

## یادداشت تحقیقاتی:

# تحلیل الاستوپلاستیک تونل با در نظر گرفتن تغییر غیر خطی پارامترهای مقاومتی از پیک به ماندگار، در مرحله‌ی نرم کرنشی

احمد فهیمی فر\*، الهه محمدی<sup>۱</sup>

۱. استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش خاک و پی دانشگاه تفرش<sup>۱</sup>

Fahim@aut.ac.ir\*

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۱۱/۵]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۹/۱۲]

**چکیده-** در این مقاله یک روش ساده برای منحنی پاسخ زمین در تونل‌های دایره‌ای حفاری شده در توده سنگ‌های با رفتار نرم کرنشی، با به کارگیری معیار خرابی غیرخطی هوک- براون ارائه شده است. بیشتر پژوهشگران تغییر پارامترهای مقاومتی از پیک به ماندگار، در ناحیه نرم کرنشی را، به صورت یک تابع خطی در نظر گرفته‌اند. در این مقاله به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار نرم کرنشی، این تغییرات به صورت غیرخطی مدل می‌شوند. به این ترتیب پارامترهای اتساع، زاویه‌ی اصطکاک و ثابت‌های معیار خرابی از نقطه‌ی پیک به ماندگار ثابت نیستند. برای بررسی دقت و کاربرد عملی روش پیشنهادی به مقایسه این روش با سایر روش‌های ساده سازی شده و دقیق از قبیل Park et al. 2007 و Brown et al. 1983 پرداخته شده است که نزدیکی بسیار زیاد نتایج حاصل از این روش، به نتایج روش Park حاکی از دقت بسیار زیاد روش تحلیلی پیشنهادی است. تأثیر مقدار پارامتر نرم‌کرنشی روی تغییر پارامترهای مقاومتی نیز با ترسیم منحنی پاسخ‌های مختلف بررسی شده است.

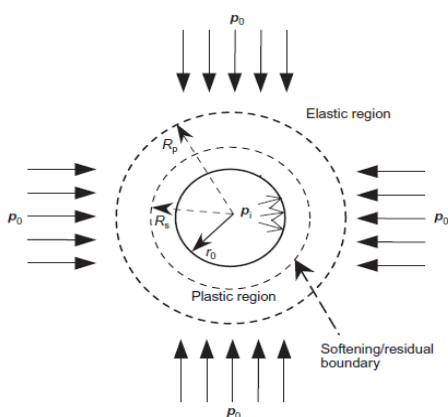
**واژگان کلیدی-** منحنی پاسخ زمین، رفتار نرم کرنشی، معیار خرابی هوک- براون

## مقدمه

موهر- کولمب و معیار هوک- براون مطالعه کرده‌اند و مدل‌های الاستیک کاملاً پلاستیک، الاستیک- شکننده پلاستیک و نرم کرنشی را در نظر گرفته‌اند. بر مبنای بازبینی پژوهش‌های موجود، مدل نرم کرنشی به واقعیت رفتاری توده سنگ‌ها نزدیک‌تر است. اما مدل کردن این مصالح به علت شیب منفی در نمودار تنش- کرنش از پیچیدگی برخوردار است. به گونه‌ای که برای حفاری تونل‌های دایره‌ای در این مصالح تلاش‌های کمتری انجام شده است [۷-۱] و آن به این دلیل است که رابطه‌ی بین تنش‌ها،

هرچند مطالعه و تحلیل تونل‌های دایره‌ای حفاری شده در توده سنگ‌های همگن و ایزتروپ، تحت میدان تنش هیدروستاتیک ساده است، اما نتایج تحلیل تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها پیرامون حفره‌های دایره‌ای بینش کاملی برای طراحی حائل و ارزیابی پایداری تونل فراهم می‌کند. علاوه بر این، روش‌های تحلیلی در بازبینی مدل‌های ساختاری و برنامه‌های عددی مفید است. در چند دهه گذشته، پژوهشگران زیادی این نوع مسائل را با به کارگیری معیار

کمتر شود، توده سنگ دچار تغییر شکل‌های غیرالاستیک شده و یک ناحیه با شعاع  $R_{pl}$  در اطراف تونل ایجاد می‌شود، که ناحیه پلاستیک نامیده می‌شود. پس از جاری شدن، مقاومت توده سنگ وارد قسمت نرم کرنشی می‌شود. در توده سنگ‌هایی با رفتار نرم کرنشی، ناحیه پلاستیک از دو ناحیه نرم شونده (Softening) و ماندگار (Residual) تشکیل شده است. شعاع ناحیه نرم کرنشی با  $R_S$  نمایش داده شده است.



شکل ۱: نمایش شماتیک تونل در فضای بی‌نهایت

### فشار حائل بحرانی $P_{cr}$

مقدار فشار حائل بحرانی  $P_{cr}$  بستگی به معیار خرابی دارد، هنگامی که معیار خرابی M-C (موهر-کولمب) باشد [۸]:

$$P_{cr} = (2\sigma_0 - Y)/(\alpha + 1) \quad (1)$$

زمانی که معیار خرابی H-B (هوک-براون) باشد [۸]:

(۲)

$$P_{cr} = \sigma_0 - \sigma_c (0.5\sqrt{(m/4)^2 + m\sigma_0/\sigma_c} + s - m/8)$$

و اگر معیار تعمیم داده شده H-B که به

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( \frac{m_b \sigma_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a$$

شکل  $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( \frac{m_b \sigma_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a$  فرمول‌بندی می‌شود، استفاده شود،  $P_{cr}$  را می‌توان به روش عددی و با به

کرنش پلاستیک و پارامترهای مقاومتی در طی مرحله نرم کرنشی پیچیده است.

براون [۲] از جمله پژوهشگران نخستین برای این مسئله بود که منحنی پاسخ زمین (Ground Response Curve- GRC) را با فرض کرنش الاستیک ثابت در ناحیه پلاستیک به دست آورد، که جابه‌جایی داخلی به دلیل این فرض کمتر از واقعیت تخمین زده می‌شود.

Panet [۳] و Guan [۴] نیز راه‌حلی به دست آوردند، اما آن‌ها فقط کاهش چسبندگی و زاویه اتساع را در محدوده نرم کرنشی در نظر گرفتند و از تغییر زاویه اصطکاک داخلی چشم‌پوشی کردند.

بر مبنای تئوری کلاسیک پلاستیسیته، Alonso [۵] از روش همانندسازی (Self-Similar) در تونل دایره‌ای در توده سنگ‌های نرم کرنشی استفاده کرد و تأثیر پارامترهای مقاومتی روی GRC را به تفضیل بررسی کرد.

Lee and Pietruszczak [۶] و Park [۷] این مسئله را به وسیله‌ی روش تفاضل محدود مطالعه کردند و به محاسبه و تحلیل تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها در ناحیه پلاستیک پرداختند.

بیشتر این پژوهشگران، تغییر پارامترهای مقاومتی از پیک به ماندگار را به صورت یک تابع خطی در نظر گرفته‌اند که در ادامه بحث خواهد شد. در این مقاله، این تغییرات به صورت غیرخطی در نظر گرفته می‌شود.

### توصیف مسئله و فرآیند تحلیل

#### توصیف مسئله

تونل مورد بحث در شکل ۱ نمایش داده شده است. یک تونل دایره‌ای طویل که در محیط پیوسته، همگن، ایزوتروپ و تحت شرایط تنش هیدرواستاتیک  $P_0$  حفاری شده است. فشار داخلی تونل با  $P_{in}$  نمایش داده شده که به طور یکنواخت در امتداد سطح حفاری توزیع شده است. در صورتی که فشار حائل درونی  $P_{in}$  از فشار بحرانی  $P_{cr}$

مقاومت ماندگار نتیجه شود. در حالت کلی ضخامت حلقه-های پلاستیک با یکدیگر برابر نیست و به طور خودکار به وسیلهی فرآیند عددی تعیین می‌شوند [۸]. معادله تعادل برابر است با:

$$\frac{d\sigma_r(r)}{dr} - \frac{\sigma_\theta(r) - \sigma_r(r)}{r} = 0 \quad (6)$$

اگر معیار خرابی H-B باشد، داریم:

$$\sigma_\theta = \sigma_r + \sqrt{m\sigma_c\sigma_r + s\sigma_c^2} \quad (7)$$

و اگر معیار خرابی H-B تعمیم یافته باشد، داریم:

$$\sigma_\theta = \sigma_r + \bar{\sigma}_{ci} \left( \frac{\bar{m}\sigma_r}{\bar{\sigma}_{ci}} + \bar{s} \right)^{\bar{a}} \quad (8)$$

در این رابطه،  $\bar{\sigma}_c$ ،  $\bar{a}$ ،  $\bar{s}$  و  $\bar{m}$  پارامترهای نامعلوم مقاومتی هوک-براوناست.

بیشتر پژوهشگران، از جمله Alonso این پارامترهای مقاومتی را به صورت زیر تعریف کرده‌اند [۵]:

(۹)

$$x(\eta) = \begin{cases} x_p - (x_p - x_r) \frac{\eta}{\eta^*} & 0 < \eta < \eta^* \\ x_r & \eta > \eta^* \end{cases}$$

که  $x$  نماینده‌ی پارامترهای مقاومتی مثل  $m$ ،  $\psi$ ،  $a$  و  $s$  است. همچنین علائم  $p$  و  $r$  به ترتیب حروف اول کلمات Peak و Residual هستند که به مؤلفه‌های پیک و ماندگار اشاره می‌کنند.

در این رابطه،  $\eta$  کرنش پلاستیک انحرافی و  $\eta^*$  کرنش پلاستیک انحرافی بحرانی است که  $\eta^*$  از رفتارماندگار شروع می‌شود و می‌توان آن را به وسیله‌ی آزمایش تعیین کرد. (Alonso برای به دست آوردن مقدار این پارامتر، رابطه‌ای را در مقاله خود معرفی نموده است [۱۰]).

در رابطه (۹)، تغییر پارامترهای مقاومتی از پیک به ماندگار به صورت خطی مدل می‌شوند. در این مقاله، برای مدل کردن تغییر غیرخطی از پیک ( $P$ ) به ماندگار ( $r$ )، همان گونه

کارگیری روش نیوتن-رافسون، از معادله‌ی زیر به دست آورد [۸]:

$$\sigma_{ci} \left( m_b \frac{p_{cr}}{\sigma_{ci}} + s \right)^a - 2(p_0 - p_{cr}) = 0 \quad (3)$$

از این رو به عنوان حدس اولیه در تعیین فشار بحرانی، پارامتر  $a$  برابر ۰/۵ فرض شده و میزان فشار بحرانی اولیه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$p_{cr}^{a=0.5} = p_0 - \frac{1}{2} \left( \sqrt{\left( \frac{m_b}{4} \right)^2 + m_b \frac{p_\theta}{\sigma_{ci}} + s} - \frac{m_b}{8} \right) \sigma_{ci} \quad (4)$$

با انجام یک گام محاسباتی از روش نیوتن-رافسون، می‌توان با دقت بسیار قابل قبولی، فشار بحرانی را تعیین کرد [۹]:

(۵)

$$p_{cr} = p_{cr}^{a=0.5} + \frac{2(p_0 - p_{cr}^{a=0.5}) - \sigma_{ci} \left( m_b \frac{p_{cr}^{a=0.5}}{\sigma_{ci}} + s \right)^a}{2 + a m_b \left( m_b \frac{p_{cr}^{a=0.5}}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}}$$

باید توجه داشت که برای معیار خرابی  $P_{cr}$  مستقل از شعاع  $r$  است و نیز تنش شعاعی روی مرز الاستوپلاستیک برابر است با:  $\sigma_r = P_{cr}$ .

## فرآیند تحلیل

زمانی که فشار داخلی  $P_{in}$  کمتر از  $P_{cr}$  می‌شود، سنگ پیرامون حفاری دایره‌ای در ناحیه‌ی پلاستیک قرار می‌گیرد. فرض کنید فشار داخلی به تدریج از  $P_{cr}$  تا  $P_{in}$  به وسیله‌ی  $n$  گام کاهش یابد. اگر فشار داخلی از  $P_{cr}$  تا  $P_{cr} - \Delta\sigma_1$  کاهش یابد، یک حلقه‌ی پلاستیک به ضخامت  $r_1 - r_0$  وجود خواهد داشت. که  $r_1$  شعاع خارجی و  $r_0$  شعاع داخلی برای این حلقه است.  $\Delta\sigma_1$ ، میزان کاهش فشار در حلقه ۱ است. پروسه نرم شوندگی کرنش در هر حلقه پلاستیک ادامه خواهد داشت تا اینکه در مدت کاهش فشار

حلقه‌های پلاستیک به طور مجزا در نظر گرفته شده و بررسی شوند.

برای به دست آوردن مقادیر تنش در هر حلقه، می‌توان با جای‌گذاری  $\sigma_r - \sigma_\theta$  از رابطه (۷) در معادله (۶)، معادله تعادل را به شکل زیر نوشت و از آن برای حل استفاده کرد.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\bar{\sigma}_c \left( \frac{\bar{m}\sigma_r + \bar{s}}{\bar{\sigma}_c} \right)^{0.5}}{r} = 0 \quad (12)$$

محاسبات را از مرز الاستوپلاستیک شروع کرده و تا مرز حفاری پیش می‌رویم، که تحت این شرایط از شرط مرزی زیر استفاده می‌شود:

$$\sigma_{r(i)} \Big|_{r=R_{pl}} = P_{cr} \quad (13)$$

بنابراین، با استفاده از معادلات (۶) و (۷) و (۱۳) مؤلفه‌های تنش  $\sigma_{\theta(i)}$  و  $\sigma_{r(i)}$  در آخرین حلقه پلاستیک به دست خواهند آمد، به دست آمده روی مرز داخلی آخرین حلقه پلاستیک، به عنوان شرط مرزی معلوم برای حلقه بعدی استفاده می‌شود و به این ترتیب مؤلفه‌های تنش در تمام حلقه‌های پلاستیک به دست خواهند آمد.

برای حلقه پلاستیک با شعاع خارجی  $r = r_{i-1}$  و شعاع داخلی  $r = r_i$  رابطه زیر را داریم [۱۱]:

$$r_i = r_{i-1} \frac{2\varepsilon_{\theta(i-1)} - \varepsilon_{r(i-1)} - \varepsilon_{r(i)}}{2\varepsilon_{\theta(i)} - \varepsilon_{r(i-1)} - \varepsilon_{r(i)}} \quad (14)$$

بعد از تعیین مؤلفه‌های تنش و شعاع پلاستیک در هر حلقه به تعیین کرنش‌ها و جابه‌جایی‌ها می‌پردازیم. طبق مطالعات انجام گرفته، نمو کرنش مماسی برابر است با [۷]:

$$d\varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta(i)} - \varepsilon_{\theta(i-1)} \quad (15)$$

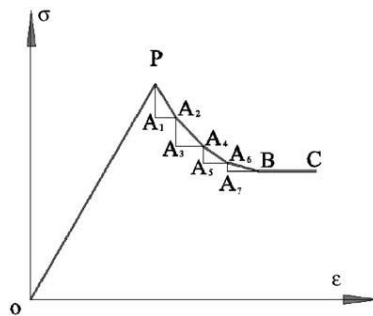
بنابراین، نمو کرنش مماسی در  $r_i$  را می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$d\varepsilon_{r(i)} = d\varepsilon_{r(i-1)} - \beta(d\varepsilon_{\theta(i)} - d\varepsilon_{\theta(i-1)}) \quad (16)$$

$$\beta = \frac{1 + \sin\bar{\psi}}{1 - \sin\bar{\psi}}$$

که  $d\varepsilon_{r(i-1)}$  و  $d\varepsilon_{\theta(i-1)}$  به ترتیب، نمو‌های کرنش الاستیک شعاعی و مماسی در  $r_{i-1}$  است.

که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، یک سری  $P$  و  $r$  محلی در نظر گرفته می‌شود. برای به دست آوردن این مقادیر، فاصله بین  $P$  و  $r$  را به  $n$  قسمت تقسیم می‌کنیم که به صورت  $\Delta x = \frac{(x_p - x_r)}{n}$  مشخص می‌شود، بنابراین هر کاهش از  $P$  به  $r$  به وسیله  $\Delta x$  به دست می‌آید.



شکل ۲: نمایش شماتیک مدل به کارگرفته شده برای اعمال مدل نرم‌کرنشی در کاهش از پیک به ماندگار

برای به دست آوردن  $P$  و  $r$  های محلی نیز می‌توان به صورت زیر عمل کرد:

$$\begin{aligned} x_{r(i-1)} &= x_{p(i-1)} - \Delta x \\ x_{p(i)} &= x_{r(i-1)} - \Delta x \end{aligned} \quad (10)$$

لازم به ذکر است که تغییر پارترهای مقاومتی از  $P$  به  $r$  محلی، خطی و به وسیله معادله (۹) مدل می‌شوند. که شیب این خط با استفاده از پارامتر  $\eta$  در هر حلقه پلاستیک تعیین می‌شود.

پارامتر  $\eta$  از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۵]:

$$\eta = \varepsilon_\theta^p - \varepsilon_r^p \quad (11)$$

بنابراین در رابطه (۹) علاوه بر متغیر بودن  $\eta$  در هر حلقه پلاستیک،  $x_p$  و  $x_r$  نیز متغیر است. به این ترتیب با مدل کردن چندین تغییر خطی کوچک می‌توان تغییر غیرخطی مورد نظر را مدل کرد. با افزایش  $n$  (تعداد حلقه‌ها)، تعداد خطوط شکسته افزایش می‌یابند و به حالت غیرخطی نزدیک‌تر می‌شویم. (از آن‌جا که پارامترهای مقاومتی به  $\eta$  و  $\eta$  نیز به بزرگی کرنش پلاستیک بستگی دارد و مقدار کرنش پلاستیک در ناحیه پلاستیک متفاوت است، باید

و سپس به وسیله روش پیشنهادی و با به کارگیری دیتاست ۲ در جدول ۱، تأثیر تغییر مقدار پارامتر نرم-شوندگی روی میزان جابه‌جایی در تونل دایره‌ای بررسی می‌شود. و در پایان با رسم منحنی پاسخ زمین با استفاده از دیتاست ۱، تأثیر تعاریف مختلف برای پارامترهای مقاومتی از پیک به ماندگار در ناحیه نرم‌کرنشی مورد بحث قرار می‌گیرد.

	Set 1 (strain-softening) (Brown et al-1983) & (Park et al-2007)	Set 2 (brittle plastic) (Carranza-Torres, 2004)
Young's modulus, $E$ , Mpa	1380	5700
Poisson's ratio, $\nu$	0.25	0.3
Radius of opening, $r_0$ , m	5.35	2
Initial stress, $P_0$ , Mpa	3.31	15
Peak dilation angle, $\psi_p$ , degrees	19.47	0
Residual dilation angle, $\psi_r$ , degrees	5.22	0
H-B Constants		
$\sigma_c$ , Mpa	27.6	30
$\sigma_{cr}$ , Mpa	27.6	25
$m_p$	0.5	1.7
$\xi$	0.001	0.0039
$\beta$	0.5	0.55
$m_r$	0.1	0.85
$s_r$	0	0.0019
$a_r$	0.5	0.6

جدول ۱: دیتاست‌ها (معیار خرابی هوک- براون)

## مقایسه میان روش پیشنهادی و سایر

### روش‌های موجود

به منظور تعیین اختلاف میان روش‌های ساده‌سازی شده از جمله (Brown et al- 1983) [۱۱] با روش‌های دقیق مانند روش ارائه شده در (Park et al- 2007) [۷] و روش پیشنهادی در این پژوهش، دیتاست ۱ در جدول ۱ تحلیل شده است. در دیتاست ۱، مقادیر پیک و ماندگار زاویه اتساع،  $\psi_p$  و  $\psi_r$ ، به ترتیب به وسیله  $k_{\psi}^p (= 2)$  و  $k_{\psi}^r (= 1.2)$  و با به کارگیری معادله ۱۶ محاسبه شده‌اند ( $\beta = k_{\psi}$ ). در این مثال  $\eta^*$  برابر  $0.004742$  فرض شده است. اختلاف اصلی میان این دو دسته روش‌ها در تعریف پارامتر نرم‌شوندگی  $\eta$  است. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، روش پیشنهادی بر مبنای کرنش پلاستیک نموی است و پارامتر نرم‌شوندگی نیز طبق معادله ۵ تعریف شده است. با مقایسه همگرایی پیش‌بینی شده در این روش با سایر روش-

رابطه بین کرنش‌ها و جابه‌جایی‌ها نیز به صورت زیر است [۱۱]:

$$\varepsilon_r = -\frac{du}{dr} \quad ; \quad \varepsilon_\theta = -\frac{u}{r} \quad (17)$$

با انتخاب یک مقدار کوچک دلخواه برای  $d\varepsilon_\theta$ ، می‌توان مقادیر  $\varepsilon_r(i)$ ،  $\varepsilon_\theta(i)$ ،  $r_i$  و  $u_i$  را با استفاده از معادلات ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ محاسبه کرد. تکرار محاسبات تا وقتی است که به طور کامل جابه‌جایی‌ها و کرنش‌ها را در ناحیه‌ی پلاستیک به دست آوریم.

کرنش‌های الاستیک در  $r_i$  را می‌توان با استفاده از قانون هوک تعیین کرد [۷]:

$$\varepsilon_r^e(i) = \frac{1}{2G} [(1-\nu)(\sigma_r(i) - P_0) - \nu(\sigma_\theta(i) - P_0)]$$

$$\varepsilon_\theta^e(i) = \frac{1}{2G} [(1-\nu)(\sigma_\theta(i) - P_0) - \nu(\sigma_r(i) - P_0)]$$

با شروع محاسبات از مرز الاستوپلاستیک می‌توان مقادیر متوالی  $\sigma_r(i)$  را برای شعاع تعیین شده  $r_i$  (در معادله ۱۴) به دست آورد.

پارامتر نرم‌شوندگی در  $r_i$  را می‌توان به صورت زیر تخمین زد [۷]:

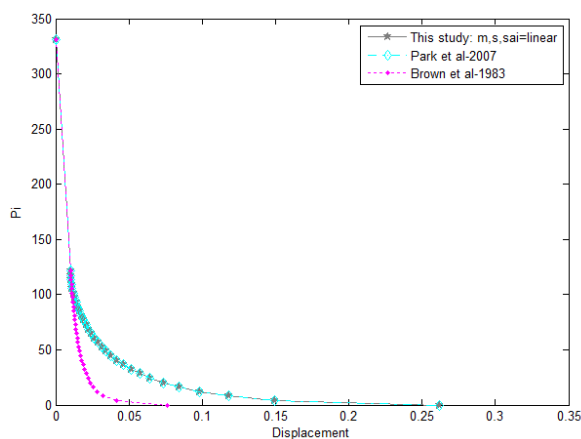
$$\eta = \varepsilon_{\theta(i-1)} - \varepsilon_{r(i-1)} + \frac{1}{2G} [\sigma_{r(i-1)} - \sigma_{\theta(i-1)}] \quad (19)$$

اگر  $\eta$  از  $\eta^*$  بیشتر شود، مقاومت توده سنگ به وضعیت باقی‌مانده می‌رسد. برای به دست آوردن منحنی پاسخ زمین به روش پیشنهادی در این مقاله برنامه کامپیوتری در محیط matlab تهیه شده است که ترتیب محاسبات در ضمیمه آمده است.

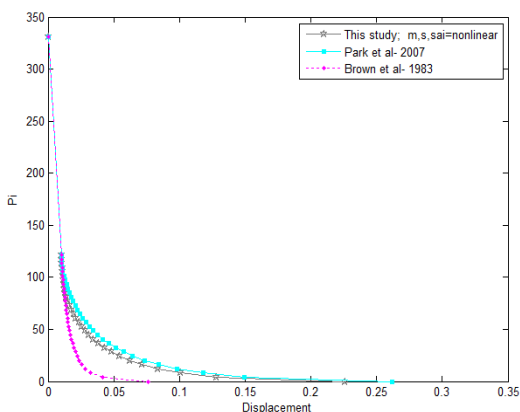
## بررسی نتایج

برای نشان دادن کارایی و دقت روش پیشنهادی و بررسی آثار آن در داخل ناحیه‌ی پلاستیک، به تحلیل دو مثال پرداخته شده است. ابتدا به وسیله‌ی تحلیل الاستوپلاستیک تونل دایره‌ای با استفاده از دیتاست ۱ در جدول ۱، تأثیر تعاریف مختلف برای پارامتر نرم‌شوندگی  $\eta$  بحث می‌شود،

برای جابه‌جایی شعاعی نیز چنین وضعیتی را داریم، یعنی می‌توان گفت که در حالت شکننده- پلاستیک مقدار جابه‌جایی شعاعی بیشترین بوده و با افزایش  $\eta^*$  کاهش می‌یابد. بنابراین نتایج حاکی از آن است که رفتار نرم‌کنشی ناحیه پلاستیک و شعاع پلاستیک کوچکتری در مقایسه با شکننده- پلاستیک در هنگام تسلیم دارد. همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، با بیشتر شدن  $\eta^*$  مقادیر تغییر مکان شعاعی نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۳: مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های ساده‌سازی شده و دقیق. (تغییر پارامترهای مقاومتی  $m, s, \psi$  از پیک به ماندگار خطی در نظر گرفته شده‌اند)



شکل ۴: مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌های ساده‌سازی شده و دقیق. (تغییر پارامترهای مقاومتی  $m, s, \psi$  از پیک به ماندگار غیرخطی است)

ها مثل Park et al- 2007 و Brown، مشخص می‌شود که این روش توافق خوبی با روش Park دارد و بدین طریق دقت روش پیشنهادی ثابت می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تأثیر تعاریف مختلف برای پارامتر نرم‌شوندگی بسیار قابل ملاحظه است. در واقع در روش Brown که  $\eta = \varepsilon_\theta - \varepsilon_\theta^e$ ، هم‌گرایی دیواره تونل با چشم‌پوشی از تغییر کرنش الاستیک در ناحیه پلاستیک به طور قابل ملاحظه‌ای کم تخمین زده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نتایج روش پیشنهادی، در حالت خطی در نظر گرفتن تغییر پارامترهای مقاومتی از پیک به ماندگار، بسیار نزدیک به نتایج Park است، بنابراین روش پیشنهادی می‌تواند برای بررسی بیشتر روی تغییرات غیرخطی پارامترهای مقاومتی از پیک به ماندگار در ناحیه نرم‌کنشی مورد استفاده قرار گیرد، که شکل ۴ نتایج حاصل از این بررسی را نشان می‌دهد. در واقع، شکل‌های ۳ و ۴ منحنی‌های پاسخ زمین، که از این دو دسته روش تعیین شده‌اند را نشان می‌دهند. نزدیکی بسیار زیاد به نتایج به دست آمده از روش Park نیز حاکی از دقت بسیار زیاد روش تحلیلی پیشنهادی است.

## تأثیر پارامتر نرم‌شوندگی بحرانی $\eta^*$ روی تحلیل الاستوپلاستیک

منحنی پاسخ زمین برای چهار مقدار متفاوت  $\eta^*$  در شکل ۵ نمایش داده شده است، همان‌گونه که انتظار می‌رود، با کوچکتر شدن پارامتر نرم‌شوندگی بحرانی، جواب‌های نرم‌شوندگی به سمت جواب‌های شکننده- پلاستیک همگرا می‌شوند، که این اعتبار روش پیشنهادی برای محیط H-B را اثبات می‌کند. در حالت شکننده- پلاستیک، شعاع پلاستیک  $R_{pl}$  بیشترین مقدار است و با افزایش  $\eta^*$  کاهش می‌یابد. برای  $\eta^* = 0.012$  ناحیه پلاستیک تماماً نرم‌کنشی است، یعنی ناحیه پلاستیک ماندگاری تشکیل نمی‌شود.

$$\varepsilon_{\theta 1} = \frac{(P_0 - P_{cr})}{2G}, \quad \varepsilon_{r1} = \frac{(P_{cr} - P_0)}{2G}$$

$$\bar{m}_1 = m_p, \quad \bar{S}_1 = S_p, \quad \bar{\psi}_1 = \psi_p, \quad \rho_1 = 1$$

### ترتیب محاسبات برای هر حلقه

پارامتر  $x$ ، در روابط زیر می‌تواند نماینده‌ی هر یک از پارامترهای مقاومتی مثل  $a$ ،  $\psi$ ،  $m$  و  $s$  باشد.

$$\Delta x = \frac{(x_p - x_r)}{n}$$

$$x_{p(i)} = x_{p(i-1)} - \Delta x, \quad x_{r(i)} = x_{p(i)} - \Delta x$$

$$\Delta \varepsilon_{\theta(i)} = 0.005 \varepsilon_{\theta(i-1)}$$

$$\eta = \varepsilon_{\theta(i-1)} - \varepsilon_{r(i-1)} + \frac{1}{2G} \{ \sigma_{r(i-1)} - \sigma_{\theta(i-1)} \}$$

$$\begin{cases} \bar{x}_i = x_p - (x_p - x_r) \frac{\eta}{\eta^*} & \eta < \eta^* \\ \bar{x}_i = x_r & \eta > \eta^* \end{cases}$$

لازم به ذکر است که  $\eta$ ،  $x_r$ ،  $x_p$  در رابطه بالا، برای هر حلقه متغیر است.

$$\beta_i = \frac{1 + \sin \bar{\psi}_i}{1 - \sin \bar{\psi}_i}$$

$$\varepsilon_{\theta(i)} = \varepsilon_{\theta(i-1)} + \Delta \varepsilon_{\theta(i)}$$

$$\Delta \varepsilon_{r(i)} = \Delta \varepsilon_{r(i-1)} - \beta_i \{ \Delta \varepsilon_{\theta(i)} - \Delta \varepsilon_{\theta(i-1)} \}$$

$$\varepsilon_{r(i)} = \varepsilon_{r(i-1)} + \Delta \varepsilon_{r(i)}$$

$$\rho_i = \frac{2\varepsilon_{\theta(i-1)} - \varepsilon_{r(i-1)} - \varepsilon_{r(i)}}{2\varepsilon_{\theta(i)} - \varepsilon_{r(i-1)} - \varepsilon_{r(i)}} \rho_{(i-1)}, \quad \rho_i = \frac{r_i}{r_e}, \quad \frac{u_i}{r_e} =$$

$$D = \frac{[\rho_{(i-1)} - \rho_{(i)}]^2}{[\rho_{(i-1)} + \rho_{(i)}]}$$

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

$$b = \sigma_{r(i-1)} + k \bar{m}_i \sigma_c$$

$$\sigma_{r(i)} = b - \sqrt{b^2 - a}$$

$$\sigma_{\theta(i)} = \sigma_{r(i)} + \sqrt{\bar{m}_i \sigma_c \sigma_{r(i)} + \bar{S}_i \sigma_c^2}$$

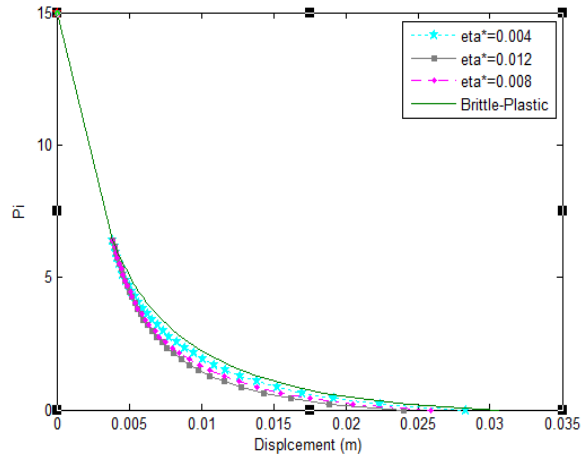
$$\varepsilon_{r(i)}^e = \frac{1}{2G} [(1 - \nu)(\sigma_{r(i)} - P_0) - \nu(\sigma_{\theta(i)} - P_0)], \quad \varepsilon_{\theta(i)}^e =$$

$$\frac{1}{2G} [(1 - \nu)(\sigma_{\theta(i)} - P_0) - \nu(\sigma_{r(i)} - P_0)]$$

$$\Delta \varepsilon_{r(i)}^e = \varepsilon_{r(i)}^e - \varepsilon_{r(i-1)}^e, \quad \Delta \varepsilon_{\theta(i)}^e = \varepsilon_{\theta(i)}^e - \varepsilon_{\theta(i-1)}^e$$

اگر  $\sigma_{r(i)} > P_i$  باشد، محاسبات را برای حلقه‌ی بعد تکرار می‌کنیم ( بنابراین داریم:  $i = i + 1$  ). و اگر  $\sigma_{r(i)} < P_i$  باشد  $\rho$ ، و  $\frac{u_i}{r_e}$  را در  $r_i$  به روش زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\rho_{at \ r_i} = \rho_{i-1} + \frac{P_i - \sigma_{r(i-1)}}{\sigma_{r(i-1)} - \sigma_{r(i-1)}} (\rho_i - \rho_{i-1})$$



شکل ۵: منحنی پاسخ زمین برای توده سنگ نرم کرنشی H-B (دیتاست ۲)

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از این روش به نتایج Park نزدیک بوده، با این تفاوت که در این روش جابه‌جایی‌های کمتر و منطقه پلاستیک کوچکتری به دست می‌آید.

### خلاصه و نتیجه‌گیری

برای تحلیل الاستوپلاستیک تونل‌ها در قسمت نرم کرنشی از روش غیرخطی تغییر پارامترها استفاده شد که نتایج نشان می‌دهند بر این اساس محاسبات از دقت بالاتری برخوردار خواهند بود.

### ضمیمه

#### داده‌های ورودی

$\sigma_c$ : مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر،  $E$  و  $\nu$ : مدول یانگ و ضریب پواسون توده سنگ،  $m_p$  و  $S_p$ : مقادیر peak ثوابت هوک-براون  $m_r$  و  $S_r$ : مقادیر ماندگار ثوابت هوک-براون،  $\psi_p$  و  $\psi_r$ : مقادیر پیک و ماندگار زاویه‌ی اتساع،  $\eta^*$ : مقدار پارامتر نرم شوندگی (کنترل کننده انتقال بین مراحل نرم شونده و ماندگار)،  $P_0$ : مقدار تنش هیدروستاتیک درجا،  $r_i$ : شعاع داخلی تونل.

#### مقادیر اولیه:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \sigma_{r1} = \sigma_{re} = P_{cr}, \quad \sigma_{\theta 1} = 2P_0 - P_{cr}$$

[4] Guan Z, Jiang Y, Tanabasi Y. Ground reaction analyses in conventional tunneling excavation. Tunnel Undergr Space Technol 2007;22:230–7.

[5] Alonso E, Alejano LR, Varas F, Fdez-Manin G, Carranza-Torres C. Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behavior. Int J Numer Anal Meth Geomech 2003;27:1153–85.

[6] Lee YK, Pietruszczak S. A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass. Tunnel Undergr Space Technol 2008;23:588–99.

[7] Park KH, Tontavanich B, Lee JG. A simple procedure for ground response curve of circular tunnel in elastic-strain softening rock masses. Tunnel Undergr Space Technol 2008;23:151–9.

[8] Shuilin Wang, Xiaotao Yin, Hua Tang, Xiurun Ge. A new approach for analyzing circular tunnel in strain-softening rock masses. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.

[9] Sofianos AI (2003) Tunnelling Mohr–Coulomb strength parameters for rock masses satisfying the generalized Hoek–Brown criterion. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 40(3): 435–440.

[10] L.R. Alejano a,1, A. Rodriguez-Dono a,\*, E. Alonso a, G. Fdez.-Manin b. Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behavior. Tunnelling and Underground Space Technology 24 (2009) 689–705.

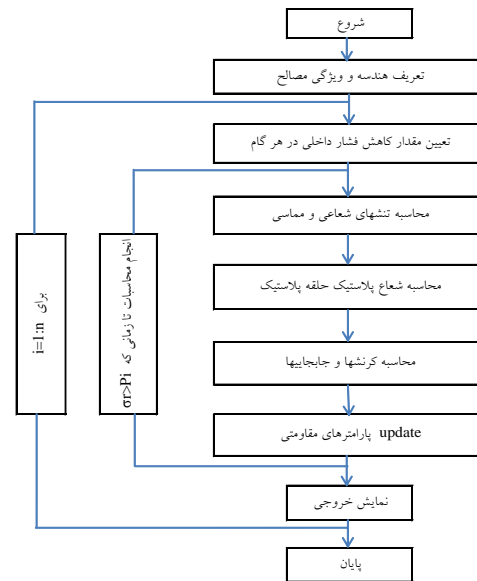
[11] Brown ET, Bray JW, Ladanyi B, Hoek E. Ground response curves for rock tunnels. ASCE J Geotech Eng 1983;109:15–39.

$$\left(\frac{u_i}{r_e}\right)_{at\ r_i} = \left(\frac{u_i}{r_e}\right)_{i-1} + \frac{P_i - \sigma_{r(i-1)}}{\sigma_{r(i-1)} - \sigma_{r(i-1)}} \left\{ \left(\frac{u_i}{r_e}\right)_i - \left(\frac{u_i}{r_e}\right)_{i-1} \right\}$$

شعاع ناحیه‌ی پلاستیک و جابه‌جایی در  $r_i$  را نیز به صورت زیر می‌توان محاسبه کرد:

$$r_e = \frac{r_i}{\rho_{at\ r_i}} \quad \& \quad u_{at\ r_i} = \left(\frac{u_i}{r_e}\right)_{at\ r_i} r_e$$

ترتیب انجام محاسبات در نمودار زیر نشان داده شده است.



## مراجع

- [1] Carranza-Torres C. Self similarity analysis of the elastoplastic response of underground openings in rock and effects of practical variables. PhD thesis, University of Minnesota; 1998.
- [2] Brown ET, Bray JW, Ladanyi B, Hoek E. Ground response curves for rock tunnels. J Geotech Eng 1983;109:15–39.
- [3] Panet M. Le calcul des tunnels par la methode des curves convergence–con- finement. Paris: Presses del’Ecole Nationale des Ponts et Chaussees; 1995.