

تحلیل پایداری چاه و تعیین پنجره وزن گل مناسب برای چاهی از میدان نفتی در جنوب غربی ایران

میثم مطهری^۱، عبدالنبی هاشمی^{۱*} و عبدالله ملقب^۲

۱- گروه مهندسی نفت، دانشگاه صنعت نفت، دانشکده نفت اهواز، اهواز، ایران

۲- شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب، اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۳

چکیده

تحلیل پایداری چاه یکی از مهم‌ترین مسائل در عملیات حفاری بوده و عدم توجه به آن و ناپایداری، ممکن است باعث ایجاد مشکلات متعددی در چاه شود. برای تحلیل پایداری چاه باید در ابتدا خواص مکانیکی سنگ و تنش‌های اولیه محاسبه و تخمین‌زده شوند. پارامترهای مختلفی بر روی پایداری چاه تأثیرگذار است که مهم‌ترین پارامتر قابل کنترل، وزن گل حفاری است. وزن گل حفاری اگر بیشتر از حد مجاز و مقدار پیش‌بینی شده باشد، باعث نفوذ گل در سازند و شکست کششی می‌شود. از طرف دیگر، اگر کمتر از حد مجاز و مقدار پیش‌بینی شده باشد، ممکن است باعث شکست برشی یا به عبارت دیگر، فروریختگی در چاه شود. در این تحقیق، برای تحلیل پایداری چاه و در نتیجه تعیین پنجره و محدوده مناسب برای وزن گل حفاری برای چاهی در میدان نفتی واقع در جنوب غربی ایران، از دو معیار موهر-کلمب و موگی-کلمب استفاده می‌شود. خواص مکانیکی سنگ توسط نمودارهای چاه‌پیمایی تهیه شده و روابط ارائه شده توسط شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب بعد از انجام تست‌های مختلف بر نمونه مغزه‌های مختلف، محاسبه می‌شود. فشار منفذی و تنش‌های اولیه به کمک روابط مختلف محاسبه شده و به کمک اندازه‌گیری‌های مستقیم صورت گرفته در سر چاه مانند تست LOT صحت‌سنجی می‌شوند. سپس دو معیار شکست مذکور برای تخمین پنجره وزن گل مناسب به کار برده می‌شوند و برای اعتبارسنجی نتایج حاصله، از نمودارهای قطرسنجی و اندازه مته استفاده می‌شود. در آخر، مشاهده گردید که مقدار حداقل وزن گل مجاز تخمین‌زده شده توسط معیار موهر-کلمب بیشتر از واقعیت است. در مقابل، مقدار تخمین‌زده شده توسط معیار موگی-کلمب به واقعیت نزدیک‌تر بوده و با شکست‌های برشی اتفاق افتاده در چاه هماهنگی خوبی دارد. از این‌رو، برای چاه مذکور، معیار شکست موگی-کلمب، معیار مناسب‌تری جهت انجام پژوهش‌های تحلیل پایداری است.

کلمات کلیدی: پایداری چاه، معیارهای شکست، پنجره مناسب وزن گل حفاری، خواص مکانیکی سنگ،

تنش‌های اولیه، فشار فروریختگی

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی a.hashemi@put.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.4018.2829)

مقدمه

امروزه پایداری چاه یکی از مهم‌ترین مسائل در عملیات حفاری محسوب می‌شود. به‌طور کلی، پایداری چاه به معنای جلوگیری از ریزش دیواره چاه و شکست‌های مکانیکی در دیواره چاه در اثر تنش‌های مکانیکی موجود و فعل و انفعالات شیمیایی بین گل حفاری و دیواره چاه تعریف می‌شود. قبل از انجام عملیات حفاری، تنش‌های موجود در زمین از مقاومت سنگ‌ها کمتر بوده و تعادل برقرار است. بعد از عملیات حفاری تنش‌ها تغییر کرده که به آن‌ها تنش‌های القایی می‌گویند که ممکن است مقادیر آن‌ها بیشتر از مقاومت سنگ شده و باعث شکست سنگ‌های دیواره چاه و ناپایداری چاه شوند که برای جلوگیری از آن می‌توان چاه را از سیال حفاری مملو کرد [۱]. عدم توجه به مبحث پایداری، ممکن است موجب ناپایداری و ایجاد مشکلاتی از قبیل ریزش دیواره چاه، گیر لوله‌های حفاری، گشادشدگی یا تنگ شدگی قطر چاه، افزایش هزینه‌های حفاری، توقف تولید و در آخر، ممکن است باعث از دست رفتن چاه شود. از این‌رو، پایداری چاه و تحلیل آن یکی از مباحث مهم عملیات حفاری را شامل می‌شود [۲].

برروی پایداری چاه، پارامترهای مختلفی تأثیرگذار هستند که به دو دسته پارامترهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم می‌شوند. از جمله مهم‌ترین پارامترهای غیرقابل کنترل می‌توان به عواملی چون خواص مکانیکی سنگ‌ها، تنش‌های اولیه در منطقه، فشار منفذی لایه‌های مختلف و غیره اشاره نمود. چگالی و یا فشار هیدرواستاتیک سیال (گل) حفاری، شیب و جهت شیب (آزیموت) چاه مورد نظر، نوع سیال حفاری و خواص شیمیایی آن و غیره از جمله عوامل و پارامترهای قابل کنترل هستند. سیال حفاری و چگالی آن، مهم‌ترین پارامتر مورد نظر جهت کنترل پایداری چاه و جلوگیری از ناپایداری چاه است زیرا در بین پارامترهای قابل کنترل ذکر شده، به‌صورت عملیاتی و اجرایی، وزن

گل حفاری، راحت‌ترین و در دسترس‌ترین پارامتر جهت جلوگیری از ناپایداری چاه محسوب می‌شود [۳]. به‌طور کلی برای بررسی پایداری چاه، ابتدا خواص مکانیکی استاتیک و دینامیک برای اعماق مختلف به‌کمک روابط تجربی و ارائه شده توسط افراد مختلف تعیین می‌شوند. سپس، تنش‌های اولیه تخمین‌زده شده و در نهایت به‌کمک معیارهای شکست مختلف و پارامترهای محاسبه شده، پنجره و محدوده مناسب برای وزن سیال حفاری^۱ تعیین می‌شود [۴]. از جمله مهم‌ترین معیارهای شکست مورد استفاده در صنعت حفاری می‌توان از معیار شکست موهر-کلمب^۲، موگی-کلمب^۳، هوک-براون^۴ و لید اصلاح‌شده^۵ نام برد.

به‌طور کلی شکست‌هایی که ممکن است در دیواره چاه اتفاق بیفتد از دو نوع شکست برشی یا شکست کششی است [۵]. همچنین فشار هیدرواستاتیک یا وزن گل حفاری که توسط معیارهای شکست تخمین‌زده می‌شود دارای یک مقدار کمینه و یک مقدار بیشینه است. حد پایین وزن گل حفاری در پنجره گل برابر با حداقل فشار هیدرواستاتیک مجاز سیال حفاری است تا مانع از شکست برشی سنگ^۶ یا فروریختگی در چاه مذکور شود. همچنین، حد بالای وزن گل حفاری بیان‌گر حداکثر فشار هیدرواستاتیک مجاز گل حفاری است تا مانع از شکست کششی^۷ در چاه مذکور شود [۶].

به‌طور کلی برای صحت‌سنجی و بررسی خواص مکانیکی استاتیک محاسبه شده به‌کمک روابط موجود، برخی تست‌ها مانند آزمایش سه محوره برروی چند نمونه صورت می‌پذیرد. سپس، نتایج حاصله از این تست‌ها با خواص محاسبه شده به‌کمک نمودارهای چاه‌پیمایی و روابط موجود مقایسه می‌شود.

1. Scanning Electron Microscopy (SEM)
2. Safe Mud Weight Window
3. Mohr-Coulomb
4. Mogi-Coulomb
5. Hoek-Brown
6. Modified Lade
7. Shear Failure or Breakout(collapse)

نهایت، پنجره وزن گل حفاری برای چاه مورد نظر تهیه می‌شود. همچنین برای صحت‌سنجی و تأیید پنجره و محدوده تعیین شده، از نمودار قطرسنجی استفاده می‌شود.

ناحیه مورد مطالعه

میدان مورد نظر که در جنوب غربی ایران قرار دارد یکی از میادین نفتی مهم در ایران است. چاه مورد نظر که در این میدان جهت تحلیل پایداری چاه مورد بررسی قرار گرفته است، به صورت چهار حفره مجزا با ابعاد مختلف حفاری شده است. حفره آخر که ۶/۱۲۵ in است از عمق ۳۵۳۷ تا ۴۱۱۲۰ m حفاری شده است. در این عمق ذکر شده، سه سازند حفاری شده است. سازند اول، سازند داریان بوده که عمدتاً سنگ تشکیل‌دهنده این سازند شیل است. لیکن در این سازند مقادیر کمی سنگ آهک نیز وجود دارد. سازند دوم و سوم سازندهای گدوان و فلهلیان هستند. سازند فلهلیان که سازن مخزنی نیز بوده عمدتاً از سنگ آهک تشکیل شده است و همچنین، مقادیر ناچیزی شیل نیز در این سازند موجود است.

مراحل انجام کار

جهت انجام پایداری چاه مذکور، ابتدا باید نمودارهای چاه‌پیمایی تهیه شود. سپس به کمک این نمودارها خواص مکانیکی سنگ که شامل خواص مکانیکی دینامیک و استاتیک است، تعیین شود. سپس فشار منفذی و تنش‌های اولیه موجود در ناحیه تعیین شود و در نهایت به کمک معیارهای مشخص و همچنین تنش‌های القایی که بعد از حفاری چاه در اطراف دهانه چاه وجود دارند، محدوده مناسب برای وزن سیال حفاری تعیین شود.

برای تأیید کردن نتایج تنش‌های اولیه و فشار منفذی تخمین‌زده شده، از برخی تست‌ها مانند RFT^۱ یا LOT^۲ که مستقیماً بر روی خود چاه صورت می‌گیرند، استفاده می‌شود. همچنین برای بررسی صحت و درستی پنجره گل و فشار فروریختگی^۳ و شکستگی^۴ مجاز تخمین‌زده شده به کمک معیارهای شکست برای چاه مورد نظر، از نمودار چاه‌پیمایی قطرسنجی و اندازه مته حفاری به صورت هم‌زمان با هم و یا نمودارهای تصویری تهیه شده برای چاه مذکور استفاده می‌شود [۷]. در زمینه پایداری چاه تحقیقاتی در گذشته صورت پذیرفته است که از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات بردلی^۵ اشاره نمود که اولین کسی بود که پایداری چاه را معرفی کرده و یک مدل خطی سه‌بعدی برای شکست ارائه نمود [۸]. رسولی و همکاران برای تعیین اثر تنش‌های القایی و آشفته در نزدیکی گسل بر روی عملیات حفاری و پایداری چاه، برای یک سازند و حفره در دو چاه از میدانی واقع در شمال استرالیا مدل ژئو مکانیکی از جمله خواص مکانیکی و مقاومت سنگ و تنش‌های اولیه موجود در ناحیه را تعیین و به کمک داده‌های حاصله از تست‌های آزمایشگاهی این نتایج و مدل ساخته شده را کالیبره کردند [۹]. صالحی و همکاران پایداری چاه را به کمک شبیه‌سازی با نرم‌افزارهای FLAC3D^۶ و ABAQUS برای دو چاه در میدان جنوبی ایران تحت شرایط حفاری زیر- تعادلی انجام دادند [۱۰]. همچنین منصوری زاده و همکاران برای چاهی واقع در جنوب غربی ایران پایداری چاه را به کمک سه معیار شکست جهت تعیین فشار بهینه گل حفاری انجام دادند [۱۱].

در این مقاله برای چاهی در میدان نفتی واقع در جنوب غربی ایران از عمق ۴۱۲۰-۳۵۳۷ m، ابتدا به کمک نمودارهای چاه‌پیمایی تهیه شده، خواص مکانیکی و تنش‌های اولیه محاسبه شده و سپس به کمک دو معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب فشار فروریختگی و شکستگی تخمین‌زده می‌شود. در

1. Breakdown or Tensile Failure

2. Repeat Formation Test

3. Collapse or Breakout pressure

4. Breakdown pressure

5. Braddly

6. FaSt Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions

مکانیکی که به کمک نمودارهای چاه‌پیمایی و روابط مربوطه تعیین می‌شوند، خواص دینامیک سنگ هستند. خواص مکانیکی که به کمک انجام تست‌های آزمایشگاهی مانند تست تک محوره یا سه محوره به دست می‌آیند، خواص استاتیک سنگ هستند. ولی به دلیل نبود نمونه مغزه جهت انجام تست‌های آزمایشگاهی، در اکثر مواقع، به کمک روابط تجربی مختلف که به صورت تابعی از خواص دینامیک است، خواص استاتیک محاسبه می‌شوند. همچنین، این خواص تخمین زده شده باید به کمک نتایج چند تست آزمایشگاهی انجام شده بر روی چند نمونه در اعماق مختلف، صحت‌سنجی شوند تا برای انجام مراحل بعدی دارای اعتبار باشند.

در این بخش موارد ذکر شده به تفصیل شرح داده خواهد شد. نمودارهای چاه‌پیمایی برای ناحیه و عمق مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. نمودارهای نشان داده شده در شکل ۱ شامل: نمودار صوتی تراکمی (DTC) برحسب $(\mu\text{s}/\text{ft})$ ، نمودار صوتی برشی (DTS) برحسب $(\mu\text{s}/\text{ft})$ ، نمودار اشعه گاما (GR) برحسب API، نمودار تخلخل نوترون (NPHI) برحسب اعشار و نمودار چگالی (RHOB) برحسب (kg/m^3) خواص مکانیکی سنگ^۱

یکی از اصلی‌ترین بخش‌ها در تحلیل پایداری چاه تعیین خواص مکانیکی برای سنگ‌های محدوده مورد نظر است. خواص مکانیکی به دو دسته دینامیک و استاتیک تقسیم می‌شوند. خواص

عمق حفاری شده (m)		نمودار صوتی فشاری $\mu\text{s}/\text{ft}$ ۴۰ ۲۰۰	نمودار صوتی برشی $\mu\text{s}/\text{ft}$ ۴۰ ۲۰۰	نمودار اشعه گاما API ۱۵۰	نمودار تخلخل نوترون V/V ۰.۵	نمودار چگالی kg/m^3 ۱۸۰۰ ۳۲۰۰
۳۵۰۰						
۳۶۰۰						
۳۶۵۰						
۳۷۰۰						
۳۷۵۰						
۳۸۰۰						
۳۸۵۰						
۳۹۰۰						
۳۹۵۰						
۴۰۰۰						
۴۰۵۰						
۴۱۰۰						

شکل ۱ نمودارهای چاه‌پیمایی و پتروفیزیکی برای حفره ۶/۱۲۵ اینچی چاه مورد نظر در میدان نفتی جنوب غربی ایران

مدول الاستیسیته یا یانگ^۱ سنگ

برای محاسبه مدول یانگ دینامیک از داده‌های نمودار صوتی فشارشی و برشی (زمان گذر در حالت برشی و فشارشی)، نمودار چگالی و رابطه ۱ استفاده می‌شود [۱۲].

$$E_d = 1.82 \times 10^5 \rho_b \times \frac{1}{(DTS)^2} \times (3(DTS)^2 - 4(DTC)^2) \quad (1)$$

که در این رابطه، E_d مدول یانگ دینامیک برحسب GPa و ρ_b چگالی برحسب (kg/m^3) است. برای محاسبه مدول یانگ یا الاستیسیته استاتیک برای چاه مورد نظر در این مقاله از رابطه‌ای که توسط شرکت مناطق نفت خیز جنوب، بعد از انجام تست‌های مختلف برروی سنگ‌های میدان مورد نظر به دست آمده، استفاده می‌شود که در رابطه ۲ قابل مشاهده است، که در این رابطه E_{static} مدول یانگ استاتیک برحسب GPa است.

$$E_{\text{Static}} = 0.7 \times E_d \quad (2)$$

نسبت پواسون^۲

نسبت پواسون به کمک داده‌های نمودار صوتی فشارشی و برشی و رابطه ۳ قابل محاسبه است [۱۲]. بر این اساس:

$$g = \frac{\frac{1}{2} \times (DTS/DTC)^2 - 1}{(DTS/DTC)^2 - 1} \quad (3)$$

که در این رابطه g بیان گر نسبت پواسون دینامیک است که بدون واحد است. همچنین فرض بر این است که نسبت پواسون استاتیک با دینامیک باهم برابر هستند.

مقاومت تراکمی تک محوره

به‌طور کلی، به دلیل نبود مغزه و نمونه‌های کافی جهت انجام تست‌های آزمایشگاهی، مقاومت تراکمی تک محوره از روابط تجربی گوناگون ارائه شده توسط محققان قبلی محاسبه می‌شود. همچنین، داده‌های تخمین زده شده باید به کمک چند تست آزمایشگاهی برروی چند نمونه در اعماق مختلف کالیبره شوند تا دارای اعتبار باشند. در این مقاله برای محاسبه آن از رابطه ۴ که توسط شرکت مناطق نفت خیز جنوب بعد از انجام تست‌های گوناگون

برروی میدان مذکور پیشنهاد شده، استفاده شده است. بنابراین:

$$UCS = 2.27 \times E_{\text{Static}} + 4.7 \quad (4)$$

در این رابطه از مدول یانگ استاتیک استفاده شده است. مقاومت تراکمی تک محوره برحسب (MPa) است. برای مقاومت کششی سنگ^۳ و محاسبه آن، مقدار آن به صورت درصدی از مقاومت تراکمی تک محوره در نظر گرفته شده است و فرض بر این است که به‌طور میانگین برابر با ۰/۱ مقاومت تراکمی تک محوره است.

زاویه اصطکاک داخلی^۴

زاویه اصطکاک داخلی یکی دیگر از خواص مهم مکانیک سنگی است که برای انجام پایداری چاه، تعیین آن ضروری است. این پارامتر براساس معیار شکست موهر- کلمب تعریف می‌شود [۱۳]. به‌طور کلی، این پارامتر از طریق تست‌های آزمایشگاهی و انجام تست سه محوره برروی نمونه‌های مغزه به دست می‌آید. اما به دلیل نبود داده‌های آزمایشگاهی، در اکثر مواقع از روابط تجربی استفاده می‌شود. در این مقاله، از رابطه تجربی پلامب^۵ رابطه ۵ برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی استفاده شده است [۱۳]. براین اساس:

$$\varphi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{\text{shale}}) + 62.1(1 - NPHI - V_{\text{shale}})^2 \quad (5)$$

که در این رابطه NPHI بیان گر تخلخل نوترون، V_{shale} برابر با درصد حجمی شیل است که به کمک نمودار اشعه گاما به دست آورده می‌شود و φ نیز زاویه اصطکاک داخلی برحسب درجه (dega) است.

چسبندگی^۶

چسبندگی نیز یکی دیگر از خواص سنگ است که طبق معیار شکست موهر- کلمب تعیین می‌شود.

1. Young's Modulus
2. Poisson' Ratio
3. Tensile Strength
4. Friction Angle
5. Plumb
6. Cohesion

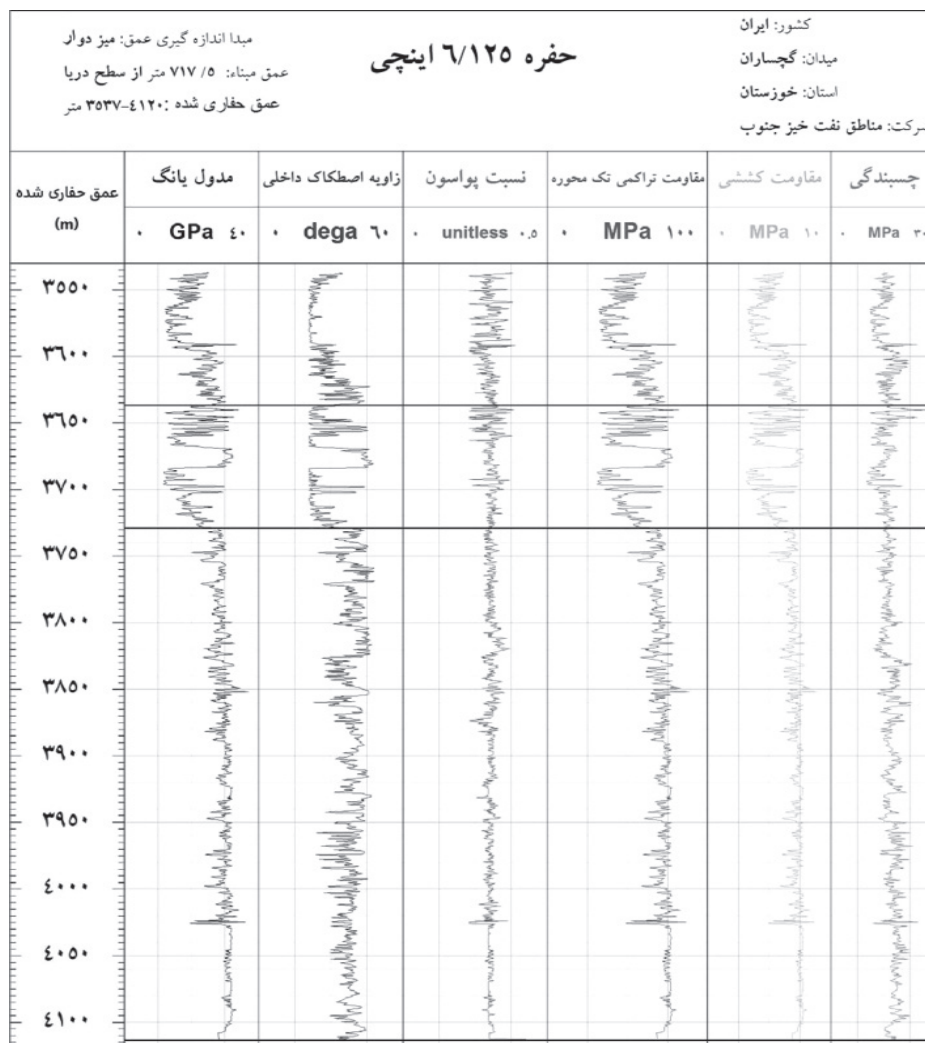
فشار منفذی

فشار منفذی و محاسبه آن یکی از پارامترهای ضروری در مبحث پایداری چاه است و همچنین برای محاسبه تنش‌های اولیه افقی، پارامتری ضروری محسوب می‌شود. برای تخمین این پارامتر، در سازند اولی و دومی به دلیل اینکه عمدتاً شیلی است از رابطه ایتون^۱ استفاده می‌شود که مخصوص سازندهای شیلی است و در رابطه ۷ نشان داده شده است [۱۴]. همچنین برای سازند مخزنی، باتوجه به عمق مبنا و فشار سیال مخزنی در عمق مبنا و همچنین، وزن مخصوص سیال (که همگی توسط شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب تعیین شده‌اند) و رابطه انتگرالی، فشار منفذی محاسبه شده است.

این پارامتر نیز از طریق تست سه محوره قابل اندازه‌گیری است اما به دلیل نبود نمونه مغزه در اکثر مواقع از معادله تعیین می‌شود. رابطه مورد نظر جهت تعیین چسبندگی براساس معیار موهر-کلمب است، که طبق آن چسبندگی تابعی از مقاومت تراکمی تک محوره و زاویه اصطکاک داخلی بوده و در رابطه ۶ نشان داده شده است [۱۲].

$$C = UCS \times (1 - \sin \phi / 2 \cos \phi) \quad (6)$$

در این رابطه C بیان‌گر چسبندگی است و برحسب MPa است. خواص مکانیکی استاتیک محاسبه شده با توجه به روابط بالا در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ خواص مکانیکی استاتیک محاسبه شده برای حفره ۶/۱۲۵ in چاه مورد نظر در میدان نفتی جنوب غربی ایران

تنش‌های اولیه

تنش‌های اولیه که شامل تنش عمودی، تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر است، یکی دیگر از مراحل اصلی برای تحلیل پایداری چاه و محاسبه پنجره مناسب برای وزن گل حفاری است. در ادامه، محاسبه هر یک از این تنش‌ها به تفصیل بیان خواهد شد.

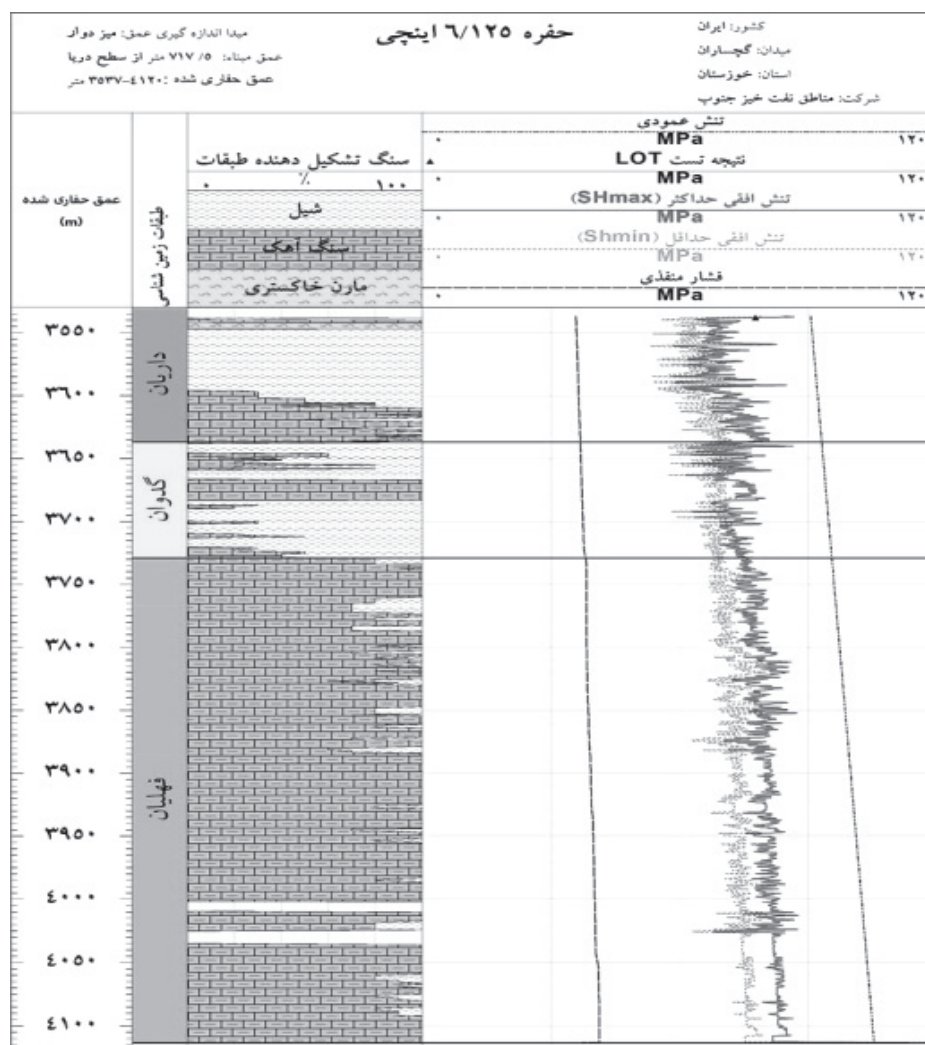
تنش عمودی

برای محاسبه تنش عمودی در این مقاله، فرض براین است که مقدار آن برابر با وزن طبقات و لایه‌های بالاسری در هر عمق دلخواه است.

فشار منفذی محاسبه شده برای سازندهای مورد نظر در شکل ۳ نمایش داده شده است.

$$P_p = S_v - (S_v - P_{pn}) \times \left(\frac{DTC_n}{DTC}\right)^3 \quad (7)$$

در رابطه بالا P_p بیان‌گر فشار منفذی است که واحد آن پاسکال (Pa) است. S_v تنش عمودی است که ناشی از وزن طبقات بالاسری است و برحسب Pa است. P_{pn} و DTC_n نیز به ترتیب فشار منفذی نرمال یا همان فشار منفذی محاسبه شده با چگالی آب سازندی است برحسب Pa که به صورت خطی با افزایش عمق افزایش می‌یابد و زمان گذر صوتی فشارشی نرمال برحسب $\mu\text{s}/\text{ft}$ هستند.



شکل ۳ نمودار تنش‌های اولیه و فشار منفذی برای حفره ۶/۱۲۵ این چاه مورد نظر همراه با سازندهای موجود و سنگ‌های تشکیل دهنده سازندها

کردن تنش اصلی حداقل، از تست LOT استفاده شده است. در این مقاله، تنش اصلی حداقل برابر با تنش افقی حداقل است که مقدار آن با توجه به شکل ۳ با نتیجه حاصل از تست LOT (شکل مثلثی) همخوانی خوبی دارد. از این رو، می توان نتیجه گرفت تنش های محاسبه شده دارای صحت و دقت قابل قبول هستند.

تنش های القایی

تنش های القایی، تنش هایی هستند که بعد از حفاری چاه در اطراف آن به وجود می آیند و مقدار آن ها بیشتر از تنش های اولیه بوده و در صورتی که از مقاومت سنگ تجاوز کنند باعث شکست برشی یا کششی، سنگ دیواره چاه می شوند، از این رو محاسبه و تعیین آن ها ضروری است [۱۵]. تنش های القایی به سه دسته تنش مماسی (در جهت مماس با دیواره چاه عمل می کند)، تنش شعاعی (هم راستای شعاع چاه است) و تنش محوری (در راستای محور چاه و رو به مرکز زمین به صورت قائم است)، تقسیم می شوند. مقدار این تنش ها تابعی از نسبت شعاع چاه به فاصله از دیواره چاه است. هر چه فاصله از مرکز چاه بیشتر شود مقدار این تنش ها کاهش می یابد زیرا نسبت شعاع به فاصله کاهش می یابد. در فواصل خیلی دور این تنش ها دیگر برابر با تنش های اولیه هستند [۱۵]. از این رو طبق نکات ذکر شده، بیشترین مقدار تنش های القایی به دیواره چاه اعمال می شوند و حائز اهمیت هستند. مقدار آن ها در هر نقطه دلخواه در دهانه چاه با توجه به روابط ۱۲، ۱۳ و ۱۴ قابل محاسبه است [۱۶]. براین اساس:

$$\sigma_z = S_v - 2g(S_{H \max} - S_{h \min}) \cos 2\theta \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = (S_{H \max} - S_{h \min}) - 2(S_{H \max} - S_{h \min}) \cos 2\theta - P_w \quad (13)$$

$$\sigma_r = P_w \quad (14)$$

از این رو به کمک چگالی لایه های مختلف (که از نمودار چگالی به دست می آید)، شتاب گرانش زمین و رابطه انتگرالی زیر رابطه ۸ مقدار تنش عمودی محاسبه می شود. جهت این تنش به صورت عمودی و در جهت مرکز زمین است [۱۲].

$$S_v(z) = \int_0^z \rho_b \cdot g \, dz \quad (8)$$

S_v تنش عمودی بر حسب Pa، z و g به ترتیب عمق دلخواه بر حسب متر و شتاب گرانش بر حسب (m/s^2) هستند.

تنش های افقی

محاسبه تنش های افقی به سادگی تنش عمودی نیست. از این رو، روابط متعددی برای محاسبه آن ها ارائه شده است که در این مقاله با توجه به کارهای صورت گرفته در گذشته و نتایج حاصله و پیشنهاد شرکت مناطق نفت خیز جنوب، از روابط مدل کرنش افقی پرو-الاستیک^۱ برای محاسبه مقادیر تنش های افقی استفاده می شود (روابط ۱۰ و ۱۱) [۱۲]. بر این اساس:

(۱۰)

$$S_{h \min} = S_v \left(\frac{g}{1-g} \right) + \left(\frac{1-2g}{1-g} \right) \alpha P_p + \left(\frac{E_{Static}}{1-g} \right) \varepsilon_x + \left(\frac{E_{Static}}{1-g} \right) \varepsilon_y \quad (11)$$

$$S_{H \max} = S_v \left(\frac{g}{1-g} \right) + \left(\frac{1-2g}{1-g} \right) \alpha P_p + \left(\frac{E_{Static}}{1-g} \right) \varepsilon_y + \left(\frac{E_{Static}}{1-g} \right) \varepsilon_x$$

در روابط بالا Sh_{\min} و SH_{\max} به ترتیب تنش افقی حداقل و حداکثر هستند که واحد آن ها Pa است. α ضریب بایوت^۲ نام دارد و در این مقاله مقدار آن ۱ فرض شده است. ε_x و ε_y برابر با کرنش های افقی در راستای x و y هستند.

تنش های اصلی محاسبه شده با توجه به روابط بالا در شکل ۳ بر حسب MPa نشان داده شده اند. برای شناسایی بهتر، فشار منفذی به صورت خط های تیره بلند، تنش افقی حداقل به صورت نقطه-نقطه، تنش افقی حداکثر به صورت خط توپر یا ممتد و تنش عمودی به صورت خط-نقطه-نقطه نمایش داده شده اند. همچنین برای کالیبره

1. Poroelastic Horizontal Strain Model

2. Biot's Factor

افزایش بیش از حد فشار گل ممکن است باعث تجاوز آن از مقاومت کششی سنگ و در نتیجه، شکست کششی در دیواره چاه شود. بنابراین برای تعیین فشار فروریختگی یا به عبارت دیگر، حداقل وزن گل مجاز، بدترین شرایط تنش‌ها به صورت $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$ و برای تعیین فشار شکستگی یا حداکثر وزن مجاز گل حفاری، بدترین شرایط تنش‌ها نسبت به هم به صورت $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$ در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله برای تعیین محدوده مناسب و مجاز برای وزن گل حفاری از دو معیار شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب استفاده شده است.

معیار موهر-کلمب

معیار موهر کلمب یک معیار شکست دوبعدی بوده و در آن تنش اصلی متوسط در نظر گرفته نمی‌شود و این معیار شکست رایج‌ترین معیار مورد استفاده جهت مطالعات پایداری چاه است. رابطه ریاضی این معیار براساس تنش‌های اصلی برابر است با [۱۷]:

$$S_1 - P_p = UCS + q(S_3 - P_p) \quad (23)$$

$$q = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) \quad (24)$$

که S_1 و S_3 تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل است. برای شکست برشی و فروریختگی با توجه به شرایط تنش $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$ و معیار موهر-کلمب، تنش اصلی حداکثر برابر تنش مماسی ($S_1 = \sigma_\theta$) و تنش اصلی حداقل برابر با تنش شعاعی یا همان فشار گل حفاری است ($S_3 = \sigma_r = P_w$). برای حالت شکست کششی، این شرایط کاملاً برعکس بوده و به صورت $S_1 = \sigma_\theta$ و $S_3 = P_w$ است. حال با توجه به نکات ذکر شده و جای‌گذاری روابط ۱۵ و ۱۹ در رابطه ۲۳، برای هر دو حالت فروریختگی و شکستگی، فشار مجاز گل حفاری به دست می‌آید (رابطه ۲۵ و ۲۶).

بر این اساس:

$$P_{w(BO)} = \frac{[A - UCS - P_p(q-1)]}{1+q} \quad (25)$$

$$P_{w(Break)} = \frac{[UCS + P_p(q-1) + qD]}{1+q} \quad (26)$$

که در این روابط $P_{w(BO)}$ و $P_{w(Break)}$ به ترتیب بیان‌گر فشار فروریختگی و فشار شکستگی سازند برحسب Pa

σ_r و σ_z ، σ_θ به ترتیب تنش مماسی، تنش محوری و تنش شعاعی برحسب پاسکال هستند. P_w برابر با فشار هیدرواستاتیک سیال حفاری است که واحد آن پاسکال است و θ نیز برابر با آزمون نقطه مورد نظر، با در نظر گرفتن جهت تنش افقی حداکثر برحسب درجه است. نکته قابل توجه اینست که همان‌طور که از روابط بالا مشخص تنش‌های مماسی و شعاعی به فشار هیدرواستاتیک سیال حفاری بستگی دارند و تابعی از آن هستند درحالی‌که تنش محوری به آن بستگی ندارد. همچنین در دیواره چاه تنش شعاعی با فشار سیال حفاری برابر است.

تعیین پنجره وزن گل حفاری به کمک معیارهای شکست

فرض بر این است که شکست برشی یا فروریختگی زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار تنش مماسی، ماکزیمم مقدار ممکن شود زیرا در این حالت سنگ تحت بیشترین فشارش ممکن است. با توجه به رابطه ۱۳، این امر زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار θ برابر با $\pi/2 + \pi/2$ یا $\pi/2 - \pi/2$ باشد [۴]. همچنین، شکست کششی زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار تنش مماسی کمترین مقدار ممکن شود یعنی زمانی که θ برابر 0 یا π باشد [۴]. از این‌رو، مقدار تنش مماسی در دو حالت ماکزیمم و مینیمم برابر است با:

$$\sigma_\theta^{max} = A - P_w \quad (15)$$

$$A = 3S_{Hmax} - S_{Hmin} \quad (16)$$

$$\sigma_z = B \quad (17)$$

$$B = \sigma_v + 2g(S_{Hmax} - S_{Hmin}) \quad (18)$$

$$\sigma_\theta^{min} = D - P_w \quad (19)$$

$$D = 3S_{Hmin} - S_{Hmax} \quad (20)$$

$$\sigma_z = E \quad (21)$$

$$E = \sigma_v - 2g(S_{Hmax} - S_{Hmin}) \quad (22)$$

با توجه به روابط ۱۵ و ۱۹ هر چه فشار گل حفاری کمتر شود مقدار تنش مماسی افزایش می‌یابد. از این‌رو، اگر فشار گل از حدی کاهش یابد، باعث فروریختگی و شکست برشی می‌شود. با این حال،

نتایج و بحث

حال فشارهای مجاز گل حفاری و نیز، وزن گل‌های محاسبه شده به کمک دو معیار شکست و در نتیجه، پنجره وزن گل حفاری که برحسب پوند بر گالن (Lbm/Gal or ppg) است، در شکل ۴ (شیار یا نمودار چهارم و پنجم) نشان داده شده است. همچنین، برای صحت‌سنجی وزن گل‌های تخمین‌زده شده از نمودار قطرسنجی^۲ و اندازه مته^۳ برحسب (in) استفاده شده است که در شکل ۴ (آخرین یا ششمین نمودار یا شیار) قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۴، شش ناحیه قابل مشاهده و حائز اهمیت است که عبارتند از:

(۱) فشار کیک^۴ (ناحیه خاکستری رنگ و نقطه‌ای شکل) بیان‌گر همان فشار منفذی محاسبه شده است.

(۲) شکست برشی^۵ (ناحیه زرد رنگ که به صورت خط توپر نشان داده شده است) بیان‌گر همان حداقل وزن مجاز برای گل حفاری جهت جلوگیری از فروریختگی و شکست برشی در چاه است (P_{w-BO}).
(۳) فشار هرزروی گل^۶ که مقدار آن برابر با تنش اصلی حداقل است و به صورت ناحیه سبز رنگ با اشکال لوزی نشان داده شده است.

(۴) کسپختگی کششی^۷ (ناحیه سورمه‌ای رنگ که به صورت نقطه-خط-خط نشان داده شده است) نیز بیان‌گر حداکثر وزن گل مجاز جهت جلوگیری از شکست کششی است ($P_{w-Break}$).

(۵) نمودار مشکی رنگ که به صورت خط تیره کوتاه است، برابر با وزن های واقعی گل حفاری^۸ است که در عملیات حفاری برای حفاری چاه مذکور در این حفره استفاده شده است که برحسب Lbm/Gal or ppg است.

هستند که توسط معیار موهر-کلمب پیش‌بینی می‌شوند. در نتیجه، حد بالا و پایین وزن گل حفاری یا به عبارت دیگر پنجره گل حفاری، با توجه به معیار موهر-کلمب تعیین می‌شود.

معیار موگی-کلمب

موگی-کلمب یک معیار شکست سه‌بعدی است که در آن اثر تنش اصلی متوسط نیز لحاظ می‌شود. این معیار شکست یک رابطه خطی بین تنش هشت سطحی^۱ و تنش متوسط مؤثر است [۱۸]. بنابراین:

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{mean} \quad (27)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(S_1 - S_2)^2 + (S_3 - S_1)^2 + (S_2 - S_3)^2} \quad (28)$$

$$\sigma_{mean} = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3} \quad (29)$$

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3}C \cos \varphi \quad (30)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (31)$$

که S_2 بیان‌گر تنش اصلی متوسط است. حال به همان صورت که برای معیار موهر-کلمب انجام گرفت، برای معیار موگی-کلمب نیز با جای‌گذاری مناسب تنش‌ها در حالت بدترین شرایط تنشی نسبت به هم ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ و $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)، در هر دو حالت شکست کششی و شکست برشی، فشار مجاز گل حفاری برای هر دو حالت فروریختگی و شکستگی به دست می‌آید. براین اساس:

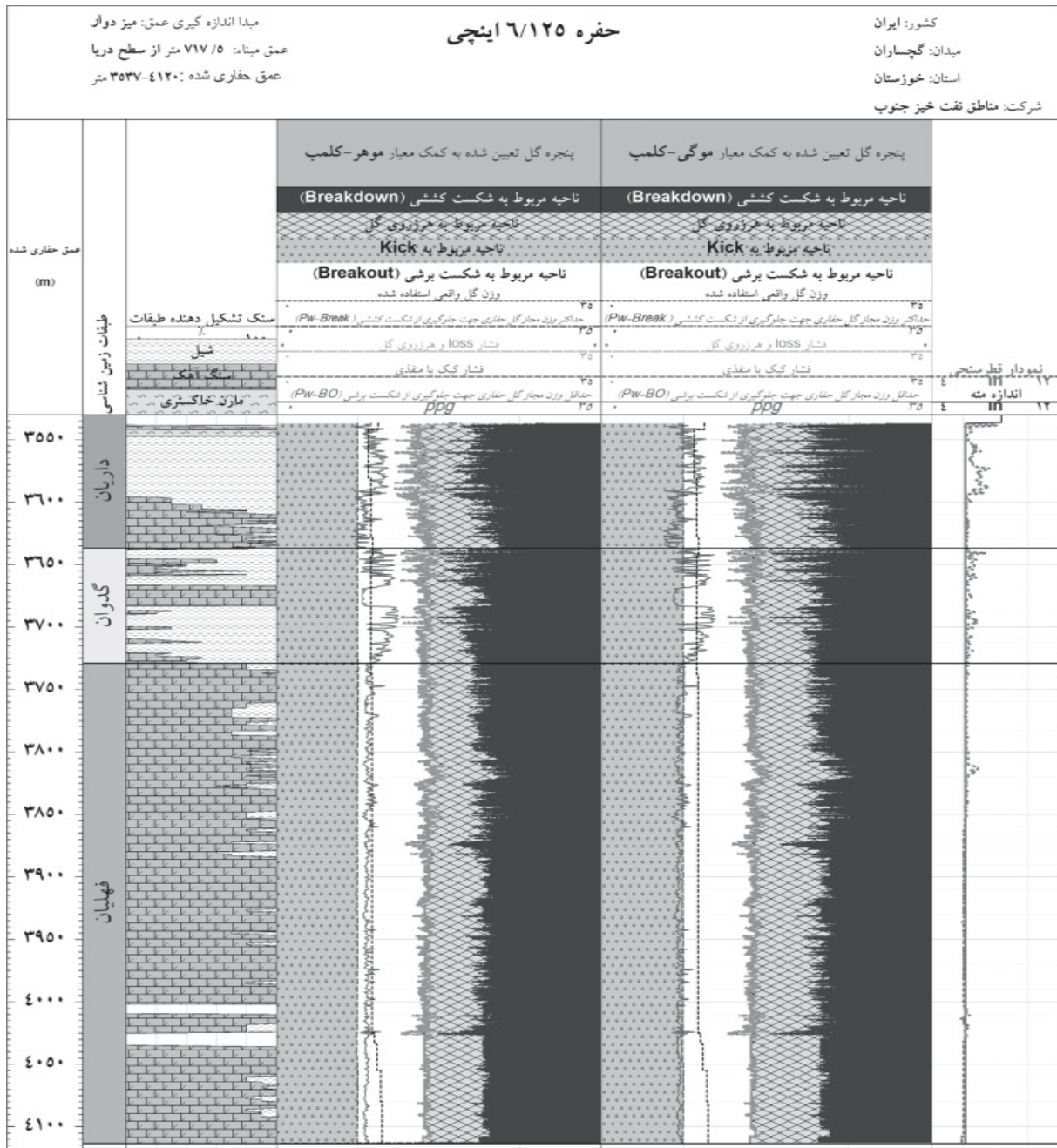
$$P_{w(BO)} = \frac{A}{2} - \frac{1}{6}\sqrt{12[a' + b'(A - 2P_p)]^2 - 3(A - 2B)^2} \quad (32)$$

$$a' = C \cos \varphi \text{ \& } b' = \sin \varphi \quad (33)$$

$$P_{w(Break)} = \frac{A}{2} + \frac{1}{6}\sqrt{12[a' + b'(D - 2P_p)]^2 - 3(D - 2E)^2} \quad (34)$$

که در این روابط $P_{w(Break)}$ و $P_{w(BO)}$ به ترتیب بیان‌گر فشار فروریختگی و فشار شکستگی سازند برحسب Pa هستند که توسط معیار موگی-کلمب تخمین‌زده می‌شوند. در نتیجه، حد بالا و پایین وزن گل حفاری یا به عبارت دیگر، پنجره گل حفاری با توجه به معیار موگی-کلمب تعیین می‌شود.

1. Octahedral Stress
2. Caliper
3. Bit Size
4. Kick Pressure
5. Shear Failure
6. Loss Pressure
7. Breakdown
8. Actual Mud Weight



شکل ۴ پنجره وزن گل حفاری تخمین زده شده برای حفره ۶/۱۲۵ این چاه مورد نظر به کمک معیارهای شکست موهر-کلمب و موگی-کلمب همراه با نمودار قطرسنجی و اندازه مته

در چاه مذکور است. درحالی که فشار فروریختگی تخمین زده شده توسط معیار شکست موهر-کلمب از فشار فروریختگی تخمین زده شده توسط معیار موگی-کلمب بیشتر است که این امر به دلیل محافظه کارانه بودن این معیار است.

ناحیه سفید رنگ در وسط نمودار که بیان گر محدوده ایمن وزن گل حفاری^۱ به منظور جلوگیری از ایجاد شکست برشی یا کششی است. با توجه به پنجره وزن گل تخمین زده شده توسط معیار موگی-کلمب (نمودار پنجم در شکل ۴)، فشار فروریختگی پیش بینی شده توسط این معیار در اکثر اعماق، کمتر از وزن گل واقعی استفاده شده

1. Safe Mud Wight Window

میدان نفتی واقع در جنوب غربی ایران انجام شد. در ابتدا، خواص مکانیکی استاتیک سنگ به کمک نمودارهای چاه‌پیمایی تهیه شده و روابط ارائه شده توسط شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب- بعد از انجام تست‌های سه محوره و تک محوره مختلف بر روی نمونه مغزه‌های مختلف از میدان مذکور- محاسبه شد. سپس فشار منفذی برای چاه مذکور و همچنین تنش‌های اولیه شامل تنش عمودی و تنش‌های افقی حداکثر و حداقل تخمین و تعیین شد و نتایج حاصل شده به کمک تست LOT صحت‌سنجی شد. در آخر، حداقل و حداکثر وزن گل مجاز (فشار فروریختگی و شکستگی) به کمک دو معیار شکست ذکر شده تخمین و در نتیجه، پنجره وزن گل حفاری مناسب و ایمن برای چاه مذکور پیش‌بینی شد. فشار فروریختگی یا همان حداقل وزن گل مجاز برای گل حفاری تخمین زده شده توسط معیار موهر- کلمب به دلیل محافظه کارانه تر بودن و عدم در نظر گرفتن تنش اصلی متوسط، بیشتر تخمین زده و برآورد شده است. در حالی که وزن گل تخمین زده شده توسط معیار موگی- کلمب به واقعیت نزدیک‌تر است. برای صحت‌سنجی پنجره وزن گل تخمین زده شده از نمودارهای قطرسنجی و اندازه مته استفاده شده و شکست برشی یا فروریختگی پیش‌بینی شده توسط معیار شکست موگی- کلمب هم‌خوانی خوبی با شکست برشی اتفاق افتاده در چاه مذکور براساس نمودار قطرسنجی دارد. بنابراین، برای حفره ۶/۱۲۵ in چاه مذکور، جهت جلوگیری از ناپایداری چاه و تعیین پنجره وزن گل حفاری، معیار شکست موگی- کلمب برای چاه مذکور می‌شود.

همچنین در معیار موهر- کلمب تنش اصلی متوسط در نظر گرفته نمی‌شود، ولی در معیار موگی- کلمب به دلیل لحاظ کردن اثر تنش اصلی متوسط، نتایج حاصله به واقعیت نزدیک‌تر بوده و دارای انعطاف‌پذیری بیشتری است. همچنین در معیار موهر- کلمب و معیار موگی- کلمب در اعماق ۳۵۳۷ تا ۳۶۰۰ m، ۳۶۴۰-۳۶۶۵ m و ۳۶۸۵-۳۷۳۰ m فشار تخمین زده شده برای فروریختگی یا به عبارت دیگر حدپایین مجاز برای وزن گل حفاری، از وزن گل واقعی استفاده شده در چاه بیشتر است. به علاوه، با توجه به نمودار قطرسنجی و اندازه مته و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، در اعماق ذکر شده در چاه مذکور شکست برشی و فروریختگی اتفاق افتاده است. از این رو فشار فروریختگی یا حدپایین وزن گل حفاری پیش‌بینی شده توسط معیار موگی- کلمب، با ناحیه شکست برشی یا فروریختگی واقعی اتفاق افتاده در داخل چاه هم‌خوانی خوبی دارد. برای معیار موهر- کلمب نیز تا حدودی این مورد صداقت دارد لیکن به دقت معیار موگی- کلمب ناست زیرا به صورت محافظه کارانه عمل کرده و وزن گل حفاری را بیشتر تخمین زده و زیاد برآورد می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت برای چاه مذکور موگی- کلمب، معیار شکست مناسب‌تری جهت تخمین و تعیین پنجره وزن گل حفاری مناسب است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تحلیل پایداری و تعیین پنجره وزن گل مناسب به کمک دو معیار شکست موهر- کلمب و موگی- کلمب برای حفره ۶/۱۲۵ in چاهی در

مراجع

- [1]. Zoback M. D., "Reservoir geomechanics," Cambridge University Press; 2010.
- [2]. Das B. and Chatterjee R. "Wellbore stability analysis and prediction of minimum mud weight for few wells in Krishna-Godavari Basin, India," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 93, pp. 30-37, 2017
- [3]. Xu G., "Wellbore stability in geomechanics," (Doctoral dissertation, University of Nottingham), 2007.
- [4]. Maleki S., Gholami R., Rasouli V., Moradzadeh A., Riabi R. G. and Sadaghzadeh F., "Comparison of different failure

- criteria in prediction of safe mud weigh window in drilling practice,* Earth-Science Reviews, 136, pp.36-58., 2014.
- [5]. Liz-Losada R. J. and Alejano L. R., "New safe mud weight window representations to prevent wellbore instability," In IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology. Society of Petroleum Engineers, January 2000.
- [6]. Gholami R., Moradzadeh A., Rasouli V. and Hanachi J. "Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations," Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 6, Issue 1, pp.13-25, 2014.
- [7]. Rahimi R., "The effect of using different rock failure criteria in wellbore stability analysis," PhD thesis, Missouri University of Science and Technology. United States, 2014.
- [8]. Bradley W. B., "Failure of inclined boreholes," Journal of Energy Resources Technology, Vol. 101, Issue 4, pp. 232-239, 1979.
- [9]. Rasouli V., Pallikathakathil Z. J. and Mawuli E., "The influence of perturbed stresses near faults on drilling strategy: a case study in Blacktip field, North Australia," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 76, Issue 1-2, pp.37-50, 2011.
- [10]. Salehi S., Hareland G. and Nygaard R., "Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 72, Issue 3-4, pp. 229-235, 2010.
- [11]. Mansourizadeh M., Jamshidian M., Bazargan P. and Mohammadzadeh O., "Wellbore stability analysis and breakout pressure prediction in vertical and deviated boreholes using failure criteria—A case study," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 145, pp. 482-492, 2016.
- [12]. Fjar E., Holt R. M., Raaen A. M., Risnes R. and Horsrud P., Petroleum related rock mechanics. Vol. 53. Elsevier Science, Published Date: 4th January 2008.
- [13]. Senseny P. E. and Pfeifle T. W., "Fracture toughness of sandstones and shales," In The 25th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, 1984.
- [14]. Eaton B. A., "Graphical method predicts geopressures worldwide," World Oil;(United States), Vol. 183, No. 1, 1976.
- [15]. Kirsch C., "Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre," Zeitschrift des vereines Deutscher Ingenieure, Vol. 42, pp.797-807,1898.
- [16]. Aadnoy B. and Looyeh R., "Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design," Gulf Professional Publishing, 2011.
- [17]. Mohr O., "Welche umstände bedingen die elastizitätsgrenze und den bruch eines materials," Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, Vol. 46, Issue 1524-1530, pp. 1572-1577, 1900.
- [18]. Al-Ajmi A. M. and Zimmerman R. W., "Relation between the mogi and the coulomb failure criteria," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 42, Issue 3, pp. 431-439, 2005.