

مقاله پژوهشی

## آنالیز حساسیت خصوصیات ژئومکانیکی سازند بر پایداری چاه‌های نفتی در حفاری فروتعادلی در یکی از میادین جنوب غربی ایران

محمدرضا آقاخانی امام قیسی<sup>۱</sup>؛ محسن حیدری<sup>۱</sup>؛ منوچهر صانعی<sup>۲</sup>؛ حامد شبان‌نیا<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد؛ ژئومکانیک نفت، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- استادیار؛ گروه استخراج، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۳- دانشجوی کارشناسی؛ گروه استخراج، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2022.344494.1167

### چکیده

### واژگان کلیدی

حفاری فروتعادلی به منظور کاهش صدمه به سازند، کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت حفاری مورد توجه قرار گرفته است. علی‌رغم این مزیت‌ها اجرای حفاری فروتعادلی به دلیل خطرات ناشی از پایین‌تر بودن فشار سیال حفاری از فشار سازندی نیازمند مدل‌سازی و بررسی دقیق پیش از اجرا عملیات حفاری می‌باشد. لذا با توجه به این موارد در این پژوهش سعی شده است با استفاده از مدل‌سازی عددی و روش تحلیلی موهر-کلمب ابتدا پایداری چاه مورد مطالعه در حفاری فروتعادلی مورد بررسی قرار گرفته و سپس به‌وسیله آنالیز حساسیت تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی، تنش‌های برجا و فشار چاه بر کرنش شعاعی دیواره چاه به عنوان پارامتری وابسته به پایداری چاه محاسبه شود. نتایج نشان داد بازه پنجره گل ایمن و پایدار جهت انجام حفاری فروتعادلی برای سازند مورد مطالعه ۲۱،۲۴ تا ۳۴،۷ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین نتایج آنالیز حساسیت چاه مورد مطالعه نشان داد که با توجه به فاکتورهای حساسیت به‌دست آمده برای هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی، موثرترین پارامتر در بین پارامترهای الاستیک و پلاستیک به ترتیب مدول یانگ و چسبندگی و کم‌اثرترین پارامترها به ترتیب ضریب پواسون و زاویه اصطکاک می‌باشد. به علاوه با بررسی فاکتور حساسیت در بین تمام پارامترهای ژئومکانیکی، می‌توان گفت فشار چاه و تنش افقی حداکثر به ترتیب با مقادیر ۶،۴۳ و ۵،۳۳ دارای بیشترین اثرگذاری بر کرنش شعاعی در حفاری فروتعادلی می‌باشند.

### ۱. مقدمه

در طول عملیات حفاری، موجب ناپایداری چاه خواهد شد [۱]. پس از آن، جهت برقرار کردن مجدد تعادل در چاه، از فشار گل استفاده می‌شود. فشار گل سازندی، با توجه به خصوصیات سازندی و پنجره گل تعیین شده می‌تواند به سه صورت فروتعادلی، تعادلی و فراتعادلی تعیین شود. در حفاری فروتعادلی فشار ته چاهی کمتر از فشار سازند در حال حفاری در نظر گرفته می‌شود، این مورد می‌تواند منجر به وضعیت عدم تعادل فشار شده که در آن جریان سیالات سازندی وارد چاه شده و همراه با گل حفاری به سطح می‌آید. حفاری فروتعادلی جهت جلوگیری از صدمه دیدن سازند و هرزروی

پایداری چاه در زمان حفاری یکی از مهم‌ترین مسائل صنعت نفت و گاز است. از آن جهت که سالانه زمان و هزینه بسیاری صرف کنترل مشکلات ناشی از ناپایداری چاه‌ها از جمله افزایش قطر چاه، هرزروی گل و گیرکردن لوله‌ها می‌شود؛ در نتیجه تعیین فشار گل حفاری مناسب و بررسی اثر پارامترهای ژئومکانیکی سازند بر پایداری چاه، منجر به کاهش هزینه‌ها و همچنین اطمینان از پایداری چاه خواهد شد. پس از شروع حفاری تعادل تنش‌های برجا در سازند برهم خواهد خورد و نتایج مربوط به پاسخ سنگ‌ها به تمرکز تنش در اطراف چاه

سیال، افزایش سرعت حفاری، کاهش هزینه‌های مربوط به سیستم گردش گل حفاری و افزایش عمر مفید مته به کار گرفته می‌شود. همچنین این روش محدودیت استفاده در مواردی از جمله سازندهای عمیق، پرفشار و با نفوذپذیری بالا، چاه‌های ناپایدار، چاه‌های حاوی علائم تنوع فشار و سنگ شناسی و چاه‌های دارای مشکلات تولید سیال سازندی کنترل نشده را دارا می‌باشد [۲]. برهمکنش بین سیالات حفاری با سیال سازندی باعث تغییر فشار در اطراف چاه می‌شود که منجر به تغییر تنش‌های وابسته به زمان به صورت محلی خواهد شد [۳]. خصوصیات مختلفی بر پایدار بودن چاه تأثیر دارند که از آن جمله می‌توان به خصوصیات مکانیکی مانند مدول یانگ، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک و چسبندگی اشاره کرد. با توجه به اینکه امکان تخمین خصوصیات فوق در تمام طول چاه یا در تمام چاه‌های یک میدان نفتی وجود ندارد و همچنین محدودیت داده‌های موجود؛ با استفاده از آنالیز حساسیت می‌توان دامنه تأثیرات هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی بر پایداری چاه را در یک دامنه حداقل تا حداکثر به دست آورد؛ این بررسی موجب خواهد شد تا قبل از انجام حفاری بر اساس خصوصیات ژئومکانیکی دید مناسب‌تری از پایداری چاه در تمام فواصل چاه داشته باشیم.

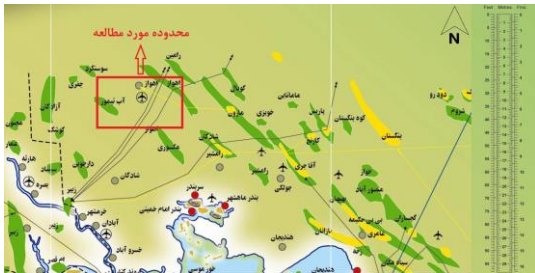
تا پیش از سال ۱۹۷۹ مسائل پایداری چاه به طور جدی مورد توجه قرار نگرفته بود تا اینکه بردلی مقاله خود را با عنوان گسیختگی در چاه‌های مایل منتشر کرد و باعث علاقه زیادی به این موضوع در صنعت نفت و گاز شد [۴]. کوئلو و همکاران [۵] تحلیل پایداری چاه را با مدل‌سازی دوبعدی انجام داده و در ادامه کارستاد و آدونی [۶] و العجمی و زیمرمن [۷] این تحلیل را به کمک مدل‌سازی سه‌بعدی انجام دادند. سروش و همکاران در مطالعه‌ای به امکان‌سنجی استفاده از حفاری فروتعدالی در یکی از میادین شمالی عراق پرداخته‌اند. در نهایت به کمک تعریف پنجره گل حفاری به این نتیجه رسیده‌اند که حفاری فروتعدالی در فواصل سنگ‌های کربناته امکان پذیر و در سازندهای شیلی و سیلتی با مشکلات ناپایداری چاه مواجه خواهد شد [۸]. ماریون و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی مخزن تخلیه شده، آنالیز حفاری و امکان‌سنجی حفاری فروتعدالی نتیجه گرفتند که حفاری فروتعدالی باعث پیشرفت حفاری، افزایش تولید و کاهش مشکلات پایداری چاه در سازند مورد مطالعه شده است [۹].

صانعی به آنالیز پایداری چاه به روش حفاری فروتعدالی با استفاده از نرم افزار  $FLAC^{3D}$  پرداخته است. در این پژوهش با تعیین وزن گل حفاری مناسب این نتیجه به دست آمد که حفاری فروتعدالی با توجه به پایین بودن فشار گل نسبت به فشار سازند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۰]. ساکسنا و همکاران به مطالعه حفاری فروتعدالی و بررسی استفاده از سیال حفاری مبتنی بر فوم در حفاری فروتعدالی پرداخته‌اند. در این پژوهش نتیجه گرفته‌اند که حفاری فروتعدالی به علت افزایش بهره‌وری چاه بدون تحریک، کاهش از دست رفتن سیال حفاری و ویژگی‌های غیر آسیبرسان، در حال تبدیل شدن به یک فناوری نوظهور برای حفاری می‌باشد [۱۱]. عسگری و همکاران با استفاده از روش سطح تسلیم نرمالیزه که یک روش مبتنی بر آنالیز الاستوپلاستیک می‌باشد به تحلیل پایداری چاه پرداخته‌اند. نتایج مطالعات نشان داده است که بدون ایجاد مشکل برای پایداری دیواره‌ی چاه یا ادامه‌ی حفاری می‌توان چاه را با فشار گل تا حدی کمتر از فشار ریزش حفر کرد [۱۲]. نجفی‌پور و همکاران نیز با مدل‌سازی به کمک نرم افزار عددی آباکوس به تعیین پنجره گل حفاری مناسب و تغییرات حدود بالا و پایین پنجره گل با تغییر پارامترهای ژئومکانیکی سازند پرداخته‌اند [۱۳]. در نهایت این نتیجه به دست آمده که با افزایش مدول یانگ، چسبندگی و زاویه اصطکاک، فشار حد بالا و پایین پنجره گل به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات نسبت پواسون با نتایج حاصل از سایر متغیرها رابطه‌ای معکوس دارد. عبدالمی‌پور و همکاران به بررسی پارامترهای ژئومکانیکی موثر بر پایداری چاه با استفاده از روش عددی تفاضل محدود سه بعدی و استفاده از مدل موهر پرداخته‌اند، که نتایج آن نشان دهنده ترتیب متفاوتی از اهمیت پارامترها بر اساس مقاومت سنگ است [۱۴]. درویش‌پور و همکاران نیز با استفاده از نرم افزار عددی فلک سه بعدی و مدل حجم محدود، اثرات پارامترهای مقاومت سنگ، تنش‌های عمده اطراف چاه و فشار منفذی بر پنجره ایمن گل حفاری را بررسی نموده‌اند. تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که کاهش در مقادیر زاویه اصطکاک و چسبندگی منجر به محدود شدن قابل توجهی از پنجره گل حفاری می‌شود. از طرف دیگر، کاهش فشار منفذی و نسبت بین حداکثر و حداقل تنش افقی باعث می‌شود که پنجره گل حفاری به طور قابل توجهی عریض شود [۱۵].

## ۲. مشخصات عمومی و ژئومکانیکی منطقه

### مورد مطالعه

داده‌های ژئومکانیکی مورد استفاده جهت انجام مدل‌سازی در این مطالعه از سازند ایلام واقع در گروه بنگستان به‌دست آمده است. سازند ایلام به دو رخساره عمیق و کم عمق تقسیم می‌شود که رخساره کم عمق در نواحی فارس و خوزستان و رخساره عمیق در نواحی ایلام قرار دارد. سازند ایلام دارای ذخایر فرعی و کوچک نفتی در میداین آب‌تیمور، اهواز، منصوری و دارخوین می‌باشد. محل قرارگیری این میداین واقع در سازند ایلام در شکل ۱ نشان داده شده است. به علاوه در جدول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات ژئومکانیکی و خواص مخزنی سازند ایلام آورده شده است [۲۰].



شکل ۱. محل قرارگیری میداین نفتی دارای ذخیره در سازند ایلام

#### جدول ۱. مشخصات ژئومکانیکی سازند ایلام

مشخصات	مقدار
نوع سنگ	سنگ آهک
مدول یانگ (MPa)	۲۱۲۵,۱۷
ضریب پواسون	۰,۲۵
زاویه اصطکاک (درجه)	۳۵
چسبندگی (MPa)	۸,۵۷

#### جدول ۲. خواص مخزنی سازند

مشخصات	مقدار
عمق (m)	۳۴۷۰
تنش قائم (MPa)	۹۳,۷
تنش افقی حداکثر (MPa)	۷۲,۴۱
تنش افقی حداقل (MPa)	۶۱,۴۸
فشار منفذی (MPa)	۳۴,۷

همچنین بهنام و همکاران به مدل‌سازی عددی رفتار چاه نفت در تشکیلات شیلی با روش تفاضل محدود و به کمک نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  پرداخته‌اند. نتایج حاکی از یک رابطه خطی است که در آن حداقل فشار گل حفاری برای جلوگیری از شکست برشی با حداقل و حداکثر تنش‌های افقی، فشار منفذی، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی تخمین زده می‌شود [۱۶].  
 خدماتی و همکاران نیز به بررسی اثر پارامترهای ژئومکانیکی بر کرنش پلاستیک سیمان و تاثیر آن بر ضریب اطمینان لوله جداری با استفاده از روش عددی المان محدود سه بعدی پرداخته‌اند. نتایج نشان داده که با افزایش مدول یانگ، سیمان سخت و شکننده شده و در همین حال افزایش ضریب پواسون منجر به رفتار پلاستیک در سیمان خواهد شد [۱۷].  
 همکاران یک طرح کاملاً ضمنی متوالی پیشرفته برای ژئومکانیک مخزن به منظور تجزیه و تحلیل حفاری گمانه در شرایط خطی و غیرخطی پیشنهاد کرده‌اند [۱۸].  
 همکاران به منظور آنالیز مشکلات ناپایداری چاه در زمان حفاری، از جمله فروپاشی منافذ و تراکم افزایش یافته برشی به توسعه یک مدل ترکیبی پوروالاستوپلاستیک و نفوذپذیری پرداخته‌اند [۱۹].

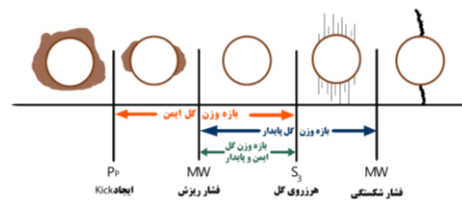
در نتیجه با توجه به اهمیت شناخت پارامترهای ژئومکانیکی در انجام حفاری‌های فروتعدالی، در این پژوهش سعی شده است تا به بررسی آنالیز حساسیت پارامترهای ژئومکانیکی از جمله پارامترهای الاستیک، پلاستیک، تنش‌های برجا سازند و فشار چاه مورد مطالعه و همچنین تعیین پارامترهای تاثیرگذار بر پایداری چاه پرداخته شود. جهت انجام این پژوهش ابتدا به کمک داده‌های میدان مورد مطالعه وزن گل ایمن حفاری به روش موه‌ر-کلمب برای حفاری فروتعدالی تعیین شد؛ سپس در ادامه با استفاده از روش المان محدود و معیار الاستوپلاستیک در اکر-پراگر مدل‌سازی عددی برای چاه قائم انجام شده و به آنالیز حساسیت هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی بر کرنش شعاعی پرداخته شده است. در نهایت به‌عنوان خلاقیت در این پژوهش برای هر یک از این پارامترهای ژئومکانیکی در حفاری فروتعدالی یک فاکتور حساسیت گزارش شده است که به کمک این فاکتور اثربخشی هر یک از پارامترها با توجه به کرنش دیواره چاه تعیین شده و با مقایسه این فاکتورها با یکدیگر، پارامترها از نظر اثرگذاری بر پایداری چاه ردیف شده‌اند.

### ۳. روش شناسی

در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش تحلیلی موهر-کلمب پنجره گل حفاری ایمن برای چاه مورد مطالعه به دست آمده و سپس در مدل سازی عددی فشار چاه در بازه فروتعدالی پنجره گل به دست آمده اعمال شده است. در نهایت با تغییر پارامترهای ژئومکانیکی در مدل عددی، مقدار تغییرات کرنش شعاعی دیواره چاه اندازه گیری و جهت آنالیز حساسیت مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۱.۳. تعیین پنجره گل به روش موهر-کلمب

سازندهای زیرزمینی قبل از انجام عملیات حفاری چاه تحت تنش های برجا و در حالت تعادل می باشند، پس از انجام عملیات حفاری به علت برداشته شدن سنگ ها، تمرکز تنش ها روی دیواره چاه قرار گرفته و می تواند منجر به گسیختگی چاه شود. جهت ایجاد تعادل نیاز به اعمال فشار هیدرواستاتیک در چاه است که مقدار این فشار در بازه های تحت عنوان پنجره گل قرار می گیرد. در صورتی که مقدار فشار گل از حدود بالا و پایین این پنجره گل تجاوز کند منجر به مشکلاتی از جمله شکستگی های برشی و کششی در چاه خواهد شد. با توجه به شکل ۲ بازه های مختلفی برای پنجره فشار گل پیشنهاد شده است، ایمن و پایدارترین بازه فشار گل حفاری مربوط به بازه فشار ریزش تا تنش بر جای افقی حداقل می باشد [۲۱].



شکل ۲. شماتیک پنجره گل حفاری

پژوهش های مختلفی جهت تعیین پنجره گل حفاری انجام شده است. در یکی از این پژوهش ها از روش تحلیلی موهر-کلمب که بر مبنای معیار شکست موهر-کلمب و محاسبه تنش های اطراف چاه می باشد، به تعیین پنجره گل حفاری پرداخته شده است، که نتایج به دست آمده مطابقت خوبی با روش های سطح تسلیم نرمالیزه و مدل سازی عددی داشته است [۲۲]. در این مطالعه نیز فشار ریزش توسط روش موهر-

کلمب و برای حفاری فروتعدالی محاسبه شده است. در این روش جهت محاسبه تنش های القایی دیواره چاه از روابط کرنش<sup>۱</sup> اصلاح شده [۲۳] (رابطه ۱) استفاده شده است [۲۴].

$$\begin{aligned} \sigma_r &= P_w \\ \sigma_\theta &= A - P_w \\ \sigma_z &= B \end{aligned} \quad (1)$$

که  $P_w$  فشار چاه و  $A$  و  $B$  توسط رابطه ۲ به دست می آید.

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h \quad (2)$$

$$B = \sigma_v + 2\theta(\sigma_H - \sigma_h)$$

و ضرایب  $C$  و  $q$  از روابط ۳ به دست می آید.

$$C = c_0 - P_0(q - 1) \quad (3)$$

$$q = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$$

در این روابط  $c_0$  چسبندگی،  $P_0$  فشار منفذی و  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی می باشد. پس از محاسبه مقادیر فوق و با توجه به نسبت میان تنش های القایی با استفاده از جدول ۳ مقدار فشار ریزش به عنوان حد پایین پنجره گل محاسبه می شود.

جدول ۳. معیار موهر-کلمب به منظور تعیین فشار ریزش

[۲۴]

نمونه	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	$P_{wb}$
۱	$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{wb1} = (B - C)/q$
۲	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{wb2} = (A - C)/(1 + q)$
۳	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{wb3} = A - C - qB$

#### ۳.۲. مدل سازی عددی

در این پژوهش مدل سازی چاه قائم با استفاده از روش عددی المان محدود انجام گرفته است. در این روش ابتدا محیط مسئله به المان های کوچک تقسیم و سپس تقریب های معادلات پیچیده در هر یک از المان ها تخمین زده می شود. یکی از نرم افزارهای مهندسی که به تحلیل روش المان محدود می پردازد و دارای المان های گسترده جهت مدل سازی هندسه و همچنین دارای مدل های رفتاری بسیار زیاد است، نرم افزار آباکوس<sup>۲</sup> می باشد.

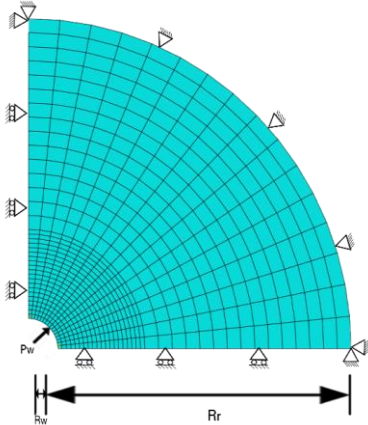
<sup>۲</sup> ABAQUS

<sup>۱</sup> Kirsch

مورد مقایسه قرار گرفته و در نهایت نتایج به دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است.

$$U_d = \frac{\sigma_h - P_w R_w^2}{2G_f r} \quad (4)$$

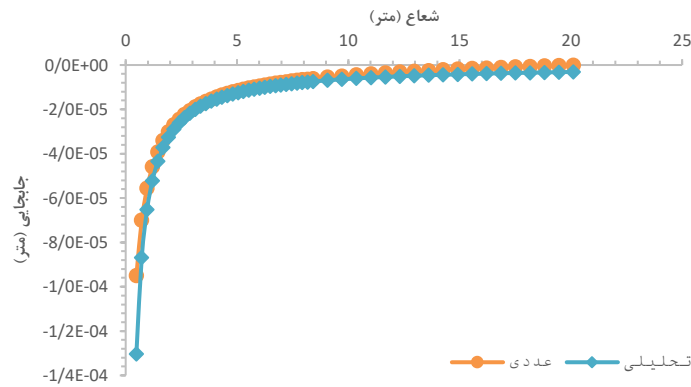
در این رابطه  $r$  مختصات شعاعی،  $P_w$  فشار چاه،  $R_w$  شعاع چاه،  $\sigma_h$  تنش افقی حداقل و  $G$  مدول برشی می‌باشد.



شکل ۳. هندسه مدل نهایی چاه قائم به همراه شرایط اولیه و مرزی و مش‌بندی

در مدل ایجاد شده برای چاه قائم جهت کاهش زمان محاسبات و با توجه به تقارن مضاعف مسئله، مدل به صورت یک چهارم در نظر گرفته شده است. چاه دارای قطر ۲۰/۳۸ سانتی متر و ابعاد مدل عددی ده برابر قطرچاه در نظر گرفته شده است. پس از ایجاد هندسه مدل، شرایط مرزی، خصوصیات ژئومکانیکی، تنش‌های برجا و فشار گل حفاری با توجه به جدول‌های ۱ و ۲ به مدل اعمال شده است. مدل رفتاری الاستوپلاستیک جهت این تحلیل با توجه به پژوهش‌های پیشین [۲۲] که معیار دراکر-پراگر نسبت به موهر-کلمب با توجه به در نظر گرفتن مقدار تنش میانی از دقت بهتری در تعیین پلاستیسیته برخوردار است به صورت دراکر-پراگر در نظر گرفته شده است. جهت افزایش دقت محاسبات در نزدیکی چاه، مش‌بندی محیط مسئله و مدل به دو بخش تقسیم شده است و اندازه مش به ترتیب از دیواره چاه تا انتهای مدل ۲۰×۱۶ و ۱۵×۱۶ می‌باشد. هندسه نهایی مسئله برای چاه قائم به صورت شکل ۳ است.

به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی در حالت الاستیک، مقادیر جابجایی نسبت به شعاع در حالت عددی با رابطه تحلیلی ۴



شکل ۴. گراف جابجایی نسبت به شعاع در حالت چاه قائم

پارامترهای ورودی اطلاق می‌شود. اولین مرحله در آنالیز حساسیت، ایجاد یک مدل بر مبنای پارامترهای سیستم (خصوصیات ژئومکانیکی و تنش‌های برجا) و فاکتور حساسیت می‌باشد؛ که به صورت  $P = f\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$  نشان داده می‌شود. این رابطه باید به صورت تحلیلی یا در سیستم‌های با پیچیدگی بیشتر به صورت عددی یا نمودارهای گرافیکی ارائه شود. از جمله معایب این سیستم می‌توان به این مورد اشاره

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است نتایج به دست آمده در حالت عددی انطباق قابل قبولی با نتایج حالت تحلیلی دارد. در نتیجه می‌توان گفت شرایط مرزی و بارگذاری فرض شده در مدل‌سازی دارای اعتبار مناسبی می‌باشند.

### ۳.۳. فاکتور آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت به تغییر فاکتورهای خروجی نسبت به مقادیر مختلف یکی از این پارامترها و ثابت نگه‌داشتن سایر

را از نظر تاثیر گذاری مقایسه نمود.

#### ۴. نتایج و بحث

با توجه به نتایج تنش‌های شعاعی، مماسی و محوری محاسبه شده از روابط (۱) برای حفاری فروتعدالی می‌توان با مقایسه مقادیر این تنش‌ها از رابطه اول موجود در جدول ۳ جهت محاسبه پنجره گل حفاری از روش موهر-کلمب استفاده نمود. در نتیجه در سازند مورد مطالعه با رژیم تنش نرمال، فشار ریزش به‌عنوان حد پایین پنجره گل با مقدار ۲۱/۲۴ مگاپاسکال و به دلیل انجام حفاری به صورت فروتعدالی مقدار فشار منفذی به‌عنوان حد بالای پنجره گل با مقدار ۳۴/۷ مگاپاسکال در نظر گرفته خواهد شد.

پس از محاسبه پنجره گل به کمک استفاده از روش تحلیلی موهر-کلمب، از آنجایی که برای مدل‌سازی عددی نیاز به تعیین یک فشار چاه بهینه در بازه فشار گل وجود دارد در نتیجه با بررسی مقادیر مختلف فشار در مدل‌سازی عددی و بررسی میزان کرنش پلاستیک (PEEQ) در هر مرحله در نهایت این نتیجه به‌دست آمد که مقدار فشار گل بهینه که در آن مقدار کرنش پلاستیک چاه در کمترین مقدار و چاه در حالت ایمن و پایدار قرار دارد معادل ۲۹/۵ مگاپاسکال می‌باشد. در مراحل بعدی جهت انجام آنالیز حساسیت از این فشار استفاده شده است. مقادیر تنش و جابجایی در اطراف چاه در این فشار در شکل ۵ نشان داده شده است.

نمود که در بررسی حساسیت هر پارامتر سیستم تنها به همان فاکتور بسنده شده و اثر آن پارامتر بر سایر پارامترها نادیده گرفته شده است. جهت استفاده از سیستم آنالیز حساسیت نیاز به استفاده از تحلیل بدون بعد داریم. در تحلیل بدون بعد، تابع حساسیت بدون بعد به صورت نسبت بین خطای نسبی مربوط به سیستم  $P$  ( $\delta_p$ ) به خطای نسبی پارامتر  $\alpha_k$  به‌عنوان تابع حساسیت  $S_k(\alpha_k)$  مطابق با رابطه ۵ تعریف خواهد شد [۲۵].

$$S_k(\alpha_k) = \frac{\left(\frac{|\Delta P|}{P}\right)}{\left(\frac{|\Delta \alpha_k|}{\alpha_k}\right)} = \left|\frac{\Delta P}{\Delta \alpha_k}\right| \frac{\alpha_k}{P} \quad (5)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

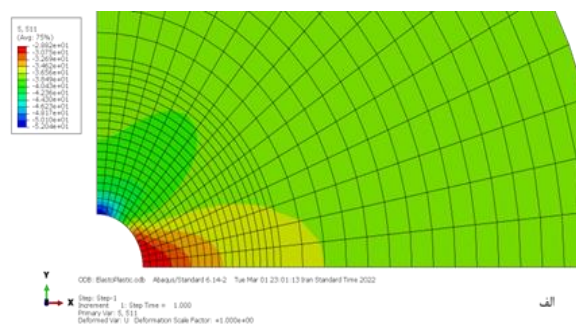
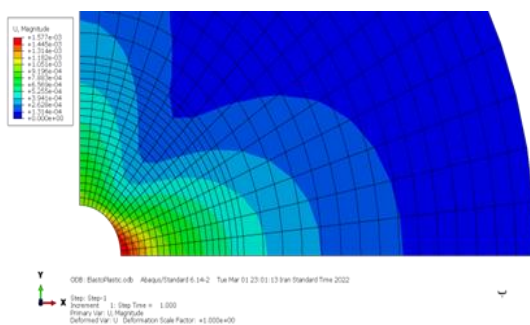
که در این رابطه  $\delta_p = |\Delta P|/P$  خطای نسبی مربوط به سیستم  $P$  و  $|\Delta \alpha_k|/\alpha_k$  خطای نسبی مربوط به پارامتر  $\alpha_k$  است.

زمانی که مقدار خطای نسبی مربوط به پارامتر کم و همچنین  $\alpha_k = \alpha_k^*$  باشد، فاکتور حساسیت برای پارامتر  $\alpha_k$  به صورت زیر به دست خواهد آمد [25].

$$S_k^* = S_k(\alpha_k^*) = \left(\frac{d\varphi_k(\alpha_k)}{d\alpha_k}\right) \alpha_k = \alpha_k^* \frac{\alpha_k^*}{P^*} \quad (6)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

در نهایت به کمک استفاده از مقادیر  $S_k^*$  به‌دست آمده برای هر پارامتر و مقایسه مقدار فاکتور حساسیت، می‌توان پارامترها



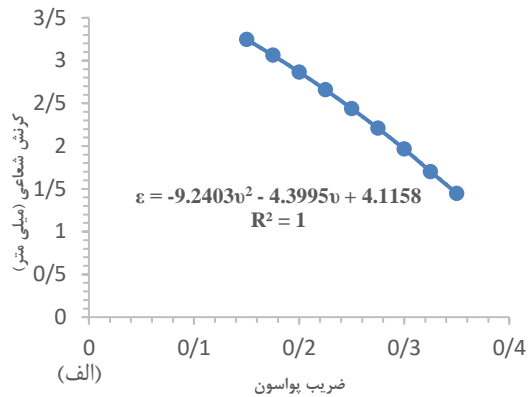
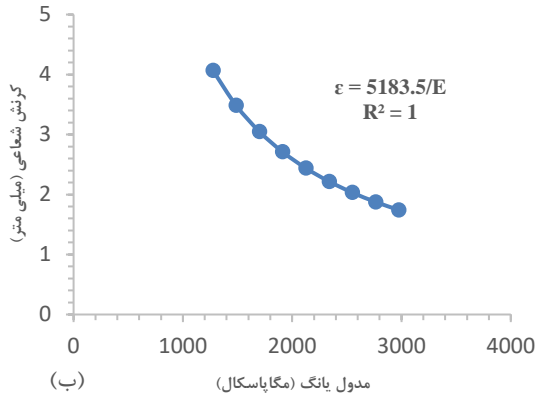
شکل ۵. مقادیر الف) تنش‌های حداکثر و ب) جابجایی در فشار چاه ۲۹/۵ مگاپاسکال

عنوان پارامتر الاستیک، چسبندگی و زاویه اصطکاک به‌عنوان پارامترهای پلاستیک و همچنین تنش‌های برجا و فشار چاه به‌عنوان سایر پارامترهای طراحی بر فاکتور خروجی کرنش شعاعی چاه مورد آنالیز حساسیت قرار گرفته است. نتایج آنالیز

جهت بررسی پایداری چاه، فاکتورهای خروجی مختلفی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند که هر کدام از این فاکتورها با توجه به پارامترهای ورودی متغیر هستند. در مطالعه حاضر اثر پارامترهای ژئومکانیکی نظیر مدول یانگ و ضریب پواسون به

زاویه صفر درجه از شعاع چاه نشان داده شده است.

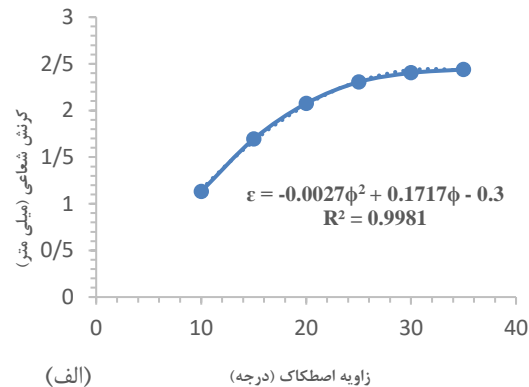
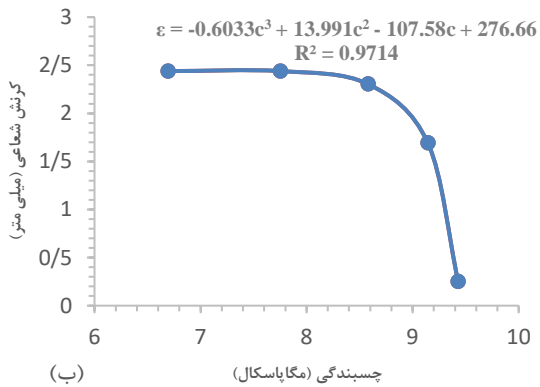
حساسیت چاه مورد مطالعه، در شکل‌های ۶ تا ۹ در راستای



شکل ۶. آنالیز حساسیت پارامترهای الاستیک، (الف) ضریب پواسون، (ب) مدول یانگ در مقابل کرنش شعاعی چاه

نتیجه گیری حاضر قابل قبول می‌باشد. در نهایت نتایج تغییرات پارامترهای الاستیک در مقابل کرنش شعاعی با نتایج به دست آمده از پژوهش عبدالهی پور و همکاران [۱۴] بر روی سنگ ضعیف مقایسه شده و مطابقت مناسبی بین نتایج این دو پژوهش حاصل شد.

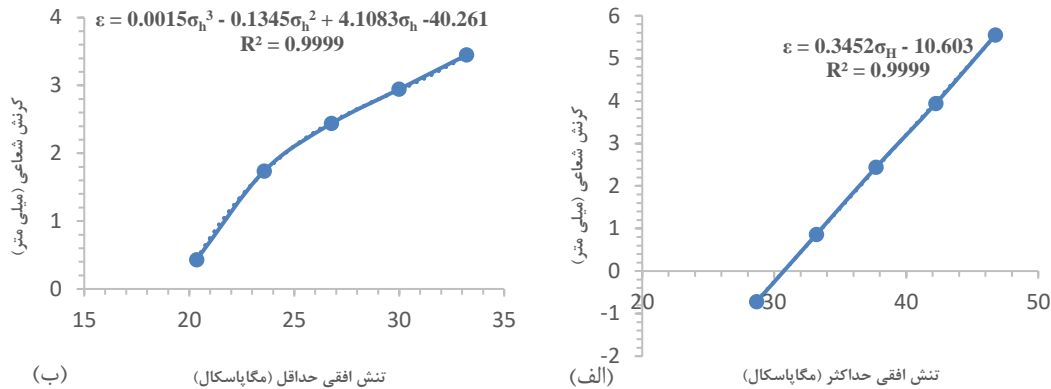
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش ضریب پواسون، میزان کرنش در دیواره چاه کاهش می‌یابد که این مورد ناشی از ضعیف بودن سنگ سازند مورد بررسی می‌باشد. همچنین در بررسی مدول یانگ مشاهده شد که با افزایش مدول یانگ میزان کرنش شعاعی دیواره چاه کاهش می‌یابد که می‌توان گفت با توجه به رابطه بین مدول یانگ و کرنش



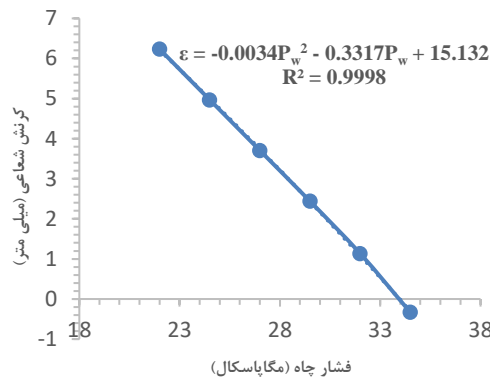
شکل ۷. آنالیز حساسیت پارامترهای پلاستیک، (الف) زاویه اصطکاک و (ب) چسبندگی در مقابل کرنش شعاعی چاه

تغییرات کرنش ناچیز بوده و پس از مقدار چسبندگی ۸٫۵ مگاپاسکال مقدار کرنش کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی از فاصله گرفتن پوش شکست دراکر-پراگر باشد.

با توجه به شکل ۷ مقدار کرنش دیواره با افزایش زاویه اصطکاک افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به روند تغییرات کرنش با مقدار چسبندگی مشاهده می‌شود که ابتدا میزان



شکل ۸. آنالیز حساسیت الف) تنش افقی حداکثر ب) تنش افقی حداقل در مقابل کرنش شعاعی چاه



شکل ۹. آنالیز حساسیت فشار چاه در مقابل کرنش شعاعی چاه

بر اساس مقادیر ضریب پواسون ۰/۲۵ و کرنش شعاعی معادل با آن بر اساس گراف شکل ۶-الف (مقدار ۲/۴۳) محاسبه شده است.

$$\varepsilon = -9.2403\vartheta^2 - 4.3995\vartheta + 4.115$$

$$\rightarrow S_{(\vartheta)}^* = \frac{|d\varepsilon|}{|d\vartheta|} \left( \frac{\vartheta}{\varepsilon} \right) =$$

$$|-18.4806\vartheta - 4.3995| \times \frac{0.25}{2.43} \quad (7)$$

$$\rightarrow S_{(\vartheta)}^* = 0.9245$$

با توجه به مثال حل شده برای ضریب پواسون، فاکتور حساسیت در ادامه با استفاده از معادلات روند نشان داده شده در گراف‌های تصاویر ۶ تا ۹ و رابطه ۶ برای سایر پارامترهای یاد شده محاسبه و نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

در شکل ۸ با بررسی میزان تنش‌های موثر برجا افقی، مشخص شد که با افزایش تنش افقی حداکثر اختلاف میان تنش‌های حداکثر و حداقل افزایش می‌یابد که منجر به افزایش کرنش دیواره چاه می‌شود. به علاوه همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است با نزدیک شدن فشار چاه به مقدار تنش موثر حداکثر سازند، میزان کرنش شعاعی کاهش می‌یابد که ناشی از ایجاد تعادل بین چاه و سازند است.

با توجه به نتایج حاصل از تغییرات کرنش نسبت به هر یک از پارامترهای مورد مطالعه که در شکل‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده است؛ معادله روند هریک از پارامترهای فوق در مقابل کرنش شعاعی در نزدیک‌ترین حالت با نتایج عددی به دست آمده است. جهت آشنایی با نحوه محاسبه فاکتور حساسیت، در این بخش فاکتور حساسیت مربوط به ضریب پواسون به عنوان مثال به صورت زیر محاسبه شده است. فاکتور حساسیت



جدول ۴. فاکتور حساسیت پارامترهای ژئومکانیکی، تنش‌های برجا و فشار چاه

$S_{p_w}^*$	$S_E^*$	$S_{\theta}^*$	$S_{\varphi}^*$	$S_c^*$	$S_{\sigma_H}^*$	$S_{\sigma_h}^*$
۶,۴۳۸۱	۱	۰,۹۲۴۵	۰,۲۴۸۲	۲,۰۷۶۲	۵,۳۳۷۱	۱,۴۱۱۱

گل اعمالی به چاه جهت حفاری فروتعدالی به‌دست آمده است.

- کرنش شعاعی چاه به‌عنوان عامل بررسی پایداری چاه انتخاب شده و تغییرات آن نسبت به تغییرات مقدار پارامترهای ژئومکانیکی محاسبه و روابطی میان کرنش و هر یک از پارامترهای مورد بررسی به‌دست آمده است.
- با توجه به فاکتورهای حساسیت به‌دست آمده برای هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی، مشاهده شد که موثرترین پارامتر در بین پارامترهای الاستیک و پلاستیک به ترتیب مدول یانگ و چسبندگی و کم اثرترین پارامترها به ترتیب ضریب پواسون و زاویه اصطکاک است.
- در مجموع از میان تمامی پارامترهای بررسی شده، فشار چاه و پس از آن تنش افقی حداکثر بیشترین اثرگذاری و پارامترهای زاویه اصطکاک و ضریب پواسون کمترین اثرگذاری را بر کرنش شعاعی در حفاری فروتعدالی دارند.

## ۶. مراجع

- [1] Chen, G., Chenevert, M. E., Sharma, M. M., & Yu, M. (2003). A study of wellbore stability in shales including poroelastic, chemical, and thermal effects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 38(3-4), 167-176.
- [2] Raza, S. H. (2015). Application of Underbalanced Drilling in Conventional Reservoirs and its Prospects. SPE/PAPG Pakistan section Annual Technical Conference.
- [3] Roshan, H., & Rahman, S. (2011). Analysis of pore pressure and stress distribution around a wellbore drilled in chemically active elastoplastic formations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(5), 541-552.
- [4] Bradley, W. (1979). Failure of inclined boreholes.
- [5] Coelho, L. C., Soares, A. C., Ebecken, N. F. F., Alves, J. L. D., & Landau, L. (2005). The impact of constitutive modeling of porous rocks on 2-D wellbore stability analysis. *Journal of Petroleum Science and*

با توجه به نتایج به‌دست آمده برای فاکتور حساسیت پارامترهای الاستیک، پلاستیک، تنش‌های برجا و فشار چاه موجود در جدول ۴، مشاهده می‌شود که در بین پارامترهای بررسی شده به ترتیب فشار چاه با مقدار فاکتور حساسیت ۶,۴۳۸ و تنش برجا افقی حداکثر با مقدار ۵,۳۳۷ تاثیرگذارترین پارامترهای ژئومکانیکی و زاویه اصطکاک با مقدار فاکتور حساسیت ۰,۲۴۸ و ضریب پواسون با مقدار ۰,۹۲۴ کم اثرترین پارامترهای ژئومکانیکی بر پایداری چاه در حفاری فروتعدالی می‌باشند. به‌علاوه ترتیب قرارگیری پارامترها از نظر تاثیرگذاری به ترتیب از بیشترین به کمترین تاثیرگذاری مربوط به فشار چاه، تنش افقی حداکثر، چسبندگی، تنش افقی حداقل، مدول یانگ، ضریب پواسون و در نهایت زاویه اصطکاک می‌باشد.

## ۵. نتیجه‌گیری

همان‌گونه که به وضوح در مقدمه این پژوهش به آن اشاره شد حفاری فروتعدالی یکی از اصلی‌ترین روش‌ها در حفاری چاه‌های نفت و گاز می‌باشد. با توجه به این موضوع سعی شده است در این پژوهش بر اساس داده‌های یکی از میدادین جنوب غربی ایران به مدل‌سازی عددی برای چاه قائم در حفاری فروتعدالی با فرض حالت الاستوپلاستیک و معیار شکست دراکر-پراگر پرداخته شود و در نهایت با تحلیل آنالیز حساسیت پارامترهای ژئومکانیکی، نتایج زیر به‌دست آمده است:

- پنجره گل ایمن به‌دست آمده جهت حفاری فروتعدالی بر اساس روش تحلیلی موهر-کلمب مقدار ۲۱,۲۴ تا ۳۴,۷ مگاپاسکال می‌باشد که مقدار حد بالای آن با توجه به فروتعدالی بودن حفاری برابر با مقدار فشار منفذی سازند است.
- با بررسی نتایج خروجی تنش و کرنش در فشارهای گل مختلف در بازه‌ی پنجره گل ایمن فوق، فشار ۲۹,۵ مگاپاسکال به عنوان پایدارترین و ایمن‌ترین مقدار فشار

- A criterion for estimating the minimum drilling mud pressure to prevent shear failure in oil wells. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 227-236.
- [17] Khodami, E., Ramezanzadeh, A., Noroozi, M., & Mehrad, M. (2020). Numerical Investigation of the Impact of Geomechanical Parameters of Formations on Well Integrity of One of the Iranian Oil Fields. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 54(2), 179-183.
- [18] Duran, O., Sanei, M., Devloo, P. R., & Santos, E. S. (2020). An enhanced sequential fully implicit scheme for reservoir geomechanics. *Computational Geosciences*, 24(4), 1557-1587.
- [19] Sanei, M., Duran, O., Devloo, P. R., & Santos, E. S. (2021). Analysis of pore collapse and shear-enhanced compaction in hydrocarbon reservoirs using coupled poro-elastoplasticity and permeability. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(7), 1-18.
- [20] Saeidi Moghaddam, S., Afshoon, R., & Jalali Far, H. (2012). Feasibility of using Under Balanced Drilling in one of the oil reservoirs in southern Iran 3rd National Petroleum Engineering Congress.
- [21] Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. Cambridge university press.
- [22] Heydari, M., Aghakhani Emamqeyysi, M. R., & Sanei, M. (2022). Finite element analysis of wellbore stability and optimum drilling direction and applying NYZA method for a safe mud weight window. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 11(29), 67-76.
- [23] Kirsch, C. (1898). Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 42, 797-807.
- [24] Zimmerman, R. W., & Al-Ajmi, A. M. (2006). Stability analysis of deviated boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion, with applications to some North Sea and Indonesian Reservoirs. IADC/SPE Asia Pacific drilling Technology conference and exhibition.
- [25] Abdollahipour, A., & Rahmancejad, R. (2012). Sensitivity analysis of influencing parameters in cavern stability. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22(5), 707-710.
- Engineering, 46(1-2), 81-100.
- [6] Kaarstad, E., & Aadnoy, B. S. (2005). Optimization of borehole stability using 3-D stress optimization. SPE annual technical conference and exhibition.
- [7] Al-Ajmi, A. M., & Zimmerman, R. W. (2006). Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(8), 1200-1211.
- [8] Soroush, H., Gao, H., Qutob, H., Neil, B., Mahli, Z., & Abalioglu, I. (2011). Geomechanical Study for UBD Feasibility in the Northern Iraq Fields. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition.
- [9] Marbun, B. T. H., Zulkhifly, S., Hariz, J., & Lumbangaol, C. (2011). A Methodology of Underbalanced Drilling Design in Depleted Reservoir. International Petroleum Technology Conference.
- [10] Sanei, M. (2011). Wellbore stability analysis in the method of under balanced drilling. Proceeding of the 8th Iranian Student Conference of Mining Engineering; Tehran, Iran. (In Persian).
- [11] Ojha, K., Saxena, A., & Pathak, A. (2014). Underbalanced drilling and its advancements: an overview. *Journal of Petroleum Engineering and Technology*, 4(2).
- [12] Asgari, Ramin, Haydarizadeh, & Meamarian. (2017). Analysis of wellbore stability and Determination of Mud weight window with NYZA at a South oil field. *Exploration and production oil and GAS*, 1396(146), 59-65.
- [13] Najafipour, A., Ahangari, K., & Al Ali, S. M. (2018). Determination of the appropriate mud window and sensitivity analysis of horizontal wellbore stability using numerical modeling in one of the oil fields in southwest Iran. [Research]. *Scientific- Propagative Journal of Oil & Gas EXPLORATION & PRODUCTOIN*, 1396(150), 60-67.
- [14] Abdollahipour, A., Soltanian, H., Pourmazaheri, Y., Kazemzadeh, E., & Fatehi-Marji, M. (2019). Sensitivity analysis of geomechanical parameters affecting a wellbore stability. *Journal of Central South University*, 26(3), 768-778.
- [15] Darvishpour, A., Seifabad, M. C., Wood, D. A., & Ghorbani, H. (2019). Wellbore stability analysis to determine the safe mud weight window for sandstone layers. *Petroleum Exploration and Development*, 46(5), 1031-1038.
- [16] Behnam, N., Hosseini, M., & Shahbazi, S. (2020).