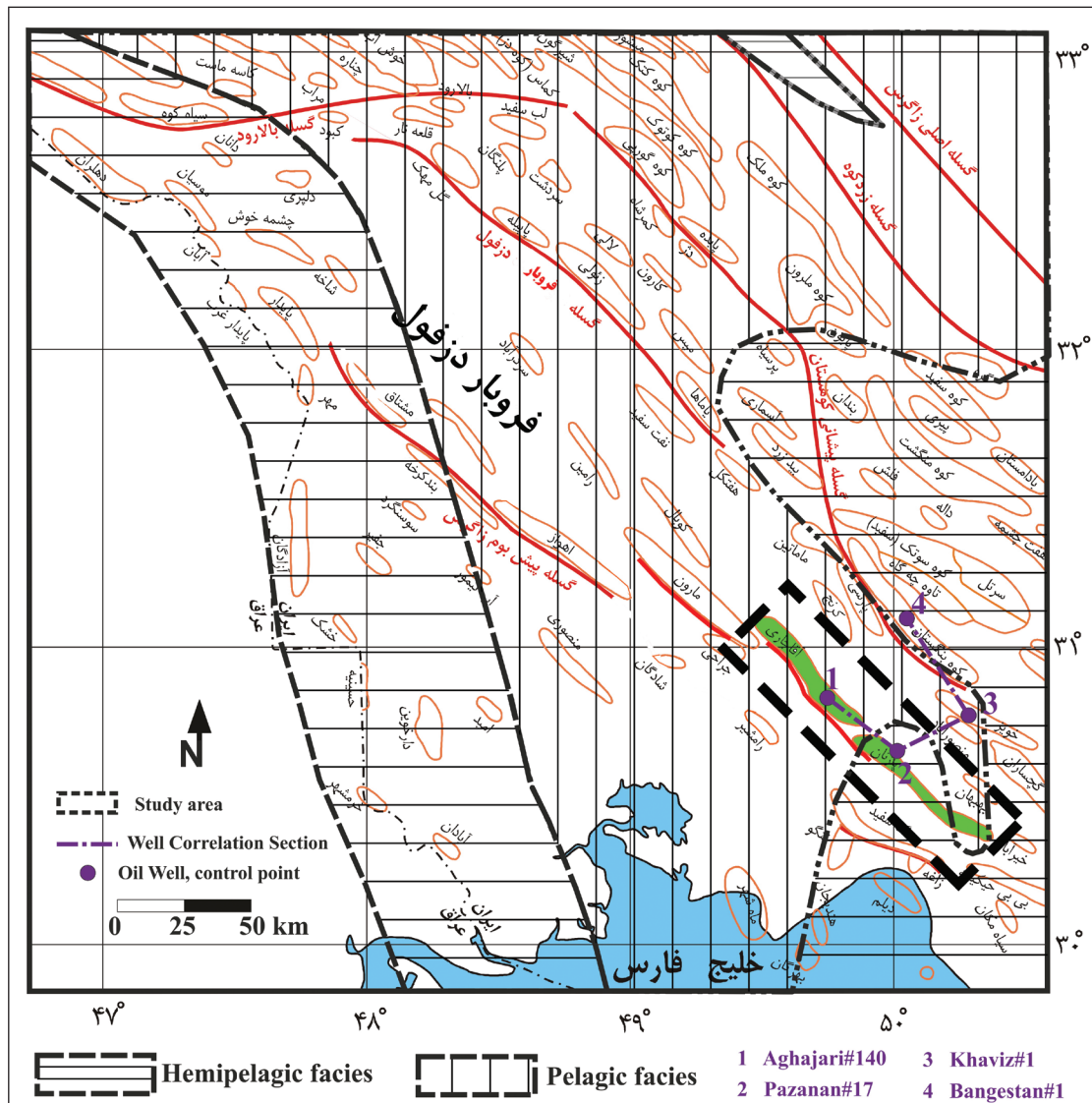
تفسیر برش‌های لرزه‌ای نشان دادند که صرف‌نظر از اثر عملکرد افق‌های جدایشی میانی، طول موج و شکل چین از افق‌های کنگان تا آسماری کم و بیش مشابه است. بنابراین، چین‌خوردگی اولیه (حداقل از افق کنگان تا آسماری) به صورت هماهنگ (Harmonic) و نامتقارن (Asymmetric) روی داده و سبک چین‌خوردگی در آغاز از نوع جدایشی نامتقارن (Asymmetric Detachment Fold, Mitra, 2002) بوده است. به‌طور دقیق‌تر، در ابتدا یک چین جدایشی در تمامی افق‌ها (حداقل کنگان تا



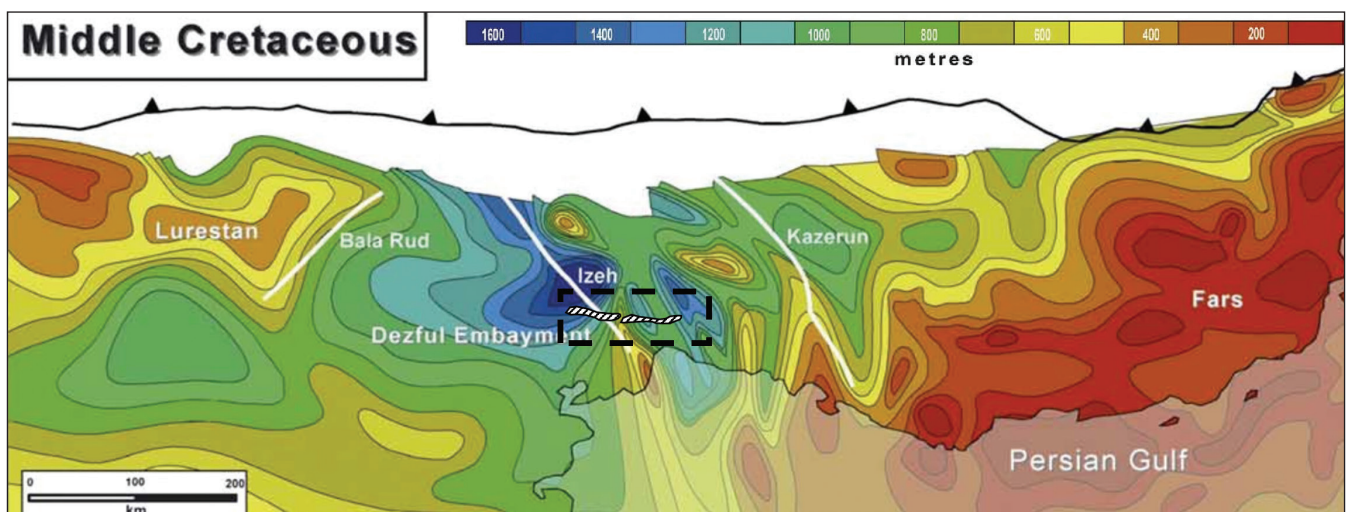
شکل ۱۳- برش رسوبی از تغییرات چینه‌شناختی سازندها از فروبار دزفول تا فارس. عمده تغییرات رخساره سازندهای ژوراسیک میانی تا کرتاسه پایینی در جایی بین دو زون گسلی ایذه و کازرون قرار دارد برگرفته از (Setudehnia (1978) با اندکی تغییر.



شکل ۱۴- ستون چینه‌نگاری (از رأس سازند گدوان به پایین) و نمودارهای گامای تصحیح شده (مشکی) و سونیک (قرمز) چاه‌های آغاچاری-۱۴۰، پازنان-۱۷، خویز-۱ و بنگستان-۱. نمودار گامای چاه‌های پازنان-۱۷ و بنگستان-۱ محتوای شیلی سازند گرو را پایین نشان می‌دهند و که گاه‌آ نزدیک به مقادیر سازند فهلیان است. در این چاه‌ها، سازند گرو (با سنگ‌شناسی غالب شیل آهکی/آهک شیلی) به لحاظ چینه‌نگاری مکانیکی قابلیت فعالیت به عنوان سطح جدایشی را نداشته است. در مقابل، محتوای شیل سازند گرو در چاه خویز-۱ بسیار بیشتر است. برای موقعیت چاه‌ها به شکل ۱۵ مراجعه شود.



شکل ۱۵- نقشه محیط نهشتگی سازند گرو (بر پایه Bordenave and Huc (1995) و Kobraei et al. (2017) با اصلاح در گستره مورد مطالعه) و موقعیت برش تطابقی شکل ۱۴. پیچش مرز تغییرات رخساره گرو در جنوب‌خاور تاقدیس پازنان بر پایه فعالیت آن در شکل ۱۲ به دست آمده است. بنابراین، رخساره سازند گرو (به سن کرتاسه‌زیرین) در ساختمان پازنان با فعالیت بلندای ایذه-هندیجان نیز کنترل شده است.



شکل ۱۶- نقشه هم‌ضخامت رسوبات کرتاسه میانی در کمربند چین-راندگی زاگرس که حاکی از فعالیت زون گسلی ایذه در این زمان است برگرفته از Sephr and Cosgrove (2004). تاقدیس‌های مورد مطالعه در داخل مستطیل خط‌چین قرار دارند.

یک چین جدایشی هماهنگ و نامتقارن توسعه یافته است. مراحل دگرریختی از این مرحله به بعد، در هر یک از تاقدیس‌های نامبرده متفاوت است. در ساختمان آغاچاری، افزایش دگرریختی منجر به فعال شدن واحدهای کم‌قوام دشتک، سری تبخیری ژوراسیک و گرو همراه با ایجاد گسل‌های اصلی به ویژه در یال جنوب باختری ساختمان شده است. با ادامه دگرریختی پیش‌رونده، بر فعالیت لایه کم‌قوام شیلی گرو افزوده شده و گسل‌های راندگی و پس‌راندگی جابه‌جایی و توسعه بیشتری یافته‌اند. در نهایت، با اوج‌گیری واحدهای پرقوام آسماری تا فهلپان، واحدهای جوان‌تر میشان و آغاچاری نیز از چین‌خوردگی سازند آسماری به‌طور مستقیم متأثر می‌شوند (شکل ۱۷-الف - ۱ تا الف-۴). در مقایسه، افزایش دگرریختی در ساختمان پازنان تنها با فعالیت واحد کم‌قوام دشتک به عنوان افق جدایشی و توسعه و برش گسل‌ها (با تمرکز بر یال جنوب باختر چین) انجام شده است (شکل‌های ۱۷-ب - ۱ تا ب-۴).

مقایسه ویژگی‌های هندسی افق آسماری در برش‌های لرزه‌ای و مرحله نهایی مدل‌های مفهومی هندسی (شکل‌های ۱۷-الف - ۴ و ۱۷-ب - ۴) نشان می‌دهند که این مدل‌ها از اعتبار قابل قبولی برخوردارند (جدول ۴ و شکل ۱۸). در برش‌های لرزه‌ای موجود، بیشترین میزان کوتاه‌شدگی افق آسماری در ساختمان آغاچاری و پازنان به ترتیب ۱۳ و ۲۸ درصد محاسبه شده است.

افزون بر این موارد، برش لرزه‌ای ۱ (شکل ۵) به وضوح نشان می‌دهد که بخش‌های تبخیری و کم‌قوام سازند گچساران (قدیمی‌تر از پاره‌سازند ۶)، نقش افق جدایشی اصلی بالایی را از مراحل آغازین چین‌خوردگی ایفا نموده‌اند. چرا که طول موج، دامنه چین و همچنین توسعه گسل راندگی در افق‌های میشان و آغاچاری کاملاً متفاوت با افق‌های آسماری و قدیمی‌تر است. به نظر می‌رسد که دگرریختی پیش‌رونده و رشد و ارتفاع‌گیری پیوسته چین در افق آسماری، در ابتدا تنها با جریان‌یافتگی بخش‌های نمکی و کم‌قوام سازند گچساران به اطراف قله آسماری جبران شده است و در نهایت با افزایش ارتفاع قله آسماری، حالت جوش‌خوردگی (Welding) بین واحد آسماری و پاره‌سازند ۶ گچساران روی داده است. در این حالت شاهد انتقال دگرریختی به واحدهای جوان‌تر رویی بوده به‌طوری که الگوی چین‌خوردگی لایه‌های زیرین بر هندسه‌ی چین در لایه‌های سازند آغاچاری تحمیل شده است. این وضعیت تنها در برش‌های لرزه‌ای ۲ و ۳ (شکل‌های ۷ و ۸) دیده می‌شود که در آنها سازند شیلی گرو به عنوان یک لایه جدایشی به شدت فعال شده است.

در اینجا، دو مدل مفهومی هندسی از نحوه تکوین ساختاری دو تاقدیس آغاچاری و پازنان ارائه شده است تا در قالب آنها، نقش افق‌های کم‌قوام منطقه در کنترل هندسه نهایی این ساختارها نمایان‌تر گردد (شکل ۱۷). در هر دو مدل، در ابتدا لایه‌ها با شیب ناحیه‌ای فروبار دزفول قرار داشته‌اند و با شروع دگرریختی،

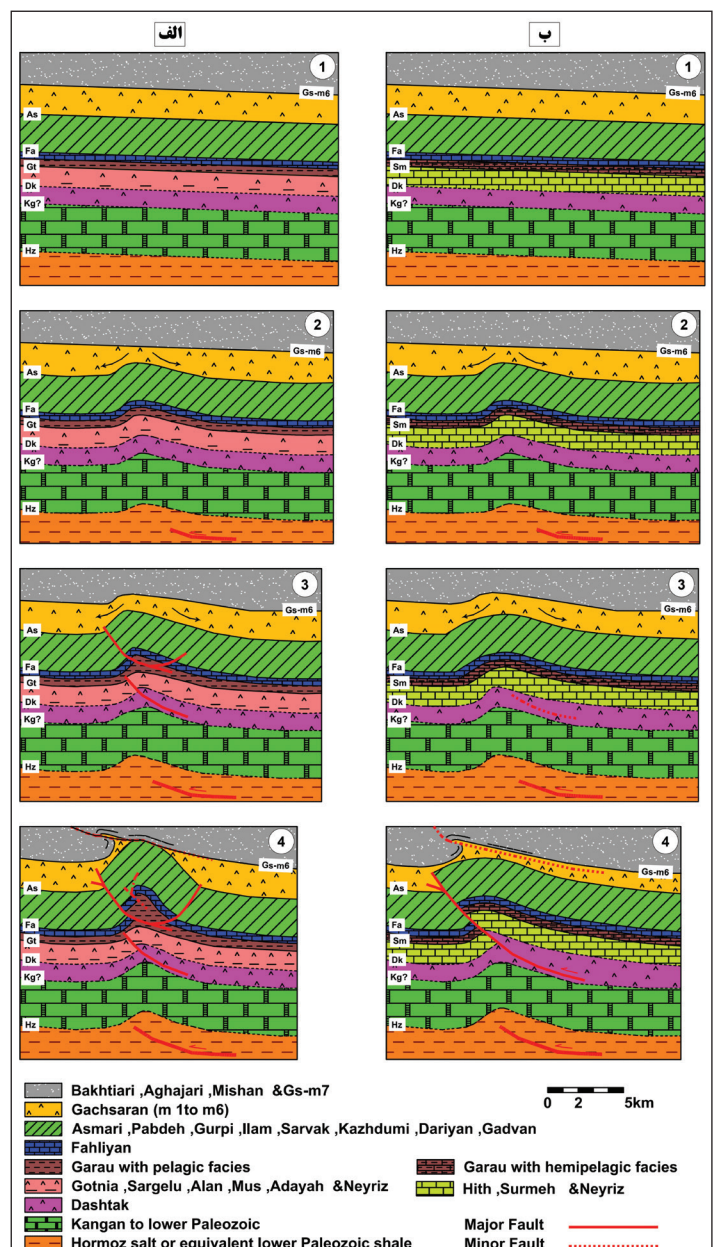
شکل ۱۷- مدل مفهومی هندسی مراحل چین‌خوردگی و تکوین ساختاری.

مدل (الف) برای تاقدیس آغاچاری

- ۱) لایه‌ها پیش از آغاز چین‌خوردگی زاگرس همراه با شیب ناحیه‌ای فروبار دزفول.
- ۲) ایجاد چین جدایشی اولیه به صورت هماهنگ و نامتقارن بر روی افق‌های جدایشی پالنوزوئیک زیرین و جریان‌یافتگی بخش‌های کم‌قوام گچساران.
- ۳) فعال شدن واحدهای کم‌قوام دشتک، سری ژوراسیک و گرو همراه با ایجاد گسل‌های اصلی به ویژه در یال جنوب‌باختری ساختمان.
- ۴) فعالیت بیشتر لایه کم‌قوام شیلی گرو و توسعه و جابه‌جایی زیادتر گسل‌های راندگی و پس‌راندگی همراه با اوج‌گیری واحدهای پرقوام آسماری تا فهلپان و تأثیر بر دگرریختی واحدهای جوان‌تر.

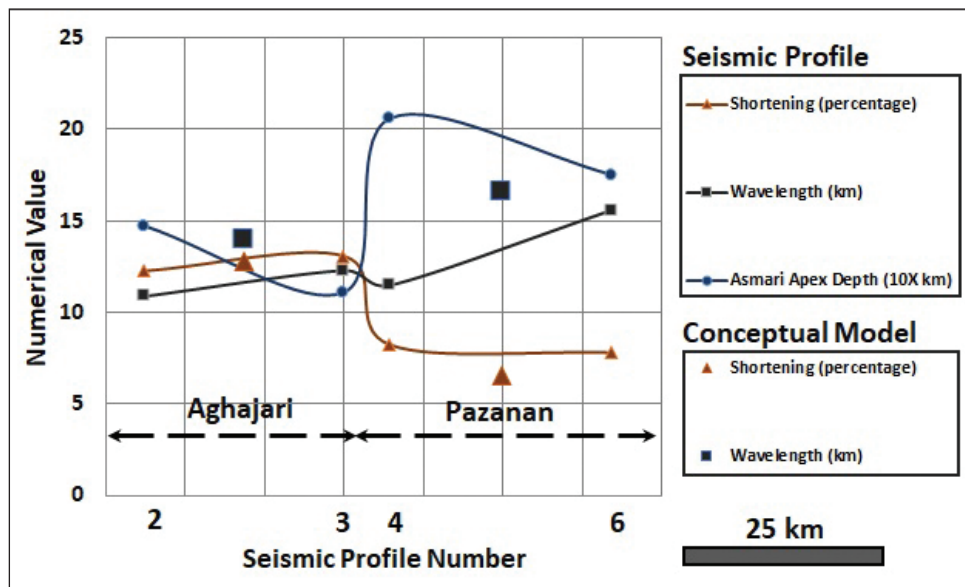
مدل (ب) برای تاقدیس پازنان

- ۱) لایه‌ها پیش از آغاز چین‌خوردگی زاگرس همراه با شیب ناحیه‌ای فروبار دزفول.
- ۲) ایجاد چین جدایشی اولیه به صورت هماهنگ و نامتقارن بر روی افق‌های جدایشی پالنوزوئیک زیرین و جریان‌یافتگی بخش‌های کم‌قوام گچساران.
- ۳) فعال شدن واحد کم‌قوام دشتک همراه با ایجاد سطوح گسیختگی.
- ۴) رشد گسل راندگی و بریده شدن توالی سازندهای پرقوام در یال جنوب باختر و تأثیر بر دگرریختی واحدهای جوان‌تر.



جدول ۴- مقایسه برخی از ویژگی‌های چین‌آسماری در برش‌های لرزه‌ای و مدل‌های مفهومی هندسی.

| ساختمان آغاجاری | | ساختمان پازنان | | | | ویژگی اندازه‌گیری شده برش لرزه‌ای ۶ | ردیف |
|----------------------------|---------------|----------------|--------------------------|---------------|-------|--|------|
| مدل مفهومی (شکل ۱۷-الف) | برش لرزه‌ای ۲ | برش لرزه‌ای ۳ | مدل مفهومی (شکل ۱۷-ب) | برش لرزه‌ای ۴ | | | |
| ۱۹۹۷۶ | ۲۰۳۷۱ | ۲۰۱۸۵ | ۱۹۷۷۲ | ۱۸۲۴۲ | ۲۳۴۰۶ | طول اولیه (به متر) | ۱ |
| ۱۷۴۱۰ | ۱۷۸۷۵ | ۱۷۵۵۰ | ۱۸۴۸۸ | ۱۶۷۴۲ | ۲۱۵۸۲ | طول نهایی (به متر) | ۲ |
| ۲۵۶۶ | ۲۴۹۶ | ۲۶۳۵ | ۱۲۸۴ | ۱۵۰۰ | ۱۸۲۴ | کوتاه شدگی به متر به درصد | ۳ |
| ۱۲,۸ | ۱۲,۲ | ۱۳,۰ | ۶,۵ | ۸,۲ | ۷,۸ | | |
| ۱۴۰۰۰ | ۱۰۹۰۰ | ۱۲۳۰۰ | ۱۶۶۰۰ | ۱۱۵۰۰ | ۱۵۶۰۰ | طول موج چین (به متر) | ۴ |
| ۱۶۶۰ | ۱۴۲۰ | ۱۶۴۰ | ۱۱۰۰ | ۱۱۹۰ | ۱۳۰۰ | دامنه چین (به متر) | ۵ |
| ۸۴۰ | ۱۴۷۰ | ۱۱۱۰ | ۱۹۷۰ | ۲۰۶۰ | ۱۷۵۰ | عمق رأس سازند آسماری (به متر، زیر سطح دریا) | ۶ |



شکل ۱۸- نمودار مقایسه برخی از ویژگی‌های هندسی چین‌آسماری در برش‌های لرزه‌ای و مدل‌های مفهومی هندسی (شکل‌های ۱۷-الف-۴ و ۱۷-ب-۴). ملاحظه می‌شود که مقادیر به دست آمده از برش‌های لرزه‌ای تفاوت اندکی با ویژگی‌های اندازه‌گیری شده متناظر در مدل‌های مفهومی هندسی دارند.

۶- نتیجه‌گیری

- کیفیت مناسب برش‌های لرزه‌ای در نمایش جزئیات هندسی افق‌های کم‌قوام به عنوان سطوح جدایشی میانی
- تغییرات معنی‌دار در شکل و ویژگی‌های هندسی واحد چین‌خورده آسماری در تاقدیس‌های نامبرده
- کاهش دامنه چین از واحد آسماری به واحدهای قدیمی‌تر در ساختمان آغاجاری و ثابت بودن دامنه در سطوح مختلف ساختمان پازنان
- مقایسه ستون چینه‌نگاری و نمودارهای پتروفیزیکی سازند گرو در چاه‌های ژرف حفاری شده.
متأسفانه اطلاعات سرعتی کافی برای تبدیل به عمق سرسازندهای گوتنیا و کنگان در گستره مورد مطالعه (و حتی مناطق نزدیک آن که بتوان به اطلاعات سرعتی برداشت شده اعتماد نمود) وجود ندارد و به همین دلیل، امکان ترسیم مقاطع عمقی نبوده

چینه‌نگاری مکانیکی، پاسخ واحدهای سنگ‌چینه‌ای به تنش‌های وارد شده بر آنهاست. طبیعی است که این پاسخ، متناسب با ویژگی‌های مکانیکی و رئولوژیکی آن واحدها خواهد بود. واحدهای پرقوام و کم‌قوام به ترتیب رفتاری شکننده و شکل‌پذیر در برابر تنش‌های وارده از خود نشان می‌دهند. در پهنه فروبار دزفول، توالی‌های مختلفی از رخساره‌های رسوبی پرقوام و کم‌قوام وجود دارند. در این مطالعه از برش‌های لرزه‌ای، ویژگی‌های ساختاری چین‌خوردگی، اطلاعات چینه‌ای و نمودارهای گرفته شده در چاه‌های ژرف حفاری شده و مطالعات قبلی چینه‌ای این فروبار استفاده شده است تا علل الگوی چین‌خوردگی متفاوت در دو تاقدیس مجاور یکدیگر آغاجاری و پازنان مشخص شود. تعدادی از شواهد کلیدی که نشان می‌دهند بین هندسه چین‌خوردگی و چینه‌نگاری مکانیکی سازندهای دشتک، سری ژوراسیک و گرو در تاقدیس‌های یاد شده ارتباط تنگاتنگی وجود دارد، عبارتند از:

رخساره آن در این مناطق، همی‌پلاژیک برآورد می‌شود. همچنین سری تبخیری ژوراسیک در ساختمان آغاچاری به استناد برش‌های لرزه‌ای، از دیدگاه ساختاری، نقش فعالی داشته است. در ساختمان پازنان، این واحدها رفتاری صلب داشته‌اند و به نظر می‌رسد که در راستای جانبی به واحدهای آهکی سورمه تبدیل شده‌اند. دو مدل مفهومی هندسی ارائه شده با مراحل تکوین ساختاری مختلف نیز مؤید نقش متفاوت واحدهای سنگ‌چینه‌ای ژوراسیک میانی تا کرتاسه زیرین بر هندسه چین‌خوردگی در تاقدیس‌های آغاچاری و پازنان است. افزون بر این، بر پایه شواهد هندسی بازتابنده‌ها، سبک چین‌خوردگی این دو ساختار از نوع جدایشی گسل‌خورده با گرایش به سمت جنوب باختر پیشنهاد شده است.

است. با این وجود، تفسیر برش‌های لرزه‌ای (در حوزه زمان) و استفاده از نگاره‌های پتروفیزیکی، همراه با مقایسه ویژگی‌های هندسی راس سازند آسماری (در حوزه عمق) نشان می‌دهد که در سراسر ساختمان آغاچاری و بخش جنوب‌خاوری ساختمان پازنان، سازند کم‌قوام و پلاژیک گرو نقش اساسی در کنترل چین‌خوردگی توالی پُرقوام آسماری تا فهلیان را داشته است. واضح است که در این مناطق، به سبب فشردگی و انحنای بیشتر واحدهای آسماری تا فهلیان، توسعه شکستگی‌ها و گسلش بیشتری روی داده است و این موضوع علاوه بر تأثیر بر میزان تولید این میادین، می‌تواند در برنامه‌های آتی توسعه‌ای آنها مورد استفاده قرار گیرد. در مقابل، سازند گرو در بخش‌های میانی و شمال‌باختری ساختمان پازنان فعال نشده است و

کتابنگاری

- خرازی‌زاده، ن.، الماسیان، م. و شرکتی، ش.، ۱۳۹۱- تحلیل جنبشی هندسه چین‌خوردگی در تاقدیس آغاچاری (فروافتادگی دزفول)، مجله علوم زمین، زمستان، شماره ۸۶، صص ۲۶۱ تا ۲۷۲. Doi:10.22071/GSJ.2012.54094
- علی‌پور، ر.، علوی، س. ا.، قاسمی، م.، مختاری، م. و گلال‌زاده، ع.، ۱۳۹۱- تحلیل شکستگی‌های سنگ مخزن آسماری در میدان نفتی پازنان (جنوب باختر ایران)، نشریه علوم دانشگاه خوارزمی، جلد ۱۲، شماره ۲، صص ۴۸۳-۵۰۰. <http://jsci.khu.ac.ir/article-1-1496-fa.html>
- علی‌پور، ر.، علوی، س. ا.، قاسمی، م.، مختاری، م. و گلال‌زاده، ع.، ۱۳۹۴- مقایسه هندسه ساختاری تاقدیس آغاچاری و مارون با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی، جنوب باختر ایران، نشریه یافته‌های نوین در زمین‌شناسی، جلد ۱۶، شماره ۴۱، صص ۱۹۹ تا ۲۱۶. <http://gnf.khu.ac.ir/article-1-2536-fa.html>

References

- 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.347-62. doi: 10.1144/1354-079305-706.
- Aqrawi, A. M., Goff, J. C., Horbury, A. D. and Sadooni, F. N., 2010- The Petroleum Geology of Iraq. Scientific Press, p.423. ISBN: 978-0-901360-36-8.
- Armstrong, F. C. and Oriol, S. S., 1965- Tectonic development of Idaho-Wyoming thrust belt. *AAPG Bulletin*, v.49, p.1847-1866. <https://doi.org/10.1306/A663386E-16C0-11D7-8645000102C1865D>.
- Berberian, M. and King, G. C. P., 1981- Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian J. of Earth Sciences*, v.18, p.210-285. <https://doi.org/10.1139/e81-163>.
- Blanc, E. P., Allen, M. B., Inger, S. and Hassani, H., 2003- Structural styles in the Zagros simple folded zone, Iran. *Journal of the Geological Society*, v.160, p.401-412.
- Bordenave, M. L. and Hegre, J. A., 2005- The influence of tectonics on the entrapment of oil in the Dezful Embayment, Zagros fold belt, Iran. *Journal of Petroleum Geology*, v.28, p.339-368. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2005.tb00087.x>.
- Bordenave, M. L. and Huc, A.Y., 1995- The Cretaceous source rocks in the Zagros foothills of Iran. *Revue de L'institut Français du Petrole*, v.50, no.6, p.727-752. <https://doi.org/10.2516/ogst:1995044>.
- Briggs, S. E., Davies, R.J., Cartwright, J. A. and Morgan, R., 2006- Multiple detachment levels and their control on fold styles in the compressional domain of the deepwater west Niger Delta. *Basin Research*, v.18, p.435-450. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2006.00300.x>.
- Buchanan, P. G. and McClay, K. R., 1991- Sandbox experiments of inverted listric and planar fault systems. *Tectonophysics*, v.188, p.97-115. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90317-L](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90317-L).
- Cooke, M. L., 1997- Predicting fracture localization in folded strata from mechanical stratigraphy and fold shape: case study of East Kaibab Monocline, Utah. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v.34, p.56-63. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00248-7](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00248-7).
- Corbett, K., Friedman, M. and Spang, J., 1987- Fracture development and mechanical stratigraphy of Austin chalk, Texas. *AAPG Bulletin*, v.71, p.17-28. <https://doi.org/10.1306/94886D35-1704-11D7-8645000102C1865D>.
- Dalton, T. J. S., Paton, D. A. and Needham, D. T., 2017- Influence of mechanical stratigraphy on multi-layer gravity collapse structures: insights from the Orange Basin, South Africa. *Geological Society, London, Special Publications*, v.438, p.211-228. <https://doi.org/10.1144/SP438.4>.
- Dixon, J. M. and Liu, S., 1992- Centrifuge modelling of the propagation of thrust faults. In: McClay, K.R. (Ed.). *Thrust Tectonics*. Chapman & Hall, London, p.53-69. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-3066-0>.

- Edgell, H. S., 1992- Basement tectonics of Saudi Arabia as related to oil field structures. *Basement tectonics*, 9, p.169-193. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2654-0>.
- Edgell, H. S., 1996- Salt tectonism in the Persian Gulf basin. Geological Society, London, Special Publications, v.100, p.129-151. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.100.01.10>.
- Erickson, S. G., 1996- Influence of mechanical stratigraphy on folding vs faulting. *Journal of Structural Geology*, v.18, p.443-450. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(95\)00064-K](https://doi.org/10.1016/0191-8141(95)00064-K).
- Falcon, N. L., 1974- Southern Iran: Zagros Mountains. In: *Mesozoic-Cenozoic orogenic belts*. Geological Society of London. Special Publication, Ed. by A.M. Spencer, p.199-212.
- Ghanadian, M., Faghih, A., Grasemann, B., Abdollahie Fard, I. and Maleki, M., 2017- Analogue modeling of the role of multi-level decollement layers on the geometry of orogenic wedge: an application to the Zagros Fold–Thrust Belt, SW Iran. *International journal of earth science*, v.106, p.2837–2853. <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1462-0>.
- Gross, M., Fischer, M., Engelder, T. and Greenfield, R., 1995- Factors controlling joint spacing in interbedded sedimentary rocks; integrating numerical models with field observations from the Monterey Formation, USA. In: Ameen, M.S. (Ed.). *Fractography*. Geological Society Special Publication, London, p.215-233. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.092.01.12>.
- Gwinn, V. E., 1964- hin-skinned tectonics in the Plateau and northwestern Valley and Ridge provinces of the central Appalachians. *Geological Society of America Bulletin*, v.75, p.863-900. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1964\)75\[863:TTITPA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1964)75[863:TTITPA]2.0.CO;2).
- Harris, L. D. and Milici, R. C., 1977- Characteristics of thin-skinned style of deformation in the southern Appalachians, and potential hydrocarbon traps. United States: Geological Survey Professional Papers, v.1018, Washington, DC.
- Harrison, J. C. and Bally, A. W., 1988- Cross-sections of the Parry Islands fold belt on Melville Island, Canadian Arctic Islands: Implications for the timing and kinematic history of some thin-skinned decollement systems. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v.36, p.311-332. <https://doi.org/10.35767/gscpgbull.36.3.311>.
- Iacopini, D. and Butler, R. W., 2011- Imaging deformation in submarine thrust belts using seismic attributes. *Earth and Planetary Science Letters*, v.302, p.414-422. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.041>.
- Kobraei, M., Rabbani, A. R. and Taati, F., 2017- Source rock characteristics of the Early Cretaceous Garau and Gadvan formations in the western Zagros Basin–southwest Iran. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, p.1-20. <https://doi.org/10.1007/s13202-017-0362-y>.
- Letouzey, J., Colletta, B., Vially, R. and Chermette, J. C., 1995- Evolution of salt-related structures in compressional settings. In: Jackson MPA, Roberts DG, Snelson S (eds.) *Salt tectonics: a global perspective AAPG Memoir 65*, p.41–60.
- Mitra, S., 2002- Structural models of faulted detachment folds. *AAPG Bulletin*, v.86, p.1673–1694. doi: 10.1306/61EEDD3C-173E-11D7-8645000102C1865D.
- Nemcok, M., Schamel, S. and Gayer, R., 2005- *Thrustbelts: Structural Architecture, Thermal Regimes and Petroleum Systems*. Cambridge University Press, Cambridge, p.541. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511584244>.
- Pierce, W. G., 1966- Jura tectonics as a decollement. *Geological Society of America Bulletin*, v.77, p.1265-1276. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1966\)77\[1265:JTAAD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1966)77[1265:JTAAD]2.0.CO;2).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.07.006>.
- Sepehr, M., 2001- The tectonic significance of the Kazerun Fault Zone, Zagros fold-thrust belt, Iran. PhD thesis, Imperial College, University of London. <https://spiral.imperial.ac.uk/handle/10044/1/7583>.
- Sepehr, M., Cosgrove, J. W., Moieni, M., 2006- The impact of cover rock rheology on the style of folding in the Zagros fold-thrust belt: *Tectonophysics*, v.427, p.265–281. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.05.021>.
- Setudehnia, A., 1978- The Mesozoic sequence in southwest Iran and adjacent area. *Journal of Petroleum Geology*, v.1, p. 3–42. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1978.tb00599.x>.
- Sherkati, S. and Letouzey, J., 2004- Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran. *Marine and Petroleum Geology*, v.21, p.535–554. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.01.007>.
- Stewart, S. A., 1996- Influence of detachment layer thickness on style of thin-skinned shortening. *Journal of Structural Geology*, v.18, p.1271-1274. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(96\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(96)00052-1).
- T’Hart, B., 1970- Tectonic framework and paleogeography of the agreement area. National Iranian Oil Company, Report 1179 (unpublished).
- Takin, M., 1972- Iranian geology and continental drift in the Middle East. *Nature*, v.235, p.147-150. <https://doi.org/10.1038/235147a0>.
- Talbot, C. J., 1992- Centrifuged models of Gulf of Mexico profiles. *Marine and Petroleum Geology*, v.9, p.412-432. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(92\)90052-G](https://doi.org/10.1016/0264-8172(92)90052-G).

The role of mechanical stratigraphy on folding geometry using subsurface data, a case study from the Aghajari and Pazanan anticlines (South Dezful embayment)

M. Tavakoli Yarak^{1*}, S. A. Alavi², M. R. Ghassemi³ and I. Abdollahi fard⁴

¹Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

²Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³Associate Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran (GSI), Tehran, Iran

⁴Ph.D. Exploration directorate, NIOC, Tehran, Iran

Received: 2017 November 05

Accepted: 2018 February 17

Abstract

The significance and role of mechanical stratigraphy of rocks in kinematics of folds has long been of interest to structural geologists. Sequences of competent and incompetent layers in fold-thrust belts deform by faulting and folding over time due to tectonic forces. Parameters such as sedimentary facies variations and thickness of incompetent layers play major role in activity of these layers as detachment horizons. The purpose of this study is to investigate the role of mechanical stratigraphy on fold geometry in the Aghajari and Pazanan hydrocarbon-bearing anticlines within the Dezful Embayment zone. For this purpose, we have used seismic profiles, stratigraphic data and petrophysical logs (from some of the wells in the study area) as well as the previous stratigraphic studies of the Dezful Embayment zone. Results of this study show that the Lower Cretaceous incompetent shale unit (Garau Formation) is among the major intermediate detachment levels in the Aghajari structure, and has a significant control on folding geometry of the competent sequences of Lower Cretaceous to Oligo-Miocene (Fahliyan to Asmari Formations). The Triassic evaporitic unit (Dashtak Formation) and other incompetent evaporitic Formations of Middle-Upper Jurassic (Adayah, Alan and Sargelu) also have been active in the Aghajari structure. In contrast, in most parts of the Pazanan structure, the Garau and the Jurassic Formations do not have appropriate mechanical properties to act as intermediate detachment levels due to their change into hemipelagic facies and limestone (Surmeh Formation) respectively. Based on the evidences on the geometric characteristics of the abovementioned structures, and considering the stratigraphic column of the wells in the region, the facies change in the abovementioned Formations occurs between the Pazanan and Aghajari anticlines. It seems that activity of the Hendijan-Izeh paleo-high also has some control on facies of the Garau Formation. Based on geometric characteristics and a conceptual model provided for development of these structures, the folding style of the anticlines is suggested as an asymmetric faulted detachment fold type.

Keywords: Zagros, Mechanical stratigraphy, Aghajari anticline, Pazanan anticline, Intermediate detachment horizon, Surmeh Formation, Garau Formation.

For Persian Version see pages 213 to 228

*Corresponding author: M. Tavakoli Yarak; E-mail: me_tavakoli@sbu.ac.ir