

مدل سازی کامل سه بعدی حفر تونل و نصب پوشش با تاکید بر حفاری مرحله‌ای، مقایسه تحلیل سه بعدی با دوبعدی

علی لکی روحانی^{*}، سمیه جلفائی

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۷ آذر ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۵ اسفند ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۹ اسفند ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۲۴ مرداد ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

تحلیل سه بعدی تونل
پروفیل طولی نشست
درصد آزادسازی تنش
مدل دوبعدی
حفاری مرحله‌ای

چکیده: در این مقاله به مدل سازی سه بعدی و کامل تونل با در نظر گرفتن حفاری و نصب پوشش به صورت گام به گام پرداخته می شود. مدل سازی کامل سه بعدی تونل با روش اجزا محدود می تواند تا حد بسیار مطلوبی نشان دهنده رفتار طولی و عرضی زمین در مقابل پیشرفت مراحل حفار و نصب پوشش باشد. با مقایسه نشست طولی بدست آمده از تحلیل عددی با روابط تجربی ارائه شده، تطابق خوبی بین نتایج مشاهده شد. همچنین دیده شد که اثر شرط مرزی ابتدای مدل تا ۵ برابر قطر تونل وجود دارد و از این طول به بعد نشست به حالت پایدار و بیشینه خود می رسد. با افزایش عمق تونل نشست سطحی زمین در قبل از سینه کار کمتر و بعد از سینه کار بیشتر می گردد. مطابق با دیگر نتایج بدست آمده، پروفیل های طولی نشست حاصل از عمق های مختلف تونل، در محل سینه کار یکدیگر را قطع می کنند، یعنی نشست سطحی زمین در محل سینه کار برای تونل های با عمق مختلف یکسان می شود. در بخش دیگر این مقاله پروفیل عرضی بدست آمده از تحلیل دوبعدی با پروفیل متناظرش از تحلیل سه بعدی مقایسه می گردد، با تطابق سطح زیر نمودار این دو پروفیل، می توان به پارامتر درصد آزاد سازی تنش که یکی از پارامترهای کلیدی در تحلیل های دوبعدی است، رسید.

۱- مقدمه

در ارزیابی نشست سطحی زمین بر اثر حفر تونل عوامل مختلفی موثر هستند مثل: ۱- در نظر گرفتن اثر سه بعدی حفر و ساخت تونل. ۲- روش حفاری و جزئیات آن. ۳- عمق و قطر تونل. ۴- وضعیت اولیه تنش های برجا در زمین و ۵- رفتار تنش-کرنش خاک پیرامون تونل [۱-۴]، برای محاسبه نشست سطحی زمین سه دسته روش ارائه شده است: روش های تجربی [۵-۱۲]، روش های تحلیلی [۱۳-۲۳] و روش های عددی.

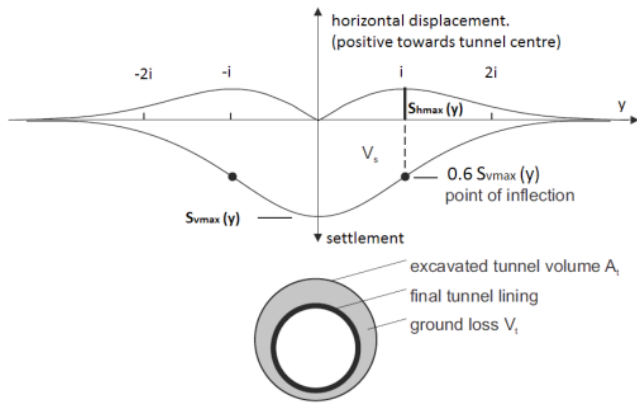
روش های تجربی روند محاسباتی ساده ای دارند و در عمل به طور گسترده ای استفاده می شوند و اگر شرایط تونل زنی مشخص باشد و پارامترهای طراحی به خوبی کالیبره شده باشند، نتایج قابل قبولی از آنها بدست می آید. روش های تحلیلی، حل هایی به شکل بسته اغلب با فرض رفتار الاستیک یا الاستوپلاستیک کامل ارائه می دهند، اما استفاده از این روش ها محدود به تحلیل های دوبعدی و تونل های دایروی است [۱۶]. همچنین در روش های تحلیلی فرض می شود که زمین همگن است و اثرات اندرکنش تونل و زمین نیز در نظر گرفته نمی شوند. اما روش های عددی قادر به در نظر گرفتن اثرات غیر همگنی زمین، رفتار غیر خطی خاک، هندسه پیچیده مساله، اندرکنش

خاک و سازه و روش های حفاری هستند.

معمولاً روند حفر تونل توسط تحلیل های دوبعدی انجام می شود که نقطه ضعف اصلی آنها در نظر نگرفتن پروسه حفاری و حفاری مرحله ای است. حفر تونل دارای ماهیت سه بعدی است و اگر نیاز به مدل سازی مراحل حفاری باشد، باید از تحلیل های سه بعدی استفاده کرد. حفاری به شیوه گام به گام [در سال ۱۹۸۰ توسط Hanafy و Emery برای مدل سازی تونل دهانه باز (بدون پوشش دائمی)، معرفی شده است. در روش گام به گام، صرف نظر از نوع حفاری که می تواند به صورت سنتی یا با ماشین حفر تونل انجام گیرد؛ نصب پوشش با یک گام تاخیر از حفاری صورت می گیرد. به دنبال کار Hanafy و Emery برای حفاری به صورت سنتی با روش گام به گام، تحقیقات دیگری نیز صورت گرفته است [۲۵].

تحلیل های سه بعدی برای حفاری های سطحی زمین که به روش تونل زنی NATM و یا TBM انجام می شود کاربرد دارد. در این مقاله مدل سازی و تحلیل کامل حفر تونل به صورت سه بعدی و با استفاده از روش اجزا محدود، انجام می شود. هدف از این مقاله بررسی تاثیر حفر مرحله ای تونل و نصب پوشش، بر روی پروفیل های طولی نشست با تاکید بر طول گام حفاری می باشد، که تاکنون کمتر به آن پرداخته شده است. فاصله موقعیتی

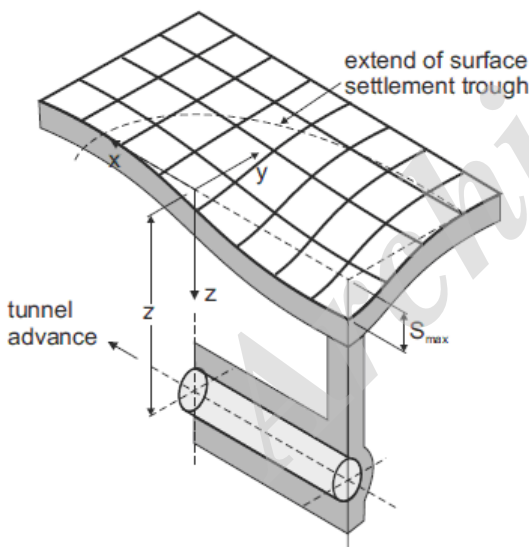
^{*} نویسنده عهده دار مکاتبات: Rou001@znu.ac.ir



شکل ۱: پروفیل نشست قائم و تغییر مکان افقی سطح زمین بر اثر حفاری تونل در خاک نرم (Moller, 2008)

Fig. 1. Vertical settlement and horizontal displacement trough induced by tunneling in soft soil (Moller, 2008)

در این رابطه $S_v(x)$ نشست طولی زمین در راستای محور حفاری x ، بیشینه $S_{vmax}(x)$ نشست طولی زمین که در حالت نشست پایدار^۱ می باشد و $x^* = (\frac{x}{R})$ که در آن شعاع تونل R است. پروفیل نشست سطحی زمین بر اثر حفاری در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: پروفیل نشست زمین بر اثر حفاری تونل (Attewell et al. 1986)

Fig. 2. Ground settlement trough by tunneling (Attewell et al. 1986)

که پروفیل های طولی به حالت پایدار Steady State می رسند، اثر عمق قراگیری تونل و همچنین سختی زمین بر روی پروفیل های طولی نشست، موارد دیگری است که در این مقاله بدان پرداخته شده است.

بدین منظور و در ابتدا مقدمه ای از روابط تجربی ارائه شده برای پروفیل های عرضی و طولی آورده می شوند. سپس مدل سازی کامل سه بعدی و تحلیل آن، انجام شده و نتایج بدست آمده برای پروفیل های طولی نشست سطحی زمین، مورد بحث و بررسی قرار می گیرند. مقایسه پروفیل عرضی برای یک مقطع از پروفیل طولی با پروفیل عرضی بدست آمده از تحلیل دوبعدی و روش تجربی نیز در پایان ارائه می شود. لازم به ذکر است صحت سنجی کاملی با مدل تحلیلی و عددی برای مدل های دوبعدی انجام شده که در متن اصلی مقاله نیست و در قسمت ضمیمه مقاله آورده شده است.

۲- روش های تجربی محاسبه پروفیل نشست سطحی زمین

۲-۱ پروفیل عرضی

۲-۱-۱ روش تجربی Peck (۱۹۶۹)

ایشان با توجه به داده های میدانی، رابطه زیر را برای نشست قائم ارائه کردند:

$$S_v(y) = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \cdot e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \quad (1)$$

که در آن y فاصله افقی از خط مرکزی تونل می باشد و i نقطه عطف پروفیل نشست است که به کمک رابطه $(i/R) = (z/D)^{0.8}$ محاسبه می شود. $D (=2R)$ و Z به ترتیب عمق و قطر تونل می باشند. بنابراین می توان پارامتر افت حجم را با انتگرال گیری از رابطه ۱ محاسبه کرد:

$$V_s = \int S_v(y) \cdot dx = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{vmax}(y) \quad (2)$$

بیشینه جابجایی S_{vmax} که در موقعیت $y=0$ و در بالای تاج تونل رخ می دهد، از طریق تحلیل عددی تخمین زده می شود.

۲-۲ پروفیل طولی

۲-۲-۱ روش تجربی Panet - Guento (۱۹۸۲)

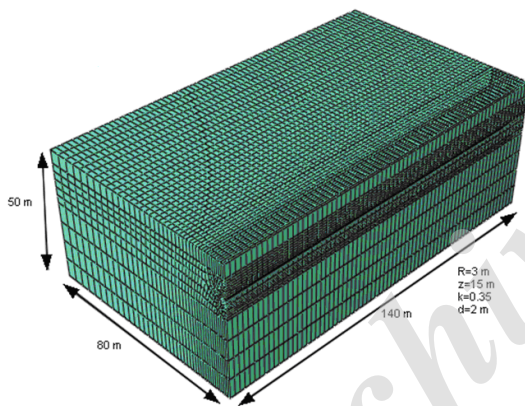
بر اساس تحقیقات Panet و Guento در سال ۱۹۸۲ رابطه زیر برای محاسبه تغییر شکل طولی ارائه شده است:

$$S_v(x) = S_{vmax}(x) \left(0.28 + 0.72 \left[1 - \left(\frac{0.84}{0.84 + x} \right)^2 \right] \right) \quad (3)$$

جدول ۱: مشخصات مکانیکی زمین و هندسی تونل، استفاده شده در مدل‌سازی‌ها

Table 1. Mechanical property of soil and geometry of tunnel, used in modelling

پارامتر	نشان	واحد	مقدار
ضریب فشار جانبی	k	-	۰/۳۵
جرم حجمی	ρ	kg/m ³	۲۰۰۰
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ	Degree	۳۰
مقاومت چسبندگی	c	MPa	۰/۱
مدول الاستیسیته	E	MPa	۲۰۰
ضریب پواسون	ν	-	۰/۳
زاویه اتساع	ψ	Degree	۰
شعاع حفر تونل	R	m	۳
عمق حفر تونل	z	m	۱۵
گام حفاری	d	m	۲



شکل ۳: شبکه‌بندی مدل عددی

Fig. 3. Meshing of numerical model

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- پروفیل‌های طولی نشست در حفاری مرحله‌ای و مقایسه با روابط تجربی

برای مشخصات ارائه شده در جدول ۱، پروفیل‌های طولی نشست برای حفاری مرحله‌ای و برای موقعیت‌های مختلف جبهه حفاری (سینه کار) در شکل ۴ ترسیم شده‌اند، همچنین شکل ۵ پروفیل طولی نشست را زمانیکه جبهه حفاری در موقعیت ۸۰ متری قرار داشته باشد را نشان می‌دهد. حفاری مرحله‌ای تا ۸۰ متری از طول مدل ادامه داشته و علامت پیکان روی هر نمودار مشخص کننده موقعیت سینه کار می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود برای یک نقطه مشخص روی سطح زمین با پیشروی حفر تونل، نشست بیشتر می‌گردد تا به یک مقدار بیشینه برسد (شکل ۴).

۲-۲- روش تجربی Unlu - Gercek (۲۰۰۳)

Gercek و Unlu در سال ۲۰۰۳ تابع پیوسته‌ای برای تعیین پروفیل تغییر مکان طولی در جلو و پشت سینه کار ارائه کردند. پروفیل تغییر شکل طولی مرتبط با فاصله از سینه کار، برای حالت الاستیک به صورت زیر پیش‌بینی می‌شود که در آن ($x^*=0$) در موقعیت سینه کار و مقادیر منفی و مثبت x به ترتیب برای جلو و پشت سینه کار در نظر گرفته شده است:

$$\text{for } (x^* \leq 0), S_V(x) = S_{V\max}(x) \times \left[(0.22\nu + 0.19) + A_a (1 - e^{(B_a x^*)}) \right] \quad (4)$$

$$\text{for } (x^* \geq 0), S_V(x) = S_{V\max}(x) \times \left[(0.22\nu + 0.19) + A_b \left(1 - \left(\frac{B_b}{A_b + x^*} \right)^2 \right) \right] \quad (5)$$

در این روابط، ν ضریب پواسون خاک و پارامترهای ثابت دیگر در دو رابطه زیر تعریف می‌شوند:

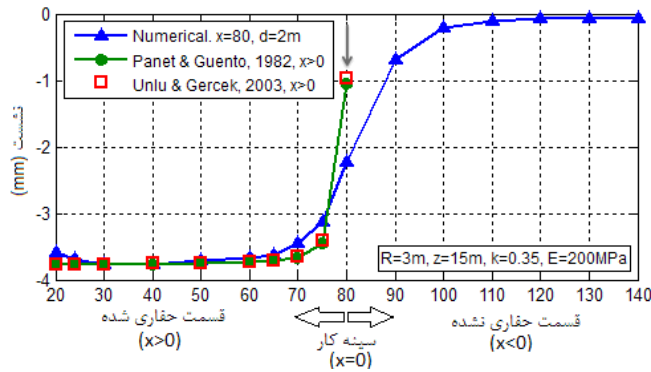
$$A_a = -0.22\nu + 0.19, \quad B_a = 0.73\nu + 0.81 \quad (6)$$

$$A_b = -0.22\nu + 0.81, \quad B_b = 0.39\nu + 0.65 \quad (7)$$

۳- مدل‌سازی، حفاری و نصب پوشش به صورت مرحله‌ای

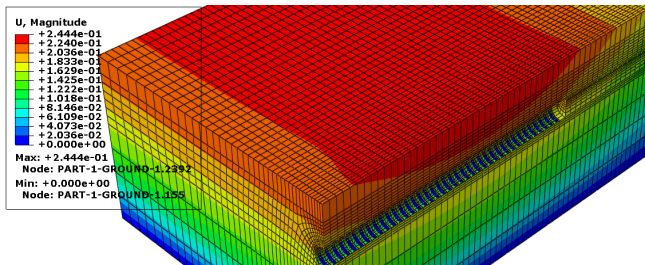
مدل‌سازی عددی با استفاده از روش اجزا محدود و نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. مدل‌سازی به صورت سه‌بعدی و حفاری به صورت گام به گام می‌باشد. خصوصیات مکانیکی مصالح محیطی مطابق با جدول ۱ انتخاب شده است. ابعاد محیط در مدل عددی ۸۰ متر، ۵۰ متر و ۱۴۰ متر به ترتیب برای طول، عرض و عمق می‌باشد (شکل ۳). بعد از ساخت هندسه مدل، شبکه‌بندی و سپس تحلیل انجام می‌شود. برای شبکه‌بندی مدل زمین از المان ۸ گرهی و ۶ وجهی C3D8I، و برای پوشش از المان ۴ گرهی S4R استفاده شده است. در مجموع و برای همه مدل از ۳۶۲۶۰ المان با ۴۱۴۸۰ گره استفاده شده است. در شکل ۳ نمونه‌ای از هندسه مدل و شبکه‌بندی آن نمایش داده شده است.

لازم به ذکر است در تحلیل‌ها گام حفاری معادل ۲ متر بوده و ۸۰ متر از طول تونل، به صورت گام به گام حفاری شده است، یعنی اینکه در هر مرحله ۲ متر از طول تونل حفاری شده و با یک گام تاخیر، پوشش بتنی نصب می‌گردد. این روند تا زمانی که طول قسمت حفاری شده به ۸۰ متر برسد ادامه خواهد داشت. همچنین به دلیل تقارن طولی در مساله، فقط نیمی از تونل مدل‌سازی شده است.



شکل ۶: مقایسه پروفیل طولی نشست با روابط تجربی

Fig. 6. Comparison of longitudinal settlement trough with empirical relations

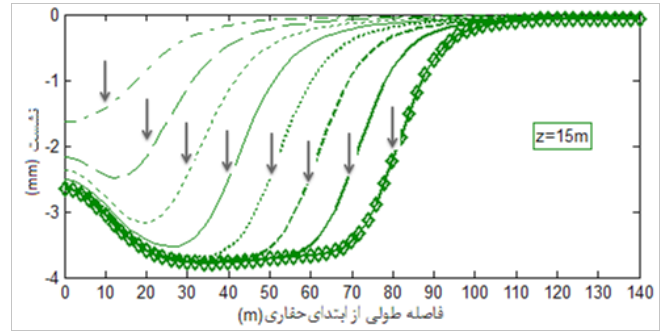


شکل ۷: کانتورهای جابجایی بیانگر پروفیل نشست سطحی زمین در طول و عرض، حالت نشست پایدار در این شکل مشخص است

Fig. 7. Vertical displacement, ground surface settlement trough in longitudinal and transverse axes, steady-state condition for settlement is known

۴-۲- اثر عمق حفاری در نشست سطحی زمین و پروفیل‌های طولی نشست

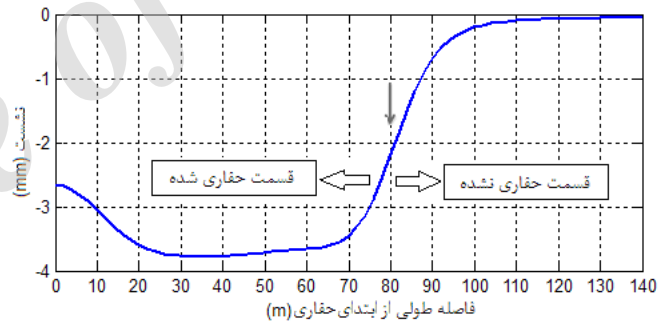
برای بررسی اثر عمق تونل بر روی پروفیل طولی نشست، سه مدل با عمق تونل ۱۰، ۱۵ و ۳۰ متری ساخته و تحلیل شد. در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ پروفیل‌های نشست طولی برای این سه عمق و برای حفاری مرحله‌ای آورده شده است. هر گراف شامل تعدادی پروفیل طولی است که در آن موقعیت جبهه حفاری (سینه کار) مشخص شده است. شکل ۱۱ مقایسه این سه عمق را زمانی که سینه کار در ۸۰ متری واقع شده باشد را نشان می‌دهد. نتیجه اول اینکه با افزایش عمق نشست سطحی زمین در قیل از سینه کار کمتر و بعد از سینه کار بیشتر می‌گردد. نتیجه مهم دیگر اینکه اثر شرایط مرزی ابتدای مدل با کاهش عمق حفاری کمتر می‌گردد، اگرچه مقدار نشست بیشینه بیشتر می‌شود. همچنین پروفیل‌های نشست حاصل از عمق‌های مختلف تونل، در محل سینه کار یکدیگر را قطع می‌کنند، یعنی نشست سطحی زمین در محل سینه کار (در اینجا ۸۰ متری) برای تونل‌های با عمق مختلف یکسان می‌شود.



شکل ۴: پروفیل‌های طولی نشست برای تونل با عمق ۱۵ متر

Fig. 4. Longitudinal settlement trough for depth of tunnel 15 (m)

همچنین اثرات شرایط مرزی سمت چپ مدل تقریباً تا طول ۳۰ متری یعنی ۵ برابر قطر تونل مشاهده می‌گردد و از این طول به بعد نشست به حالت پایدار و بیشینه خود می‌رسد. در سطح زمین با نزدیک شدن به جبهه حفاری (سینه کار) نشست کم شده و پس از عبور از این مقطع، نشست با نرخ بیشتری کمتر شده، تا به صفر همگرا شود شکل ۵.



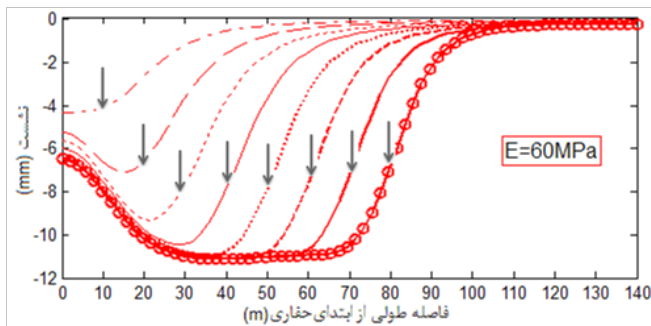
شکل ۵: پروفیل طولی نشست سطحی زمین زمانی که سینه کار در ۸۰ متری از ابتدای تونل قرار گرفته باشد

Fig. 5. Longitudinal settlement trough for 80 (m) distance tunnel face from initial excavation

در شکل ۶ مقایسه‌ای بین پروفیل طولی بدست آمده از روش عددی با روش تجربی برای قسمت‌های حفاری شده تونل یعنی قبل از سینه کار آورده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود دارای انطباق مناسبی هستند. در شکل ۷ نمونه‌ای از کانتورهای جابجایی زمین نشان داده شده است. حالت رسیدن به نشست پایدار در این شکل کاملاً نمایان است.

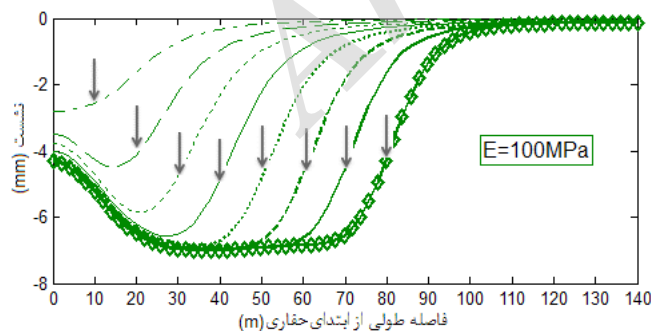
۴-۳-۴- اثر مدول ارتجاعی خاک در نشست سطحی زمین و پروفیل‌های طولی نشست

برای بررسی اثر مدول ارتجاعی زمین بر روی مقدار نشست بیشینه و همچنین پروفیل‌های طولی نشست سه مدل با مدول‌های ارتجاعی ۲۰۰، ۱۰۰ و ۶۰ مگاپاسکال برای بیان رفتار خاک متراکم تا تراکم نسبتاً کم، ساخته و سپس تحلیل می‌شوند. در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ پروفیل‌های نشست طولی زمین برای حفاری مرحله‌ای هر یک از حالت‌ها نشان داده شده است و در شکل ۱۵ مقایسه آنها دیده می‌شود. همانطور که انتظار آن نیز می‌رود با افزایش مدول ارتجاعی خاک و تراکم، نشست سطحی زمین کمتر می‌گردد. همچنین برای هر سه حالت، نشست در فاصله $5D$ از ابتدای حفاری، به حالت پایدار و مقداری ثابت می‌رسد.



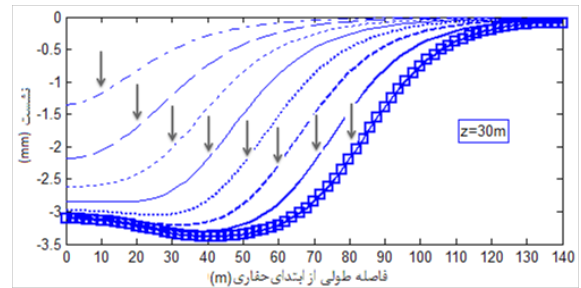
شکل ۱۲: پروفیل‌های طولی نشست برای زمین با مدول ارتجاعی ۶۰ مگاپاسکال

Fig. 12. Longitudinal settlement trough for elasticity modulus of ground 60 (MPa) Longitudinal settlement trough for elasticity modulus of ground 60 (MPa)

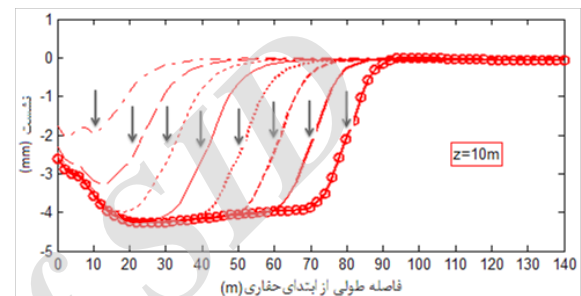


شکل ۱۳: پروفیل‌های طولی نشست برای زمین با مدول ارتجاعی ۱۰۰ مگاپاسکال

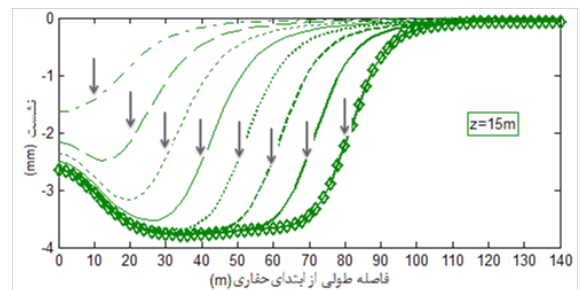
Fig. 13. Longitudinal settlement trough for elasticity (modulus of ground 100 (MPa)



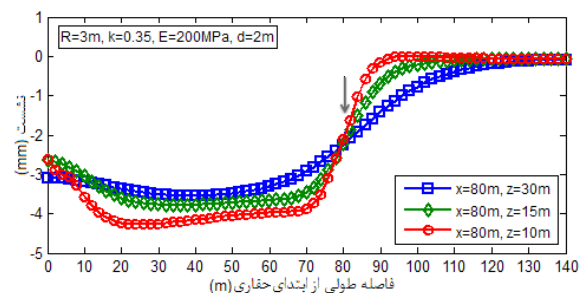
شکل ۸: پروفیل‌های طولی نشست برای تونل با عمق ۱۰ متر
Fig. 8. Longitudinal settlement trough for depth of tunnel 10 (m)



شکل ۹: پروفیل‌های طولی نشست برای تونل با عمق ۱۵ متر
Fig. 9. Longitudinal settlement trough for depth of tunnel 15 (m)

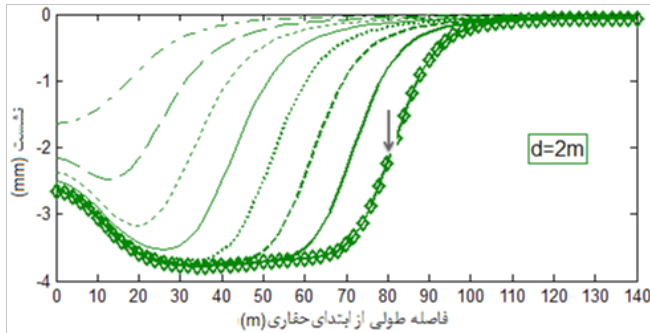


شکل ۱۰: پروفیل‌های طولی نشست برای تونل با عمق ۳۰ متر
Fig. 10. Longitudinal settlement trough for depth of tunnel 30 (m)

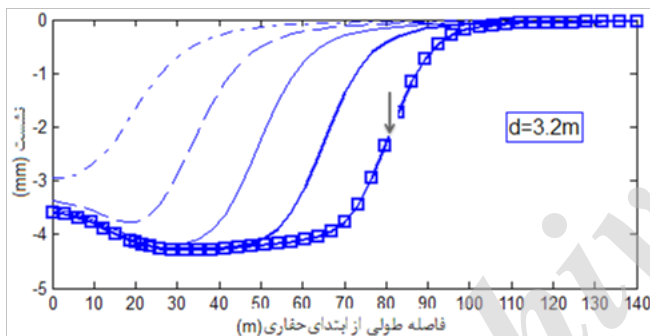


شکل ۱۱: مقایسه پروفیل‌های طولی نشست برای تونل با عمق‌های مختلف
Fig. 11. Comparison of longitudinal settlement trough for different tunnel depth

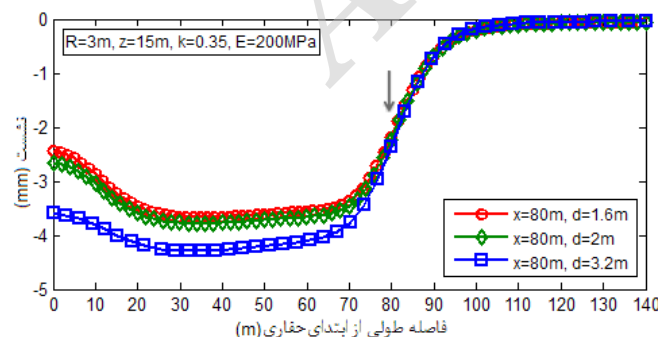
است. در این قسمت برای بررسی اثر گام حفاری بر روی پروفیل‌های طولی نشست مدل‌هایی با سه گام ۱/۶، ۲ و ۳/۲ متر ساخته و تحلیل شدند. در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ پروفیل‌ها ترسیم شده و در شکل ۱۹ مقایسه بین آنها انجام شده است. آنطور که انتظار می‌رود با افزایش گام حفاری مقدار نشست سطحی بیشتر می‌گردد اما مقدار تاثیر بر روی نشست قبل از سینه کار است و پروفیل‌های نشست بعد از سینه کار بر روی یکدیگر منطبق می‌شوند.



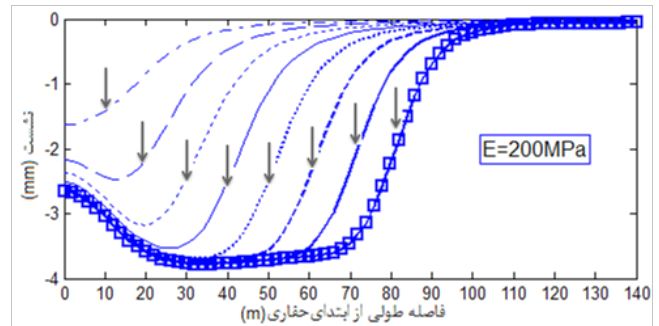
شکل ۱۷: پروفیل طولی نشست برای گام حفاری ۲ متر
Fig. 17. Longitudinal settlement trough for length of excavation 2 (m)



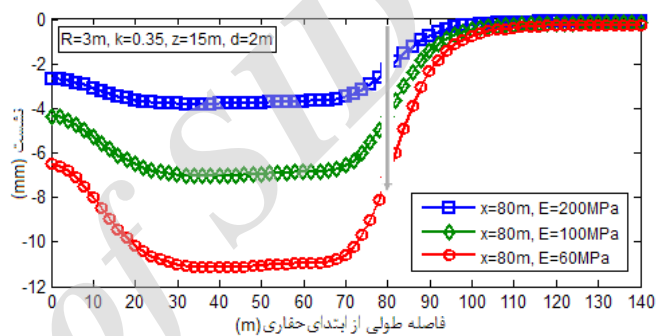
شکل ۱۸: پروفیل طولی نشست برای گام حفاری ۳/۲ متر
Fig. 18. Longitudinal settlement trough for length of excavation 3.2 (m)



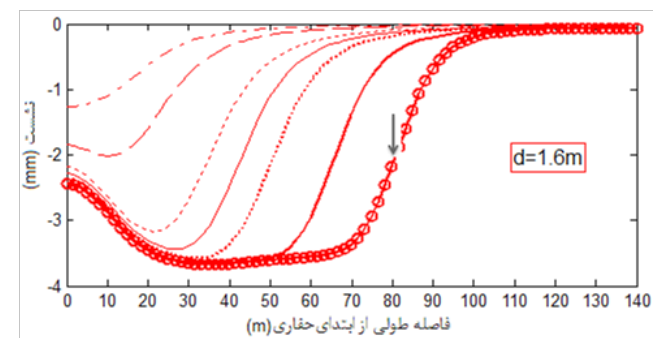
شکل ۱۹: مقایسه پروفیل طولی نشست برای مقادیر مختلف گام حفاری
Fig. 19. Comparison of longitudinal settlement trough for different length of excavation



شکل ۱۴: پروفیل‌های طولی نشست برای زمین با مدول ارتجاعی ۲۰۰ مگاپاسکال
Fig. 14. Longitudinal settlement trough for elasticity modulus of ground 200 (MPa)



شکل ۱۵: مقایسه پروفیل طولی نشست برای مقادیر مختلف مدول ارتجاعی
Fig. 15. Comparison of longitudinal settlement trough for different elasticity modulus of ground

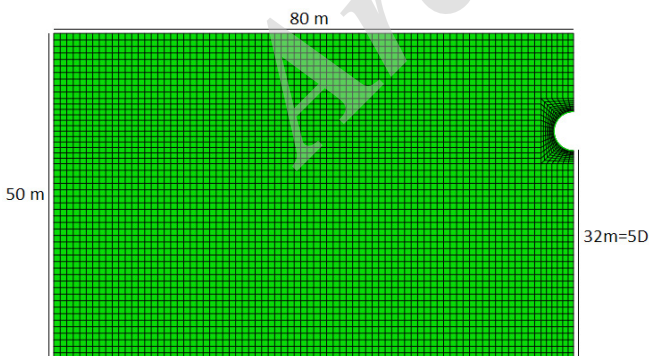


شکل ۱۶: پروفیل طولی نشست برای گام حفاری ۱/۶ متر
Fig. 16. Longitudinal settlement trough for length of excavation 1.6 (m)

۴-۴ تاثیر گام حفاری در پروفیل طولی نشست در عمل گام حفاری معمولاً بین ۱/۵ تا ۲/۵ متر انتخاب می‌شود (Franzius, 2005)، که مسلماً بر روی مقدار نشست سطحی زمین موثر

نشست برای حالت سه بعدی، برای همین فاصله ترسیم شده است.

مدل دوبعدی به طول ۸۰ و عرض ۵۰ متر با تونلی به قطر ۶ و عمق ۱۵ متر با خصوصیات رفتاری مطابق جدول ۱ ساخته و تحلیل می‌شود. با فرض گام حفاری ۲ متر در مدل دوبعدی، پوشش بتنی مستطیلی شکل با طول ۲ متر و ضخامت ۰/۳۵ متر با رفتار الاستیک خطی برای بتن و با مشخصات $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ و $E = 15 \text{ GPa}$ ، $\nu = 0.15$ ، نصب می‌گردد شکل ۲۱ برای مقایسه مدل دوبعدی با سه بعدی ابتدا لازم است پروفیل‌های عرضی نشست بدست آمده از مدل دوبعدی و برای مقادیر مختلف درصد آزاد سازی تنش (فاکتور باربرداری) و برای گام حفاری ۲ متر، رسم شوند شکل ۲۲، سپس سطح زیر هر نمودار که بیانگر حجم نشست انجام شده می‌باشد، محاسبه و با سطح زیر نمودار بدست آمده از تحلیل سه بعدی است، مقایسه گردد. این مقایسه در شکل ۲۳ انجام شده است و همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود برای درصد آزاد سازی تنش معادل ۳۵٪ انطباق بین این دو سطح نشست مشاهده می‌گردد. همچنین در شکل ۲۴ پروفیل عرضی بدست آمده از تحلیل دوبعدی با β معادل ۳۵٪ با پروفیل عرضی بدست آمده از تحلیل سه بعدی در حالت نشست پایدار مقایسه شده‌اند که تطابق بسیار خوبی مشاهده می‌گردد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت برای این مشخصات فرض شده برای هندسه و عمق تونل و همچنین مشخصات مکانیکی خاک، باید برای مدل دوبعدی متناظر با مدل سه بعدی β را معادل ۳۵٪ انتخاب کرد. قاعدتا می‌توان به همین روش برای مشخصات هندسی و مکانیکی مختلف گراف‌ها یا جداول β متناظر مدل دوبعدی با مدل سه بعدی را بدست آورد که نیاز به صرف تحلیل‌های بسیار دارد. اما مسلماً یکی از روش‌های نسبتاً دقیق و مطمئن برای بدست آوردن درصد آزاد سازی تنش در مدل‌های دوبعدی همین روش مقایسه پروفیل‌های نشست عرضی بدست آمده از مدل دوبعدی با مدل سه بعدی است.

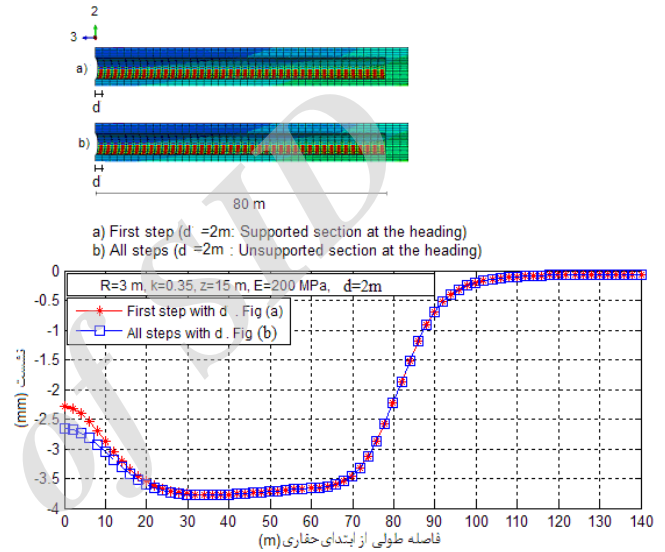


شکل ۲۱: هندسه و شبکه بندی مدل دو بعدی

Fig. 21. Geometry of 2D-mesh model

۴-۵- اثر هم زمان بودن حفاری و نصب پوشش در گام اول بر پروفیل طولی نشست

اگر در همان گام اول حفاری، بلافاصله پس از حفاری پوشش نصب شود تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی کاهش نشست بر روی ابتدای پروفیل طولی خواهد داشت. در شکل ۲۰ می‌توان این اثر را دید. حالت a مربوط به حالتی است که از همان ابتدا پوشش نصب شده است و ملاحظه می‌گردد که در فاصله حدود ۲D از ابتدای حفاری، نشست نسبت به حالت b کمتر شده است. حالت b همان حالت طبیعی است که پوشش در آن با یک گام تاخیر نصب شده است.



شکل ۲۰: مقایسه پروفیل طولی نشست برای تاثیر هم زمان بودن حفاری و نصب پوشش

Fig. 20. Comparison of longitudinal settlement trough for effect of excavation coincide with lining

۴-۶- مقایسه تحلیل سه بعدی با دوبعدی

معمولاً بدلیل صرفه جویی در هزینه و زمان محاسبات، تحلیل تونل به صورت دوبعدی انجام می‌گیرد. اما برای انجام تحلیل دوبعدی نیاز به تخمین پارامتر β یا درصد آزاد سازی تنش می‌باشد. در اصل با تخمین صحیح این پارامتر می‌توان ادعا کرد که یک مدل کرنش مسطح از تونل می‌تواند تا حدودی اثر بعد سوم را نیز لحاظ کرده باشد. در آثار منتشر شده تاکنون اشاره‌ای به چگونگی تخمین صحیح این پارامتر نشده است. یکی از روش‌های تخمین پارامتر β مقایسه پروفیل‌های عرضی نشست سطحی زمین برای یک مقطع خاص از تونل با مقادیر نشست واقعی بدست آمده از ابزارگذاری در سایت است. اما روش دیگر تخمین β مقایسه پروفیل نشست عرضی زمین بدست آمده از تحلیل دوبعدی با سه بعدی است.

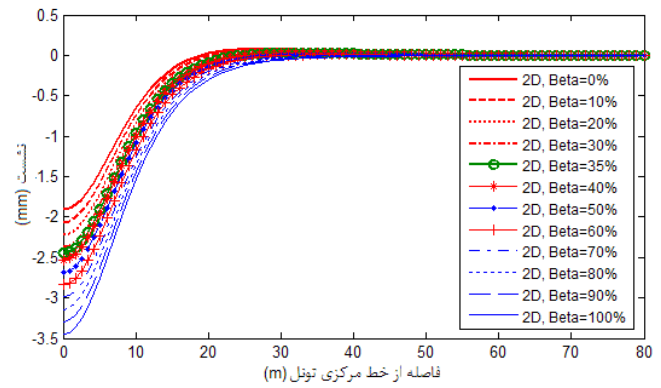
برای مقایسه یک مدل دوبعدی با سه بعدی، تونلی با مشخصات جدول ۱ در نظر گرفته شد. همانطور که قبلاً مشاهده شد، نشست در فاصله ۵D از ابتدای مدل، به حالت پایدار می‌رسد، به همین دلیل، مقطع عرضی پروفیل

که سابق بر این در نرم افزار و سخت افزارهای کامپیوتری موجود بود اغلب تحلیل تونل و نشست سطحی زمین یا به صورت تجربی و یا با مدل های عددی و ساده دویبعدی انجام می شد اما در حال حاضر با وجود نرم افزارهای قوی و تخصصی و همچنین پیشرفت سخت افزاری و سرعت در تحلیل های سه بعدی، می توان تحلیل و مدل سازی را به صورت سه بعدی انجام داد. هدف از این مقاله ارائه چنین تحلیلی و با در نظر گرفتن بعد سوم تونل و اثرات حفر مرحله ای و پوشش گذاری تونل بوده است. بدین منظور از نرم افزار اجزا محدود ABAQUS برای ساخت مدل ها استفاده شد و حفاری تونل به صورت مرحله ای مدل سازی گردید. یعنی مطابق با آنچه در عمل اتفاق می افتد بین گام حفاری و نصب پوشش یک مرحله فاصله قرار داده شد. مطابق با نتایج بدست آمده:

۱. تطابق خوبی بین نتایج تحلیل عددی-سه بعدی با روابط تجربی برای پروفیل نشست طولی مشاهده شد.
۲. اثر شرط مرزی ابتدای مدل تا حدود ۵D یعنی ۵ برابر قطر تونل مشاهده می گردد و از این طول به بعد نشست به حالت پایدار و بیشینه خود می رسد.
۳. با افزایش عمق تونل نشست سطحی زمین در قبل از سینه کار کمتر و بعد از سینه کار بیشتر می گردد. همچنین اثر شرایط مرزی ابتدای مدل با کاهش عمق حفاری کمتر می گردد و حالت نشست پایدار در فاصله کمتری از مدل اتفاق می افتد. پروفیل های نشست حاصل از عمق های مختلف تونل، در محل سینه کار یکدیگر را قطع می کنند، یعنی نشست سطحی زمین در محل سینه کار برای تونل های با عمق مختلف یکسان می شود.
۴. با افزایش گام حفاری مقدار نشست سطحی بیشتر می گردد اما مقدار تاثیر بر روی نشست، قبل از سینه کار است و پروفیل های نشست بعد از سینه کار بر روی یکدیگر منطبق می گردند. همچنین با افزایش مدول ارتجاعی خاک و تراکم زمین، نشست سطحی زمین کمتر می گردد.
۵. یکی از روش های نسبتاً دقیق و مطمئن برای بدست آوردن درصد آزاد سازی تنش در مدل های دویبعدی، مقایسه پروفیل های نشست عرضی بدست آمده از مدل دویبعدی با مدل سه بعدی است، در این مقاله برای مشخصات هندسی خاص برای تونل و مشخصات مکانیکی معلوم برای زمین با مقایسه پروفیل های دویبعدی و سه بعدی مقدار β ، فاکتور درصد آزاد سازی تنش معادل ۳۵٪ بدست آمد.

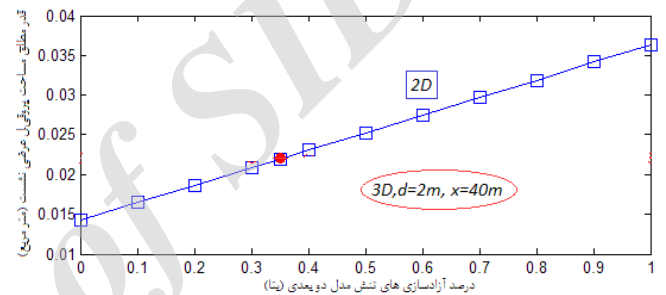
مراجع

- [1] P. Guedes, C. Santos Pereira, The role of the soil K0 value in numerical analysis of shallow tunnels, in: Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, 2000, pp.



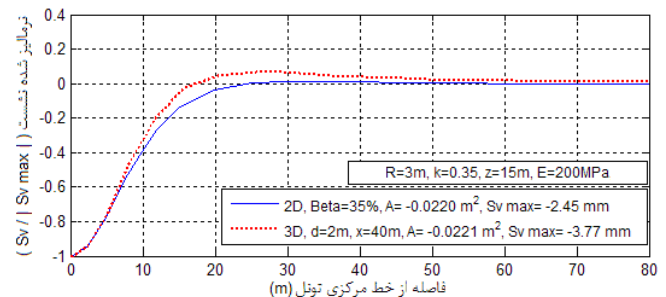
شکل ۲۲: پروفیل عرضی نشست در درصد آزاد سازی های مختلف تنش برای گام حفاری ۲ متر

Fig. 22. Transverse settlement trough for different relaxation stress percent, for length of excavation 2 (m)



شکل ۲۳: مقایسه مساحت زیر منحنی نشست در حالت سه بعدی با حالت دو بعدی برای مقادیر مختلف β

Fig. 23. Comparison of area of settlement curve in 3D state with 2D state for different relaxation stress percent



شکل ۲۴: مقایسه پروفیل عرضی نشست بدست آمده از مدل سه بعدی و دو بعدی برای $\beta=0/35$ (نرمال شده)

Fig. 24. Comparison of transverse settlement trough from 3D model and 2D model for $\beta=0/35$ (Normalize)

۵- بحث تکمیلی و نتیجه گیری

مرحله حفار تونل یا تونل زنی، یک عملیات سه بعدی است که در آن طول تونل و طول قسمتی که هنوز برای آن پوشش نصب نشده است دارای اهمیت بوده و در نشست سطحی زمین موثر است. به دلیل محدودیت هایی

- settlement in shield tunneling, in: Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm., 1981.
- [15] C. Sagaseta, Analysis of undrained soil deformation due to ground loss, *Geotechnique*, 38(4) (1988).
- [16] A. Verruijt, J. Booker, Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane, *Geotechnique*, 48(5) (1998) 709-713.
- [17] N. Loganathan, H. Poulos, Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays, *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124(9) (1998) 846-856.
- [18] A. Bobet, Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground, *Journal of Engineering Mechanics*, 127(12) (2001) 1258-1266.
- [19] C. Gonzalez, C. Sagaseta, Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extension of Madrid Metro, *Computers and Geotechnics*, 28(6-7) (2001) 445-468.
- [20] M. Melis, L. Medina, J.M. Rodríguez, Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension, *Canadian Geotechnical Journal*, 39(6) (2002) 1273-1287.
- [21] K.-H. Park, Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays, *Tunnelling and underground space technology*, 20(3) (2005) 249-261.
- [22] A. Osman, M. Bolton, R. Mair, Predicting 2D ground movements around tunnels in undrained clay, *Géotechnique*, 56(9) (2006) 597-604.
- [23] F. Pinto, A.J. Whittle, Ground movements due to shallow tunnels in soft ground. I: Analytical solutions, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 140(4) (2013) 04013040.
- [24] E. Hanafy, J. Emery, Advancing face simulation of tunnel excavation and lining. Placement, in: *Underground Rock Engineering*, 13th Canadian Rock Mechanics Symposium, 1980, pp. 119-125.
- [25] S.C. Möller, Tunnel induced settlements and structural forces in linings, Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik Stuttgart, Germany, 2006.
- [26] H.-M. Mödlhammer, Numerical methods for tunneling using ABAQUS and investigations of long-time-effects of the shotcrete shell and its impact on the combined support system, na, 2011.
- [27] J. Franzius, D. Potts, J. Burland, The influence of soil anisotropy and K_0 on ground surface movements resulting from tunnel excavation, *Géotechnique*, 55(3) (2005) 189-199.
- [28] E. Hoek, Support for very weak rock associated with 379-384.
- [2] R.J. Jardine, D. Potts, A. Fourie, J. Burland, Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction, *Geotechnique*, 36(3) (1986) 377-396.
- [3] G. Lee, C. Ng, Three-dimensional analysis of ground settlements due to tunnelling: Role of K_0 and stiffness anisotropy, in: *Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 2002, pp. 617-622.
- [4] P. Vermeer, P. Bonnier, S. Möller, On a smart use of 3D-FEM in tunnelling, in: *Proceeding of eighth international symposium on numerical models in geomechanics*, 2002, pp. 361-366.
- [5] R.B. Peck, Deep excavations and tunneling in soft ground, *Proc. 7th Int. Con. SMFE, State of the Art*, (1969) 225-290.
- [6] B. Schmidt, Prediction of settlements due to tunneling in soil: three case histories, in: *Rapid Excavation and Tunneling Conf, 2nd Proc*, 1974.
- [7] P. Attewell, Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil, *Ground engineering*, 15 (1982) 36.
- [8] M. Panet, A. Guenot, Analysis of convergence behind the face of a tunnel: Tunnelling 82, proceedings of the 3rd international symposium, Brighton, 7-11 June 1982, P197-204. Publ London: IMM, 1982, in: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Pergamon, 1983, pp. A16.
- [9] M. Panet, *Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement*, Presses ENPC, 1995.
- [10] F. Corbetta, D. Bernaud, D.N. Minh, Contribution à la méthode convergence-confinement par le principe de la similitude, *Revue Française de Géotechnique*, (54) (1991) 5-11.
- [11] 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.
- [12] T. Unlu, H. Gercek, Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(5) (2003) 547-553.
- [13] C. Oteo, J. Moya, Estimation of the soil parameters of Madrid in relation to the tunnel construction, in: *Proc 7th Euro conf. on soil mechanics and foundation engineering*, 1979, pp. 239-247.
- [14] M. Romo, M. Diaz, Face stability and ground

که در آن چسبندگی c و φ زاویه اصطکاک داخلی سنگ می باشد و:

$$k = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

اگر یک تونل دایروی به شعاع r_0 و تحت فشار هیدرواستاتیک P_0 باشد، و فشار یکنواخت P_i از طرف پوشش به دیواره داخلی تونل وارد شود، در حالتی که فشار داخلی پوشش از P_{cr} بیشتر باشد، رفتار توده اطراف تونل الاستیک است و جابجایی شعاعی الاستیک دیواره تونل برابر است با رابطه ۵.

$$P_{cr} = \frac{2P_0 - \sigma_{cm}}{1 + k} \quad (3)$$

$$u_{ie} = \frac{r_0(1+\nu)}{E}(P_0 - P_i) \quad (4)$$

در این روابط ν ضریب پواسون و E مدول ارتجاعی مصالح می باشد. در حالتی که فشار داخلی پوشش از P_{cr} کمتر باشد، گسیختگی در توده سنگ اطراف تونل رخ می دهد و شعاع پلاستیک r_p برابر است با:

$$r_p = r_0 \left[\frac{2(P_0(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k+1)P_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{k-1}} \quad (5)$$

و جابجایی شعاعی پلاستیک دیواره تونل برابر است با:

$$u_{ip} = \frac{r_0(1+\nu)}{E} \left[\frac{2(1-\nu)(P_0 - P_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_0} \right)^2}{-(1-2\nu)(P_0 - P_i)} \right] \quad (6)$$

برای صحت سنجی حل عددی با تحلیل، مدلی به ابعاد $4 \times 4 \text{ m}^2$ که در آن حفره ای به قطر 0.5 متر در عمق 2 متری قرار دارد در نظر گرفته می شود. ضریب پواسون محیط معادل 0.286 و $E = 2/6 \text{ MPa}$ با وزن مخصوص $\gamma = 20000 \text{ KN/m}^3$. در جدول ۱ نتایج حل تحلیلی و عددی برای جابجایی آورده شده است که نشاندهنده تطابق خوب نتایج است. همچنین شکل ۲ انطباق منحنی پاسخ زمین بدست آمده از حل تحلیلی را با حل عددی نشان می دهد.

faults and shear zones, Rock support and reinforcement practice in mining, (1999) 19-32.

[29] S. Maraš-Dragojević, Analysis of ground settlement caused by tunnel construction, Građevinar, 64(07.) (2012) 573-581.

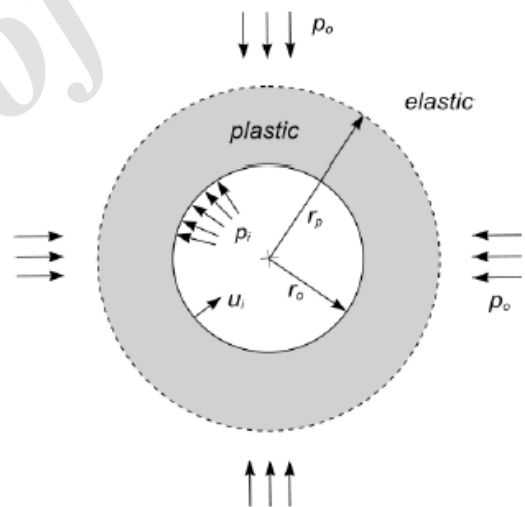
ضمیمه (صحت سنجی)

۱. صحت سنجی اول: مقایسه منحنی پاسخ زمین (GRC) بدست

آمده از روش تحلیلی با روش عددی

منحنی پاسخ زمین یکی از اجزای روش همگرایی همجواری در تحلیل اندرکنش حائل سنگ است، که برای تعیین جابجایی ها در پیرامون تونل حفر شده به روش جدید اتریشی به کار می رود. حل تحلیلی منحنی پاسخ زمین براساس فرض میدان تنش برجا ایزوتروپ می باشد و قابل کاربرد برای تونل های عمیق است. اما امروزه، تونل های شهری در سطح و اغلب تحت نسبت تنش های برجا غیرایزوتروپ حفر می شوند.

هدف رسم تغییرات جابجایی در تاج (crown)، دیواره (wall) و کف (floor) تونل براساس تغییرات تنش اولیه زمین P_0 به تنش وارده از طرف دیواره تونل P_i می باشد (شکل ۱).



شکل ۱: نمایش ناحیه پلاستیک اطراف تونل و پارامترهای لازم برای محاسبه آن (Hoek, 1999)

Fig. 1. Plastic zone surrounding of circular tunnel and necessary parameters in calculations (Hoek, 1999)

رابطه گسیختگی توده سنگ بر اساس معیار موهر کولمب به صورت زیر می باشد:

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \varphi}{(1 - \sin \varphi)} \quad (1)$$

جدول ۱: مقایسه جابجایی‌های بدست آمده برای تاج، دیواره و کف تونل توسط مدل عددی و روابط تحلیلی

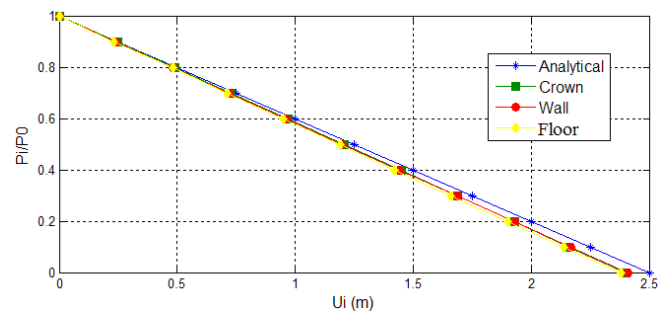
Table 1. Comparison of displacement for crown, wall and floor obtained by numerical analysis and analytical solution

P_i/P_0	Analytical u_{ie}	Numerical		
		Crown (m)	Wall (m)	Floor (m)
۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۰/۹	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۳
۰/۸	۰/۵۰	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۸
۰/۷	۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۷۱
۰/۶	۱/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۵
۰/۵	۱/۲۵	۱/۲۱	۱/۲۰	۱/۱۹
۰/۴	۱/۵۰	۱/۴۵	۱/۴۴	۱/۴۲
۰/۳	۱/۷۵	۱/۶۹	۱/۶۹	۱/۶۶
۰/۲	۲/۰۰	۱/۹۳	۱/۹۳	۱/۹۰
۰/۱	۲/۲۵	۲/۱۶	۲/۱۷	۲/۱۴
۰	۲/۵۰	۲/۴۰	۲/۴۱	۲/۳۸

جدول ۲ در حالت سه بعدی به روش گام به گام و همچنین در حالت دوبعدی با کمک تحلیل المان محدود برنامه DIANA به مدل سازی تونل پرداخت. ایشان با مقایسه پروفیل‌های نشست بدست آمده از روش دوبعدی با درصد آزادسازی تنش مختلف با پروفیل نشست حاصل از مدل سازی سه بعدی به این نتیجه رسید که برای تونلی با مشخصات ذکر شده درصد آزادسازی تنش ۶۳ درصد ($\beta = 0.63$) برای مدل سازی دوبعدی مناسب می باشد.

بنابراین، تونل سطحی با عمق ۱۵ متر و شعاع دهانه ۳ متر در زمین رسی آهکی با فرض محیط ناهمگن و غیرایزوتروپ ساخته شد. در تحلیل انجام شده رفتار مصالح الاستو پلاستیک با معیار خرابی موهر-کولمب در نظر گرفته شده است، و نیز از اثر آب زیرزمینی صرف نظر شده است. پوشش بتنی به ضخامت 0.35 m با فرض رفتار الاستیک خطی برای بتن و مشخصات $E = 15\text{ GPa}$ ، $\nu = 0.15$ و $\rho = 2.5\text{ g/cm}^3$ ، $\beta = 0.63$ نصب گردیده است.

مطابق با شکل ۵ انطباق خوبی برای نشست بین مدل سازی عددی در این مقاله و مقاله اصلی مشاهده می شود. لازم بذکر است در هر دو نمودار درصد آزادسازی تنش، $\beta = 0.63$ اختیار شده است.



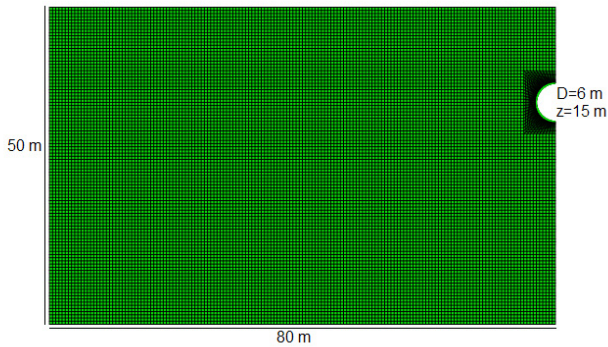
شکل ۲: منحنی‌های پاسخ زمین بدست آمده از حل عددی و حل تحلیلی
Fig. 2. Ground Reaction Curves obtained by numerical model and analytical solution

۲. صحت سنجی دوم: مقایسه پروفیل نشست سطحی زمین بدست آمده از روش عددی با مقاله Dragojevic به منظور اعتبار سنجی نتایج بدست آمده از مدل سازی عددی با نرم افزار ABAQUS، مدلی برای تونل حفر شده در زمین رسی آهکی مطابق شکل ۳ ساخته شد. Dragojevic در سال ۲۰۱۲ با در نظر گرفتن مشخصات زمین لایه‌ای مطابق شکل ۳ و خصوصیات مکانیکی زمین مشابه

جدول ۲: خصوصیات مصالح مدل موهر-کولمب [۲۹]

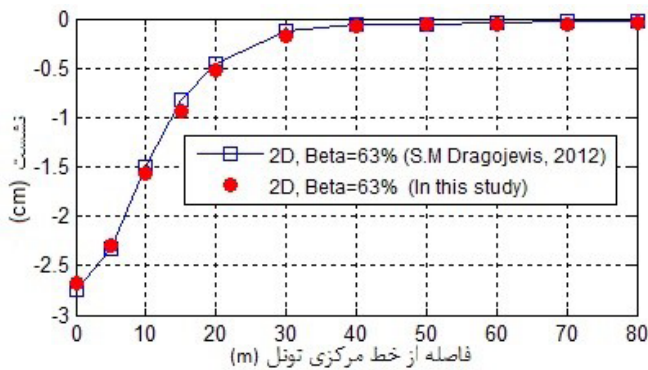
Table 2. Material property Mohr-Coulomb model [29]

لایه ها	ϕ ($^{\circ}$)	c Pa	ν	E Pa	ρ kg/m ³	k_0
لایه اول	۲۳	۱۸e۳	۰/۴	۱۰e۶	۱۸۵۰	۰/۶۵
لایه دوم	۲۰	۲۰e۳	۰/۳	۱۵e۶	۲۰۰۰	۰/۸۵
لایه سوم	۲۵	۶۰e۳	۰/۳	۶۰e۶	۲۰۰۰	۰/۵۸



شکل ۴: هندسه و شبکه بندی مدل ساخته شده برای صحت سنجی

Fig. 4. Geometry of numerical model in verification analyze



شکل ۵: مقایسه پروفیل نشست زمین بدست آمده از مدل سازی ۲D در این مقاله با مقاله (Dragojevic (2012)

Fig. 5. Comparison of ground settlement trough from this article with Dragojevic (2012)



شکل ۳: لایه بندی زمین برای تونل حفر شده در زمین رسی آهکی

Fig. 3. Layered ground for tunneling in marly clay soil

Please cite this article using:

A. Lakirouhani, S. Jolfaei, Full 3D Modeling of Tunnel Excavation and Lining with Emphasis on Sequence Excavation, Comparison of 3D and 2D Analysis. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(1) (2018) 149-160.
DOI: 10.22060/ceej.2016.708

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

