

تحلیل ساختاری سه بعدی از تاقدیس سفیدزاخور در پهنه فارس، به منظور تعیین هندسه افق مخزن گازی

پرموتریاس

مهدی نجفی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

علی یسافی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

جاما ورجس

موسسه تحقیقات علوم زمین CSIC؛ بارسلونا، اسپانیا

عباس بحرودی

گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

شهرام شرکاتی

معاونت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، تهران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۳/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۲۶

yassaghi@modares.ac.ir

چکیده

تعیین محل حفاری اکتشافی گاز در بلندای قدیمی فارس نیازمند اطلاع از هندسه افق مخزنی پرموتریاس است. این مطالعه با استفاده از برداشت های میدانی، برش های لرزه ای و داده چاه های اکتشافی، به بررسی هندسه سه بعدی تاقدیس سفیدزاخور بعنوان یک الگوی ساختاری در این منطقه پرداخته است. برای این منظور شش برش عرضی ترازمند و یک مدل ساختاری سه بعدی از این تاقدیس تهیه و تحلیل شدند. نتایج مطالعه نشان داد که کوتاه شدگی بیشتر و در نتیجه آن برخاستگی بیشتر ساختاری در بخش غربی تاقدیس باعث مهاجرت هیدروکربور و تجمع آن در این بخش گردیده است. به علاوه، انتخاب محل دقیق حفاری چاه نباید فقط بر اساس هندسه افقهای سطحی ساختار باشد، زیرا تبخیری های تریاس یک افق جدایش مؤثر را در میانه پوشش رسوبی تشکیل می دهند که محل رأس تاقدیس در واحدهای سطحی را نسبت به محل تله در افق مخزنی به صورت افقی جابجا نموده است.

کلمات کلیدی: مدل ساختاری سه بعدی، تاقدیس سفیدزاخور، تغییرات هندسی، اکتشاف گاز، پهنه فارس

مقدمه

راستای این برش های عرضی ناحیه ای تمرکز نموده اند (Mq Quarrie, 2004; Letouzey and Sherkati, 2004; Molinaro, 2005; Sherkati et al., 2006; Alavi, 2007; Motamedi, 2008; Jahani et al., 2008, 2011). Oveisi et al., 2007; Yamato et al., 2011). مقیاس ناحیه ای، در مقالات منتشر شده توجه کمتری به تغییرات سبک چین خوردگی در مقیاس محلی با ترسیم برش های ساختاری سریالی در امتداد یک تاقدیس مشخص و با تحلیل ساختاری سه بعدی شده 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 نموده اند، هندسه های عمیق چین ها را مستندتر نشان داده اند. برخی از این مطالعات زیرسطحی به تغییرات هندسه چین خوردگی در عمق پوشش رسوبی در بخش های مرکزی و پیشانی فارس اشاره کرده اند (Sherkati et al., 2006; Sepehr et al., 2006; Motamedi et al., 2012)

ساختارهایی که در بلندای قدیمی فارس واقع شده اند از جهت مسیر و زمان مهاجرت هیدروکربور، همچنین ویژگیهای سنگ منشأ، سنگ مخزن و سنگ پوش شرایط ایده آلی برای ایجاد ذخایر هیدروکربوری دارند (باغبانی، ۱۳۸۲)؛ و در مواردی که شرایط هندسی افق مخزنی فراهم بوده باشد تله های هیدروکربنی ایجاد نموده اند، به گونه ای که تاقدیس های این منطقه حاوی ۱۵۰۰ تریلیون فوت مکعب معادل ۱۵ درصد از کل ذخایر گاز اکتشاف شده در جهان می باشند (Motamedi et al., 2012). مطالعه هندسه سه بعدی این تاقدیس ها برای مدل سازی سیستم هیدروکربنی منطقه و تعیین اولویت ساختارها برای حفاری اکتشافی ضروری است.

در دهه گذشته، مطالعات بسیاری بر روی سبک چین خوردگی در پهنه فارس از کمر بند چین خورده و رانده زاگرس انجام گرفته است که اکثر آنها با ارائه برش های ساختاری ناحیه ای بر روی تغییرات هندسه و کینماتیک چین خوردگی در

مرکزی بلندای قدیمی فارس و در جنوب تاقدیس‌های نره و لار و در شمال تاقدیس‌های چمن‌نوری، هالگان و دی واقع شده است (ابطحی، ۱۳۸۷؛ شکل ۱).

پوشش رسوبی منطقه مطالعه که بر روی پی‌سنگ متبلور پرکامبرین قرار گرفته است ضخامت بیش از ۱۰ کیلومتر دارد و عمدتاً از واحدهای سنگی کربناته، تبخیری، مارنی و شیلی تشکیل شده است (شکل ۲). (James and Wynd, 1965; Szabo and Kheradpir, 1978; Koop and 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 پالئوزوئیک قرار دارند. واحدهای پالئوزوئیک زیرین شامل سازندهای میلا (دولومیت، شیل و آهک)، ایل‌بیک (شیل، ماسه سنگ و مادستون) و زردکوه (شیل، ماسه سنگ و کربنات) هستند که با یک ناپوستگی از واحدهای پالئوزوئیک بالایی جدا می‌شوند. سیلورین با سازندهای سیاه (ماسه سنگ و شیل‌های ارگانیک) و سرچاهان (ماسه سنگ و شیل‌های ارگانیک) آغاز می‌شود که سنگ منشأ گاز در بلندای فارس هستند. تفسیر برش‌های لرزه‌ای توسط شرکت ملی نفت ایران، ضخامت حدود چهار کیلومتر را برای سری پالئوزوئیک در بلندای قدیمی فارس پیشنهاد نموده است (جهانی، ۱۳۹۰ گفته شفاهی)، که این میزان بیشتر از برآوردهای قبلی بین ۲/۵ تا ۳ کیلومتر می‌باشد. برش‌های لرزه‌ای تبدیل به عمق شده در این مطالعه نیز ضخامت حداقل چهار کیلومتر را برای واحدهای پالئوزوئیک در این منطقه تأیید می‌نماید (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. ضخامت میانگین این گروه ۱۰۶۵ متر در منطقه مطالعه است. این گروه از سازندهای کنگان و دالان (آهک، دولومیت و انیدریت) در بالا و سازند فراقان (ماسه سنگ و شیل) در قاعده تشکیل شده است (Szabo and Kheradpir, 1978; Rahimpour-Bonab et al., 2010). سازند دشتک به سن تریاس بر روی گروه دهرم واقع شده است. ضخامت 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 شرق، در فارس داخلی و زاگرس مرتفع، سازند دشتک با دولومیت‌های سازند خانه کت جایگزین می‌شوند. بر روی سازند دشتک، سازند نیریز با ضخامت 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 می‌باشد، ضخامت 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 ضخامت ۱۲۶ متر جوان‌ترین سازند کرتاسه است که توسط یک لایه کلیدی از سازند پایده به سن پالئوسن که از ۲۳۷ متر شیل و آهک تشکیل شده جدا می‌شود. بر روی سازند پایده، ۴۵۰ متر آهک و دولومیت‌های سازندهای آسماری و جهرم واقع شده‌اند. در بلندای قدیمی فارس تنها دو عضو از سازند گچساران حضور دارند که ضخامتی بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ متر از انیدریت، نمک و آهک را شامل می‌شوند. سازند میشان به سن میوسن که تا حدود ۷۰۰ متر ضخامت دارد از شیل و در بخش‌های درونی‌تر از عضو آهکی گوری در قاعده تشکیل شده است. آهک گوری ضخامت 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.

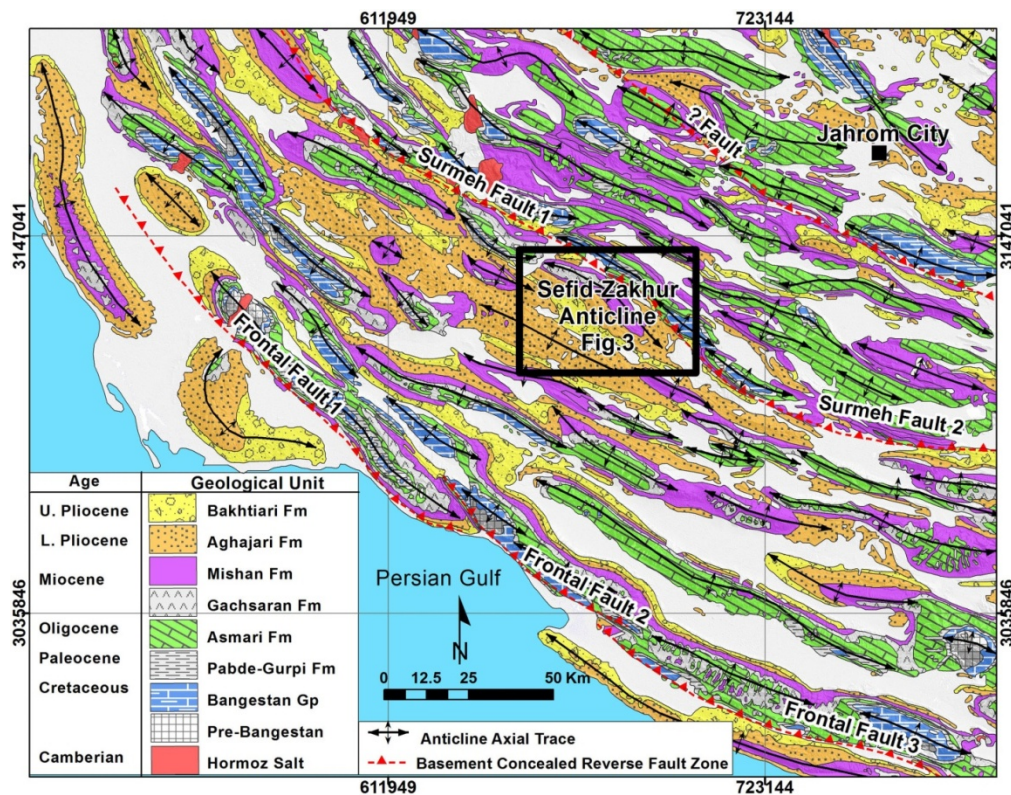
علاوه بر مقالات منتشر شده فوق، اطلاعات زیر سطحی که در خلال اکتشافات اخیر و موفق هیدروکربنی در منطقه بلندای قدیمی فارس بدست آمده- اند نشان می‌دهند که تغییر در هندسه چین‌ها در دو جهت اتفاق می‌افتد. در برخی ساختارها هندسه واحدهای مزوزوئیک و سنوزوئیک نسبت به افق مخزنی پرموتریاس متفاوت می‌باشد. همچنین در منطقه بلندای قدیمی فارس تاقدیس-هایی وجود دارند که هندسه چین‌خوردگی در راستای امتداد آنها به شدت متفاوت است. این تغییرات در هندسه چین‌ها، و انتخاب محل حفاری‌های اکتشافی گاز و تعیین اولویت حفاری تاقدیس‌ها را مشکل کرده و مطالعه بیشتر و دقیقتر در مقیاس محلی را طلب می‌کند. یک نمونه شاخص از این ساختارها که هندسه متغیر دارد تاقدیس سفید زاخور می‌باشد که در مرکز بلندای قدیمی فارس واقع شده است. اطلاعات زیر سطحی که در خلال اکتشافات اخیر بدست آمده‌اند به همراه مشاهده نقشه زمین‌شناسی و تصویر ماهواره‌ای، نشان از پیچیدگی سبک چین‌خوردگی در محدوده این تاقدیس دارند. پهنای این تاقدیس در بخش غربی ۱۲/۵ کیلومتر و قدیمی‌ترین واحد رخنمون یافته در آن سازند پایده به سن پالئوسن می‌باشد. در مقابل پهنای تاقدیس در بخش شرقی ۱۹ کیلومتر و قدیمی-ترین واحد رخنمون یافته در این بخش آهک گوری به سن میوسن است.

این تفاوتها می‌تواند نشانه تفاوت سبک چین‌خوردگی دو بخش شرقی و غربی تاقدیس باشد. مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های میدانی برداشت شده در محدوده تاقدیس سفید زاخور، تفسیر برش‌های لرزه‌ای دو بعدی و ترکیب آنها با داده‌های دو چاه اکتشافی، به مطالعه هندسه سه بعدی تاقدیس می‌پردازد تا یک الگوی ساختاری برای اکتشاف ذخایر گازی در محدوده بلندای قدیمی فارس فراهم آورد. بنابراین اهداف این مطالعه شامل موارد زیر می‌باشد: (۱) بررسی تغییرات هندسه چین‌خوردگی در راستای امتداد تاقدیس سفیدزاخور؛ (۲) بررسی تغییرات هندسه چین‌خوردگی از سطح زمین تا عمق افق مخزنی گاز (گروه کربناته دهرم به سن پرموتریاس)؛ و (۳) بررسی ارتباط هندسه تاقدیس سفیدزاخور با تجمع و مهاجرت گاز در افق مخزنی پرموتریاس.

زمین‌شناسی عمومی

منطقه این مطالعه که ادامه شمالی کمان قطر است در بخش مرکزی پیشانی پهنه فارس واقع شده است (شکل ۱). این منطقه به نام‌های مختلفی خوانده شده است، مانند: پلاتفرم فارس (Talbot and Alavi, 1996)، کمان قطر-جنوب فارس (Perotti et al., 2011)، بلندای گابندی/فارس (Motamedi et al., 2012; Bordenave and Hegre, 2012)، و بلندای قدیمی فارس (باغبانی، ۱۳۸۲).

در این مقاله از واژه بلندای قدیمی فارس استفاده شده است. بلندای قدیمی فارس در بخش مرکزی پهنه پیشانی فارس واقع شده است. این منطقه حداقل از تریاس تا میوسن نسبت به مناطق مجاور بالاتر بوده است. مطالعه نقشه‌های هم-ضخامت سازندها و تفسیر برش‌های لرزه‌ای طولی نشان داده است که ضخامت پوشش رسوبی از جنوب شرق و شمال غرب به سمت مرکز این منطقه کاهش می‌یابد (Rahimpour et al., 2010; Perotti et al., 2011). بالاتر بودن این منطقه از تریاس تا میوسن موجب مهاجرت اولیه هیدروکربور به سمت آن و تجمع گاز در بلندا شده است. با آغاز چین‌خوردگی در میوسن، این تجمعات گازی مجدداً مهاجرت کرده و در بستگی‌های ایجاد شده توسط تاقدیس‌ها به دام افتاده اند (Bordenave and Hegre, 2012). سنگ مخزن این ذخایر واحدهای کربناته گروه دهرم به سن پرموتریاس هستند، که توسط شیل‌های ارگانیک سیلورین زیرین به عنوان سنگ منشأ شارژ شده و با تبخیری‌های تریاس به عنوان سنگ پوش پوششیده شده‌اند. تاقدیس سفیدزاخور به طول حدود ۵۰ کیلومتر در بخش



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی پهنه بلندای قدیمی فارس (پیشانی فارس مرکزی) که با تغییراتی جزئی از نقشه ۱:۲۵۰,۰۰۰ شرکت ملی نفت ایران اقتباس شده است. موقعیت تاقدیس سفید زاخور (شکل ۳) و همچنین محل میدان‌های گازی پرموتریاس بر روی نقشه مشخص شده‌اند.

Age	Tectonic Event	Geological Unit	Lithology
U. Pliocene	Convergence & Folding-Thrusting	Bakhtiari Fm (Bk)	~10 Km
L. Pliocene		Aghajari Fm (Aj)	
Miocene	Continental collision	Mishan Fm (Mn)	~8 Km
Eocene-Oligocene		Gachsaran Fm (Gs)	
Paleocene		Asmari Fm (As)	
Cretaceous	Arc collision & Ophiolite Obduction	Pabde-Gurpi Fm (Pd-Gu)	~6 Km
		Bangestan Gp (Bgp)	
Jurassic	Neo-Tethys Rifting	Khami Gp (kh)	~4 Km
Triassic		Dashtak Fm (Dk)	
		Dehram Gp (Dgp) "Gas Reservoir"	
U. Paleozoic	Passive Margin Sedimentation	Siahu-Sarchahan (Sh-Sch)	~2 Km
		Lower Paleozoic (Lpz) ?	
L. Paleozoic		Hormoz Series (Hs) ?	
Precambrian	Pan-african Orogeny	Crystalline Basement (Bs)	0 Km

شکل ۲. ستون چینه‌شناسی پوشش رسوبی در بلندای قدیمی فارس (modified after James and Wynd, 1965; Szabo and Kheradpir, 1978; Ghavidel, 1996). این ستون بر حسب ضخامت واحدها می‌باشد که با عملیات صحرایی برای واحدهایی جوانتر از کرتاسه، داده‌های چاه‌های حفاری شده تا عمق پالئوزوئیک بالایی و گزارش‌های چینه‌شناسی برای واحدهای پالئوزوئیک زیرین به دست آمده است.

طول لایه‌ها محاسبه شد. در گام آخر، برش‌های سریالی وارد محیط نرم افزار 3D Move شدند و با درونیابی بین آنها مدل‌سازی ساختاری سه بعدی از تاق‌دیس سفیدزاخو انجام گرفت.

برش‌های سریالی

برای بررسی هندسه تاق‌دیس سفیدزاخو، شش برش ساختاری سریالی شامل برش‌های AA', BB', CC', DD', EE' و FF' به ترتیب از غرب به شرق، با جهت یابی NE-SW در عرض تاق‌دیس سفید زاخو ترسیم شدند (شکل‌های ۳ و ۵). این برش‌ها با بکارگیری روش توضیح داده شده در قبل و با استفاده از برش‌های لرزه‌ای، داده‌های میدانی و داده‌های چاه‌های سفیدزاخو-۱ و سفیدزاخو-۲ تهیه شدند. این برش‌ها سپس موازنه شدند تا هم هندسه ساختاری تفسیر شده تأیید شود و هم میزان کوتاه‌شدگی در راستای آنها محاسبه گردد.

برش‌های AA' و BB' در بخش غربی تاق‌دیس یک چین باز با زاویه بین پهلویی ۸۰-۹۰ درجه را نشان می‌دهند که مشابه هندسه چین‌های جناغی است (شکل ۵). دامنه چین در این بخش حدود ۵ کیلومتر می‌باشد. چاه سفیدزاخو-۱ که در بخش غربی تاق‌دیس و در مسیر برش BB' واقع شده است ضخامت تکنونیک افزایش یافته ۱۳۹۰ متر را برای افق جدایش میانی (سازند دشتک) نشان می‌دهد. میزان جابجایی محل محور تاق‌دیس در واحدهای مزوزوئیک نسبت به واحدهای پالئوزوئیک با عملکرد جدایشی سازند دشتک حدود ۲۵۰ متر به سمت شمال شرق برآورد می‌شود. میزان کوتاه‌شدگی حاصل از چین‌خوردگی و گسلش در بخش غربی تاق‌دیس برابر با ۲۰ درصد است (شکل ۵). در برش AA' علاوه بر سازند دشتک، سازند کژدمی نیز در منطقه لولایی چین افزایش ضخامت داده است که البته این موضوع در تمام بخش غربی تاق‌دیس عمومیت ندارد.

برش‌های DD', EE' و FF' در بخش شرقی تاق‌دیس سبک متمایزی را نسبت به بخش غربی نشان می‌دهند؛ یک چین بسیار ملایم با زاویه بین پهلویی حدود ۱۲۰ درجه که تا حدودی مشابه چین‌های جعبه‌ای است (شکل ۵). دامنه چین در این بخش حدود ۲/۵ کیلومتر می‌باشد. میزان کوتاه‌شدگی ساختاری در این بخش حدود ۷ درصد بوده و ضخامت حفاری شده از افق جدایش میانی (سازند دشتک) در چاه سفیدزاخو-۲ عادی و حدود ۸۰۰ متر است. هیچ جابجایی در محل محور تاق‌دیس از سطح به عمق مشاهده نمی‌شود (شکل ۵).

مدل سه بعدی ساختاری

تاکنون راهکارهای متعددی برای ساختن مدل سه بعدی از ساختارهای زمین‌شناسی توسعه یافته‌اند. این روش‌ها بر اساس نوع داده‌هایی که استفاده می‌کنند، به طور عمومی قابل تقسیم به سه گروه اصلی هستند: (۱) روش‌هایی که تنها داده‌های سطحی را به کار می‌گیرند (e.g. Dhont et al., 2005; Guillaume et al., 2008; Carrera et al., 2009) عمدتاً از داده‌های زیرسطحی استفاده می‌کنند (e.g. Mitra and Leslie, 2003; Mitra et al., 2005; Dischinger and Mitra, 2006; Valcarce et al., 2006)؛ و (۳) روش‌های تلفیقی که داده‌های سطحی و زیرسطحی را با یکدیگر ترکیب می‌نمایند (e.g. Back et al., 2008). روش‌های تلفیقی به دلیل پیچیدگی بیشتر در مطالعات کمتری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مطالعه یک روش تلفیقی را برای ساختن مدل ساختاری سه بعدی از تاق‌دیس سفیدزاخو به کار گرفته است (شکل ۶).

این مدل یک مدل سه بعدی کامل است، به این معنی که از سطح تا عمق پوشش رسوبی را شامل می‌شود. در ابتدا نقشه زمین‌شناسی موجود (شرکت ملی نفت ایران) در محدوده تاق‌دیس سفیدزاخو، با ترسیم همبندی‌های زمین‌شناسی بر روی تصویر ماهواره‌ای گوگل و به دنبال آن عملیات صحرایی دقیق‌تر شد.

این سازند از تناوب ماسه سنگ، سیلتستون و مارن تشکیل شده است که در بخش‌های بالایی با کنگلومرا پوشیده می‌شوند. جوان‌ترین واحد سنگی در منطقه مطالعه سازند کنگلومرای بختیاری است که ضخامت بسیار متغیری از خود نشان می‌دهد (شکل ۲).

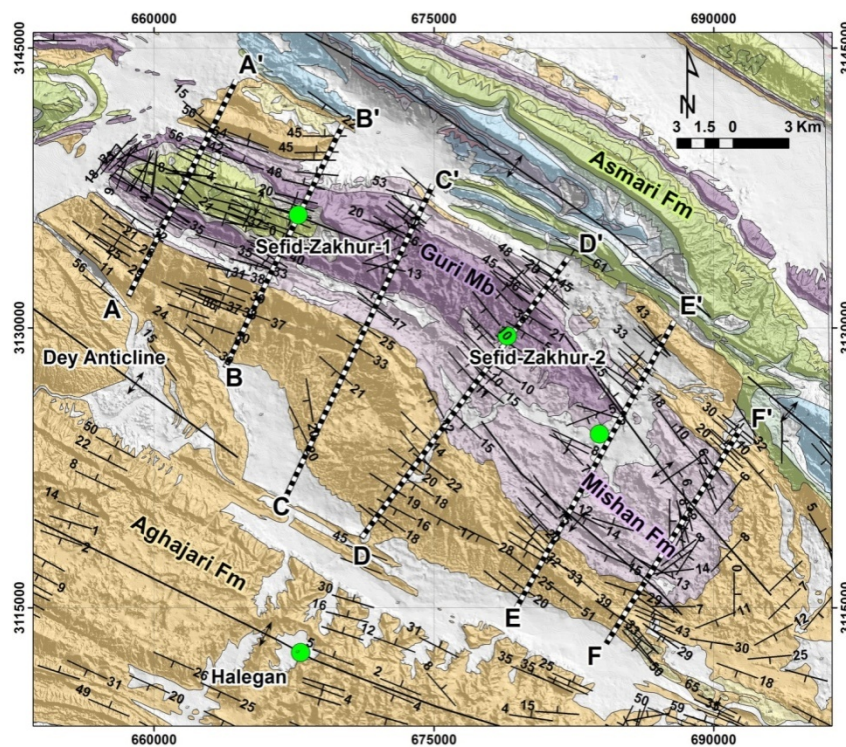
روش مطالعه

به منظور مطالعه تاق‌دیس سفیدزاخو ابتدا شش برش ساختاری عرضی از تاق‌دیس سفیدزاخو ترسیم گردید (شکل ۳). به منظور رسم برش‌های زمین‌شناسی در عرض تاق‌دیس سفیدزاخو، تمام داده‌های سطحی و زیر سطحی در محیط نرم افزار 2DMove (یک نرم افزار 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 ترسیم گردید:

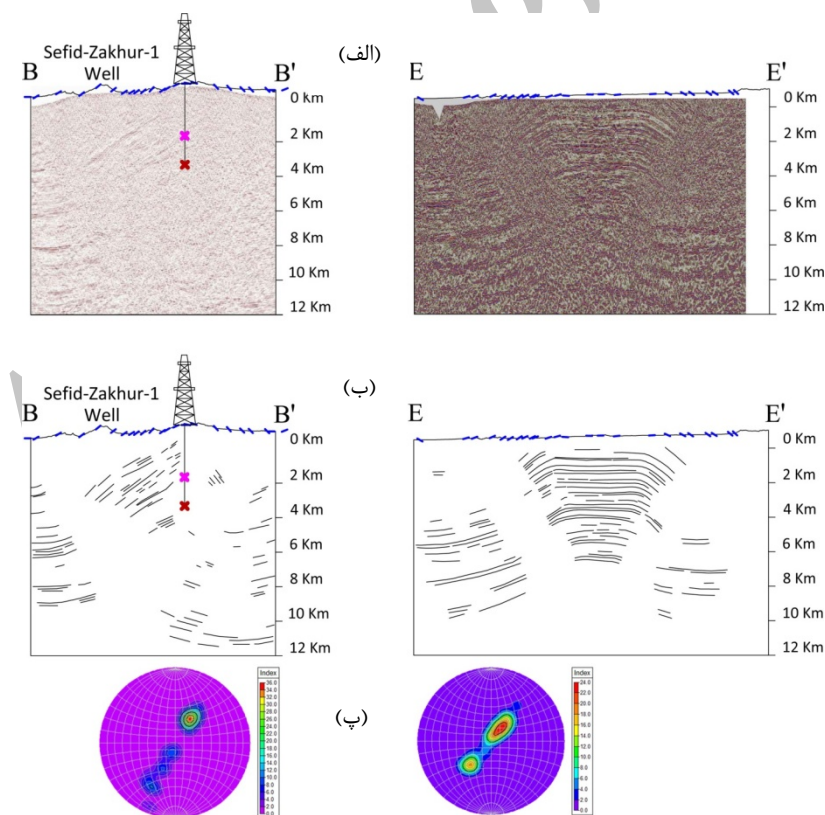
در گام نخست از ترسیم هر برش، داده‌های عملیات صحرایی و اطلاعات موجود بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی (در مقیاس‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ تهیه شده توسط شرکت ملی نفت ایران) بر روی برش توپوگرافی در مسیر برش پیاده شدند. داده‌های سطحی شامل جهت‌یابی لایه‌ها، محل همبندی سازندها، گسل‌های برداشت شده در سطح و محل ناپیوستگی‌ها بود. علاوه بر اینها، داده‌های چاه شامل محل سرسازندها در چاه و داده‌های شیب‌سنجی لایه‌ها نیز بر روی برش پیاده شدند.

در گام دوم برای ترسیم برش‌های ساختاری، برش‌های لرزه‌ای با اعمال مدل‌های سرعتی مناسب از زمان به عمق تبدیل شدند. پیش از تفسیر ساختاری لازم است تا برش‌های لرزه‌ای تبدیل به عمق شوند تا هم عمق و شیب صحیح ساختارها مشخص شود و هم هندسه‌های کاذبی که در برش‌های زمانی دیده می‌شوند حذف گردند (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 عمق لرزه‌ای، یک مدل سرعتی پیوسته انتخاب شد که فرض می‌کند سرعت با افزایش عمق با تابع مشخصی بصورت پیوسته افزایش می‌یابد. این مدل سرعت موج در واحدهای سنگی نزدیک به سطح (v_0) و نرخ افزایش سرعت با افزایش عمق (k) را طبق تابع ارائه شده توسط Marsden (1992) استفاده می‌کند تا عمق هر نقطه از برش لرزه‌ای را محاسبه نماید. در گام سوم و پس از تبدیل به عمق برش‌های لرزه‌ای، رفلکتورهای مشخص بر روی برش‌ها با رسم خطوط پررنگ شدند. در این مرحله هیچ افق یا ساختاری تفسیر نشده و تنها پررنگ کردن رفلکتورها با دست بر روی کاغذ و سپس با کامپیوتر در محیط نرم‌افزار 2DMove انجام گرفت تا داده‌های موجود در برش لرزه‌ای واضح شوند (شکل ۴).

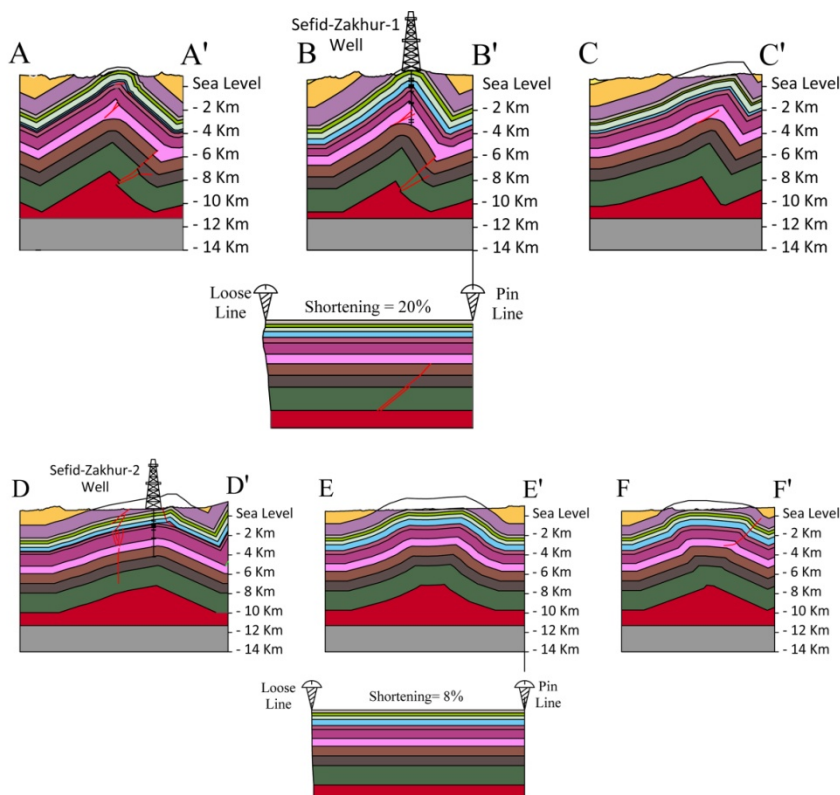
در گام چهارم، تفسیر ساختاری و رسم برش انجام گرفت. طی سه گام قبلی، تمام داده‌های سطحی و زیرسطحی بر روی برش پیاده شده و با یکدیگر تلفیق شدند (شکل ۴). به برشی که تنها داده‌ها بر روی آن نشان داده شده است، "برش داده" گفته می‌شود (Groshong, 2006). در این مطالعه راه حل‌های هندسی مختلفی بر اساس مدل‌های ساختاری متفاوت به گونه‌ای که کاملاً منطبق بر داده‌ها باشند برای ترسیم برش‌ها امتحان شدند. در نهایت هندسه‌هایی که بیشترین انطباق را با داده‌های موجود بر روی هر برش داشتند، انتخاب گردیدند. گام پنجم، بازگردانی، موازنه و برآورد کوتاه‌شدگی بود. موازنه، 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 (Dahlstrom, 1969; Groshong, 2006). در نهایت پس از بازگردانی برش زمین‌شناسی ناحیه‌ای، میزان کوتاه‌شدگی در راستای برش با فرض پایستگی



شکل ۳. الف) نقشه زمین‌شناسی از محدوده تاکدیس سفیدزاخور که داده‌های حاصل از پیمایش‌های میدانی، موقعیت چاه‌های سفیدزاخور-۱ و سفیدزاخور-۲ و همچنین مسیر برش‌های عرضی ترسیم شده (شکل‌های ۴ و ۵) بر روی آن نشان داده شده است.



شکل ۴. الف) پروفیل‌های لرزه‌ای تبدیل به عمق شده در مسیر برش BB' در بخش غربی و برش EE' در بخش شرقی سفیدزاخور (برای مشاهده محل برش‌ها به شکل مراجعه کنید). ب) نمونه‌هایی از "برش داده" که برای برش BB' در بخش غربی و برش EE' در بخش شرقی تاکدیس نشان داده شده است. مهمترین اطلاعات موجود بر روی هر برش داده شامل خطوط ترسیم شده بر روی پروفیل لرزه‌ای که رفلکتورهای شاخص را نشان می‌دهند؛ محل سر سازندها در چاه؛ و جهت یابی لایه بندی در سطح می‌باشند. برش‌های ساختاری سریالی (شکل ۵) در طول مسیر خود بر روی برش‌های داده ترسیم شده‌اند.



شکل ۵. شش برش ساختاری در عرض تاقدیس سفیدزاخورد تغییرات هندسه چین خوردگی از غرب (برش‌های AA'، BB' و CC') به شرق (برش‌های DD'، EE' و FF') را نشان می‌دهند. برش‌های BB' و EE' که موازنه شده‌اند به ترتیب مقادیر کوتاه‌شدگی ۲۰ و ۷ درصد را نشان می‌دهند.

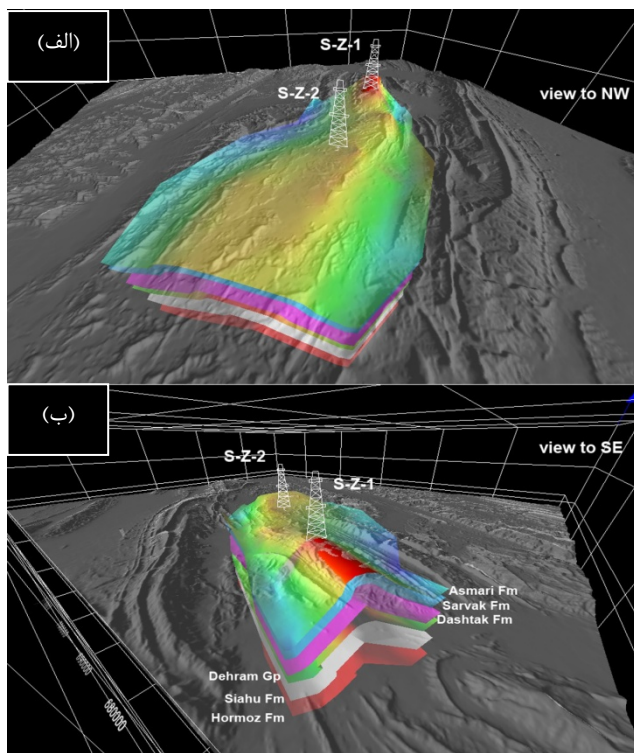
فضایی ایجاد می‌گردد که معمولاً با واحدهای نامقاوم پر می‌شود. هندسه جناغی و تنگ بودن تاقدیس موجب شدت یافتن مکانیزم خمشی- برشی، افزایش تنش برشی اعمالی بر لایه‌ها و در نتیجه ضخیم‌شدگی واحدهای نامقاوم در منطقه لولایی چین و عملکرد آن به عنوان افق جدایش می‌گردد. به نظر می‌رسد بیشتر بودن کوتاه‌شدگی در سفیدزاخورد غربی (۲۰ درصد در مقابل ۷ درصد) (شکل ۵) با عث شده است تا چین از مرحله چین‌خوردگی باز جعبه‌ای که در سفیدزاخورد شرقی دارد عبور کرده، فشردگی بیشتری پیدا کند و وارد مرحله چین‌خوردگی جناغی شود (مقایسه برش AA' با FF' در شکل ۵). واحدهای تبخیری نامقاوم تریاس که بین تقریباً یک کیلومتر کربناته‌های مقاوم گروه دهرم در زیر و یک کیلومتر کربناته‌های ژوراسیک گروه خامی در بالا محصور شده‌اند، با چین‌خوردگی جناغی دگرریختی برشی بیشتری را متحمل می‌شوند، رورانده‌گی‌های داخل سازندی در آنها توسعه می‌یابد و ضخامت آنها افزایش می‌یابد. این واحدهای تبخیری نامقاوم ضخیم شده در اثر دگرریختی، فضاهای ایجاد شده در منطقه لولایی تاقدیس جناغی سفیدزاخورد غربی را پر می‌نمایند (برش AA' در شکل ۵). در نتیجه محل خط الراس تاقدیس در عمق افق مخزن گازی تریاس نسبت به محل خط الراس تاقدیس در سطح زمین جابجایی نشان می‌دهد، که این جابجایی در راستای تبخیریهای تریاس (سازند دشتک) رخ داده است. همانطور که مدل سه بعدی نشان می‌دهد کوتاه‌شدگی بیشتر باعث برخاستگی ساختاری بیشتر بخش غربی شده است (شکل‌های ۶ و ۷). این برخاستگی ساختاری با مهاجرت هیدروکربوری از بخش شرقی به سمت بخش غربی تاقدیس همراه گردیده است.

سپس همبری‌های زمین‌شناسی بر روی مدل ارتفاعی-رقومی قرار داده شدند تا در نقاط مختلف دارای مؤلفه ارتفاع شوند. در نهایت این همبری‌ها وارد نرم‌افزار 3DMove شدند. از طرف دیگر برش‌های ساختاری که هندسه لایه‌ها و گسل‌ها را در خود داشتند از محیط 2DMove به 3DMove انتقال داده شدند. برای کامل شدن اطلاعات در فضای سه بعدی، محل سر سازندها در چاههای سفیدزاخورد-۱ و سفیدزاخورد-۲ نیز به محیط اضافه شدند. الگوریتم‌های مختلفی برای درون‌یابی بین این اطلاعات شامل خطوط و نقاط به منظور ساختن صفحات سه بعدی شامل: (۱) موزائیک سازی؛ (۲) خطی؛ (۳) نوار باریک وجود دارد. در این مطالعه برای ساختن صفحات سه بعدی از الگوریتم موزائیک سازی، که نزدیک‌ترین همسایه‌ها از نقاط داده را با مش‌های مثلثی شکل به هم وصل می‌کند، استفاده شد.

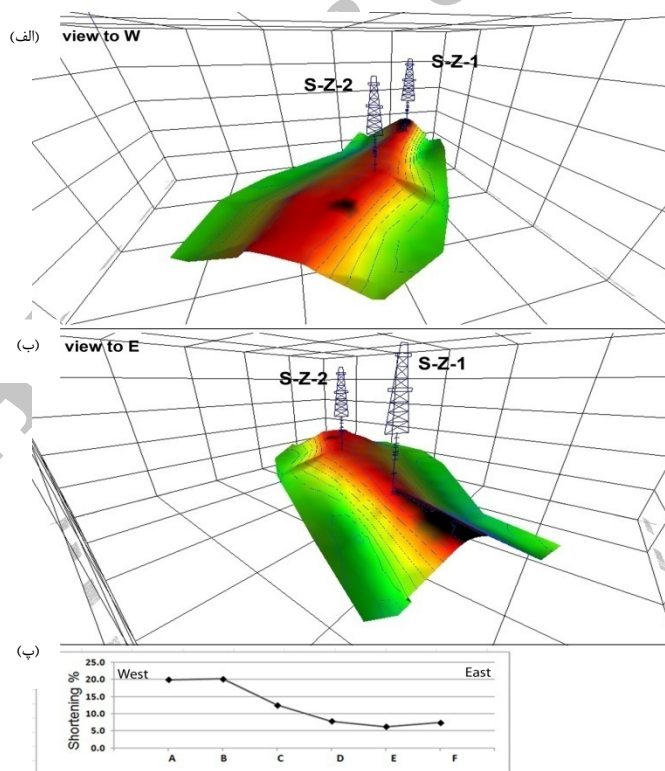
پنج سطح به عنوان نماینده ترازهای ساختاری مختلف در مدل سه بعدی ساخته شدند که به ترتیب سنی شامل واحدهای زیر هستند (شکل ۶): (۱) سازند آسماری به سن الیگوسن؛ (۲) سازند دشتک به سن تریاس میانی-بالایی؛ (۳) گروه دهرم به سن پروتریاس (افق مخزن گازی)؛ (۴) سازند سیاهو به سن سیلورین و (۵) سری هرمز (یا معادل‌های آن) به سن اینفراکامبرین.

بحث

بر اساس سازوکارهای ارائه شده برای تکامل چین‌ها در یک توالی متناوب از واحدهای مقاوم و نامقاوم (e.g. Ramsay, 1974; Fowler and Winsor, 1996)، با افزایش کوتاه‌شدگی و در نتیجه آن فشردگی بیشتر ساختار، یک چین باز جعبه‌ای به یک چین جناغی تبدیل می‌شود. در منطقه لولایی چین‌های جناغی



شکل ۶. مدل ساختاری سه بعدی از تاکدیس سفیدزاخور. سطوح به ترتیب از بالا به پایین سازند آسماری، سازند دشتک، گروه دهرم (افق مخازن گازی)، سازند سیاهو و سری هرمز را نشان می‌دهند. (الف) دید به سمت شمال غرب بخش شرقی تاکدیس را نشان می‌دهد. (ب) دید به سمت جنوب شرق بخش غربی تاکدیس را نشان می‌دهد. محل چاههای سفیدزاخور-۱ (S-Z-1) و سفیدزاخور-۲ (S-Z-2) بر روی مدل نشان داده شده است.



شکل ۷. (الف و ب) هندسه سه بعدی گروه کریناته دهرم به عنوان افق مخزنی گاز در تاکدیس سفیدزاخور. محل چاههای سفیدزاخور-۱ (S-Z-1) و سفیدزاخور-۲ (S-Z-2) بر روی مدل نشان داده شده است. (پ) نمودار میزان کوتاه شدگی را در راستای برشهای ساختاری AA' تا FF' نشان می‌دهد که از سمت شرق به سمت غرب، هم جهت با برخاستگی ساختاری بیشتر، افزایش می‌یابد.

با جابجایی همراه است. این تغییر در هندسه چین و محل رأس تاقدیس می‌بایست در هنگام انتخاب محل حفاری اکتشافی گاز مدنظر قرار گیرد.

۳) مدلسازی ساختاری سه بعدی از تاقدیس سفیدزاخورد یک الگو را برای مطالعات اکتشافی در بلندای قدیمی فارس فراهم می‌نماید. این مدل امکان جدایش هندسه ساختاری را بین ترازهای سطحی، ترازهای میانی و ترازهای عمیق چین‌های منطقه نشان داده و مشخص می‌نماید که در مطالعات اکتشافی، برش‌های ساختاری دو بعدی کافی نبوده و پیش از شروع عملیات حفاری اکتشافی بر روی چنین تاقدیس‌هایی که به عنوان اهداف اکتشافی جدید مورد نظر هستند، ساختن یک مدل ساختاری سه بعدی که با ترکیب داده‌های سطحی و زیرسطحی انجام شده باشد، ضروری است.

قدردانی

از واحد تحقیق و توسعه معاونت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران به خاطر پشتیبانی کامل این مطالعه قدرانی می‌گردد. همچنین از آقایان دکتر سلمان جهانی، مهندس محمد حسن گودرزی از معاونت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران و دکتر ادوارد ساورا از موسسه تحقیقات علوم زمین CSIC اسپانیا به دلیل نظرات فنی سازنده آنها در طول مطالعه سپاسگزاری می‌گردد.

این مهاجرت در راستای امتداد تاقدیس سفیدزاخورد باعث شده است تا بخش غربی این ساختار محل تجمع گاز شده و به عنوان محل مناسب برای حفاری‌های آتی پیشنهاد گردد. هر چند در طراحی محل این حفاری‌ها می‌بایست به جابجایی محور تاقدیس در سطح نسبت به افق مخزنی آن توجه گردد.

نتیجه گیری

۱) هندسه تاقدیس سفیدزاخورد در راستای امتداد آن، از شمال غرب به جنوب شرق به شدت تغییر می‌کند. این هندسه از یک چین جعبه‌ای با کوتاه‌شدگی ۲۰ درصد در بخش غربی تا یک چین جناغی با کوتاه‌شدگی ۷ درصد در بخش شرقی تغییر می‌نماید. کوتاه‌شدگی بیشتر و در نتیجه آن برخاستگی بیشتر ساختاری در بخش غربی تاقدیس سفیدزاخورد می‌تواند با مهاجرت هیدروکربور به آن سمت و تجمع آن در این بخش همراه گردد، لذا این بخش می‌تواند به عنوان هدف اکتشافی آتی پیشنهاد گردد.

۲) در بخش غربی تاقدیس سفیدزاخورد، نهشته‌های تبخیری ضخیم تریاس (سازند دشتک) با افزایش ضخامت تکتونیک تا بیش از دو برابر ضخامت اولیه، یک افق جدایش مؤثر را در میانه پوشش رسوبی تشکیل می‌دهند که هندسه توالی پس از تریاس را از مخازن گازی پرموتریاس جدا کرده است. در نتیجه این جدایش، محل رأس تاقدیس در واحدهای مزوزوئیک و سنوزوئیک نسبت به واحدهای پالئوزوئیک

منابع

- ابطحی، س. ت. ۱۳۸۷. معرفی یک میدان، میدان سفید زاخورد، مخزن دهرم. ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۵۰، صفحه ۱۱-۱۳.
- باغبانی، د. ۱۳۸۲. بررسی تحولات جغرافیای گذشته و ارزیابی و توان هیدروکربوری افق دهرم در ناحیه فارس و جنوب شرق خلیج فارس و تعیین محدوده بلندای قدیمی فارس. مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران. گزارش زمین‌شناسی شماره ۱۹۴۶.
- 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.
- 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.
- Back, S., Strozyk, F., Kukla, P. A., Lambiase, J. J., 2008. Three-dimensional restoration of original sedimentary geometries in deformed basin fill, onshore Brunei Darussalam, NW Borneo. *Basin Research* (2008) 20, 99-117, doi: 10.1111/j.1365-2117.2007.00343.x.
- Carrera, N., Mun˜oz, E. Roca, J. A., 2009, 3D reconstruction of geological surfaces by the equivalent dip-domain method: An example from field data of the Cerro Bayo Anticline (Cordillera Oriental, NW Argentine Andes). *Journal of Structural Geology* 31 (2009) 1573-1585.
- Dahlstrom CDA .1969. Balanced cross sections. *Can J Earth Sci.* 6:743-757.
- Dhont, D., P. Luxey., J. Chorowicz, 2005, 3-D modeling of geologic maps from surface data. *AAPG Bulletin*, v. 89, no. 11 (November 2005), pp. 1465-1474.
- Dischinger, J. D., Mitra, Sh., 2006, Three-dimensional structural model of the Painter and East Painter reservoir structures, Wyoming fold and thrust belt. *AAPG Bulletin*, v. 90, no. 8 (August 2006), 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. 1171-1185.
- Fowler, T.J., Winsor, C.N. 1996. Evolution of chevron folds by profile shape changes: comparison between multilayer deformation experiments and folds of the Bendigo-Castlemaine goldfields, Australia. *Tectonophysics*, 258, 125-150, doi:10.1016/0040-1951(95)00191-3.
- Ghavidel- Syooki, 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.
- Guillaume, B., Dhont, D., Brusset, S. 2008. Three-dimensional geologic imaging and tectonic control on stratigraphic architecture: Upper Cretaceous of the Tremp Basin (south-central Pyrenees, Spain). *AAPG Bulletin*, v. 92, no. 2 (February 2008), pp. 249-269.
- 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.
- Jahani, S. 2008. Salt tectonics, folding and faulting in the Eastern Fars and southern offshore provinces (Iran). PhD Thesis. Université de Cergy – Pontoise.

- 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., Sherhati, 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.
- 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.
- Motamedi, H., Sherhati, 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.
- Mc Quarrie, 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.
- Molinaro, M., Leturmy, P., Guezou, J. C., Frizon de Lamotte, D., 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, 2005
- 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.
- Marsden, D. 1992. V (sub o) -K method of depth conversion, *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, 11 (8), p. 53-54.
- Mitra, Sh., Leslie, W. 2003, Three-dimensional structural model of the Rhourde el Baguel field, Algeria. *AAPG Bulletin*, v. 87, no. 2 (February 2003), pp. 231–250.
- Mitra, Sh., Figueroa, G. C., Garcia, J. H., Alvarado, A. M. 2005. Three-dimensional structural model of the Cantarell and Sihil structures, Campeche Bay, Mexico. *AAPG Bulletin*, v. 89, no. 1 (January 2005), pp. 1–26.
- Oveisi, B. 2007. Rates and processes of active folding in the central Zagros – IRAN. PhD Thesis. Universite 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.
- Ramsay, J.G. 1974. Development of chevron folds. *Geological Society of America Bulletin*, 79, 795–812.
- Rahimpour-Bonab, 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.
- 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.
- Sherhati, 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.
- Szabo, F., Kheradpir, A. 1978. Permian and Triassic stratigraphy, Zagros basin, south-west Iran, *Journal of Petroleum Geology*, 1, 57 – 82.
- 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.
- Valcarce, G. Z., Zapata, T., Ansa, A., Selva, d G. 2006, Three-dimensional structural modeling and its application for development of the El Porto'n field, Argentina. *AAPG Bulletin*, v. 90, no. 3 (March 2006), pp. 307–319.
- Yamato, P., Kaus, B., Mouthereau, F., Castellort, 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.