

تفاوت رژیم تنش برجا وابسته به موقعیت ساختاری و ویژگی‌های ژئومکانیکی، نمونه موردی در سازندهای گچساران و آسماری، جنوب باختری ایران

حسین طالبی^(۱)، احمد علوی^(۲)، محمدرضا قاسمی^(۳) و شهرام شرکتی^(۴)

۱. دانشجوی دکتری تکتونیک، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۲. استاد گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
۴. دکتری مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۰۷

چکیده

برآورد تانسور تنش برجا در حوضه‌های رسوبی با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده در طی حفاری و نمودارگیری در چاه‌های اکتشافی و توسعه‌ای نفت و گاز امکان‌پذیر است. محاسبه بزرگا و اندازه‌گیری راستای تنش‌های برجا و رژیم تنش حاصل شده در محدوده چاه‌های مورد مطالعه در برنامه‌های بازیافت ثانویه از مخازن هیدروکربوری و همچنین تحلیل پایداری دیواره چاه‌ها کاربردهای متعددی خواهد داشت. افزایش تولید با طراحی شکافت هیدرولیکی، کاهش تولید ماسه در مخازن چندلایه‌ای همچون میدان بزرگ مارون با افق‌های ماسه‌ای سست و همچنین بهبود عملکرد حفاری در سازندهای غیرمخزنی همچون گچساران با ویژگی‌های رئولوژیک خاص، نیازمند شناخت و آگاهی از شرایط تنش حاکم می‌باشد. در این پژوهش تلاش گردیده است تا رژیم تنش برجا با استفاده از نتایج حاصل از مدل‌های مکانیکی زمین^(۲) در چند حلقه چاه منتخب در میدان‌های هیدروکربوری مارون و لالی در سازند مخزنی آسماری و سازند غیرمخزنی گچساران تحلیل گردد. نتایج حاصله نشان‌دهنده افت قابل ملاحظه بزرگای تنش‌های افقی در گذر از سازند گچساران به سازند مخزنی آسماری به‌ویژه در میدان مارون می‌باشد. بزرگای تنش‌های اصلی محاسبه شده در سازندهای گچساران و آسماری میدان لالی، نشان‌دهنده رژیم تنش راستالغز ($Sh_{max} > S_v > Sh_{min}$) است، گرچه در سازند گچساران میدان مارون، رژیم تنش تخمین زده شده در محدوده معکوس تا راستالغز می‌باشد ولی رژیم تنش غالب در مخزن آسماری این میدان از نوع نرمال است. این وضعیت تنش برجا، بیان‌کننده آن است که شرایط ساختاری و همچنین اختلاف در عمق جایگیری این ساختارها نقش مهمی در تغییر رژیم زمین‌ساختی بازی می‌نماید

واژه‌های کلیدی: تنش برجا، میدان‌های لالی و مارون، رژیم‌های تنش راستالغز و نرمال، سازندهای آسماری و گچساران.

مقدمه

از شرایط تنش در پوسته گردیده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که شرایط تنش در پوسته بسیار پیچیده بوده که

اندازه‌گیری تنش‌های متعددی در دهه‌های گذشته در سطح جهانی صورت گرفته است و باعث افزایش آگاهی

1. In-situ stress

2. Mechanical earth model

* نویسنده مرتبط: H_Talebi@sbu.ac.ir

انجام شده است لذا تاکنون روابط تجربی متکی بر داده‌های آزمایشگاهی و میدانی که خاص پهنه‌های زمین ساختی ایران و از جمله زاگرس باشد، گزارش نشده است.

موقعیت جغرافیایی و شرایط ساختاری میدان‌های مورد مطالعه

میدان‌های هیدروکربوری مارون و لالی به ترتیب در جنوب و شمال باختری فروافتادگی دزفول شمالی واقع شده و در نوع خود از مهم‌ترین مخازن تولیدی نفت در جنوب باختر ایران محسوب می‌شوند. موقعیت این میدان‌های هیدروکربوری در پهنه فروافتادگی دزفول شمالی به‌عنوان بخشی از زاگرس چین‌خورده در (شکل ۱) نشان داده شده است. میدان مارون در فاصله ۶۰ کیلومتری خاور شهر اهواز و در مجاورت میداندین کویال، آغاچاری، رامین، شادگان و رامشیر واقع شده است. از مهم‌ترین میدان‌های هم‌جوار میدان لالی که در فاصله تقریبی ۱۲۰ کیلومتری شمال باختری اهواز واقع گردیده می‌توان به زیلویی، کارون، مسجدسلیمان و پاپیله اشاره نمود (شکل ۱).

این دو میدان از لحاظ موقعیت ساختاری و سیستم دگرشکلی تفاوت‌های عمده‌ای با یکدیگر دارند. طول ساختار مارون در سطح سازند آسماری ۶۷ کیلومتر و عرض آن حداکثر ۷ کیلومتر و ضخامت سازند آسماری در این میدان در حدود ۴۵۰ متر است. این میدان یک تاق‌دیس تقریباً نامتقارن است که دارای شیب متوسط ۴۵ تا ۶۰ درجه در یال جنوب باختری و ۲۵ تا ۴۵ درجه در یال شمال خاوری و دارای پیچشی در قسمت میانی ساختار است که طی آن روند میدان تقریباً ۲۰ درجه از جهت W45N در شمال باختر به سمت W65N در جنوب باختر تغییر یافته است. ساختار لالی به‌عنوان یک ساختار کاملاً نامتقارن و پیچیده با پرشیب شدن یال پیشانی و کشیدگی^۱، که مرتبط با گسلش راندگی بخش پیشانی و پس راندگی در یال شمال شرقی است، نسبت به ساختارهای مجاور خود یعنی زیلویی و کارون در ارتفاع بالاتری قرار گرفته و هندسه ساختار فراجسته^۲ را که در (شکل ۲) نشان داده شده است، به نمایش می‌گذارد

بخشی از آن ناشی از ناهمگنی‌های زمین‌شناسی (وجود گسل‌ها و پهنه‌های گسیختگی و همچنین تفاوت در ترکیب مواد) و بخش دیگر آن به دلیل وجود چندین فاز تغییر شکل در برخی نواحی است که با میدان‌های تنش متفاوتی همراه گردیده‌اند (Fossen, 2010).

آگاهی و درک میدان تنش محلی و ناحیه‌ای دارای کاربردهای عملی متعددی است که یکی از مهم‌ترین آنها در حفاری و افزایش میزان تولید و مدیریت بهینه میدان‌های هیدروکربوری است. در کنار آن شناخت و آگاهی از وضعیت پیشین و کنونی تنش اطلاعات مهمی در ارتباط با فرآیندهای تکتونیکی گذشته و حال حاضر فراهم می‌نماید.

بدون تردید درک شرایط تنش برجا و تغییرات آن در سازندهای مختلف زمین‌شناسی و قیاس آن با وضعیت تنش‌های قدیمی، در تحلیل حرکات ورقه‌های لیتوسفریک، فرونشست‌های پوسته‌ای و تغییرشکل‌های زمین ساختی نقش اساسی ایفا می‌نماید. راینکر و همکاران (Reinecker et al., 2006) با تجزیه و تحلیل نزدیک به ۱۶۰۰۰ داده ورودی از تنش، الگوهای اصلی تنش و پراکندگی رژیم‌های تنش در پوسته زمین را در نقشه جهانی تنش نشان داده‌اند. این داده‌ها بر پایه الگوهای تنش رده اول (تنش مربوط به جابجایی ورقه‌های زمین ساختی)، الگوهای تنش رده دوم (ایزوستازی ریشه قاره‌ها) و الگوهای تنش رده سوم (گسل‌ها) قابل تفسیر می‌باشند که توسط (Heidbach et al., 2007) انجام گردید. ارزیابی‌های انجام شده در حوضه‌های رسوبی گوناگون در سراسر دنیا نشان می‌دهد که بزرگی تنش در محیط‌های گسلش نرمال، امتدادلغز و معکوس، در تعادل با مقاومت اصطکاکی است (Zang et al., 2010).

بر اساس پژوهش‌های انجام شده که در مناطق مختلف دنیا، برای برآورد بزرگای تنش‌ها انجام شده است، روابطی تجربی ویژه‌ای برای همان نواحی استخراج گردیده است و قابل تعمیم به سایر نقاط نمی‌باشد که یکی از دلایل اصلی آن، تفاوت محیط‌های ساختاری است، آنچه که از آن به‌عنوان فراسنج‌های زمین ساختی یاد گردیده است (Blanton and Olson, 1999). در این زمینه مطالعات اندکی در ایران

1. Dragging
2. Pop up structure

(طالبی و نریمانی، ۱۳۸۸).

روش مطالعه

برآورد بزرگای تنش‌های برجا

تعیین تانسور تنش نیازمند پیش‌زمینه‌ای از تنش قائم، کوچک‌ترین تنش افقی، فشار روزنی^۱، وزن گل، وجود یا عدم وجود شکستگی‌های القایی، فراسنج‌های حفاری و مقاومت سنگ دیواره چاه است (Yaghoubi and Zeinali, 2009). روشی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است از روش‌های معتبر تعیین تنش در عمق‌های نسبتاً زیاد می‌باشد و کاربرد زیادی در حل مسائل ژئومکانیکی دارند که برای نمونه می‌توان به (Rasouli et al., 2010) اشاره نمود. استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی درون‌چاهی و همچنین شواهد حفاری مبنای اصلی این پژوهش بوده و علاوه بر این جهت مقایسه و بهبود تخمین‌های صورت گرفته در برخی نقاط مورد نظر، روش چند ضلعی تنش^۲ از سایر روش‌های متداول در این‌گونه مطالعات برای مقایسه به کار گرفته شده است. فشار روزنی به‌عنوان یکی از فراسنج‌های بسیار مهم در روابط و معادلات تخمین تنش‌های برجا در روش پوروالاستیسیته شناخته می‌شود (Sayers, 2010).

بدین منظور در این تحقیق برای سازندهای گچساران و آسماری جهت برآورد قابل قبول از مقدار فشار روزنی، مجموعه‌ای از اطلاعات در دسترس مورد استفاده قرار گرفته است

فشار روزنی در لایه‌های با سنگ‌شناسی متفاوت در سازند گچساران که مجموعه‌ای از انیدریت، نمک، مارن‌های خاکستری و قرمز و به‌ندرت لایه‌های نازکی از کربنات می‌باشند، یکی از چالش‌های این مطالعه بوده است، زیرا آزمایش‌هایی همچون^۳ RFT،^۴ MDT و یا^۵ FPT که برای کسب داده‌های فشار روزنی و اطلاعات ویژه از سیالات مخزنی به کار می‌روند به‌طور معمول فقط در بخش‌های مخزنی انجام می‌شوند. نبود این اطلاعات و همچنین عدم امکان آزمایش در سازندی همچون گچساران به دلایل

شعاع انحنای متفاوت در طول ساختمان و شیب بسیار متنوع در یال‌های این مخزن از ویژگی‌های این میدان می‌باشد. به‌طور کلی گوناگونی سبک ساختاری و شکل چین‌خوردگی از ویژگی‌های تأقدیس‌های واقع در پهنه‌های پیش بوم کوهزاده‌هایی مانند زاگرس است که مرتبط با تغییرات رخساره رسوبی و ویژگی‌های مکانیکی آنها می‌باشد که دو ساختار مورد بررسی در این پژوهش نیز از قاعده یادشده مستثنی نیستند.

برای نمونه می‌توان به وجود لایه‌های تبخیری (بخش کلهر) در میان بخش‌های کربناته مخزن آسماری میدان لالی و وجود لایه‌های متعدد شیل، مارن و ماسه در حفاصل لایه‌های کربناته مخزن آسماری میدان مارون اشاره کرد. این موارد نمونه خوبی برای نمایش چینه‌شناسی مکانیکی متفاوت در مخزن آسماری میدان‌های نفتی زاگرس هستند.

بررسی و پردازش داده‌های مورد نیاز

جهت انجام این تحقیق وجود نمودارهای تصویرگر و همچنین نمودارهای صوتی دوقطبی پردازش شده با هدف مطالعات ژئومکانیکی اهمیت زیادی داشته است. به دلیل اینکه اخذ این نوع نمودارها در بخش‌های روباره و غیر مخزنی در میدان‌های نفتی ایران مرسوم نمی‌باشد، تعداد بسیار اندکی از چاه‌ها دارای این اطلاعات می‌باشند و تا حد امکان داده‌های موجود این میدان‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج آنالیزهای آزمایشگاهی نمونه‌های مغزه برای تخمین فراسنج‌های استاتیک مکانیکی و مقاومتی و کالیبراسیون اطلاعات پتروفیزیکی استفاده شده است (طالبی و همکاران، ۱۳۹۲). داده‌های میدانی شامل آزمایش‌های نشت و نشت گسترده که از داده‌های بسیار نادر و با اهمیت می‌باشند در دو حلقه از چاه‌های میدان‌های لالی و مارون به‌منظور اندازه‌گیری تنش بر جای کمینه (σ_3) و انجام کالیبراسیون لازم مورد استفاده قرار گرفته است.

برای تخمین مقادیر تنش‌های برجا در توالی سازندهای گچساران و آسماری، از یک حلقه چاه میدان لالی و سه حلقه از چاه‌های میدان مارون که اطلاعات نسبتاً کامل‌تری داشته‌اند، استفاده شده است.

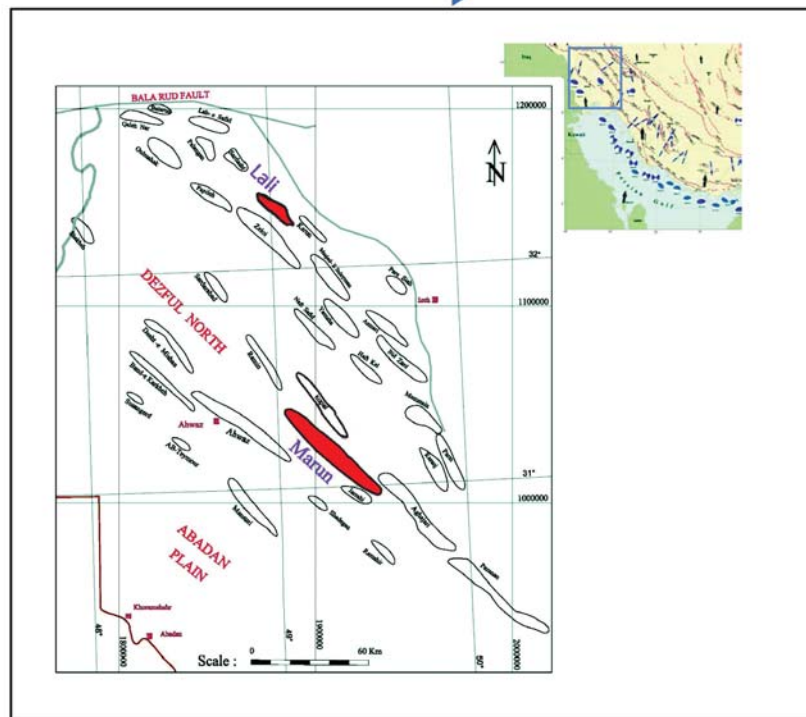
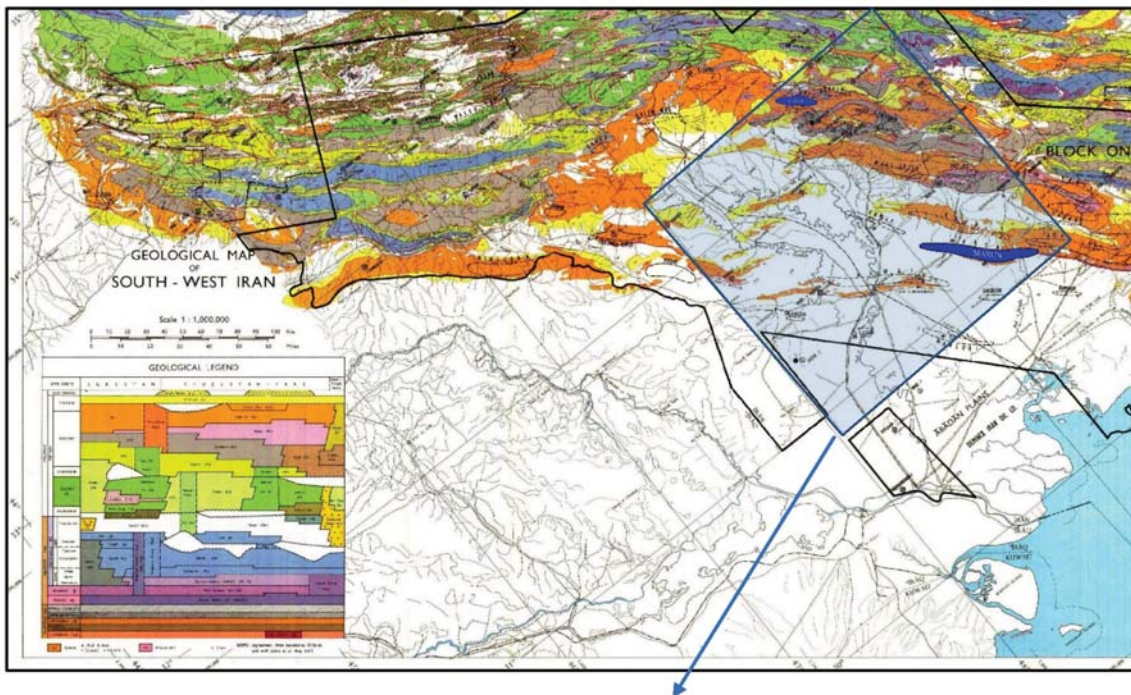
1. Pore pressure

2. Stress polygon

3. Repeat formation test

4. Modular Formation Dynamics Tester

5. Formation Pressure Test

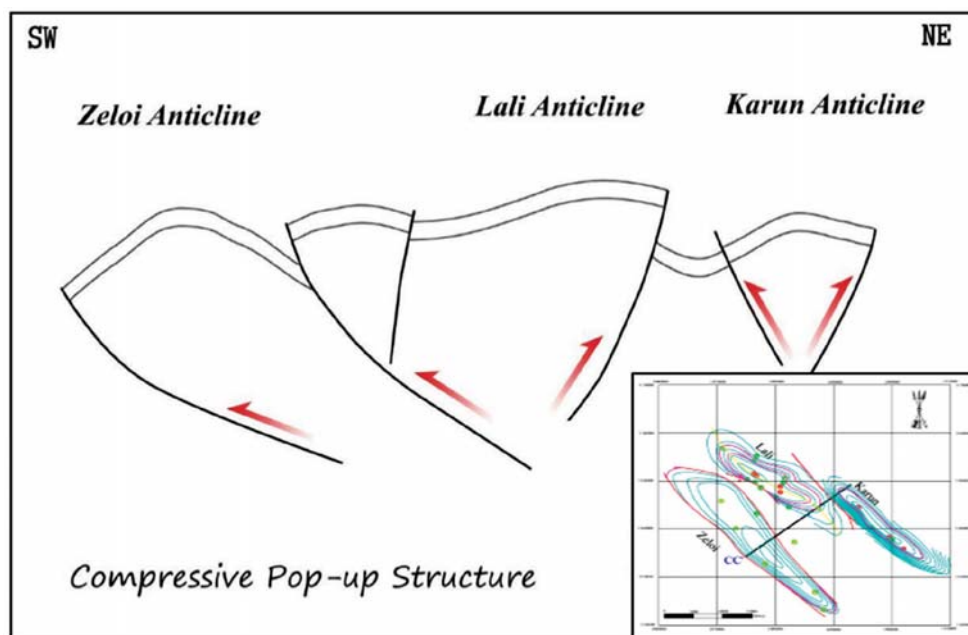


شکل ۱. موقعیت زیرسطحی ناقدیس‌های مارون و لالی در فروافتادگی دزفول شمالی. پهنه زاگرس چین‌خورده با توجه به زمین‌شناسی سطحی (شکل بالا) و موقعیت ساختارهای هیدروکربوری مجاور آنها (شکل پایین) نشان داده شده است

فنی^۱، شرایط بیش فشاری^۲ و مخاطرات حفاری، سبب شده
 است تا فشار سازندی در گچساران با تقریب و به‌طور عمده بر
 مبنای فراسنج‌های حین حفاری و اطلاعاتی چون وزن گل
 حفاری، میزان هرزروی و جریان سیال سازندی، محاسبه
 شود.

بر اساس اطلاعات موجود، تخلخل زمینهای در لایه‌های
 نمک و انیدریت تقریباً صفر می‌باشد. عمده فشارهای سیال

1. Technical
2. Over pressure



شکل ۲. نمایش ساختار بالا جسته (Pop up) لالی در برش ساختاری ترسیم شده در حدفاصل میدان لالی و ساختارهای مجاور آن که چاه‌های لالی-۳، کارون-۲ و زیلویی-۴، ۵ و ۱۲ را در بردارد (طالبی و نریمانی، ۱۳۸۸)

استفاده شده است. در نهایت با این اطلاعات برآورد واقع گرایانه‌ای از مقدار تنش بیشینه افقی (sHmax) و تانسور کامل تنش انجام شده است.

آزمایش‌های مکانیک سنگ

با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری سه محوری بر روی تعدادی نمونه سنگ، فراسنج‌های زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مربوط به معیار شکست مور-کولمب تعیین گردید. با آزمایش کشش برزیلی مقادیر مقاومت کششی سنگ‌های مختلف به روش غیرمستقیم تعیین شد. تعداد محدود نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ، تنوع سنگ‌شناسی و شرایط واقعی زمین از جمله عواملی هستند که می‌توانند دقت نتایج حاصله را تحت تاثیر قرار دهند.

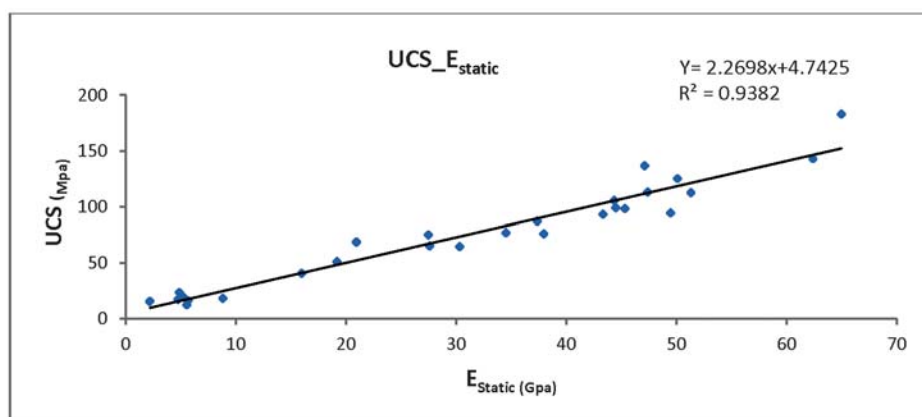
در این مطالعه بر اساس اطلاعات موجود، روابط تجربی برای تعیین فراسنج‌های مقاومتی استاتیک نمونه‌های مغزه اخذ شده از سازندهای آسماری و گچساران، استخراج گردید. مناسب‌ترین رابطه به دست آمده مربوط به تخمین مدول یانگ استاتیک از روی مقاومت فشاری تک‌محوری است (نمودار ۱).

نسبتاً بالا در این سازند مربوط به لایه‌های مارنی و میان لایه‌های بسیار نازک آهکی در بخش‌هایی از این سازند می‌باشد. بنابراین مدل‌های مکانیکی زمین در سازند گچساران با در نظر گرفتن این فرض ساخته شده‌اند.

در مورد سازند آسماری با وجود اطلاعات نسبتاً مناسب، گرادبان فشار روزنی در بخش‌های مختلف این سازند مورد استفاده قرار گرفته است.

در این پژوهش برآورد بزرگای تنش‌های برجا در دو بخش اصلی تنش‌های قائم و افقی انجام گردیده است. تعیین تنش قائم با خطای نسبتاً کمتری قابل دستیابی است که در بخش مربوطه، توضیحات آن ارائه گردیده است. تخمین تنش‌های افقی که در واقع نسبتی از تنش‌های قائم هستند، دارای پیچیدگی و عدم قطعیت می‌باشد. عموماً برای تعیین تنش‌های افقی (به جز در رژیم‌های گسلش معکوس) از آزمایش‌های نشت و نشت گسترده و همچنین ریزترک استفاده می‌شود. با توجه به اینکه این آزمایش‌ها تنها در چند نقطه محدود انجام می‌شود، تنها گویای میزان بزرگای تنش در همان نقطه خواهند بود، بنابراین برای برآورد و تحلیل بزرگای تنش در تمام توالی حفاری موردنظر از این داده‌ها برای کالیبراسیون بزرگای تنش‌ها در کنار سایر داده‌ها

1. Micro fracture



نمودار ۱. نمودار رابطه تجربی حاصل از نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ برای مقاومت تک‌محوری و مدول یانگ بر اساس داده‌های این مطالعه

برآورد تنش قائم

در نواحی با تغییرات جانبی اندک در چینه‌شناسی مکانیکی و چگالی، تنش ناشی از وزن روباره عمدتاً در راستای قائم اعمال می‌گردد. براین اساس بزرگای تنش قائم معادل با فشار لیتوستاتیک یا وزن لایه‌های روباره جهت برآورد تنش قائم، ملاک قرار گرفته و بر اساس رابطه زیر تعیین گردید:

$$S_v = \int_0^z \rho(z)gz dz \approx \bar{\rho}gz$$

در اینجا $\rho(z)$ ، چگالی در عمق معین و g شتاب ثقل می‌باشد. وزن مخصوص سنگ‌ها در سازند آسماری با استفاده از نمودار دانسیته و در سنگ‌های روباره مخزن، با استفاده از چگالی میانگین خرده‌های حفاری تعیین گردیده است. با استفاده از این اطلاعات، گرادیان تنش قائم در فروافتادگی دزفول شمالی برابر با ۰/۲۵۵ مگاپاسکال/متر برآورد شده است (طالبی و همکاران، ۱۳۹۲) که در شکل‌های ۶، ۸ و ۹ قابل مشاهده می‌باشد.

تعیین راستای تنش افقی بیشینه

در این مطالعه یکی از معتبرترین داده‌های حاصل از تفسیر نمودارهای تصویری در چاه‌های نسبتاً عمیق تولیدی نفت برای تعیین راستای تنش‌های افقی که نشانگر وضعیت کنونی میدان تنش در توده سنگ می‌باشند، استفاده شده است. شکستگی‌های القایی کششی^۱ و ریزش‌های دیواره

ساخت مدل مکانیکی زمین در سازندهای گچساران و آسماری

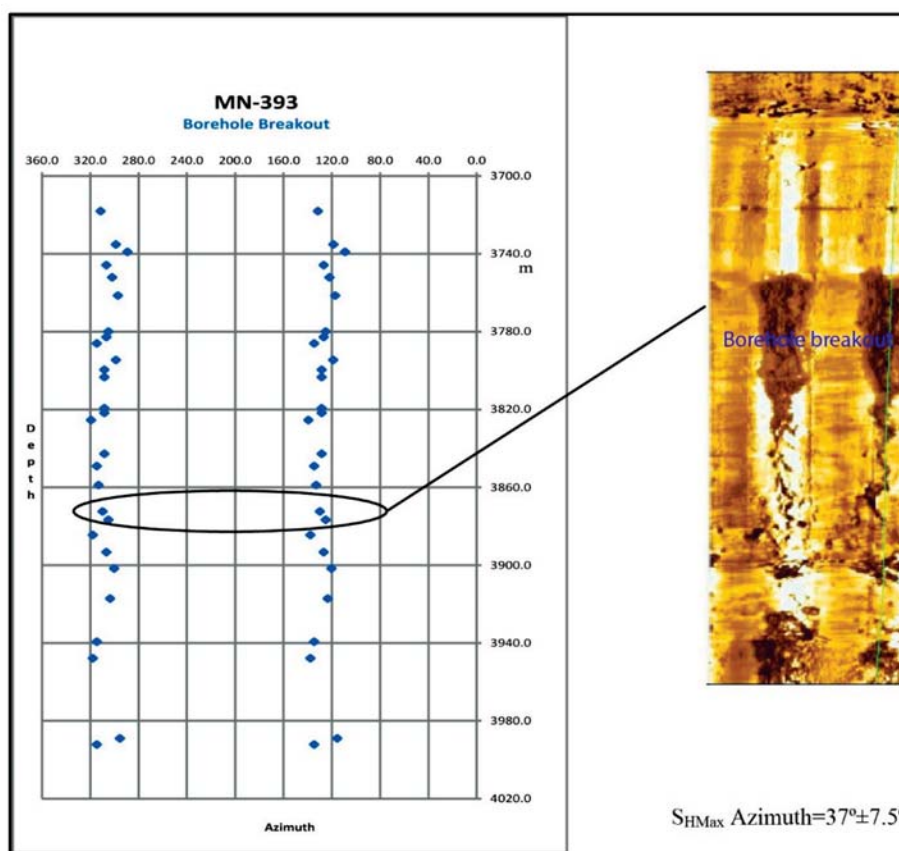
هدف اصلی این پژوهش، تحلیل و تمایز تنش در دو سازند با ویژگی‌های رئولوژیک و فشاری متفاوت، یعنی گچساران و آسماری در چاه‌های انتخاب شده از دو میدان لالی و مارون واقع در پهنه ساختاری فروافتادگی دزفول بوده و برای این منظور تخمین تنش‌ها با استفاده از ساخت مدل‌های مکانیکی زمین که در حال حاضر مورد استفاده بسیاری از شرکت‌های بالادستی نفت و گاز می‌باشد، انجام گردیده است. شرایط تنش درون زمین تأثیر بسیار عمیقی روی انتشار امواج صوتی لرزه‌ای و درون‌چاهی دارد و این مسئله منجر به اهمیت زیاد و کاربرد گسترده امواج کشسان جهت حل مسائل مربوط به ژئومکانیک گردیده است.

با استفاده از داده‌های مربوط به سرعت امواج برشی و فشاری، فراسنج‌های دینامیک الاستیک شامل مدول‌های یانگ، برشی و بالک و نسبت پواسون برای سازندهای گچساران و آسماری محاسبه شده‌اند (Rasouli et al., 2010). داده‌های حاصل از آزمایش‌های مکانیک سنگ روی مغزه‌ها برای تبدیل فراسنج‌های دینامیک به استاتیک استفاده شده‌اند که مبنای دقیق‌تری برای محاسبات تنش در توالی چاه می‌باشند. برای کالیبراسیون مقدار تنش حداقل (σ_3) دو آزمایش برجای نشست نیز استفاده شده است تا تخمین نزدیک به واقعیت حاصل گردد.

1. Induced tensile fractures

و همکاران، ۱۳۹۲) و غالباً در راستای شمال خاوری-جنوب باختری است (شکل ۳). تعیین راستای تنش در سازند گچساران به دلیل وجود تعداد بسیار اندکی از نشانگرهای مورد نظر در چند حلقه چاه، خیلی قابل اتکا نمی‌باشد. یکی از دلایل اصلی این مورد به ویژگی شکل پذیر بودن لایه‌های تبخیری و تغییر شکل شکننده به مراتب کمتر در این سازند مرتبط می‌باشد.

چاه از جمله نشانگرهای معتبر و قابل اعتماد جهت تعیین راستای تنش افقی بیشینه^۲ می‌باشند که ناشی از عملکرد شکستگی‌های کششی و برشی در دیواره چاه‌ها در اثر حفاری در یک توده سنگ واتنیده است (Hamison, 2007). در تفسیر راستای تنش، روش میانگین آماری در توالی عمقی لحاظ گردیده است. راستای تنش‌های افقی بیشینه در سازند آسماری با تشخیص تعداد قابل توجهی از نشانگرهای ذکر شده در چاه‌های مورد نظر تعیین گردیده (فارسی‌مدان



شکل ۳. نمایش ریزش‌های دیواره چاه (Borehole breakout) در توالی سازند آسماری چاه مارون-۳۹۳. با توجه به انحراف میانگین کمتر از ۱۰ درجه و فراوانی ریزش‌های دیواره چاه به‌عنوان شاخص راستای تنش از نظر معیار رده‌بندی کیفی تعیین راستای تنش (Tingay et al., 2008)، در رده بسیار معتبر (A) قرار می‌گیرد

چاه قائم و فرضیاتی همچون همگن بودن و حاکم بودن شرایط الاستیک خطی امکان‌پذیر است.

آزمایش‌های نشست و نشست گسترده در پاشنه جداری چاه‌ها، یکی از روش‌های پرکاربرد تعیین تنش افقی حداقل می‌باشد و در سه نقطه از توالی حفاری شده در چاه‌های

1. Borehole breakouts
2. SHmax

برآورد تنش‌های افقی

تخمین تنش حداقل (σ_3) با استفاده از آزمایش‌های ژئومکانیکی برجا

اندازه‌گیری مستقیم بزرگی تنش‌های افقی با روش‌های موجود امکان‌پذیر نمی‌باشد و تخمین آن با نتایج آزمایش‌های ریز ترک و با استفاده از روابط شکست هیدرولیکی در یک

برگرفته از معادلات (Kirsch, 1898) و (Jaeger and Cook, 1979) می‌باشد که برای توصیف تغییرات تنش در مجاورت یک حفره کروی شکل در محیط الاستیک و با فرض کرنش صفحه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (معادله ۱). در این تحقیق از نتایج داده‌های مربوط به آزمایش‌های نشست که در واقع یک شکست هیدرولیکی کوچک مقیاس می‌باشد، استفاده شده است (Sayers, 2010).

$$\sigma_{\theta\theta}^{\min} = \nu\sigma_h - \sigma_H - P_p \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{\max} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_p \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این روش با فرض قائم بودن چاه، داده‌های سرعت امواج صوتی اعم از فشارشی و کششی جهت محاسبه پیمایه کشسان و ضریب پواسون و در کنار چند فراسنج دیگر همچون فشار روزنی و کرنش‌های زمین‌ساختی، جهت محاسبه بزرگای تنش مورد استفاده قرار گرفته‌اند که مبنای آن تئوری پوروالاستیسیته است (روابط ۳ و ۴) و نهایتاً با آزمایش‌های میدانی تا حد امکان صحت‌سنجی شده‌اند.

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{1-\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \frac{E_{static}}{1-\nu^2} \varepsilon_x + \frac{\nu E_{static}}{1-\nu^2} \varepsilon_y \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \frac{E_{static}}{(1-\nu^2)} \varepsilon_y + \frac{\nu E_{static}}{(1-\nu^2)} \varepsilon_x \quad \text{رابطه (۴)}$$

روابط شماره ۳ و ۴ بر مبنای تئوری تغییر شکل الاستیک که توسط بایوت (Biot, 1941) ارائه گردید، بازنویسی شده‌اند. در روابط فوق، ε_x و ε_y به ترتیب میزان کرنش افقی در راستای طولی و عرضی، α ضریب بایوت^۱، ثابت پوروالاستیک یا ضریب تنش مؤثر و P_p فشار سیال درون چاه در هنگام گسیختگی سازند می‌باشند.

عمیق در این ناحیه مورد استفاده قرار گرفته است. در این آزمایش، فشار بسته شدن ترک به‌عنوان تنش بر جای حداقل (σ_3) قابل استفاده است که در این پژوهش از نتیجه این آزمایش برای کالیبراسیون مقادیر بزرگی تنش استفاده شده است. نمودارهای شاخص و تیپیک که حاصل از ترسیم مقادیر فشار-حجم گل و یا فشار-زمان هستند در منابع مختلف در دسترس می‌باشند (Lee et al., 2004). نقطه نشست^۱ در این‌گونه نمودارها، نقطه شروع شکست^۲ می‌باشد و به‌اختصار با (FIP) نمایش داده شده است و به‌عنوان تخمینی از تنش حداقل منطقه می‌باشد. البته جهت تخمین نسبتاً دقیق تنش حداقل، به‌ویژه در چرخه‌های دوم و یا سوم آزمایش، نقطه مربوط به فشار بسته شدن ترک^۳ یا (FCP) تخمین بسیار دقیق‌تری است. گاهی اوقات تفسیر این نمودارها به‌ویژه اگر بدون دیدگاه زمین‌شناسی انجام شده باشد، پر ابهام خواهد بود.

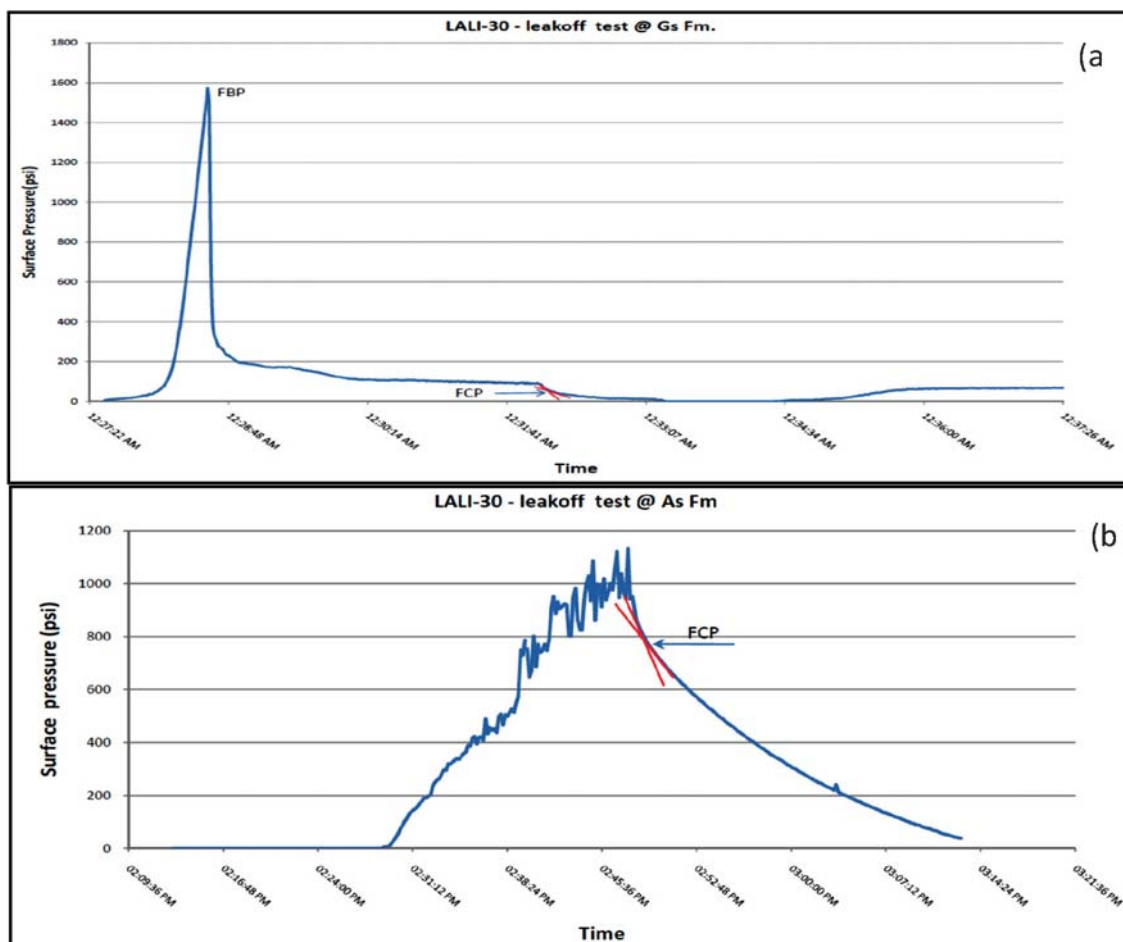
برای یکی از چاه‌های انتخاب شده در میدان لالی (لالی-۳۰) در دو نقطه واقع در سازند گچساران (عمق ۴۱۸ متر) و همچنین بخش فوقانی سازند آسماری (عمق ۱۶۰۴ متر) دو آزمایش موفق انجام شد و نمودار و نتایج آن در شکل ۴ و همچنین جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در کالیبراسیون بزرگی تنش حداقل لحاظ گردیده است.

بحث

تخمین بزرگای تنش‌های افقی همواره یکی چالش بوده است و تاکنون در هیچ‌یک از مطالعات انجام شده تخمین کاملاً دقیق تانسور تنش در عمق‌های زیاد امکان‌پذیر نبوده است. این شرایط در سازندهای شکل‌پذیر که در بخش‌هایی نیز بسیار پر فشار هستند، دارای محدودیت‌های بیشتری است.

برآورد بزرگای تنش با استفاده از فشار گسیختگی یا شکست سازند^۴ در مراحل آغازین یک آزمایش شکست هیدرولیکی قابل انجام می‌باشد (Sayers, 2010) که در شکل ۵ و در یک چاه قائم نشان داده شده است. تنش‌های پیرامونی^۵ دیواره چاه به هر دو تنش اصلی افقی بیشینه (sH) و کمینه (sh) وابسته است. معادله شماره ۱

1. Leakoff pressure
2. Fracture initiation pressure
3. Fracture closure pressure
4. Breakdown pressure
5. Hoop stress
6. Biot's coefficient



شکل ۴. نمودار نتایج آزمایش‌های LOT که نقطه FCP معادل تنش حداقل به ترتیب مربوط به بخش فوقانی سازند گچساران در سنگ انیدریت (XLOT-1)، (a) و کرنات‌های بخش ابتدایی سازند آسماری (XLOT-2) (b) در چاه لالی-۳۰ می‌باشند

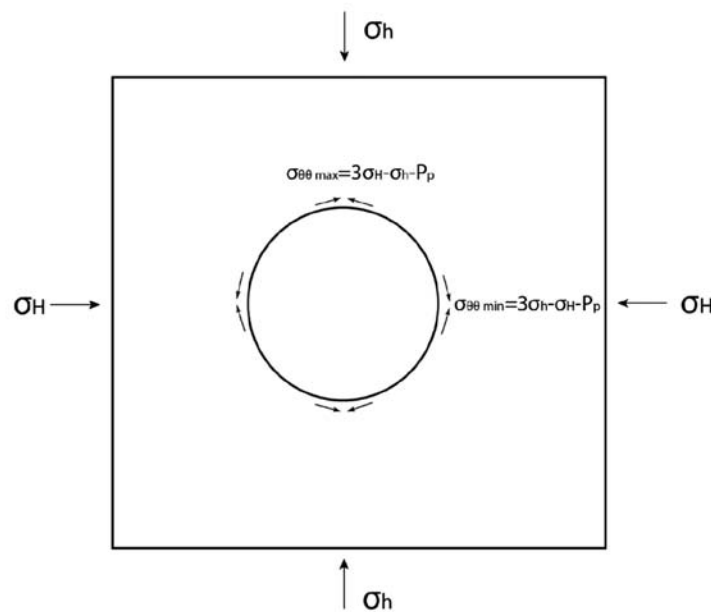
جدول ۱. نتایج مربوط به دو آزمایش نشت گسترده (XLOT) در محل چاه لالی-۳۰

چاه لالی-۳۰	عمق (متر)	وزن گل (پوند افوت مکعب)	فشار روزنی (پوند اینچ)	فشار شکست (پوند بر اینچ مربع)	فشار بسته شدن شکستگی (پوند بر اینچ مربع)	تنش رویاره (پوند بر اینچ مربع)	سازند و سنگ شناسی
جداری (۱۳/۳/۸) اینچ	۴۱۸	۸۵	۸۰۳.۷	۲۳۷۲.۷	۸۷۰	۱۴۵۰.۲	گچساران-۷ (انیدریت - مارن)
جداری (۹/۵/۸) اینچ	۱۶۰۴	۷۸	۲۸۲۷.۴	۳۹۶۰.۴	۳۶۳۷	۵۸۸۲.۷	آسماری (سنگ آهک)

دیواره چاه، تنش القایی بیشینه در پیرامون چاه یا $(\sigma_{\theta\theta}^{\min})$ ، برابر با صفر قرار داده شده است (روابط ۱ و ۲).
 با استفاده از این روش و با تغییر فراسنج‌های تکتونیکی $(\epsilon_x$ و ϵ_y) در مدل مکانیکی ساخته شده، وقوع شکستگی‌های برشی و یا کششی در دیواره چاه با نسبت تنش‌های افقی مطابقت داده شده و مناسب‌ترین شرایط در تمامی توالی مورد نظر لحاظ گردید و همان‌گونه که در بازه عمقی ۳۶۸۰ متر تا انتهای چاه مشاهده می‌شود (شکل ۷)، بین فشار

کالیبراسیون مدل‌های مکانیکی زمین و تخمین تنش‌ها

برای استنباط و تخمین تنش‌ها در دیواره چاه با فرض مقاومت کششی ناچیز سنگ در قیاس با مقادیر تنش برجا، رابطه شماره ۱ به‌گونه‌ای بازنویسی شده است که در هنگام وقوع شکست، تنش القایی حداقل در پیرامون چاه $(\sigma_{\theta\theta}^{\min})$ برابر با صفر باشد که این شرایط به هنگام شکل‌گیری و ایجاد شکستگی‌های القایی کششی در دیواره چاه محقق می‌گردد. به‌صورت همزمان در نقاط شکل‌گیری شکستگی برشی در



شکل ۵. در دیواره چاه‌ها، تنش‌های پیرامونی کمینه و بیشینه به ترتیب در راستای تنش‌های اصلی بیشینه (sH) و کمینه (sh) شکل می‌گیرند

مخزنی آسماری حفر گردیده است. موقعیت ساختاری^۴ و محل چاه حفاری شده در (شکل ۶) نشان داده شده است. تخمین بزرگای تنش‌های برجای آن، بیانگر رژیم تنش نرمال در توالی مورد نظر می‌باشد. مقادیر بزرگای هر سه تنش اصلی به عمق زیاد جایگیری این سازند و افزایش بزرگای تنش‌های افقی، متاثر از افزایش وزن روباره می‌باشد که مهم‌ترین نقش را در این زمینه ایفا می‌نماید. با توجه به تعداد قابل توجه ریزش‌های دیواره چاه، اندازه‌گیری راستای تنش و کالیبراسیون بزرگای تنش با دقت نسبتاً خوبی انجام گردیده است، چنانکه در عمق ۳۷۰۵ متری چرخش قابل ملاحظه راستای تنش افقی بیشینه (حدود ۷۰ درجه)، ناشی از عملکرد احتمالی گسل را می‌توان تشخیص داد.^۱

راستای تنش افقی بیشینه در بخش ابتدایی سازند آسماری این چاه در جهت عکس روند شناخته شده در این میدان می‌باشد. در چاه مارون-۴۵۸ که از لحاظ جایگاه ساختاری در موقعیت نسبتاً مشابه با مارون-۳۹۳ قرار گرفته است، به دلیل وجود نتایج آزمایش نشت گسترده در بخش ۱ سازند گچساران، تخمین نسبتاً دقیقی از بزرگا و نسبت

ایجاد شکستگی‌های برشی (جابجایی نمودار Bo-Pr به سمت راست) و شکل‌گیری بخش‌های ریزشی در دیواره چاه که شاخص گسیختگی‌های برشی هستند، تطابق خوبی برقرار شد (شکل‌های ۶ و ۷).

با استفاده از خروجی مدل‌های مکانیکی، تنش‌های برجای تخمین زده شده در این چاه‌ها به‌عنوان رژیم تنش تکتونیکی حاکم در این محدوده، مدنظر قرار گرفته است.

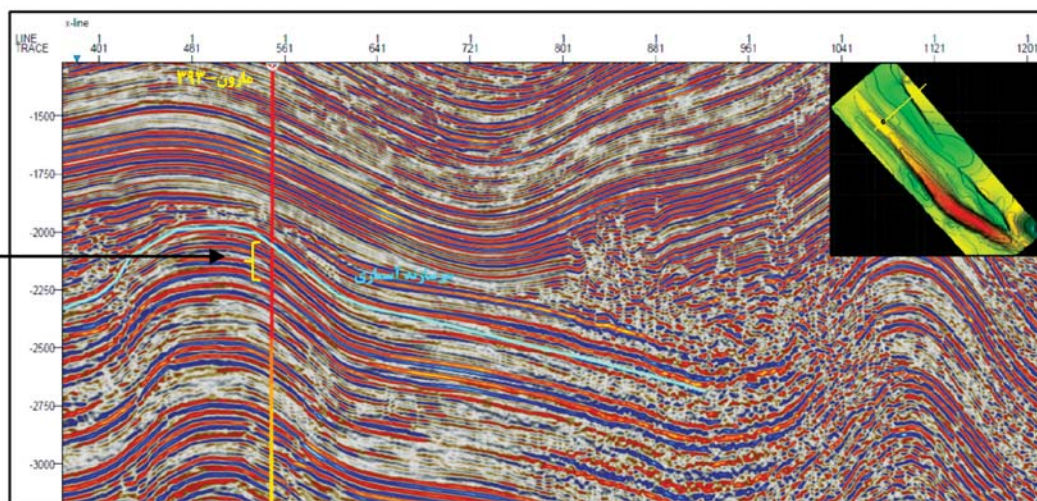
تحلیل شرایط تنش برجا نسبت به موقعیت ساختاری

پس از برآورد و تخمین نسبی بزرگای تنش‌های برجا، رژیم تنش حاصله با توجه به موقعیت جایگیری چاه‌های مورد نظر مطابقت داده شد. در میدان مارون دو حلقه چاه در یال شمالی و چاه سوم در یال جنوبی حفاری شده‌اند. خطوط لرزه‌ای در بردارنده این چاه‌ها و وضعیت ساختاری آنها بررسی گردیده‌اند.

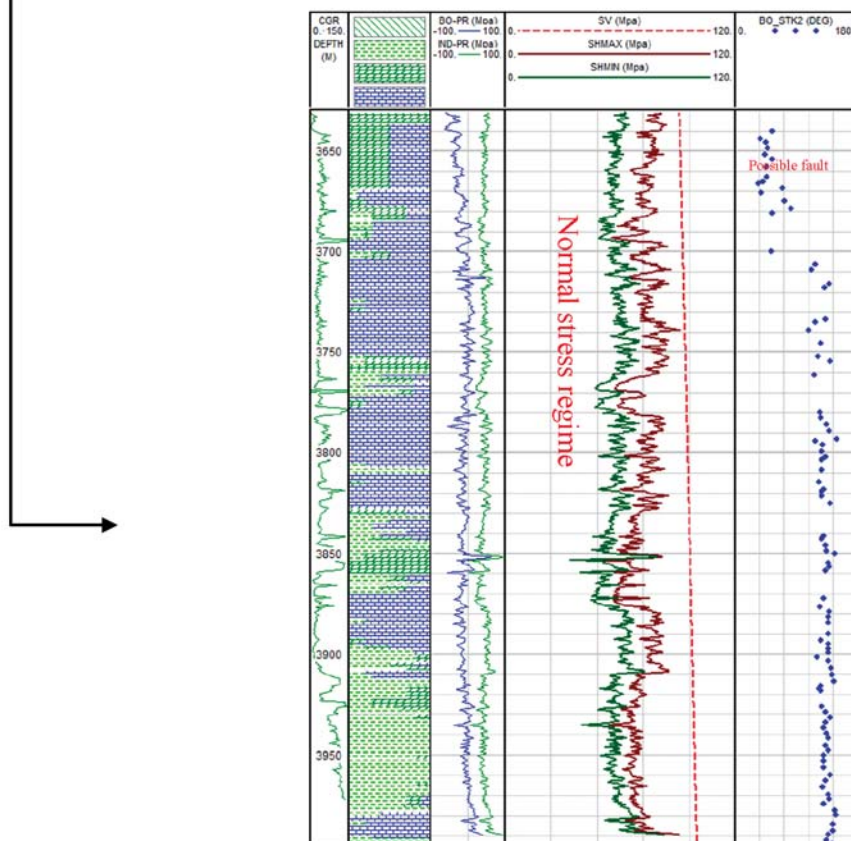
بر اساس تفسیر برش‌های لرزه‌ای، سازوکار چین‌خوردگی در میدان مارون از نوع چین‌های مرتبط با گسل^۱ بوده و به نظر بیانگر گذر از چین جدایشی ساده^۲ به چین جدایشی حمل شده^۳ است.

چاه مارون-۳۹۳ در یال شمالی و دماغه شمال باختری این میدان واقع گردیده است و بیش از ۳۶۰ متر از سازند

1. Fault related folds
2. Detachment fold
3. Transported detachment fold
4. Structural position

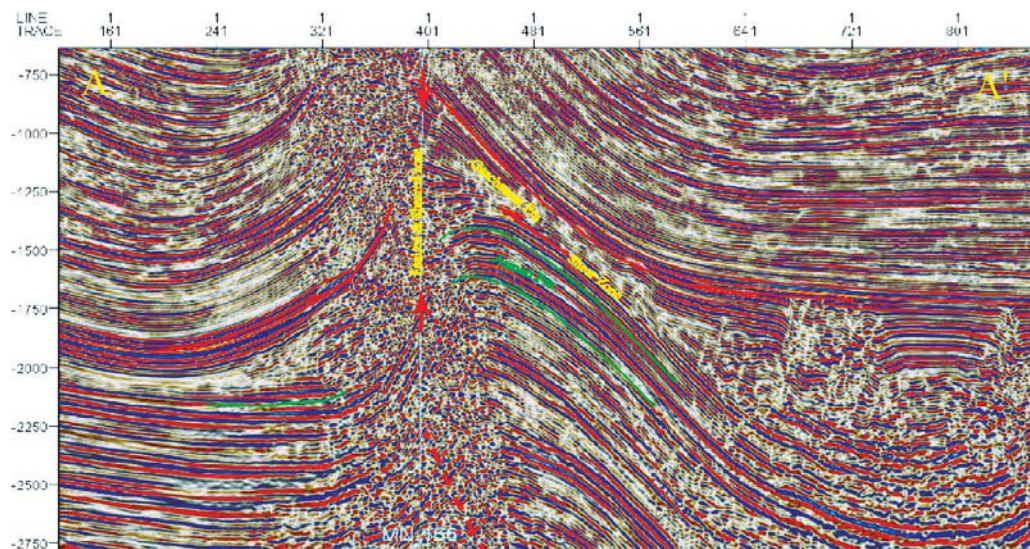
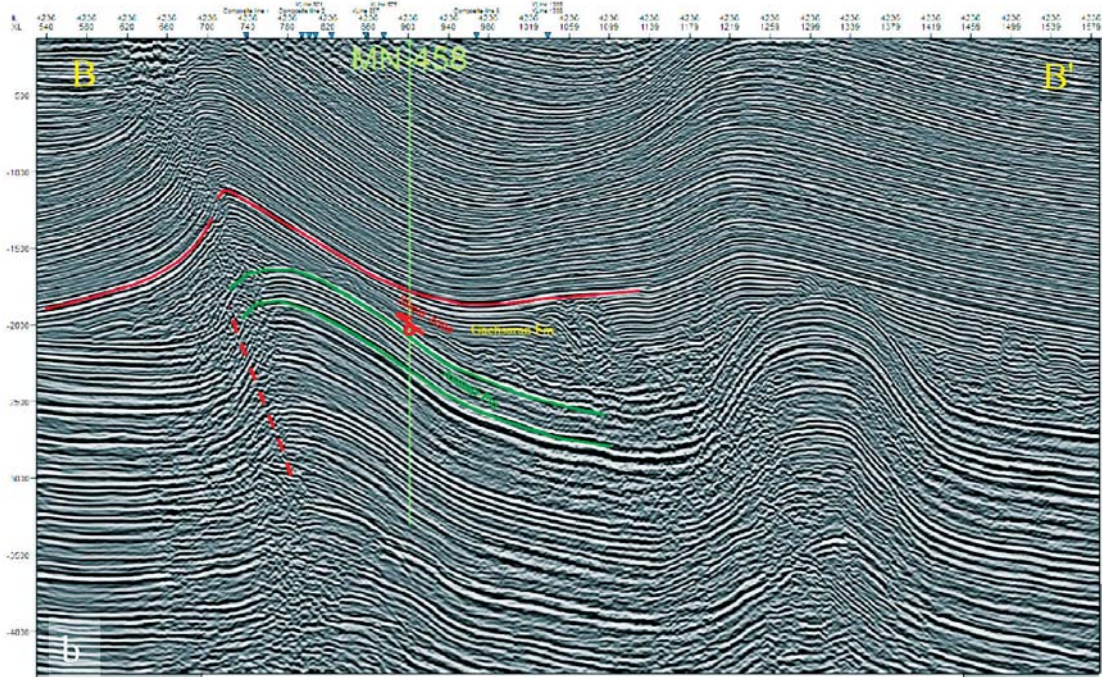
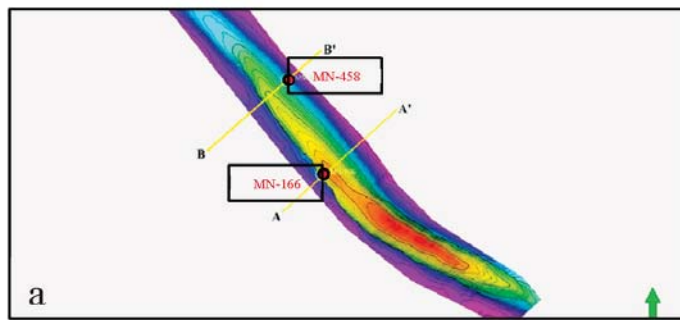


شکل ۶. موقعیت چاه مارون-۳۹۳ در یال شمالی تافدیس در برش لرزه‌ای عمود بر ساختار (Inline). سرسازند آسماری با رنگ آبی متمایز شده و بازه عمقی که رژیم تنش برجا تعیین گردیده، نمایش داده شده است



شکل ۷. مدل MEM چاه مارون-۳۹۳ در توالی سازند آسماری و برآورد رژیم تنش نرمال در سازند آسماری. BO-Pr و IND-Pr به ترتیب فشار ایجاد شکستگی‌های برشی و فشار ایجاد گسیختگی‌های کششی در دیواره چاه می‌باشند

تفاوت رژیم تنش برجا وابسته به موقعیت ساختاری ...



شکل ۸. (a) محل برش‌های عرضی در بردارنده چاه‌های ۱۶۶ و ۴۵۸ میدان مارون، (a) برش لرزه‌ای و تفسیر ساختمانی از محل چاه مارون-۴۵۸ (B-B')، (b) نقطه انجام آزمایش با دایره قرمز نشان داده شده است

گسیختگی برای شکست‌های برشی و کششی در دیواره چاه، مناسب‌ترین وضعیت با توجه وجود شواهد آزمایش نشت و شواهد حفاری لحاظ گردیده است.

باید به این نکته توجه داشت که به دلیل شرایط ساختاری، عمق سازندهای گچساران و آسماری در این میدان بسیار کمتر از میدان مارون است و به همین دلیل بزرگی مطلق تنش‌ها نیز نسبت به میدان مارون کمتر خواهد بود. وضعیت ساختمانی و تکتونیک حاکم بر این ناحیه، گواهِ سیستم برشی در لایه‌های شکل‌پذیر و عمدتاً تبخیری این بخش از سازند گچساران می‌باشد که تأثیر شگرفی بر شکل ساختاری بخش‌های شککننده و شکل‌پذیر تاقدیس مارون داشته است (شکل ۸، a و b). هندسه چین مرتبط با گسل در این برش عرضی از تاقدیس مارون کاملاً قابل مشاهده بوده و از ساختار کوپال واقع در سمت راست آن متمایز شده است.

علاوه بر این به نظر می‌رسد که ویژگی‌های مکانیکی سازند گچساران به‌ویژه در لایه‌های نمک واقع در عمق کمتر، تفاوت قابل توجهی از لحاظ ویژگی‌های خزشی و متحرک لایه‌های تبخیری با تاقدیس‌های عمیق‌تر فروافتادگی دزفول همچون مارون و کوپال دارد. در مدل یک بعدی ساخته شده، تمامی توالی‌چینه‌ای هر دو سازند در محدوده رژیم تنش راست‌الغز بوده و تمایز در بزرگای تنش‌های افقی بین این دو سازند آن‌چنان‌که در میدان مارون وجود داشت، ملاحظه نمی‌گردد که به نظر می‌رسد یکی از دلایل احتمالی آن نبود بیش فشاری سازند گچساران در این محدوده است. مسئله بسیار مهمی که باید به آن توجه نمود آن است که در درون و مجاورت شکستگی‌های بزرگ و پهنه‌های دارای شکستگی، هم بزرگا و هم راستای تنش‌ها از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت خواهد بود. لذا پیش‌بینی و تخمین تنش در این نواحی، دارای عدم قطعیت زیادی است و تغییرات تنش بسیار بزرگ خواهد بود (Zang et al., 2010).

چندضلعی تنش مربوط به عمق ۱۶۰۴ متری در ابتدایی‌ترین بخش سازند آسماری در چاه لالی-۳۰، نمایش‌دهنده حد معیار گسیختگی موهر-کلمب برای تعادل اصطکاکی گسل‌های از

تنش‌های اصلی حاصل گردید که بیانگر رژیم تنش معکوس در این ناحیه است (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج بزرگای تنش محاسبه شده مربوط به عمق ۳۷۴۵ متر در بخش ۱ سازند گچساران

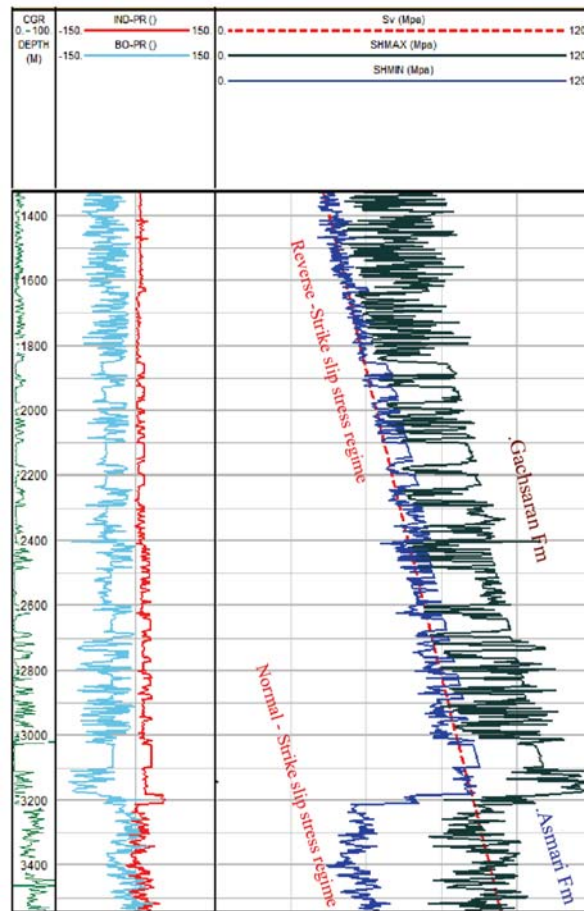
Sv (Mpa)	SHmax (Mpa)	Shmin (Mpa)
۱۰۵	۱۷۵	۱۱۵

سومین حلقه چاه مطالعه شده در میدان مارون (مارون-۱۶۶) در یال جنوبی و متمایل به بخش مرکزی میدان واقع گردیده است (مقطع A-A'، شکل‌های ۷a و ۸). موقعیت ویژه این چاه، این امکان را می‌دهد تا با بررسی نسبت بزرگی تنش‌ها در دو سازند با خصوصیات سنگ‌شناسی و مکانیکی متفاوت، به تحلیل وضعیت تنش و پیوند آن با شرایط ساختاری موجود پرداخته شود. توالی گچساران این چاه در پیشانی جبهه تغییر شکل و در پهنه برشی قرار گرفته است و توالی سازند آسماری کاملاً تحت تأثیر خمش و فشردگی یال جنوبی است به گونه‌ای که تشخیص بازتابنده‌های^۱ مربوط به سطوح لایه‌بندی و همچنین گسل‌های احتمالی را مشکل نموده است.

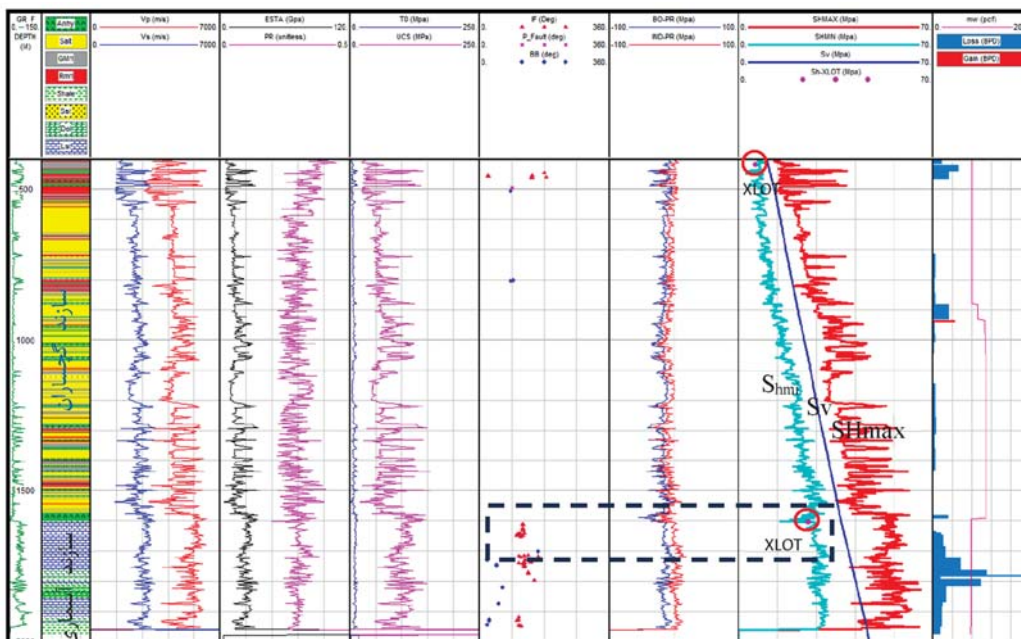
تخمین بزرگی تنش‌های برجا در سازند گچساران کاملاً مطابق با وضعیت ساختاری ناحیه مورد نظر بوده و بیانگر رژیم تنش غالباً معکوس و در بخش‌هایی متمایل به امتداد لغز می‌باشد. در بخش آسماری با کاهش قابل توجه بزرگی تنش‌های افقی نسبت به سازند گچساران علیرغم اینکه این محدوده تحت تأثیر خمش و شکستگی‌های احتمالی ناشی از چین‌خوردگی پیش‌رونده است، رژیم تنش در محدوده نرمال تا امتداد لغز تخمین زده شده است.

در مورد چاه لالی-۳۰ واقع در یال شمالی این تاقدیس شرایط تنش برجا به‌گونه‌ای کاملاً متفاوت از موقعیت‌های بررسی شده در میدان مارون مشاهده می‌شود (شکل ۱۰). وجود دو نقطه کنترلی مربوط به آزمایش‌های XLOT جهت افزایش دقت بزرگای تنش‌های تخمینی در سازندهای گچساران و بخش فوقانی سازند آسماری باعث افزایش اعتبار نتایج حاصله گردیده است. در محدوده‌ای که با چهارگوش خط‌چین مشخص گردیده است، با استفاده از معیارهای

تفاوت رژیم تنش برجا وابسته به موقعیت ساختاری ...



شکل ۹. موقعیت چاه مارون-۱۶۶ در یال جنوبی تاقدیس مارون (برش A-A' در شکل ۸) در برش لرزه‌ای عمود بر ساختار به همراه نتایج تخمین بزرگای تنش حاصل از مدل MEM در سازندهای گچساران و آسماری

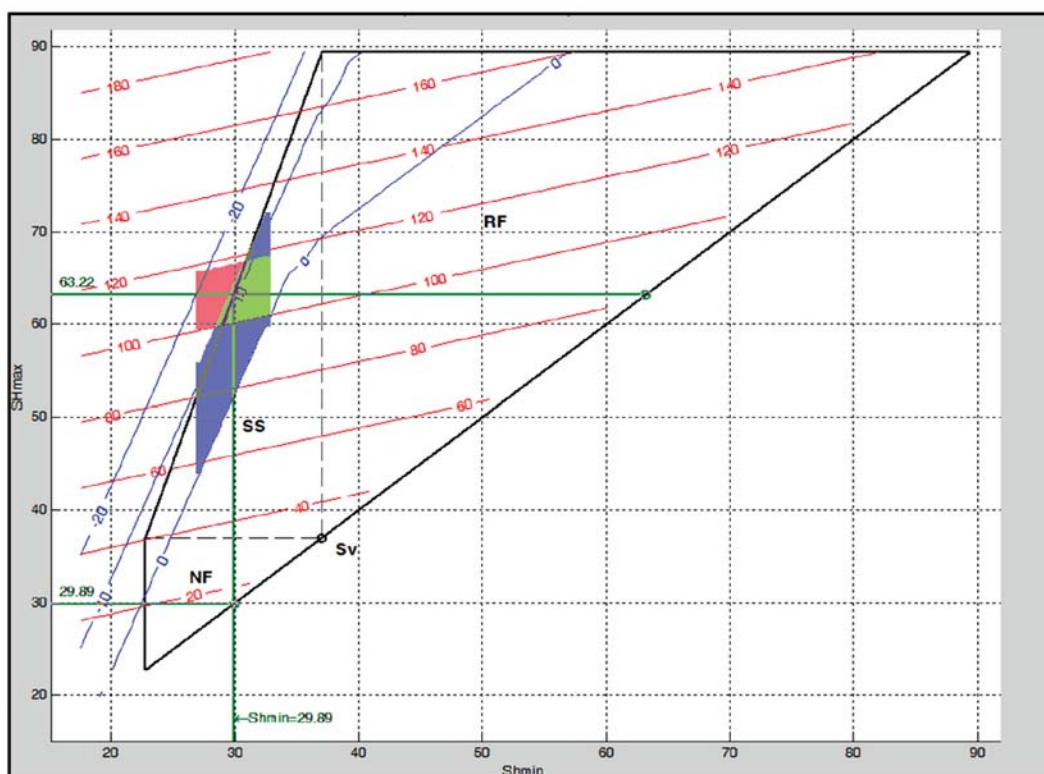


شکل ۱۰. مدل MEM چاه لالی-۳۰ در توالی سازندهای گچساران و آسماری نشان‌دهنده رژیم تنش راستالغز در این چاه می‌باشد

دیواره چاه به‌عنوان تابعی از مقاومت فشاری (خطوط تراز قرمز) و کششی سنگ (خطوط تراز آبی)، ترسیم گردیده است. با در نظر گرفتن محدوده مقاومت کششی و فشاری سنگ، ناحیه همپوشان که با هاشور سبز به نمایش در آمده است، نشانگر حالت سازگار با هر دو پارامتر محدودکننده است که در این نقطه تنها با رژیم گسلش راستالغز همخوانی خواهد داشت (شکل ۱۱).

پیش موجود می‌باشد (شکل ۱۱). محدوده‌های چندضلعی تنش مستقل از پارامترهای مربوط به چاه، تنها به فشار روزنی، تنش قائم و مقاومت اصطکاکی وابسته هستند. از آنجایی که مقاومت پوسته اجازه اختلاف تنش تفریقی بیشتر از این، بین تنش‌های بیشینه و کمینه را نخواهد داد، بر اساس تئوری، وضعیت تنش در درون این چندضلعی قرار گرفته و به آن محدود می‌گردد (Zoback, 2010).

بزرگی تنش‌های افقی مطابق با وقوع گسیختگی در



شکل ۱۱. چندضلعی تنش مربوط به عمق ۱۶۰۴ متری در بالاترین بخش سازند آسماری. محدوده هاشور خورده به رنگ سبز، گویای رژیم تنش امتدادلغز در این نقطه می‌باشد

نتیجه‌گیری

با محیط ساختاری و جایگاه زمین‌شناسی‌شان می‌توانند کوچک‌تر و یا بزرگ‌تر از تنش قائم باشند. بر این اساس بزرگای نسبی تنش‌های اصلی به سبک گسلش فعال کنونی منطقه بستگی دارد.

چاه‌های مورد بررسی در میدان مارون در توالی سازند گچساران غالباً نشان‌دهنده رژیم تنش معکوس هستند که ناشی از تکتونیک برشی حاکم در بخش متحرک

مدل‌های مکانیکی زمین ساخته شده در دو سازند گچساران و آسماری، نشان‌دهنده آن است که نرخ بالای بزرگی تنش در قسمت‌های پرفشار سازند گچساران به‌ویژه در میدان مارون را می‌توان به فشار محبوس آب سازندی، عمدتاً در بخش‌های مارنی و همچنین ویژگی‌های رئولوژیک و مکانیکی لایه‌های تبخیری نسبت داد.

بر اساس مدل اندرسون، تنش‌های افقی مرتبط

مخزنی آسماری میدان نفتی مارون (بر اساس نتایج تفسیر نمودارهای تصویرگر). سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین.

- Biot, M.A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12, 155-164.

- Blanton, T. and Olson, J., 1999. Stress magnitudes from logs: effects of tectonic strains and temperature. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2, 62-68.

- Fossen, H., 2010. *Structural Geology*. Cambridge University Press, 457.

- Hamison, B., 2007. Micromechanisms of borehole instability leading to breakouts in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 157-173.

- Heidbach, O., Reinecker, J., Tingay, M., Müller, B., Sperner, B., Fuchs, K. and Wenzel, F., 2007. Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress patterns highlighted in the World Stress Map database. *Tectonics*, 26, 3-7.

- Jaeger, C., 1979. *Rock Mechanics and Engineering*. Cambridge University Press, 463.

- Lee, D., Bratton, T. and Birchwood, R., 2004. Leak-Off Test interpretation and modeling with application to geomechanics. *Gulf Rocks 2004, the 6th North America Rock Mechanics Symposium (NARMS)*. American Rock Mechanics Association, 04-547.

- Rasouli, V., Pallikathakathil, Z. and Elike, M., 2010. Optimum well trajectory design in a planned well in Blacktip field, Australia: a case study. *APPEA. J.*, (The Australian Petroleum Production and Exploration Association), 50, 535-548.

- Reinecker, J., Tingay, M. and Muller, B.,

لایه‌های تبخیری این سازند می‌باشد. رژیم تنش غالب در سازند آسماری مارون و در بخش‌هایی که متاثر از پدیده‌های ساختمانی نیست، از نوع نرمال و در بخش‌های دچار خمش و احتمالاً گسلیده یال جنوبی، گویای رژیم نرمال-راستالغز است و به نظر نقش تنش روباره در سازند آسماری این میدان در قیاس با تنش‌های افقی، قابل توجه می‌باشد. - در میدان لالی بر اساس نمونه موردی مطالعه شده، رژیم تنش برجا در هر دو سازند گچساران و آسماری از نوع راستالغز بوده و تمایز تنش قابل توجهی در بزرگای تنش‌های افقی این دو سازند ملاحظه نمی‌شود.

- تحلیل شرایط تکتونیکی حاکم بر محل چاه‌های مورد مطالعه، هر یک گویای شرایط ویژه‌ای است که متاثر از پدیده‌های مختلف است. بنابراین تعمیم حالت تنش به کل میدان می‌تواند دارای عدم قطعیت زیادی باشد. در سازند گچساران میدان مارون به دلیل ویژگی‌های سنگ‌شناسی و همچنین شرایط فشار روزنی، تنش‌های برجای افقی در قیاس با سازند آسماری بزرگ‌تر می‌باشند. این مورد در محدوده چاه مطالعه شده در میدان لالی به دلیل عمق نسبتاً کم سازند گچساران، صدق نمی‌نماید.

- در مخزن آسماری میدان‌های مارون و لالی به دلیل تفاوت سبک دگرشکلی و همچنین وجود پهنه‌های شکستگی متاثر از چین‌خوردگی و گسل‌های متعدد، راستا و بزرگای تنش‌ها از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت بوده و تحلیل جامع از شرایط تنش کل میدان نیازمند مدل‌سازی سه بعدی تنش می‌باشد.

منابع

- طالبی، ح. و نریمانی، ح.، ۱۳۸۸. ارتباط ساختاری تاقدیس‌های زیلویی، لالی و کارون. گزارش فنی شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب.

- طالبی، ح.، علوی، ا.، قاسمی، م.ر.، پرهیزگار، م.ر. و بقاء دشتکی، ب.، ۱۳۹۲. راستا و بزرگای تنش برجا در سازند آسماری حوضه زاگرس-فروافتادگی دزفول شمالی. اولین همایش ملی زمین‌ساخت ایران.

- فارسی‌مدان، م.، مهدور، م. و محمدیان، ر.، ۱۳۹۲. بررسی عملکرد و تعیین جهت تنش برجا در سازند

2006. The use of the WSM database for rock engineers. International Symposium on In-Situ Rock Stress, Trondheim, Norway, 19-21.
- Sayers, C.M., 2010. Geophysics under stress: Geomechanical applications of seismic and borehole acoustic waves. Society of Exploration Geophysicists, 13.
 - Tingay, M., Reinecker, J. and Müller, B., 2008. Borehole breakout and drilling-induced fracture analysis from image logs. World Stress Map Project, 1-8.
 - Yaghoubi, A.A. and Zeinali, M., 2009. Determination of magnitude and orientation of the in-situ stress from borehole breakout and effect of pore pressure on borehole stability-Case study in Cheshmeh Khush oil field of Iran. Journal of Petroleum Science and Engineering, 67, 116-126.
 - Zang, A., Stephansson, O. and Stephansson, O., 2010. Stress Field of the Earth's Crust. Springer. 324 .
 - Zoback, M.D., 2010. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press. 461.