

### تحلیل تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن رفتار نرم کرنشی در ناحیه پلاستیک

احمد فهیمی<sup>۱</sup>؛ حامد قدمی<sup>۲\*</sup>؛ مسعود احمدوند<sup>۳</sup>؛ آروین عبدالمالکی<sup>۴</sup>

۱- استاد؛ دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران؛ گرایش ژئوتکنیک؛ دانشگاه تفرش؛ کارشناس شرکت آب منطقه‌ای البرز

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران؛ گرایش ژئوتکنیک؛ دانشگاه تفرش؛ کارشناس شرکت مهندسی مشاور طاهان

۴- دانشجوی دکتری تخصصی؛ دانشکده مهندسی عمران؛ دانشگاه تبریز

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۷/۳۰؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

#### واژگان کلیدی

تونل  
آب زیرزمینی  
رفتار نرم کرنشی  
فشار آب حفره‌ای  
تراوش

#### چکیده

در این مقاله تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی در شرایط تقارن محوری و کرنش صفحه‌ای بررسی و با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، روشی نوین برای محاسبه توزیع فشار آب حفره‌ای، تنش و کرنش در اطراف تونل دایروی حفر شده در سنگ پیشنهاد شده است. در این روش، توده سنگ اطراف تونل به صورت الاستوپلاستیک با مدل نرم کرنشی در نظر گرفته شده است. با توسعه مدل‌های پیشین در مدل جدید ارائه شده، تأثیرات نمو کرنش الاستیک در ناحیه پلاستیک و زاویه‌ی اتساع توده سنگ نیز لحاظ شده است. علاوه بر این موارد، جریان تراوش و نفوذپذیری ثانویه توده سنگ به سبب وجود کوپل هیدرومکانیکی در ناحیه پلاستیک نیز در نظر گرفته شده است. این مدل، توزیع فشار آب حفره‌ای در ناحیه الاستیک در تمام جهات اطراف تونل را به صورت دقیق‌تری نسبت سایر مدل‌ها محاسبه می‌کند. از آنجایی که معادلات حاکم، حل بسته نخواهد داشت، برنامه‌ای کامپیوتری بر مبنای این مدل، نوشته شده و دقت و کاربرد عملی آن با چندین مثال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده تأثیرات زاویه‌ی اتساع، نمو کرنش الاستیک در ناحیه پلاستیک و شرایط آب زیرزمینی را به خوبی نشان می‌دهند.

#### ۱- مقدمه

دربرگیرنده تونل‌های زیرسطح آب زیرزمینی تغییر می‌کند. این تغییرات به نوبه خود سبب تغییر در جریان تراوش نیز می‌شود.

میدان‌های تنش و تغییر شکل ایجاد شده بر اثر حفاری تونل و جریان تراوش در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی تاکنون توسط چندین پژوهشگر مورد مطالعه قرار گرفته است. اغلب حل‌های ارائه شده بر پایه روش‌های عددی هستند. با این وجود، در میان این روش‌ها، روش‌های تحلیلی محدودی نیز برای تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی یافت می‌شوند. براون و بری (Brown & Bray) [1]، فازیو و

هنگامی که تونلی زیر سطح آب زیرزمینی حفر می‌شود، آب زیرزمینی به داخل تونل جریان می‌یابد و در نتیجه درون زمین اطراف تونل، تراوش شکل می‌گیرد. این تراوش، رفتار تونل را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی، هر المان توده سنگ از تمامی جهات تحت نیروهای حجمی تراوش قرار می‌گیرد. به دلیل وجود درزه‌ها و ترک‌ها در توده سنگ تحت تأثیر نیروهای حجمی تراوش، نفوذپذیری توده سنگ عوض می‌شود. بنابراین در طول دوره‌های حفاری و نصب پوشش، نفوذپذیری توده سنگ

\* البرز؛ کرج؛ مهرشهر؛ بلوار ارم؛ خیابان بوستان؛ شرکت آب منطقه‌ای استان البرز؛ طبقه دوم؛ معاونت طرح و توسعه؛ شماره تلفن: ۰۲۶-۳۳۵۵۷۰۷-۹

رایانامه: [hamed.ghadami@yahoo.com](mailto:hamed.ghadami@yahoo.com)

است [10]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{(\sigma_\theta - \sigma_r)}{r} = 0 \quad (1)$$

در حالت تقارن محوری، رابطه‌ی تغییر شکل- کرنش به صورت گزاره‌های (۲)، (۳) و (۴) است:

$$\varepsilon_r = -\frac{du}{dr} \quad (2)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{-u}{r} \quad (3)$$

$$\frac{d\varepsilon_r}{dr} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_\theta}{r} \quad (4)$$

در گزاره‌ی (۱)  $\sigma_r$  و  $\sigma_\theta$  به ترتیب تنش مماسی و شعاعی و در گزاره‌های (۲)، (۳) و (۴)  $\varepsilon_r$  و  $\varepsilon_\theta$  به ترتیب کرنش شعاعی و مماسی و  $u$  تغییر شکل شعاعی است.

### ۳- معیار شکست توده‌سنگ و مدل رفتاری

برای بررسی رفتار توده‌سنگ می‌توان از معیار شکست تجربی غیر خطی هوک و براون مطابق با گزاره‌های (۵) و (۶) استفاده نمود [11].

الف- سنگ سالم:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \left\{ m_i \sigma_3 \sigma_c + s_i \sigma_c^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ب- ناحیه‌ی شکسته و پلاستیک:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \left\{ m_r \sigma_3 \sigma_c + s_r \sigma_c^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

در گزاره‌های فوق  $\sigma_1 = \sigma_r$  و  $\sigma_3 = \sigma_\theta$  به ترتیب تنش موثر اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر در نقطه‌ی شکست،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری محصورنشده‌ی سنگ بکر و  $m_i$ ،  $s_i$ ،  $m_r$  و  $s_r$  پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ شکسته و سالم هستند. لازم به ذکر است که صورت صحیح‌تر گزاره‌های (۵) و (۶)، استفاده از مقادیر  $a_i$  برای سنگ سالم و  $a_r$  برای ناحیه‌ی شکسته به جای مقدار ثابت ۰٫۵ است، اما در این پژوهش جهت دستیابی به راه حلی بسته برای مرز الاستوپلاستیک و عدم وجود داده‌های مناسب در مثال‌های مورد بررسی، مقدار ثابت ۰٫۵ به عنوان توان در گزاره‌ی سمت راست روابط (۵) و (۶) در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری توده‌سنگ نیز مدل نرم‌شوندگی کرنش است و شامل پارامترهای  $f$ ،  $\alpha$  و  $g$  است. در شکل ۱ رابطه‌ی تنش-کرنش بر اساس این پارامترها نشان داده شده است. تا هنگامی که رابطه‌ی تنش‌های اصلی، معیار شکست را برآورده نکند، توده‌سنگ

ریباجی (Fazio & Ribacchi) [2]، کاروسو و جیانی (Carosso & Gianni) [3]، نام و بوبت (Nam & Bobet) [4]، لی و همکاران (Lee, et al.) [5] و شین و همکاران (Shin, et al.) [6] اثرات تراوش و فشار حفره‌ای را در حل‌های خود در نظر گرفتند. با این وجود، تاثیر کوپل هیدرومکانیکی در اغلب این روش‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. براون و بری [1] با در نظر گرفتن تغییرات نفوذپذیری توده‌سنگ در نواحی پلاستیک، کوپل هیدرومکانیکی در در نظر گرفتن تغییرات مدول دقیق برای محاسبه‌ی تراوش ارائه نکردند. فهیمی فر و زارعی فرد [7] مدل تحلیلی خود را با در نظر گرفتن کوپل هیدرومکانیکی توده‌سنگ و پوشش، استفاده از تنش موثر بجای تنش کل و توسعه‌ی مدل تراوش دقیق کولیمباس (Kolymbas) [8] ارائه نمودند.

در روش‌های ذکر شده، کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک ثابت فرض شده و اثر نمو کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک در نظر گرفته نشده است؛ در نتیجه نمو کرنش پلاستیک برابر با نمو کرنش کل است. همچنین زاویه‌ی اتساع در ناحیه‌ی نرم کرنشی ثابت فرض شده و اثر تغییرات آن بر تغییر شکل‌های اطراف تونل در نظر گرفته نشده است.

در این پژوهش، بر پایه‌ی روش براون و بری و با استفاده از توسعه‌ی مدل تراوش دقیق مینگ و همکاران (Ming, et al.) [9]، مدلی تحلیلی برای تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی ارائه شده است. در این مدل، تغییرات زاویه‌ی اتساع، نمو کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک و کرنش پلاستیک انحرافی به عنوان پارامتر نرم‌شوندگی در نظر گرفته شده است.

### ۲- روابط حاکم بر محیط

مدل محاسباتی با فرض تقارن محوری در نظر گرفته شده است. این مدل شامل نواحی مختلف توده‌سنگ و نواحی الاستیک و پلاستیک (ناحیه‌ی با نرم‌شوندگی کرنش و ناحیه‌ی با مقاومت ماندگار) است.

معادله‌ی تعادل در شرایط تقارن محوری برای هر المان توده‌سنگ در مختصات قطبی به صورت گزاره‌ی (۱)

#### ۴-۱- نفوذپذیری توده‌سنگ

حفاری تونل، نفوذپذیری توده‌سنگ دربرگیرنده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تغییرات نفوذپذیری ممکن است مربوط به وضعیت تنش، فشار آب حفره‌ای و تغییرشکل‌های پلاستیک باشد. در تونل زیر سطح آب زیرزمینی، نیروی حجمی تراوش اعمالی، به گرادیان هیدرولیکی و نفوذپذیری توده‌سنگ بستگی دارد. از سوی دیگر، نفوذپذیری توده‌سنگ شکسته‌ی اطراف تونل به تغییر شکل‌های ناشی از حفاری و جریان تراوش وابسته است [7].

به سبب وجود این اندرکنش هیدرومکانیکی در توده‌سنگ، نفوذپذیری با تغییر شکل‌ها رابطه دارد. بر این اساس گزاره‌ی (۷) توسط بری و براون ارائه شده است [1]:

$$K_r = K_o(1 + \eta(\varepsilon_{ve} - \varepsilon_v)^2) \quad (7)$$

در روش براون و بری نمو کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین از پارامتر  $\varepsilon_{ve}$  در گزاره‌ی (۷) صرف نظر شده است و کرنش حجمی کل برابر با کرنش حجمی پلاستیک لحاظ شده است ( $\varepsilon_v = \varepsilon_{vp}$ ). اما در مدل جدید ارائه شده با لحاظ نمودن نمو کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک و با توجه به گزاره‌ی (۷) به صورت گزاره‌ی (۸) بازنویسی شده است [۱۳]:

$$K_r = K_o(1 + \eta\varepsilon_p^2) \quad (8)$$

در گزاره‌ی فوق،  $\eta$  پارامتر مشخص‌کننده‌ی تغییرات نفوذپذیری توده‌سنگ در ناحیه‌ی پلاستیک است.  $K_o$  نفوذپذیری اولیه‌ی توده‌سنگ و  $\varepsilon_{vp} = \varepsilon_{rp} + \varepsilon_{\theta p}$  کرنش حجمی است.

#### ۴-۲- الگوی تراوش و فشار آب حفره‌ای

الگوی ارائه شده در این پژوهش برای تراوش در تونل‌های زیرسطح آب زیرزمینی در شکل ۲ نشان داده شده است (تراوش متقارب شعاعی تا شعاع پلاستیک). گزاره‌های ارائه شده برای الگوی تراوش بر اساس فرضیات زیر است:

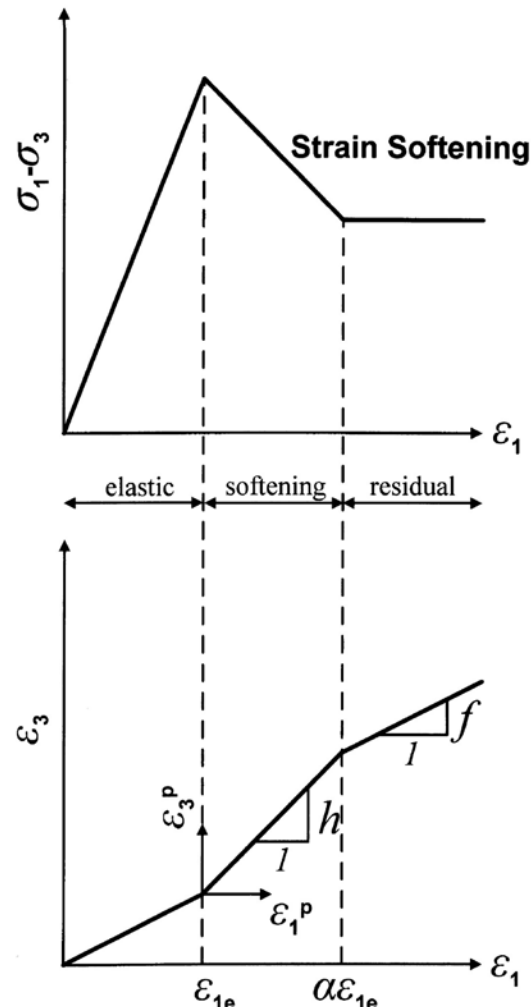
الف- نفوذپذیری توده‌سنگ همگن و همسانگرد است.

ب- جریان به حالت پایدار رسیده است.

پ- تونل دارای مقطع دایره‌ای و پتانسیل هیدرولیکی ثابت است.

ت- تراوش، شرایط سطح آب زیرزمینی را تحت تاثیر

رفتار الاستیک دارد و پس از آن مقاومت توده‌سنگ به صورت تدریجی به مقاومت پسماند می‌رسد. در نمودارهای شکل ۱،  $\varepsilon_1 = \varepsilon_\theta$  و  $\varepsilon_3 = \varepsilon_r$  به ترتیب کرنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر در توده‌سنگ هستند. همین‌طور  $\varepsilon_1^p$  و  $\varepsilon_3^p$  به ترتیب نمونه‌های کرنش بزرگ‌تر و کوچک‌تر هستند.



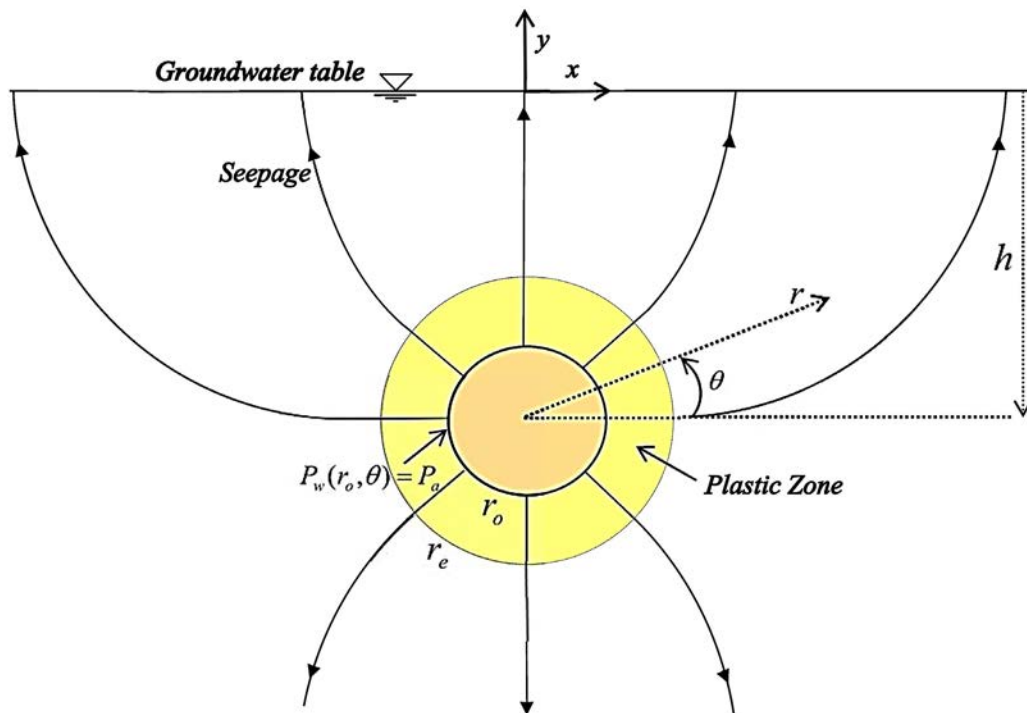
شکل ۱- مدل الاستیک-نرم‌شوندگی کرنش [12]

#### ۴- تحلیل هیدرولیکی

در تحلیل هیدرولیکی، شرایط تقارن محوری در نظر گرفته نمی‌شود؛ بنابراین فشار آب حفره‌ای،  $P_w(r, \theta)$ ، در هر نقطه‌ی اطراف تونل به صورت تابعی از فاصله‌ی شعاعی و زاویه محاسبه می‌شود.

پژوهش برای تحلیل تراوش در تونل‌های زیر سطح زیرزمینی در ناحیه‌ی الاستیک با توسعه‌ی مدل مینگ و همکاران [9]. مدل دقیق‌تری برای محاسبه‌ی فشار آب حفره‌ای در فواصل شعاعی و زوایای مختلف اطراف تونل ارائه شده است. همچنین برای تحلیل تراوش در ناحیه‌ی پلاستیک با فرض جریان شعاعی، رابطه‌ی داریسی با نفوذپذیری بسته به تغییر شکل، مورد استفاده قرار گرفته است.

قرار نمی‌دهد. به بیان دیگر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در اثر تراوش تغییر نمی‌کند. با وجود این‌که در این پژوهش تنها مطالعه‌ی ناحیه‌ی پلاستیک اطراف تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی مد نظر است، ارائه‌ی مدلی دقیق برای تراوش و توزیع فشار آب حفره‌ای در ناحیه‌ی الاستیک برای اندازه‌گیری فشار آب در مرز الاستوپلاستیک و نرخ تراوش امری ضروری است. در این



شکل ۲- الگوی تراوش در تونل زیر سطح آب زیرزمینی

سطح آب زیرزمینی ( $h$  مثبت در نظر گرفته می‌شود)،  $h_w$  ارتفاع آب بالاتر از سطح زمین،  $P_a$  فشار آب حفره‌ای در سطح خارجی تونل و  $Y(x, y)$  و  $X(x, y)$  توابعی هستند که با توجه به شرایط مرزی در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی تعیین می‌شوند. با توجه به این‌که در مدل مورد مطالعه در این پژوهش (شکل ۲) حداکثر ارتفاع آب، سطح زمین در نظر گرفته شده است، مقدار پارامتر  $h_w$  در گزاره‌ی (۹) صفر منظور می‌شود ( $h_w = 0$ ). با جایگزین کردن  $x = r \cos \theta$  و  $y = r \sin \theta - h$  در گزاره‌ی (۹)، می‌توان فشار آب حفره‌ای را در تمام جهات اطراف تونل بر اساس

### ۳-۴- ناحیه‌ی الاستیک

رابطه‌ی مینگ و همکاران برای حالتی که فشار آب حفره‌ای در سطح خارجی تونل ثابت باشد، به صورت گزاره‌ی (۹) ارائه شده است [9]:

$$P_w(x, y) = X(x, y) + h_w \cdot \gamma_w + \frac{P_a - \gamma_w h_w + Y(x, y)}{\ln \left[ \frac{h}{r_o^2} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_o^2}\right)^2 - 1} \right]} \left( \ln \frac{x^2 + (y + \sqrt{h^2 - r_o^2})^2}{x^2 + (y - \sqrt{h^2 - r_o^2})^2} \right) \quad (9)$$

در گزاره‌ی فوق،  $r_o$  شعاع خارجی تونل،  $h$  عمق تونل از

#### ۴-۴- ناحیه‌ی پلاستیک

در ناحیه‌ی پلاستیک اطراف تونل، با فرض جریان شعاعی، گزاره‌ی داریسی مورد استفاده قرار گرفته است [7]:

$$V = -K_r i_r \quad (17)$$

در گزاره‌ی بالا،  $K_r$  نفوذپذیری توده‌سنگ در ناحیه‌ی پلاستیک،  $V$  سرعت و  $i_r$  گرادیان هیدرولیکی است. با قراردادن  $q = VA$ ،  $i_r = \frac{\partial H}{\partial r}$  در گزاره‌ی (۱۷)، استفاده از رابطه‌ی برنولی و انتگرال‌گیری از رابطه‌ی فشار آب حفره‌ای محاسبه شده از گزاره‌ی (۱۷)، توزیع فشار آب حفره‌ای به صورت گزاره‌ی (۱۸) بدست می‌آید:

$$P_w(r, \theta) = \gamma_w q / 2\pi \int_{r_0}^r \frac{1}{r K_r(r)} dr + P_a \quad (18)$$

$$- \gamma_w (r - r_0) \sin \theta$$

#### ۴-۵- دبی

با مساوی قرار دادن مقادیر فشار آب در مرز الاستوپلاستیک در گزاره‌ی (۱۶) مربوط به ناحیه‌ی الاستیک و مقادیر فشار آب در مرز الاستوپلاستیک در گزاره‌ی (۱۸) مربوط به ناحیه‌ی پلاستیک می‌توان مقدار دبی را محاسبه نمود.

$$P_w(r_e, \theta)_{plastic} = P_w(r_e, \theta)_{elastic} \quad (19)$$

لازم به ذکر است که برای استفاده از گزاره‌ی ناحیه‌ی الاستیک در مرز الاستوپلاستیک باید در گزاره‌ی (۱۶) به جای شعاع خارجی تونل  $(r_0)$ ، شعاع الاستوپلاستیک  $(r_e)$  جایگزین شود.

#### ۵- تنش‌ها و تغییرشکل‌های توده‌سنگ

در مدل جدید ارائه شده، سه ناحیه‌ی مختلف پیرامون تونل مدنظر قرار گرفته است (شکل ۳):

- ۱- ناحیه‌ی الاستیک پیرامون تونل.
  - ۲- ناحیه‌ی پلاستیک مجاور ناحیه‌ی الاستیک که در آن رفتار نرم‌شوندگی کرنش حاکم است (از شعاع  $r_s$  تا شعاع  $r_e$ ).
  - ۳- ناحیه‌ی پلاستیک داخلی که تنش به مقاومت ماندگار محدود می‌شود (از شعاع  $r_0$  تا شعاع  $r_s$ ).
- در مرز الاستوپلاستیک تنش‌ها و کرنش‌های اصلی با عبارت‌های  $\sigma_{\theta e}$ ،  $\sigma_{re}$ ،  $\epsilon_{\theta e}$  و  $\epsilon_{re}$  نمایش داده می‌شوند.

$(r, \theta)$  به صورت گزاره‌ی (۱۰) بدست آورد [۱۳]:

$$P_w(r, \theta) = X(r, \theta) + \frac{P_a + Y(r, \theta)}{\ln \left[ \frac{h}{r_0} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_0}\right)^2 - 1} \right]} \times \left( \frac{\ln \left[ \frac{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]}{\ln \left[ \frac{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]} \right) \quad (10)$$

تابع  $X(r, \theta)$  با اعمال شرایط مرزی مربوط به تونل زیر سطح آب زیرزمینی به صورت زیر محاسبه می‌شود:  
الف- شرط مرزی برای دیواره و کف تونل و محدوده‌ی میان دیواره تا کف تونل ( $0 < \theta < 360$ ) و  $\theta = 180$ :

$$r \rightarrow \infty \Rightarrow P(r) = (h - r \sin \theta) \gamma_w \quad (11)$$

ب- شرط مرزی برای سقف تونل و محدوده‌ی میان

دیواره و سقف تونل ( $0 < \theta < 180$ ):

$$r \sin \theta = h \Rightarrow P(r) = (h - r \sin \theta) \gamma_w \quad (12)$$

با قرار دادن هر یک از دو شرط مرزی (۱۱) یا (۱۲) در گزاره‌ی (۱۰)، تابع  $X(r, \theta)$  به صورت یکتا به صورت گزاره‌ی (۱۳) بدست می‌آید:

$$X(r, \theta) = (h - r \sin \theta) \gamma_w \quad (13)$$

تابع  $Y(r, \theta)$  نیز با قرار دادن شرط مرزی:

$$r^2 = r_0^2 \Rightarrow P(r) = P_a \quad (14)$$

به صورت گزاره‌ی (۱۵) بدست می‌آید:

$$Y(r, \theta) = \frac{P_a - (h - r_0 \sin \theta) \gamma_w}{\ln \left[ \frac{(r_0 \cos \theta)^2 + (r_0 \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r_0 \cos \theta)^2 + (r_0 \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]} \times \ln \left[ \frac{h}{r_0} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_0}\right)^2 - 1} \right] \quad (15)$$

با جایگذاری توابع  $Y(r, \theta)$  و  $X(r, \theta)$  در گزاره‌ی (۱۰)، معادله‌ی مربوط به توزیع فشار آب حفره‌ای به صورت گزاره‌ی (۱۶) بدست می‌آید:

$$P_w(r, \theta) = (h - r \sin \theta) \gamma_w + \frac{P_a - (h - r_0 \sin \theta) \gamma_w}{\ln \left[ \frac{(r_0 \cos \theta)^2 + (r_0 \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r_0 \cos \theta)^2 + (r_0 \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]} \times \left( \frac{\ln \left[ \frac{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]}{\ln \left[ \frac{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]} \right) \quad (16)$$

با توجه به این‌که مدل نمودن رفتار نرم کرنشی توده‌سنگ یکی از اهداف اصلی این پژوهش است، با استفاده از حل عددی گزاره‌ی (۲۶) به روش تفاضل محدود، تنش شعاعی و مماسی در هر گام به صورت زیر بدست می‌آید [1]:

$$\sigma_r(i) = b - \sqrt{b^2 - a} \quad (27)$$

$$\sigma_\theta(i) = \sigma_r(i) + \left[ \overline{m(i)\sigma_c(i)\sigma_r(i)} + \overline{s(i)\sigma_c^2(i)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

که در آن:

$$a = \sigma_r^2(i-1) - \left[ \frac{1}{2} \overline{m(i)\sigma_c(i)(\sigma_r(i-1))} - 4c \frac{P_w(i) - P_w(i-1)}{\overline{s(i)\sigma_c^2(i)}} \right] \quad (29)$$

$$b = \sigma_r(i-1) + \overline{cm_a(i)\sigma_c(i)}$$

$$c = \left[ \frac{r_{i-1} - r_i}{r_{i-1} + r_i} \right]^2$$

$$\overline{w(i)} = \frac{1}{2}(w(i-1) + w(i))$$

در گزاره‌ی (۲۹)،  $w$  بیان‌کننده‌ی هر یک از پارامترهای مقاومتی  $\varphi, \sigma_c, m, s$  است.

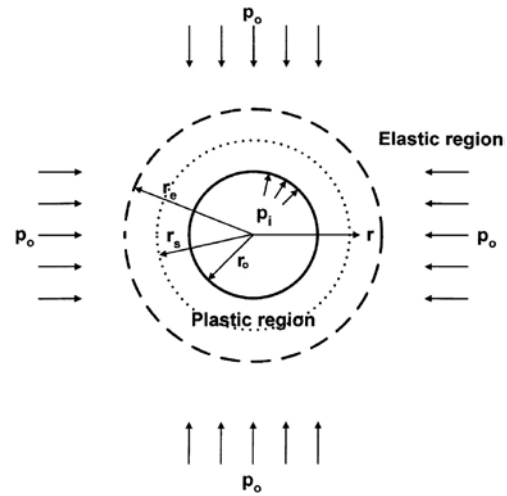
پارامترهای  $\varphi(i), \sigma_c(i), m(i), s(i)$  براساس تابع  $\gamma^p$  (کرنش پلاستیک انحرافی) بیان می‌شوند. در ناحیه‌ی پلاستیک فرض می‌شود که پارامترهای مورد نظر را می‌توان بصورت تابعی دوخطی از کرنش پلاستیک انحرافی  $\gamma^p$  توصیف نمود [15]:

$$w(i) = \begin{cases} w - (w - w_r) \frac{\gamma^p(i)}{\gamma^{p*}} & 0 < \gamma^p(i) < \gamma^{p*} \\ w_r & \gamma^p(i) > \gamma^{p*} \end{cases} \quad (30)$$

لازم به ذکر است که در این مدل،  $\gamma^p$  پارامتر نرم‌شوندگی کرنش برای کنترل مقادیر پارامترهای مقاومتی  $\varphi, \sigma_c, m, s$  در ناحیه‌ی نرم‌شوندگی کرنش است و بر اساس گزاره‌ی (۳۱) تعریف می‌شود [14]:

$$\gamma^p = \varepsilon_\theta^p - \varepsilon_r^p \quad (31)$$

و در حل عددی تفاضل محدود در هر مرحله به این صورت



شکل ۳- تونل دایره‌ای در صفحه‌ی نامحدود [14]

با استفاده از روابط تعادل در ناحیه‌ی الاستیک و گزاره‌ی اصلاح شده‌ی معیار شکست هوک و براون (گزاره‌ی (۵)) بر اساس تنش کل به شرح ذیل:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \left\{ m(\sigma_r - P_w)\sigma_c + s\sigma_c^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

تنش‌ها و کرنش‌های در مرز الاستوپلاستیک به صورت گزاره‌های ذیل محاسبه می‌شوند [1]:

$$\sigma_{re} = P_o - M\sigma_c \quad (21)$$

$$\sigma_{\theta e} = P_o + M\sigma_c \quad (22)$$

در گزاره‌های فوق:

$$M = \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{m}{4} \right)^2 + m \left( \frac{P_o - P_{we}}{\sigma_c} \right) + s \right\}^{0.5} - \frac{m}{8} \quad (23)$$

کرنش شعاعی و مماسی در مرز الاستوپلاستیک نیز از گزاره‌های زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon_{re} = -\frac{(P_o - \sigma_{re})}{2G} = -\frac{M\sigma_c}{2G} \quad (24)$$

$$\varepsilon_{\theta e} = -\frac{(P_o - \sigma_{\theta e})}{2G} = \frac{M\sigma_c}{2G} \quad (25)$$

که در آن  $G$  مدول برشی توده‌سنگ است. برای تحلیل ناحیه‌ی پلاستیک با استفاده از گزاره‌های (۱) و (۵)، معادله‌ی تعادل به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = \frac{\left[ m(\sigma_r - P_w)\sigma_c + s\sigma_c^2 \right]^{0.5}}{r} \quad (26)$$

محاسبه می‌شود:

$$\gamma^p(i) = \gamma^p(i-1) + (\Delta\varepsilon_\theta^p(i) - \Delta\varepsilon_r^p(i)) \quad (32)$$

برای محاسبه‌ی کرنش‌های شعاعی و مماسی از روابط تغییر شکل-کرنش مربوط به شرایط تقارن محوری (گزاره‌ی (۴))، استفاده می‌شود.

در مدل پیشنهادی، برخلاف مدل براون و بری [1] که کرنش الاستیک را در کل محیط پلاستیک ثابت در نظر گرفته است، نمو کرنش الاستیک نیز در هر مرحله‌ی محاسبه، به طور جداگانه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین کرنش کل به دو قسمت کرنش الاستیک و پلاستیک تقسیم می‌شود.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r^e \\ \varepsilon_\theta^e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_r^p \\ \varepsilon_\theta^p \end{Bmatrix} \quad (33)$$

با جایگذاری گزاره‌ی (۳۳) در گزاره‌ی (۴)، می‌توان گزاره‌ی سازگاری کرنش‌ها را به این صورت بیان نمود:

$$\frac{d\varepsilon_\theta^p}{dr} + \frac{\varepsilon_\theta^p - \varepsilon_r^p}{r} = -\frac{d\varepsilon_\theta^e}{dr} - \frac{\varepsilon_\theta^e - \varepsilon_r^e}{r} \quad (34)$$

با حل عددی معادله‌ی بالا به روش تفاضل محدود،  $\Delta\varepsilon_\theta^p(i)$  (نمو کرنش پلاستیک مماسی) به صورت گزاره‌ی (۳۵) بدست می‌آید [16]:

$$\Delta\varepsilon_\theta^p(i) = \frac{P_1}{P_2} \quad (35)$$

$$P_1 = \left( \begin{array}{c} -\frac{\Delta\varepsilon_\theta^e(i)}{r(i)-r(i-1)} - \frac{1}{G} \frac{\sigma_\theta(i) - \sigma_r(i)}{r(i)+r(i-1)} \\ -\frac{2(\varepsilon_\theta^p(i-1) - \varepsilon_r^p(i-1))}{r(i)+r(i-1)} \end{array} \right)$$

$$P_2 = \frac{1}{r(i)-r(i-1)} + \frac{2(1+K(i))}{r(i)+r(i-1)}$$

در گزاره‌ی (۳۵)،  $\varepsilon_r^p(i-1)$  و  $\varepsilon_\theta^p(i-1)$  کرنش‌های مماسی و شعاعی پلاستیک محاسبه شده در گام قبلی ( $i-1$ ) هستند.

$\Delta\varepsilon_r^e(i)$  و  $\Delta\varepsilon_\theta^e(i)$  (نموکرنش الاستیک شعاعی و

مماسی) از گزاره‌ی زیر بدست می‌آید [10]:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_r^e(i) \\ \Delta\varepsilon_\theta^e(i) \end{Bmatrix} = \frac{1}{2G} \begin{bmatrix} 1-\nu & -\nu \\ -\nu & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_r(i) \\ \Delta\sigma_\theta(i) \end{Bmatrix} \quad (36)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_r(i) \\ \Delta\sigma_\theta(i) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_r(i) - \sigma_r(i-1) \\ \sigma_\theta(i) - \sigma_\theta(i-1) \end{Bmatrix}$$

همچنین  $K(i)$  نیز از گزاره‌ی (۳۷) بدست می‌آید [16]:

$$K(i) = \frac{1 + \sin \varphi(i)}{1 - \sin \varphi(i)} \quad (37)$$

که در آن  $\varphi$ ، زاویه‌ی اتساع است. پس از محاسبه‌ی

$\Delta\varepsilon_\theta^p(i)$  از گزاره‌ی (۳۵)،  $\Delta\varepsilon_r^p(i)$  نیز از گزاره‌ی (۳۸)

بدست می‌آید [16]:

$$\Delta\varepsilon_r^p(i) = -K(i)\Delta\varepsilon_\theta^p(i) \quad (38)$$

در این مرحله، کرنش پلاستیک نیز با استفاده از پارامترهای محاسبه شده در مراحل قبلی، با استفاده از رابطه‌ی (۳۹) قابل محاسبه است:

$$\begin{cases} \varepsilon_r^p(i) = \varepsilon_r^p(i-1) + \Delta\varepsilon_r^p(i) \\ \varepsilon_\theta^p(i) = \varepsilon_\theta^p(i-1) + \Delta\varepsilon_\theta^p(i) \end{cases} \quad (39)$$

و کرنش‌های کل مماسی و شعاعی با استفاده از مجموع کرنش‌های الاستیک و پلاستیک طبق گزاره‌ی (۴۰) بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \varepsilon_r(i) \\ \varepsilon_\theta(i) \end{cases} = \begin{cases} \varepsilon_r(i-1) \\ \varepsilon_\theta(i-1) \end{cases} + \begin{cases} \Delta\varepsilon_r^e(i) \\ \Delta\varepsilon_\theta^e(i) \end{cases} + \begin{cases} \Delta\varepsilon_r^p(i) \\ \Delta\varepsilon_\theta^p(i) \end{cases} \quad (40)$$

در نهایت، با محاسبه‌ی کرنش کل مماسی، تغییرشکل نیز طبق گزاره‌ی (۴۱) قابل محاسبه است.

$$u(i) = -\varepsilon_\theta(i)r(i) \quad (41)$$

روش حل به این گونه است که با فرض یک شعاع الاستوپلاستیک  $r_e$ ، محاسبات در مرز پلاستیک با استفاده از روابط (۲۱) تا (۲۵) انجام گرفته و سپس با در نظر گرفتن مقادیر تنش و کرنش بدست آمده در مرز الاستوپلاستیک به عنوان مقادیر ابتدایی، روابط (۲۶) تا (۴۱) بصورت عددی تا برآورده شدن شرایط مرزی حل می‌شوند. محاسبات تا هنگامی که شعاع الاستوپلاستیک به مقدار ثابتی برسد، ادامه می‌یابد. روند محاسبات در پیوست آورده شده است.

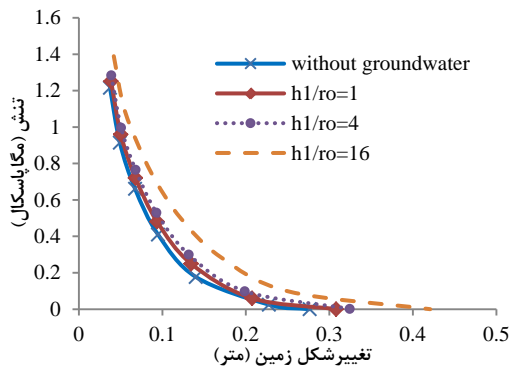
## ۶- صحت‌سنجی مدل جدید ارائه شده

با توجه به این‌که روش ارائه شده دارای حل بسته نیست؛ براساس روابط ارائه شده، برنامه‌ی *utunnel* (underwater tunnel) در محیط نرم‌افزار *MATLAB* نوشته شده است. با استفاده از برنامه‌ی *utunnel* ۲ تونل نمونه تحلیل شده‌اند. سپس نتایج بدست آمده، تفسیر و با نتایج حاصل از سایر مدل‌ها مقایسه و صحت‌سنجی شده است.

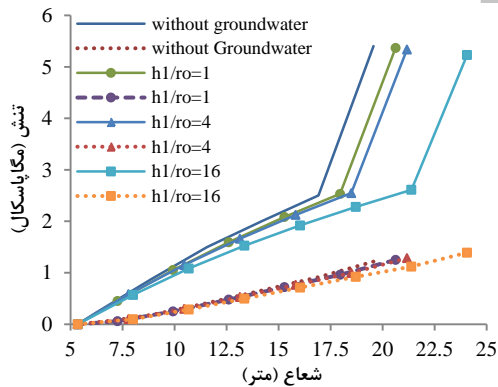
۱-۶- مثال ۱

در مثال ۱، مدل ارایه شده با مدل پارک (Park) [14] مقایسه شده است. داده‌های استفاده شده در مدل پارک در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این که در تونل مورد نظر پارک، اثر آب زیرزمینی در نظر گرفته نشده است، در تحلیل این تونل با استفاده از برنامه‌ی *utunnel* برای نسبت ارتفاع سطح آب زیرزمینی از سقف تونل به شعاع تونل  $h_1/r_0$  (شکل ۴)، محدوده‌ی گسترده‌ای از مقادیر (۱، ۴ و ۱۶) در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از تحلیل ناحیه‌ی پلاستیک تونل مورد نظر توسط برنامه‌ی *utunnel* در شکل ۵، شکل ۶ و شکل ۷ مشاهده می‌شود. در شکل ۵ و شکل ۶ منحنی مشخصه‌ی زمین و نمودار تنش شعاعی و مماسی برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی رسم شده است. منحنی بدون آب زیرزمینی، منحنی پارک است. در مثال ارایه شده توسط پارک فشار داخلی تونل (فشار پوشش)، صفر در نظر گرفته شده است ( $p_i = 0$ ) و تغییر شکل زمین جدار تونل تا رسیدن به تنش صفر ادامه می‌یابد.



شکل ۵- منحنی مشخصه‌ی زمین برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی

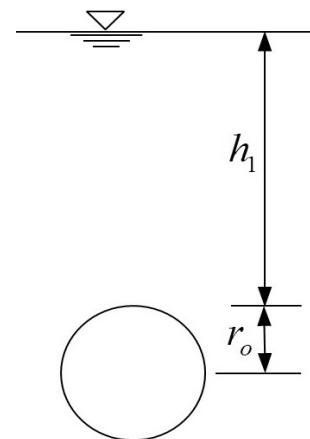


شکل ۶- نمودار تنش شعاعی و مماسی در ناحیه‌ی پلاستیک برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی (خطوط ممتد تنش مماسی و خطوط نقطه چین تنش شعاعی)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سطح آب زیرزمینی تغییر شکل زمین از ۰٫۲۷۶ متر در تونل بالاتر از سطح آب زیرزمینی به ۰٫۴۲ متر برای  $h_1/r_0 = 16$  افزایش می‌یابد، همچنین شعاع الاستوپلاستیک از ۱۹٫۵۸ متر به ۲۴٫۰۵۸ متر افزایش می‌یابد.

جدول ۱- داده‌های مربوط به روش پارک [14]

پارامتر	مقدار
مدول یانگ ( $E$ ) (مگا پاسکال)	۱۳۸۰
ضریب پواسون ( $\nu$ )	۰٫۲۵
تنش اولیه ( $P_0$ ) (مگا پاسکال)	۳٫۳۱
شعاع تونل ( $r_0$ ) (متر)	۵٫۳۵
$\sigma_c$ (مگا پاسکال)	۲۷٫۶
$m_p$	۰٫۵
$s_p$	۰٫۰۰۱
$m_r$	۰٫۱
$s_r$	۰
زاویه‌ی اصطکاک داخلی پیک ( $\phi_p$ )	۳۰
زاویه‌ی اتساع سنگ سالم ( $\phi_p$ )	۱۹٫۴۷
زاویه‌ی اتساع سنگ شکسته ( $\phi_r$ )	۵٫۲۲
پارامتر نرم‌کرنشی ( $\gamma^*$ )	۰٫۰۰۴۷۴۲

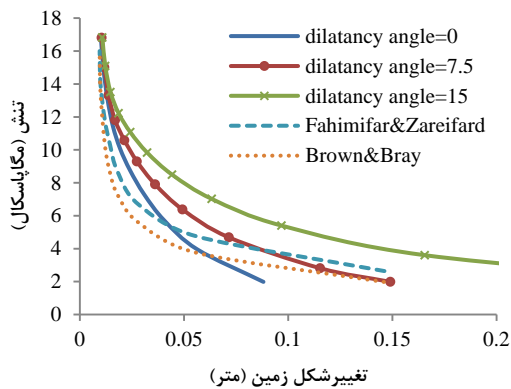


شکل ۴- شرایط سطح آب زیرزمینی

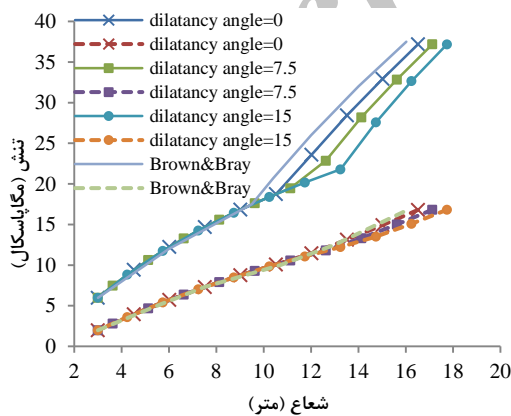


نفوذپذیری توده‌سنگ در ناحیه‌ی پلاستیک از گزاره‌ی

$k_o = K_r (1 + 10^5 \varepsilon_v^2)$  بدست می‌آید که در آن  $k_o$  نفوذپذیری اولیه‌ی توده‌سنگ و  $\varepsilon_v$  کرنش حجمی توده‌سنگ تغییر شکل‌یافته است. با در نظر گرفتن این مشخصات، براون و بری تونل مورد نظر را تحلیل و نتایج آن را در مقاله‌ی خود ثبت نمودند. نتایج براون و بری و برنامه‌ی *utunnel* در جدول ۳ مقایسه شده است. در شکل ۸ منحنی مشخصه‌ی بدست آمده توسط براون و بری [1]، فهیمی‌فر و زارعی‌فرد [7] و *utunnel* نشان داده شده است. در شکل ۹ نیز نمودار  $\sigma_r$  و  $\sigma_\theta$  برحسب شعاع  $r$  محاسبه شده با روش براون و بری و *utunnel* مشاهده می‌شود.

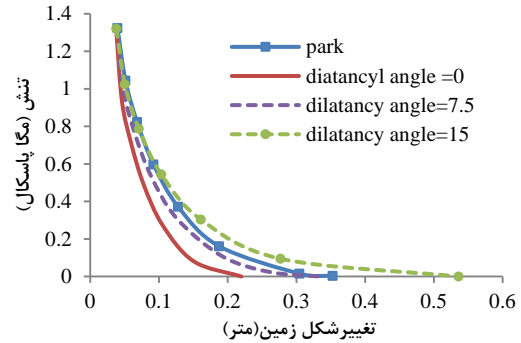


شکل ۸- منحنی مشخصه‌ی زمین در ناحیه‌ی پلاستیک با توجه به زوایای اتساع مختلف ( $h = 300m$ )



شکل ۹- نمودار تنش شعاعی و مماسی در ناحیه‌ی پلاستیک با توجه به زوایای اتساع مختلف (خطوط ممتد تنش مماسی و خطوط نقطه‌چین تنش شعاعی) ( $h = 300m$ )

در شکل ۷ اثر زاویه‌ی اتساع بر منحنی مشخصه‌ی زمین نشان داده شده است.



شکل ۷- منحنی مشخصه‌ی زمین براساس زوایای اتساع مختلف با در نظر گرفتن  $h = 50$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه‌ی اتساع از ۰ تا ۱۵ ( $\phi/2$ ) درجه، تغییر شکل زمین از ۰٫۲۱۹ متر به ۰٫۵۳۳۶ متر افزایش می‌یابد. با توجه به گزاره‌های (۳۰)، (۳۲) و (۳۳) با افزایش زاویه‌ی اتساع، تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد.

## ۲-۶- مثال ۲

تونلی در توده‌ای از گل‌سنگ و لای‌سنگ با مشخصات ارایه شده در جدول ۲ حفاری شده است.

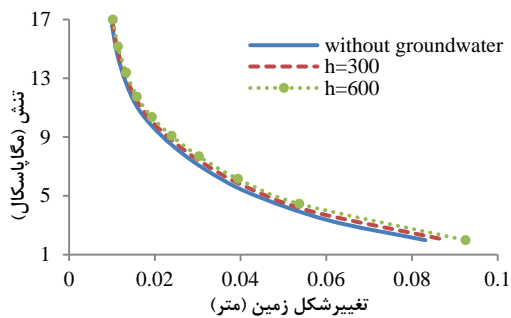
جدول ۲- داده‌های مربوط به روش براون و بری [1]

مقدار	پارامتر
۰٫۶۵	$m_p$
۰٫۲	$s_p$
۰٫۲	$m_r$
۰٫۱۰۰۰۱	$s_r$
۳۰	زاویه‌ی اصطکاک داخلی پیک ( $\phi_p$ )
۳۰	زاویه‌ی اتساع سنگ سالم ( $\phi_p$ )
۰	زاویه‌ی اتساع سنگ شکسته ( $\phi_r$ )
۲۰	مدول یانگ ( $E$ ) (گیگاپاسکال)
۰٫۲	ضریب پواسون ( $\nu$ )
۲۷	تنش اولیه ( $P_o$ ) (مگاپاسکال)
۳٫۰	شعاع تونل ( $r_o$ ) (متر)
۴۰	$\sigma_c$ (مگاپاسکال)
۳۰۰	ارتفاع سطح آب زیرزمینی ( $h$ ) (متر)
$10^{-6}$	نفوذپذیری توده‌سنگ ( $K_o$ ) (متر بر ثانیه)

جدول ۳- مقایسه‌ی نتایج حاصل از *utunnel* و روش براون و بری ( $h = 300m$ )

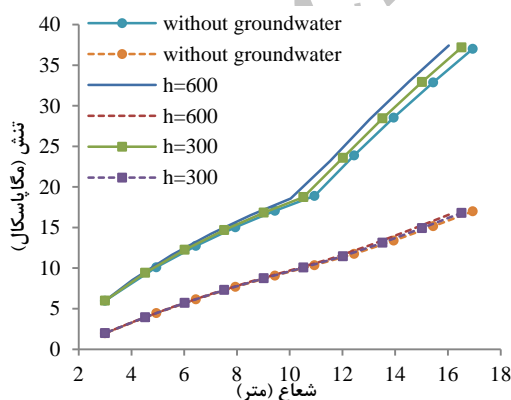
<i>utunnel</i>			پارامتر
$\varphi = 0$	$\varphi = \phi/4$	$\varphi = \phi/2$	
۱۶,۵۱۸۴	۱۷,۱۲۳۷	۱۷,۷۴۲۶	شعاع الاستوپلاستیک ( $r_e$ ) (متر)
۱۶,۸۰۷۳	۱۶,۸۱۲۲	۱۶,۸۱۶۹	تنش شعاعی در مرز الاستوپلاستیک ( $\sigma_{re}$ ) (مگاپاسکال)
۳۷,۱۹۲۷	۳۷,۱۸۷۸	۳۷,۱۸۳۱	تنش مماسی در مرز الاستوپلاستیک ( $\sigma_{\theta e}$ ) (مگاپاسکال)
۰,۰۸۸۱	۰,۱۴۹	۰,۳۰۲	تغییر شکل زمین قبل از نصب پوشش (متر)

در شکل ۱۰، شکل ۱۱ و شکل ۱۲ تاثیر شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی بر منحنی مشخصه‌ی زمین، نمودارهای تنش شعاعی و مماسی و فشار آب حفره‌ای، با ثابت نگه داشتن زاویه‌ی اتساع با استفاده از *utunnel* نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰- منحنی مشخصه‌ی زمین در ناحیه‌ی پلاستیک

برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی ( $\varphi = 0^\circ$ )



شکل ۱۱- نمودار تنش شعاعی و مماسی ناحیه‌ی پلاستیک

برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی (خطوط ممتد تنش

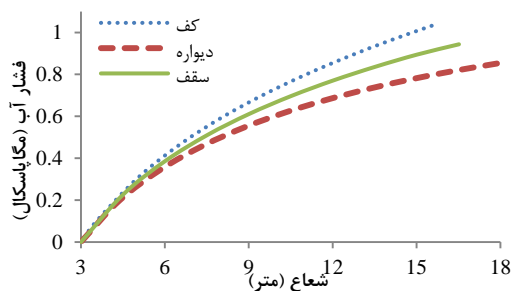
مماسی و خطوط نقطه‌چین تنش شعاعی) ( $\varphi = 7.5^\circ$ )

در مدل براون و بری [1] تحلیل تنش و کرنش همانند برنامه‌ی *utunnel* با استفاده از تنش کل در معادلات تعادل انجام گرفته است؛ اما اثرات تغییرات زاویه‌ی اتساع و نموکرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک در نظر گرفته نشده است. ضمن این‌که در مدل براون و بری از مدل تراوش شعاعی استفاده شده است. در مدل فهیمی فر و زارعی فرد [7] نیز با وجود تحلیل دقیق‌تر ناحیه‌ی الاستیک با استفاده از مدل تراوش غیرشعاعی کولیمباس [8]، اثرات تغییرات زاویه‌ی اتساع و نموکرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک در نظر گرفته نشده است. اما در *utunnel* علاوه بر تحلیل ناحیه‌ی الاستیک با استفاده از مدلی دقیق، کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک نیز با توجه به زاویه‌ی اتساع محاسبه شده و اثر تغییرات زاویه‌ی اتساع بر عملکرد تونل در ناحیه‌ی پلاستیک مورد توجه قرار گرفته است.

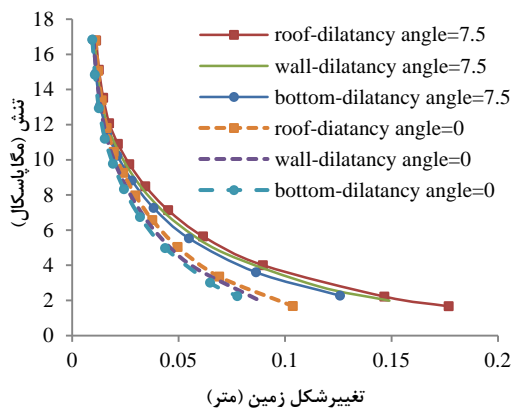
با توجه به اثر زاویه‌ی اتساع و نموکرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک، شعاع الاستوپلاستیک با افزایش زاویه‌ی اتساع، افزایش می‌یابد. همچنین با ثابت نگه داشتن فشار پوشش در مدل ارایه شده، با افزایش زاویه‌ی اتساع تغییر شکل زمین به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد.

نسبت نفوذناپذیری در ناحیه‌ی پلاستیک به نفوذپذیری اولیه، از جدار حفاری تا مرز الاستوپلاستیک به شدت زیاد است و در مدل براون و بری از ۱ در مرز الاستوپلاستیک تا ۱۶ در مرز تونل تغییر می‌کند. در *utunnel* با افزایش زاویه‌ی اتساع، نسبت نفوذپذیری افزایش می‌یابد. برای زاویه‌ی اتساع صفر این نسبت در مقدار صفر ثابت می‌ماند؛ اما با افزایش زاویه‌ی اتساع به ۷,۵ درجه، این نسبت از ۱ در مرز الاستوپلاستیک تا ۲۴ در مرز خارجی تونل تغییر می‌کند.

این‌که فشار آب محاسبه شده در کف تونل نسبت به سقف تونل مقادیر بزرگ‌تری را نشان می‌دهد (شکل ۱۳)؛ به سبب اثر بار شکسته، تغییر شکل زمین قبل از نصب پوشش در سقف تونل مقدار بیش‌تری نسبت به کف تونل محاسبه می‌شود. همچنین به دلیل اثر بار شکسته، شعاع الاستوپلاستیک از کف تا سقف تونل از ۱۵/۹۵ متر به ۱۸/۴۵ متر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳- نمودار فشار آب حفره‌ای در ناحیه‌ی پلاستیک برای سقف، کف و دیواره تونل ( $\varphi = 7.5^\circ$ )

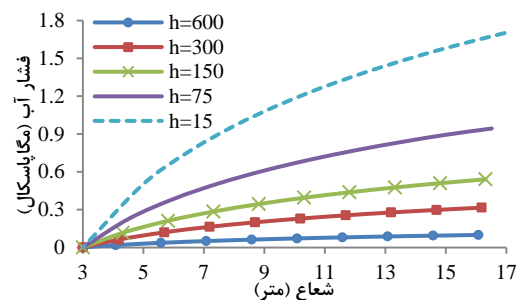


شکل ۱۴- منحنی مشخصه‌ی زمین در ناحیه‌ی پلاستیک برای سقف، کف و دیواره تونل

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش گام به گام جدیدی برای تحلیل تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی بر پایه‌ی روش براون و بری ارایه شده است. در این روش با در نظر گرفتن اثر نمونش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک و زاویه‌ی اتساع، روش براون و بری توسعه یافته است. برای تحلیل هیدرولیکی در ناحیه‌ی الاستیک از مدل توسعه‌یافته‌ی مینگ و در ناحیه‌ی پلاستیک از مدل تراوش شعاعی داری استفاده شده است.

تغییر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در مقادیر کوچک تاثیر چندانی بر شعاع الاستوپلاستیک و تغییر شکل زمین قبل از نصب پوشش نخواهد داشت، به علت تنش اولیه‌ی بالای زمین در اطراف تونل و جنس نسبتاً خوب توده‌سنگ (پارامترهای مقاومتی مناسب) در اطراف محل حفاری تونل، تغییرات سطح آب زیرزمینی در محدوده‌ی مورد مطالعه، تاثیر زیادی بر رفتار توده‌سنگ اطراف نخواهد داشت.



شکل ۱۲- نمودار فشار آب حفره‌ای برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی ( $\varphi = 7.5^\circ$ )

در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ با در نظر گرفتن اثر بار شکسته بر پایداری تونل، نمودار فشار آب حفره‌ای و منحنی مشخصه‌ی زمین نشان داده شده‌اند. با استفاده از مدل ارایه شده برای تحلیل هیدرولیکی، فشار آب حفره‌ای در سقف، کف و دیواره تونل محاسبه می‌شود. سپس با توجه به در نظر گرفتن شرایط تقارن محوری، برای لحاظ نمودن دقت بیش‌تر برای محاسبات تنش و تغییر شکل، فشار آب حفره‌ای مربوط به هر قسمت (سقف، دیواره و کف) در مدل تقارن محوری جایگذاری و تنش و تغییر شکل در توده‌سنگ اطراف ناحیه‌ی مربوطه محاسبه می‌شوند.

در مدل مربوطه برای لحاظ نمودن اثر بار شکسته،  $\gamma_r [r_e - r(i)] \sin \theta$  به مقادیر تنش شعاعی محاسبه شده در هر گام اضافه می‌شود. گزاره‌ی بالا قابلیت استفاده برای تمام جهات اطراف تونل را با توجه به لحاظ نمودن اثر زاویه، دارد. به این صورت که بطور مثال برای کف، دیواره و سقف تونل به ترتیب  $-\gamma_r (r_e - r(i))$ ،  $\gamma_r (r_e - r(i))$  و  $\gamma_r (r_e - r(i))$  به مقدار تنش شعاعی نقطه‌ی مورد نظر در همان گام اضافه می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، با وجود

پلاستیک، با افزایش زاویه‌ی اتساع افزایش می‌یابد.  
 ۲- با توجه به این‌که استفاده از مدل تراوش شعاعی برای تونل‌های کم عمق با توجه به خطای قابل توجه امکان‌پذیر نیست، از ترکیب مدل دقیق غیرشعاعی مینگ و مدل شعاعی دارسی برای مدلسازی توزیع فشار آب حفره‌ای اطراف تونل استفاده شده است. با استفاده از توسعه‌ی مدل تراوش مینگ، مدلی جدید برای توزیع فشار آب حفره‌ای در ناحیه‌ی الاستیک اطراف تونل ارائه شده است. با استفاده از مدل ارائه شده، محاسبه‌ی فشار آب حفره‌ای در هر نقطه‌ای اطراف تونل امکان‌پذیر خواهد بود. همچنین با استفاده از رابطه‌ی دارسی با فرض جریان شعاعی و با در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیکی و نفوذپذیری ثانویه، مدلی برای توزیع فشار آب حفره‌ای در ناحیه‌ی پلاستیک اطراف تونل ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل هیدرولیکی، با افزایش سطح آب زیرزمینی، شعاع الاستوپلاستیک و تغییرشکل زمین قبل از نصب پوشش افزایش می‌یابد، همچنین فشار آب حفره‌ای از سقف تا کف تونل نیز افزایش خواهد یافت.

۳- برای رسم منحنی مشخصه‌ی زمین برای سقف و کف تونل، باید اثر وزن بار شکسته در نظر گرفته شود. به این ترتیب اثر وزن بار شکسته، شعاع الاستوپلاستیک و همگرایی تونل قبل از نصب پوشش از کف تا سقف تونل افزایش می‌یابد.

در این روش، در هرگام یک میلی‌متر به شعاع افزوده می‌شود، به نحوی که برای مثال اول حدود ۳۰۰۰ حلقه و برای مثال دوم حدود ۵۰۰۰ حلقه برای برآورده شدن شرط مرزی در هر بار محاسبه‌ی شعاع الاستوپلاستیک لازم است. با توجه به تعداد حلقه‌ها، به ازای هر شعاعی از توده‌سنگ اطراف تونل، محاسبات با دقت بسیار بالایی انجام شده است. دقت و کاربرد عملی مدل ارائه شده در مقایسه با روش ارائه شده برای تحلیل الاستوپلاستیک تونل توسط پارک و روش ارائه شده برای تحلیل تونل زیر سطح آب زیرزمینی توسط براون و بری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- در مدل ارائه شده، بر خلاف روش براون و بری نمو کرنش الاستیک و پلاستیک بصورت جداگانه در هر حلقه محاسبه شده است. با افزایش زاویه‌ی اتساع، کرنش پلاستیک در هر حلقه افزایش و با افزایش کرنش پلاستیک، تغییرشکل توده‌سنگ و شعاع الاستوپلاستیک نیز افزایش می‌یابد. با توجه به محاسبه‌ی جداگانه کرنش الاستیک و پلاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک، نفوذپذیری ثانویه با مجذور کرنش پلاستیک رابطه دارد؛ بنابراین مدل ارائه شده، معیار دقیق‌تری برای در نظرگرفتن اندرکنش هیدرومکانیکی نسبت به مدل براون و بری ارائه می‌دهد. با توجه به در نظرگرفتن کرنش پلاستیک و الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک، نسبت نفوذپذیری ثانویه به اولیه در ناحیه‌ی

## ۸- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
$\sigma_r$	MPa	تنش شعاعی	$r_o$	m	شعاع تونل
$\sigma_\theta$	MPa	تنش مماسی	$r_e$	m	شعاع الاستوپلاستیک
$\sigma_r'$	MPa	تنش موثر شعاعی	$r_s$	m	شعاع نرم‌کرنشی
$\sigma_\theta'$	MPa	تنش موثر مماسی	$i_r$	-	گرادیان هیدرولیکی
$\sigma_1'$	MPa	تنش موثر اصلی بزرگ‌تر	$h$	m	ارتفاع سطح آب زیرزمینی از مرکز تونل
$\sigma_3'$	MPa	تنش موثر اصلی کوچک‌تر	$h_1$	m	ارتفاع سطح آب زیرزمینی از سقف تونل
$\sigma_c$	MPa	مقاومت فشاری تک‌محوره	$P_w$	MPa	فشار آب حفره‌ای
$\varepsilon_r$	-	کرنش شعاعی	$P_a$	MPa	فشار آب حفره‌ای در مرز تونل

دبی تراوش	$m^3/s$	$q$	کرنش مماسی	-	$\varepsilon_\theta$
سرعت جریان تراوش	$m/s$	$V$	کرنش حجمی	-	$\varepsilon_v$
وزن مخصوص آب	$KN/m^3$	$\gamma_w$	کرنش اصلی بزرگ‌تر توده‌سنگ	-	$\varepsilon_1$
فشار پوشش	$MPa$	$P_i$	کرنش اصلی کوچک‌تر توده‌سنگ	-	$\varepsilon_3$
تنش اولیه	$MPa$	$P_o$	تغییر شکل شعاعی	$m$	$u$
ثابت اندرکنش هیدرومکانیکی	-	$\eta$	فاصله‌ی شعاعی از مرکز تونل	$m$	$r$
نفوذپذیری توده‌سنگ	$m/s$	$K_o$	زاویه بصورت پادساعتگرد از محور افقی تونل	deg ree	$\theta$
نفوذپذیری ثانویه‌ی توده‌سنگ	$m/s$	$K_r$	وزن مخصوص توده‌سنگ	$KN/m^3$	$\gamma_r$
زاویه‌ی اتساع	deg ree	$\varphi$	ضریب پواسون	-	$\nu$
مدول برشی توده‌سنگ	$MPa$	$G$	مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ	$MPa$	$E$
پارامترهای توده‌سنگ در مدل هوک و براون	-	$m, s$	پارامتر نرم‌کرنشی توده‌سنگ	-	$\gamma$
پارامترهای سنگ بکر در مدل هوک و براون	-	$m_i, s_i$	پارامتر نرم‌کرنشی به پلاستیک	-	$\gamma^*$
پارامترهای $\varphi, \sigma_c, m, s$ در توده‌سنگ اولیه	-	$w_p$	گرادیان $\varepsilon_3^p$ نسبت به $\varepsilon_1^p$ در ناحیه‌ی نرم‌کرنشی	-	$g$
پارامترهای $\varphi, \sigma_c, m, s$ در توده‌سنگ شکسته	-	$w_r$	گرادیان $\varepsilon_3^p$ نسبت به $\varepsilon_1^p$ در ناحیه‌ی پلاستیک کامل	-	$f$
پارامترهای $\varphi, \sigma_c, m, s$ برای المان‌های متفاوت	-	$\bar{w}$	پارامتر نشان دهنده‌ی طول ناحیه‌ی نرم‌کرنشی	-	$\alpha$
			زاویه‌ی اصطکاک داخلی	deg ree	$\phi$

$$\varepsilon_\theta(1) = \frac{M\sigma_c}{2G} \quad .6$$

$$\rho(1) = \frac{r_1}{r_e} = 1 \quad .7$$

$$w(1) = w_p \quad .8$$

$$\varepsilon_r^p(1) = 0; \varepsilon_\theta^p(1) = 0; \gamma^p(1) = 0 \quad .9$$

$$u(1) = \varepsilon_\theta(1)r(1) \quad .10$$

$$i = i + 1 \quad .11$$

۲- ترتیب محاسبات برای هر حلقه در ناحیه‌ی پلاستیک

$$D = 0.001m \quad .1$$

$$r(i) = r(i-1) + D \quad .2$$

$$\rho(i) = \frac{r(i)}{r(1)} \quad .3$$

## ۹- پیوست‌ها

### ۹-۱- پیوست الف: روند محاسبات در *utunnel*

#### ۱- محاسبات مقدماتی

$$P_w(r(1), \theta) = \gamma_w q / 2\pi \int_{r_o}^{r_e} \frac{1}{rK_r(r)} dr + \quad .1$$

$$P_a - \gamma_w (r(1) - r_o) \sin \theta$$

$$M = \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{m}{4} \right)^2 + m \left( \frac{P_o - P_w(r(1), \theta)}{\sigma_c} \right) + s \right\}^{0.5} \quad .2$$

$$-\frac{m}{8}$$

$$\sigma_r(1) = P_o - M\sigma_c \quad .3$$

$$\sigma_\theta(1) = P_o + M\sigma_c \quad .4$$

$$\varepsilon_r(1) = -\frac{M\sigma_c}{2G} \quad .5$$

$$\Delta \varepsilon_r^p(i) = -K(i) \Delta \varepsilon_\theta^p(i)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_r^p(i) = \varepsilon_r^p(i-1) + \Delta \varepsilon_r^p(i) \\ \varepsilon_\theta^p(i) = \varepsilon_\theta^p(i-1) + \Delta \varepsilon_\theta^p(i) \end{cases} \quad ۱۵$$

$$\begin{cases} \varepsilon_r(i) \\ \varepsilon_\theta(i) \end{cases} = \begin{cases} \varepsilon_r(i-1) \\ \varepsilon_\theta(i-1) \end{cases} + \begin{cases} \Delta \varepsilon_r^e(i) \\ \Delta \varepsilon_\theta^e(i) \end{cases} + \begin{cases} \Delta \varepsilon_r^p(i) \\ \Delta \varepsilon_\theta^p(i) \end{cases} \quad ۱۶$$

$$u(i) = -\varepsilon_\theta(i)r(i) \quad ۱۷$$

$$\gamma^p(i) = \gamma^p(i-1) + (\Delta \varepsilon_\theta^p(i) - \Delta \varepsilon_r^p(i)) \quad ۱۸$$

$$(\sigma_r(i) + \gamma_r(r(1) - r(i)) \sin \theta) < p_i \quad \text{اگر } ۱۹$$

$$i = i + 1$$

و روند ۱۹ مرحله‌ی محاسبات برای حلقه‌ی بعدی تکرار می‌شود.

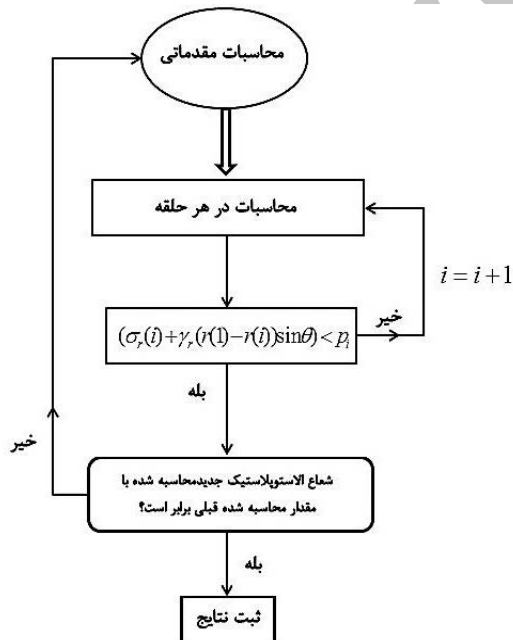
$$(\sigma_r(i) + \gamma_r(r(1) - r(i)) \sin \theta) \geq p_i \quad \text{اگر } ۲۰$$

$$r(1) = r_e = \frac{r(i)}{\rho(i)}$$

و محاسبات با در نظر گرفتن  $r(1) = r_e$  جدید از مرحله‌ی مقدماتی تکرار می‌شود.

روند محاسبات بالا تا زمانی که شعاع الاستوپلاستیک به مقدار ثابتی برسد، ادامه می‌یابد.

### ۹-۲- پیوست ب: الگوریتم برنامه



شکل ب-۱ الگوریتم برنامه‌ی utunnel

$$w(i) = \begin{cases} w_p - (w_p - w_r) \frac{\gamma^p(i)}{\gamma^{p*}} & 0 < \gamma^p(i) < \gamma^{p*} \\ w_r & \gamma^p(i) > \gamma^{p*} \end{cases} \quad ۴$$

$$\bar{w}(i) = \frac{1}{2}(w(i-1) + w(i)) \quad ۵$$

$$P_w(r(i), \theta) = \gamma_w q / 2\pi \int_{r_o}^{r(i)} \frac{1}{r K_r(r)} dr + \quad ۶$$

$$P_a - \gamma_w(r(i) - r_o) \sin \theta$$

$$c = \left[ \frac{r_{i-1} - r_i}{r_{i-1} + r_i} \right]^2$$

$$a = \sigma_r^2(i-1) - \left[ \frac{1}{2} \bar{m}(i) \bar{\sigma}_c(i) (\sigma_r(i-1)) - P_w(i) - P_w(i-1) + \bar{s}(i) \bar{\sigma}_c^2(i) \right] \quad ۷$$

$$b = \sigma_r(i-1) + c \bar{m}_a(i) \bar{\sigma}_c(i)$$

$$\sigma_r(i) = b - \sqrt{b^2 - a} \quad ۸$$

$$\sigma_\theta(i) = \sigma_r(i)$$

$$+ \left[ \bar{m}(i) \bar{\sigma}_c(i) \sigma_r(i) + \bar{s}(i) \bar{\sigma}_c^2(i) \right]^{\frac{1}{2}} \quad ۹$$

$$\begin{cases} \Delta \sigma_r(i) \\ \Delta \sigma_\theta(i) \end{cases} = \begin{cases} \sigma_r(i) - \sigma_r(i-1) \\ \sigma_\theta(i) - \sigma_\theta(i-1) \end{cases} \quad ۱۰$$

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_r^e(i) \\ \Delta \varepsilon_\theta^e(i) \end{cases} = \frac{1}{2G} \begin{bmatrix} 1-\nu & -\nu \\ -\nu & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{cases} \Delta \sigma_r(i) \\ \Delta \sigma_\theta(i) \end{cases} \quad ۱۱$$

$$K(i) = \frac{1 + \sin \varphi(i)}{1 - \sin \varphi(i)} \quad ۱۲$$

$$P_1 = \left( \frac{\Delta \varepsilon_\theta^e(i)}{r(i) - r(i-1)} - \frac{\left[ \bar{m}(i) \bar{\sigma}_c(i) \sigma_r(i) + \bar{s}(i) \bar{\sigma}_c^2(i) \right]^{\frac{1}{2}}}{r(i) + r(i-1)} \right) \frac{1}{G} - \frac{2(\varepsilon_\theta^p(i-1) - \varepsilon_r^p(i-1))}{r(i) + r(i-1)} \quad ۱۳$$

$$P_2 = \frac{1}{r(i) - r(i-1)} + \frac{2(1 + K(i))}{r(i) + r(i-1)}$$

$$\Delta \varepsilon_\theta^p(i) = \frac{P_1}{P_2} \quad ۱۴$$

۱۰- منابع‌ها

- [1] Brown, E., & Bray, J. (1982). Rock-Support Interaction Calculations for Pressure Shafts and Tunnels. *ISRM Symposium, Rock Mechanics Related to Caverns and Pressure Shafts* (pp. 26-28). Aachen, Germany. A.A. Balkema. ISBN 10: 9061912334.
- [2] Fazio, L., & Ribacchi, R. (1984). Influence of Seepage on Tunnel Stability. *ISRM Symposium on Design and Performance of Underground Excavations* (pp. 173-184). Cambridge: British Geotechnical Society, UK. Thomas Telford. ISBN: 9780727735652.
- [3] Carosso, G., & Giani, G. (1988). Analytical Solutions for Potentials and Stresses around a Cavity under a Water Table. In Serrano (Ed.), *International Congress on Tunnels and Water, 3*, (pp. 1209-1217). Madrid, Spain. Taylor & Francis Group. ISBN: 9061918219.
- [4] Nam, S. W., & Bobet, A. (2006). Liner Stresses in Deep Tunnels below the Water Table. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21(6), 626-635. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.11.004>.
- [5] Lee, S. W., Jung, J. W., Nam, S. W., & Lee, I. M. (2007). The Influence of Seepage Forces on Ground Reaction Curve of Circular Opening. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 28-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2006.03.004>.
- [6] Shin, Y. j., Kim, B. M., shin, J. H., & Lee, I. M. (2010). The Ground Reaction Curve of Underwater Tunnels Considering Seepage Forces. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 315-324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.01.005>.
- [7] Fahimifar, A., & Zareifard, M. R. (2009). A Theoretical Solution for Analysis of Tunnels below Groundwater Considering the Hydraulic-Mechanical Coupling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(6), 634-646. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2009.06.002>.
- [8] Kolymbas, D., & Wagner, P. (2007). Groundwater Ingress to Tunnels-The Exact Analytical Solution. *Tunnelling And Underground Space Technology*, 22(1), 23-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2006.02.001>.
- [9] Ming, H., Meng, S. W., Tan, Z. S., & Xiu, Y. W. (2010). Analytical Solution for Steady Seepage into an Underwater Circular Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 391-396. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.02.002>.
- [10] Timoshenko, S., & Goodier, J. (1994). *Theory of Elasticity*. New York: McGraw-Hill. ISBN: 9780070701229.
- [11] Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of Geotechnical Engineering*, 106(9), 1013-1035.
- [12] Brown, E. T., Bray, J. W., Ladanyi, B., & Hoek, E. (1983). Ground Response Curves for Rock Tunnels. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(1), 15-39. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:1\(15\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:1(15)).

[۱۳] قدیمی، ح. (۱۳۹۰). تحلیل پایداری تونل‌های تحت فشار با در نظر گرفتن اثر تراوش. تفرش، ایران: پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تفرش.

- [14] Park, K. H., Tontavanich, B., & Lee, J. G. (2008). A Simple Procedure for Ground Response Curve of Circular Tunnel in Elastic-Strain Softening Rock Masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2), 151-159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.03.002>.
- [15] Alonso, E., Alejano, L. R., Varas, F., Fdez-Manin, G., & Carranza-Torres, C. (2003). Ground Response Curves for Rock Masses Exhibiting Strain-Softening Behavior. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(13), 1153-1185. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.315>.
- [16] 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(5), 588-599. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.11.002>.

Archive of SID