

ایجاد مدل رفتاری الاستیک-کاملاً پلاستیک عددی بر اساس معیار تسلیم موگی-کولمب

سیدرضا حسنی زاوه^۱، مرتضی احمدی^{۲*}، سیدعلی قریشیان امیری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد، گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دکتری، پژوهشگر و مدرس، دانشگاه علوم و فناوری نروژ

(دریافت: آذر ۱۳۹۴، پذیرش: آذر ۱۳۹۶)

چکیده

مشکلات ریزش در چاه‌های نفت هزینه‌های زیادی را در تولید نفت تحمیل می‌نماید که یکی از علل این مشکلات می‌تواند تخمین نادرست وزن گل حفاری باشد. انتخاب معیار تسلیم مناسب در تخمین وزن گل نقش اساسی دارد. در بررسی‌های تحلیلی انجام شده در زمینه پایداری چاه نفت، کارایی معیار تسلیم موگی-کولمب نسبت به دیگر معیارها تأیید شده است که دلیل آن در نظر گرفتن تأثیر مناسب تنش اصلی میانی است. تاکنون به بررسی عددی این معیار پرداخته نشده است. در این پژوهش مدل رفتاری الاستیک-کاملاً پلاستیک بر اساس معیار موگی-کولمب ایجاد و در نرم‌افزار FLAC2D اضافه شده است. برای صحت سنجی این مدل از داده‌های آزمایش سه محوره بر روی سنگ بازالت استفاده شد که نتایج نشان دهنده دقت قابل قبول مدل است. سپس مقایسه‌ای بین سه معیار تسلیم موهر-کولمب، موگی-کولمب و دراگر-پراگر براساس مطالعه موردی از داده‌های مکانیک سنگی میدان نفتی در کانادا استفاده شده است. دلیل انتخاب این سه معیار، تأثیر متفاوت تنش اصلی میانی در این معیارها است. با توجه به نتایج به دست آمده محدوده‌ی پلاستیک تعیین شده توسط مدل موگی-کولمب در محدوده‌ی فی‌مابین دو مدل دیگر است.

کلید واژه‌ها

پایداری چاه، وزن گل حفاری، مدل رفتاری، الاستو-کاملاً پلاستیک، معیار موگی-کولمب، روش عددی

* عهده دار مکاتبات: moahmadi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

دقیقاً به معیار کولمب تبدیل می‌شود. معیار خطی موگی می‌تواند تکمیلی از معیار کولمب به سه بعد باشد. از این گذشته آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مقدار عددی پارامترهایی که در معیار موگی-کولمب استفاده می‌شود را می‌توان از نتایج آزمایش‌های سه محوره مرسوم تخمین زد. بنابراین این معیار تسلیم چند محوره می‌تواند در نبود داده‌های چند محوره (سه محوره حقیقی) کاربرد داشته باشد. این یک مزیت بزرگ است، زیرا به خاطر راحتی و امکانات کم معمولاً آزمایش‌هایی با تنش‌های جانبی برابر ($\sigma_2 = \sigma_3$) انجام می‌شود. در نهایت نتیجه گرفته شده است که اگر نوع خطی معیار موگی استفاده شود، پارامترهای آن به راحتی می‌تواند با پارامترهای معیار تسلیم کولمب مرتبط شود [۶].

معیار موگی-کولمب یک پوش خطی تسلیم در دایره موگی را شامل می‌شود ($\tau_{oct} - \sigma_{m,2}$) که می‌تواند مستقیماً به پارامترهای معیار کولمب، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مربوط شود. این معیار تسلیم خطی، به وسیله شواهد تجربی به دست آمده از آزمایش‌های سه محوره و همچنین چند محوره^۳ توجیه شده است. این یک تعمیم معمولی از معیار کولمب کلاسیک در سه بعد است [۲].

ال اجمی و زیمرمن در ادامه تحقیقات خود در سال ۲۰۰۶، تحلیل پایداری بر روی چاه قائم با استفاده از معیار موگی-کولمب را انجام داده‌اند. آن‌ها مدلی برای پایداری چاه قائم با استفاده از تئوری الاستیسیته برای محاسبه تنش و معیار کاملاً چند محوره‌ی موگی-کولمب برای پیش‌بینی تنش استفاده کرده‌اند. این مدل منجر به ارائه روش جدیدی برای محاسبه وزن گل حفاری جهت جلوگیری از ناپایداری چاه شد. همچنین نتیجه گرفته شد که معیار دراگر-پراگر به‌طور کلی مقاومت سنگ را در شرایط چند محوره، بالا تخمین می‌زند و دلیل آن در نظر گرفتن تأثیر برابر برای تنش اصلی میانی و حداقل است. این معیار همچنین نباید برای مدل شکست شکننده سنگ استفاده شود. از طرفی دیگر معیار موهر-کولمب مقاومت سنگ را به دلیل در نظر نگرفتن تنش اصلی میانی، پایین تخمین می‌زند. در مقابل به نظر می‌رسد معیار موگی-کولمب مقدار مناسبی از تأثیر تنش میانی را در مقاومت لحاظ می‌کند. این معیار نسبت به معیارهای دراگر-پراگر و موهر-کولمب، احتیاطی منطقی، در تخمین فشار گل حفاری دارد [۷]. بعد از ارائه معیار موگی-کولمب تحقیقات زیادی در زمین تحلیل پایداری چاه به

در سازه‌های زیرزمینی تنش به صورت سه‌بعدی است که مقادیر سه تنش اصلی می‌تواند با یکدیگر متفاوت باشد [۱]؛ بنابراین لازم است که معیارهای تسلیم به حالت واقعی نزدیک‌تر شوند. در این حالت باید نقش تنش اصلی میانی را مدنظر قرار داد. با توسعه تجهیزات آزمایش سه محوره، می‌توان این تأثیر را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داد. نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی اثر مقدار تنش اصلی میانی را مشخص نموده است که البته تأثیر این تنش نسبت به مقادیر تنش اصلی حداکثر و حداقل کمتر است [۱]. شایان ذکر است در اعماق تأثیر تنش میانی افزایش می‌یابد و هدف این تحقیق بررسی معیار مناسب در عمق است.

در تحلیل پایداری چاه انتخاب معیار تسلیم مناسب از اهمیت خاصی برخوردار است. رایج‌ترین معیار مورد استفاده برای سنگ‌های شکننده، معیار موهر-کولمب است. این معیار فقط تنش اصلی حداکثر (σ_1) و تنش اصلی حداقل (σ_3) را در نظر می‌گیرد و تأثیر تنش میانی (σ_2) در مقاومت سنگ را در نظر نمی‌گیرد. باید در نظر داشت که معیار تسلیم موهر-کولمب بر اساس شواهد تجربی به دست آمده از آزمایش‌های سه محوره رایج ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) حاصل شده است. این در حالی است که استفاده از معیار موهر-کولمب در تسلیم سنگ تحت حالت تنش سه محوره حقیقی^۱ ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) می‌تواند خطاهایی را به همراه داشته باشد [۲]. البته در اعماق نزدیک سطح زمین این معیار می‌تواند قابل استفاده باشد.

تحقیقات زیادی انجام شده است که اشاره به اثر σ_2 در مقاومت دارد [۳-۵]. در این تحقیق نشان داده می‌شود که معیار موهر-کولمب فقط یکی از حالات تنش سه محوره را بیان می‌کند ($\sigma_2 = \sigma_3$ or $\sigma_2 = \sigma_1$) که این یک وضعیت خاص است که سنگ با آن روبه‌رو می‌شود. معیار جدید سه محوره حقیقی به نام موگی-کولمب برای انطباق بهتر با واقعیت توسعه یافت [۶].

در سال ۲۰۰۵ ال اجمی و زیمرمن^۲ تحقیقی با موضوع رابطه‌ی بین معیار موگی و معیار کولمب انجام دادند. در این تحقیق آن‌ها نشان داده‌اند که معیار خطی موگی، تسلیم سنگ را به‌خوبی در شرایط چند محوره نشان می‌دهد. وقتی که تنش اصلی حداقل برابر تنش اصلی حداقل ($\sigma_2 = \sigma_3$) باشد، شکل خطی معیار سه محوره معیار موگی

در نرم‌افزار FLAC، حل صریح^۶ است که در این پژوهش از این الگو پیروی شده است.

۲-۱- قانون نمو الاستیک

در پیاده‌سازی این مدل با روشی که مد نظر FLAC است، از تنش‌های اصلی $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ استفاده می‌شود که تنش نرمال^۷ σ_{zz} ، یکی از این تنش‌ها خواهد بود. تنش‌های اصلی و جهات اصلی با استفاده از تانسور مؤلفه‌های تنش به دست می‌آیند (تنش فشارشی منفی در نظر گرفته شده است).

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (1)$$

به طور متناظر نمو کرنش‌های اصلی $\Delta e_1, \Delta e_2, \Delta e_3$ به صورت رابطه (۲) تجزیه می‌شوند:

$$\Delta \varepsilon_i = \Delta \varepsilon_i^e + \Delta \varepsilon_i^p \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

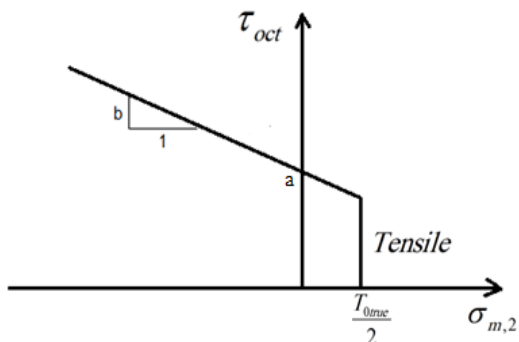
بالانویس e و p به ترتیب به بخش‌های الاستیک و پلاستیک اشاره می‌کند و بخش پلاستیک فقط در طی جریان پلاستیک غیر صفر است. بیان نموی قانون هوک بر اساس عبارت‌های تنش و کرنش اصلی عبارت است از [۱۳]:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_1 &= \alpha_1 \Delta \sigma_1^e + \alpha_2 (\Delta \sigma_2^e + \Delta \sigma_3^e) \\ \Delta \sigma_2 &= \alpha_1 \Delta \sigma_2^e + \alpha_2 (\Delta \sigma_1^e + \Delta \sigma_3^e) \\ \Delta \sigma_3 &= \alpha_1 \Delta \sigma_3^e + \alpha_2 (\Delta \sigma_1^e + \Delta \sigma_2^e) \end{aligned} \quad (3)$$

که $\alpha_1 = K + 4G/3$ و $\alpha_2 = K - 2G/3$ است. K مدول حجمی و G مدول برشی است

۲-۲- مدل موگی-کولمب

پوش تسلیم برای این مدل معیار موگی-کولمب به همراه پارگی کششی^۸ است (شکل ۲)؛ بنابراین دو معیار تسلیم خواهیم داشت یکی برشی و دیگری کششی که این باعث ایجاد دو قانون جریان متفاوت خواهد شد که قانون جریان برشی و قانون جریان کششی نامیده می‌شوند.



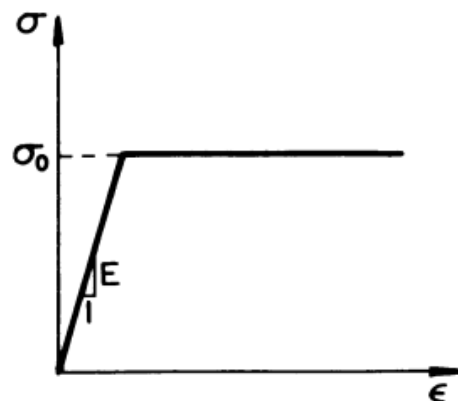
شکل ۲: معیار تسلیم موگی-کولمب با پارگی کششی، ایجاد شده برای FLAC

صورت تحلیلی با این معیار انجام گرفته است که نتیجه کلی این تحقیقات به تخمین واقعی‌تر فشار گل با استفاده از این معیار اشاره می‌کنند [۸-۱۱].

با توجه به مباحث بالا نیاز به استفاده از معیار موگی-کولمب در روش عددی کاملاً ضروری تشخیص داده شد. در این پژوهش ابتدا یک مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک بر اساس معیار موگی-کولمب ساخته شده است و سپس مقایسه‌ای بین معیارهای مرسوم انجام شده است.

۲- مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک بر اساس معیار موگی-کولمب

شرکت آیتسکا، امکان اضافه کردن مدل رفتاری^۴ جدید را در نرم‌افزار FLAC در اختیار کاربران قرار داده است بنابراین مدل موگی-کولمب برای اضافه شدن به این نرم‌افزار آماده خواهد شد. در تحلیل‌های عددی که قبلاً انجام گرفته است، اکثراً از مدل‌های رفتاری موهر-کولمب و دراگر-پراگر استفاده شده است. با مطالعه‌ی این مدل‌ها در راهنمای FLAC مشخص می‌شود که از الگوی رفتاری الاستیک کاملاً پلاستیک (شکل ۱) استفاده نموده‌اند، بنابراین جهت مقایسه صحیح بین مدل رفتاری ایجاد شده و دو مدل دیگر، برای ایجاد مدل رفتاری بر اساس معیار موگی-کولمب از الگوی رفتاری الاستیک-کاملاً پلاستیک استفاده شد. شایان ذکر است این مدل رفتاری به صورت دو بعدی کرنش صفحه‌ای^۵ توسعه داده خواهد شد.



شکل ۱: نمودار ایده‌آل تنش-کرنش برای رفتار الاستیک-کاملاً پلاستیک [۱۲]

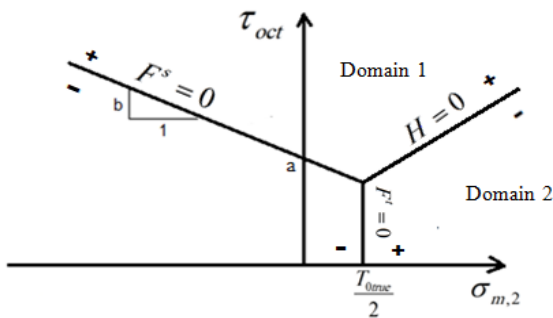
نرم‌افزار FLAC برای ایجاد مدل رفتاری جدید چهارچوبی خاصی را تعریف کرده است و همچنین روش حل

T_0 معمولاً بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است، بنابراین باید در یک ضریبی ضرب شود تا به مقادیر واقعی نزدیک شود که در این تحقیق این ضریب 0.85 در نظر گرفته شده است. بنابراین:

$$T_{0true} = 0.85T_0 \quad (14)$$

باید از دو قانون جریان استفاده شود، یکی قانون جریان برشی و دیگری قانون جریان کششی که توسط تابع $H = (\tau_{oct}, \sigma_{m,2})$ مرز بین کشش و فشارش جدا می‌شود که در شکل ۳ نمایش داده شده است.

$$H = \tau_{oct} + (b - \sqrt{2})\sigma_{m,2} - a + \frac{\sqrt{2}}{2}T_{0true} \quad (15)$$



شکل ۳: مدل موگی-کولمب و قلمروهای استفاده شده در قانون جریان

اگر تخمین الاستیک در صفحه $(\tau_{oct}, \sigma_{m,2})$ از مرز معیارها تجاوز کند، آنگاه در قلمرو ۱ یا ۲ است و با توجه به اینکه در بخش مثبت و یا منفی $H = 0$ باشد، شرایط زیر به وجود خواهد آمد:

- اگر در تخمین الاستیک در قلمرو ۱ قرار گیرد، تسلیم برشی رخ داده است و برای قانون جریان باید از تابع $F^s = 0$ استفاده نمود.
- اگر در تخمین الاستیک در قلمرو ۲ قرار گیرد، تسلیم کششی رخ داده است و برای قانون جریان باید از تابع $F^t = 0$ استفاده نمود.

۲-۴- تصحیح پلاستیک

ابتدا تسلیم برشی در نظر گرفته شده است. قانون جریان از رابطه (۱۶) تبعیت می‌کند:

$$\Delta e_i^p = \lambda^s \cdot \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_i} \quad i = 1, 2, 3 \quad (16)$$

λ^s پارامتری است که باید مشخص شود. با جایگذاری رابطه (۹) به جای Q^s ، رابطه (۱۷) به دست خواهد آمد:

در قانون جریان برشی از تابع پتانسیل غیر از تابع تسلیم استفاده شده است. بنابراین در این حالت قانون جریان غیرهمراه است؛ اما برای قانون جریان برشی از تابع تسلیم به عنوان تابع پتانسیل استفاده شده است که قانون جریان همراه نامیده می‌شود.

۲-۳- تابع تسلیم و پتانسیل

معیار تسلیم در صفحه $(\tau_{oct}, \sigma_{m,2})$ نمایش داده می‌شود:

معیار موگی-کولمب که برای تسلیم برشی استفاده می‌شود با دو مولفه‌ی تعمیم یافته‌ی تنش برشی اوکتاهدرال τ_{oct} و تنش میانگین $\sigma_{m,2}$ بیان می‌شود که به صورت رابطه (۴) است:

$$F^t = \tau_{oct} - a + b\sigma_{m,2} \quad (4)$$

که در آن:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (6)$$

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} C \cos \phi \quad (7)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \phi \quad (8)$$

در طی انجام صحت سنجی مدل رفتاری این نکته مشخص شد که برای تابع پتانسیل باید از زاویه اتساع (ψ) به جای زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) استفاده نمود که منجر به قانون جریان غیرهمراه می‌شود، لذا تابع Q عبارت است از:

$$Q^s = \tau_{oct} - a + b\sigma_{m,2} \quad (9)$$

که در آن:

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} C \cos \psi \quad (10)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \psi \quad (11)$$

معیاری که برای تسلیم کششی استفاده می‌شود عبارت است از:

$$F^t = \sigma_{m,2} - \frac{T_{0true}}{2} \quad (12)$$

که در آن:

$$T_0 = \frac{a}{\frac{\sqrt{2}}{3} + \frac{b}{2}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_1} = \cos(\psi) - \frac{(\sigma_2 - 2\sigma_1 + \sigma_3)}{2((\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 - 3\sigma_1\sigma_2 - 3\sigma_1\sigma_3 - 3\sigma_2\sigma_3)^{(0.5)}}$$

$$\frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_2} = \frac{-(\sigma_1 - 2\sigma_2 + \sigma_3)}{2((\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 - 3\sigma_1\sigma_2 - 3\sigma_1\sigma_3 - 3\sigma_2\sigma_3)^{(0.5)}} \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_3} = \cos(\psi) - \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 - 2\sigma_3)}{2((\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 - 3\sigma_1\sigma_2 - 3\sigma_1\sigma_3 - 3\sigma_2\sigma_3)^{(0.5)}}$$

نمو کرنش الاستیک با توجه به رابطه (۲) می‌تواند به صورت نمو کرنش کل منهای نمو کرنش پلاستیک بیان شود. با جایگذاری رابطه (۱۷) در قانون الاستیک (رابطه ۵)، رابطه (۱۸) به دست خواهد آمد:

$$\Delta \sigma_1 = \alpha_1 \Delta e_1 + \alpha_2 (\Delta e_2 + \Delta e_3) - \lambda^s \left(\alpha_1 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_1} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_2} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_3} \right)$$

$$\Delta \sigma_1 = \alpha_1 \Delta e_2 + \alpha_2 (\Delta e_1 + \Delta e_3) - \lambda^s \left(\alpha_1 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_2} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_1} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_3} \right) \quad (18)$$

$$\Delta \sigma_1 = \alpha_1 \Delta e_3 + \alpha_2 (\Delta e_1 + \Delta e_2) - \lambda^s \left(\alpha_1 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_3} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_1} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_2} \right)$$

حالت تنش قدیم و جدید به ترتیب با بالانویس N و O نشان داده شده است که به صورت زیر است:

$$\sigma_3^N \text{ به جای } \sigma_1 \text{ و } \sigma_2 \text{ و } \sigma_3 \text{ در } F^s = 0 \text{، بعد از اعمال یک سری عملیات ریاضی رابطه (۲۲) به دست خواهد آمد:}$$

$$a\lambda^{s^2} + b\lambda^s + c = 0 \quad (22)$$

از جانشینی رابطه (۱۸) برای $\Delta \sigma_i, i=1,2,3$ در رابطه (۱۹)، رابطه (۲۰) حاصل خواهد آمد:

$$\sigma_i^N = \sigma_i^O + \Delta \sigma_i \quad i=1,2,3 \quad (19)$$

$$\sigma_1^N = \sigma_1^I + \lambda^s \left(\alpha_1 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_1} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_2} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_3} \right)$$

$$\sigma_2^N = \sigma_2^I + \lambda^s \left(\alpha_1 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_2} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_1} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_3} \right) \quad (20)$$

$$\sigma_3^N = \sigma_3^I + \lambda^s \left(\alpha_1 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_3} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_1} + \alpha_2 \frac{\partial Q^s}{\partial \sigma_2} \right)$$

با حل رابطه (۲۲) دو جواب به دست خواهد آمد که جواب کوچک‌تر انتخاب خواهد شد. برای سادگی رابطه (۲۲)، معیار تسلیم موگی-کولمب با استفاده از نامتغیرهای تنش استفاده شده است که به صورت رابطه (۲۳) است:

$$F^s = \sqrt{I_1^2 - 3I_2} - g + h(I_1 - \sigma_2) \quad (23)$$

که در آن:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (24)$$

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3 \quad (25)$$

$$g = 2C \cos \phi \quad (26)$$

$$h = \sin \phi \quad (27)$$

زمانی که حالت تنش در موقعیتی باشد که لازم است از معیار کششی استفاده شود، به صورت رابطه (۲۸) عمل می‌شود:

$$\Delta e_i^p = \lambda^t \frac{\partial Q^t}{\partial \sigma_i} \quad i=1,2,3 \quad (28)$$

همچنین پارامتری است که باید مقدارش مشخص شود. با جایگذاری رابطه (۲۸) به جای Q^t رابطه (۲۹) حاصل خواهد شد:

که بالانویس I برای نشان دادن تخمین الاستیک استفاده شده است که با اضافه کردن نمو تنش‌های محاسبه شده با استفاده از نمو کرنش کل به تنش قدیم، تنش جدید حاصل خواهد شد، لذا:

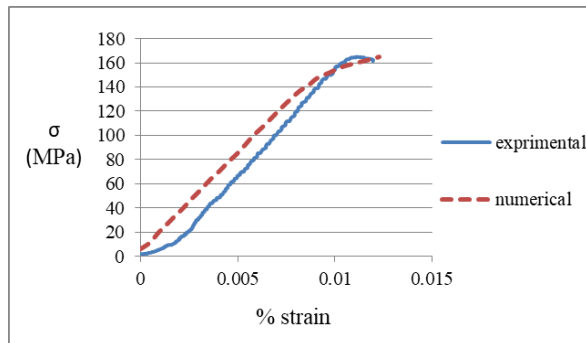
$$\sigma_1^N = \sigma_1^I + \alpha_1 \Delta e_1 + \alpha_2 (\Delta e_2 + \Delta e_3)$$

$$\sigma_2^N = \sigma_2^I + \alpha_1 \Delta e_2 + \alpha_2 (\Delta e_1 + \Delta e_3) \quad (21)$$

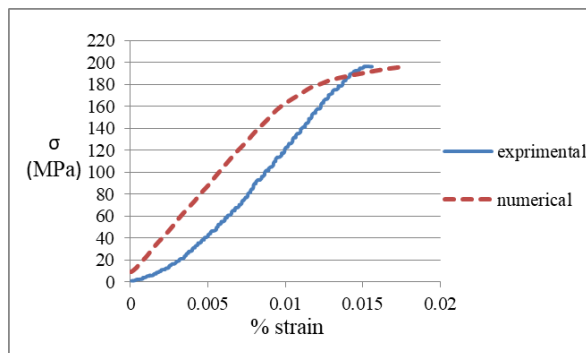
$$\sigma_3^N = \sigma_3^I + \alpha_1 \Delta e_3 + \alpha_2 (\Delta e_1 + \Delta e_2)$$

اکنون پارامتر λ^s می‌تواند تعریف شود، اگر تنش جدید در سطح تسلیم برشی قرار گیرد. با جانشینی σ_1^N و σ_2^N و

داشته باشد و همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود صحت مدل رفتاری موگی-کولمب قابل تأیید است.



شکل ۴: نمودار تنش محوری - کرنش محوری حاصل از آزمایشگاه و مدل عددی نمونه B1



شکل ۵: نمودار تنش محوری-کرنش محوری حاصل از آزمایشگاه و مدل عددی نمونه B2

۴- مقایسه مدل‌های رفتاری

در این بخش به تحلیل پایداری چاه قائم با استفاده از سه معیار دراگر-پراگر، موهر-کولمب و موگی-کولمب پرداخته شده است. انتخاب معیار موهر-کولمب و دراگر-پراگر به این دلیل بوده است که به نوعی تأثیر تنش اصلی میانی آشکار شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد معیار تسلیم موهر-کولمب از تأثیر تنش اصلی میانی صرف‌نظر می‌کند و معیار دراگر-پراگر تأثیر بیش از حدی برای تنش اصلی میانی در نظر می‌گیرد. با توجه به مطالعات انجام شده معیار موگی-کولمب تأثیری نزدیک به واقعیت از تنش اصلی میانی در نظر می‌گیرد. برای تحلیل پایداری در این بخش از داده‌های مکانیک سنگی میدان نفتی در کانادا استفاده شده است که در جدول‌های ۲ و ۳ خصوصیات مکانیک سنگی و وضعیت تنش‌های برجا ارائه شده است [۱۴]. K_ϕ و q_ϕ پارامترهای مربوط به معیار دراگر-پراگر است [۱۵].

$$\frac{\partial Q^t}{\partial \sigma_1} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{\partial Q^t}{\partial \sigma_2} = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial Q^t}{\partial \sigma_3} = \frac{1}{2}$$

با تکرار استدلالی که در بالا استفاده شده است، رابطه (۳۰) به دست خواهد آمد:

$$\sigma_1^N = \sigma_1^t + \lambda^t \left((\alpha_1 \cdot \frac{1}{2}) + (\alpha_2 \cdot \frac{1}{2}) \right)$$

$$\sigma_2^N = \sigma_2^t + \lambda^t \left((\alpha_2 \cdot \frac{1}{2}) + (\alpha_2 \cdot \frac{1}{2}) \right) \quad (30)$$

$$\sigma_3^N = \sigma_3^t + \lambda^t \left((\alpha_1 \cdot \frac{1}{2}) + (\alpha_2 \cdot \frac{1}{2}) \right)$$

و همچنین برای λ^t ، رابطه (۳۱) به دست خواهد آمد:

$$\lambda^t = \frac{F^t(\sigma_1^t, \sigma_1^t)}{\frac{1}{2}(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (31)$$

۳- صحت سنجی مدل موگی-کولمب

در این بخش جهت صحت سنجی مدل ایجاد شده آزمایش سه محوره بر روی نمونه بازالت انجام شد. از یک نمونه سنگ حداقل دو آزمایش نیاز است که در اینجا نمونه B1 تحت تنش محصور کننده ۵ مگا پاسکال و نمونه B2 تحت تنش محصور کننده ۷/۵ مگا پاسکال قرار داده شد. جدول ۱ پارامترهای کالیبره شده (تعیین شده) را نشان می‌دهد. شکل ۴ کالیبره شدن مدل عددی با نتایج حاصل از آزمایش سه محوره را نشان می‌دهد.

جدول ۱: پارامترهای به دست آمده از کالیبراسیون جهت مدل عددی

پارامتر	مقدار
زاویه اتساع (درجه)	۱۰
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۵۰
چسبندگی (MPa)	۱۱/۵
مدول حجمی (GPa)	۱۱/۸۲
مدول برشی (GPa)	۵/۶۹

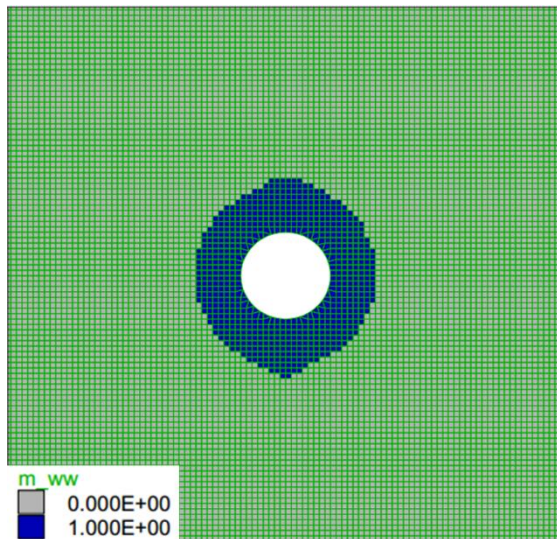
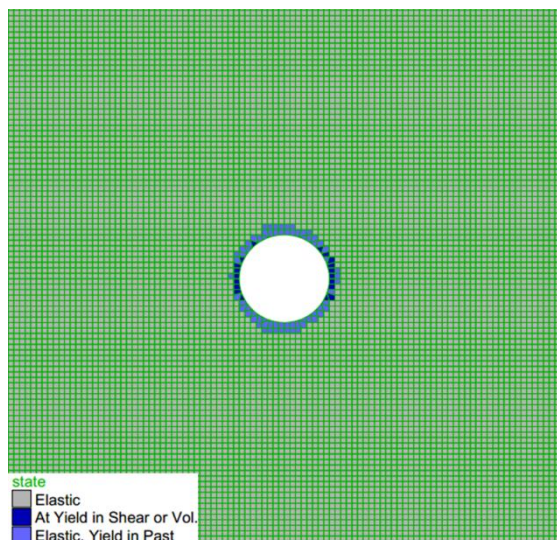
اکنون جهت اطمینان از صحت مدل رفتاری ایجاد شده با استفاده از داده‌های مرحله قبل نمونه B2 که تحت تنش محصور کننده ۷/۵ مگا پاسکال مدل شد. سپس در گام بعدی باید مدل عددی با داده‌های آزمایش سه‌محوره مطابقت

جدول ۲: خصوصیات ژئومکانیکی میدان مطالعه موردی [۱۴]

پارامتر	مقدار
نسبت پواسون	۰/۱۸۹
مدول الاستیک (GPa)	۲۰/۶
مدول برشی (GPa)	۸/۷
مدول حجمی (GPa)	۱۱
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۰
چسبندگی (MPa)	۱/۳
$K\phi$ (MPa)	۲/۴۷
$q\phi$	۰/۶۹
مقاومت کششی (MPa)	۱/۵
فشار منقذی (MPa)	۳۱/۷

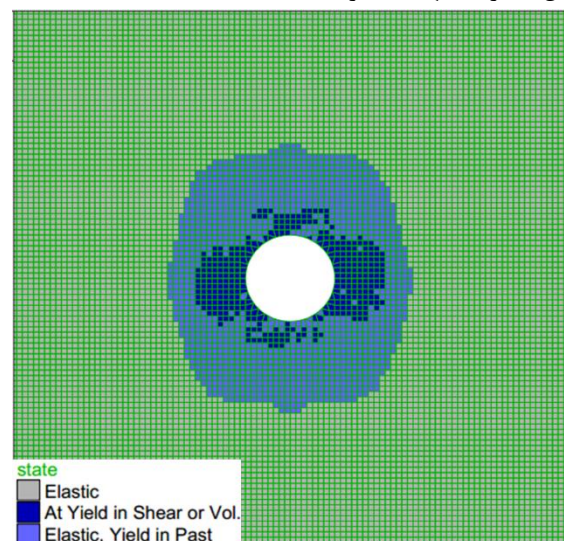
جدول ۳: وضعیت تنش‌های برجا [۱۴]

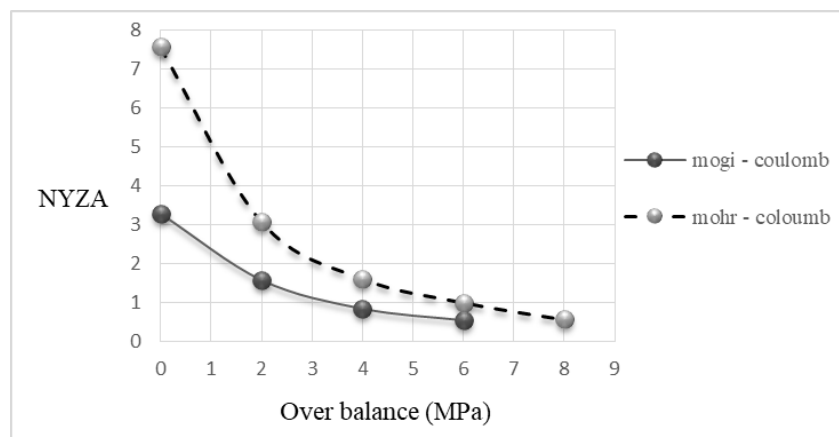
پارامتر	مقدار
σ_V (MPa)	۶۹
σ_H (MPa)	۵۵/۲
σ_h (MPa)	۴۸/۳

شکل ۷: زون پلاستیک ($m_ww = 1$) اطراف چاه با معیار تسلیم موگی-کولمب ($Overbalance = 0$)شکل ۸: زون پلاستیک اطراف چاه با معیار تسلیم دراگر-پراگر ($Overbalance = 0$)

اکنون با اعمال فشار گل متفاوت به بررسی پارامتر NYZA پرداخته شده است. پارامتر NYZA برابر حاصل نسبت مساحت زون پلاستیک به مساحت چاه است که در نهایت فشار گل حداقل در هر مدل در شکل ۹ ارائه شده است. به دلیل اینکه در $Overbalance = 0$ مدل دراگر-پراگر چاه را پایدار نشان می‌دهد در شکل ۹ به مقایسه دو مدل موگی-کولمب و موهر-کولمب بسنده شده است.

با توجه به مدل ساخته شده در حالت اعمال فشار داخلی برابر با فشار منقذی، مشاهده می‌شود که مساحت زون پلاستیک در مدل موگی-کولمب (شکل ۶) کمتر از مدل موهر-کولمب (شکل ۷) و بیشتر از مدل دراگر-پراگر (شکل ۸) است که این دقیقاً نتیجه‌ای است که در بررسی‌های تحلیلی، پژوهشگران به آن رسیده‌اند و در اینجا مدل عددی ساخته شده این نتیجه را تأیید می‌نماید و همچنین صحت کارایی این مدل تأیید می‌شود. منظور از فشار تعادلی^۹ فشار گل حفاری منهای فشار منقذی است.

شکل ۹: زون پلاستیک اطراف چاه با معیار تسلیم موهر-کولمب ($Overbalance = 0$)



شکل ۹: مقایسه تغییرات NYZA نسبت به فشار گل با دو معیار تسلیم موگی-کولمب و موهر-کولمب

[4] Addis, M. A., & Wu, B. (1993, December). The role of the intermediate principal stress in wellbore stability studies: evidence from hollow cylinder tests. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 30, No. 7, pp. 1027-1030). Pergamon.

[5] Xu, S. Q., & Yu, M. H. (2006). The effect of the intermediate principal stress on the ground response of circular openings in rock mass. *Rock mechanics and rock engineering*, 39(2), 169-181.

[6] Al-Ajmi, A. M., & Zimmerman, R. W. (2005). Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(3), 431-439.

[7] Al-Ajmi, A. M., & Zimmerman, R. W. (2006). Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(8), 1200-1211.

[8] Manshad, A. K., Jalalifar, H., & Aslannejad, M. (2014). Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 4(4), 359-369.

[9] S. Maleki, R. Gholami, V. Rasouli, A. Moradzadeh, R. G. Riabi, and F. Sadaghzadeh, "Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weigh window in drilling practice," *Earth-Science Rev.*, vol. 136, pp. 36-58, Sep. 2014.

[10] R. Gholami, a. Moradzadeh, V. Rasouli, and J. Hanachi, "Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 13-25, Feb. 2014.

[11] Elyasi, A., & Goshtasbi, K. (2015). Using different rock failure criteria in wellbore stability

۵- نتیجه‌گیری

تأثیر تنش اصلی میانی بر روی رفتار مکانیکی سنگ با انجام مطالعات فراوان آشکار شده است. در این پژوهش معیار موگی-کولمب که تنش اصلی میانی را در نظر می‌گیرد، به نرم‌افزار FLAC اضافه گردید. با استفاده از این معیار و دو معیار موهر-کولمب و دراگر-پراگر که هرکدام تأثیری متفاوت از تنش اصلی میانی را در نظر گرفته‌اند به تحلیل پایداری چاه پرداخته شد که نتایج حاکی از تخمین مقدار فشار گل بهتر توسط معیار موگی-کولمب نسبت به دو معیار دیگر است. معیار موهر-کولمب از تأثیر تنش اصلی میانی صرف‌نظر می‌کند و معیار دراگر-پراگر تأثیر تنش اصلی میانی را برابر با تنش اصلی حداقل در نظر می‌گیرد؛ بنابراین با توجه به نتایج، معیار تسلیم موگی-کولمب تأثیری مناسب از تنش اصلی میانی در نظر گرفته است.

مراجع

[1] Fjar, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Risnes, R., & Horsrud, P. (2008). *Petroleum related rock mechanics* (Vol. 53). Elsevier.

[2] Mogi, K. (2007). *Experimental rock mechanics*. CRC Press.

[3] Cai, M. (2008). Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries—insight from numerical modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(5), 763-772.

[14] Elyasi, A. (2011). 3-D Stability Modelling of Multilateral Oil Wells. Master's thesis. Rock Mechanics group. Tarbiat Modares University (TMU). In Persian.

[15] Alejano, L. R., & Bobet, A. (2012). Drucker-Prager Criterion. Rock mechanics and rock engineering, 45(6), 995-999.

analysis. Geomechanics for Energy and the Environment.

[12] Chen, W. F. & Han, D. J. (2012). Plasticity for structural engineers. Springer Science & Business Media.

[13] Manual, FLAC Users. (1998). Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, USA.

⁶ Explicit

⁷ Out-of-plane Stress

⁸ Tension Cutoff

⁹ Overblance

¹ True triaxial stress

² Adel M. Al-Ajmi, Robert W. Zimmerman

³ polyaxial

⁴ Constitutive Model

⁵ Plane Strain