

سبک چین خوردگی در بلندای قدیمی فارس، جنوب خاور کمر بند چین خورده - رانده زاگرس

مهدی نجفی^۱، علی یساقی^۲، عباس بحرودی^۳، شهرام شرکتی^۴ و جاما ورجس^۵

^۱ دانشجوی دکترا، گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

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

^۵ استاد، مؤسسه تحقیقات علوم زمین 'Jaume Almera'، بارسلونا، اسپانیا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۳۰

چکیده

بلندای قدیمی فارس که حاوی ۱۵ درصد از کل ذخایر گاز اکتشاف شده در جهان است در جنوب خاور کمر بند چین - رانده زاگرس قرار دارد. اطلاعات زیر سطحی که در خلال اکتشافات اخیر در این منطقه به دست آمده اند نشان از پیچیدگی سبک چین خوردگی تاقدیس ها در ژرفای پوشش رسوبی می دهند که دانستن آن برای مدل سازی سیستم هیدروکربنی منطقه و تعیین اولویت ساختارها برای حفاری اکتشافی ضروری است. این مطالعه با ارائه یک برش ساختاری ناحیه ای به طول ۱۳۰ و ژرفای ۱۲ کیلومتر که بر اساس تلفیق برش های لرزه ای، داده چاه های اکتشافی و برداشت های میدانی تهیه شده است، به بررسی سبک چین خوردگی در بلندای قدیمی فارس پرداخته است. نتایج این بررسی نشان دادند که تغییرات سبک چین خوردگی، با تغییر در ویژگی های مکانیکی واحدهای رسوبی، در عرض بلندای قدیمی فارس و همینطور از سطح تا ژرفای پوشش رسوبی روی می دهد. چین ها در ژرفای بین ۸ تا ۱۲ کیلومتر جدایش می یابند به گونه ای که سازوکار غالب دگرریختی پوشش رسوبی، چین خوردگی جدایشی و به دنبال آن چین خوردگی جدایشی گسلیده است. در میانه پوشش رسوبی، نهشته های تبخیری تریاس با بیش از دو برابر افزایش ستبرای زمین ساختی در برخی ساختارها، هندسه توالی پس از تریاس را از مخازن گازی کربناتی پرموتریاس جدا کرده اند. بازگردانی و موازنه برش ساختاری ناحیه ای نشان داد که میزان کوتاه شدگی حاصل از چین خوردگی و گسلش در عرض بلندای کهن فارس حدود ۲۰ درصد است. برش ساختاری موازنه شده همچنین نشان داد که حداقل دو گسل پی سنگی معکوس با ایجاد رخنمون واحدهای قدیمی در فرادواره و ایجاد اختلاف در تراز ناودیس ها، بر دگرریختی پوشش رسوبی مؤثر بوده اند.

کلیدواژه ها: کمر بند چین خورده - رانده زاگرس، بلندای قدیمی فارس، سبک چین خوردگی، افق جدایش، گسل پی سنگی، کوتاه شدگی هندسی.

E-mail: yassaghi@modares.ac.ir

*نویسنده مسئول: علی یساقی

۱- پیش نوشتار

بلندای قدیمی فارس واقع در جنوب خاور کمر بند چین خورده و رانده زاگرس، حاوی ۱۵۰۰ تریلیون فوت مکعب معادل ۱۵ درصد از کل ذخایر گاز اکتشاف شده در جهان است (Bordenave & Hegre, 2012; Motamedi et al., 2012). این بلندای قدیمی که در بخش مرکزی پیشانی فارس واقع شده، ادامه شمالی کمان قطر - فارس است (شکل ۱). مطالعه نقشه های هم ستبرای سازندها و تفسیر برش های لرزه ای طولی نشان داده است که ستبرای پوشش رسوبی از جنوب خاور و شمال باختر به سمت مرکز این منطقه کاهش می یابد و همچنین نشان می دهد این منطقه حداقل از تریاس تا میوسن نسبت به مناطق مجاور بالاتر بوده است (Rahimpour et al., 2010; Perotti et al., 2011). بالاتر بودن منطقه در طول این زمان، موجب مهاجرت اولیه هیدروکربور به سمت آن و تجمع گاز در بلنداشد. با آغاز چین خوردگی در میوسن، این تجمعات گازی مجدداً مهاجرت کرده و در بستگی های ایجاد شده توسط تاقدیس ها به دام افتادند (Bordenave & Hegre, 2012). به این ترتیب، تاقدیس هایی که در بلندای قدیمی فارس واقع شده اند از دید زمین شناسی نفت (مسیر و زمان مهاجرت هیدروکربور، همچنین ویژگی های سنگ منشأ، سنگ مخزن و سنگ پوش) شرایط ایده آلی برای ایجاد ذخایر هیدروکربوری دارند و در مواردی که شرایط ساختاری چین ها فراهم بوده باشد، تله های هیدروکربنی ایجاد کرده اند. بنابراین برای مدل سازی سیستم هیدروکربنی منطقه و تعیین اولویت ساختارها برای حفاری اکتشافی، دانستن سبک چین خوردگی تاقدیس ها ضروری است.

در دهه گذشته، سبک چین خوردگی در پهنه فارس از کمر بند چین خورده و رانده زاگرس مورد مطالعات بسیاری بوده است (McQuarrie, 2004; Letouzey & Sherkati, 2004; Molinaro et al., 2005; Sherkati et al., 2006; Alavi, 2007; Motamedi, 2008; Jahani, 2008; Ramsey et al., 2008; Oveisi, 2007; Yamato et al., 2011). بیشتر این مطالعات برش های ساختاری در مقیاس ناحیه ای در عرض پهنه فارس ارائه کرده اند و به بررسی تغییرات هندسه و کینماتیک چین خوردگی در راستای این برش ها پرداخته اند. برخی راهکار مدل سازی عددی (Yamato et al., 2011) و تعدادی از مطالعات راهکار مدل سازی آنالوگ (Sherkati et al., 2006; Jahani, 2008) را برای مستند کردن تفسیرهای ساختاری خود به کار گرفته اند. سازوکار و نرخ رشد حال حاضر چین ها در پهنه فارس با ترکیب روش های زمین ریخت شناسی و سن سنجی (Ramsey et al., 2008; Oveisi, 2007) از دیگر موضوعات مورد علاقه پژوهشگران بوده است.

از میان این مطالعات انجام شده بر روی سبک چین خوردگی در پهنه فارس، آنهایی که از داده های لرزه ای و چاه استفاده کرده اند، هندسه های ژرف چین ها را مستندتر نشان داده اند. برخی از این مطالعات زیرسطحی به تغییرات هندسه چین خوردگی در ژرفای پوشش رسوبی در بخش های مرکزی و پیشانی فارس اشاره کرده اند (Sherkati et al., 2006; Sepehr et al., 2006; Motamedi et al., 2012). افزون بر مقالات منتشر شده یادشده، اطلاعات زیر سطحی که در خلال اکتشافات اخیر و موفق هیدروکربنی در منطقه بلندای قدیمی فارس به دست آمده اند نشان می دهند که در برخی ساختارها هندسه واحدهای مزوزوییک نسبت به افق مخزنی پرموتریاس متفاوت است. این تغییر در سبک چین ها از سطح تا ژرفا، تعیین اولویت تاقدیس ها و انتخاب محل حفاری های اکتشافی گاز را مشکل کرده و مطالعه بیشتر را طلب می کند.

سازوکارهای متفاوتی برای چین خوردگی پوشش رسوبی در محدوده بلندای قدیمی فارس پیشنهاد شده است که از آن جمله می توان به چین خوردگی جدایشی (McQuarrie, 2004; Sherkati et al., 2006; Motamedi et al., 2012)،

است (Rahimpour et al., 2010). همچنین مطالعه یک برش لرزه‌ای به طول ۲۰۰ کیلومتر به موازات خلیج فارس و عمود بر روند عمومی بلندای فارس، کاهش ستبرای پوشش رسوبی در بالای بلندا را به خوبی نشان داده است (Perotti et al., 2011). این منطقه به نام‌های مختلفی خوانده شده است، مانند پلاتفرم فارس (Talbot & Alavi, 1996; Bahroudi & Koyi, 2003)، کمان قطر- جنوب فارس (Perotti et al., 2011)، بلندای گاو بندی/فارس (Motamedi et al., 2012; Bordenave & Hegre, 2012)، و بلندای قدیمی فارس (Baghbani, 2003). در این نوشتار از واژه بلندای قدیمی فارس استفاده شده است.

بر اساس ارتباط بین سنگ منشأ، سنگ مخزن و سنگ پوش، پنج سیستم هیدروکربنی در کمربند چین خورده و رانده زاگرس تعریف شده‌اند (Bordenave & Hegre, 2012). کهن ترین سیستم هیدروکربنی زاگرس که در کمان قطر- فارس (شامل بلندای قدیمی فارس) واقع شده است، "سیستم هیدروکربنی پالئوزویک" نام دارد. در این سیستم شیل‌های آرگانیکی سیلورین زیرین به عنوان سنگ منشأ، کربنات‌های سازنده‌های دالان و کنگان به سن پرموتریاس را به عنوان سنگ مخزن تغذیه کرده‌اند. سنگ پوش این سیستم تبخیری‌های ستبر تریاس (سازند دشتک) هستند. نهشته‌های تریاس در شمال و شمال خاور فارس به سازند کربناتی خانه کت تبدیل شده و خواص سنگ پوش خود را از دست می‌دهد.

سیستم هیدروکربنی پالئوزویک اغلب میدان‌های گازی زاگرس را در کمان قطر- فارس، در هر دو محدوده خشکی و دریا، ایجاد کرده است. از این جمله می‌توان به بزرگ‌ترین میدان گازی جهان، پارس جنوبی (در قطر میدان شمالی نامیده می‌شود) اشاره کرد که بین ایران و قطر مشترک است. به استناد ژرفای تدفین شیل‌های سیلورین، زایش هیدروکربن از این سنگ منشأ در اواخر زمان ژوراسیک در شمال باختر پهنه فارس آغاز شده و به تدریج به سمت جنوب خاور پهنه توسعه یافت؛ به طوری که در آپسین (ژوراسیک آغازین) تمام پهنه فارس به جز بلندای قدیمی فارس (که بلندتر از باقی نواحی بود) از نظر ژرفای تدفین مساعد زایش هیدروکربن بوده‌اند. در نتیجه مهاجرت هیدروکربن در این زمان از اطراف به سمت بلندای قدیمی فارس آغاز شد (Baghbani, 2003). در طول کرتاسه پسین (از سنومانین تا ماستریشتین) بلندای فارس به ترتیب از حواشی به سمت مرکز بلندا در مرحله زایش نفت قرار داشته است. مسیر مهاجرت گاز از اواخر ژوراسیک تا اواخر الیگوسن با مهاجرت جانبی به سمت بلندای فارس بوده است. مقادیر زیاد گاز که در اطراف بلندای فارس تولید شده بودند، با مهاجرت گسترده خود، نفت را به سمت مناطق کم ارتفاع تر در اطراف هل دادند تا پایه‌های نفتی را در لبه‌های بلندا ایجاد کنند (Bordenave & Hegre, 2012). بنابراین در الیگوسن تجمعات قابل توجه گازی در بالای بلندای قدیمی فارس وجود داشتند در حالی که در حواشی مقادیری نفت وجود داشته است.

۳- چینه‌شناسی عمومی و مکانیکی

شکل ۲ ستون چینه‌شناسی پوشش رسوبی در بلندای قدیمی فارس را نشان می‌دهد که بر حسب ستبرای واحدها تنظیم شده است. این ستون با استفاده از سه منبع تهیه شد: (۱) عملیات صحرایی برای واحدهایی جوان تر از کرتاسه که رخنمون‌های قابل ملاحظه‌ای در منطقه دارند؛ (۲) داده‌های چاه‌های حفاری شده به طوری که ستبرای سازندها در این چاه‌ها میانگین گرفته شد؛ (۳) برای واحدهای پالئوزویک زیرین که در هیچکدام از چاه‌ها حفاری نشده بودند، از گزارش‌های چینه‌شناسی زاگرس استفاده شد (James & Wynd, 1965; Szabo & Kheradpir, 1978; Ghavidel, 1996). همچنین ستبرای سری پالئوزویک با برش‌های لرزه‌ای که محور عمودی آنها از زمان تبدیل به ژرفا شده بود، کنترل شد.

پوشش رسوبی منطقه مطالعه که بر روی پی سنگ متبلور پرکامبرین قرار گرفته

چین خوردگی انتشارگسلی (Oveisi, 2007) و چین خوردگی خم گسلی (Alavi, 2007) اشاره کرد. سازوکار اصلی چین خوردگی در کمربندهای چین خورده و رانده، وابسته به میزان اصطکاکی است که در قاعده رسوبات در حال کوتاه‌شدگی وجود دارد، به گونه‌ای که هرچه اصطکاک با حضور یک واحد شکل پذیر کاهش یابد، تقدم زمانی توسعه چین خوردگی به گسلش افزایش می‌یابد (Mittra, 2003; Hughes, 2013). سری هرمز به سن اینفراکامبرین یا معادل‌های جانبی آن، به عنوان افق شکل پذیر پوشاننده پی سنگ برای پهنه فارس پیشنهاد شده‌اند (Jackson, 1980; Berberian, 1995; Talbot & Alavi, 1996). هرچند برخی از پژوهشگران عدم رخنمون گنبد‌های نمکی در بخش مرکزی بلندای قدیمی فارس را به معنی نبود سری هرمز در قاعده پوشش رسوبی در نظر گرفته‌اند (Bahroudi & Koyi, 2003)، بیشتر پژوهشگران دلایلی چون کاهش ستبرای سری هرمز در بلندا و یا تغییر رخساره آن به انیدریت را پیشنهاد کرده‌اند (Fürst, 1976; Kent, 1979; Jahani, 2008; Talbot & Alavi, 1996).

مطالعات پیشین با بازگردانی و موازنه برش‌های ساختاری در عرض بلندای قدیمی فارس مقادیر متفاوتی از کوتاه‌شدگی ساختاری را برای رسوبات چین خورده این منطقه پیشنهاد کرده‌اند که آنها را می‌توان در سه گروه جای داد: مطالعاتی که کوتاه‌شدگی را کمتر از ۱۰ درصد دانسته‌اند (Oveisi, 2007; Motamedi, 2008)؛ آنهایی که مقادیر ۱۵ تا ۲۰ درصد را برآورد کرده‌اند (McQuarrie, 2004; Yamato et al., 2011; Sherkati et al., 2006)؛ و مطالعاتی که کوتاه‌شدگی حدود ۳۰ درصد را محاسبه کرده‌اند.

تعدادی گسل بنیادی طولی با سازوکار غالب معکوس در کمربند زاگرس و از جمله در بلندای قدیمی فارس وجود دارند که هم کنترل‌کننده حوضه رسوبی در زمان‌های مختلف بوده‌اند و هم در پهنه خود دگربرختی در پوشش رسوبی ایجاد کرده‌اند. بیشتر مطالعات صورت گرفته بر روی خاستگاه این گسل‌های بنیادی به ارتباط آنها با پی سنگ اشاره دارند (Jackson, 1980; Berberian, 1995; Yamato et al., 2011). تأقدیس‌هایی که پی سنگ با گسلش معکوس در آنها درگیر است، عموماً به صورت زنجیره‌ای از برخاستگی‌ها در مناطق پیش‌بومی کمربندهای چین خورده و رانده دیده می‌شوند. بسیاری از این ساختارها در پیشانی کمربندهای چین خورده و در مجاورت حوضه پیش‌بوم واقع شده‌اند (Mittra & Mount, 1998). هرچند به وجود این ساختارهای پی سنگ- درگیر در پهنه فارس از کمربند چین خورده- رانده زاگرس اشاره شده است (Berberian, 1995; Oveisi, 2007; Sepehr & Cosgrove, 2004)، اما نقش گسل‌های پی سنگی بر روی سبک چین خوردگی پوشش رسوبی این منطقه هنوز به طور کامل روشن نیست.

مطالعه حاضر با ارائه یک برش عرضی ساختاری موازنه شده ناحیه‌ای، به طول ۱۳۲ و ژرفای ۱۲ کیلومتر بر بلندای قدیمی فارس، به بررسی (۱) سازوکار چین خوردگی پوشش رسوبی و میزان کوتاه‌شدگی آن؛ (۲) تغییر در هندسه و سبک چین‌ها از سطح تا ژرفای پوشش رسوبی متأثر از عملکرد افق‌های جدایش میانی و (۳) وضعیت گسلش در پی سنگ و نقش آن در دگربرختی پوشش رسوبی می‌پردازد. این برش موازنه شده با استفاده از داده‌های میدانی، برش‌های لرزه‌ای دو بعدی و داده چاه‌های اکتشافی رسم شده است.

۲- چهارچوب زمین‌شناسی

بلندای قدیمی فارس در بخش مرکزی پیشانی پهنه فارس واقع شده است. این منطقه ادامه شمالی کمان قطر است (شکل ۱) (Talbot & Alavi, 1996; Baghbani, 2003). مطالعه نقشه‌های هم‌ستبرای سازندها در بلندای قدیمی فارس نشان داده است که این منطقه حداقل از تریاس تا میوسن نسبت به مناطق اطراف بالاتر بوده است، که موجب کاهش ستبرای پوشش رسوبی از خاور و باختر به سمت بخش‌های مرکزی آن شده

گنبد‌های نمکی)، به گونه‌ای که شیل‌های پالئوزویک در هسته آن برونزد یافته‌اند. از طرف دیگر تاقدیس مدار واقع در بخش ساحلی، سازند آغاچاری به سن پلیوسن را به عنوان قدیمی‌ترین واحد رخنمون یافته در هسته خود نشان می‌دهد.

۴- روش مطالعه

راهکار این نوشتار برای مطالعه سبک چین‌خوردگی در بلندای قدیمی فارس شامل رسم یک برش ساختاری ترازمند به طول ۱۳۰ کیلومتر با استفاده از داده‌های صحرایی، برش‌های لرزه‌ای و داده‌های اکتشافی است. در شکل ۴ ساختار کلی مطالعه و همچنین جزئیات روش‌های به کار گرفته شده در این مطالعه برای بررسی سبک چین‌خوردگی نشان داده شده است (Najafi et al., 2012).

به منظور رسم برش‌های زمین‌شناسی در عرض ساختارهای بلندای قدیمی فارس، تمام داده‌های سطحی و زیر سطحی در محیط نرم‌افزار 2D Move (یک نرم‌افزار مدل‌سازی ساختاری و نفتی، که توسط شرکت Midland Valley در بریتانیا توسعه یافته است) با هم تلفیق شدند. هر برش ساختاری در پنج گام به شرح زیر رسم شد: در گام نخست از رسم هر برش، داده‌های عملیات صحرایی و اطلاعات موجود بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی (در مقیاس‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ تهیه شده توسط شرکت ملی نفت ایران) بر روی برش توپوگرافی در مسیر برش پیاده شدند. داده‌های سطحی شامل جهت‌یابی لایه‌ها، محل همبری سازندها، گسل‌های برداشت شده در سطح و محل ناپیوستگی‌ها بود. افزون بر این، داده‌های چاه شامل محل سرسازندها در چاه و داده‌های شیب‌سنجی لایه‌ها نیز بر روی برش پیاده شدند.

در گام دوم برای رسم برش‌های ساختاری، برش‌های لرزه‌ای با اعمال مدل‌های سرعتی مناسب از زمان به ژرفا تبدیل شدند. پیش از تفسیر ساختاری لازم است تا برش‌های لرزه‌ای تبدیل به ژرفا شوند تا هم ژرفا و شیب صحیح ساختارها مشخص شود و هم هندسه‌های کاذبی که در برش‌های زمانی دیده می‌شوند حذف شوند (Etris et al., 2001). از آنجایی که شدت چین‌خوردگی در منطقه مطالعه زیاد است و در پهلوی بسیاری از تاقدیس‌ها راندگی‌ها توسعه یافته‌اند، برای تبدیل به ژرفای برش لرزه‌ای، یک مدل سرعتی پیوسته انتخاب شد که فرض می‌کند سرعت با افزایش ژرفا تا تابع مشخصی به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. این مدل سرعت موج در واحدهای سنگی نزدیک به سطح (v0) و نرخ افزایش سرعت با افزایش ژرفا (k) را طبق تابع ارائه شده توسط Marsden (1992) استفاده می‌کند تا ژرفای هر نقطه از برش لرزه‌ای را محاسبه کند. در گام سوم و پس از تبدیل به ژرفای برش‌های لرزه‌ای، بازتابنده‌های مشخص بر روی برش‌ها با رسم خطوط پررنگ شدند. در این مرحله هیچ افق یا ساختاری تفسیر نشده و تنها پررنگ کردن بازتابنده‌ها با دست بر روی کاغذ و سپس با کامپیوتر در محیط نرم‌افزار 2D Move انجام گرفت تا داده‌های موجود در برش لرزه‌ای واضح شوند (شکل ۵).

در گام چهارم، تفسیر ساختاری و رسم برش انجام گرفت. طی سه گام پیشین، تمام داده‌های سطحی و زیرسطحی بر روی برش پیاده شده و با یکدیگر تلفیق شدند (شکل ۵-ب). به برشی که تنها داده‌ها بر روی آن نشان داده شده است، "برش داده" گفته می‌شود (Groshong, 2006). در این مطالعه راه‌حل‌های هندسی مختلفی بر اساس مدل‌های ساختاری متفاوت به گونه‌ای که کاملاً مطابق بر داده‌ها باشند برای رسم برش‌ها امتحان شدند. در نهایت هندسه‌هایی که بیشترین انطباق را با داده‌های موجود بر روی هر برش داشتند، انتخاب شدند.

گام پنجم، بازگردانی، موازنه و برآورد کوتاه‌شدگی بود. بازگردانی برگرداندن لایه‌ها به هندسه پیش از دگرریختی آنها است که به منظور تأیید و معتبر کردن تفسیرهای ساختاری انجام می‌گیرد. یک برش ساختاری که هندسه آن قابل بازگردانی نیست، از نظر توپولوژی غیر ممکن است، بنابراین نمی‌تواند از نظر زمین‌شناسی ممکن باشد (Groshong, 2006). از دو روش اساسی برای موازنه برش

است ستبرایی بیش از ۱۰ کیلومتر دارد و عمدتاً از واحدهای سنگی کربناتی، تبخیری، مارنی و شیلی تشکیل شده است (شکل ۲) (James & Wynd, 1965; Szabo & Kheradpir, 1978; Koop & Stoneley, 1982; Ghavidel, 1996). سری هرمز و یا معادل‌های آن به سن اینفراکامبرین بر روی پی‌سنگ و در قاعده پوشش رسوبی واقع شده‌اند. بر روی آنها واحدهای سنگی سری پالئوزویک قرار دارند. واحدهای پالئوزویک زیرین شامل سازندهای میلا (دولومیت، شیل و آهک)، ایل‌بیک (شیل، ماسه‌سنگ و مادستون) و زردکوه (شیل، ماسه‌سنگ و کربنات) هستند که با یک ناپیوستگی از واحدهای پالئوزویک بالایی جدا می‌شوند. سیلورین با سازندهای سیاهو (ماسه‌سنگ و شیل‌های ارگانیک) و سرچاهان (ماسه‌سنگ و شیل‌های ارگانیک) آغاز می‌شود که سنگ منشأ گاز در بلندای فارس هستند. تفسیر برش‌های لرزه‌ای توسط شرکت ملی نفت ایران، ستبرای حدود چهار کیلومتر را برای سری پالئوزویک در بلندای قدیمی فارس پیشنهاد کرده است (Jahani, 2008)، که این میزان بیشتر از برآوردهای پیشین بین ۲/۵ تا ۳ کیلومتر است. برش‌های لرزه‌ای تبدیل به ژرفا شده در این مطالعه نیز ستبرای حداقل چهار کیلومتر را برای واحدهای پالئوزویک در این منطقه تأیید می‌کند (شکل ۲).

گروه دهرم به سن پرموتریاس که معادل سازند خوف در امارات متحده عربی و عمان است (Maurer et al., 2009)، سنگ مخزن ذخایر گازی در بلندای فارس را تشکیل می‌دهد. ستبرای میانگین این گروه ۱۰۶۵ متر در منطقه مطالعه است. این گروه از سازندهای کنگان و دالان (آهک، دولومیت و انیدریت) در بالا و سازند فراکان (ماسه‌سنگ و شیل) در قاعده تشکیل شده است (Szabo & Kheradpir, 1978; Rahimpour et al., 2010). سازند دشتک به سن تریاس بر روی گروه دهرم واقع شده است. ستبرای مقطع تیپ آن در کوه سیاه ۸۱۴ متر است. این سازند عمدتاً از انیدریت به همراه دولومیت و شیل تشکیل شده است. از بلندای قدیمی فارس به سمت شمال خاور، در فارس داخلی و زاگرس مرتفع، سازند دشتک با دولومیت‌های سازند خانه‌کت جایگزین می‌شوند. بر روی سازند دشتک، سازند نیریز با ستبرای کم (۷۰ متر) واقع شده است که بر روی آن گروه خامی به سن ژوراسیک قرار دارد. این گروه که شامل سازندهای سورمه، هیث، فهلیان، داریان و گدوان است، ستبرای میانگین ۱۰۸۶ متر دارد و عمدتاً از آهک و دولومیت، به همراه مقداری شیل در بخش‌های بالایی تشکیل شده است. گروه بنگستان پس از ۷۰ متر شیل‌های سازند کژدمی در قاعده از ۲۴۰ متر سنگ‌های آهکی مقاوم مربوط سازندهای سروک و ایلام تشکیل شده است. سازند شیلی و مارنی گورپی با ستبرای ۱۲۶ متر جوان‌ترین سازند کرتاسه است که توسط یک لایه کلیدی از سازند پابده به سن پالئوسن که از ۲۳۷ متر شیل و آهک تشکیل شده جدا می‌شود. بر روی سازند پابده، ۴۵۰ متر آهک و دولومیت‌های سازندهای آسماری و جهرم واقع شده‌اند. در بلندای قدیمی فارس تنها دو عضو از سازند گچساران حضور دارند که ستبرایی بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ متر از انیدریت، نمک و آهک را شامل می‌شوند.

سازند میشان به سن میوسن که تا حدود ۷۰۰ متر ستبرای دارد از شیل و در بخش‌های درونی‌تر از عضو آهکی گوری در قاعده تشکیل شده است. آهک گوری ستبرای متغیری تا حداکثر ۵۰۰ متر را در منطقه مطالعه از خود نشان می‌دهد. سازند آغاچاری در بلندای قدیمی فارس به حدود ۲۰۰۰ متر می‌رسد، که بیشترین میزان در پهنه فارس پس از منطقه بندرعباس است. این سازند از تناوب ماسه‌سنگ، سیلستون و مارن تشکیل شده است که در بخش‌های بالایی با کنگلومرا پوشیده می‌شوند. جوان‌ترین واحد سنگی در منطقه مطالعه سازند کنگلومرای بختیاری است که ستبرای بسیار متغیری از خود نشان می‌دهد. شکل ۳ رخنمون واحدهای سنگی را در محدوده بلندای قدیمی فارس نشان می‌دهد. تفاوتی در میزان برخاستگی ساختاری تاقدیس‌ها با تفاوت عمده در واحدهای رخنمون یافته در هسته آنها مشهود است. تاقدیس سورمه قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه را دارد (به استثنای اطراف

در مقیاس برش، تصویر شده است. میزان کوتاه‌شدگی در این برش ۸/۵ درصد پیشنهاد شده است. در برش‌های ارائه شده توسط (Oveisi, 2007) تمامی گسل‌ها شیب به سمت شمال داشته، با هندسه قاشقی از افق هرمز شروع می‌شوند و عمدتاً در سازند گچساران مستهلک می‌شوند. در حالی که لایه‌ها با هندسه‌ای مدور در فرادیواره گسل‌ها چین‌خورده‌اند، در فرودیواره مسطح در نظر گرفته شده‌اند که این هندسه بیشتر منطبق بر سازوکار چین‌های انتشار گسلی است. سازند گچساران با ستبرای قابل توجه به عنوان افق جدایش اصلی در میانه پوشش رسوبی در نظر گرفته شده است. میزان کوتاه‌شدگی در این برش‌ها بین ۵/۵ تا ۱۰ درصد پیشنهاد شده است. در برش ارائه شده توسط (Yamato et al., 2011) ژرفای پی سنگ در این برش بسیار متغیر در نظر گرفته شده است و دو پله مهم در راستای گسل‌های سورمه و پشانی کوهستان وجود دارند که عمده جابه‌جایی آنها در افق جدایش قاعده‌ای هرمز مستهلک شده و بخش کمی از جابه‌جایی به پوشش رسوبی منتقل شده است. ستبراشدگی قابل توجهی از واحدهای آگاجاری و بختیاری در حوضه مقابل گسل سورمه دیده می‌شود که با افزایش ژرفای پی سنگ در این منطقه همراه است. در حالی که سری هرمز ژرفای جدایش چین‌خوردگی در این برش است، هیچ افق جدایشی در میانه پوشش رسوبی در نظر گرفته نشده است. میزان کوتاه‌شدگی ۱۵ درصد پیشنهاد شده است.

در این نوشتار یک برش ساختاری ناحیه‌ای به طول ۱۳۲ و ژرفای ۱۲ کیلومتر، با راستای N037 در عرض پهنه بلندای قدیمی فارس رسم شده است (شکل‌های ۳ و ۷). برای رسم این برش، پیمایش صحرایی در طول مسیر برش انجام گرفت تا عناصر ساختاری موجود در سطح زمین برداشت شوند. در این برش همچنین از داده‌های چاه (چاه‌های آغار، دی و کنگان) و یک برش لرزه‌ای (به طول ۸۲ کیلومتر) نیز استفاده شده است. این برش بر اساس روش ارائه شده در بالا رسم شده است. در نهایت پس از بازگردانی برش زمین‌شناسی ناحیه‌ای، میزان کوتاه‌شدگی در راستای برش با فرض پایستگی طول لایه‌ها محاسبه شد. این برش با طول اولیه ۱۵۴ کیلومتر و طول نهایی ۱۳۲ کیلومتر، میزان کوتاه‌شدگی ۲۲ کیلومتر معادل ۲۰ درصد را نشان می‌دهد. این برش در مسیر خود از شمال خاور به جنوب باختر به ترتیب تاقدیس‌های نورا، آغار، سورمه، کلاغ، دی، شاهینی، پازن (باختری)، نار و کنگان را به صورت عرضی در بر می‌گیرد (شکل ۷).

تاقدیس نورا (میمند)، یک تاقدیس نامتقارن است که شیب پهلوی جنوبی آن بیشتر است. قدیمی‌ترین واحد رخنمون یافته در هسته این تاقدیس کربنات‌های گروه بنگستان هستند. ژرفای جدایش این تاقدیس حدود ۸ کیلومتر برآورد شده است. تاقدیس آغار خاوری یک تاقدیس باز با طول موج بلند و نسبتاً متقارن است. هندسه سطحی این تاقدیس که با رخنمون سازند آهکی آسماری مشخص می‌شود، از چهار محدوده شیب تشکیل شده است که توسط نواحی لولایی مدور از هم جدا می‌شوند. چاه آغار ۱۴ که در رأس تاقدیس حفاری شده و تا کربنات‌های پرمین پایین رفته است، ستبرایی نرمال را برای سازندهای حفاری شده نشان می‌دهد. تاقدیس سورمه یک چین بسته و نامتقارن با زاویه بین پهلویی حدود ۶۵ درجه است (شکل ۸-الف). واحدهای پرمین زیرین در هسته تاقدیس سورمه رخنمون یافته‌اند که قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی در منطقه بلندای قدیمی فارس را تشکیل می‌دهند (به استثنای اطراف گنبد‌های نمکی). رخنمون واحدهای قدیمی در هسته تاقدیس سورمه به علت برخاستگی ساختاری زیاد است که می‌تواند توسط گسل پی سنگی سورمه به پوشش رسوبی اعمال شده باشد. تاقدیس کیلاغ در جنوب تاقدیس سورمه و در فرودیواره گسل سورمه واقع شده است. این چین یک هندسه فشرده با زاویه بین پهلویی حدود ۵۰ درجه و طول موج کوتاه را نشان می‌دهد. تاقدیس کیلاغ به طور کامل بر روی افق تخیلی میانی سازند دشتک، جدایش یافته است و جابه‌جایی محوری حدود سه کیلومتر به سمت پیش‌بوم در واحدهای مزوزویک نسبت به واحدهای پیش از

ساختاری ناحیه‌ای استفاده شد. نخست برای لایه‌هایی که از نظر مکانیکی مقاوم هستند و در طول دگرشکلی ستبرای آنها تغییر نمی‌کند، موازنه بر اساس قانون پایداری طول لایه‌ها انجام شد. دوم برای سازند نمکی هرمز و سازند انیدریتی دشتک که از نظر مکانیکی افق‌هایی شکل‌پذیر هستند و ستبرای آنها در طول دگرشکلی به شدت تغییر می‌کند، موازنه بر اساس قانون ثابت بودن مساحت واحدها انجام گرفت (Groshong, 2006). نکته مهم دیگر در موازنه برش‌های ساختاری، انتخاب صحیح محل loose line و pin line بود. این خطوط باید عمود بر لایه‌بندی در جایی خارج از محدوده تاقدیس‌ها که لایه‌ها افقی هستند قرار داده شوند. لولای ناودیس‌های مجاور در انتهای شمالی و جنوبی برش برای این منظور انتخاب شدند. در نهایت پس از بازگردانی برش زمین‌شناسی ناحیه‌ای، میزان کوتاه‌شدگی در راستای برش با فرض پایستگی طول لایه‌ها محاسبه شد.

۵- برش ساختاری ناحیه‌ای

پیش از این دوازده برش ساختاری در مقیاس ناحیه‌ای از پهنه فارس در مقالات بین‌المللی منتشر شده‌اند که از این میان شش برش در نزدیکی مسیر برش ارائه شده در این نوشتار هستند (شکل ۶). در برش ارائه شده توسط (McQuarrie, 2004) تمامی گسل‌ها شیب به سمت شمال دارند. بیشتر تاقدیس‌ها با یک راندگی در یال جنوبی خود همراه هستند که بیشتر منطبق با مدل چین‌های انتشار گسلی است. هر دو سبک متفاوت دگرریختی نازک پوسته و ستبر پوسته با درگیری پی سنگ پیشنهاد شده است که در این موارد خود پی سنگ نیز چین‌خورده و رورانده شده است. سری هرمز به عنوان افق جدایش در قاعده پوشش رسوبی نشان داده شده است اما افق جدایش میانی در هندسه چین‌ها در نظر گرفته نشده است. بر اساس بازگردانی و ترازمند کردن برش حدود ۲۰ درصد کوتاه‌شدگی در پهنه فارس محاسبه شده است. در برش‌های ارائه شده توسط (Letouzey & Sherkati, 2004) و (Sherkati et al., 2006) پله‌هایی در پی سنگ در نتیجه عملکرد گسل‌های پی سنگی پیشنهاد شده‌اند که ژرفای تراز ناودیس‌ها در فرودیواره آنها نسبت به فرادیواره افت دارد. سازند دشتک به عنوان یک افق جدایش میانی در پوشش رسوبی نشان داده شده است که به صورت محلی اهمیت پیدا می‌کند. بیشتر تاقدیس‌ها با یک گسل راندگی در پهلوی جنوبی خود همراه هستند، هر چند در تاقدیس‌هایی که هندسه متقارن دارند پس راندگی‌ها توسعه یافته‌اند. بسیاری از راندگی‌های اصلی با راندگی‌های میانبزر فرودیواره‌ای فرعی همراه هستند که در افق‌های میانی مستهلک می‌شوند. سری هرمز به عنوان افق جدایش در قاعده پوشش رسوبی نشان داده شده است. میزان کوتاه‌شدگی در این برش‌ها حدود ۱۷ درصد پیشنهاد شده است. در برش ارائه شده توسط (Alavi, 2007) گسل‌ها شیب به سمت شمال، آرایش دوپلکسی و هندسه فلت-رمپ-فلت دارند. لایه‌ها در فرودیواره گسل‌ها کاملاً مسطح در نظر گرفته شده‌اند و سازوکار دگرریختی عمدتاً از نوع چین‌های خم گسلی در نظر گرفته شده است. اگر چه در بیشتر تاقدیس‌های با طول موج بلند پی سنگ به صورت چین‌خورده و با هندسه هارمونیک با پوشش رسوبی در هسته چین دیده می‌شود، در برخی تاقدیس‌ها نمک هرمز ژرفای جدایش چین‌خوردگی است. سازند دشتک به عنوان افق جدایش میانی محلی در نظر گرفته شده است به گونه‌ای که در مواردی واحدهای بالایی چین‌خورده خود را به طور کامل از لایه‌های مسطح زیرین جدا می‌نماید. میزان کوتاه‌شدگی ۲۷ درصد پیشنهاد شده است. در برش ارائه شده توسط (Motamedi, 2008) پله‌هایی در پی سنگ در راستای گسل‌های تقریباً قائم در نظر گرفته شده‌اند که تغییر چندانی در ژرفا و شیب پی سنگ ایجاد نکرده‌اند. چین‌ها بر روی نمک هرمز که به طور قابل توجهی در هسته تاقدیس‌ها ستبر شده شکل گرفته‌اند. سازند دشتک به طور محلی ستبر شده و به عنوان افق جدایش میانی عمل کرده است. ارتباط بین تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها بدون توسعه گسل در پهلوها و یا با ایجاد گسل‌های بدون جابه‌جایی قابل مشاهده

دارد. این افق جدایش در برش‌های لرزه‌ای تفسیر شده نیز قابل مشاهده است. برش‌های لرزه‌ای ژرفای ۸-۱۲ کیلومتر را برای افق جدایش چین‌خوردگی در منطقه نشان می‌دهد. این مقادیر با ژرفای پی سنگ که بر اساس داده‌های مغناطیس‌هوایی محاسبه شده است (Tabatabai, 1997) همخوانی دارد. این همخوانی مشخص می‌کند که افق جدایش اصلی در قاعده پوشش رسوبی و بر روی پی سنگ واقع شده است. بر پایه این مشاهدات، بسیاری از تاقدیس‌ها در بلندای قدیمی فارس بر روی یک افق جدایش مؤثر قاعده‌ای و با سازوکار جدایشی چین‌خورده‌اند. سری هرمز به سن اینفراکامبرین یا معادل‌های جانبی آن، به عنوان افق پوشاننده پی سنگ برای پهنه فارس پیشنهاد شده‌اند (Jackson, 1980; Berberian, 1995; Talbot & Alavi, 1996). در بخش‌های مرکزی و جنوبی بلندای قدیمی فارس هیچ گنبد نمکی در سطح رخنمون ندارد (شکل ۳)، در حالی که در بخش باختری منطقه در تاقدیس‌های کوه نمک و تاقدیس خورموج و همچنین در شمال منطقه در تاقدیس‌های فیروزآباد، جبهانی و بهار، سری هرمز در سطح دیده می‌شوند. هرچند برخی از نویسندگان نبود رخنمون گنبد‌های نمکی در بخش مرکزی بلندای قدیمی فارس را به معنی نبود سری هرمز در قاعده پوشش رسوبی در نظر گرفته‌اند (Bahroudi & Koyi, 2003)، بیشتر پژوهشگران دلایلی چون کاهش ستبرای سری هرمز در بلندا و یا تغییر رخساره آن به اندریت را پیشنهاد کرده‌اند (Fürst, 1976; Kent, 1979; Jahani, 2008; Talbot & Alavi, 1996).

افزون بر این، در پهلوهایی برخی تاقدیس‌های منطقه مطالعه گسل‌های راندگی توسعه یافته است. این هندسه ساختاری مشابه چین‌های جدایشی گسلیده است (Mitra, 2002 & 2003). این چین‌ها زمانی توسعه می‌یابد که ابتدا چین بر روی افق جدایش شکل‌پذیر در قاعده پوشش رسوبی (مانند سری هرمز) ایجاد شده و سپس در نتیجه تمرکز دگرشکلی گسل‌ها در پهلوی آن توسعه می‌یابند. شواهدی که بر اساس آنها می‌توان چنین سازوکاری (چین‌خوردگی جدایشی گسلیده) را برای منطقه بلندای قدیمی فارس پیشنهاد کرد عبارتند از (۱) در زیر بیشتر راندگی‌های توسعه یافته در پهلوی چین‌ها، ناودیس‌های فرودپایه‌ای تشکیل شده‌اند (شکل ۷، ۲). میزان جابه‌جایی در راستای گسل راندگی در پهلوی چین نسبت به میزان توسعه‌یافتگی چین ناچیز است (شکل ۷)، که نشان می‌دهد بیشتر فرایند چین‌خوردگی پیش از ایجاد گسل انجام شده است. (۳) در منطقه مطالعه تاقدیس‌هایی که کوتاه‌شدگی بیشتری دارند به طور میانگین طول موج کوتاه‌تری از خود نشان می‌دهند. در چین‌های انتشارگسلی طول موج تاقدیس با جابه‌جایی بیشتر بر روی گسل و همزمان با رشد چین افزایش می‌یابد (Suppe, 1983; Suppe & Medwedeff, 1990). در حالی که در چین‌های جدایشی و جدایشی گسلیده با افزایش میزان کوتاه‌شدگی طول موج تاقدیس‌ها کاهش می‌یابد (Mitra, 2002 & 2003). چنین تحلیلی برای منطقه بلندای قدیمی فارس با معیارهای ارائه شده توسط Mitra (2002 & 2003) در مورد چین‌خوردگی جدایشی گسلیده همخوان است.

افزون بر این افق جدایش اصلی در قاعده، یک افق جدایش مهم دیگر در میانه پوشش رسوبی منطقه بلندای قدیمی فارس دیده می‌شود. همانگونه که الگوی واگرایی بازتابنده‌های لرزه‌ای (شکل ۸-ب) و داده‌های چاه‌های حفاری شده در منطقه نشان می‌دهند، تبخیری‌های سازند دشتک به سن تریاس در محل رأس برخی از تاقدیس‌ها (مانند تاقدیس‌های کلاغ، دی و پازن) افزایش ستبرای زمین‌ساختی داده‌اند. این افزایش ستبرا در مواردی (مانند تاقدیس دی) با جابه‌جایی محل محور تاقدیس در افق‌های سطحی نسبت به افق‌های مخزنی ژرف شده است. این تغییر در هندسه چین و محل رأس تاقدیس در راستای افق جدایش، می‌تواند انتخاب محل حفاری برای گاز را مشکل‌تر کند. با این وجود، همانطور که هندسه تاقدیس‌های آغار، نورا و سورمه نشان می‌دهد، اهمیت نهشته‌های تریاس به عنوان افق جدایش ساختاری، در شمال خاور گسل سورمه به سمت مناطق داخلی‌تر پهنه فارس کاهش می‌یابد. این تغییر سبک چین‌خوردگی موازی با تغییر جانبی رخساره نهشته‌های

تریاس در برش لرزه‌ای دیده می‌شود. احتمالاً توسعه یک راندگی میانبر فرودپایه‌ای در افق جدایش میانی، هندسه دوپلکسی را در محدوده تاقدیس کلاغ ایجاد کرده است. تاقدیس دی یک چین نامتقارن با میل به سمت جنوب و زاویه بین پهلویی ۱۲۰ درجه است. چاه دی-۱ در پهلوی شمالی تاقدیس، جایی که شیب لایه‌ها ۱۵ درجه به سمت شمال است حفاری شده است. داده‌های شیب‌سنجی در داخل چاه جهت‌یابی تقریباً افق را در تراز گروه دهرم نشان می‌دهند. این تغییر شیب در راستای سازند دشتک اتفاق می‌افتد به گونه‌ای که جابه‌جایی محوری رأس سازند دشتک نسبت به رأس گروه دهرم حدود ۱۱۰۰ متر به سمت پیش‌بوم است. ستبرای حفاری شده از سازند دشتک در این چاه ۱۳۳۰ است که با فرض ستبرای اولیه ۸۵۰ متر، ستبراشدگی زمین‌ساختی ۴۸۰ متر دارد. تاقدیس هالگان در راستای امتداد شمال باختر- جنوب خاور خود گسترش بسیار زیادی دارد (شکل ۳) و هندسه آن در بخش‌های مختلف تفاوت دارد. بخشی از تاقدیس هالگان که در مسیر برش ناحیه‌ای قرار دارد هندسه نامتقارن و باز با طول موجی بلند از خود نشان می‌دهد. بخش‌های بالایی سازند میشان قدیمی‌ترین رخنمون‌ها در رأس این تاقدیس هستند. گسل نظام‌آباد که یک پهنه گسلی با طول تجمعی طول بیش از ۱۵۰ کیلومتر، راستای N060 و جابه‌جایی جوان چپ‌بر است، در محدوده این تاقدیس از برش ناحیه‌ای عبور می‌کند. گسل نظام‌آباد به صورت چند شاخه شکستگی در برش لرزه‌ای نمود پیدا کرده است که جدایش شیب‌لغز قابل ملاحظه‌ای در راستای آنها دیده نمی‌شود. تاقدیس هالگان با یک دشت که رود مند نیز از آن می‌گذرد، از تاقدیس پازن در جنوب جدا شده است. دماغه باختری تاقدیس سفید با وجود اینکه در مسیر برش در سطح رخنمونی ندارد، در برش لرزه‌ای به صورت یک چین با ابعاد کوچک دیده می‌شود. در حالی که تاقدیس پازن یک هندسه نسبتاً متقارن با زاویه بین پهلویی حدود ۹۰ درجه در سطح نشان می‌دهد، در ژرفای با یک ناودیس باز در پهلوی شمالی و با یک ناودیس فشرده در پهلوی جنوبی محدود می‌شود. برش لرزه‌ای از تاقدیس پازن، یک واگرایی در الگوی بازتابنده‌ها در قاعده و رأس واحدهای تبخیری تریاس نشان می‌دهد که بیانگر ستبر شدن این واحدها در منطقه لولایی چین است (شکل ۵). تاقدیس کنگان که جنوبی‌ترین ساختار در مسیر برش است، در پیشانی کمر بند چین‌خورده- رانده زاگرس، در مجاورت حوضه پیش‌بوم و در فرادپایه گسل پیشانی کوهستان واقع شده است (شکل ۸-ب). این ساختار یک تاقدیس برجسته و بزرگ با بستگی ساختاری مناسب است که حاوی بزرگ‌ترین میدان گازی ایران در خشکی است. تاقدیس کنگان در بخش‌های سطحی یک هندسه هم‌مرکز تاج‌جبه‌ای از خود نشان می‌دهد. چاه کنگان شماره ۱ که در منطقه لولایی پهن تاقدیس حفر شده است ستبرایی عادی از واحدهای توالی رسوبی نشان می‌دهد. در بخش‌های مرکزی تاقدیس کنگان یک چین جدایشی به نام تاقدیس حاجی احمد با سبک گوش- خرگوشی در پهلوی شمالی تاقدیس شکل گرفته است بر اساس ابعاد این تاقدیس می‌توان ژرفای جدایش آن را به سازند دشتک و یا شیل‌های پالئوزوئیک نسبت داد.

۶- بحث

در این بخش بر اساس داده‌ها، اطلاعات و برش‌های ساختاری ارائه شده در بخش‌های ۳، ۴ و ۵ عملکرد افق‌های جدایشی و تأثیر آن بر سازوکار چین‌خوردگی، نقش پی سنگ در دگرشکلی پوشش رسوبی و همچنین میزان کوتاه‌شدگی در عرض پهنه فارس مورد بحث قرار می‌گیرند.

۶-۱. افق‌های جدایشی و سازوکار چین‌خوردگی

هندسه متقارن بسیاری از تاقدیس‌ها در بلندای فارس و توسعه پس‌راندگی‌ها در پهلوی شمالی آنها (مانند تاقدیس‌های پازن، کنگان و هالگان)، به عبارتی توسعه ساختارهایی که تمایل به سمت پس‌بوم دارند، نشان می‌دهد که یک افق جدایش مؤثر با گرانروی و اصطکاک کم در قاعده واحدهای در حال چین‌خوردگی حضور

درصدی پیشنهاد شده برای پهنه فارس (McQuarrie, 2004; Sherkaty et al., 2006; Yamato et al., 2011) مطابقت دارد.

۷- نتیجه‌گیری

- سازوکار غالب تشکیل چین‌ها در بلندای قدیمی فارس، چین‌خوردگی جدایشی و به دنبال آن چین‌خوردگی جدایشی گسلیده است. چین‌ها بر روی یک افق شکل‌پذیر در ژرفای بین ۸-۱۲ کیلومتر جدایش می‌یابند که می‌تواند سری هرمز یا معادل‌های جانبی آن باشد. این افق پوشش رسوبی چین‌خورده و متعاقباً گسلیده را از پی سنگ صلب عمدتاً گسلیده جدا می‌کند.

- رسم برش ترازمند ساختاری نشان داد که سبک چین‌خوردگی در منطقه بلندای قدیمی فارس در دو جهت دچار تغییر می‌شود: الف) در عرض منطقه از سمت فارس داخلی در بخش‌های درونی‌تر به سمت تاقدیس‌های ساحلی در بخش پیشانی و ب) در جهت قائم از سطح زمین تا ترازهای ژرف در پوشش رسوبی. این تغییرات موازی با و احتمالاً متأثر از تغییر در ویژگی‌های مکانیکی واحدهای سنگی در حال چین‌خوردگی روی می‌دهند.

- نهشته‌های تبخیری سبک تریاس (سازند دشتک) با افزایش سبک‌ترین زمین‌ساختی تا بیش از دو برابر سبک‌ترین اولیه، یک افق جدایش مؤثر را در میانه پوشش رسوبی تشکیل می‌دهند که در برخی ساختارها هندسه توالی پس از تریاس را از مخازن گازی پرموتریاس جدا کرده است. تغییر در هندسه چین و محل رأس تاقدیس در راستای افق جدایش، انتخاب محل حفاری اکتشافی برای گاز را مشکل می‌کند. اهمیت نهشته‌های تریاس به عنوان افق جدایش در شمال گسل سورمه به سمت مناطق داخلی پهنه فارس احتمالاً به دلیل تبدیل جانبی به دولومیت‌های سازند خانه‌کت از بین می‌رود.

- با استناد به الف) افت ناگهانی در تراز ناودیس‌ها؛ ب) رخنمون نواری واحدهای قدیمی‌تر از کرتاسه که در برابر آنها سبک‌ترین قابل توجهی از رسوبات تخریبی همزمان با زمین‌ساخت نهشته شده است و ج) روندهای لرزه‌خیزی حداقل دو گسل پی سنگی معکوس (سورمه و پیشانی کوهستان) در دگرریختی پوشش رسوبی در بلندای قدیمی فارس تحلیل شده است.

- بازگردانی و موازنه برش ساختاری ناحیه‌ای نشان داد که میزان کوتاه‌شدگی حاصل از چین‌خوردگی و گسلش در عرض بلندای قدیمی فارس حدود ۲۰ درصد است که با مقادیر ۱۵ تا ۲۰ درصدی پیشنهاد شده برای پهنه فارس مطابقت دارد.

سپاسگزاری

از واحد تحقیق و توسعه مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران به خاطر پشتیبانی کامل این مطالعه قدرانی می‌شود. همچنین از آقایان دکتر سلمان جهانی، مهندس محمدحسن گودرزی و دکتر امیلیو کاشیلو به دلیل نظرات فنی سازنده آنها در طول مطالعه سپاسگزاری می‌شود.

تریاس از سازند تبخیری دشتک به سازند دولومیتی خانه‌کت در فارس داخلی اتفاق می‌افتد (Szabo & Kheradpir, 1978).

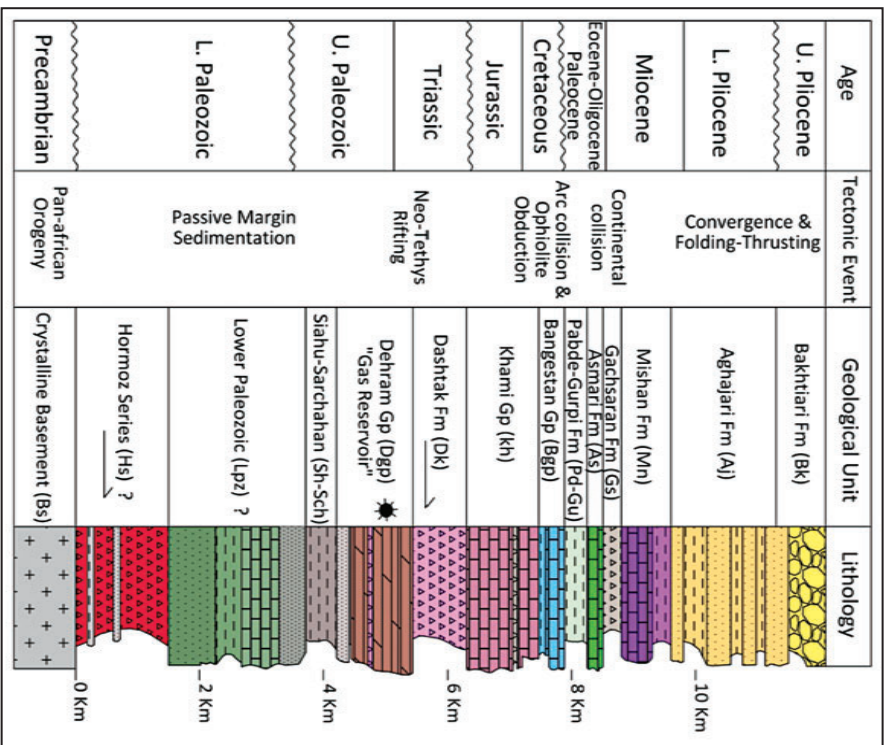
۶-۲. نقش گسل پی سنگی بر دگرریختی پوشش رسوبی

در برش ساختاری ناحیه‌ای ارائه شده در این مقاله ژرفای پی سنگ بین ۸ تا ۱۲ کیلومتر متغیر است (شکل ۷). این مقادیر با ژرفای پی سنگ که بر اساس داده‌های مغناطیس‌هوایی محاسبه شده است (Tabatabai, 1997) همخوانی دارد. افت تراز ناودیس‌ها وجود حداقل دو پله در پی سنگ را نشان می‌دهد. این تراز از حدود ۳۳۰۰ متر ژرفا برای گروه دهرم در شمال گسل سورمه به ۶۸۰۰ متر ژرفا برای گروه دهرم در جنوب گسل تغییر می‌یابد که نشان می‌دهد تراز ناودیس‌ها در فرودیواره گسل سورمه حدود ۳۵۰۰ متر نسبت به فرادیواره آن افت دارد. این میزان بیانگر جدایش قائم در راستای گسل سورمه است که با فرض شیب ۵۰ درجه (بر اساس سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها) برای این گسل، میزان جابه‌جایی شیب‌لغز حدود ۴۳۰۰ متر را پیشنهاد می‌کند. پله دوم با حدود ۲۵۰۰ متر افت تراز ساختاری در راستای گسل پیشانی کوهستان واقع شده است و جابه‌جایی حدود ۳۰۰۰ متر را برای این گسل پیشنهاد می‌کند.

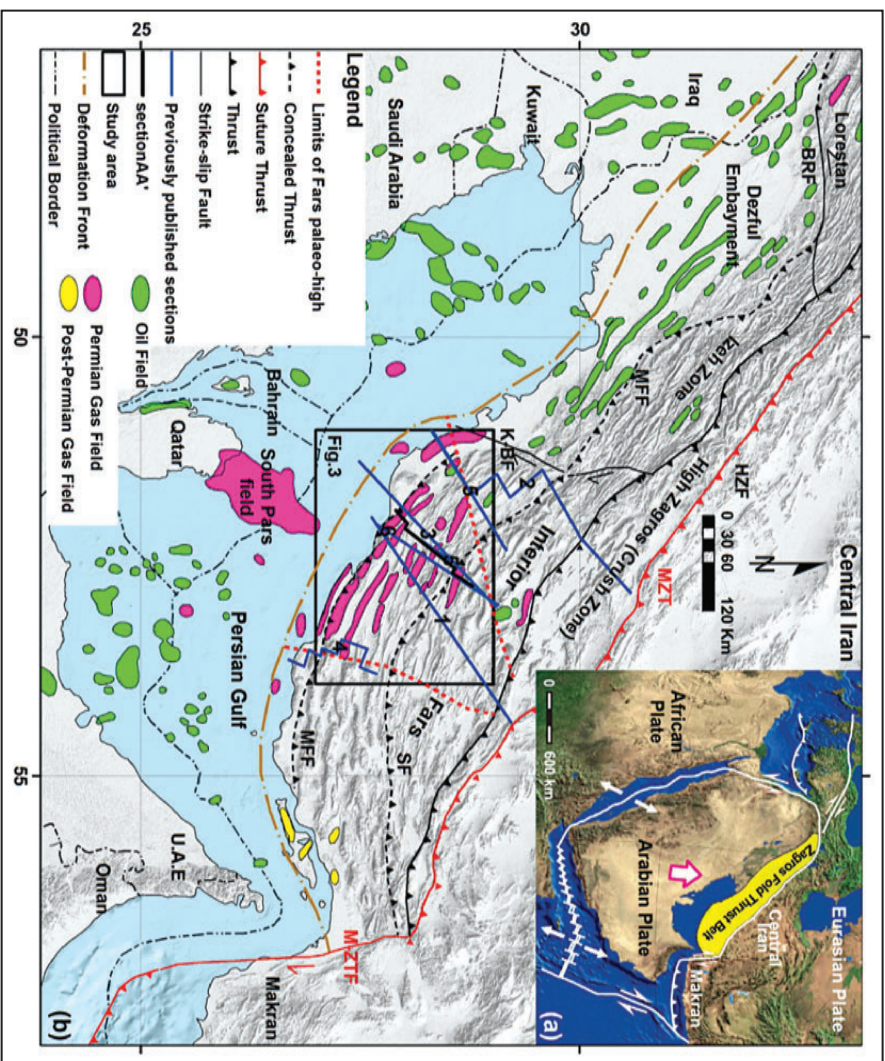
افزون بر این همانطور که نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه نشان می‌دهد (شکل ۲)، رخنمون واحدهای کهن‌تر از کرتاسه به صورت دو نوار دیده می‌شوند که در سمت جنوب آنها واحدهای نهشته شده همزمان با زمین‌ساخت (سازندهای آغاجاری و بختیاری) به‌طور قابل توجهی رخنمون دارند. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های مستخرج از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های زاگرس (Harvard CMT solution) که بر روی نقشه پیاده شده‌اند روندهایی از لرزه‌خیزی با سازوکار معکوس موازی روند عمومی ساختارها را نشان می‌دهند (شکل ۲). انطباق روند با زمین‌لرزه‌های رخدادده با رخنمون نواری واحدهای کهن‌تر از کرتاسه که در برابر آنها حوضه‌هایی از رسوبات همزمان با زمین‌ساخت وجود دارد، می‌تواند نشانگر عملکرد گسل‌های معکوس پی سنگی در این روندها باشد. محل این گسل‌ها با محل تغییر ناگهانی در تراز ناودیس‌ها منطبق است.

۶-۳. برآورد کوتاه‌شدگی

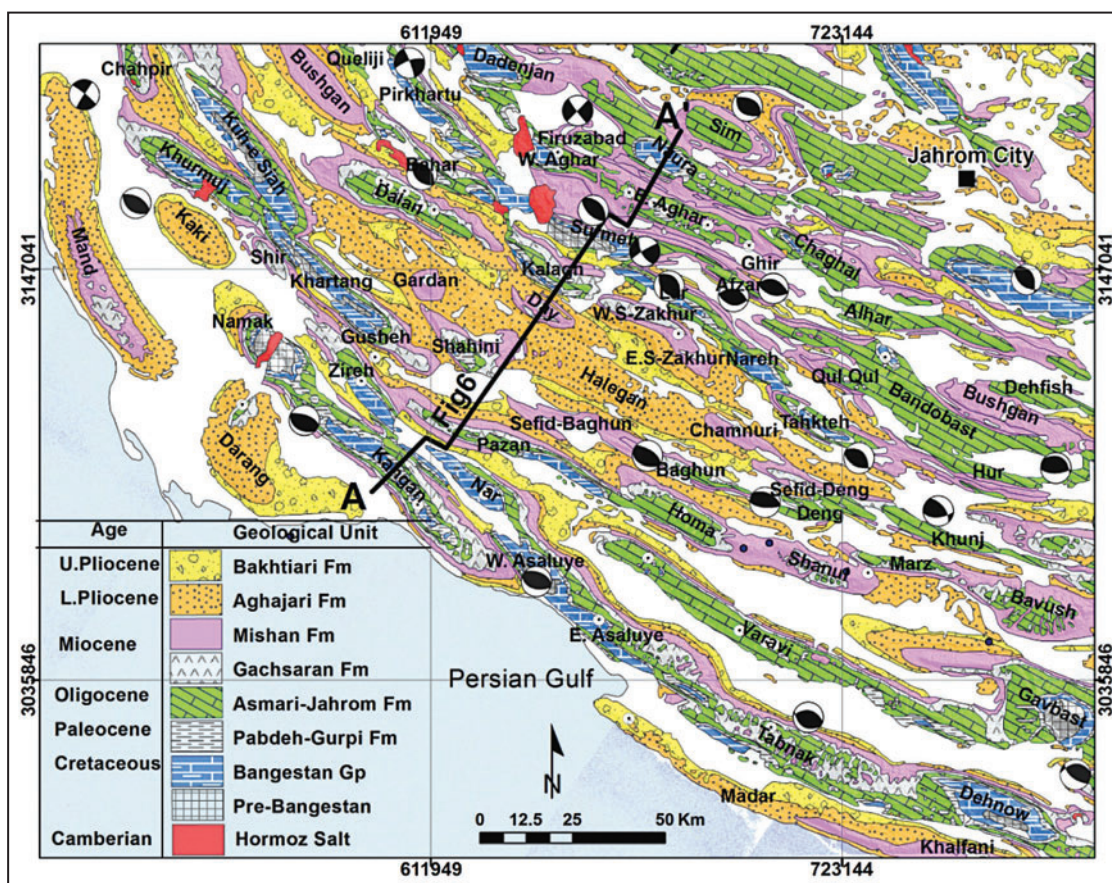
مطالعات پیشین با بازگردانی و موازنه برش‌های ساختاری در عرض بلندای قدیمی فارس مقادیر متفاوتی کوتاه‌شدگی ساختاری از حدود ۸ درصد تا حدود ۳۰ درصد را برای رسوبات چین‌خورده این منطقه پیشنهاد کرده‌اند. در برش‌هایی که رابطه بین تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها بدون توسعه راندگی‌های پهلویی در نظر گرفته شده است (Motamedi, 2008) و یا هندسه ناودیس‌ها بدون دگرریختی و سطح منظور شده (Oveisi, 2007)، کوتاه‌شدگی کمتر از ۱۰ درصد برآورد شده است (شکل ۶). در مقابل مطالعاتی که جابه‌جایی‌های زیاد برای راندگی‌ها و هندسه‌های دوپلکسی برای ساختارها در نظر گرفته‌اند، میزان کوتاه‌شدگی در حدود ۳۰ درصد پیشنهاد می‌کنند (Alavi, 2007). بازگردانی و موازنه برش ساختاری ناحیه‌ای ارائه شده در مطالعه حاضر (شکل ۷) کوتاه‌شدگی حاصل از چین‌خوردگی و گسلش در عرض بلندای قدیمی فارس را حدود ۲۰ درصد نشان می‌دهد. این میزان با مقادیر ۱۵ تا ۲۰



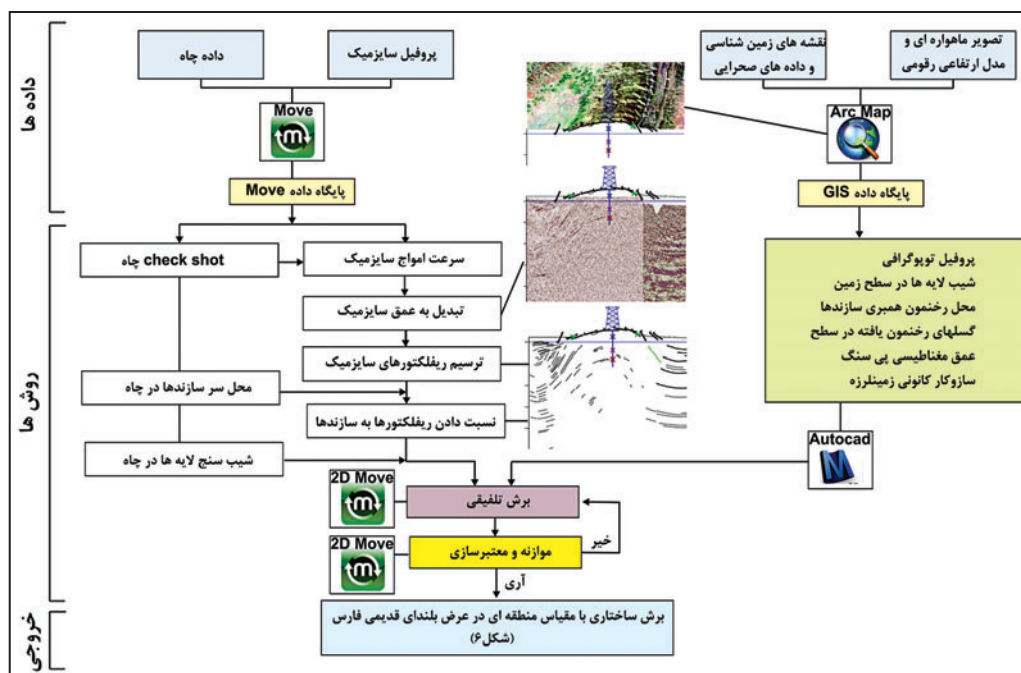
شکل ۲- ستون چینه‌شناسی پوشش رسوبی در بلندی قدیمی فارس (James & Wynd, 1965; Szabo & Kharaqir, 1978; Chavidel, 1996). این ستون بر حسب ستیری واحدها است که با عملیات صحرایی برای واحدهای جوان‌تر از کرنا، داده‌های چاه‌های جاری شده تا ژرفای پالئوزوئیک بالایی و گزارش‌های چینه‌شناسی برای واحدهای پالئوزوئیک زیرین به دست آمده است.



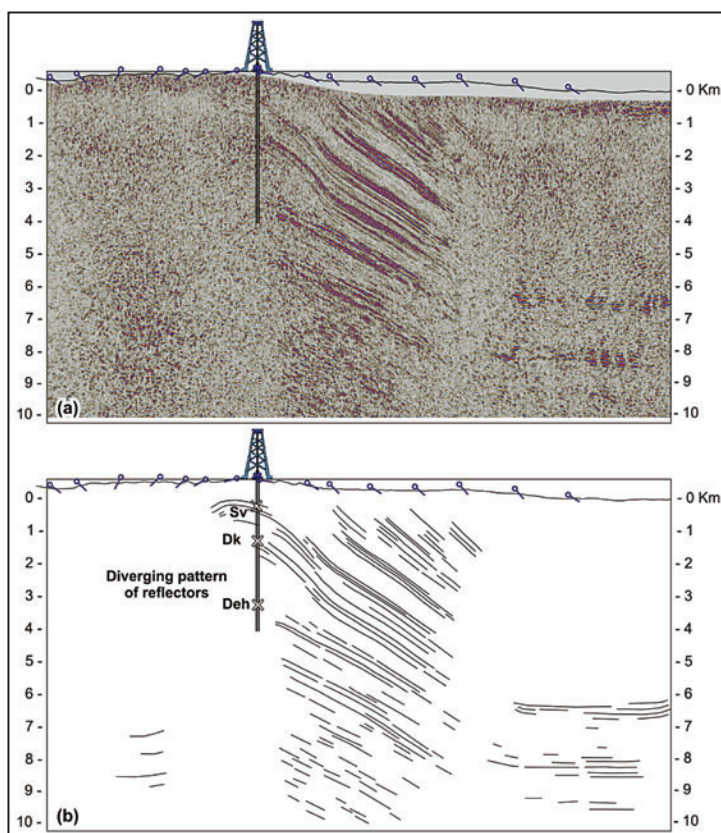
شکل ۱- الف) نقشه زمین‌ساختی از کمربند چین‌خورده و رانده زاگرس که در حاشیه شمال خاوری ورق عربی واقع شده است؛ ب) نقشه ساختاری از جنوب خاور کمربند زاگرس و تقسیمات آن (Seppehr & Cosgrove, 2004). و همچنین گسل‌هایی که مرز بهینه‌های ساختاری هستند شامل: MZT=Main; Zagros Thrust, HZF=High Zagros Fault, BR=Baland Fault, MFF: Mountain Front Fault, K-BF=Kazerun-Borazjan Fault, SF=Sumeh Fault, Zagros transfer Fault, M-ZTF=Minab-Zendan transfer Fault. مستطیل سیاه‌رنگ، موقعیت منطقه مطالعه این نوشتار را نشان می‌دهد که در بلندی قدیمی فارس واقع شده است. همچنین موقعیت میدان‌های گازی و نفتی که بر روی نقشه نشان داده شده است. به ترتیب زمانی از بهینه فارس مرکزی، به ترتیب زمانی ۱ تا ۶ به شرح زیر بر روی شکل نشان داده شده‌اند: 1= McQuarrie, 2004-section, 2=Leitzyev & Sherkat, 2004; Sherkat et al., 2006; 3=Alavi, 2007-section E; 4=Moranedi, 2008-section A; 5= Oveisi, 2007-section A & C; 6=Yamato et al., 2011



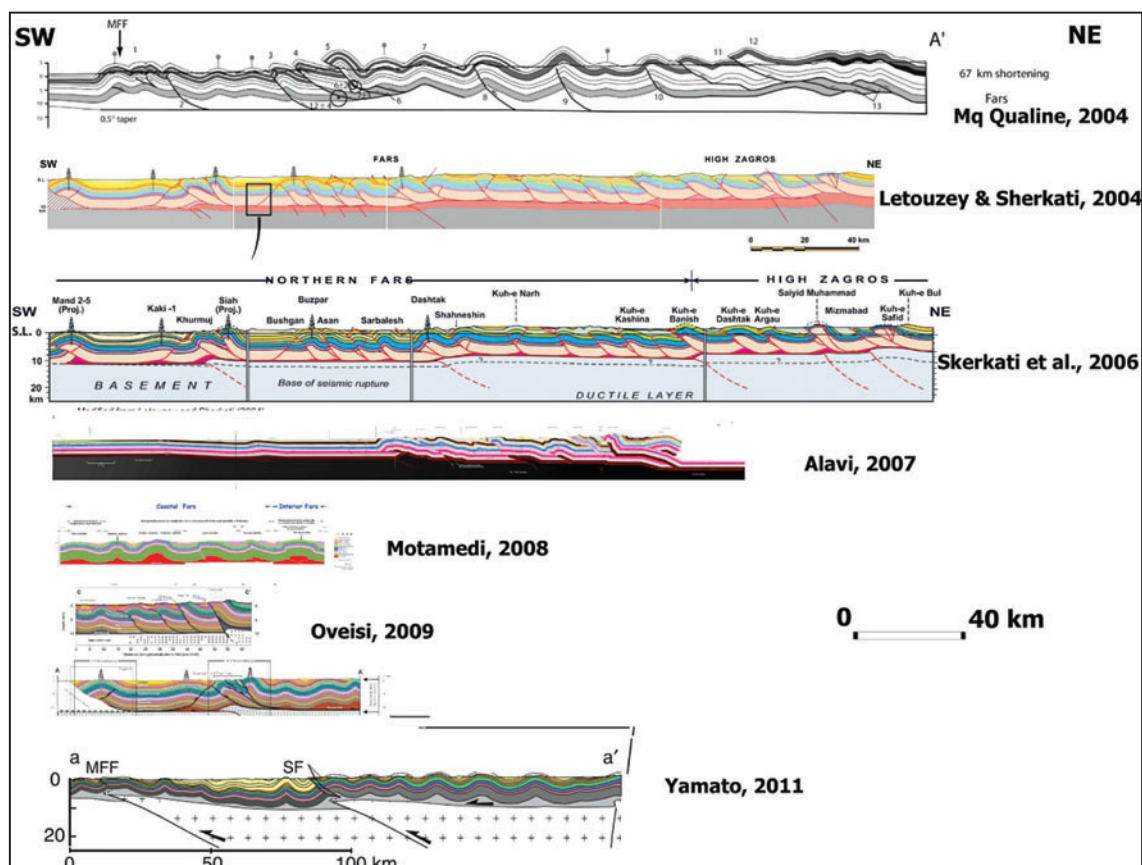
شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی پهنه بلندای قدیمی فارس (پیشانی فارس مرکزی) که با تغییراتی جزئی از نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ شرکت ملی نفت ایران اقتباس شده است. تاقدیس‌های نورا، آغار، سورمه، کلاغ، دی، هالگان، گردان، پازن، کنگان، دارنگ، لار، سفیدزاخو، خاوری، سفیدزاخو، باختری، سفید باغون، پازن، نار، تخته، نره، چمنوری، باغون، هما، وراوی، عسلویه باختری، عسلویه خاوری، سفید، دنگ، شانول، تابناک و مدار در منطقه مطالعه واقع شده‌اند. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها (Harvard CMT Solution) بر روی نقشه نشان داده شده است. موقعیت برش ساختاری ناحیه‌ای رسم شده (برش AA' در شکل ۷) نیز بر روی نقشه مشخص شده است.



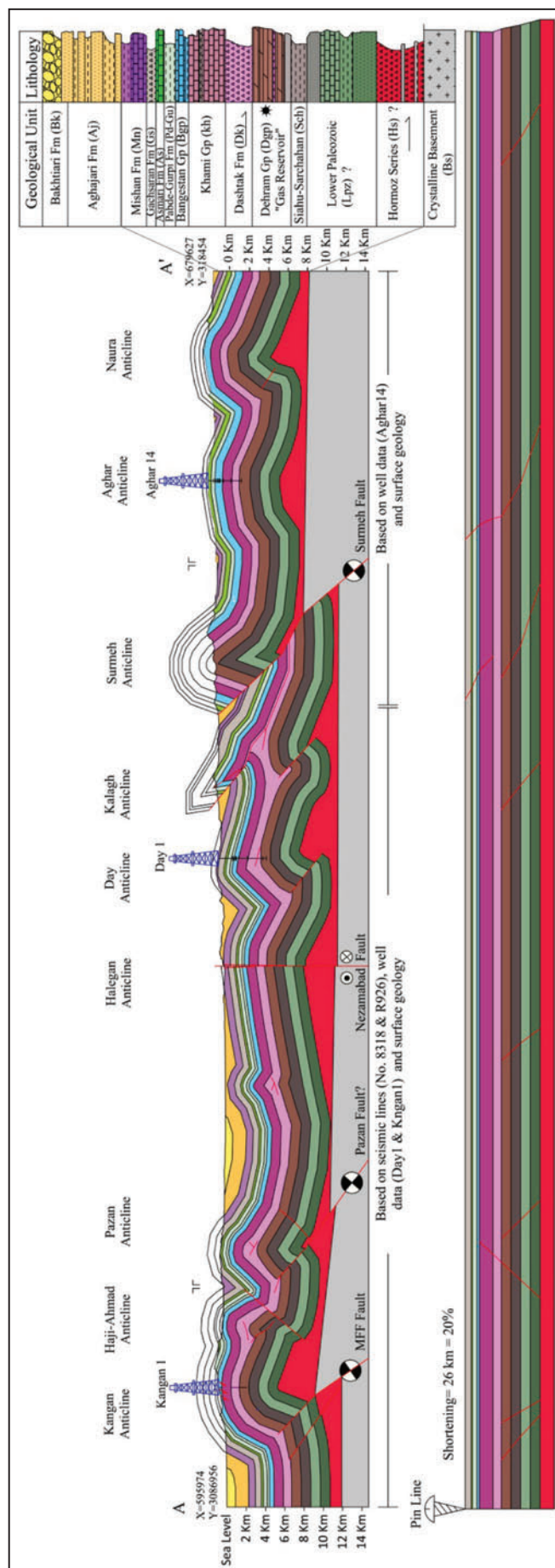
شکل ۴- نموداری از ساختار این مطالعه که ارتباط بین داده‌های استفاده شده، روش‌های به کار گرفته شده و خروجی به دست آمده را نشان می‌دهد (Najafi et al., 2012).



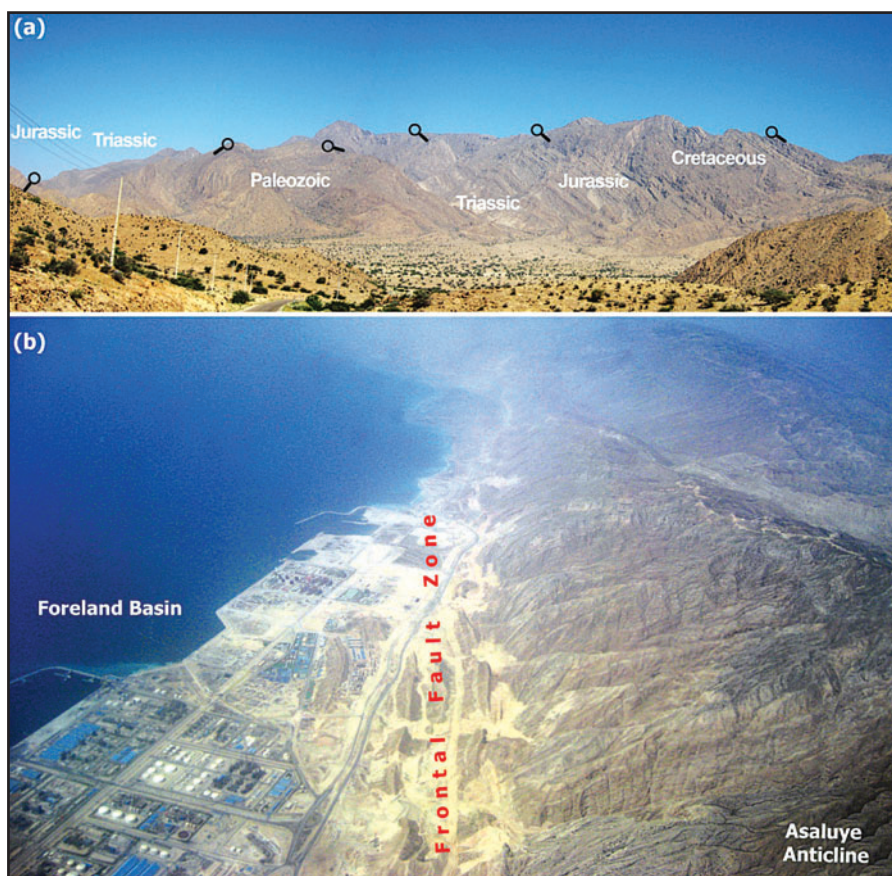
شکل ۵- الف) برش لرزه‌ای تبدیل به ژوفا شده در محدوده تاقدیس پازن و ناودیس‌های مجاور آن؛ ب) نمونه‌ای از "برش داده" که در محدوده تاقدیس پازن و ناودیس‌های مجاور آن تهیه شده است. مهم‌ترین اطلاعات موجود بر روی هر برش داده شامل خطوط رسم شده بر روی برش لرزه‌ای که بازتابنده‌های شاخص را نشان می‌دهند؛ محل سر سازندها در چاه؛ و جهت‌یابی لایه‌بندی در سطح هستند. برش ساختاری در طول مسیر خود بر روی برش داده رسم شده است.



شکل ۶- برش‌های ناحیه‌ای منتشر شده پیشین از پهنه مرکزی فارس که در نزدیکی برش ارائه شده در این نوشتار واقع شده‌اند. موقعیت این برش‌ها در نقشه ارائه شده در شکل ۱ مشخص شده است. به منظور مقایسه بهتر همه برش‌ها در یک مقیاس ارائه شده‌اند.



شکل ۷- برش ساختاری به طول ۱۳۲ کیلومتر در عرض منطقه بلندای قدیمی فارس. مسیر برش بر روی شکل‌های (۳) نشان داده شده است.



شکل ۸- الف) تاق‌دیس سورمه که واحدهای پالئوزوئیک زیرین در هسته آن رخنمون یافته‌اند (دید به سمت شمال باختر)؛ ب) عکس هوایی مایل از تاق‌دیس عسلویه باختری که در فرادیواره گسل پی‌سنگی پیشانی کوهستان و در مجاورت حوضه پیش‌بوم واقع شده است (دید به سمت شمال باختر).

References

- Alavi, M., 2007- Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of Science*, 307, 1064–95, doi:10.2475/09.2007.02.
- Baghbani, D., 2003- Paleogeographic evolution and hydrocarbon potential estimation of Dehram group in Fars area and determination of 'Fars pale-high' limits. National Iranian Oil Company, Exploration and Production, Tehran, Report 1946.
- Bahrudi, A. & Koyi, H. A., 2003- Effect of spatial distribution of Hormuz salt in deformation style in the Zagros fold-and-thrust belt: An analog modeling approach. *Journal of the Geological Society, London*, 160, 719–733, doi: 10.1144/0016-764902-135.
- Berberian, M., 1995- Master 'blind' thrust faults hidden under the Zagros folds: Active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241, 193–224, doi: 10.1016/0040-1951(94)00185-C.
- Bordenave, M. L. & Hegre, J. A., 2012- Current distribution of oil and gas fields in the Zagros Fold Belt of Iran and contiguous offshore as the result of the petroleum systems. *Geological Society, London, Special Publications*, 330, 291–353, doi: 10.1144/SP330.14.
- Etris, E. L., Crabtree, N. J., Dewar, J. & Pickford, S., 2001- True Depth Conversion: More Than a Pretty Picture. *CSEG Recorder* v26 November 2001, pp11 -22.
- Fürst, M., 1976- Tektonik und Diapirismus der ostlichen Zagrosketten. *Geol. Ges.* 127, 183–225.
- Ghavidel, M., 1996- Acritarch Biostratigraphy of the Paleozoic Rock Units in the Zagros Basin, Southern Iran. *Acta Universitatis Carolinae, Geologica*, 40, 385-411.
- Groshong, R., 2006- 3-D Structural Geology A Practical Guide to Quantitative Surface and Subsurface Map Interpretation. Second Edition. Springer. 410 pages.
- Hughes, A., 2013- Insights into Contractual Fault-Related Folding Processes Based on Mechanical, Kinematic, and Empirical Studies. Harvard University PhD Dissertations.
- Jackson, J. A., 1980- Reactivation of basement faults and crustal shortening in orogenic belts. *Nature*, 283, 343–346, doi: 10.1038/283343a0.
- Jahani, S., 2008- Salt tectonics, folding and faulting in the Eastern Fars and southern offshore provinces (Iran). PhD Thesis. Université de Cergy – Pontoise.
- James, G. A. & Wynd, J. G., 1965- Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. *AAPG Bulletin*, 49, 2182–2245, doi: 10.1306/A663388A-16C0-11d7-8645000102C1865d.

- Kent, P. E., 1979- The emergent Hormuz salt plugs of southern Iran. *Journal of Petroleum Geology* 2, 117–144.
- Koop, W. J. & Stoneley, R., 1982- Subsidence history of the Middle East Zagros Basin, Permian to Recent. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 305, 149–168, doi:10.1098/rsta.1982.0031, doi:10.1098/rsta.1982.0031.
- Letouzey, J. & Sherkati, S., 2004- Salt movement, tectonic events and structural style in the central Zagros fold and thrust belt (Iran), in 24th Annual GCSSEPM Foundation, Salt-Sediments Interactions and Hydrocarbon Prospectivity, Concepts, Applications and Case Studies for the 21st Century, Soc. of Econ. Paleontol. And Mineral. Found. Houston, Tex.
- Marsden, D., 1992- V (sub o) -K method of depth conversion, *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, 11 (8), p. 53-54.
- Maurer, F., Martini, R., Rettori, R., Hillgartner, H. & Cirilli, S., 2009- The geology of Khuff outcrop analogues in the Musandam Peninsula, United Arab Emirates and Oman. *GeoArabia*, 14, 125-158, doi: 10.1007/s12517-010-0198-y.
- McQuarrie, N., 2004- Crustal scale geometry of the Zagros fold-thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology*, 26, 519–535, doi:10.1016/j.jsg.2003.08.009.
- Mitra, S. & Mount, V. S., 1998- Foreland basement-involved structures. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 82, 70–109.
- Mitra, S., 2002- Structural models of faulted detachment folds. *AAPG Bulletin*, 86, 1673–1694, doi: 10.1306/61EEDD3C-173E-11D7-8645000102C1865D.
- Mitra, S., 2003- A unified kinematic model for the evolution of detachment folds. *Journal of Structural Geology*, 25, 1659–1673, doi:10.1016/S0191-8141(02)00198-0.
- Molinaro, M., Leturmy, P., Guezou, J. C., Frizon de Lamotte, D. & Eshraghi, S. A., 2005- The structure and kinematics of the southeastern Zagros fold-thrust belt, Iran: From thin-skinned to thick-skinned tectonics, *Tectonics*, 24, TC3007, doi:10.1029/2004TC001633.
- Motamedi, H., 2008- Structural Analysis of Bandar-e-Chiru- Khonj Region, Coastal - Interior Fars, Zagros Fold-Thrust Belt. PhD thesis, Beheshti University, Tehran, Iran. 158 pages.
- Motamedi, H., Sherkati, S. & Sepehr, M., 2012- Structural style variation and its impact on hydrocarbon traps in central Fars, Southern Zagros folded belt, Iran. *Journal of Structural Geology*, 37, 124-133, doi:10.1016/j.jsg.2012.01.021.
- Najafi, M., Beamud, E., Verges, J., Yassaghi, A., Sherkati, S. & Bahroudi, A., 2012- 3-D Structure of Permian Reservoir and Timing of Deformation in Frontal Fars, Zagros Fold-Thrust Belt. Presented at Daryush Conference, Evolution of the Zagros-Makran Fold Belts. 14-15 May 2012, Institute of Earth Sciences 'Jaume Almera', ICTJA-CSIC, Barcelona, Spain.
- Oveisi, B., 2007- Rates and processes of active folding in the central Zagros – IRAN. PhD Thesis. Université Joseph Fourier. 226 pages.
- Perotti, C., Carruba, S., Rinaldi, M. & Bertozzi, G., 2011- The Qatar–South Fars Arch Development (Arabian Platform, Persian Gulf): Insights from Seismic Interpretation and Analogue Modelling.. In: Schattner, U. (eds) *New Frontiers in Tectonic Research - At the Midst of Plate Convergence*, ISBN: 978- 953-307-594-5, 325–352.
- Rahimpour, H., Esrafil-Dizaji, B. & Tavakoli, V., 2010- Dolomitization and Anhydrite precipitation in Permo–Triassic carbonates at the South Pars gas field, offshore Iran: controls on reservoir quality. *Journal of Petroleum Geology*, 33, 43 – 66.
- Ramsey, L., Walker, R. & Jackson, J., 2008- Fold evolution and drainage development in the Zagros Mountains of Fars province, SE Iran. *Basin Research*, 20, 23–48, doi: 10.1111/j.1365-2117.2007.00342.x.
- Sepehr, M. & Cosgrove, J. W., 2004- Structural framework of the Zagros fold-thrust belt, Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 21, 829–843, doi:10.1016/j.marpetgeo.2003.07.006.
- 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*, 427, 265–281, doi:10.1016/j.tecto.2006.05.021.
- Sherkati, S., Letouzey, J. & Frizon de Lamotte, D., 2006- The Central Zagros fold-thrust belt (Iran): New insights from seismic data, field observation and sandbox modeling. *Tectonics*, 25, TC4007, doi: 10.1029/2004TC001766.
- Suppe, J. & Medwedeff, D. A., 1990- Geometry and kinematics of fault propagation folding. *Eclogae Geologicae Helveticae* 83 (3), 409–454.
- Suppe, J., 1983- Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science* 283, 684–721.
- Szabo, F. & Kheradpir, A., 1978- Permian and Triassic stratigraphy, Zagros basin, south-west Iran, *Journal of Petroleum Geology*, 1, 57 – 82.
- Tabatabai, H., 1997- Basement contour map (South East Iran). Scale 1: 1 000,000. National Iranian Oil Company, Exploration and Production, Tehran, Report 35393/A.
- Talbot, C. J. & Alavi, M., 1996- The past of a future syntaxis across the Zagros. In: Alsop, G.I., Blundell, D.J. & Davison, I. (eds) *Salt tectonics: Geological Society, London, Special Publications*, 100, 89–109, doi:10.1144/GSL.SP.1996.100.01.08.
- Vergés, J., Goodarzi, M. G. H., Emami, H., Karpuz, R., Efstathiou, J. & Gillespie, P., 2011- Multiple detachment folding in Pusht-e Kuh arc, Zagros: Role of mechanical Stratigraphy. In: Mc Clay, K., Shaw, J.H. & Suppe, J. (eds) *Thrust fault-related folding: AAPG Memoir*, 94, 69 – 94, doi: 10.1306/13251333M942899.
- Yamato, P., Kaus, B., Mouthereau, F. & Castelltort, S., 2011- Dynamic constraints on the crustal-scale rheology of the Zagros fold belt, Iran. *The Geological Society of America*. v. 39; no. 9; p. 815–818; doi:10.1130/G32136.1.

Fold Style in the Fars Paleo-High, SE Zagros Fold-Thrust Belt

M. Najafi ¹, A. Yassaghi ^{2*}, A. Bahroudi ³, Sh. Sherkati ⁴ & J. Vergés ⁵

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Department of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ Ph.D., Exploration Directorate of National Iranian Oil Company, Tehran, Iran

⁵ Professor, Institute of Earth Sciences 'Jaume Almera', Barcelona, Spain

Received: 2013 June 09

Accepted: 2013 December 21

Abstract

The long-lived Fars paleo-high, located in SE Zagros Mountains is a prolific hydrocarbon province as it contains 15% of the world's proven gas reserves. Subsurface data sets acquired during the recent hydrocarbon exploration in the region indicated fold style variation and structural complexity deep in the sedimentary cover, understanding of which is essential for petroleum system modelling and selection of new targets for gas at depth. In order to analyse the fold style in Fars paleo-high, this study presents a new regional balanced cross-section with a length of ~130 km and a depth of 12 km, across the Fars paleo-high. The section was constructed using seismic profiles, exploration wells and field data. The results show that variation of fold style happens in accordance to variation in mechanical properties of rock units across the Fars paleo-high, as well as from surface down to the depth of sedimentary cover. Detachment folding, followed by limb thrusting, which happens above 8-12 km below sea level, is the main deformation mechanism of sedimentary cover. In the middle of sedimentary cover, however, tectonically over-thickened Triassic evaporitic rocks efficiently decouple the geometry of post Triassic succession with respect to the underlying Permo-Triassic reservoir carbonates. Restoration and balancing of the regional cross-section indicated 20% of shortening across the Fars Paleo-high, accommodated by folding and thrusting. Abrupt change in the level of synclines accompanied with trends of seismicity and linear exposure of old geological units, proposes involvement of at least two main basement reverse faults in the deformation of cover sequence.

Keywords: Zagros fold-thrust belt, Fars Paleo-high, Fold style, Detachment horizon, Basement faulting, Geometrical shortening.
For Persian Version see pages 79 to 90

*Corresponding author: A. Yassaghi; E-mail: yassaghi@modares.ac.ir