

مقاله پژوهشی

مطالعه تحلیلی و عددی ژئومکانیک مخزن جهت مطالعه امکان پذیری حفاری  
فروتعادلی در سازندهای ماسه سنگی

محمدسعید امینی<sup>۱\*</sup>؛ سعید نیکوسخن<sup>۲</sup>؛ علی مرتضوی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد؛ مکانیک سنگ؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵

شناسه دیجیتال (DOI): 1022107/jpg.2022.351326.1174

واژگان کلیدی	چکیده
امکان سنجی حفاری فروتعادلی، پنجره ایمن گل حفاری، ناپایداری چاه نفت، لاگ نفتی، ژئولاگ	این مقاله بر کاربرد مدل سازی عددی و تحلیلی به منظور امکان سنجی حفاری فروتعادلی در یکی از میادین نفتی مناطق مرکزی ایران و در سازندهای ماسه سنگی که بر تحلیل یک بعدی از نرم افزار ژئولاگ و نرم افزار آباکوس متمرکز شده است. در بخش حل تحلیلی از روابط الاستیک و پلاستیک همچنین برای پایداری دیواره، از روابط مختلف استفاده شده است. میدان نفتی مناطق مرکزی ایران یکی از میادین بزرگ جنوب غرب ایران است که همواره با مشکل هرزروی سیال و مشکلات پایداری دیواره چاه همراه است. گزارشات حفاری و لاگ های تهیه شده از این میدان نشان می دهد که در یکی از چاه ها فشار وارده گل حفاری به دیواره ۳۳ مگاپاسکال است و با توجه به این میزان فشار گل پایداری چاه در طول مسیر تا حدودی با ریسک ریزش دیواره ایجاد شده است. شبیه سازی با مدل یک بعدی ژئولاگ و حل تحلیلی انجام شده است که ناپایدارترین لایه مخزن با توجه به فشار گل استفاده شده را محیط ناامن از لحاظ پایداری نشان می دهد که با استفاده از اصلاح فشار گل حفاری و تعیین پنجره ایمن گل حفاری با معیارهای موهر-کلمب و شاخص تعیین پایداری کلمب به یک پنجره ایمن گل حفاری برای هر دو روش فروتعادلی و فراتعادلی ممکن کرده است که با توجه به نتایج بدست آمده جهت امکان سنجی حفاری فروتعادلی به تعیین گل بهینه و فشار گل بهینه برای انجام حفاری فروتعادلی منجر شد که این میزان فشار گل اصلاح شده در روش حفاری فراتعادلی ۴۳/۹۰ مگاپاسکال است که این فشار در بخش حفاری فروتعادلی، ۳۷ مگاپاسکال است.

تولید ماسه، بهره دهی چاه ها در مخازن شکافدار، مشکلات آینده ذخیره سازی گاز و غیره، مطالعات ژئومکانیکی مورد توجه جدی قرار نگرفته است. به همین دلیل اطلاعات ناچیزی در مورد خواص مکانیکی سنگ مخزن و پوش سنگ میادین هیدروکربونی موجود است. در بسیاری از میادین تولیدی کشور، هیچ گونه آزمایش مکانیک سنگ انجام نشده و بانک اطلاعاتی در این باره تهیه نگردیده است. در اکثر شرکت های نفتی، مراکز تحقیقاتی و دانشگاه های دنیا، ژئومکانیک نفت

۱. پیش گفتار

کاربرد مکانیک سنگ از سال ها پیش در بخش های مختلف صنعت نفت دنیا و در موضوعاتی چون شکافت هیدرولیکی، ذخیره سازی زیرزمینی گاز، ماسه دهی چاه ها، نشست سطح زمین یا کف دریا، فعال شدن گسل ها، تغییر تراوایی، بهره دهی چاه ها، ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین و غیره، مطرح شده و پروژه های زیادی در رابطه با آن تعریف گردیده است. در ایران به رغم ثبت مشکلاتی نظیر مچالگی لوله جداری،

مورد توجه ویژه قرار گرفته است. در برخی از این شرکت‌ها بخش ویژه‌ای به این عنوان تشکیل شده است؛ این بخش بر تحقیق و اجرای پروژه‌های مربوط به موضوع یاد شده تمرکز دارد [۱]. تکنولوژی حفاری در طول سال‌های متمادی توسعه یافته. از دلایل اصلی برای پیشرفت در این تکنولوژی افزایش دائمی درخواست انرژی بوده است، به عنوان مثال نفت، گاز و همچنین افزایش قیمت انرژی. این دلایل پیش برنده صنعت نفت برای حفاری در مناطقی هستند که در گذشته محدودیت‌های تکنولوژیکی و اقتصادی داشتند. یکی از این روش‌ها حفاری فروتعدالی می‌باشد که در حال کمک به صنعت و باعث ایجاد افق‌های جدید در زمینه اکتشاف و تولید نفت و گاز است. حفاری فروتعدالی به عنوان یک مفهوم جدید در صنعت نیست بلکه به قدمت حفاری است. در واقع این تکنولوژی به عنوان یک روش خطرناک برای سلامتی و امنیت پرسنل شاغل در محوطه در نظر گرفته می‌شد. این روش در بخش‌های امنیت و تکنولوژی کم و بیش در صد سال گذشته رشد کرده است. به منظور شکوفانگه داشتن این تکنولوژی، نیاز مداوم به نوآوری و گسترش تکنولوژی موجود می‌باشد که باعث بالا رفتن اعتبار و ارزش افزوده صنعت خواهد بود [۲]. محققان زیادی در مورد عوامل مؤثر بر پایداری و مسائل مرتبط با ناپایداری چاه نفت تحقیق کرده‌اند که می‌توان به مواردی اشاره کرد. عجمی و زیمیرمان [۳] پایداری چاه‌های نفت در سه رژیم تنش گسل نرمال، گسل معکوس و گسل امتدادلغز را مورد بررسی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند هرچه چاه نسبت به حالت قائم زاویه‌دارتر، یعنی هرچه افقی‌تر باشد ناپایداری در رژیم تنش نرمال بیشتر و با افزایش زاویه جهت شیب نسبت به تنش افقی بزرگ پایداری بهتر می‌شود. در رژیم تنش امتدادلغز چاه افقی نسبت به چاه قائم پایداری بیشتر و افزایش زاویه جهت شیب موجب ناپایداری‌تر شدن چاه می‌شود. در رژیم تنش معکوس وابسته به جهت حفاری پایداری در زوایای شیب مختلف فرق می‌کند و کلاً افزایش جهت شیب ناپایداری را بیشتر می‌کند. در مورد انتخاب معیار شکست نیز ایشان استفاده از معیار موگی-کلمب در مقایسه با موهر-کلمب را پیشنهاد دادند. فن و همکاران [۴] با روش تحلیلی و در مخزن گازی به تحلیل خواص پتروفیزیکی پرداختند. با استفاده از این روش تخلخل و نفوذپذیری مخازن گازی به صورت پویا بدست می‌آید که می‌تواند یک مبنای زمان واقعی

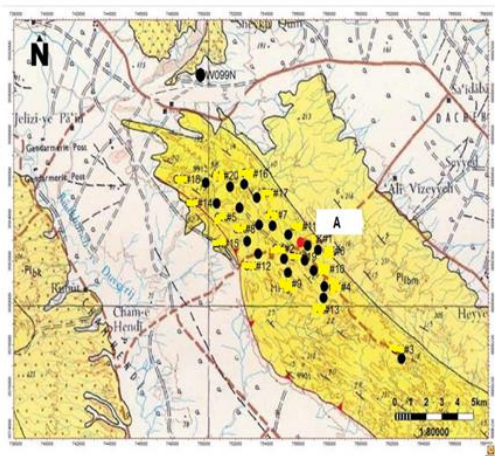
برای ارزیابی بیشتر خواص فیزیکی مخازن گازی فراهم کند. رابطه‌ی بین افت فشار چاه و نشست گاز مخزن در هنگام حفاری بر اساس اصل جمع آثار تعیین شد و معادله نفوذپذیری مخزن گاز بدست آمد. واحدهای تشکیل باید به طور نامحدودی تقسیم شوند تا راندمان بالایی داشته باشند. از این رو محاسبات مخازن مکمل از این محاسبات به دور است. همچنین ژانگ و همکاران [۵] با روش تحلیلی و عددی و با نوع سازند سنگ ضعیف بررسی کردند. هر دو مدل تحلیلی و مدل عددی نشان می‌دهد که تنش فشاری در حالت فرا تعادلی به شرایط فروتعدالی در تنش کششی تبدیل می‌شود. زون شکست در حفاری فروتعدالی در اعماق زیاد است (علت نرخ نفوذ بالای حفاری فروتعدالی نسبت به فرائعدالی). تغییر شکل در نتیجه تخلیه فشارهای سنگی ایجاد می‌شود که در حفاری فرو تعادلی بیشتر از حفاری فرائعدالی است. پایین نگه داشتن دمای مایع حفاری به تنش‌های منطقه تأثیر گذار بوده و فشار کمی برای شکست سنگ لازم است. وانگ و همکاران [۶] نیز در ادامه این بررسی‌ها با استفاده از روش تحلیلی و عددی و با نوع مخزن گازی به تحلیل پرداختند. با افزایش هوادهی در حین حفاری فروتعدالی به صورت افقی، تأثیر نشست جریان در پایداری چاه افزایش می‌یابد و تنش شعاعی در دیواره چاه کاهش و مقدار هوادهی افزایش می‌یابد، که این افزایش با افزایش فاصله از چاه است و تنش مماسی نیز افزایش می‌یابد. آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که پایداری چاه و نگهداری بهتر در حین حفاری فروتعدالی به صورت افقی است. برای همین چاه اغلب پایدار بوده و فشارمنفذی کم و زاویه اصطکاک و چسبندگی زیاد هستند. خزری و همکاران [۷] با استفاده از روش عددی جریان عملیات حفاری فروتعدالی با مدل دو سیال جریان دو فازی را شبیه‌سازی کردند. برای یک نرخ جریان گاز مشخص و پیش فرض، محدودیتی برای سرعت جریان مایع وجود دارد، پس از آن شرایط شرط نمی‌تواند برقرار شود. از طرف دیگر، با توجه به سرعت جریان مایع و فشار، یک جریان خاص جریان گاز وجود دارد که به حداقل فشار ته چاه می‌رسد، پس از آن فشار ته چاه دوباره افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان مایع، میزان جریان گاز بحرانی کاهش می‌یابد. سرانجام، مشخص می‌شود که برای نگه داشتن چاه در شرایط حفاری فروتعدالی، حد بالایی برای فشار وجود دارد. دانیالی و همکاران [۸] نیز



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی میدان مناطق مرکزی ایران [۹]

### ۳. خلاصه گزارش حفاری یکی از میادین نفتی مناطق مرکزی ایران

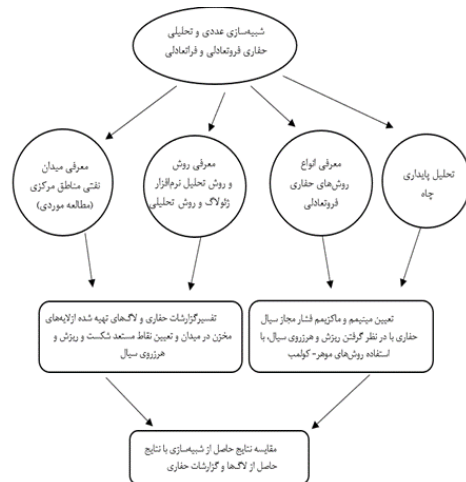
ساختار زمین‌شناسی این میدان در افق آسماری ۲۸،۵ کیلومتر طول و ۴،۵ کیلومتر عرض دارد و در جهت شمال غربی و جنوب شرقی گسترده شده است. سنگ مخزن از نوع آسماری است و هدف از حفر چاه تولید نفت از مخزن آسماری است. موقعیت دقیق چاه مورد مطالعه در شکل ۳ مشخص است [۱۰].



شکل ۳. موقعیت دقیق یکی از چاه‌های نفتی مناطق مرکزی [۱۰]

عمق حفاری شده در این چاه تا ۳۷۶۳ متر است که چاه به صورت تلسکوپی با روش فراتعدالی حفر شده است و در سال ۱۳۹۵ عملیات حفاری به پایان رسیده است. عملیات حفاری این چاه با برپایی دکل NDC-۱۱۵ در تاریخ ۱۳۹۵، ۱۲/۱۷ در

با روش تحلیلی آباکوس و با نوع سازند سنگ مخزن آسماری میدان نفتی موضوع را بررسی کردند. با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، به تحلیل استاتیکی و بررسی پایداری دیواره چاه در عملیات حفاری فراتعدالی در سنگ مخزن آسماری میدان نفتی پرداخته شده است. اگر فشار گل اعمال شده به این چاه کمتر از ۲۲ مگاپاسکال باشد چاه وارد ناحیه پلاستیک شده و دیواره چاه ریزش می‌کند. در حفاری فراتعدالی وزن گل را تا آنجا که می‌توان باید کاهش داد که خطر ناپایداری شدن دیواره چاه وجود نداشته باشد. با افزایش فشار گل حفاری، میزان تنش فون مایزس که بیان‌گر خرابی جداره است افزایش داشته است. کرنش لگاریتمی با شیب یکسان با سایر پارامترها با افزایش فشار گل حفاری افزایش داشته است. فشار گل حفاری ۲۰ مگا پاسکال حد پایداری دیواره چاه در حفاری فراتعدالی در میدان مورد مطالعه می‌باشد. در فلوجارت شکل ۱ متدولوژی تحقیق و مراحل تحلیل مسئله آورده شده است.



شکل ۱. متدولوژی تحقیق و مراحل تحلیل مسئله

### ۲. مطالعه موردی و زمین‌شناسی منطقه

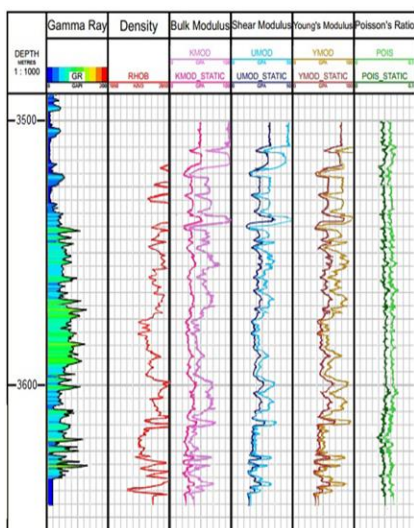
میدان مناطق مرکزی ایران در منتهی الیه شمالی فروافتادگی دزفول در نزدیکی مرز جنوبی ناحیه لرستان و در فاصله حدود ۱۸۰ کیلومتری شمال غربی اهواز قرار دارد شکل ۲. اولین چاه در این میدان در سال ۱۳۴۵ حفر شد که به دلیل بروز مشکلات فنی متروکه اعلام گردید. در سال ۱۳۴۶ وجود نفت در چاه ۲ میدان و در مخزن آسماری به اثبات رسید [۹].

الاستیک استاتیکی رابطه (۶) برای لیتولوژی های مختلف است که در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱. محاسبه مدول الاستیک استاتیکی برای لیتولوژی های مختلف

شماره	سنگ	رابطه
۱	هر نوع سنگ	$E = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x}$
۲	هر نوع سنگ	$\nu = -\frac{\epsilon_d}{\epsilon_a}$
۳	هر نوع سنگ	$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$
۴	هر نوع سنگ	$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$
۵	ماسه سنگ	$E_{dyn} = RHOB \times V_s^2 \times \left( \frac{3V_c^2 - V_s^2}{V_c^2 - V_s^2} \right) \times (0.0003048^2) \times 10^2$
۶	ماسه سنگ	$E_s = 0.0293 \times (E_{dyn})^2 + 0.4533 \times E_{dyn}$
۷	ماسه سنگ	$\nu_{dyn} = \frac{1}{2} \left( \frac{\left( \frac{DTS}{DTC} \right)^2 - 1}{\left( \frac{DTS}{DTC} \right)^2 + 1} \right)$
۸	ماسه سنگ	$\nu_s = 0.8\nu_{dyn}$

شکل ۴ نتایج به دست آمده از محاسبه پارامترهای الاستیک یکی از را نمایش می دهد. در شکل ۴ ستون اول و دوم از سمت چپ به ترتیب شامل عمق و مقادیر اشعه گاما، ستون سوم بیانگر جرم مخصوص، ستون چهارم، پنجم و ششم به ترتیب مقادیر استاتیکی و دینامیکی مدول های بالک، برشی و یانگ و در نهایت ستون هفتم نسبت پواسون استاتیکی و دینامیکی در اعماق مورد نظر یکی از چاه های نفتی ایران است.



شکل ۴. نتایج تغییرات پارامترهای الاستیک استاتیکی و دینامیکی سنگ در یکی از چاه های نفتی مناطق مرکزی ایران حاصل از مدل سازی

آغاز و حفاری به صورت عمودی از سطح زمین (سازند آغاجاری) تا عمق ۲۸۳۵ متری (گچساران- ۴) انجام شد. سپس حفاری چاه به صورت انحرافی از عمق ۲۸۳۵ متری تا عمق ۳۵۰۷ متری انجام شد. به دلیل گیرکردن لوله ها و عدم موفقیت جهت آزاد سازی لوله ها، چاه بسته شد و تصمیم گرفته شد که چاه از عمق ۲۵۲۶ متری (نقطه شروع کنار گذر- ۱، درون گچساران- ۵-۷) تا ۲۵۴۶ متری کج گردد. ادامه حفاری به صورت انحرافی از عمق ۲۵۴۶ متری تا عمق ۳۷۶۳/۵ متری (عمق نهایی- درون سازند آسماری) انجام گردید. [۱۰].

#### ۴. ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه

در این شرایط باید داده مذکور مورد تحلیل قرار گیرد تا داده های پوچ و پرت در صورت امکان با کمک رگرسیون توسط دیگر پارامتر درون یابی شوند و در غیر این صورت از لیست داده ها حذف شود. در یکی از چاه های نفتی مناطق مرکزی ایران تنها از عمق ۳۴۸۳ تا ۳۷۶۴ متر (بخش مخزن، بازه عمقی ۲۸۱ متر) کلیه پارامترهای مورد نیاز همگی با هم و با گام های برداشت متفاوت وجود دارند. ابتدا داده های پوچ شناسایی شده و با کمک رگرسیون (خطی و غیر خطی) توسط دیگر پارامترهای صحیح موجود در نرم افزار متلب و اکسل درون یابی شدند. سپس برای کاهش خطاها، پارامترها به ازای هر نیم متر میانگین گیری شدند.

#### ۵. پارامترهای الاستیک سنگ

خواص الاستیک سنگ را می توان شامل مدول الاستیک رابطه (۱)، نسبت پواسون رابطه (۲)، مدول برشی رابطه (۳) و مدول حجمی رابطه (۴) که در جدول (۱) آورده شده است دانست. [۱۱]. که در آن  $\sigma_x$  و  $\epsilon_x$  تنش و کرنش تک محوری هستند. نسبت پواسون برابر با نسبت کرنش جانبی ( $d\epsilon$ ) به کرنش محوری ( $d\epsilon$ ) سنگ است محاسبه می شود [۱۲] در روابط فوق،  $E_{dyn}$  و  $\nu_{dyn}$  به ترتیب مدول یانگ و فشاری و برشی، و زمان انتقال موج فشاری و برشی و نگار چگالی نسبت پواسون دینامیکی رابطه (۷) و نسبت پواسون استاتیکی از رابطه (۸)،  $V_C$  و  $V_S$  سرعت موج است بدست می آیند. برای به دست آوردن مدول الاستیک سنگ برای یکی از چاه های نفتی مناطق مرکزی ایران استفاده شده است. برای محاسبه مدول

## ۶. پارامترهای مقاومتی سنگ

مقاومت فشاری تک‌محوری یکی از پارامترهای مهم در تعیین محدوده تغییرات تنش‌های اصلی افقی است. به‌طور معمول این پارامتر از طریق آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری اندازه‌گیری می‌شود، هرچند دسترسی به مغزه‌های حفاری به‌خصوص در صنعت نفت کار آسانی نیست؛ به همین منظور روابط تجربی متعددی جهت محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از نگاره‌های پتروفیزیکی برای شرایط و جنس مختلف سازند ارائه شده است. [۱۳ و ۱۴].

### جدول ۲. محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری در سازندهای مختلف

شماره	سنگ	رابطه
۹	ماسه‌سنگ دریای شمال	$UCS = 1(2.48E - 6 \times (DT - 23.87) 23.87)$
۱۰	هر نوع سنگ	$\alpha = 1 - (1 - \phi)^{\frac{3}{1-\phi}}$

در این روابط  $UCS$  مقاومت فشاری تک‌محوری برحسب مگاپاسکال،  $E_s$  مدول الاستیک استاتیکی و  $E_{dyn}$  مدول الاستیک دینامیکی سنگ برحسب گیگاپاسکال،  $\Phi$  تخلخل و  $\alpha$  ضریب بایوت است تعداد روابط ارائه شده برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری برای سازندهای مختلف بسیار زیاد است. در این مطالعه با توجه به اینکه رابطه عاصف بر اساس سازندهای کربناته ایران به دست آمده، برای به دست آوردن مقاومت فشاری سازند یکی از این روابط (۹) جدول (۲) استفاده می‌شود. مقاومت کششی در سنگ بکر که با اختصار با  $To$  یا  $\sigma_t$  نمایش داده می‌شود، در مقایسه با مقاومت فشاری ناچیز است. [۱۵].

### جدول ۳. روابط مربوط به مقاومت کششی

شماره	انواع سنگ	رابطه
۱۱	انواع سنگ	$\sigma_t = 0.1(\sigma_c)$
۱۲	کربناته جنوب غربی ایران	$\sigma_t = 3.846\rho - 0.528\phi$
۱۳	کربناته جنوب غربی ایران	$\sigma_t = 0.001(\sigma_c)^2 - 0.024(\sigma_c) + 7.238$
۱۴	هر نوع سنگ	$C = \frac{2 \times \tan(45 + \frac{\phi}{2})}{UCS}$

در روابط فوق  $\sigma_t$  مقاومت کششی برحسب مگا پاسکال،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک‌محوری برحسب مگاپاسکال و  $\Phi$  تخلخل است. در این مطالعه با توجه به اینکه رابطه پیشنهادی [۱۶] بر اساس سازندهای کربناته ایران است، برای به دست آوردن

مقاومت کششی سازند یکی از چاه‌های نفتی مناطق مرکزی از رابطه (۱۳) استفاده می‌شود. چسبندگی سنگ را می‌توان به‌عنوان مقاومت برشی سنگ درحالی‌که تنش نرمالی بر سنگ اعمال نمی‌شود، تعریف نمود [۱۷]. زاویه اصطکاک داخلی برابر با شیب خط معیار شکست موهر-کولمب در نمودار تنش نرمال-تنش برشی است [۱۷]. روابط ارائه شده جهت به دست آوردن زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از خصوصیات پتروفیزیکی بسیار محدود است. از این رو از محدود روابط تجربی ارائه شده می‌توان استفاده نمود که برخی از این روابط در جدول ۴ قابل مشاهده است [۱۳].

### جدول ۴. روابط مربوط به زاویه اصطکاک داخلی

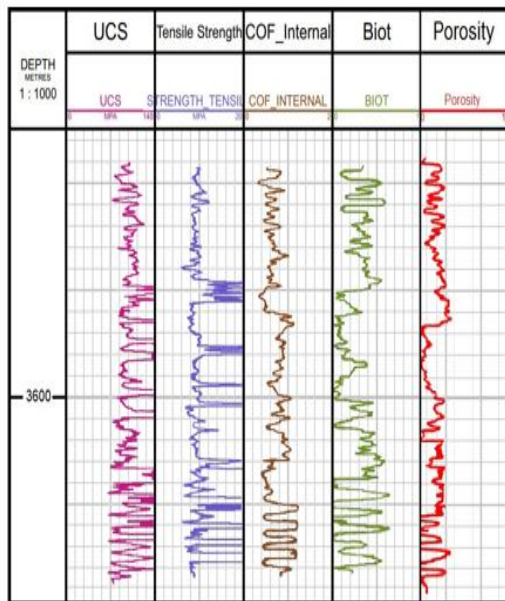
شماره	سنگ	رابطه
۱۵	خرد شونده	$\phi = 26.5 - 37.4 \times (1 - \Phi - V_{shale}) + 62.1 \times (1 - \Phi - V_{shale})^2$
۱۶	ماسه سنگ	$\phi = 57.8 - 105 \times \phi$
۱۷		$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{min,max}}$

در روابط فوق،  $V_{shale}$  حجم شیل برحسب درصد،  $GR$  پرتوگاما و  $\Phi$  تخلخل سنگ برحسب درصد است. می‌توان از رابطه زیر نیز برای محاسبه مقدار حجم شیل استفاده نمود [۱۸]. در این روابط  $GR_{max}$  و  $GR_{min}$  به ترتیب قرائت نگار پرتوگاما در نواحی بدون شیل و در شیل است. در این مطالعه با توجه به سازند ماسه‌سنگی قسمت موردنظر یکی از چاه‌های نفتی مناطق مرکزی رابطه (۱۶) برای به دست آوردن زاویه اصطکاک داخلی استفاده می‌شود. شکل ۵ خصوصیات مقاومتی سنگ بستر چاه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. در این شکل ستون اول از سمت چپ شامل عمق، ستون دوم بیانگر مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری، ستون سوم مقاومت کششی، ستون چهارم نشان‌دهنده ضریب اصطکاک داخلی و در نهایت ستون پنجم و ششم ضریب بایوت و تخلخل در اعماق موردنظر چاه مورد مطالعه است.

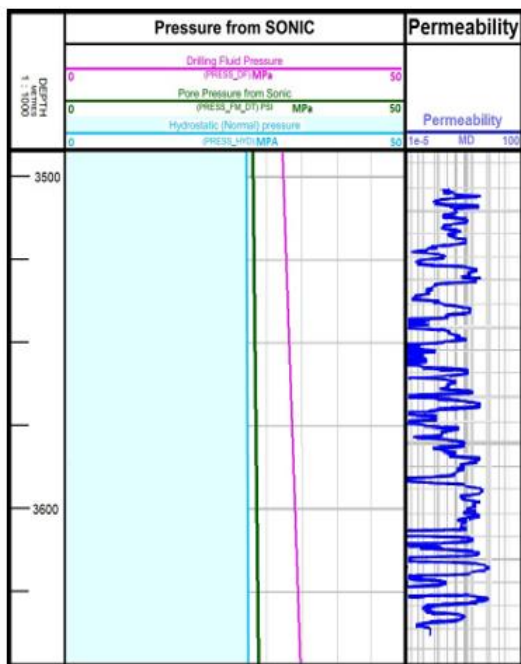
## ۷. فشارمنفدی

فشار منفدی، به فشار سیال موجود در تخلخل سنگ اطلاق می‌شود که با میزان نفوذپذیری و تخلخل سنگ، در ارتباط است. در برخی مواقع به دلیل لیتولوژی و یا تکتونیک، میزان فشار منفدی از حالت هیدروستاتیک خارج شده و شرایط غیرطبیعی اتفاق می‌افتد. همچنین اگر فشار سیال مخزن به

موردنظر قابل مشاهده است [۱۲].



شکل ۵. خصوصیات مقاومتی سنگ بستر یکی از مناطق مرکزی ایران



شکل ۶. تغییرات فشار هیدرواستاتیک، فشار منفذی و فشار گل حفاری چاه مورد مطالعه مناطق مرکزی ایران

۴۸ تا ۹۵ درصد وزن روباره برسد، شرایط فشار لیتواستاتیک اتفاق می‌افتد [۱۹]. به‌طور کلی فشار منفذی به دلیل ایجاد تنش مؤثر و کاستن مقاومت کششی و فشاری سنگ، یک پارامتر کلیدی در یک عملیات حفاری موفق، شناخت ویژگی‌های مخزن و در نتیجه تولید بهینه به حساب می‌آید. به‌منظور دستیابی به اطلاعات قابل اطمینان از فشار منفذی در شرایطی که وضعیت فشار منفذی بسیار متغیر و باعث مشکل است، استفاده از نگاره‌گیری کابلی لازم است. روش‌های اندازه‌گیری میدانی فشار منفذی، همچون روش MDT و یا DST پرهزینه و زمان‌بر هستند. از دیگر محدودیت‌های این روش‌ها می‌توان به محدود بودن تعداد آزمایش‌ها در نقاطی از چاه و عدم پیوستگی اطلاعات اشاره نمود [۲۰]. رابطه رایج با (۱۸) استفاده از زمان انتقال موج فشاری و چگالی توده سنگ برای محاسبه گرادیان فشار منفذی استفاده می‌شود:

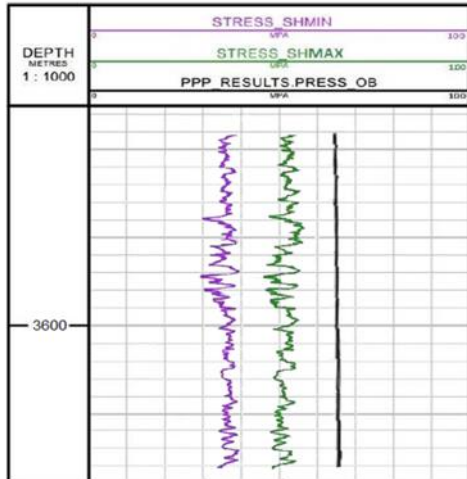
$$P_p = OBG - (OBG - P_g) \left( \frac{NCT}{DTC} \right)^3 \quad (18)$$

در اینجا  $P_p$  گرادیان فشار منفذی OBG، گرادیان تنش روباره  $P_g$  و  $DTC$  زمان انتقال موج فشاری و  $NCT$  زمان انتقال موج فشاری نرمال شده است. مقدار موج فشاری نرمال شده با استفاده از برازش منحنی خطی و یا غیرخطی بر روی نمودار انتقال موج فشاری به دست می‌آید. همچنین برای محاسبه فشار منفذی نرمال شده، چگالی آب از سطح زمین تا عمق ۹۰ متری معادل چگالی آب شرب و چگالی آب پایین‌تر از آن معادل چگالی شوراب در نظر گرفته می‌شود [۲۱]. در این پروژه به دلیل اطلاعات موجود از رابطه رایج ایتون [۲۰] استفاده می‌شود. نفوذپذیری ذاتی سنگ نیز طبق پیشنهاد [۲۲] از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\kappa = \sqrt{\frac{300}{w^4} \times \left( \frac{\phi}{S} \right)^w} \quad (19)$$

که در آن  $\kappa$  نفوذپذیری ذاتی سنگ،  $S$  درجه اشباع،  $\phi$  تخلخل و  $w$  ضریب بافت سنگ است [۲۲]. در شکل ۶ در ستون اول از سمت چپ فشار هیدرواستاتیک به رنگ آبی، فشار منفذی به رنگ سبز و فشار گل حفاری به رنگ بنفش و در ستون دوم نفوذپذیری ذاتی سنگ مخزن در اعماق

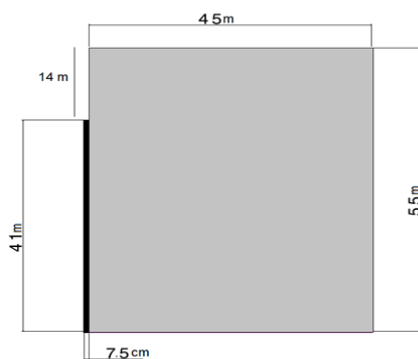
تنش عمودی از تنش افقی حداکثر و حداقل شرایط تکتونیک منطقه گسل نرمال پیش‌بینی می‌شود.



شکل ۷. مقادیر تنش‌های عمودی و افقی در چاه مورد مطالعه نفت مناطق مرکزی ایران

### ۱.۰. مدل‌سازی عددی

در این مقاله از حالت دو بعدی نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است که با توجه به این موضوع که در دید از روبه‌روی مدل و دیدن شرایط حفاری چاه از حالت تقارن محوری برای مدل‌سازی استفاده شده است که نصف مدل مورد بررسی قرار گرفته است. نمایی از مدل در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۸. نمایی از ابعاد و نما از روبه‌روی چاه شماره A در نرم‌افزار اتوکد

### ۱.۱.۰. خواص مواد

با توجه به جدول ۵ خواص مواد در شرایط چاه مورد نظر آورده شده است و بعد از اعمال این خواص در نرم‌افزار و با توجه به

### ۸. تنش‌های برجا

تنش قائم در هر نقطه از چاه معادل وزن روباره است؛ بنابراین انتگرال چگالی لایه‌های بالایی در نقطه موردنظر تنش قائم را تعیین می‌کند (رابطه ۲۰).

$$S_v = \rho_w g h_w \int_{h_w}^h \rho(z) g dz \approx \rho_w g (h_w + (h - h_w)) \quad (20)$$

که در آن  $\rho_w$  جرم مخصوص آب،  $h_w$  ارتفاع آب برای شرایطی که نقطه موردنظر زیر سطح آب قرار داشته باشد،  $\rho_h$  جرم مخصوص سنگ در هر عمق،  $h$  عمق نقطه موردنظر از سطح زمین و  $g$  شتاب جاذبه زمین است. چگالی ماتریکس سنگ در هر عمق از روی نگار چگالی قرائت می‌شود. [۱۳].

### ۹. کرنش و تنش‌های افقی

یکی از روش‌های پرکاربرد در این زمینه، مدل‌سازی شکستگی‌های برشی و کششی ناشی از تنش با کمک تخمین مقادیر تنش از روابط پروالاستیک است (رابطه ۲۱ و رابطه ۲۲) [۲۴]. بر طبق این روابط، تنش افقی حداقل و حداکثر برابر هستند با:

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_H + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_h \quad (21)$$

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_h + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_H \quad (22)$$

در این روابط  $\nu$  نسبت پواسون،  $P_p$  فشار منفذی و  $E$  مدول یانگ است [۲۵]. در روابط بالا  $\alpha$  ضریب بایوت است. همچنین  $\varepsilon_H$  و  $\varepsilon_h$  به ترتیب مقادیر کرنش تکتونیک در جهت محورهای تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر هستند که می‌توانند از روابط زیر محاسبه شوند [۲۶].

$$\varepsilon_h = \frac{\nu}{E} \sigma_v \times \left( \frac{1}{1-\nu} - 1 \right) \quad (23)$$

$$\varepsilon_H = \frac{\nu}{E} \sigma_v \times \left( 1 - \frac{\nu^2}{1-\nu} \right) \quad (24)$$

روش کار به این صورت است که برای اعماق موردنظر کرنش‌های تکتونیک به دست می‌آیند و در نهایت میانگین‌گیری می‌شوند.  $\varepsilon_H$  و  $\varepsilon_h$  برای چاه مورد مطالعه تخمین زده شده است. شکل ۷ نتایج به‌دست آمده برای مقادیر تنش را نشان می‌دهد که در آن خطوط مشکی، بنفش و سبز به ترتیب تنش عمودی، افقی حداقل و حداکثر است. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، به دلیل بیشتر بودن

تئوری حل مورد نظر نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

#### جدول ۵. خواص مواد مورد نظر در چاه شماره A

پارامتر	مقدار
مدول یانگ	۵۲ GPa
ضریب پواسون	۰/۳۱
مقاومت فشاری	۴۰ MPa
مقاومت کششی	۶۱ MPa
فشار منفذی	۵۵ MPa
تخلخل	۲۶٪
زاویه اصطکاک	۳۸،۴۵°
زاویه شکست	۶۵،۹°
چگالی	۲۸۰۰ Kg/m <sup>3</sup>
تنش عمودی	۹۱ MPa
تنش افقی حداکثر	۲۸ MPa
تنش افقی حداقل	۴۹ MPa
چسبندگی	۱۹ MPa
ضریب گذردهی	۱e-۸
تراکم پذیری	۰/۳

با توجه به مشخصات جدول ۵، مشخصات مکانیکی و هیدرولیکی مشخص است و با توجه به اینکه مقطع مورد بررسی از خاک سفت تشکیل شده است، فرآیند توامان هیدرومکانیک با استفاده از نرم افزار آباکوس در مرحله step, از حالت soil استفاده شده است که نتایج با توجه به اطلاعات واقعی همپوشانی لازم را دارد و این تحلیل با کمترین خطا قابل قبول است.

#### ۲.۱۰. تحلیل نتایج

با توجه به جدول ۶ تحلیل نتایج ۱ و جدول ۷ تحلیل نتایج ۲ حاصل از نرم افزار المان محدود آباکوس آورده شده است.

#### ۱۱. مراحل آنالیز پایداری چاه نفت و تعیین

##### دامنه گل حفاری

در این بخش به منظور تعیین تنش‌های وارده بر دیواره چاه یا وضعیت تنش‌ها در سازندهای مختلف استفاده شده است. معمولاً در این مرحله، فشار چاه، فشار گل حفاری، نامشخص است. هدف اصلی، تعیین فشار بحرانی و سپس پنجره ایمن

گل حفاری است. فشار بحرانی فشاری است که در آن شکست دیواره ( $P_{wf}$ ) و یا ریزش چاه ( $P_{wc}$ ) اتفاق می‌افتد و موجب گسیختگی چاه می‌شود. بنابراین هدف از تحلیل پایداری پی بردن به فشارهای ریزش و شکست چاه است و در نهایت دست‌یابی به یک فشار گل بهینه و پنجره ایمن گل حفاری برای حفاری و پایداری چاه [۱].

#### ۱.۱۱. فشار شکست چاه

ریزش دیواره چاه یک گسیختگی مکانیکی است که در صورت پایین بودن فشار داخل چاه اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در فشارهای بالای چاه، شکست کششی در دیواره‌ی چاه رخ می‌دهد، اگر فشار چاه کاهش یابد پدیده‌ای به نام ریزش دیواره چاه به وقوع می‌پیوندد. تحت این شرایط اگر روند کاهش فشار درون چاه ادامه یابد، به همان نسبت تنش شعاعی کم شده و تنش محیطی رفته رفته بزرگتر می‌شود، در نتیجه اختلاف قابل ملاحظه بین تنش‌های شعاعی و محیطی یک تنش برشی بزرگ بوجود خواهد آمد. چنانچه این تنش برشی به وجود آمده از تنش بحرانی بیشتر باشد، چاه دچار ریزش می‌شود. [۱]. فشار بحرانی چاه در نقطه‌ی شکست را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\sigma_{wf} = 3\sigma_x - \sigma_y - P_0 - \sigma_t \quad (25)$$

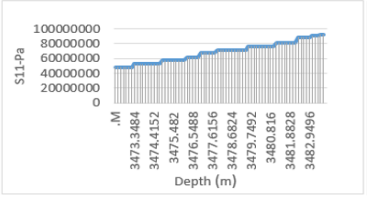
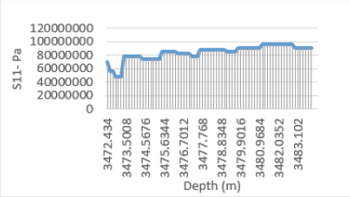
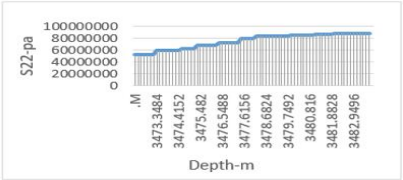
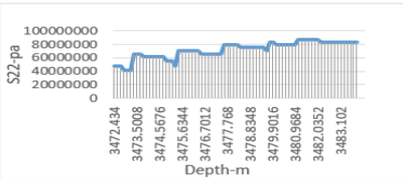
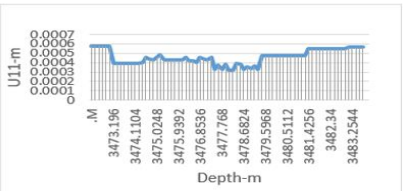
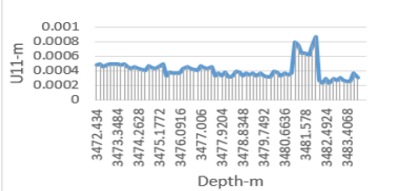
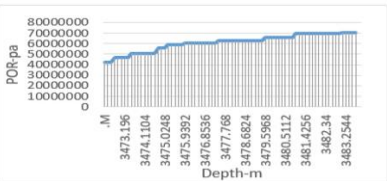
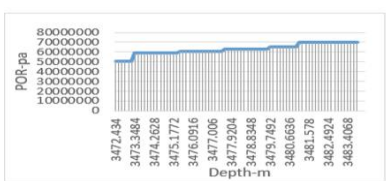
در این رابطه  $\sigma_{wf}$  فشار بحرانی شکست است و  $P_0$  فشار منفذی و  $\sigma_t$  تنش کششی است.

#### ۲.۱۱. فشار ریزش چاه

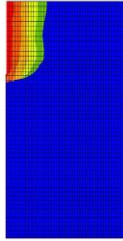
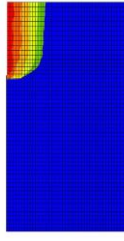
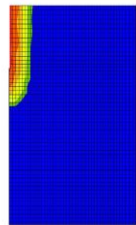
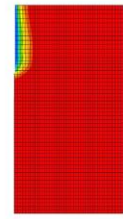
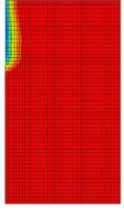
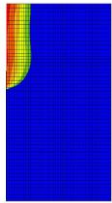
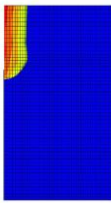
ریزش دیواره چاه یک گسیختگی مکانیکی است که در صورت پایین بودن فشار داخل چاه اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در فشارهای بالای چاه، شکست کششی در دیواره‌ی چاه رخ می‌دهد، اگر فشار چاه کاهش یابد پدیده‌ای به نام ریزش دیواره چاه به وقوع می‌پیوندد. تحت این شرایط اگر روند کاهش فشار درون چاه ادامه یابد، به همان نسبت تنش شعاعی کم شده و تنش محیطی رفته رفته بزرگتر می‌شود، در نتیجه اختلاف قابل ملاحظه بین تنش‌های شعاعی و محیطی یک تنش برشی بزرگ بوجود خواهد آمد. چنانچه این تنش برشی به وجود آمده از تنش بحرانی بیشتر باشد، چاه دچار ریزش می‌شود. [۱].



جدول ۶. تحلیل نتایج ۱

حالت فروتعدالی	حالت فراتعدالی
<p><b>تنش افقی</b></p>  <p>مقدار تنش افقی در ابتدا چاه کمتر از انتهای چاه است که در انتها به ۹۴ مگاپاسکال رسیده است.</p>	<p><b>تنش افقی</b></p>  <p>مقدار بیشینه تنش افقی ۹۰ مگاپاسکال است که در نقاط پایانی چاه در عمق ۳۴۸۲ متری اتفاق افتاده است.</p>
<p><b>تنش عمودی</b></p>  <p>میزان تنش عمودی در ابتدای چاه کمترین مقدار و در انتهای چاه بیشترین مقدار را دارد.</p>	<p><b>تنش عمودی</b></p>  <p>میزان تنش عمودی در ابتدای چاه حالت نوسانی دارد ولی در نهایت با افزایش عمق افزایش می‌یابد.</p>
<p><b>جابجایی</b></p>  <p>تغییرات جابه‌جایی در ابتدای چاه بیشترین مقدار را دارد و رفته رفته کاهش می‌یابد و در نهایت در انتهای چاه یک حالت بیشینه نیز دارد.</p>	<p><b>جابجایی</b></p>  <p>میزان جابه‌جایی در عمق ۳۴۸۱ متری بیشینه است.</p>
<p><b>فشار منفذی</b></p>  <p>مقدار فشار منفذی از ابتدا تا انتهای چاه افزایشی است تغییرات آن بیشتر از حالت مقابل است.</p>	<p><b>فشار منفذی</b></p>  <p>میزان فشار منفذی در ابتدای چاه کمینه است و رفته رفته افزایش می‌یابد.</p>

جدول ۷. تحلیل نتایج ۲

حالت فراتعدادی	حالت فروتعدادی
 <p>تنش افقی</p> <p>مقدار بیشینه تنش افقی ۹۰ مگاپاسکال است که در نقاط پایانی چاه در عمق ۳۴۸۲ متری اتفاق افتاده است.</p>	 <p>تنش افقی</p> <p>مقدار تنش افقی در ابتدا چاه کمتر از انتهای چاه است که در انتها به ۹۴ مگاپاسکال رسیده است.</p>
 <p>تنش عمودی</p> <p>میزان تنش عمودی در ابتدای چاه حالت نوسانی دارد ولی در نهایت با افزایش عمق افزایش می‌یابد.</p>	 <p>تنش عمودی</p> <p>میزان تنش عمودی در ابتدای چاه کمترین مقدار و در انتهای چاه بیشترین مقدار را دارد.</p>
 <p>جابه‌جایی</p> <p>میزان جابه‌جایی در عمق ۳۴۸۱ متری بیشینه است.</p>	 <p>جابه‌جایی</p> <p>تغییرات جابه‌جایی در ابتدای چاه بیشترین مقدار را دارد و رفته رفته کاهش می‌یابد و در نهایت در انتهای چاه یک حالت بیشینه نیز دارد.</p>
 <p>فشار منفذی</p> <p>میزان فشار منفذی در ابتدای چاه کمینه است و رفته رفته افزایش می‌یابد.</p>	 <p>فشار منفذی</p> <p>مقدار فشار منفذی از ابتدا تا انتهای چاه افزایشی است تغییرات آن بیشتر از حالت مقابل است.</p>

جدول ۸. تعیین پنجره ایمن گل حفاری چاه مورد مطالعه در

حالت فرتعادلی		
پارامتر	مقدار واقعی استفاده شده	مقدار طراحی شده
فشار بحرانی شکست - $P_{wf}$	۵۸,۳۵ MPa	۴۸,۳۴ MPa
فشار بحرانی ریزش - $P_{wc}$	۳۶,۹۶ MPa	۳۹,۴۶ MPa
مقداری طراحی شده و منطقی فشار گل حفاری - $P_w$	۳۳,۹۵ MPa	-
مقدار واقعی استفاده شده فشار گل حفاری - $P_w$	-	$۳۹,۴۶ \ll ۴۸,۳۴$

با توجه به جدول ۸ مقدار واقعی فشار گل استفاده شده در حفاری فرتعادلی انجام شده در چاه مورد مطالعه حدود ۳۳/۹۵ مگاپاسکال است. این در حالی است که مقدار بدست آمده گل حفاری بر اساس شبیه‌سازی عددی و حل تحلیلی در بازه  $۳۹,۴۶ \ll ۴۸,۳۴$  مگاپاسکال باید باشد.

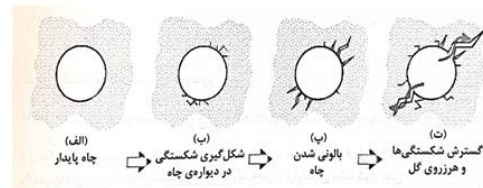
جدول ۹. تعیین پنجره ایمن گل حفاری چاه مورد مطالعه

در حالت فرتعادلی		
پارامتر	مقدار واقعی استفاده شده	مقدار طراحی شده
فشار بحرانی شکست - $P_{wf}$	-	۴۷,۴۶ MPa
فشار بحرانی ریزش - $P_{wc}$	-	۳۶,۵۴ MPa
مقداری طراحی شده و منطقی فشار گل حفاری - $P_w$	-	-
مقدار واقعی استفاده شده فشار گل حفاری - $P_w$	-	$۳۶,۵۴ \ll ۴۷,۴۶$

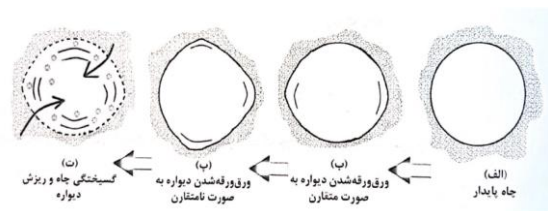
با توجه به جدول ۹ مقدار واقعی فشار گل پیش‌بینی شده در حفاری فرتعادلی در یکی از مقدار بدست آمده گل حفاری بر اساس شبیه‌سازی عددی و حل تحلیلی در بازه  $۳۶,۵۴ \ll ۴۷,۴۶$  مگاپاسکال باید باشد.

۱۲. مقایسه سه روش تحلیلی، عددی و داده‌های واقعی

در نمودارهای زیر به بررسی و نتایج کلی خروجی‌های حل تحلیلی و عددی و داده‌های واقعی گرفته شده از چاه آورده شده است که به مقایسه هر یک از این نمودارها با پارامتر فشار منفذی و فشار گل حفاری پرداخته شده است. با توجه به شکل ۱۱ مقایسه بین فشارمنفذی در حالت حل



شکل ۹. طرح شماتیک فشار شکست دیواره چاه از شکل‌گیری شکستگی تا هرزروی گل به دلیل شکست هیدرولیکی [۱]



شکل ۱۰. مراحل ریزش چاه از شسته‌شدگی اولیه تا ورقه ورقه شدن دیواره، تغییر شکل و ریزش چاه [۱]

فشار بحرانی چاه در نقطه‌ی ریزش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

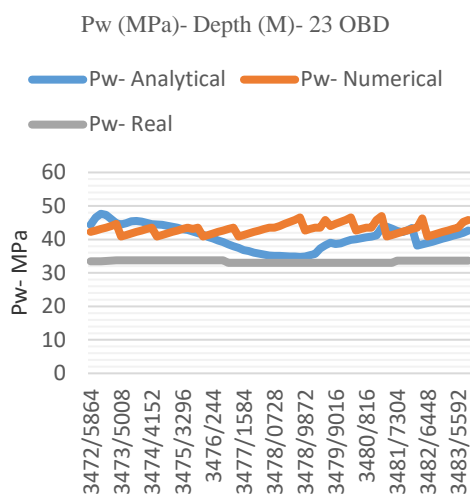
$$\sigma_{wc} = \frac{1}{2}(3\sigma_x - \sigma_y)(1 - \sin\varphi) - CC\cos\varphi + P_0\sin\varphi \quad (26)$$

در این رابطه  $\sigma_{wc}$  فشار بحرانی ریزش است و  $C$  میزان چسبندگی سنگ و  $\varphi$  زاویه اصطکاک سنگ است. با توجه به توضیحات داده شده برای محاسبه و رسیدن به پنجره ایمن گل حفاری و حد بالا و پایین پنجره گل حفاری از معیار موهر-کلمب و حل تحلیلی در ارتباط با فشار ریزش و شکست استفاده شده است.

۳.۱۱. محاسبه وزن ایمن گل حفاری با استفاده از

مدل عددی و تحلیلی

با توجه به توضیحات داده شده در بخش ۱۱، در مورد میزان فشار گل حفاری برای پایداری دیواره و تعیین پنجره گل حفاری، مقدار دقیق گل حفاری باید در بازه بین فشار شکست دیواره چاه و فشار ریزش دیواره چاه باشد که دیوار به دلیل فشار بالای گل باعث شکست چاه نشود و همین‌طور کم بودن فشار گل حفاری باعث ریزش دیواره چاه نشود. با توجه به محاسبات انجام شده از رابطه (۲۵ و ۲۶) میزان فشار شکست و ریزش چاه برای یکی از در جدول (۷ و ۸) و برای حالت‌های فرتعادلی و فرتعادلی آورده شده است.



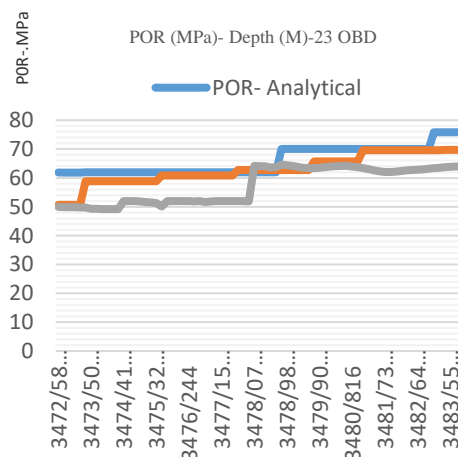
شکل ۱۲. نمودار مقایسه خروجی‌های فشار گل حفاری با حل تحلیلی، عددی و اطلاعات واقعی چاه مورد مطالعه در حالت فراتعادلی

### ۱۳. نتیجه‌گیری

۱- در این پروژه سعی شده است با استفاده از نرم افزار المان محدود و داده‌های چاه مورد مطالعه میدان نفتی مناطق مرکزی ایران در بخش مخزن، پنجره ایمن گل حفاری و نیز فشار بهینه مناسبی از داده‌های موجود از چاه‌ها بدست آید. با توجه به مقاطعی که در بخش مخزن در نظر گرفته شد، در چاه مورد مطالعه محدوده پنجره ایمن گل حفاری در حالت فراتعادلی، حد بالا و پایین پنجره گل حفاری به ترتیب ۴۸،۳۴ و ۳۹،۴۶ مگاپاسکال و در امکان‌سنجی حالت حفاری فروتعادلی به ترتیب ۴۷،۴۶ و ۳۶،۵۴ مگاپاسکال است. اگر فشار گل حفاری به اندازه‌ای نباشد که تنش‌های برشی در دیواره چاه را زیر مقاومت برشی نگه دارد شکست فشاری رخ خواهد داد. مقدار فشار به وجود آورنده شکست کششی (هیدرولیکی) حد بالای فشار گل و مقدار فشاری که باعث شکست فشاری می‌شود حد پایین فشار گل نامیده می‌شود.

۲- در چاه قائم، تنش‌های افقی ایزوتروپ و دیواره چاه نفوذ ناپذیر در سنگی که رفتار الاستیک خطی دارد بزرگترین اختلاف تنش در دیواره چاه رخ می‌دهد بنابراین انتظار می‌رود شکست چاه در این منطقه صورت پذیرد. ساده‌ترین مثال، چاه قائم با فشار منفذی ثابت و میدان تنش‌های افقی ایزوتروپ است اگر فرض شود چاه با یک

عددی، تحلیلی و اطلاعات واقعی بدست آمده از چاه مورد مطالعه آورده شده است که همان‌طور که در نمودار مشخص است بیشترین اختلاف در اعداد بدست آمده در حل تحلیلی است که مقدار فشارمنفذی در این حالت بیشتر از حالت‌های دیگر است و فشارمنفذی در اطلاعات واقعی بین ۵۰ تا ۶۰ مگاپاسکال تغییر می‌کند که این تغییرات در حل تحلیلی از ۶۰ تا ۷۵ مگاپاسکال و در حل عددی این تغییرات از ۵۰ تا ۷۰ مگاپاسکال است. که این مقادیر در عمق ۳۴۷۲ متر تا ۳۴۸۳ متر در ابتدای مخزن چاه مورد مطالعه است.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه خروجی‌های فشارمنفذی با حل تحلیلی، عددی و اطلاعات واقعی چاه مورد مطالعه در حالت فراتعادلی

با توجه به شکل ۱۲ مقایسه بین فشار گل حفاری در حالت حل عددی، تحلیلی و اطلاعات واقعی بدست آمده از چاه مورد مطالعه آورده شده است که همان‌طور که در نمودار مشخص است بیشترین مقدار فشار گل حفاری در اعداد بدست آمده در حل عددی و تحلیلی است که مقدار فشار گل حفاری در این حالت‌ها بیشتر از حالت واقعی است و فشار گل حفاری در اطلاعات واقعی بین ۳۰ تا ۴۰ مگاپاسکال تغییر می‌کند که این تغییرات در حل عددی از ۴۰ تا ۵۰ مگاپاسکال و در حل تحلیلی این تغییرات در بازه ۴۵ تا ۵۰ مگا پاسکال رخ می‌دهد. که این مقادیر در عمق ۳۴۷۲ متر تا ۳۴۸۳ متر در ابتدای مخزن چاه مورد مطالعه است.

modeling reveals the mechanism of rock failure in gas UBD. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 4: p. 29-34.

[6]. He, S., et al., (2014) Effects of fluid seepage on wellbore stability of horizontal wells drilled underbalanced. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 21: p. 338-347.

[7]. Khezrian, M., E. Hajidavalloo, and Y. Shekari, (2015) Modeling and simulation of under-balanced drilling operation using two-fluid model of two-phase flow. *Chemical Engineering Research and Design*, 93: p. 30-37.

[۸]. دانیالی، محمد. (۱۳۹۷)، تحلیل پایداری دیواره چاه نفت در حفاری فروتعادلی به وسیله نرم افزار آباکوس. هفتمین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی با رویکرد توسعه ارتباط دولت، دانشگاه و صنعت. شیراز.

[۹]. گزارش زمین شناسی، شرکت نفت مناطق مرکزی، چاه شماره A، ۱۳۹۵

[۱۰]. گزارش حفاری، شرکت نفت مناطق مرکزی، ۱۳۹۵

[11]. Hudson, J.A. (2001), *Engineering rock mechanics: part 2: illustrative worked examples.*: Elsevier.

[12]. Chen, X., C.P. Tan, and C.M. Haberfield, (2002) A comprehensive, practical approach for wellbore instability management. *SPE drilling & completion*, 17(04): p. 224-236.

[13]. Zoback, M.D., (2010) *Reservoir geomechanics*: Cambridge university press.

[14]. Moos, D., et al., (2003), Comprehensive wellbore stability analysis utilizing quantitative risk assessment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 38(3-4): p. 97-109.

[15]. Hobbs, D. (1964) The tensile strength of rocks. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Elsevier.

[16]. Haghnejad, A., et al., (2013) Prediction Relations between Physical and Mechanical Properties of Rocks: A Case Study of Asmari Formation in Iran. *Int. J. Geosci. Res.*, 1: p. 1-8.

[17]. Hudson, J.A., (2001) *Engineering rock mechanics: part 2: illustrative worked examples.*: Elsevier.

[18]. Zhang, J., (2011), Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, 108(1-2): p. 50-63.

[19]. Maleki, S., et al., (2014), Comparison of different

یک کامل گل پوشیده شده است، به این معنی که فشار مغذی از فشار چاه تاثیر نمی پذیرد. با این فرضیات تنش های اصلی کل در دیواره های چاه اتفاق افتاده است. ۳- با توجه به تغییرات پارامترهای در روش تحلیلی و روش یک بعدی با نرم افزار ژئولاگ و صحت سنجی های انجام شده می توان به این نتیجه رسید که نتایج تعیین پنجره گل حفاری دقیق است.

۴- مقادیر عددی و مقادیر تحلیلی نسبت به واقعیت با مقادیر قابل توجهی در هر یک از پارامترها باهم اختلاف دارند که از دید مهندسی این تغییر به دلیل تحلیل کوپل هیدرومکانیک است که باعث شده دقت پارامترهای عددی و تحلیلی بسیار بالا باشد.

۵- به منظور بررسی و صحت سنجی دقیق باید در اینگونه از پروژه ها از چندین معیار استفاده نمود.

۶- با توجه به روش عددی و تحلیلی و پنجره ایمن گل حفاری استفاده از روش فروتعادلی در اینگونه سازندها پیشنهاد می شود.

## ۱۴. تشکر و قدردانی

از شرکت نفت مناطق مرکزی ایران برای در اختیار قرار دادن اطلاعات چاه نفتی واقع در میدان مناطق مرکزی ایران و حمایت های شرکت نفت مناطق مرکزی ایران تشکر و قدردانی می گردد.

## ۱۵. مراجع

[1]. Aadnoy, B.S. and R. Looyeh, (2019) *Petroleum rock mechanics: drilling operations and well design*: Gulf Professional Publishing.

[2]. Iranian Petroleum Engineers Association. (2021) <https://www.iranspe.com/post/%D8%AD%D9%81%D8%A7%D8%B1%DB%8C%D9%81%D8%B1%D9%88->

[3]. Al-Ajmi, A.M. and R.W. Zimmerman, (2006) Stability analysis of vertical boreholes using the Mog% Coulomb failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43: p. 1200-1211.

[4]. Fan, X., et al., (2015) An evaluation of porosity and permeability based on an unsteady seepage model in a reservoir while underbalanced drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 127: p. 367-376.

[5]. Zhang, H., et al., (2012) Analytical and numerical

failure criteria in prediction of safe mud weigh window in drilling practice. *Earth-Science Reviews*,. 136: p. 36-58.

[20]. Eaton, B.A.( 1975) The equation for geopressure prediction from well logs. in Fall meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME.. OnePetro.

[21]. Zhang, L. and K. Radha, ( 2010), Stability analysis of vertical boreholes using a three-dimensional hoek-brown strength criterion, in *GeoFlorida 2010: advances in analysis, modeling & design*.. p. 283-292.

[22]. Coates, G.R. and J. Dumanoir. (1973), A new approach to improved log-derived permeability. in *SPWLA 14th Annual Logging Symposium*.. OnePetro.

[23]. Zhou, Y., et al.,( 2018), The correlation between low tectonic stress and the Appalachian Basin Quiet Zone. *Tectonophysics*,. 745: p. 95-116.

[24]. Afsari, M., et al. (2009), Mechanical earth model (MEM): An effective tool for borehole stability analysis and managed pressure drilling (case study). in *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. OnePetro.

[25]. Abdideh, M. and M.A.( 2019), Moghimzadeh, Geomechanical study of gas reservoir rock using vertical seismic profile and petrophysical data (continental shelf in southern Iran). *Geomechanics and Geoengineering*,. 14(2): p. 118-135.