

# بر آورد فشار بهینه گل حفاری با استفاده از معیارهای مختلف شکست در چاه‌های انحرافی، مطالعه موردی: چاه 2sk 5 میدان نفتی سلمان

پژوهش نفت

سال بیست و سوم  
شماره ۷۳

صفحه ۱۱۲-۱۰۴، ۱۳۹۲

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۳/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۱/۱۰/۶

عبدالمجید موحدی‌نیا، محمد کمال قاسم العسکری و محسن یاراحمدی\*

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی نفت و گاز

msyarahmadi@gmail.com

دراگرپراگر مورد بررسی قرار گیرد و ضمن مقایسه کاربرد معیارهای فوق در پایداری چاه، در نهایت پیشنهاداتی جهت حفر چاه در میدان مذکور داده شود.

واژه‌های کلیدی: پنجره گل حفاری، معیارهای شکست، پایداری، شکست کششی، شکست برشی

## مقدمه

سازندهای زیرزمینی همواره تحت تأثیر تنش‌های فشاری عمودی (وزن لایه‌های فوقانی) و همچنین تنش‌های افقی (محدوده کرنش‌های جانبی) هستند. عملیات حفاری سنگ‌ها باعث بر هم خوردن تعادل در آنها می‌شود. وقتی که یک چاه حفاری می‌شود، تعادل محدوده‌ای که در آن حفاری شده به هم می‌خورد. دیواره اطراف آن سعی در برگرداندن تعادل به محدوده نامتعادل دارد. در نتیجه تمرکز تنش در اطراف دیواره چاه ایجاد شده و تنش‌های برجا تغییر می‌کند. اگر عامل بازدارنده ناپایداری در چاه موجود نباشد، در دیواره چاه و سازند شکست ایجاد می‌شود. بنابراین به یک عامل بازدارنده و جبران کننده فشار جهت جلوگیری از شکست نیازمندیم که این فشار معمولاً به

## چکیده

ناپایداری دیواره چاه یکی از جدی‌ترین مشکلات در حفاری می‌باشد، زیرا این مساله می‌تواند در نهایت سبب تأخیر در عملیات حفاری، افزایش هزینه‌های حفاری و در بعضی موارد متروک شدن چاه شود. هزینه‌های ناشی از این مشکلات در جهان بالغ بر دو میلیارد دلار در سال برآورد شده است. امروزه با توجه به خواص فیزیکی و شیمیایی گل حفاری می‌توان با تغییر در ترکیبات آن دیواره چاه را پایدار نمود. با کمک علم مکانیک سنگ و اطلاع کامل از خواص مکانیکی سازند، مسیر بهینه حفر چاه و پنجره گل تعیین می‌شود. خصوصیات متعددی از سازند در طراحی مسیر چاه تأثیرگذار هستند. اطلاع از این خصوصیات و به کارگیری کامل و صحیح آنها، تأثیر بسزایی در طراحی بهینه وزن گل و پایداری چاه خواهد داشت. روش‌های تحلیلی به دلیل ساده بودن و عدم نیاز به بسیاری از پارامترهای مربوط به سنگ و محیط حفاری (که معمولاً در ابتدای پروژه معلوم نیست)، نسبت به روش‌های عددی کاربرد بیشتری دارند. در این تحقیق سعی بر آن بوده است که پایداری چاه 2sk 5 در میدان سلمان به روش تحلیلی با استفاده از سه معیار شکست موهرکولمب، موگی کولمب و

دیواره چاه و محدوده‌های آنها را نشان می‌دهد. به منظور کنترل پایداری چاه، لازم است وزن گل در محدوده ایمنی قرار گیرد [۱ و ۲].

به منظور بررسی شکست برشی، معیارهای شکست برشی زیادی از جمله موهر - کلمب، معیار دراکر - پراگر، معیار وان مایسس و معیار لید توسعه یافته<sup>۲</sup> وجود دارند [۱].

در حالت کلی معیار شکست کششی، تنش مؤثر اصلی حداقل را با مقاومت سنگ مقایسه می‌کند. دو مدل برای بیان شکست کششی وجود دارد، که یکی از آنها ایجاد شکاف<sup>۳</sup> در دیواره چاه به علت افزایش وزن گل و غلبه تنش‌های دیواره چاه بر مقاومت کششی سنگ‌های دیواره و دیگری ورقه ورقه شدن<sup>۴</sup> یا شسته شدن<sup>۵</sup> به دلیل غلبه تنش مؤثر شعاعی بر مقاومت کششی سنگ‌های دیواره چاه و کاهش فشار بسیار سریع در دیواره چاه می‌باشد. با توجه به ناچیز بودن مقاومت کششی، در بسیاری از حالات می‌توان آن را صفر فرض نمود [۳].

در این مقاله سعی بر آن است که پایداری این چاه در میدان مذکور به روش تحلیلی با استفاده از سه معیار شکست موهر - کولمب و موگی - کولمب و دراکر - پراگر مورد بررسی قرار گیرد و ضمن مقایسه کاربرد معیارهای فوق در پایداری چاه، در نهایت پیشنهاداتی جهت حفر چاه در میدان مذکور داده شود [۴].

### مشخصات چاه

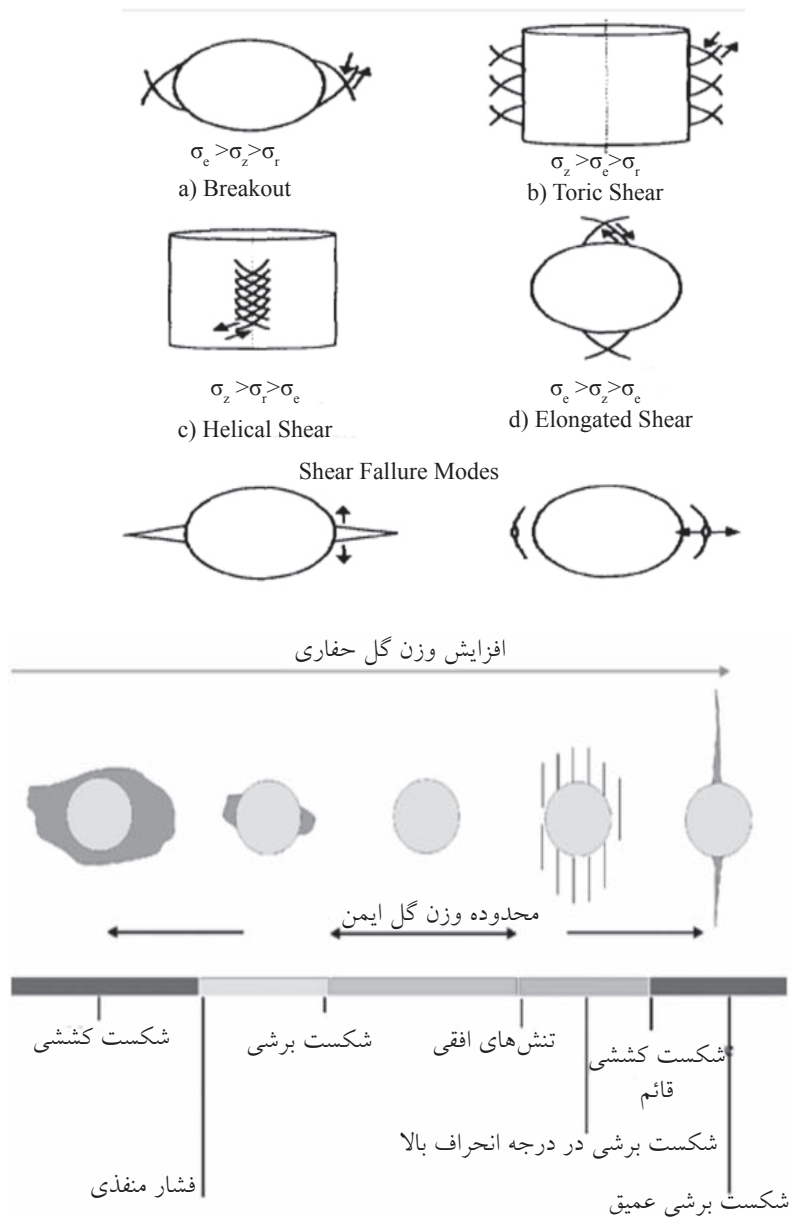
میدان سلمان از یک تاقدیس نامتقارن به ابعاد حدود  $14 \times 11$  کیلومتر تشکیل شده که از سه لایه تولیدی نفتی عرب تحتانی و فوقانی مربوط به ژوراسیک، لایه بوئیب مربوط به کرتاسه تحتانی و یک لایه گازی به نام خاف تشکیل یافته است. این مخزن در سال ۱۹۶۵ با حفر اولین چاه اکتشافی (2sk-1) کشف و تولید از لایه عرب تحتانی آن از تاریخ ژوئن ۱۹۶۸ آغاز گردید.

وسیله فشار سیالات (گل حفاری) که فشار هیدرواستاتیک نامیده می‌شود، جبران می‌گردد.

### ناپایداری چاه و معیارهای شکست

تنش‌های موجود در درون زمین به دو دسته تنش‌های دور از میدان و تنش‌های دیواره چاه تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول تنش‌هایی هستند که در فاصله زیادی از چاه وجود داشته و تحت تأثیر چاه و فرآیندهای حفاری قرار نمی‌گیرند. این گروه به طور عمده حاصل حرکات صفحه‌ای موجود در لیتوسفر<sup>۱</sup> در مقیاس منطقه‌ای هستند، اگرچه گاهی اوقات تحت شرایط تکتونیکی محلی همچون عملکرد چین، گسل و یا دیپایریسم دچار تغییر می‌شوند. این تنش‌ها در یک سیستم کارترین توصیف می‌شوند که شامل یک مؤلفه قائم حاصل از نیروی وزن طبقات فوقانی و دو مؤلفه افقی ناشی از شرایط مرزی کششی یا فشاری زمین‌شناسی هستند. تنش‌ها معمولاً از نظر مقدار بزرگی متفاوت از یکدیگرند و با عناوین تنش افقی حداکثر و تنش افقی حداقل خوانده می‌شوند. حفاری یک سازند تحت تأثیر نیروهای افقی ناهمگن، سبب توزیع مجدد مؤلفه‌های تنش و تبدیل مؤلفه‌های تنش دور از میدان به مؤلفه‌های تنش دیواره چاه می‌شود. بدین ترتیب استفاده از گل حفاری با وزن نامناسب سبب افزایش یا کاهش بیش از اندازه فشار چاه در مقایسه با فشار سازند شده و آسیب‌های جبران‌ناپذیری را بر دیواره چاه تحمیل می‌نماید. از جمله این آسیب‌ها که در تعیین جهت تنش‌های برجا تأثیرگذارند، می‌توان به گسیختگی چاه و شکستگی‌های حاصل از عملیات حفاری اشاره کرد که جهت تعیین کننده جهت تنش‌های برجا می‌باشد. وقتی یک تکه سنگ در معرض تنش‌های بزرگ قرار می‌گیرد، یکی از انواع شکست کششی یا برشی در آن اتفاق می‌افتد. این عوامل باعث می‌شود که سنگ همواره در معرض تغییر شکل باشد و این شرایط با تغییر توانایی تحمل بار سنگ همراه است. سطحی از تنش که در آن شکل سنگ به هم ریخته و می‌شکند را معمولاً مقاومت سنگ می‌گویند. سطح تنش تنها پارامتر تعیین کننده مقاومت نمی‌باشد و هندسه تنش، نوع تست (دو محوره و سه محوره) و تنظیمات آزمایشگاه نیز تعیین کننده است. شکل ۱ تغییر شکل‌های مختلف

1. Lithosphere
2. Modified Lead
3. Fracturing
4. Spalling or Splinting
5. Wash out

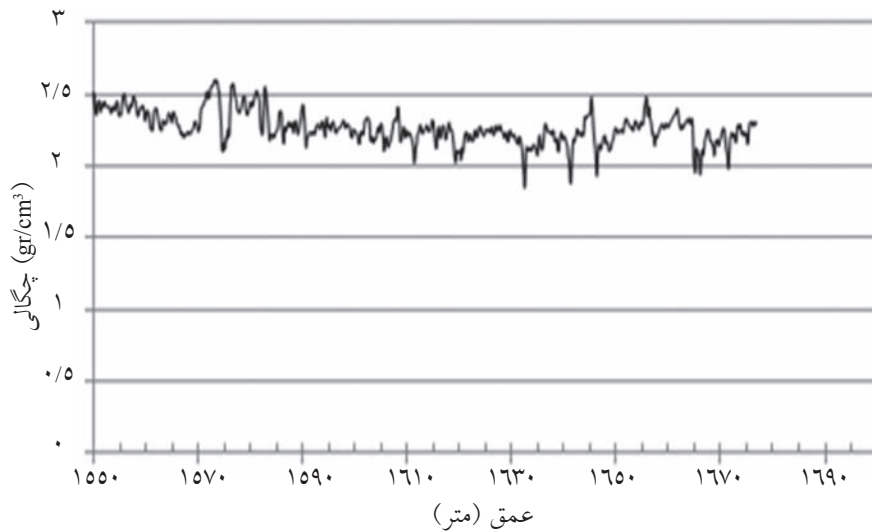


شکل ۱- انواع شکست در دیواره چاه و محدوده‌های آنها [ ۱ و ۲].

چگالی سازند شیلی در این میدان بین ۱/۸ تا ۲/۶ gr/cm<sup>3</sup> است که بر اساس آن می‌توان مقدار فشار سرپاره را تخمین زد. برای لایه شیلی مورد نظر مقدار فشار سرپاره تقریباً بین ۰/۹ (psi/ft) تا ۱/۱ (psi/ft) می‌باشد.

برای به دست آوردن پارامترهای الاستیسیته سنگ از نمودارهای صوتی فشارشی و برشی استفاده شده است. در لایه مورد نظر در این چاه، چند نقطه جهت تحلیل پایداری مکانیکی دیواره چاه مورد بررسی قرار گرفته، که مشخصات این نقاط در جدول ۱ ارائه شده است.

در حفاری در میدان مذکور یک لایه شیلی مشاهده شده است که در ادامه به برخی از مشخصات این لایه اشاره خواهد شد. لایه شیلی کزدمی در این چاه از عمق ۱۵۷۹ متر حفار شروع و تا عمق ۱۶۸۶،۵ متر ادامه پیدا می‌کند. برای بررسی پایداری این لایه ابتدا با استفاده از نمودارهای رانده شده در این چاه پارامترهای مکانیک سنگی را به دست می‌آوریم. از نمودار دانسیته مقدار دانسیته سازند نسبت به عمق بر حسب gr/cm<sup>3</sup> تعیین می‌شود که در شکل ۲ آورده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که مقدار



شکل ۲- تغییرات چگالی بر حسب عمق

جدول ۱- مشخصات نقاط بررسی شده در چاه 2sk5

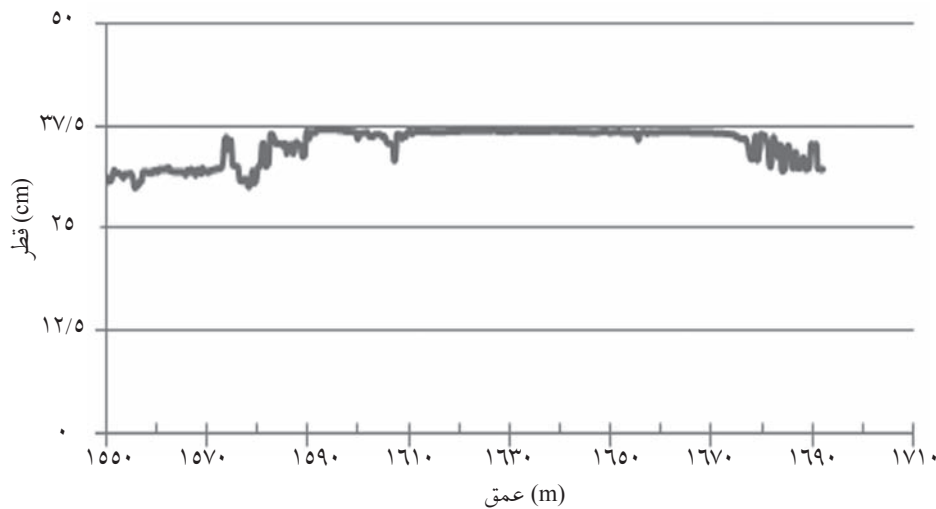
نقطه ۳	نقطه ۲	نقطه ۱	
۱۶۸۰m (۵۵۱۰ft)	۱۶۰۰m (۵۲۴۸ft)	۱۵۸۰m (۵۱۸۲/۴ ft)	عمق مورد نظر (متر)
۱/۰۳	۰/۹۸	۱/۰۶	فشار سرباره (psi/ft)
۰/۹۳	۰/۹۰	۰/۹۴	تنش افقی ماکزیمم
۰/۸۴	۰/۸۱۵	۰/۸۳	تنش افقی می نیمم
۲۳۱ (۱۲۹)	۲۳۰/۵ (۱۲۹/۵)	۲۳۰ (۱۳۰)	آزیموت (درجه)
۹/۵	۹/۴	۹/۴	فشار معادل حفره (lb/gal)
۹/۶-۱۰	۹/۶-۱۰	۹/۶-۱۰	وزن گل حفاری استفاده شده (lb/gal)
۰/۳۳	۰/۳۲۵	۰/۲۹	نسبت پواسون
۰/۷	۰/۷	۰/۷	ثابت بایوت
۱۴۰۰	۱۴۰۰	۲۰۰۰	پیوستگی (psi)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	مقاومت کششی (psi)
۳۰	۳۰	۳۰	زاویه اصطکاک (درجه)

### نتایج تجربی

وزن گل حفاری استفاده شده در این نقاط (lb/gal) ۱۰ بوده است. نمودار قطر چاه نمایان گر کیفیت حفاری در سازند مورد نظر است. با استفاده از این نمودار می توان دریافت که در چه عمقی، چاه دچار ریزش و در چه عمقی دچار تنگ شدگی شده است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، تقریباً در تمام فواصل عمق (۱۵۸۰ تا ۱۶۸۰ متر) قطر چاه بزرگ شده است. این ناپایداری یا به عبارتی بزرگ شدن قطر چاه، به دلیل ناپایداری شیمیایی یا مکانیکی است.

### بررسی ناپایداری

مزیت روش های تحلیلی، ساده بودن و عدم نیاز به بسیاری از پارامترهای مربوط به سنگ و محیط حفاری است که شاید مقدار آنها در زمان شروع حفاری نامعلوم باشد. تاکنون روش های تحلیلی زیادی در خصوص روابط میدان تنش و کرنش ارائه شده است. برای تعیین ناپایداری مکانیکی یک چاه به یک مدل جهت تخمین اندازه تنش اطراف چاه نیاز داریم. وستگارد یکی از ابتدایی ترین روش های تعیین تنش های گسترش یافته در اطراف چاه را ارائه کرد.



شکل ۳- نمودار تغییرات قطر چاه بر حسب عمق

را الاستیک همسان‌گرد فرض می‌کنیم. سیستم مختصات استوانه‌ای، برای مطالعه حالت تنش اطراف پیشنهاد می‌شود. در این روش ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Matlab، مؤلفه‌های تنش را در سیستم مختصات استوانه‌ای که جهت محور Z آن موازی با محور چاه است به دست آورده (شکل ۴) و سپس با استفاده از روابط تحلیلی، مؤلفه‌های تنش در اطراف چاه حفر شده محاسبه می‌شود و میزان فشار لازم گل جهت جلوگیری از شکست برشی توسط معیارهای مختلف به دست می‌آید. برای محاسبه تنش در دیواره چاه از معادلات زیر استفاده می‌کنیم. این معادلات توسط فیرهارست و هراماتسو و با در نظر گرفتن  $(R=a)$  به دست آمده است.  $a$  فاصله از مرکز چاه در معادلات اولیه برای تعیین تنش در اطراف چاه و  $R$  شعاع چاه می‌باشد که با در نظر گرفتن  $(R=a)$  تنش بر روی دیواره چاه مشخص می‌شود [۷].

$$\sigma_r = p_w \quad (۱)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_x^o + \sigma_y^o - 2(\sigma_x^o \sigma_y^o) - 4\sigma_{xy}^o \sin 2\theta - p_w \quad (۲)$$

$$\sigma_z = \sigma_z^o - [2(\sigma_x^o - \sigma_y^o) \cos 2\theta + \sigma_{xy}^o \sin 2\theta] \quad (۳)$$

$$\sigma_{\theta z} = 2(-\sigma_{xz}^o \sin \theta + \sigma_{yz}^o \cos \theta) \quad (۴)$$

$$\sigma_{r\theta} = 0 \quad (۵)$$

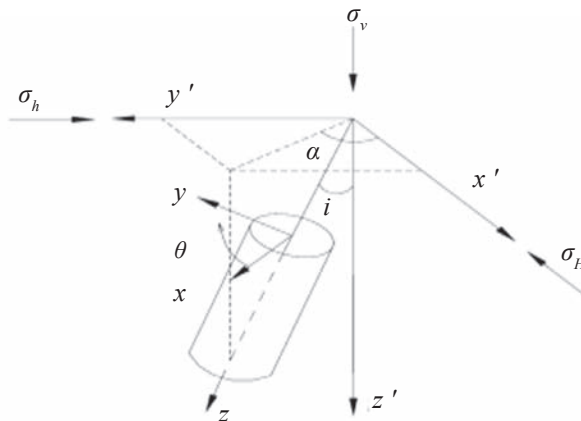
$$\sigma_{rz} = 0 \quad (۶)$$

در شکل ۵ که مربوط به نقطه ۱ در عمق ۱۵۸۰ متر است، محور عمودی فشار گل و محور افقی زاویه انحراف چاه را نشان می‌دهد.

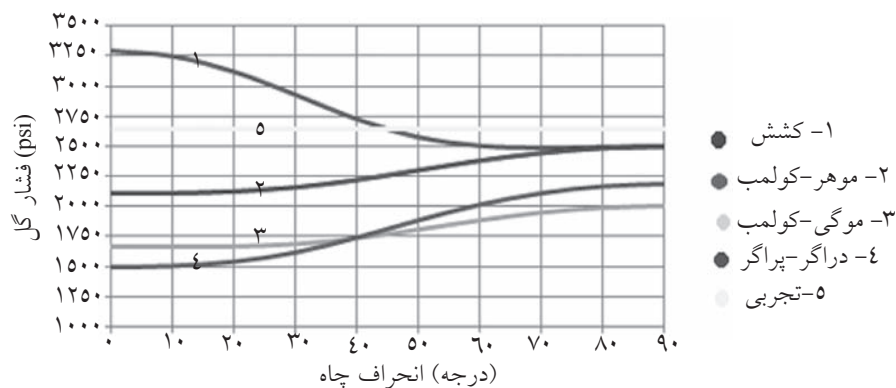
در این روش پایه کار بر روی الاستوپلاستیک توسعه داده شده بود و بعد از آن کارهای زیادی با استفاده از این روش انجام شد. در بین تعداد زیاد مدل‌های به چاپ رسیده، روش الاستیک خطی یک روش معمولی به نظر می‌رسد. پارامترهای ورودی در این روش در قیاس با سایر روش‌های پیچیده بسیار کم است. رایس نز و براتلی و مک لین و آدیس روش الاستوپلاستیک را برای آنالیز پایداری پیشنهاد کردند. برخی از محققین مانند اسوین جائر، مدل الاستیک خطی را برای آنالیز پایداری دیواره چاه در موارد شکست به کار بردند. در عمل داده‌های مورد نیاز برای روش‌های پیچیده چندان در دسترس نیستند [۵].

کرش با فرض محیط الاستیک، روابطی برای تعیین تنش‌های شعاعی، مماسی و برشی در اطراف مقطع دایره‌ای ارائه نمود. پس از ارائه این روابط توسط کرش، تلاش‌های بسیار زیادی برای برطرف نمودن نواقص آن صورت گرفت. یکی از کمبودهای عمده مدل کرش، در نظر گرفتن محیط به صورت الاستیک در زمان حفاری است. حال آنکه رفتار سنگ در اطراف محل حفاری شده به صورت پلاستیک می‌باشد. با توجه به این مشکل عمده، سالنکون روابط خود را در سال ۱۹۶۹ برای تعیین شعاع محدوده دچار تغییرات پلاستیک شده و نیز محاسبه میزان تنش در مناطق پلاستیک و الاستیک ارائه داد [۶].

به هر حال برای آنالیز پایداری دیواره چاه‌ها، رفتار سنگ



شکل ۴- سیستم انتقال تنش برای چاه‌های انحرافی



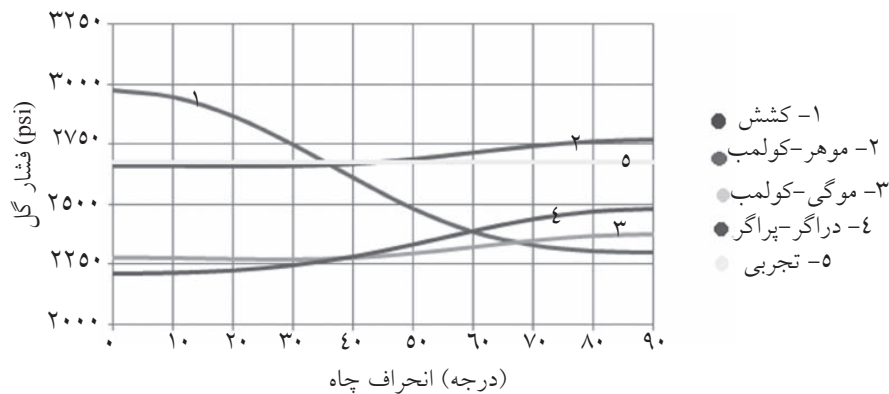
شکل ۵- حد پایین پنجره گل بر اساس معیارهای موهر-کولمب، موگی-کولمب و دراگر-پراگر و حد بالای آن (شکست کششی) در نقطه ۱ (عمق ۱۵۸۰ متر) و فشار گل به کار رفته در چاه با زاویه انحراف ۴۰ درجه

شده با زاویه انحراف حدود ۴۰ درجه و در عمق ۱۵۸۰ متر، فشار گل حدود ۲۶۴۰ psi فرض شده است که در معیارهای مورد استفاده مانند نمودار قطر چاه (شکل ۳)، این حالت پایدار است.

شکل ۶ مربوط به نمودارهای فشار گل در نقطه ۲ با عمق ۱۶۰۰ متر است. حد پایین گل در این نمودار نیز بر اساس سه معیار شکست موهر-کولمب، موگی-کولمب و دراگر-پراگر رسم شده است.

حد بالای گل نیز با فرض صفر بودن مقاومت کششی سنگ با توجه به زاویه انحراف چاه رسم شده است. همچنین فشار گل به کار رفته در چاه با زاویه انحراف ۴۰ درجه مشخص گردیده است. در این نقطه هم هر سه معیار، جهت کاربرد فشار گل پایین‌تر، زاویه انحراف کمتری را برای چاه پیشنهاد می‌کنند.

حد پایین گل در این نمودار بر اساس سه معیار شکست موهر-کولمب، موگی-کولمب و دراگر-پراگر رسم شده است. حد بالای گل نیز با فرض صفر بودن مقاومت کششی سنگ با توجه به زاویه انحراف چاه رسم شده است. همچنین فشار گل به کار رفته در چاه با زاویه انحراف ۴۰ درجه مشخص گردیده است. مطابق شکل، معیار شکست موگی-کولمب و دراگر-پراگر به دلیل در نظر گرفتن تنش اصلی متوسط، نسبت به معیار موهر کولمب مقادیر فشار گل بیشتری را برای پایداری چاه در زوایای انحراف مختلف پیشنهاد می‌کنند. همچنین هر سه معیار جهت کاربرد فشار گل پایین‌تر زاویه انحراف کمتری را نشان می‌دهند. در زاویه انحراف بالای ۸۰ درجه، حد بالای گل با حد پایین معیار موهر-کولمب تقریباً برابر می‌شود. این بدین معنی است که فشار گل در این نقطه برابر با تنش حداقل دیواره چاه شده و شکست کششی رخ می‌دهد. چنانچه در جدول ۱ ذکر شد، برای چاه حفر



شکل ۶- حد پایین پنجره گل بر اساس معیارهای موهرکولمب، موگی کولمب و دراگر پراگر و حد بالای آن (شکست کششی) در نقطه ۲ (عمق ۱۶۰۰ متر) و فشار گل به کار رفته در چاه با زاویه انحراف ۴۰ درجه

بالای ۳۲ درجه، مطابق معیار موهر-کولمب، شکست کششی نسبت به شکست برشی در فشار گل کمتری رخ می‌دهد بدین معنی که قبل از رسیدن فشار گل به حدی که شکست برشی اتفاق نیفتد، فشار گل از تنش مماسی حداقل بیشتر شده و شکست کششی رخ می‌دهد. این شرایط برای معیارهای دراگر-پراگر و موگی-کولمب به ترتیب در زوایای انحراف بالاتر از ۵۰ و ۵۵ درجه اتفاق می‌افتد. چنانچه در جدول ۱ ذکر شد، برای چاه حفر شده با زاویه انحراف حدود ۴۰ درجه و در عمق ۱۶۰۰ متر، فشار گل حدود ۲۸۰۷ psi استفاده شده است که مطابق شکل، معیار موهر-کولمب این شرایط را ناپایدار ارزیابی می‌کند، ولی معیار موگی-کولمب و دراگر پراگر آن را پایدار ارزیابی می‌کند. مطابق نتایج به دست آمده از نمودار قطر چاه (شکل ۳)، چاه در این شرایط، عملاً ناپایدار بوده و قطر آن افزایش یافته است.

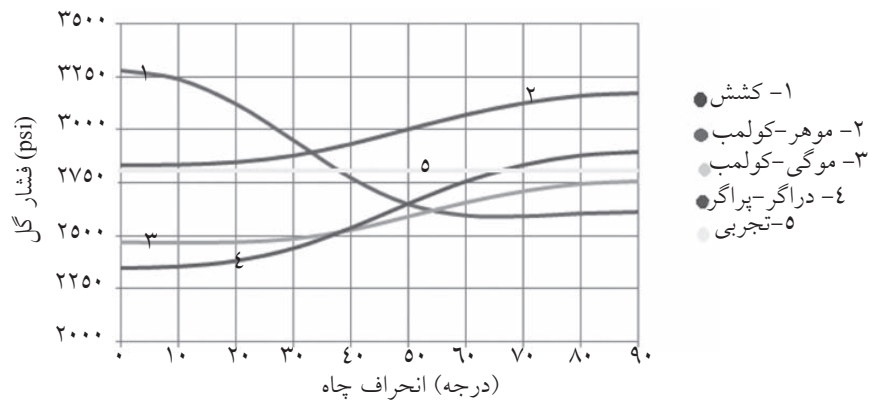
### نتیجه‌گیری

همان‌طور که اشاره شد، معیارهای موگی-کولمب و دراگر-پراگر به دلیل در نظر گرفتن تنش اصلی متوسط در محاسبات، مقاومت برشی بیشتری را برای سنگ در نظر می‌گیرند و فشار گل کمتری را نسبت به معیار موهر-کولمب جهت حفاری پیشنهاد می‌دهند. برای سه نقطه مورد بررسی در چاه، معیار موهر-کولمب نتایجی نزدیک‌تر به واقعیت نشان می‌دهد.

در زاویه انحراف بالای ۳۵ درجه، مطابق معیار موهر-کولمب شکست کششی نسبت به شکست برشی در مقادیر کمتر فشار گل رخ می‌دهد بدین معنی که قبل از رسیدن فشار گل به حدی که شکست برشی اتفاق بیفتد، فشار گل از تنش مماسی حداقل بیشتر شده و شکست کششی رخ می‌دهد. این شرایط برای معیارهای دراگر-پراگر و موگی-کولمب به ترتیب در زاویه انحراف‌های بالاتر از ۶۰ و ۷۰ درجه اتفاق می‌افتد. چنانچه در جدول ۱ ذکر شده برای چاه حفر شده با زاویه انحراف حدود ۴۰ درجه و در عمق ۱۶۰۰ متر، فشار گل حدود ۲۶۷۴ psi استفاده شده است که مطابق شکل ۶، معیار موهرک-ولمب این شرایط را ناپایدار ارزیابی می‌کند، اما معیار موگی-کولمب و دراگر-پراگر آن را پایدار ارزیابی می‌نماید. مطابق آنچه از نمودار قطر چاه (شکل ۳) بومی‌آید، چاه در این شرایط ناپایدار بوده و قطر آن افزایش یافته است.

نتایج در مورد نقطه سوم نیز تقریباً مشابه نقطه ۲ است. در این نمودار نیز حد پایین گل بر اساس سه معیار شکست موهر-کولمب، موگی-کولمب و دراگر-پراگر رسم شده است. حد بالای گل نیز با فرض صفر بودن مقاومت کششی سنگ با توجه به زاویه انحراف چاه رسم شده است. همچنین فشار گل به کار رفته در چاه با زاویه انحراف ۴۰ درجه مشخص گردیده است. در این نقطه هم هر سه معیار جهت کاربرد فشار گل پایین‌تر، زاویه انحراف کمتری را برای چاه پیشنهاد می‌کنند. در زاویه انحراف

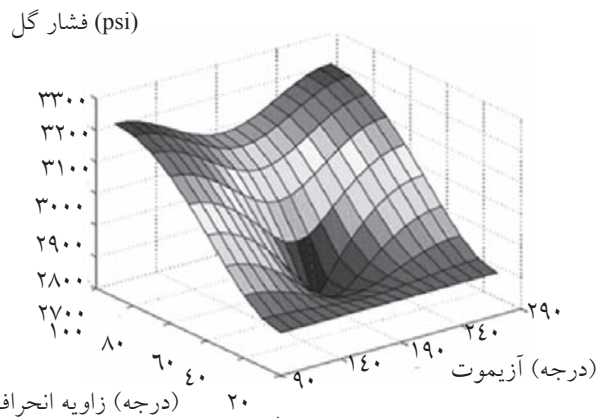




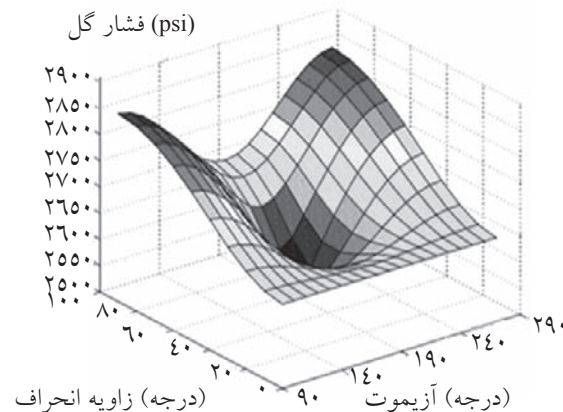
شکل ۷- حد پایین پنجره گل بر اساس معیارهای موهر-کولمب، موگی-کولمب و دراگر-پراگر و حد بالای آن (شکست کششی) در نقطه ۳ (عمق ۱۶۸۰ متر) و فشار گل به کار رفته در چاه با زاویه انحراف ۴۰ درجه

معیار موهر-کولمب، در آزمون ۱۸۰ و زاویه انحراف ۵۰ درجه به دست می‌آید [۸]. بر این اساس، جهت پایداری در نقطه ۲ و ۳ پیشنهاد می‌شود آزمون و زاویه انحراف چاه تغییر کند تا بتوان با کمترین فشار گل، در دیواره چاه به پایداری رسید.

مطابق شکل ۸ که نشان‌دهنده فشار گل مورد نیاز برای پایداری در نقطه ۲ (عمق ۱۶۰ متر) در زوایای انحراف و آزمون‌های مختلف بر اساس معیار موهر-کولمب می‌باشد، آزمون بهینه ۱۸۰ و زاویه انحراف ۴۰ درجه را به منظور به‌کارگیری کمترین فشار گل پیشنهاد می‌دهد. همچنین مطابق شکل ۹، فشار گل بهینه برای پایداری در نقطه ۳ چاه (عمق ۱۶۸۰ متر) بر اساس



شکل ۸- تغییرات حداقل فشار گل مورد نیاز بر اساس آزمون و زاویه انحراف چاه



شکل ۹- تغییرات حداقل فشار گل مورد نیاز بر اساس آزمون و زاویه انحراف چاه



علائم و نشانه‌ها

$$\sigma_H = \text{تنش مماسی} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$\sigma_r = \text{تنش شعاعی} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$\sigma_y^o = \text{تنش نرمال در مختصات کارتزین} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$\sigma_{r\theta} = \text{تنش برشی در مختصات استوانه ای} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$\sigma_{\theta z} = \text{تنش برشی در مختصات استوانه ای} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$\sigma_{rz} = \text{تنش برشی در مختصات استوانه ای} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$\theta = \text{(درجه) انحراف چاه از جالت قائم}$$

$$\Phi = \text{(درجه) زاویه اصطکاک داخلی}$$

$$\sigma_h = \text{تنش افقی مینیمم} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$\sigma_H = \text{تنش افقی ماکزیمم} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$c = \text{چسبندگی} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$P_w = \text{فشار گل} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$\sigma_v = \text{تنش روباره (قائم)} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$\tau = \text{تنش برشی نرمال} \left( \frac{lb}{in^2} \right)$$

$$v = \text{ضریب پواسون}$$

$$B = \text{ضریب بایوت}$$

مراجع

- [1]. Maury v. and guenot a., "Practical advantages of mud cooling systems f/drilling", SPE / IADC 25732 presented at the, SPE / IADC drilling conference in amesterdam feb. pp. 23-25, 1993.
- [2]. Zhang J., *The Impact Of Shale Properties On Wellbore Stability*, The University Of Texas At Austin 2005.
- [3]. Zobac M. D., and Hearly J. H., *Friction, Faulting And Insitu Stresses*. Ann Geophys 1984;2;689-98.
- [4]. Bos A. and Chenvert M. E., "Stability Of Highly Inclined Boreholes", SPE Drilling Engineering . Dec.1997.
- [5]. Al-ajmi A.M., and Zimmerman R.W., *Stability analysis of vertical boreholes using the moyi-coulomb failure criterion int.*, j. rock mech. & min . sci. & geomech. April. 2006.
- [6]. Salknon P. N. Vouliano And Albert e.t. *Stability analysis in deviated wells*, Spe International Metting On Petroleum Engineering.
- [7]. Hardest F. and Matso H., *Pore Field And Wellbore Stability* SPE 19381, Spe International Metting On Petroleum Engineering, 1968.
- [8]. موحدی نیاع. م.، قاسم العسکری م. ک.، یاراحمدی م.، آنالیز پایداری دیواره چاه در چاه‌های انحرافی در میدان سلمان با استفاده از معیارهای شکست مختلف، (پایان‌نامه کارشناسی ارشد) ۲۰۱۱.