



مقاله پژوهشی

تحلیل پایداری چاه با استفاده از منحنی اندرکنش زمین و معیار مور-کولمب

امیر محمد احمدی^۱، ابوالفضل عبدالهی پور^{۱*}، علیرضا کارگر^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: شهریور ۱۴۰۲، پذیرش: دی ۱۴۰۲)

چکیده

امروزه با افزایش نیاز بشر به تأمین انرژی و مشتقات نفتی، استخراج این ماده روزبه‌روز در حال افزایش است. با این وجود مخازنی که از نظر عملیات حفاری و پایداری چاه پیچیدگی و مشکلات اندکی داشتند، در حال اتمام هستند. مهندسان برای پاسخ به این نیاز باید به استخراج منابعی که دارای پیچیدگی و مشکلات بیشتری در حفاری و پایداری نسبت به قبل هستند بپردازند. لذا مبحث پایداری چاه، وزن بهینه و پنجره ایمن سیال حفاری بیش‌ازپیش مورد اهمیت قرار می‌گیرد. در این پژوهش با تعمیم و اصلاح منحنی اندرکنش زمین که یکی از مهم‌ترین روش‌ها در تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی است، به تحلیل پایداری چاه و انتخاب وزن بهینه سیال حفاری با استفاده از روش حل تحلیلی و عددی پرداخته می‌شود. در ابتدا منحنی اندرکنش زمین برای پنج حفره دایره‌ای شکل در میدان تنش‌های هیدرواستاتیک و ناهمسانگرد رسم شده و تأثیر پارامترهایی همچون فشار منفذی، نسبت‌های مختلف تنش‌های افقی به قائم و شعاع حفره روی منحنی اندرکنش زمین بررسی می‌شود. مشخص شد تغییرات این پارامترها با میزان همگرایی دیواره حفره رابطه مستقیم داشته و با افزایش آن‌ها میزان همگرایی دیواره حفره افزایش می‌یابد. سپس با استفاده از روابط تحلیلی مور-کلمب و روش منحنی اندرکنش زمین در مدل‌سازی عددی تفاضل محدود، حدود پنجره ایمن سیال حفاری محاسبه گردید. طبق نتایج به‌دست‌آمده در روش عددی با استفاده از منحنی اندرکنش زمین حد پایین و بالای فشار سیال حفاری به ترتیب کمتر و بیشتر از حد پایین و بالای فشار سیال حفاری با استفاده از روش تحلیلی مور-کلمب بوده و روش عددی مبتنی بر منحنی اندرکنش زمین پنجره ایمن بزرگ‌تری نسبت به روش تحلیلی مور-کلمب ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی

پایداری چاه، منحنی اندرکنش زمین، پنجره ایمن گل حفاری، وزن گل حفاری، معیار گسیختگی

*معهده‌دار مکاتبات: abdollahipour@ut.ac.ir

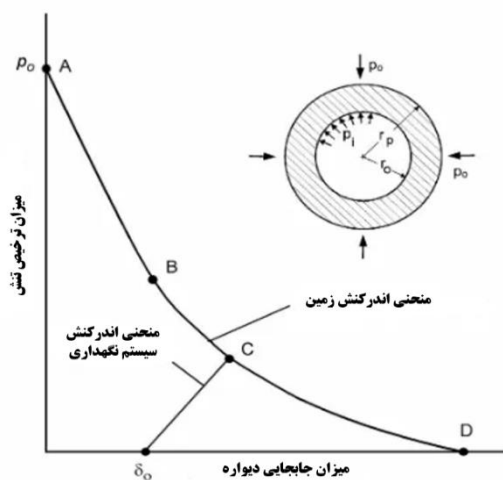
۱- مقدمه

پایداری چاه در زمان حفاری از مهم‌ترین مسائل مطرح در صنعت نفت و گاز است. در این مطالعه استفاده از منحنی اندرکنش زمین به عنوان روش بررسی پایداری و تعیین پنجره گل ایمن استفاده خواهد شد.

۱-۱- منحنی اندرکنش زمین

منحنی اندرکنش زمین یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های روش همگرایی - همجواری است. روش همگرایی - همجواری (CCM^۱) تکنیکی است که برهمکنش بین تونل و سیستم نگهداری نصب‌شده را از نظر کرنش‌ها و تنش‌های موجود محاسبه می‌کند. این روش سه مؤلفه داشته که عبارت‌اند از: منحنی اندرکنش زمین (GRC^۲) که رابطه بین کاهش فشار داخلی، تغییر شکل و جابجایی دیواره تونل را توصیف می‌کند. پروفیل تغییر شکل طولی (LDP^۳) که تغییر شکل و جابجایی در مقطع طولی تونل در فاصله مشخصی از جبهه کار حفاری را مرتبط می‌سازد. منحنی مشخصه سیستم نگهداری (SCC^۴) که بیانگر رابطه تنش - کرنش برای سیستم نگهداری است. این موارد باهم به طراح این امکان را می‌دهد تا عملکرد سیستم نگهداری را با توجه به تغییر شکل‌ها و جابجایی‌ها تخمین بزند [۱]. گاهی اوقات اصطلاح منحنی اندرکنش زمین (GRC) یا منحنی مشخصه زمین، به یک روش محاسبه مرتبط است. درواقع، برای یک حفره با هندسه معین، منحنی اندرکنش زمین، جابجایی یک نقطه انتخاب‌شده در مرز حفاری را به عنوان تابعی از فشار سیستم نگهداری نشان می‌دهد. برای به دست آوردن منحنی گفته‌شده، انجام یک سری محاسبات تعادل، ضروری است [۲]. روش کلاسیک به حالت ساده تقارن محوری در یک محیط الاستوپلاستیک نامحدود اشاره دارد. رفتار حفاری تونل در چنین شرایطی را اولین بار فینر بیان کرد. متعاقباً، راه‌حل‌های عددی توسعه داده شده‌اند که امکان افزایش قابل توجه احتمالات ارائه‌شده توسط این تحلیل‌ها را فراهم می‌کنند [۳]. فرمول‌بندی‌های ناحیه پلاستیک بر اساس این فرض هستند که زمین به عنوان یک محیط پیوسته در طول تسلیم (بدون شکستگی و ریزش) باقی می‌ماند. ملاحظات مربوط به شل شدن و ریزش زمین توسط پِچِر (۱۹۶۴) به این محاسبات اضافه شد. فرضیات زیادی وجود دارند که برای بررسی تحلیلی ناحیه ریزشی موردنیاز هستند [۴]. محاسبه

رفتار الاستیک در روش همگرایی-همجواری (CCM) اولین بار بر اساس حل اولیه حفره دایروی در یک صفحه توسط کرنش بیان شد. همان‌طور که ذکر شد اولین بار فینر رفتار تونل را در یک ناحیه پلاستیک با تعدادی از فرمول‌بندی‌های پیشنهادی تحلیل کرد. محققین دیگری از جمله پانت و گونو (۱۹۸۲)، دانکن فاما (۱۹۹۳)، کارانزا - تورس و فیهرست (۲۰۰۰) این فرمول‌بندی‌ها را تکمیل کردند [۵-۷]. معمولاً یافتن راه‌حل‌های تحلیلی برای مسئله تونل حفرشده در مواد پیچیده‌تر مانند مواد نرم شونده کرنشی (SS) ممکن نیست، بنابراین در این رفتار (GRC) باید با استفاده از یک روش عددی به دست آید [۸-۱۲].



شکل ۱: منحنی اندرکنش زمین (GRC) [۶]

در شکل ۱ منحنی اندرکنش زمین برای یک حفره دایروی شکل رسم شده است. با توجه به شکل زمین و محیط اطراف حفره در نقطه A در حال تعادل بوده و فشار داخلی P_i با فشار وارده از زمین (تنش‌های برجا P_0) برابر است. با پیشروی در فرایند حفاری و باربرداری، به تدریج فشار داخلی کاهش یافته و جابجایی در دیواره حفره اتفاق می‌افتد. این جابجایی و ترخیص تنش تا نقطه B با رفتار الاستیک ادامه می‌یابد. با عبور از نقطه بی تنش وارده به توده سنگ اطراف حفره افزایش یافته و توده سنگ اطراف حفره دچار شکست می‌شود. با ایجاد شکست، نمودار از رفتار الاستیک به رفتار پلاستیک تغییر کرده و نمودار سهمی می‌شود. نقطه C جایی است که سیستم نگهداری با تنش‌های وارده از طرف زمین به تعادل می‌رسد. سپس در نقطه D با ترخیص کامل تنش و حفاری کل مقطع جابجایی شعاعی دیوار حفره به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

۱-۲- پایداری چاه

حفر چاه، به منظور دسترسی به مخازن نفت و تولید نفت، انجام می‌شود. این فرآیند معمولاً با شیب و آزمایش‌های مختلفی انجام شده و از میان لایه‌هایی با خواص متفاوت عبور می‌کند؛ بنابراین، حفاری یک فرآیند پرخطر است. از دست دادن چاه به علت ایجاد ناپایداری منجر به هزینه‌های قابل توجه و توقف در عملیات تولید می‌شود. پایداری چاه به عنوان یکی از مهم‌ترین ملزومات در هنگام حفاری و تولید محسوب می‌شود. مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده است. با توجه به مطالعات انجام شده، پارامترهای ژئومکانیکی جزء مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها در این مبحث هستند [۱۳]. ادنوی و بلاینه در سال ۲۰۰۴ برای بررسی پایداری دیواره چاه از مدل الاستوپلاستیک استفاده کردند. آزمایش‌های شکاف هیدرولیکی نشان داد که مدل الاستیک خطی، فشار شکست را کمتر از مدل الاستوپلاستیک تخمین می‌زند. طبق آزمایش‌ها، برای مواقعی که سیال در سازند نفوذ نداشته باشد مدل‌های الاستیک و الاستوپلاستیک را می‌توان استفاده کرد. از طرفی از آنجایی که مدل‌های پوروالاستیک و پوروالاستوپلاستیک تغییرات فشار منفذی سنگ‌ها را نیز در نظر می‌گیرند، برای شرایطی که سیال به درون سازند نفوذ کند دارای کاربرد بیشتری هستند [۱۴]. العجمی و زیمرمن در سال ۲۰۰۶ معیار گسیختگی موگی-کلمب را جهت بررسی و تحلیل شکست‌های برشی در سنگ‌ها ارائه کردند [۱۵]. با توجه به معیار گسیختگی موگی-کلمب در جهت مدل‌سازی شکست، العجمی و زیمرمن در سال ۲۰۰۹ مدل پایداری دیواره چاه‌های عمودی، جهت‌دار و افقی را ارائه نمودند [۱۶]. ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۰، پنج معیار گسیختگی بر روی پنج نمونه‌ی مختلف سنگ آزمایش کرده و با توجه به نمونه‌های مورد ارزیابی، بهترین معیار گسیختگی برای بررسی تحلیل دیواره چاه را معیارهای سه‌بعدی هوک - براون و موگی-کلمب معرفی کردند [۱۷]. غلامی و همکاران در سال ۲۰۱۳ در مطالعه‌ی موردی که برای تعیین پنجره ایمن فشار سیال حفاری انجام دادند به این نتیجه رسیدند که معیار موگی-کولمب نسبت به دو معیار مور-کولمب و هوک - براون نتیجه‌ی نزدیک‌تری با مشاهدات سرچاهی داشته و دلیل آن را مدنظر قرار دادن تنش میانه توسط معیار موگی-کولمب ذکر کردند [۱۸]. ملکی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به بررسی نتایج سه معیار

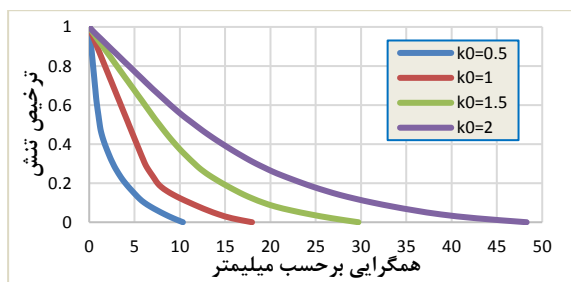
گسیختگی مور-کلمب، موگی-کلمب و هوک - براون در تحلیل پایداری دیواره چاه پرداختند. با توجه به بررسی‌ها آن‌ها نشان دادند که معیار گسیختگی موگی-کلمب نتایج دقیق‌تری ارائه می‌کند [۱۹]. نجیبی و همکاران در سال ۲۰۱۷ جهت ارائه‌ی پنجره‌ی ایمن سیال حفاری از معیارهای گسیختگی مور-کولمب و موگی-کولمب استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که سبب اینکه معیار مور-کولمب تنش میانه را در نظر نمی‌گیرد، حد پایین پنجره ایمن سیال حفاری را بیش از واقعیت تخمین می‌زند [۲۰].

۲- مواد و روش‌ها

جهت معرفی روش، ابتدا نحوه مدل‌سازی و رسم منحنی اندرکنش زمین برای پنج تونل با شعاع‌های (۲) مختلف رسم و بررسی خواهد شد. سپس مدل برای استفاده در چاه و تعیین پنجره گل اصلاح خواهد شد.

۲-۱- رسم نمودار منحنی اندرکنش زمین با استفاده از مدل عددی

در این بخش منحنی اندرکنش پنج تونل دایره‌ای شکل با استفاده از نرم‌افزار فلک دوبعدی (نسخه ۸) به دست آمده است. مرزهای مدل عددی ثابت در نظر گرفته شده، اندازه مدل به صورتی در نظر گرفته شده که در مرزهای مدل، تنش مؤثر برابر با تنش‌های اصلی هستند. مدل عددی در میدان تنش‌های هیدرواستاتیک و آنیزوتروپ رسم شده است. تأثیر پارامترهایی همچون فشار منفذی، نسبت‌های مختلف تنش‌های افقی به قائم و شعاع تونل روی منحنی اندرکنش زمین بررسی می‌شود. پارامترهای ورودی برای تونل‌ها در جدول ۱ قابل مشاهده است. ملاحظات منحنی‌های رسم شده به شرح زیر است: در ساخت هندسه مدل، شرایط مرزی چهار طرف مدل ثابت در نظر گرفته شده است. هندسه مدل به صورت شعاعی در نظر گرفته شده است. از محاسبه نیرو وزن صرف‌نظر شده است. برای حفره‌های شماره ۱ و ۲ منحنی اندرکنش زمین در شرایط هیدرواستاتیک بررسی می‌شود. برای تونل‌های ۳، ۴ و ۵ اثر افزایش شعاع در منحنی اندرکنش زمین بررسی می‌شود. برای تونل شماره ۳ منحنی اندرکنش زمین با نسبت تنش‌های افقی به قائم مختلف بررسی می‌شود. تمام بررسی‌ها در هر دو جهت y و x انجام می‌شود. از معیار گسیختگی مور-کولمب در مدل‌سازی استفاده شد.



شکل ۶: تغییرات منحنی اندرکنش زمین به نسبت تنش افقی به تنش قائم در راستای X ، تونل شماره ۳.

۲-۲- تعیین پنجره ایمن سیال حفاری با روش تحلیلی مور-کلمب

به منظور استفاده از منحنی اندرکنش زمین در بررسی پنجره گل در چاه، ملاحظات باید در نظر گرفته شود که در این بخش به آن پرداخته خواهد شد. تنش‌های شعاعی و مماسی (که تابعی از فشار سیال حفاری P_W می‌باشند) بر روی دیواره‌ی چاه از روابط کرش به دست آمده است [۲۱].

$$\sigma_r = P_W \quad (۱)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_W \quad (۲)$$

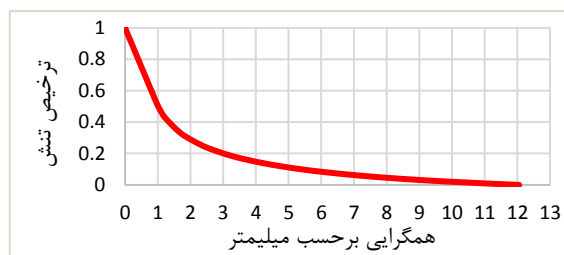
$$\sigma_z = \sigma_H - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \quad (۳)$$

که در آن، σ_r تنش شعاعی، P_W فشار سیال حفاری، σ_θ تنش مماسی، σ_H تنش افقی حداکثر، σ_h تنش افقی حداقل برحسب مگاپاسکال بوده و ν ضریب پواسن است.

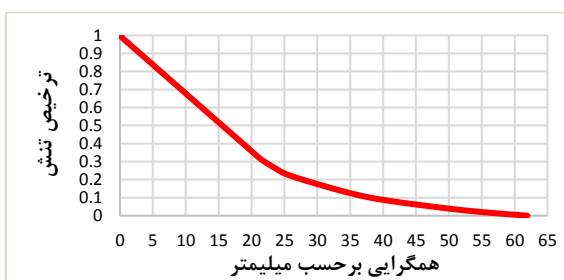
تغییرات فشار سیال حفاری این تنش‌ها σ_θ و σ_r را تحت تأثیر قرار می‌دهد. دو نوع شکست در چاه رخ می‌دهد که شامل شکست برشی (ریزش دیواره چاه) و شکست کششی (شکست هیدرولیکی) است. با تغییرات σ_θ و σ_r مرتبط با P_W ، دو حالت رخ می‌دهد: $\sigma_r \leq \sigma_\theta$ که باعث ریزش دیواره چاه و $\sigma_r \geq \sigma_\theta$ که باعث شکست دیواره چاه می‌شود. زمانی که فشار سیال حفاری افزایش یابد در پی آن تنش شعاعی افزایش یافته و متعاقباً تنش مماسی کم می‌شود. بنابراین مرز بالایی فشار سیال حفاری (فشار شکست) زمانی برقرار می‌شود که مقدار تنش شعاعی از تنش مماسی بزرگ‌تر باشد. با در نظر گرفتن این مورد و تنش محوری، سه جایگشت از تنش‌ها برای بررسی و تخمین بیشینه فشار سیال حفاری به وجود می‌آید که عبارت‌اند از:

جدول ۱: پارامترهای ورودی در مدل‌سازی تونل‌ها

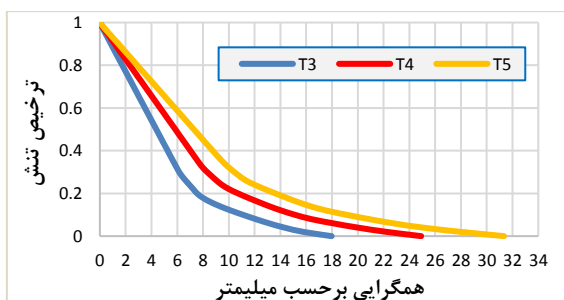
شماره تونل	r [m]	c [kPa]	σ [MPa]	φ [°]	ν [-]	E [GPa]
۱	۱٫۶۵	۱۷۰	۵٫۲	۲۳	۰٫۲۵	۵۰۰۰
۲	۵٫۳۵	۳۷۰	۳٫۳	۳۲	۰٫۲۵	۱۳۸۰
۳	۳	۲۴۰	۲	۳۰	۰٫۲۰	۱۶۰۰
۴	۴	۲۴۰	۲	۳۰	۰٫۲۰	۱۶۰۰
۵	۵	۲۴۰	۲	۳۰	۰٫۲۰	۱۶۰۰



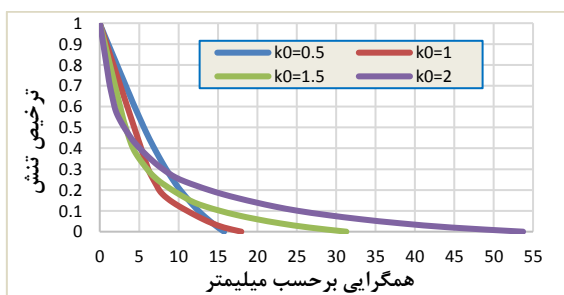
شکل ۲: منحنی اندرکنش زمین تونل شماره ۱



شکل ۳: منحنی اندرکنش زمین تونل شماره ۲



شکل ۴: تغییرات منحنی اندرکنش زمین نسبت به شعاع - تونل‌های شماره ۳، ۴ و ۵



شکل ۵: تغییرات منحنی اندرکنش زمین به نسبت تنش افقی به تنش قائم در راستای Y ، تونل شماره ۳

۲-۳- تعیین پنجره ایمن سیال حفاری با روش تحلیلی مور-کلمب

برای محاسبه تنش‌ها در حالت ریزش (شکست فشاری) و گسیختگی (شکست کششی) می‌توان از معیار گسیختگی مور - کلمب استفاده کرد که به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۳]:

$$\sigma_1 - P_0 = \sigma_c + q(\sigma_3 - P_0) \quad (۱۱)$$

که در آن، σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل و σ_c مقاومت تراکم تک‌محوری سنگ برحسب مگاپاسکال هستند. با بازنویسی رابطه (۱۱)، معیار گسیختگی مور - کلمب به صورت زیر خواهد شد:

$$\sigma_1 = C + q\sigma_3 \quad (۱۲)$$

که در آن، q و C ثابت‌هایی هستند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$C = \sigma_c - P_0(q - 1) \quad (۱۳)$$

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (۱۴)$$

که در آن، φ زاویه اصطکاک داخلی، σ_c مقاومت تراکم تک‌محوری (MPa) و P_0 فشار منفذی (MPa) است.

۲-۳-۱- تعیین حد پایین فشار سیال حفاری با استفاده معیار مور - کلمب

با در نظر گرفتن میدان تنش به صورت $\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$ و $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ که در آن $\sigma_z = \sigma_1$ و $\sigma_r = \sigma_3$ است. با جایگذاری روابط (۵)، (۶) و (۷) در رابطه (۱۲) حد پایین مجاز فشار سیال حفاری از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$P_{wb1} = \frac{(B - C)}{q} \quad (۱۵)$$

که در آن P_{wb1} فشار حد پایین سیال حفاری برحسب مگاپاسکال است. اگر فشار چاه کمتر از حد پایین مجاز فشار سیال حفاری باشد در نتیجه پدیده ریزش در دیواره چاه اتفاق خواهد افتاد. با توجه به این نکته برای جلوگیری از ریزش دیواره چاه باید شرط $P_w \geq P_{wb1}$ برقرار باشد. به این صورت فشار حد پایین سیال حفاری برای دو جایگشت تنش دیگر محاسبه می‌شود [۲۳].

$$\begin{cases} \sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z \\ \sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta \\ \sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta \end{cases} \quad (۴)$$

مقاومت کششی سنگ در زوایای صفر و ۱۸۰، به دلیل اینکه تنش مماسی به حداقل خود می‌رسد، مقدار کمینه را داشته و شکست هیدرولیکی در راستا تنش افقی حداکثر رخ می‌دهد. با در نظر گرفتن زاویه صفر یا ۱۸۰ در روابط (۲) و (۳) تنش‌های اصلی در حالت شکست در دیواره چاه، به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۲۲]:

$$\begin{cases} \sigma_r = P_w \\ \sigma_\theta = D - P_w \\ \sigma_z = E \end{cases} \quad (۵)$$

که در آن E و D ثابت‌هایی هستند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$D = (3\sigma_h - \sigma_H) \quad (۶)$$

$$E = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (۷)$$

در مقابل، هنگامی که فشار سیال حفاری کاهش پیدا می‌کند، تنش مماسی افزایش یافته و به مقاومت فشاری سنگ نزدیک می‌شود؛ بنابراین حد پایین فشار سیال حفاری که منجر به ریزش دیواره چاه می‌شود زمانی رخ می‌دهد که مقدار تنش مماسی از تنش شعاعی بزرگ‌تر باشد. در این مورد هم سه جایگشت برای تخمین حداقل فشار سیال حفاری به صورت زیر بیان می‌شود:

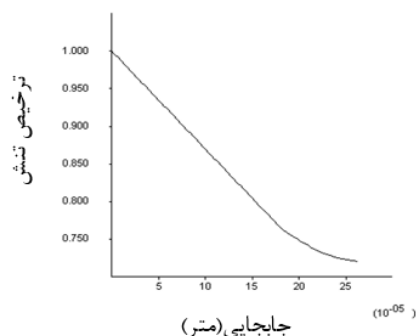
زمانی که تنش مماسی و تنش قائم به حداکثر مقدار خود برسند، حداکثر تنش فشاری در چاه به سنگ وارد می‌شود. در این حالت با در نظر گرفتن زاویه ۹۰ و ۹۰- در روابط (۲) و (۳) تنش‌های اصلی ریزش دیواره چاه طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\begin{cases} \sigma_r = P_w \\ \sigma_\theta = A - P_w \\ \sigma_z = B \end{cases} \quad (۸)$$

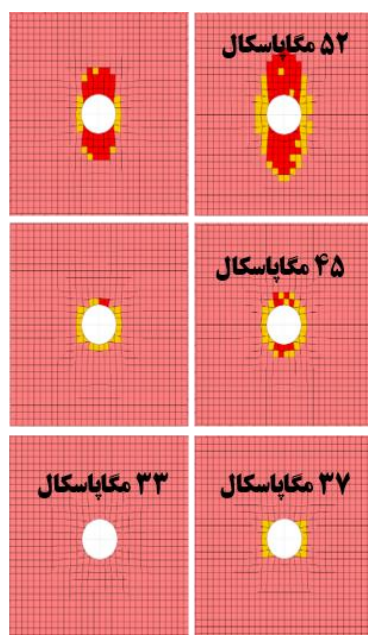
که در آن A و B ثابت‌هایی هستند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h \quad (۹)$$

$$B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (۱۰)$$



شکل ۷: منحنی اندرکنش چاه در میدان تنش هیدرواستاتیک برای محاسبه فشار حد بالای سیال حفاری، ابتدا فشار سیال حفاری بسیار زیاد در نظر گرفته شد تا زون پلاستیک در اطراف چاه ایجاد شود (میدان تنش هیدرواستاتیک بوده و زون پلاستیک به صورت یکسان در دیواره ایجاد می‌شود). پس از آن فشار سیال حفاری به تدریج کاهش داده شد و مقادیر جابجایی دیواره چاه و همچنین گسترش زون پلاستیک ثبت گردید. گسترش زون پلاستیک در فشار ۴۲ مگاپاسکال به صفر رسیده که مطلوب است. این فشار به عنوان حد بالای ایمن فشار سیال حفاری در نظر گرفته شد.



شکل ۸: اعمال فشارهای مختلف سیال حفاری جهت یافتن فشار بیشینه با توجه به کمینه شدن گسترش زون پلاستیک

جدول ۴: حد پایین و بالای فشار سیال حفاری با استفاده از معیار گسیختگی مور - کلمب

ردیف	میدان تنش	حد پایین [MPa]	حد بالا [MPa]
۱	هیدرواستاتیک	۲۸	۴۲
۲	آنیزوتروپ	۲۸٫۲	۳۲٫۷

جدول ۲: روابط فشار ریزش چاه در معیار مور - کلمب

ردیف	میدان تنش	ریزش در شرایط $P_w \leq P_{wbi}$
۱	$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{wb1} = \frac{(B - C)q}{q}$
۲	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{wb2} = \frac{(A - C)q}{q + 1}$
۳	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{wb3} = A - C - qB$

۲-۳-۲- تعیین حد بالا فشار سیال حفاری با استفاده معیار مور - کلمب

مانند حالت ریزش در دیواره چاه، برای ایجاد شکست کششی در دیواره چاه سه حالت وجود دارد که می‌توان حد بالای فشار سیال حفاری را محاسبه کرد. با در نظر گرفتن جایگشت‌های تنش حالت شکست کششی و روابط مور - مور کلمب، فشار حد بالای سیال حفاری در جدول ۳ خلاصه می‌شود [۲۳].

جدول ۳: روابط فشار شکست چاه در معیار مور - کلمب

ردیف	میدان تنش	ریزش در شرایط $P_w \geq P_{wfi}$
۱	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{wf1} = C + qE$
۲	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{wf2} = \frac{(C + qD)q}{q + 1}$
۳	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_{wf3} = \frac{(C - E)q}{q} + D$

۲-۴- محاسبه حد بالا و پایین فشار سیال حفاری در مدل عددی

با توجه به محاسبات تحلیلی و معیار مور - کلمب، حد بالا و پایین فشار سیال حفاری با استفاده مدل سازی عددی و منحنی اندرکنش زمین محاسبه می‌شود. در ابتدا مدل عددی ساخته شده و حفاری در مدل انجام می‌شود. پس حفاری محدوده پلاستیک در اطراف چاه ایجاد می‌شود. سپس اقدام به رسم منحنی اندرکنش زمین کرده و ترخیص تنش تا ۳۸ درصد تنش برجا انجام می‌شود. مدل بدون فشار سیال به پایداری نرسیده و ترخیص تنش کامل انجام نمی‌شود.

پس از ترخیص ۲۵ درصدی منحنی اندرکنش زمین به طور کامل از حالت الاستیک خطی به پلاستیک تغییر رفتار داده و شکست در سنگ اتفاق می‌افتد. با توجه به موارد گفته شده با اعمال فشاری برابر با ۷۵ درصد تنش‌های برجا، چاه به حالت پایدار رسیده و حد پایین فشار سیال حفاری محاسبه می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از منحنی اندرکنش زمین که مفهومی شناخته‌شده در طراحی تونل است برای بررسی و طراحی پنجره گل در چاه استفاده شد. نتایج مدل‌سازی برای پنجره گل در چاه نشان داد که در هر دو میدان تنش هیدرواستاتیک و آنیزوتروپ، حد پایین و بالای فشار سیال حفاری در روش عددی به ترتیب کمتر و بیشتر از حد پایین و بالای فشار سیال حفاری در روش تحلیلی مور-کلمب است. روش عددی مبتنی بر منحنی اندرکنش زمین، پنجره ایمن بزرگ‌تری را نسبت به روش تحلیلی ارائه می‌دهد. پارامترهایی مانند نسبت تنش افقی به قائم، شعاع چاه و فشار منفذی سازند با میزان همگرایی دیواره حفاره رابطه مستقیم داشته و با افزایش این پارامترها میزان همگرایی دیواره چاه افزایش می‌یابد. در منحنی اندرکنش زمین فشار سیال حفاری به‌عنوان یک سیستم نگهداری، به‌صورت خطی در نمودار نمایش داده می‌شود. نقطه برخورد منحنی اندرکنش زمین و فشار سیال حفاری به‌عنوان نقطه تعادل معرفی شده و دیواره چاه در این نقطه پایدار است.

مراجع

- [1] González-Cao J, Varas F, Bastante FG, Alejano LR. Ground reaction curves for circular excavations in non-homogeneous, axisymmetric strain-softening rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013 Dec 1;5(6):431-42.
- [2] Amberg F. For a correct interpretation of ground reaction curves. In 12th ISRM Congress 2011 Oct 16. OnePetro.
- [3] Fenner R. Untersuchungen zur erkenntnis des gebirgsdrucks. (No Title). 1938.
- [4] Pacher F. Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues. In *Principles in the Field of Geomechanics: 14th Symposium of the Austrian Regional Group (if) of the International Society for Rock Mechanics Salzburg, 27. und 28. September 1964* (pp. 149-161). Springer Berlin Heidelberg.
- [5] Carranza-Torres C, Fairhurst C. The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1999 Sep 1;36(6):777-809.
- [6] Panet M. Analysis of convergence behind the face of a tunnel.

جدول ۵: حد پایین و بالای فشار سیال حفاری با استفاده مدل

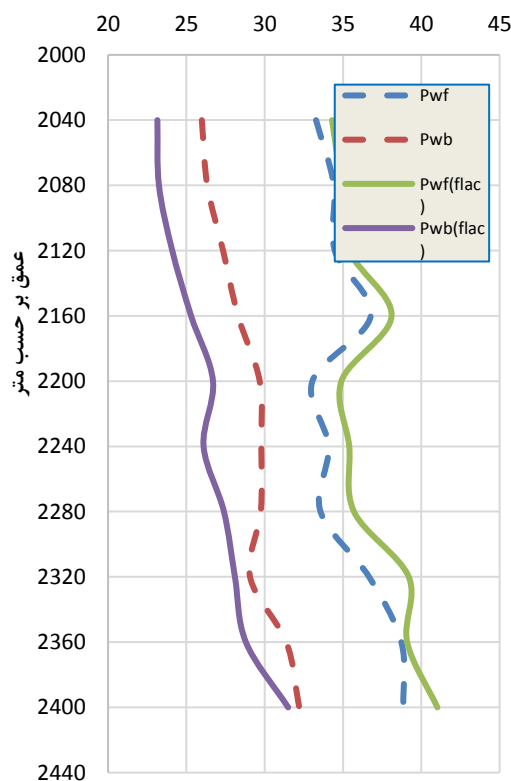
عددی منحنی اندرکنش زمین

ردیف	میدان تنش	حد پایین [MPa]	حد بالا [MPa]
۱	هیدرواستاتیک	۲۶٫۲۵	۴۲
۲	آنیزوتروپ	۲۷٫۲	۳۳

۳- نتایج و بحث

تعیین پنجره ایمن گل و پایداری چاه از مسائل مهم در زمان حفاری است. مطالعات فراوانی با استفاده از ایده‌های گوناگون به بررسی این موضوع پرداخته‌اند [۲۴-۲۷]. در روش عددی برای محاسبه حد پایین فشار سیال از منحنی اندرکنش زمین و برای حد بالا فشار سیال از به حداقل رساندن منطقه پلاستیک با تغییر فشار داخلی چاه استفاده شد. با توجه به محاسبات انجام‌شده و شکل ۷ روش عددی با استفاده از منحنی اندرکنش زمین پنجره گل بزرگ‌تری را نسبت به روش تحلیلی محاسبه می‌کند. پنجره ایمن گل بزرگ‌تر باعث کاهش هزینه و ریسک حفاری خواهد شد.

فشار گل حفاری بر حسب مگاپاسکال



شکل ۹: تغییرات پنجره گل حفاری در روش تحلیلی و عددی

- determining safe mud weight windows in drilling operations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014 Feb 1;6(1):13-25.
- [19] Maleki S, Gholami R, Rasouli V, Moradzadeh A, Riabi RG, Sadaghzadeh F. Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weight window in drilling practice. *Earth-Science Reviews*. 2014 Sep 1;136:36-58.
- [20] Najibi AR, Ghafoori M, Lashkaripour GR, Asef MR. Reservoir geomechanical modeling: In-situ stress, pore pressure, and mud design. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017 Mar 1;151:31-9.
- [21] Andrieux P, Detournay C, Hart R. *FLAC and numerical modeling in geomechanics*. Brummer RK, editor. Balkema; 2003.
- [22] Fjær E, Holt RM, Horsrud P, Raaen AM. *Petroleum related rock mechanics*. Elsevier; 2021 Dec 8.
- [23] Gholami R, Moradzadeh A, Rasouli V, Hanachi J. Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014 Feb 1;6(1):13-25.
- [24] Abdollahipour, A., & Fatehi-Marji, M. Numerical modeling of borehole breakouts formation in various stress fields using a Higher-Order Displacement Discontinuity Method (HODDM). *Journal of Petroleum Geomechanics*, 2022, 4(3), 1–18.
- [25] Abdollahipour, A., Kargar, A., & Fatehi-Marji, M. Numerical modeling of effect of Anderson's stress regimes on volume of sand production in oil wellbores. *Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 2023, 13(25), 31–38.
- [26] Amirkhani, M., & Abdollahipour, A. Sensitivity Analysis and determination of the most important affecting parameters in stability of oil wellbores based on numerical modeling in Phase2. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 2024, 14(38).
- [27] Heydari, M., Aghakhani Emamqeyasi, M. R., & Sanei, M. 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*, 2022, 11(29).
- [7] Duncan Fama ME. Numerical modeling of yield zones in weak rock.
- [8] Guan Z, Jiang Y, Tanabasi Y. Ground reaction analyses in conventional tunnelling excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007 Mar 1;22(2):230-7.
- [9] Alejano LR, Rodriguez-Dono A, Alonso E, Manín GF. Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behaviour. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2009 Nov 1;24(6):689-705.
- [10] Lee YK, Pietruszczak S. A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2008 Sep 1;23(5):588-99.
- [11] Wang S, Yin X, Tang H, Ge X. A new approach for analyzing circular tunnel in strain-softening rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2010 Jan 1;47(1):170-8.
- [12] Zhang C, Feng XT, Zhou H, Qiu S, Wu W. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels. *Rock mechanics and rock engineering*. 2012 May; 45:275-88.
- [13] Boness NL, Zoback MD. Mapping stress and structurally controlled crustal shear velocity anisotropy in California. *Geology*. 2006 Oct 1;34(10):825-8.
- [14] Aadnøy BS, Belayneh M. Elasto-plastic fracturing model for wellbore stability using non-penetrating fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2004 Dec 15;45(3-4):179-92.
- [15] Al-Ajmi AM, Zimmerman RW. Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006 Dec 1;43(8):1200-11.
- [16] Al-Ajmi AM, Zimmerman RW. A new well path optimization model for increased mechanical borehole stability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009 Nov 1;69(1-2):53-62.
- [17] Zhang L, Cao P, Radha KC. Evaluation of rock strength criteria for wellbore stability analysis. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 2010 Dec 1;47(8):1304-16.
- [18] Gholami R, Moradzadeh A, Rasouli V, Hanachi J. Practical application of failure criteria in

³ Longitudinal Deformation Profile⁴ Support Characteristic Curve¹ Convergence-Confinement Method² Ground Reaction Curve