

بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار تنش‌ی تونل‌های کم‌عمق دوبعدی با استفاده از روش اجزای مرزی

مهدی پنجمی*، عضو هیئت علمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، زنجان، ایران
جعفر عسگری مارنانی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران
حمید علی‌الهی، عضو هیئت علمی دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، زنجان، ایران
حمید کوهساری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، زنجان، ایران
محمد آدم‌پیرا، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، زنجان، ایران

E-mail: m.panji@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۰۷ - پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۰۸

چکیده

امروزه با پیشرفت صنعت حمل و نقل، تونل‌های زیرزمینی نقش بسزایی در جوامع شهری ایفا می‌کنند و نیاز به احداث این‌گونه سازه‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. در این تحقیق با استفاده از روش اجزای مرزی مبتنی بر حل‌های اساسی الاستواستاتیک محیط کامل، به بررسی رفتار تونل‌های کم‌عمق با فرض رفتار خطی توده سنگی، تحت بارگذاری همزمان ثقلی و تنش‌های یکنواخت سطحی پرداخته شده است. در این میان با در نظر گرفتن معیار گسیختگی هوک - براون، ضمن مطالعه نحوه گسترش شعاع گسیختگی برای مقاطع مختلف تونل، حساسیت عرض بارگذاری سطحی نیز بر توزیع رفتار تنش در پیرامون تونل مورد توجه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که اثرات بارهای سطحی بر رفتار تونل‌ها، از عمقی معادل ۲۵ برابر شعاع تونل به بعد تقریباً از بین رفته و عملکرد تونل در یک محیط نیم‌صفحه، مشابه رفتار تونل در یک محیط بی‌کران خواهد شد. همچنین، تنش‌های القایی ناشی از بارهای همزمان ثقلی و سطحی، کمترین مقدار را برای تونل‌های دایره‌ای و بحرانی‌ترین حالت را برای تونل‌های مستطیلی ایجاد می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: رفتار تنش، روش اجزای مرزی، تونل‌های کم‌عمق، شعاع گسیختگی

۱ - مقدمه

هرچه دقیق‌تر پاسخ سطح زمین و توده سنگی پیرامون تونل پرداخته و در راستای کمینه‌سازی این مقادیر عمل نمایند. پیشرفت روزافزون علم رایانه و استفاده از آن در تحلیل سیستم‌های سازه‌ای به جهت برخورداری از سهولت و سرعت عمل بالای آن، موجبات شکل‌گیری روش‌های عددی را در علوم مهندسی مهیا ساخته است. از جمله روش‌های عددی می‌توان به دو روش اجزای محدود (FEM) و تفاضل محدود (FDM) اشاره کرد.

امروزه تونل‌های زیرزمینی نقش عمده‌ای در بهبود عملکرد جوامع شهری و به‌ویژه صنعت حمل و نقل دارند، بنابراین، باید به‌گونه‌ای طراحی شده که در برابر بارهای مؤثر از مقاومت کافی برخوردار باشند. از سوی دیگر در مناطق شهری، تونل‌های نزدیک به سطح زمین می‌توانند بر رفتار سازه‌های موجود مانند ساختمان‌ها، جاده‌ها، راه‌آهن‌ها، غیره و بالعکس تأثیرگذار باشند. بنابراین، لازم است مهندسان طراح با بهره‌گیری از ابزار و روش‌های مناسب، به تعیین

(Lee and Rowe, 1991). همچنین به منظور بررسی رفتار خاک‌های تحکیم نشده با لایه‌های مایل، مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل‌های اجزای محدود مختلفی انجام گردید (Park and Adachi, 2002). در یک مطالعه عددی دو بعدی به کمک روش اجزای محدود، گسیختگی توده سنگ در اطراف بازشدگی دایره‌ای بررسی گردید به طوری که این مدل، قادر به در نظر گرفتن عدم تجانس سنگ با استفاده از تغییرات احتمالاتی ویژگی‌های مکانیکی مواد می‌باشد (Wang and Sloan, 2012). اگرچه از آغاز شکل‌گیری روش اجزای مرزی بیش از چهار دهه می‌گذرد ولی پیشرفت‌های چند دهه اخیر در بهبود کمی و کیفی رایانه‌ها، توسعه روش اجزای مرزی را نیز مانند سایر موضوعات حوزه مهندسی و فناوری سرعت بخشیده است. فرآیند گسسته‌سازی مرز برای اولین بار در سال ۱۹۰۳ برای معادلات جریان پتانسیل استفاده گردید (Fredholm, 1903). پس از گذشت چند دهه، محققان زیادی توانستند معادلات انتگرال مرزی را به مکانیک جامدات بسط دهند (Banerjee and Driscoll, 1976). از سال ۱۹۸۰ به بعد، روش اجزای مرزی برای حل مسایل مکانیک سنگ و خاک نیز مورد استفاده قرار گرفت، به طوری که برخی از پژوهشگران با استفاده از روش گسسته‌سازی مرز، مدل بازشدگی در فضای نامحدود را مورد بررسی قرار دادند (Banerjee and Butterfield, 1981). در همان دوران یعنی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۳ میلادی، هوک و براون نیز توانستند برای مقاومت سنگ‌های بکر و نحوه شکستگی آنها معیاری تحت عنوان معیار گسیختگی هوک - براون ارایه نمایند که نسخه تکمیل شده آن در سال ۱۹۹۲ برای همه سنگ‌ها در حالت بکر و در حالت بافت درزه‌ای مورد استفاده علاقه‌مندان قرار گرفت (Hoek and Marions, 2007). در مطالعات اخیر انجام شده به کمک روش اجزای مرزی بر روی سازه‌های زیرزمینی، محققان توانستند مدلی را شبیه‌سازی نمایند که توانایی در نظر گرفتن رفتار ناهمگن مصالح و نحوه اثر مراحل حفاری را داشته باشد (Duenser et al., 2011). نرم‌افزارهای تجاری از قبیل FLAC2D و EXAMINE2D که امروزه توسط پژوهشگران مختلفی برای مدل‌سازی سازه‌های زیرزمینی دوبعدی استفاده می‌شود به سادگی و با دقت بالا قابلیت

علی رغم سادگی در فرمولاسیون، قدرت محاسبات بالا و توسعه آن برای تحلیل مسایل الاستوپلاستیک، روش‌های مذکور برای تحلیل مسایلی که فضای مطرح شده در آنها تا بی‌کران وسیع است، با حجم محاسبات بالا (به دلیل حجم بالای المان‌بندی)، افزایش داده‌ها و در نتیجه طولانی بودن زمان محاسبات همراه هستند. همچنین تعریف شرایط مرزی مصنوعی به‌ویژه در مرزهای پیرامونی، از دلایل دشوارتر شدن تحلیل و کاهش دقت می‌باشند. این در حالی است که به کمک روش‌های اجزای مرزی (BEM) به عنوان روش مکمل که از قدرت فوق‌العاده بالایی در مدل‌سازی، به ویژه مدل‌سازی مسایل با مرزهای نامحدود و نیمه نامحدود، برخوردار می‌باشد می‌توان با سهولت و دقت بیشتر به بررسی انواع مسایل در علوم مهندسی پرداخت. شایان ذکر است از نقاط ضعف روش اجزای مرزی شاید بتوان به عدم توسعه آن برای تحلیل مسایل غیر خطی اشاره داشت.

تاکنون مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی زیادی برای بررسی پایداری زمین در اطراف تونل‌های کم‌عمق انجام شده است. لاگاناتان و پولوس پاسخ‌های تحلیلی برای پیش‌بینی و تعیین مقادیر جابه‌جایی زمین‌های نرم در اثر حفر تونل پیشنهاد کردند و نتایج خود را با پنج نمونه واقعی مورد بررسی قرار دادند (Loganathan and Poulos, 1998). در سال ۱۹۹۹ به منظور شناسایی مکانیزم حاکم بر گسترش نشست‌های سطحی در اثر حفر تونل در زمین‌های ماسه‌ای، یک تحلیل بازگشتی به کمک اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شد (Gioda and Locatelli, 1999). سال‌ها بعد با انجام آزمایش سانتریفیوژ برای یک محیط تک حفره‌ای و دو حفره‌ای، تغییر مکان زمین‌های رسی نیز بررسی گردید (Wu and Lee, 2003).

برای بررسی پایداری توده سنگی پیرامون تونل‌های کم‌عمق، تحقیقات زیادی با استفاده از روش‌های عددی انجام شده است. در سال ۱۹۸۳ به کمک روش اجزای محدود، نشست زمین‌های نرم بالای تونل پیش‌بینی گردید (Row and Kack, 1983). برای مدل‌سازی تونل در حالت‌های مختلف هندسه، خواص مصالح و مکانیزم‌های شکست، از روش اجزای محدود در سال ۱۹۸۹ بهره گرفته شد (Koutasbeloulis, Griffiths, 1989).

لی و راول به وسیله روش اجزای محدود سه بعدی، تغییر شکل‌های به‌وجود آمده در خاک‌های رسی پیرامون تونل را محاسبه نمودند

$$\int_{\Omega} \sigma_{kj,j}^* u_k d\Omega = - \int_{\Gamma} p_k u_k^* d\Gamma + \int_{\Gamma} u_k p_k^* d\Gamma \quad (3)$$

به‌طوری‌که p_k و u_k به ترتیب بیانگر مقادیر تنش و تغییر مکان مرزی، p_k^* حل اساسی فضای کامل تنش و Γ مشخص‌کننده مرز است. به کمک تابع دلتای دیراک (یکی از روش‌های حل مرزی) معادله انتگرال مرزی پس از حذف جملات حاکم بر دامنه Ω به شکل زیر ارائه می‌شود:

$$c_{lk}^i u_l^i + \int_{\Gamma} p_{lk}^* u_k d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{lk}^* p_k d\Gamma \quad (4)$$

در رابطه فوق $c_{lk}^i = 1 - (\theta_i / 2\pi)$ زاویه قرارگیری گره مرزی i (زاویه شکست مرزی) است. حل اساسی مؤلفه‌های تنش سطحی p_{lk}^* مطابق زیر نتیجه می‌شود:

$$p_{lk}^* = - \frac{1}{4\pi(1-\nu)r} \left[\frac{\partial r}{\partial n} \left[(1-2\nu)\delta_{lk} + 2r_{,l}r_{,k} \right] + (1-2\nu)(n_l r_{,k} - n_k r_{,l}) \right] \quad (5)$$

در این رابطه n_l مؤلفه l ام بردار نرمال عمود بر مرز Γ و $\partial r / \partial n$ مشتق بردار مکانی r نسبت به بردار نرمال می‌باشد. باوجود حل‌های اساسی u_{lk}^* و p_{lk}^* و همچنین معادله انتگرال مرزی ۴ برای هر گره مرزی i ، می‌توان مجهولات مرزی اعم از جابه‌جایی و تنش را به‌دست آورد. لازم به‌ذکر است برای تعیین تنش در هر نقطه درونی تعریف شده در فضای مسئله، می‌توان با استفاده از معادله تعادل و حل‌های اساسی فضای کامل تغییر مکان، حل‌های اساسی مربوطه برای تنش را به‌صورت زیر به‌دست آورد (Balas et al., 1990):

$$\sigma_{ij} = \int_{\Gamma} D_{kij}^* p_k d\Gamma - \int_{\Gamma} S_{kij}^* u_k d\Gamma \quad (6)$$

$$D_{kij}^* = \frac{1}{r} \left\{ (1-2\nu) \left[\delta_{ki} r_{,i} + \delta_{kj} r_{,i} - \delta_{ij} r_{,k} \right] + 2r_{,i} r_{,j} r_{,k} \right\} \quad (7)$$

$$\frac{1}{4\pi(1-\nu)}$$

$$S_{kij}^* = \frac{2\mu}{r^2} \left\{ 2 \frac{\partial r}{\partial n} \left[(1-2\nu)\delta_{ij} r_{,k} + \nu(\delta_{ik} r_{,j} + \delta_{jk} r_{,i}) - 4r_{,i} r_{,j} r_{,k} \right] + 2\nu(n_i r_{,j} r_{,k} + n_j r_{,i} r_{,k}) + (1-2\nu)(2n_k r_{,i} r_{,j} + n_j \delta_{ik} + n_i \delta_{jk}) - (1-4\nu)n_k \delta_{ij} \right\} \cdot \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \quad (8)$$

مدل‌سازی بارگذاری‌های سطحی شالوده‌ای را ندارند (Shah, 1992) و (Martin et al., 1999) و (Kooi and Verruijt, 2001). اخیراً پنجمی و همکاران با عددی سازی حل‌های اساسی الاستواستاتیک محیط کامل و نیم‌صفحه، به تهیه الگوریتم‌های اجزای مرزی مستقیم پرداخته و از آن در تحلیل پی و تونل بهره‌گرفته‌اند (پنجی، ۱۳۸۵)، (عسگری مارنانی و پنجی، ۱۳۸۵ و (Panji et al., 2011). در اکثر تحقیقات انجام گرفته تاکنون رفتار انواع تونل‌ها به‌طور مجزا تحت اثر بارهای سطحی و یا فشارهای ثقلی پیرامون بررسی شده و اثر بارگذاری همزمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است، بنابراین هدف از این تحقیق، مشاهده رفتار انواع مقاطع تونل‌های کم‌عمق تحت حالت‌های مختلف بارگذاری توأمان ثقلی و سطحی می‌باشد که در این میان کارایی و سادگی روش‌های اجزای مرزی در تحلیل این‌گونه مسایل نیز مدنظر قرار گرفته است.

۲- فرمول‌بندی اجزای مرزی در فضای کامل

از اعمال انتگرال باقیمانده‌های وزن‌دار به معادله تعادل الاستواستاتیک ناویر با صرف‌نظر از نیروهای حجمی خواهیم داشت (Bathe, 1996):

$$\int_{\Omega} \sigma_{kj,j}^* u_k^* d\Omega = 0 \quad (1)$$

به طوری‌که در رابطه فوق u_k^* تابع وزن در روش باقیمانده‌های وزن‌دار یا حل اساسی فضای کامل کلونین، Ω مبین دامنه مسئله و $\sigma_{kj,j}^*$ معادله تعادل برحسب مؤلفه‌های تنش می‌باشد. با بهره‌گیری از معادله ناویر و روش گلرکین در الاستیسته دوبعدی، حل اساسی تغییر مکان به‌صورت زیر به‌دست می‌آید (Brebbia and Domiguez, 1990):

$$u_{lk}^* = \frac{1}{8\pi\mu(1-\nu)} \left[(3-4\nu) \ln \frac{1}{r} \delta_{lk} + r_{,l} r_{,k} \right] \quad (2)$$

که u_{lk}^* حل اساسی فضای کامل تغییر مکان در امتداد l تحت یک نیروی واحد در امتداد k ، $l=1,2$ ، $k=1,2$ ، فاصله نقطه منبع تا نقطه مورد بررسی (مرزی یا درونی)، $r_{,l}$ مشتق بردار r نسبت به امتداد l ، δ_{lk} دلتای کرونگر و μ و ν به ترتیب مبین مدول برشی و ضریب پواسون هستند. با دو بار انتگرال‌گیری جزء به جزء از معادله ۱، رابطه گرین برای معادله تعادل مطابق رابطه ۳ به‌دست می‌آید.

به طوری که σ_1 تنش اصلی حداکثر، σ_3 تنش اصلی حداقل (تنش محصورکننده)، σ_{ci} مقاومت فشاری تک محوری قطعات بکر توده سنگی، m_b ضرایب ثابت وابسته به خواص توده سنگ برجا و s, a ضرایب وابسته به وضعیت درزه‌ای توده سنگ می‌باشند. s, a و m_b ضرایب ثابت معیار گسیختگی هوک - براون می‌باشند که توسط نرم افزار RocLab قابل محاسبه هستند. با فرض $\sigma_3 = 0$ در رابطه ۹، مقاومت فشاری کاهش یافته تک محوری سنگ برای حالت‌های مختلف بافت درزه‌ای به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a \quad (10)$$

و به همین ترتیب چنانچه در رابطه ۹، $\sigma_1 = 0$ فرض شده و معادله برحسب σ_3 حل شود، مقاومت کششی تک محوری سنگ نتیجه خواهد شد. هوک در سال ۱۹۸۳ برای سنگ‌های ترد شکننده نشان داد که مقاومت کششی تک محوری سنگ با مقاومت کششی دو محوری آن یکسان است یعنی با فرض $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_t$ ، مقاومت کششی توده سنگ خواهد شد (Hoek, 1983):

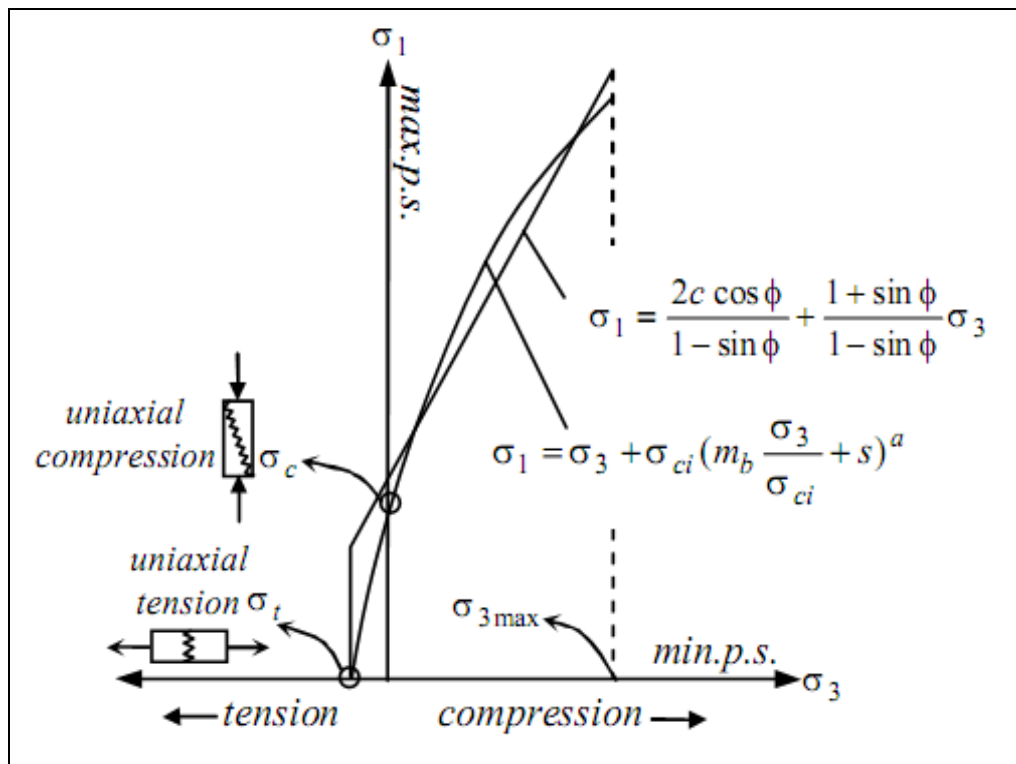
$$\sigma_t = \frac{-s \sigma_{ci}}{m_b} \quad (11)$$

در روابط صفحه قبل D_{kij}^* و S_{kij}^* حل‌های اساسی تنش درونی و δ_{ij} بیانگر تانسور تنش است.

۳- مقاومت توده سنگی

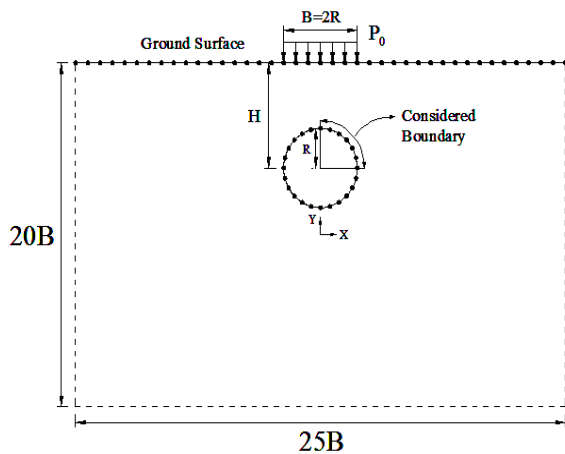
یکی از مهم‌ترین مسایل در طراحی تونل‌ها و فضاها زیرزمینی، آگاهی از مقاومت توده سنگی است که تونل در آن حفر می‌شود. در این مقاله برای تعیین مقاومت توده سنگ و پارامترهای جرمی آن از نرم افزار RocLab ویرایش ۴ استفاده شده است. این نرم افزار مبتنی بر معیار گسیختگی هوک - براون ارائه شده و مقادیر مقاومت (مقاومت فشاری و کششی)، مدول تغییر شکل، ضرایب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگی را با توجه به مقادیر بکر آن نتیجه می‌دهد. شکل تکامل یافته معیار شکست هوک - براون مطابق زیر است (Hoek et al., 1995, 2002):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (9)$$

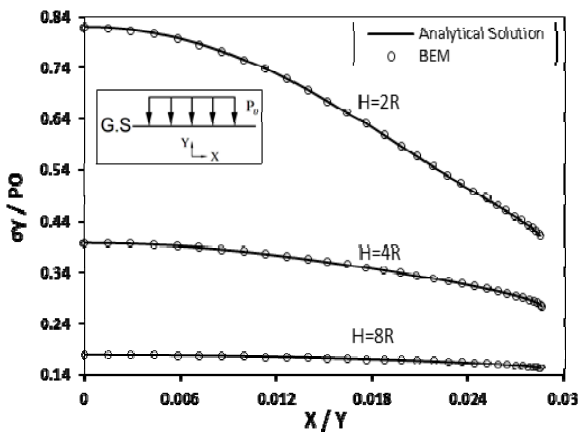


شکل ۱. رابطه بین تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل هوک - براون و معادل سازی آن با معیار موهر - کلمب (Hoek et al., 2002)

سعی و خطا محدوده ۲۵ برابر نیم عرض بارگذاری از طرفین و ۲۰ برابر عرض بارگذاری در راستای قائم گسسته شده است.



شکل ۲. محدوده گسسته شده مرز تونل و سطح زمین با المان درجه ۲



شکل ۳. مقایسه بین نتایج تحلیلی (Poulos and Davis, 1974) و اجزای مرزی (مطالعه حاضر) برای تنش قائم در ربعی از تونل در عمق‌های 2R، 4R و 8R تحت بار گسترده یکنواخت

جهت صحت‌گذاری نتایج حاصل، مطابق شکل ۲ تنش‌های قائم برای نقاط مفروض بر روی ربعی از تاج تونل قبل از حفاری آن و در اعماق 2R، 4R و 8R، به کمک الگوریتم تهیه شده محاسبه و با حل تحلیلی ارایه شده در این خصوص (Poulos and Davis, 1974) مقایسه شده است.

همان‌طورکه در شکل ۳ ملاحظه می‌شود برای بارگذاری یکنواخت، دقت بسیار مطلوبی بین نتایج تحلیلی و عددی به دست آمده است که این موضوع حاکی از توانایی بالای روش اجزای مرزی در مدل‌سازی این‌گونه مسایل می‌باشد.

جهت درک بهتر روابط ذکر شده، در شکل ۱ رابطه هوک - براون به صورت ترسیمی نیز نمایش داده شده است. در واقع روابط ۱۰ و ۱۱، به ترتیب نقاط تقاطع منحنی هوک - براون با امتدادهای تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل می‌باشند. پس از تعیین مقاومت‌های کششی و فشاری توده سنگی و نتایج حاصل از تحلیل تنش بر اساس رابطه ۶ می‌توان ضریب مقاومت (نسبت مقاومت بر تنش) که در مسایل طراحی بسیار اهمیت دارد، تعیین و مورد بررسی قرار داد.

۴-۱- مدل‌سازی عددی

۴-۱-۱- مفروضات

- به لحاظ محدود بودن مدل‌سازی عددی به تحلیل‌های خطی، مصالح تشکیل دهنده زمین از سنگ دولریت که دارای رفتار تقریباً خطی در مقابل بارگذاری است، با ضریب پواسون ۰/۱۵، مدول الاستیسیته ۷۰ Gpa و وزن مخصوص ۲/۸۵ ton/m^3 فرض شده است.
- مقدار ضریب فشار جانبی خاک برابر یک فرض شده است.
- در راستای بی‌بعدسازی، همه پارامترهای طول از قبیل عمق و عرض شالوده، برحسب شعاع تونل R ارایه شده است.
- جهت افزایش دقت در انتگرال‌گیری از انتگرال‌های منفرد، از روش انتگرال‌گیری عددی ویژه بهره گرفته شده است.
- از ۱۰۰ المان درجه ۲ خطی برای گسسته‌سازی سطح زمین، ۲۰ المان برای گسسته‌سازی سطح زیر بارگذاری و ۵۰ المان برای گسسته‌سازی مرز پیرامون تونل، مطابق شکل ۲ استفاده شده است.
- مقدار بارگذاری یکنواخت سطحی به میزان $P_0 = 100KN/m^2$ فرض شده است.

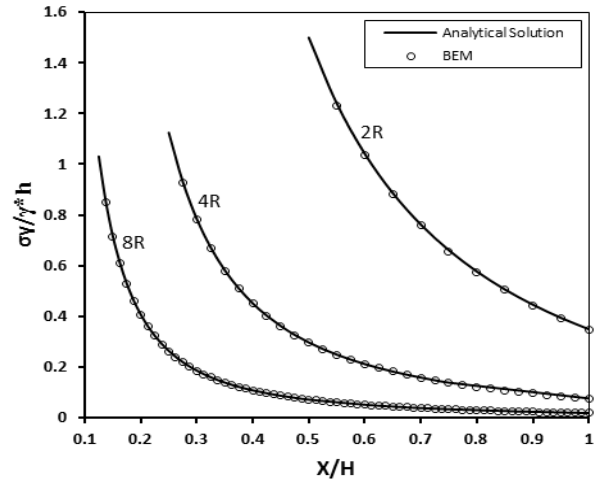
۴-۲- بررسی صحت مدل عددی

چنانچه در شکل ۲ مشاهده می‌شود برای بررسی صحت مدل‌سازی عددی، از بارگذاری گسترده یکنواخت به عرض $B=2R$ استفاده شده است. جهت رسیدن به مقدار خطای کمتر از ۰/۵ درصد، با

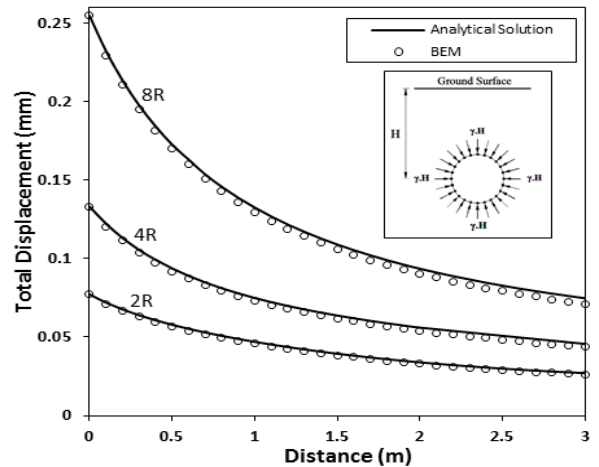
۴-۳- ارزیابی محدوده گسیختگی

به طور کلی نواحی از پیرامون تونل که در آن نسبت مقاومت بر تنش (ضریب مقاومت) از ضریب اطمینان کوچک تر بوده و با نصب سیستم نگهداری پایدار آن کنترل می شود را محدوده گسیختگی می نامند (Martin et al., 1999). این محدوده در مقاطع مختلف تونل ها و در وضعیت های مختلف تنش های برجا متفاوت می باشد.

با توجه به این که یکی از اهداف اصلی این تحقیق ارزیابی محدوده گسیختگی و به طور خاص تعیین گسترش شعاع گسیختگی در پیرامون تونل های کم عمق تحت اثر همزمان بارهای ثقلی و بارهای یکنواخت سطحی می باشد، نرم افزاری به کمک روش اجزای مرزی (BEM) تهیه شده تا به کمک آن، ضمن تحلیل تنش تونل، شعاع گسیختگی آن نیز تعیین شود. نرم افزار مذکور به زبان MATLAB و مشتمل بر شش زیر برنامه اصلی است. این برنامه با دریافت مقادیر ورودی که به واسطه گسسته سازی پیرامون تونل و محیط بهینه شده با اجزای مرزی درجه دو صورت گرفته، به تحلیل تنش آن و تعیین مقادیر مجهول مسئله می پردازد. با به دست آوردن مقادیر یاد شده (مقادیر تنش)، تنش های اصلی حداکثر و حداقل محاسبه می گردد. سپس، با استفاده از مقاومت های کششی و فشاری توده سنگ که با توجه به مشخصات سنگ مفروض طبق جدول ۱ از نرم افزار RocLab به دست می آید، و با اتخاذ ضریب اطمینان برای انواع مقاطع تونل، شعاع گسیختگی پیرامون آن تعیین می شود. برای سنگ مورد مطالعه ضمن تعیین شعاع گسیختگی (Rf) برای انواع مختلف مقاطع تونل مطابق شکل ۵، اثر حضور بار سطحی نیز بر روی رفتار این پارامتر بررسی شده که نتایج در شکل های ۶-الف و ۶-ب مشاهده می شود. از نکات قابل توجه در نمودارهای ارائه شده این است که کمترین مقدار شعاع گسیختگی در هر دو حالت مذکور، مختص به تونل با مقطع دایره ای می باشد و به عبارت دیگر بهترین نوع مقطع از لحاظ کمینه سازی محیط گسیختگی متعلق به این نوع از مقطع است. همچنین بیشترین مقدار شعاع گسیختگی در تونل از نوع مستطیلی مشاهده می شود که تقریباً ۲ برابر شعاع گسیختگی تونل دایره ای و نعل اسبی است که به نظر می رسد در مقابل فشارهای هیدرواستاتیکی پایدار کمتری نسبت به دیگر مقاطع دارا می باشد.



الف) مقایسه تنش قائم در فواصل مختلف از تونل در عمق های 2R ، 4R و 8R متأثر از بار ثقلی

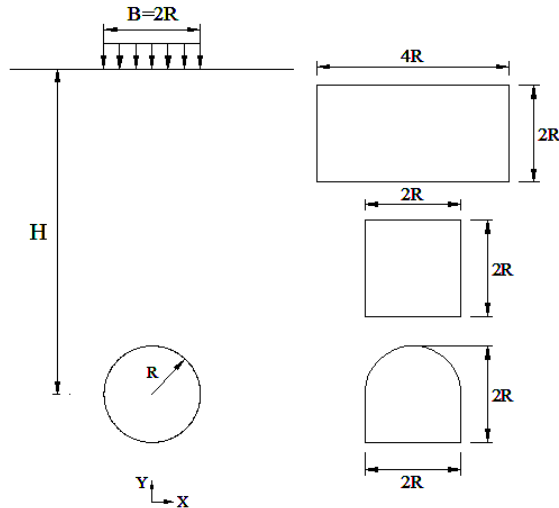


ب) مقایسه جابه جایی کل در فواصل مختلف از دیواره تونل در عمق های 2R ، 4R و 8R متأثر از بار ثقلی

شکل ۴. مقایسه بین نتایج حاصل از مدل سازی عددی اجزای مرزی و پاسخ های تحلیلی (Verruijt, 1998)

برای صحت گذاری نتایج حاصل از فشارهای ثقلی ($\gamma.H$) در پیرامون تونل نیز تغییر مکان و تنش حاصل از تحلیل عددی اجزای مرزی با پاسخ تحلیلی ارائه شده توسط وروجیت (Verruijt, 1998) مقایسه شده است. همان طور که در شکل ۴-الف مشاهده می شود مقادیر تنش حاصل از تحلیل عددی، حتی در اعماق زیاد نیز تطابق خوبی با نتایج تحلیلی دارد. در شکل ۴-ب نیز تغییر مکان کل ناشی از فشارهای ثقلی، در فواصل مختلف از پیرامون تونل، در حالت هایی که تونل در اعماق 2R ، 4R و 8R قرار گرفته، با نتایج تحلیلی مقایسه شده است.

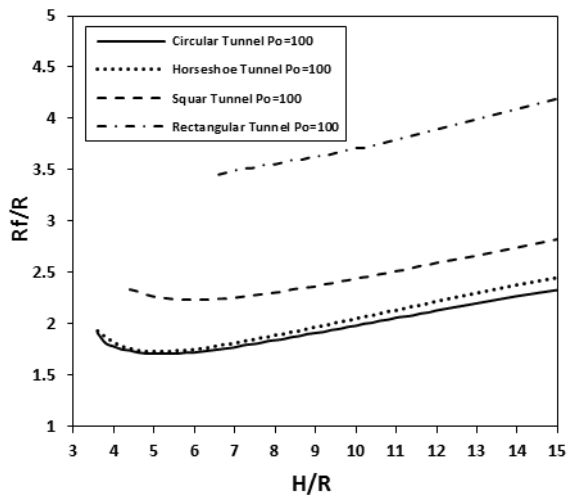
بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار تنشی تونل‌های کم عمق دوبعدی ...



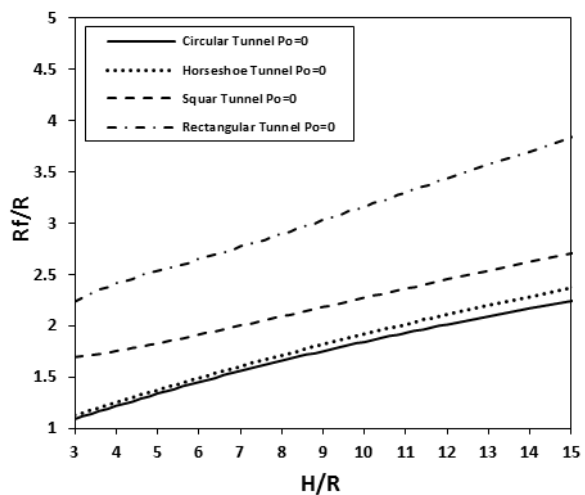
شکل ۵. انواع مقاطع تونل مورد مطالعه جهت بررسی شعاع گسیختگی

جدول ۱. مشخصات توده سنگ مفروض حاصل از نرم افزار RocLab

Hoek Brown Classification			Hoek Brown Criterion		
sigci	60	MPa	mb	2.68284	
GSI	50		s	0.003866	
mi	16		a	0.505734	
D	0		Mohr-Coulomb Fit		
Ei	70000		c	0.552333	MPa
Failure Envelope Range			phi	58	degrees
Application	Tunnels		Rock Mass Parameters		
sig3max	0.701873	MPa	sigt	-0.08646	MPa
Unit Weight	0.026	MN/m ³	sigc	3.61363	MPa
Tunnel Depth	50	m	sigcm	13.1089	MPa



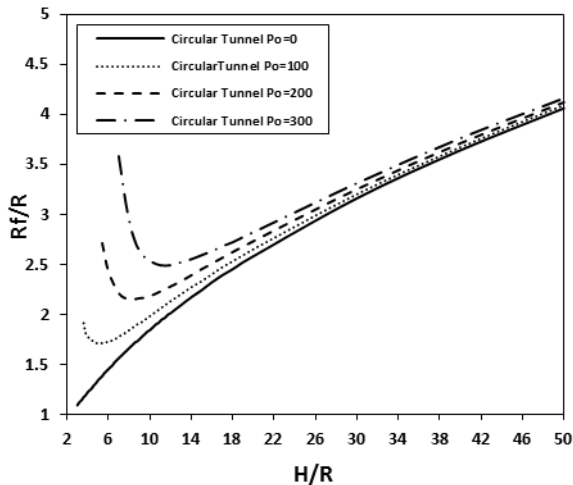
۶-ب) بدون اعمال بار سطحی



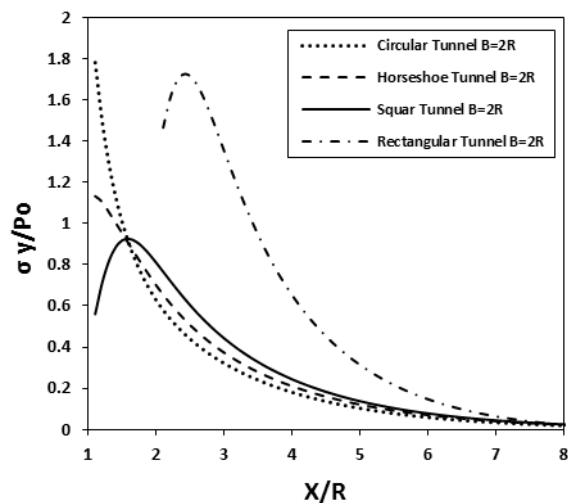
۶-الف) در اثر اعمال بار یکنواخت سطحی

شکل ۶. توزیع شعاع گسیختگی برای مقاطع مختلف تونل برحسب عمق استقرار با فرض ضریب اطمینان واحد

شکل ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این که مقدار تنش قائم نسبت به تنش های افقی و برشی چه در تاج و چه در دیواره تونل بیشتر است، بنابراین، همواره تنش قائم حاکم بوده و برای ارایه این نتایج، پارامتر مذکور در راستای دیواره تونل در نظر گرفته شده است.



شکل ۷. مقایسه شعاع گسیختگی برای تونل دایره ای با $B=2R$ برای بارگذاری های سطحی ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و $300 \text{ (KN/m}^2\text{)}$



شکل ۸. وضعیت تنش قائم در محیط اطراف تونل مستقر در عمق $H=4R$ تحت بارگذاری یکنواخت سطحی با عرض $B=2R$

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، رفتار تنشی پیرامون تونل های با مقطع مربعی و مستطیلی متفاوت بوده و بر خلاف مقاطع دایره ای و نعل اسبی، نقاط پیک در این نمودارها دیده می شود. علت این موضوع را شاید بتوان در تفاوت موجود در نحوه اعمال بارگذاری در مرز مقاطع مختلف تونل و برهم

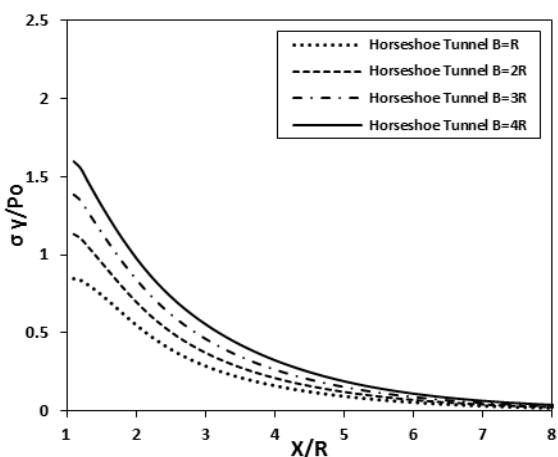
همان طور که در شکل ۶-الف مشاهده می شود با اعمال بارگذاری یکنواخت سطحی و با توجه به فرض رفتار خطی مصالح، شعاع گسیختگی نسبت به حالت دیگر (شکل ۶-ب) افزایش قابل توجهی دارد. این مقایسه برای تونل دایره ای با عرض ثابت بارگذاری ($B=2R$) تحت بارهای سطحی مختلف در شکل ۷ انجام شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش شعاع گسیختگی در نقاط نزدیک به سطح زمین به دلیل تداخل نواحی گسیختگی ناشی از بارگذاری سطحی و فشارهای ثقلی بیشتر است، به طوری که مرز تداخل نواحی گسیختگی مذکور متناسب با بارگذاری سطحی بوده و با ۲ برابر شدن اندازه بار سطحی، مرز ناحیه گسیختگی، ۱/۵ برابر گردیده است. به عنوان مثال، مرز نواحی گسیختگی برای بار سطحی $P_0 = 100 \text{ KN/m}^2$ در عمق $H=3.4R$ بوده، در حالی که با دو برابر شدن بار سطحی، مرز ناحیه گسیختگی در عمق $H=5.1R$ دیده می شود. از طرف دیگر، نتایج شکل ۷ حاکی از آن است که برای هر بارگذاری سطحی، عمق بهینه ای وجود دارد که شعاع گسیختگی در آن عمق، کمترین مقدار بوده و با افزایش مقدار بارگذاری، شعاع گسیختگی بهینه نیز افزایش می یابد. به نظر می رسد عمق بهینه، به پارامترهای زیادی مثل نوع و مشخصات سنگ، نوع و نحوه بارگذاری، عرض بارگذاری و نوع مقطع تونل وابسته می باشد و یافتن رابطه ای که این روابط را نشان دهد، نیازمند تحقیقات و مطالعات بیشتری است. همچنین مشاهده می شود که اثرات بارهای سطحی بر روی رفتار تونل ها، بسته به مقدار و عرض بارگذاری، نوع سنگ و مقطع تونل، از عمق خاصی به بعد تقریباً از بین رفته و ناچیز می گردد و عملکرد تونل در یک محیط نیم صفحه، مشابه رفتار تونل در یک محیط بی کران خواهد شد. در تحقیق حاضر می توان اظهار داشت اثرات بارهای سطحی برای تونل دایره ای با عرض ثابت بارگذاری ($B=2R$)، از عمق $H=25R$ به بعد از بین می رود.

۴-۴- بررسی حساسیت عرض بارگذاری سطحی (B)

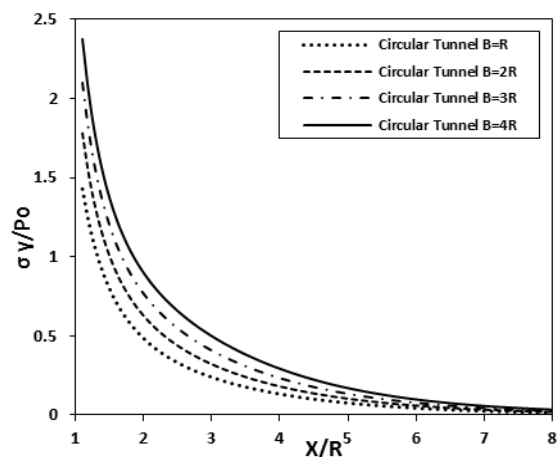
در این بخش، رفتار تنشی پیرامون تونل با مقاطع مختلف و در اعماق مختلف، تحت اثر بارگذاری یکنواخت سطحی با عرض های متفاوت $R, 2R, 3R, 4R$ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مزبور در شکل های ۸ و ۹ ارایه شده است. همچنین اثرات عرض های بارگذاری سطحی مختلف، در عمق های مختلف $4R, 6R, 8R$ و $15R$ برای دو مقطع تونل دایره ای و مربعی در

کمرنگ‌تر شدن اثر بار سطحی، حساسیت عرض بارگذاری ناچیز می‌شود. چنانچه در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود منحنی‌های تنش در عرض‌های بارگذاری بیشتر از $5R$ و عمق‌های استقرار کمتر از $10R$ ، به یکدیگر همگرا می‌شوند. به عبارت دیگر، مقدار تنش در عرض‌های بارگذاری بیشتر از $5R$ ، برای اعماق استقرار $2R$ تا $10R$ تقریباً یکسان می‌باشد. علت این امر را می‌توان این‌گونه استنتاج نمود که وقتی تونل در اعماق کمتر از $10R$ مستقر است، حباب تنش ناشی از بار سطحی با حباب تنش پیرامون تونل تداخل پیدا کرده و موجب افزایش تنش در پیرامون تونل خواهد شد. این در حالی است که در عرض‌های بارگذاری کمتر از $5R$ این تداخل کمتر می‌شود. از نتایج قابل توجه در شکل‌های مذکور این است که اثر بارهای مؤثر سطحی از فاصله $X=7R$ به بعد از بین رفته و تمامی نمودارها از این فاصله به بعد به یک مقدار همگرا می‌شوند.

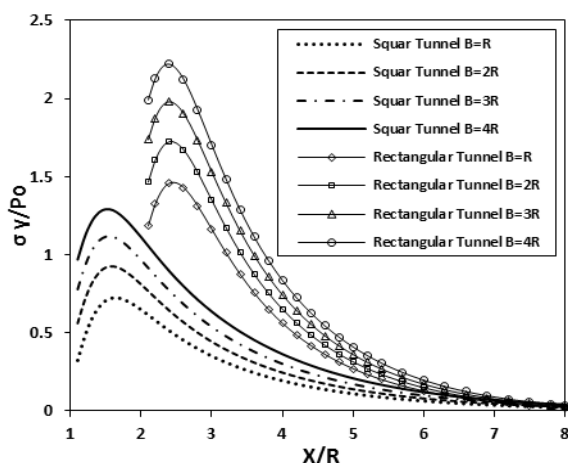
خوردگی تنش ناشی از وجود نقاط گوشه در محدوده کوچکی از پیرامون تونل‌های مربعی و مستطیلی و شکل‌گیری خلأهای تنشی در مجاورت آنها دانست که موجب می‌شود در محدوده مذکور، تنش‌های قائم در مقاطع مربعی و مستطیلی کمتر از مقاطع دایره‌ای و نعل اسبی به دست آید. چنانچه در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود با دور شدن از تونل همواره مقدار تنش کاهش یافته و به یک مقدار ثابت همگرا شده و اثر بازشدگی زیرزمینی از بین می‌رود. همچنین با افزایش عمق استقرار تونل، تنش‌های حاصل در اطراف تونل افزایش یافته که به علت افزایش تنش‌های نقلی امری طبیعی محسوب می‌شود. از طرفی با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ این موضوع به وضوح قابل مشاهده است که با افزایش عرض بارگذاری، به علت افزایش پهنه اثر نیروهای سطحی، تنش در اطراف تونل افزایش یافته ولی با افزایش عمق استقرار تونل، نرخ این افزایش کمتر می‌شود تا حدی که در عمق $15R$ به دلیل



ب) تنش قائم در راستای افقی از دیواره تونل با مقطع نعل اسبی

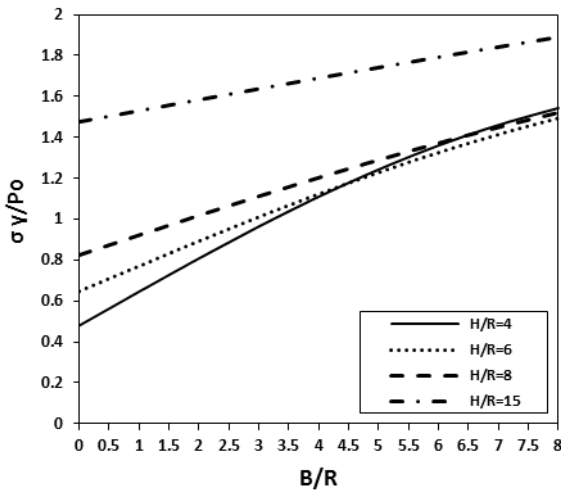


الف) تنش قائم در راستای افقی از دیواره تونل با مقطع دایره‌ای

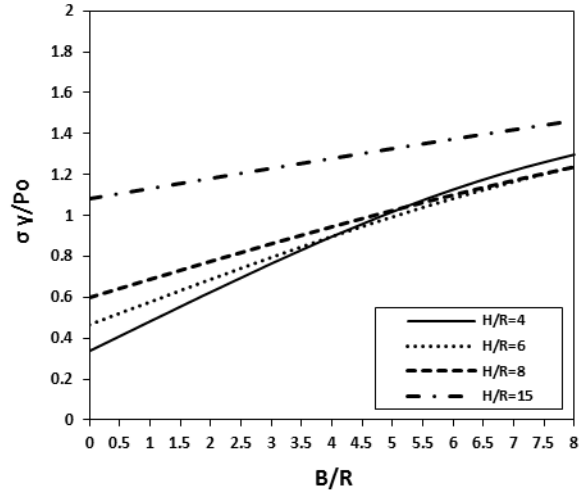


ج) تنش قائم در راستای افقی از دیواره تونل با مقاطع مربعی و مستطیلی

شکل ۹. وضعیت تنش قائم در راستای افقی از دیواره تونل مستقر در عمق $H=4R$ برای حالات مختلف عرض بارگذاری سطحی



ب) تونل مربعی



الف) تونل دایره‌ای

شکل ۱۰. وضعیت تنش قائم در فاصله $X/R=2$ در راستای افقی از دیواره تونل برای عمق‌های مختلف

۵- نتیجه‌گیری

در طراحی ابنیه‌های ژئوتکنیکی، قضاوت مهندسی نقش اساسی را ایفا می‌کند. به‌خصوص در تونل‌سازی، تهیه مدل مناسب و اطلاع از وضعیت تنش و جابه‌جایی‌های پیرامون آن موجب تسهیل در امر طراحی خواهد شد. از جمله روش‌های عددی که قابلیت مدل‌سازی محیط‌های نامحدود و نیمه نامحدود را داراست، روش اجزای مرزی است. همان‌طور که مشاهده شد انطباق و همخوانی مطلوب روش اجزای مرزی با پاسخ‌های تحلیلی موجود برای مسایل نیمه نامحدود و دقت بسیار بالای آن، صحنه بر این ادعا است که روش اجزای مرزی می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب برای مدل‌سازی تونل‌ها در محیط‌های نامحدود و نیمه نامحدود و ابنیه‌های ژئوتکنیکی مرتبط با آن مطرح شود. پارامترهایی همچون عمق استقرار، مقطع تونل، مقدار و عرض بارگذاری سطحی از جمله پارامترهایی هستند که می‌توانند تأثیر بسزایی بر تغییر مکان‌ها و تنش‌های اطراف تونل‌ها داشته باشند. در مقاله حاضر تأثیر این پارامترها مورد بررسی قرار گرفت. به‌طور کلی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، تعیین وضعیت گسیختگی و تنش‌های القایی پیرامون تونل را می‌توان به شرح زیر جمع‌بندی نمود:

(۱) تونل با مقطع دایره‌ای بهترین مقطع برای فشارهای هیدرواستاتیکی محسوب می‌شود و تنش‌های القایی ناشی از بارهای همزمان ثقلی و سطحی، کمترین مقدار را در این تونل‌ها از خود نشان می‌دهند.

- (۲) بازشدگی‌های عریض مانند مقاطع مستطیلی چه از لحاظ وضعیت تنش و چه از لحاظ وضعیت گسیختگی، در بحرانی‌ترین حالت هستند به‌طوری‌که شعاع گسیختگی آن، ۲ برابر شعاع گسیختگی مقاطع دایره‌ای و نعل اسبی می‌باشد.
- (۳) مقادیر شعاع گسیختگی در انواع مقاطع تونل نزدیک به سطح زمین، به علت تداخل این نواحی، افزایش محسوس‌تری داشته‌اند و متناسب با بارگذاری سطحی می‌باشند به‌طوری‌که با ۲ برابر شدن آن، مرز ناحیه گسیختگی ۱/۵ برابر می‌شود.
- (۴) اثر بارهای مؤثر سطحی بر تنش‌های القایی به‌وجود آمده در پیرامون تونل، در حد فاصل $7R$ تا $8R$ برای عمق‌های مختلف مستهلک می‌شود.
- (۵) با افزایش عرض بارگذاری سطحی، مقادیر تنش در اطراف تونل نیز افزایش می‌یابد ولی با افزایش عمق، نرخ این افزایش کمتر می‌شود تا حدی که در عمق‌های بیشتر از $15R$ ، به دلیل کم‌رنگ‌تر شدن اثر بار سطحی، حساسیت عرض بارگذاری ناچیز می‌گردد.
- (۶) اثرات بارهای سطحی بر روی رفتار تونل‌ها، بسته به مقدار و عرض بارگذاری، نوع سنگ و مقطع تونل، از عمق خاصی به بعد تقریباً از بین رفته و ناچیز می‌گردد و عملکرد تونل در یک محیط نیم‌صفحه، مشابه رفتار تونل در یک محیط بی‌کران خواهد شد. به عبارت دیگر می‌توان اظهار داشت اثرات بارهای سطحی برای تونل دایره‌ای با عرض ثابت بارگذاری $(B=2R)$ ، از عمق $H=25R$ به بعد، از بین می‌رود.

- Brebbia, C. A. and Dominguez, J. (1992) "Boundary elements an introductory course", Computational Mechanics publications, London.
 - Crouch, S. L. and Starfield, A. M. (1983) "Boundary elements methods in solid mechanics", Dept. of civil and mineral engineering, university of Minnesota., 55455, USA.
 - Duenser, C., Thoeni, K., Riederer, K., Lindner, B and Beer, G. (2011) "New developments of the boundry element method for underground constructions", International Journal of Geomechanics, No.10, pp.1061-1097.
 - Fredholm. I. (1903) "Sur une classe d'equations fonctionelles", Acta Math. 27, pp.365-390.
 - Gioda, G. and Locatelli, L. (1999) "Back analysis of the measurements performed during the excavation of a shallow tunnel in sand", Int. J Numer. Anal. Meth. Geomech, Vol. 23, No. 13, pp.1407-1425.
 - Hoek, E. (1983) "Strength of jointed rock masses" 23th Ranking Lecture., Geotechnique, Vol. 33, No. 3., pp.187-223.
 - Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002) "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition", Proceeding of the NARMS-TAC conference, Toronto, Vol. 1, pp. 267-273.
 - Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F. (1995) "Support of underground excavation in hard rocks", A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.
 - Hoek, E. and Marions, P. (2007) "A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion", Soils and Rocks, No. 2, November 2007.
 - Kooi, C. B. and Verruijt, A. (2001) "Interaction of circular holes in an infinite elastic medium", Tunneling and underground space technology, Vol.16, pp.59-62.
 - Koutasbeloulis, N. C., Griffiths, D. V. (1989) "Numerical modeling of the trap door problem", Geotechnique 39, pp.77-89.
 - Lee, K. M. and Rowe, R. K. (1991) "An analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay Tunnel", Can. Geotech. J., Vol. 28, pp.25-41.
 - Loganathan, N. and Poulos, H. G. (1998) "Analytical prediction for tunneling induced ground movements in clays", J. Geotech. Geoenviron. Eng., pp.846-856.
 - ۷) در طراحی تونل‌های زیرزمینی شهری که عموماً تحت اثر بارهای سطحی قرار دارند، چنانچه نتایج مشاهده شده در تحقیق حاضر نیز حاکی از آن است، برای اعماق استقرار کمتر از 6R، در راستای انتخاب گزینه بهتر مهندسی توصیه می‌شود که از مقاطع با مرزهای هندسی پیوسته بدون گوشه استفاده شده و از مقاطعی که تمرکز تنش‌ی بیشتر در پیرامون ایجاد می‌کنند، اجتناب نمود.
- ۶- مراجع**
- پنجی، م. (۱۳۸۵) "تحلیل تنش‌ی محیط‌های پیوسته نامحدود و نیمه‌نامحدود به کمک روش‌های اجزای مرزی"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، ایران.
 - عسگری مارنانی، ج. و پنجی، م. (۱۳۸۵) "رفتار شالوده‌های نواری روی خاک‌های رسی تحت بارهای برون از محور"، نشریه علمی ترویجی بنا، شماره ۲۹ و ۳۰، ص ۳۴-۴۴.
 - عسگری مارنانی، ج. و پنجی، م. (۱۳۸۶) "روش‌های اجزای مرزی، تئوری و کاربرد"، چاپ اول، انتشارات نیوشانگار، ایران.
 - Balas, J., Sladek, J. and Sladek V. (1989) "Stress analysis by boundary element methods", Elsevier Science Pub.
 - Banerjee, P. K. and Butterfield, R. (1981) "Boundary element methods in engineering science", McGraw-Hill., London., Russian Translation., Mir Publishers, 1984., Moscow., Chinese Translation., National Defense Press, 1988., Beijing.
 - Banerjee, P. K. and Driscoll, R. M. (1976) "Three-dimensional analysis of raked pile groups", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol. 61, pp.653-671.
 - Bathe, K.-J. (1996) "Finite element procedures", Prentice- Hall Inc.
 - Benjumea, R. and Sikarskie, D. L. (1972) "On the solution of plane orthotropic elasticity problems by an integral method", Trans ASME., J Appl Mech., Vol. 39, pp.801-808.

- Rowe, R. K. and Kack, G. J. (1983) "A theoretical examination of the settlements induced by tunneling four case histories", *Can. Geotech. J.*, Vol. 20, No. 20, pp.299-314.
- Shah, S. (1992) "Practical implementation of the direct boundary element method for three-dimensional stress analysis of underground excavations", Ph.D. thesis, Graduate Dept. of civil Engineering, university of Toronto.
- Verruijt, A. (1998) "Deformations of an elastic half plane with a circular cavity", *Int. J. Solids Structures*, Vol. 35, pp.2795-2804.
- Wang, S. Y., Sloan, S. W., Sheng, D. C. and Tang, C.A., (2012) "Numerical analysis of the failure process around a circular opening in rock", *Computers and Geotechnics*, Vol. 39, pp.8-16.
- Wu, D. R. and Lee, C. J. (2003) "Ground movements and collapse mechanism induced by tunneling in clayey soil", *IJPMG-Int. J. Phys. Model. Geotech*, No. 4, pp.15-29.
- Martin, C. D., Kaiser, P. K. and McCreath, D. R. (1999) "Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels", *Canadian Geotechnical journal*, Vol. 36, pp.136-151.
- Massonnet. C. E. (1965) "Numerical use of integral procedures, Stress Analysis", Edited by O. C. Zienkiewicz and G. S. Hollister., J. Wiley.
- Panji, M., Asgari Marnani, J. and Tavousi Tafreshi, SH. (2011) "Evaluation of effective parameters on the underground tunnel stability using BEM", *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, Vol. 1, No. 2, pp.29-37.
- Park, S. H. and Adachi, T. (2002) "Laboratory tests and FE analyses on tunneling in the unconsolidated ground with inclined layers", *Tunn. Undergr. Space Technol.*, Vol. 17, pp.181-193.
- Poulos, H. G., Davis, E. H. (1974) "Elastic solution for soil and rock mechanics", John Wiley & Sons., Inc.

Evaluation of Effective Parameters on Stress Behavior of 2D Shallow Tunnels Using Boundary Elements Method

M. Panje, Member of Academic Board, Department of Engineering, Azad University, Zanjan Branch, Zanjan, Iran.

J. Asgari Marnani, Assistant Professor, Department of Engineering, Azad University, Zanjan Branch, Zanjan, Iran.

H. Ali Elahi, Member of Academic Board, Department of Engineering, Azad University, Zanjan Branch, Zanjan, Iran.

H. Kohsari, M.Sc. Student, Department of Engineering, Azad University, Zanjan Branch, Zanjan, Iran.

M. Adam Pira, , M.Sc. Student, Department of Engineering, Azad University, Zanjan Branch, Zanjan, Iran.

E-mail:m.panji@srbiau.ac.ir

Received: September 2012 - Accepted: February 2013

ABSTRACT

Nowadays, with development of transportation industry, underground tunnels have a vital role in urban communities. Thus, the need of tunnel construction is inevitable. In this study, using the boundary elements method (BEM) based on full-plane elastostatics fundamental solutions, behavior of shallow tunnels under both gravity loads and tractions have been investigated. With considering the Hook-Brown failure criteria, manner of radius rupture extension for variety of tunnel's sections and sensitivity of traction width on the stress distribution around the tunnel has been considered. Results indicate that when the tunnel is located in depth more than 25 times the tunnel radius, the effect of surface loads on tunnel behavior is disappeared and performance of the tunnel in the half-plane will be the same behavior of the tunnel in the full-plane. It is noted that, the behavior of rock mass surrounding the tunnel is assumed elastic, and the formulation of the problem is based on plane strain behavior.

Keywords: Stress Behavior, Boundary Elements Method, Shallow Tunnels, Rupture Radius