

تأثیر وزن ناحیه شکسته بر توزیع تنش و جابجایی محیط اطراف تونل

رامین حیدری*، دانشجوی دکتری مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
احمد فهیمی‌فر، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

Ramin.heidary@aut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۰۴

چکیده

با شروع تغییر شکل‌های پلاستیک در اطراف تونل، میزان فشار وارده بر سقف تونل به علت وزن ناحیه پلاستیک شده بالای آن افزایش می‌یابد که این امر در تحلیل پایداری تونل تأثیرگذار است. در این مقاله، با در نظر گرفتن توده سنگ اطراف تونل به صورت الاستوپلاستیک، با مدل نرم کرنشی و وزن ناحیه پلاستیک و استفاده از معیار هوک-براون، معادلات تنش و جابجایی اطراف تونل بازنویسی شده و به روش تحلیلی- عددی حل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن وزن ناحیه شکسته، توزیع تنش اطراف تونل تغییر می‌کند و مقدار جابجایی و شعاع ناحیه پلاستیک افزایش می‌یابد. این امر، در شرایط با شعاع پلاستیک بزرگتر، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. همچنین، با بررسی تأثیر پارامترهای معیار هوک-براون بر جابجایی اطراف تونل، اهمیت هر کدام از پارامترها نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای هوک-براون در شرایط پلاستیک نسبت به حالت اوج، تأثیر بیشتری بر جابجایی اطراف تونل دارد.

واژه‌های کلیدی: تونل، وزن ناحیه شکسته، تغییر شکل پلاستیک، جابجایی، تنش، رفتار الاستوپلاستیک

۱. مقدمه

شکسته بالای آن افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند نقش مهمی در تحلیل پایداری تونل ایفا کند. همچنین، این تأثیر می‌تواند برای تونل‌های سطحی، تونل در توده سنگ ضعیف و تونل‌های با دهانه بزرگ بیشتر باشد (دتورنی، ۱۹۸۶). برای تونل‌های عمرانی با توجه به عمق آن‌ها، رفتار توده سنگ در بیشتر حالت‌ها به صورت الاستوپلاستیک می‌باشد که این امر به دلیل مشکلات مربوط به روابط آن، در تحقیقات گذشته معمولاً ساده-سازی شده و حالت‌های خاص آن مانند پلاستیک کامل^۱ و ترد شکننده^۲ برای توده سنگ در نظر گرفته شده است. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه، کارنزا-تورس و فرهورست (۱۹۹۹ و ۲۰۰۰) و کارنزا-تورس (۲۰۰۴) بوده که با در نظر گرفتن معیار هوک-براون و

امروزه، با گسترش شهرها و افزایش جمعیت، استفاده از فضاهای زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته است. حفاری در زیر زمین، توزیع تنش موجود در زمین را تغییر داده و باعث جابجایی در توده سنگ محیط اطراف تونل می‌شود. پیش‌بینی حائل تونل، نیازمند بررسی رفتار توده سنگ و ارزیابی بار وارده بر حائل است. تحلیل تونل دایره‌ای حفاری شده در محیط الاستوپلاستیک تحت تنش هیدرواستاتیک یکی از مهم‌ترین و بنیادی‌ترین مسائل مربوط به شناخت رفتار تونل‌ها بوده است. با شروع تغییر شکل‌های غیرالاستیک و گسترش ناحیه با رفتار پلاستیک در اطراف تونل، میزان فشار وارده بر سقف تونل به علت وزن ناحیه پلاستیک و

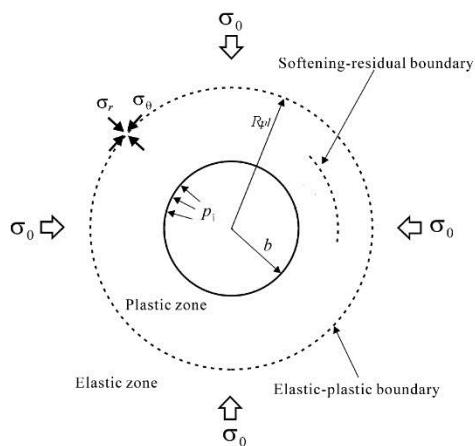
^۱Brittle plastic

^۲Perfect plastic

است که در روابط بیان شده، معیار هوک- براون اصلاح شده استفاده شده و در نهایت تأثیر هر کدام از پارامترهای مقاومتی هوک- براون بر توزیع جابجایی بررسی شده است.

۲. بیان مسئله

شکل ۱، تونل دایره‌ای در محیط پیوسته، همگن، ایزوتروپ و تحت شرایط تنش هیدرواستاتیک را نشان می‌دهد. فشار داخلی تونل با p_i نمایش داده شده است. اگر فشار پوشش تونل کمتر از فشار بحرانی باشد، ناحیه-ای با شعاع R_{pl} در اطراف تونل به وجود می‌آید که ناحیه پلاستیک نامیده می‌شود. در توده سنگ با رفتار نرم - کرنشی، ناحیه پلاستیک از دو ناحیه نرم شونده^۱ و پلاستیک کامل^۲ تشکیل شده است. در شکل ۱، σ_0 تنش درجای محیط اطراف تونل و b شعاع تونل را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شمایی از توده سنگ بعد از حفاری در حالت نرم کرنشی (لی و پیتروژاک، ۲۰۰۷)

۱-۲. معادله تعادل در شرایط بارگذاری وزنی

روش دتورنی (۱۹۸۶) و روش پانت (۱۹۹۵) برای در نظر گرفتن وزن ناحیه شکسته در منحنی پاسخ زمین ارائه شده است. دتورنی (۱۹۸۶) فرض نمود که بارهای ثقلی به صورت شعاعی به سمت مرکز تونل اعمال می‌شوند. با این فرض، حالت تقارن محوری موجود در مسئله حفظ می‌شود. مدل ارائه شده توسط دتورنی در اصطلاح

رفتار توده سنگ به صورت ترد شکننده و الاستوپلاستیک، روابطی را برای تعیین جابجایی اطراف تونل ارائه نموده‌اند. همچنین، آلونسو و همکاران (۲۰۰۳)، آلخانو و آلونسو (۲۰۰۵) و آلخانو و همکاران (۲۰۰۹) با در نظر گرفتن دو معیار هوک- براون و موهر- کولمب، جابجایی و توزیع تنش را در ناحیه اطراف تونل تعیین نموده‌اند. قابل ذکر است که در تحقیقات انجام شده، معیار هوک- براون با فرض $a=0/5$ (ضریب معیار هوک- براون) در نظر گرفته شده است. پارک و همکاران (۲۰۰۵)، با در نظر گرفتن معیارهای هوک- براون و موهر- کولمب برای توده سنگ با رفتار نرم کرنشی، یک روش عددی برای تعیین منحنی پاسخ زمین ارائه داده‌اند. شاران (۲۰۰۵)، با در نظر گرفتن رفتار ترد شکننده برای توده سنگ، راه‌حل بسته‌ای را برای تعیین جابجایی اطراف تونل پیشنهاد کرده است. وی همچنین در سال ۲۰۰۸، با در نظر گرفتن معیار هوک- براون اصلاح شده و رفتار توده سنگ به صورت ترد شکننده، توزیع تنش در اطراف تونل را تعیین نموده است (شاران، ۲۰۰۸). زارعی فرد و فهیمی فر (۲۰۱۲)، با در نظر گرفتن تونل به صورت سطحی، وزن ناحیه پلاستیک و معیار هوک- براون، با فرض $a=0/5$ ، تنش‌ها و جابجایی-های محیط اطراف تونل بررسی شده‌اند که در نهایت، با استفاده از روش المان مجزا، معادلات تعیین شده حل شده‌اند.

همان طور که می‌دانیم، معیار هوک- براون معیار مناسب‌تری برای توصیف رفتار توده سنگ در حوزه عمران می‌باشد. بنابراین، تعیین توزیع تنش و جابجایی اطراف تونل با در نظر گرفتن این معیار، به خصوص در حالت کلی این معیار ($a \neq 0/5$)، می‌تواند به واقعیت نزدیک‌تر باشد. در تحقیقات گذشته، وزن ناحیه شکسته اطراف تونل در محاسبات در نظر گرفته نشده است. در صورتی که این عامل می‌تواند در نتایج تعیین شده تأثیرگذار باشد. در مقاله حاضر، با در نظر گرفتن رفتار محیط اطراف تونل به صورت الاستوپلاستیک و وزن ناحیه پلاستیک، معادلات جابجایی و تنش‌ها در اطراف تونل بازنویسی شده و تأثیر وزن ناحیه شکسته در نتایج بررسی شده است. قابل ذکر

Residual

Critical pressure

Softening

که f_r و f_θ حاصل تقسیم مؤلفه‌های نیروی وزن بر حجم المان و r فاصله المان از مرکز تونل می‌باشد. تونل دارای تقارن محوری بوده و با استفاده از مدل Centripetal این فرض دچار تغییر نشده است. بنابراین، مقادیر تنش‌های شعاعی و مماسی برابر با تنش‌های اصلی فرض می‌شود ($\sigma_r = \sigma_3$ و $\sigma_\theta = \sigma_1$) همچنین، $\sigma_{r\theta} = 0$ می‌باشد. از آنجایی که سقف تونل از حساس‌ترین نقاط تونل است و بررسی آن جهت تحلیل پایداری تونل دارای اهمیت است، معادلات به دست آمده برای این نقطه بازنویسی می‌شوند. در سقف تونل، نیروی وزن در واحد حجم مستقیماً به سمت مرکز تونل و در راستای ثقلی است. از این رو، f_θ برابر با صفر و f_r برابر با وزن مخصوص توده سنگ، یا γ ، می‌باشد. بنابراین، معادله (۲) ارضا شده و معادله (۱) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \gamma = 0 \quad (3)$$

رابطه (۳) به عنوان کلی‌ترین حالت معادله تعادل حاکم بر تونل برای تحلیل الاستوپلاستیک تونل و تعیین تنش‌ها و تغییر مکان‌ها در ناحیه پلاستیک محیط اطراف تونل می‌باشد.

۲-۲. معیار شکست

معیار شکست مورد استفاده در این مقاله معیار هوک-براون است. معیار شکست هوک-براون از جمله معیارهای پُرکاربردی است که جهت تعریف شرایط تنش‌ی که سنگ تحت آن دچار تغییر شکل‌های پلاستیک یا شکست می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارتباط بین تنش‌ها به صورت زیر بیان می‌شود (هوک و براون، ۱۹۸۰).

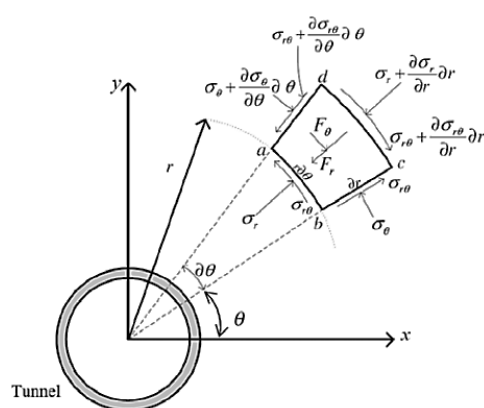
$$\sigma_\theta = \sigma_r + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_r}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4)$$

در این رابطه، σ_r و σ_θ به ترتیب تنش‌های مماسی و شعاعی، σ_{ci} مقاومت تک‌محوره سنگ و m_b, s, a پارامترهای مقاومتی معیار هوک-براون می‌باشند. پس از جاری شدن توده سنگ، پارامترهای مقاومتی از مقادیر اوج به مقادیر ماندگار کاهش پیدا می‌کنند. برای کاهش پارامترهای مقاومتی در ناحیه نرم کرنشی، تغییرات خطی

مدل Centripetal نامیده می‌شود. در مقاله حاضر، از روش دتورنی (۱۹۸۶) برای در نظر گرفتن وزن ناحیه پلاستیک در روابط استفاده می‌گردد.

در روش پانت (۱۹۹۵)، کافی است ابتدا منحنی پاسخ زمین بدون در نظر گرفتن اثر وزن ناحیه شکسته ترسیم شده و سپس میزان اضافه بار ناشی از وزن ناحیه شکسته که برابر با $\gamma(R_{pl} - b)$ می‌باشد به آن اضافه گردد، که b شعاع تونل و R_{pl} شعاع ناحیه پلاستیک اطراف تونل می‌باشد.

با در نظر گرفتن المان abcd و نوشتن معادلات تعادل در جهت‌های شعاعی و مماسی، معادلات حاکم در شرایط مورد بررسی تعیین می‌گردد. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده، تونل تحت شرایط کرنش مسطح بوده و تمامی مؤلفه‌های تنش تابعی از r و θ هستند. بنابراین، از مختصات قطبی جهت تعیین معادلات تعادل حاکم بر مسئله استفاده شده است.



شکل ۲. نیروهای حجمی و مؤلفه‌های تنش در المان اطراف تونل (زارعی فرد و فهیمی فر، ۲۰۱۲)

F_θ و F_r مؤلفه‌های نیروی وزن به ازای واحد حجم به ترتیب در جهت‌های شعاعی و مماسی هستند. معادلات تعادل نیروها در راستای مماسی و شعاعی نوشته شده و با ساده‌سازی‌های انجام شده، به صورت زیر نتیجه می‌شوند:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + f_r = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\sigma_{r\theta}}{r} + f_\theta = 0 \quad (2)$$

تنش‌های شعاعی و مماسی در ناحیه الاستیک اطراف تونل با استفاده از روابط (۷) تعیین می‌گردد:

$$\sigma_r = \sigma_0 - (\sigma_0 - p_{cr}) \left(\frac{b\xi}{r} \right)^2 \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 + (\sigma_0 - p_{cr}) \left(\frac{b\xi}{r} \right)^2$$

همچنین، جابجایی شعاعی u_r در ناحیه الاستیک عبارت است از:

$$u_r = \frac{\sigma_0 - p_{cr}}{2G} \frac{(b\xi)^2}{r} \quad (8)$$

در این رابطه، G مدول برشی توده سنگ و ξ ضریب ثابت می‌باشند و بقیه پارامترها قبلاً بیان شده‌اند.

۴-۲. تنش بحرانی (p_{cr})

در مرز ناحیه الاستیک و پلاستیک، شرایط تنش در المان سنگ در حالت تعادل می‌باشد و معیار شکست در این مرز ارضا می‌شود. بنابراین، برای تعیین تنش بحرانی با فرض $\Gamma = R_{pl}$ ، مقادیر تنش شعاعی و مماسی با استفاده از معادلات لامه تعیین شده و با جایگذاری در معیار هوک- براون، تنش بحرانی به دست می‌آید. از آنجایی که معادله به دست آمده معادله غیرخطی است، برای حل آن از روش عددی نیوتون-رافسون استفاده می‌شود. با توجه به توصیه سوفیانوس (۲۰۰۹)، انجام یک مرحله سعی و خطا، جواب قابل قبولی به دست می‌دهد. برای مقدار اولیه در حل نیوتون-رافسون، از حل معادله برای $a=0.5$ استفاده شده که با $p_{cr}^{a=0.5}$ نشان داده شده است:

$$p_{cr} = p_{cr}^{a=0.5} + \frac{2(\sigma_0 - p_{cr}^{a=0.5}) - \sigma_{ci} \left(m_b \frac{p_{cr}^{a=0.5}}{\sigma_{ci}} + s \right)^a}{2 + a m_b \left(m_b \frac{p_{cr}^{a=0.5}}{\sigma_{ci}} + s \right)^{a-1}} \quad (9)$$

$$p_{cr}^{a=0.5} = \sigma_0 - \frac{1}{2} \sigma_{ci} \left(\sqrt{\sigma_0 \frac{m_b}{\sigma_{ci}} + \frac{m_b}{16} + s} - \frac{m_b}{4} \right)$$

کلیه پارامترهای موجود در روابط بالا قبلاً توضیح داده شده‌اند.

۴-۵. تحلیل در ناحیه پلاستیک

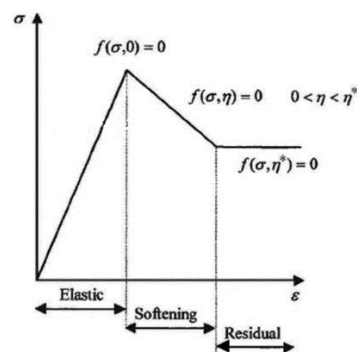
برای مسائل متقارن در مختصات استوانه‌ای، ارتباط بین

برای آنها در نظر گرفته می‌شود. آلونسو و همکاران (۲۰۰۳) با معرفی پارامتر نرم کرنشی η ، رابطه (۵) را برای نحوه تغییر پارامترهای مقاومتی هوک- براون در ناحیه نرم کرنشی ارائه داده‌اند:

$$\begin{cases} x_p + (x_r - x_p) \frac{\eta}{\eta^*} & 0 < \eta < \eta^* \\ x_r & \eta > \eta^* \end{cases} \quad (5)$$

در این رابطه، متغیر x نماینده پارامترهای مقاومتی توده سنگ از جمله زاویه اتساع (ψ)، مقاومت تک‌محوره سنگ σ_{ci} و پارامترهای معیار هوک- براون (m_b, s, a) بوده و علائم r و p به ترتیب مربوط به ناحیه پلاستیک کامل و نقطه اوج و η^* پارامتر نرم کرنشی بحرانی می‌باشد. در این مقاله، پارامتر نرم کرنشی برابر با کرنش پلاستیک برشی در نظر گرفته شده است که از رابطه (۶) تعیین می‌گردد. شکل ۳ مدل نرم کرنشی را نشان می‌دهد.

$$\eta = \gamma^p = \dot{\epsilon}_\theta^p - \dot{\epsilon}_r^p = \dot{\epsilon}_\theta - \dot{\epsilon}_r - (\dot{\epsilon}_\theta^e - \dot{\epsilon}_r^e) \quad (6)$$

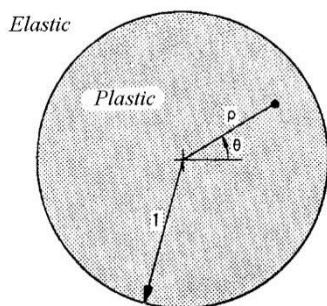


شکل ۳. منحنی تنش کرنش برای نمونه سنگ با رفتار نرم کرنشی (آلونسو و همکاران ۲۰۰۳)

۴-۳. تحلیل در ناحیه الاستیک

توزیع تنش‌های شعاعی و مماسی در ناحیه الاستیک اطراف حفاری استوانه‌ای در شرایط تنش‌های هیدرواستاتیک توسط لامه^۱ تعیین شده است (یگر و همکاران، ۱۹۷۶). در مرز ناحیه الاستیک و پلاستیک، تنش شعاعی برابر با تنش بحرانی (p_{cr}) است و با فرض اینکه شعاع ناحیه پلاستیک برابر $R_{pl} = b\xi$ می‌باشد،

ناحیه پلاستیک محیط اطراف تونل به صورت یک صفحه واحد در نظر گرفته شده و با فرض پارامتر ρ به صورت رابطه (۱۶)، مشتقات موجود در معادلات بر حسب r و ξ به مشتقات عادی بر حسب ρ تبدیل می‌شوند. در نهایت، معادله (۱۵) به صورت رابطه (۱۷) بازنویسی می‌گردد:



شکل ۴. صفحه واحد ناحیه پلاستیک (کارنزا- تورس

(۱۹۹۹

$$\frac{\partial(\quad)}{\partial r} = \frac{1}{b\xi} \frac{d(\quad)}{d\rho} \quad (16)$$

$$\rho = \frac{r}{b\xi} \quad \frac{\partial(\quad)}{\partial \xi} = -\frac{\rho}{\xi} \frac{d(\quad)}{d\rho}$$

$\frac{d^2 u_r}{d\rho^2} - \frac{A_1}{\rho} \frac{du_r}{d\rho} + \frac{A_1}{\rho^2} u_r = \frac{b}{2G} \left(A_2 \frac{d\sigma_r}{d\rho} - A_3 \frac{d\sigma_\theta}{d\rho} \right)$	(۱۷)
$A_1 = \frac{\partial g / \partial \sigma_r}{\partial g / \partial \sigma_\theta}, \quad A_2 = 1 - \nu + \nu A_1, \quad A_3 = (1 - \nu) A_1 + \nu$	

$$\frac{d^2 u_r}{d\rho^2} - \frac{A_1}{\rho} \frac{du_r}{d\rho} + \frac{A_1}{\rho^2} u_r = \frac{b}{2G} \left(A_2 \frac{d\sigma_r}{d\rho} - A_3 \frac{d\sigma_\theta}{d\rho} \right)$$

$$A_1 = \frac{\partial g / \partial \sigma_r}{\partial g / \partial \sigma_\theta}, \quad A_2 = 1 - \nu + \nu A_1, \quad A_3 = (1 - \nu) A_1 + \nu$$

شرایط مرزی مورد استفاده برای حل معادله (۱۷)، جابجایی و مشتق جابجایی در مرز الاستوپلاستیک می‌باشد. برای این امر از رابطه (۷) استفاده می‌شود:

$$u_r(1) = \frac{(\sigma_0 - p_{cr})}{2G} b\xi \quad (18)$$

$$\frac{du_r}{d\rho}(1) = -\frac{(\sigma_0 - p_{cr})}{2G} b\xi$$

با در نظر گرفتن شرایط مرزی بیان شده و حل معادله (۱۷)، رابطه (۱۹) برای تعیین جابجایی شعاعی در ناحیه پلاستیک به دست می‌آید:

نرخ کرنش‌ها و جابجایی‌ها به صورت زیر بیان می‌شود (آلخانو و همکاران، ۲۰۰۹):

$$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{\dot{u}_r}{r}, \quad \dot{\epsilon}_r = \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial r} \quad (10)$$

در این روابط $\dot{\epsilon}_\theta, \dot{\epsilon}_r$ به ترتیب نرخ کرنش‌های شعاعی و مماسی می‌باشند. در تحلیل الاستوپلاستیک، فرض شده که تغییر شکل‌ها، ترکیبی از تغییر شکل‌های الاستیک ($\dot{\epsilon}_\theta^e, \dot{\epsilon}_r^e$) و پلاستیک ($\dot{\epsilon}_\theta^p, \dot{\epsilon}_r^p$) است:

$$\dot{\epsilon}_\theta = \dot{\epsilon}_\theta^e + \dot{\epsilon}_\theta^p, \quad \dot{\epsilon}_r = \dot{\epsilon}_r^e + \dot{\epsilon}_r^p \quad (11)$$

ارتباط میان مؤلفه‌های الاستیک نرخ کرنش و تنش توسط قانون هوک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\epsilon}_\theta^e = \frac{1}{2G} [(1-\nu)\dot{\sigma}_\theta - \nu\dot{\sigma}_r], \quad \dot{\epsilon}_r^e = \frac{1}{2G} [(1-\nu)\dot{\sigma}_r - \nu\dot{\sigma}_\theta] \quad (12)$$

در روابط بالا، ν ضریب پواسون و $\dot{\sigma}_\theta, \dot{\sigma}_r$ به ترتیب نرخ تنش‌های شعاعی و مماسی می‌باشند. نرخ کرنش‌های پلاستیک با استفاده از تابع پتانسیل g تعیین می‌گردد:

$$\dot{\epsilon}_\theta^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_\theta}, \quad \dot{\epsilon}_r^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_r} \quad (13)$$

که λ ضریب پلاستیک بوده و مقدار نامشخص دارد. جهت تعیین مقادیر جابجایی در ناحیه پلاستیک، انتخاب یک قانون جریان الزامی است. قانون جریان از تابع پتانسیل که بر حسب مؤلفه‌های اصلی تنش‌ها می‌باشد، تعیین می‌گردد:

$$g(\sigma_\theta, \sigma_r) = \sigma_\theta - K_\psi \sigma_r = 0 \quad (17)$$

$$K_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (14)$$

با جایگذاری معادلات (۱۰)، (۱۲) و (۱۳) در معادله (۱۱) و حذف پارامتر λ ، معادله دیفرانسیل نرخ جابجایی در ناحیه پلاستیک به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \dot{u}_r}{\partial r} - A_1 \frac{\dot{u}_r}{r} = \frac{1}{2G} [A_2 \dot{\sigma}_r - A_3 \dot{\sigma}_\theta] \quad (15)$$

$$A_1 = \frac{\partial g / \partial \sigma_r}{\partial g / \partial \sigma_\theta}, \quad A_2 = 1 - \nu + \nu A_1, \quad A_3 = (1 - \nu) A_1 + \nu$$

برای سادگی در حل معادله و تبدیل آن به معادله‌ای با مشتقات عادی، از مفهوم صفحه واحد که به وسیله دتورنی (۱۹۸۶) بیان شده استفاده می‌شود. در این روش،

$$u_r = \rho \left(\frac{k(1+A_1)-C}{A_1-1} \right) + \rho^{A_1} \left(\frac{2k}{1-A_1} + \frac{C}{(A_1-2)(1-A_1)} \right) + \frac{C\rho^2}{A_1-2} \quad (19)$$

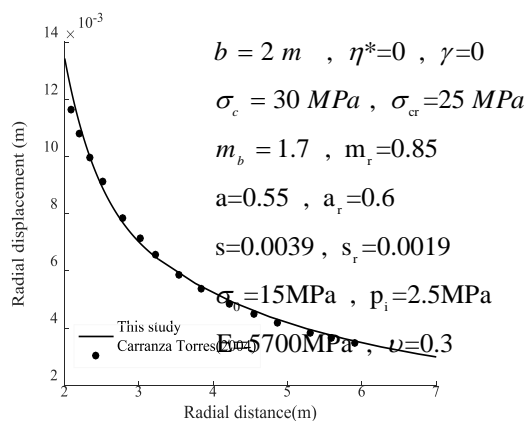
$$k = \frac{(\sigma_0 - p_{cr})}{2G} b \xi, \quad C = \frac{b}{2G} \left(A_2 \frac{d\sigma_r}{d\rho} - A_3 \frac{d\sigma_\theta}{d\rho} \right)$$

الاستوپلاستیک ادامه پیدا می‌کند. برای این امر، کلیه روابط در نرم‌افزار متلب کد نویسی شده و نتایج تعیین شده‌اند.

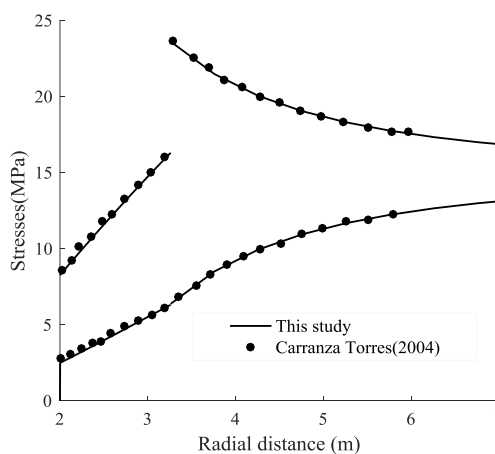
۳. تحلیل نتایج و اعتبارسنجی

همان‌طور که بیان شد، روابط به‌دست آمده در این مقاله با در نظر گرفتن توده سنگ با رفتار نرم کرنشی به‌دست آمده‌اند. از آنجایی که حالت پلاستیک کامل و ترد شکننده حالت‌های خاصی از رفتار نرم کرنشی می‌باشند، روابط بیان شده برای این دو حالت نیز قابل استفاده هستند. برای بررسی روابط بیان شده در بخش قبل، در این قسمت، تونلی با مشخصات بیان شده در زیر در نظر گرفته شده است. مثال بیان شده به وسیله روش محققان پیشین نیز بررسی شده است که در اینجا نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

از آنجا که طبق رابطه (۵)، پارامترهای مقاومتی هوک- براون به مقدار η^* و η بستگی دارند و معادله تعادل تنش‌ها غیرخطی می‌باشد، نمی‌توان به تنهایی با تکیه بر شرایط مرزی اولیه، جابجایی‌ها و تنش‌ها را در ناحیه پلاستیک تعیین نمود. ابتدا با در نظرگیری پارامتر نرم‌شوندگی به وسیله رابطه (۵)، مقدار پارامترهای مقاومتی تعیین شده و با استفاده از پارامترهای مشخص شده، تنش‌ها به وسیله رابطه (۳) محاسبه می‌شود. برای حل معادله تنش‌ها در ناحیه پلاستیک از روش رانگ کوتا^۱ استفاده شده است. در این روش، ناحیه پلاستیک به المان‌های کوچکتر تقسیم شده و در هر المان، تنش‌ها و سپس جابجایی‌ها محاسبه شده‌اند. با توجه به کرنش‌های به‌دست آمده و رابطه (۶) مقدار پارامتر η تعیین شده و با مقایسه آن با η^* و با توجه به رابطه (۵)، مقدار پارامترهای مقاومتی دوباره تعیین می‌گردند. با استفاده از این پارامترها، تنش‌های شعاعی و مماسی و جابجایی در المان بعدی تعیین می‌گردد. همین روند تا رسیدن به مرز



(ب)

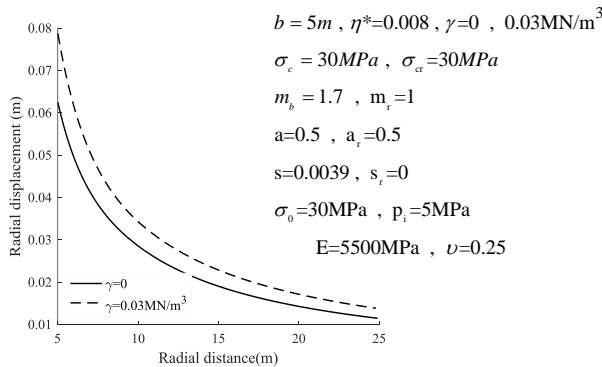


(ف)

شکل ۵. الف: توزیع تنش شعاعی و مماسی و ب: توزیع جابجایی

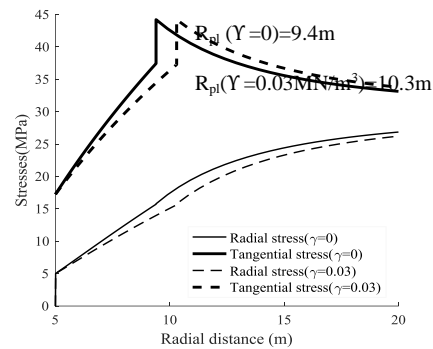
Runge-Kutta methods

همراه و جریان غیرهمراه استفاده شده است که در نهایت منجر به حل معادلات به صورت عددی شده‌اند. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نتایج هم‌خوانی خوبی را نشان می‌دهند و صحت روش بیان شده را تأیید می‌کنند. در شکل ۶، توزیع تنش‌ها و جابجایی برای ناحیه پلاستیک به وسیله روش پیشنهادی در دو حالت، با در نظر گرفتن وزن ناحیه شکسته و بدون در نظر گرفتن آن، نشان داده شده است.



(ب)

در شکل ۵، توزیع تنش‌ها و جابجایی در محیط اطراف تونل نشان داده شده است. روش بیان شده در این مقاله با نتایج به دست آمده از روش کارنزا-تورس (۲۰۰۴) در حالت ترد شکننده و بدون در نظر گرفتن وزن ناحیه پلاستیک مقایسه شده است. قابل ذکر است که کارنزا-تورس (۲۰۰۴) با در نظر گرفتن معیار هوک-براون، جابجایی محیط اطراف تونل را برای توده سنگ با رفتار ترد شکننده تعیین نموده است. در این تحقیق، از جریان

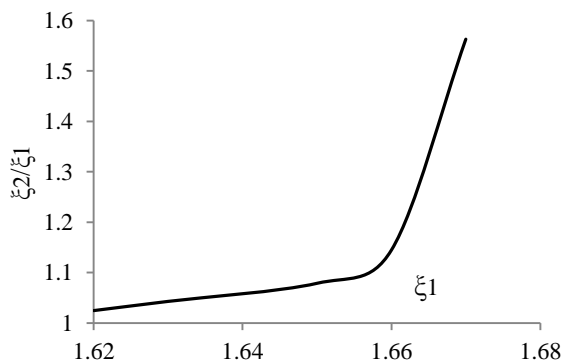


(الف)

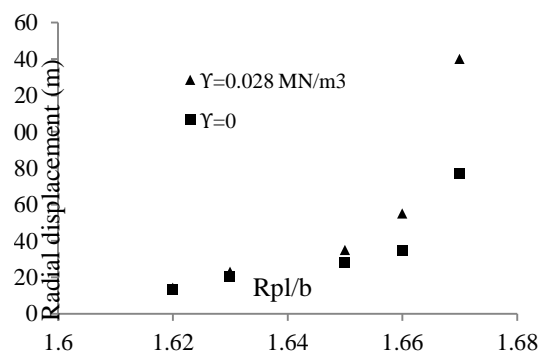
شکل ۶. الف: توزیع تنش‌های شعاعی و مماسی و ب: جابجایی اطراف تونل

ناحیه شکسته جابجایی ایجاد شده در دیواره تونل و محیط اطراف افزایش یافته است. بنابراین، لازم است در طراحی حائل تونل به این امر توجه شود که با در نظر گرفتن وزن ناحیه شکسته تغییر در جابجایی و توزیع تنش به وجود می‌آید.

همان طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، در نظر گرفتن وزن ناحیه شکسته اطراف تونل باعث تغییر در توزیع تنش و جابجایی می‌گردد. با در نظر گرفتن وزن ناحیه شکسته، شعاع ناحیه پلاستیک افزایش پیدا کرده و همین امر باعث تغییر در توزیع تنش اطراف تونل شده است. همچنین، مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن وزن



(ب)



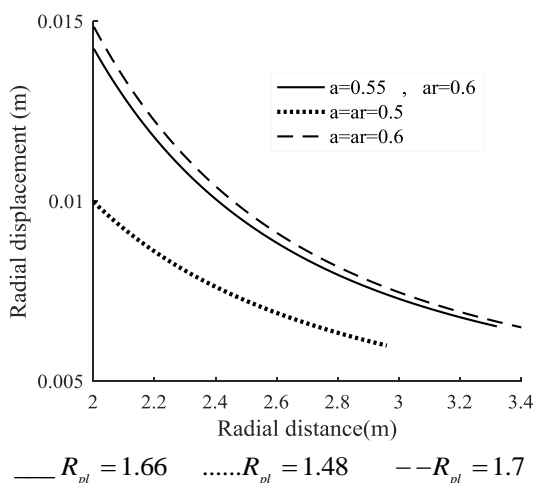
(الف)

شکل ۷. تأثیر وزن ناحیه شکسته بر: الف) جابجایی دیواره تونل و ب) شعاع ناحیه پلاستیک

جابجایی باعث تغییر شعاع ناحیه پلاستیک نیز می‌شوند. در شرایطی که پارامترهای a و a_r برابر باشند، با افزایش این دو پارامتر، جابجایی و شعاع ناحیه پلاستیک افزایش می‌یابد. همچنین، برای دو حالتی که a_r یکسانی دارند، جابجایی به‌دست آمده برای هر دو تقریباً یکسان می‌باشد و این امر اهمیت پارامتر a_r را نسبت به a نشان می‌دهد.

در صورت یکسان بودن پارامترهای m و m_r ، با افزایش این پارامترها، جابجایی کاهش می‌یابد و اگر m در دو حالت یکسان فرض شود، با کاهش m_r جابجایی افزایش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود، با کاهش پارامتر σ_c مقدار جابجایی افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، تغییر مقدار پارامترها در حالت پلاستیک تأثیر بیشتری بر جابجایی دارد.

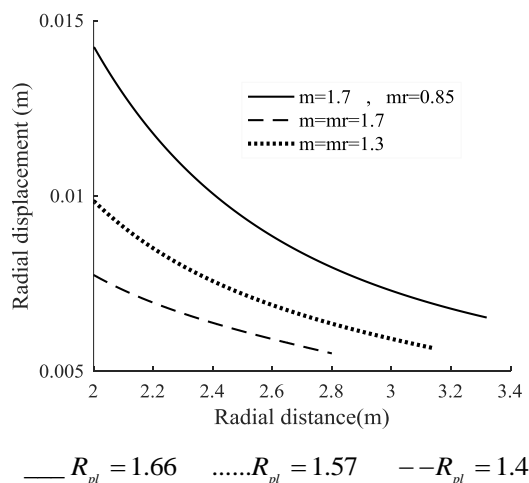
اما در مورد زاویه اتساع، شرایط متفاوتی مشاهده می‌گردد. همان‌طور که دیده می‌شود، در صورت یکسان بودن زاویه اتساع در حالت اوج و پلاستیک، با کاهش این پارامتر، جابجایی نیز کاهش می‌یابد. اما در صورت یکسان بودن ψ_r جابجایی به‌دست آمده یکسان می‌باشد. این امر اهمیت مقدار زاویه اتساع در ناحیه پلاستیک را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، در شرایطی که ψ_p را برابری انتخاب می‌گردد، با کاهش ψ_r مقدار جابجایی نیز کاهش می‌یابد.

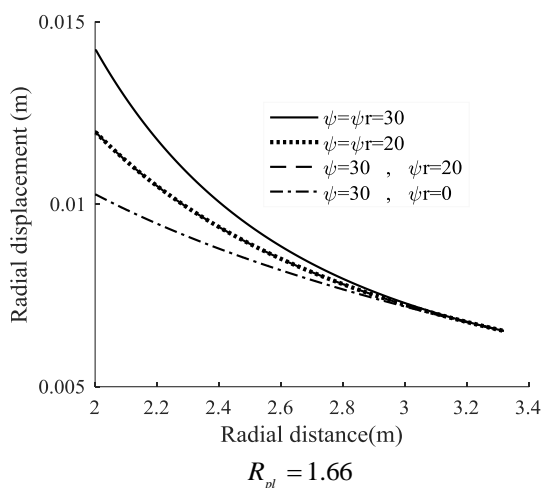
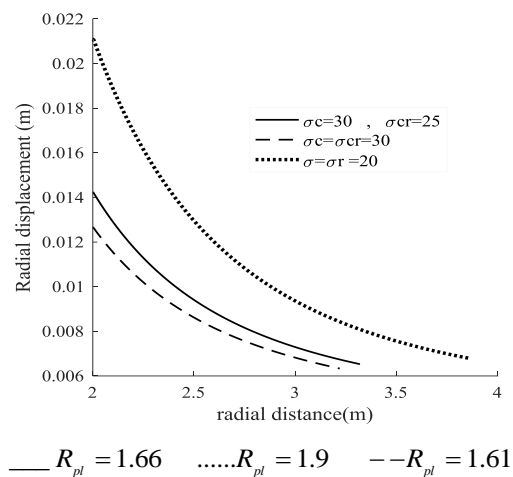
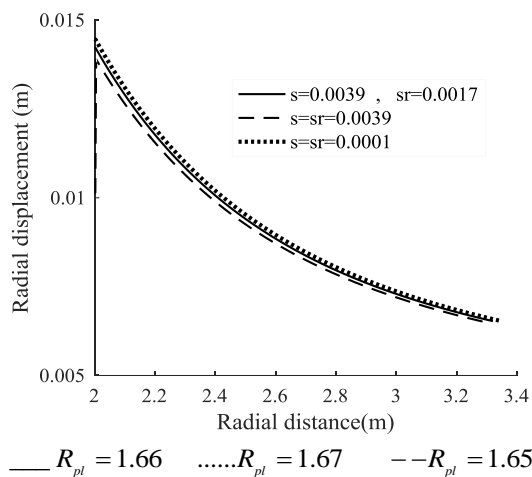


در شکل ۷-الف، جابجایی در دیواره تونل در شرایط با شعاع ناحیه پلاستیک مختلف برای دو حالت با در نظرگیری وزن ناحیه پلاستیک و بدون در نظر گرفتن آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع ناحیه پلاستیک، اختلاف نتایج در حالت در نظر گرفتن وزن ناحیه پلاستیک افزایش می‌یابد. بدین معنی است که در صورت افزایش ناحیه پلاستیک، اهمیت وزن این ناحیه بیشتر بوده و باید در محاسبات مربوطه در نظر گرفته شود.

در شکل ۷-ب نیز نشان داده شده که با افزایش شعاع ناحیه پلاستیک در حالتی که وزن در نظر گرفته نمی‌شود، اختلاف مقدار شعاع ناحیه پلاستیک برای هر دو حالت بدون وزن و با در نظرگیری وزن، افزایش می‌یابد. یعنی اگر شعاع ناحیه پلاستیک در حالت بدون وزن افزایش یا بد ارتباط آن با حالتی که وزن در نظر گرفته می‌شود به صورت خطی نیست و در نظر گرفتن وزن باعث افزایش چشم‌گیری در شعاع ناحیه پلاستیک می‌شود.

تأثیر پارامترهای معیار هوک-براون بر جابجایی محیط اطراف تونل در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامتر s کمترین تأثیر را بر جابجایی ایجاد شده در اطراف تونل دارد. باقی پارامترهای معیار هوک-براون علاوه بر تغییر مقدار





$$b = 2m , \eta^* = 0.004 , \gamma = 0.028 \text{ MN/m}^3$$

$$\sigma_c = 30 \text{ MPa} , \sigma_{cr} = 25 \text{ MPa}$$

$$m_b = 1.7 , m_r = 0.85$$

$$a = 0.55 , a_r = 0.6$$

$$s = 0.0039 , s_r = 0.0017$$

$$\sigma_0 = 15 \text{ MPa} , p_i = 2.5 \text{ MPa}$$

$$E = 5700 \text{ MPa} , \nu = 0.3$$

شکل ۸. تأثیر پارامترهای معیار هوک- براون بر جابجایی اطراف تونل

کاهش فشار حائل باشد، تأثیر وزن ناحیه شکسته بیشتر می‌گردد و باعث افزایش جابجایی و شعاع ناحیه پلاستیک به صورت غیرخطی می‌شود.

- با بررسی پارامتریک پارامترهای هوک- براون و زاویه اتساع مشاهده می‌شود که پارامتر s کمترین تأثیر را بر جابجایی اطراف تونل دارد. تأثیر پارامترهای دیگر قابل توجه بوده و برای دستیابی به نتایج قابل قبول باید مقدار دقیقی را برای آنها انتخاب نمود. از طرفی، زاویه اتساع حالت پلاستیک نسبت به زاویه اتساع در حالت اوج تأثیر چشم‌گیری بر جابجایی اطراف تونل دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با در نظر گرفتن وزن ناحیه شکسته در اطراف تونل و بازنویسی معادله تعادل تنش‌ها و سازگاری تغییرشکل‌ها، به بررسی تأثیر این پارامتر پرداخته و در ادامه تأثیر پارامترهای معیار هوک- براون بررسی شد. نتایج به‌دست آمده را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان نمود:

- با در نظر گرفتن وزن ناحیه شکسته، توزیع تنش و جابجایی اطراف تونل تغییر یافته و شعاع ناحیه پلاستیک و جابجایی در سقف تونل افزایش می‌یابد.
 - با افزایش شعاع ناحیه پلاستیک، که می‌تواند نتیجه

۵. مراجع

- Alejano, L. R. and Alonso, E. 2005. "Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42: 481-507.
- Alejano, L. R., Rodriguez-Dono, A., Alonso, E. and Fdez.-Manín, G. "Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behaviour". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 24: 689-705.
- Alonso, E., Alejano, L. R. and Varas, F. "Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behavior". *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, 27: 1153-1185.
- Carranza-Torres, C. and 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.
- Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C. 2000. "Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 15: 187-213.
- Carranza-Torres, C. 2004. "Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41: 1-11.
- Detournay, E. 1986. "Elastoplastic model of a deep tunnel for a rock with variable dilatancy". *Rock Mech. Rock Eng.*, 19: 99-108.
- Hoek, E. and Brown, E. T. 1980. "Underground excavations in rock". The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Jaeger, J. C., Cook, N. G. W. and R. W. Zimmerman. 1976. "Fundamentals of rock mechanics". Chapman and Hall.
- Lee, Y. K. and Pietruszczak, S. 2007. "A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 23: 588-599.
- Malvern, L. 1969. "Introduction to the mechanics of a continuous medium". Prentice-Hall, New Jersey.
- Panet, M. 1995. "Le Calcul Des Tunnels Par La Méthode Convergence-Confinement". Presses ENPC, Paris.
- Park, K. H., Tontavanich, B. and Lee, J. G. 2008. "A simple procedure for ground response curve of circular tunnel in elastic-strain softening rock masses". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 23(2): 151-159.
- Sharan, S. 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.
- Sharan, S. 2008. "Analytical solutions for stresses and displacements around a circular opening in a generalized Hoek-Brown rock". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 45: 78-85.
- Sofianos, A. 2009. "Tunneling Mohr-Coulomb strength parameters for rock masses satisfying the generalized Hoek-Brown criterion". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40: 435-440.
- Wang, Y. 1996. "Ground response of circular tunnel in poorly consolidated rock". *ASCE, J. Geotech. Eng.*, 9: 703-708.
- Zareifard, M. R. and Fahimifar, A. 2012. "A new solution for shallow and deep tunnels by considering the gravitational loads". *Acta Geotech. Slov.*, 2: 37-49.