

مدلسازی عددی رفتار چاه نفت در تشکیلات شیلی با روش تفاضل محدود (مطالعه موردی: یکی از چاه‌های نفت میدان مارون)

سینا شهبازی^۱، مهدی حسینی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

(دریافت: بهمن ۱۳۹۴، پذیرش: خرداد ۱۳۹۵)

چکیده

در هنگام حفاری و یا بعد از حفاری حفریات زیرزمینی مانند چاه‌های نفتی ناپایداری‌هایی در دیواره چاه مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که ۹۰ درصد مشکلات ناپایداری چاه‌ها مربوط به حفاری در سازندهای شیلی می‌شود. از طرفی سازندهای شیلی در ۷۵ درصد مقاطع حفاری شده در ایران یافت می‌شوند که سبب بروز مشکلاتی مانند فروپاشی کامل یا جزئی چاه و یا حتی از دست دادن چاه قبل از رسیدن به مخزن می‌شوند. در این تحقیق، با استفاده از روش تفاضل محدود (نرم‌افزار FLAC^{2D}) به بررسی پایداری دیواره چاه نفت در سازندهای شیلی پرداخته شده است. این مدلسازی در ۳ حالت حفاری چاه صورت گرفته است. حالت اول، حفاری بدون اعمال فشار گل درون چاه در حین حفاری و حالت دوم، حفاری بالای تعادل به صورتی که فشار گل از فشار منفذی سازند بیشتر باشد و حالت سوم، حفاری زیر تعادل به صورتی که فشار گل پایین‌تر از فشار منفذی سازند باشد. نتایج مدلسازی عددی نشان داده است که بیشترین جابجایی و سطح پلاستیک اطراف چاه در حفاری بدون اعمال فشار گل بوده و جابجایی در حفاری‌های بالای تعادل و زیر تعادل به شدت کاهش پیدا کرده و کمترین جابجایی و سطح پلاستیک اطراف چاه در حفاری بالای تعادل رخ داده است، علاوه بر این در این تحقیق تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین فشار گل بهینه برای پایداری چاه در روش الاستوپلاستیک، با استفاده از روش تعیین سطح تسلیم نرمالیزه (NYZA) صورت گرفته است و در صورتی که مقدار آن از حد بحرانی تعریف شده کمتر باشد، چاه پایدار بوده است. نتایج نشان داد که پارامتر NYZA با چگالی سیال حفاری رابطه معکوس دارد، به طوری که هرچه فشار سیال حفاری و چگالی آن بالا برود، دیواره چاه پایدارتر و NYZA چاه کم می‌شود. براساس روش NYZA که مقدار آن برای پایداری دیواره چاه در روش عددی مقدار بحرانی ۱ است، می‌توان دریافت که از فشار گل ۲۲ مگاپاسکال به بالا، وارد محدوده پایداری در چاه مورد مطالعه می‌شویم. فشار گل بهینه در چاه مورد مطالعه، در حفاری زیر تعادل ۳۳/۰۲ تا ۳۳/۷۱ مگاپاسکال و برای حفاری بالای تعادل ۳۵/۰۹ تا ۳۵/۷۸ مگاپاسکال به دست آمده است. تمام نتایج در لایه شیلی سازند آسماری در عمق ۳۹۱۵ متری از یکی از چاه‌های نفت مخزن مارون ایران به دست آمده است.

کلید واژه‌ها

پایداری چاه نفت، میدان مارون، سازندهای شیلی، روش تفاضل محدود، سطح تسلیم نرمالیزه

۱- مقدمه

شیلی با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ که یک برنامه‌ی عددی بر مبنای روش تفاضل محدود است، به مدلسازی چاه نفت پرداخته شده و پایداری چاه در دو حالت زیر تعادل و بالای تعادل مورد بررسی قرار گرفته شده است.

یکی از روش‌هایی که با آن می‌توان فشار گل مورد نیاز برای پایدار نگه‌داشتن چاه را در حالت الاستوپلاستیک تعیین نمود، روش سطح تسلیم نرمالیزه^۳ است. سطح تسلیم نرمالیزه از تقسیم مساحت ناحیه پلاستیک (شکست) اطراف چاه به سطح مقطع اولیه چاه به دست می‌آید [۶، ۷].

شواهد به دست آمده از مطالعات صورت گرفته نشان داده است که اغلب زمانی ناپایداری در دیواره چاه به وجود می‌آید که مقدار NYZA از مقدار بحرانی خود که مقدار ۱ است، بیشتر شود. پس سطح پلاستیک اطراف چاه با تغییر دادن مقدار فشار گل تغییر کرده و می‌توان مقدار NYZA را تغییر داد، از طرفی با افزایش فشار گل، سطح پلاستیک اطراف چاه کاهش پیدا کرده و مقدار NYZA کاهش یافته و دیواره چاه پایدارتر خواهد شد [۸].

عمده تلاش‌ها در سال‌های اخیر به بررسی رفتار گمانه‌ها در طی حفاری، تحلیل پایداری با هدف بررسی رفتار دیواره چاه و عوامل موثر بر ناپایداری دیواره چاه معطوف بوده است. بر اساس مطالعه‌های انجام گرفته توسط پژوهشگران، مکانیسم‌های حاکم در ناپایداری به عوامل زیادی از جمله، نوع شیل و خصوصیات آن، پروفایل چاه، محیط تنش درجا، گرادیان دمایی و ویژگی‌های سیستم گل حفاری وابسته است.

از مطالعه‌های انجام گرفته توسط روش‌های عددی می‌توان به کارهای چن^۴ و همکاران اشاره کرد که شامل بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی‌های عددی و آزمایشگاهی است که به منظور به دست آوردن توزیع تنش، جابجایی و فشار منفذی در نمونه استوانه جدار ضخیم انجام شده است [۱]. محمدزاده ثانی و همکاران که پایداری دیواره چاه در سازند شیلی را توسط نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ مورد بررسی قرار داده‌اند [۳]. مطالعه‌های شیرین‌آبادی و همکاران در مورد تحلیل پایداری چاه در یکی از مخازن نفتی در بخش سازند آسماری توسط نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ ، به بررسی پایداری چاه در دو حالت قائم و افقی پرداخته‌اند [۹]. بررسی‌های کیان^۵ و همکارانش در خصوص پایداری چاه نفت در سازندهای شیلی، به بررسی تغییر شکل شیل حاصل از جریان سیال

طی مشاهده‌های انجام شده بر روی ناپایداری حفاریات زیرزمینی مانند چاه‌های نفتی، محققین به این نتیجه رسیده‌اند که بخش اعظم مشکلات ناپایداری چاه‌ها در سازند-های شیلی رخ می‌دهد. این ناپایداری‌ها منجر به مشکلات زیادی در بخش حفاری می‌شوند که اغلب باعث موانعی برای رسیدن به هدف و یا تاخیر انداختن زمان حفاری می‌شوند [۱]، [۲]. آنچه که حساسیت و ضعف سازندهای شیلی را در خلق این مشکلات مطرح می‌کند، موضوع هیدراسیون و تورم شیل به ویژه در تماس با محیط‌های آبی است. با شروع تورم شیل، گرفتگی لوله حفاری و ریزش سازند و عدم راندمان در حفاری ایجاد می‌شود [۳].

به طور خلاصه، دلایل ناپایداری شیل‌ها را می‌توان چنین بیان کرد که اولاً، شیل‌ها که حاوی کانی‌های رسی هستند، می‌توانند با برخی گل‌های حفاری واکنش دهند که تورم به وجود آمده در اثر این واکنش سبب ناپایداری می‌شود. دوماً، سنگ‌های شیلی در لحظه پیدایش به صورت ضعیف سیمانی و منجمد شده‌اند و توسط جریان گل، شسته شده و فرسایش می‌یابند. سوماً، چون شیل‌ها دارای تراوایی بسیار پایین بوده نسبت به سایر رسوبات دارای فشار سیال بیشتری هستند. چهارماً، در حین حفاری جریان سیال منفذی به داخل یا خارج سازندهای شیلی صورت می‌پذیرد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که پدیده جذب سطحی آب توسط شیل‌ها همراه با تغییر نحوه توزیع تنش در سنگ، به کاهش مقاومت آن و ناپایداری ختم می‌شود. از طرف دیگر پدیده خروج آب از شیل‌ها باعث کاهش فشار منفذی می‌شود و برای پایداری بسیار مفید است. باید توجه داشت که خروج زیاد این آب سبب ایجاد ترک و شکاف در نزدیکی چاه شده و به ناپایداری منتهی می‌شود [۳].

در حفاری چاه‌های نفتی در سازندهای مختلف از دو روش عمده حفاری زیر تعادل^۱ و حفاری بالای تعادل^۲ استفاده می‌شود. در روش حفاری زیر تعادل، فشار گل حفاری کمتر از فشار منفذی سازند و در روش حفاری بالای تعادل فشار گل حفاری بیشتر از فشار منفذی سازند در نظر گرفته می‌شود [۴، ۵].

این مطالعات با هدف بررسی و پیش‌بینی تغییر شکل دیواره چاه نفت و تعیین بهینه فشار گل حفاری در سازند

در این پژوهش ابتدا با توجه به تهیه و مطالعه لاگ‌های لایه شیل سازند آسماری در یکی از چاه‌های میدان مارون و با استفاده از رابطه‌های موجود، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و تنش‌های موجود در منطقه محاسبه شده و سپس با استفاده از روش عددی توسط نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ ، پایداری دیواره و تعیین فشار گل بهینه مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- نمونه مورد مطالعه

نمونه شیلی مورد مطالعه در این تحقیق در سازند آسماری در میدان مارون واقع شده است. میدان مارون در جنوب فروافتادگی دزفول شمالی و در امتداد تاقدیس‌های آغاجاری و رامین قرار گرفته است. از دید موقعیت جغرافیایی، این میدان نسبت به میداین مجاور از شمال توسط میدان رامین، از خاور توسط میدان کوپال، از باختر و شمال باختر توسط میداین شادگان و اهواز و از جنوب توسط میدان رامشیر محدود می‌شود [۱۸]. سن رسوبات آسماری این میدان الیگو-میوسن است و از نظر پتانسیل مخزنی جزو میداین با ذخیره بالا و از نظر تقسیم‌بندی مخازن از نوع مخازن چند لایه^{۱۴} محسوب می‌شود [۱۹]. سازند آسماری اصلی‌ترین سنگ مخزن میدان مارون است که در پهنه‌های بالایی بیشتر از دولومیت و آهک تشکیل شده است [۲۰]. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی میدان نفتی مارون و میداین نفتی همجوار آن قابل مشاهده است.

۳- نحوه محاسبه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه شیل سازند آسماری از داده‌های لاگ چاه

از آنجایی که نمونه ارسال شده از یکی از چاه‌های میدان مارون به آزمایشگاه به صورت مغزه با قطر ۱۰۲ میلی‌متر بوده؛ با توجه به محدودیت قطر در دستگاه سه محوری سلول هوک، نیاز به مغزه‌گیری مجدد از نمونه‌های ارسال شده، بوده است. از طرفی به دلیل متورم شدن شیل‌ها در تماس با آب، از گل پایه روغنی در فرایند مغزه‌گیری به جای آب و گل‌های پایه آبی، مورد استفاده قرار گرفته است. پس از آماده‌سازی دستگاه مغزه‌گیر با قطر ۵۴/۷ میلی‌متر اقدام به مغزه‌گیری شد. علی‌رغم استفاده از گل پایه روغنی امکان گرفتن مغزه‌هایی با قطر ۵۴/۷ میلی‌متر ممکن نشد و مغزه‌ها هنگام حفاری تکه تکه شدند. بنابراین در این تحقیق خواص

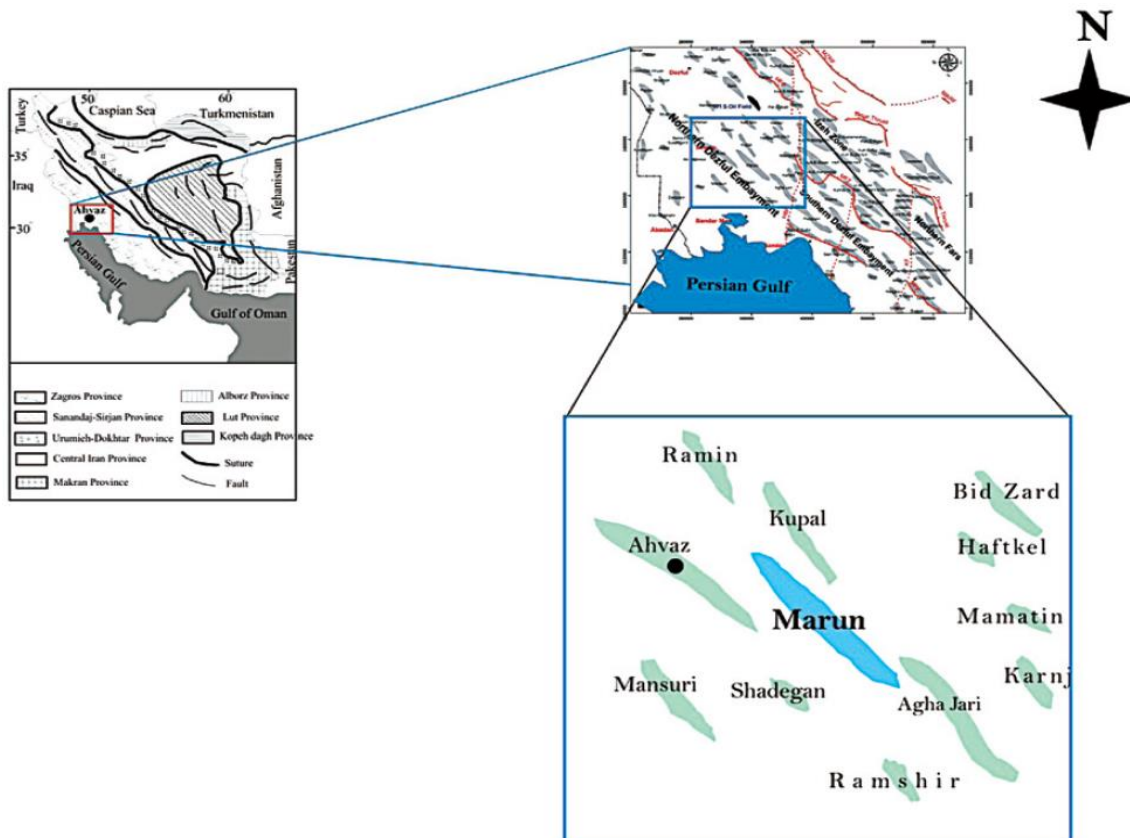
حفاری و انتقال یون پرداخته‌اند [۱۰]. مطالعه‌های پارا^۶ و همکاران بر روی شبیه‌سازی پایداری چاه برای ایجاد امکان استفاده از حفاری زیر تعادل در مخازن بسیار تخلیه شده^۷ در غرب ونزولا پرداخته‌اند [۱۱]. صالحی و همکارانش بر روی شبیه‌سازی عددی برای تجزیه تحلیل پایداری چاه در دو میدان تخلیه شده در ایران برای ایجاد امکان استفاده از حفاری زیر تعادل در ۲ میدان کربناته پرداخته‌اند [۷]. یو چن^۸ و همکارانش که به بررسی اثرات شیمیایی و فیزیکی در پایداری دیواره چاه در سازندهای شیلی پرداختند [۱۲]. منجیایو یو^۹ و همکارانش به بررسی مدل ناپایداری در دیواره چاه در سازندهای شیلی پرداختند [۱۳]. مطالعه‌های گوئیژونگ چن^{۱۰} و همکارانش مدلی را برای ناپایداری شیل‌ها ارائه نمودند که پارامترهایی نظیر اثرات پروالاستیک و شیمیایی را شامل می‌شد [۱۴]. ایسلام^{۱۱} و همکارانش در بررسی ناپایداری دیواره چاه در سازندهای شیلی به پدیده تغییرات فشار منفذی با ارائه یک مدل ریاضی با استفاده از روش المان محدود پرداختند [۱۵]. ساروت^{۱۲} و همکارانش یک مدل عددی برای پدیده تورم شیل‌ها ارائه نمودند [۱۶]. مطالعه‌های آنتونیو لویگی مرلانی^{۱۳} و همکارانش پدیده تورم شیل را از نقطه نظر عددی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۷]. نتایج پژوهش‌های صورت گرفته نشان داد که بیشتر ناپایداری‌ها در دیواره چاه در شیل‌ها رخ می‌دهد و عواملی همچون عوامل هیدرومکانیکی و شیمیایی در بروز این ناپایداری‌ها تاثیر گذار هستند.

از دلایل انجام این پژوهش و تفاوت آن با تحقیقات انجام گرفته در گذشته می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱) داده‌های مورد استفاده در پژوهش‌های گذشته در بعضی موارد دارای سند معتبری نبوده و در مواردی (مانند نفوذپذیری شیل میدان مارون) این داده‌ها غلط است.
- ۲) در این پژوهش داده‌های ورودی برای تحلیل پایداری دیواره چاه با استفاده از به روز ترین روابط موجود که در مطالعات گذشته بر روی شیل انجام شده به دست آمده است.
- ۳) در مطالعات گذشته تنش‌های افقی حداقل و حداکثر اطراف چاه یکسان فرض شده است که در این تحقیق با رسم چندضلعی تنش و با استفاده از روابط گسلش اندرسون، تنش افقی حداقل و حداکثر اطراف چاه محاسبه شده است.
- ۴) در این پژوهش با محاسبه سطح تسلیم نرمالیزه (NYZA) به تحلیل پایداری دیواره چاه پرداخته شده است.

به عنوان لایه شیلی در سازند آسماری دانست. در جدول ۱ اطلاعات مورد نیاز برای به دست آوردن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی از لاگ‌ها استخراج شده است.

مکانیکی و مقاومتی شیل از لاگ‌های ارسال شده توسط شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب از یکی از چاه‌های میدان مارون محاسبه شده‌اند. با توجه به مطالعه لاگ‌های چاه مورد مطالعه، از عمق ۳۹۱۵ متر تا عمق ۳۹۳۰ متری را می‌توان



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی میدان نفتی مارون و میادین نفتی همجوار آن [۱۸]

جدول ۱: اطلاعات استخراج شده از لاگ‌های لایه شیلی سازند آسماری در یکی از چاه‌های میدان مارون

ویژگی	تخلخل	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	ΔT_P ($\mu s/ft$) (زمان عبور موج طولی)
مقدار	۰/۱۶	۲/۵	۷۱/۷۷

حداکثر انتخاب شده است. با استفاده از رابطه (۱) تنش عمودی محاسبه می‌شود [۲۳].

$$\sigma_v = \gamma \times h \quad (1)$$

که در آن γ چگالی متوسط سنگ‌ها از سطح زمین تا عمق ۳۹۱۵ متری بر حسب مگانیوتن بر متر مکعب و h ارتفاع مورد نظر بر حسب متر (عمق ۳۹۱۵ متر) است.

با توجه به میانگین چگالی ستون سنگ‌شناسی چاه مورد نظر، مقدار تنش قائم (S_v) در عمق ۳۹۱۵ متری برابر ۹۷/۷۸ مگاپاسکال بوده است (چگالی ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شده است). برای به دست آوردن تنش افقی حداقل و حداکثر ($S_{H \min}$ و $S_{H \max}$) از تئوری گسلش

در جدول ۲ روابط مورد استفاده برای به دست آوردن ویژگی‌های مکانیکی و مقاومتی شیل آورده شده است.

۴- نحوه محاسبه تنش‌های عمودی، افقی حداقل و افقی حداکثر لایه شیلی سازند آسماری

با استفاده از داده‌های لاگ چاه می‌توان دریافت که از عمق ۳۹۱۵ تا ۳۹۳۰ متری لایه شیلی است و به دلیل بالا بودن مقدار SGR در عمق ۳۹۱۵ متری و خالص بودن شیل، این ارتفاع را به عنوان مبنا برای مقطع افقی مورد مطالعه برای به دست آوردن تنش‌های عمودی، افقی حداقل و افقی

اندرسون برای تعیین رژیم تنش، استفاده شده است. با استفاده از رابطه‌های (۲) و (۳) برای حالت‌های مختلف محاسبه کرد [۲۳]. گسلش می‌توان مقدار تنش‌های افقی کمینه و بیشینه را

جدول ۲: روابط مورد استفاده برای بدست آوردن خصوصیات مکانیکی و مقادیر شیل

رابطه‌های مورد استفاده	تعریف پارامترهای موجود در پارامترها
$V_p = \frac{1}{\Delta T_p}$	که در آن V_p سرعت موج طولی بر حسب متر بر ثانیه و ΔT_p زمان عبور موج طولی [۲۱]
$\sigma_c = 0.77V_p^{2.93}$	که در آن σ_c مقاومت فشاری تک محوره بر حسب مگاپاسکال، V_p سرعت موج طولی بر حسب کیلومتر بر ثانیه [۲۲]
$\Phi = \sin^{-1}\left(\frac{V_p - 100}{V_p + 100}\right)$	که در آن زاویه Φ اصطکاک داخلی بر حسب درجه V_p ، سرعت موج طولی بر حسب متر بر ثانیه [۲۳]
$2C = S_0 \left[(\mu_i^2 + 1)^{\frac{1}{2}} - \mu_i \right]$	که در آن C چسبندگی S_0 ، مقاومت فشاری تک محوره و μ_i ، تانژانت زاویه اصطکاک داخلی [۲۳]
$\frac{V_p}{V_s} = 1.89$	که در آن V_s سرعت موج عرضی V_p ، سرعت موج طولی بر حسب متر بر ثانیه [۲۴]
$\Delta T_s = \frac{1}{V_s}$	که در آن زمان ΔT_s عبور موج عرضی بر حسب ثانیه بر متر V_s ، سرعت موج عرضی بر حسب متر بر ثانیه [۲۱]
$E_d = \rho V_s^2 \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$	که در آن E_d مدول الاستیک دینامیکی بر حسب مگاپاسکال ρ ، چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و V_p ، V_s ، سرعت موج طولی بر حسب متر بر ثانیه و V_s ، سرعت موج عرضی بر حسب متر بر ثانیه [۲۵]
$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$	که در آن ν ضریب پواسن V_p ، V_s ، سرعت موج طولی بر حسب متر بر ثانیه و V_s ، سرعت موج عرضی بر حسب متر بر ثانیه [۲۵]
$E_s = 0.076V_p^{3.23}$	که در آن E_s مدول الاستیک استاتیکی بر حسب مگاپاسکال V_p ، سرعت موج طولی بر حسب متر بر ثانیه [۲۲]
$G = \frac{E}{2(1-\nu)}$	که در آن G مدول برشی E ، مدول الاستیک استاتیکی و ν ضریب پواسن [۲۳]
$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$	که در آن K مدول بالک E ، مدول الاستیک استاتیکی و ν ضریب پواسن [۲۳]

با فرض $S_{H \min}$ ، به عنوان خط قائم و $S_{H \max}$ ، به عنوان خط افقی، می‌توان چندضلعی تنش را برای عمق مورد نظر رسم کرد. این چند ضلعی مقادیر ممکن تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر را در هر عمقی بر اساس تئوری گسلش اندرسون و نیز تئوری گسلش مور-کولمب با یک ضریب اصطکاک و فشار منفذی تعریف می‌کند [۲۶]. در شکل ۲ این چند ضلعی تنش رسم و ارائه شده است.

العجمی و زیمرمن با استفاده از ملاک شکست موگی-کولمب مربوط به چاه و معادلات کرش^{۱۵}، روابطی را برای محاسبه حد بالا و پایین فشار گل محاسبه کردند. رابطه‌های مذکور در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است [۲۷].

با محاسبه مقادیر فشار فروریزش^{۱۶} و فشار شکست^{۱۷} با توجه به وضعیت تنش‌ها در یک چاه عمودی می‌توان وزن

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_V - P_P}{S_{H \min} - P_P} \leq \left[(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu \right]^2 \quad (۲)$$

گسلش نرمال

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_{H \max} - P_P}{S_V - P_P} \leq \left[(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu \right]^2 \quad (۳)$$

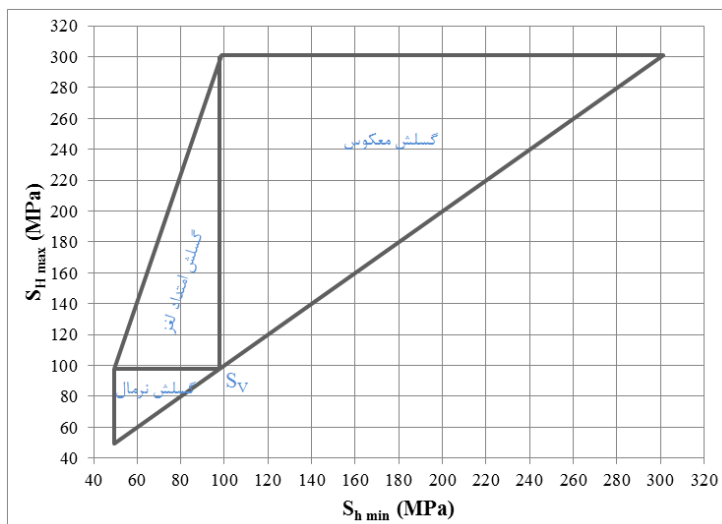
گسلش معکوس

که در آن، σ_1 تنش اصلی بیشینه، σ_3 تنش اصلی کمینه، S_V تنش عمودی، $S_{H \max}$ تنش افقی بیشینه، $S_{H \min}$ تنش افقی کمینه، P_P فشار منفذی سازند و μ تانژانت زاویه اصطکاک داخلی است.

با جای‌گذاری مقدار ۳۴/۴ مگاپاسکال برای فشار منفذی (با توجه به اطلاعات موجود در مدارک منتشر نشده شرکت مناطق نفت خیز جنوب) در روابط بالا مقدار $S_{H \max}$ برابر ۳۰۱/۲ مگاپاسکال و $S_{H \min}$ برابر ۴۹/۵ مگاپاسکال به دست آمده است.

مقادیر محاسبه شده فشار شکست (P_{wf}) کمتر از مقدار عملی فشار گل باشد، چاه دچار شکست و در نتیجه گسیختگی خواهد شد [۲۷].

بهینه گل حفاری را تعیین کرد. اگر مقادیر محاسبه شده فشار فروریزش (P_{wb}) بیشتر از مقدار عملی فشار گل در چاه مورد نظر باشد، چاه ریزش می‌کند. به همین ترتیب اگر



شکل ۲: چند ضلعی تنش (Stress Polygon) برای عمق ۳۹۱۵ متری و فشار منفذی ۳۴/۴ مگاپاسکال

جدول ۳: معیار شکست موگی - کولمب برای محاسبه فشار فروریزش در چاه عمودی [۲۷]

وضعیت	اگر $P_W \leq P_{Wb}$ چاه دچار ریزش می‌شود	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$
۱	$P_{wb1} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3A + 2b'K) - \sqrt{H + 12(K^2 + b'AK)} \right]$	$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$
۲	$P_{wb2} = \frac{1}{2}A - \frac{1}{6} \sqrt{12[a' + b'(A - 2P_0)]^2 - 3(A - 2B)^2}$	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$
۳	$P_{wb3} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3A - 2b'G) - \sqrt{H + 12(G^2 - b'AG)} \right]$	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$

جدول ۴: معیار شکست موگی - کولمب برای محاسبه فشار شکست در چاه عمودی [۲۷]

وضعیت	اگر $P_W \geq P_{wf}$ چاه دچار شکست می‌شود	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$
۱	$P_{wf1} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3D + 2b'N) + \sqrt{J + 12(N^2 + b'DN)} \right]$	$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$
۲	$P_{wf2} = \frac{1}{2}D + \frac{1}{6} \sqrt{12[a' + b'(D - 2P_0)]^2 - 3(D - 2E)^2}$	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$
۳	$P_{wf3} = \frac{1}{6-2b'^2} \left[(3D - 2b'M) + \sqrt{J + 12(M^2 - b'DM)} \right]$	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$

- در جدول ۳، σ_r ، σ_θ و σ_z تنش‌های حاصل در دیواره چاه، P_W فشار داخلی چاه و پارامترهای A ، B ، H ، K ، G ، a' و b' عبارتند از:
- (۴) $\sigma_r = P_W$
- (۵) $\sigma_\theta = A - P_W$
- (۶) $\sigma_z = B$
- (۷) $A = 3\sigma_H - \sigma_h$
- (۸) $B = \sigma_v + 2\gamma(\sigma_H - \sigma_h)$
- (۹) $H = A^2(4b'^2 - 3) + (B^2 - AB)(4b'^2 - 12)$
- (۱۰) $K = a' + b'(B - 2P_0)$

مصالحی که ممکن است بعد از حد تسلیم به حالت پلاستیک برسند به خوبی مدلسازی می‌کند. نرم افزار FLAC در اصل برای مهندسی ژئوتکنیک و معدن طراحی شده است، با این حال این برنامه با توجه به توانایی‌ها و قابلیت‌های گسترده که دارد می‌تواند برای حل مسائل پیچیده مکانیکی در رشته‌های دیگر مهندسی نیز استفاده شود. مدل‌های رفتاری متنوعی که در این برنامه تعریف شده است به مهندسی اجازه می‌دهد که مسائل مختلفی را تحت تحلیل‌های غیر خطی مدلسازی و تحلیل کنند [۴].

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 زیر تعادل استفاده شود جریان سیال به داخل چاه همچنان وجود خواهد داشت. این در حالی است که در حفاری بالای تعادل به دلیل فشار بالای گل نسبت به فشار منفذی سازند، سیال گل حفاری به داخل چاه نفوذ کرده و مانع از ورود سیال منفذی به داخل چاه خواهد شد. به طور معمول در روش حفاری زیر تعادل فشار گل حدود ۰/۶۹ تا ۱/۳۸ مگاپاسکال کمتر و در حفاری بالای تعادل فشار گل به همین مقدار بیشتر از فشار منفذی سازند در نظر گرفته می‌شود [۴].

در این تحقیق پایداری چاه درون سازند آسماری که قطر آن $\frac{5}{8}$ اینچ است (معادل ۱۵ سانتی‌متر) در حالات حفاری بدون گل، حفاری زیر تعادل و بالای تعادل مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای ایجاد هندسه مدل از یک شبکه به ابعاد ۲ متر در ۲ متر استفاده شده است. ابعاد مش‌ها در اطراف چاه ریز در نظر گرفته شده است و با دور شدن از چاه ابعاد مش‌ها افزایش می‌یابد. مرزهای چپ و راست مدل در راستای X و مرزهای بالا و پایین در راستای Y ثابت شده است.

لایه سنگی مورد مطالعه در سازند آسماری میدان مارون و جنس آن از شیل است. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی شیل و پارامترهای مقاومتی معیار موهر-کولمب در جدول ۵ مشاهده می‌شود.

$$G = K + b'A \quad (11)$$

$$a' = 2C \cos \varphi \quad (12)$$

$$b' = \sin \varphi \quad (13)$$

در جدول ۴، σ_r ، σ_θ و σ_z تنش‌های حاصل در دیواره چاه، P_w فشار داخلی چاه و پارامترهای M ، N ، J ، E ، D عبارتند از:

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

$$\sigma_\theta = D - P_w \quad (15)$$

$$\sigma_z = E \quad (16)$$

$$D = 3\sigma_h - \sigma_H \quad (17)$$

$$E = \sigma_v - 2\gamma(\sigma_H - \sigma_h) \quad (18)$$

$$J = D^2(4b'^2 - 3) + (E^2 - DE)(4b'^2 - 12) \quad (19)$$

$$N = a' + b'(E - 2P_0) \quad (20)$$

$$M = N + b'D \quad (21)$$

$$a' = 2C \cos \varphi \quad (22)$$

$$b' = \sin \varphi \quad (23)$$

با توجه به چند ضلعی تنش نقاطی بر روی چندضلعی در مقطع مورد نظر فرض و برای هر یک از آن نقاط با استفاده از رابطه‌های بالا، حد فشار بالا و پایین گل محاسبه می‌شود.

پس از انتخاب چندین نقطه در ۳ محدوده گسل معکوس، امتداد لغز و نرمال تنها تعداد کمی از نقاط در گسل نرمال جواب داده و بر اساس آن رژیم تنش در چاه مورد نظر را رژیم نرمال در نظر گرفته شده است. با توجه به دلایل ذکر شده و فشار گل مورد استفاده در حفاری چاه (۳۵/۸ مگاپاسکال)، تنش افقی بیشینه ۵۹ مگاپاسکال و تنش افقی کمینه برابر با ۴۹/۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه شیل دارای نفوذپذیری و تراوایی بسیار پایینی است، در بیشتر موارد به عنوان پوش سنگ محسوب می‌شود، ولی در مواردی هم در مخازن دیده و باعث ناپایداری چاه شده است. با استفاده از آزمایش‌های جوش و همکاران روی ویژگی‌های شیل، میزان نفوذپذیری شیل برابر با

$$10 \times 2 \text{ متر مربع اندازه گیری کرده اند [28].} \quad (21)$$

۵- مدلسازی عددی

نرم‌افزار FLAC^{۱۸} یک برنامه تفاضل محدود است که برای محاسبات مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این برنامه رفتار سازه‌هایی را که در آن خاک، سنگ و یا سایر

جدول ۷: مقادیر تنش برجا، فشار منفذی سیال و فشار گل

لیتولوژی	شیل آسماری
تنش قائم (مگاپاسکال)	۹۷/۸۷
تنش افقی بیشینه (مگاپاسکال)	۵۹
تنش افقی کمینه (مگاپاسکال)	۴۹/۵
فشار منفذی سازند (مگاپاسکال)	۳۴/۴
فشار گل در حفاری بالای تعادل (مگاپاسکال)	۳۵/۸
فشار گل در حفاری زیر تعادل (مگاپاسکال)	۳۳

جدول ۵: خصوصیات مکانیکی شیل سازند آسماری

ویژگی	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	۸/۱۷	گیگاپاسکال
ضریب پواسون	۰/۳	
مدول بالک	۶/۸	گیگاپاسکال
مدول برشی	۳/۱۴	گیگاپاسکال
مقاومت کششی	۴	مگاپاسکال
زاویه اصطکاک	۳۸	درجه
چسبندگی	۱۳/۰۷	مگاپاسکال
تخلخل	۰/۱۶	
نفوذپذیری	۲	نانودارسی
جرم مخصوص	۲۵۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب

۶- نتایج عددی

در شکل‌های ۳ تا ۵ بردارهای جابجایی^{۱۹} مدل به ترتیب در حفاری بدون اعمال فشار گل، حفاری بالای تعادل و حفاری زیر تعادل مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل‌های ۳ تا ۵، مشاهده می‌شود که تمام جابجایی‌ها به درون چاه است و بیش‌ترین میزان جابجایی ۱/۳۷۹ سانتی‌متر در دیواره چاه بوده که مربوط به حفاری بدون اعمال فشار گل است.

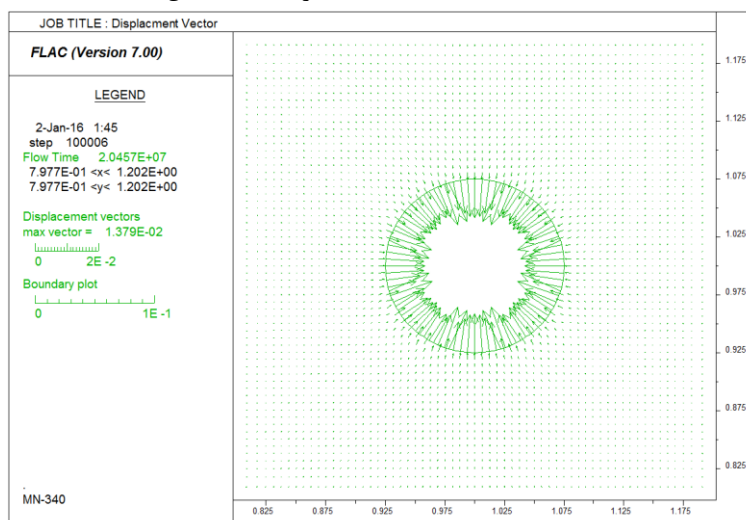
یکی از مهمترین شکل‌ها و گزارش‌ها در تحلیل پایداری دیواره چاه، وضعیت الاستوپلاستیک اطراف چاه است که در سه حالت حفاری بدون اعمال فشار گل، حفاری بالای تعادل و حفاری زیر تعادل به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۸ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین سطح پلاستیک مربوط به حفاری بدون فشار گل است و کمترین مربوط به حفاری بالای تعادل است.

سیال موجود در منافذ سنگی از جنس نفت بوده و پارامترهای آن در جدول ۶ مشاهده می‌شود.

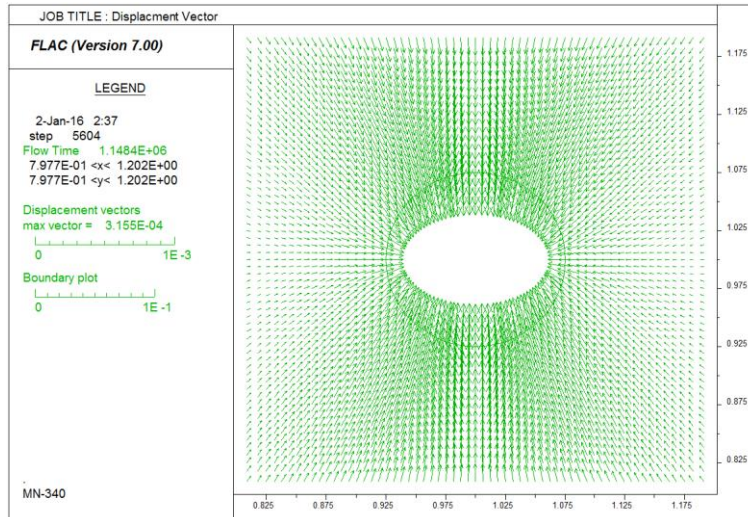
جدول ۶: پارامترهای سیال منفذی (نفت)

ویژگی	مقدار	واحد
جرم مخصوص	۶۹۲	کیلوگرم بر متر مکعب
مدول بالک	۰/۶۳	گیگاپاسکال

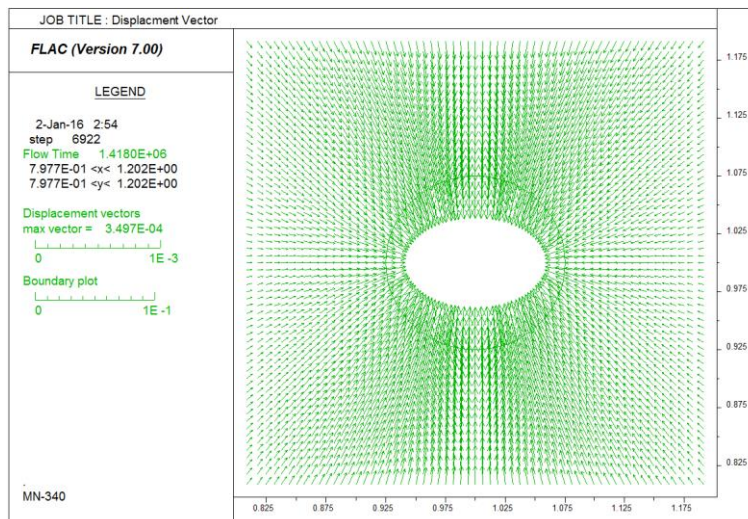
در جدول ۷ مقادیر تنش قائم، افقی و فشار منفذی محاسبه شده، همچنین مقادیر فشار گل در دو حالت زیر تعادل و بالای تعادل در حین حفاری در این جدول درج شده است.



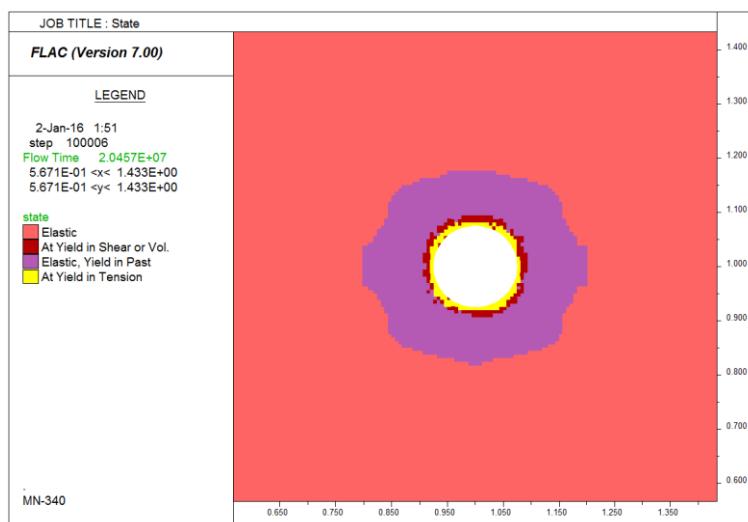
شکل ۳: بردارهای جابجایی مدل در حفاری چاه، بدون اعمال فشار گل



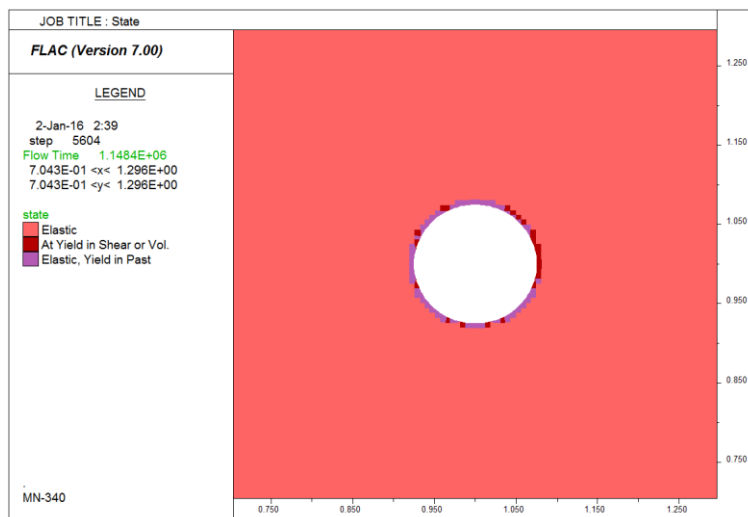
شکل ۴: بردارهای جابجایی مدل در حفاری بالای تعادل



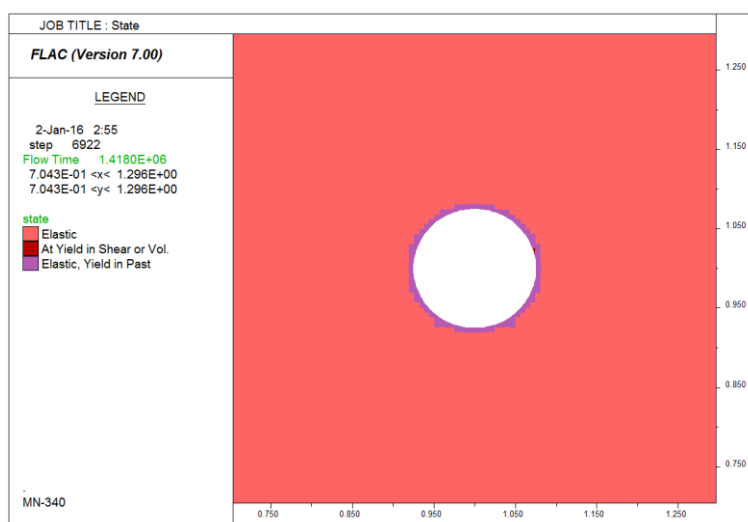
شکل ۵: بردارهای جابجایی مدل در حفاری زیر تعادل



شکل ۶: وضعیت الاستوپلاستیک اطراف مدل در حفاری چاه، بدون اعمال فشار گل



شکل ۷: وضعیت الاستوپلاستیک اطراف مدل در حفاری بالای تعادل



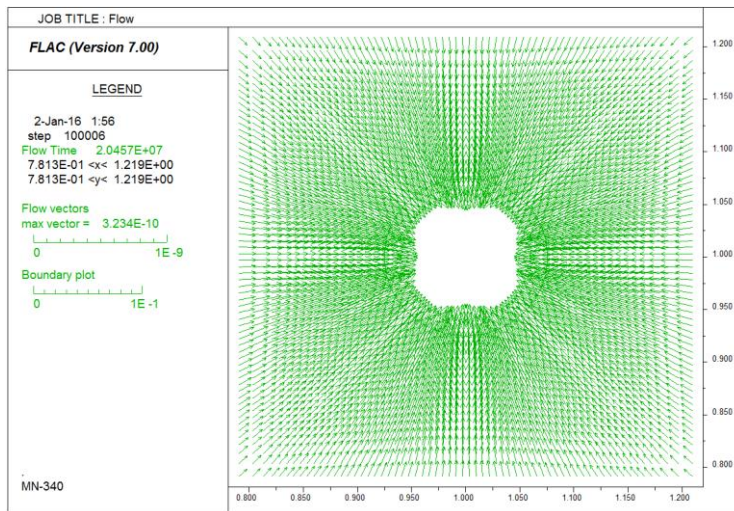
شکل ۸: وضعیت الاستوپلاستیک اطراف مدل در حفاری زیر تعادل

۱۰ جریان سیال گل حفاری به داخل سازند قابل مشاهده است.

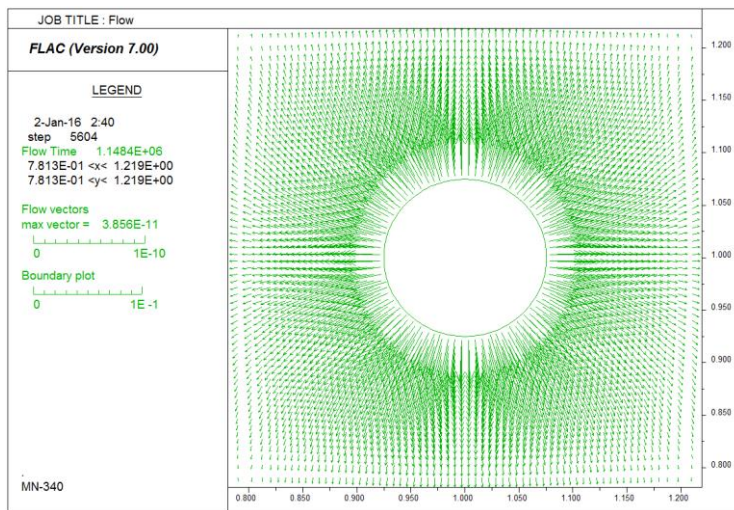
در حفاری زیر تعادل، بردار فشار منفذی سازند مورد نظر پس از حفاری به داخل چاه است و از طرف دیگر بردار فشار گل به صورت شعاعی و در خلاف جهت فشار منفذی سازند به دیواره چاه اعمال شده است و به دلیل پایین بودن فشار گل نسبت به فشار منفذی سازند می‌توان این را انتظار داشت که برآیند جهت بردارهای جریان به داخل چاه باشد و سیال منفذی سازند به داخل چاه جریان پیدا کند. شکل ۱۱ جریان سیال منفذی سازند به داخل چاه را نشان می‌دهد.

در حفاری بدون فشار گل از آنجایی که در حین حفاری چاه از فشار گل برای پایداری دیواره چاه استفاده نشده است و از طرفی بردار فشار منفذی سازند مورد نظر پس از حفاری به داخل چاه است، می‌توان این را انتظار داشت که جهت بردارهای جریان^{۲۰} به داخل چاه باشد و سیال منفذی به داخل چاه جریان پیدا کند. در شکل ۹ جریان سیال منفذی به داخل چاه حفاری شده نشان داده شده است.

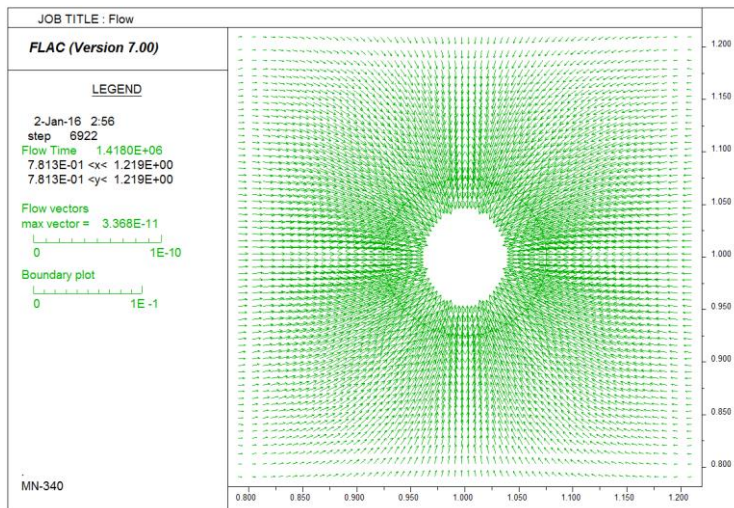
در حفاری بالای تعادل، بردار فشار منفذی سازند مورد نظر پس از حفاری به داخل چاه است و از طرف دیگر بردار فشار گل به صورت شعاعی و در خلاف جهت فشار منفذی سازند به دیواره چاه اعمال شده است و به دلیل بالا بودن فشار گل نسبت به فشار منفذی سازند می‌توان این را انتظار داشت که برآیند جهت بردارهای جریان به داخل سازند باشد و سیال گل حفاری به داخل سازند جریان پیدا کند. در شکل



شکل ۹: بردارها و جهت جریان سیال منفذی اطراف مدل در حفاری چاه، بدون اعمال فشار گل

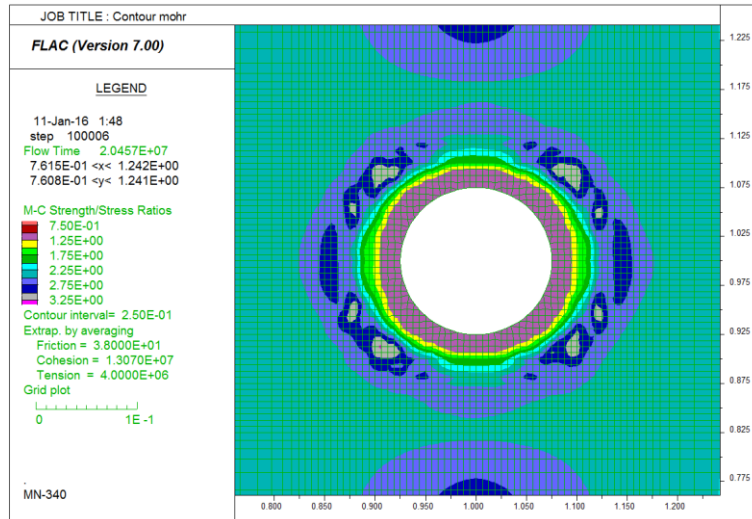


شکل ۱۰: بردارها و جهت جریان سیال گل حفاری اطراف مدل در حفاری بالای تعادل

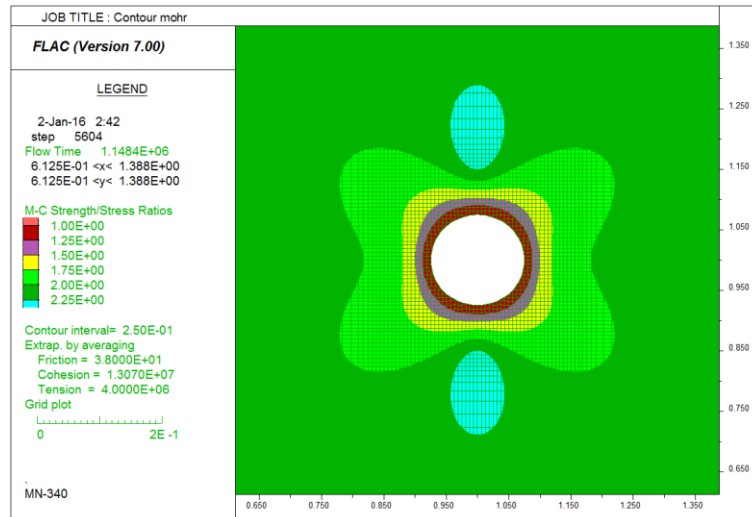


شکل ۱۱: بردارها و جهت جریان سیال منفذی سازند در اطراف مدل در حفاری زیر تعادل

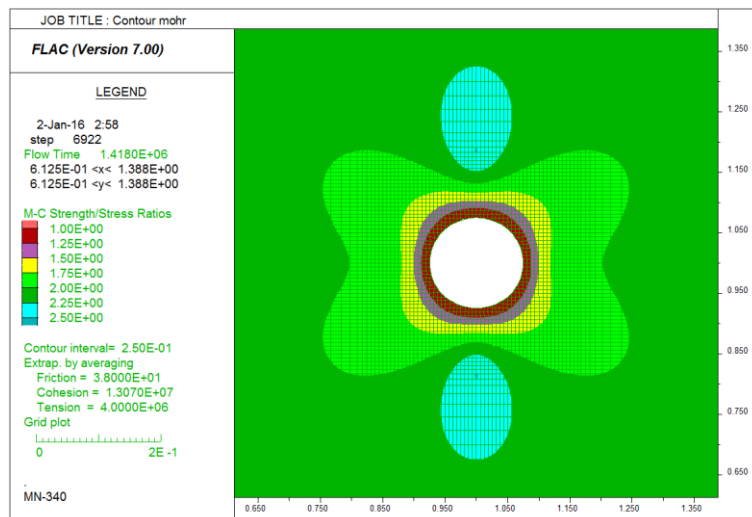
در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ ضریب ایمنی اطراف چاه به ترتیب در حالت‌های حفاری بدون اعمال فشار گل، حفاری بالای تعادل و حفاری زیر تعادل آورده شده است و می‌توان نتیجه گرفت کمترین ضریب ایمنی مربوط به حفاری بدون اعمال فشار گل است.



شکل ۱۲: قسمت ریزشی با ضریب ایمنی کمتر از ۱ اطراف چاه در حفاری بدون فشار گل



شکل ۱۳: ضریب ایمنی اطراف چاه حفاری شده، با اعمال فشار گل بالای تعادل



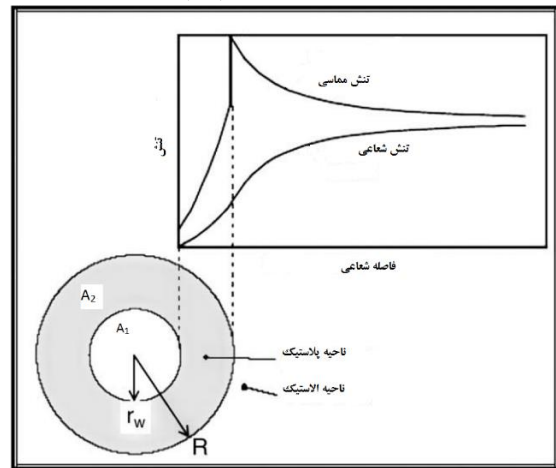
شکل ۱۴: ضریب ایمنی اطراف چاه حفاری شده، با اعمال فشار گل زیر تعادل

۷- تحلیل نتایج عددی

یکی از روش‌های تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین فشار گل برای پایداری چاه در روش الاستوپلاستیک، محاسبه سطح تسلیم نرمالیزه^{۲۱} (NYZA) است. سطح تسلیم نرمالیزه از تقسیم مساحت ناحیه پلاستیک اطراف دیواره چاه به مساحت اولیه چاه به دست می‌آید [۶، ۷].

شکل ۱۵ سطح تسلیم نرمالیزه را نشان می‌دهد که مقدار آن از رابطه ۲۴ به دست می‌آید:

$$NYZA = \frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{R}{r_w} \right)^2 - 1 \quad (24)$$

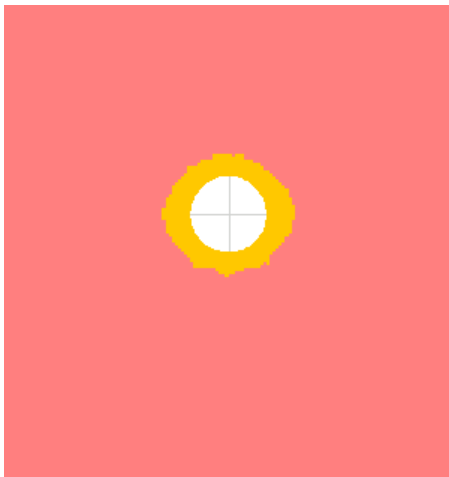


شکل ۱۵: ناحیه تسلیم اطراف چاه [۶، ۷]

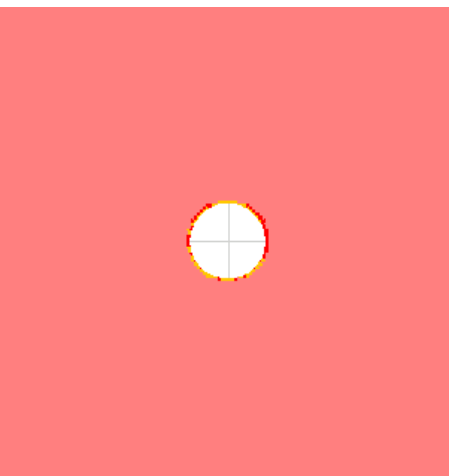
بر اساس روش مک لیلان و هاوکس، چاه در شرایط الاستوپلاستیک زمانی پایدار است که سطح تسلیم نرمالیزه کوچک‌تر از ۱ باشد یعنی محدوده فشار گل اعمالی به دیواره چاه در حدی باشد که سطح تسلیم نرمالیزه تشکیل شده کمتر از ۱ باشد. سطح تسلیم نرمالیزه‌ای که توسط روش تحلیلی به دست می‌آید به صورت دایره‌ای است (همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود). سطح شکست به صورت دایره‌ای در میدان تنش هیدرواستاتیک تا نامنظم در میدان تنش ناهمسانگرد در روش عددی تغییر می‌کند. مقدار عددی که توسط مک لیلان و هاوکس برای پایداری چاه در نظر گرفتند با استفاده از روش عددی تعیین کردند [۸]. پس می‌توان با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ که یک روش عددی به حساب می‌آید سطح تسلیم نرمالیزه اطراف چاه در سازند شیلی را مورد بررسی قرار داد و با استفاده از روش مک لیلان و هاوکس پایداری دیواره چاه را در شرایط حفاری بالای

تعداد و حفاری زیر تعادل تحلیل کرد و سپس می‌توان فشار گل مناسب را برای حفاری در حالت زیر تعادل محاسبه کرد. با استفاده از اعمال فشار گل‌های مختلف در محدوده کمتر از فشار منفذی (حفاری زیر تعادل) و محدوده بالای فشار منفذی (حفاری بالای تعادل) در چاه مورد نظر در مدلسازی عددی، می‌توان سطح تسلیم نرمالیزه‌ها را در فشار گل‌های مختلف به دست آورد.

برای مثال در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ سطح تسلیم نرمالیزه برای حفاری به ترتیب با فشار گل‌های ۲۰ مگاپاسکال و ۳۷ مگاپاسکال آورده شده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار اتوکد مساحت سطح پلاستیک (سطح تسلیم نرمالیزه) اطراف چاه در فشار گل‌های مختلف حساب شده و با تقسیم بر مساحت اولیه چاه، مقدار NYZA در فشار گل‌های مختلف به دست می‌آید.



شکل ۱۶: سطح تسلیم نرمالیزه برای حفاری با فشار گل ۲۰ مگاپاسکال



شکل ۱۷: سطح تسلیم نرمالیزه برای حفاری با فشار گل ۳۷ مگاپاسکال

عددی مقدار بحرانی ۱ است، با استفاده از نتایج شکل ۱۸ می‌توان دریافت که از فشار گل ۲۲ مگاپاسکال به بالا، وارد محدوده پایداری چاه می‌شود.

در چاه‌های نفتی به دلیل مزایای زیاد حفاری زیر تعادل، سعی بر آن است که فشار گل حفاری را در بازه فشار گل زیر تعادل انتخاب کنند و از آنجایی که که فشار منفذی سازند برابر با ۳۴/۴ مگاپاسکال است می‌توان بازه فشار گل در حفاری زیر تعادل را بین فشارهای ۲۲ مگاپاسکال و ۳۴/۴ مگاپاسکال انتخاب کرد.

از طرفی مک لیلان و هاوکس فشار گل بهینه را در حفاری زیر تعادل در محدوده ۰/۶۹ تا ۱/۳۸ مگاپاسکال کمتر از فشار منفذی و برای حفاری بالای تعادل محدوده ۰/۶۹ تا ۱/۳۸ مگاپاسکال بیشتر از فشار منفذی می‌دانند [۸]. پس با توجه به نتایج بالا می‌توان فشار گل بهینه حفاری را برای حفاری بالای تعادل و حفاری زیر تعادل بدست آورد. در جدول ۸ محدوده بهینه فشار گل در حفاری زیر تعادل با توجه به نتایج بالا آورده شده است. در جدول ۹ محدوده بهینه فشار گل در حفاری بالای تعادل با توجه به نتایج بالا آورده شده است.

جدول ۸: محدوده بهینه فشار گل در حفاری زیر تعادل

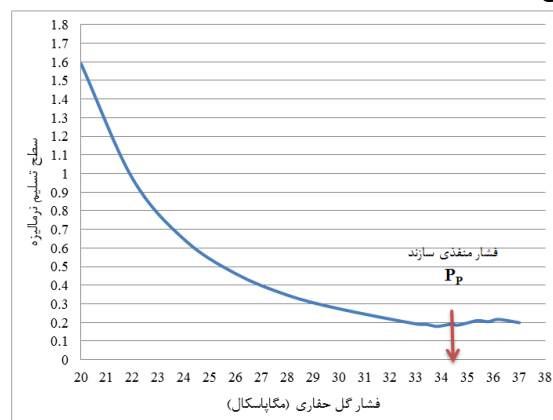
فشار منفذی سازند (مگاپاسکال)	بیشترین فشار گل حفاری (مگاپاسکال)	کمترین فشار گل حفاری (مگاپاسکال)
۳۴/۴	۳۳/۷۱	۳۳/۰۲

جدول ۹: محدوده بهینه فشار گل در حفاری بالای تعادل

بیشترین فشار گل حفاری (مگاپاسکال)	کمترین فشار گل حفاری (مگاپاسکال)	فشار منفذی سازند (مگاپاسکال)
۳۵/۷۸	۳۵/۰۹	۳۴/۴

در این تحقیق پایداری یکی از چاه‌های میدان مارون در لایه شیلی سازند آسماری بررسی شده است. ناپایداری چاه در عملیات حفاری می‌تواند به خاطر شسته شدن سازند، به هم آمدن و یا فرسایش چاه باشد. از میان تمامی سازندهایی که از خود ناپایداری شدید نشان می‌دهند، شیل‌ها به عنوان مشکل‌سازترین آنها شناخته شده‌اند. به گونه‌ای که ۹۰ درصد مشکلات ناپایداری چاه‌ها مربوط به حفاری در لایه‌های شیلی است. با توجه به اطلاعات لاگ چاه مورد مطالعه، روابط گسلش اندرسون، رسم پلیگون تنش و استفاده از معیار شکست موگی-کولمب می‌توان دریافت که رژیم تنش در محدوده چاه مورد مطالعه نرمال است. بهینه کردن وزن گل، جهت کاهش ریزش چاه و مشکلات مرتبط

شکل ۱۸ تغییرات NYZA را نسبت به فشار گل اعمالی برای نمونه شیلی در سازند آسماری مخزن مارون نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: تغییرات سطح تسلیم نرمالیزه نسبت به فشار گل اعمالی برای نمونه شیلی سازند آسماری در یکی از چاه‌های مخزن مارون

از نتایج شکل ۱۸ می‌توان دریافت که با کاهش فشار گل اعمالی شعاع پلاستیک اطراف چاه افزایش و مطابق آن سطح تسلیم نرمالیزه افزایش می‌یابد. از طرفی براساس روش NYZA که مقدار آن برای پایداری دیواره چاه در روش

با توجه به نتایج بالا و مزایای حفاری زیر تعادل نسبت به حفاری بالای تعادل می‌توان نتیجه گرفت که حفاری زیر تعادل بهترین روش برای حفاری در چاه مورد مطالعه است. از جمله دلایل آن کاهش میزان مصرف گل حفاری، کاهش هدر رفتن میزان گل و کمتر آسیب رساندن به سازند است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در صورتی که فشار گل از ۲۲ مگاپاسکال که مقدار NYZA برای پایداری دیواره چاه مقدار بحرانی یک تا ۳۳ مگاپاسکال است که کمترین مقدار NYZA حاصل می‌شود، افزایش یابد سطح تسلیم ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.

۸- نتیجه‌گیری

- [2] Meier, T. & Rybacki, E. & Reinicke, A. & Dresen, G. (2013) 'Influence of borehole diameter on the formation of borehole breakouts in black shale; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences; Volume 62, pp 74–85.
- [3] Mohammadzade Sani, M. (2013) 'Wellbore Stability Design In Shale Formations' Petroleum Engineering Master's Thesis, Faculty of Engineering, Kerman Shahid Bahonar University (In Persian).
- [4] Zamiran, S. (2014) 'Modeling and Analysis of Soil and Rock Structures in Flac (Functional examples)' Publishers Noavar (In Persian).
- [5] Afshoon, R & Asadolah pour, A. & Jalali far, H. (2011) 'Instability in the wellbore On one of the oil reservoirs in Iran', The Third Congress of Iranian Petroleum Engineering (In Persian).
- [6] Hawkes, C. D. & McLellan, P.J., (1996) 'Modeling of yielded zone enlargement around a wellbore' Proceedings of 2nd North American Rock Mechanics Symposium, Montreal, Quebec, Canada.
- [7] Salehi, S. & Hareland, G. & Nygaard, R. (2010) 'Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells', Journal of Petroleum Science and Engineering; Volume 72, pp 229–235.
- [8] McLellan, P. & Hawkes, C., (2001) 'Borehole Stability Analysis for under balanced Drilling', advanced Geo technology Inc .
- [9] Shirin Abadi, R. & Rasouli, V. & Goshtasbi, K. (2006) 'Stability Analysis of Oil wells in Iran' the first Congress of Iranian Petroleum Engineering (In Persian).
- [10] Qian, W. & Yingcao, Z. & Gang, W. & Hongwei, J. & Yushi, L. (2012) 'Afluid Solid Chemistry Coupling Model for shale wellbore stability', Petroleum Exploration and Development; Volume 39, Issue 4 , pp 508-513.
- [11] Parra, J.G. & Celis, E. & De Gennaro, S. (2003) 'wellbore stability Simulations for underbalanced drilling Operations in Highly Depleted Reserviors', SPE Drilling & Completion.
- [12] Yu, M. & Chen, G. & Chenevert, ME. & Sharma, MM. (2001) 'Chemical and thermaleffects on wellbore stability of shale formations', SPE 71366, New Orleans, 30 September–3 October 2001.
- [13] Mengjiao, Yu. & Chenevert, E. & Martin, (2003) 'Chemical-mechanical wellbore instability model for shales: accounting for solute diffusion', Jurnal of petroleum Science and Engineering 38, p131-143.
- [14] Chen, G. & Chenevert, M.E. & Sharma, M.M. & Mengjiao, Yu. (2003) 'A Study of wellbore stability in shales including proelastic, chemical and

با ریزش چاه و کاهش تهاجم گل حفاری به درون سازند ضروری است. در عملیات‌های حفاری دو روش حفاری وجود دارد که شامل حفاری زیر تعادل و حفاری بالای تعادل است. در حفاری زیر تعادل فشار سیال حفاری کمتر از فشار منفذی سازند است اما در حفاری بالای تعادل فشار سیال حفاری بیشتر از فشار منفذی سازند است. استفاده از حفاری زیر تعادل به دلیل مزایای بیشتر نسبت به حفاری بالای تعادل، در عملیات‌های حفاری بهتراست. هر چه فشار گل حفاری کمتر باشد، سطح پلاستیک اطراف چاه بیشتر است. پارامتر NYZA یا سطح تسلیم نرمالیزه، پارامتری است که معمولاً پایداری چاه نفت را با آن می‌سنجند و هرچه مقدار آن از حد بحرانی تعریف شده کمتر باشد، چاه پایدارتر بوده است. پارامتر NYZA با چگالی سیال حفاری رابطه معکوس دارد، به طوری که هرچه فشار سیال حفاری و چگالی آن بالا برود، دیواره چاه پایدارتر و NYZA چاه کم می‌شود. براساس روش NYZA که مقدار آن برای پایداری دیواره چاه در روش عددی مقدار بحرانی یک است و با توجه به نتایج مدلسازی عددی چاه مورد مطالعه می‌توان دریافت که از فشار گل ۲۲ مگاپاسکال به بالا، وارد محدوده پایداری چاه شده است. در عملیات حفاری فشار گل بهینه در حفاری زیر تعادل در محدوده ۰/۶۹ تا ۱/۳۸ مگاپاسکال کمتر از فشار منفذی و برای حفاری بالای تعادل محدوده ۰/۶۹ تا ۱/۳۸ مگاپاسکال بیشتر از فشار منفذی است. فشار گل بهینه در چاه مورد مطالعه، در حفاری زیر تعادل ۰/۲ تا ۳۳/۷۱ مگاپاسکال و برای حفاری بالای تعادل ۰/۹ تا ۳۵/۷۸ مگاپاسکال به دست آمده است.

۹- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی شرکت مناطق نفت خیز جنوب انجام شده و از مساعدت مسئولین محترم آن شرکت تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Chen, X. & Tan, C.P. & wu, B. & Haberfield, C.M. (1988) 'Modelling of the undrained behavior of wellbores', The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks, proceedings of the second international symposium on hard soils-soft rocks, Napoli, Italy, pp 483-489.

- Shale layers' Monthly magazine Oil Research, No 63, pp 12-18 (In Persian).
- [27] Al-Ajmi A.M. & Zimmerman R. W., (2006) "Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. pp 1-15, 10.1016
- [28] Josh, M. & Esteban, L. & Delle Piane, C. & Sarout, J. & Dewhurst, D.N. & Clennell, M.B., (2012). 'Laboratory characterisation of shale properties' Journal of Petroleum Science and Engineering 88-89, 107-124.
- thermal effects', Journal of Petroleum Science and Engineering 38, 167-176.
- [15] Islam, M.A. & Skalle, P. & Tantserev Evgeniy, NTNU. (2009)'Analytical and numerical study of consolidation effect on time delayed borehole stability during underbalanced drilling in shale',In proceedings of the IPTC 09/SPE drilling conference, Kuwait, Desember 14-19. SPE 127554.
- [16] Sarout, J. & Detournay, E. (2011) 'Chemoporoelastic analysis and experimental validation of the pore pressure transmission test for reactive shales',International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 48, 759-772.
- [17] Merlani, AL. & Salusti, E. & Violini, G.(2011) 'Non-linear waves of fluid pressure and contaminant density in swelling shales',Journal of Petroleum Science and Engineering 79, 1-9.
- [18] Nouraie nejad, KH. A. & Amiri Bakhtiyar, H. & Mohammadian, R. A. & Azizi, A. PH. (2014) 'Geometric and kinetic variables reservoir fractures Maroon oil field' Journal of Earth Sciences, 24th, No 93, pp 37-46 (In Persian).
- [19] Mirzaghali Poor, A. & Haghi, A. H. (1990) 'Marun Oilfield geological study' Report No 4210, Department of Geology expansion, National South Oil Company, pp 55 (In Persian).
- [20] Mirzaghali Poor, A. & Haghi, A. H. (1989) 'Study the geological layers 4 and 5 Asmari of Marun Oilfield' Report No 4135, Department of Geology expansion, National South Oil Company (In Persian).
- [21] Fjaer, E. & Holt, R. M. & Horsrud, P. & Raaen, A. M. & Risnes, R. (2008) 'Petroleum Related Rock Mechanics', 2nd Ed, Amsterdam, Elsevier.
- [22] Horsrud, P. (2001)" Estimating Mechanical Properties of Shale from Empirical Correlations" SPE 56017, 27 March 2001.
- [23] Zoback, Mark D. (2007) '*Reservoir Geomechanics*' New York, United States of America: Cambridge university press.
- [24] Miller, S. L. M. & Stewart, R. R.,(1990) 'effects of lithology, porosity and shaliness on p_ and s_ wave velocities from sonic logs',Canadian Journal of Exploration geophysics, Vol.26, p 94-103
- [25] Najibi, A. R. & Ghafoori, M. & Lashkaripour, Gh. R. & Asef, M. R. ,(2015) 'Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of Asmari and Sarvak limestones, two main oil reservoirs in Iran' Journal of Petroleum Science and Engineering 126 ,78-82.
- [26] Ahmadi, M. & Soleymani, M. & Salehi Siyavoshni, N. (2010) 'Stability of oil wells in Ahvaz