

# تحلیل رژیم تنش در مخزن هیدروکربوری و پایداری دیواره چاه در میدان شاه دنیز، حوضه خزر

پروانه علیزاده سعید<sup>۱</sup>، محمد حسنپور صدقی<sup>۲\*</sup>، علی کدخدائی<sup>۳</sup> و ملک محمد گیتی<sup>۴</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۳. دکتری گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۴. مدیر پتروفیزیک شرکت نفت خزر

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۶

## چکیده

ناپایداری دیواره چاه یکی از مشکلات اساسی در عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز است. تحلیل و پیش‌بینی ناپایداری دیواره چاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از موارد دارای اهمیت در ناپایداری مشخص کردن رژیم تنش و اندازه‌گیری مقدار تنش‌ها می‌باشد. این مطالعه در یکی از میدان‌های حوضه خزر جنوبی در ایران انجام شده است. رژیم تنش فشارشی در میدان مورد مطالعه با توجه به مشاهدات تکتونیکی بزرگ مقیاس و نشانه‌های تنش ناحیه‌ای شناسایی شده است. با داده‌های صوتی و چگالی و فشار منفذی پیش‌بینی شده از روش ایتون (Eaton)، بزرگی تنش‌های برجا محاسبه شده است. این مطالعه تاثیر شیب و آزیموت را روی ناپایداری چاه در رژیم گسلی فشارشی ارائه می‌دهد. در این مطالعه برای محاسبه پایداری در آزیموت و شیب‌های مختلف از معیار گسیختگی اصلاح شده لید (Lade) استفاده شده است. مطالعه پایداری در این میدان توسط نرم‌افزار STABview انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که پایداری در امتداد آزیموت تنش افقی حداکثر (NE-SW) مشکلات کمتری نسبت به سایر جهتها دارد. در یک مسیر نزدیک به جهت تنش افقی حداقل، چاه قائم بیشترین پایداری را دارد، اما در جهت نزدیک به جهت تنش افقی حداکثر چاه افقی بهترین گزینه می‌باشد.

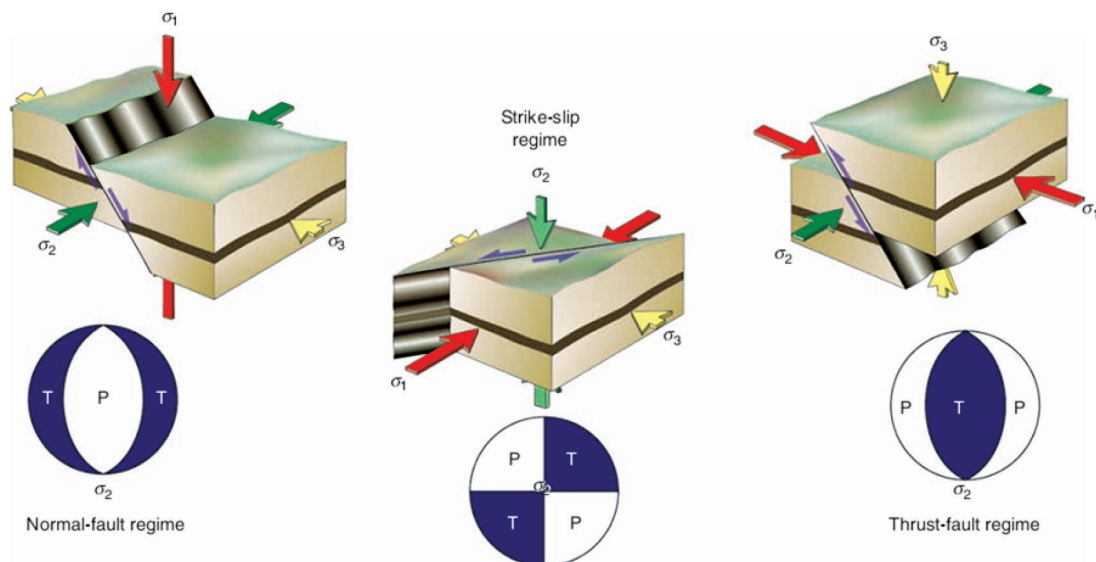
**واژه‌های کلیدی:** پایداری دیواره چاه، تنش‌های برجا، چاه‌های نفت و گاز، رژیم تنش، ژئومکانیک.

## مقدمه

آگاهی از خصوصیات کامل تنسور تنش‌های برجا، نیازمند تعیین بزرگی و جهت سه مؤلفه‌ی تنش‌های اصلی است، که از بزرگ به کوچک به‌عنوان  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  نشان داده می‌شود. در محیطی با سطح برجستگی‌های ملایم، فرض کلی بر این است که سطح زمین هموار و افقی است. در چنین موردی، جهت یکی از تنش‌های اصلی تقریباً عمودی است. این تنش قائم برجا، توسط  $\sigma_v$  نشان داده می‌شود که

به دلیل اینکه ناپایداری دیواره چاه از مشکلات اساسی در عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز می‌باشد در بسیاری از میدان‌های نفتی برای کاهش هزینه‌ها و افزایش تولید بازدهی بیشتر مخازن نفت و همچنین کاهش مشکلات حفاری به مطالعات پایداری و تعیین مسیر بهینه حفاری نیاز می‌باشد (Zare et al., 2010).

\* نویسنده مرتبط: hassanpour\_mhd@tabrizu.ac.ir



شکل ۱. ارتباط بین جهت‌گیری تنش‌های اصلی (رژیم‌های تنش) و رژیم‌های تکتونیکی بر اساس اندرسون ۱۹۵۱ و استریونت‌های نشان‌دهنده بخش‌های فشاری (P) و کششی (T) (Fossen, 2010)

### زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در حوضه جنوبی دریای خزر قرار گرفته است، حوضه جنوبی دریای خزر شامل بخش‌های جنوبی دریای خزر و مناطق خشکی شرق آذربایجان، غرب ترکمنستان و شمال ایران است. تقریباً ۴۵ درصد آن در آذربایجان، ۳۵ درصد آن در ترکمنستان و ۲۰ درصد در ایران قرار دارد. دریای خزر یکی از مناطق مهم منابع نفتی و تأمین‌کننده عمده نفت و گاز می‌باشد و مطالعات پایداری دیواره‌ها، در این منطقه ضروری می‌باشد (Fowler et al., 2000).

مرز جدایش حاشیه باختری و جنوبی فرونشست خزر جنوبی با کوه‌های تالش توسط گسل معکوس خزر کنترل می‌شود. عملکرد این گسل، باعث فراخاست رسوبات دامنه شمالی البرز شده به گونه‌ای که رسوبات پالئوزوئیک دامنه شمالی البرز در کنار رسوبات کواترنر ساحل جنوبی خزر است. گفتنی است که فشارش پلیوسن-پلیستوسن و عملکرد گسل‌های راندگی سبب شده که در حال حاضر نهشته‌های میوسن دریای خزر، در ارتفاع ۲۰۰۰ متری و نهشته‌های پلیوسن در ارتفاع ۱۰۰۰ متر باشند. بررسی ویژگی‌های لرزه زمین‌ساختی خزر جنوبی نشان‌دهنده چیرگی رژیم زمین

از وزن سنگ‌های پوشاننده، رسوبات و سیالات موجود در آنها نتیجه می‌شود. با توجه به ماهیت عمود بر هم بودن تنش‌های اصلی، دو تنش اصلی دیگر در سطح افقی خواهد بود. این تنش‌های اصلی توسط  $\sigma_{Hmin}$  و  $\sigma_{Hmax}$  به ترتیب برای بیشترین و کمترین تنش برجا نشان داده می‌شود (McLellan and Hawkes, 2001) (شکل ۱).

امروزه تنش‌های برجا و کاربرد ژئومکانیک برای تعیین تنش‌ها، در صنایع نفتی دنیا بسیار مورد توجه قرار گرفته است به طوری که بسیاری از شرکت‌های بزرگ نفتی دنیا در زمینه مطالعات مخازن نفتی به سراغ این مباحث رفته و آن را مورد توجه قرار داده‌اند. اصولاً مطالعه تنش‌های برجا می‌تواند تاثیر بسیار مهمی در تحلیل پایداری چاه، تعیین و بررسی شکستگی‌ها داشته باشد.

با تحلیل تنش‌ها و ارائه مدل ژئومکانیکی و در نهایت بررسی پایداری دیواره چاه در هر سازند می‌توان با انتخاب مناسب و بهینه پارامترهای حفاری نظیر آزمون، زاویه انحراف و وزن گل حفاری علاوه بر کاهش هزینه‌های حفاری چاه‌های آبی، از مخاطرات احتمالی نظیر مچالگی و یا برش لوله جداری در طول عمر یک چاه نیز تا حد زیادی جلوگیری کرد.

بهره‌دهنده به شدت توسط گسل معکوس در یال غربی، چین‌خورده است. با این حال، تراست عمیق و گسل معکوس در سری لایه‌های بهره‌دهنده به نظر نمی‌رسد به‌طور مستقیم به هم وصل باشند و گسل‌ها همچنان در طول سازند آپشرون و سازندهای کواترنری به گسترش ادامه داده است (Fowler et al., 2000).

## روش مطالعه

مدل ژئومکانیکی، نمایشی عددی از وضعیت تنش‌های برجا و خواص مکانیک سنگ برای یک ستون چینه‌شناسی در میدان می‌باشد. بررسی ژئومکانیکی مخازن هیدروکربوری نقش بسیار مهمی در ارزیابی و توسعه میادین نفت و گاز ایفا می‌کند. در بسیاری از مناطق، چگونگی و محل حفاری چاه‌ها با توجه به عمق سازند مخزنی و تنش روباره، چالشی بسیار جدی را پیش روی متخصصان صنعت نفت قرار می‌دهد. مشکلات و مسائل فراوانی در مسیر طولانی تولید نفت از درون مخزن تا سطح زمین وجود دارد که بخش عمده‌ای از آن‌ها زاینده شرایط نامتعادل فیزیکی-مکانیکی سازندها است. امروزه ژئومکانیک نفت به دانشی کلیدی برای تحلیل و فائق آمدن به این‌گونه مشکلات تبدیل شده است.

ژئومکانیک، اساساً دانشی میان‌رشته‌ای، در مورد مکانیک سنگ، زمین‌شناسی ساختمانی و مهندسی نفت است که به بررسی و تحلیل رفتار زمین در برابر تنش‌ها می‌پردازد. این تنش‌ها ممکن است تنش‌های طبیعی درون زمین یا تنش‌های القا شده توسط انسان در عملیات مختلف، از جمله حفاری باشد. مدل ژئومکانیکی در حالت کلی خواص الاستیسیته-دینامیک سازند را به خواص الاستیسیته-استاتیک معادل آن مرتبط ساخته که این خواص الاستیسیته-استاتیک برای تعیین مقاومت سازند و تنش‌های بر جای زمین به کار می‌روند. مدل ژئومکانیکی از پروفایل‌های عمقی شامل پارامترهای الاستیک یا الاستو-پلاستیک، مقاومت سنگ، تنش‌های بر جای زمین، فشار منفذی و جهت تنش‌های بر جای زمین تشکیل شده است. پارامترهای الاستیک سنگ به دو روش دینامیکی و

ساختی فشاری بر ناحیه است (آقاباتی، ۱۳۸۹). بررسی ساختار پوسته و لرزه‌زمین‌ساخت حوضه خزر جنوبی و کوه‌های طالش با استفاده از داده‌های محلی و دور لرزه‌ها نشان‌دهنده ضخامت پوسته در حدود ۴۰ کیلومتری نزدیک ساحل و وجود دو خطواره لرزه‌زا در امتدادهای شمالی-جنوبی در بخش باختری حوضه خزر جنوبی و لنکران با رژیم فشارشی می‌باشد (مرتضی‌نژاد، ۱۳۹۲).

بیشتر مخازن نفتی شمال ایران در نهشته‌های پلیوسن-کواترن حاشیه دریای خزر تشکیل شده‌اند به همین دلیل، این انباشته‌ها ارزش اقتصادی دارند. جدا از میدان‌های نفتی خزر شمالی و خزر میانی، خزر جنوبی یکی از منابع اصلی اکتشاف و تولید نفت و گاز دریای خزر است. در خزر جنوبی، سنگ مخزن اصلی بهره‌دهنده به سن پلیوسن زیرین-میانی است. سنگ مخزن فرعی آن نهشته‌های ماسه‌ای سازند آپشرون به سن کواترن پیشین می‌باشد (Javanshir et al., 2015).

گسل‌های حاشیه‌ای در حوضه خزر هنوز هم به شدت فعال‌اند زیرا بسیاری از زلزله‌های گیلان و مازندران در نتیجه جابجایی‌ها و فعالیت این گسل‌ها به وجود آمده‌اند. مطالعات زمین‌شناسی و ژئوفیزیک نشان می‌دهد که گسل‌ها از نوع معکوس و تا حدی رو رانده‌اند (Devlin et al., 1999).

مطالعات لرزه‌نگاری انجام شده نشان می‌دهد که در منطقه خزر جنوبی تاقدیس‌ها و ناودیس‌های بزرگ و کوچک متعددی با ابعاد چند کیلومتر وجود دارند که نتیجه ادامه چین‌خوردگی آلپین بوده که در رسوبات تخریبی از قبیل کنگلومرا، ماسه سنگ و رس تخریبی دوران سوم به وجود آمده است که در منطقه گسترش زیادی دارند. به‌طور کلی از اواخر پالئوژن در منطقه خاور حوضه خزر نفوذ گل‌فشان‌ها به طرف بالا و همچنین پدیده دیاپیریسم در شیل‌ها فعال بوده که تا امروز نیز این فعالیت ادامه دارد و برآمدگی بسیاری در نقاط مختلف این منطقه را شامل می‌شود. این برآمدگی‌ها را به خوبی می‌توان بر روی مقاطع لرزه‌نگاری ملاحظه کرد (Fowler et al., 2000).

ویژگی‌های اصلی ساختاری میدان مورد مطالعه ساختار بسته‌ای است که به چهار جهت شیب‌دار می‌باشد و محور اصلی آن شمال غرب-جنوب شرق است. سری لایه‌های

برای اندازه‌گیری این پارامترها نیاز به داده‌های لاگ چگالی و لاگ‌های صوتی فشاری و برشی می‌باشد و سپس این داده‌ها توسط نرم‌افزار ژئولاگ<sup>۱</sup> در جهت کاهش نویزهای این نمودارها و در نتیجه دستیابی به داده‌های قابل اعتماد نویزگیری شده است و سپس محاسبات انجام شده است. نسبت پواسون یکی از پارامترهای مهم در برآورد بزرگای تنش می‌باشد. سرعت‌ها به صورت کیلومتر در ثانیه است و نتایج بدون واحد می‌باشد.

$$v = 0.5 \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

مدول یانگ یکی از پارامترهای مورد نیاز در تحلیل‌های ژئومکانیکی است و طبق تعریف نسبت تنش قائم به کرنش قائم می‌باشد. در این مطالعه مقدار این پارامتر از رابطه (۲) به دست آمده است. در این رابطه:  $\rho_b$ : چگالی برحسب گرم بر سانتیمتر مکعب و  $E$ : مدول یانگ برحسب پوند بر اینچ مربع و  $10^{10} \times 1.34$ : فاکتور تبدیل مدول، به واحد psi (پوند بر اینچ مربع) می‌باشد.

$$E = \left( \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2} \right) \left( \frac{v(\Delta t_s^2) - v(\Delta t_p^2)}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \right) \times 1.34 \times 10^{10} \quad (2)$$

برای محاسبه مدول برشی از رابطه (۳) با استفاده از داده‌های لاگ چگالی برحسب گرم بر سانتیمتر مکعب و داده‌های زمان گذر موج برشی برحسب میکروثانیه بر فوت تعیین می‌شود.

$$G = \left( \frac{RHOB}{\Delta t_s^2} \right) \times 1.34 \times 10^{10} \quad (3)$$

در رابطه (۴)،  $K$  مدول بالک استاتیکی برحسب پوند بر اینچ مربع و  $10^{10} \times 1.34$ : فاکتور تبدیل مدول، به واحد psi (پوند بر اینچ مربع) می‌باشد.

$$K_{(psi)} = \rho_b \left( \left( \frac{1}{\Delta t_p^2} \right) - \left( \frac{v}{\Delta t_s^2} \right) \right) \times 1.34 \times 10^{10} \quad (4)$$

برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوره توسط

استاتیکی قابل اندازه‌گیری هستند. در روش دینامیکی، با اندازه‌گیری سرعت عبور امواج تراکمی ( $V_p$ ) و برشی ( $V_s$ ) در شرایط برجا و یا آزمایشگاه، ویژگی‌های الاستیک دینامیکی سنگ به دست می‌آیند. در روش استاتیکی نیز با انجام آزمایش‌های تخریبی مانند مقاومت فشاری تک‌محوری و یا سه محوری بر روی مغزه سنگ، پارامترهای مقاومتی و الاستیک استاتیکی اندازه‌گیری می‌شوند. روش‌های استاتیکی نتایج واقع بینانه‌تری نسبت به روش‌های دینامیکی می‌دهند، اما هزینه انجام آن بیش‌تر است و اندازه‌گیری آن به نقاط دارای مغزه سنگی محدود می‌شود. متأسفانه پارامترهای دینامیکی و استاتیکی با یک دیگر برابر نیستند و معمولاً پارامترهای دینامیکی از پارامترهای استاتیکی متناظر خود بزرگ‌تر هستند. به‌منظور اندازه‌گیری پیوسته ویژگی‌های مکانیک سنگ در طول چاه، ایجاد روابط تجربی بین پارامترهای دینامیکی و استاتیکی ضروری به نظر می‌رسد.

خواص الاستیسته سنگ‌ها که رابطه بین تنش و کرنش را در محدوده تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر سنگ نشان می‌دهد متشکل از ضرایب الاستیک می‌باشد. تاکنون روش‌های متنوعی برای تخمین پارامترهای مکانیکی در یک مخزن نفتی معرفی شده‌اند که دامنه‌ای از روش تجربی تا روش‌های هوشمند را شامل می‌شوند که در این مطالعه از فرمول‌های تجربی برای برآورد پارامترهای ژئومکانیکی استفاده شده است.

پارامترهای مورد نیاز برای انجام یک تحلیل زمین مکانیکی جهت بررسی پایداری دیواره چاه را می‌توان در دودسته تقسیم‌بندی کرد:

دسته اول پارامترهای مربوط به سازند بوده که شامل نسبت پواسون<sup>۱</sup> و مدول‌های الاستیسیته (مدول یانگ<sup>۲</sup>، مدول برشی<sup>۳</sup> و مدول حجمی<sup>۴</sup>)، مقاومت فشاری تک‌محوره<sup>۵</sup> و ضریب بایوت<sup>۶</sup> و همچنین فشار منفذی<sup>۷</sup> می‌باشند. معادلات در روابط (۱) تا (۶) نشان داده شده است. دسته دوم پارامترهای مربوط به تنش منطقه است که شامل مقدار و جهت تنش‌های عمودی و تنش‌های افقی ماکزیمم و مینیمم معادلات در روابط (۷) و (۸) نشان داده شده است (Tixier et al., 1975).

1. Poisson's ratio
2. Young's modulus
3. Shear modulus
4. Bulk modulus
5. Unconfined compressive strength
6. Biot ratio
7. Pore pressure
8. Geolog

مشخص که در این فرمول توسط زویاک ارائه شده است (Zoback, 2007)، چگالی آب می‌باشد و  $Z_w$  عمق آب و  $\rho_w$  دانسیته آب است که این مقدار برای دریای خزر  $1 \text{ g/cm}^2$  فرض شده است.

$$Sv = \rho_w g z_w + \int_{z_w}^z \rho(z) g dz \approx \rho_w g z_w + \rho(z - Z_w) \quad (7)$$

تعیین بزرگی تنش افقی حداکثر  $\sigma_H$  بر پایه تئوری پوروالاستیسیته محاسبه شده است. در این معادله که توسط زویاک (Zoback, 2007) ارائه شده است  $v$ : ضریب پواسون و  $a$ : ثابت بایوت و  $E$ : مدول یانگ و  $\epsilon_x$ ،  $\epsilon_y$  کرنش به ترتیب در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر و  $P_p$ : فشار منفذی می‌باشد. برای محاسبه تنش افقی حداقل، از میانگین تنش عمودی و تنش افقی حداکثر استفاده شده است (شکل ۲).

$$\sigma_H = \frac{v}{1-v} \sigma_v - \frac{v}{1-v} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E}{1-v^2} \epsilon_x + \frac{vE}{1-v^2} \epsilon_y \quad (8)$$

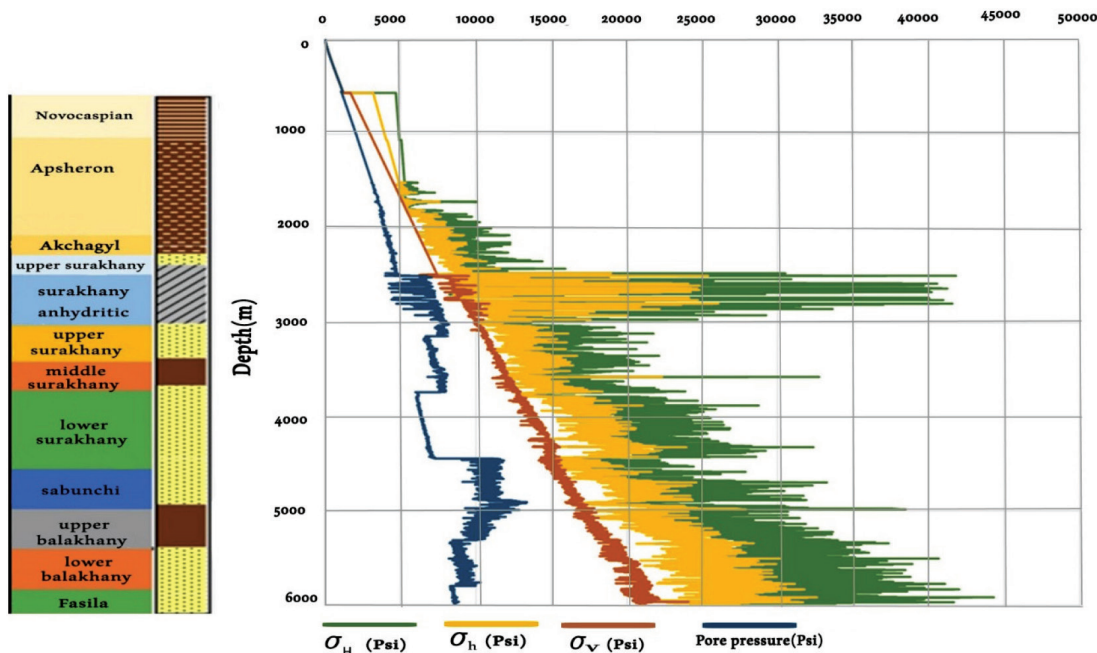
معادله (۵) که توسط ترکان و همکاران ارائه شده است (Tercan et al., 2005) و مناسب‌ترین معادله جهت محاسبه این پارامتر در میدان مورد مطالعاتی ما از نظر جنس سازندها می‌باشد، استفاده شده است.

$$UCS = 7.1912 V_p + 26.258 \quad (5)$$

فشار منفذی مورد نظر توسط معادله ایتون (Eaton, 1975) مورد محاسبه قرار گرفته است. در این معادله  $P_{pg}$  گرادیان فشار منفذی سازند،  $S_g$  گرادیان فشار روباره،  $P_{ng}$  گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک (که معمولا برابر با  $0.45 \text{ psi/ft}$  می‌باشد)،  $\Delta t$  زمان گذر موج صوتی از داده‌های لاگ صوتی ( $\mu\text{s/ft}$ )،  $Z$  عمق برحسب فوت و توان ثابت  $x$  در مطالعات ایتون ۳ قرار داده می‌شود ولی با توجه به مخازن مورد مطالعه نیاز به اصلاح دارد. سپس توسط داده‌های تست فشار منفذی سازند MDT کالیبره شده است.

$$P_{pg} = S_g - (S_g - P_{ng}) \left( \frac{65 + 134e^{-0.013Z}}{\Delta t} \right)^x \quad (6)$$

تنش عمودی عبارت است از فشار وارد آمده از سوی وزن طبقات و سیالات بالایی بر سازند در عمق



شکل ۲. مقایسه بزرگی تنش‌های عمودی، افقی حداکثر و حداقل برحسب psi (پوند بر اینچ مربع) نسبت به عمق برحسب متر مربوط به چاه مورد مطالعه می‌باشد

## بحث

### تنش‌های مؤثر بر میدان نفتی مورد مطالعه

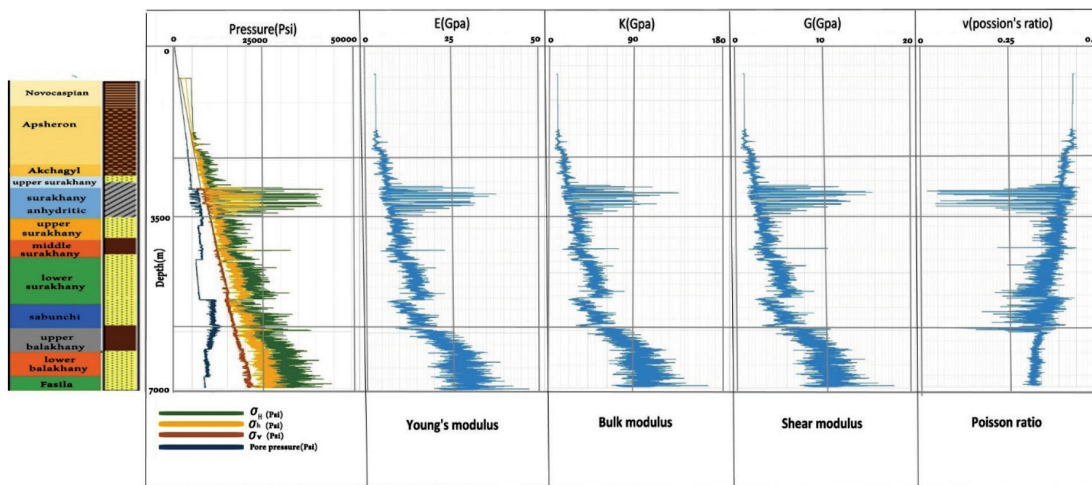
میدان نفتی مورد مطالعه که در جنوب حوضه دریای خزر قرار دارد به دلیل وجود گل‌فشان‌های فراوان در این میدان بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است و از روی نتایج مطالعات این محققان و با توجه به پروژه‌ی استرس جهانی، امتداد تنش افقی ماکزیمم به صورت شمال شرقی- جنوب غربی و با آزیموت N30E قرار گرفته است (Bonini et al., 2010) (Fowler et al., 2000) (2012).

### مدل ژئومکانیکی ارائه شده برای چاه مورد نظر

مدل ژئومکانیکی، نمایشی عددی از وضعیت تنش‌های برجا و فشار منفذی و خواص مکانیک سنگ شامل مدول‌های الاستیک برای یک ستون چینه‌شناسی در میدان مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۳).

با توجه به مدل ژئومکانیکی ارائه شده مشخص است که در سازند انیدریتی سوراخانی مقادیر مدول برشی، مدول یانگ و مدول بالک بیشترین مقدار است و مقدار تنش‌ها در این واحد چینه‌ای تأثیر بیشتری روی ناپایداری چاه خواهد داشت. همین‌طور با افزایش عمق، مقدار تنش‌ها

افزایش می‌یابد و ناپایداری تحت تأثیر این افزایش قرار می‌گیرد. با استفاده از این نمودار می‌توان قسمت‌هایی که دارای فشار منفذی بالایی نسبت به سایر مناطق است را که شامل سازند ماسه‌ای شیلی عمیق صابونچی می‌باشد را مشخص کرد، که در این سازند فشار گسیختگی دارای مقادیر بیشتری است. بنابراین در صورت استفاده از یک نوع گل حفاری، حفاری در این قسمت ناپایداری بیشتری نسبت به سایر نواحی خواهد داشت. سازندهای تبخیری خاصیت شکل‌پذیری بالایی با افزایش تنش‌های اعمالی دارد و در سازندهای نمکی مانند سازند سوراخانی انیدریتی در عمق ۲۵۰۰ تا ۳۱۰۰ متری، حالت تنش بسیار پیچیده و متغیر است. و این سازندها با تأثیر تنش برجا در منطقه می‌تواند در درازمدت رفتار ویسکوپلاستیک و خزشی از خود نشان دهد. این بدان معنا است که با وارد شدن یک مقدار خاص تنش به سازندهای تبخیری، به دلیل عدم توانایی در نگهداری و برقرار داشتن تنش‌های انحرافی درون خود، حالت تنش در آن کاملاً هیدرواستاتیک یا نزدیک به آن می‌شود. در نمک، مقدار تنش افقی تقریباً با وزن روباره برابر است. از این‌رو از واژه تحت تعادل در حفاری سازندهای نمکی مثل سازند سوراخانی انیدریتی استفاده می‌شود.

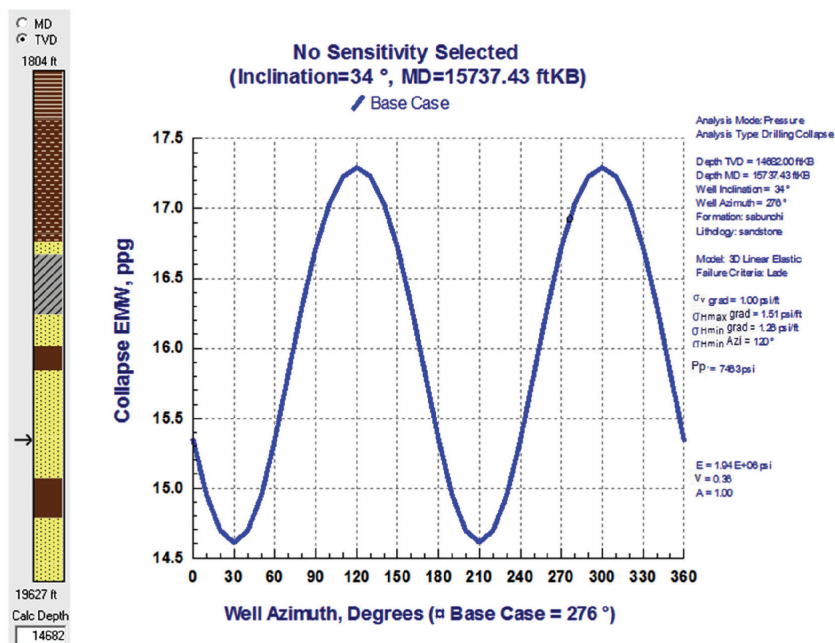


شکل ۳. مدل ژئومکانیکی نمایشی عددی از وضعیت تنش‌های برجا و خواص مکانیک سنگ مربوط به چاه مورد نظر می‌باشد، که ستون اول مربوط به داده‌های نسبت پواسون در عمق‌های مختلف چاه حفر شده برحسب متر، ستون دوم مربوط به داده‌های مدول برشی برحسب گیگاپاسکال، ستون سوم مربوط به داده‌های مدول بالک برحسب گیگاپاسکال، ستون چهارم مربوط به داده‌های مدول یانگ و ستون پنجم مربوط به داده‌های تنش که در شکل (۲) ارائه شده است، نشان می‌دهد

درجه کمترین فشار فروریختگی را نشان می‌دهد. بنابراین حفاری در این امتداد می‌تواند پایدارترین شرایط را برای دیواره تامین کند (شکل ۴). با توجه به شکل نمودار عمودی مقدار فشار فروریختگی و نمودار افقی آزمون‌های مختلف برای حفاری را نشان می‌دهد که در آزمون‌های ۳۰ و ۲۱۰ درجه مقدار فشار فروریختگی نسبت به سایر نواحی کمترین مقدار می‌باشد که نشان می‌دهد در این آزمون‌ها پایداری دیواره چاه بیشترین مقدار نسبت به سایر نواحی می‌باشد.

## تعیین جهت آزمون<sup>۱</sup> برای حفاری پایدار

آزمون حفاری برای امتدادهای متفاوت نسبت به جهت شمال (صفر درجه)، بر اساس جهت‌گیری تنش‌های افقی ماکزیمم و مینیمم سنجیده شده و مقدار فشار فروریختگی چاه<sup>۲</sup> را در آزمون‌های مختلف بر اساس ppg (پوند بر گالن)، نشان می‌دهند. بنابراین بر اساس این نمودارها و با توجه به اینکه رژیم تنش حاکم بر منطقه از نوع فشارشی است، پایدارترین جهت حفاری در جهت آزمون‌های ۳۰ و ۲۱۰



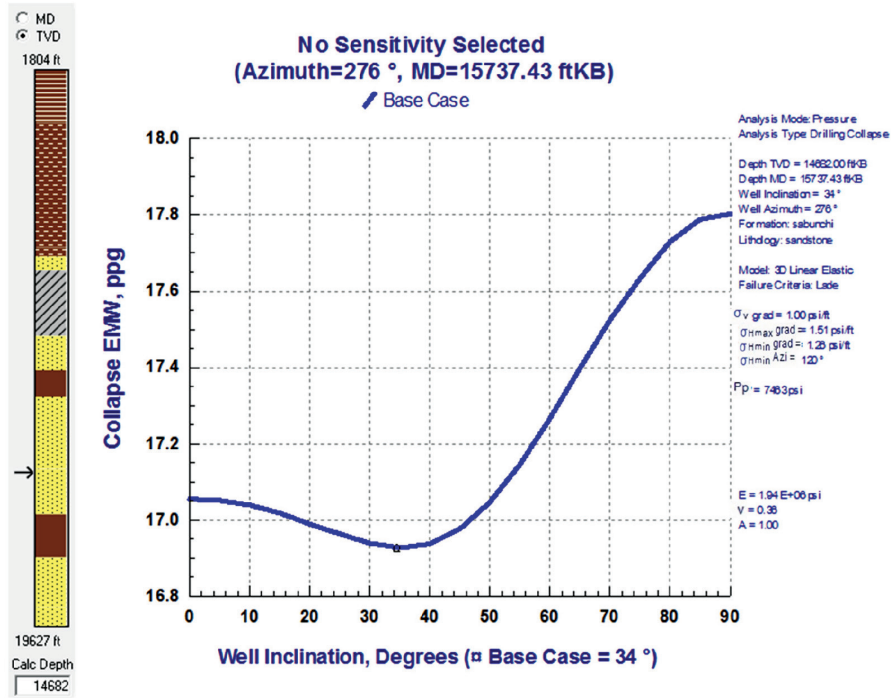
شکل ۴. فشار فروریختگی چاه برای آزمون‌های متفاوت حفاری، برحسب پوند بر گالن در سازند صابونچی نشان‌دهنده پایداری بیشتر چاه در آزمون‌های ۳۰ و ۲۱۰ درجه

حاصل می‌شود. در یک سیستم تنش فشارشی، زاویه انحراف بهینه چاه بسته به مسیر حفاری، بین یک چاه افقی و یک چاه عمودی در حال تغییر است. در یک مسیر نزدیک به جهت تنش افقی حداقل ( $\alpha=90^\circ$ ) چاه قائم بیشترین پایداری را دارد. اما در جهت نزدیک به جهت تنش افقی حداکثر ( $\alpha=0^\circ$ ) چاه افقی بهترین گزینه می‌باشد. در این حالت مسیر حفاری موازی با تنش برجای اصلی حداکثر ( $\sigma_H$ ) می‌باشد.

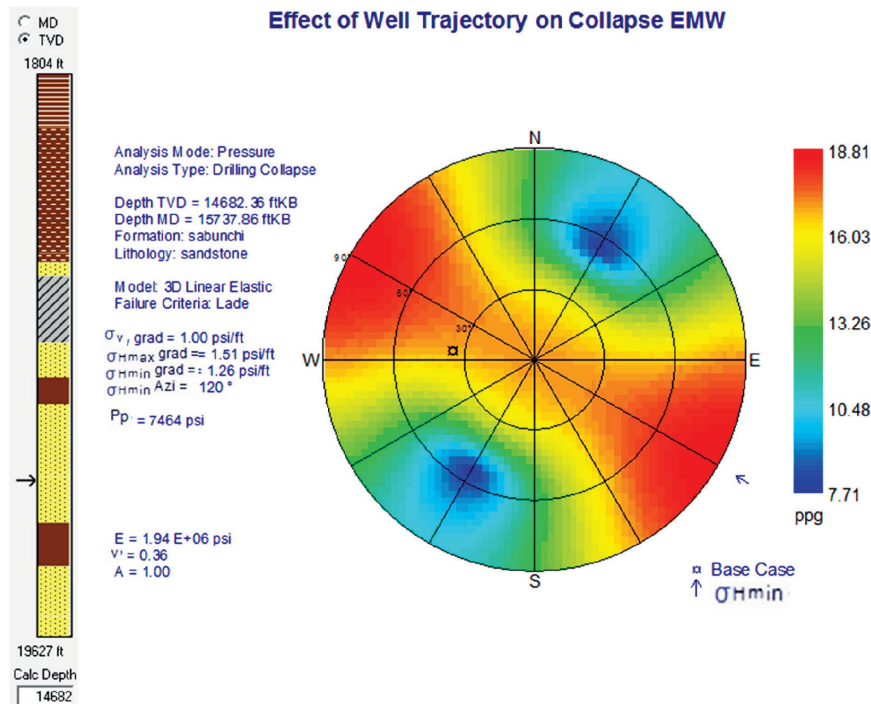
## تعیین زاویه انحراف<sup>۳</sup> برای حفاری پایدار

چاه‌ها در حالت معمولی به صورت قائم در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین زاویه انحراف صفر درجه نشان‌دهنده چاه قائم و زاویه انحراف ۹۰ درجه نشان‌دهنده چاه افقی می‌باشد. فشار فروریختگی چاه را به عنوان تابعی از زاویه انحراف نشان می‌دهد (شکل ۵). این نمودار فشار وزن گل معادل برحسب پوند بر گالن بیان می‌شود. با توجه به نمودارها، چاه‌های عمودی پایدار است و تقریباً در چاه‌هایی با انحراف‌های ۳۰ و ۴۰ درجه چاه دارای کمترین فشار فروریختگی است و در زوایای انحراف ۹۰ درجه بیشترین مقدار فشار گسیختگی

1. Azimuth
2. Collapse pressure
3. Inclination



شکل ۵. فشار فروریختگی چاه برای زوایای متفاوت انحراف برحسب پوند بر گالن در سازند صابونچی نشان دهنده بیشترین فشار فروریختگی و در نتیجه ناپایداری در چاه‌های افقی نسبت به چاه‌های قائم می‌باشد



شکل ۶. نمودار قطبی فشار فروریختگی برحسب پوند بر گالن در سازند صابونچی، کمترین فشار فروریختگی در آزیموت شمال شرقی-جنوب غربی می‌باشد که موقعیت چاه حفاری با علامت مشخص شده است. جهت تنش افقی حداقل با علامت فلش در امتداد شمال غرب-جنوب شرق نشان داده شده است. با توجه به این نمودار قطبی در یک مسیر نزدیک به جهت تنش افقی حداقل ( $\alpha=90^\circ$ ) چاه قائم بیشترین پایداری را دارد. اما در جهت نزدیک به جهت تنش افقی حداکثر ( $\alpha=0^\circ$ ) چاه افقی بهترین گزینه می‌باشد



قرار می‌گیرد که نسبتاً اختلاف تمرکز تنش کمتری دارد در مقایسه با چاهی که در راستای تنش افقی حداقل انحراف یابد که تحت تاثیر دو تنش عمودی ( $\sigma_3$ ) و تنش افقی حداکثر ( $\sigma_1$ ) قرار می‌گیرد که بیشترین اختلاف تمرکز تنش در اطراف چاه را داشته و چاه از پایداری حداقل برخوردار می‌باشد. بنابراین بهینه‌ترین مسیر در آزمون تنش افقی حداکثر و زاویه انحراف افقی‌تر خواهد بود و ناپایدارترین حالت در مسیر تنش افقی حداقل و با زاویه انحراف کمتر یعنی عمودتر خواهد بود. با توجه به نتایج محاسبات پایداری و آزمون تنش‌ها در میدان مورد مطالعه، ایمن‌ترین مسیر حفاری در امتداد شمال شرقی-جنوب غربی و به صورت دقیق‌تر در امتداد N30E، در این میدان مشخص شده است.

### سپاسگزاری

این تحقیق با همکاری و پشتیبانی شرکت نفت خزر انجام شده است.

### منابع

- آقائباتی، س.ع.، ۱۳۸۹. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۰۶.  
- مرتضی نژاد، غ.ر.، عزیز زنجانی، آ.، قدس، ع.ر. و ثبوتی، ف.، ۱۳۹۲. علوم زمین، تابستان ۹۲، سال بیست و دوم، ۳۸-۴۷.

- Anderson, E.M. 1951. The dynamics of faulting and dike formation with application to Britain. Oliver and Boyd, 2nd Edition, Edinburgh, 133147.

- Bonini, M., 2012. Mud volcanoes: Indicators of stress orientation and tectonic controls. Earth-Science Reviews 115, 121-152.

- Bonini, M. and Mazzarini, F., 2010. Mud volcanoes as potential indicators of regional stress and pressurized layer depth. Tectonophysics.

- Devlin, W., Cogswell, J., Gaskins, G., Isaksen, G., Pitcher, D., Puls, D., Stanley, K. and Wall, G., 1999. South Caspian Basin: young, cool, and full of promise. Geological Society of

## بررسی پایداری چاه در میل و آزمون‌های مختلف توسط نمودارهای قطبی

در مطالعه پایداری باید مشخص شود تا چه میزان، چاه می‌تواند نسبت به زاویه قائم انحراف داشته باشد و اصولاً در چه زاویه‌ای پایداری بیشتر است. برای این منظور می‌توان از استریونته‌های نیمکره پایینی جهت تحلیل پایداری دیواره چاه بهره برد. نمودار قطبی برای نمایش کنترهای رنگی از داده‌های فشار و اندازه‌گیری خطر در مسیرهای مختلف چاه و همچنین برای نمایش تصاویر استریوگرافیک بکار می‌رود. مرکز نمودار نشان‌دهنده چاهی با شیب و آزمون صفر درجه است و از مرکز به اطراف دایره‌ها نشان‌دهنده تغییرات در شیب است (شکل ۶) که هر دایره نشان‌دهنده شیب ۳۰ درجه است. در بخش بالای نمودار، شمال با علامت N مشخص شده است و هر خطوط شعاعی نشان‌دهنده تغییرات در آزمون در حدود ۳۰ درجه است. بهینه‌ترین مسیر برای پایداری با توجه به مقدار و فشار فروریختگی برحسب پوند بر گالن نشان داده شده است که در نمودارها نقطه‌ای که دارای بیشترین مقدار فشار باشد ناپایدارترین نقطه می‌باشد یعنی برای پایدار ماندن چاه وزن گل بیشتری نیاز است. در چاه مورد مطالعه که رژیم تنش فشارشی حاکم است بهینه‌ترین مسیر در آزمون تنش افقی حداکثر و زاویه انحراف افقی‌تر خواهد بود و ناپایدارترین حالت در مسیر تنش افقی حداقل و با زاویه انحراف کمتر یعنی عمودتر خواهد بود.

### نتیجه‌گیری

محاسبه مقادیر تنش برجا در میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد که با توجه به مدل گسلی اندرسون، رژیم تنش حاکم بر منطقه، رژیم تنش فشارشی می‌باشد ( $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ ) که در رژیم تکتونیکی فعال فشارشی، آنچه در میدان مورد مطالعه حاکم است، چنانچه مسیر چاه عمودی باشد تحت تاثیر تنش افقی حداکثر ( $\sigma_1$ ) و تنش افقی حداقل ( $\sigma_2$ ) قرار می‌گیرد که این دو تنش ناهمگنی تمرکز کمتری در اطراف چاه را ایجاد کرده و پایداری نسبی دارد. در مورد چاه‌های افقی، چاهی که در راستای تنش افقی حداکثر انحراف یابد تحت تاثیر دو تنش عمودی ( $\sigma_3$ ) و تنش افقی حداقل ( $\sigma_2$ )

- America Today, 9,7, 1-9.
- Eaton, B.A., 1975. The equation for geopressure prediction from well logs. Society of Petroleum Engineers of AIME. Paper SPE, 5544.
  - Fossen, H., 2010. Structural Geology. Cambridge University Press, 77.
  - Fowler, S.R., Mildenhall, J., Zalova, S., Riley, G., Elsley, G., Desplanques, A. and Guliyev, F., 2000. Mud volcanoes and structural development on Shah Deniz. Journal of Petroleum Science and Engineering, 189-206.
  - Javanshir, Rashid J., Riley, Gregory W., Duppenbecker, Stephan J. and Abdullayev, N., 2015. Validation of lateral fluid flow in an overpressured sand-shale. Marine and Petroleum Geology, 593-610.
  - Mclellan, P.J. and Hawkes, C.D., 2001. Borehole Stability Analysis for Underbalanced Drilling. Journal of Canadian Petroleum Technology, 40, 5, 31-38.
  - Tercan, A.E., Unver, B., Tiryaki, B. and Özbilgin, D., 2005. A study of relationships among mechanical, index and petrographic properties of some sandstones using canonical correlation analysis, (in Turkish). Mining, 44, 3-14.
  - Tixier, M.P., Loveless, G.W. and Anderson, R.A., 1975. Estimation of Formation Strength from the Mechanical Properties Log, SPE4532.
  - Zare, M.R., Shadizadeh, S.R. and Habibi, B., 2010. Mechanical Stability Analysis of Directional Wells: A Case Study in Ahwaz. The 34th Annual SPE International Conference and Exhibition. Tinapa-Calabar, Nigeria.
  - Zoback, M.D., 2007. Reservoir Geomechanics, Cambridge University Press, 449.