

بررسی تأثیر معیار موهر کولمب و هوک براون بر منحنی عکس‌العمل زمین

علیرضا کارگر^{۱*}، رضا رحمان‌نژاد^۲

۱- دانشجوی دکتری بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استاد بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

(دریافت ۲ اردیبهشت ۹۱، پذیرش اردیبهشت ۹۲)

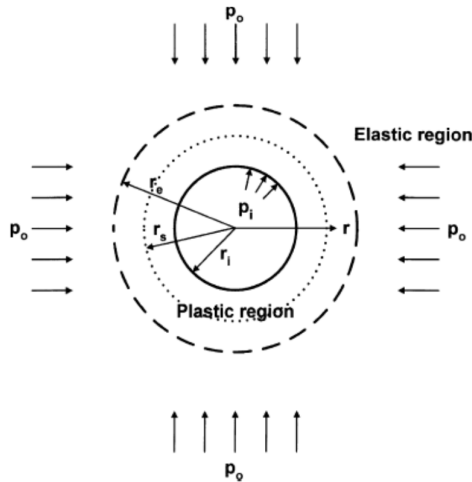
چکیده

روش همگرایی- همجواری یکی از روش‌های موثر در طراحی و محاسبه نگهداری حفاریات زیرزمینی دایروی می‌باشد. در این روش فرض می‌گردد که تونل در محیط پیوسته، همگن، ایزوتروپ و تحت میدان تنش هیدروستاتیک قرار دارد. معیار شکست انتخاب‌شده برای تحلیل توده سنگ بر ابعاد ناحیه پلاستیک، میدان تنش و جابجایی‌های ناشی از حفاری تونل تأثیر می‌گذارد. براون و همکاران یک روش عددی گام به گام بر پایه معیار هوک براون برای تحلیل میدان تنش و جابجایی اطراف تونل ارائه دادند. در این تحقیق روش گام به گام مشابهی برای معیار موهر کولمب توسعه داده شده است. سپس به مقایسه اثر معیارهای هوک براون و موهر کولمب بر منحنی عکس‌العمل زمین برای مدل‌های رفتاری مختلف توده سنگ پرداخته می‌شود. در نهایت نتایج آنالیز حساسیت هر یک از دو معیار نسبت به پارامترهایشان ارائه می‌گردد.

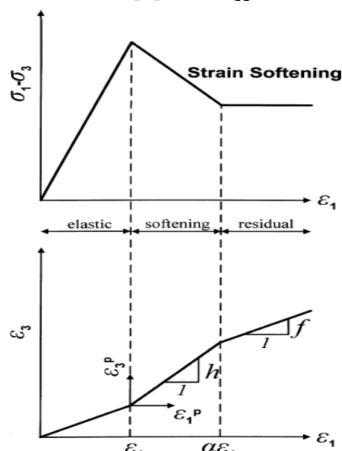
مقایسه جابجایی‌های نسبی ناشی از تغییرات پارامترهای مقاومتی معیارهای موهر کولمب و هوک براون نشان می‌دهد که معیار موهر کولمب نسبت به تغییرات پارامترهای مقاومتی حداقل ۵ برابر حساس‌تر از معیار هوک براون است. بعلاوه تغییرات پارامترهای مقاومتی منجر به تغییر شکل بیشتر توده‌های باکیفیت متوسط (محیط دارای رفتار کرنش نرم شونده) می‌شود، بنابراین باید سعی گردد تا آنجا که ممکن است مقاومت ذاتی توده سنگ را برای چنین محیط‌هایی با روش‌های آتشباری کنترل شده یا حفاری مکانیزه حفظ نمود.

کلمات کلیدی

همگرایی- همجواری، معیار شکست، حفره دایره‌ای شکل، ناحیه پلاستیک.



شکل ۱: تونل دایروی در محیط بینهایت تحت تنش هیدروستاتیک [۶]



شکل ۲: مدل کرنش نرم شونده [۶]

رفتار الاستوپلاستیک نرم شونده در شکل ۲ نشان داده شده است. تحت این رفتار سه ناحیه مختلف در اطراف حفره ایجاد می‌شود. در ابتدا ناحیه الاستیک سپس پلاستیک نرم شونده و در انتها ناحیه خردشده در دیواره تونل تشکیل می‌گردد. پس از شکست اولیه پارامترهای مقاومتی سنگ به آرامی با افزایش کرنش کاهش می‌یابند تا به مقادیر پسماند خود برسند. سپس تغییر شکل در شاخه پسماند ادامه می‌یابد تا تنش شعاعی به مقدار فشار داخلی p_i در دیواره تونل برسد. برای به دست آوردن منحنی عکس‌العمل زمین در ابتدا می‌بایست میدان تنش و کرنش را در ناحیه پلاستیک تعیین نمود.

در این تحقیق از دو معیار شکست استفاده شده است:

- معیار شکست غیرخطی هوک-براون

$$\sigma_\theta = \sigma_r + (m\sigma_c\sigma_r + s)^{0.5} \quad (1)$$

که در اینجا σ_c مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر، m و

۱- مقدمه

تحلیل تنش و جابجایی در اطراف یک حفره دایره‌ای شکل در محیط ایزوتروپ^۱ از مسائل بسیار مهم در مهندسی سنگ بشمار می‌رود. با فرض وجود میدان تنش هیدروستاتیک^۲ راه-حل تحلیلی را می‌توان یافت که میدان تنش و کرنش را در اطراف حفره تعیین کند. این روش در شرایط مختلفی همچون اعتبارسنجی مدل‌های ساختاری، ارزیابی پایداری حفریات دایروی همچون گمانه‌ها و تونل‌های حفاری شده با TBM^۳ و شکل منحنی عکس‌العمل توده‌سنگ نگهداری مفید است [۱]. به منظور به دست آوردن منحنی عکس‌العمل زمین^۴ برای تونل‌های دایروی چندین روش تحلیلی برای حالت‌های الاستوپلاستیک کامل^۵ و الاستوپلاستیک شکننده^۶ با در نظر گرفتن معیار خطی موهر کولمب^۷ و غیرخطی هوک براون^۸ ارائه شده است [۲]، [۳]، [۴]، [۵].

نوع معیار تسلیم مورد استفاده برای توده سنگ نقش مهمی در منحنی عکس‌العمل زمین و ناحیه پلاستیک ایجادشده در اطراف حفره دارد. انتخاب نوع معیار تسلیم به مشخصات سنگ بستگی دارد.

براون و همکاران^۹ در سال ۱۹۸۳ یک روش عددی پله‌ای را برای محیط با رفتار الاستیک نرم شونده^{۱۰} ارائه کردند. این روش که بر پایه معیار هوک-براون است کرنش الاستیک را در ناحیه پلاستیک که مقدار آن همان مقدار کرنش الاستیک در مرز الاستوپلاستیک است، ثابت فرض می‌کند.

در سال ۲۰۰۳ آلونسو و همکاران^{۱۱} روشی را با حل معادله دیفرانسیل تعادل و با در نظر گرفتن معادلات سازگاری و قانون جریان ارائه دادند [۵].

هدف از این مقاله بررسی تأثیر معیار موهر کولمب و هوک براون بر منحنی عکس‌العمل زمین و آنالیز حساسیت پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ است.

۲- بیان مسئله

در شکل ۱ تونل دایروی در توده‌سنگی پیوسته، همگن و ایزوتروپ و به صورت اولیه الاستیک که تحت تنش اولیه p_o قرار گرفته، نشان داده شده است. دیواره تونل تحت فشار داخلی p_i قرار دارد. با کاهش p_i تغییر شکل در دیواره تونل رخ خواهد داد و همزمان موجب گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف حفره می‌گردد.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (11)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{du}{dr}, \varepsilon_\theta = -\frac{u}{r} \quad (12)$$

با تقسیم‌بندی ناحیه پلاستیک به تعدادی رینگ‌های حلقوی نازک، تنش شعاعی در فاصله r_j طبق معیار تسلیم هوک براون به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲].

$$\sigma_{r(j)} = b - \sqrt{b^2 - a} \quad (13)$$

که در اینجا

$$a = \sigma_{r(j-1)} - 4k_1 \left[\frac{1}{2} \bar{m} \sigma_c \sigma_{r(j-1)} + \bar{s} \sigma_c^2 \right] \quad (14)$$

$$b = \sigma_{r(j-1)} + k_1 m \sigma_c \quad (15)$$

$$k_1 = \left(\frac{r_{j-1} - r_j}{r_{j-1} + r_j} \right)^2 \quad (16)$$

دانکن فاما^{۱۲} فرمول بسته‌ای را برای تنش شعاعی در ناحیه پلاستیک طبق معیار موهر کولمب ارائه داد. در این تحقیق تنش شعاعی با استفاده از روش تفاضل محدود در فاصله r_j برای معیار موهر کولمب به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷].

$$\sigma_{r(j)} = \frac{1}{1+k_2(1-K(\varphi))} \left[2k_2(\sigma_c + \sigma_{\theta(j-1)} - \sigma_{r(j-1)}) + \sigma_{r(j-1)} \right] \quad (17)$$

$$k_2 = \left(\frac{r_{j-1} - r_j}{r_{j-1} + r_j} \right) \quad (18)$$

$$K(\bar{\varphi}) = \frac{1 + \sin \bar{\varphi}}{1 - \sin \bar{\varphi}} \quad (19)$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{2\bar{c} \cos \bar{\varphi}}{1 - \sin \bar{\varphi}} \quad (20)$$

شعاع رینگ جدید از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\frac{r_j}{r_{(j-1)}} = \frac{2\varepsilon_{\theta(j-1)} - \varepsilon_{r(j-1)} - \varepsilon_{r(j)}}{2\varepsilon_{\theta(j)} - \varepsilon_{r(j-1)} - \varepsilon_{r(j)}} \quad (21)$$

نمو کرنش مماسی به شکل زیر بیان می‌گردد

$$d\varepsilon_{\theta(j)} = \varepsilon_{\theta(j)} - \varepsilon_{\theta(j-1)} \quad (22)$$

بنابراین افزایش کرنش شعاعی در شعاع r_j به صورت زیر قابل محاسبه است

$$d\varepsilon_r^p = -\beta d\varepsilon_\theta^p \quad (23)$$

S ثابت‌های هوک براون سنگ که به خواص سنگ و میزان خردشدگی آن قبل از اینکه تحت تنش قرار بگیرد بستگی دارد.

• معیار شکست خطی موهر کولمب

$$\sigma_\theta = \sigma_c + \sigma_r K(\varphi) \quad (2)$$

که $K(\varphi)$ و σ_c به صورت زیر می‌باشند

$$k(\varphi) = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

φ زاویه اصطکاک داخلی و c چسبندگی توده سنگ است. پارامترهای مقاومتی توده سنگ به صورت زیر برای هر دو معیار تغییر می‌کند [۵]

$$\bar{m} = m_p - (m_p - m_r) \gamma^p / \gamma^{p*} \quad (5)$$

$$\bar{s} = s_p - (s_p - s_r) \gamma^p / \gamma^{p*} \quad (6)$$

$$\bar{\varphi} = \varphi_p - (\varphi_p - \varphi_r) \gamma^p / \gamma^{p*} \quad (7)$$

$$\bar{c} = c_p - (c_p - c_r) \gamma^p / \gamma^{p*} \quad (8)$$

که در اینجا γ^p پارامتر نرم‌شوندگی، γ^{p*} حدی از پارامتر نرم‌شوندگی که تغییر از حالت نرم شونده به باقیمانده را نشان می‌دهد. در اینجا، پارامتر نرم‌شوندگی به عنوان تفاوت کرنش‌های اصلی حداکثر و حداقل پلاستیک تعریف می‌شود که همان کرنش برشی پلاستیک است.

$$\gamma^p = \varepsilon_\theta^p - \varepsilon_r^p = (\varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^e) - (\varepsilon_r - \varepsilon_r^e) \quad (9)$$

روش‌های متفاوتی برای اعمال اتساع وجود دارد. برای مثال اتساع ثابت، اتساع خطی و اتساع توانی را می‌توان همراه با تغییر شکل پلاستیک در نظر گرفت [۲]، [۴]، [۵].

در این مقاله زاویه اتساع به صورت خطی از مقادیر حداکثر تا باقیمانده به صورت زیر تغییر می‌کند.

$$\bar{\psi} = \psi_p - (\psi_p - \psi_r) \gamma^p / \gamma^{p*} \quad (10)$$

۱-۲- محاسبه گام به گام برای سنگ با مدل الاستوپلاستیک نرم شونده

با فرض شرایط کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری معادلات تعادل و ساختاری در سیستم مختصات قطبی در اطراف یک تونل دایروی به صورت زیر به دست می‌آیند

وارد شرایط پسماند می‌گردد.

۳- روش کار و بحث

با استفاده از روش گام به گام برنامه‌ای در محیط MATLAB نوشته شد تا میدان تنش و جابجایی را در اطراف حفره دایره‌ای شکل با استفاده از معیار موهر کولمب و هوک براون تعیین کند.

سری داده‌های ۱-۱، ۱-۲ (توده‌سنگ با رفتار کرنش نرم شونده)، ۲ (توده‌سنگی با رفتار شکننده) و ۳ (توده‌سنگی با رفتار الاستوپلاستیک کامل) در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند [۱].

۳-۱- مقایسه معیار موهر-کولمب و هوک-براون در همگرایی

یک حفره دایروی

در این مرحله به تأثیر معیارهای شکست هوک براون و موهر کولمب بر همگرایی دیواره یک حفره دایروی، شعاع ناحیه پلاستیک و منحنی عکس‌العمل زمین پرداخته می‌شود.

۳-۱-۱- شعاع ناحیه پلاستیک

در این بخش به تأثیر معیار تسلیم موهر کولمب و هوک براون در ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف حفره دایره‌ای شکل پرداخته می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، برای داده‌های سری ۲ که مربوط به سنگ‌های الاستوپلاستیک شکننده هستند تفاوت میان شعاع ناحیه پلاستیک در حالت معیار تسلیم موهر کولمب و هوک براون بسیار ناچیز است.

برای داده‌های سری ۳ که مربوط به سنگ‌های پلاستیک کامل است این اختلاف بیشتر است. در واقع در حالت معیار هوک براون شعاع ناحیه پلاستیک بیشتر از حالت معیار موهر کولمب است. این تفاوت در مدل پلاستیک کامل ناشی از دو عامل است، اول این که در این مدل در حالت معیار هوک براون تنش شعاعی در مرز ناحیه الاستوپلاستیک (σ_{re}) بیشتر از مقدار آن در حالت معیار موهر کولمب است ثانیاً گرادیان رشد تنش شعاعی در ناحیه پلاستیک در حالت معیار موهر کولمب بیشتر از معیار هوک براون است در نتیجه در معیار موهر کولمب تنش سریع‌تر به مقدار تعادلی آن در مرز ناحیه الاستوپلاستیک می‌رسد و شعاع ناحیه کوچک‌تر می‌گردد.

$$d\varepsilon_{r(j)} = d\varepsilon_{r(j-1)} - \beta(d\varepsilon_{\theta(j)} - d\varepsilon_{\theta(j-1)}) \quad (24)$$

که در اینجا $d\varepsilon_{r(j-1)}$ و $d\varepsilon_{\theta(j-1)}$ به ترتیب مقدار نمو کرنش شعاعی و مماسی در شعاع r_{j-1} و $\beta = \frac{1+\sin\psi}{1-\sin\psi}$ است. با انتخاب مقادیر فرضی کوچک برای $d\varepsilon_{\theta(j)}$ ، $\varepsilon_{r(j)}$ ، r_{j-1} و u_j با استفاده از معادلات بالا برای هر یک از معیارها قابل محاسبه می‌باشند. فرایند به صورت پله‌ای تکرار می‌گردد تا تنش، کرنش و جابجایی به طور کامل در ناحیه پلاستیک تعیین گردد. کرنش‌های الاستیک در فاصله r_j از محور تونل با استفاده از رابطه تنش-کرنش الاستیک به صورت زیر محاسبه می‌شوند

$$\varepsilon_{r(j)}^e = \frac{1}{2G} [(1-\nu)(\sigma_{r(j)} - p_o) - \nu(\sigma_{\theta(j)} - p_o)] \quad (25)$$

$$\varepsilon_{\theta(j)}^e = \frac{1}{2G} [(1-\nu)(\sigma_{\theta(j)} - p_o) - \nu(\sigma_{r(j)} - p_o)] \quad (26)$$

که در اینجا G مدول برشی و ν نسبت پواسون است. تنش شعاعی در فصل مشترک الاستوپلاستیک ($r = r_e$) برای معیار هوک براون به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷]

$$\sigma_{re} = p_o - M\sigma_c \quad (27)$$

که در اینجا

$$M = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m_p}{4} \right)^2 + \frac{m_p p_o}{\sigma_c} + s_p \right] - \frac{m_p}{8} \quad (28)$$

تنش شعاعی در فاصله r_e برای معیار موهر کولمب به صورت زیر محاسبه می‌شود [۸]

$$\sigma_{re} = \frac{2p_o - \sigma_{cp}}{1 + K(\varphi_p)} \quad (29)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{2c_p \cos \varphi_p}{1 - \sin \varphi_p} \quad (30)$$

با استفاده از معادلات (۲۷) و (۲۹) به عنوان نقطه شروع، مقادیر متوالی $\sigma_{r(j)}$ از طریق معادلات (۱۳) و (۱۷) برای شعاع‌های نتیجه شده از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود. کرنش برشی پلاستیک در شعاع r_j به صورت تقریبی طبق رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$\gamma^p = \varepsilon_{\theta(j-1)} - \varepsilon_{r(j-1)} + \frac{1}{2G} \{ \sigma_{r(j-1)} - \sigma_{\theta(j-1)} \} \quad (31)$$

همان‌گونه که دیده شد چنانچه γ^p به γ^{p*} برسد توده‌سنگ

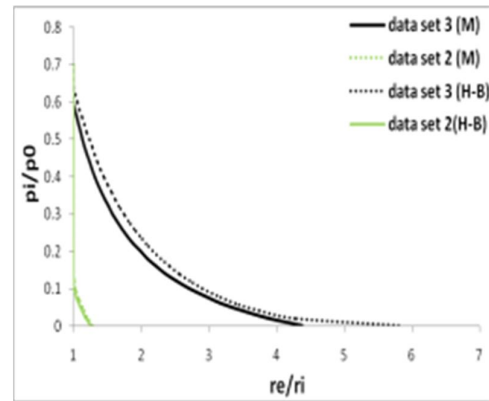
جدول ۱: سری داده‌های ورودی برای انواع مدل رفتاری توده‌سنگ

سری ۳	سری ۲	سری ۱-۲	سری ۱-۱	
۴۸۰	۴۰۰۰۰	۱۳۸۰	۱۳۸۰	مدول یانگ (Mpa)
۰/۲۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۲۵	نسبت پواسون (ν)
۵	۱۰۸	۱۰	۳/۳۱	تنش اولیه زمین (Mpa)
۵	۴	۵/۳۵	۵/۳۵	شعاع تونل، r_i (m)
۷/۵	۳۰۰	۳۰	۲۷/۶	مقاومت فشاری تک‌محوره (Mpa)
۰/۵۵	۷/۵	۴/۵	۰/۵	m_p
۰	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۰۱	s_p
۰/۵۵	۱	۰/۴۵	۰/۱	m_r
۰	۰/۰۱	۰/۰۰۲	۰	s_r
۲۲/۴	۵۵	۴۰	۳۰	φ_p (°)
۲۱	۲۹	۲۴	۲۱	φ_r (°)
۰/۲۷	۲۳/۱۷	۱/۶۱	۰/۳۸	c_p (Mpa)
۰/۲۷	۱۱/۳۴	۰/۷۳	۰/۱۹	c_r (Mpa)
۰	۳۶	۲۷	۱۹/۴۷	ψ_p (°)
۰	۰	۰	۵/۲۲	ψ_r (°)
۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴۷۴۲	۰/۰۰۴۷۴۲	γ^{p*}

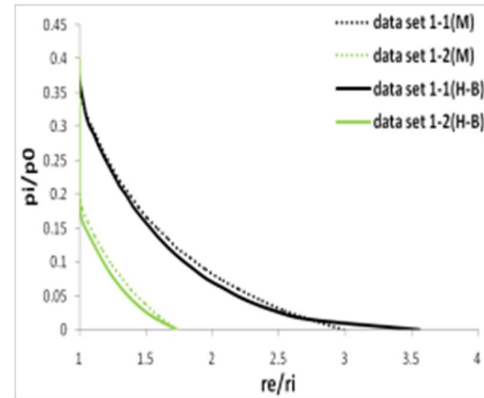
برای داده‌های سری ۱-۱ و ۲-۱ که مربوط به سنگ‌های با رفتار الاستوپلاستیک نرم شونده می‌باشند همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌کنیم شعاع ناحیه پلاستیک در بخش زیادی از منحنی در حالت معیار موهر کولمب بیشتر از هوک براون است و این به علت افزایش بیشتر گرادیان تنش در ناحیه خردشده در حالت معیار هوک براون نسبت به موهر کولمب است، تنها در فشارهای داخلی (فشار نگهداری) پایین در نمودار مربوط به داده‌های سری ۱-۱ شعاع ناحیه پلاستیک در معیار هوک براون بیشتر می‌گردد.

۳-۱-۲- شعاع ناحیه خردشده

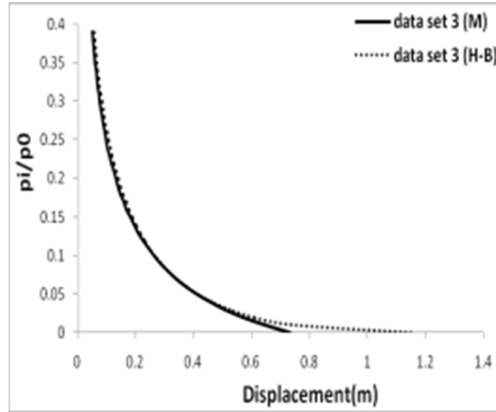
برای داده سری ۲ که مربوط به سنگی با رفتار الاستوپلاستیک شکننده است، همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود تفاوت میان شعاع ناحیه خردشده ناچیز است. در داده‌های سری ۳، که مربوط به سنگی با رفتار الاستوپلاستیک کامل است شعاع ناحیه خردشده در حالت معیار هوک-براون بیشتر از موهر کولمب است.



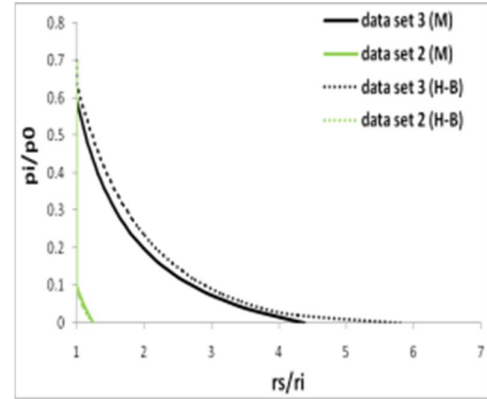
شکل ۳: تغییرات r_e/r_i برای معیار موهر کولمب و هوک براون



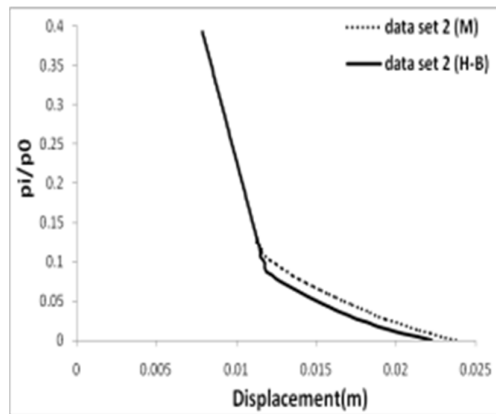
شکل ۴: تغییرات r_e/r_i برای معیار موهر کولمب و هوک براون



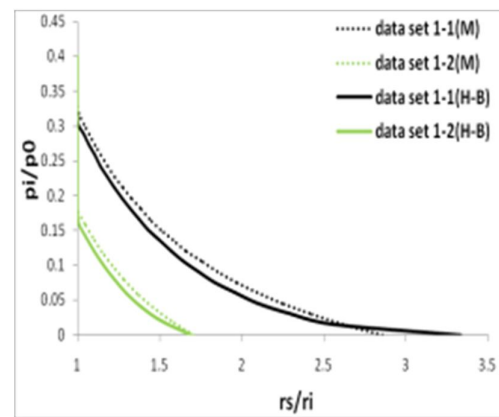
شکل ۷: منحنی عکس‌العمل زمین برای معیار موهرکولمب و هوک براون



شکل ۵: تغییرات τ_s/τ_i برای معیار موهرکولمب و هوک براون



شکل ۸: منحنی عکس‌العمل زمین برای معیار موهرکولمب و هوک-براون



شکل ۶: تغییرات τ_s/τ_i برای معیار موهرکولمب و هوک-براون

برای داده‌های سری ۱-۱ و ۲-۱ که مربوط به سنگی با رفتار الاستوپلاستیک نرم شونده است در شکل ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که در اغلب نمودارها تغییر شکل سنگ در حالت معیار موهرکولمب بیشتر از هوک-براون است تنها برای داده سری ۱-۱ در فشارهای داخلی بسیار پایین این روند معکوس می‌گردد.

چنانچه منحنی‌های $p-u$ را با اشکال ۵ و ۶ مقایسه کنیم خواهیم دید که برای هر سری داده افزایش یا کاهش تغییر شکل به افزایش یا کاهش شعاع ناحیه خردشده بستگی دارد. برای مثال تغییر شکل در داده‌های سری ۳ در حالت معیار هوک-براون بیشتر از موهرکولمب می‌باشد درحالی‌که شعاع ناحیه خردشده نیز طبق شکل ۵ برای داده‌های سری ۳ برای معیار هوک-براون بیشتر از موهرکولمب است.

در شکل ۶ که مربوط به داده‌های سری ۱-۱ و ۲-۱ که سنگ‌هایی با رفتار الاستوپلاستیک نرم شونده هستند دیده می‌شود که شعاع ناحیه خردشده در اغلب نمودار در حالت معیار موهرکولمب بیشتر از هوک-براون است تنها برای سری داده ۱-۱ در فشارهای داخلی پایین این روند معکوس می‌گردد.

۳-۱-۳- منحنی رفتاری زمین

در منحنی رفتاری زمین برای داده‌های سری ۳ در شکل ۷ مشاهده می‌شود که تغییر شکل در دیواره تونل برای حالت معیار هوک-براون به مقدار کمی بیشتر از معیار موهرکولمب است البته این تفاوت برای فشارهای داخلی پایین قابل توجه است.

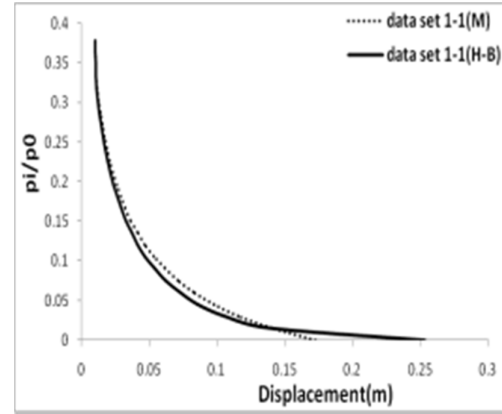
همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود تغییر شکل‌ها برای داده‌های سری ۲ در حالت موهرکولمب بیشتر از هوک-براون است.

است و تنها در فشارهای داخلی ناچیز ($p_i/p_0 < 0.025$) این روند معکوس می‌گردد. این رفتار در منحنی $p-u$ برای داده‌های سری ۱-۱ در شکل ۹ نیز دیده می‌شود. این وابستگی در میزان تغییر شکل دیواره حفره و شعاع ناحیه خردشده را می‌توان این-گونه توجیه کرد که طبق هر کدام از معیارهای موهر کولمب و هوک-براون بخش عمده‌ای از کرنش پلاستیک در سنگ در ناحیه خردشده شکل می‌گیرد (رفتار منحنی‌ها توسط ابعاد ناحیه خردشده کنترل می‌شود) به عبارتی همان‌گونه که دیده شد افزایش شعاع ناحیه خردشده در هر حالت موجب افزایش تغییر شکل در دیواره حفره می‌گردد (و این بدین معنی است که برای مثال با بیشتر بودن شعاع ناحیه خردشده برای یک سری داده در حالت معیار هوک-براون نسبت به معیار موهر کولمب، تغییر شکل ایجادشده در دیواره حفره نیز در حالت معیار هوک-براون بیش از معیار موهر کولمب می‌گردد و بالعکس).

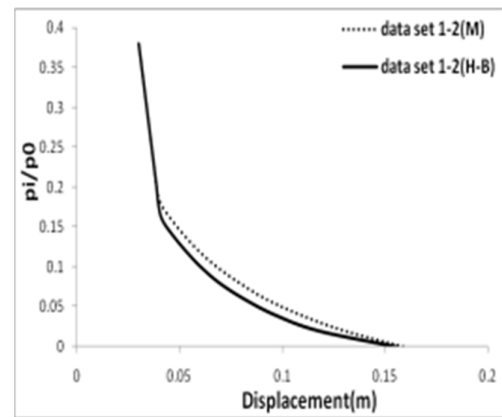
۳-۲- تحلیل پارامتری معیار موهر کولمب و هوک-براون

در مرحله اول با تحلیل پارامتری معیار هوک-براون، میزان حساسیت تغییر شکل در دیواره حفره را نسبت به هر یک از دو پارامتر m_r و s_r مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور پارامتر s_r توده‌سنگ به ترتیب به مقادیر $s_p/3$ ، $s_p/2$ و s_p تغییر داده می‌شود.

برای داده‌های سری ۱-۱ همان‌گونه که در شکل ۱۱-a مشاهده می‌شود با افزایش s_r تغییر شکل توده‌سنگ کاهش می‌یابد، چنین رفتاری برای داده‌های سری ۱-۲ و ۲ نیز دیده می‌شود. البته درصد نسبی این تغییرات برای داده‌های سری ۲ که مربوط به سنگی سخت با رفتار الاستوپلاستیک شکننده است کمتر است.

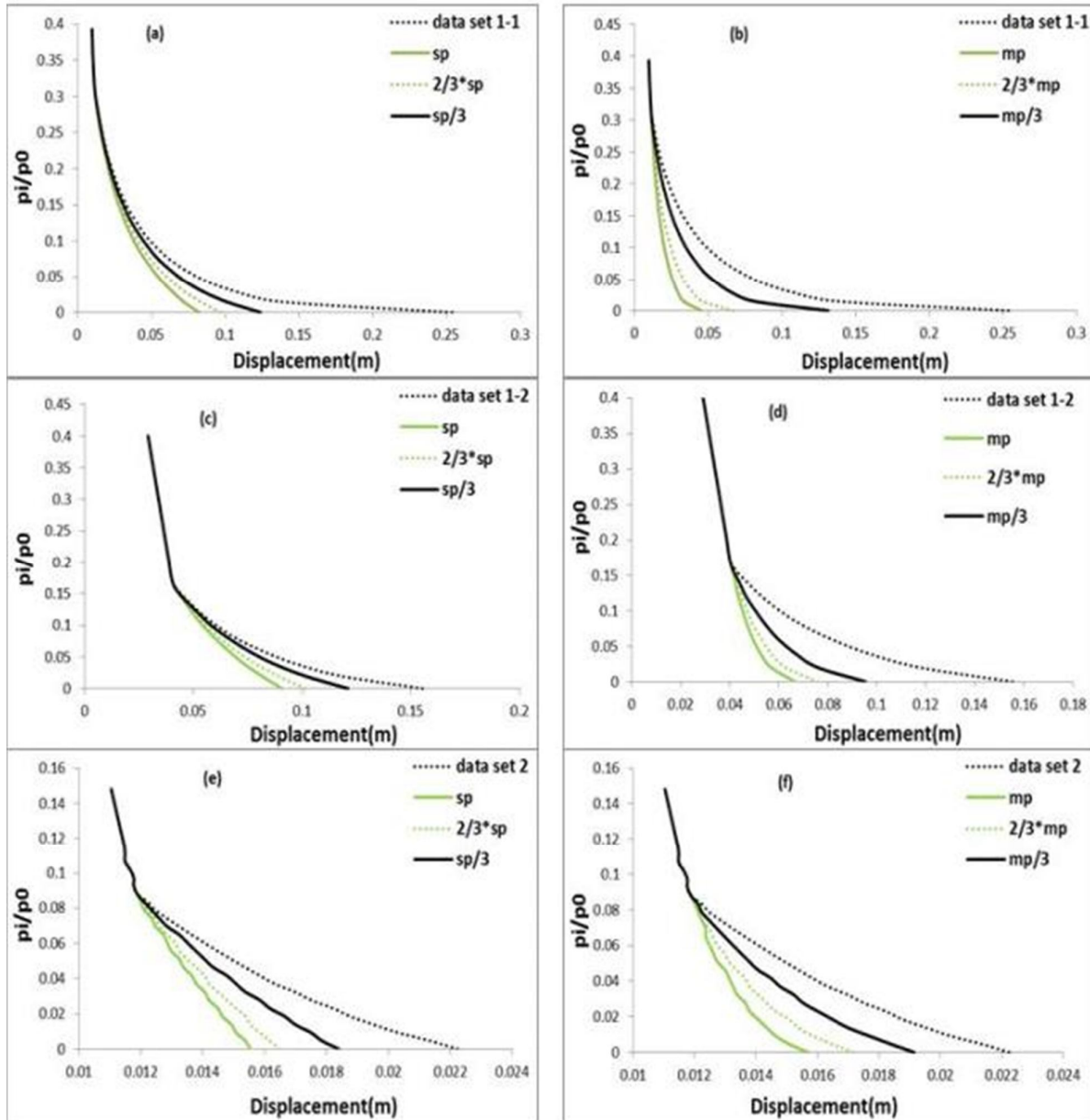


شکل ۹: منحنی عکس‌العمل زمین برای معیار موهر کولمب و هوک-براون



شکل ۱۰: منحنی عکس‌العمل زمین برای معیار موهر کولمب و هوک-براون

این وابستگی را به وضوح می‌توان برای داده‌های سری ۱-۱ در شکل‌های ۶ و ۹ مشاهده کرد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که برای داده‌های سری ۱-۱ شعاع ناحیه خردشده برای اغلب فشارهای داخلی در حالت موهر کولمب بیشتر از هوک-براون



شکل ۱۱: تأثیر تغییرات پارامتر m_r و s_r بر روی منحنی عکس‌العمل زمین

و s در سنگ‌های باکیفیت متوسط از اهمیت بیشتری برخوردار است. مخصوصاً کاهش مقدار m_r به ازاء مقادیر کمتر از $2/3 m_p$ و s_r به ازاء مقادیر کمتر از $2/3 s_p$ باعث ایجاد تغییر شکل نسبی بیشتری در توده‌سنگ می‌گردد. بنابراین می‌بایست در عملیات حفاری با تمهیداتی همچون آتشباری کنترل شده و یا حفاری مکانیزه سعی در حفظ مقدار m و s به ترتیب در مقادیر بیشتر از $2/3 m_p$ و $2/3 s_p$ نمود تا باعث ایجاد تغییر شکل نسبی کمتری در توده‌سنگ شود.

در مرحله بعد پارامتر m_r توده سنگ به مقادیر $m_p/3$ ، $2/3 m_p$ و m_p تغییر نمود. برای هر سه سری داده‌های ۱-۱ و ۲-۱ و ۲ همان‌گونه که در شکل ۱۱-b دیده می‌شود با افزایش m_r تغییر شکل توده‌سنگ کاهش می‌یابد و درصد نسبی این تغییرات در داده‌های سری ۱-۱ بیشتر از ۲-۱ و برای داده‌های سری ۲-۱ بیشتر از سری ۲ است. این امر نشان‌دهنده این است که با افزایش کیفیت سنگ تغییر نسبی پارامتر m_r باعث ایجاد تغییر شکل نسبی کمتری در توده‌سنگ می‌گردد.

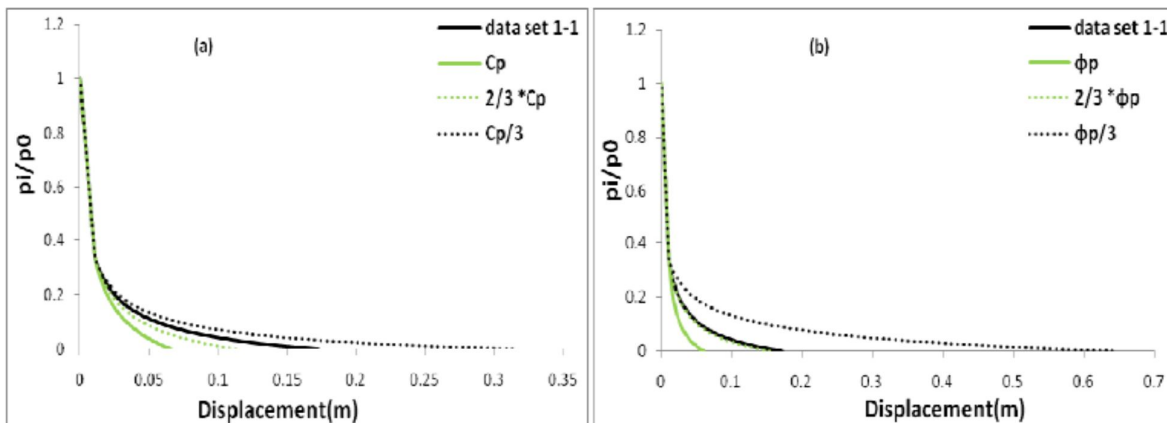
همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود حفظ پارامتر m

جدول ۲: تغییر شکل نسبی ایجاد شده ناشی از تغییرات پارامتری در معیارهای موهر کولمب و هوک-براون

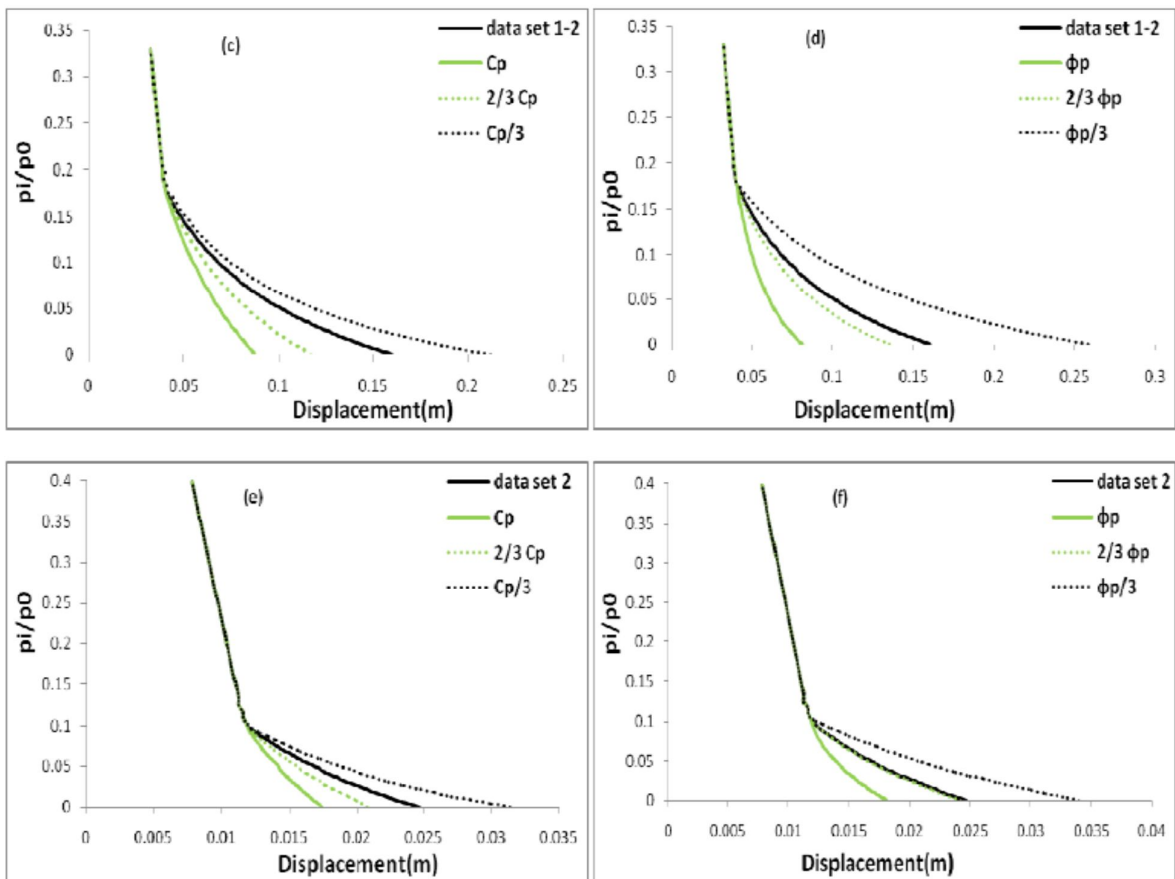
داده سری ۲	داده سری ۱-۲	داده سری ۱-۱	
۸/۶	۱۲/۸	۱۰/۸	$s_r = \frac{s_p}{3} \sim \frac{2}{3} s_p$
۴/۳	۶/۸	۵/۶	$s_r = \frac{2}{3} s_p \sim s_p$
۸/۹	۱۲/۶	۲۵/۵	$m_r = \frac{m_p}{3} \sim \frac{2}{3} m_p$
۶/۶	۵/۹	۸/۵	$m_r = \frac{2}{3} m_p \sim m_p$
۴۲/۵	۵۹/۴	۱۱۶/۵	$c_r = \frac{c_p}{3} \sim \frac{2}{3} c_p$
۱۳/۸	۱۸/۲	۲۶/۷	$c_r = \frac{2}{3} c_p \sim c_p$
۳۹/۵	۷۶/۸	۲۸۲/۳	$\varphi_r = \frac{\varphi_p}{3} \sim \frac{2}{3} \varphi_p$
۲۴/۶	۳۳/۶	۵۴/۵	$\varphi_r = \frac{2}{3} \varphi_p \sim \varphi_p$

می‌یابد که این نشان می‌دهد با افزایش استحکام سنگ میزان حساسیت تغییر شکل سنگ نسبت به تغییر پارامتر c_r کاهش می‌یابد. در مرحله بعد به تغییر پارامتر φ_r اقدام گردید. به این منظور به ترتیب مقادیر $\varphi_p/3$ ، $2/3 \varphi_p$ و φ_p به φ_r نسبت داده شد.

در این مرحله به تحلیل پارامتری معیار موهر کولمب پرداخته می‌شود. در ابتدا پارامتر c_r سنگ به مقادیر $c_p/3$ ، $2/3 c_p$ و c_p تغییر می‌کند. همان‌گونه که در شکل a-۱۲ دیده می‌شود با افزایش c_r تغییر شکل توده سنگ کاهش می‌یابد. درصد نسبی تغییر شکل توده سنگ از داده‌های سری ۱-۱ به داده‌های سری ۲ کاهش



شکل ۱۲: تأثیر تغییرات پارامتر φ_r و c_r بر روی منحنی عکس العمل زمین

ادامه شکل ۱۲: تأثیر تغییرات پارامتر φ_r و C_r بر روی منحنی عکس‌العمل زمین

پارامتری در معیار موهر کولمب بیشتر از هوک-براون است.

۴- نتیجه‌گیری

همان‌گونه که مشاهده شد با سخت‌تر شدن سنگ شعاع ناحیه پلاستیک و تغییر شکل دیواره حفره در حالت معیار موهر کولمب بیشتر از هوک-براون می‌شود و به همین صورت گرادیان رشد تنش در ناحیه خردشده در حالت معیار هوک-براون بیشتر از موهر کولمب است.

با مقایسه درصد تغییر شکل نسبی ایجادشده ناشی از تغییر پارامترها در معیار هوک-براون و موهر کولمب چنین نتیجه می‌شود که حساسیت تغییر شکل توده‌سنگ نسبت به تغییرات پارامتری در معیار موهر کولمب بیشتر از هوک-براون است.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته چنین استنباط می‌گردد که با سخت‌تر شدن سنگ، حساسیت توده‌سنگ نسبت به تغییرات پارامتری در معیار موهر کولمب کاهش می‌یابد.

تغییرات نسبی پارامترهای توده‌سنگ موجب تغییر شکل

با افزایش φ_r همان‌گونه که در شکل ۱۲-b,d,f دیده می‌شود تغییر شکل توده‌سنگ کاهش می‌یابد. با مقایسه درصد نسبی تغییر شکل توده‌سنگ برای این سه سری داده چنین نتیجه می‌شود که از داده‌های سری ۱-۱ به سری ۲ درصد تغییر شکل نسبی توده‌سنگ نسبت به تغییرات پارامتر φ_r کاهش می‌یابد به عبارتی دیگر با افزایش استحکام و سختی سنگ درصد تغییر شکل نسبی توده‌سنگ نسبت به تغییرات پارامتر φ_r کمتر می‌گردد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش نسبی پارامترهای C_r و φ_r تغییر شکل نسبی توده‌سنگ کاهش می‌یابد. البته این تغییرات برای مقادیر پایین φ_r و C_r شدیدتر و به ازای مقادیر بالای آن کمتر است.

با مقایسه درصد تغییر شکل نسبی ایجادشده ناشی از تغییر پارامترها در معیار هوک-براون و موهر کولمب چنین نتیجه می‌شود که حساسیت تغییر شکل توده‌سنگ نسبت به تغییرات

mass"; Tunnelling and Underground Space Technology 23, 588-599.

[7] Kargar A.R., Rahmanejd R., 2009; "The effect of various constitutive models on ground response curve"; M.Sc. Thesis, Bahonar University of Kerman.

[8] Duncan Fama M.E., Trueman R., Craig, M.S.; 1995; "Two and three dimensional elasto-plastic analysis for coal pillar design and its application to highwall mining"; Int. J. Rock Mech. Min. sci. & Geomech. Abstract. 32, 215-225.

[9] Brady B.H.G., Brown E.T.; 1993; "Rock Mechanics for Underground Mining"; Chapman & Hall.

[10] Florence A.L., Schwer L.E.; 1978; "Axisymmetric compression of a Mohr-Coulomb medium around a circular hole"; Int. J. Number. Anal. Meth. Geomech. 2, 367-379.

[11] Guan Z., Jiang Y., Tanabasi Y.; 2007; "Ground reaction analyses in conventional tunneling excavation"; Tunnel. Under. space Technol. 22, 230-237.

[12] Hoek E., Brown E.T.; 1980; "Underground Excavation in rock. Institution of Mining and Metallurgy" London.

[13] Hoek E., Brown E.T.; 1997; "Practical estimates of rock mass strength"; Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 34(8), 1165-1186.

[14] Ogawa T., Lo K.Y.; 1987; "Effects of dilatancy and yield criteria on displacements around tunnels"; Can. Geotech. J. 24, 100-113.

[15] Park K.H., Kim Y.J.; 2006; "Analytical solution for a circular opening in an elastic-brittle-plastic rock"; Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 43, 616-622.

[16] Sharan S.K.; 2003; "Elastic-brittle-plastic analysis of circular openings in Hoek-Brown media"; Int. J. rock mech. Min. Sci. 40, 817-824.

[17] Sharan S.K.; 2005; "Exact and approximate solutions for displacements around circular openings in elastic-brittle-plastic Hoek-Brown rock"; Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 42, 542-549.

نسبی بیشتری در سنگ‌های نرم شونده نسبت به سنگ‌های شکننده می‌گردد. بنابراین حفظ پارامتر m و s در سنگ‌های باکیفیت متوسط از اهمیت بیشتری برخوردار است، به ویژه کاهش مقدار m_r به ازاء مقادیر کمتر از $2/3 m_p$ و s_r به ازاء مقادیر کمتر از $2/3 s_p$ باعث ایجاد تغییر شکل نسبی بیشتری در توده سنگ می‌گردد. بنابراین می‌بایست در عملیات حفاری با تمهیداتی همچون آنتشاری کنترل شده و یا حفاری مکانیزه سعی در حفظ مقدار m و s به ترتیب در مقادیر بیشتر از $2/3 m_p$ و $2/3 s_p$ گردد تا باعث ایجاد تغییر شکل نسبی کمتری در توده سنگ گردند.

با توجه به کلیه موارد و نتایج ذکر شده می‌توان چنین استنتاج نمود که تکنولوژی حفاری باید به گونه‌ای طراحی گردد که منجر به حداقل کاهش مقاومت ذاتی توده سنگ در مرحله اول برای سنگ‌های باکیفیت متوسط (با رفتار کرنش نرم شونده) و در مرحله بعد برای سنگ‌های باکیفیت خوب (با رفتار شکننده) گردد. بنابراین توصیه می‌شود برای حفظ پارامترهای مقاومتی دو معیار نامبرده در محدوده نزدیک به مقادیر اوج تمهیداتی همچون آنتشاری کنترل شده و یا حفاری مکانیزه اتخاذ گردد.

۵- مراجع

[1] Park K.-H., Tontavanich B., Lee J.-G., 2007; "A simple procedure for ground response curve of circular tunnel in elastic-strain softening rock masses"; Tunnelling and Underground Space Technology 23, 151-159.

[2] Brown E.T., Bray J.W., Ladanyi B., Hoek E.; 1983; "Ground response curves for rock tunnels"; J. Geotech. Eng. ASCE 109, 15-39.

[3] Carranza-Torres C., Fairhurst C.; 1999; "The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the hoek-brown failure criterion"; Int. J. Rock Mech. Min. sci. 36, 777-809.

[4] Detournay E.; 1986; "Elastoplastic model of a deep tunnel for a rock with variable dilatancy" Rock Mech. Rock Eng. 19, 99-108.

[5] Alonso E., Alejano L.R., Varas F., Fdez-Manin, G., Carranza-Torres C.; 2003; "Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behaviour"; Int. J. Anal. Meth. Geomech. 27, 1153-1185.

[6] Lee Y.-K., Pietruszczak S.; 2008; "A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock

1. Isotrope
2. Hydrostatic
3. Tunnel boring machine
4. Ground reaction curve
5. Elastic-perfectly plastic
6. Elastic-brittle-plastic
7. Mohr-Coulomb
8. Hoek-Brown
9. Brown et al
10. Elastic-strain softening
11. Alonso et al
12. Duncan Fama