نشریه‌ی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره نهم، شماره۳، پائیز ۱۴۰۴، صفحه ۴۱ تا ۵۹
https://doi.org/10.22034/IRSRM.2025.504159.0088

تعیین میزان فشار سیال حفاری بهینه جهت پایداری چاه نفت با استفاده از مدل‌سازی ژئومکانیکی در نرم‌افزار المان محدودABAQUS

رضا عشقی‌قهدریجانی[۱]، رضا شیرین‌آبادی[۲*]

۱-گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲-گروه مهندسی عمران، مرکز تحقیقات مدل‌سازی و بهینه‌سازی در علوم و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

دریافت : ۱۴۰۴/۰۷/۱۲؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹

(*نویسنده مسئول: r.shirinabadi@iau.ac.ir)

چکیده

صنعت نفت و عملیات حفاری در زندگی امروز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یکی از اساسی‌ترین مشکلات در حفاری چاه‌های نفت، مسائل مربوط به پایداری چاه می‌باشد که گاه منجر به تحمیل هزینه‌های زیادی از جمله هزینه‌های مالی و نیز خطرات جانی برای کارکنان می‌گردد. مهم‌ترین دغدغه یک مهندس حفار نگه‌داشتن چاه در شرایط ایمن و جلوگیری از فرو ریزش دیواره چاه می‌باشد که سبب توجه ویژه به برنامه سیال حفاری و برنامه طراحی لوله جداری و روش‌های عملیاتی در حفر یک چاه می‌شود. این مطالعه به بررسی پایداری دیواره چاه نفت و عوامل تأثیرگذار بر آن می‌پردازد. بدین جهت با استفاده از نمودارهای حاصل از نمودارگیری سازند مورد مطالعه ابتدا به محاسبه‌ی داده‌های سازند مورد مطالعه پرداخته و سپس با استفاده از مدل ژئومکانیکی سازند در نرم‌افزار المان محدود آباکوس به تحلیل پایداری چاه و تعیین وزن بهینه سیال حفاری در شرایط گوناگون پرداخته شده است. بدین منظور به کمک نرم‌افزار آباکوس مدل ژئومکانیکی یک چاه عمودی در عمق ۲۶۰۰ تا ۲۷۰۰ متری سطح زمین شبیه‌سازی شده است و فشار بهینه گل حفاری که در آن هیچ‌گونه ناحیهٔ پلاستیکی در دیواره چاه تشکیل نمی‌شود محاسبه گردیده است. حد پایین فشار گل حفاری بهینه بااستفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس مقدار ۳۳/۱ مگاپاسکال و حد بالای فشار گل ۱۲۱/۷ مگاپاسکال محاسبه شده است. نتایج حاصل نشان از کارآمدی نرم‌افزار آباکوس در تحلیل پایداری چاه نفت دارد.

واژگان کلیدی **تحلیل پایداری، ناحیه پلاستیک چاه، سیال حفاری بهینه، نرم‌افزار آباکوس، تحلیل عددی، پنجره ایمن گل حفاری**

۱- مقدمه

مطالعه‌ای توسط امام قیسی و همکاران تحت عنوان آنالیز حساسیت خصوصیات ژئومکانیکی سازند بر پایداری چاه‌های نفتی در حفاری فروتعادلی در یکی از میادین جنوب غربی ایران انجام شد در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی و روش تحلیلی موهر-کلمب ابتدا پایداری چاه مورد مطالعه در حفاری فروتعادلی مورد بررسی قرار گرفته و سپس به‌وسیله آنالیز حساسیت تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی، تنش‌های برجا و فشار چاه بر کرنش شعاعی دیواره چاه به عنوان پارامتری وابسته به پایداری چاه محاسبه شود. نتایج نشان داد بازه پنجره گل ایمن و پایدار جهت انجام حفاری فروتعادلی برای سازند مورد مطالعه ۲۱/۲۴ تا ۳۴/۷ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین نتایج آنالیز حساسیت چاه مورد مطالعه نشان داد که با توجه به فاکتورهای حساسیت به‌دست آمده برای هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی، موثرترین پارامتر در بین پارامترهای الاستیک و پلاستیک به ترتیب مدول یلنگ و چسبندگی و کم اثرترین پارامترها به ترتیب ضریب پواسون و زاویه اصطکاک می‌باشد[۱].

مطالعه‌ای توسط سرفرازی و همکاران تحت عنوان مطالعه تاثیر میکرو پارامترهای مدل عددی PFC بر رشد ترک هیدرولیکی انجام شد در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار PFC2D، تاثیر سختی نرمال و برشی مدل و همچنین مقاومت نرمال و برشی مدل بر الگوی رشد ترک هیدرولیکی مطالعه شده است. بطور کلی ۶ الگوی شکست متفاوت شناسایی شد. سختی نرمال و برشی مدل و مقاومت نرمال و برشی مدل تاثیر بسزایی بر الگوی شکست چاه دارد. در ادامه رابطه‌ای برای تخمین تنش هیدرولیکی شکست براساس مقاومت فشاری تک محوره مدل ارائه شده است[۲].

مطالعه‌ای توسط جهان‌محمدی، مصدق و همکاران تحت عنوان تعیین پنجره ایمن وزن گل و مسیر بهینه حفاری سازند گدوان با استفاده از معیارهای شکست سنگ در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب غرب ایران انجام شد در این پژوهش ارزیابی پایداری چاهی واقع در یکی میادین جنوب غرب ایران براساس یک مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی می‌باشد. پس از ساخت مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی، جهت ارزیابی پایداری چاه از معیارهای شکست موهر-کولمب و موگی-کولمب استفاده شد. با بررسی نتایج مشخص شد که معیار شکست موهر-کولمب، تخمین بهتری در مورد فشار ریزش ارائه می‌دهد. همچنین امتداد ریزش‌های شناسایی شده بر روی نگار تصویری، به‌صورت شمال‌غرب-جنوب‌شرق بوده که نمایانگر جهت تنش افقی حداقل می‌باشد[۳].

مطالعه‌ای توسط حیدری و جلالی‌فر تحت عنوان بررسی پایداری دیواره چاه انحرافی به کمک روش ارزیابی کمی ریسک در یکی از میادین جنوب غرب ایران انجام شد در این تحقیق داده‌های هفت حلقه چاه به‌منظور بررسی و مدل‌سازی پایداری دیواره چاه انحرافی در حفاری سازند شیلی یکی از بزرگ‌ترین میادین نفتی جنوب غرب ایران استفاده شده است. در مرحله آنالیز کمی ریسک هدف بررسی تاثیر میزان عدم قطعیت پارامترهای اصلی (متغیرهای ورودی رابطه تعیین حداقل وزن گل مورد نیاز بر اساس معیار شکست موهر-کولمب) و حساسیت آن‌ها در افزایش درصد موفقیت و کاهش شکست می‌باشد. در روش آنالیز کمی ریسک از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است و نتایج در نمودار تورنادو نمایش داده می‌شود[۴].

مطالعه‌ای توسط محمدآبادی و همکاران تحت عنوان تخمین پارامترهای ژئومکانیکی، تجزیه و تحلیل تنش‌های برجا و تعیین پنجره وزن بهینه گل با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شد در این پژوهش ابتدا دو چاه تصادفی از یکی از میدان‌های نفتی جنوب ایران برگزیده شد که یکی به‌عنوان چاه آموزشی جهت تعیین مدل مناسب و دیگری جهت پیش‌بینی زمان موج‌های صوتی انتخاب شد. این داده‌ها با استفاده از طیف وسیعی از روش‌های یادگیری ماشین و تنظیم فراپارمترها روی الگوریتم‌ها، بهترین مدل‌ها جهت پیش‌بینی لاگ‌های صوتی ارائه شد. در ادامه با استفاده از روابط پورالاستیک تنش‌های برجا میدان تعیین شدند و معلوم گردید مخزن سروک و ایلام در رژیم تنش معکوس و مخزن آسماری در رژیم تنش نرمال تا امتدادلغز قرار دارند. در پایان با استفاده از معیارهای مکانیک سنگ بهترین وزن بهینه گل حفاری در چاه مورد مطالعه ارائه شد[۵].

مطالعه‌ای توسط مهدی‌زاده و همکاران تحت عنوان بررسی همبستگی عوامل ژئومکانیکی با میزان جابه‌جایی دیواره شرقی معدن سنگ آهن چادرملو بااستفاده از مدل‌سازی فرکتالی انجام شد در این پژوهش پس از بررسی اطلاعات اولیه و ساخت بانک اطلاعاتی، مدل بلوکی بخشی از دیواره شرقی معدن برای پارامترهای ژئومکانیکی شامل مقاومت فشاری تک محوره، وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی تخمین زده شد. سپس با استفاده از مدل‌سازی فرکتالی زون‌های هر پارامتر شناسایی شده و با مقایسه هر یک از این پارامترها با میزان جابه‌جایی تجمعی به دست آمده از رادار، انطباق کلی هر یک از این عوامل با استفاده از ماتریس لاگ‌راشیو محاسبه گردید. بر این اساس مقاومت فشاری تک محوره و زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش برش مستقیم، انطباق بیشتری با میزان جابه‌جایی نشان داد[۶].

مطالعه‌ای توسط عشقی‌قهدریجانی و شیرین‌آبادی تحت عنوان مدل‌سازی عددی شکست هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و تعیین عوامل موثر بر فشار شروع شکست انجام شد در این پژوهش به مدل‌سازی عددی شکست هیدرولیکی در ۴ حللت مختلف در نرم‌افزار المان محدود آباکوس و مقایسه نتایج حاصل با مدل‌سازی آزمایشگاهی آن به منظور یافتن فشار شکست پرداخته شده است. سپس تحلیل حساسیت با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به منظور بررسی تاثیر تغییر پارامترهای مختلف بر روی فشار شکست انجام شد. این پارامترهای ورودی که در واقع داده‌های چاه می‌باشند شامل مدول الاستیسیته، تنش جانبی، تنش محوری، مقاومت کششی و نسبت پواسون می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که تنش جانبی و مقاومت کششی بیش‌ترین تأثیر را بر روی فشار شکست دارند و تاثیر پارامترهایی مثل تنش محوری و مدول یانگ در تعیین فشار شکست بسیار ناچیز است[۷].

مطالعه‌ای توسط شیرین‌آبادی و موسوی انجام شد در این پژوهش معادلات Kirsch، Salencon و مدل‌سازی عددی به منظور تحلیل تنش در مجاورت چاه انجام شده است. در ابتدا، کد اجزاء مجزا سه‌بعدی (3DEC) برای ساخت مدل عددی با استفاده از رفتار الاستیک استفاده شد. سپس نتایج با معادلات Kirsch مقایسه شد. پس از آن، مدل عددی با توجه به رفتار الاستوپلاستیک ساخته شد. همچنین نتایج با معادلات Salencon مقایسه شد و اثر شکستگی بر روی گمانه چاه تحت فشار سه‌محوری توسط 3DEC بررسی شد[۸].

مطالعه‌ای توسط امیرخانی و عبدالهی‌پور تحت عنوان تحلیل حساسیت و تعیین مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر پایداری چاه نفت بر اساس مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار phase2 انجام شد در این پژوهش به بررسی میزان تأثیر هر پارامتر بر پایداری چاه نفت و مشخص کردن مهم‌ترین آن‌ها و مرتب نمودن آن‌ها بر اساس اهمیت در پایداری چاه نفت پرداخته شده است. حداکثر جابه‌جایی ایجادشده در دیواره چاه به‌عنوان معیار پایداری در نظر گرفته شده است. درنهایت این پارامترها به ترتیب از بیش‌ترین تأثیرگذاری تا کم‌ترین تأثیرگذاری مرتب شده‌اند. درنهایت مشخص شد پارامترهای مورد بررسی به ترتیب از حساسیت زیاد به کم عبارت‌اند از: فشار منفذی، فشار گل حفاری، نسبت تنش‌های افقی جانبی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب چسبندگی، مدول یانگ و نسبت پوآسون[۹].

۲- روش‌شناسی تحقیق

۲-۱- محاسبه پارامترهای استاتیک و دینامیک

پارامترهای ژئومکانیکی مخزن حاصل از بررسی‌های دینامیکی با استفاده از نمودارهای لاگ صوتی و نمودار لاگ چگالی به دست می‌آیند. با اندازه‌گیری خواص یاد شده می‌توان مدول الاستیسیته سنگ مخزن در حالت دینامیکی را بدست آورد. بدلیل این‌که تغییرات در ژئومکانیک که وابسته به سنگ می‌باشد، آرام است، محاسبات دینامیکی باید به محاسبات استاتیکی تبدیل شوند، به همین دلیل از روابط تجربی زیر برای تبدیل مدول الاستیسیته سنگ مخزن از حالت دینامیکی به استاتیکی استفاده می‌کنیم.

مدول یانگ در حالت استاتیک

$$E_s = ۰/۴۱۴۵E_d - ۱/۰۵۹۳ \quad (۱)$$

مدول یانگ در حالت دینامیکی

$$E_d = \frac{\rho_b[3-4(\frac{\Delta t_c}{\Delta t_s})^2]}{\Delta t_s{}^2 - \Delta t_c{}^2} \quad (2)$$

در این روابط ρ_b چگالی سنگ، Δt_s زمان گذر امواج برشی، Δt_c زمان گذر امواج فشاری می‌باشند. در این روابط زمان گذر موج فشاری و برشی بر حسب میکرو ثانیه بر فوت، چگالی بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. برای بدست آوردن ضریب پواسون نیز می‌توان از فرمول ارائه شده در زیر استفاده نمود در این‌جا این نکته حائز اهمیت است که ضریب پوآسون در حالت دینامیکی و استاتیکی هیچ تفاوتی ندارد و به تبدیل خاصی نیاز نیست.

$$\upsilon = \frac{1}{2}(\frac{\Delta t_s{}^2 - 2\Delta t_c{}^2}{\Delta t_s{}^2 - \Delta t_c{}^2}) \quad (3)$$

۲-۲- تعیین تنش‌های برجا

یکی از پارامترهای ورودی و مهم در معیارهای شکست، تنش‌های برجا می‌باشد. تنش عمودی یا روباره (σ_v) یکی از تنش‌های اصلی است و تنش‌های افقی حداکثر (σ_H) و حداقل (σ_h) دو تنش اصلی دیگر هستند. تنش عمودی بوسیله انتگرال دانسیته سنگ از سطح تا عمق مورد نظر بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_v = \int_0^z \rho g dz \cong \overline{\rho} g z \quad (4)$$

که در آن σ_v تنش قائم، g شتاب جاذبه و z عمق از سطح مبنا است.

مقدار تنش‌های افقی حداقل و حداکثر توسط روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v}\sigma_v - \frac{v}{1-v}\alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{1-v^2}\varepsilon_y + \frac{vE_{sta}}{1-v^2}\varepsilon_x \quad (5)$$

$$\sigma_H = \frac{v}{1-v}\sigma_v - \frac{v}{1-v}\alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E_{sta}}{1-v^2}\varepsilon_x + \frac{vE_{sta}}{1-v^2}\varepsilon_y \quad (6)$$

که در روابط فوق، υ ضریب پواسون، α ضریب بایوت، P_p فشار منفذی، E مدول یانگ استاتیک، ε_x و ε_y کرنش در جهت تنش افقی حداقل و حداکثر می‌باشند که می‌توانند به صورت کششی یا فشاری باشند.

برای در نظر گرفتن اثر فشار منفذی در سنگ و هم‌چنین پیش‌بینی شکست سنگ، تعیین ثابت بایوت بسیار حائز اهمیت می‌باشد. ضریب بایوت از طریق آزمون آزمایشگاهی تعیین و مقدار آن از صفر تا یک تغییر می‌کند. معمولا در مطالعات ژئومکانیکی مخازن نفت و گاز، به دلیل سخت بودن اجرای آزمون‌ها، از انجام آن صرف نظر می‌شود. ضریب بایوت به عنوان اصلاح کننده اثر فشار منفذی با توجه به تراکم‌پذیری حجم و اجزاء ماتریکس سنگ، وقتی اطلاع دقیقی از مقدار دقیق آن در دسترس نباشد معمولا برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. در حل این مسئله $\alpha = 1$ در نظر گرفته شده است.

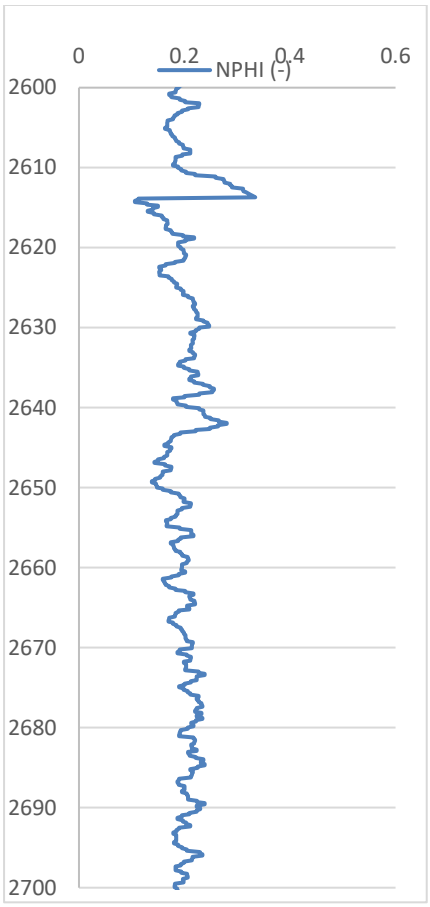
۲-۳- تحلیل پایداری دیواره چاه

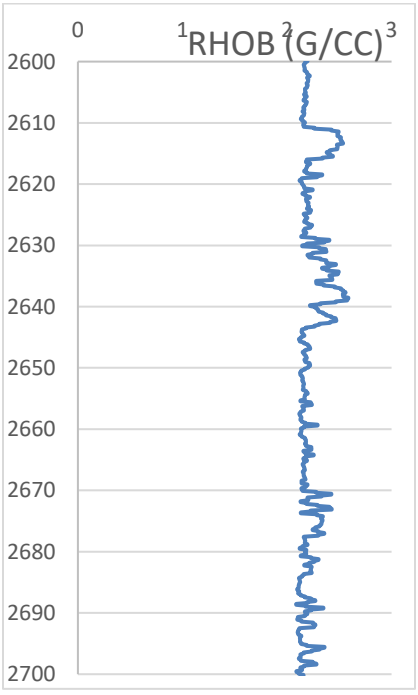
با استفاده از پارامترهای محاسبه شده در قسمت‌های گذشته می‌توان با مدل‌سازی ژئومکانیکی سازند مورد نظر در نرم افزار آباکوس پایداری دیواره چاه را تحت شرایط مختلف بررسی نموده و پنجره ایمن گل حفاری را نیز به دست آورد و به بررسی تاثیر هریک از پارامترهای موجود بر روی پایداری چاه و میزان فشار گل حفاری پرداخت. این میزان از فشار گل به ما این امکان را می‌دهد که از ریزش دیواره چاه و هم‌چنین شکست هیدرولیکی در کل عمق حفاری جلوگیری کرده به علاوه باتوجه‌به این میزان از فشار گل از ورود سیال سازند به دیواره چاه و هم‌چنین از هرزروی گل حفاری به سازند جلوگیری کنیم و در نهایت می‌توان از مشکلات ناشی از ناپایداری دیواره چاه ممانعت کرد. در حفاری چاه‌های نفتی در سازندهای مختلف از دو روش عمده حفاری تحت تعادل و حفاری بالای تعادل استفاده می‌شود. باید توجه داشت در حالت عادی و بدون اعمال فشار گل، فشار منفذی سازند باعث ایجاد جریان سیال به داخل چاه می‌شود. چنان‌چه از روش حفاری تحت تعادل استفاده شود جریان سیال به داخل چاه هم‌چنان وجود خواهد داشت.

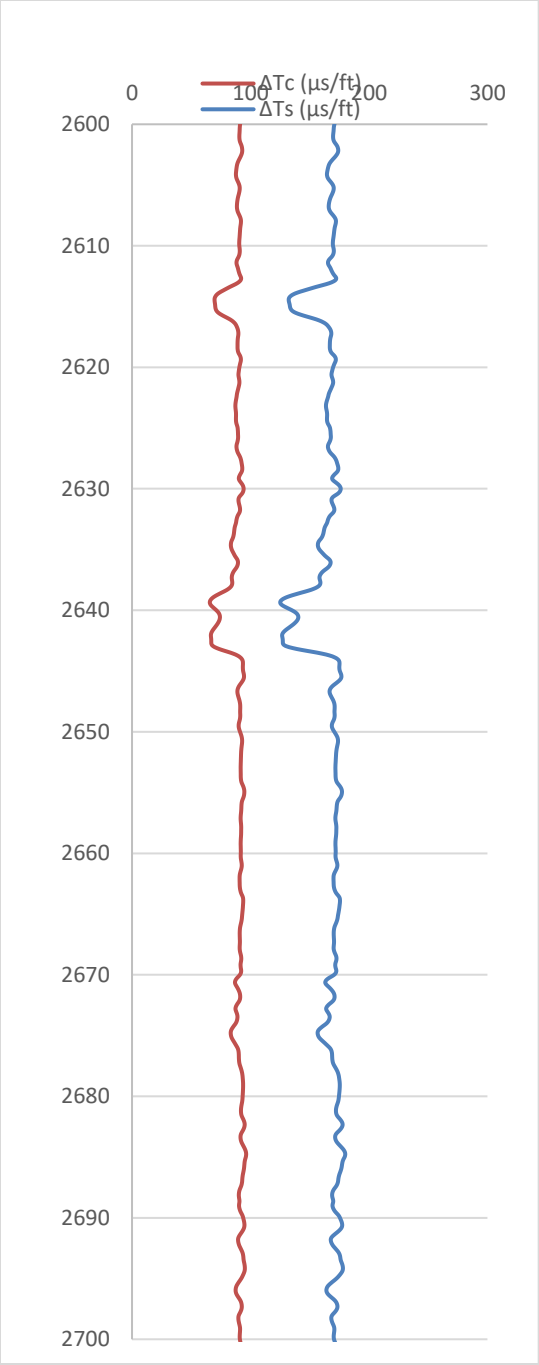
۴-۲- پارامترهای ژئومکانیکی محاسبه شده

ابتدا با جمع‌آوری اطلاعات حاصل از نمودارگیری پارامترهای مدول الاستیک در دو حالت دینامیک و استاتیک بدست آمد. برای محاســـبه پارامترهای مکانیکی مخزن مورد مطالعه از نمودارهای چگالی، نوترون و نمودارهای صـــوتی فشـــاری و برشـــی اســـتفاده می‌شود، که در شکل ۱ نشان داده شده است.

میدان مورد مطالعه میدان نفتی اهواز می‌باشـــد که یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین میدان‌های نفتی در جنوب غرب ایران است. این میدان در اســـتان خوزســـتان واقع شـــده و از لحاظ تولید نفت، جایگاه ویژه‌ای در صـــنعت نفت ایران دارد. ســـازند آســـماری در جنوب غرب ایران و به‌ویژه در میدان نفتی اهواز یافت می‌شود. این ســـازند عمدتاً از ســـنگ آهک و دولومیت تشـــکیل شـــده اســـت و به دلیل ویژگی‌های مخزنی مناســـب، یکی از منابع اصـــلی تولید نفت در منطقه به شـــمار می‌رود. عمق لایه مورد مطالعه همان‌طور که در شکل ۱ مشخص می‌باشد، از ۲۶۰۰ الی ۲۷۰۰ متری می‌باشد. یعنی به عبارت ســـاده‌تر ۱۰۰ متر از لایه مورد نظر که در همان لایه مخزنی می‌باشد مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.



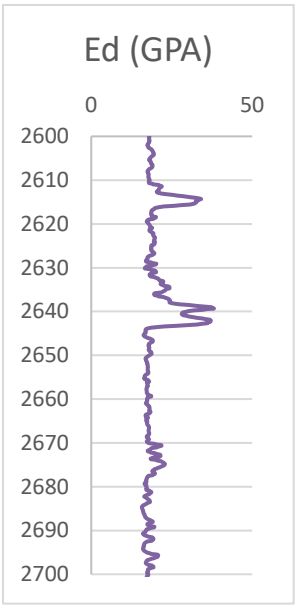




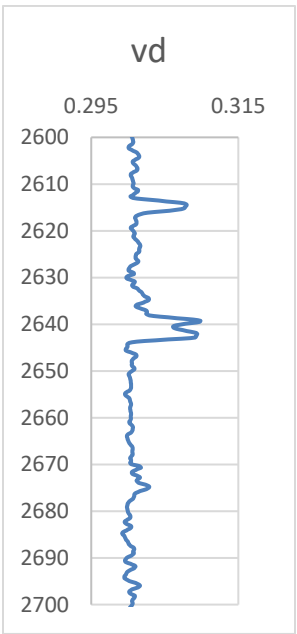
شکل ۱: نمودارهای بدست آمده از چاه در مخزن مورد مطالعه بر حسب عمق

در ابتدا باید نمودارهای حاصل شده از نمودارگیری چاه نفت مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد و سپس پارامترهای خواص الاستیک در حالت‌های دینامیک و استاتیک سنگ در عمق مورد مطالعه را باتوجه‌به روابط تجربی ارائه شده در قسمت قبل بدست آورد. برای بدست آوردن پارامترهای مدول‌های مورد نظر از اطلاعات مربوط به نمودارهای چگالی و نمودارهای صوتی در هر دو حالت برشی و فشاری استفاده می‌شود.

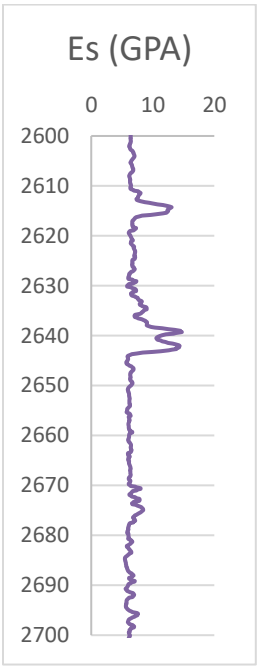
شکل ۲ نشان دهنده مدول یانگ دینامیکی، شکل ۳ نشان دهنده ضریب پوآسون (بدون بعد) و شکل ۴ نشان دهنده مدول یانگ استاتیکی می‌باشد.



شکل۲: مدول یانگ دینامیکی



شکل ۳: ضریب پوآسون (بدون بعد)



شکل ۴: مدول یانگ استاتیکی

جدول۱: خصوصیات مکانیک سنگی

مشخصه ژئومکانیکی	مقدارعددی
چسبندگی(MPA)	۶/۹۴
زاویه‌ی اصطکاک(درجه)	۴۰
مقاومت کششی(MPA)	۲/۹۸
مدول الاستیسیته(GPA)	۷/۰۳
ضریب پواسون	۰/۳

جدول۲: تنش قائم، تنش افقی حداقل، تنش افقی حداکثر و فشار منفذی

مشخصه	مقدارعددی
فشارمنفذی (MPA)	۲۵/۷۳
تنش افقی حداکثر کل (MPA)	۵۷/۱
تنش افقی حداقل کل (MPA)	۵۱/۷
تنش قائم کل (MPA)	۶۸/۹
طول چاه (متر)	۱۰۰

۳- مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس

۳-۱- مدل‌سازی عددی

یکی از مزایای اســـتفاده از روش عددی به جای روش تحلیلی، قابلیت بررســـی تنش‌ها و میزان جابجایی‌ها در هر نقطه از دیواره چاه اســت که امکان شـــناســـایی نواحی در حال تســـلیم را فراهم می‌آورد و دقت بیش‌تری در تعیین فشـــار گل ارائه می‌دهد. این روش به طور کلی دید بهتری از تغییرات تنش و تغییر شـــکل‌ها ارائـه می‌دهـد. در روش عـددی، امکـان حـل کـامـل معـادلات پوروالاســـتیک وجود دارد. در مدل‌ســـازی عددی لازم اســـت که روش‌های حل مناسب برای المان‌ها، آنالیز حساسیت نسبت به نوع و تعداد المان‌ها، شرایط مرزی و مدل رفتاری به دقت تعریف شوند تا طراحی کارآمد ژئومکانیکی حاصل گردد.

۳-۲- نرم‌افزار آباکوس

نرم‌افزار آباکوس یک نرم‌افزار اجزای محدود قدرتمند اســـت که دارای توانایی‌های گســـترده در مدل‌ســـازی می‌باشـد. روش اجزای محدود یا روش المان‌های محدود که به اختصـــار (FEM) نامیده می‌شود روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل انتگرال‌ها اســـت. اســـاس کار این روش یا حذف کامل معادلات دیفرانسـیل یا سـاده‌سـازی آن‌ها به معادلات دیفرانسـیل معمولی، کـه بـا روش‌هـای عـددی مثـل اویلر حـل می‌شـــونـد، می‌باشد[۱۰].

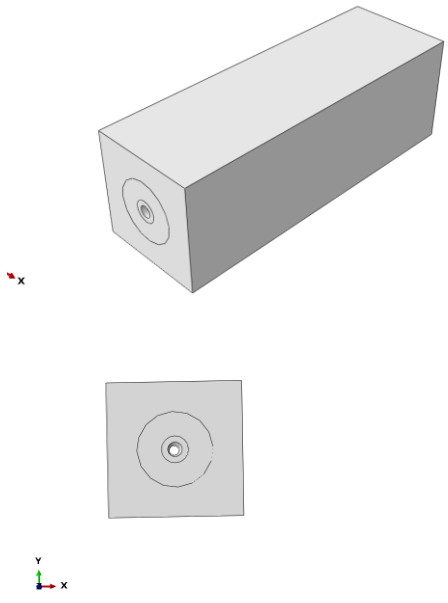
این نرم‌افزار قابلیت‌های پیشـــرفته‌ای را برای مدل‌ســـازی و شـبیه‌سـازی رفتار پیچیده مواد و سـاختارها ارائه می‌دهد که آن را به ابزاری ارزشـــمند برای بررســـی پایداری چاه تبدیل می‌کند و سـبب شـده تا در این مطالعه از این نرم‌افزار برای بررسـی پایداری دیواره چاه نفت و تعیین فشار گل حفاری بهینه استفاده گردد.

۳-۳- فرضیات مدل‌سازی

در مـدل‌هـای ســـاخـتـه شـــده، مقطعی از یـک چـاه عمودی مدل‌ســـازی شـــده و بررســـی می‌گردد (شـــکل ۵)، محیط کاملا همسانگرد در نظر گرفته‌شده، طول چاه صد متر و مقطعی دایروی دارد که محور چاه در مرکز یک مکعب و با قطر ۲۰ ســـانتی‌متر

مدل‌سازی شده است. در مدل‌سازی عددی از روش اجزاء محدود استفاده و در المان‌بندی آن المان‌بندی در تعداد و اشکال مختلف بررسی و بهترین و منظم‌ترین نمونه مدل‌سازی شد، برای افزایش دقت در نتایج خروجی مورد نظر تعداد المان‌ها در نزدیکی چاه افزایش داده شده است، در حل مدل از معیار گسیختگی موهر- کولمب استفاده شده است. هم‌چنین از ابتدا یک فشار منفذی اولیه به میزان ۲۵/۷۳ مگاپاسکال به مدل داده شده و شرایط مرزی و تنش‌ها نیز در مدل اعمال شده است.

جهت محور x به عنوان تنش افقی حداقل، جهت محور Y به عنوان تنش افقی حداکثر و جهت محور Z به عنوان جهت تنش قائم فرض شده است. پارامترهای ورودی به مدل شامل تنش‌های برجا، مقاومت کششی، نسبت پواسون، مدول یانگ، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و فشار منفذی می‌باشد. روش کار به این صورت است که پس از ایجاد مدل ژئومکانیکی مخزن، ابتدا خواص سنگ و خاک مورد نظر در مدل اعمال می‌شود پس از آن شرایط مرزی و مقدار تنش‌ها و نیز میزان فشار گل به دهانه‌ی چاه وارد شده و پس از آن تحت شرایط حاصل به بررسی ایجاد ناحیه‌ی پلاستیک در چاه پرداخته می‌شود و بهترین فشار گل جهت پایداری دیواره چاه محاسبه می‌گردد. واحدها و نمادهای پارامترهای به‌کاررفته مطابق جدول ۱ هستند. سایر فرض‌های مدل‌سازی عددی نیز مطابق جدول ۲ هستند.



شکل۵: مدل ژئومکانیکی اولیه شبیه‌سازی شده از چاه مورد مطالعه

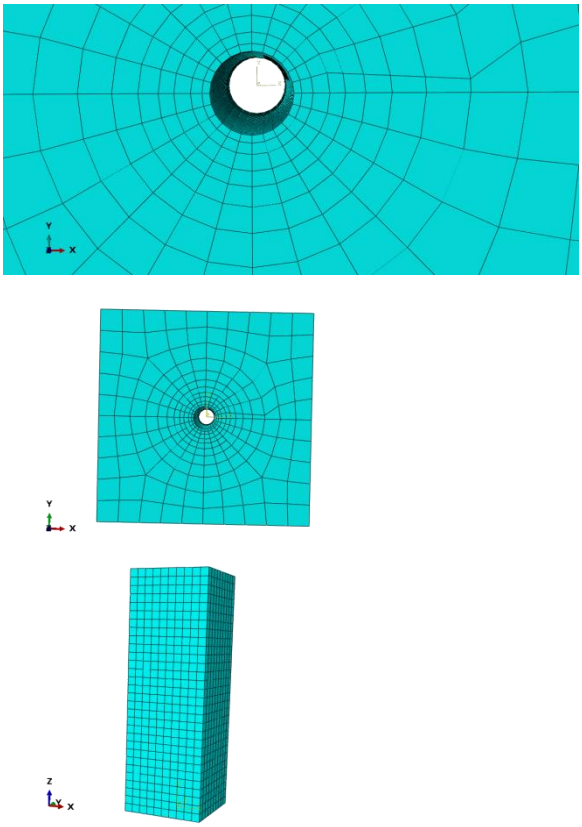
۴-۳- هندسه مدل

برای مدل‌سازی این تحقیق در آباکوس یک مدل سه‌بعدی به شکل مکعب طراحی شده است که برای افزایش دقت مدل با نزدیک‌تر شدن به دهانه‌ی چاه، اندازهٔ المان‌های ما کوچک‌تر می‌شود. این مدل دارای طول ۱۰۰ متر و شعاع ۰/۱ متر است و مقطعی از چاه می‌باشد. در واقع صد متر از چاه در عمق ۲۶۰۰ تا ۲۷۰۰ متری از سطح زمین به صورت جداگانه در نرم‌افزار طراحی گردیده و خواص ژئومکانیکی و شرایط مرزی به صورت کاملا واقعی تحت شرایط موجود در میدان نفتی مدل‌سازی شده است. محیط کاملا همسانگرد در نظر گرفته‌شده، طول چاه صد متر و مقطعی دایروی دارد که محور چاه در مرکز یک مکعب و با قطر ۲۰ سانتی‌متر مدل‌سازی شده است. در این مدل‌سازی مقطع چاه به صورت بکر و بدون شکست اولیه می‌باشد. میزان کرنش پلاستیک به عنوان معیار سنجش پایداری چاه در نظر گرفته شده است. پس از انجام این کار تنش‌های اعمالی به نمونه که شامل تنش افقی حداقل، تنش افقی حداکثر و تنش قائم و نیز شرایط مرزی داخل چاه تعریف گردید که در شکل ۷ قابل مشاهده هستند.

۵-۳- المان‌بندی نمونه

در آباکوس می‌توان انواع المان‌بندی و تعداد مختلف را بررسی نمود. به منظور یافتن نزدیک‌ترین جواب باید انواع اشکال المان بندی و تعداد مختلف آن‌را بررسی نمود و بهترین را انتخاب کرد. برای افزایش دقت در نتایج خروجی مورد نظر تعداد المان‌ها در نزدیکی دهانه چاه افزایش داده شده و اندازه هر المان مطابق شکل (شکل۶) کوچک‌تر شده است. در این مدل‌سازی المان‌بندی مطابق شکل ۶ اعمال شده است. المان‌بندی در سه ابعاد مختلف در کل مدل طراحی گردیده است بدین شکل که اندازه المان کلی ۰/۲ متر در نظر گرفته شده، اندازه المان‌ها در دهانه‌ی چاه ۰/۰۳ متر معادل ۳ سانتی‌متر و اندازه المان‌ها در نزدیکی دهانه‌ی چاه به حالت Single تغییر یافته و از Maximum size معادل ۰/۱ متر تا Minimum size معادل ۰/۰۴ متر به سمت دهلنه‌ی چاه تنظیم

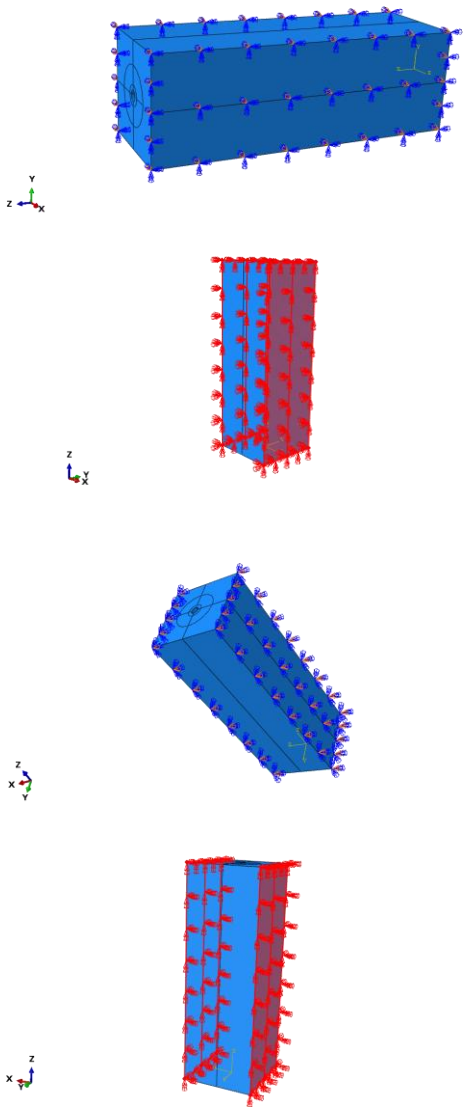
شـــده اســـت تا اندازه‌ی المان‌ها به ســـمت دهلنه‌ی ورودی چاه کوچک‌تر شوند. در آخر نوع المان‌بندی (element shape) در حالت Hex و (Technique) درحـالـت Structured کـه بهترین نوع المان‌بندی است قرار داده شده که یک المان مکعبی هشت گره‌ای ایجاد شده است.

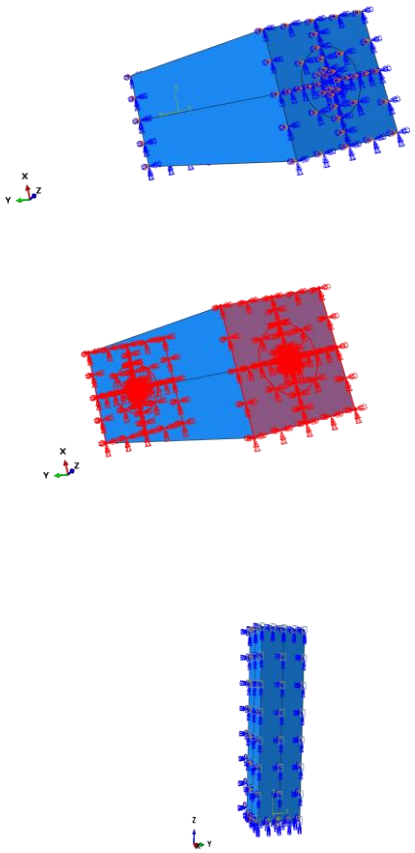


شکل ۶: المان‌بندی مدل طراحی شده

۶-۳- شرایط بارگذاری و شرایط مرزی

در این بخش تنش‌های برجا، شـرایط مرزی و هم‌چنین فشـار گل به نمونه اعمال می‌شـــود. از آن‌جایی که نمونه‌ی مدل‌ســـازی شـده مقطعی از چاه می‌باشـد از بالا و پایین محصـور هسـت، بدین ترتیب در راســتای Z و دورانی مقید می‌باشـد و قابلیت جابه‌جایی در راستای Z را ندارد و تنها قابلیت حرکت در جهت‌های X و Y را دارا است. در اعمال شـرایط مرزی بر سـطوح عمود بر محور X تنها محور X مقید است اما توان جابه‌جایی در جهت‌های Z و Y را دارا اســت و در اعمال شــرایط مرزی بر ســطوح عمود بر محور Y تنها محور Y مقید است اما توان جابه‌جایی در جهت‌های Z و X را دارا اســـت. برای وارد کردن تنش‌های برجا جهت محور X به عنوان تنش افقی حداقل، جهت محور Y به عنوان تنش افقی حداکثر و جهت محور Z به عنوان جهت تنش قائم فرض می‌شـــود و چون تنش‌ها از نوع فشـاری می‌باشـند باید به صـورت منفی وارد شـوند. فشـار گل نیز به صـورت یک فشـار خطی که با گذشـت زمان به صـورت متناوب تغییر پیدا می‌کند مشـابه شـکل ۸ به دهانه‌ی چاه وارد می‌گردد تا بتوان کرنش پلاستیک، جابه‌جایی و مقدار تنش را در کل مقطع چاه در فشـارهای مختلف مشـاهده کرده و فشـار گل بهینه را بدست آورد.

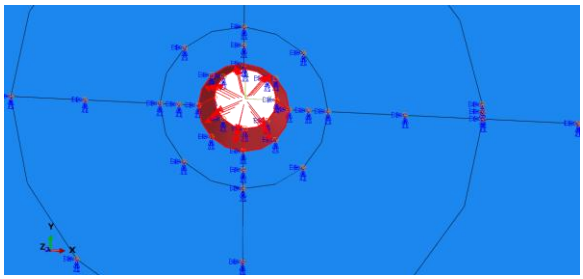




شکل ۷: اعمال شرایط مرزی

۷-۳- اجرای مدل جهت یافتن فشار گل حفاری

برای شناسایی حداقل فشاری که در آن مقدار کرنش پلاستیک برابر صفر است و چاه در حالت پایدار قرار دارد، باید فشار سیال به صورت متناوب به دهانه‌ی چاه وارد شود.



شکل ۸: اعمال فشار گل به دهانه چاه

مقدار فشار گل حفاری در شروع، مقدار ۳۵ مگاپاسکال و بالاتر از فشار منفذی و هر گام زمانی ده ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در ابتدای اعمال فشار گل در مقدار ۳۵ مگاپاسکال چاه بدون کرنش پلاستیک و در حالت پایدار قرار دارد (شکل۹). برای یافتن حد پایین فشار گل بهینه، فشار اعمالی را کاهش داده تا اولین کرنش پلاستیک مشاهده گردد. بدین منظور از نرم‌افزار ۱۰۰ خروجی گرفته می‌شود یعنی به ازای گذشت هر ۰/۱ ثانیه ۰/۱ مگاپاسکال از فشار وارده بر دهانه‌ی چاه کاسته شده و به صورت خطی کاهش می‌یابد تا این مقدار به ۲۵ مگاپاسکال که کمتر از فشار منفذی است برسد. بدین شکل می‌توان فشاری که موجب ایجاد اولین کرنش پلاستیک در دهانه‌ی چاه شده را مشاهده و حداقل فشار گل حفاری بهینه را بدست آورد و آن‌را به عنوان حد پایین فشار گل در نظر گرفت. بدین شکل با کاهش منظم فشار گل در نهایت در گام زمانی ۱/۹ ثانیه که بیانگر فشار اعمالی ۳۳/۱ مگاپاسکال به دهانه چاه می‌باشد اولین کرنش پلاستیک مشاهده می‌شود و چاه وارد فاز پلاستیک می‌گردد. با گذشت زمان و اعمال هر چه کمتر فشار گل حفاری این کرنش پلاستیک افزایش یافته و در کل چاه پخش شده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که حد پایین فشار گل حفاری بهینه برای پایداری دیواره‌ی چاه ۳۳/۱ مگاپاسکال می‌باشد. برای پایداری دیواره چاه فشار گل اعمالی نباید کمتر از ۳۳/۱ مگاپاسکال باشد و این مقدار به عنوان کم‌ترین مقدار فشار گل حفاری بهینه در نظر گرفته می‌شود.

جدول۳: نتایج بررسی حد پایین فشار گل حفاری

مشخصه	مقدار
حد پایین فشار گل(MPa)	۳۳/۱
گام زمانی(ثانیه)	۱/۹
بازه اعمال فشار گل(MPA)	۳۵-۲۵

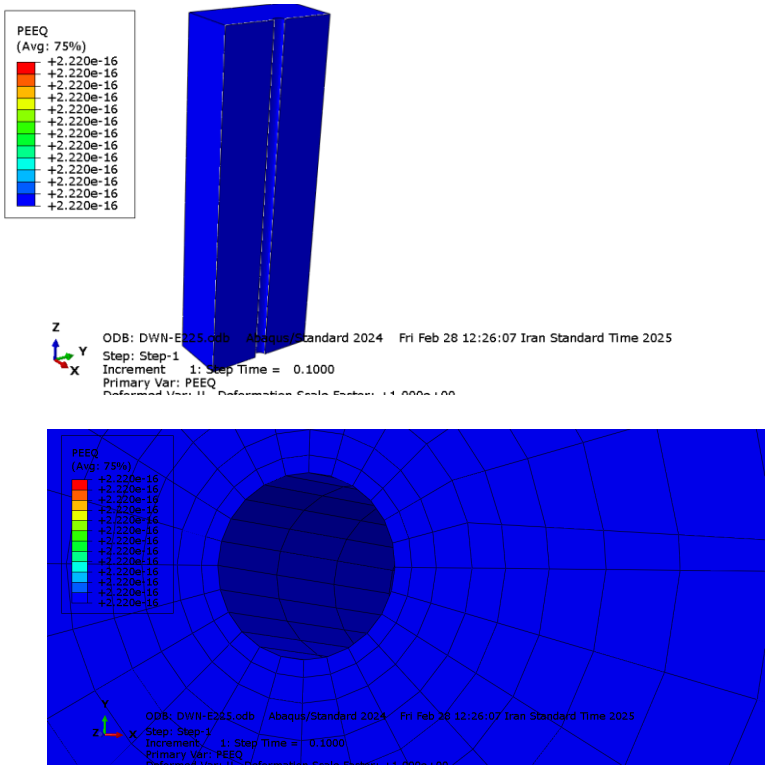
برای شناسایی حداکثر فشاری که در آن مقدار کرنش پلاستیک برابر صفر است و چاه در حالت پایدار قرار دارد، باید فشار سیال به صورت متناوب به دهانه‌ی چاه وارد شود. مقدار فشار گل حفاری در شروع، مقدار ۱۱۵ مگاپاسکال و هر گام زمانی مانند حالت قبل ده ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در ابتدای اعمال فشار گل در مقدار ۱۱۵ مگاپاسکال و کمتر از این مقدار چاه بدون کرنش پلاستیک و

در حالت پایدار قرار دارد. برای یافتن حد بالای فشار گل بهینه، فشار اعمالی را افزایش داده تا اولین کرنش پلاستیک مشاهده گردد. بدین منظور از نرم‌افزار ۱۰۰ خروجی گرفته می‌شود یعنی به ازای گذشت هر ۰/۱ ثانیه ۰/۱ مگاپاسکال به فشار وارده بر دهانه‌ی چاه افزوده می‌گردد و به صورت خطی افزایش می‌یابد تا این مقدار به ۱۲۵ مگاپاسکال برسد. بدین شکل می‌توان فشاری که موجب ایجاد اولین کرنش پلاستیک در دهانه‌ی چاه شده را مشاهده و حداکثر فشار گل حفاری بهینه را که در آن چاه در حالت پایدار قرار دارد را بدست آورد و آن‌را به عنوان حد بالای فشار گل در نظر گرفت. بدین شکل با افزایش منظم فشار گل در نهایت در گام زمانی ۶/۷ ثانیه که معادل فشار گل اعمالی ۱۲۱/۷ مگاپاسکال به دهانه چاه می‌باشد اولین کرنش پلاستیک به وجود آمده و چاه وارد فاز پلاستیک می‌شود. با گذشت زمان و اعمال هر چه بیشتر فشار گل حفاری این کرنش پلاستیک افزایش یافته و در کل چاه پخش شده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که حد بالای فشار گل حفاری بهینه برای پایداری دیواره‌ی چاه ۱۲۱/۷ مگاپاسکال می‌باشد. برای پایداری دیواره چاه فشار گل اعمالی نباید بیشتر از ۱۲۱/۷ مگاپاسکال باشد و این مقدار به عنوان بیش‌ترین مقدار فشار گل حفاری بهینه در نظر گرفته می‌شود.

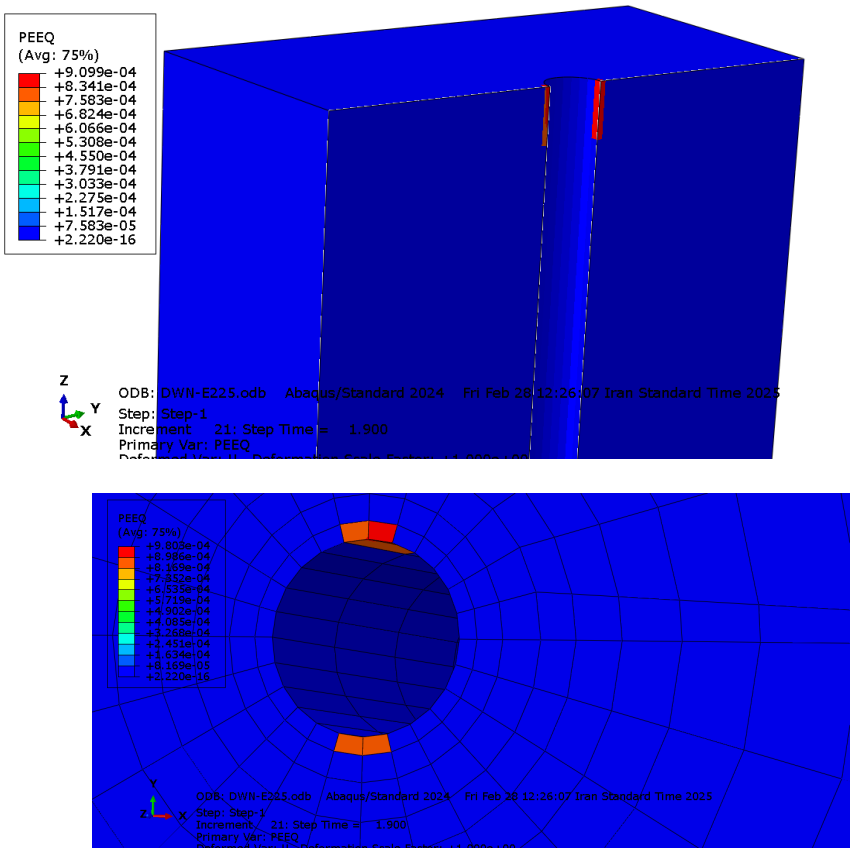
جدول۴: نتایج بررسی حد بالا فشار گل حفاری

مشخصه	مقدار
حد بالا فشار گل(MPa)	۱۲۱/۷
گام زمانی(ثانیه)	۶/۷
بازه اعمال فشار گل(MPA)	۱۲۵-۱۱۵

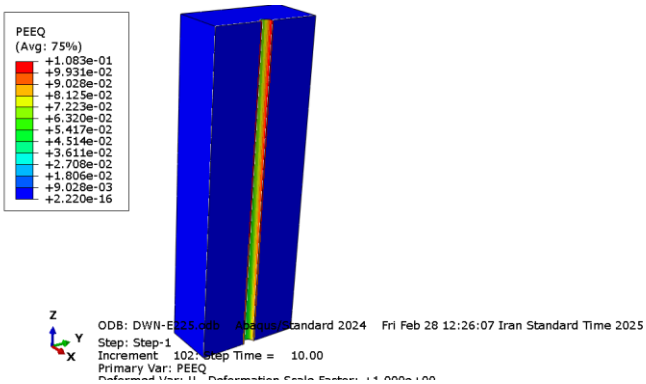
با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان به این نتیجه رسید که پنجره ایمن گل حفاری که در آن چاه در حالت پایدار قرار دارد دارای حد پایین ۳۳/۱ و حد بالای ۱۲۱/۷ مگاپاسکال می‌باشد و بین این دو مقدار فضای ایمن در نظر گرفته می‌شود.



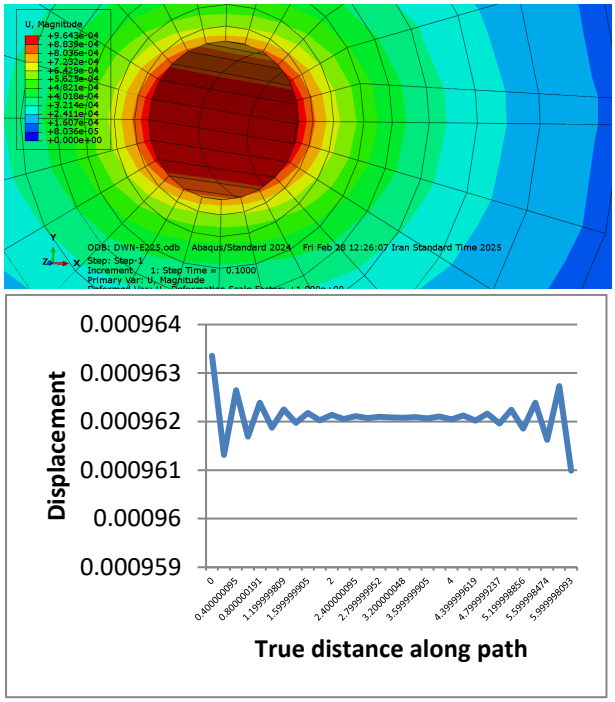
شکل۹: نبود کرنش پلاستیک در ابتدای اعمال فشار گل بالاتر از ۳۳/۱ مگاپاسکال



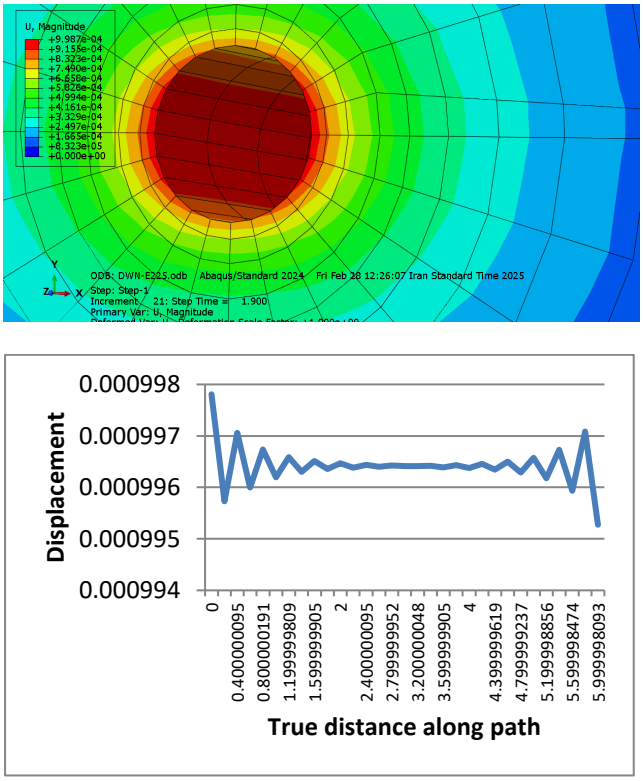
شکل۱۰: اولین کرنش پلاستیک مشاهده شده در فشار گل ۳۳/۱



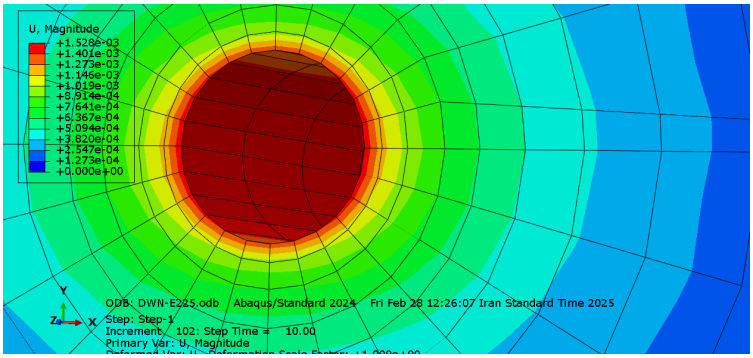
شکل۱۱: کرنش پلاستیک در فشار گل ۲۵ مگاپاسکال

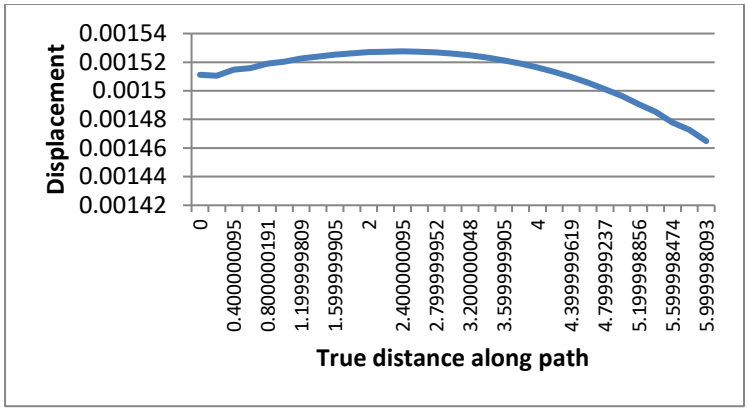


شکل۱۲: تغییرات جابه‌جایی در طول چاه در ابتدای اعمال فشار گل بالاتر از ۳۳/۱ مگاپاسکال

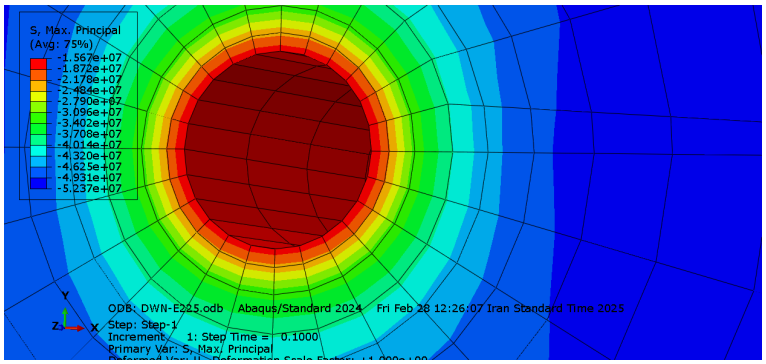


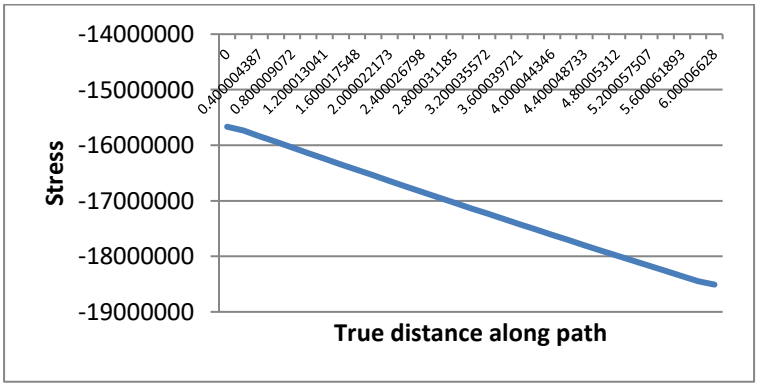
شکل۱۳: تغییرات جابه‌جایی در طول چاه در فشار گل ۳۳/۱ مگاپاسکال و شروع کرنش پلاستیک



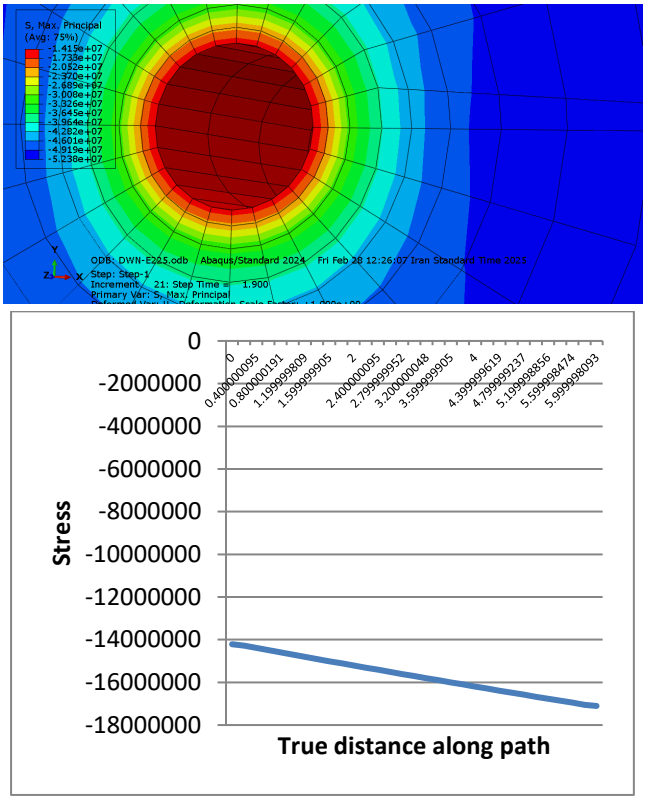


شکل۱۴: تغییرات جابه‌جایی در طول چاه در فشار گل ۲۵ مگاپاسکال

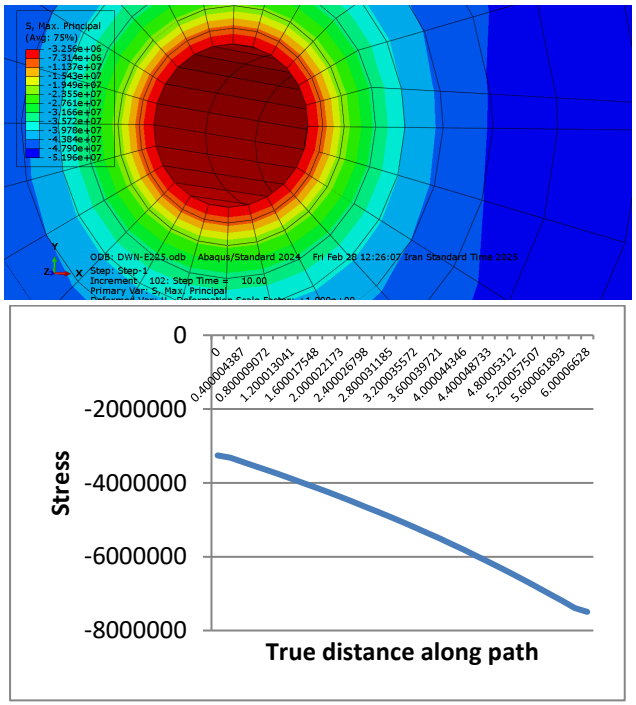




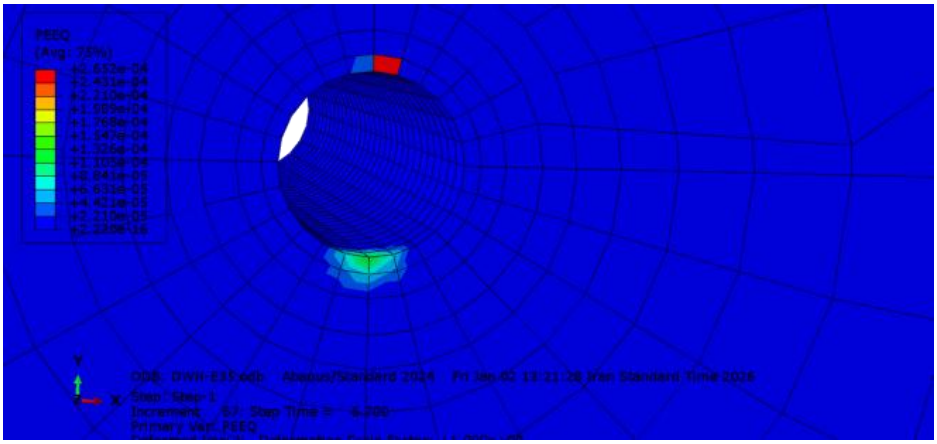
شکل۱۵: تغییرات تنش در طول چاه در ابتدای اعمال فشار گل بالاتر از ۳۳/۱ مگاپاسکال



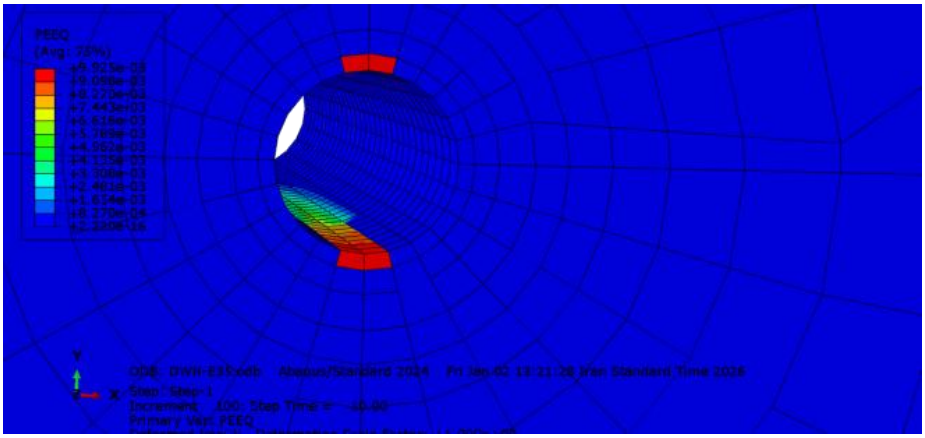
شکل۱۶: تغییرات تنش در طول چاه در فشار گل ۳۳/۱ مگاپاسکال و شروع کرنش پلاستیک



شکل۱۷: تغییرات تنش در طول چاه در فشار گل ۲۵ مگاپاسکال



شکل۱۸: اولین کرنش پلاستیک مشاهده شده در فشار گل ۱۲۱/۷



شکل۱۹: کرنش پلاستیک در فشار گل ۱۲۵ مگاپاسکال و بیشتر از حد بالای فشار گل

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی و مدل‌سازی یک چاه حفاری شده عمودی با استفاده از روش عددی در نرم‌افزار ABAQUS پرداخته شده است. نتایج حاصل شده از این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

۱. نتایج حاصل از مطالعات ژئومکانیکی قادر است تا نتایج واقعی را برای ما با دقت مناسب پیش‌بینی کند. لذا استفاده از این روش‌ها، در حین عملیات حفاری و نیز قبل از هر گونه عملیات حفاری جدید پیشنهاد می‌شود.

۲. براساس نتایج حاصل از نرم‌افزار ABAQUS مشخص گردید که حد پایین فشار گل بهینه برای حفاری چاه نفت مقدار ۳۳/۱ مگاپاسکال می‌باشد.

۳. براساس نتایج حاصل از نرم‌افزار ABAQUS مشخص گردید که حد بالای فشار گل بهینه برای حفاری چاه نفت مقدار ۱۲۱/۷ مگاپاسکال می‌باشد.

۴. به کمک این روش می‌توان در سرعت و دقت بالاتری محدوده پنجره ایمن گل حفاری را به دست آورد.

۵. فشاری از سیال حفاری که به محض عبور از آن چاه وارد محدوده پلاستیک می‌شود را می‌توان به عنوان حد پایین و حد بالای فشار گل در نظر گرفت و در نتیجه می‌توان از معیار کرنش

پلاستیک برای تعیین محدوده پنجره ایمن گل حفاری استفاده نمود.

۶. از مدل ایجاد شده می‌توان به عنوان یک مدل جامع و کامل در تحقیقات آتی بهره گرفت.

۷. اگر مقدار فشار گل حفاری کمتر از ۳۳/۱ مگاپاسکال باشد چاه وارد فاز پلاستیک می‌شود.

۸. اگر مقدار فشار گل حفاری بیش‌تر از ۱۲۱/۷ مگاپاسکال باشد چاه وارد فاز پلاستیک می‌شود.

۹. باتوجه‌به تغییرات تنش از ســـطح تا انتهای چاه می‌توان نتیجه گرفت که در دهانه‌ی چاه بیش‌ترین تنش اعمالی وجود دارد و این قســمت از چاه در معرض و احتمال شـکســت و ریزش بیش‌تری قرار دارد و میزان تنش با فاصـــله گرفتن از ســـطح چاه کاهش یافته به‌طوری‌که کم‌ترین تنش در قســـمت انتهایی چاه است.

مراجع

[
1. Aghakhani Emamqeysi, M.R., et al., Sensitivity analysis on geomechanical properties of the formation affecting the wellbore stability during underbalanced drilling in one of the southwest fields of Iran. Journal of Petroleum Geomechanics, 2022. **5**(2): p. 70-79.
2. Sarfarazi,V. , Haeri,H. and Fatehi Marji,M. (2022). Studying the effect of microparameters of the PFC numerical model on hydraulic crack propagation. JOURNAL OF ROCK MECHANICS, 5(4), 13-19.
3. Jahan Mohammadi, H., et al., Determination of safe mud weight window and optimal drilling path in the Gadwan formation using rock failure criteria in one of the hydrocarbon fields in southwest Iran. Journal of Petroleum Geomechanics, 2024. **6**(4): p. 61-80.
4. Heidari,R. , Jalalifar,H. and Kasravi,J. (2021). Study of the stability of the diverted well wall using a quantitative risk assessment method in one of the fields in southwestern Iran. JOURNAL OF ROCK MECHANICS, 5(2), 54-62.
5. Ghalibaf Mohammad Abadi, H., et al., Estimation of Geomechanical Parameters, In Situ Stress Measurement Techniques, and Determination of Safe Mud Weight Windows Using Machine Learning Algorithm Methods. Journal of Petroleum Geomechanics, 2023. **5**(4): p. 1-28.
6. Mahdizadeh,M. , Afzal,P. , Eftekhari,S. M. and Ahangari,K. (2022). Investigating the correlation between geomechanical factors and the displacement rate of the eastern wall of the Chadormalou iron ore mine using fractal modeling. JOURNAL OF ROCK MECHANICS, 6(1), 39-50.
7. Eshghi Gahderijani, R. and R. Shirinabadi, Numerical modeling of hydraulic fracturing using ABAQUS finite element software and determining the factors affecting the fracture initiation pressure. JOURNAL OF ROCK MECHANICS, 2023. **7**(1): p. 73-83.
8. Shirinabadi, R., E. Moosavi, and M. Gholinejad, Application of distinct element method to analyze the fracture and in-situ stress on wellbore stability under triaxial compression. Indian Geotechnical Journal, 2021. **51**(6): p. 1384-1398.

9. Amirkhani, M. and A. Abdollahipour, Sensitivity Analysis and determination of the most important affecting parameters in stability of oil wellbores based on numerical modeling in Phase2. Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering, 2022.
10. Gardes, R., Method and system for drilling and completing underbalanced multilateral wells utilizing a dual string technique in a live well. 2000, Google Patents.

JOURNAL OF ROCK MECHANICS

Determining the Optimal Drilling Fluid Pressure for Oil Well Stability Using Geomechanical Modeling in ABAQUS Finite Element Software

Reza Eshghi Ghahderijani[1], Reza Shirinabadi[2]*

1. Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Department of Civil Engineering, Research Center for Modeling and Optimization in Science and Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 04. October. 2025 Accepted: 20. December. 2025
(*Corresponding author: r.shirinabadi@iau.ac.ir)

Abstract The oil industry and drilling operations are extremely important in today's life. One of the fundamental challenges in drilling oil wells is the issue of wellbore stability, which can sometimes lead to significant costs, including financial expenses as well as safety risks for personnel. The main concern of a drilling engineer is to maintain the well in safe conditions and prevent the collapse of the wellbore walls, which necessitates special attention to the drilling fluid program, casing design, and operational methods in drilling a well. This study examines the stability of oil well walls and the factors affecting it. To this end, using the logs derived from the formation under study, the formation data was first calculated, and then, using a geomechanical model of the formation in the ABAQUS finite element software, the wellbore stability was analyzed and the optimal drilling fluid weight was determined under various conditions. To this end, using ABAQUS software, a geomechanical model of a vertical well at a depth of 2600 to 2700 meters from the ground surface was simulated, and the optimal drilling mud pressure, at which no plastic zones form in the wellbore, was calculated. The lower limit of the optimal drilling mud pressure, determined through simulation in ABAQUS software, was calculated as 33.1 MPa, and the upper limit of the mud pressure was calculated as 121.7 MPa. The results indicate the efficiency of ABAQUS software in analyzing the stability of oil wells.

Keywords **Stability analysis, plastic zone of the well, optimum drilling fluid, ABAQUS software, numerical analysis, safe drilling mud window**