



ساخت مدل ژئو مکانیکی برای یک عدد چاه در میدان جنوب غربی ایران

میثم مطهری، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، meysam.motahari92@gmail.com

عبدالنبی هاشمی، دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه، nabi.hashemi@gmail.com^{۲*}

عبدالله ملقب، کارشناس ژئومکانیک، ab.molaghab@gmail.com^۳

چکیده

پایداری چاه یکی از مسائل حائز اهمیت جهت انجام عملیات حفاری چه در صنعت نفت و چه در صنعت معدن می‌باشد. زیرا در صورت عدم رعایت این موضوع و ایجاد مشکلاتی از قبیل ریزش دیواره چاه، گیر لوله های حفاری در چاه و یا لزوم حفر چاهی جدید داخل چاه حفاری شده، هزینه‌های وارده بر صنعت می‌تواند بسیار گزاف بوده و صرفه اقتصادی نداشته باشد. در مورد تحلیل پایداری چاه، ابتدا برای چاه و ناحیه مورد نظر باید مدل ژئو مکانیکی آن ساخته و تعیین شود. منظور از ساخت مدل ژئو مکانیکی، محاسبه و تعیین خواص مکانیکی سنگ، تخمین تنش‌های اولیه و تخمین فشار منفذی به کمک نمودارهای چاه پیمایی صوتی، تخلخل نوترون، چگالی و اشعه گاما می‌باشد. در این تحقیق برای چاهی در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران و برای چهار حفره یا بخش آن مدل ژئو مکانیکی ساخته می‌شود. همچنین از داده های اندازه‌گیری مستقیم و تست‌هایی مانند RFT و LOT برای صحت سنجی محاسبات انجام شده و تنش‌های اولیه و فشار منفذی تخمین زده شده استفاده می‌شود. از آنجایی که مقادیر محاسبه شده برای تنش‌های اولیه و فشار منفذی با تست‌ها و اندازه گیری‌های مستقیم صورت گرفته دارای همخوانی خوبی می‌باشند، از این رو می‌توان نتیجه گرفت مدل ساخته شده دارای دقت مناسبی بوده و مورد تایید می‌باشد. بنابراین می‌توان از آن برای تحلیل‌های پایداری آینده استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: مدل ژئو مکانیکی، خواص مکانیکی سنگ، تنش‌های اولیه، فشار منفذی، نمودارهای چاه پیمایی

^۱ گروه مهندسی نفت، دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران ۰۹۱۳۳۲۳۹۴۹۹

^۲ * گروه مهندسی نفت، دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران - مسئول مکاتبات

^۳ شرکت مناطق نفت خیز جنوب، اداره زمین شناسی، اهواز، ایران ۰۹۱۶۳۲۱۳۱۷۰



۱- مقدمه

پایداری چاه یکی از بخش های مهم در عملیات حفاری محسوب می شود. به طور کلی، تعریف پایداری چاه عبارت است از جلوگیری از شکستگی یا تغییر شکل های پلاستیک و دائمی در سنگ های دیواره و نواحی اطراف چاه که به دلیل وجود تنش های مکانیکی یا برهمکنش های شیمیایی می باشد [۱]. عدم توجه به پایداری چاه و به وجود آمدن ناپایداری در چاه ها ممکن است باعث بروز مشکلاتی از قبیل ریزش دیواره چاه، گیر لوله های حفاری، side track و غیره شود و همچنین بر روی پایداری چاه پارامترهای متفاوتی تاثیر گذار می باشد که خود این پارامترها به دو دسته کلی پارامترهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم میشوند [۲]. یکی از اصلی ترین بخش ها در پایداری چاه های نفتی تعیین مدل ژئو مکانیکی^۱ (MEM) می باشد. منظور از مدل ژئو مکانیکی همان تعیین خواص مکانیکی استاتیک و دینامیک و مقاومت سنگ به کمک نمودارهای چاه پیمایی موجود و همچنین تعیین تنش های اولیه در ناحیه و عمق های مختلف چاه مورد نظر می باشد [۳]. از این رو قبل از انجام هرگونه تحلیل پایداری، تعیین پنجره مناسب برای گل حفاری یا تعیین شیب و آزمایشات مناسب برای حفاری چاه، ابتدا باید مدل ژئو مکانیکی برای چاه مورد نظر تعیین شود. در سال ۲۰۰۶ سایر و پاستر^۲ برای یک حفره در چاهی در آب های عمیق خلیج مکزیک مدل ژئو مکانیکی را جهت تعیین مقاومت سنگ به کمک نمودارهای صوتی پیشرفته و تکنیک های تفسیر آن ها تعیین کردند [۴]. رسولی و همکاران در سال ۲۰۱۱ برای تعیین اثر تنش های 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 تنش های اولیه موجود در ناحیه را تعیین و به کمک داده های حاصله از تست های آزمایشگاهی این نتایج و مدل ساخته شده را کالیبره کردند [۵]. داس و کترجی^۳ در سال ۲۰۱۷ برای بررسی پایداری چاه و تعیین پنجره مناسب برای وزن گل حفاری به کمک سه معیار شکست در ۵ چاه از میدانی در هند ابتدا مدل ژئو مکانیکی را ساخته و سپس این مدل را در هر یک از چاه ها به کمک نتایج آزمایشگاهی کالیبره کردند [۶].

در این تحقیق، به کمک نمودارها و داده های موجود برای تمام حفرات یک چاه از میدانی در جنوب غربی ایران مدل ژئو مکانیکی از عمق ۹۸۵ تا ۴۱۱۵ متری شامل حفرات ۱۷/۵، ۱۲/۲۵، ۸/۳۷۵ و ۶/۱۲۵ اینچی تعیین شده است. همچنین نتایج حاصله به کمک داده ها و تست های انجام شده یا روابط ارائه شده توسط شرکت ملی نفت جنوب ایران کالیبره شده اند.

۲- چاه مورد نظر

چاه مورد نظر جهت بررسی و ساخت مدل ژئو مکانیکی از چهار حفره تشکیل شده است که عمق و توضیح زمین شناسی هر یک از این چاه های مورد نظر عبارتست از:

- حفره اول ۱۷/۵ اینچی بوده از عمق ۱۴۹۵-۹۸۵ متری که در داخل سازند گچساران حفاری شده است. عمده سنگ های در برگیرنده این حفره و سازند انریدریت، نمک، مارن و مقداری کمی هم شیل می باشد.
- حفره دوم دارای ابعاد ۱۲/۲۵ اینچی بوده از عمق ۲۱۵۷-۱۵۶۵ متری و در داخل دو سازند حفاری شده است. سازند اول، سازند مخزنی و آسماری بوده و از نظر زمین شناسی عمدتاً از سنگ آهک تشکیل شده است و سازند دوم سازند پابده و گورپی نام دارد که عمدتاً از شیل تشکیل شده است.

¹ Mechanical Earth Model

² Sayers and Pastor

³ Das and Chatterjee



۳) حفره سوم دارای ابعاد ۸/۳۸۵ اینچی از عمق ۳۳۹۷-۳۵۰۶ متری است. در این حفره چهار سازند حفاری شده است که سازند اولی و دومی عمدتاً از سنگ آهک تشکیل شده است و بنگستان نام دارد که خود به دو بخش ایلام و سروک تقسیم می‌شود. و سازند سوم و چهارمی که کژدمی و داریان بالایی نام دارد، بخش اعظم آن‌ها شیل همراه با مقادیر کمی مارن می‌باشد.

۴) حفره چهارم دارای ابعاد ۶/۱۲۵ اینچی از عمق ۳۵۳۷-۴۱۲۰ متری می‌باشد و دو سازند در این حفره حفاری شده است. سازند اول داریان پایینی بوده و عمدتاً شیلی می‌باشد و همچنین دارای مقادیری سنگ آهک نیز می‌باشد. در حالی که سازند دومی از سنگ آهک به مقادیر ناچیزی شیل تشکیل شده است که فلهیلان نام دارد.

۳ - ساخت مدل ژئو مکانیکی یک بعدی

اولین قدم برای ساخت مدل ژئو مکانیکی (MEM) گردآوری نمودارهای چاه پیمایی (Petrophysical Logs) برای چاه مورد نظر می‌باشد. نمودارهای مورد نیاز عبارتند از: نمودار صوتی فشارشی و برشی ((compression and shear slowness (DTC,DTS)), نمودار چگالی (RHOB)، نمودار تخلخل نوترون ((neutron porosity (NPHI)) و نمودار اشعه گاما (GR). این نمودارهای ذکر شده، همگی به عنوان داده های ورودی جهت تعیین مدل ژئو مکانیکی هستند که در شکل ۱ برای چاه مورد نظر در تمامی حفره ها نشان داده شده‌اند. مراحل مورد نیاز جهت تعیین و ساخت مدل ژئو مکانیکی عبارتست از:

۳-۱- تعیین خواص مکانیکی

خواص مکانیکی به دسته دینامیک و استاتیک تقسیم می‌شوند. در ابتدا خواص دینامیک به کمک روابط موجود و همچنین داده‌ها و نمودارهای چاه پیمایی ذکر شده تعیین و محاسبه شوند. سپس به کمک برخی روابط تجربی خواص استاتیک به کمک خواص دینامیک محاسبه شده، به دست آورده می‌شوند. در نهایت جهت اطمینان از صحت و درستی خواص الاستیک محاسبه شده، باید نتایج مذکور با داده‌ها و نتایج تست‌های آزمایشگاهی مانند تست سه محوره همخوانی داشته و کالیبره شوند. حال محاسبه یکایک خواص مکانیکی برای چاه مورد نظر در اعماق مختلف به شرح زیر می‌باشد.

۳-۱-۱- مدول یانگ^۱ یا خاصیت الاستیسیته سنگ

برای محاسبه مدول یانگ دینامیک از داده های نمودار صوتی فشارشی و برشی (زمان گذر در حالت برشی و فشارشی)، نمودار چگالی و رابطه ۱ استفاده می‌شود [۷].

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

که در این رابطه E_d مدول یانگ دینامیک می‌باشد. برای محاسبه مدول یانگ یا الاستیسیته استاتیک برای چاه مورد نظر در این مقاله از رابطه‌ای که توسط شرکت ملی نفت جنوب، بعد از انجام تست های مختلف بر روی سنگ های میدان مورد نظر به دست آمده، استفاده می‌شود که در رابطه ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

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

که در این رابطه E_{static} مدول یانگ استاتیک می‌باشد.

۳-۱-۲- نسبت پواسون^۲

در محاسبه نسبت پواسون دینامیک نیز باتوجه به رابطه ۳ از نمودارهای صوتی فشارشی و برشی استفاده می‌شود که برابر است با [۷]:

¹ Young's Modulus

² Poisson Ratio



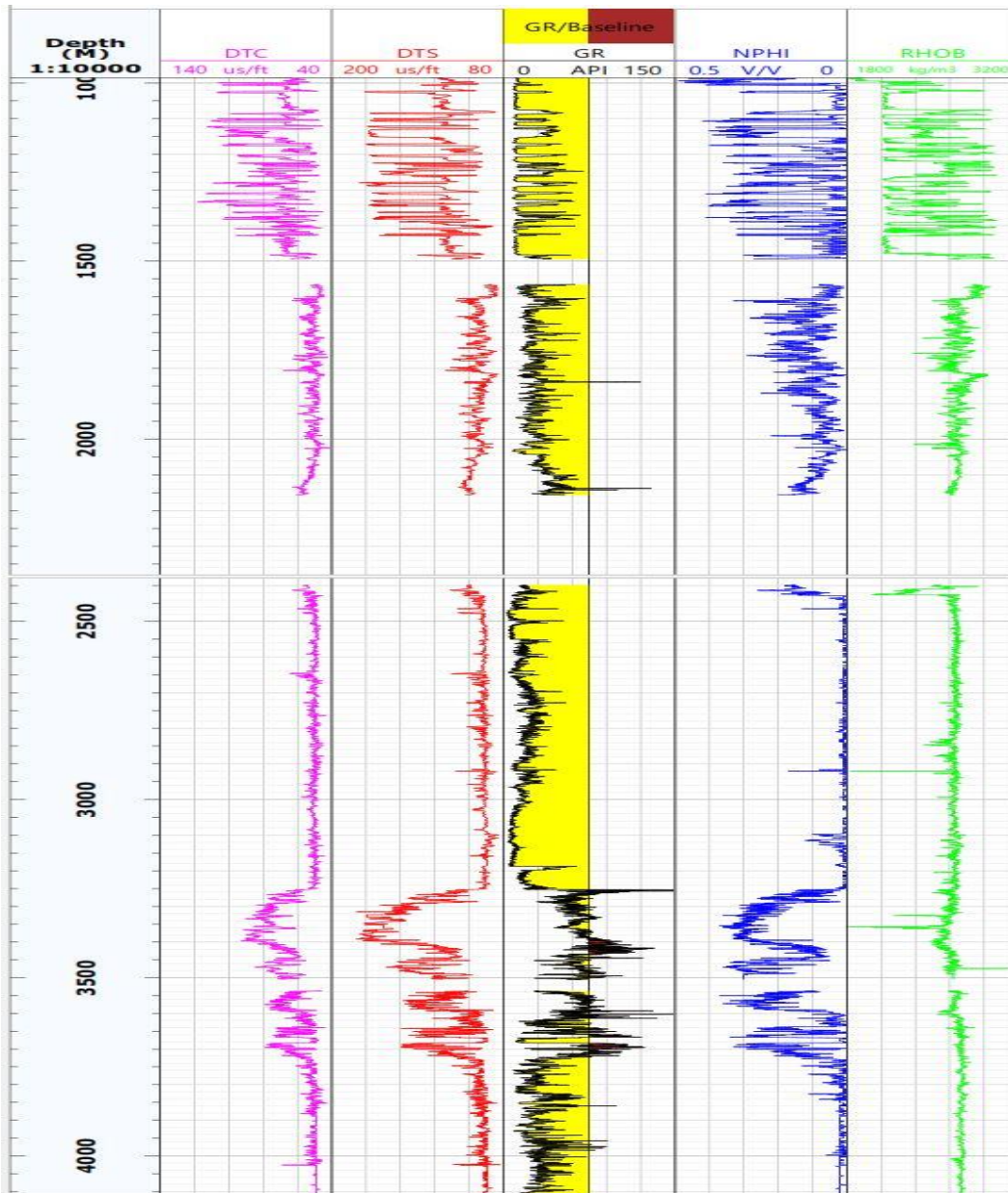
سومین کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالورژی و معدن ایران ۴ دی ۱۳۹۸ - دانشگاه شهید چمران اهواز



$$\vartheta = \frac{\frac{1}{2}(DTS/DTC)^2 - 1}{(DTS/DTC)^2 - 1}$$

(۳)

که در این رابطه ϑ بیانگر نسبت پواسون دینامیک است. همچنین در این مقاله فرض بر این است که نسبت پواسون استاتیک با دینامیک باهم برابر می‌باشند.



شکل ۱ نمودارهای چاه پیمایی و پتروفیزیکال برای چاه مورد نظر در میدان نفتی جنوب غربی ایران. DTC، DTS، GR، NPFI و RHOB به ترتیب بیانگر نمودار صوتی فشاشی (us/ft)، صوتی برشی (us/ft)، اشعه گاما بر حسب API، تخلخل نوترون بر حسب اعشار و چگالی سازند ها بر حسب Kg/m^3 می‌باشد.



۳-۱-۳- مقاومت تراکمی تک محوره

یکی دیگر از پارامترهای مهم در تعیین خواص مکانیکی، مقاومت تراکمی تک محوره (UCS) است. مقاومت تراکمی تک محوره برابر با حداکثر تنش در نمودار تنش- کرنش حاصله از تست تک محوره یا سه محوره می‌باشد. به طور 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. در این مقاله برای محاسبه آن از رابطه شماره ۴ که توسط شرکت ملی نفت جنوب بعد از انجام تست های گوناگون بر روی میدان مذکور پیشنهاد شده، استفاده شده است. بنابراین:

$$UCS = 2.27E_{static} + 4.7 \quad (۴)$$

در این رابطه از مدول یانگ استاتیک استفاده شده است. همچنین برای مقاومت کششی سنگ و محاسبه آن، مقدار آن به صورت درصدی از مقاومت تراکمی تک محوره در نظر گرفته شده است و فرض بر این است که به طور میانگین برابر با ۰/۱ مقاومت تراکمی تک محوره می‌باشد.

۳-۱-۴- زاویه اصطحاک داخلی (Friction Angle)

زاویه اصطحاک داخلی یکی دیگر از پارامترهای مهم برای تعیین مدل ژئو مکانیکی می‌باشد و این پارامتر بر اساس معیار شکست موه‌ر-کلمب تعریف می‌شود. به طور کلی این پارامتر از طریق آزمایشگاهی و انجام تست سه محوره بر روی نمونه‌های مغزه به دست می‌آید. لیکن، به دلیل نبود داده های آزمایشگاهی، در اکثر مواقع از روابط تجربی استفاده می‌شود. در این مقاله از رابطه تجربی پلامب (۵) برای تعیین زاویه اصطحاک داخلی استفاده شده است [۸]. براین اساس:

$$\varphi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1(1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (۵)$$

که در این رابطه NPHI بیانگر تخلخل نوترون و V_{shale} برابر با درصد حجمی شیل می‌باشد که به کمک نمودار اشعه گاما به دست آورده می‌شود.

۳-۲- فشار منفذی (Pore Pressure)

فشار منفذی یکی از بخش های اصلی در تعیین مدل ژئو مکانیکی می‌باشد و همچنین برای محاسبه تنش های افقی پارامتری ضروری محسوب می‌شود. برای تخمین فشار منفذی برای لایه های آهکی و مخزنی، از عمق مبنا و همچنین فشار سیال مربوطه در عمق مبنا و رابطه انتگرالی استفاده شده است. برای لایه های شیلی از رابطه معروف ایتون (رابطه ۶) استفاده می‌شود که برابر است با [۹]:

$$P_p = S_v - (S_v - P_{pn}) \left(\frac{DTCn}{DTC} \right)^3 \quad (۶)$$

که در این رابطه P_p برابر فشار منفذی، P_{pn} بیانگر فشار منفذی نرمال یا همان فشار منفذی محاسبه شده با چگالی آب سازندی است که به صورت خطی با افزایش عمق افزایش می‌یابد.

همچنین برای لایه‌های نمکی و انیدریتی فشار منفذی به صورت کسری از فشار گل استفاده شده در آن عمق تخمین زده شده است. و در نهایت برای صحت سنجی فشار منفذی های تخمین زده شده از نتایج تست RFT استفاده شده است.

۳-۳- تنش های اولیه

آخرین مرحله برای تعیین مدل ژئو مکانیکی، محاسبه تنش های اولیه است که عبارتست از تنش عمودی، تنش افقی حداکثر و تنش افقی حداقل. حال نحوه محاسبه این تنش ها به شرح زیر می‌باشد.

¹ Plumb

² Eaton

³ Repeat Formation Test



۳-۳-۱- تنش عمودی (Vertical Stress)

برای محاسبه تنش عمودی در این مقاله، فرض بر این است که مقدار آن برابر با وزن طبقات و لایه های بالاسری در هر عمق دلخواه می باشد. 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 ۶) مقدار تنش عمودی محاسبه می شود. همچنین جهت این تنش به صورت عمودی و در جهت مرکز زمین است [۷].

$$S_v(z) = \int_0^z \rho_b \cdot g \cdot dz \quad (7)$$

۳-۳-۲- تنش های افقی

محاسبه تنش های افقی به سادگی تنش عمودی نمی باشد. از این رو روابط متعددی برای محاسبه آن ها ارائه شده است که در این مقاله باتوجه به کارهای صورت گرفته در گذشته و نتایج حاصله، از روابط مدل کرنش افقی پرو-الاستیک^۱ برای محاسبه مقادیر تنش های افقی استفاده می شود [۷]. بر این اساس:

$$S_{Hmin} = S_v(\vartheta/1 - \vartheta) + (1 - 2\vartheta/1 - \vartheta)\alpha P_p + (E_{static}/1 - \vartheta)\varepsilon_x + (E_{static}\vartheta/1 - \vartheta)\varepsilon_y \quad (8)$$

$$S_{Hmax} = S_v(\vartheta/1 - \vartheta) + (1 - 2\vartheta/1 - \vartheta)\alpha P_p + (E_{static}/1 - \vartheta)\varepsilon_y + (E_{static}\vartheta/1 - \vartheta)\varepsilon_x \quad (9)$$

که در این روابط S_{Hmax} ، S_{Hmin} به ترتیب بیانگر تنش های افقی حداقل و حداکثر می باشند. همچنین برای کالیبره کردن محاسبات انجام شده از نتایج آزمایش LOT^۲ استفاده شده است.

۴- مدل ژئو مکانیکی ساخته شده و تحلیل آن

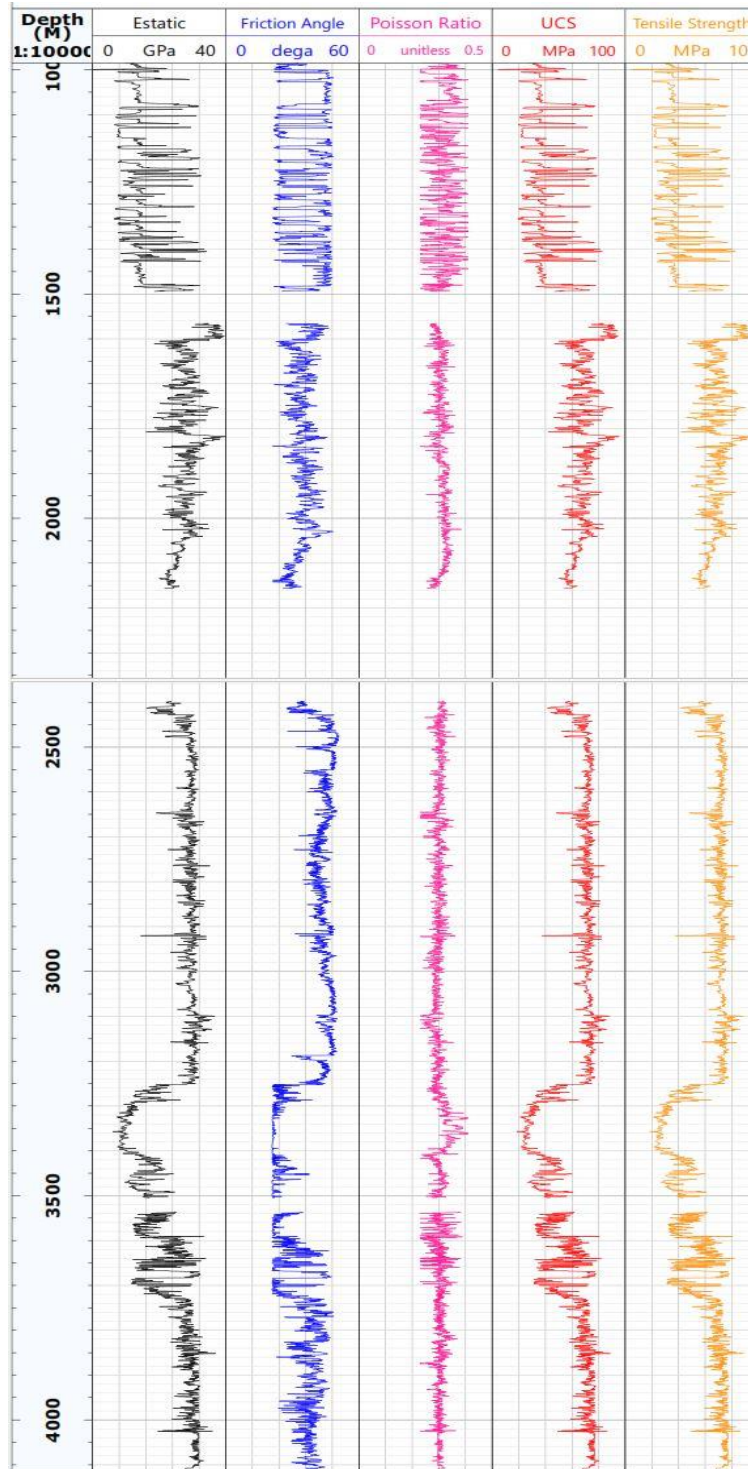
خواص مکانیکی باتوجه به روابط ذکر شده در بالا همگی محاسبه شده و نمودار حاصله در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این مقاله همانطور که ذکر شد از روابطی که توسط خود شرکت ملی نفت بعد از انجام آزمایشات متعدد بر روی نمونه مغزه های مختلف ارائه شده، استفاده شده است. از این رو به دلیل آزمایش های صورت گرفته در گذشته، آزمایش سه محوره جدیدی بر روی نمونه ای انجام نشده است.

فشار منفذی و تنش های اولیه محاسبه شده طبق روابط ذکر شده نیز در شکل ۳ نشان داده است. همانطور که در این شکل مشخص شده، فشار منفذی ثبت شده به صورت مستقیم در عملیات (آزمایش RFT) (به صورت اشکال کروی صورتی رنگ نمایش داده شده است) با فشار منفذی تخمین زده شده همخوانی دارد. این مورد نشان از صحت محاسبات انجام شده دارد و فشار منفذی تخمین زده شده را تایید می کند. همانطور که ذکر شد، برای تایید مقدار تنش اصلی حداقل محاسبه شده از آزمایش LOT که توسط آن تنش اصلی حداقل به صورت مستقیم اندازه گیری می شود، استفاده می شود (که در این تحقیق تنش اصلی حداقل برابر با تنش افقی حداقل می باشد). بنابراین همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، مقدار تنش تخمین زده شده با نتایج آزمایشگاهی و مستقیم (به صورت اشکال مثلثی و مشکی رنگ نشان داده شده است) همخوانی خوبی دارد. از این رو می توان نتیجه گرفت مقادیر محاسبه شده برای تنش دارای دقت کافی و مورد تایید می باشد. همچنین، از آنجایی که هم مقادیر فشار منفذی و هم مقادیر تنش افقی حداقل مورد تایید بوده، در نتیجه مقادیر تنش افقی حداکثر نیز قابل قبول می باشد.

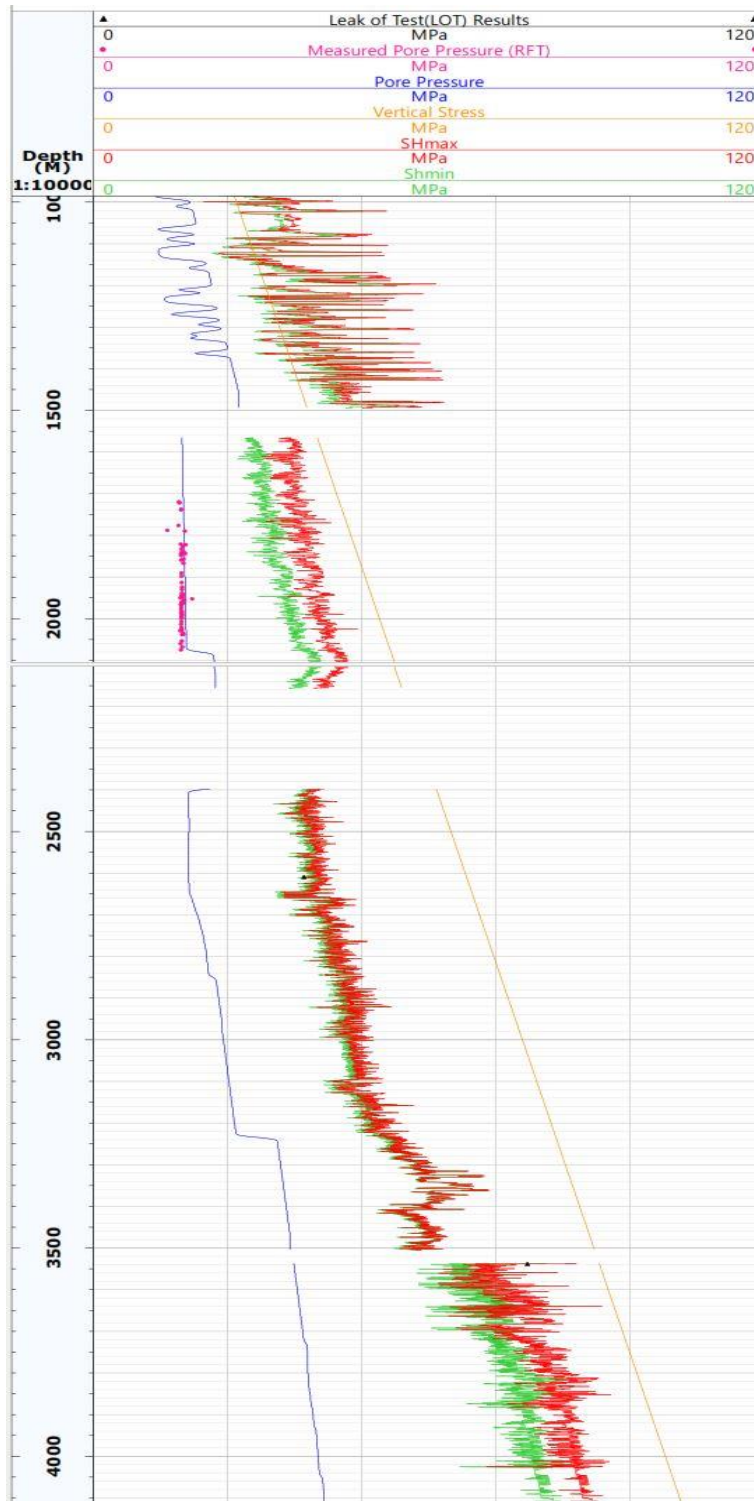
با توجه به شکل ۳، نکته قابل توجه دیگر به این صورت است که در حفره اول (۱۷/۵ اینچی) مقادیر تنش افقی حداقل و حداکثر در اکثر عمق ها از مقدار تنش عمودی بیشتر می باشد. لیکن در حفرات بعدی مقدار تنش عمودی از دو تنش افقی ذکر شده بیشتر می باشد. بنا براین، می توان نتیجه گرفت در حفره اولی رژیم تنش به صورت معکوس است و در حفرات بعدی به صورت نرمال می باشد.

¹ Poroelastic Horizontal Strain Model

² Leak of Test



شکل ۲ نمودارهای خواص مکانیکی استاتیک محاسبه شده برای چاه مورد نظر در میدان نفتی جنوب غربی ایران. شامل: مدول الاستیسیته یا یانگ (رنگ مشکی)، بر حسب گیگا پاسکال (GPa)، نسبت پواسون (رنگ صورتی)، بدون واحد، زاویه اصطحاک داخلی (رنگ آبی) بر حسب درجه، مقاومت تراکمی تک محوره (رنگ قرمز) و مقاومت کششی (رنگ زرد) بر حسب مگا پاسکال (MPa).



شکل ۳ نمودارهای تنش‌های اولیه و فشار منفذی برای چاه مورد نظر در میدان نفتی جنوب غربی ایران. فشار منفذی (رنگ آبی) و تنش‌های اولیه شامل تنش عمودی (رنگ زرد)، تنش افقی حداقل (رنگ سبز) و تنش افقی حداکثر (رنگ قرمز) بر حسب مگا پاسکال می‌باشند. همچنین اشکال مثلثی و مشکی رنگ بیانگر نتایج تست LOT و اشکال کروی و صورتی رنگ بیانگر نتایج تست RFT می‌باشند



۵- نتیجه گیری

پایداری چاه امروزه یکی از بخش‌های اساسی جهت انجام عملیات ایمن حفاری چه در صنعت نفت و چه در صنعت معدن می‌باشد. قبل از انجام پایداری و تحلیل آن برای هر چاهی ابتدا باید مدل ژئو مکانیکی برای چاه مذکور تعیین شود. در این تحقیق برای چاهی در یکی از میداین نفتی جنوب غربی ایران در چهار حفره ۱۷/۵، ۱۲/۲۵، ۸/۳۷۵ و ۶/۱۲۵ اینچی، مدل مورد نظر ساخته شد. برای ساختن مدل ابتدا نمودارهای چاه پیمایی جمع آوری شد. سپس به کمک روابطی که توسط افراد مختلف یا شرکت ملی نفت جنوب ارائه شده است، خواص مکانیکی سنگ برای چاه مورد نظر از جمله مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، زاویه اصطحکاک داخلی و مقاومت کششی و مقاومت تراکمی تک محوره به دست آورده شد. سپس فشار منفذی و تنش‌های اولیه برای چاه مذکور تخمین زده شد. به علاوه، به کمک تست‌های RFT و LOT و اندازه گیری‌های مستقیم صورت گرفته، مقادیر فشار منفذی و تنش‌های افقی تخمین زده شده صحت سنجی و کالیبره شدند. از این رو می‌توان ادعا کرد مدل ژئو مکانیکی ساخته شده برای چاه مذکور قابل قبول و مورد تایید می‌باشد. در نتیجه از این مدل ساخته شده برای تحلیل پایداری‌های آینده برای چاه مذکور می‌توان استفاده نمود.

فهرست علائم

فشار منفذی (مگاپاسکال)	P_p	مدل الاستیسیته دینامیک (گیگا پاسکال)	E_d
فشار منفذی نرمال (مگاپاسکال)	P_{pn}	مدول الاستیسیته استاتیک (گیگا پاسکال)	E_{static}
نمودار صوتی فشارشی نرمال (میکرو ثانیه/فوت)	DTC_n	نمودار صوتی فشارشی اندازه گیری شده (میکرو ثانیه/فوت)	DTC
تنش عمودی (مگاپاسکال)	S_v	نمودار صوتی برشی (میکرو ثانیه/فوت)	DTS
شتاب جاذبه (متر/ مجذور ثانیه)	g	چگالی (کیلوگرم/ متر مکعب)	ρ_b
تنش افقی حداقل (مگاپاسکال)	S_{hmin}	نسبت پواسون (بدون واحد)	ν
تنش افقی حداکثر (مگا اسکال)	S_{Hmax}	مقاومت تراکمی تک محوره (مگاپاسکال)	UCS
کرنش‌های افقی در جهت تنش‌های افقی است	ϵ_x و ϵ_y	زاویه اصطحکاک داخلی (درجه)	ϕ
نسبت بایوت که برابر یک فرض شده است	α	تخلخل نوترون (به صورت اعشاری)	$NPHI$
عمق از سطح زمین (متر)	Z	درصد حجمی شیل (/.)	V_{shale}

مراجع

- [1] Zoback, Mark D. *Reservoir geomechanics*. Cambridge University Press, 2010.
- [2] Mansourizadeh, Mostafa, Majid Jamshidian, Pouya Bazargan, and Omid Mohammadzadeh. "Wellbore stability analysis and breakout pressure prediction in vertical and deviated boreholes using failure criteria—A case study." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 145: 482-492, 2016.
- [3] Gholami, Raouf, A. Moradzadeh, Vamegh Rasouli, and J. Hanachi. "Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6, no. 1: 13-25, 2014.
- [4] Sayers, Colin Michael, Charles L. Russell, Mauro Pelorosso, Jose Adachi, Jorge Aurelio Aurelio Pastor, Vasudev Singh, Kwasi M. Tagbor, and Patrick James Hooyman. "Determination of rock strength using advanced sonic log interpretation techniques." In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2009.



سومین کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالورژی و معدن ایران
۴ دی ۱۳۹۸ – دانشگاه شهید چمران اهواز



- [5] Rasouli, Vamegh, Zachariah John Pallikathekathil, and Elike Mawuli. "The influence of perturbed stresses near faults on drilling strategy: a case study in Blacktip field, North Australia." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 76, no. 1-2: 37-50, 2011.
- [6] Das, Baisakhi, and Rima Chatterjee. "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: 30-37, 2017
- [7] Fjar, Erling, Rachel M. Holt, A. M. Raaen, Rasmus Risnes, and P. Horsrud. *Petroleum related rock mechanics*. Vol. 53. Elsevier, 2008.
- [8] Senseny, P. E., and T. W. Pfeifle. "Fracture toughness of sandstones and shales." In *The 25th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association, 1984.
- [9] Eaton, Ben A. "Graphical method predicts geopressures worldwide." *World Oil*; (United States) 183, no. 1, 1976.