



منحنی پاسخ زمین برای تاج، دیواره و کف تونل‌های سطحی تحت میدان تنش غیرایزوتروپ: محدوده کاربرد حل تحلیلی

علی لکی‌روحانی*، حسن وجودی

دانشکده فنی، گروه عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۰ آبان ۱۳۹۳
بازنگری: ۲۲ فروردین ۱۳۹۴
پذیرش: ۴ خرداد ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۶ مهر ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

منحنی پاسخ زمین
تونل سطحی
نسبت تنش‌های برجا
روش تحلیلی

چکیده: منحنی پاسخ زمین یکی از اجزای روش همگرایی همجواری در تحلیل اندرکنش حائل سنگ است که برای تعیین جابجایی‌ها در پیرامون تونل حفر شده به روش جدید اتریشی به کار می‌رود. حل تحلیلی منحنی پاسخ زمین براساس فرض میدان تنش برجا ایزوتروپ می‌باشد و قابل کاربرد برای تونل‌های عمیق است. اما امروزه تونل‌های شهری در سطح و اغلب در نسبت تنش‌های برجا غیرایزوتروپ حفر می‌شوند. در این مقاله برای مدل‌های دوبعدی با هندسه و مشخصات محیطی مشخص، منحنی‌های پاسخ زمین برای عمق‌های مختلف و همچنین نسبت تنش‌های برجا مختلف، به دو روش تعیین می‌شوند: ۱- با استفاده از حل تحلیلی و معادل‌سازی میدان تنش غیرایزوتروپ به یک میدان تنش ایزوتروپ. ۲- حل عددی. سپس نتایج این تحلیل‌ها با یکدیگر مقایسه و محدوده کاربرد حل تحلیلی منحنی پاسخ زمین تعیین می‌شود. طبق نتایج، جابجایی‌های دیواره تونل بیشتر از نسبت تنش‌های برجا اولیه نسبت به عمق قرارگیری تونل متاثر می‌شود. همچنین جابجایی‌های بدست آمده از حل عددی برای تاج و کف تونل، نسبت به دیواره تونل، انحراف بیشتری از حل تحلیلی دارند. تنها جابجایی که می‌توان با دقت مناسبی از حل تحلیلی برای تونل‌های سطحی بدست آورد، جابجایی دیواره تونل تحت تنش‌های ایزوتروپ است. جابجایی‌های تاج و کف تونل تحت شرایط ایزوتروپ و برای عمق‌های بیش از ۱۴ برابر شعاع تونل با دقت مناسبی می‌توانند از حل تحلیلی بدست آیند، اما با افزایش نسبت تنش‌های برجا، حل تحلیلی و عددی از یکدیگر بیشتر و بیشتر فاصله می‌گیرند حتی برای تونل‌های عمیق.

۱- مقدمه

منحنی‌های پاسخ زمین (GRC) یکی از اجزای روش همگرایی همجواری (CCM) در تحلیل تونل‌ها می‌باشند. روش همگرایی همجواری توسط برخی از محققین ارائه شده است [۴-۱] و روشی است که به طور معمول در طراحی سیستم حائل در تونل‌زنی به روش‌های مرسوم استفاده می‌شود و به کمک آن مساله سه بعدی اندرکنش حائل-سنگ به یک مدل دوبعدی ساده می‌شود.

فرض اصلی روش همگرایی همجواری اینست که بار حائل مورد نیاز برای پایداری حفاری با جابجایی شعاعی تونل به سمت داخل کم می‌شود. زمانیکه توده سنگ به سمت داخل حرکت می‌کند، تنش‌های مماسی افزایش می‌یابند که هم باعث تسلیم توده سنگ می‌شود و هم تنش همه جانبه محیط افزایش می‌یابد. این روش از سه جز اصلی تشکیل می‌شود: منحنی پاسخ زمین (GRC)، پروفیل تغییرشکل طولی زمین (LDP)، منحنی مشخصه حائل (SCC). در منحنی پاسخ زمین کاهش فشار داخلی حائل به افزایش جابجایی

شعاعی دیواره تونل ارتباط پیدا می‌کند و محل برخورد GRC و SCC، فشار و تغییرشکل تونل را در نقطه تعادل بین حائل و زمین تعیین می‌کند. مزیت مهم روش همگرایی همجواری در این است که مساله پیشرفت سه بعدی تونل، با ارتباط بین فاصله از سطح جبهه تونل در LDP و فشار داخلی در GRC، به یک مدل دوبعدی تبدیل می‌شود [۲].

معمولاً برای بدست آوردن منحنی پاسخ زمین از روش‌های تحلیلی استفاده می‌شود [۵]. روش‌های تحلیلی در طراحی حائل تونل بسیار مفید و ارزشمند هستند، چون نه تنها می‌توانند نوع حائل را در نظر بگیرند بلکه زمان نصب آنرا نیز لحاظ می‌کنند. اما این روش‌ها فقط در شرایط خاص قابل کاربرد هستند و نقطه ضعف اصلی آن‌ها این است که نمی‌توانند شرایط پیچیده‌ای از تنش‌های برجا و هندسه را در نظر بگیرند. فرضیاتی که روش‌های تحلیلی بر پایه آن‌ها استوار هستند عبارتند از: ۱- مقطع تونل دایروی می‌باشد. ۲- توده سنگ پیرامون تونل همگن فرض شده است. ۳- میدان تنش برجا، ایزوتروپ است. ۴- شرایط کرنش مسطح (تونل طولی)، در نظر گرفته شده است. ۵- از نیروی وزن صرف‌نظر شده است. این فرضیات معمولاً در شرایط واقعی تونل‌زنی نقض می‌شوند به همین دلیل پن و چن^۳ (۱۹۹۰) مفهوم خانواده منحنی‌های پاسخ زمین را ارائه کردند [۶]. این دو نویسنده فهمی عمیق‌تر

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Rou001@znu.ac.ir

1 Ground Response Curve
2 Convergence Confinement Method

از آنجائیکه شرایط مساله تقارن محوری است، معادله تعادل به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{d\sigma_{rr}}{dr} = \frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}}{r} \quad (3)$$

که در تمام محیط و روی مرزها باید ارضا شود. با ترکیب روابط ۱ و ۳ و حل معادله دیفرانسیل، توزیع تنش در ناحیه خرد شده، بدست می‌آید:

$$\sigma_{rr} = \left(p_i + \frac{\sigma_{cm}}{K_\phi - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{K_\phi - 1} - \frac{\sigma_{cm}}{K_\phi - 1} \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = K_\phi \left(p_i + \frac{\sigma_{cm}}{K_\phi - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{K_\phi - 1} - \frac{\sigma_{cm}}{K_\phi - 1}$$

مرز خارجی توده سنگ پلاستیک در تعادل با سنگ بکر الاستیک است، اگر p_1 تنش شعاعی تعادلی بر روی این مرز به شعاع r_p باشد، آنگاه r_p با استفاده از رابطه اول^۴ محاسبه می‌شود:

$$r_p = a \left(\frac{P_i + \frac{\sigma_{cm}}{K_\phi - 1}}{P_i + \frac{\sigma_{cm}}{K_\phi - 1}} \right)^{\frac{1}{K_\phi - 1}} \quad (5)$$

با استفاده از روابط تئوری الاستیسیته و استفاده از اصل برهم‌نهی برای احتساب فشار بر روی فصل مشترک ناحیه الاستیک و پلاستیک و استفاده از معادله تعادل (رابطه ۳) توزیع تنش در ناحیه الاستیک به شکل روابط زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_{rr} = p \left(1 - \frac{r_p^2}{r^2} \right) + p_1 \frac{r_p^2}{r^2} \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = p \left(1 + \frac{r_p^2}{r^2} \right) - p_1 \frac{r_p^2}{r^2}$$

تنش‌ها در روی مرز داخلی ناحیه الاستیک $r=r_p$ در آستانه گسیختگی قرار دارند (حالت حدی) و باید معیار خرابی موهر کولمب مطابق با رابطه ۱ را ارضا کنند، با استفاده از این خاصیت مقدار به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$p_1 = \left(\frac{2}{K_\phi + 1} \right) \left(p + \frac{\sigma_{cm}}{K_\phi - 1} \right) - \frac{\sigma_{cm}}{K_\phi - 1} \quad (7)$$

با قراردادن p_1 در رابطه ۵، r_p بدست می‌آید. همان مقدار فشار حائل بحرانی برای شکل‌گیری ناحیه پلاستیک در پیرامون تونل است و از این به بعد در این مقاله با نشان داده می‌شود.

از فشار داخلی و تغییرشکل تونل را در نقاط مختلف جدار تونل که وابسته به شرایط تنش‌های اولیه و شکل تونل می‌باشد را ارائه کردند. اساس روش آن‌ها، استفاده از روش عددی اجزا محدود همراه با شرایط الاستوپلاستیک و معیار خرابی موهر-کولمب^۱ بوده است.

هدف از این مقاله تحقیق پیرامون محدودیت‌های منحنی‌های پاسخ زمین، بدست آمده از روش تحلیلی برای تونل‌های سطحی و تحت تنش‌های میدانی غیرایزوتروپ می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، مدل‌سازی عددی با روش تفاضلات محدود و نرم‌افزار FLAC2D برای تونل‌هایی با عمق قرارگیری مختلف در شرایط تنش برجای غیرایزوتروپ انجام شده و نتایج آن‌ها با نتایج حل تحلیلی مقایسه شده است. اما محدودیت‌های کار انجام شده در این مقاله عبارتند از: ۱- کیفیت توده سنگ تقریباً خوب فرض شده است. ۲- توده سنگ به صورت پیوسته و بدون درز و ترک مدل شده است. ۳- مقطع تونل دایروی و با شعاع ثابت در همه تحلیل‌ها فرض شده است.

در ابتدا حل تحلیلی اندرکنش حائل سنگ آورده شده است و پس از آن مدل‌سازی عددی انجام شده و در مورد نتایج بحث خواهد شد. صحت‌سنجی روش کار و مقایسه منحنی‌های GRC و شعاع ناحیه پلاستیک بدست آمده از حل تحلیلی با حل عددی در ضمیمه مقاله آورده شده است.

۲- حل تحلیلی اندرکنش حائل-سنگ

برای تحلیل ریاضی اندرکنش حائل-سنگ، یک حفره دایروی به شعاع a در محیط الاستیک و تحت تنش همه جانبه p که از داخل تحت فشار p_i حائل قرار دارد، در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱). میدان تنش و مقاومت توده سنگ به نحوی است که حلقه‌ای از توده سنگ خرد شده اطراف تونل شکل می‌گیرد. فرض می‌شود که مقاومت توده سنگ مطابق با معیار موهر-کولمب بدست می‌آید:

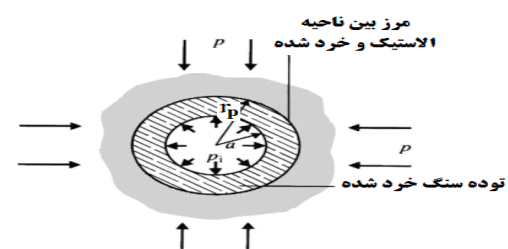
$$\sigma_1 = K_\phi \sigma_3 + \sigma_{cm} \quad (1)$$

در این رابطه σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های اصلی بزرگتر و کوچکتر و σ_{cm} مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ می‌باشد، که در آن:

$$K_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}, \quad \sigma_{cm} = 2c \sqrt{K_\phi} \quad (2)$$

ϕ زاویه اصطکاک توده سنگ و c مقاومت ناشی از چسبندگی است.

1 Mohr-Coulomb



شکل ۱: مدل تحلیلی تحت تنش هیدرواستاتیک
Fig. 1. The analytical model for the hydrostatic stress condition

به شرطی که $\psi = 0$ باشد، بیشترین جابجایی شعاعی که در جدار تونل اتفاق می‌افتد، مطابق با رابطه فوق برابر است با [۷]:

$$u_r = \frac{a}{2G} \left[2(1-\nu)(p - p_{cr}) \left(\frac{r_p}{a} \right)^2 - (1-2\nu)(p - p_i) \right] \quad (14)$$

۳- شرایط مدل‌سازی عددی و تحلیلی

مدل‌های عددی: شرایط مدل‌ها برای ترسیم منحنی‌های پاسخ زمین برای تونل‌های سطحی و عمیق به صورت زیر می‌باشد:

نسبت تنش‌های برجا بین ۱ تا ۶ و همچنین عمق قرارگیری تونل از ۵ تا ۲۵ متر، تغییر کرده است. قطر تونل در تمام مدل‌ها ثابت و به مقدار ۵ متر می‌باشد. همچنین مدل‌سازی به صورت دوبعدی و با فرض کرنش مسطح می‌باشد. خصوصیات مصالح محیطی مطابق با جدول ۱ اختیار شده است و از معیار خرابی موهر-کولمب پیروی می‌کنند.

همچنین در مدل‌های ساخته شده نحوه اعمال فشار قائم بصورت گرانشی است، به این صورت که با افزایش عمق، فشار قائم در زمین افزایش می‌یابد و فشار افقی در هر عمق، از ضرب ضریب فشار جانبی، K در فشار قائم همان تراز بدست آمده است.

محیط مدل‌سازی عددی به ابعاد 50×50 mm²، در یک شبکه 200×200 مش‌بندی می‌شود (شکل ۲). بعد از اعمال شرایط مرزی و بارگذاری، مدل‌ها توسط نرم‌افزار FLAC2D اجرا می‌شوند [۹] درصد آزادسازی تنش در ده مرحله انجام می‌شود و جابجایی‌های شعاعی دیواره، تاج و کف تونل در هر مرحله ثبت شده و براساس آنها منحنی‌های پاسخ زمین ترسیم می‌شوند.

جدول ۱: مشخصات مصالح محیطی در مدل‌سازی‌ها

Table 2. The environmental properties in modeling

پارامتر	نشان	واحد	مقدار
جرم حجمی	ρ	kg/m ³	۲۷۰۰
شعاع تونل	a	m	۲/۵
زاویه اصطکاک	ϕ	Degree	۴۰
مقاومت چسبندگی	C	MPa	۱
مدول الاستیسیته	E	GPa	۱۵
ضریب پواسون	ν	-	۰/۲۵
زاویه اتساع	ψ	Degree	۰
مقاومت کششی	σ_T	MPa	۳

مقدار جابجایی شعاعی در ناحیه الاستیک برابر است با:

$$u_r = -\frac{1}{2G} (p - p_{cr}) \frac{r_p^2}{r} \quad (8)$$

و مقدار جابجایی شعاعی در ناحیه پلاستیک به کمک رابطه ۹ بدست می‌آید [۸]:

$$u_r = \frac{1}{1-A_1} \left[\left(\frac{r}{r_p} \right)^{A_1} - A_1 \frac{r}{r_p} \right] u_r(1) - \frac{1}{1-A_1} \left[\left(\frac{r}{r_p} \right)^{A_1} - \frac{r}{r_p} \right] u_r'(1) - \frac{r_p}{2G(1-A_1)(K_\phi - A_1)} \left(p_{cr} + \frac{\sigma_{cm}}{K_\phi - 1} \right) \times \left[(A_1 - K_\phi) \frac{r}{r_p} - (1 - K_\phi) \left(\frac{r}{r_p} \right)^{A_1} + (1 - A_1) \left(\frac{r}{r_p} \right)^{K_\phi} \right] \quad (9)$$

در این رابطه:

$$u_r(1) = -\frac{r_p}{2G} (p - p_{cr}) \quad (10)$$

$$u_r'(1) = \frac{r_p}{2G} (p - p_{cr}) \quad (11)$$

و با فرض قانون جریان خطی:

$$A_1 = -K_\psi, \quad (12)$$

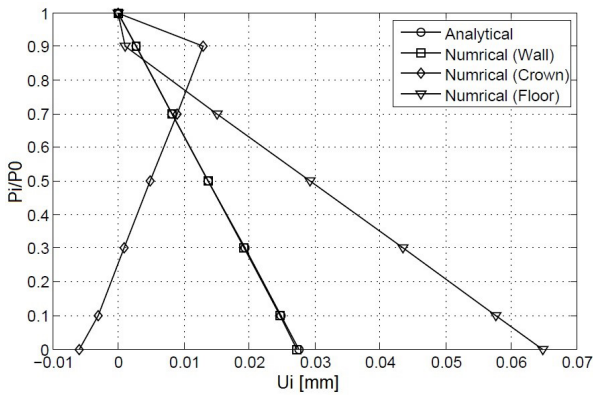
$$A_2 = 1 - \nu - \nu K_\psi,$$

$$A_3 = \nu - (1 - \nu) K_\psi.$$

$$K_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (13)$$

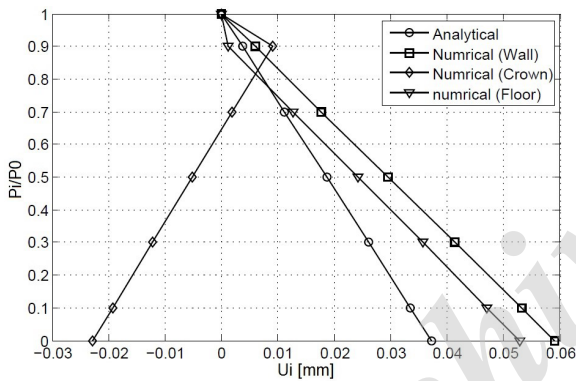
که ψ زاویه اتساع است.

طبق نمودارهای شکل ۶ با افزایش نسبت تنش‌های جانبی، تاج تونل به مقدار بیشتری به سمت بالا حرکت می‌کند، هم‌چنین در این زمان، کف تونل نیز به آهستگی به سمت پایین حرکت می‌کند.



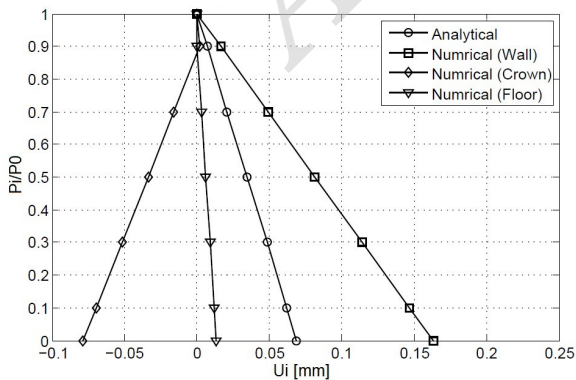
شکل ۳: منحنی‌های پاسخ زمین برای عمق ۵ متری و حالت تنش ایزوتروپ $K=1$

Fig. 3. Ground response curves for the depth of 5 m and the isotropic stress condition $k=1$



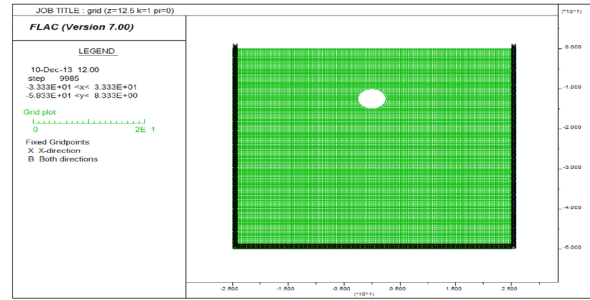
شکل ۴: منحنی‌های پاسخ زمین برای عمق ۵ متری با $K=1/7$

Fig. 4. Ground response curves for the depth of 5 m and $k=1.7$



شکل ۵: منحنی‌های پاسخ زمین برای عمق ۵ متری با $K=4$

Fig. 5. Ground response curves for the depth of 5 m and $k=4$



شکل ۲: شکل هندسی مدل عددی و شرایط مرزی

Fig. 2. The geometry shape in modeling and the boundary condition

حل تحلیلی: حل تحلیلی با بارگذاری معادل روش عددی و با فرض محیط الاستیک و تنش برجا ایزوتروپ انجام شده است. بدین صورت که فشار محصورکننده، معادل با میانگین بار افقی و قائم در نظر گرفته شده. روش حل مطابق با فرمول‌های ارائه شده در بخش ۲ می‌باشد.

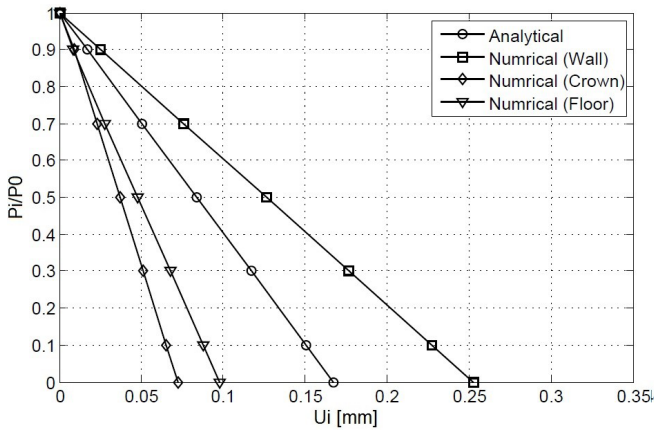
۴- بحث و بررسی نتایج

پس از تحلیل مدل‌ها، منحنی‌های پاسخ زمین بدست آمده از حل تحلیلی و مدل‌های عددی برای عمق و نسبت تنش‌های مختلف ترسیم می‌شوند که در ادامه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. در هر شکل، ۴ منحنی پاسخ زمین دیده می‌شود. یکی مربوط به حل تحلیلی است و سه مورد دیگر مربوط به حل عددی (دیواره، تاج و کف تونل) می‌باشند. گفتنی است که در این شکل‌ها منحنی پاسخ زمین بدست آمده از حل تحلیلی، یک خط مستقیم است، به این دلیل که تقریباً در تمام مدل‌ها، توده سنگ در محدوده الاستیک قرار گرفته است.

در شکل ۳ منحنی‌های پاسخ زمین برای تونل قرار گرفته در عمق ۵ متری و حالت تنش‌های میدانی ایزوتروپ ترسیم شده‌اند. همانطور که دیده می‌شود منحنی پاسخ بدست آمده برای دیواره تونل از دو روش تحلیلی و عددی بر هم منطبق می‌باشند، ولی برای تاج و کف تونل اثر عمق کم یا سطحی بودن حفاری باعث شده که منحنی‌های پاسخ عددی از مقدار تحلیلی آن فاصله بگیرند.

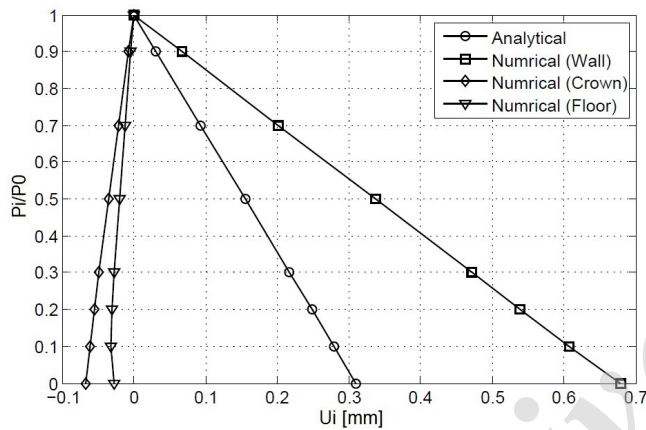
در شکل ۴ همین منحنی‌ها برای $K=1/7$ دیده می‌شوند. در این شکل منحنی پاسخ بدست آمده برای دیواره تونل از مقدار تحلیلی آن فاصله می‌گیرد، هم‌چنین به دلیل افزایش اثر تنش‌های جانبی، منحنی‌های پاسخ عددی تاج و کف تونل به سمت چپ حرکت می‌کنند، به‌نحوی که در تاج مقدار این جابجایی منفی می‌گردد.

در نمودارهای شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش بیشتر تنش‌های جانبی منحنی پاسخ تاج بطور کامل در ناحیه منفی قرار می‌گیرد و بدین معنی است که تاج تونل بدلیل تنش‌های افقی به سمت بالا حرکت کرده است. هم‌چنین در این حالت اختلاف بین حل تحلیلی و عددی برای دیواره و کف تونل بیشتر شده است.



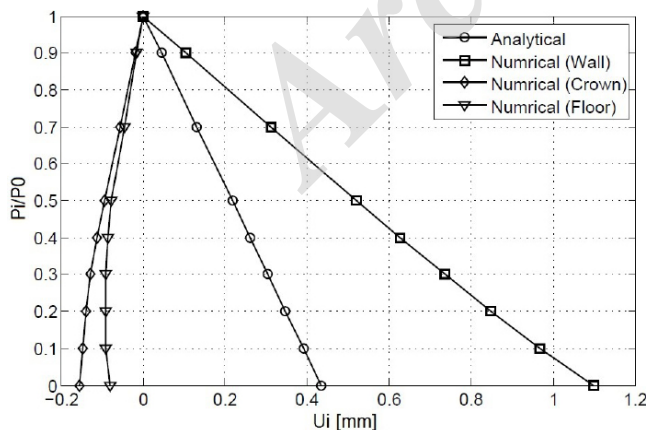
شکل ۸: منحنی‌های پاسخ زمین برای عمق ۲۲/۵ متری با $K=1/7$

Fig. 8. Ground response curves for the depth of 22.5 m and $k=1.7$



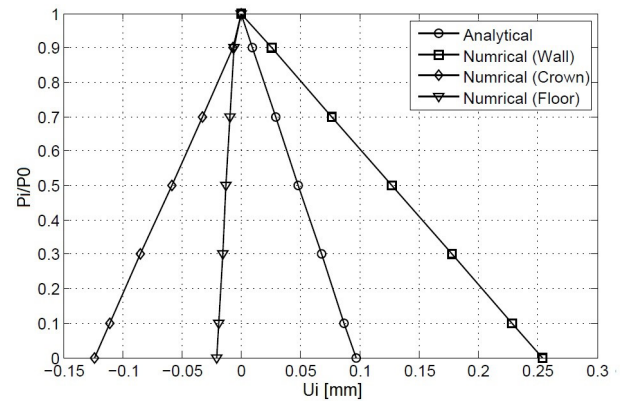
شکل ۹: منحنی‌های پاسخ زمین برای عمق ۲۲/۵ متری با $K=4$

Fig. 9. Ground response curves for the depth of 22.5 m and $k=4$



شکل ۱۰: منحنی‌های پاسخ زمین برای عمق ۲۲/۵ متری با $K=6$

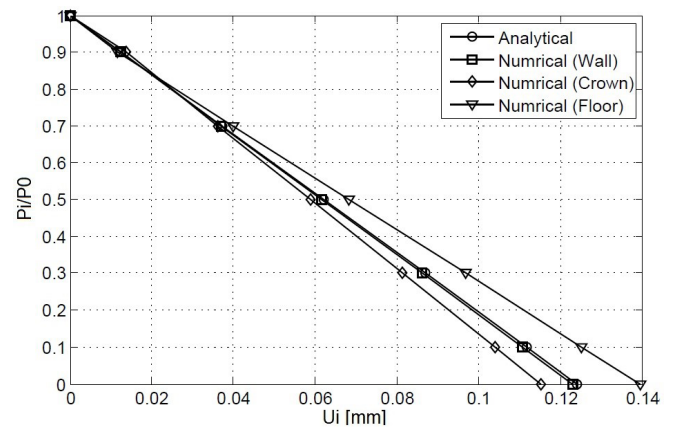
Fig. 10. Ground response curves for the depth of 22.5 m and $k=6$



شکل ۶: منحنی‌های پاسخ زمین برای عمق ۵ متری با $K=6$

Fig. 6. Ground response curves for the depth of 5 m and $k=6$

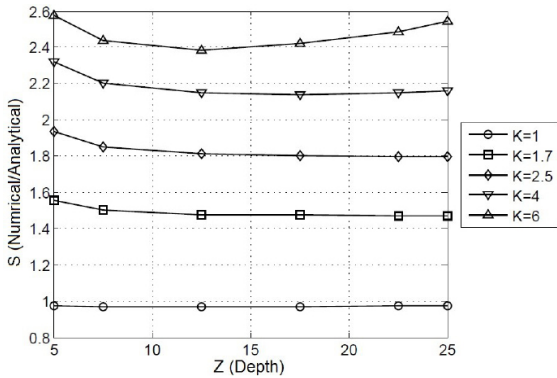
شکل ۷ منحنی‌های پاسخ زمین را برای عمق ۲۲/۵ متری برای حالت تنش ایزوتروپ نشان می‌دهد. مطابق با این شکل منحنی پاسخ تاج و کف تونل برخلاف عمق ۵ متری دارای انحنا نمی‌شود، همچنین حل تحلیلی و عددی برای دیواره تونل دارای انطباق نسبتاً خوبی هستند. طبق نمودار ۸ مشاهده می‌گردد که با افزایش نسبت تنش‌های برجا برای همین عمق اختلاف بین منحنی‌های پاسخ دیواره، تاج و کف با حل تحلیلی بیشتر می‌گردد. طبق نمودار ۹ و ۱۰ با افزایش نسبت تنش‌های برجا اختلاف بین منحنی‌های پاسخ دیواره، تاج و کف با حل تحلیلی بیشتر می‌گردد و تونل به سمت بالا و کف تونل به سمت پائین حرکت می‌کند



شکل ۷: منحنی‌های پاسخ زمین برای عمق ۲۲/۵ متری و حالت تنش ایزوتروپ $K=1$

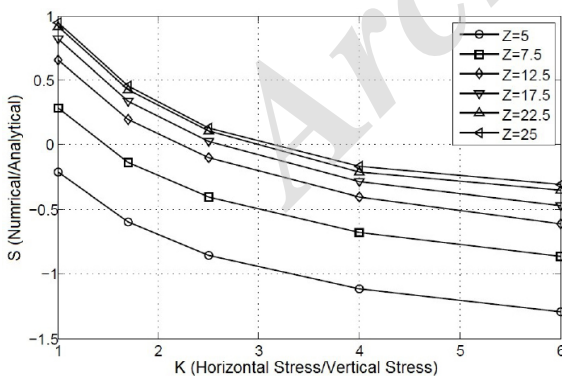
Fig. 7. Ground response curves for the depth of 22.5 m and the isotropic stress condition $k=1$

نمودار شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با افزایش عمق حفاری تونل، تغییرات کمی از یک حالت به حالت دیگر مشاهده می‌شود (از حالت عددی به تحلیلی)، این بدین معنی است که تاثیر تنش‌های برجا برای جابجایی‌های نهایی، نسبت به عمق حفاری بیشتر و با اهمیت‌تر است، همچنین برای میدان تنش‌های ایزوتروپ، حل عددی و تحلیلی برای دیواره تونل، در انطباق کامل با یکدیگر هستند و به عمق بستگی ندارند.



شکل ۱۲: نسبت حل عددی به تحلیلی در مقابل عمق، برای نسبت تنش‌های برجا مختلف برای دیواره تونل
Fig. 12. Ratio of numerical to analytical solution versus depth for different in-situ stress ratios (Tunnel wall)

۵-۲- محدودیت‌های روش تحلیلی منحنی پاسخ برای تاج تونل، برای بررسی محدودیت‌های روش تحلیلی منحنی پاسخ برای تاج تونل، نمودار تغییرات S بر حسب نسبت تنش‌های برجا و برای عمق‌های مختلف ترسیم می‌شود که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ قابل مشاهده است.



شکل ۱۳: نسبت حل عددی به تحلیلی در مقابل نسبت تنش‌های برجا، برای عمق‌های مختلف (تاج تونل)
Fig. 13. Ratio of numerical to analytical solution versus in-situ stress ratio for different depths (Crown of tunnel)

به دلیل رعایت اختصار از آوردن نمودارهای مربوط به عمق‌های دیگر پرهیز شده و بحث تکمیلی در مورد نتایج بدست آمده، آورده می‌شود.

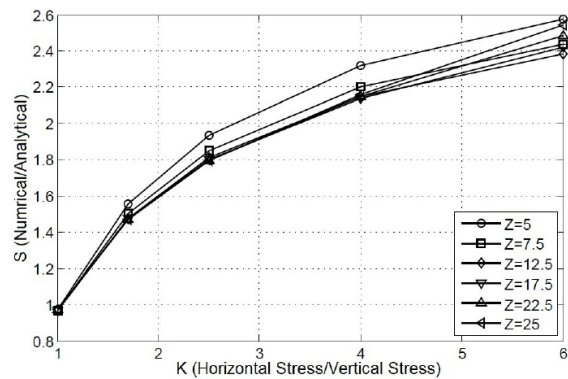
۵- بحث تکمیلی در مورد محدودیت‌های روش تحلیلی منحنی پاسخ زمین

با توجه به نتایج و نمودارهای بدست آمده در بخش قبل، در این بخش به محدودیت‌های روش تحلیلی در بدست آوردن منحنی پاسخ زمین پرداخته می‌شود. بدین منظور پارامتر S به صورت نسبت حداکثر جابجایی بدست آمده از حل عددی به حداکثر جابجایی بدست آمده از حل تحلیلی تعریف می‌شود:

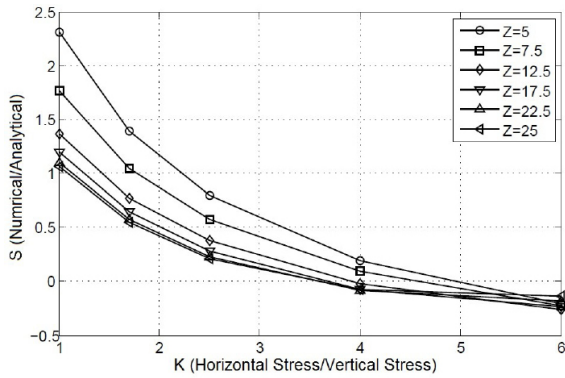
$$S = \frac{(\delta)_{Max} \text{ Numerical}}{(\delta)_{Max} \text{ Analytical}} \quad (15)$$

در ادامه نمودارهای تغییرات S بر حسب نسبت تنش‌های برجا و برای عمق‌های مختلف ترسیم شده و در مورد نتایج آن‌ها بحث می‌شود.

۵-۱- محدودیت‌های روش تحلیلی منحنی پاسخ برای دیواره تونل
نمودارهای شکل ۱۱ تغییرات S را بر حسب نسبت تنش‌های برجا و برای عمق‌های مختلف برای دیواره تونل، نشان می‌دهد و بیانگر انحراف نتایج بدست آمده از حل عددی با روابط تحلیلی برای دیواره تونل است. مطابق با این گراف حل عددی و تحلیلی در شرایط تنش‌های برجا ایزوتروپ، حتی در شرایطی که تونل سطحی باشد، کاملاً بر یکدیگر منطبق هستند و با افزایش نسبت تنش‌های اولیه حل تحلیلی، نتایج خوبی ارائه نمی‌دهد و از حل عددی انحراف قابل ملاحظه‌ای دارد.

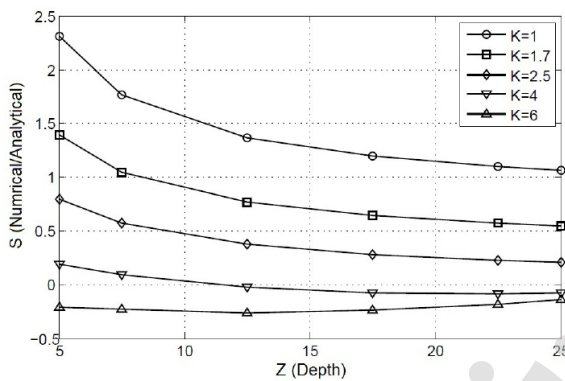


شکل ۱۱: نسبت حل عددی به تحلیلی در مقابل نسبت تنش‌های برجا، برای عمق‌های مختلف برای دیواره تونل
Fig. 11. Ratio of numerical to analytical solution versus in-situ stress ratio for different depths (Tunnel wall)



شکل ۱۵: نسبت حل عددی به تحلیلی در مقابل نسبت تنش های برجا، برای عمق های مختلف برای کف تونل

Fig. 15. Ratio of numerical to analytical solution versus in-situ stress ratio for different depths (Floor of tunnel)



شکل ۱۶: نسبت حل عددی به تحلیلی در مقابل عمق، برای نسبت تنش های مختلف برای کف تونل

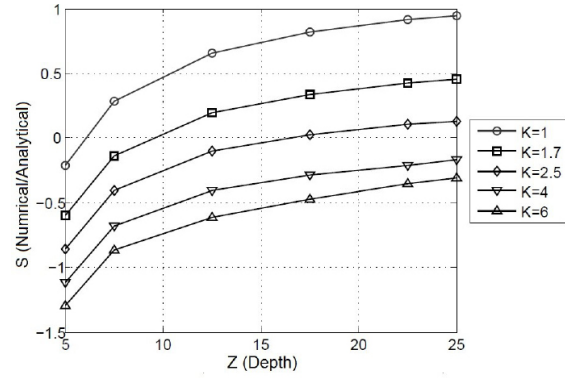
Fig. 16. Ratio of numerical to analytical solution versus depth for different in-situ stress ratios (Floor of tunnel)

شکل ۱۶ نشان می دهد که عمق حفاری اثر بیشتری روی جابجایی های کف نسبت به جابجایی دیواره دارد و در حالت شرایط ایزوتروپ برای عمق های زیاد حل عددی به تحلیلی نزدیک می شود و برای نسبت های تنش برجا بزرگتر از یک، این دو حل از یکدیگر بیشتر دور می شوند.

۴-۵- محدودیت منحنی پاسخ برای تونل های عمیق

نمودار تغییرات S برحسب نسبت تنش های برجا برای تونل عمیق در شکل ۱۷ نشان داده شده است. عمق تونل در این حالت ۳۰ متر انتخاب شده است ($Z=12 \alpha$).

در این شکل دیده می شود که با افزایش نسبت تنش های برجا اولیه، اختلاف بین جابجایی بدست آمده از فرمولاسیون تحلیلی از حل عددی بیشتر می شود، همچنین نکته مهم دیگر اینکه، شکل انحراف منحنی دیواره نسبت به منحنی تاج و کف به نسبت متقارن است.



شکل ۱۴: نسبت حل عددی به تحلیلی در مقابل عمق، برای نسبت تنش های برجا مختلف (تاج تونل)

Fig. 14. Ratio of numerical to analytical solution versus depth for in-situ stress ratio (Crown of tunnel)

شکل ۱۳ نشان می دهد که جابجایی های تاج در حالت شرایط ایزوتروپ به خوبی دیواره تونل دارای انطباق نیستند و این مساله بدین علت است که عمق حفاری اثر بیشتری بر روی جابجایی های تاج نسبت به جابجایی های دیواره دارد (مقایسه شکل ۱۳ با ۱۱). همچنین باید توجه شود که در نسبت تنش های برجا بزرگتر از $1/5$ تا 3 با توجه به عمق تونل، جابجایی های تاج منفی می گردد، یعنی تاج تونل به جای اینکه به سمت پایین حرکت کند به سمت بالا می رود و این مساله بدین علت است که فشار محصورکننده در جهت افقی به اندازه کافی بزرگ است.

نمودارهای شکل ۱۴ نشان می دهند که عمق حفاری اثر بیشتری بر روی جابجایی های تاج در مقایسه با دیواره تونل دارد (مقایسه شکل ۱۴ با ۱۲). همچنین در شرایط ایزوتروپ برای عمق های زیاد حل تحلیلی و عددی به یکدیگر نزدیک می شوند. نکته دیگر اینکه جابجایی های محاسبه شده از فرمولاسیون تحلیلی برای میدان تنش ایزوتروپ همیشه دست بالا می باشند، چون مقادیر S همواره کمتر از یک است.

۵-۳- محدودیت های روش تحلیلی منحنی پاسخ برای کف تونل

در این بخش نیز برای بررسی محدودیت های منحنی پاسخ زمین بدست آمده از روش تحلیلی برای کف تونل، نمودار تغییرات S برحسب نسبت تنش های برجا و عمق های مختلف ترسیم شده است.

طبق شکل ۱۵ مشاهده می گردد که جابجایی های کف در شرایط ایزوتروپ بخوبی جابجایی های دیواره دارای تطابق نیستند (مقایسه شکل ۱۵ با شکل ۱۱) و شبیه به تاج تونل، عمق حفاری تاثیر بیشتری در جابجایی های کف نسبت به دیواره تونل دارد. در همین شکل دیده می شود که برای نسبت تنش های برجا حدود ۴، عامل S به صفر نزدیک می شود که نشان دهنده این است که جابجایی های کف در این سطح تنش محصورکننده، حدود صفر می شود. همچنین همانطور که در نمودارها ملاحظه می شود در عمق های سطحی و نسبت تنش های برجا زیاد، جابجایی های کف منفی می شوند (کف تونل به سمت پایین حرکت می کند).

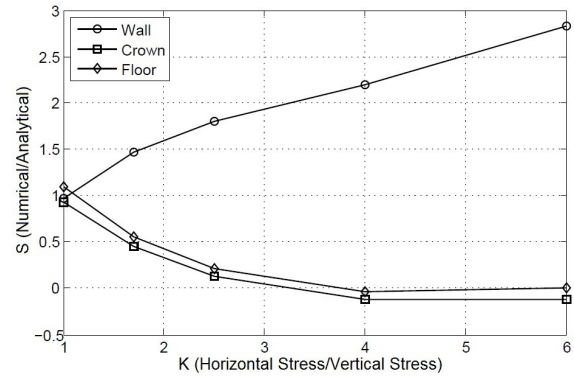
۶- نتیجه گیری

منحنی پاسخ زمین یکی از اجزای روش همگرایی همجواری در تحلیل اندرکنش حائل سنگ و طراحی حائل تونل‌ها است. روش‌های تحلیلی منحنی پاسخ زمین بر اساس فرض میدان تنش برجا ایزوتروپ و همچنین صرف نظر کردن از نیروی وزن می‌باشند. هدف اصلی از انجام این پژوهش تحقیق پیرامون محدودیت‌های روش تحلیلی منحنی پاسخ زمین برای تونل‌های سطحی تحت شرایط تنش برجا غیرایزوتروپ و همچنین بررسی نحوه تغییرات جابجایی‌ها در اثر تغییر نسبت تنش‌های برجا بوده است. بدین منظور با استفاده از مدل عددی دوبعدی تحلیل‌هایی برای عمق‌های مختلف و تحت تنش‌های برجا مختلف انجام شد. مطابق با نتایج بدست آمده:

- برای تونل‌های سطحی، شکل مقطع تغییر شکل یافته تونل تخم‌مرغی است و همیشه جابجایی‌های بزرگتر در دیواره‌ها و جابجایی‌های کمتر در تاج و کف تونل اتفاق می‌افتد.
- جابجایی‌های دیواره تونل بیشتر از نسبت تنش‌های برجا اولیه نسبت به عمق قرارگیری تونل متاثر می‌شوند.
- برای نسبت تنش‌های برجا بزرگتر از حدود ۱/۵، تاج تونل به سمت بالا حرکت می‌کند، بدین معنی که منحنی پاسخ زمین مقادیر منفی برای جابجایی ارائه می‌دهد.
- تنها جابجایی که می‌توان با دقت مناسبی از حل تحلیلی برای تونل‌های سطحی بدست آورد، جابجایی دیواره تونل تحت تنش‌های ایزوتروپ است.
- جابجایی‌های تاج و کف تونل تحت شرایط ایزوتروپ و برای عمق‌های بیش از ۱۴ برابر شعاع تونل با دقت مناسبی می‌توانند از حل تحلیلی بدست آیند، اما با افزایش نسبت تنش‌های برجا، حل تحلیلی و عددی از یکدیگر بیشتر فاصله می‌گیرند.

۷- صحت‌سنجی (ضمیمه)

در این قسمت منحنی پاسخ زمین، شعاع ناحیه پلاستیک و جابجایی دیواره تونل برای یک مدل دوبعدی (فرض کرنش مسطح) که تحت تنش هیدرواستاتیک ۷ مگاپاسکال و مطابق مشخصات جدول ۲ قرار دارد، با روابط تحلیلی ارائه شده در بخش قبل مقایسه می‌شود. شکل ۱۹ مقایسه شعاع ناحیه پلاستیک و منحنی GRC بدست آمده از حل تحلیلی و عددی را نشان می‌دهد که همانطور مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین این دو حل وجود دارد. اگر از روی یک نقطه دلخواه روی منحنی شعاع ناحیه پلاستیک به صورت عمودی خطی رسم کنیم تا منحنی GRC را قطع کند، p_i متناظر با نقطه تقاطع، فشار حائل شعاع ناحیه پلاستیک انتخاب شده است. همانطور که دیده می‌شود بیشترین شعاع ناحیه پلاستیک برای p_i معادل صفر بدست می‌آید. شکل ۲۰ و ۲۱ مقایسه تنش‌های شعاعی و مماسی و همچنین جابجایی دیواره تونل بدست آمده از دو حل تحلیلی و عددی است که تطابق بسیار خوبی دیده می‌شود.



شکل ۱۷: نسبت حل عددی به تحلیلی در مقابل نسبت تنش‌های برجا، برای تونل عمیق (عمق ۳۰ متری)

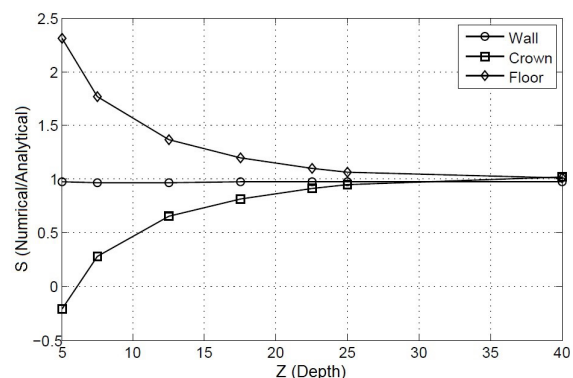
Fig. 17. Ratio of numerical to analytical solution versus in-situ stress ratio for deep tunnel ($z=30$ m)

۵-۵ محدودیت روش تحلیلی منحنی پاسخ در شرایط میدان تنش ایزوتروپ

در این قسمت برای بررسی محدودیت‌های روش تحلیلی برای میدان تنش ایزوتروپ، نمودار تغییرات S بر حسب عمق و برای دیواره، تاج و کف تونل ترسیم می‌شود که در شکل ۱۸ قابل مشاهده است.

دیده می‌شود که در این شرایط برای دیواره تونل حل عددی همواره موافق با حل تحلیلی و مستقل از عمق حفاری است. نتیجه دیگر اینکه نسبت حل عددی به تحلیلی برای تاج تونل کمتر از یک است و این بدین معنی است که حل تحلیلی برای جابجایی‌ها در این حالت دست بالا است. نسبت S برای تاج در عمق تقریباً ۳۰ متری، یک می‌شود ($Z=12 \alpha$).

از طرف دیگر نسبت حل عددی به تحلیلی برای کف تونل بزرگتر از یک است و این بدین معنی است که حل تحلیلی در این حالت برای جابجایی‌ها دست پائین است. نسبت S برای کف در عمق تقریباً ۳۷/۵ متری، یک می‌شود ($Z=15 \alpha$).



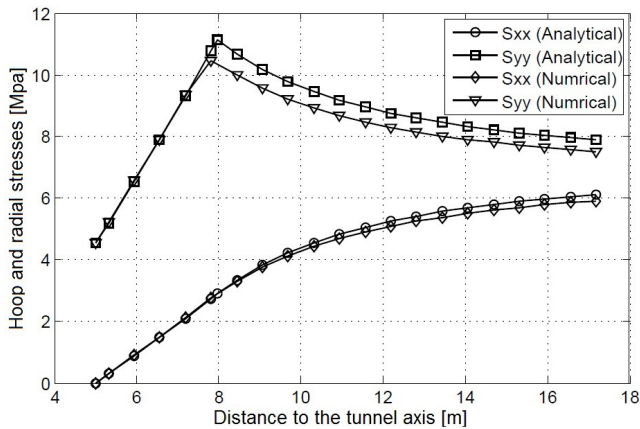
شکل ۱۸: نسبت حل عددی به تحلیلی در مقابل عمق، برای حالت میدان تنش ایزوتروپ

Fig. 18. Ratio of numerical to analytical solution versus depth for the isotropic stress condition

جدول ۲: مشخصات مصالح محیطی استفاده شده در صحت‌سنجی

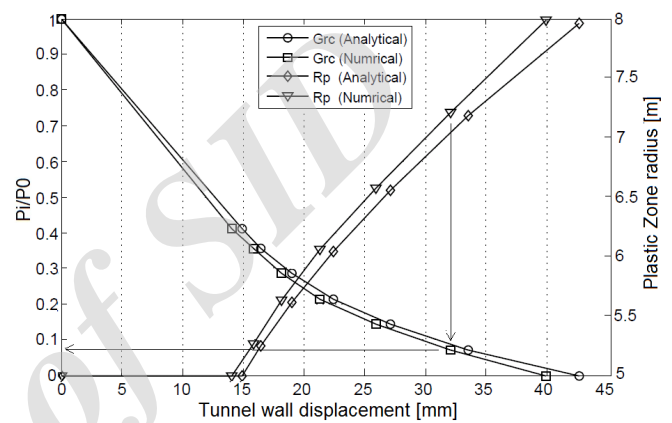
Table 2. The environmental properties is used in verification

پارامتر	نشان	واحد	مقدار
شعاع تونل	a	m	۵
زاویه اصطکاک مصالح		Degree	۲۳
مقاومت چسبندگی	ϕ_c	MPa	۱/۵
مدول الاستیسیته	E	MPa	۱۸۰۰
ضریب پواسون	ν	-	۰/۳



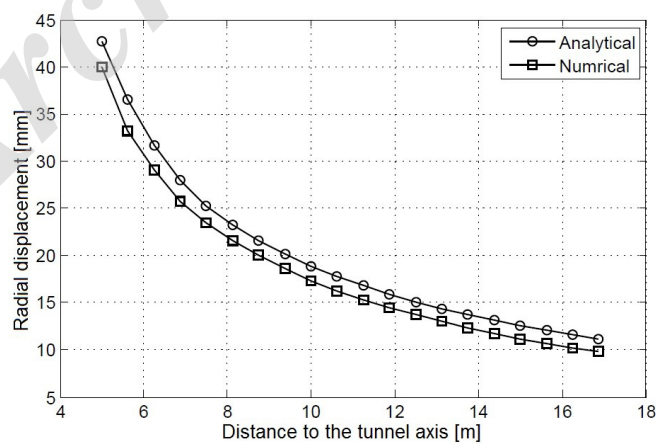
شکل ۲۰: مقایسه تنش‌های شعاعی و مماسی دیواره تونل بدست آمده از حل تحلیلی و عددی ($p_i=0$)

Fig. 20. Comparison of radial stress and tangential stress for wall of the tunnel obtained from the analytical solution with numerical solution



شکل ۱۹: مقایسه نمودار پاسخ زمین و شعاع ناحیه پلاستیک بدست آمده از حل تحلیلی و عددی

Fig. 19. Comparison of ground response curves and radius of plastic zone obtained from the analytical solution with numerical solution



شکل ۲۱: مقایسه جابجایی دیواره تونل بدست آمده از حل تحلیلی و عددی ($p_i=0$)

Fig. 21. Comparison of displacement of the tunnel wall obtained from the analytical solution with numerical solution

- [5] E.T. Brown, J.W. Bray, B. Ladanyi, E. Hoek, Ground response curves for rock tunnels, *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(1) (1983) 15-39.
- [6] Y.-W. Pan, Y.-M. Chen, Plastic zones and characteristics-line families for openings in elasto-plastic rock mass, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 23(4) (1990) 275-292.
- [7] E. Hoek, *Practical rock engineering*. 2007, Online. ed. Rocscience, (2007).
- [8] C. Carranza-Torres, J. Labuz, Class notes on underground excavations in rock, *Topic*, 8 (2006) 1-6.
- [9] F.D. ITASCA, Version 5, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 2 Dimensions, ITASCA Consulting Group Inc, (2005).
- [1] C. Carranza-Torres, C. Fairhurst, The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(6) (1999) 777-809.
- [2] C. Carranza-Torres, C. Fairhurst, Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2) (2000) 187-213.
- [3] P. Gesta, J. Kreisel, P. Londe, C. Louis, M. Panet, Tunnel stability by convergence-confinement method, *Underground Space*, 4(4) (1980) 225-232.
- [4] P. Gesta, Recommendations for use of convergence-confinement method, AFTES, Groupe de travail, (7) (1993) 206-222.

مراجع

Please cite this article using:

A. Lakirouhani, H. Vojoudi, "Ground Response Curve for the Crown, Wall and Floor of Shallow Tunnels under Non-Isotropic Stress Field: Application Range of Analytical Solutions", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 493-502.
DOI: 10.22060/ceej.2015.418

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Archive of SID