

بررسی تأثیر انواع مدل‌های رفتاری توده سنگ در منحنی عکس‌العمل زمین

علی‌رضا کارگر^۱، رضا رحمان‌نژاد^{۲*}

۱- دانش آموخته دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی معدن؛ Email: alikargar@yahoo.com

۲- دانشیار دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی- بخش مهندسی معدن؛ Email: r_rahmannejad@hotmail.com

(دریافت ۲۰ تیر ۱۳۸۸، پذیرش ۲۱ آذر ۱۳۸۹)

چکیده

امروزه روش همگرایی- همجواری از پرکاربردترین روش‌ها برای تعیین نگهداری حفاریات دایروی و غیر دایروی است. انتخاب مدل ساختاری مناسب برای توده‌سنگ، اعم از الاستوپلاستیک کامل، الاستوپلاستیک شکننده و الاستوپلاستیک نرم‌شونده، نقش بسیار مهمی در کاربرد این روش دارد. در مواردی میزان اختلاف در تغییرشکل ایجاد شده ناشی از انتخاب مدل‌های ساختاری متفاوت بیش از ۱۰۰ درصد است.

در این مقاله سعی شده است تا تأثیر انتخاب مدل‌های رفتاری مختلف در منحنی عکس‌العمل زمین و میزان زون پلاستیک ایجاد شده در اطراف یک حفره دایروی بررسی شود. در این مقاله فرض شده است که توده‌سنگ تحت تأثیر فشار ایزوتروپیک p_0 قرار دارد و رفتار اولیه الاستیک دارد. معیار شکست مورد استفاده معیار غیر خطی هوک‌براون است. روش حل مسئله روش پله‌ای است که در آن پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ به صورت گام به گام از مقادیر حداکثر خود تا مقادیر باقیمانده تغییر می‌کنند. در انتها یک آنالیز حساسیت روی پارامترهای شکست معیار هوک‌براون صورت می‌گیرد.

کلمات کلیدی

همگرایی-همجواری، مدل‌های ساختاری، مدل کرنش نرم‌شونده، معیار شکست

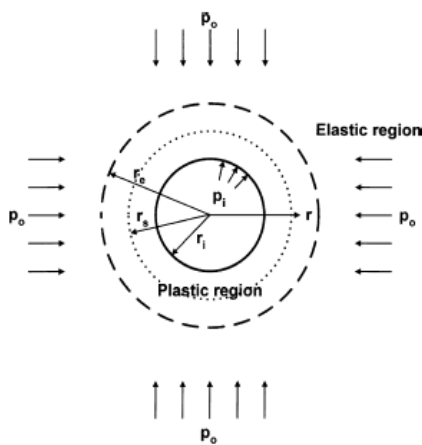
* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

۱- مقدمه

پارامترهای پلاستیک توده سنگ تغییر می‌کنند. این روش را براون و همکاران پیشنهاد کرده‌اند [۱۱]. معیار تسلیم مورد استفاده در اینجا معیار غیرخطی هوک-براون است.

۲- طرح مسئله

در شکل ۱ تونل دایروی که در توده سنگی پیوسته، همگن و ایزوتروپ^{۱۳} و به صورت اولیه الاستیک که تحت تنش اولیه p_0 قرار گرفته، نشان داده شده است. دیواره داخلی تونل تحت فشار داخلی p_i قرار دارد.



شکل ۱: تونل دایروی در فضای نامحدود [۱۲]

با کاهش p_i ، تغییر شکل در دیواره تونل رخ خواهد داد و هم‌زمان موجب گسترش زون پلاستیک در اطراف حفره می‌گردد. بر اثر رفتار الاستوپلاستیک نرم‌شونده (شکل ۲) سه زون مختلف در اطراف حفره ایجاد می‌شود. در ابتدا زون الاستیک، سپس پلاستیک نرم‌شونده و در انتها زون خرد شده در دیواره تونل تشکیل می‌گردد.

در زون نرم‌شونده با افزایش کرنش خصوصیات مقاومتی توده سنگ به حالت پسماند میل می‌کنند تا در نهایت در زون خرد شده به خصوصیات پسماند خود برسند. هدف در اینجا یافتن روشی برای دنبال کردن رفتار سنگ پس از مقاومت نهایی و یافتن منحنی عکس‌العمل زمین است. به علت وجود تقارن محوری در مسئله می‌توان معیار غیرخطی هوک-براون را بر حسب σ_r و σ_θ بازنویسی کرد.

امروزه منحنی عکس‌العمل زمین کاربرد وسیعی در طراحی فضاهای زیرزمینی دارد. باتوجه به این‌که میدان تنش اولیه هیدرواستاتیک^۱ است، می‌توان با توجه به حالت تقارن در مسئله، راه‌حلی تحلیلی پیدا نمود. این راه‌حل در شرایط زیادی همچون اعتبارسنجی مدل‌های ساختاری، ارزیابی پایداری حفریات دایروی همچون گمانه‌ها و تونل‌های حفاری شده با TBM^۲ و شکل منحنی عکس‌العمل نگهداری مفید است [۱]. [۳]

به منظور به دست آوردن منحنی عکس‌العمل زمین برای تونل‌های دایروی تعدادی از روش‌های تحلیلی برای حالت‌های الاستوپلاستیک کامل^۳ و الاستوپلاستیک شکننده^۴ با در نظر گرفتن معیار خطی موهر کولمب^۵ یا غیرخطی هوک-براون^۶ ارائه شده است [۴]-[۸].

براون و همکاران^۷ در سال ۱۹۸۳، روش عددی پله‌ای را بر پایه مدل کرنش الاستیک نرم‌شونده^۸ ارائه کردند. این روش که بر پایه معیار هوک-براون بود، کرنش الاستیک را در زون پلاستیک ثابت فرض می‌کرد که مقدار آن همان مقدار کرنش الاستیک در فصل مشترک زون الاستوپلاستیک بود.

در سال ۲۰۰۳، آلونسو و همکاران^۹ راه‌حلی با حل معادلات دیفرانسیل تعادل با در نظر گرفتن معادلات سازگاری و قانون جریان ارائه دادند.

در مسائل کاربردی مهندسی، زاویه اتساع سنگ را ثابت در نظر می‌گیرند و با این فرض، مسئله را حل می‌کنند. هوک^{۱۰} و براون در سال ۱۹۹۷ مدل‌های الاستوپلاستیک شکننده، الاستوپلاستیک نرم‌شونده و الاستوپلاستیک کامل را برای توده‌سنگ‌های با رفتار به ترتیب خیلی خوب، متوسط و ضعیف ارائه دادند که طبق نظر آن‌ها پیشنهاد شد زاویه اتساع ψ بر اساس زاویه اصطکاک داخلی سنگ ϕ برای این سه نوع رفتار به ترتیب $\phi/4$ ، $\phi/8$ و 0 در نظر گرفته شود.

دترنی^{۱۱} پیشنهاد کرد که زاویه اتساع متغیر برای مدل الاستوپلاستیک کامل طبق معیار موهر کولمب استفاده شود [۹]. آلونسو و آلیجینو^{۱۲} پیشنهاد کردند که از فاکتور زاویه اتساع در نقطه مقاومت حداکثر سنگ برای رفتار الاستوپلاستیک کامل و الاستوپلاستیک نرم‌شونده طبق معیار موهر کولمب استفاده شود [۱۰].

هدف از این مقاله بررسی تأثیر مدل‌های رفتاری سنگ در منحنی عکس‌العمل زمین با استفاده از برنامه نوشته شده در محیط MATLAB است که بر اساس روش گام‌به‌گام

$$h = \begin{cases} h_p - (h_p - h_r) \frac{\gamma^p}{\gamma^{p*}} & 0 \leq \gamma^p < \gamma^{p*} \\ h_r & \gamma^p \geq \gamma^{p*} \end{cases} \quad (6)$$

γ^{p*} مقداری از کرنش برشی پلاستیک است که در آن گذر از حالت نرم‌شونده به پسماند اتفاق می‌افتد. همانگونه که در رابطه ۵ دیده می‌شود تأثیر کرنش الاستیک در ناحیه پلاستیک نرم شونده لحاظ شده است بنابراین پارامترهای سختی توده سنگ طبق معیار هوک-براون و زاویه اتساع به صورت زیر تغییر می‌کند [۱۳].

$$\bar{m} = m_p - (m_p - m_r) \frac{\gamma^p}{\gamma^{p*}} \quad (7)$$

$$\bar{s} = s_p - (s_p - s_r) \frac{\gamma^p}{\gamma^{p*}} \quad (8)$$

$$\bar{\psi} = \psi_p - (\psi_p - \psi_r) \frac{\gamma^p}{\gamma^{p*}} \quad (9)$$

پارامترهای توده‌سنگ برای مدل‌های دیگر رفتاری همچون پلاستیک کامل و پلاستیک شکننده به راحتی با جای‌گذاری معادله‌های ۷، ۸ و ۹ محاسبه پذیرند.

برای حالت پلاستیک کامل:

$$\bar{m} = m_p = m_r \quad (10)$$

$$\bar{s} = s_p = s_r \quad (11)$$

برای حالت پلاستیک شکننده:

$$\bar{m} = m_r \quad (12)$$

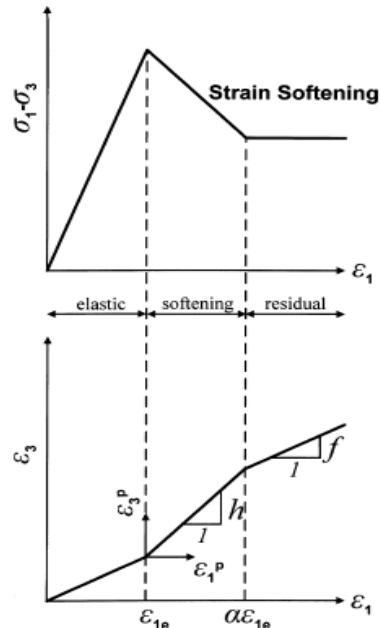
$$\bar{s} = s_r \quad (13)$$

۲-۱- محاسبه گام به گام برای سنگ با مدل الاستوپلاستی

نرم شونده

با فرض شرایط کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری در اطراف یک تونل دایروی، معادله‌های تعادل و کرنش-جابجایی در سیستم مختصات قطبی به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (14)$$



شکل ۲: مدل کرنش نرم شونده [۱۲]

برای مقاومت حداکثر:

$$F(\sigma_r, \sigma_\theta, h_p) = 0 \rightarrow \sigma_\theta = \sigma_r + \sqrt{m_p \sigma_c \sigma_r + s_p} \quad (1)$$

برای بخش نرم شونده:

$$F(\sigma_r, \sigma_\theta, \bar{h}) = 0 \rightarrow \sigma_\theta = \sigma_r + \sqrt{\bar{m} \sigma_c \sigma_r + \bar{s}} \quad (2)$$

برای مقاومت باقیمانده:

$$F(\sigma_r, \sigma_\theta, h_r) = 0 \rightarrow \sigma_\theta = \sigma_r + \sqrt{m_r \sigma_c \sigma_r + s_r} \quad (3)$$

که در اینجا تابع F تابع تسلیم است و h پارامتر سختی، σ_c مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر، m و s ثابت‌های هوک-براون سنگ که به ترتیب به نوع سنگ و میزان درزه‌داری آن بستگی دارد.

h ، پارامتر سختی، براساس نظریه آلونسو به صورت تابعی از کرنش برشی پلاستیک بیان می‌گردد [۱۳].

$$h = h(\gamma^p) \quad (4)$$

$$\gamma^p = \varepsilon_\theta^p - \varepsilon_r^p = (\varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^e) - (\varepsilon_r - \varepsilon_r^e) \quad (5)$$

که در اینجا ε_θ^p کرنش مماسی پلاستیک و ε_r^p کرنش شعاعی پلاستیک است. طبق نظریه آلونسو پارامتر سختی به صورت خطی از مقدار حداکثر (در نقطه مقاومت حداکثر) تا مقدار پسماند (در نقطه مقاومت باقیمانده) تغییر می‌کند [۱۳].

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

تنش شعاعی در فصل مشترک زون الاستوپلاستیک که $r = r_e$ است برای معیار هوک-براون به صورت زیر محاسبه می شود [۱۴].

$$\sigma_{re} = \frac{1}{2} (\beta - \sqrt{\beta^2 + 4\beta p_o + s_p \sigma_c^2}) + p_o \quad (26)$$

که در اینجا:

$$\beta = \frac{(m_p \sigma_c)}{4} \quad (27)$$

با استفاده از معادله ۲۵ به عنوان نقطه شروع، مقادیر متوالی $\sigma_{r(j)}$ از طریق معادله ۱۶ برای شعاع‌های نتیجه شده از رابطه ۲۰ محاسبه می شود.

کرنش برشی پلاستیک در شعاع r_j به صورت تقریبی طبق رابطه زیر تعیین می شود.

$$\gamma^p = \varepsilon_{\theta(j-1)} - \varepsilon_{r(j-1)} + \frac{1}{2G} \{ \sigma_{r(j-1)} - \sigma_{\theta(j-1)} \} \quad (28)$$

همان گونه که دیده شد، چنان چه γ^p به γ^{p*} برسد توده سنگ وارد شرایط پسماند می گردد.

۳- روش کار و بحث

سه مدل رفتاری سنگ پس از مقاومت نهایی، الاستوپلاستیک کامل، الاستوپلاستیک نرم شونده و الاستوپلاستیک شکننده است که در مدل اول (الستوپلاستیک کامل) مقاومت توده سنگ پس از مقاومت حداکثر در منحنی تنش-کرنش به صورت یکنواخت و ثابت ادامه می یابد. در این حالت خصوصیات مقاومتی توده سنگ در حالت حداکثر و باقیمانده باهم برابر است. در مدل الاستوپلاستیک نرم شونده مقاومت توده سنگ پس از نقطه مقاومت حداکثر در منحنی تنش-کرنش با آهنگی ثابت کاهش می یابد تا به مقاومت پسماند توده سنگ برسد؛ در این حالت خصوصیات مقاومتی توده سنگ نیز به صورت یکنواخت از مقدار حداکثر در نقطه مقاومت نهایی توده سنگ به سمت مقدار باقیمانده خود در حالت پسماند تمایل دارد. در مدل الاستوپلاستیک شکننده مقاومت توده سنگ به صورت ناگهانی در منحنی تنش-کرنش سنگ از حالت حداکثر در نقطه مقاومت نهایی به حالت پسماند تمایل دارد؛ همین اتفاق برای خصوصیات مقاومتی توده سنگ نیز رخ می دهد.

$$\varepsilon_r = -\frac{du}{dr}, \varepsilon_{\theta} = -\frac{u}{r} \quad (15)$$

با تقسیم بندی ناحیه پلاستیک به تعدادی رینگ های حلقوی نازک، تنش شعاعی در فاصله r_j طبق معیار تسلیم هوک-براون به شکل زیر محاسبه می شود [۱۱].

$$\sigma_{r(j)} = b - \sqrt{b^2 - a} \quad (16)$$

که در اینجا:

$$a = \sigma_{r(j-1)} - 4k \left[\frac{1}{2} \bar{m} \sigma_c \sigma_{r(j-1)} + \bar{s} \sigma_c^2 \right] \quad (17)$$

$$b = \sigma_{r(j-1)} + km \sigma_c \quad (18)$$

$$k = \left(\frac{r_{j-1} - r_j}{r_{j-1} + r_j} \right)^2 \quad (19)$$

شعاع رینگ جدید از رابطه زیر به دست می آید.

$$\frac{r_j}{r_{j-1}} = \frac{2\varepsilon_{\theta(j-1)} - \varepsilon_{r(j-1)} - \varepsilon_{r(j)}}{2\varepsilon_{\theta(j)} - \varepsilon_{r(j-1)} - \varepsilon_{r(j)}} \quad (20)$$

نمو کرنش مماسی به شکل زیر تعریف می شود.

$$d\varepsilon_{\theta(j)} = \varepsilon_{\theta(j)} - \varepsilon_{\theta(j-1)} \quad (21)$$

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

$$d\varepsilon_r^p = -\beta d\varepsilon_{\theta}^p \quad (22)$$

$$d\varepsilon_{r(j)} = d\varepsilon_{r(j-1)} - \beta (d\varepsilon_{\theta(j)} - d\varepsilon_{\theta(j-1)}) \quad (23)$$

که در اینجا $d\varepsilon_{r(j-1)}^e$ و $d\varepsilon_{\theta(j-1)}^e$ به ترتیب مقدار نمو کرنش شعاعی و مماسی در شعاع r_{j-1} و $\beta = \frac{1 + \sin \bar{\psi}}{1 - \sin \bar{\psi}}$ است.

با انتخاب مقادیر فرضی کوچک برای $d\varepsilon_{\theta}$ مقادیر $\varepsilon_{\theta(j)}$ ، $\varepsilon_{r(j)}$ و u_j با استفاده از معادلات ۲۱، ۲۲، ۲۰ و ۱۵ به ترتیب محاسبه می شوند. فرایند به صورت پله ای تکرار می گردد تا تنش، کرنش و جابجایی به طور کامل در ناحیه پلاستیک تعیین گردد. کرنش های الاستیک در فاصله r_j از محور تونل با استفاده از رابطه تنش-کرنش الاستیک به صورت زیر محاسبه می شوند.

$$\varepsilon_{r(j)}^e = \frac{1}{2G} [(1-\nu)(\sigma_{r(j)} - p_o) - \nu(\sigma_{\theta(j)} - p_o)] \quad (24)$$

که در اینجا G مدول برشی و ν نسبت پواسون است.

در مرحله اول به بررسی این سه مدل رفتاری و مقایسه آن‌ها در توده‌سنگ پرداخته می‌شود.

۳-۱- مقایسه مدل‌ها
دوسری از داده‌ها که در جدول ۱ ذکر شده‌اند، بررسی شدند.

جدول ۱: طبقه‌بندی رودهدرها [۱]

سری ۳	سری ۲	سری ۳-۱	سری ۲-۱	سری ۱-۱	
۴۸۰	۴۰۰۰	۵۵۰۰	۱۳۸۰	۱۳۸۰	مدول یانگ، $(Mpa)E$
۰/۲۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	نسبت پواسون، ν
۵	۱۰۸	۱۵	۱۰	۳/۳۱	تنش اولیه زمین، P_0
۵	۴	۵	۵/۳۵	۵/۳۵	شعاع تونل، r_i
۷/۵	۳۰۰	۳۰	۳۰	۲۷/۶	مقاومت فشاری تک محوره، σ_c
۰/۵۵	۷/۵	۱/۷	۴/۵	۰/۵	m_p
۰	۰/۱	۰/۰۰۳۹	۰/۰۲	۰/۰۰۱	s_p
۰/۵۵	۱	۱	۰/۴۵	۰/۱	m_r
۰	۰/۰۱	۰	۰/۰۰۲	۰	s_r
۲۲/۴	۵۵	۳۰	۴۰	۳۰	ϕ_p
۰	۳۶	۳۰	۲۷	۱۹/۴۷	ψ_p
۰	۰	۳۰	۰	۵/۲۲	ψ_r
۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴۷۴۲	۰/۰۰۴۷۴۲	γ^{p*}

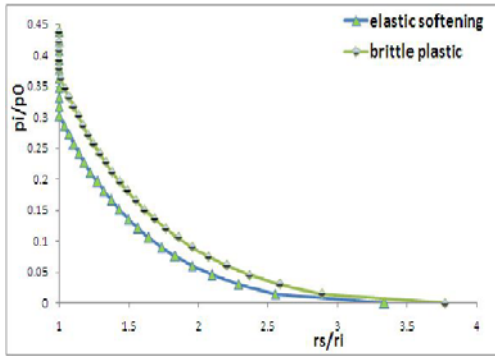
در نتیجه هنگامی که تنش شعاعی به σ_{re} (تنش در مرز زون الاستیک-پلاستیک) می‌رسد تفاوت شعاع زون پلاستیک بسیار اندک است.

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که نمودار شعاع زون خرد شده برای حالت الاستوپلاستیک شکننده بالاتر از حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده قرار می‌گیرد که این به علت کاهش ناگهانی پارامترهای مقاومتی سنگ به حالت پسماند در مرز زون الاستیک-پلاستیک است؛ در واقع سنگ به محض تسلیم وارد مرحله پسماند می‌شود. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که تغییر شکل‌ها در حالت الاستوپلاستیک کامل به مراتب کمتر از حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده و شکننده است که علت آن کاهش کرنش‌های پلاستیک در زون پلاستیک و همچنین کوچک بودن شعاع زون پلاستیک در حالت الاستوپلاستیک کامل است؛ اما نکته جالب در اینجا نزدیک بودن منحنی عکس‌العمل زمین در حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده و الاستوپلاستیک شکننده است. در واقع، توده سنگ در حالت الاستوپلاستیک شکننده تقریباً همان تغییر شکل‌هایی را ایجاد کرده که در حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده به وجود آمده

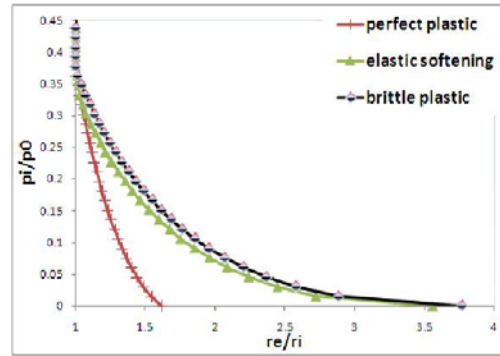
روی داده‌های سری ۱-۱ و ۲-۱، سه مدل رفتاری ماده به صورت زیر بررسی شد.

- ۱- حالت الاستوپلاستیک کامل، $m = m_p$ ، $s = s_p$ و $\psi = \psi_p$
- ۲- حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده \bar{m} ، \bar{s} و $\bar{\psi}$ متغیر از حالت پیک تا باقیمانده.
- ۳- حالت الاستوپلاستیک شکننده.

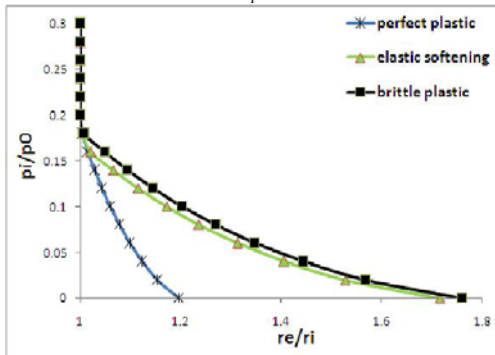
مطابق شکل ۳، شعاع زون پلاستیک در حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده و شکننده بیشتر از حالت الاستوپلاستیک کامل است که علت آن کاهش خصوصیات مقاومتی سنگ در دو حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده و شکننده است، درحالی‌که در حالت الاستوپلاستیک کامل سنگ خصوصیات مقاومتی خود را حفظ کرده، لذا شعاع زون پلاستیک در این حالت کمترین مقدار است. شعاع زون پلاستیک در حالت الاستوپلاستیک شکننده به مقدار ناچیزی بیشتر از حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده است. علت این امر می‌تواند ناشی از تفاوت بسیار ناچیز گرادپان تنش شعاعی در زون نرم‌شونده در حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده و شکننده باشد.



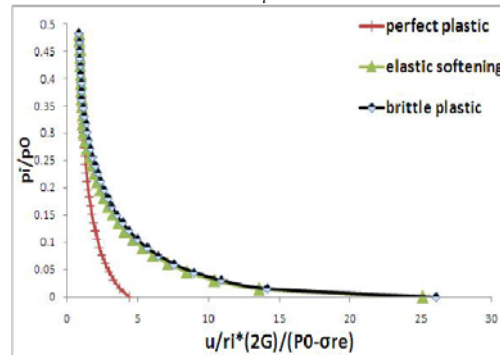
شکل ۴: تغییرات $\frac{r_s}{r_i}$ (داده سری ۱-۱)



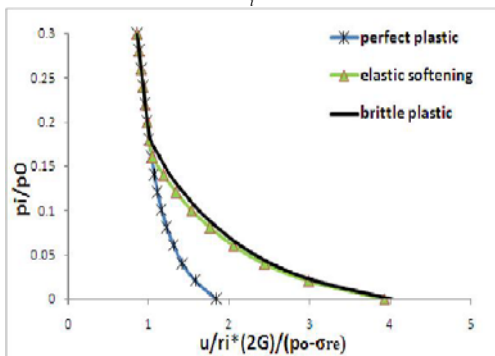
شکل ۳: تغییرات $\frac{r_e}{r_i}$ (داده سری ۱-۱)



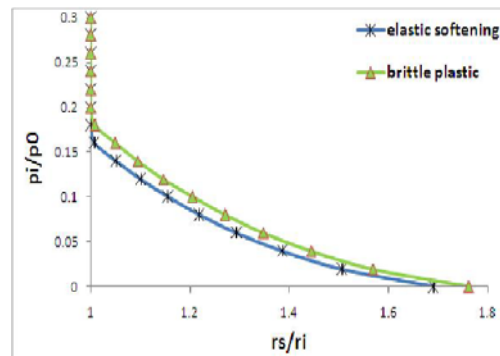
شکل ۶: تغییرات $\frac{r_e}{r_i}$ (داده سری ۲-۱)



شکل ۵: منحنی عکس العمل زمین (داده سری ۱-۱)



شکل ۸: منحنی عکس العمل زمین (داده سری ۲-۱)



شکل ۷: تغییرات $\frac{r_s}{r_i}$ (داده سری ۲-۱)

در همین زون است و از طرفی در حالت الاستوپلاستیک شکننده به علت از دست رفتن خصوصیات مقاومتی سنگ کرنش پلاستیک ایجاد شده در این زون افزایش می‌یابد. بنابراین تأثیر متضاد این دو پارامتر در نهایت موجب تغییرات کرنش بسیار نزدیک در این زون می‌گردد و تغییر شکل دیواره در این دو حالت بسیار نزدیک به یکدیگر می‌شود.

چنین بررسی برای داده‌های سری ۱-۲ نیز صورت گرفت و نتایج مشابهی حاصل شد که در اشکال ۶، ۷ و ۸ مشاهده می‌شوند. گفتنی است که داده‌های انتخاب شده برای بررسی از

است. علت این امر را می‌توان در تأثیر دو پارامتر زاویه اتساع و خصوصیات مقاومتی سنگ جستجو کرد. در زون نرم‌شونده در حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده زاویه اتساع از ماکزیمم مقدار خود در مرز زون با آهنگی ثابت در حال کاهش است و در مرز زون خرد شده به مقدار پسماند خود می‌رسد. از طرفی طبق رابطه ۲۲ زاویه اتساع نقش مستقیم در انتقال نمو کرنش پلاستیک از حالت مماسی به شعاعی دارد. بنابراین در زون نرم‌شونده در حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده این ضریب انتقال کرنش به مراتب بزرگتر از آن در حالت الاستوپلاستیک شکننده

در مرحله دوم آنالیز حساسیت پارامتر m_r برای بررسی انتخاب

شد که به ترتیب مقادیر $\frac{m_p}{3}$ ، $\frac{2}{3}m_p$ و m_p را اختیار کرد.

در شکل ۱۲ که مربوط به داده‌های سری ۱-۱ است مشاهده می‌شود که با افزایش m_r ، نمودار p-u توده‌سنگ از حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده به طرف الاستوپلاستیک کامل جابجا می‌گردد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ که مربوط به داده‌های سری ۱-۲ و ۱-۳ هستند نیز همین روند مشاهده می‌گردد. با توجه به این اشکال مشخص می‌شود که در حالت $m_r = m_p$ این تفاوت نسبت به مدل پلاستیک کامل بسیار ناچیز است.

۴- نتیجه‌گیری

۱- از میان مدل‌های رفتاری توده سنگ، مدل الاستوپلاستیک شکننده باعث ایجاد بیشترین تغییرشکل در منحنی عکس-العمل زمین برای یک توده سنگ می‌شود.
 ۲- با تحلیل پارامتری صورت گرفته روی معیار هوک‌براون در سنگ‌های با کیفیت متوسط، این نتیجه حاصل شد که افزایش پارامتر m_r تأثیر بیشتری نسبت به افزایش پارامتر s_r در کاهش جابجایی دیواره تونل دارد. بنابراین سعی در حفظ پارامتر m توده‌سنگ با استفاده از روش‌هایی همچون آتشیاری کنترل شده و یا حفاری ضروری است.

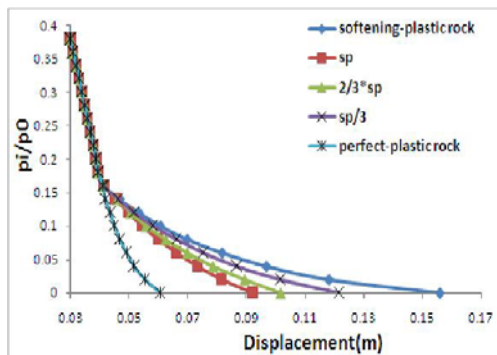
میان سنگ‌های با رفتار الاستوپلاستیک نرم‌شونده انتخاب گردید.

۳-۲- آنالیز حساسیت پارامترهای معیار هوک‌براون

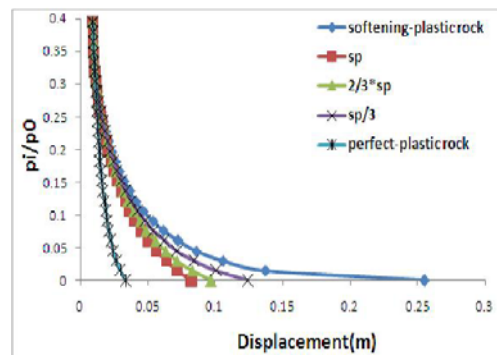
در این بخش به بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای شکست در معیار هوک‌براون بر منحنی عکس‌العمل زمین پرداخته می‌شود. بررسی‌های انجام شده بر روی سنگ‌های با کیفیت متوسط صورت می‌گیرد.

به این منظور، در ابتدا تغییرات ایجاد شده ناشی از تغییر پارامتر s_r (پارامتر درزه‌داری معیار هوک-براون)، به ترتیب برای مقادیر $\frac{s_p}{3}$ ، $\frac{2}{3}s_p$ و s_p به ازاء ثابت ماندن بقیه پارامترها، بررسی شد.

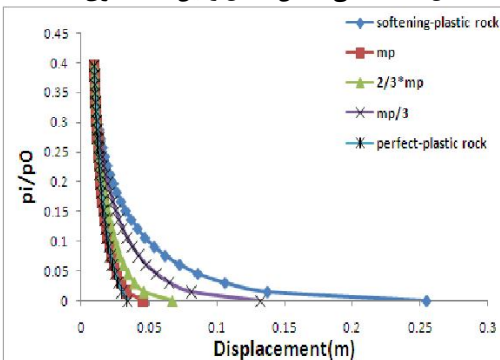
به ازاء داده‌های سری ۱-۱، همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش پارامتر s_r منحنی فشار-تغییرشکل سنگ از حالت الاستوپلاستیک نرم‌شونده به سمت الاستوپلاستیک کامل جابجا می‌گردد. در شکل ۱۰ و ۱۱ نیز همین روند را برای داده‌های سری ۱-۲ و ۱-۳ مشاهده می‌شود. طبق این شکل‌ها، در حالت $s_r = s_p$ تفاوت نسبت به حالت پلاستیک کامل بیش از ۱۰۰ درصد است.



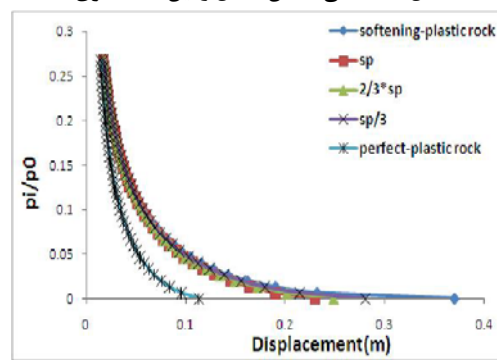
شکل ۱۰: منحنی عکس‌العمل زمین (داده سری ۱-۱)



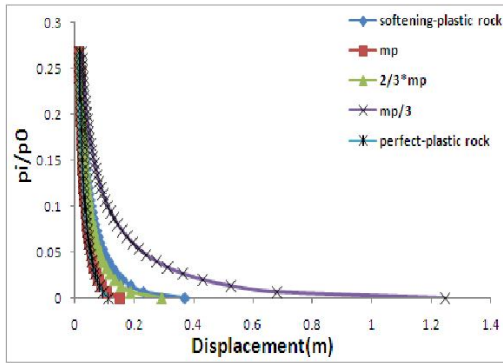
شکل ۹: منحنی عکس‌العمل زمین (داده سری ۱-۱)



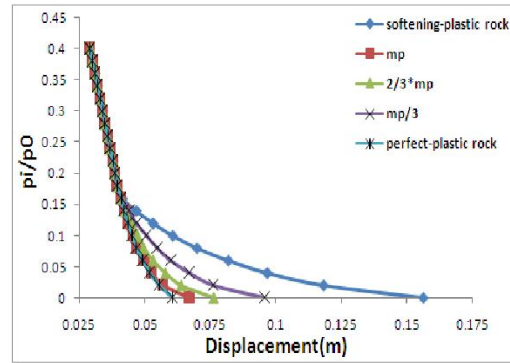
شکل ۱۲: منحنی عکس‌العمل زمین (داده سری ۱-۱)



شکل ۱۱: منحنی عکس‌العمل زمین (داده سری ۱-۱)



شکل ۱۴: منحنی عکس العمل زمین (داده سری ۳-۱)



شکل ۱۳: منحنی عکس العمل زمین (داده سری ۲-۱)

$$m_j = m_r; s_j = s_r$$

10.2. For elastic-strain softening model

If $\gamma^p \leq \gamma^{p*}$ then

$$m_j = m_p - (m_p - m_r) \frac{\gamma^p}{\gamma^{p*}}$$

$$s_j = s_p - (s_p - s_r) \frac{\gamma^p}{\gamma^{p*}}$$

Else $m_j = m_r; s_j = s_r$

10.3. For perfect plastic model

$$m_j = m_r = m_p$$

$$s_j = s_r = s_p$$

$$11. \quad d\varepsilon_{rj} = d\varepsilon_{rj-1} - \beta (d\varepsilon_{\theta j} - d\varepsilon_{\theta j-1})$$

$$12. \quad \varepsilon_{\theta j} = \varepsilon_{\theta j-1} + d\varepsilon_{\theta j}; \varepsilon_{rj} = \varepsilon_{rj-1} + d\varepsilon_{rj}$$

$$13. \quad \frac{\lambda_j}{\lambda_{j-1}} = \frac{2\varepsilon_{\theta(j-1)} - \varepsilon_{r(j-1)} - \varepsilon_{r(j)}}{2\varepsilon_{\theta(j)} - \varepsilon_{r(j-1)} - \varepsilon_{r(j)}}$$

$$14. \quad k_j = \left(\frac{\lambda_{j-1} - \lambda_j}{\lambda_{j-1} + \lambda_j} \right)^2$$

$$15. \quad \sigma_{r(j)} = b - \sqrt{b^2 - a};$$

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

$$b = \sigma_{r(j-1)} + km \sigma_c$$

$$16. \quad \sigma_{\theta j} = \sigma_{rj} + \sqrt{m_j \sigma_c \sigma_{rj} + s_j \sigma_c^2}$$

$$17. \quad \varepsilon_{rj}^e = \frac{1}{2G} [(1-\nu)(\sigma_{rj} - p_o) - \nu(\sigma_{\theta j} - p_o)]$$

$$18. \quad \varepsilon_{\theta j}^e = \frac{1}{2G} [(1-\nu)(\sigma_{\theta j} - p_o) - \nu(\sigma_{rj} - p_o)]$$

$$19. \quad d\varepsilon_{rj}^e = \varepsilon_{rj}^e - \varepsilon_{rj-1}^e; d\varepsilon_{\theta j}^e = \varepsilon_{\theta j}^e - \varepsilon_{\theta j-1}^e$$

۵- تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت هسته پژوهشی طراحی و ساخت ابنیه زیرزمینی در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر انجام گرفته است.

۶- ضمائم

در این بخش الگوریتم برنامه به صورت مرحله به مرحله آورده شده است.

$$1. \quad \sigma_{re} = \frac{1}{2} \left(\beta - \sqrt{\beta^2 + 4\beta p_o + s_p \sigma_c^2} \right) + p_o;$$

$$\beta = \frac{(m_p \sigma_c)}{4}$$

$$2. \quad \sigma_{r1} = \sigma_{re}$$

$$3. \quad \sigma_{\theta 1} = 2p_o - \sigma_{re}$$

$$4. \quad \varepsilon_{r1}^e = \frac{1}{2G} [(1-\nu)(\sigma_{r1} - p_o) - \nu(\sigma_{\theta 1} - p_o)]$$

$$5. \quad \varepsilon_{\theta 1}^e = \frac{1}{2G} [(1-\nu)(\sigma_{\theta 1} - p_o) - \nu(\sigma_{r1} - p_o)]$$

$$6. \quad m_1 = m_p; s_1 = s_p; \psi_1 = \psi_p; \lambda_1 = 1$$

$$7. \quad d\varepsilon_{\theta j} = 0.01 \varepsilon_{\theta j-1}$$

$$8. \quad \gamma^p = \varepsilon_{\theta j-1} - \varepsilon_{rj-1} + \frac{1}{2G} \{ \sigma_{rj-1} - \sigma_{\theta j-1} \}$$

9. If $\gamma^p \leq \gamma^{p*}$ then

$$\psi_j = \psi_p - (\psi_p - \psi_r) \frac{\gamma^p}{\gamma^{p*}}$$

Else $\psi_j = \psi_r$

10. Sequences for different models

10.1. For brittle-plastic model

- [8] 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. Anal. Meth. Geomech. 2, 367-379.
- [9] Detournay, E., 1986. *Elastoplastic model of a deep tunnel for a rock with variable dilatancy*. Rock Mech. Rock Eng. 19, 99-108.
- [10] Alejano, L.R., Alonso, E., 2005. *Consideration of the dilatancy angle in rocks and rock masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 42, 481-507.
- [11] Brown, E.T., Bray, J.W., Ladanyi, B., Hoek, E., 1983. *Ground response curves for rock tunnels*. J. Geotech. ASCE 109, 15-39.
- [12] Park, K.H., Tontavanich, B., Lee, J.G., 2008. *A simple procedure for ground response curve of circular tunnel in elastic-strain softening rock masses*. Tunnel. Under. space Technol. 23, 151-159.
- [13] Alonso, E., Alejano, L.R., Varas, F., Fdez-Manin, G., Carranza-Torres, c., 2003. *Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behavior*. Int. J. Anal. Meth. Geomech. 27, 1153-1185.
- [14] 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.
- [15] Lee, Y.K., Pietruszczak, S., 2007. *A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass*. Tunnel. Under. Space Technol. 23, 588-599.
20. If $\sigma_{ij} < p_i$ then
calculate process for the next ring by
 $j = j + 1$
Else $r_e = r / \lambda_j$; $u = r \varepsilon_{\theta j}$

منابع

- [1] Guan, Z., Jiang, Y., Tanabasi, Y., 2007, *Ground reaction analyses in conventional tunneling excavation*. Tunnel. Under. space Technol. 22, 230-237.
- [2] Hoek, E., Brown, E.T., 1980. *Underground Excavation in rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [3] Hoek, E., Brown, E.T., 1997. *Practical estimates of rock mass strength*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 34(8), 1165-1186.
- [4] 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. Abstr. 32, 215-225.
- [5] Florence, A.L., Schwer, L.E., 1978. *Axisymmetric compression of a Mohr- Coulomb medium around a circular hole*. Int. J. Number.
- [6] 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.
- [7] Sharan, S.K., 2003. *Elastic-brittle-plastic analysis of circular openings in Hoek-Brown media*. Int. J. rock mech. Min. Sci. 40, 817-824.

پی‌نوشت

- 1 Hydrostatic
2 Tunnel boring machine
3 Elastic-perfectly plastic
4 elastic-brittle-plastic
5 Mohr-Coulomb
6 Hoek-Brown
7 Brown et al.
8 elastic-strain softening
9 Alonso et al.
10 Hoek
11 Detourany
12 Alejano
13 Isotrope

