

## تغییرات میدان تنش و رژیم گسلش جهت تعیین امکان فعالیت مجدد گسل‌ها در پوش سنگ و مخزن بر اثر تولید و فشارافزایی در میدان نفتی آغاچاری - جنوب غرب ایران

حسن فتحی؛ دانشجوی دکتری زمین شناسی، گرایش تکتونیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران

محسن پور کرمانی\*؛ استاد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران

محمد آبدیده؛ دانشیار، گروه مهندسی نفت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد امیدیه، امیدیه

سهیلا بوذری؛ دانشیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران

محمود الماسیان؛ استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۰

### چکیده

تولید و تزریق سیال ممکن است، از طریق تغییر فشار منفذی و تغییرات متناظر در میدان تنش، سبب ایجاد شکست هیدرولیکی، شکست برشی در سطوح ترک، یا فعالیت مجدد گسل‌ها و ناپیوستگی‌های موجود توسط کاهش تنش مؤثر شود. بنابراین، تغییر شکل زمین، لرزه‌های اتفاق افتاده، فعالیت مجدد ناپیوستگی‌ها، و ظرفیت ناتراوایی سنگ‌های اطراف مجموعه مخزن - پوش سنگ از پدیده‌های مهم در اجرای پروژه‌های دربرگیرنده تولید و تزریق گاز در فضاهای زیرزمینی محسوب می‌شوند. استراتژی موفق در توسعه مخزن مطالعه و مدل‌سازی ژئومکانیکی مخزن را می‌طلبد. ساخت یک مدل جامع ژئومکانیکی شامل وضعیت تنش به صورت تابعی از عمق (جهت و مقدار)، خواص فیزیکی سنگ مخزن و سازندهای آن (مقاومت سنگ و مدول‌های الاستیک)، تخمین فشار منفذی، و توصیف و توزیع شکستگی‌ها و گسل‌هاست. در این پژوهش، مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی ساخته شده در میدان مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار IP توضیح داده شد و با مدل‌سازی تحلیلی به بررسی و ارزیابی امکان فعالیت مجدد گسل‌های میدان، امکان وقوع شکستگی‌ها طی عملیات تزریق و تولید، و میزان بحرانی تغییر فشار تزریق و تولید برای ایجاد شکستگی‌های کششی و برشی پرداخته شد.

کلیدواژگان: پوش سنگ، تزریق گاز، فشار منفذی، خواص الاستیک سنگ، فعال شدن مجدد گسل‌ها، مدل ژئومکانیکی، ناپیوستگی.

### مقدمه

استفاده از ژئومکانیک در صنعت نفت به سرعت در حال گسترش است. نمونه‌هایی از کاربرد ژئومکانیک در صنعت نفت عبارت است از: تعیین خواص مکانیکی سنگ‌های مخزن، شبیه‌سازی کامل ژئومکانیکی مخزن، تحلیل پایداری چاه، محاسبه فشار منفذی، طراحی لوله‌های جداری، طراحی عملیات حفاری، انتخاب نوع مته برای حفاری، شبیه‌سازی مخزن،

فعالیت گسل‌ها، نشست و تراکم مخزن، طراحی انگیزش چاه برای افزایش تولید، ارزیابی تولید ماسه در چاه. خواص ژئومکانیکی سنگ یا با آزمایش‌های مستقیم مکانیک سنگی بر مغزه‌ها اندازه‌گیری می‌شود یا این ویژگی‌ها از روی سرعت موج فشاری و برشی حاصل از نگارهای صوتی به دست می‌آیند. درک بهتر مفهوم و تئوری ژئومکانیک، کاربردهای اجرایی، و اثبات نتایج آن در صنعت نفت توجه این صنعت را بر این رشته نوپا متمرکز کرده است و به دنبال آن مطالعات و تحقیقات در این زمینه افزایش یافته است. از آغاز اکتشاف تا پایان عمر یک میدان، ژئومکانیک با بیشتر جنبه‌های مخزن مرتبط است. از طرفی مقاطع لرزه‌ای، نگارها، آزمون‌های آزمایشگاهی بر مغزه‌ها، آزمایش‌های برجا در چاه، و غیره، که روش‌های اصلی شرکت‌های نفتی در اندازه‌گیری و جمع‌آوری اطلاعات برای توصیف مخزن‌اند، به رفتار مکانیک سنگی وابسته‌اند. از این‌رو، امروزه بیشتر شرکت‌های نفتی تیم‌های متخصص ژئومکانیک دارند.

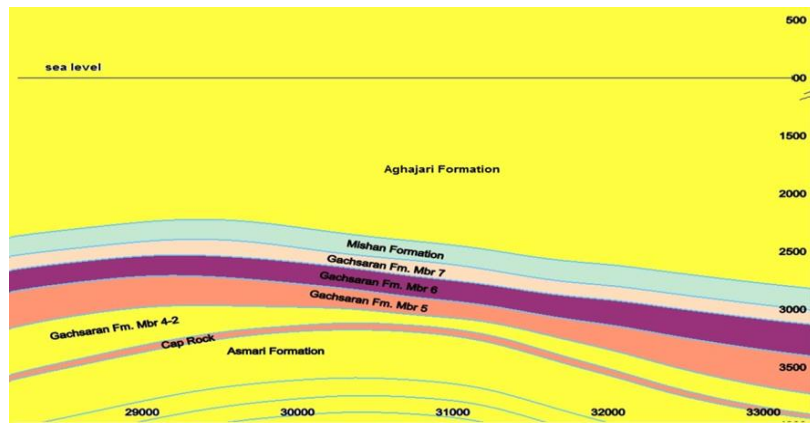
در این پژوهش، پس از معرفی میدان نفتی آغاچاری، نحوه ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در این میدان توضیح داده می‌شود. در ادامه با مدل‌سازی تحلیلی امکان فعالیت مجدد گسل‌های میدان طی بهره‌برداری (کواترنری) و همچنین امکان وقوع شکستگی‌ها طی عملیات تزریق و تولید و میزان بحران تغییر فشار تزریق و تولید برای ایجاد شکستگی‌های کششی و برشی با مدل‌سازی تحلیلی ارزیابی می‌شود.

### زمین‌شناسی میدان نفتی آغاچاری

یکی از میداین نفتی بسیار مشهور خاورمیانه در جنوب غرب ایران واقع است. این میدان را، سال ۱۳۱۵، شرکت نفت ایران و انگلیس کشف کرد. این میدان مهم و قدیمی حدود ۹۰ کیلومتری جنوب شرقی اهواز، نزدیک شهرستان امیدیه، قرار دارد که از لحاظ زمین‌شناسی در حوضه فرفاقتادگی دزفول واقع است. مخزن آسماری جوان‌ترین مخزن نفتی در این حوضه فرفاقتادگی به شمار می‌رود. سازند آسماری با ضخامت بیش از ۴۵۰ متر با سازندهای گروه فارس (گچساران، میشان، آغاچاری، بختیاری) پوشیده شده و زیر آن با سازندهای پابده و گورپی از مخزن بنگستان جدا می‌شود.

### زمین‌شناسی ساختمانی مخزن

دماغه شمال غربی تاق‌دیس در سطح زمین با رسوبات جوان‌تر سازند بختیاری قابل مشاهده است. از مشخصات بارز سطح‌الارضی آن می‌توان به شیب ملایم لایه‌ها اشاره کرد؛ طوری که حداکثر مقدار آن در یال جنوبی به ۱۲ درجه و در بخش شمالی به حدود ۶ درجه می‌رسد. رسوبات عهد حاضر رخنمون سازند آغاچاری را در اطراف تاق‌دیس پوشانده است. از نظر تکتونیکی، به جز چند گسل و روران‌گی در دماغه شمال غربی، آثار و علائم تکتونیکی دیگری در سطح زمین به چشم نمی‌خورد (شکل ۱). ساختمان زیرزمینی مخزن آسماری میدان در کمربند چین‌خورده زاگرس و با امتداد شمال غرب - جنوب شرق قرار گرفته است (امیربختیار و همکاران ۱۳۹۳).



شکل ۱. ساختار سازندهای میدان نفتی آغاچاری (از سازند آغاچاری تا سازند آسماری)

### ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی در چاه‌های A و B میدان نفتی آغاچاری

ساخت مدل ژئومکانیکی فرایندی است که در آن به همه مشخصه‌های مخزن نیاز است. یک مدل ژئومکانیکی نسبتاً جامع از مخزن، شامل وضعیت تنش و فشار منفذی، به صورت تابعی از عمق و خصوصیات سنگ، از پارامترهای مرتبط با تغییر شکل سنگ است که خود شامل خصوصیات الاستیک و پارامترهای مقاومتی سنگ، مانند مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ، است. با توجه به اینکه دسترسی کامل به این داده‌ها همواره مقدور نیست، بنابراین همیشه در اجزای مختلف مدل‌های ژئومکانیکی، بسته به کمیت و کیفیت داده‌ها، قطعیت وجود ندارد.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش با تحلیل داده‌ها و نمودارهای زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، حفاری، پتروفیزیکی، بهره‌برداری، و مهندسی مخزن مدل ژئومکانیکی چاه‌های A و B میدان نفتی آغاچاری در سازند آسماری و بخشی از سازند گچساران ساخته و پارامترهایی چون فشار منفذی، ویژگی‌های الاستیک سنگ، خواص مکانیکی سازند، و بزرگی تنش‌ها برای این سازندها محاسبه شد. داده‌ها و نمودارهای به‌کارگرفته‌شده جهت ساخت این مدل بدین شرح است: نقشه خطوط هم‌تراز زیرزمینی میدان، نمودار ترسیمی سرچاهی، گزارش‌های حفاری چاه شامل داده‌های هرزروی و جریان گل حفاری، نتایج تفسیرشده لرزه‌ای<sup>۱</sup> (VSP)، داده‌های پتروفیزیکی شامل نتایج DT (سرعت حرکت موج‌های فشارشی و برشی)، نمودارهای چگالی، تخلخل، پرتو گاما، نتایج فشار استاتیکی چاه، نتایج نمودار تصویرگر شامل ریزش ناشی از شکستگی‌های برشی و شکستگی‌های القایی، و سایر داده‌ها.

### مدل ژئومکانیکی

در مدل‌سازی چاه از نرم‌افزار پتروفیزیکی<sup>۲</sup> (IP) استفاده شد. داده‌ها و اطلاعات ورودی آن نمودارهای رانده‌شده در چاه‌اند؛

1. Vertical Seismic Profile  
2. Interactive Petrophysics

شامل نمودارهای صوتی، چگالی، نوترون، قطرسنج و نمودارهای تصویری و داده‌های فشار منفذی. خروجی نرم‌افزار مدل ژئومکانیکی تک‌بعدی چاه مورد نظر است. این نرم‌افزار با استفاده از روابط ریاضی که به آن داده می‌شود مقادیر پارامترهای مورد نظر، شامل پارامترهای الاستیک سنگ و خواص مقاومتی سازند و تنش‌های برجا، را محاسبه می‌کند و پروفایل پیوسته‌ای از این پارامترها را نسبت به عمق ارائه می‌دهد. همچنین، می‌توان برای هر پارامتر مقدار بیشینه و کمینه و میانگین را در بازه عمقی مورد مطالعه در چاه به دست آورد.

## جمع‌آوری داده‌ها

قدم اول در ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی جمع‌آوری داده‌هاست. در این مسیر نگارهای پتروفیزیکی، نگارهای صوتی فشاری و برشی، داده‌های اندازه‌گیری فشار منفذی، و محل تقاطع چاه‌ها با سازندهای مختلف جمع‌آوری شد. همچنین، داده‌های گسل‌های موجود در میدان با استفاده از مقاطع پردازش‌شده ژئوفیزیکی به دست آمد. علاوه بر این، داده‌های نمودار ترسیمی سرچاهی و داده‌های تفسیرشده از نگاره‌های تصویری و شکستگی‌های برشی و کششی رخ داده در چاه‌های مورد مطالعه گردآوری شد.

## بحث

### محاسبه سرعت موج برشی

زمان انتقال موج برشی در سنگ، که یکی از پارامترهای مهم فیزیکی جهت تخمین مقادیر الاستیک سنگ به شمار می‌رود، اهمیت بسیار دارد. آمین و همکارانش (۲۰۰۹) سرعت موج برشی را با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوری و تخلخل سنگ محاسبه کردند و با آزمایش مغزه‌های مخازن کربناته و مقایسه نتایج با نگاره صوتی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در تخمین سرعت موج برشی را با استفاده از نگاره تخلخل (NPHI)، نگاره چگالی (RHOB)، و سرعت موج فشاری (V<sub>p</sub>) به دست آوردند. سپس رابطه‌ای را ارائه کردند. با توجه به اهمیت حضور داده‌های سرعت موج برشی (V<sub>s</sub>) در محاسبه خواص الاستیک سنگ (رابطه ۱) جهت تخمین این پارامتر معرفی شده است (علی‌پور ۱۳۹۱).

رابطه ۱. مخازن کربناته جنوب ایران

$$V_s \left( \frac{Km}{s} \right) = -0.1236V_p^2 + 1.6126V_p - 2.3057$$

### مدول‌های الاستیک سنگ

پارامترهای الاستیک سنگ را می‌توان شامل مدول الاستیک (E)، نسبت پواسون (ν)، مدول برشی (G)، و مدول حجمی (K) دانست. مدول الاستیک یا مدول یانگ سنگ و میزان مقاومت تک‌محوری دو پارامتر مهم در تعریف سنگ بکرنند. مدول الاستیک معرف میزان صلبیت سنگ است و شیب نمودار تنش - کرنش شناخته می‌شود (حسن‌زاده ۱۳۹۴).

نسبت پواسون بیان‌کننده نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری سنگ است (رابطه ۲). مدول برشی یا مدول سفتی

واحدی برای سنجش مقاومت سنگ در برابر برش است (رابطه ۳). مدول حجمی نسبت تنش‌های همه‌جانبه به کرنش حجمی تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، مدول حجمی واحدی برای سنجش مقاومت سنگ در برابر فشار همه‌جانبه است (رابطه ۴) (زوباک ۲۰۱۰).

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad \text{رابطه ۴}$$

معادلات تجربی متعددی جهت برقراری رابطه بین خصوصیات پتروفیزیکی و ژئومکانیکی سنگ وجود دارد. در این میان می‌توان به رابطه محاسبه مشخصات الاستیک با استفاده از سرعت امواج برشی و فشاری (یا زمان انتقال امواج) و چگالی سنگ اشاره کرد (حمیداوی ۱۳۹۲).

$$E_{dyn} = RH_oB \times V_s^2 \times \left( \frac{3V_c^2 - 4V_s^2}{V_c^2 - V_s^2} \right) \times (0.0003048^2) \times 10^2 \quad \text{رابطه ۵ (رولف و همکاران ۲۰۱۴)}$$

$$\nu_{dyn} = \frac{1}{2} \left( \frac{(DTS/DTC)^2 - 1}{(DTS/DTC)^2 + 1} \right) \quad \text{رابطه ۶}$$

در روابط ۵ و ۶ و VS سرعت موج فشاری و برشی برحسب Ft/μs و DTC و DTS زمان انتقال موج فشاری و برشی برحسب Ft/μs است.

مطالعات آزمایشگاهی تکمیلی، که شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب برای سازندهای مختلف انجام داد، به تولید روابطی برای مقادیر استاتیکی مدول یانگ با استفاده از مدول یانگ دینامیکی منجر شد (رابطه ۷).

$$E_s (GP_a) = 0.7E_{dyn}(GP_a) \quad \text{رابطه ۷}$$

نسبت پواسون استاتیکی معمولاً به اندازه ۰/۷ نسبت پواسون دینامیکی در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۸) (طالبی و همکاران ۱۳۹۵).

$$\nu = 0.9\nu_{dyn} \quad \text{رابطه ۸}$$

## خواص مقاومتی سنگ

### مقاومت فشاری تک‌محوری

مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) یکی از پارامترهای مهم در تعیین محدوده تغییرات تنش‌های اصلی افقی است. این پارامتر را معمولاً از طریق آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری اندازه می‌گیرند؛ هرچند دسترسی به مغزه‌های حفاری

به خصوص در صنعت نفت کار آسانی نیست. در این مطالعه از رابطه شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب ایران، که برای میادین داخلی کشور ارائه کرده (رابطه ۹)، استفاده می شود (طالبی و همکاران ۱۳۹۵).

$$UCS_{[MPa]} = 4.7 + 2.27E_s$$

رابطه ۹

### مقاومت کششی نهایی

مقاومت کششی<sup>۱</sup> (UTS) در سنگ، که به اختصار با  $T_s$  نمایش داده می شود، در مقایسه با مقاومت فشاری بسیار ناچیز است. مقاومت کششی سنگ با استفاده از آزمایش آزمون برزیلی به دست می آید. در این زمینه نیز شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب با مطالعات آزمایشگاهی رابطه ای (رابطه ۱۰) را برای مقاومت کششی سازند ارائه کرده است (طالبی و همکاران ۱۳۹۵).

$$T_s = 0.9UCS$$

رابطه ۱۰

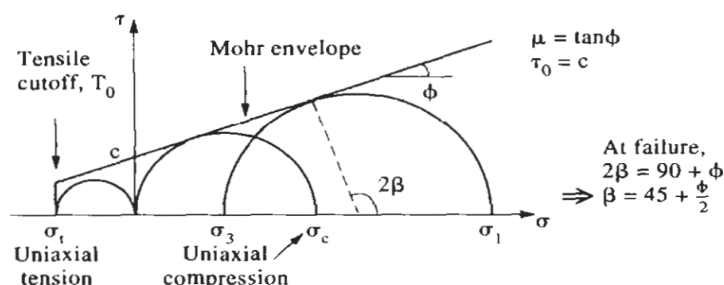
### زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی ذاتی

زاویه اصطکاک داخلی برابر است با شیب خط معیار شکست موهر - کلمب در نمودار تنش برشی - تنش محوری (شکل ۲). پلامب در سال ۱۹۹۴ برای سنگ های خردشونده رابطه ای برای شیل و سازندهای رسوبی شیلی ارائه داد (نجیبی ۱۳۹۰).

$$\phi = 26.5 - 37.4 * (1 - \phi - V_{shale}) + 62.1 * (1 - \phi - V_{shale})^2$$

رابطه ۱۱

در رابطه ۱۱،  $V_{shale}$  حجم شیل،  $\phi$  تخلخل سنگ بر حسب درصد، و  $\phi$  زاویه اصطکاکی داخلی سنگ است.



شکل ۲. ضریب اصطکاک داخلی و چسبندگی روی معیار شکست موهر - کلمب

چسبندگی ذاتی سنگ را می توان مقاومت برشی سنگ، درحالی که تنش نرمالی بر سنگ اعمال نمی شود، تعریف کرد (خانلری ۱۳۸۹). در شکل ۲ چسبندگی ذاتی محل برخورد خط شکست معیار موهر - کلمب با محور تنش برشی تعریف شده است. هادسون (۲۰۱۲) در کتاب خود چسبندگی ذاتی و زاویه اصطکاک داخلی را پارامترهای مقاومتی معیار موهر - کلمب نیز معرفی کرده است (کریمی ۱۳۹۷). می توان با مراجعه به روابط معیار موهر - کلمب مقدار چسبندگی ذاتی را نیز محاسبه کرد (رابطه ۱۲).

$$UCS = C * 2 * \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

رابطه ۱۲

در چاه B برای سنگ‌شناسی‌های مختلف با استفاده از آزمایش نمونه‌های مغزه مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری به دست آمد و از داده‌های آن جهت اعتبارسنجی مدل‌های ژئومکانیکی یک‌بعدی ساخته شده استفاده شد (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج آزمایش مغزه برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری در چاه B

از عمق	تا عمق	لیتولوژی	UCS (Mpa)
3191	3191.15	نمک	15.5
3306.6	3306.8	انیدریت	75.82
3187.3	3187.43	نمک	17.2
3097.2	3097.48	نمک	23.42
3193.24	3193.54	نمک	40.87
3099.68	3099.78	مارن خاکستری	16.01
3095	3095.15	مارن خاکستری	65.11
3095.17	3095.42	مارن خاکستری	76.8

### فشار منفذی

فشار منفذی، به دلیل کاستن مقاومت کششی و فشاری سنگ، پارامتری بحرانی برای یک عملیات حفاری موفق و شناخت ویژگی‌های مخزن و در نتیجه تولید بهینه به حساب می‌آید (کریمی ۱۳۹۷).

وجود سیال سبب کاهش تنش مؤثر به پیکره سنگ می‌شود و بخشی از فشار وارد شده را تحمل می‌کند. بنابراین، برای تعیین تنش مؤثر به میزان فشار منفذی نیاز است. در سازند آسماری این چاه‌ها، برای تعیین فشار منفذی در مخزن، از نتایج آزمایش<sup>۱</sup> MDT استفاده شد. داده‌های این آزمایش نقطه‌ای و بیانگر فشار منفذی در عمق آزمایش شده است. برای محاسبه فشار منفذی در سازند گچساران نیز از رابطه تجربی مناطق نفت خیز استفاده شد (رابطه ۱۳).

$$P_p = -((\sigma_v - P_{p_{hydro}}) * (DT_N / DT)^3) + \sigma_v \quad \text{رابطه ۱۳}$$

در رابطه ۱۳  $P_p$  فشار منفذی، OBG گرادیان افزایش تنش روباره،  $P_{ng}$  فشار هیدرو استاتیک، DT نگار امواج صوتی فشاری، و  $DT_n$  نرمال شده نگار DT است. ضریب n نیز به خصوصیات زمین‌شناسی منطقه بستگی دارد (طالبی و همکاران ۱۳۹۵).

### وضعیت تنش

برای به دست آوردن تانسور تنش در هر نقطه باید مقادیر تنش قائم، تنش افقی حداکثر، تنش افقی حداقل، و راستای آن‌ها در آن نقطه به دست آید. با بررسی و تفسیر نگارهای تصویری<sup>۲</sup> راستای تنش‌ها در چاه به دست می‌آید. راستای تنش افقی حداکثر در راستای شکستگی‌های کششی و راستای تنش افقی حداقل در راستای شکستگی‌های برشی در دیواره چاه است (حسن‌زاده ۱۳۹۴).

1. Modular Formation Dynamics Test  
2. Image Logs

### تعیین بزرگی تنش قائم

تنش قائم عبارت است از فشار واردآمده از وزن طبقات و سیالات بالایی بر سازندی در عمق مشخص که با حاصل جمع وزن مخصوص سنگ‌های بالایی در ضخامت هر لایه به دست می‌آید. تعیین مقدار تنش قائم با رابطه ۱۴ به دست می‌آید (سلطانزاده ۲۰۰۹).

$$S_v = \int_0^z \rho(z) g dz \approx \bar{\rho} g z \quad \text{رابطه ۱۴}$$

برای محاسبه تنش قائم سازند آسماری از نمودار دانسیته به طور مستقیم و برای محاسبه چگالی در سازند گچساران، با توجه به نبود نمودار چگالی در این سازند، از رابطه تجربی گارنر ( $\rho = 0.31V_p^{0.25}$ ) استفاده شد.

### تعیین بزرگی تنش‌های افقی

تعیین مقدار تنش‌های افقی بسیار مشکل‌تر از تنش قائم است. با در نظر گرفتن رفتار پورو الاستیک سنگ، تنش‌های افقی با داشتن نسبت پواسون، کرنش‌های افقی، فشار منفذی، ضریب بایوت، و مدل یانگ در منطقه‌ای که از نظر تکتونیکی فعال است با روابط ۱۵ و ۱۶ و ۱۷ محاسبه می‌شوند (سلطانزاده ۲۰۰۹؛ مولدرز ۲۰۱۵).

$$S_H = \frac{v}{1-v} (S_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E \varepsilon_y}{1-v^2} + \frac{v E \varepsilon_x}{1-v^2} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$S_h = \frac{v}{1-v} (S_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E \varepsilon_x}{1-v^2} + \frac{v E \varepsilon_y}{1-v^2} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_g} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

منظور از  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_y$  مؤلفه‌های کرنش در جهت‌های  $x$  و  $y$  است. محاسبه و اندازه‌گیری این دو مؤلفه چالش مهم صنعت نفت است. امروزه، به کمک نمودار صوتی دوقطبی<sup>۱</sup> (DSI)، که دارای مؤلفه‌های مختلف برشی یا  $\Delta T_s$  است، می‌توان این ضرایب را محاسبه کرد.

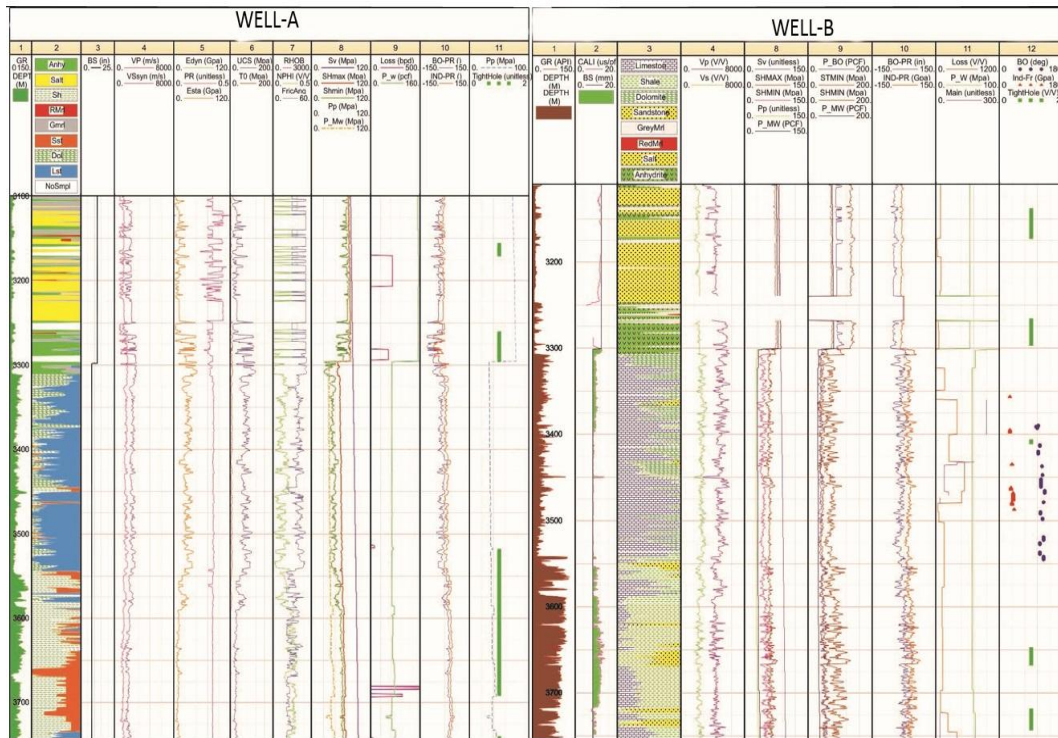
$\alpha$  ضریب بایوت نامیده می‌شود که مقدار آن برابر است با  $0 < \alpha < 1$  که:

$1 = \alpha$  برای سنگ متخلخل و تراوا مثل سنگ مخزن

$0 = \alpha$  برای سنگ نامتخلخل و ناتراوا مثل سنگ پوش

$P_p$  نیز فشار منفذی سنگ مخزن و در آن  $K_b$  مدول حجمی مربوط به کل حجم سنگ و  $K_g$  مدول حجمی مربوط به کل دانه‌های سنگ است. در شرایطی که تخلخل سنگ زیاد باشد، مقدار حد این ضریب به سمت ۱ میل می‌کند. همچنین  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_y$  کرنش در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر را به ترتیب برابر با  $0/3$  و  $0/2$  در نظر می‌گیریم. در سازندهای کربناته شکافدار، از جمله مخزن آسماری، می‌توان فشار هرزروی گل را مبنای کالیبره کردن نمودار تنش افقی حداقل قرار داد. در چاه A مقادیر  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_y$  با استفاده از اطلاعات حاصل از گزارش‌های روزانه حفاری، مانند گیر لوله‌ها و ریزش و تنگی دیواره چاه و هرزروی و جریان گل حفاری، کالیبره شدند. همچنین در چاه B در سازند گچساران

از اطلاعات حاصل از گزارش‌های حفاری و در سازند آسماری از اطلاعات گزارش‌های حفاری به‌علاوه نمودار تصویری رانده‌شده استفاده شد.



شکل ۳. مدل‌های ژئومکانیکی یک‌بعدی ساخته‌شده در چاه‌های A و B (نمای کلی)

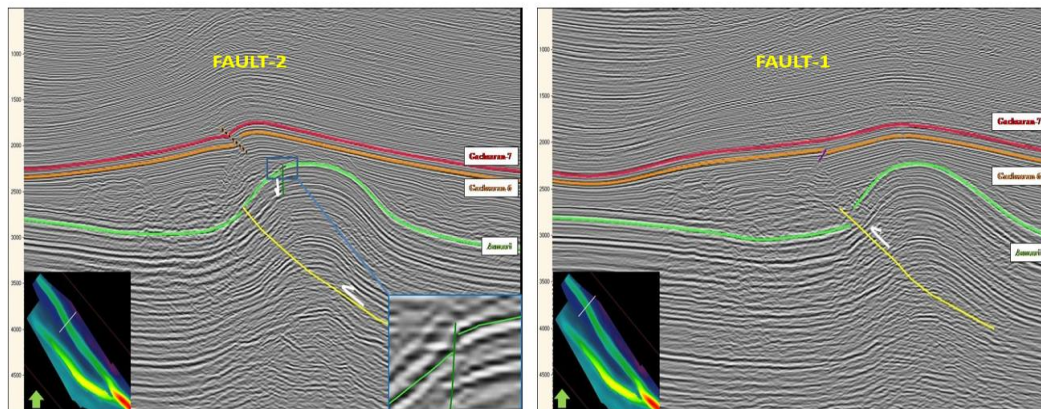
### مدل‌سازی تحلیلی فعالیت مجدد گسل‌ها در میدان نفتی آغاچاری

فعالیت مجدد گسل‌ها طی زمان تولید و تزریق به طراحی فشار تزریق و میزان تولید در میدان نفتی وابسته است. زمانی که فشار منفذی در مخزن افزایش می‌یابد، تنش‌های مؤثر نرمال بر صفحه گسل کاهش می‌یابند و در نتیجه گسل لغزیده و فعال می‌شود. با افزایش فشار منفذی، در نهایت، تنش‌های مؤثر به صفر می‌رسند و گسل‌ها باز می‌شوند. فعالیت مجدد گسل‌ها و بازشدگی آن‌ها، تا زمانی که سیال هیدروکربوری از طریق لایه‌های متخلخل به سطح زمین مهاجرت نکند، قابل تشخیص نیست (آرچر و رسولی ۲۰۱۷). در این بخش یک روش تحلیلی ساده برای آنالیز دوبعدی فعالیت مجدد گسل‌ها در زمان تزریق به کار رفت.

### شواهد عملکرد گسل بر اساس بررسی‌های ژئوفیزیکی در میدان نفتی آغاچاری

بررسی مقاطع لرزه‌ای حاصل از ژئوفیزیک سه‌بعدی در میدان نفتی آغاچاری نشان می‌دهد گسل واقع در یال جنوبی طی حدود هشتاد سالی (دوران کواترنری) که از کشف این میدان نفتی می‌گذرد فعال تر شده است و همان‌طور که مقاطع لرزه‌ای (شکل ۴) نشان می‌دهد به دنبال فشارهای وارده میدان دچار چین‌خوردگی شده و تاقدیس به صورت تاقدیسی

نامتقارن تا نزدیکی سطح زمین دیده می‌شود. همچنین گسل دیگری از جنس نرمال در نزدیکی قلّه تاقدیس نمایان است. البته جابه‌جایی این گسل آن قدر نیست که بتوان به‌وضوح آن را روی مقطع لرزه‌ای دید. اما، در صورت دقیق شدن و بزرگ‌نمایی مقطع می‌توان جابه‌جایی آسماری در اثر این گسل را مشاهده کرد (شکل ۴). وقوع گسل‌های نرمال در قلّه چین‌خوردگی امری عادی است و در عموم تاقدیس‌ها دیده می‌شود.



شکل ۴. گسل شماره ۱ با زاویه شیب حدود ۳۵ درجه و گسل شماره ۲ با زاویه شیب حدود ۸۶ درجه در یال جنوبی میدان (مهدی‌پور و همکاران ۱۳۹۶)

نکته دیگر وقوع گسل‌خوردگی در لایه‌های گچساران است. در بسیاری از مقاطع لرزه‌ای دیده می‌شود نمک‌های بخش ۴ سازند گچساران، در اثر فشارهای وارده و کمبود فضا، به سمت لایه‌های بالایی روان شده و گنبد‌های نمکی پدید آورده است. نفوذ این نمک‌ها می‌تواند سبب چین‌خوردگی و گسل‌خوردگی در لایه‌های مجاور شود.

### آنالیز فعالیت مجدد گسل‌های شماره ۱ و ۲ با استفاده از مدل‌سازی تحلیلی

اگر رفتار مقاومتی گسل بر پایه معیار موهر - کلمب در نظر گرفته شود، تنش برشی لازم برای لغزش گسل با رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود که تابعی از ضریب بایوت، چسبندگی گسل، ضریب اصطکاک داخلی گسل، تنش مؤثر بر صفحه گسل، و فشار منفذی است (کیو و همکاران ۲۰۱۳). همچنین، احتمال فعالیت مجدد گسل‌ها یا همان تمایل به لغزش گسل‌ها (ST) از نسبت میان تنش برشی و تنش برشی لازم برای لغزش به دست می‌آید.

$$ST = \frac{\tau}{\tau_{slip}}$$

رابطه ۱۸

در رابطه ۱۸،  $\tau$  تنش برشی است و با رابطه ۱۹ محاسبه می‌شود.

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h) \sin(2\theta)$$

رابطه ۱۹

و  $\tau_{slip}$  تنش برشی لازم برای لغزش است که با رابطه ۲۰ محاسبه می‌شود.

$$\tau_{slip} = C + \mu(\sigma_n - \alpha p) \quad \text{رابطه ۲۰}$$

جایی که  $p$  فشار منفذی،  $\alpha$  ضریب بایوت،  $C$  چسبندگی گسل، و  $\mu = \tan \phi$  ضریب اصطکاک گسل برای گسلی با زاویه اصطکاک  $\phi$  است. در رابطه ۲۰  $(\sigma_n - \alpha p = \sigma'_n)$  تنش نرمال بر صفحه گسل است. تنش نیز با رابطه ۲۱ محاسبه می‌شود (آلبرتی ۲۰۱۰؛ سلطانزاده ۲۰۰۹).

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h) + \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)\cos(2\theta) \quad \text{رابطه ۲۱}$$

در رابطه ۲۱ زاویه شیب گسل است که از مقاطع لرزه‌ای به دست می‌آید و  $\sigma_v$  تنش قائم است که از مدل‌سازی ژئومکانیکی به دست می‌آید و ثابت فرض می‌شود. همچنین، با بررسی فشار اولیه و فشار کنونی مخزن در چاه‌های در حال تولید، میزان تغییر فشار مخزن در حدود ۲۰۰۰ پام فرض شد (با این فرض که تغییر فشار مخزن متأثر از تغییر فشار منفذی است). با استفاده از رابطه تخلیه (رابطه ۲۲) میزان تغییرات تنش افقی در اعماق مختلف نیز تخمین زده شد.

$$\Delta\sigma_h = \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu}\right)\Delta P \quad \text{رابطه ۲۲}$$

جهت مدل‌سازی تحلیلی فعالیت مجدد گسل‌ها در میدان مورد مطالعه پارامترهای مکانیک سنگی حاصل از مدل‌سازی یک‌بعدی در چاه‌های A و B میدان به کار رفت. احتمال فعالیت مجدد گسل‌های شماره ۱ و شماره ۲ نیز به منزله نماینده‌ای از گسل‌های میدان در سنگ‌شناسی‌های متفاوت در اعماق مختلف بررسی شد.

WELL NO	Depth	Formation	Lithology	ow	oh	tslip	UCS	c	$\theta$	FRIC ANGLE	$\mu$	$\alpha$	$\nu$	$\Delta P(\text{Psi})$	$\Delta\sigma_h$	$\tau$	$\tau_{slip}$	on	ST
A	3143	Gs. Fm. Mbr 4-2	Gray Marl	81	78	16	30	12	35	11	0.6	1	0.34	2000	58.09	10.76	51.11	73.46	0.21
	3240	Gs. Fm. Mbr 4-2	Salt	83	85	9	31	5	35	51	0.6	1	0.44	2000	55.14	13.09	45.24	73.83	0.29
	3270	Cap Rock	Gray Marl	84	83	12	30	9	35	30	0.6	1	0.34	2000	52.18	14.95	49.01	73.53	0.31
	3310	Cap Rock	Anhydrite	85	67	46	112	19	35	52	0.6	1	0.32	2000	49.23	16.81	60.23	73.23	0.28
	3312	Asmari	Dolomite	85	65	50	93	23	35	37	0.6	1	0.32	2000	46.28	18.19	64.33	72.26	0.28
	3530	Asmari	Limestone	90	71	43	68	15	35	42	0.6	1	0.35	2000	43.33	21.93	58.49	74.65	0.37
	3593	Asmari	Shale	92	70	32	27	6	35	41	0.6	1	0.34	2000	40.38	24.26	50.51	75.02	0.48
	3633	Asmari	Shale	93	68	31	19	4	35	45	0.6	1	0.34	2000	37.42	26.11	48.89	74.72	0.53
	3712	Asmari	Sandstone	95	70	36	22	7	35	22	0.6	1	0.34	2000	6.69	41.49	53.38	65.95	0.78

جدول ۲. احتمال عملکرد گسل شماره ۱ در چاه A در شرایط فعلی تغییر فشار مخزن

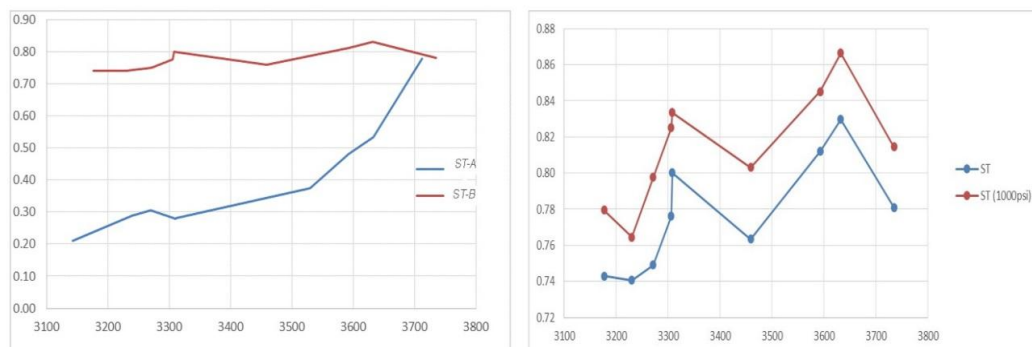
WELL NO	Depth	Formation	Lithology	ow	oh	tslip	UCS	c	$\theta$	FRIC ANGLE	$\mu$	$\alpha$	$\nu$	$\Delta P(\text{Psi})$	$\Delta\sigma_h$	$\tau$	$\tau_{slip}$	on	ST
B	3177	Gs. Fm. Mbr 4-2	Gray Marl	83	83	12	26	7	35	31	0.6	1	0.36	2000	6.07	36.15	48.88	57.69	0.74
	3230	Gs. Fm. Mbr 4-2	Salt	84	83	11	34	6	35	51	0.6	1	0.27	2000	8.59	35.43	47.85	59.19	0.74
	3271	Cap Rock	Gray Marl	85	88	13	28	8	35	31	0.6	1	0.43	2000	3.47	38.31	51.14	58.18	0.75
	3306	Cap Rock	Anhydrite	86	77	40	45	8	35	51	0.6	1	0.41	2000	4.21	38.43	49.52	59.09	0.78
	3308	Asmari	Dolomite	86	59	36	33	8	35	40	0.6	1	0.29	2000	8.19	36.56	45.69	60.40	0.80
	3459	Asmari	Limestone	89	73	43	47	10	35	45	0.6	1	0.38	2000	5.34	39.31	51.70	61.48	0.76
	3593	Asmari	Shale	93	59	40	33	8	35	36	0.6	1	0.30	2000	7.94	39.97	49.22	65.02	0.81
	3632	Asmari	Shale	94	62	39	37	7	35	48	0.6	1	0.31	2000	7.63	40.58	48.91	65.58	0.83
	3735	Asmari	Sandstone	97	71	43	29	10	35	23	0.6	1	0.34	2000	6.59	42.48	54.39	67.26	0.78

جدول ۳. احتمال عملکرد گسل شماره ۱ در چاه B در شرایط فعلی تغییر فشار مخزن

مقدار ST بین ۰ و ۱ متغیر است. میزان بالای ST نمایانگر تمایل بیشتر گسل به فعالیت مجدد است. همان گونه که در جدول های ۲ و ۳ و نمودارهای شکل ۶ مشاهده می شود گسل شماره ۱ در چاه B تمایل بیشتری جهت فعالیت مجدد از خود نشان می دهد. همچنین می توان گفت گسل شماره ۱ در سنگ شناسی شیل در عمق ۳۶۳۲ متری در چاه B بیشترین احتمال فعالیت را دارد.

جهت بررسی میزان تأثیر تغییرات فشار مخزن بر عملکرد گسل، پارامتر تغییرات فشار به اندازه ۱۰۰۰ پام اعمال و پارامتر تمایل به فعالیت مجدد گسل در سنگ شناسی های متفاوت در هر دو چاه بررسی شد. بررسی نتایج به دست آمده بیانگر آن است که تغییر فشار مخزن به میزان ۱۰۰۰ پام موجب افزایش تمایل گسل ها به فعالیت مجدد خواهد شد که البته این تمایل در گسل شماره ۱ محسوس تر است.

همچنین، به منظور تعیین آستانه بحرانی شیب گسل های میدان، جهت فعالیت مجدد، مدل سازی تحلیلی از تمایل فعالیت مجدد گسل ها در زوایای مختلف در اعماق مختلف انجام شد که نتیجه آن زاویه شیب بحرانی ۴۶ تا ۵۲ درجه را برای گسل ها نشان می دهد. بدین معنی که گسل های با زاویه بین ۴۶ تا ۵۲ درجه تمایل بیشتری به فعالیت مجدد در اعماق و سنگ شناسی های مختلف از خود نشان می دهند.



شکل ۶. مقایسه احتمال فعالیت گسل شماره ۱ در چاه های A و B در اعماق مختلف و مقایسه تغییرات پارامتر تمایل به لغزش در گسل شماره ۱ هنگام افزایش ۱۰۰۰ پامی فشار در اعماق مختلف

### آنالیز احتمال وقوع شکستگی در مخزن و سنگ های اطراف

با استفاده از روش آنالیز صفحه ای در ارتباط با معیار شکست موهر - کلمب می توان مدل سازی تحلیلی از وقوع شکستگی های کششی و برشی درون مخازن و سنگ های اطراف ارائه داد. بدین منظور پارامترهای  $R_{\sigma}$  (نسبت مسیر تنش) و  $R_{\phi}$  (شیب پوش شکست خطی) در اعماق مختلف محاسبه و بر اساس میزان نسبت  $R_{\sigma}$  به  $R_{\phi}$  سناریوهای مختلف وابسته به شکست یا پایداری در رژیم های متفاوت گسلش ارزیابی می شود.

سناریوی تغییر فشار	رژیم تنش گسل نرمال		رژیم تنش گسل معکوس
	$R_\phi > R_\sigma$	$R_\phi < R_\sigma$	
تزریق	پایداری	ناپایداری	ناپایداری
تولید	ناپایداری	پایداری	پایداری


جدول ۴. تمایل سنگ به شکست درون مخزن در زمان تولید و تزریق در رژیم‌های تنش گسل نرمال و معکوس

محاسبه  $R_\sigma$  و  $R_\phi$  با رابطه‌های ۲۳ و ۲۴ انجام شد (ژانگ ۲۰۱۱).

$$R_\sigma = \frac{\Delta\sigma'_H}{\Delta\sigma'_V} = \frac{\delta_L - \gamma_{\alpha(H)}}{\delta_L - \gamma_{\alpha(V)}} \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$$R_\phi = \tan^2(45 - \phi/2) \quad \text{رابطه ۲۴}$$

جایی که  $\delta_L$  شاخص محل است درون مخزن ۱ و خارج مخزن ۰ است.  $\gamma_H$  و  $\gamma_V$  به ترتیب نسبت‌های کمانش افقی و قائم‌اند و با توجه به هندسه میدان و تئوری‌های خواص مواد (تئوری ناهمگنی) اندازه‌گیری می‌شوند (شکل ۷) (اکبرعلی و همکاران ۲۰۱۵). گفتنی است در این مطالعه به دلیل متفاوت بودن خواص مکانیکی مخزن با سنگ‌های اطراف از تئوری ناهمگنی استفاده شد و همچنین برای شکل کلی مخزن با توجه به تفاوت نسبتاً زیاد عرض ۷۰ کیلومتری به ضخامت ۴۵۰ متری مخزن پنی‌شکل (یا سکه‌مانند) در نظر گرفته شد.

Shape	Inclusion (Reservoir and surrounding rock have identical elastic properties)	Inhomogeneity (Elastic properties of reservoir are different from the surrounding rock)
Penny-shape 	$\gamma_{\alpha(H)} = \gamma_{\alpha(h)} = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \left(1 - \frac{\pi e}{4}\right)$ $\gamma_{\alpha(V)} = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \frac{\pi e}{2}$	Numerical solution can be found from equations (3.62). For a simplified inhomogeneity (i.e., $\nu = \nu^*$ ), a closed form solution can be found as: $\gamma_{\alpha(H_1)} = \gamma_{\alpha(H_2)} = C_1 / C_3, \gamma_{\alpha(V)} = C_2 / C_3$ where: $C_1 = (1-2\nu)\{\pi^2 e^2(1-R_\mu)(1+\nu) - 8R_\mu(1-\nu) - 2\pi[R_\mu(\nu-2)+1]\}$ $C_2 = \pi e(1-2\nu)[\pi e(1-R_\mu)(1+\nu) - 2R_\mu(1-2\nu) - 2]$ $C_3 = (m-1)\pi e$ $\{(1-2\nu)[2 - \pi e(1-R_\mu)(1+\nu)] - R_\mu(3-4\nu)(1+\nu)\} - 8R_\mu(1-\nu)^2$

شکل ۷. محاسبه نسبت‌های کمانش افقی و قائم با در نظر داشتن شکل میدان و تئوری ایجاد شکستگی (حسن‌زاده ۱۳۹۴)

سیستم تنش در سازند گچساران، چاه‌های A و B، عمدتاً معکوس ( $\sigma_h > \sigma_v$ ) و سیستم گسلش در سازند آسماری این چاه‌ها عمدتاً نرمال ( $\sigma_h < \sigma_v$ ) است. با توجه به نتایج جدول ۴، می‌توان گفت در سازند گچساران به دلیل حاکم بودن رژیم تنشی گسل معکوس در حین تزریق حالت ناپایدار دارد و وقوع شکستگی‌های القایی محتمل است. اما، حین تولید این سازند حالت پایداری دارد و احتمال وقوع شکستگی اندک است. در سازند آسماری جایی که رژیم تنش گسل نرمال حاکم است سناریوهای مختلفی بسته به میزان  $R_\sigma$  و  $R_\phi$  به وجود خواهد آمد.

## محاسبه تغییر فشار بحرانی برای شکستگی‌های برشی و کششی درون مخزن و سنگ‌های اطراف

با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی، که از مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی تهیه شده در چاه‌های A و B میدان به دست آمده است، می‌توان میزان تغییر فشار بحرانی را برای ایجاد شکستگی‌های القایی برشی و کششی در مخزن آسماری و سنگ‌های اطراف آن در زمان تولید و تزریق محاسبه کرد.

تغییر فشار بحرانی برای شکستگی‌های برشی در مخزن و سنگ‌های اطراف با رابطه ۲۵ تعیین می‌شود (سلطان‌زاده ۲۰۰۹).

$$A(\Delta P_{C(s)} / P_0)^2 + B(\Delta P_{C(s)} / P_0) + C = 0$$

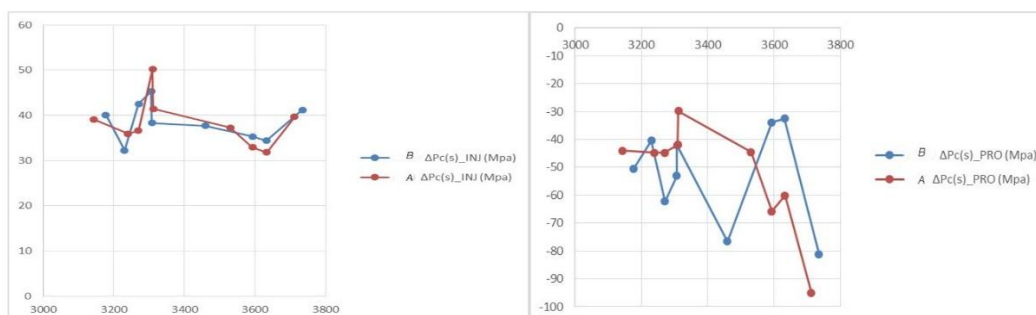
رابطه ۲۵. شکستگی برشی

زاویه اصطکاک داخلی، که از مدل ژئومکانیکی به دست آمد، معمولاً برابر با ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود.  $\gamma_{\alpha(m)}$  و  $\gamma_{\alpha(d)}$  نسبت‌های کمانش تنش انحرافی نرمال شده میانگین‌اند. رابطه کلی تعیین تغییر فشار بحرانی برای شکستگی‌های کششی در مخزن و سنگ‌های اطراف به شکل زیر بیان می‌شود (سلطان‌زاده ۲۰۰۹):

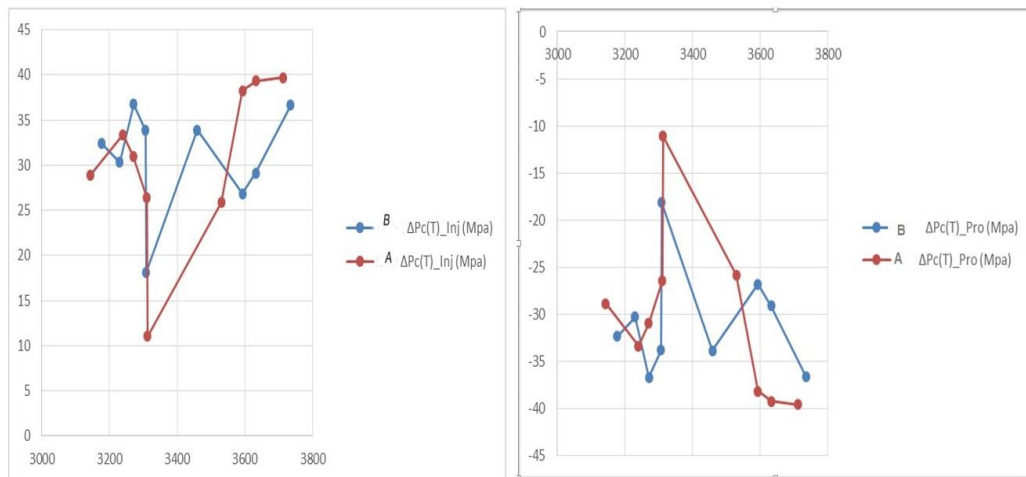
$$A'(\Delta P_{C(T)} / P_0)^2 + B'(\Delta P_{C(T)} / P_0) + C' = 0$$

رابطه ۲۶. شکستگی کششی

همان‌گونه که جدول‌ها و نمودارها نشان می‌دهند، تغییرات بحرانی فشار برای ایجاد شکستگی‌های برشی و کششی در سنگ‌شناسی‌های مختلف در چاه‌های A و B وضعیت نسبتاً مشابهی دارند. همچنین، می‌توان گفت در چاه A، در مقایسه با چاه B، تغییر بیشتری در فشار تزریق و تولید برای ایجاد شکستگی‌های کششی و برشی لازم است. کمترین مقدار ممکن برای تغییر فشار در هر دو چاه در مرز سازند آسماری و گچساران در سنگ‌شناسی دولومیت وجود دارد؛ جایی که در چاه A با ۱۱ مگاپاسکال و در چاه B با ۱۸ مگاپاسکال تغییر در فشار تولید و تزریق شکستگی القایی از نوع کششی به وقوع خواهد پیوست.



شکل ۸. مقایسه تغییر فشار بحرانی برای شکستگی‌های القایی برشی در حین تولید و تزریق در چاه‌های A و B



شکل ۹. مقایسه تغییر فشار بحرانی برای شکستگی القایی کششی حین تولید و تزریق در چاه‌های A و B

## نتیجه

اطلاعات حاصل از مدل‌های ژئومکانیکی ساخته شده در چاه‌های A و B، شامل اندازه تنش‌های قائم و افقی حداقل و افقی حداکثر، نشان می‌دهد در سازند گچساران در سنگ‌شناسی‌های مختلف رژیم تنش گسل معکوس و امتداد لغز حکم فرماست. پارامتر تمایل لغزش (ST) برای هر دو گسل در شرایط ژئومکانیکی چاه A و B در سنگ‌شناسی‌های مختلف و اعماق مختلف اندازه‌گیری شد. میزان آن بین ۰ و ۱ متغیر است. اندازه‌گیری‌های نشان می‌دهد گسل شماره ۱ نسبت به گسل شماره ۲ به فعالیت مجدد متمایل‌تر است. سنگ‌شناسی شیل بیشترین احتمال فعالیت مجدد را در شرایط ژئومکانیکی چاه B برای گسل شماره ۱ از خود نشان می‌دهد. با افزایش تغییرات فشار منفذی به میزان ۱۰۰۰ پام، پارامتر تمایل لغزش برای هر دو گسل افزایش می‌یابد که این افزایش در گسل شماره ۱ محسوس‌تر است. مدل‌سازی تحلیلی از تمایل فعالیت مجدد گسل‌ها در زوایای مختلف در اعماق مختلف بیانگر زاویه شیب بحرانی ۴۶ تا ۵۲ درجه برای گسل‌هاست. بدین معنی که گسل‌های بین زاویه ۴۶ تا ۵۲ درجه تمایل بیشتری به فعالیت مجدد در اعماق و سنگ‌شناسی‌های مختلف از خود نشان می‌دهند. آنالیز احتمال وقوع شکستگی در سازند گچساران چاه A و B، به دلیل حاکم بودن رژیم تنش گسل معکوس، شرایط ناپایداری (وقوع شکستگی) حین عملیات تزریق و شرایط پایداری (عدم وقوع شکستگی) حین عملیات تولید را نشان می‌دهد. آنالیز احتمال وقوع شکستگی برای مخزن آسماری در چاه A نشان‌دهنده ناپایداری هنگام تزریق و پایداری هنگام تولید است و برای مخزن آسماری در چاه B نشان‌دهنده ناپایداری هنگام تزریق و پایداری به هنگام تولید نفت و گاز است.

## منابع

امیربختیار، ح. و همکاران (۱۳۹۳). مطالعه جامع سازند آسماری در فروافتادگی دزفول، شرکت ملی نفت، مناطق نفت‌خیز جنوب. حسن‌زاده، ا. (۱۳۹۴). «ارزیابی یکپارچگی پوش سنگ با استفاده از مدل‌سازی ژئومکانیکی در یکی از میداین جنوب غرب ایران»،

پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیدیه.

حمیداوی، ح. (۱۳۹۲). «طراحی عملیات ژئومکانیکی شکست هیدرولیکی در لایه مخزنی بنگستان (مطالعه موردی: میدان نفتی کوپال)»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیدیه.

طالبی، ح. و همکاران (۱۳۹۵). *اندازه‌گیری راستا و بزرگی تنش‌های برجای سازند آسماری فروافتادگی دزفول شمالی، اهواز: شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، اداره مطالعات زمین‌شناسی گسترشی.*

علی‌پور، م. (۱۳۹۱). «ازدیاد برداشت در صنعت نفت ایران»، *اکتشاف و تولید.*

کریمی، ا. (۱۳۹۷). «تعیین مسیر بهینه حفاری جهت‌دار در میدان نفتی کوپال»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیدیه.

مهدی‌پور، ض. و محمودیان، م.، کوچک‌زاده، م. (۱۳۹۶). «تعبیر و تفسیر اطلاعات لرزه‌ای سه‌بعدی میداین مارون و کوپال»، گزارش داخلی شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب، شماره پ - ۷۲۹۸.

نجیبی، ع. (۱۳۹۰). «انطباق پارامترهای مکانیکی سنگ با داده‌های پتروفیزیکی در مخزن کوپال و تأثیر آن بر تحلیل پایداری دیواره چاه»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم.

- Amir Bakhtiar, H. & colleagues. (2014). Comprehensive study of the Asmari Formation in the Dezful embayment - National Oil Company - South Oil Fields.
- Hassanzadeh, A. (2015). Evaluation of caprock integrity using geomechanical modeling in one of the fields of Southwest of Iran. Master thesis, University of Omidieh.
- Hamidavi, H (2013). Designing Geomechanical Operations of Hydraulic Fracture in Bangestan Reservoir (Case Study: Kupal Oil Field). Master thesis, University of Omidieh.
- Talebi, H. & colleagues (2015). measuring the direction and magnitude of the stresses in place of the Asmari Formation in the Dezful embayment - National Oil Company - South Oil Fields, Department of Geological Studies.
- Alipour, Mehdi (2012). Increasing recovery in Iran's oil industry. Magazine of Exploration and Production 91.
- Karimi, O. (2017). Determine the optimal route of direction drilling in Koupal Oil Fields. Master thesis, University of Omidieh.
- Mahdipour, Zargham, Mehdi Mahmoudian and Mohammad Kuchakzadeh (2012). Interpreting three-dimensional seismic information of Maroon and Kupal fields. Internal report of oilfields of south No. 7298.
- Najibi, AS. (2011). Adaptation of mechanical parameters of rock with petrophysical data in cupola reservoir and its effect on wall stability analysis.
- AkbarAli, A. H., Brown, T., Delgado, R., Lee, D., Plumb, D., Smirnov, N., & Stouffer, T. (2015). *Watching Rocks Change - Mechanical Earth Modeling*. Houston, Texas, USA: Schlumberger.
- Alberti, R. J. (2010). Midale Reservoir Fracture Characterization Using Integrated Well and Seismic Data, Weyburn Field, Saskatchewan. Colorado School of Mines.
- Archer, S. & Rasouli, V. (2017). A log based analysis to estimate mechanical properties and in-situ stresses in a shale gas well in North Perth Basin.
- Mulders, F. M. M. (2015). Modelling of stress development and fault slip in and around a producing gas reservoir. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, Netherlands.
- Qiu, K., Cheng, N., Ke, X., Liu, Y., Wang, L., Chen, Y., & Xiong, P. (2013). 3D Reservoir Geomechanics Workflow and Its Application to a Tight Gas Reservoir in Western China. *the International Petroleum Technology Conference, 26-28 March*. (pp. 1-11). Beijing, China: International Petroleum Technology Conference.

Rolf, B., Mohammad, W., & Mohsen, P. (2014). A Preliminary study of casing collapse in Iran Hydroquest Report, Schlumberger Oil Company.

Soltanzadeh, H. (2009). Geomechanical Analysis of Caprock Integrity. A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctorate of Philosophy in the Department of Civil and Geological Engineering University of Saskatchewan Saskatoon.

Zhang, X. (2011). Methodology and Implications for Natural Fracture Network Modelling in a Carbonate Reservoir of Abu Dhabi. *the International Petroleum Technology Conference, 20–22 January*. (pp. 1-14). Doha, Qatar: International Petroleum Technology Conference.

Zoback, M. D. (2010). Petroleum related rock mechanics – 2nd edition, Elsevier, Amsterdam, The Netherland. pp 395-398.