

## طراحی فشار سیال حفاری در یکی از لایه‌های شیلی میدان نفتی اهواز بر اساس مدت زمان پایدار ماندن چاه و جابه‌جایی لایه‌ی شیلی

سیداحمد حسینی \* دانشگاه پلی‌تکنیک تورین (ایتالیا)

کاوه آهنکری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

چکیده

لایه‌های شیلی که در ۷۵ درصد مقاطع حفاری شده یافت می‌شوند سبب بروز ۹۰ درصد از مشکلات مربوط به ناپایداری چاه هستند. هنگام حفاری در لایه‌های شیلی می‌توان با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی و در نظر گرفتن متغیرهای صحیح و منطقی، هزینه‌های ناشی از ناپایداری دیواره‌ی چاه را کاهش داده و با درک صحیح به‌وضعیت پایداری آن کمک کرد. این تحقیق درباره‌ی تأثیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی شیل بر پایداری و نگهداری دیواره‌ی چاه‌های نفتی در یکی از میدانی نفتی کشور انجام شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار FLAC، در مقطعی از چاه که با ناپایداری شیل مواجه شده بود تحلیل پایداری انجام گرفت. همچنین جهت بررسی اثر فشار گل حفاری بر پایداری لایه‌ی شیلی، چندین فشار متفاوت در محدوده‌های مختلف برای گل حفاری در نظر گرفته شد و در هر حالت مقدار جابه‌جایی لایه‌ی شیلی و مدت زمان پایدار ماندن دیواره‌ی چاه قبل از گسیخته شدن لایه ارائه و بحث شد. با در نظر گرفتن دینامیک گل حفاری، فشاری که برای گل حفاری در نظر گرفته می‌شود قطعاً باید از فشار منفذی سازند بیشتر و از مقاومت فشاری سازند کمتر باشد تا تمامی حالات در این مطالعه ارزیابی شوند. نتایج نشان می‌دهد که آگاهی از وضعیت و مقدار تنش‌های برجا، تأثیر زیادی بر تحلیل‌ها دارد. در نهایت بهترین فشار گل حفاری جهت ایجاد بیشترین پایداری در چاه، ۷۱ مگاپاسکال به‌دست آمد.

واژگان کلیدی: شیل، FLAC، تنش، گسیختگی، فشار منفذی، پایداری، سازند، جابه‌جایی

### مقدمه

عوامل متعددی بر پایداری چاه حفاری شده در داخل شیل‌ها مؤثرند. این عوامل شامل حفره‌ی چاه، خواص شیل، تنش‌های درجا، فشار سیال سازند و خواص سیال حفاری هستند. قبل از حفر چاه، توزیع تنش در سازندها به حالت پایدار و تعادل رسیده است. زمانی که چاه حفر می‌شود تنش‌هایی که بر موادی خروجی از چاه اعمال می‌شود روی سایر قسمت‌های سازند و همچنین سیال حفاری توزیع می‌شوند. سیال حفاری در نقش یک نگهدارنده برای دیواره‌ی چاه ظاهر می‌شود و با وارد کردن تنش برشی به سازند، سبب توزیع مجدد تنش‌ها می‌گردد. در صورتی که این تنش برشی از مقاومت سازند فراتر رود سازند دچار شکستگی خواهد شد. وجود ساختار صفحه‌ای در شیل‌ها سبب آغاز شکستگی در اثر تنش‌های برشی یا کششی در راستای صفحات ضعیف می‌شود. افزایش فشار روزنه‌ای باعث کاهش نقش نگهدارندگی گل حفاری و در نتیجه کاهش شرایط پایداری دیواره‌ی چاه می‌گردد. هنگام ناپایداری چاه، ریزش کلی یا جزئی می‌تواند در یک لحظه

یا در بازه‌ی زمانی اتفاق افتاده و منجر به گیر کردن لوله‌ها، تمیزکاری ضعیف چاه، بسته شدن چاه، مشکلات لوله‌ی بالا و لوله‌ی پایین، شرایط چاه‌نگاری ضعیف و از دست رفتن حجم فراوان سیمان و گل حفاری شود. سایر مشکلات ناشی از ناپایداری شیل‌ها، کیفیت پایین عملیات سیمان‌کاری به دلیل شکل غیرمنظم چاه و افزایش هزینه‌های حفاری (صرف هزینه‌های اضافی جهت پایداری چاه) است. از دیگر مشکلات حفاری در لایه‌های شیلی نیز می‌توان به گلی شدن مته (بیت بالینگ) اشاره کرد [۱]. بر اساس تحقیقات انجام شده، در مقایسه با سایر متغیرها، مقاومت سنگ (خصوصیات الاستیک سنگ، شرایط زه‌کشی و سطوح لایه‌بندی) در پایداری چاه از اهمیت بیشتری برخوردار است [۲ و ۳].

از علائم ناپایداری دیواره‌ی چاه در حین حفاری، پوسته‌پوسته شدن دیواره، کاهش سرعت حفاری، چسبیدن لوله‌ها، گشادشدگی غیرطبیعی چاه، ریزش کامل چاه و ... است [۴]. به‌طور کلی عوامل ناپایداری چاه می‌تواند مکانیکی، شیمیایی یا ترکیبی از این دو باشد. عوامل مکانیکی بیشتر حاصل وزن نامناسب گل حفاری و روش

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (hosseini\_157@gmail.com)



آن مقایسه می‌گردد. مدل‌های الاستیکی بسط‌یافته شامل محاسبه‌ی زاویه‌ی شکست دیواره‌ی چاه، اثرات صفحات ضعیف لایه‌ای بر شکست سنگ، اثرات مواد بازدارنده‌ی شیمیایی موجود در گل بر فشارهای تراوشی در رس‌ها، فشار منفذی محلی و تنش برشی بیشینه در اطراف دیواره‌ی چاه است. برای مدل‌سازی، مدل‌های الاستیک خطی رایج هستند. چراکه اجرای این مدل‌ها آسان بوده و به مقدار متعادلی از متغیرهای ورودی نیاز دارند. علاوه بر این قادر به برآورد خطر ناپایداری دیواره‌ی اکثر چاه‌ها هستند. مدل‌های الاستیسیته‌ی خطی، وضعیت دیواره‌ی چاه را به‌دقت تشریح نمی‌کنند. در بسیاری از موارد اگر حتی تمرکز تنش در اطراف دیواره‌ی چاه از مقاومت سازند بیشتر باشد، چاه پایدار می‌ماند. یک راه برای جبران این اثرات انجام کالیبراسیون است که پیش‌بینی‌های حاصل از مدل را جهت سازگاری با داده‌های مربوطه تصحیح می‌کند. عموماً مدل‌های الاستوپلاستیک به‌علت توانایی در برآورد نزدیک‌تر به واقعیت استحکام مکانیکی دیواره‌ی چاه پیشنهاد می‌شوند. در این مدل‌ها مشخص می‌شود که حتی پس از تمرکز تنش در سنگ به‌مقدار بیشتر از مقاومت آن، لزوماً سنگ به‌طور کامل نشسته از دیواره‌ی چاه جدا نمی‌شود. جهت مدل‌سازی پیشرفته‌تر پایداری دیواره‌ی چاه از تعداد زیادی مدل‌های ژئومکانیکی عددی استفاده می‌شود. این مدل‌ها شامل کدهای تفاضل محدود، اجزاء ناهمگن و اجزاء محدود هستند. مدل‌های مذکور قادر به بازنمایی تغییر شکل، انعطاف‌پذیری سنگ‌ها و رفتار جریان سیال نیز هستند. نسخه‌های سه‌بعدی بعضی از این نرم‌افزارها در دسترس قرار دارد. مدل‌های محاسبه‌ای جهت ارزیابی پایداری دیواره‌ی چاه به دو گروه تقسیم می‌شوند:

الف) روش‌های تجزیه‌ای و نیمه‌تجزیه‌ای با شیوه‌های حل عددی یا بدون آن؛ زمانی که نیاز به مجزا کردن مسأله نیست.

ب) روش‌های عددی؛ زمانی که مسأله به اجزاء کوچک‌تر از قبیل اجزاء محدود، تفاضل محدود اجزاء مرزی و روش‌های اجزاء ناهمگن تقسیم می‌شود.

جهت مدل‌سازی پایداری دیواره‌ی چاه از نرم‌افزار FLAC استفاده می‌شود [۵].

## ۲- نرم‌افزار FLAC

نرم‌افزار FLAC کد تفاضل محدود مشخصی است که رفتار ساختارهای تشکیل شده از خاک، سنگ و موادی را که ممکن است در صورت رسیدن به حد انعطاف‌پذیری، رفتار پلاستیکی از خود نشان دهند شبیه‌سازی می‌کند. مواد از طریق برازاندن شکلی

حفاری نامناسب هستند. در حالی که عوامل شیمیایی تحت تأثیر شدید گل حفاری هستند که در اصل عواملی مانند گل نامناسب و بازدارنده‌های ناکافی بر آنها تأثیر گذارند. البته در اکثر موارد ناپایداری دیواره‌ی چاه ناشی از تأثیر هر دو عامل مکانیکی و شیمیایی است. نخستین شرط برای پایدار ماندن چاه در حین حفاری، وجود تعادل بین تمرکز تنش در نزدیک دیواره‌ی چاه و مقاومت سنگ است. بنابراین ناپایداری دیواره‌ی چاه در حالتی بروز خواهد کرد که شدت تنش مؤثر در دیواره‌ی چاه از مقاومت سنگ تجاوز کند. در این مطالعه با داشتن اطلاعات کافی، به کمک نرم‌افزار FLAC ناپایداری یک لایه‌ی شیلی در یکی از میدان نفتی اهواز بررسی خواهد شد. با شبیه‌سازی ناپایداری لایه‌ی شیلی، وزن و فشار بهینه‌ی گل حفاری برای به حداقل رساندن ناپایداری طراحی می‌شود. در ادامه چندین وزن گل ارزیابی شده، در هر حالت مقدار جابه‌جایی لایه‌ی شیلی تحلیل می‌شود و در نهایت وزن بهینه‌ی گل حفاری برای حداقل کردن ناپایداری چاه انتخاب می‌گردد.

## ۱- زمین‌شناسی منطقه و بررسی پایداری چاه

میدان نفتی اهواز با روند شمال غرب-جنوب شرق، تاقدیسی تحت‌الارضی به‌طول ۶۷ و عرض ۴ تا ۶ کیلومتر مربع را شامل می‌شود که در ناحیه‌ی فروافتادگی دزفول شمالی قرار دارد. حفر چاه‌های این منطقه با سازندهای مختلفی تقاطع دارد که از بین آنها سازندهای گروه بنگستان (ایلام، سروک و کزدمی) حاوی بیشترین مقدار شیل بوده و مشکلات ناپایداری چاه نیز در همین سازندها ایجاد شده است. حدود ۶۰ درصد کانی رسی موجود در میدان نفتی اهواز، کانی ایلیت بوده و مقدار کانی مخرب مونت‌موریلونیت در این میدان اندک است.

جهت بررسی پایداری چاه با روش عددی (نرم‌افزار FLAC)، در عمق ۳۴۸۶ متری چاه مورد نظر در درون لایه‌ی شیلی سازند ایلام مقطع زده شد. قطر چاه در این مقطع  $\frac{3}{8}$  اینچ و ضخامت کیک گل حفاری ۳۵/۱ اینچ است. وزن مخصوص گل به کاررفته برای ایجاد پایداری ۸۲ تا ۸۳/۳ پوند بر فوت مکعب و فشار منفذی آن برابر  $42/6 \text{ MPa}$  اندازه‌گیری شده است. در این عمق ناپایداری ایجاد شده توسط شیل از نوع تنگ‌شدگی چاه می‌باشد [۵].

جهت ارزیابی خطر ناپایداری دیواره‌ی چاه بعضی از مدل‌ها در دسترس هستند. ساده‌ترین مدل، بررسی وضعیت تنش و مقدار آن در دیواره‌ی چاه است. در این مدل فرض می‌شود سنگ رفتار الاستیک خطی مداوم دارد و این تنش با مقاومت سنگ جهت محاسبه‌ی

- طرح‌های تنش و کرنش صفحه‌ای و مدل‌های هندسی
- مدل‌های ساختمانی برای مدل‌سازی نگهداری
- امکان رسم نمودار و مشاهده‌ی چشمی تغییرات
- امکان آنالیزهای دینامیکی
- امکان مدل‌سازی خزش (creep) و رفتار ویسکوالاستیک
- تأثیر روش بازکردن تونل بر پایداری آن
- امکان مدل‌سازی جریان سیالات زیرزمینی و توزیع فشار آن

### ۳- تجزیه و تحلیل پایداری چاه توسط نرم‌افزار FLAC

تجزیه و تحلیل پایداری به عوامل متعددی از جمله شکل هندسی چاه، فشار سیال سازندی، نیروهای درجای اصلی، خواص مکانیکی سنگ و وزن گل بستگی دارد که از این متغیرها تنها وزن گل قابل کنترل است. با توجه به اهمیت وزن مخصوص در کنترل شکست سازند و هرزروی گل حفاری، بهینه‌سازی آن حائز اهمیت است. فشار گل باید طوری طراحی شود که از فشار شکست سازند کمتر و از فشار منفذی سیال بیشتر باشد. با در نظر گرفتن این شرایط، شکست، هرزروی و گیر کردن لوله‌ها در سازند اتفاق نخواهد افتاد و فشار گل می‌تواند از نفوذ سیال به درون چاه جلوگیری کرده و مانع فوران چاه شود.

خصوصیات لایه‌ی شیلی مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. تنش قائم با توجه به جنس سنگ از مقادیر میانگین چگالی به دست می‌آید. با توجه به میانگین چگالی ستون سنگ‌شناسی چاه مورد نظر، مقدار تنش قائم (SV) در عمق ۳۴۸۶ متری برابر ۹۳ Mpa بود. برای به دست آوردن تنش افقی حداقل و حداکثر ( $S_{Hmax}$ ,  $S_{Hmin}$ ) و پیش‌بینی محدوده‌ی تفاضل تنش برای حالات مختلف از معادلات ۱ و ۲ استفاده می‌شود. این معادلات به ترتیب با فرض حالات نرمال و معکوس هستند:

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

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

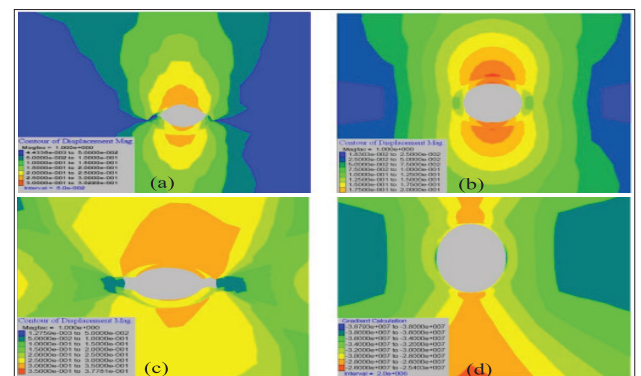
در این معادلات  $P_0$  فشار منفذی،  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل و  $\mu$  یک مقدار ثابت است که در اینجا ۰/۶ در نظر گرفته می‌شود. فرض بر این است که وضعیت تنش درون پوسته در تعادل اصطکاکی است. با جاگذاری مقادیر (۴۲ مگاپاسکال برای فشار

از هدف مورد نظر که باید مدل‌سازی شود، نواحی یا اجزاء موجود در شبکه نشان داده می‌شوند. هر جزء از یک رابطه تنش-کرنش غیر خطی یا خطی در پاسخ به نیروی وارد شده و محدوده‌های مرزی عمل می‌کند. اگر تنش‌ها به اندازه‌ای بزرگ باشند که سبب انعطاف و تغییر شکل مواد گردند شبکه به‌طور واقعی تغییر شکل داده و جابجا می‌شود. این شکل از مسأله، محاسبه‌ی لاگرانژین نامیده می‌شود و برای مدل‌سازی تغییرات، شامل یک مدل حد واسط است. این نرم‌افزار همچنین جهت شبیه‌سازی رفتار مستمر نواحی مجزای سطوح شیدار و حضور گسل‌های مجزا یا درزه‌ها درون یک لایه یا نواحی مجزا یا شیدار نیز به کار می‌رود. نرم‌افزار FLAC همچنین قادر به مدل‌سازی جریان‌های زیرزمینی است. این فعل و انفعالات ممکن است با هر نوع مدل مکانیکی ترکیب شوند.

اگرچه 3D FLAC در اصل برای کاربردهای مهندسی عمران و معدن طراحی شده، اما قابلیت زیادی برای حل مسائل مکانیک نیز دارد. ساختارهای متعددی در این نرم‌افزار وجود دارند که مدل‌سازی موادی را که رفتارشان بسیار غیر خطی است ممکن می‌سازند. علاوه بر این FLAC امکانات خاص دیگری نیز دارد که در زیر به آنها اشاره می‌شود:

- مدل‌سازی صفحاتی که ممکن است در آنها لغزش یا جدایش اتفاق بیفتد

نوع سنگ	$E_1$ (GPa)	$E_2=E_3$ (GPa)	$\nu_1$	$\nu_2 = \nu_3$	$c$ (MPa)	وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> )	C (MPa)	$\phi$ (°)
شیلی	۷/۵	-----	۰/۳۲	-----	۲۰	۲۶۰۰	۱۲	۴۰
شیلی آهکی	۱۴	۸	۰/۴۳	۰/۱۶۷۵	۸۰	۲۵۰۰	۱۳	۵۰



۱ | شماتیک جابه‌جایی لایه‌ی شیلی در فشارهای مختلف سیال حفاری  
 (a) اگر هیچ گلی در چاه نباشد  
 (b) اگر گلی با فشار ۲۰ مگاپاسکال در چاه باشد  
 (c) اگر گلی با فشار ۴۰ مگاپاسکال در چاه باشد  
 (d) اگر گلی با فشار ۶۰ مگاپاسکال در چاه باشد



منفذی) در معادلات ۲ و ۱ خواهیم داشت:

$$S_1 = S_v$$

$$S_3 = S_{h \min}$$

$$S_1 = S_{H \max}$$

$$S_3 = S_v$$

$$S_{h \min} = 58$$

$$S_{h \min} = 200$$

که  $S_1$  تنش عمودی و  $S_3$  تنش افقی است. حال با داشتن این اطلاعات می توان به کمک نرم افزار چاه را مدل سازی کرد. شکل ۱- شماتیکی از جابه جایی لایه ی شیلی اطراف چاه را نشان می دهد. در شکل ۱- a چاه بدون گل در نظر گرفته شده (یعنی داخل چاه هیچ سیالی وجود ندارد). همان طور که در شکل مشاهده می شود در اثر فشار منفذی خود سازند، شیل شروع به حرکت به داخل چاه می کند. این حرکت و جابه جایی لایه ی شیلی بعد از حدود ۱۱ ساعت شبیه سازی انجام شده است. در محسوس ترین حالت، جابه جایی لایه ی شیلی ۰/۲۶۱۴۳ فوت و میانگین کل جابه جایی در تمام جهات ۰/۰۲۵ فوت است. قسمت هایی که نزدیک به دیواره ی چاه هستند بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته اند و همان طور که مشخص است جابه جایی بیشتری از خود نشان می دهند (مناطق با رنگ نارنجی و زرد).

در ادامه فشارهایی برابر با ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۷۵ مگاپاسکال در چاه اعمال می شود. با قرار دادن فشار گل ۲۰ مگاپاسکال (شکل ۱- b) مشاهده می شود که بیشترین جابه جایی لایه ی شیلی ۰/۳۰۲۲ فوت است. اما میانگین جابه جایی ۰/۰۵ فوت خواهد بود که نسبت به حالتی که چاه خالی از گل بود و هیچ فشاری بر دیواره ی آن وارد نمی شد تغییر قابل توجهی است. علت ناهمگون بودن حرکت لایه ی شیلی، توزیع تنش های اطراف چاه است. در شکل ۱- نیز چنین حادثه ای رخ داده و منجر به شکل بیضوی چاه شده، اما در حالتی

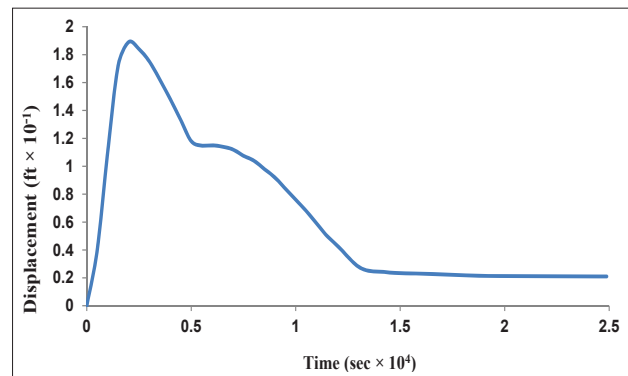
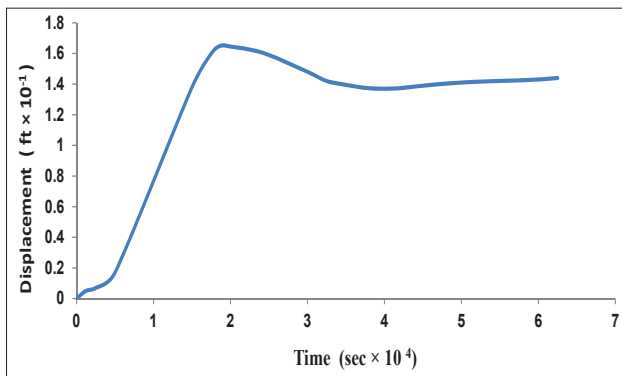
که ۲۰ مگاپاسکال فشار اعمال می شود این ناهمگونی محسوس تر خواهد بود

همان طور که در شکل ۲- مشاهده می شود اگر گلی با فشار ۲۰ مگاپاسکال در چاه داشته باشیم بعد از جابه جایی ۰/۱۸۹۴ فوتی لایه ی شیلی (که پس از گذشت حدود ۳۳ دقیقه رخ می دهد) عملاً لایه ی شیلی به داخل چاه spurt شده و در اصطلاح می شکند. به عبارت دیگر این بیشترین زمانی است که لایه ی شیلی می تواند قبل از شکسته شدن با این وزن گل (معادل ۲۰ مگاپاسکال) دوام بیاورد. پس از این مقدار جابه جایی (۰/۱۸۹۴ فوت) لایه ی شیلی به داخل چاه ریزش کرده و چاه عملاً بسته می شود.

در گام های بعدی که فشار گل را برابر ۴۰، ۶۰، ۷۵ مگاپاسکال قرار می دهیم وضعیت کاملاً متفاوت خواهد بود. زمانی که گلی با فشار ۴۰ مگاپاسکال در چاه قرار داده می شود (شکل ۱- c) بیشترین جابه جایی ۰/۲ فوت است.

در شکل ۵- مدت زمان پایداری لایه ی شیلی در حالتی که فشار گل ۴۰ مگاپاسکال باشد نشان داده شده است. در این حالت حداکثر جابه جایی لایه ی شیلی در مجموع ۰/۱۶۵۲ فوت است که عملاً پس از این مقدار جابه جایی، لایه ی شیلی گسسته می شود. این اتفاق پس از حدود ۶ ساعت و ۲۵ دقیقه رخ خواهد داد. در واقع این افزایش فشار گل از ۲۰ به ۴۰ مگاپاسکال در مقدار جابه جایی و مدت زمان پایدار ماندن لایه ی شیلی بسیار حائز اهمیت و محسوس است.

شکل ۱- d نیز وضعیت لایه ی شیلی اطراف چاه را با ورود گلی با فشار ۶۰ مگاپاسکال به چاه نشان می دهد. در این حالت حداکثر جابه جایی ۰/۳۷۷۸ فوت است. همان طور که گفته شد علت این افزایش نیز توزیع تنش اطراف چاه است. در شکل نیز مشخص است که در جهاتی که فشار حاصل از جابه جایی لایه ی شیلی به دیواره ی



شکل ۱ نمودار جابه جایی لایه ی شیلی بر حسب زمان با فشار گل ۴۰ مگاپاسکال

شکل ۲ نمودار جابه جایی لایه ی شیلی بر حسب زمان با فشار گل ۲۰ مگاپاسکال

حداقل است. یعنی چاه در راستای مناطقی که جابه‌جایی بیشتری دارند (مناطق نارنجی‌رنگ) کشیده شده است. به عبارت دیگر فشار شکست بیشترین اثر را بر این نواحی گذارده و شیل را تحت فشار قرار می‌دهد.

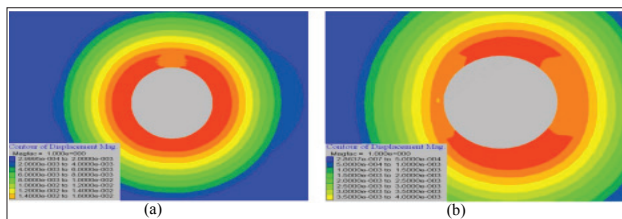
بنابراین فشار گلی که قطعاً بهترین شرایط پایداری را در چاه ایجاد می‌کند باید از ۶۰ مگاپاسکال بیشتر و از ۷۵ مگاپاسکال کمتر باشد. با استفاده از معیار موهر-کلمپ و داده‌های در دسترس، این فشار ۷۱ مگاپاسکال خواهد بود. بنابراین روش تحلیلی، فشار بهینه‌ی گل را ۷۱ مگاپاسکال به دست می‌آید [۵]. جهت اعتبارسنجی و مقایسه‌ی نتایج این تحقیق، دو فشار ۶۹ و ۷۱ مگاپاسکال هم مطالعه می‌شوند و پایداری دیواره‌ی چاه در این دو فشار نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل ۶- مقادیر جابه‌جایی لایه‌ی شیلی در اطراف چاه به ترتیب با فشار گل ۶۹ و ۷۱ مگاپاسکال نشان داده شده است. با فشار گل ۶۹ مگاپاسکال، حداکثر جابه‌جایی ۰/۰۱۶ فوت و با فشار ۷۱ مگاپاسکال حداکثر جابه‌جایی ۰/۰۰۴ فوت خواهد بود.

در شکل‌های ۷- و ۸ مقدار جابه‌جایی لایه‌ی شیلی در دو فشار ۶۹ و ۷۱ مگاپاسکال ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۷- مشاهده می‌شود با فشار گل ۶۹ مگاپاسکال حداکثر جابه‌جایی تا زمان اجرای نرم‌افزار (یعنی ۱۳ ساعت)، برابر ۰/۰۱۹۳۹ فوت است. یعنی در این بازه‌ی زمانی همچنان لایه‌ی شیلی پایدار بوده و گسیختگی رخ نمی‌دهد. شکل ۸- این روند را برای فشار گل ۷۱ مگاپاسکال نشان می‌دهد که حداکثر جابه‌جایی پس از ۱۷ ساعت ۰/۰۴۵۴۴ فوت است.

در جدول ۲- نتایج مربوط به جابه‌جایی و مدت زمان پایدار ماندن دیواره‌ی چاه در فشارهای مختلف به صورت کلی ارائه شده است.

### نتیجه‌گیری

با توجه به توضیحات ارائه شده در خصوص مشکلات ناشی از شیل‌ها در حین حفاری (از جمله افزایش هزینه‌ها)، در حفاری سازندهای حاوی شیل، شناخت و طراحی گل بهینه نیازمند توجه

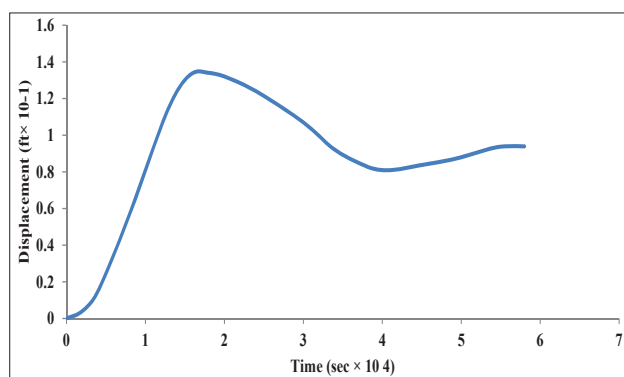


شکل ۶ | جابه‌جایی لایه‌ی شیلی (a) با فشار گل ۶۹ مگاپاسکال (b) با فشار گل ۷۰ مگاپاسکال

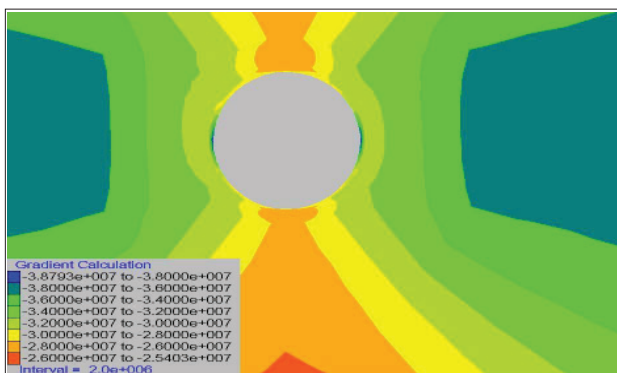
چاه اعمال شده شکل چاه کاملاً تغییر کرده و در ناحیه‌هایی که حرکت لایه‌ی شیلی بیشتر است چاه فشرده‌تر خواهد بود.

اما با دقت در به نمودار جابه‌جایی لایه‌ی شیلی برحسب زمان در حالتی که فشار گل ۶۰ مگاپاسکال است (شکل ۴-) مشخص می‌شود که حداکثر جابه‌جایی لایه‌ی شیلی قبل از شکسته شدن ۰/۱۳۳۲ فوت خواهد بود که نسبت به فشارهای قبلی جابه‌جایی کمتری دارد. از نظر مدت زمان پایداری نیز این زمان ۵ ساعت است.

در مرحله‌ی بعد گل با فشار ۷۵ مگاپاسکال در چاه قرار داده شد. در این حالت وضعیت کامل متفاوت بود. با اعمال این فشار به دیواره‌ی چاه، جهت جابه‌جایی عوض شد. همان‌طور که در شکل ۵- مشخص است در این حالت حداکثر جابه‌جایی ۰/۲۵۴۰۳- است. علامت منفی بیانگر معکوس شدن جهت جابه‌جایی نسبت به حالت قبلی است. در واقع فشار ۷۵ مگاپاسکال بیش از مقاومت شکست لایه‌ی شیلی است؛ یعنی با این فشار در چاه شکاف هیدرولیکی توزیع داده است. راستای جابه‌جایی نیز به خوبی بیانگر چگونگی توزیع تنش‌های اصلی است؛ چراکه ناپایداری و ایجاد شکست در سنگ در راستای تنش اصلی حداکثر و در راستای عمود بر تنش اصلی



شکل ۷ | نمودار جابه‌جایی لایه‌ی شیلی برحسب زمان با فشار گل ۶۰ مگاپاسکال



شکل ۸ | جابه‌جایی لایه‌ی شیلی با فشار گل ۶۰ مگاپاسکال





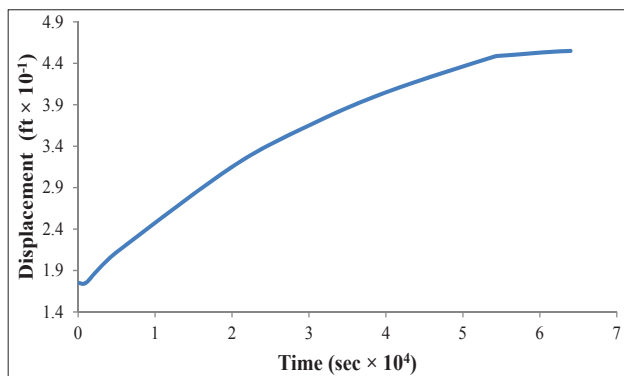
مبحث فیلتراسیون گل حفاری به داخل شیل در نظر گرفته نشد که در صورت اعمال آن، مسلماً ناپایداری شدیدتر شده و در مدت زمان کمتری اتفاق خواهد افتاد. در حفاری این سازند شیلی فشار بهینه‌ی گل حفاری ۷۱ مگاپاسکال محاسبه شد. اما نکته‌ی قابل توجه آن است که این فشار با صرف نظر و ناچیز فرض کردن ECD گل حفاری حاصل شد.

در مبحث ناپایداری دیواره‌ی چاه و مشکلات لایه‌های شیلی در مسیر چاه، با در نظر گرفتن دینامیک گل حفاری می‌توان فشار گل را طوری طراحی کرد که کمترین ناپایداری ممکن در دیواره‌ی چاه رخ دهد. همیشه افزایش فشار در برخورد با لایه‌های شیلی سبب کاهش ناپایداری نمی‌شود؛ زیرا همان‌طور که مشاهده شد با استفاده از گل حفاری با فشار ۷۵ مگاپاسکال عملاً فرآیند شکست هیدرولیکی رخ می‌دهد. بنابراین ممکن است عدم آگاهی از مقاومت و رفتار لایه‌های شیلی منجر به بروز خسارت و حتی از دست رفتن چاه گردد که در این مورد هرزروی گل حفاری را به دنبال خواهد داشت. ■

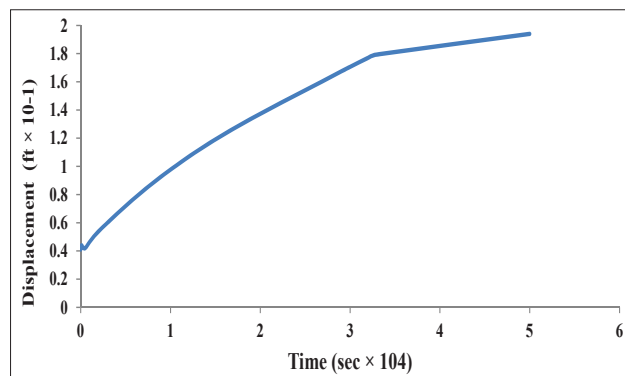
فراوانی است. همان‌طور که گفته شد ناپایداری لایه‌های شیلی در حفاری چاه‌ها به دلایل مکانیکی و شیمیایی اتفاق می‌افتد که در این مطالعه با طرح مبحث دلایل مکانیکی و جنبه‌های پایداری این موارد بررسی شد. همان‌طور که مشاهده شد اعمال فشارهای متفاوت گل، بر مقدار ناپایداری تأثیرگذار خواهد بود. مدت زمانی که دیواره‌ی چاه می‌تواند ناپایداری خود را حفظ کند از جنبه‌های دیگری نیز می‌تواند مهم تلقی شود (مثلاً در حفاری‌های UBD). در این مطالعه

۲ | آنالیز پایداری لایه‌ی شیلی در فشارهای مختلف گل

فشار گل [MPa]	حداکثر جابه‌جایی [ft]	مدت زمان پایداری دیواره‌ی چاه قبل از گسیختگی [min]	جابه‌جایی که در آن گسیختگی اتفاق می‌افتد [ft]
۲۰	۰/۳۰۲۲	۳۳	۰/۱۸۹۴
۴۰	۰/۲	۳۸۵	۰/۱۶۵۲
۶۰	۰/۳۷۷۸	۳۰۰	۰/۱۳۳۲
۶۹	۰/۰۱۶	>۷۸۰	-
۷۱	۰/۰۰۴	>۱۰۲۰	-
۷۵	-۰/۲۵۴۰۳	-	-



شکل ۸ | نمودار جابه‌جایی لایه‌ی شیلی بر حسب زمان با فشار گل ۷۱ مگاپاسکال



شکل ۷ | نمودار جابه‌جایی لایه‌ی شیلی بر حسب زمان با فشار گل ۶۹ مگاپاسکال

## منابع

- [3] Ottesen S. & Kwakwa K.A. "A Multidisciplinary Approach To In-Situ Stress Determination And Its Application Towellbore Stability Analysis". SPE 21915., Pp 21991, 5-.
- [4] Robert L.Cuthbertson PE And John Vozniak ., New Surface Equipment For Underbalanced Drilling "
- [۵] بررسی پایداری دیواره‌ی چاه در لایه‌های شیلی، مطالعه‌ی موردی؛ میدان نفتی اهواز، مرتضی احمدی، محمد سلیمانی و نفیسه صالحی سیاوشانی، مجله‌ی پژوهش نفت

- [۱] تقسیم‌بندی مکانیسم‌های ناپایداری لایه‌های شیلی در حفاری، ابوذر میرزایی پیامن، رضا صالحی مورکانی، مجله‌ی اکتشاف و تولید
- [2] 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, 2023-, Pp 110,2002-.,