

بررسی پایداری دیواره چاه در لایه‌های شیلی، مطالعه موردی: میدان نفتی اهواز

پژوهش نفت

سال بیستم
شماره ۶۳
صفحه ۱۸-۱۲، ۱۳۸۹

مرتضی احمدی، محمد سلیمانی و نفیسه صالحی سیاوشانی*

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی معدن

N_ss81@yahoo.com

مقدمه

وجود لایه‌های شیلی در اعماق زمین در زمان حفاری برای استخراج نفت و گاز یکی از مشکلات اساسی حفاری و تولید است. با وجود مطالعات فراوان بر روی شیل‌ها و خصوصیات پیچیده آن‌ها، هنوز مشکلات حاصل از وجود لایه‌های شیلی باعث بالابردن هزینه در حفاری چاه‌های نفت می‌باشد.

در بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی شیل، به بررسی خصوصیات فیزیک و شیمیایی رفتار آن در هنگام حفاری و بعد از آن پرداخته‌اند و سعی کرده‌اند تا با معرفی روابطی برای تغییر در ترکیبات گل حفاری، شیل را پایدار سازند. بررسی شیل از دیدگاه مکانیک سنگ، جنبه جدیدی از مطالعات است که در سال‌های اخیر در حال توسعه می‌باشد. از جمله موارد دارای اهمیت در مطالعه پایداری چاه‌های افقی، تعیین تنش برجا است.

بر اساس تحقیقات انجام شده، مقاومت سنگ در مقایسه با دیگر پارامترها مانند خصوصیات الاستیک سنگ، شرایط زه‌کشی و سطوح لایه‌بندی در پایداری چاه از اهمیت بیشتری برخوردار است [۱ و ۲]. بر اساس اینکه ناحیه مورد مطالعه از نظر تکتونیک آرام یا فعال است و همچنین چگونگی تنش‌های برجای غالب از نوع نرمال، فشاری و یا از نوع گسل‌های امتداد لغز باشد، مسیر بهینه چاه عمودی، مایل و افقی تعیین خواهد شد.

چکیده

لایه‌های شیلی که در ۷۵ درصد مقاطع حفاری شده یافت می‌شوند، سبب بروز ۹۰ درصد از مشکلات مربوط به ناپایداری چاه می‌باشند. در هنگام حفاری در سازندهای شیلی با استفاده از روش‌های عددی، تحلیلی و در نظر گرفتن پارامترهای صحیح و منطقی می‌توان به کاهش هزینه‌های ناشی از ناپایداری دیواره چاه پرداخت و با درک صحیح به وضعیت پایداری کمک کرد. این تحقیق نیز پیرامون تاثیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی شیل بر پایداری و نگهداری دیواره چاه‌های نفت در یکی از میدانی نفتی ایران است. در این پژوهش با استفاده از دو روش عددی (نرم‌افزار FESTO3) و روش تحلیلی در یک مقطع از چاه که در آن ناپایداری شیل مشاهده شده، تحلیل پایداری انجام گرفت و با روش تحلیلی برای حالات مختلف تنش‌های برجا، پنجره وزن گل ارائه شد. همچنین توسط روش عددی، یکی از این وضعیت‌ها که مطابق با وضعیت چاه مورد نظر است مورد بررسی قرار گرفت و وزن گل بهینه برای آن عمق پیشنهاد شد و سپس نتایج به دست آمده از دو روش تحلیلی و عددی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که آگاهی از وضعیت و مقدار تنش‌های برجا، تاثیر زیادی بر روی تحلیل‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پایداری، حفاری چاه‌نفت، خصوصیات مکانیکی شیل، نرم‌افزار FESTO3، میدان نفتی اهواز

۸۳/۳ پوند بر فوت مکعب و فشار منفذی آن برابر ۴۲/۶ MPa اندازه‌گیری شده است. در این عمق ناپایداری ایجاد شده توسط شیل از نوع تنگ‌شدگی چاه^۲ می‌باشد [۴].

روش تحلیلی

برای تعیین وزن گل مجاز، ملاک شکست مور-کلمب تعمیم داده شده در نظر گرفته شد. برای استفاده از این ملاک در ابتدا می‌باید جهت و مقدار تنش‌های برجا تعیین شوند. به علت عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری مربوط به تنش‌های برجا از تئوری گسلس اصطکاکی [۵] استفاده و توسط چند ضلعی تنش، مقدار تنش‌ها در هفت حالت ممکن محاسبه شد. با استفاده از روابط موجود در هریک از این هفت حالت می‌توان وزن گل مجاز را محاسبه کرد و در نهایت برای هر یک از این حالات، تنش ایجاد شده در چاه را محاسبه کرده و سپس حد بالا و پایین فشار گل را به دست آورد.

تنش قائم با توجه به جنس سنگ از مقادیر میانگین چگالی که در متون مختلف ارائه شده به دست می‌آید. با توجه به میانگین چگالی ستون سنگ شناسی چاه مورد نظر، مقدار تنش قائم (S_v) در عمق ۳۴۸۶ متری برابر ۹۳ MPa بود. برای به دست آوردن تنش افقی حداقل و حداکثر (S_{Hmax} و S_{Hmin}) و پیش‌بینی محدوده تفاضل تنش از تئوری گسلس آندرسون برای تعیین رژیم تنش، استفاده شد. با استفاده از معادلات ذیل برای حالات مختلف گسلس می‌توان مقدار تنش‌های افقی حداقل و حداکثر را محاسبه کرد. به ترتیب با فرض حالات گسلس نرمال و معکوس معادلات به شکل زیر است:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_v - P_0}{S_{Hmin} - P_0} \leq \left[(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu \right]^2 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_{Hmax} - P_0}{S_v - P_0} \leq \left[(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu \right]^2 \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، P_0 فشار منفذی، σ_1 و σ_3 تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل و μ یک مقدار ثابت است که در اینجا برابر ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود. فرض بر این است که وضعیت تنش درون پوسته در تعادل اصطکاکی است.

هنگامی که یک چاه عمودی در داخل رژیم تنش گسلی نرمال ($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$) حفر می‌شود، چاه پایدار می‌ماند. تحت شرایط تنش گسلی امتداد لغز ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$)، چاه‌های مایل و افقی پایدارتر از چاه‌های عمودی هستند [۳]. در این تحقیق، پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز با استفاده از تئوری گسلس آندرسون، مقدار تنش‌های برجا در مقطع مورد نظر از چاه در لایه شیلی، محاسبه شد. سپس توسط ملاک شکست مور-کلمب^۱ مربوط به چاه برای هر کدام از حالات تنش استنتاج شده از چند ضلعی تنش یک بازه وزن گل مجاز به دست آمد. در مرحله بعد با استفاده از نرم‌افزار FESTO3 که بر مبنای روش اجزا محدود عمل می‌کند، تحلیل پایداری چاه در عمق مورد نظر انجام و وزن گل پیشنهاد شده است. نتایج به دست آمده از دو روش مذکور تشابه قابل قبولی دارند با این تفاوت که در روش عددی عوامل بیشتری مدنظر قرار می‌گیرند.

زمین‌شناسی منطقه

میدان نفتی اهواز با روند شمال غرب-جنوب شرق، یک تاقدیس تحت‌الارضی است که در ناحیه فروافتادگی دزفول شمالی قرار دارد. ابعاد این میدان بر روی افق آسماری ۶۷ و ۵ کیلومتر است. پتانسیل اقتصادی این میدان از سازندهای آسماری و بنگستان در سال ۱۹۵۸ به اثبات رسید. حفر چاه‌های این منطقه با سازندهای مختلفی تقاطع داشته که از بین آن‌ها سازندهای گروه بنگستان (ایلام، سروک و کژدمی) دارای بیشترین میزان شیل بوده و مشکلات ناپایداری چاه نیز در همین سازندها ایجاد شده است. حدود ۶۰ درصد کانی رسی موجود در میدان نفتی اهواز از کانی ایلیت است و کانی مخرب مونت موریلونیت در این میدان اندک می‌باشد [۴].

بررسی پایداری چاه

برای بررسی پایداری چاه از روش تحلیلی و عددی (نرم‌افزار)، در عمق ۳۴۸۶ متری چاه مورد نظر در درون لایه شیلی سازند ایلام مقطع زده شد. قطر چاه در این مقطع $\frac{3}{8}$ اینچ و ضخامت کیک گل حفاری $\frac{1}{8}$ اینچ می‌باشد. وزن مخصوص گل حفاری به کار رفته برای ایجاد پایداری ۸۲ تا

1. Mohr-Coulomb

2. Tight Hole

جدول ۱- معیار مور-کلمب برای فشار فروریزش در چاه عمودی [۵]

وضعیت	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	اگر $P_w \leq P_{wb}$ چاه دچار ریزش می شود
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	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{wb3} = A - C - qB$

جدول ۲- معیار مور-کلمب برای فشار شکست در چاه عمودی [۵]

وضعیت	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	اگر $P_w \leq P_{wf}$ چاه دچار شکست می شود
۱	$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_{wf} = C + qE$
۲	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{wf2} = (C + qD) / (1 + q)$
۳	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_{wf3} = (C - E) / q + D$

در جداول ۱ و ۲، σ_r ، σ_θ و σ_z تنش های حاصل در دیواره چاه، P_w فشار داخلی چاه و پارامترهای A ، C ، B ، E ، D و q عبارتند از:

$$B = \sigma_b + 2v(\sigma_H - \sigma_h) \quad (۳)$$

$$C = C_0 - P_0(q - 1) \quad (۴)$$

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h \quad (۵)$$

$$E = \sigma_r - 2v(\sigma_H - \sigma_h)$$

$$D = 3\sigma_H - \sigma_h$$

$$q = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (۶)$$

در روابط بالا، σ_H و σ_h به ترتیب تنش های برجای افقی حداکثر و حداقل، v نسبت پواسون و ϕ زاویه اصطکاک داخلی سنگ می باشد و C_0 برابر است با:

$$C_0 = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (۷)$$

با توجه به نمودار چند ضلعی تنش، می توان هفت نقطه با وضعیت های تنش برجای خاص را در مقطع مورد نظر فرض کرد. برای هر یک از این حالات می توان با توجه به روابط ملاک شکست مور-کلمب حد بالا و پایین فشار گل را محاسبه کرد. در هر یک از حالات تنش برجا می توان دو مقدار را تعیین کرد؛ مقدار اول حد بالای گل یعنی P_{wf} و دومی حد پایین گل یا P_{wb} می باشد. برای پایداری چاه، فشار گل باید بین این دو حد قرار گیرد. به عبارت دیگر:

$$P_{wb} \leq P_w \leq P_{wf}$$

1. Kirsch

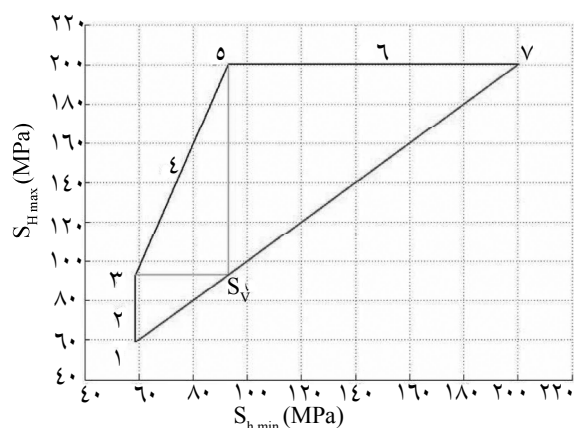
با جای گذاری مقادیر (۴۲) مگاپاسکال برای فشار منفذی) در روابط بالا میزان گسش نرمال و معکوس محاسبه می شود:

$$S_{h \min} = 58 \quad \left(\begin{array}{l} S_1 = S_v \\ S_3 = S_{h \min} \end{array} \right) \text{ گسش نرمال}$$

$$S_{H \max} = 200 \quad \left(\begin{array}{l} S_1 = S_{H \max} \\ S_3 = S_v \end{array} \right) \text{ گسش معکوس}$$

در این روابط S_r تنش عمودی و S_3 تنش افقی است.

با فرض $S_{h \min}$ به عنوان خط قائم و $S_{H \max}$ به عنوان خط افقی، می توان چند ضلعی تنش را برای عمق مورد نظر رسم کرد. این چند ضلعی مقادیر ممکن تنش های اصلی حداقل و حداکثر را در هر عمقی بر اساس تئوری گسش آندرسون و نیز تئوری گسش مور-کلمب با یک ضریب اصطکاک و فشار منفذی تعریف می کند. در شکل ۱ این چند ضلعی تنش رسم و ارائه شده است.



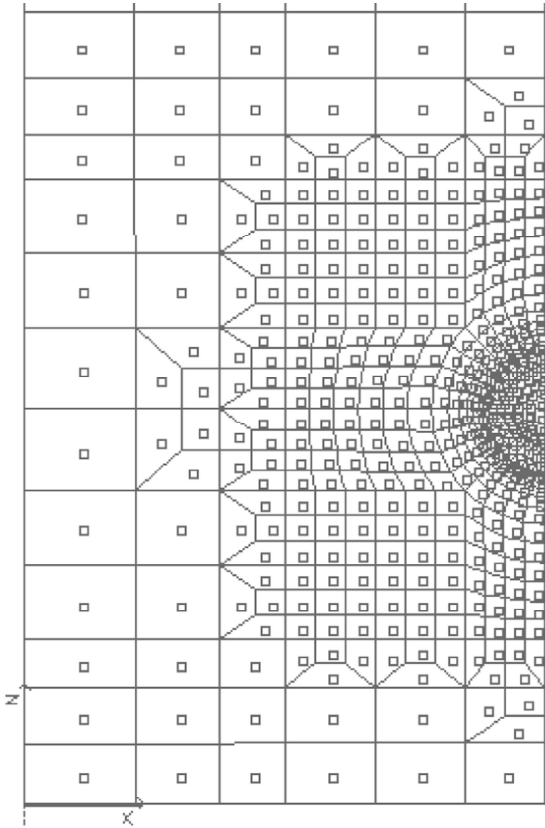
شکل ۱- چند ضلعی تنش (Stress polygon) برای عمق ۳۴۸۶

متری و فشار منفذی ۴۲ مگاپاسکال

العجمی و زیمرمن با استفاده از ملاک شکست مور-کلمب مربوط به چاه و معادلات کرش^۱، روابطی را برای محاسبه حد بالا و پایین فشار گل محاسبه کردند. روابط مذکور در جداول ۱ و ۲ آورده شده است [۵].

با محاسبه مقادیر فشار فروریزش و فشار شکست با توجه به وضعیت تنش ها در یک چاه عمودی می توان وزن 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 می کند. به همین ترتیب اگر مقادیر محاسبه شده فشار شکست (P_{wf}) کمتر از مقدار عملی فشار گل باشد، چاه دچار شکست و در نتیجه گسیختگی خواهد شد.

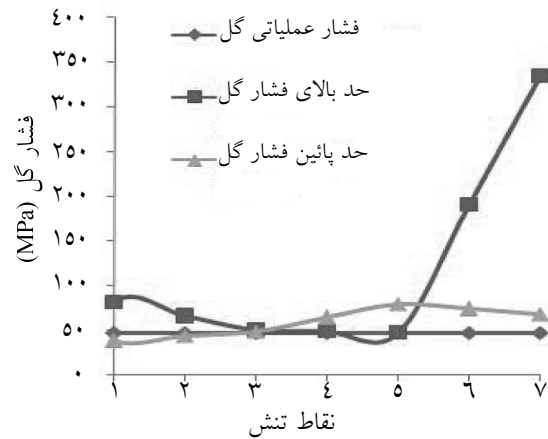
بنابراین هندسه مدل عبارت از مربعی است که دایره مشخص کننده چاه در عمق مورد نظر و در مرکز آن قرار دارد و از هر طرف به اندازه ۵ برابر قطر چاه امتداد دارد. با توجه به وجود محور تقارن قائم، مدل برای نیمی از چاه در نظر گرفته شد [۶].



شکل ۳- مدل عددی ساخته شده برای تحلیل عددی

برای تحلیل عددی اطلاعات به مقادیر ژئومکانیکی لایه شیل نیاز می‌باشد. مشخصات ژئومکانیکی شیل در دو حالت همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در اینجا شیل آهکی به عنوان شیل ناهمسان‌گرد در نظر گرفته شده و مقادیر مربوط به شیل در حالت کلی که از میانگین مقادیر شیل‌های مختلف به دست آمده به عنوان شیل همسان‌گرد محسوب شده است. در تحلیلی که توسط نرم‌افزار صورت می‌گیرد دو مرحله محاسبات در نظر گرفته شده است. مرحله اول قبل از حفر چاه تنش‌های برجا بر مدل اعمال می‌شود. از بین سه تنش برجای موجود دو تنش افقی حداقل و حداکثر بر روی مرزهای کناری مدل اثر می‌کنند.

نموداری که با استفاده از روابط مذکور به دست آمده در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- حد پایین و بالای فشار گل در هر یک از حالات تنش

با مقایسه نمودار شکل ۲، حد پایین وزن گل و وزن گل به کار رفته در نقطه ۱، با وضعیت تنش برجای موجود، در چاه هیچ گونه ریزشی رخ نخواهد داد ولی در بقیه نقاط، ممکن است چاه دچار ریزش شود. به همین ترتیب با مقایسه نمودار مربوط به حد بالای وزن گل و وزن گل به کار رفته در نقاط ۱، ۲، ۶، ۷، چاه دچار شکست نشده ولی در نقاط ۳، ۴ و ۵، وزن گل تقریباً برابر با حد بالای گل است که می‌تواند در چاه شکست ایجاد کند [۶].

روش عددی

در شکل ۳، مدل دو بعدی ساخته شده توسط نرم‌افزار FESTO3 برای تحلیل جابجایی‌ها و بررسی پایداری چاه مورد مطالعه ارائه شده است. این نرم‌افزار شبیه‌ساز بعدی برای توصیف رفتار تنش کرنش توده سنگ درزه دار ارائه شده است. سیستم این برنامه با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فورترن^۱ نوشته شده که تحت دو سیستم عامل لینوکس^۲ و ویندوز اجرا می‌شود [۷]. بعد از تکمیل ورودی مختصات و تعداد نقاط گرهی و تخصیص این نقاط به المان‌ها، خصوصیات مکانیکی توده سنگ و هرگونه نگهداری لازم به عنوان اطلاعات ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود.

در طراحی مدل برای عدم تأثیر مرزها بر روی نتایج، ابعاد خارجی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شدند.

1. Fortran

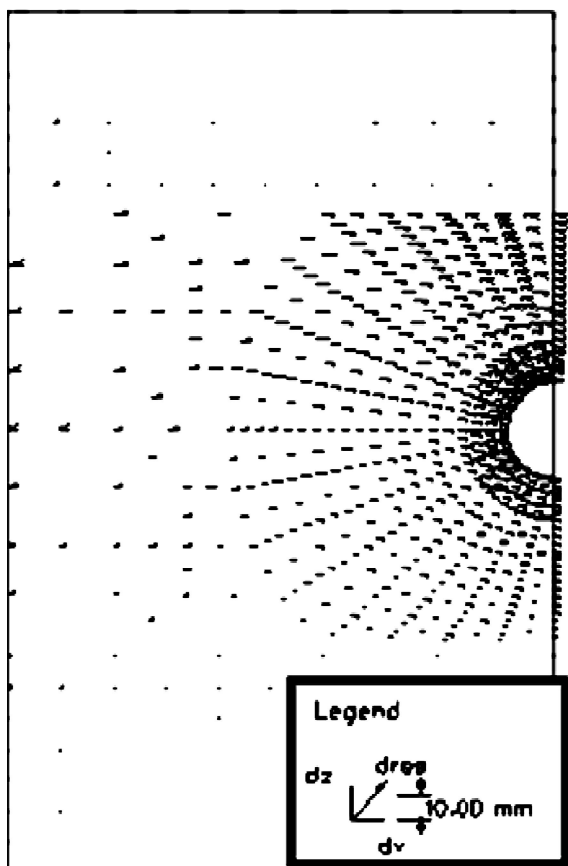
2. SUSE Linux

جدول ۳- خصوصیات مکانیکی و فیزیکی لایه شیلی مورد مطالعه [۸]

نوع سنگ	E_1 (GPa)	$E_2 = E_3$ (GPa)	ν_1	$\nu_2 = \nu_3$	σ_c (MPa)	وزن مخصوص (Kg/m ³)	C (MPa)	ϕ (°)
شیلی	۷/۵	-----	۰/۳	-----	۲۰	۲۶۰۰	۱۲	۴۰
شیلی آهکی	۱۴	۸	۰/۴۳	۰/۱۶۷۵	۸۰	۲۵۰۰	۱۳	۵۰

چاه و نرم افزار (FESTO3) در حالات تنش برجای نقطه ۱، حاکی از پایداری است، ولی در عمل در مقطع انتخاب شده ناپایداری چاه در داخل لایه شیلی مشاهده شده است. لذا می توان نتیجه گرفت که وضعیت فرض شده برای تنش های برجای با وضعیت واقعی در این نقطه متفاوت بوده و حالت تنش مطابق نقطه ۱ وجود ندارد.

با تغییر شرایط تنش های برجای، مطابق حالت تنش در نقطه ۵ چندضلعی تنش، مقدار جابجایی حدود یک سانتی متر به طرف درون چاه به دست آمد. خطوط موجود در شکل ۴، مقدار و جهت جابجایی محاسبه شده در این حالت را با توجه مقیاس شکل نشان می دهد [۶].



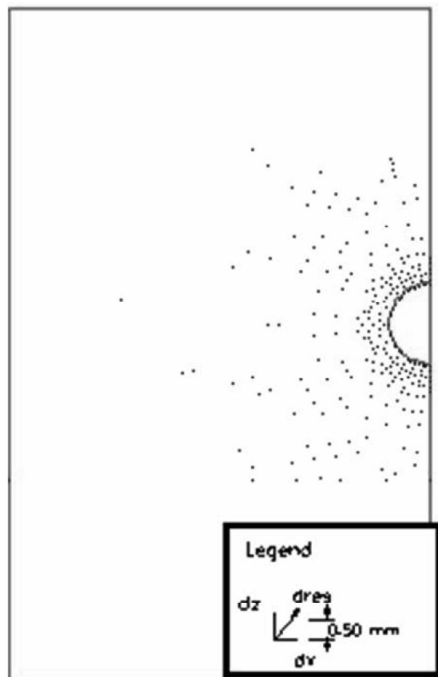
شکل ۴- میزان جابجایی ها در اطراف چاه بعد از حفر چاه و اعمال فشار گل (وضعیت تنش مطابق حالت پنج و شیلی همسان گرد می باشد)

برای بررسی وضعیت تنش های برجای در منطقه، وضعیت تنش شماره ۱ به دست آمده از چند ضلعی تنش در نظر گرفته شد که در آن دو تنش افقی برابر فرض شده و تنش عمودی برابر با وزن روباره می باشد.

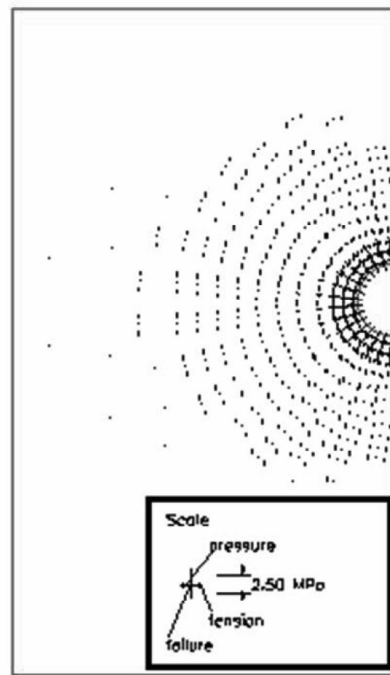
در مرحله دوم محاسبات فرض شد که چاه حفر شده و فشار گل نیز بر دیواره وارد می شود. فشار گلی که بر دیواره چاه در مدل وارد می شود، همان مقدار فشار گل به کار رفته در عمل می باشد. با اجرای برنامه برای مقاطع محاسباتی طراحی شده در دو حالت شیلی همسان گرد و ناهمسان گرد، وضعیت تنش های حداقل و حداکثر و میزان جابجایی های اطراف چاه محاسبه شد. نتایج به دست آمده از این تحلیل مقادیر جابجایی ناچیز در اطراف دیواره را نشان دادند که قابل صرف نظر هستند. از طرف دیگر، مقدار جابجایی های ایجاد شده هر دو در حالت شیلی همسان گرد و ناهمسان گرد بسیار کوچک بوده و تفاوتی بین این دو حالت مشاهده نشد.

با توجه به نقشه های تکتونیک موجود در منطقه، چاه مورد نظر در نقطه ای واقع شده که لایه بندی در آن نقطه افقی است. از آن جایی که مدل ساخته شده در نرم افزار دو بعدی بوده و ناهمسان گردی در دو جهت که موازی لایه بندی هستند یکسان در نظر گرفته شده است، برابر بودن مقادیر جابجایی بدون توجه به مساله ناهمسان گردی توجیه می شود. از طرف دیگر مقطعی که در آن تحلیل پایداری چاه صورت گرفته در عمق زیاد واقع شده است که به علت بالا بودن فشار محصور کننده، ناهمسان گردی اثری بر محاسبات ندارد. بنابراین آگاهی صحیح از وضعیت قرارگیری صفحات لایه بندی و جهت ناهمسان گردی شیلی می تواند در تحلیل وضعیت تنش ها و پایداری چاه تاثیر داشته باشد.

نتایج تحلیل های انجام گرفته توسط دو روش تحلیلی و عددی (استفاده از ملاک شکست مورOکلمب مربوط به



شکل ۶- میزان جابجایی‌ها در اطراف چاه بعد از حفر چاه و اعمال فشار گل ۷۰ MPa



شکل ۵- وضعیت تنش‌های اصلی اطراف چاه بعد از حفاری و اعمال فشار گل ۷۰ MPa

همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد در نظر گرفته شدند. شایان ذکر است که این عامل‌ها فقط در روش عددی تاثیر دارند و در روش تحلیلی به‌کار رفته در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. با این وجود به علت افقی بودن لایه مورد نظر و قرار گرفتن در عمق زیاد و در نتیجه بالا بودن فشار محصور کننده و ایجاد شرایط تنش ایزوتروپ و همگن، می‌توان نتیجه گرفت که ناهمسان‌گردی نمی‌تواند در این شرایط منجر به بروز اختلاف در نتایج شود که تحلیل‌های عددی نیز خود موید این مساله هستند.

از آن جایی که وضعیت تنش برجای فرض شده در تحلیل‌ها هیچ‌گونه ناپایداری را در عمق مورد نظر نشان نداد، لذا می‌توان نتیجه گرفت که آن وضعیت، شرایط واقعی تنش‌های چاه نمی‌باشد. با تغییر شرایط تنش برجا و تحلیل دوباره، ناپایداری در تحلیل‌ها مشاهده شد. با انجام مجدد تحلیل، آن مقدار از فشار گل که باعث پایدار ماندن دیواره می‌شود به‌دست آمد. نتایج به‌دست آمده از نرم افزار FESTO3 نسبتاً با واقعیت و جواب‌های به‌دست آمده از روش تحلیلی همخوانی دارد.

با تغییر در مقدار فشار گل و انجام محاسبات متعدد، میزان فشار گلی که در آن دیواره چاه پایدار می‌ماند، ۷۰ MPa به‌دست آمد. در شکل‌های ۵ و ۶ وضعیت تنش‌های برجا و مقدار جابجایی‌ها در این حالت ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با اعمال این فشار گل، میزان جابجایی‌ها بسیار کوچک و قابل صرف نظر کردن می‌باشند.

نتیجه‌گیری

برای پایداری دیواره چاه، مقدار فشار گل باید بین مقادیر فشار فروریزش و فشار شکست سازند انتخاب شود. به علت موجود نبودن اطلاعات میدانی، مقدار و وضعیت تنش‌های برجا در عمق مورد نظر با استفاده از تئوری گسلش آندرسون و رسم چند ضلعی تنش محاسبه شد. در این تحقیق با استفاده از ملاک شکست مور-کلمب تعمیم داده شده برای چاه، بازه مجاز وزن گل (پنجره گل) و حد بالا و پایین فشار گل برای حالات مختلف تنش استنتاج شده از تئوری گسلش اصطکاکی و چند ضلعی تنش، به‌دست آمد. از آنجایی که شیل یک سنگ ناهمسان‌گرد می‌باشد، برای تحلیل‌ها دو دسته از پارامترهای ورودی

منابع

- [1] Chen X., Tan C.P. & Detournay, C. "The impact of mud infiltration on wellbore stability in fractures rock masses". SPE/ISRM 78241 presented at the SPE/ISRM rock mechanics conference held in Irving, Texas, 20-23 ,pp 1-10, 2002,.
- [2] Ottesen S. & Kwakwa K.A. "A multidisiplinary approach to in-situ stress determination and its application to wellbore stability analysis". SPE 21915., pp 2-5, 1991.
- [3] Awal M.R., Khan M.S., Mohiuddin, M.A., Abdulraheem A. & Azeemuddin, M. "A new approach to borehole trajectory optimization for increased hole stability", SPE 68092, pp 1-10, 2001.
- [4] N.I.S.O.C reports. Ahwaz field, 1998.
- [5] Al-Ajmi A.M., & Zimmerman R. W., "Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. pp 1-15, 10.1016,2006.
- [۶] صالحی سیاوشانی ن.، "تاثیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی شیل در تحلیل پایداری و نگهداری چاه‌های نفت در یکی از میادین نفتی کشور"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۶.
- [7] Manual of FESTO3, version: 1.03, WBI company, 2000.
- [۸] گزارش مطالعات ژئوتکنیک مسیر تونل انتقال آب نوسود کرمانشاه (قطعه ۲)، شرکت مهندسی مشاور ساحل، ۱۶۹ صفحه، مهر ۸۶.