

### منحنی اندرکنش زمین در تونل با در نظر گرفتن زون پلاستیک با رفتار نرم شونده و اتساعی

احسان کاتبیان<sup>۱</sup>، حامد ملاداودی<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۰۹/۰۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۸/۲۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2017.843

واژگان کلیدی	چکیده
منحنی اندرکنش زمین رفتار کرنش نرم شونده پارامتر نرم شونده پارامتر نرم شونده بحرانی اتساع توده سنگ شاخص مقاومت زمین شناسی	تحلیل تنش‌ها و جابجایی‌ها پیرامون تونلی با مقطع دایروی، یکی از مسائل مهم در تونلسازی است. بر اثر بارگذاری‌های ناشی از حفر فضای زیرزمینی، زون پلاستیک پیرامون فضای زیرزمینی ایجاد می‌شود. منحنی اندرکنش زمین، یکی از روش‌ها برای فهم مکانیزم تغییر شکل تونل است که رابطه بین کاهش فشار داخلی و افزایش جابجایی شعاعی دیواره تونل را نشان می‌دهد. در سال‌های اخیر، روش‌های زیادی برای محاسبه منحنی اندرکنش زمین پیشنهاد شده است، ولی اکثر راه‌حل‌های ارائه شده مربوط به رفتار الاستوپلاستیک کامل یا شکننده سنگ بوده است. اما رفتار واقعی زون پلاستیک ناشی از حفر تونل پس از مقاومت حداکثر، رفتاری نرم شونده و اتساعی است. تلاش‌های صورت گرفته برای محاسبه منحنی اندرکنش زمین با استفاده از مدل رفتاری نرم شونده، بسیار محدود بوده است، زیرا با استفاده از این مدل، منحنی پاسخ زمین، حل صریحی ندارد. در این تحقیق سعی شده است، با توسعه روش‌های قبلی و لحاظ کیفیت توده سنگ و اتساع متغیر در الگوریتم مساله، رفتار واقعی توده سنگ زون پلاستیک در محاسبه منحنی اندرکنش زمین در نظر گرفته شود. نتایج محاسبات با الگوریتم پیشنهادی تطابق خوبی با روش عددی و همگرایی‌های اندازه‌گیری شده تونل قمرود دارد. نتایج محاسبات نشانگر اثر قابل ملاحظه پارامتر اتساع بر میزان همگرایی‌های تونل است. با افزایش کیفیت توده سنگ (شاخص مقاومت زمین شناسی) رفتار بعد از مقاومت حداکثر توده سنگ پیرامون تونل به رفتار شکننده میل می‌کند.

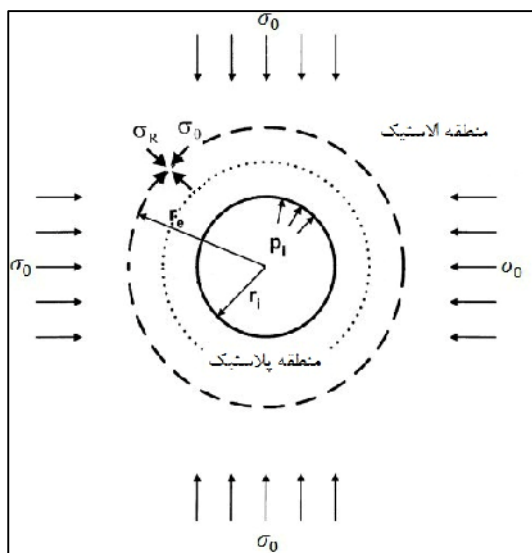
#### ۱- پیش‌گفتار

مجدد تنش در اطراف تونل ایجاد می‌شود. یکی از معمول‌ترین روش‌های تحلیلی مورد استفاده در طراحی تونل، روش همگرایی-همجواری می‌باشد که شامل سه مولفه اصلی است. پروفیل تغییر شکل طولی زمین که جابجایی شعاعی رخ داده در سرتاسر محور یک تونل بدون نگهداری را نشان می‌دهد؛ منحنی مشخصه سیستم نگهداری که رابطه بین فشار داخلی سیستم نگهداری و جابجایی شعاعی را نشان می‌دهد و منحنی اندرکنش زمین که رابطه بین کاهش فشار داخلی و افزایش جابجایی شعاعی دیواره تونل را نشان می‌دهد. تاکنون روش‌های زیادی برای محاسبه منحنی اندرکنش زمین توسط

تونل به عنوان زیرساختی مهم در زمینه توسعه و پیشرفت کشور مطرح است. در تونلسازی، حفظ پایداری فضای حفر شده لازم است. حفر هرگونه فضا یا سازه در زمین باعث به هم خوردن تعادل تنش‌های وارد بر آن منطقه شده و حفظ پایداری، نیازمند ایجاد تعادلی جدید بین تنش‌های موجود است. تحلیل تنش‌ها و جابجایی‌ها پیرامون تونلی با مقطع دایروی، یکی از مهم‌ترین مسائل در تونلسازی است. در اثر بارگذاری‌های ناشی از حفر فضای زیرزمینی، زون پلاستیک در اطراف تونل شکل می‌گیرد. زون پلاستیک به دلیل توزیع

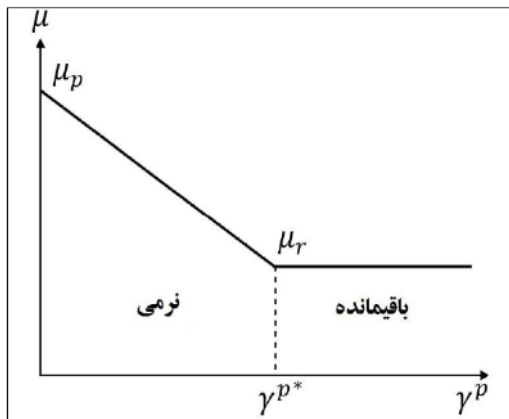
## ۲- تشریح مساله

تونلی با مقطع دایروی به شعاع اولیه  $r_i$  در نظر گرفته می‌شود. تنش‌های افقی و قائم برجا با یکدیگر برابر و مقدار آن  $\sigma_0$  فرض می‌شود. فشارسیستم نگهداری  $P_i$  به صورت شعاعی و یکنواخت به دیواره تونل اعمال می‌شود. رفتار توده سنگ اصلی قبل از شکست، الاستیک خطی است و با مدول یانگ ( $E$ ) و نسبت پواسون ( $\nu$ ) مشخص می‌شود. پس از شکست، با توجه به فشار بر جای  $\sigma_0$ ، فشار سیستم نگهداری  $P_i$  و خصوصیات مصالح سنگی، منطقه پلاستیک تا شعاع  $r_e$  در اطراف تونل توسعه می‌یابد. شرایط حاکم بر مساله، شرایط کرنش صفحه ای همراه با تقارن محوری است. بر این اساس، تنش‌های مماسی ( $\sigma_\theta$ ) و شعاعی ( $\sigma_r$ ) در توده سنگ محیط اطراف تونل، به ترتیب تنش‌های اصلی حداکثر ( $\sigma_1$ ) و حداقل ( $\sigma_3$ ) خواهند بود. در ضمن، تنش شعاعی در مرز الاستیک-پلاستیک ( $\sigma_R$ ) برابر با مقدار فشار نگهداری بحرانی ( $P_{i_{cr}}$ ) است. تنها در شرایطی زون پلاستیک در اطراف تونل شکل می‌گیرد که مقدار فشار نگهداری بحرانی، بیشتر از مقدار فشار داخلی سیستم نگهداری باشد (*Brown et al., 1983*). به عبارتی فشار نگهداری بحرانی ( $P_{i_{cr}}$ ) حداقل فشار نگهداری لازم برای حفظ توده سنگ در شرایط الاستیک است.



شکل ۱- زون پلاستیک شکل گرفته اطراف تونل (Park et al., 2008)

محققین مختلف پیشنهاد شده است اما اکثر راه حل‌های ارائه شده مربوط به مدل رفتاری الاستوپلاستیک کامل یا الاستوپلاستیک شکننده سنگ بوده است. زیرا برای این دو نوع مدل رفتاری، یک راه حل دقیق برای محاسبه منحنی اندرکنش زمین وجود دارد. اما رفتار واقعی زون پلاستیک ناشی از حفر تونل پس از مقاومت حداکثر، رفتاری نرم شونده و اتساعی است، لذا ضروری است از مدل‌های رفتاری نرم شونده در محاسبه منحنی اندرکنش زمین استفاده شود. در مدل رفتاری الاستوپلاستیک با رفتار کرنش نرم شونده، سه زون مختلف در اطراف تونل شکل می‌گیرد. زون الاستیک که دور از تونل تشکیل می‌شود و زون پلاستیک که شامل دو بخش نرم شونده و باقیمانده است. تلاش‌های صورت گرفته برای محاسبه منحنی اندرکنش زمین با مدل رفتاری پلاستیک نرم شونده، بسیار محدود بوده است. زیرا با استفاده از مدل رفتاری نرم شونده، منحنی پاسخ زمین، حل صریحی ندارد. برای محاسبه منحنی اندرکنش زمین حول تونل با سطح مقطع دایروی با مدل رفتاری پلاستیک نرم شونده، براون و همکارانش (*Brown*) یک راه حل گام به گام را تحت معیار تسلیم هوک و براون پیشنهاد دادند، ولی با توجه به نادیده گرفتن تغییرات کرنش الاستیک در منطقه پلاستیک، میزان همگرایی دیواره تونل، کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شد (*Brown, et al., 1983*). از طرف دیگر، روش ارائه شده توسط الانسو، کاملاً تئوریک بوده و نیازمند حل یک سیستم معادلات دیفرانسیلی است و برای کاربردهای عملی بسیار پیچیده است (*Alonso et al., 2003*). لی و همکارانش (*Lee et al., 2008*) با اصلاح روش پیشنهادی براون (*Brown, et al., 1983*)، یک راه حل تحلیلی جدید ارائه دادند، به گونه‌ای که در این روش برخلاف روش براون، مقدار کرنش الاستیک در منطقه پلاستیک، متغیر در نظر گرفته شد که این موضوع سبب محاسبه دقیق‌تر جابجایی‌ها در زون پلاستیک شد (*Lee & Pietruszczak, 2008*). در این تحقیق با لحاظ رفتار نرم شونده و اتساعی سنگ، رفتار واقعی سنگ در محاسبه همگرایی‌های تونل لحاظ شد. از سوی دیگر، با لحاظ کیفیت توده سنگ و اتساع متغیر در الگوریتم پیشنهادی، اثرات این پارامترها در میزان همگرایی تونل بررسی شد.



شکل ۲- نمو پارامترهای مقاومتی در منطقه پلاستیک

در رابطه (۴)،  $\mu$  نشان دهنده یکی از پارامترهای مقاومتی  $\varphi$ ،  $C$ ،  $m$ ،  $S$  و  $a$ ؛ اندیس‌های  $p$  و  $r$  به ترتیب مقادیر اوج و باقیمانده پارامترهای مقاومتی؛  $\gamma^p$  پارامتر نرم شوندگی و  $\gamma^{p*}$  پارامتر نرم شوندگی بحرانی است. پارامتر نرم شوندگی بحرانی  $\gamma^{p*}$ ، مرز منطقه نرمی و باقیمانده را مشخص می‌کند. بر این اساس، در شرایطی که  $0 < \gamma^p < \gamma^{p*}$  باشد، منطقه نرمی و در شرایطی که  $\gamma^p \geq \gamma^{p*}$  باشد، منطقه باقیمانده شکل می‌گیرد. مقادیر اوج و باقیمانده پارامترهای مقاومتی را می‌توان بر مبنای روابط ارائه شده توسط هوک و همکارانش، بر اساس شاخص مقاومت زمین شناسی ( $GSI$ ) و پارامتر مقاومتی سنگ بکر تعیین کرد ( $Hoek, et al., 2002$ ). پارامتر  $m$  توده سنگ از رابطه ذیل تعیین می‌شود.

$$m = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $m_i$  پارامتر مقاومتی سنگ بکر هوک و براون و  $D$  پارامتر آشفستگی محیط ناشی از روش حفر تونل است. پارامتر مقاومتی  $S$  توده سنگ به صورت ذیل مشخص می‌شود.

$$S = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (6)$$

برای تعیین مقادیر مقاومتی اوج از مقدار  $GSI_{peak}$  تعیین شده در سایت و برای تعیین مقادیر مقاومتی باقیمانده از  $GSI_{res}$  استفاده می‌شود. بر اساس رابطه ارائه شده توسط الجانو مقدار  $GSI_{res}$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود ( $Alejano, et al., 2012$ ):

## ۲-۱- تابع تسلیم و پتانسیل پلاستیک

تابع تسلیم، مرز رفتار الاستیک و پلاستیک در سنگ را نشان می‌دهد. بر این اساس، تابع تسلیم توده سنگ از معیار تسلیم کلی زیر تبعیت می‌کند ( $Lee \& Pietruszczak, 2008$ ):

$$F = \sigma_\theta - \sigma_r - H \quad (1)$$

در رابطه (۱)، مقدار  $H$  برای دو معیار تسلیم موهر-کولمب و هوک و براون به ترتیب به صورت زیر تعیین می‌شود ( $Lee \& Pietruszczak, 2008$ ):

$$H^{MC} = (N-1)\sigma_r + q \rightarrow \begin{cases} N = \frac{1+\sin(\varphi)}{1-\sin(\varphi)} \\ q = \frac{2C \cos(\varphi)}{1-\sin(\varphi)} \end{cases}, \quad H^{HB} = \sigma_c \left(m \frac{\sigma_r}{\sigma_c} + s\right)^a \quad (2)$$

در رابطه (۲)، پارامترهای مقاومتی  $\varphi$ ،  $C$  و  $\sigma_c$ ، به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت فشاری تک محوری و  $s$ ،  $m$  و  $a$  ثابت‌های وابسته به نوع و کیفیت توده سنگ است.

تابع پتانسیل پلاستیک، قانون جریان پلاستیک نمو کرنش پلاستیک را نشان می‌دهد. در شرایط قانون جریان غیرهمراه، تابع پتانسیل پلاستیک می‌تواند به صورت زیر تعریف شود ( $Lee \& Pietruszczak, 2008$ ):

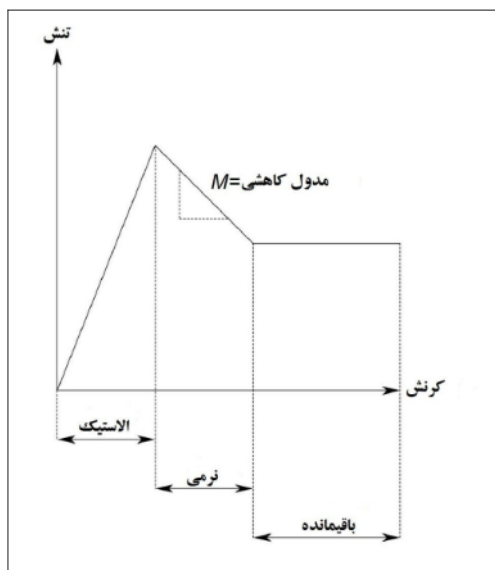
$$G = \sigma_\theta - K \sigma_r, \quad K = -\frac{\xi_r^p}{\xi_\theta^p} = \frac{1+\sin(\Psi)}{1-\sin(\Psi)} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $K$  ضریب اتساع است که به صورت نسبت بین نمو کرنش پلاستیک شعاعی و مماسی بیان می‌شود و  $\Psi$  اتساع سنگ است.

## ۲-۲- نمو پارامترهای مقاومتی در زون پلاستیک

مطابق شکل ۲ در منطقه پلاستیک فرض می‌شود که پارامترهای مقاومتی توده سنگ به صورت تابعی دوخطی و بر مبنای پارامتر نرم شوندگی ( $\gamma^p$ ) و پارامتر نرم شوندگی بحرانی ( $\gamma^{p*}$ ) در منطقه نرمی کاهش یافته و در منطقه باقیمانده به مقدار ثابت می‌رسد ( $Lee \& Pietruszczak, 2008$ ):

$$\mu(\gamma^p) = \begin{cases} \mu_p - (\mu_p - \mu_r) \frac{\gamma^p}{\gamma^{p*}}, & 0 < \gamma^p < \gamma^{p*} \\ \mu_r, & \gamma^p \geq \gamma^{p*} \end{cases} \quad (4)$$



شکل ۳- رفتار نرم شونده سنگ توده در شرایط تک محوره

مشاهدات آزمایشگاهی و صحرایی نشان داده است که رفتار توده سنگ بعد از شکست وابستگی زیادی به کیفیت توده سنگ (Hoek & Brown, 1997; Cai et al., 2007) و تنش فشاری محصور کننده دارد (Wawersik & Fairhurst, 1970; Alejano & Alonso, 2005) بر اساس تحقیقات الجانو با فرض وابستگی پارامتر مدول کاهش (M) به مدول یانگ، خواهیم داشت (Alejano, et al., 2007):

$$\left\{ \begin{array}{l} M = E \left[ 0.0046 e^{0.0768 GSI_{peak}} \left( \frac{\sigma_{rmean}}{\sqrt{s_p} \sigma_c} \right)^{-1} \right. \\ \quad \left. \text{برای } \frac{\sigma_{rmean}}{\sqrt{s_p} \sigma_c} > 0.1 \right. \\ M = E \left[ 0.0046 e^{0.0768 GSI_{peak}} \left( \frac{\sigma_{rmean}}{2\sqrt{s_p} \sigma_c} + 0.05 \right)^{-1} \right. \\ \quad \left. \text{برای } \frac{\sigma_{rmean}}{\sqrt{s_p} \sigma_c} \leq 0.1 \right. \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\gamma^{p*} = \left( 1 - \frac{1}{2} K_p \right) \left[ \sigma_{\theta}^{peak} (\sigma_{rmean}) - \sigma_{\theta}^{res} (\sigma_{rmean}) \right] \left[ \frac{1}{E} + \frac{1}{M} \right] \quad (13)$$

### ۳-۲- فشار نگهداری بحرانی

برای به دست آوردن فشار نگهداری بحرانی با استفاده از معیار شکست هوک و براون، می توان از روش *Newton-Raphson*

$$GSI_{res} = 17.25 e^{0.0107 GSI_{peak}} \quad (7) \quad (25 < GSI < 75)$$

الجانو بر اساس شاخص مقاومت زمین شناسی، رابطه زیر را برای محاسبه زاویه اتساع ماکزیمم در مرز الاستیک-پلاستیک پیشنهاد داد (Alejano, et al., 2010):

$$\Psi_p = \frac{5 GSI_{peak} - 125}{1000} \varphi_p \quad (25 < GSI < 75) \quad (8)$$

مقدار زاویه اصطکاک داخلی ماکزیمم بر مبنای کیفیت توده سنگ و فشار جانبی بر اساس رابطه ارائه شده توسط هوک و همکارانش تعیین می شود (Hoek et al. 2002):

$$\varphi_p = \arcsin \left[ \frac{6a_p m_p (s_p + m_p \sigma_r')^{a_p - 1}}{2(1 + a_p)(2 + a_p) + 6a_p m_p (s_p + m_p \sigma_r')^{a_p - 1}} \right] \quad (9)$$

$$\sigma_r' = \frac{\sigma_R}{\sigma_c}$$

حال، بر مبنای قانون جریان غیرهمراه در تئوری پلاستیسیته، مقدار ضریب اتساع ماکزیمم ( $K_p$ ) بر اساس زاویه اتساع ماکزیمم ( $\Psi_p$ ) با رابطه ذیل تعیین می شود:

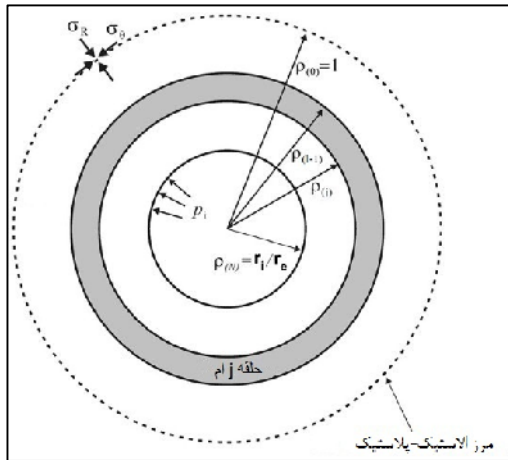
$$K_p = \frac{1 + \sin(\Psi_p)}{1 - \sin(\Psi_p)} \quad (10)$$

بر اساس تحقیقات دیتورنی، مقدار ضریب اتساع بر اساس تابعی نمایی از مقدار اولیه آن  $K_p$ ، در منطقه نرم شونده کاهش یافته و در منطقه باقیمانده به مقدار ثابت می رسد (Detournay, 1986):

$$K = 1 + (K_p - 1) e^{-\frac{\gamma^p}{\gamma^{p*}}} \quad (11)$$

پارامتر نرم شونده، نمو پارامترهای مقاومتی در منطقه نرمی را کنترل کرده و به صورت تفاضل کرنش های اصلی حداکثر و حداقل پلاستیک تعریف می شود. پارامتر نرم شونده بحرانی، مرز منطقه نرمی و باقیمانده را مشخص می کند (Alonso et al., 2003). شکل ۳ مدل رفتاری کرنش نرم شونده را برای رفتار تک محوره توده سنگ نشان می دهد.

در شکل ۳، شیب نمودار مرحله نرم شونده (مدول کاهش) با پارامتر  $M$  مشخص می شود. اگر این شیب به سمت بی نهایت میل کند، رفتار کاملاً شکننده بوده و اگر به سمت صفر میل کند، رفتار پلاستیک کامل است.



شکل ۴- تقسیم زون پلاستیک به n حلقه هم مرکز (Lee & Pietruszczak, 2008)

#### ۲-۴-۲- محاسبه تنش، کرنش و جابجایی در زون پلاستیک

تنش شعاعی در زون پلاستیک به طور یکنواخت از  $\sigma_R$  در  $r = r_e$  تا  $r = r_i$  کاهش می‌یابد. می‌توان نمو تنش شعاعی و مولفه تنش شعاعی را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد (Lee & Pietruszczak, 2008):

$$\Delta\sigma_r = \frac{P_i - \sigma_R}{n}, \quad \sigma_{r(j)} = \sigma_{r(j-1)} + \Delta\sigma_r \quad (19)$$

مولفه تنش مماسی و نمو آن برای حلقه  $j$  ام با استفاده از معادلات رفتاری به صورت زیر محاسبه می‌شود (Lee & Pietruszczak, 2008):

$$\sigma_{\theta(j)} = \sigma_{r(j)} + H(\sigma_{r(j)}, \gamma_{(j-1)}^p), \quad \Delta\sigma_{\theta(j)} = \sigma_{\theta(j)} - \sigma_{\theta(j-1)} \quad (20)$$

$H$  بر اساس معیار تسلیم از رابطه (۲) تعیین می‌شود. نمو کرنش‌های شعاعی و مماسی الاستیک در زون پلاستیک با استفاده از قانون هوک و بر مبنای نمو تنش‌های شعاعی و مماسی در هر حلقه تعیین می‌شود.

$$\Delta\varepsilon_{r(j)}^e = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)\Delta\sigma_r - \nu\Delta\sigma_{\theta(j)}], \quad \Delta\varepsilon_{\theta(j)}^e = \frac{1+\nu}{E} [(1-\nu)\Delta\sigma_{\theta(j)} - \nu\Delta\sigma_r] \quad (21)$$

بر اساس معادله تعادل تنش در شرایط کرنش صفحه‌ای همراه با تقارن محوری وبا استفاده از روش تفاضل محدود شعاع نرمالیزه حلقه  $j$  ام بر اساس شعاع نرمالیزه حلقه  $(j-1)$  ام به صورت ذیل محاسبه می‌شود (Lee & Pietruszczak, 2008):

به صورت زیر استفاده کرد (Press, et al., 1992):

$$f(P_{i,cr}^{HB}) = 2(\sigma_0 - P_{i,cr}^{HB}) - \sigma_{cp} \left( m_p \frac{P_{i,cr}^{HB}}{\sigma_{cp}} + s_p \right)^{a_p} \quad (14)$$

$$P_{i,cr}^{HB(n)} = P_{i,cr}^{HB(n-1)} - \frac{f(P_{i,cr}^{HB(n-1)})}{f'(P_{i,cr}^{HB(n-1)})}, \quad n = 1, \dots, i, \quad P_{i,cr}^{HB(1)} = 1.1 \quad (15)$$

برای به دست آوردن فشار نگهداری بحرانی با استفاده از معیار شکست موهر-کولمب از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$P_{i,cr}^{MC} = \frac{2\sigma_0 - q_p}{N_p + 1} \rightarrow \begin{cases} N_p = \frac{1 + \sin(\varphi_p)}{1 - \sin(\varphi_p)} \\ q_p = \frac{2C_p \cos(\varphi_p)}{1 - \sin(\varphi_p)} \end{cases} \quad (16)$$

#### ۲-۴-۲- محاسبات در منطقه پلاستیک نرم شونده

##### ۲-۴-۱- شرایط اولیه و مرزی

فرض می‌شود زون پلاستیک اطراف تونل،  $n$  حلقه هم مرکز را مشابه شکل ۴ می‌سازد، به طوری که حلقه  $j$  ام بین دو شعاع نرمالیزه شده  $\rho_{(j)} = \frac{r_{i,j}}{r_e}$  و  $\rho_{(j-1)} = \frac{r_{i,j-1}}{r_e}$  قرار می‌گیرد. ضخامت حلقه‌ها با یکدیگر برابر نبوده و در خلال فرآیند اقصاع معادلات تعادل تعیین می‌شود (Lee & Pietruszczak, 2008). معادلات حاکم بر مساله شامل معادله تعادل تنش، معادله سازگاری کرنش و معادلات رفتاری است که شکل دیفرانسیلی داشته و محاسبات توسط روش تفاضل محدود به ترتیب از بیرونی‌ترین حلقه در مرز الاستیک-پلاستیک آغاز و تا سطح دیواره تونل ادامه پیدا می‌کند.

در مرز الاستیک-پلاستیک ( $\rho_{(0)} = 1$ )، مولفه‌های تنش و کرنش تحت شرایط کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\sigma_{r(0)} = \sigma_R, \quad \sigma_{\theta(0)} = 2\sigma_0 - \sigma_R \quad (17)$$

$$\varepsilon_{r(0)} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_R - \sigma_0), \quad \varepsilon_{\theta(0)} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_0 - \sigma_R) \quad (18)$$

$$u_{(j)} = U_{(j)} r_e \rightarrow \begin{cases} U_{(j)} = \varepsilon_{\theta(j)} \rho_{(j)} \\ r_e = \frac{r_i}{\rho_{(n)}} \end{cases} \quad (27)$$

با  $n$  بار تکرار محاسبات، مقدار تنش‌ها، کرنش‌ها و جابجایی‌ها در منطقه پلاستیک به طور کامل محاسبه می‌شود. در منطقه الاستیک نیز با استفاده از روابط تحلیلی شکل بسته، محاسبات انجام می‌شود.

### ۳- صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی

به منظور بررسی کارایی و صحت سنجی الگوریتم پیشنهادی، این الگوریتم در محیط نرم افزار *MATLAB* کد نویسی شد تا منحنی‌های تنش، جابجایی و اندرکنش زمین بر اساس آن محاسبه شود.

#### ۳-۱- صحت سنجی با روش عددی

برای صحت سنجی فرآیند محاسبات عددی مبتنی بر تفاضل محدود الگوریتم پیشنهادی، نتایج تحلیل با استفاده از الگوریتم پیشنهادی با روش عددی مقایسه شد. بدین منظور، فرض شد تونلی به شعاع ۳ متر در عمق ۷۸۵ متری در توده سنگی با وزن مخصوص  $2600 \frac{kg}{m^3}$  حفر شده است. مدل مورد نظر در نرم افزار *FLAC 2D* ساخته شد. در این مدل عددی از معیار تسلیم موهر کولمب استفاده شد. در شکل ۵، هندسه، مش بندی و شرایط مرزی مدل ساخته شده در نرم افزار *FLAC 2D* نشان داده شده است. به دلیل تقارن حاکم بر مساله، تنها یک چهارم از مدل تونل شبیه سازی شده است.

$$\rho_{(j)} = \frac{2H(\sigma_{r(j)}, \gamma_{(j-1)}^p) + \Delta\sigma_r}{2H(\sigma_{r(j)}, \gamma_{(j-1)}^p) - \Delta\sigma_r} \rho_{(j-1)} \quad (22)$$

بر اساس معادله سازگاری کرنش-جابجایی و با استفاده از روش تفاضل محدود، نمو کرنش مماسی پلاستیک در حلقه  $j$  ام به صورت زیر محاسبه می‌شود (Lee & Pietruszczak, 2008):

$$\Delta\varepsilon_{\theta(j)}^p = -\frac{\frac{\Delta\varepsilon_{\theta(j)}^e}{\Delta\rho_{(j)}} - \frac{1+\nu}{E} \frac{H(\sigma_{r(j)}, \gamma_{(j-1)}^p)}{\bar{\rho}_{(j)}} - \frac{1}{\bar{\rho}_{(j)}} (\varepsilon_{\theta(j-1)}^p - \varepsilon_{r(j-1)}^p)}{\frac{1}{\Delta\rho_{(j)}} + \left(1 + K_{(j-1)} \frac{1}{\bar{\rho}_{(j)}}\right)}$$

$$\bar{\rho}_{(j)} = \frac{\rho_{(j)} + \rho_{(j-1)}}{2} \quad (23)$$

با توجه به نمو کرنش مماسی پلاستیک محاسبه شده در حلقه  $j$  ام و پارامتر اتساعی حلقه قبل، مقدار نمو کرنش شعاعی پلاستیک در حلقه  $j$  ام به صورت ذیل محاسبه می‌شود:

$$\Delta\varepsilon_{r(j)}^p = -K_{(j-1)} \Delta\varepsilon_{\theta(j)}^p \quad (24)$$

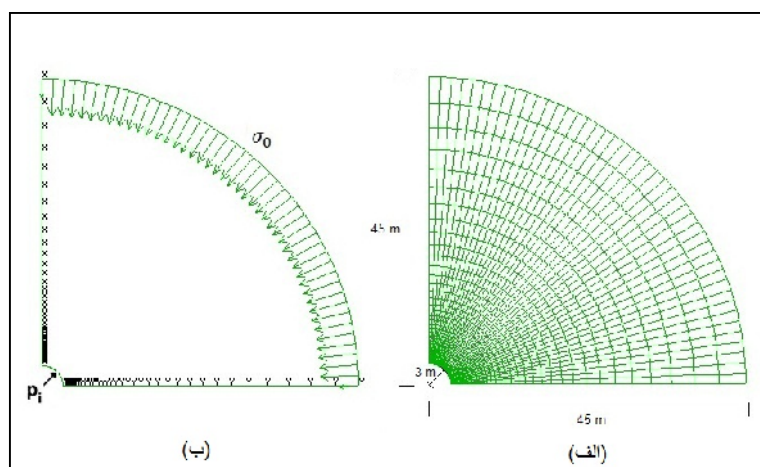
پارامتر نرم شونده در حلقه  $j$  ام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma_{(j)}^p = \gamma_{(j-1)}^p + (\Delta\varepsilon_{\theta(j)}^p - \Delta\varepsilon_{r(j)}^p) \quad (25)$$

کرنش شعاعی و مماسی کل در زون پلاستیک در حلقه  $j$  ام به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{r(j)} &= \varepsilon_{r(j-1)} + \Delta\varepsilon_{r(j)}^e + \Delta\varepsilon_{r(j)}^p \\ \varepsilon_{\theta(j)} &= \varepsilon_{\theta(j-1)} + \Delta\varepsilon_{\theta(j)}^e + \Delta\varepsilon_{\theta(j)}^p \end{aligned} \quad (26)$$

میزان جابجایی در حلقه  $j$  ام ( $u_{(j)}$ ) بر اساس جابجایی نرمالیزه شده ( $U_{(j)}$ ) و با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود (Lee & Pietruszczak, 2008):



شکل ۵- مدل ساخته شده در نرم افزار *FLAC 2D*، (الف) هندسه و مش بندی، (ب) شرایط مرزی

داده‌های ورودی مساله به شرح جدول ۱ است:

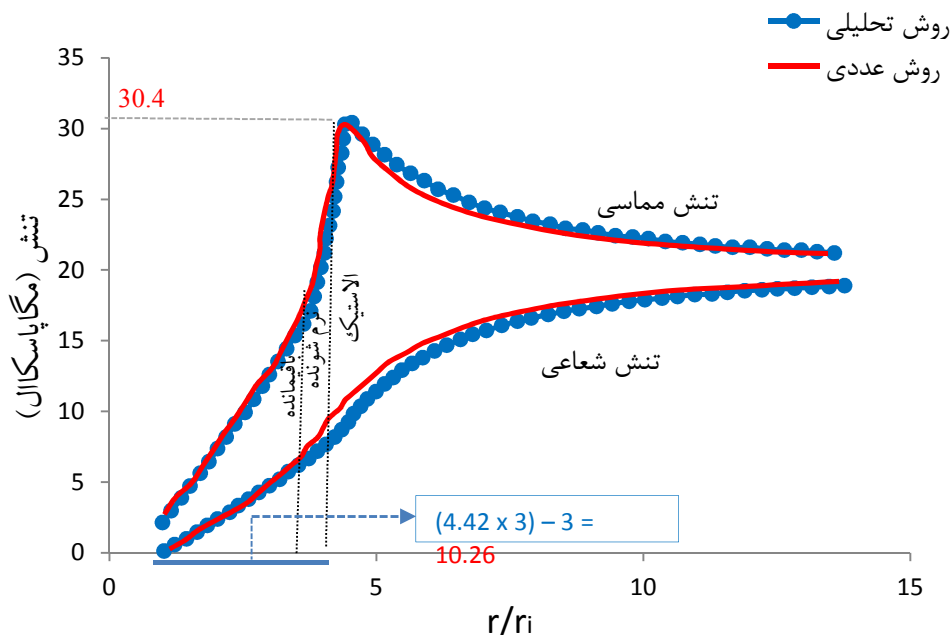
جدول ۱- داده‌های ورودی مساله

پارامتر	مقدار
$E$ (GPa)	۱۰
$\theta$	۰٫۲۵
$\sigma_0$ (MPa)	۲۰
$\varphi_p$	۳۰
$\varphi_r$	۲۲
$C_p$ (MPa)	۱٫۰
$C_r$ (MPa)	۰٫۷
$\Psi_p, \Psi_r$	۳٫۷۵
$\gamma^{p*}$	۰٫۰۰۴

در شکل ۶، منحنی تنش‌های شعاعی و مماسی و برای فاصله از تونل برای حالتی که فشار سیستم نگهداری

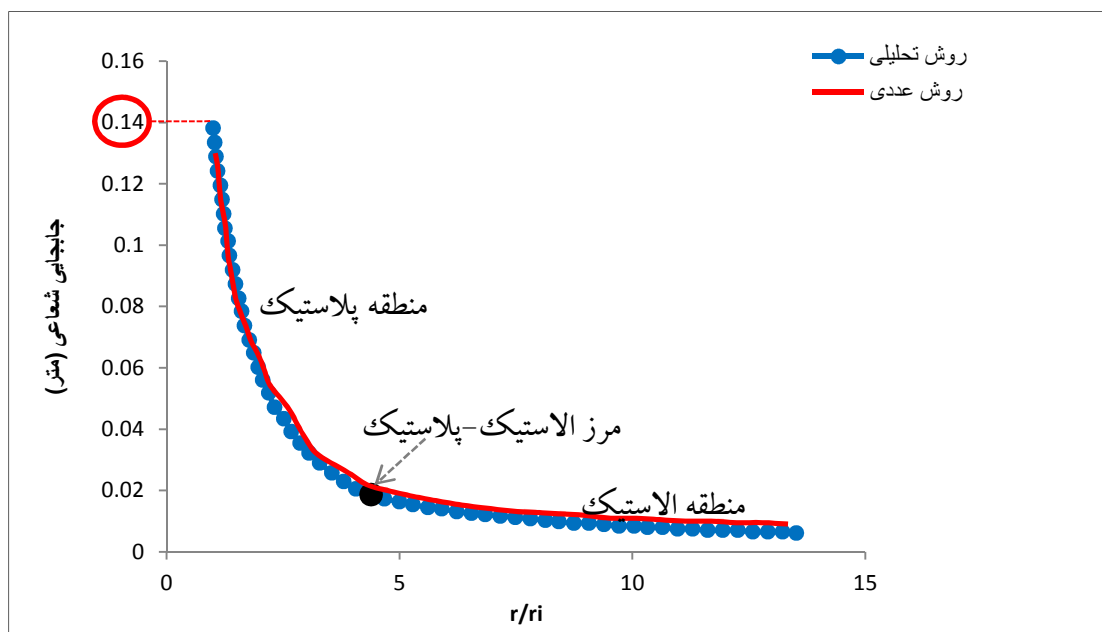
برابر صفر است، در هر دو روش تحلیلی پیشنهادی و عددی ترسیم شده است. ضخامت منطقه پلاستیک برابر  $۱۰٫۲۶۴$  متر است. بیشترین تنش، مربوط به تنش مماسی در مرز الاستیک-پلاستیک برابر با  $۳۰٫۴$  مگاپاسکال است. به علت نبود سیستم نگهداری، مقدار تنش شعاعی در سطح دیواره تونل به مقدار صفر رسیده است. تنش‌های شعاعی و مماسی در فاصله‌ای دور از تونل در منطقه الاستیک به مقدار  $۲۰$  مگاپاسکال (تنش اولیه برجا)، همگرا شده است. مناطق الاستیک و پلاستیک که شامل دو منطقه نرم شوندگی و باقیمانده است، در شکل مشخص شده است. تغییر ناگهانی شیب منحنی تنش مماسی در منطقه پلاستیک نشان دهنده تغییر شرایط از منطقه نرم شونده به باقیمانده است.

در شکل ۷، منحنی جابجایی شعاعی در برابر فاصله شعاعی از تونل در حالتی که فشار سیستم نگهداری برابر صفر است، در هر دو روش تحلیلی پیشنهادی و عددی ترسیم شده است.



شکل ۶- نمودار توزیع تنش‌های شعاعی و مماسی در برابر فاصله شعاعی از تونل

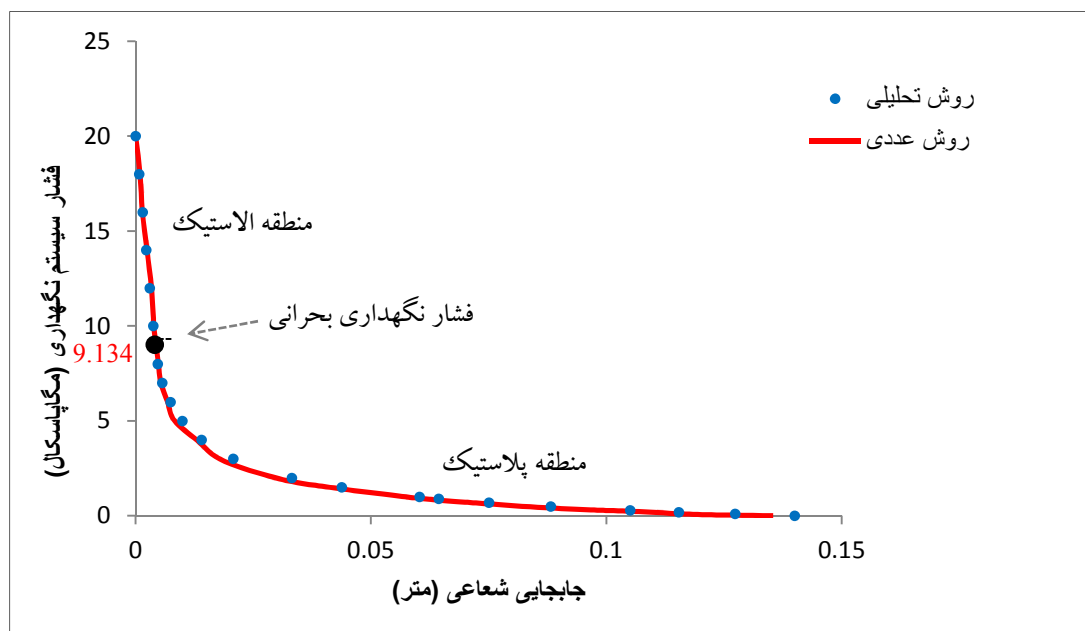
منحنی اندرکنش زمین در تونل با در نظر گرفتن زون پلاستیک با رفتار نرم شونده و اتساعی: ص ۵۳-۷۳



شکل ۷- نمودار جابجایی شعاعی در برابر فاصله شعاعی از تونل

اندرکنش زمین با دو روش تحلیلی پیشنهادی و عددی ترسیم شده است. چنانچه در شکل مشاهده می شود، مقدار فشار نگهداری بحرانی، ۹/۱۳۴ مگاپاسکال است که مرز بین منطقه الاستیک و پلاستیک را مشخص می کند.

بر اساس شکل ۷ جابجایی شعاعی در سطح دیواره تونل ۱۴ سانتیمتر است. همچنین، مقدار جابجایی در مرز الاستیک-پلاستیک با فاصله شعاعی ۱۳/۲۶۴ متر از مرکز تونل، حدود ۱/۸ سانتیمتر می باشد. در شکل ۸، منحنی



شکل ۸- منحنی اندرکنش زمین



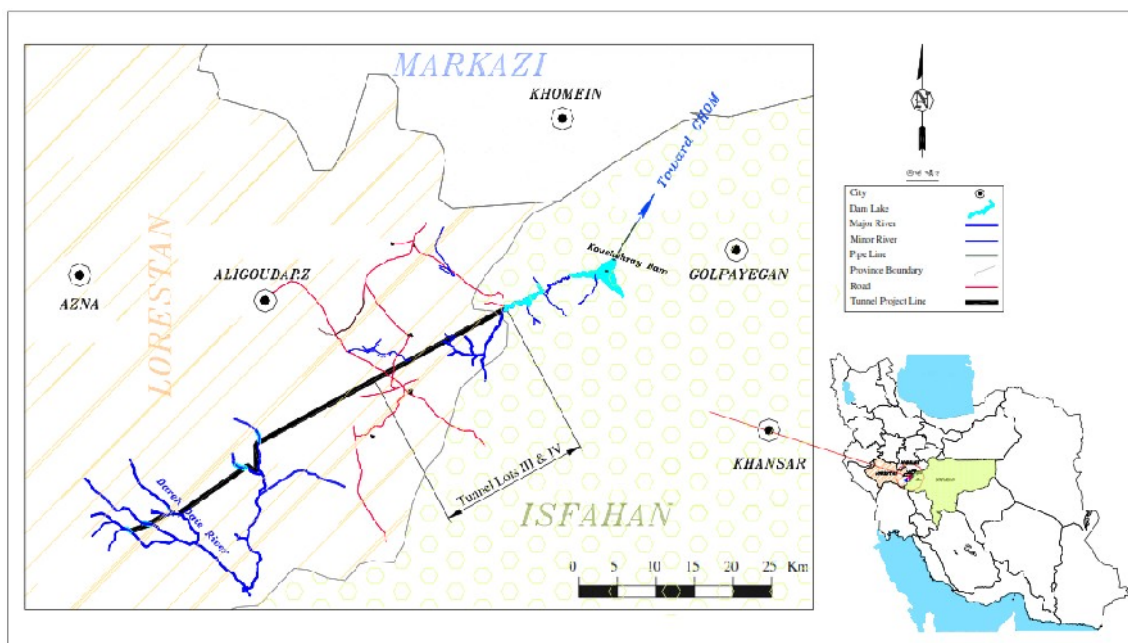
شده است. در *TBM* دوسپره، قطر جلوی سپر بیش از انتهای آن است. در شکل ۹، تصویری از موقعیت جغرافیایی پروژه مشاهده می‌شود (Rostami & Farrokh, 2008)

برای دو کیلومتر از طول تونل (کیلومتر ۳۰ تا ۳۲)، همگرایی دیواره تونل مستقیماً با استفاده از ابزار اندازه‌گیری در چال‌های تزریق در داخل پوشش سگمنت بتنی، اندازه‌گیری شده است. از آنجا که سگمنت‌های بتنی تونل شامل چال تزریق هستند، توسط این چال‌ها می‌توان به توده سنگ پیرامون تونل به منظور اندازه‌گیری مستقیم همگرایی زمین دسترسی پیدا کرد (Farrokh & Rostami, 2009). شکل ۱۰، تغییرات میزان همگرایی تونل را نسبت به زمان برای دونوع توده ماسه سنگ و شیست در محدوده‌ای از تونل نشان می‌دهد.

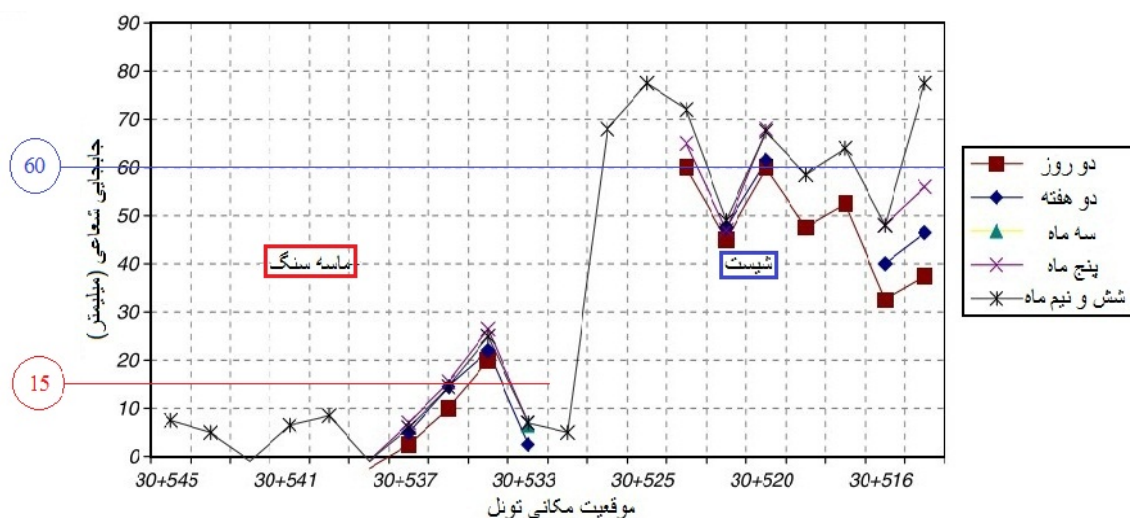
چنانچه مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نمودارهای ترسیمی با روش تحلیلی پیشنهادی و روش عددی وجود دارد.

### ۲-۳- صحت‌سنجی با همگرایی‌های تونل انتقال آب قمرود

تونل انتقال آب قمرود یکی از اجزای سیستم مدیریت آب در ایران مرکزی می‌باشد. این پروژه شامل یک تونل به طول ۳۶ km از رودخانه دز تا مخزن آب گلپایگان است. این تونل به چهار بخش ۹ کیلومتری تقسیم شده است. قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء (ص) طراحی و اجرای بخش‌های ۳ و ۴ پروژه با مجموع طول ۱۸ کیلومتر از انتهای تونل را برعهده داشته است. امتداد تونل *N60E* است. بخش‌های ۳ و ۴ از تونل انتقال آب قمرود با یک *TBM* دو سپره به قطر ۴٫۵ متر حفاری و اجرا



شکل ۹- موقعیت جغرافیایی تونل انتقال آب قمرود (Rostami & Farrokh, 2008).



شکل ۱۰- همگرایی شعاعی تونل به صورت تابعی از زمان (Rostami & Farrokh, 2008)

جابجایی شعاعی در برابر فاصله شعاعی از تونل با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ترسیم شده است. با مقایسه شکل‌های ۱۰ و ۱۱، تطابق نسبتاً خوبی بین همگرایی‌های محاسبه شده از الگوریتم پیشنهادی و همگرایی‌های اندازه گیری شده در دیواره تونل وجود دارد. بر این اساس، میزان جابجایی‌ها در توده شیسست زیاد است. بر اساس گزارشات شرکت مهندسی مشاور قائم، *TBM* در این قسمت به دلیل همگرایی‌های زیاد، گیر کرد. در شکل ۱۲، نمودار تنش‌های شعاعی و مماسی در برابر فاصله شعاعی از تونل برای دو توده شیسست و ماسه سنگ با الگوریتم پیشنهادی ترسیم شده است.

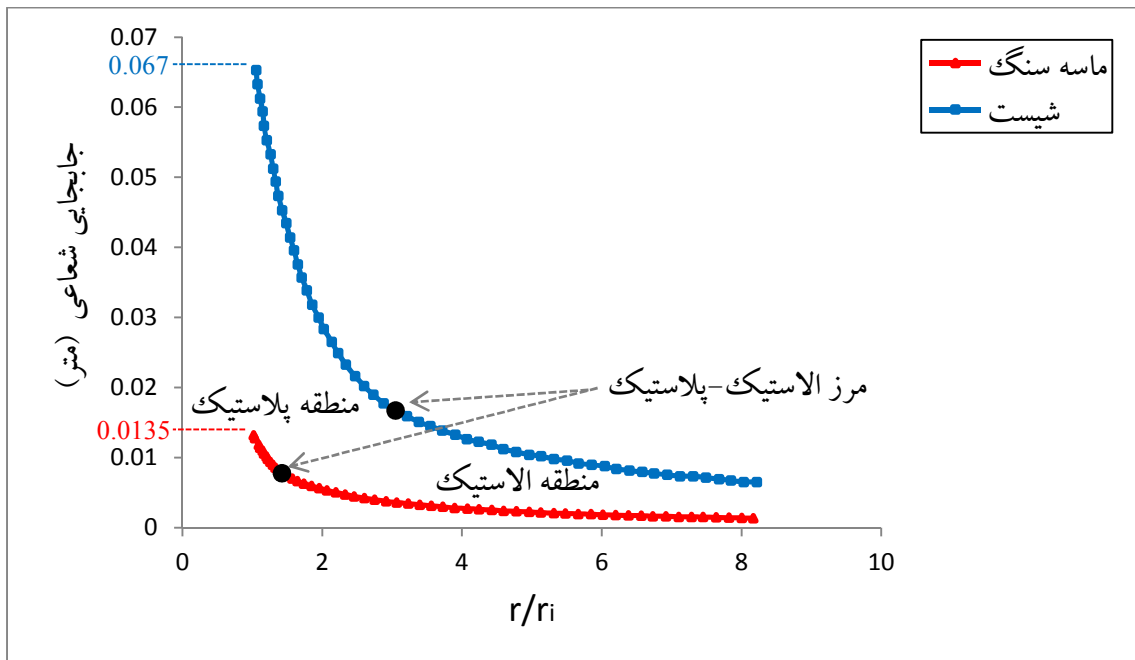
بر این اساس، ضخامت زون پلاستیک شکل گرفته پیرامون تونل در ماسه سنگ ۱ متر و در بخش شیسست ۴٫۷۸ متر است. مقدار تنش مماسی در مرز الاستیک-پلاستیک به بیشترین مقدار می‌رسد. این تنش در بخش توده ماسه سنگ ۲۷٫۲ مگاپاسکال و در بخش سنگ شیسستی ۲۴٫۸ مگاپاسکال است. در شکل ۱۳، منحنی اندرکنش زمین برای دو توده شیسست و ماسه سنگ با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، ترسیم شده است.

همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، میانگین همگرایی‌های اندازه گیری شده در دیواره تونل برای ماسه سنگ در حدود ۱۵ میلی‌متر و برای شیسست در حدود ۶۰ میلی‌متر است. سایر داده‌های برداشت شده از سایت در جدول ۲ ارائه شده است:

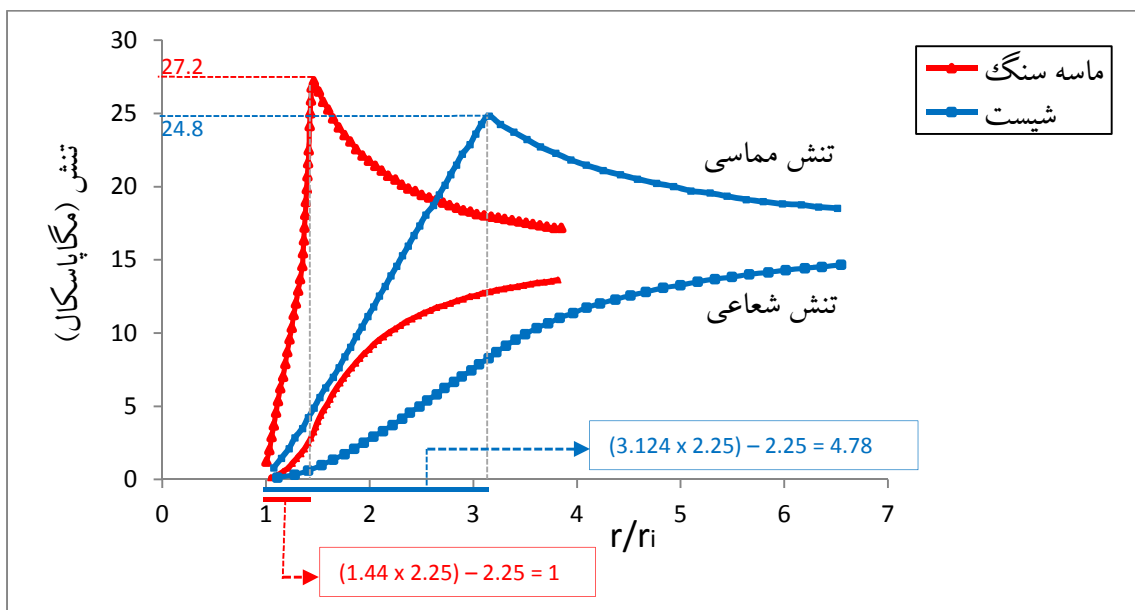
جدول ۲- داده‌های برداشت شده از تونل انتقال آب قمرود (Farrokh & Rostami, 2009)

پارامتر	ماسه سنگ	شیست
$E$ (GPa)	۶٫۵	۴٫۵
$\theta$	۰٫۲۵	۰٫۲۵
$\sigma_0$ (MPa)	۱۵٫۳	۱۶٫۵۷
$\sigma_c$ (MPa)	۶۰	۴۰
$m_t$	۱۹	۹
$GSI_{peak}$	۵۰	۳۵

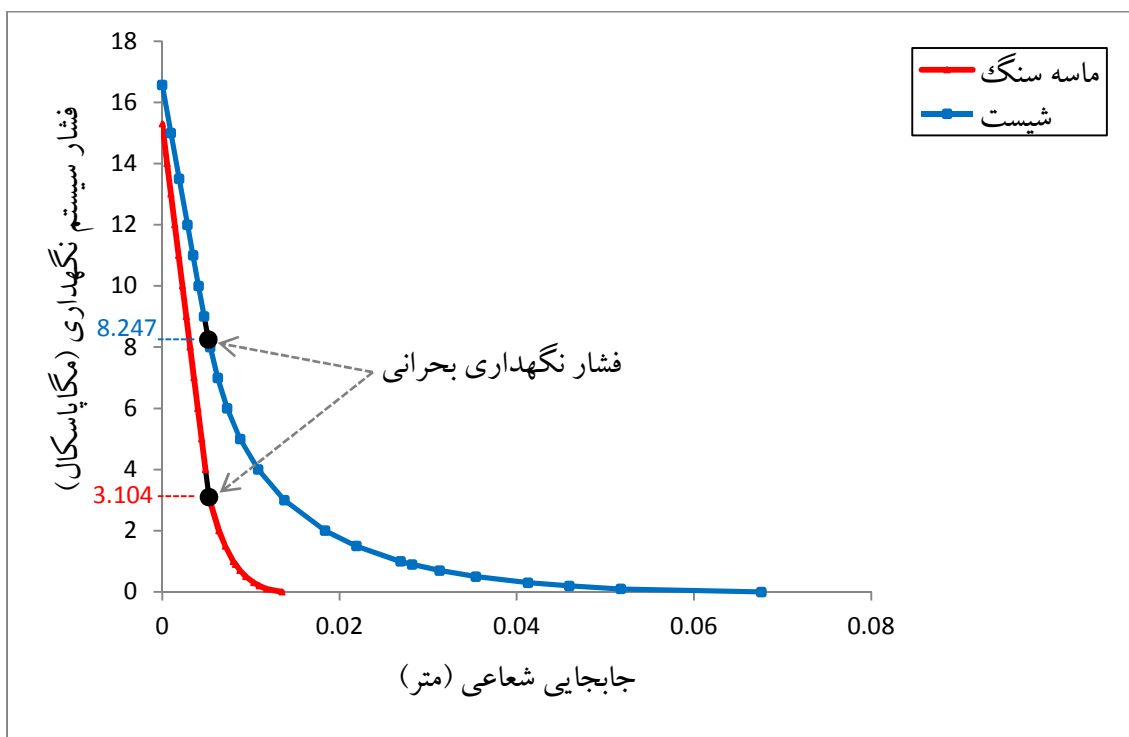
به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، همگرایی‌های محاسبه شده با روش تحلیلی پیشنهادی با میزان همگرایی‌های اندازه گیری شده در دیواره تونل، مقایسه شد. در شکل ۱۱، منحنی



شکل ۱۱- نمودار جابجایی شعاعی در برابر فاصله شعاعی از تونل



شکل ۱۲- نمودار توزیع تنش‌های شعاعی و مماسی در برابر فاصله شعاعی از تونل



شکل ۱۳- منحنی اندرکنش زمین

همکارانش از کاهش خطی پارامتر اتساع با افزایش پارامتر نرم شونده در الگوریتم پیشنهادی خود استفاده کردند (Park, et al., 2008) و (Lee, et al., 2008).

دیتورنی که مطالعات زیادی در زمینه اتساع سنگ انجام داده است، با بیان اینکه استفاده از زاویه اتساع ثابت در محیط پیرامون تونل، غیرواقعی است، کاهش نمایی پارامتر اتساع با افزایش پارامتر نرم شونده را پیشنهاد داد (Detournay, 1986). به منظور بررسی تاثیر پارامتر اتساع، در شکل ۱۴، منحنی جابجایی شعاعی در برابر فاصله شعاعی از تونل با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای سه حالت اتساع ثابت، کاهش خطی و نمایی پارامتر اتساع ترسیم شده است. مقدار زاویه اتساع ماکزیمم در مرز الاستیک-پلاستیک، ۲۵ درجه فرض شده است. سایر داده‌های ورودی مساله در جدول ۳ ارائه شده است.

بر اساس شکل ۱۳، پس از حدود ۵ میلی‌متر همگرایی دیواره تونل، توده‌های سنگی شیبست و ماسه سنگ رفتار پلاستیک نشان می‌دهند. فشار نگهداری بحرانی برای ماسه سنگ ۳٫۱۰۴ و برای شیبست ۸٫۲۴۷ مگاپاسکال است.

#### ۴- مطالعه پارامتری الگوریتم پیشنهادی

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر الگوریتم پیشنهادی، منحنی‌های رفتاری زمین برای مقادیر متفاوت از هر یک از پارامترهای اتساع، شاخص مقاومت زمین شناسی و پارامتر نرم شونده بحرانی ترسیم شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

##### ۴-۱- تاثیر پارامتر اتساع

هووک و براون بر اساس تعدادی آزمایش‌های تجربی استفاده از زوایای اتساع ثابت برای توده سنگ‌هایی با کیفیت‌های متفاوت را پیشنهاد دادند (Hoek & Brown 1997).

پاک و همکارانش و همچنین لی و

شکل ۱۴، به نظر می‌رسد که استفاده از زاویه اتساع ثابت، همگرایی دیواره تونل را بیش از اندازه زیاد نشان می‌دهد، لذا تحلیل نتایج با اتساع ثابت، محافظه کارانه است. مقدار جابجایی‌های شعاعی در منطقه الاستیک برای هر سه حالت، یکسان است، که نشانگر عدم تاثیر اتساع در منطقه الاستیک است.

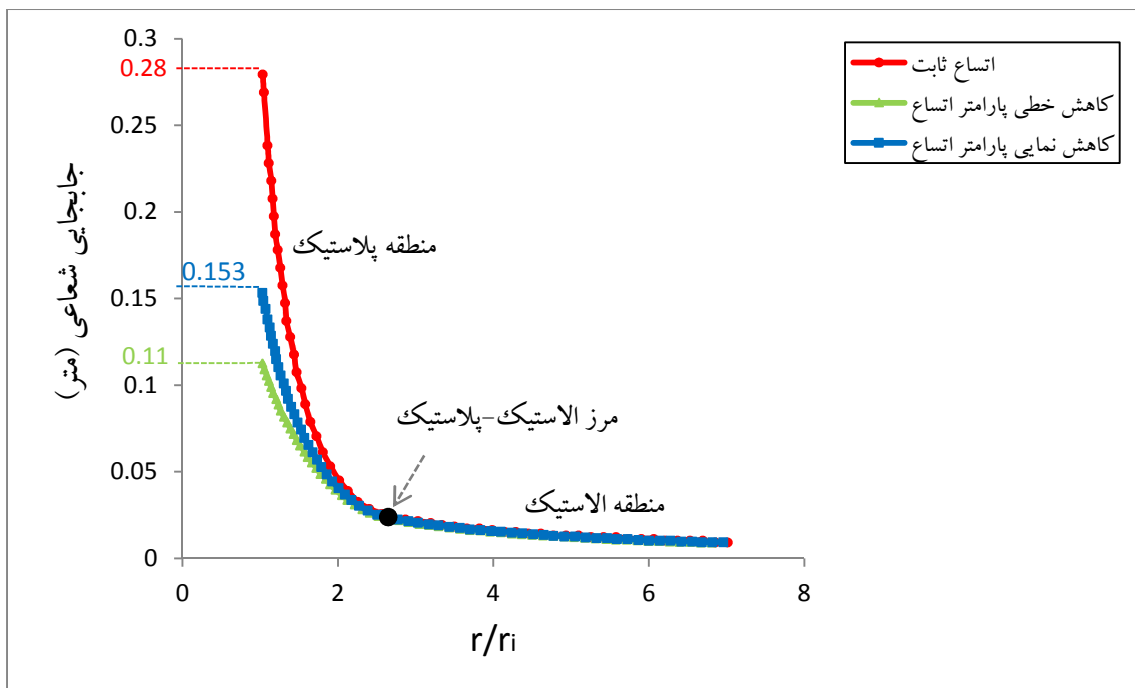
در شکل ۱۵، نمودار جابجایی شعاعی در برابر فاصله شعاعی از تونل برای مقادیر متفاوت زاویه اتساع ماکزیمم در مرز الاستیک-پلاستیک با در نظر گرفتن کاهش نمایی پارامتر اتساع در زون پلاستیک، ترسیم شده است.

بر اساس شکل ۱۵، میزان همگرایی دیواره تونل برای زاویه اتساع ماکزیمم ۲۵ درجه برابر ۱۵/۵ سانتیمتر و برای اتساع صفر برابر ۸ سانتیمتر است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه اتساع میزان همگرایی دیواره تونل از ۸ سانتیمتر به ۱۵/۵ سانتیمتر افزایش یافته است که این موضوع اهمیت بالای تاثیر این پارامتر در تخمین همگرایی دیواره تونل را نشان می‌دهد.

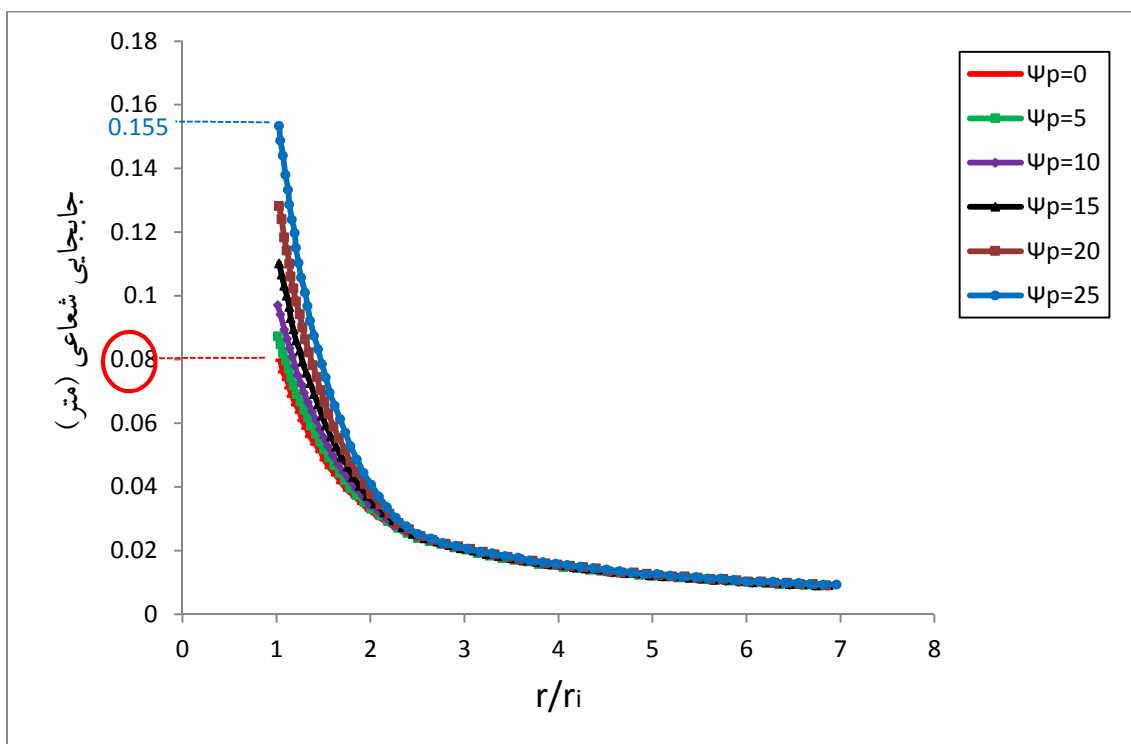
جدول ۳- داده های ورودی مساله

پارامتر	مقدار
$r_i$ (m)	۴٫۵
$\theta$	۰٫۲۵
$\sigma_0$ (MPa)	۱۵
$P_i$ (MPa)	۰
$\sigma_c$ (MPa)	۳۰
$m_i$	۱۰
$GSI_{peak}$	۵۰

چنانچه در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، با استفاده از اتساع ثابت، جابجایی شعاعی در سطح دیواره تونل ۲۸ سانتیمتر و با استفاده از کاهش خطی پارامتر اتساع (رابطه ۴)، این مقدار ۱۱ سانتیمتر محاسبه شده است. با استفاده از کاهش نمایی پارامتر اتساع (رابطه ۱۱)، مقدار جابجایی در سطح دیواره تونل ۱۵/۳ سانتیمتر محاسبه می‌شود. با توجه به



شکل ۱۴- نمودار جابجایی شعاعی در برابر فاصله شعاعی از تونل برای سه حالت اتساع ثابت، کاهش خطی و نمایی پارامتر اتساع



شکل ۱۵- نمودار جابجایی شعاعی در برابر فاصله شعاعی از تونل با در نظر گرفتن کاهش نمایی پارامتر اتساع با افزایش پارامتر نرم شوندگی

در شکل ۱۶، نمودار تنش‌های شعاعی و مماسی در برابر فاصله شعاعی از تونل برای مقادیر متفاوت  $GSI$  ترسیم شده است. چنانچه در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، با کاهش مقدار  $GSI$ ، شعاع منطقه پلاستیک شکل گرفته پیرامون تونل، افزایش پیدا کرده است، به طوری که ضخامت منطقه پلاستیک شکل گرفته در پیرامون تونل برای توده سنگی با مقدار  $GSI$  برابر با ۷۵ در حدود ۲٫۶۱ متر و برای مقدار  $GSI$  برابر با ۲۵ در حدود ۹٫۹۳ متر می‌باشد. همچنین، مقدار تنش مماسی در مرز الاستیک-پلاستیک، با کاهش مقدار  $GSI$ ، کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار  $GSI$ ، سهم منطقه نرم شونده از کل زون پلاستیک کاهش یافته و سنگ شکننده‌تر می‌شود. همچنین، با کاهش مقدار  $GSI$ ، سهم منطقه نرم شونده از کل زون پلاستیک افزایش یافته و سنگ شکننده‌تر می‌شود. در شرایطی که مقدار  $GSI$  برابر ۷۵ است، رفتار سنگ به سمت الاستوپلاستیک شکننده و در شرایطی که مقدار  $GSI$  برابر ۲۵ است، رفتار سنگ به سمت الاستوپلاستیک کامل میل می‌کند.

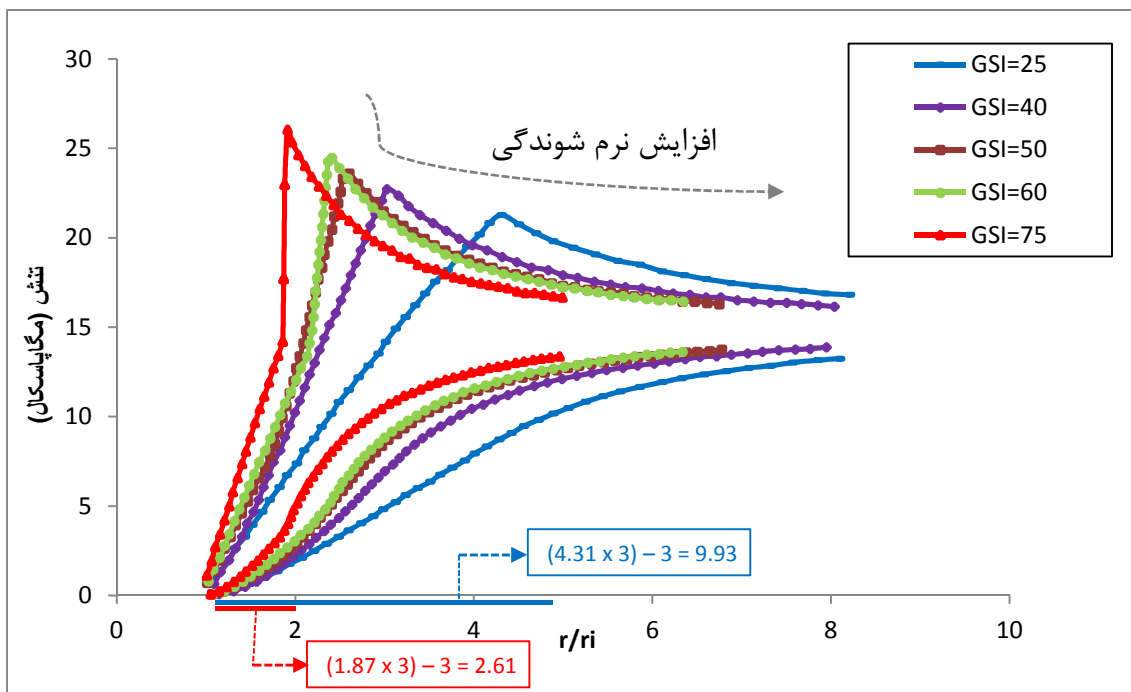
#### ۴-۲- تاثیر شاخص مقاومت زمین شناسی ( $GSI$ )

به منظور در نظر گرفتن کیفیت توده سنگ در محاسبه همگرایی دیواره تونل، در الگوریتم پیشنهادی از شاخص مقاومت زمین شناسی برای محاسبه پارامترهای توده سنگ استفاده شده است. به منظور بررسی اثر این پارامتر، منحنی‌های رفتاری زمین با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای مقادیر متفاوت  $GSI$  ترسیم شده است. داده‌های ورودی مساله در جدول ۴ ارائه شده است.

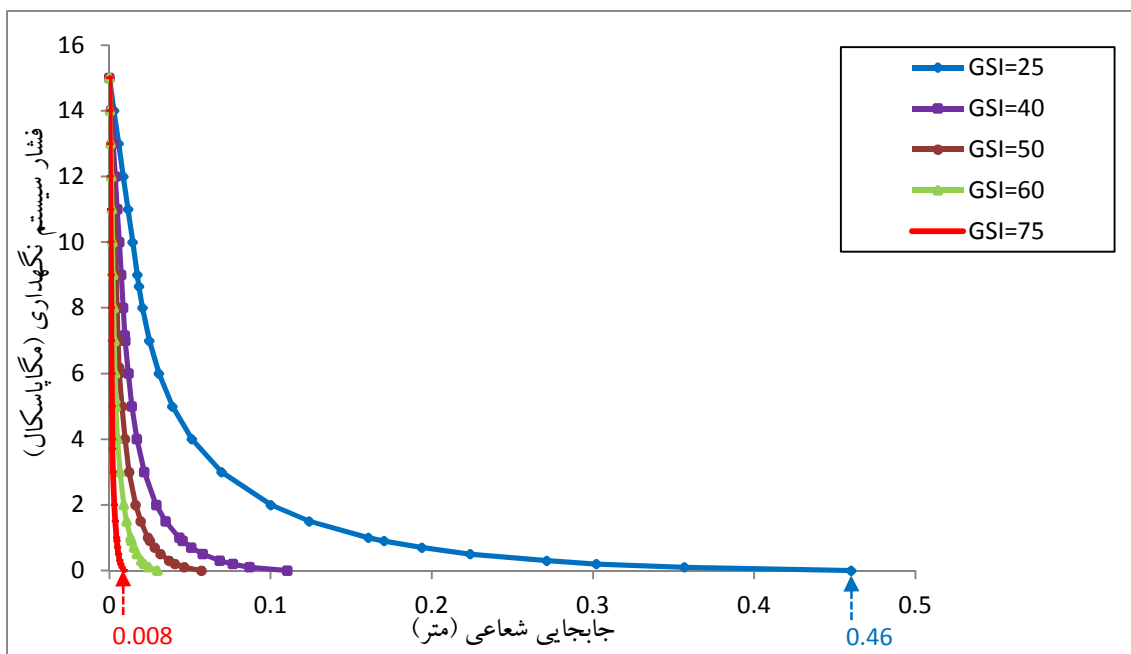
جدول ۴- داده‌های ورودی مساله

مقدار	پارامتر
۳	$r_i (m)$
۰٫۲۵	$\theta$
۱۵	$\sigma_0 (MPa)$
۰	$P_i (MPa)$
۳۰	$\sigma_c (MPa)$
۱۰	$m_i$

در شکل ۱۷، منحنی اندرکنش زمین برای مقادیر متفاوت  $GSI$  ترسیم شده است. بر اساس شکل، میزان همگرایی دیواره تونل برای  $GSI$  برابر با ۲۵ حدود ۴۶ سانتیمتر و برای  $GSI$  برابر با ۷۵ حدود ۸ میلی‌متر است.



شکل ۱۶- نمودار توزیع تنش‌های شعاعی و مماسی در برابر فاصله شعاعی از تونل برای مقادیر متفاوت  $GSI$



شکل ۱۷- منحنی اندرکنش زمین برای مقادیر متفاوت  $GSI$

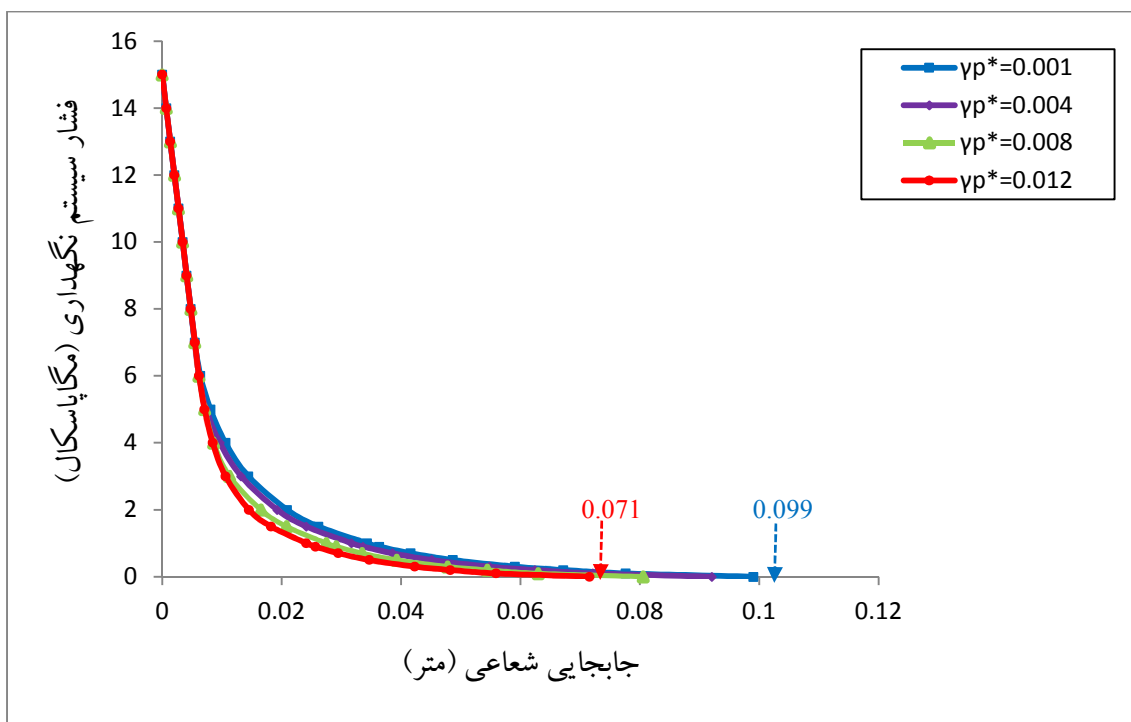
### ۳-۴- تاثیر پارامتر نرم شوندگی بحرانی

با کاهش پارامتر نرم شوندگی بحرانی رفتار سنگ به سمت شکست شکننده و با افزایش آن به سمت حالت الاستوپلاستیک کامل همگرا می‌شود. بنابراین می‌توان حالت‌های الاستوپلاستیک شکننده و الاستوپلاستیک کامل را به عنوان حدهای بالا و پایین مدل رفتاری الاستوپلاستیک با کرنش نرم شوندگی بیان کرد (Alonso, et al., 2003). به منظور بررسی تاثیر این پارامتر، منحنی‌های رفتاری زمین برای مقادیر متفاوت پارامتر نرم شوندگی بحرانی ترسیم و با یکدیگر مقایسه شده است. داده‌های ورودی مساله در جدول ۵ ارائه شده است. در شکل ۱۸، منحنی اندرکنش زمین برای مقادیر متفاوت پارامتر نرم شوندگی بحرانی ترسیم شده است. همانگونه که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، با افزایش پارامتر نرم شوندگی بحرانی میزان جابجایی‌های شعاعی در سطح دیواره تونل از ۹۹ میلیمتر به ۷۱ میلیمتر کاهش یافته است. بنابراین، با افزایش شکل پذیری (افزایش پارامتر نرم شوندگی بحرانی)، میزان همگرایی دیواره تونل کاهش می‌یابد. بالعکس، با افزایش شکنندگی (کاهش پارامتر نرم شوندگی بحرانی)، میزان همگرایی دیواره تونل افزایش می‌یابد. با تغییر این

پارامتر، میزان جابجایی‌ها در زون الاستیک، تغییری نکرده است.

جدول ۵- داده‌های ورودی مساله

پارامتر	مقدار
$r_i (m)$	۳
$E (GPa)$	۵۷
$\vartheta$	۰٫۳
$\sigma_0 (MPa)$	۱۵
$P_i (MPa)$	۰
$\sigma_c (MPa)$	۳۰
$m_p$	۱٫۷
$m_r$	۰٫۸۵
$s_p$	۰٫۰۰۳۹
$s_r$	۰٫۰۰۱۹
$\Psi_p, \Psi_r$	۰
$a_p$	۰٫۵۵
$a_r$	۰٫۶۰

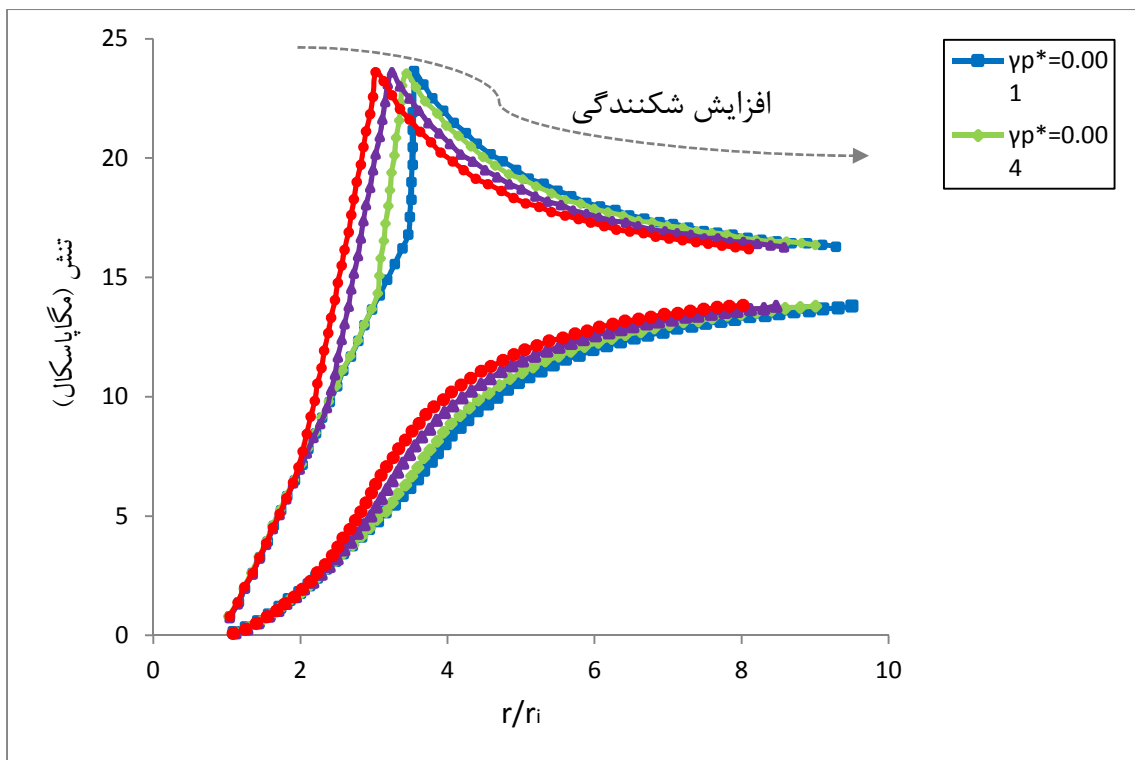


شکل ۱۸- منحنی اندرکنش زمین برای مقادیر متفاوت پارامتر نرم شوندگی بحرانی



رفتار شکل پذیرتر سنگ است. از سوی دیگر، با کاهش پارامتر نرم شوندگی بحرانی (افزایش شکنندگی)، ضخامت کل منطقه پلاستیک افزایش می‌یابد، اما سهم بخش نرم شونده از کل زون پلاستیک کاهش می‌یابد. در صورتی که، با افزایش پارامتر نرم شوندگی بحرانی (افزایش شکل پذیری)، ضخامت کل منطقه پلاستیک کاهش می‌یابد، اما سهم بخش نرم شونده از کل زون پلاستیک افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۹، نمودار تنش‌های شعاعی و مماسی در برابر فاصله شعاعی از تونل برای مقادیر متفاوت پارامتر نرم شوندگی بحرانی ترسیم شده است. بر اساس شکل ۱۹، برای مقادیر بسیار کوچک پارامتر نرم شوندگی بحرانی، کاهش تنش در منطقه پلاستیک به صورت ناگهانی رخ می‌دهد که نشانگر رفتار شکننده سنگ است. در صورتی که، با افزایش پارامتر نرم شوندگی بحرانی، کاهش تنش در منطقه پلاستیک به صورت تدریجی رخ می‌دهد که نشانگر



شکل ۱۹- نمودار توزیع تنش‌های شعاعی و مماسی در برابر فاصله شعاعی از تونل

پیشنهادی تطابق خوبی با نتایج عددی و همگرایی‌های اندازه‌گیری شده تونل قمرود دارد. نتایج محاسبات با الگوریتم پیشنهادی نشان داد که پارامتر اتساع نقش مهمی در تخمین همگرایی دیواره تونل و پایداری آن دارد، لذا این پارامتر بایستی با دقت تعیین شود. بر اساس نتایج و نمودارهای ترسیمی، با افزایش اتساع، مقدار همگرایی‌های دیواره تونل زیاد می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که تحلیل با اتساع ثابت، جابجایی شعاعی دیواره تونل را زیاد تخمین می‌زند، لذا تحلیل با استفاده از اتساع ثابت،

## ۵- نتیجه‌گیری

الگوریتم پیشنهادی رفتار پلاستیک نرم شونده، اتساع متغیر و کیفیت توده سنگ را به طور واقعی‌تر لحاظ می‌نماید. ازسویی سرعت محاسبات در روش تحلیلی گام به گام مبتنی بر روش تفاضل محدود نسبت به شبیه‌سازی‌های عددی بیشتر است. بنابراین این روش پیش از شبیه‌سازی‌های عددی پیچیده، زمانبر و هزینه به ویژه برای انجام تحلیل‌های حساسیت قابل استفاده است.

در این تحقیق، نتایج محاسبات با استفاده از الگوریتم

پارامتر نرم شونده بحرانی، میزان همگرایی دیواره تونل کاهش می‌یابد. با افزایش این پارامتر، ضخامت کل منطقه پلاستیک کاهش یافته، اما سهم بخش نرم شونده از کل زون پلاستیک افزایش می‌یابد. به هر صورت برای اعتبارسنجی بیشتر در خصوص الگوریتم پیشنهادی، کارهای تحقیقاتی بیشتر در این زمینه پیشنهاد می‌شود.

محافظه کارانه است. بر اساس محاسبات انجام گرفته با الگوریتم پیشنهادی، با افزایش کیفیت توده سنگ ( $GSI$ ) ضخامت زون پلاستیک کاهش یافته و سهم منطقه نرم شونده از کل زون پلاستیک کاهش می‌یابد، لذا سنگ شکننده تر شده و رفتار آن به سمت الاستوپلاستیک شکننده میل می‌کند. با افزایش

## ۶- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
$r_i$	$m$	شعاع اولیه تونل	$GSI_{peak}$	-	شاخص مقاومت زمین شناسی تعیین شده در سایت
$\sigma_0$	$MPa$	فشار برجا	$GSI_{res}$	-	شاخص مقاومت زمین شناسی باقیمانده
$P_i$	$MPa$	فشار داخلی	$M$	$MPa$	مدول کاهشی
$E$	$MPa$	مدول الاستیک	$\sigma_c$	$MPa$	مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر
$\theta$	-	نسبت پواسون	$\sigma_{3mean}$	$MPa$	تنش جانبی میانگین
$r_e$	$m$	شعاع زون پلاستیک	$P_{i_{cr}}$	$MPa$	فشار نگهداری بحرانی
$\sigma_\theta$	$MPa$	تنش مماسی	$\rho$	-	شعاع نرمالیزه
$\sigma_r$	$MPa$	تنش شعاعی	$\sigma_R$	$MPa$	تنش شعاعی در مرز الاستیک-پلاستیک
$F$	-	تابع تسلیم	$\Delta\sigma_r$	$MPa$	نمو تنش شعاعی
$m, s, a$	-	پارامترهای مقاومتی معیار هوک و بروان	$\Delta\sigma_\theta$	$MPa$	نمو تنش مماسی
$C$	$MPa$	چسبندگی	$\Delta\varepsilon_r^e$	-	نمو کرنش شعاعی الاستیک
$\varphi$	$degree$	زاویه اصطکاک داخلی	$\Delta\varepsilon_\theta^e$	-	نمو کرنش مماسی الاستیک
$G$	-	تابع پتانسیل پلاستیک	$\Delta\varepsilon_r^p$	-	نمو کرنش شعاعی پلاستیک
$K$	-	ضریب اتساع	$\Delta\varepsilon_\theta^p$	-	نمو کرنش مماسی پلاستیک
$\dot{\varepsilon}_r^p$	-	نمو کرنش شعاعی پلاستیک	$\varepsilon_r$	-	کرنش شعاعی کل در زون پلاستیک
$\dot{\varepsilon}_\theta^p$	-	نمو کرنش مماسی پلاستیک	$\varepsilon_\theta$	-	کرنش مماسی کل در زون پلاستیک
$\psi$	$degree$	زاویه اتساع	$U$	-	جابجایی شعاعی نرمالیزه شده
$\gamma^p$	-	پارامتر نرم شونده بحرانی	$u$	$m$	جابجایی شعاعی
$\gamma^{p*}$	-	پارامتر نرم شونده بحرانی			

$$\sigma_{r(0)} = \sigma_R, \quad \sigma_{\theta(0)} = 2\sigma_o - \sigma_R \quad .12$$

$$\varepsilon_{r(0)} = \frac{1+\vartheta}{E} (\sigma_R - \sigma_o),$$

$$\varepsilon_{\theta(0)} = \frac{1+\vartheta}{E} (\sigma_o - \sigma_R) \quad .13$$

$$\rho_{(0)} = 1 \quad .14$$

ج) توالی محاسبات برای هر حلقه در منطقه پلاستیک

۱. اگر  $P_{i_{cr}} \geq P_i$  باشد، زون پلاستیک پیرامون تونل به  $n$

حلقه هم مرکز تقسیم می شود. در شرایطی که  $P_{i_{cr}} < P_i$  باشد، هیچ زون پلاستیکی در اطراف تونل شکل نمی‌گیرد.

۲. اگر  $\gamma_{(i)}^p \leq \gamma^{p*}$ ،

$$\mu_{(i)} = \mu_p - (\mu_p - \mu_r) \frac{\gamma_{(i)}^p}{\gamma^{p*}}$$

$$K_{(i)} = 1 + (K_p - 1) e^{-\frac{\gamma_{(i)}^p}{\gamma^{p*}}}$$

و اگر  $\gamma_{(i)}^p > \gamma^{p*}$ ،

$$\mu_{(i)} = \mu_r$$

$$K_{(i)} = K_{(i-1)}$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{P_i - \sigma_R}{n} \quad .3$$

$$\sigma_{r(j)} = \sigma_{r(j-1)} + \Delta\sigma_r \quad .4$$

$$\sigma_{\theta(j)} = \sigma_{r(j)} + H(\sigma_{r(j)}, \gamma_{(j-1)}^p) \quad .5$$

$$\Delta\sigma_{\theta(j)} = \sigma_{\theta(j)} - \sigma_{\theta(j-1)} \quad .6$$

$$\Delta\varepsilon_{r(j)}^e = \frac{1+\vartheta}{E} [(1-\vartheta)\Delta\sigma_r - \vartheta\Delta\sigma_{\theta(j)}] \quad .7$$

$$\Delta\varepsilon_{\theta(j)}^e = \frac{1+\vartheta}{E} [(1-\vartheta)\Delta\sigma_{\theta(j)} - \vartheta\Delta\sigma_r] \quad .7$$

$$\rho_{(j)} = \frac{2H(\sigma_{r(j)}, \gamma_{(j-1)}^p) + \Delta\sigma_r}{2H(\sigma_{r(j)}, \gamma_{(j-1)}^p) - \Delta\sigma_r} \rho_{(j-1)} \quad .8$$

$$\Delta\varepsilon_{\theta(j)}^p = - \frac{\left[ \frac{\Delta\varepsilon_{\theta(j)}^e}{\Delta\rho_{(j)}} - \frac{1+\vartheta}{E} \frac{H(\sigma_{r(j)}, \gamma_{(j-1)}^p)}{\bar{\rho}_{(j)}} - \frac{1}{\bar{\rho}_{(j)}} (\varepsilon_{\theta(j-1)}^p - \varepsilon_{r(j-1)}^p) \right]}{\frac{1}{\Delta\rho_{(j)}} + \left( 1 + K_{j-1} \frac{1}{\bar{\rho}_{(j)}} \right)}$$

$$\bar{\rho}_{(j)} = \frac{\rho_{(j)} + \rho_{(j-1)}}{2}$$

$$\Delta\varepsilon_{r(j)}^p = -K_{(j-1)} \Delta\varepsilon_{\theta(j)}^p \quad .10$$

$$\gamma_{(j)}^p = \gamma_{(j-1)}^p + (\Delta\varepsilon_{\theta(j)}^p - \Delta\varepsilon_{r(j)}^p) \quad .11$$

$$\varepsilon_{r(j)} = \varepsilon_{r(j-1)} + \Delta\varepsilon_{r(j)}^e + \Delta\varepsilon_{r(j)}^p$$

$$\varepsilon_{\theta(j)} = \varepsilon_{\theta(j-1)} + \Delta\varepsilon_{\theta(j)}^e + \Delta\varepsilon_{\theta(j)}^p \quad .12$$

$$U_{(j)} = \varepsilon_{\theta(j)} \rho_{(j)} \quad .13$$

## ۷- پیوست:

روند محاسبات در منطقه پلاستیک نرم شونده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در ادامه آورده شده است.

### الف) داده های ورودی

داده‌های ورودی مساله شامل شعاع اولیه تونل ( $r_i$ )، تنش برجا ( $\sigma_o$ )، فشار داخلی ( $P_i$ )، مقاومت فشار تک محوری سنگ بکر ( $\sigma_c$ )، پارامتر مقاومتی هوک و براون برای سنگ بکر ( $m_i$ )، ضریب آشفنگی محیط ( $D$ )، نسبت پواسون ( $\vartheta$ )، مدول الاستیک ( $E$ ) و شاخص مقاومت زمین شناسی تعیین شده در سایت ( $GSI_{peak}$ ) است.

### ب) محاسبات مقدماتی

$$GSI_{res} = 17.25 e^{0.0107 GSI_{peak}} \quad .1$$

$$m = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad .2$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad .3$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}}) \quad .4$$

$$\varphi =$$

$$\arcsin\left[\frac{6am(s+m\sigma'_3)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am(s+m\sigma'_3)^{a-1}}\right] \quad .5$$

$$c = \frac{\sigma_c[(1+2a)s + (1-a)m\sigma'_3](s+m\sigma'_3)^{a-1}}{(1+a)(2+a)\left(1 + \frac{(6am(s+m\sigma'_3)^{a-1})}{(1+a)(2+a)}\right)^{0.5}}$$

$$\sigma'_3 = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_c} \quad .6$$

$$\Psi_p = \frac{5 GSI_{peak} - 125}{1000} \varphi_p \quad .7$$

$$K_p = \frac{1 + \sin(\Psi_p)}{1 - \sin(\Psi_p)} \quad .8$$

$$\left\{ \begin{aligned} M &= E \left[ 0.0046 e^{0.0768 GSI_{peak}} \left( \frac{\sigma_{rmean}}{\sqrt{s_p \sigma_c}} \right)^{-1} \right. \\ &\quad \left. \text{برای } \frac{\sigma_{rmean}}{\sqrt{s_p \sigma_c}} > 0.1 \right. \end{aligned} \right. \quad .9$$

$$\left\{ \begin{aligned} M &= E \left[ 0.0046 e^{0.0768 GSI_{peak}} \left( \frac{\sigma_{rmean}}{2\sqrt{s_p \sigma_c}} + 0.05 \right)^{-1} \right. \\ &\quad \left. \text{برای } \frac{\sigma_{rmean}}{\sqrt{s_p \sigma_c}} \leq 0.1 \right. \end{aligned} \right.$$

$$\left. \right\}$$

$$\left. \right\}$$

$$\gamma^{p*} = (1 - \frac{1}{2} K_p) [\sigma_{\theta}^{peak}(\sigma_{rmean}) -$$

$$\sigma_{\theta}^{res}(\sigma_{rmean})] \left[ \frac{1}{E} + \frac{1}{M} \right] \quad .10$$

$$\sigma_R = P_{i_{cr}} \quad .11$$

می‌شود. جابجایی شعاعی در هر حلقه توسط  $u_{ij} = U_{(j)}r_e$  تعیین می‌گردد.

با  $n$  مرتبه تکرار محاسبات بالا  $\sigma_{r(n)} = P_i$  و  $r_e = \frac{r_i}{\rho(n)}$

## ۸- منبع‌ها

- Alejano, L.R., Alonso, E. (2005). Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses. *Int J Rock Mech Min Sci.*, 42(4):481–507.
- Alejano, L.R., Alonso, E., Rodriguez-Dono, A., Fernández-Manín, G. (2010). Application of the Convergence-confinement Method to Tunnels in Rock Masses Exhibiting Hoek–Brown Strain-softening Behaviour. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 47(1), 150–160.
- Alejano, L.R., Rodriguez-Dono, A., Veiga, M. (2010). Plastic radii and longitudinal deformation profiles of tunnels excavated in strain-softening rock masses. *Tunneling and Underground Space Technology*, 30:169–82.
- Alonso, E., Alejano, L.R., Varas, F., Fdez-Manin, G., Carranza-Torres, C. (2003). Ground Responses Curves for Rock Masses Exhibiting Strain-softening Behavior. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geotech.* 27, 2003, 1153-1185.
- Brown, E., Bray, J., Landayi, B., Hoek, E. (1983). Ground response curves for rock Tunnels,” *ASCEJ. Geotech. Eng. Div.* 109, 15–39.
- Cai, M., Kaiser, PK., Tasakab, Y., Minamic, M. (2007). Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. *Int J Rock Mech Min Sci.*, 44:247–65.
- Detournay, E. (1986). Elasto-plastic Model of a Deep Tunnel for a Rock With Variable Dilatancy. *Rock Mech. Rock Eng.* 19, 99–108.
- Farrokh, E., Rostami, J. (2008). Correlation of Tunnel Convergence with TBM Operational Parameters and Chip Size in the Ghomroud Tunnel, Iran. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, 700-710.
- Farrokh, E., Rostami, J. (2009). Effect of Adverse Geological Condition on TBM Operation in Ghomroud Tunnel Conveyance Project. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24, 436-446.
- Hoek, E., Brown, ET. (1997). Practical Estimates of Rock Mass Strength. *Int. J. Rock Mech. Sci. Geomech. Abstr.* 34(8), 1165–87.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. (2002). Hoek-Brown Criterion–2002. *edn. Proc. NARMSTAC Conference, Toronto, Vol. 1*, pp 267–273.
- Lee, Y.K., Pietruszczak, S. (2008). A New Numerical Procedure for Elasto-plastic Analysis of a Circular Opening Excavated in a Strain-softening Rock Mass. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23, 588-599.
- Park, K.H., Tontavanich, B., Lee, J.G. (2008). A Simple Procedure for Ground Curve of Circular Tunnel in Elastic-strain Softening Rock Masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 151-159.

Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (1992). *Numerical Recipes in Fortran*. Cambridge University Press.

Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S. (2009). Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. *Rock Mech Rock Eng* 42:131–46.

Wawersik, W.R., Fairhurst, C. (1970). A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *Int J Rock Mech Min Sci* 7:561–75.