

تأثیر عدم قطعیت و حساسیت متغیرهای ژئومکانیکی بر تحلیل پایداری چاه افقی جهت بهینه‌سازی فشار گل حفاری

امیرحسام ترابی^{*}، کاوه آهنگری^۱، دانشگاه آزاد اسلامی

چکیده

ناپایداری در هر مرحله از عمر چاه می‌تواند باعث تأخیر در حفاری، تکمیل و بهره‌برداری شود؛ به‌خصوص در حفاری افقی که دسترسی و کنترل به نسبت کمتر است. ناپایداری، هزینه‌های بسیاری را ایجاد می‌کند؛ هزینه‌هایی که می‌توان با به‌کارگیری مدل‌های جامع ژئومکانیکی و بررسی متغیرهای مؤثر در ناپایداری چاه آنها را کاهش داد و پایداری چاه و قطعیت نتایج تحلیل پایداری را بیشینه کرد. مسیر حفر چاه، جهت و بزرگی تنش‌های برجا، خصوصیات مکانیک‌سنگی، مدول یانگ، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک از جمله متغیرهایی هستند که بررسی عدم قطعیت و تحلیل حساسیت آنها به دلیل ثابت نبودن و ذات غیرهمگن محیط سنگی می‌تواند به درک صحیح وضعیت پایداری بیانجامد. تأثیر رژیم‌های گسلش بر پایداری چاه‌های نفت و گاز حائز اهمیت ویژه‌ای است و علاوه بر چاه‌های قائم که در رژیم‌های گسلش مختلف رفتارهای متفاوت ژئومکانیکی دارند چاه‌های افقی وضعیت بحرانی‌تری نسبت به تغییر در رژیم‌های گسلش مختلف دارند. در این مطالعه، چاه افقی در محدوده‌ی عمقی مشخص، با در نظر گرفتن رژیم گسلش نرمال، حالت پوروالاست و پلاستیک با تنش‌های افقی اینزوتروپ، تحلیل شد. آنالیز به‌صورت استاتیکی در محدوده‌ی زمانی ۰-۲ ثانیه (گام ژئواستاتیک و حفاری) بررسی شده و تحلیل پایداری با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی در یکی از چاه‌های میدان پارس جنوبی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت متغیرهای مختلف ژئومکانیکی و خواص متفاوت انجام شد. تغییر داده‌ها در محدوده‌ی محتمل نشان می‌دهد که نتایج تحلیل تا چه حد به تغییرات هر یک از متغیرها حساس است. در این مطالعه سعی شده با تلفیق و کمی‌سازی داده‌های ژئومکانیکی، پتروفیزیکی و زمین‌شناسی مطالعه‌ی گسترده‌تری روی متغیرهای مؤثر انجام شود. در انتها به کمک نرم‌افزار عددی المان محدود آباکوس نحوه‌ی تأثیر تغییرات بررسی و مشاهده شد برخلاف نسبت پواسون، افزایش مدول یانگ، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک باعث بزرگ‌تر شدن بازه‌ی پنجره‌ی گل ایمنی می‌شود. ضمن اینکه تغییرات مدول یانگ بیشترین تأثیر را در فشار سیال ایمن دارد. از نتایج تغییرات، می‌توان برای تعیین آسان و قابل‌اطمینان پنجره‌ی بحرانی گل استفاده کرد.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۱/۰۸

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۱/۱۲

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۲۸/۰۴

واژگان کلیدی:

تحلیل پایداری، مدل‌سازی عددی، نرم‌افزار آباکوس، چاه افقی، میدان پارس جنوبی

مقدمه

با گذشت زمان و افزایش نیاز به بهره‌برداری از ذخایر هیدروکربنی، چاه‌ها از دیدگاه متغیرهای مؤثر بر پایداری چاه پیچیده‌تر شده‌اند و عملیات حفاری در محیط‌هایی با شرایط سخت‌تر انجام می‌شود. علاوه بر چالش‌های روشی در حفر این چاه‌ها که مستلزم صرف وقت و هزینه‌ی بیشتری است وقوع هرگونه ناپایداری در دیواره‌ی چاه می‌تواند تا حد زیادی هزینه‌های چاه را افزایش دهد [۱ و ۲]. طبق تخمین‌ها بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از حفاری در نقاط مختلف جهان، حداقل ۱۰ درصد از بودجه‌ی تعریف شده‌ی چاه، در مواجهه با عملیات پیش‌بینی نشده در خصوص ناپایداری دیواره‌ی چاه صرف می‌شود که رقمی حدود یک میلیارد دلار در سال است. واضح است که مشکلات پایداری چاه محصول مجموعه‌ای از اتفاقات هستند که منشأ آنها برهم‌کنش میان سنگ و سیال، شرایط تنش‌های اعمالی، رفتار غیرعادی سازند و انجام نامناسب عملیات حفاری است [۳]. اگرچه افزایش کاربرد مطالعات مکانیک‌سنگی در طراحی چاه‌ها تا حد زیادی عملکرد حفاری را بهبود بخشیده اما کماکان بخش عمده‌ای از

قضایات آنها در این حوزه بر مبنای مشاهدات و تجربیات گذشته انجام می‌شود. با وجود تمامی تلاش‌ها در سال‌های گذشته، کماکان مشکلات عدم پایداری چاه توسط جوامع درگیر در این حوزه تجربه می‌شود. اثرات عملی این ناپایداری عموماً به ریزش دیواره‌ی چاه و تولید ماسه منجر می‌شود که اگر به‌نحو مناسب و مؤثری برطرف نشود می‌تواند مشکلاتی مثل گیرکردن سر مته، گشادشدگی چاه، خوردگی ادوات درون چاهی، هرزروی گل، نیاز به بازیابی مته و نیاز به حفاری انحرافی را در پی داشته باشد [۴ و ۵]. در این میان رژیم گسلش می‌تواند تأثیر به‌سزایی در بروز ناپایداری در چاه‌های قائم و به‌ویژه افقی داشته باشد. در این مطالعه، تأثیر رژیم گسلش نرمال در پایداری چاه افقی در میدان پارس جنوبی و پنجره‌ی مجاز فشار گل حفاری تحلیل می‌شود. با توجه به اینکه طول یک چاه در مقایسه با قطر آن بسیار بزرگ است، امکان بررسی کامل در یک مدل وجود ندارد. زیرا در چنین شرایطی در اغلب نرم‌افزارهای عددی، چاه به‌صورت یک خط فرض می‌شود، انجام تحلیل بسیار زمان‌بر است و مشاهده و تحلیل نتایج مدل‌سازی

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (amirhesamtorabi@gmail.com)

ضریب بایوت بر فشار منفذی ($\alpha.Pf$) و فشار شکست سنگ انجام می‌شود [۷ و ۸]. در این تحقیق از معیار شکست موهر-کولمب برای آنالیز پایداری چاه افقی استفاده شده است. آنالیز مدل به صورت عددی و روش اجزای محدود بوده و با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است. شرایط پایداری چاه افقی در حالت انیزوتروپ تنش‌های افقی آنالیز حساسیت شد [۷]. شرایط بهینه‌ی پایداری چاه حین حفاری در محدوده‌ی عمقی ۳۲۵۰/۲۳ متری در سازند دالان بالایی میدان پارس جنوبی با توجه به فشار درون چاهی و امتداد حفر چاه بررسی شد. آنالیز حساسیت متغیرهای ژئومکانیکی شامل مدول یانگ، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک در حالات بسیاری با اعمال فشار سیال سازند در درون چاه بررسی شد.

۱- میدان پارس جنوبی

خلیج فارس به‌عنوان آبراهی استراتژیک و باارزش همواره مورد توجه بوده است؛ گستره‌ای میان شبه‌جزیره‌ی عربستان و جنوب‌غربی ایران که مساحت بالغ بر ۳۹۰۰۰ مایل مربعی آن تا تنگه‌ی هرمز امتداد دارد. میدان پارس جنوبی (شکل-۱) یکی از میادین جنوب‌غربی ایران و بزرگ‌ترین میدان گازی فراساحل در جهان است که روی خط مرزی مشترک ایران و قطر در خلیج فارس قرار دارد و به‌صورت طاقدیسی با ابعاد تقریبی ۱۶۰×۶۵ کیلومتر و با مساحت ۹۷۰۰ کیلومتر مربع است که ۳۷۰۰ کیلومتر مربع آن در آب‌های سرزمینی ایران و ۶۰۰۰ کیلومتر مربع آن در آب‌های قطر قرار دارد. میدان پارس جنوبی در موقعیت ۵۲ تا ۵۲/۵ درجه‌ی شرقی و ۲۶/۵ تا ۲۷ درجه‌ی شمالی، حدود ۱۰۰ کیلومتری عسلویه، ۱۷۵ کیلومتری کیش، ۱۰۵ کیلومتری سواحل قطر و ۳۳۰ کیلومتری شمال‌غربی دبی واقع شده است.

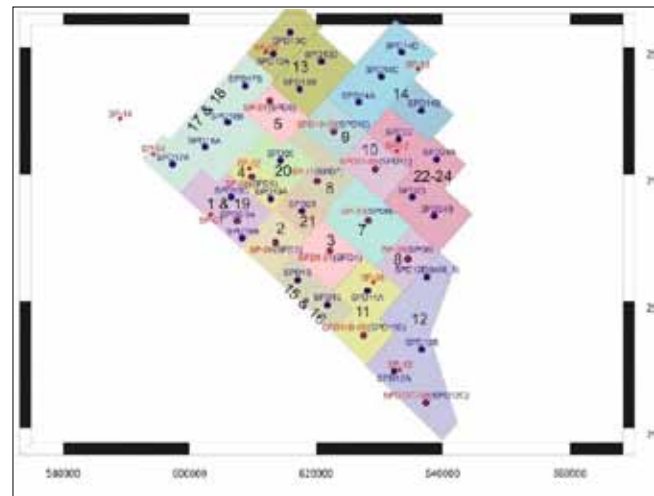
ساختار پارس جنوبی، گنبدی و از نوع رویشی به‌شمار می‌آید که عامل اصلی رویش آن برخاستن پی‌سنگ در کمان قطر-فارس است. بازه‌ی حفاری شده‌ی چاه از بالا به پایین شامل عهد حاضر، گروه‌های فارس، بنگستان، خامی، کازرون و در نهایت دهرم است. سازند سرچاهان (سیلورین پیشین) به‌عنوان سنگ منشأ و سازنده‌ی گروه دهرم (فراقون، دالان و کنگان) به‌عنوان سنگ مخزن و لایه‌ی مورد بررسی دالان بالایی در عمق ۳۲۵۰/۲۳ متری است.

۲- مدل سازی اجزاء محدود چاه

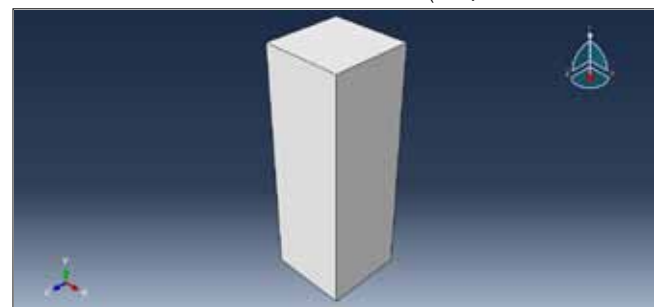
جهت بررسی رفتار چاه از دیدگاه پایداری دیواره در زمان حفر و پس از آن، یک مدل عددی سه‌بعدی توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس ساخته و تحلیل شد [۱۰]. به‌طور کلی علاوه بر مزایا و کاربرد

امکان‌پذیر نخواهد بود. در نتیجه جهت تحلیل پایداری چاه در فواصلی که احتمال بروز ناپایداری در اثر عوامل مربوط به سازند مثل جنس سنگ، فشار منفذی یا عوامل وابسته به حفاری مثل نوع و وزن گل تشخیص داده می‌شود مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی ساخته می‌شود تا به کمک روش‌های عددی، ناحیه‌ی پلاستیک در اطراف چاه، تأثیر فشار منفذی بر پایداری دیواره‌ی چاه و ... بررسی گردد [۶ و ۷].

سنگ‌ها در اعماق زمین از ماتریکس و بخش غیرجامد تشکیل شده‌اند. بخش غیرجامد شامل تخلخل، درز و شکاف و همچنین سیالات درون منافذ است. واضح است که فشار منفذی در توزیع تنش‌ها تأثیر به‌سزایی دارد [۵]. در اکثر قریب به اتفاق میادین نفتی، فشار منفذی سازند همواره به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین متغیرهای مؤثر بر پایداری چاه مورد بحث است [۸ و ۴]. با توجه به ناهمسانگرد بودن سنگ و روابط ارائه شده توسط کرش، محیط اطراف چاه پوروالاست و پلاستیک فرض می‌شود. با توجه به روابط و معادلات توزیع تنش‌ها در حالات الاستیک و الاستیک منفذی [۹] در مراجع مختلف [۳ و ۲] از نوشتن این روابط صرف‌نظر می‌شود و آنالیز فشار گل بین دو حد



شکل ۱ | نمایی از میدان پارس جنوبی (گزارش حفاری چاه مورد مطالعه، شرکت نفت و گاز پارس)



شکل ۲ | هندسه‌ی مدل ساخته شده

۰/۲۱۶ متر) به صورت بلوکی مکعبی با ابعاد $1/3 \times 4 \times 1/3$ متر مکعب فرض شده است. در این مدل سعی شده شرایط شبیه‌سازی به شرایط واقعی چاه نزدیک باشد. بنابراین شرایط سنگ به صورت متخلخل فرض شده و فشار منفذی در آن لحاظ گردیده است [۵]. شکل-۲ هندسه‌ی مدل و جهت حفر چاه که تنش افقی آن حداقل و در جهت Y است را نشان می‌دهد.

روش مش‌بندی بر اساس مدل پوروالاستوپلاستیک است. مش‌بندی این مدل به روش ساختاری و شش‌وجهی خواهد بود و المان‌های سه‌بعدی پیوسته به صورت منظم در سراسر مدل ایجاد شده‌اند. مش‌بندی مدل‌ها تابع عوامل متعددی است. در این مدل المان‌های منظم مکعبی ایجاد شده‌اند. شکل-۳ این مش‌بندی را نشان می‌دهد. جهت افزایش دقت مدل، المان‌های نزدیک دهانه‌ی چاه کوچک‌تر و منظم‌تر می‌شوند؛ به گونه‌ای که بیشترین دقت و محاسبات انجام می‌شود.

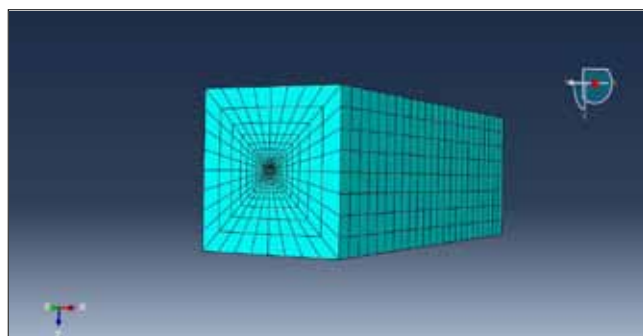
مقادیر تنش قائم برجا به صورت عمودی و به‌وجه بالای مدل به صورت فشار یکنواخت اعمال شد. با در نظر گرفتن گام تحلیل ژئواستاتیک، مقادیر تنش‌های افقی نیز بر مدل اعمال و تغییرات تنش قائم نیز در درون مدل مفروض شد. فشار درون چاه به صورت فشار یکنواخت شعاعی به‌وجه داخلی حفره وارد شد. فاصله‌ی مرز مدل تا مرز چاه پنج برابر شعاع چاه در نظر گرفته شده تا شرایط تنش به‌حالت برجا برسد. شرایط مرزی مدل با مقیدسازی حرکت انتقالی کف بلوک مکعبی در جهت قائم Z و حرکت چرخشی آن در سه جهت محورهای مختصات انجام شد. همچنین حرکت انتقالی دو وجه جانبی عمود بر بردار نرمال X در جهت X و دو وجه جانبی عمود بر بردار نرمال Y در جهت Y مقید شد. حرکت‌های چرخشی این وجه جانبی نیز در سه جهت مقید شد. شرایط مرزی مربوط به فشار منفذی در گام تحلیل اولیه به کل مدل و در گام نهایی تحلیل به دور مدل و همین‌طور به درون چاه داده شد تا حرکت شعاعی سیال در درون بلوک از مرز خارجی مدل به مرز داخلی ایجاد و اثر جریان سیال در ایجاد ناپایداری محسوس‌تر گردد. بنابراین طبق شکل-۴ شرایط مرزی خارجی مدل به صورت کامل برای Displacement/Rotation، Pore pressure، Well pore pressure و در جهت X, Y, Z اعمال شد.

این مدل‌سازی شامل دو گام اساسی است. نخست، گام ژئواستاتیک و دوم، گام حفاری و اعمال فشار چاه که زمان مورد نیاز برای هر گام یک ثانیه است و در مجموع زمان تحلیل ۲ ثانیه خواهد بود.

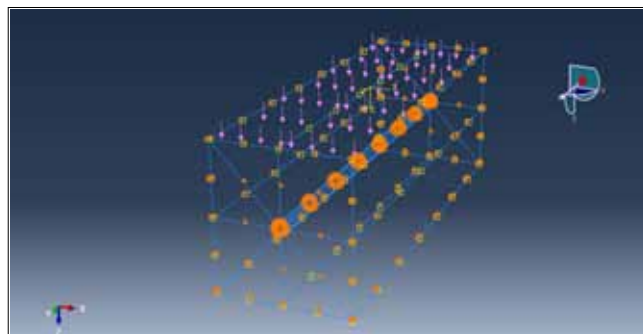
الف) گام ژئواستاتیک: در این گام شرایط مدل با فرض قبیل از حفاری شبیه‌سازی می‌شود، سیستم در حالت تعادل خواهد بود و

زیاد روش‌های عددی که توانایی مدل‌سازی با جزئیات بسیار و فرضیات کم را دارد این مقاله دید بهتری از وضعیت تغییر تنش‌ها، جابه‌جایی و تغییر شکل‌ها ترسیم می‌کند. اساس روش‌های عددی، تبدیل محیطی با بی‌نهایت درجه‌ی آزادی به محیطی با درجه‌ی آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط است. تخمین تغییرات فشار منفذی، وجود فضای متخلخل سنگ، سیال درون آن و کاربردی کردن روش حل عددی به کمک نرم‌افزار آباکوس تا حد زیادی روند شبیه‌سازی مدل سنگ را به واقعیت نزدیک می‌کند.

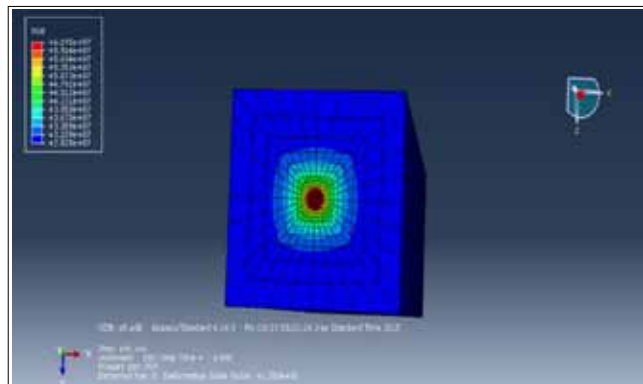
با توجه به رابطه‌ی کرش مدل چاه افقی با قطر $8/5$ اینچ (معادل



شکل ۳ | مدل سه‌بعدی مش‌بندی شده



شکل ۴ | شرایط مرزی خارجی مدل



شکل ۵ | نمای سه‌بعدی چاه افقی با اثر نفوذ شعاعی سیال در درون فضای متخلخل مدل سنگی

تنش در مقطع چاه تا حد ممکن است. مدت زمان این گام از ثانیه‌ی یک تا ثانیه‌ی دو است.

در این تحلیل از معیار شکست موهر-کولمب برای شبیه‌سازی شکست استفاده شده و داده‌ها با توجه به این معیار ارائه شده‌اند. این متغیرها شامل متغیرهای فیزیکی و مکانیکی سنگ، تنش‌های برجا و فشار منفذی در محدوده‌ی مدل‌سازی شده هستند.

۳- تحلیل مدل چاه افقی در جهت تنش افقی حداقل (σ_{\min}) و ارائه‌ی نتایج ۳-۱- اجرای مدل و نتایج

در این حالت مدل افقی در جهت تنش افقی حداقل با آزمون صفر درجه و به صورت متخلخل در رژیم گسلسل شمال ($\sigma_v > \sigma_{H_{\max}} > \sigma_{\min}$) است که با توجه به آنیزوتروپ بودن تنش‌های افقی ($\sigma_{H_{\max}} \neq \sigma_{H_{\min}}$) فرمول محاسبه‌ی فشار شکست طبق رابطه‌ی ۱- است [۲ و ۳]:

$$P_{\text{frac}} = 3 \sigma_{H_{\max}} - \sigma_v - P_f + T_0 \quad (1)$$

رسیدن به حد تسلیم و جابجایی‌های ثابت شده در دیواره‌های فضای حفاری تنها نشانه‌ی ناپایداری نیست؛ بلکه وقوع همزمان یک یا چند عامل برای اعلام ناپایداری از جمله نسبت بحرانی مساحت ناحیه‌ی پلاستیک ایجاد شده به سطح مقطع فضای حفاری، نسبت بحرانی تنش‌های اطراف فضا نسبت به خصوصیات مقاومتی سنگ میزبان و ... لازم است. اثر نفوذ سیال به سمت دیواره‌ی چاه در درون بلوک لحاظ شده که این خود بر ناپایداری بیشتر در چاه تأثیرگذار است [۹] و شرایط نزدیک‌تر به واقعیتی را در تحلیل ایجاد می‌کند (شکل-۵). با توجه به متغیرهای فیزیکی و مکانیکی سازند، تمامی متغیرها در محیط الاستیک منفذی از جمله تنش‌های برجا، تخلخل، تراوایی و فشار سیال در درون منافذ نیز در نرم‌افزار تغذیه شد [۶] تا عوامل مختلف ایجاد ناپایداری همزمان بررسی شوند.

در این ناحیه تنش افقی حداکثر ۵۲/۸۷ مگاپاسکال، تنش افقی حداقل ۴۸/۸۴ مگاپاسکال، تنش قائم برجا ۷۰/۶۸ مگاپاسکال و حداکثر فشار گل ۶۱/۹۵ مگاپاسکال محاسبه شده است (رابطه‌ی ۱). ابتدا فشار گل در محدوده‌ی زمانی استاتیکی ۲-۱ ثانیه‌ی گام حفاری در نقطه‌ای از چاه افقی گره‌ی ۳- (شکل-۶) از حد فشار منفذی (با ضریب بایوت) ۲۸/۳۵ مگاپاسکال تا حد گسیختگی کششی ۶۱/۹۵ مگاپاسکال با ضریب ثابت افزایش داده شد (شکل-۷).

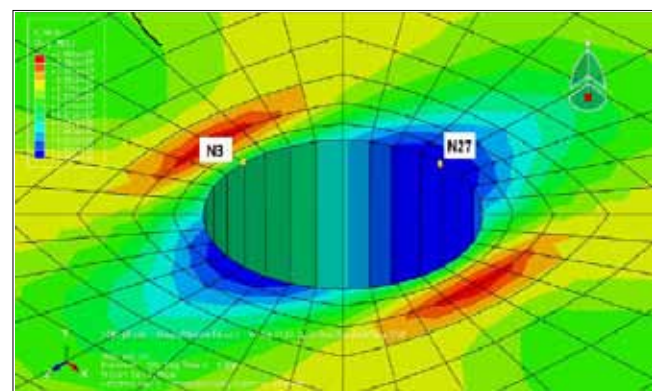
نتایج نشان داد که در محدوده‌ی زمانی گام حفاری در ابتدا کرنش‌های پلاستیک وجود ندارند. اما با افزایش فشار تا محدوده‌ی زمانی ۱/۸۷ ثانیه، کرنش‌های پلاستیک کم کم پدیدار شده و روند

مقادیر تغییرات تنش و کرنش و جابجایی و تغییرات فشار منفذی بسیار اندک است. در این گام شرایط اعمال تنش‌های برجا در سنگ به همراه اعمال نیروی وزن، مدل‌سازی تا قبل از حفاری را بیشتر به واقعیت نزدیک می‌کند و مدت زمان این گام از صفر تا ثانیه‌ی یک خواهد بود. **(ب) گام حفاری و اعمال فشار چاه:** در این گام با حفر سنگ، رژیم تنش‌ها در دیواره‌ی چاه متفاوت خواهد شد و مقدار تغییرات تنش، کرنش و جابجایی به همراه فشار منفذی در نزدیکی چاه افزایش خواهد یافت.

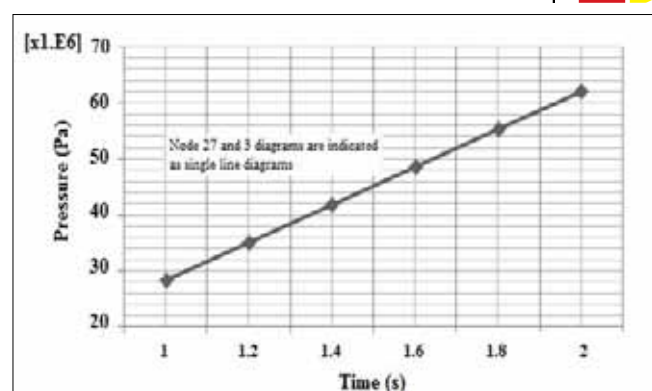
در این گام بعد از حفر سنگ، هدف از اعمال فشار گل حفاری در درون چاه، تعدیل تغییرات در مقدار کرنش پلاستیک، جابجایی و

۱ | مقادیر ورودی مدل‌سازی (۱)

تخلخل %	تراوایی Md	ضریب بایوت	نسبت پواسون	مقاومت چسبندگی MPa	مدول یانگ GPa	زاویه‌ی اصطکاک Degree
۱۰/۰۱	۵۶/۴۳	۰/۸۷۲	۰/۲۸	۰/۵۲	۵۰	۳۸/۱
مقاومت کششی Mpa	چگالی Kg/m ³	فشار منفذی MPa	تنش افقی حداکثر MPa	تنش افقی حداقل MPa	تنش قائم برجا MPa	ضریب پوکی
۲/۳۷	۲۸۲۰	۳۲/۵۰	۵۲/۸۷	۴۸/۸۴	۷۰/۶۸	۰/۱۱



شکل ۶ | نمایش جایگاه گره‌های-۲۷ و ۳



شکل ۷ | افزایش فشار چاه (پاسکال) به صورت خطی بر حسب زمان تحلیل

(جدول ۲-۲). انتخاب مقدار بهینه‌ی فشار گل در محدوده‌ی مجاز بر مبنای حداقل جابجایی و مقدار بهینه‌ی تنش و کرنش پلاستیک است.

۳-۳- حد بالای گل حفاری

ادامه‌ی آنالیز حساسیت روی متغیرها مثل روال طی شده‌ی قبل ارائه گردیده است. مدل پایه با تغییر تک تک متغیرها E, ν بررسی شد اما نتایج دقیق و قطعی به دست نیامد. بنابراین مدل یانگ و ضریب پواسون با استفاده از رابطه‌ی که از قانون هوک گرفته شده کمی سازی و بی بعد گردید و آنالیز حساسیت در نقطه‌ای از چاه افقی گره‌ی ۲۷- (شکل ۶-۶) تکرار و به نتایج قابل اتکایی منجر شد. نتایج حاصل، ارتباط مستقیمی با تراکم پذیری سنگ دارد؛ چراکه مدول بالک $(K=37.88 \text{ GPa})$ که غالباً مدول تراکم پذیری نامیده می شود در رابطه‌ی هوک-۲ ارائه شده است.

$$E = 3K(1 - \nu) \quad (2)$$

دلیل بروز ناپایداری، کرنش‌های پلاستیک برگشت ناپذیر حاصل از تنش‌های وارد بر چاه است. نتایج حاصل از تغییرات مدول یانگ و ضریب پواسون عکس یکدیگر بود؛ به عبارت دیگر برخلاف ضریب پواسون، افزایش مدول یانگ، نمودار حد بالای فشار سیال را صعودی کرد (شکل ۱۰-۱). مدول یانگ در واقع شیب نمودار تنش و کرنش است؛ بنابراین معیار خوبی برای قابلیت انعطاف پذیری هر محیط جامدی مثل سنگ است. با افزایش مدول یانگ، سنگ تنش‌های بیشتری را در خود می پذیرد، با فاصله‌ی دورتری از شروع گام حفاری بر مقاومت تسلیم غلبه شده و روند رشد کرنش‌های پلاستیک افزایش می یابد. به عبارت دیگر تغییر شکل پذیری سنگ کمتر می شود و برای شکست

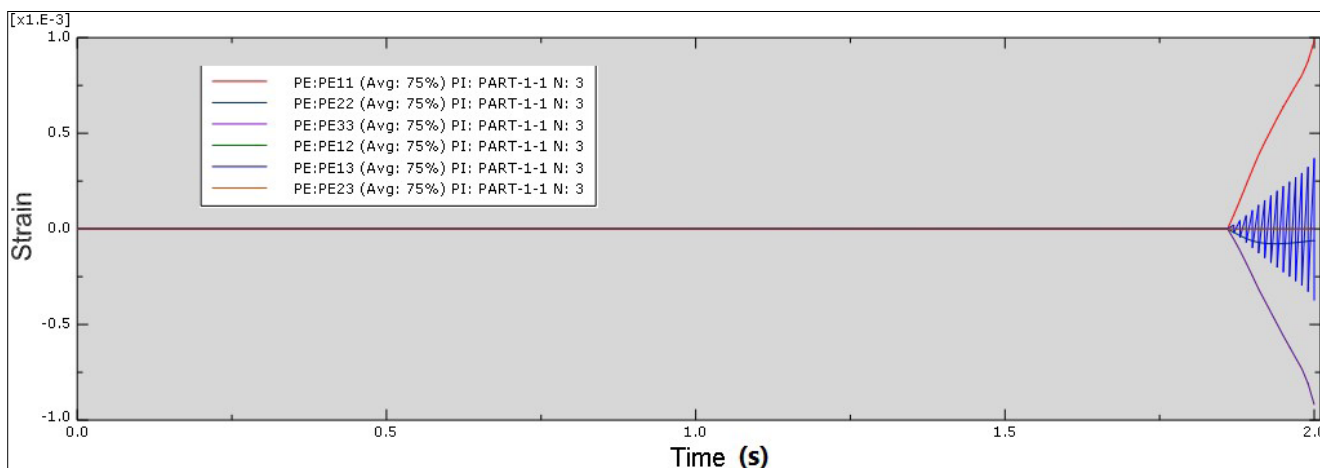
افزایشی را طی خواهند کرد (شکل‌های ۸-۹). اعمال فشار گل از زمان ۱/۸۷ ثانیه (معادل ۵۷/۵۸ مگاپاسکال فشار چاه؛ شکل ۷-۷) باعث به حد تسلیم رسیدن سنگ و ایجاد کرنش‌های پلاستیک در دیواره‌ی چاه شد و چاه را با ناپایداری و احتمالاً شکست و ریزش مواجه کرد.

۳-۲- حد پایین گل حفاری

آنالیز تنش در نقطه‌ای از چاه افقی گره‌ی ۳- شکل ۶-۶ در گام حفاری و اعمال فشار با افزایش فشار چاه از فشار منفذی تا فشار شکست کششی در محدوده‌ی زمانی ۲-۱ ثانیه است. مقدار یابجایی در مقطع چاه نسبت به زمان در مقطع چاه با افزایش فشار در پنجره‌ی مجاز گل روندی کاهشی می یابد و بعد از زمان بهینه تا حد فشار شکست، روندی افزایشی دارد.

نقطه‌ی عطف روند کاهشی و افزایشی که حداقل جابجایی ممکن را دارد زمان ۱/۴۵ ثانیه از گام حفاری است. با توجه به نمودار تنش در مقطع چاه نسبت به زمان (شکل ۹-۹) در این بررسی فشار چاه در محدوده‌ی بین ۲۸/۳۵ مگاپاسکال یعنی حد پایین پنجره‌ی گل تا حد بالای پنجره‌ی گل یعنی ۵۷/۵۸ مگاپاسکال که حد گسیختگی چاه است تحلیل حساسیت شد و پایدارترین فشار گل مشاهده گردید. با توجه به شکل ۷-۷ در زمان ۱/۴۵ ثانیه فشار ۴۳/۴۷ مگاپاسکال است

۲ مقادیر فشار گل حاصل از نتایج شبیه سازی			
متغیر	Optimum value	Fracture Pressure	Lower limit
زمان (ثانیه)	۱/۴۵	۱/۸۷	۱
فشار گل (MPa)	۴۳/۴۷	۵۷/۵۸	۲۸/۳۵
تنش وارد بر دیواره‌ی چاه (MPa)	۲۵/۵۲	۳۳/۴۹	۲۰/۱۰



سنگ است، تنش برشی برای ایجاد کرنش افزایش یافته و فشار لازم جهت ایجاد فاز پلاستیک و تسلیم ماده‌ی سنگ و فشار حد بالای گل افزایش می‌یابد. زاویه‌ی اصطکاک داخلی از متغیرهای مقاومتی سنگ است. این زاویه در واقع بیانگر وابستگی مقاومت سنگ به فشارهای جانبی در برابر شکست است. به عبارت دیگر هرچه مقدار این زاویه بیشتر باشد ناحیه‌ی مربوط به سالم ماندن سنگ، فضای بیشتری را در اختیار داشته و در اثر ارتباط بین ذرات سنگ، فشار جهت ایجاد فاز پلاستیک افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به $\tan\phi$ شیب خط نمودار معیار شکست موهر-کلمب هر قدر زاویه‌ی اصطکاک بیشتری شود فشار جهت ایجاد فاز پلاستیک نیز افزایش می‌یابد (شکل-۱۱). با توجه به نتایج حاصل، تغییرات مدول یانگ بیشترین تأثیر را در فشار سیال ایمن دارد.

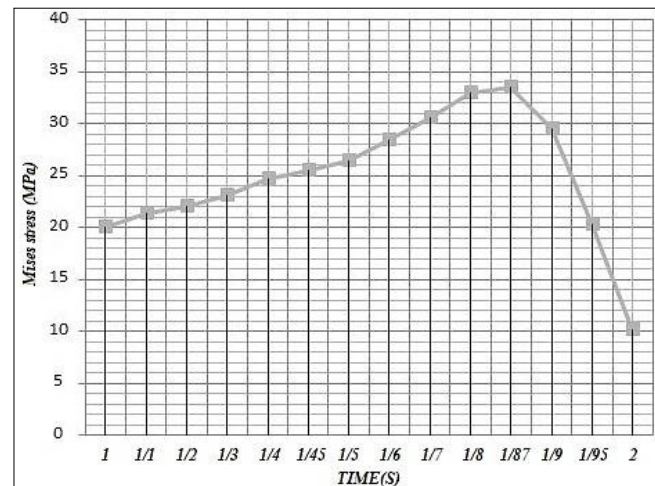
نتیجه‌گیری

با فرض حفر چاه افقی در راستای تنش افقی حداقل و وجود رژیم گسلش نرمال، نتایج زیر حاصل می‌شود:

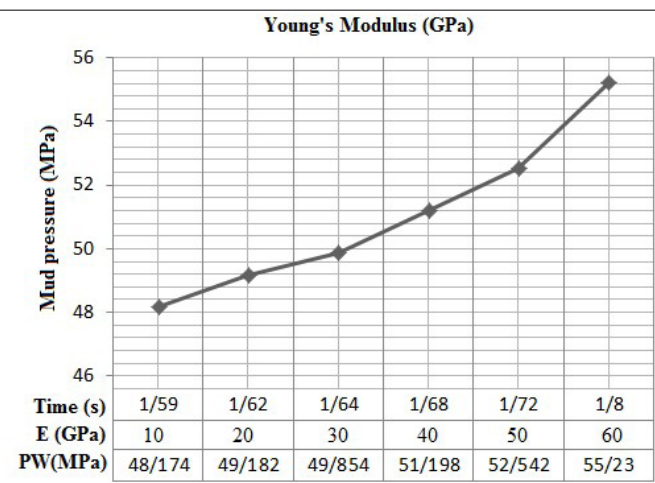
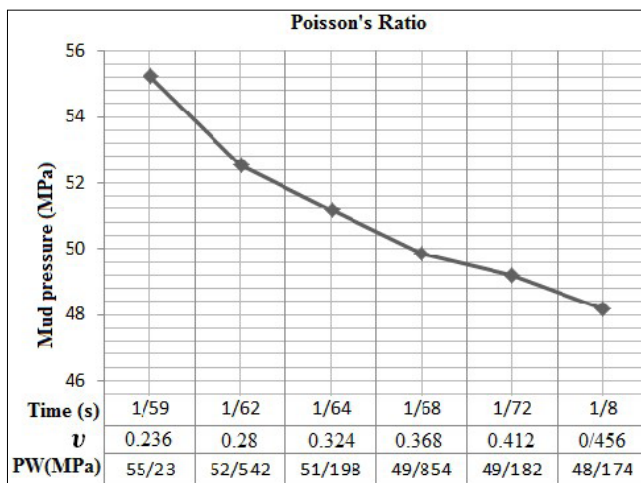
- به کمک آنالیز حساسیت می‌توان محدودده‌ی دقیق‌تری از پنجره‌ی گل را تعیین کرد. با توجه به تقسیم واحد زمان به قسمت‌های کوچک (۰/۰۱ ثانیه) می‌توان نتیجه گرفت اعداد حاصل دقت بیشتری دارند.
- با توجه به نحوه‌ی بررسی ناحیه‌ی پلاستیک و نحوه‌ی تعیین فشار بهینه در نمودار جابجایی، در صورت امکان می‌توان فشار بهینه‌ی زیرتعدادی را جهت حفاری تعیین کرد.
- با افزایش چسبندگی از ۰/۵ تا ۶/۵ مگاپاسکال در بازه‌ی زمانی ۰/۱۳ ثانیه از گام حفاری حدود بالای گل حفاری ۴/۳۷ مگاپاسکال افزایش یافت. تنش برشی برای ایجاد کرنش افزایش یافته و فشار مورد نیاز برای ایجاد فاز پلاستیک و تسلیم سنگ بیشتر می‌شود. بنابراین

برشی نیاز به فشار بیشتری دارد. برخلاف مدول یانگ و همان‌طور که در نتایج آنالیز حساسیت این متغیر مشاهده شد با افزایش نسبت پواسون سنگ ضعیف‌تر می‌شود و سهم کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد. هر قدر نسبت پواسون کمتر باشد سنگ تنش‌های بیشتری را می‌پذیرد. بنابراین همان‌طور که در نمودار شکل-۱۰ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت پواسون سنگ کرنش بیشتری از خود نشان می‌دهد اما نمی‌تواند در مقابل تنش بیشتری مقاومت کند و سریع‌تر با شکست مواجه می‌شود.

نتایج تغییرات چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک به کمک نمودار معیار شکست موهر-کلمب مطالعه شد که افزایش هر یک از این دو متغیر، افزایش حد بالای فشار سیال را به دنبال داشت (شکل-۱۱). همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش چسبندگی که ناشی از مستحکم‌تر شدن



شکل ۹ | نمودار تنش در مقطع چاه نسبت به زمان



شکل ۱۰ | تغییرات حد بالای فشار گل نسبت به مدول یانگ و نسبت پواسون

از گام حفاری، سنگ کرنش بیشتری از خود نشان می‌دهد و نمی‌تواند در مقابل تنش‌های بیشتر مقاومت کند. بنابراین حد بالای گل حفاری ۷/۰۵۶ مگاپاسکال کاهش می‌یابد.

■ با توجه به $\tan\phi$ (شیب خط نمودار معیار شکست موهر-کلمب)، در بازه‌ی زمانی ۰/۴۸ ثانیه از گام حفاری، هرچه این شیب از ۲۰ تا ۴۵ درجه افزایش یابد تنش معادل برای ایجاد شکست نیز بیشتر می‌شود. در نتیجه فشار جهت ایجاد فاز پلاستیک و حدود بالای گل حفاری نیز حدود ۱۶/۱۲ مگاپاسکال افزایش می‌یابد و پنجره‌ی گل حفاری گسترده‌تر می‌شود.

■ با اعمال فشار منفذی و اثر نفوذ آن در سنگ و همچنین اعمال فشار گل در چاه، شبیه‌سازی آنالیز استاتیکی پایداری چاه با دقت بیشتری انجام شد؛ زیرا وجود سیال در درون سنگ ناپایداری بیشتری ایجاد کرده است. ■

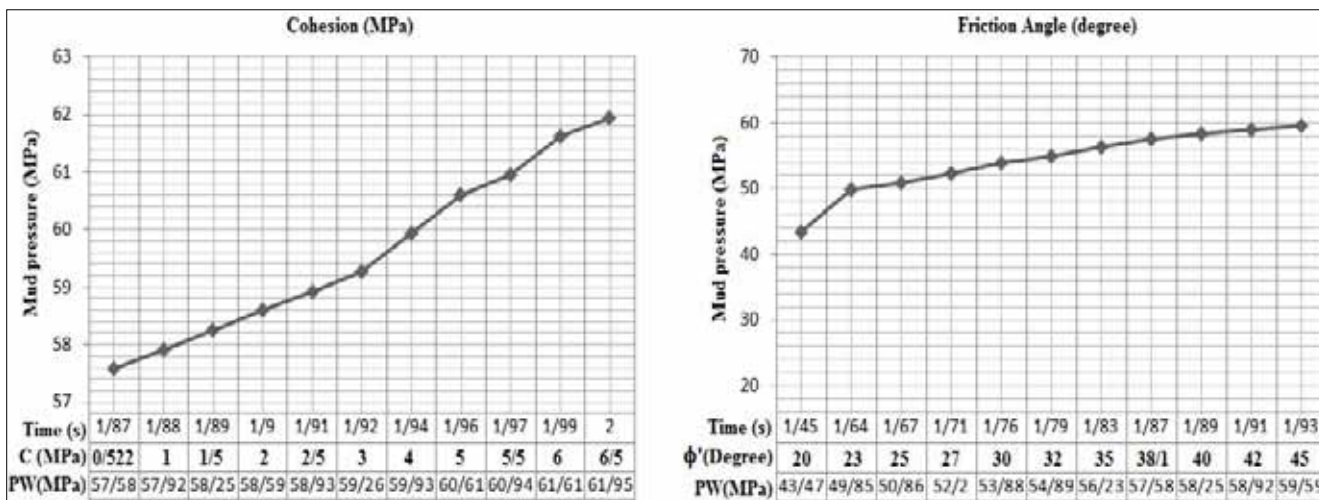
پنجره‌ی گل حفاری گسترده‌تر می‌شود.

■ با افزایش مدول یانگ، سنگ متراکم‌تر می‌شود و به‌دنبال سیر صعودی حد بالای گل حفاری، بازه‌ی پنجره‌ی گل افزایش می‌یابد (آنالیز مدول یانگ از ۱۰ تا ۶۰ گیگاپاسکال در بازه‌ی زمانی ۰/۲۱ ثانیه از گام حفاری و تغییرات ۷/۰۵۶ مگاپاسکالی از حد بالای گل حفاری). بنابراین پنجره‌ی گل حفاری گسترده‌تر می‌شود.

■ بررسی موازی رابطه‌ی معکوس نسبت پواسون و مدول یانگ به‌کمک مدول بالک (که اغلب مدول تراکم‌پذیری نامیده می‌شود) نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. مدول یانگ بیشترین تأثیر را در فشار سیال ایمن دارد.

■ چاه افقی حفر شده در راستای تنش افقی حداقل در برابر تنش افقی حداکثر پایدارتر است. ضمن اینکه در حفر چاه در راستای تنش افقی حداقل، گسیختگی برشی در راستای تنش افقی حداکثر و گسیختگی کششی در راستای تنش قائم پدید می‌آید.

■ با افزایش نسبت پواسون از ۰/۲۳ تا ۰/۴۵ در بازه‌ی زمانی ۰/۲۱ ثانیه



تغییرات حد بالای فشار گل نسبت به چسبندگی و زاویه اصطکاک

منابع

- [1] ترابی، امیرحسام. گزارش پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت دانشگاه علوم و تحقیقات تهران با عنوان "تأثیر عدم قطعیت متغیرهای ژئومکانیکی بر تحلیل پایداری چاه‌های افقی در مقطع شیلی، مطالعه موردی میدان پارس جنوبی" ۱۳۹۴
- [2] Fjaer, E., "Petroleum Related Rock Mechanics", Elsevier Publication Books, p. 491, 2008.
- [3] Zoback, M. D. "Reservoir Geomechanics", Cambridge University Press, p. 464, 2007.
- [4] Aadny, B.S., "Introduction to special issue on borehole stability". J. of Pet. Sci. Eng. 38, 792003 ,82-.
- [5] Shuling Li, Jeff George, and Cary Purdy, "Pore-Pressure and Wellbore-Stability Prediction to Increase Drilling Efficiency". Journal of Petroleum Technology, 2012.
- [6] Capasso G. and Musso G., "Evaluation of Stress and Strain Induced by the Rock
- Compaction on a Hydrocarbon Well Completion Using Contact Interfaces with ABAQUS", MI, Italy/new Politecnico di Torino, Italy, 2010.
- [7] Lee H., Ong S., Azeemudin M., Goodman H. "A wellbore stability model for formations with anisotropic rock strengths", Journal of Petroleum Science and Engineering, Volumes 96-97, Pages 1092012 ,119-.
- [8] Li Qiuguo, Xing Zhang and Khalid Al-Ghamari, "3-D Geomechanical Modeling and Wellbore Stability Analysis in Abu Butabul Field", Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [9] Carvalho Coelho L., Claudio Soares A., Francisco N., Ebecken F., Alves J., Landau L. "The impact of constitutive modeling of porous rocks on 2-D wellbore stability analysis Original Research Article, Journal of Petroleum Science and Engineering", Volume 46, Issues 1-2, Pages 812005 ,100-.
- [10] ABAQUS Documentation, Simulia Corporation, Version 6.11.2010 ,1-.