

# اثرات ژئومکانیکی افت فشار مخزن، دمای سیال حفاری و فشار اسمزی بر روی شرایط پایداری دیواره چاه (مطالعه موردی)

احسان چراغ‌سحر، رضا فلاح<sup>\*</sup> و سیدعلیرضا طباطبایی‌نژاد

دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶

## چکیده

ناپایداری دیواره چاه همواره یکی از مهمترین مشکلات در حین حفاری بوده است. به طور معمول، تعیین وزن سیال حفاری جهت پایداری دیواره چاه در حین حفاری، در شرایط اولیه مخزن انجام می‌شود. در حالیکه بعد از تولید از مخزن، با گذشت زمان، فشار منفذی لایه تولیدی در صورت نبود منبع فشار کاهش می‌یابد و باعث تغییر در مقدار و جهت تنش‌های برجا می‌شود. در این شرایط به منظور حفظ پایداری دیواره در حفاری چاه‌های جدید لازم است که اثر افت فشار مخزن جهت تعیین شرایط پایداری و مسیر بهینه در نظر گرفته شود. همچنین دیگر عوامل اثرگذار در پایداری دیواره چاه دمای سیال حفاری و اثر اسمزی آن می‌باشد. در این تحقیق به منظور بررسی اثر افت فشار مخزن بر روی شرایط پایداری چاه و مسیر بهینه حفاری و همچنین بررسی اثر اسمزی و دمای سیال حفاری، یکی از مخازن جنوب غرب ایران که دچار ۱۱ MPa افت فشار شده است، مورد مطالعه قرار گرفت. در شرایط اولیه این مخزن حداقل فشار درون چاهی مورد نیاز جهت عدم ریزش دیواره چاه در محدوده ۲۸/۴ - ۳۴/۲ MPa بوده است و پایدارترین مسیر حفاری، حفر چاهی با زاویه ۴۵° و در جهت تنش افقی حداقل می‌باشد. پس از کاهش ۱۱ MPa فشار مخزن، با تغییر تنش‌های القایی اطراف دیواره چاه، حداقل فشار لازم جهت پایداری در محدوده ۲۱/۷ - ۲۶/۴ MPa و پایدارترین مسیر حفاری ۱۰° کاهش، چاهی با زاویه ۳۵° می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن اثر دمای سیال حفاری بر روی این مقادیر، حداقل فشار لازم در چاه با مقداری کاهش در محدوده ۲۱/۴ - ۲۶ MPa می‌باشد و همچنین با اعمال اثر شیمیایی سیال حفاری بر روی محتوای رسی سازند این مقدار با مقداری افزایش در محدوده ۲۲ - ۲۶/۷ MPa می‌باشد. نهایتاً با در نظر گرفتن همزمان اثر اسمزی و دمای سیال به دلیل اثر معکوسی که دارند حداقل فشار لازم جهت پایداری در محدوده ۲۱/۸ - ۲۶/۵ MPa می‌باشد. بنابراین، اثر افت فشار مخزن تأثیر قابل توجهی بر روی پایداری دیواره چاه دارد و سایر موارد در مخزن مورد مطالعه تأثیر کمی دارند.

کلمات کلیدی: ژئومکانیک، پایداری دیواره چاه، افت فشار مخزن، دمای سیال حفاری، اثر اسمزی

\*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی rezafalahat@sut.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2019.3809.2752)

## مقدمه

می‌تواند باعث جلوگیری و یا کاهش مشکلات شود. پدیده‌هایی که سبب ناپایداری چاه می‌شوند غالباً به دو دسته مکانیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. از دید مکانیکی برای برقراری تعادل تنش‌ها، لازم است که تمرکز تنش در اطراف دیواره کاهش یابد. به این منظور با اعمال وزن ستون سیال حفاری این تمرکز تنش کاهش می‌یابد و تعادل برقرار می‌شود و دیواره چاه پایدار می‌شود. به این ترتیب برای تعیین محدوده وزن گل ایمن برای پایداری چاه لازم است که ابتدا مدل مکانیکی منطقه شامل تنش‌های برجا، خواص الاستیک و فشار منفذی ساخته شود و سپس با تعیین تنش‌های القایی برجای اطراف چاه و استفاده از یک معیار شکست وزن گل موردنیاز برای پایدار ماندن دیواره چاه تعیین شود. از طرف دیگر، هنگامی که سیال حفاری در چاه قرار می‌گیرد ممکن است فعل و انفعالاتی بین سیال و دیواره چاه به وجود آید بنابراین لازم است عوامل شیمیایی ناپایداری دیواره چاه نیز بررسی شوند. ناپایداری شیمیایی بیشتر به دلیل وجود محتوای شیلی سنگ‌هاست که به دلیل واکنش‌هایی که با سیال حفاری انجام می‌شود می‌تواند باعث تشدید ناپایداری گردد. از عوامل مؤثر دیگر در پایداری دیواره چاه دمای سیال حفاری مورد استفاده در چاه است که می‌تواند بر روی شرایط پایداری دیواره چاه تأثیرگذار باشد. بنابراین، برای تعیین پنجره گل ایمن لازم است که اثرات شیمیایی و دمایی سیال حفاری در نظر گرفته شود. از طرف دیگر با گذشت زمان و تولید از مخزن، مخزن دچار افت فشار خواهد شد و این افت فشار می‌تواند روی مقادیر و حتی جهت تنش‌های برجای افقی تأثیرگذار باشد [۷-۹]. تغییر جهت و مقدار تنش‌های برجا تأثیر زیادی بر روی شرایط پایداری چاه دارد. بنابراین در چنین شرایطی که فشار مخزن کاهش یافته است برای حفاری مجدد

ناپایداری چاه در حین حفاری یکی از عوامل اصلی هدررفت زمان و هزینه در عملیات حفاری است. ناپایداری دیواره چاه ممکن است منجر به افزایش هزینه‌های حفاری بین ۱۰ تا ۱۵٪ شود و حتی می‌تواند منجر به از دست رفتن چاه شود [۱-۳]. سالانه میلیاردها دلار، به دلیل مشکلات ناپایداری چاه در سراسر دنیا هزینه می‌شود [۴]. مشکل ناپایداری دیواره چاه را می‌توان به کمک معیارهای شکست<sup>۱</sup> و مدل‌هایی که تنش‌های اطراف چاه را محاسبه می‌کنند، بررسی نمود. پیش از حفاری، تنش‌های برجا در اعماق در حال تعادل هستند. با شروع حفاری بار وارد بر سنگ‌های اطراف چاه برداشته می‌شود و باعث ایجاد تمرکز تنش در اطراف دیواره چاه می‌شود. به تنش‌های اطراف دیواره چاه تنش‌های القایی گفته می‌شود [۵]. برای پایدار ماندن دیواره چاه لازم است که وزن گل در محدوده مشخصی حفظ شود که به آن پنجره گل ایمن گفته می‌شود. اگر وزن گل مورد استفاده در چاه از حد بالای این محدوده بیشتر شود باعث شکست کششی دیواره می‌شود. بنابراین، دیواره چاه دچار شکست شده و باعث هرزروی سیال حفاری و آسیب سازند می‌گردد. از طرف دیگر، اگر وزن گل از حد پایین پنجره گل ایمن کمتر باشد باعث شکست برشی می‌گردد و منجر به ریزش دیواره می‌شود [۶]. ریزش دیواره چاه باعث افزایش فشار وارده به پمپ‌های گل و در صورت عدم تشخیص آن، باعث گیرکردن رشته حفاری در چاه می‌شود که برای آزاد کردن آن، باید وقت و هزینه فراوانی صرف شود [۱، ۳]. همچنین شکست کششی القایی باعث هرزروی سیال حفاری به درون سازند شده و حتی در صورت تشخیص به موقع، ساعت‌ها و یا حتی روزها وقت برای رفع آن نیاز است. این مشکلات باعث تحمیل هزینه‌های زیادی بر کارفرما می‌شود. علاوه بر تعیین پنجره گل ایمن صحیح، حفاری در جهت پایدارترین مسیر نیز

1. Failure Criterion

$$\tau_{\theta z} = 2(\tau_{yx} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta) \quad (10)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0 \quad (11)$$

در معادلات ۷ تا ۱۱،  $\theta$  زاویه اطراف دیواره چاه، فشار ته چاه و  $P_w$  نسبت پواسن می‌باشد. برای در نظر گرفتن فشار منفذی لازم است که از معادلات پوروالاستیک استفاده شود. بنابراین، فرم نهایی تنش‌های القایی اطراف دیواره چاه به صورت پوروالاستیک به این صورت خواهند بود:

$$\sigma_r = P_w \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = (\sigma_x + \sigma_y) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta - P_w + \eta(P_w - P_f) \quad (13)$$

$$\sigma_z = \sigma_{z(car)} - \nu [2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \sin 2\theta] + \eta(P_w - P_f) \quad (14)$$

$$\tau_{\theta z} = 2(\tau_{yx} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta) \quad (15)$$

$$\eta = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \alpha \quad (16)$$

که  $P_f$  فشار منفذی و  $\alpha$  عدد بایوت می‌باشد. با توجه به اینکه در اطراف دیواره چاه تنش شعاعی تنش اصلی حداقل ( $\sigma_3$ ) می‌باشد، تنش اصلی حداکثر و تنش اصلی حداقل از رابطه زیر محاسبه می‌شوند [۵]:

$$\sigma_{1,3} = \frac{(\sigma_\theta + \sigma_z)}{2} \pm \sqrt{\sigma_{\theta z}^2 + \left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_z}{4}\right)^2} \quad (17)$$

سپس تنش‌های اصلی محاسبه شده جهت آنالیز پایداری دیواره چاه باید در یک معیار شکست قرار بگیرند. معیار شکست سه بعدی موگی کلمب برای این مطالعه استفاده شده است. این معیار شکست به صورت زیر بیان می‌شود [۱۰]:

$$F = a + b(\sigma_{m,2}) - \tau_{oct} \quad (18)$$

که:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (19)$$

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} C \cos \varphi \quad (20)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (21)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (22)$$

در این مخزن و یا امتداد چاه‌های قبلی به منظور افزایش بهره‌وری و یا عبور از این لایه برای رسیدن به لایه‌های پایینی لازم است که در تعیین وزن گل ایمن و مسیر بهینه به منظور حفاری در شرایط پایدار، بازنگری شود و اثر افت فشار مخزن نیز در نظر گرفته شود. هدف این تحقیق، در نظر گرفتن اثرات شیمیایی و دمایی سیال حفاری و افت فشار مخزن بر روی تعیین پنجره گل ایمن در یکی از مخازن جنوب غرب ایران می‌باشد.

### روش انجام تحقیق و معرفی منطقه

برای تعیین پنجره گل ایمن و مسیر بهینه، ابتدا لازم است تنش‌های برجا در مختصات کارتیزین در اطراف دیواره چاه محاسبه شوند. تنش‌های القایی اطراف دیواره به صورت تابعی از جهت و شیب چاه به صورت زیر می‌باشند [۵]:

$$\sigma_x = (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha) \cos^2 i + \sigma_v \sin^2 i \quad (1)$$

$$\sigma_y = (\sigma_H \sin^2 \alpha + \sigma_h \cos^2 \alpha) \cos^2 i \quad (2)$$

$$\sigma_{z(car)} = (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha) \sin^2 i + \sigma_v \cos^2 i \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = 0.5(\sigma_h - \sigma_H) \sin 2\alpha \cos i \quad (4)$$

$$\tau_{xz} = 0.5(\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha - \sigma_v) \sin 2i \quad (5)$$

$$\tau_{yz} = 0.5(\sigma_h - \sigma_H) \sin 2\alpha \sin i \quad (6)$$

در معادلات ۱ تا ۶ زاویه چاه است،  $\alpha$  زاویه آزیموت نسبت به جهت تنش افقی ماکزیمم،  $\sigma_v$  تنش عمودی که ناشی از وزن لایه‌های بالایی است،  $\sigma_H$  تنش افقی حداکثر و  $\sigma_h$  تنش افقی حداقل است. برای تعیین شرایط پایداری دیواره چاه لازم است که تنش‌های القایی در اطراف دیواره چاه و در مختصات استوانه‌ای محاسبه شوند. با توجه به شکل چاه و با فرض کرنش صفحه‌ای تنش‌های القایی در مختصات استوانه‌ای به این صورت می‌باشند:

$$\sigma_r = P_w \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = (\sigma_x + \sigma_y) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta - P_w \quad (8)$$

$$\sigma_z = \sigma_{z(car)} - \nu [2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \sin 2\theta] \quad (9)$$

۱۱ MPa افت فشار گردیده و فشار آن به ۲۱/۶ MPa کاهش یافته است. شکل ۱ لایه‌های عبوری چاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. چاه مورد مطالعه در این تحقیق به صورت افقی در داخل مخزن حفاری شده است.

#### طراحی پنجره گل ایمن در شرایط اولیه

ساخت مدل مکانیکی زمین نیازمند تخمین تنش‌های برجا و پارامترهای مکانیک سنگی شامل خواص الاستیک، مقاومت سنگ و فشار منفذی می‌باشد. برای ساخت مدل مکانیکی زمین از داده‌های مختلفی استفاده می‌شود. در این تحقیق برای به دست آوردن تنش عمودی از نگاره چگالی و برای محاسبه تنش‌های افقی از روش‌های چند ضلعی تنش و آزمایش شکست ارائه شده توسط زوبک استفاده شده است [۱۱].

به منظور محاسبه پارامترهای ژئومکانیکی، از نگاره‌های چاه پیمایی از جمله نگار صوتی و چگالی به دست آمده در چاه مورد نظر استفاده شده است. با توجه به نگار فتوالکتریک، جنس سنگ آهک می‌باشد و روابط فیزیک سنگی متناسب با این نوع سنگ برای محاسبه پارامترهای UCS، Internal Friction، Young's Module و Cohesion استفاده شده است. این پارامترها بر حسب عمق در تمام طول مخزن رسم شدند. سپس با توجه به اینکه مخزن بصورت چند لایه است و خواص ژئومکانیکی آن متفاوت می‌باشند، به منظور بررسی و مقایسه نتایج حاصل از تأثیر افت فشار، دما و اسمز بر روی پایداری دیواره چاه، یکی از لایه‌های تولیدی در عمق حفاری ۳۴۹۲ m چاه انتخاب گردید. پارامترهای مدل مکانیکی محاسبه شده برای این لایه از مخزن کربناته در جدول ۱ آورده شده است. ابتدا در شرایط اولیه مخزن حداقل وزن گل ریزش به عنوان تابعی از زاویه و آزیموت در نرم‌افزار محاسبه گردید و نتایج آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

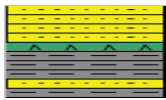
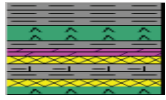
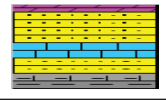
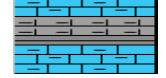
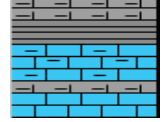



در معادلات ۱۸ تا ۲۲ تنش برشی اوکتاهدرال،  $C$  چسبندگی سنگ،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی سنگ و  $\sigma_{1,2}$  تنش میانی است. در این معیار شکست هنگامی که  $F \leq 0$  گردد، سنگ دچار شکست می‌شود.

در این تحقیق برای محاسبه حداقل وزن گل ریزش و تعیین مسیر بهینه حفاری از نرم‌افزار ژئومکانیکی Stabview حداقل فشار لازم در چاه جهت عدم ریزش دیواره در تمام زاویه‌ها و آزیموت‌های چاه به دست می‌آید. مختصاتی که کمترین حداقل وزن گل ریزش را ارائه می‌کنند به عنوان مسیر بهینه یا پایدارترین مسیر شناخته می‌شود.

در این تحقیق، تأثیر تغییر تنش‌های برجا به صورت استاتیک بررسی گردید و هدف این مطالعه، بررسی تأثیر افت فشار بر روی شرایط پایداری چاه در دو مقطع زمانی (شرایط اولیه و پس از افت فشار) بوده است. بدین منظور، ابتدا مدل مکانیکی زمین در شرایط اولیه ساخته شد و حداقل وزن گل ریزش و پایدارترین مسیر محاسبه شد (طراحی در شرایط اولیه). سپس، با در نظر گرفتن افت فشار ایجاد شده بر اثر تولید و اثر آن بر روی وضعیت تنش‌های برجا، مدل مکانیکی جدید ساخته شده و حداقل وزن گل ریزش و پایدارترین مسیر تعیین می‌شود (طراحی پس از افت فشار). در حالت سوم، اثر اسمزی و دمای سیال حفاری هر کدام به طور جداگانه بر روی شرایط پایداری در نظر گرفته می‌شوند و در حالت چهارم همه عوامل با هم و به طور همزمان اعمال می‌گردند.

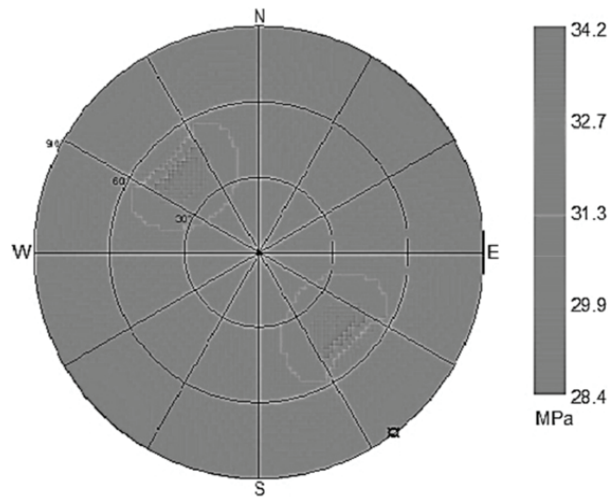
این تحقیق بر روی سازند مخزنی یکی از میادین جنوب غرب ایران انجام شده است. سازند مخزنی این میدان سروک می‌باشد که از جنس کربناته و همراه با محتوای شیلی می‌باشد و در سال ۱۳۷۷ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. فشار اولیه این مخزن ۳۲/۶ MPa می‌باشد. پس از ۲۰ سال تولید دچار

شکل ۱ ضخامت و جنس لایه‌های منطقه

عصر	دوران	سن سنگ	سازند	عمق حفاری تا بالای سازند (m)	ضخامت (m)	توصیف سنگ	سنگ‌شناسی
Cenozoic	Tertiary	Miocene - Pliocene	آغاچاری	۱۴	۱۲۴۰	ماسه سنگ، سنگ رس، ژیبس و انیدریت	
		M. Miocene	گچساران	۱۲۵۴	۵۶۱	انیدریت و ژیبس، سنگ رس، مارل، سنگ آهک و نمک	
		Oligocene-Miocene	آسماری	۱۸۱۵	۳۵۰	ماسه سنگ، سنگ آهک، سنگ رس و مارل	
		U.Paleocene-L. Oligocene	بایده	۲۱۶۵	۱۴۰	سنگ آهک، شیل و مارل	
Mesozoic	Cretaceous	Upper	گورپی بالایی	۲۳۰۵	۱۸۰	سنگ آهک، شیل و مارل	
			تاریور	۲۴۸۵	۶۰		
			گورپی پایینی	۲۵۴۵	۱۶۰		
			ایلام	۲۷۰۵	۱۰۸	مارل، شیل و سنگ آهک	
			لاقان	۲۸۱۳	۱۳	شیل و سنگ آهک	
			سروک	۲۸۲۶	۱۲۲۴	شیل و سنگ آهک	
			عمق حفاری نهایی	۴۰۵۰	-		

جدول ۱ پارامترهای ژئومکانیکی منطقه

عمق حفاری (m)	عمق عمودی (m)	تنش عمودی (MPa)	تنش افقی حداکثر (MPa)	تنش افقی حداقل (MPa)	فشار سازند (MPa)	مقاومت فشارشی تک محوره (MPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی	نسبت پواسن	ضریب بایوت
۳۴۹۲	۲۸۳۴	۶۸/۵	۶۴	۴۷	۳۲/۶	۴۳	۱۱/۲	۳۴/۰۶	۰/۳	۰/۹

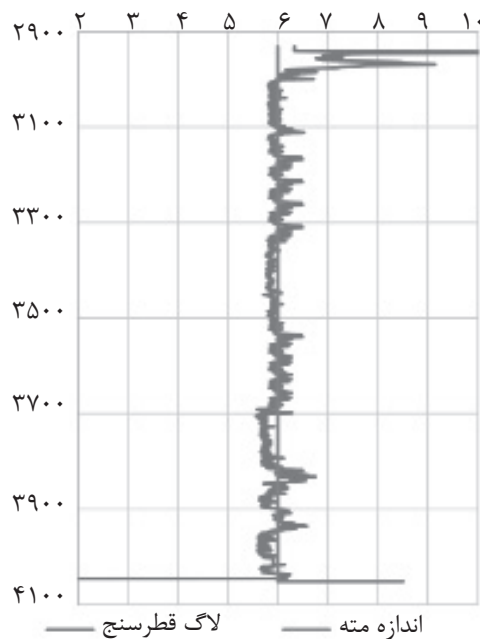


شکل ۲ حداقل فشار لازم جهت پایداری دیواره چاه در شرایط اولیه

با توجه به این لاگ (شکل ۳) دیواره چاه دچار ریزش نشده است. براساس گزارشات حفاری چاه مورد بررسی، وزن گل استفاده شده در چاه PPG ۱۰/۵ بوده است که در عمق مورد بررسی فشاری معادل ۳۵ MPa ایجاد می‌کند که این مقدار از فشار پیش‌بینی شده جهت ریزش دیواره بیشتر بوده است که می‌تواند نشان از درستی فشار ریزش محاسبه شده باشد.

در شرایط اولیه مخزن حداقل فشار لازم در چاه برای عدم ریزش در محدوده ۲۸/۴ - ۳۴/۲ MPa به دست آمد و در چاه مورد بررسی، ۳۳/۲ MPa می‌باشد. همچنین، مسیر بهینه در زاویه ۴۵° و آزیموت ۱۳۵° است (شکل ۲).

به منظور راستی آزمایی نتایج حداقل فشار لازم جهت پایداری دیواره چاه که در شرایط اولیه به دست آمد، از لاگ قطرسنجی استفاده شده است.



شکل ۳ نمودار قطرسنج چاه مورد مطالعه

## طراحی پنجره گل ایمن پس از افت فشار مخزن

با تولید از مخزن در طول سالیان و در صورت نبود برنامه تزریقی جهت کنترل فشار، فشار مخزن معمولاً دچار کاهش می‌شود. براساس معادله ۲۳، کاهش فشار مخزن می‌تواند باعث تغییر در مقدار و جهت تنش‌های برجای افقی گردد [۳، ۱۲]. با توجه به معادله‌های ۱-۶، تغییر در جهت و مقدار تنش‌های برجای افقی می‌تواند باعث تغییر در مقادیر تنش‌های القایی اطراف دیواره چاه گردد. تغییرات تنش‌های القایی اطراف چاه بر اثر افت فشار در شکل ۴ نشان داده شده است. تغییر تنش‌های القایی اطراف دیواره چاه، شرایط پایداری دیواره چاه و مسیر بهینه حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین برای حفر چاه‌های جدید از این مخزن و یا جهت رسیدن به مخازن پایین‌تر، لازم است که اثر افت فشار مخزن جهت ارزیابی شرایط پایداری دیواره و مسیر بهینه مورد بررسی قرار گیرد. برای پیش‌بینی تغییرات تنش در اثر افت فشار مخزن از معادلات پروالاستیک استفاده شد [۱۱]:

$$\Delta\sigma_{Hor} = \alpha \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \Delta P_p \quad (23)$$

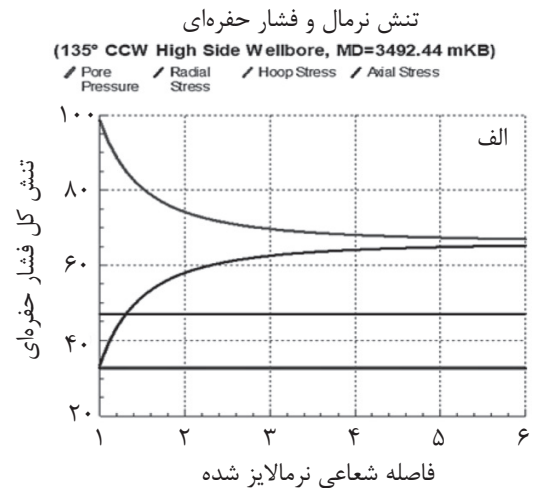
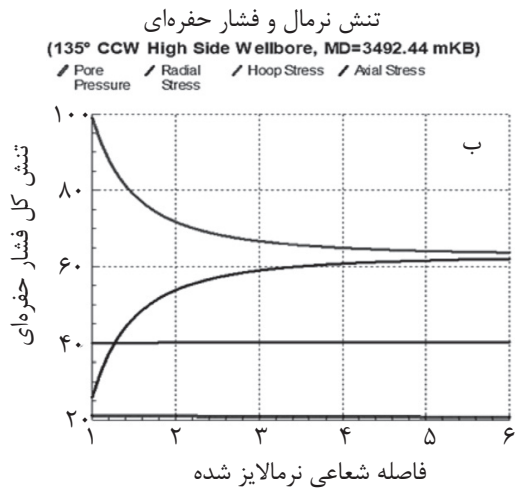
در این رابطه  $\Delta\sigma_{Hor}$  تغییرات تنش‌های افقی که متناظر با  $\sigma_{Hmax}$  و  $\sigma_{Hmin}$  است،  $\Delta P_p$  تغییرات فشار منفذی برای اثر تولید،  $\nu$  نسبت پواسن و  $\alpha$  عدد بایوت می‌باشد. در معادله ۲۳ فرض شده است که مخزن همگن و عدم کرنش در جهت جانبی می‌باشد. همچنین در این مطالعه فرض شده است که افت فشار مخزن تأثیری بر روی مقدار تنش عمودی ندارد و تنها تنش عمودی مؤثر تغییر می‌کند.

در لایه مخزنی مورد مطالعه بعد از تولید از مخزن در طول ۲۰ سال، فشار مخزن ۱۱ MPa کاهش یافته است. بر اثر این افت فشار، مقدار تنش‌های برجا طبق معادله ۲۳ تغییر می‌کنند و این تغییرات باعث تغییر در مقدار تنش‌های القایی در اطراف

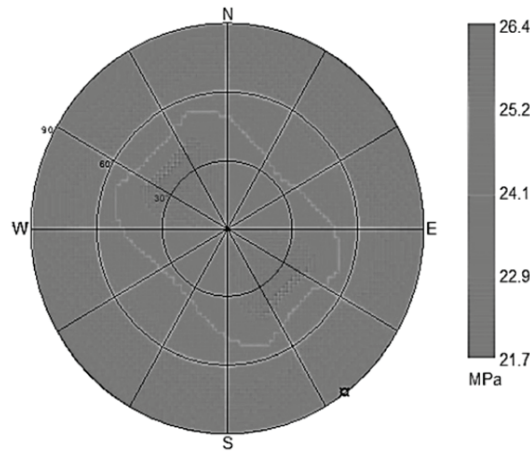
دیواره چاه می‌گردد (شکل ۴). بر اثر این تغییرات در وضعیت تنش‌ها، حداقل شرایط پایداری و مسیر بهینه برای حفاری در این لایه جهت رسیدن به مخازن پایین‌تر تغییر می‌کند. به‌طوریکه حداقل فشار موردنیاز جدید در چاه جهت حفاری در این لایه به محدوده ۲۶/۴ - ۲۱/۷ MPa و در چاه مورد مطالعه به ۲۶ MPa تغییر می‌کند و پایدارترین مسیر حفاری جدید در زاویه ۳۵° و آزیموت ۱۳۵ قرار دارد (شکل ۵). همچنین شکل ۶ تغییرات حداقل فشار لازم جهت پایداری دیواره بر حسب زاویه چاه در حالت قبل از افت فشار و پس از افت فشار، در جهت مسیر آزیموت چاه مورد مطالعه (آزیموت ۱۴۳) را نشان می‌دهد به طوری که زاویه‌ای که به کمترین فشار لازم جهت پایداری نیاز دارد از ۴۵° به ۳۵° کاهش می‌یابد و همچنین پس از افت فشار مخزن حفاری چاه عمودی نسبت به چاه افقی پایدارتر است. همچنین در شکل ۷ میانگین شعاع ریزش نرمالایز شده بر حسب فشار درون چاه نشان داده شده است به‌طوریکه با کاهش فشار ته چاه، شعاع بیشتری از دیواره چاه به درون چاه فرو می‌ریزد. پس از تولید و افت فشار مخزن، کمینه مقداری که می‌توان فشار چاه را کاهش داد مقدار ۲۱ MPa می‌باشد. به محض رسیدن فشار ته چاهی به این فشار، به یکباره دیواره چاه دچار ریزش زیادی می‌شود.

## اثر دمای سیال حفاری بر روی پنجره گل ایمن

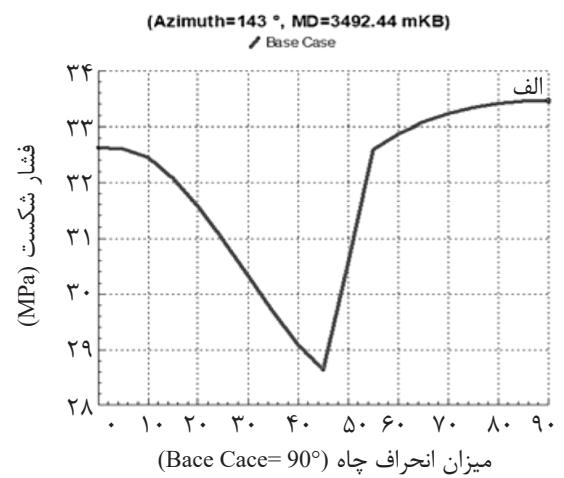
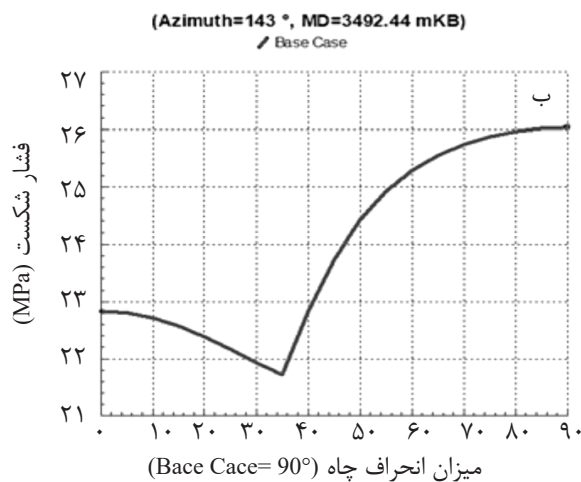
دمای سیال حفاری روی تنش‌های القایی در اطراف چاه مؤثر است. دمای بالا باعث افزایش تمرکز گرمایی می‌شود که اثر نامطلوبی روی پایداری دیواره چاه دارد [۱۳]. کاهش دمای گل حفاری باعث کاهش تمرکز تنش در اطراف دیواره چاه می‌شود. به‌طوری‌که از رسیدن تنش به محدوده مقاومت سنگ جلوگیری می‌کند. اگرچه گرادیان دما نسبت به عمق از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر متفاوت است ولی در حالت کلی، سازند در عمق مورد نظر حفاری، گرم‌تر از سیال حفاری است.



شکل ۴ تنش‌های القایی در اطراف دیواره چاه در جهت آزیموت چاه. (الف) شرایط اولیه (ب) پس از کاهش فشار مخزن

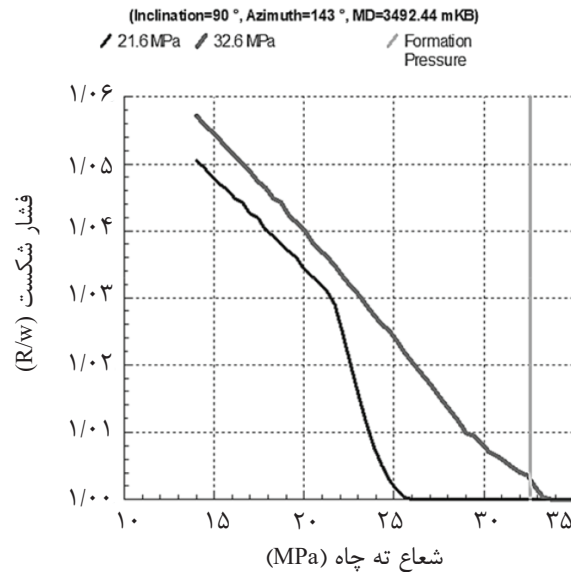


شکل ۵ حداقل فشار لازم در چاه جهت پایداری دیواره چاه



شکل ۶ حداقل فشار لازم در چاه جهت پایداری دیواره چاه در جهت آزیموت چاه مورد بررسی. (الف) شرایط اولیه (ب) پس از کاهش فشار مخزن





شکل ۷ اثر افت فشار مخزن بر شعاع ریزش دیواره نسبت به فشار ته چاه

شود و یا اینکه بر اساس شیب زمین گرمایی به دست آید. در این تحقیق دمای سازند مورد حفاری براساس شیب زمین گرمایی و عمق عمودی واقعی  $110^\circ\text{C}$  و دمای سیال حفاری نیز براساس نمودارگیری در عمق حفار  $3492\text{ m}$  مقدار  $60^\circ\text{C}$  می باشد. همچنین، مقدار ضریب انبساط حجمی برای سنگ آهک در دماهای مختلف توسط روزنهلتز و همکاران داده شده است که برای شرایط موردنظر این تحقیق  $24 \times 10^{-6}^\circ\text{C}$  می باشد [۱۵]. با در نظر گرفتن اثر دمای سیال حفاری و افت فشار مخزن حد پایین پنجره گل به محدوده  $21/4 - 26$  MPa تغییر یافت که نشان می دهد دمای کمتر گل حفاری نسبت به سازند باعث کاهش وزن گل مورد نیاز مورد نیاز برای پایداری دیواره چاه می شود (شکل ۸).

#### اعمال اثر اسمزی بر روی پنجره گل

فعل و انفعال سیال حفاری با سازند معمولاً باعث تورم و نرم شدگی سنگ در اطراف دیواره چاه و تغییر مقاومت آن می شود. اهمیت این پدیده بستگی به فاکتورهای زیادی مانند نوع کانی های سنگ، مقاومت سازند، نوع سیال حفاری، فشار منفذی، دما، اندازه تنش برجا و وجود کیک گل بر روی دیواره چاه و ترکیب شیمیایی سیال حفاری دارد [۱۶، ۱۷].

سیال حفاری خنک تر تنش مماسی را کاهش می دهد و در نتیجه، سبب پایداری بیشتر می شود. خنک تر بودن گل حفاری باعث بهبود پایداری دیواره چاه می شود [۵، ۱۱، ۱۲، ۱۴].

با استفاده از روابط ارائه شده توسط آدنوی و لویه ارائه شده، تنش دمایی القایی ناشی از دمای چرخش سیال توسط زوبک به صورت زیر می باشد [۱۱]:

$$\sigma_T = \frac{a_m \times E \times (T - T_0)}{1 - \nu} \quad (24)$$

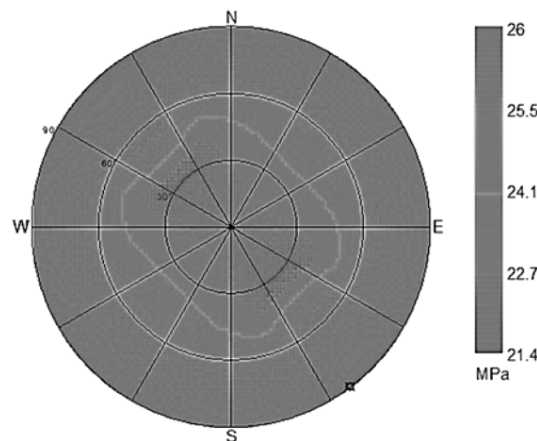
که  $E$  و  $\nu$  به ترتیب نسبت پواسن و مدول یانگ می باشند.  $a_m$  ضریب انبساط دمایی سنگ است و بر حسب  $K^{-1}$  می باشد.  $T$  دمای گردش سیال و  $T_0$  دمای سازند بر حسب کلوین می باشد. این مقدار تنش که ناشی از دما است به تنش های مماسی و محوری در دیواره چاه اضافه می شود و تنش های القایی جدید در اطراف دیواره چاه به صورت زیر می باشند:

$$\sigma_r = P_w \quad (25)$$

$$\sigma_\theta = (\sigma_x + \sigma_y) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta - P_w + \eta(P_w - P_f) + \frac{a_m \times E \times (T - T_0)}{1 - \nu} \quad (26)$$

$$\sigma_z = \sigma_{z(car)} - \nu [2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \sin 2\theta] + \eta(P_w - P_f) + \frac{a_m \times E \times (T - T_0)}{1 - \nu} \quad (27)$$

دمای سازند می تواند توسط نمودارگیری مشخص



شکل ۸ حداقل فشار لازم جهت پایداری در چاه پس از کاهش فشار مخزن و با اعمال اثر دمای سیال حفاری

در فعالیت آب شیل و فعالیت سیال حفاری می‌تواند بعنوان یک معادل پتانسیل هیدرولیکی شناخته شود [۲۱].

محاسبات فشار اسمزی می‌تواند در تعیین اثر واکنش شیمیایی روی تغییر تنش در دیواره کمک کننده باشد. معادلات عددی برای فشار اسمزی و اثر آن روی تنش‌های مؤثر در دیواره چاه به صورت زیر می‌باشند [۲۲]:

$$\sigma'_r = 0 \quad (28)$$

$$\sigma'_\theta = \alpha \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \Delta \Pi \quad (29)$$

$$\sigma'_z = \alpha \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \Delta \Pi \quad (30)$$

در این معادلات  $\sigma_r$  و  $\sigma_\theta$  و  $\sigma_z$  مقادیر تنش‌های شعاعی، مماسی و محوری ناشی از فشار اسمزی می‌باشند. همچنین  $\alpha$  عدد بایوت،  $\nu$  نسبت پواسن و  $\Delta \Pi$  فشار اسمزی است که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$\Delta \Pi = I_m * \left( \frac{RT_0}{V_w} \right) \ln \frac{a_{w,df}}{a_{w,sh}} \quad (31)$$

که در این معادله  $I_m$  ضریب غشایی است و بدون بعد است و براساس نوع کانی رسی مقداری از ۰ تا ۱ دارد.  $R$  ثابت جهانی گازها می‌باشد و  $T_0$  دمای مطلق گل و بر حسب  $K$  می‌باشد. همچنین حجم مولی آب می‌باشد و پارامترهای  $V_w$  و  $a_{w,df}$  به

فعل و انفعالات شیمیایی بین سیال و سازند به دلیل متفاوت بودن ترکیب شیمیایی آب درون فضای متخلخل سنگ و ترکیب شیمیایی سیال حفاری می‌باشد. این واکنش‌های شیمیایی هنگامی که سیال در مقابل سازندهای شیلی قرار بگیرد بسیار بحرانی‌تر می‌شوند [۱۸]. در صورتی که سازند در حال حفاری حاوی کانی‌های متورم شونده رسی باشد، این سازند از نظر شیمیایی فعال است و برای به حداقل رساندن واکنش‌های شیمیایی باید در انتخاب نوع گل دقت نمود. تشکیل کیک گل باعث جلوگیری از واکنش‌های فیزیکی شیمیایی بین سیال حفاری و سازند می‌شود. بنابراین به دلیل عدم تشکیل کیک گل مناسب در سازندهای حاوی شیل، آب می‌تواند به محتوای شیلی سازند نفوذ کند و فشار منفذی را افزایش دهد [۱۹، ۲۰]. هنگامی که فشار منفذی افزایش یابد، تنش‌های ایجاد شده می‌تواند باعث ریزش قسمت‌های شیل شود [۱۸]. اگر وزن گل استفاده شده به اندازه کافی برای مقابله با فشار سیال سازند بالا نباشد، شیل به درون چاه ریزش می‌کند و مسئله ناپایداری چاه مطرح می‌شود. بنابراین جهت تعیین فرمولاسیون گل و بهینه‌سازی وزن گل لازم است که اثرات فیزیکی و شیمیایی گل برای آنالیز پایداری چاه در نظر گرفته شود [۳]. اثر شیمیایی ناشی از اختلاف

با توجه به اینکه سیال حفاری در این تحقیق حاوی نمک است، مقدار اثرات اسمزی پایین بوده و اثرات واکنش‌های یونی بین سیال حفاری و محتوای شیلی سازند ناچیز می‌باشد. لذا، حداقل فشار موردنیاز در چاه جهت پایدار ماندن دیواره چاه مقدار کمی افزایش می‌یابد و بین ۲۶/۷ MPa - ۲۲ می‌باشد در حالی که در صورت استفاده از سیال حفاری پایه آبی شیرین این اثر شدیدتر می‌بود (شکل ۹).

**اثر همزمان اسمز و دمای سیال به همراه افت فشار**

#### مخزن بر روی پنجره گل سیال حفاری

همان‌طور که بحث شد، کمتر بودن دمای سیال حفاری نسبت به دمای سیال باعث پایدارتر شدن دیواره و کاهش فشار مورد نیاز در چاه جهت پایداری می‌شود و از طرف دیگر، اثر اسمزی سیال حفاری باعث افزایش فشار مورد نیاز جهت پایداری می‌شود. در صورتی که هر دو عوامل به طور همزمان باهم در نظر گرفته شوند می‌توانند تا حدی اثر همدیگر را خنثی کنند. در مخزن مورد مطالعه در این تحقیق، حداقل فشار لازم پایداری در چاه با در نظر گرفتن این دو عامل در محدوده ۲۱/۸ - ۲۶/۵ MPa می‌باشد که تغییر ناچیزی نسبت به شرایط بدون در نظر گرفتن این دو اثر نشان می‌دهد (شکل ۱۰).

ترتیب واکنش‌پذیری شیمیایی آب سازندی و سیال حفاری می‌باشد. واکنش‌پذیری آب شیرین، ۱ و برای آب‌های شور کمتر از ۱ است [۲۳].

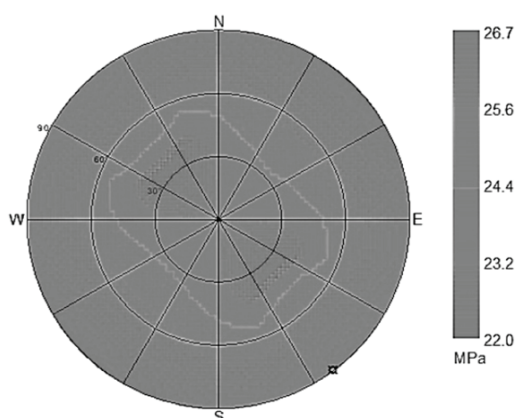
بنابراین با در نظر گرفتن اثر دما و سیال حفاری روی تنش‌های القایی دیواره چاه این تنش‌ها به صورت زیر بازنویسی می‌شوند:

$$\sigma_r = P_w \quad (32)$$

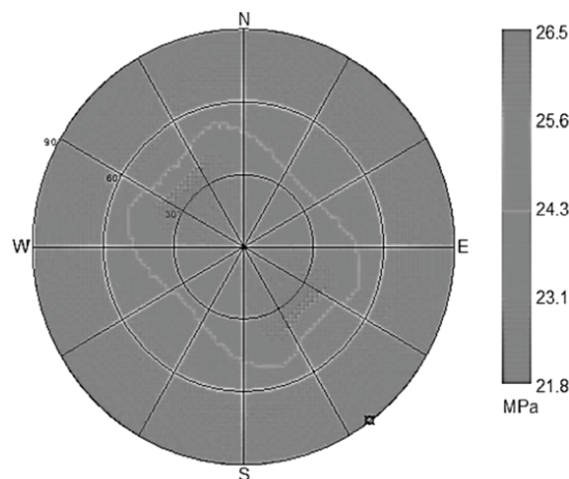
$$\sigma_\theta = (\sigma_x + \sigma_y) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta - P_w + \eta(P_w - P_f) + \alpha \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \Delta \Pi + \frac{a_m \times E \times (T - T_0)}{1-\nu} \quad (33)$$

$$\sigma_z = \sigma_{z(car)} - \nu \left[ 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \sin 2\theta \right] + \eta(P_w - P_f) + \alpha \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \Delta \Pi + \frac{a_m \times E \times (T - T_0)}{1-\nu} \quad (34)$$

عموماً ضریب غشایی شیل، واکنش‌پذیری شیمیایی سیال حفاری و آب سازندی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند. سیال حفاری استفاده شده در چاه مورد تحقیق حاوی ۲۰ درصد حجمی نمک پتاسیم کلرید بوده که براساس مطالعات انجام شده مقادیر واکنش‌پذیری محتوای شیل سازند و واکنش‌پذیری شیمیایی سیال حفاری به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۹۲ می‌باشد. همچنین، برای ضریب غشایی نیز برای سیالات حفاری حاوی نمک در حدود ۰/۱ می‌باشد [۲۲-۲۶].



شکل ۹ حداقل فشار لازم جهت پایداری در چاه پس از کاهش فشار مخزن و با اعمال اثر اسمزی



شکل ۱۰ حداقل فشار لازم جهت پایداری در چاه پس از کاهش فشار مخزن و با اعمال اثر اسمزی و دمای سیال حفاری

از تخلیه کاهش می‌یابد و همچنین پایدارترین زاویه چاه جهت حفاری در این منطقه پس از افت فشار،  $10^\circ$  کاهش یافت به طوری که افت فشار لایه باعث پایدارتر شدن چاه عمودی نسبت به چاه افقی می‌شود. تأثیر دمای کمتر سیال حفاری نسبت به دمای مخزن باعث می‌شود تا حدودی دیواره چاه از نظر ریزش پایدارتر شود به طوری که در این مخزن باعث کاهش حدود  $0.4$  MPa در مقدار فشار لازم جهت پایداری گردیده است. علاوه بر آن، اثر اسمزی باعث ناپایدارتر شدن دیواره می‌گردد و در این تحقیق باعث افزایش  $0.3$  MPa در حداقل فشار لازم جهت پایداری گردیده است. بررسی توأمان دو اثر سبب خنثی کردن تأثیر آنها در این مخزن شده است.

### نتیجه گیری

در این تحقیق اثر افت فشار مخزن ناشی از تولید با استفاده از معیار شکست موگی کلمب بر روی حداقل فشار لازم جهت پایداری دیواره چاه مورد بررسی قرار گرفت و همچنین، اثرات اسمزی و دمای سیال حفاری به صورت جداگانه و همزمان بررسی گردیدند. در مخزن مورد مطالعه، پس از  $11$  MPa افت فشار مخزن، تنش‌های مؤثر برجا تغییر کرده و به سبب آن تنش‌های القایی در اطراف دیواره نیز تغییر کردند که باعث کاهش قابل توجه محدوده حداقل فشار لازم جهت حفاری پایدار چاه گردید به طوری که این مقدار در تمام مختصات از  $28.4$  MPa- $34.2$  MPa به محدوده  $21.7$  MPa- $26.4$  MPa کاهش یافت. همچنین در چاه مورد بررسی، حداقل فشار لازم با  $7.2$  MPa کاهش از  $33.2$  MPa در شرایط اولیه به  $26$  MPa پس

### منابع

- [1]. Bourgoyne Jr. A. T., Millheim K. K., Chenevert M. E. and Young Jr. F. S., "Applied drilling engineering chapter 8 solutions," SPE-31656-MS, Society of Petroleum Engineers, 1986.
- [2]. Cheatham Jr J. B., "Wellbore stability," Journal of Petroleum Technology, Society of Petroleum Engineers, Vol. 36, Issue 06, pp. 889-896, June 1984.
- [3]. Rabia H., "Well engineering and construction," Entrac Consulting Limited London, 1<sup>st</sup> ed. p. 743, 2002.
- [4]. Kang Y., Yu M., Miska S. Z. and Takach N., "Wellbore stability," A Critical Review and Introduction to DEM., SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2009.

- [5]. Fjar E., Holt R. M., Raaen A. M., Risnes R. and Horsrud P., "Petroleum related rock mechanics," 2<sup>nd</sup> ed., Developments in Petroleum Sciences, Vol. 53, p. 483, 2008.
- [6]. Liz Losada R. J. and Alejano L. R., "New safe mud weight window representations to prevent wellbore instability," in IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology, Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [7]. Aadnoy B. S., "Effects of reservoir depletion on borehole stability," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 6, Issue 1, pp. 57-61, July 1991.
- [8]. Addis M., "The stress-depletion response of reservoirs," in SPE Annual Technical Conference And Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 1997.
- [9]. Gao Q., Cheng Y., Yan Ch., Jiang L. and Han S. "Initiation pressure and corresponding initiation mode of drilling induced fracture in pressure depleted reservoir," Journal of Energy Resources Technology, Vol. 141, Issue 1, p. 012901, 2019.
- [10]. Al-Ajmi A. M. and Zimmerman R. W., "Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Vol. 42, Issue 3, pp. 431-439. 2005.
- [11]. Zoback M. D., "Reservoir geomechanics," Cambridge University Press, 2010.
- [12]. Li X. and Gray K., "Wellbore stability of deviated wells in depleted reservoir," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [13]. Li M., Liu G. and J. Li, "Thermal effect on wellbore stability during drilling operation with long horizontal section," Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 23, pp. 118-126, March 2015.
- [14]. Aadnoy B. S. and Belayneh M., "A new fracture model that includes load history, temperature and Poissons effects," in IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2008
- [15]. Rosenholtz J. L. and Smith D. T., "Linear thermal expansion of calcite, var. Iceland spar, and Yule Marble," American Mineralogist, Vol. 34, No. 11-12, pp. 846-854, 1949.
- [16]. Darley H. C. and Gray G. R., "Composition and properties of drilling and completion fluids," Gulf Professional Publishing, 1988
- [17]. McLellan P. J., "Assessing the risk of wellbore instability in horizontal and inclined wells," Petroleum Society of Canada, Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 35, Issue 05, May1996.
- [18]. Fam M. and Dusseault M., "Dielectric permittivity of shales as a measure of their physico-chemical sensitivity," in SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Society of Petroleum Engineers, 1998
- [19]. Tutuncu A. and Mese A., "Impact of fluids and formation anisotropy on acoustic, deformation and failure characteristics of reservoir shales and pure clay minerals," in 12<sup>th</sup>, ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics, 2011.
- [20]. Tutuncu A. and Mese A., "Relationship between permeability, acoustic, mechanical and strength anisotropies in unconventional reservoirs and seal shales," in 45<sup>th</sup> US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association, 2011.
- [21]. Yu M., "Chemical and thermal effects on wellbore stability of shale formations," Doctoral dissertation, pp.1-

184, 2002.

[22]. Al-Bazali T. M., Zhang J., Chenevert M. E. and Sharma M. M., "*Factors controlling the membrane efficiency of shales when interacting with water-based and oil-based muds,*" International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Sustainable Growth for oil and Gas, 2006.

[23]. Talal M. Al-Bazali, Zhang J., Chenevert M. E. and Sharma M. M., "*Factors controlling the membrane efficiency of shales when interacting with water-based and oil-based muds,*" in International Oil & Gas Conference and Exhibition in China, Society of Petroleum Engineers, 2006.

[24]. Chen G. and Ewy R., "*Investigation of the undrained loading effect and chemical effect on shale stability,*" in SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Society of Petroleum Engineers, Texas 2002.

[25]. Hawkes C. D., McLellan P. J., Ruan C., Maurer W. and Gahan B. C., "*Wellbore instability in shales: a review of fundamental principles and GRI-funded research,*" . Final Report (Part 1 of 2), 2000.

[26]. Mody F. K. and Hale A., "*Borehole-stability model to couple the mechanics and chemistry of drilling-fluid/shale interactions,*" Society of Petroleum Engineers, Journal of Petroleum Technology, Vol. 45, Issue 11, Publication Date November, 1993.