

## بررسی کارایی مدل‌های رفتاری متداول خاک در پیش‌بینی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل در خاک‌های درشت دانه به روش اجزای محدود

فرزاد کامکار<sup>۱</sup>، مهدی حسینی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

(دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۱۶، پذیرش ۱۳۹۷/۰۵/۱۴)

### چکیده

با توجه به رشد روز افزون جمعیت و نیاز به ساخت زیربنایی برای حمل و نقل سریع و آسان، ساخت تونل اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. حفر تونل‌های شهری با عبور از زیر ساختمان‌های متعدد و به علت تخریب تنش و ایجاد تغییرشکل‌های الاستیک و پلاستیک باعث ایجاد نشست‌هایی در سطح زمین می‌شود. این نشست‌ها در صورتی که کنترل نشده نباشد به سازه‌های سطحی آسیب و خسارات جبران ناپذیری وارد خواهند کرد. در نتیجه پیش‌بینی صحیح نشست بخش مهمی از مرحله امکان‌سنجی ساخت تونل در مناطق شهری است. امروزه برای آنالیز و طراحی تونل‌ها از روش‌های متعددی استفاده می‌شود که معمولاً برای تونل‌های شهری که در اعماق کم و در زمین‌های نرم اجرا می‌شوند، بهترین روش استفاده از روش‌های عددی است. بررسی اثرات حفاری بر توزیع تنش‌ها در اطراف تونل‌ها و همچنین بررسی نشست‌های سطحی نیز در زمین‌های نرم بسیار مهم است که باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق به مدلسازی دوبعدی تونل مدرس در پروژه تونل آرش - اسفندیار - نیایش با نرم‌افزار پلکسیس پرداخته شده است که این تونل در منطقه سه شهرداری تهران قرار دارد. بعد از مدلسازی عددی با مدل رفتاری خاک سخت‌شونده، نشست‌های سطح زمین تعیین شده و سپس با نتایج حاصل از مدلسازی با مدل رفتاری موهر-کولمب مقایسه شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده این نتایج حاصل شد که حفاری تونل مدرس، با توجه به نتایج مدلسازی‌ها و انجام مقایسه با نتایج پایش‌های انجام گرفته، با به کارگیری روش حفر مرحله‌ای NATM و بهره بردن از المان‌های تقویت خاک همچون فورپولینگ، نیل و میکروپایل، می‌تواند به خوبی و به صورت کنترل شده و ایمن انجام گیرد و باید در مقاطع مشابه در تونل از این تجربه استفاده شود. همچنین استفاده از مدل رفتاری خاک سخت‌شونده نسبت به مدل موهر-کولمب برای مدلسازی تونل در خاک درشت دانه تهران که شرایطی مشابه خاک این تونل دارد، مناسب‌تر است. حداکثر نشست سطح زمین در مدلسازی با مدل رفتاری خاک سخت‌شونده و مدل موهر کولمب به ترتیب ۲۳/۳۷ و ۲۷/۰۴ میلی‌متر به دست آمده است.

### کلمات کلیدی

تونل آرش - اسفندیار - نیایش، مدلسازی عددی، تونل مدرس، تونل شهری، نشست.

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: meh\_hosseini18@yahoo.com

## ۱- مقدمه

عمل کاربرد دارد. شایع‌ترین و گسترده‌ترین روش تجربی برای پیش‌بینی نشست سطح زمین روش پک<sup>۱</sup> است (رابطه ۱).

$$S(y) = S_{max} \exp\left(\frac{-y^2}{2l^2}\right) \quad (1)$$

که در آن:

$S(y)$ : نشست در فاصله  $y$  از محور تونل

$S_{max}$ : بیشینه نشست سطح زمین روی محور تونل

$l$ : فاصله نقطه عطف منحنی از محور تونل است.

روش‌های تحلیلی عمدتاً مبتنی بر تئوری مکانیک محیط‌های پیوسته است و سعی در تشریح مکانیزمی دارد که قادر به پیش‌بینی نشست سطح زمین باشد. روش تحلیلی یک روش بهتر و سودمندتر از روش تجربی است زیرا می‌تواند با توجه به پارامترهای بیشتری نشست سطح زمین را تخمین بزند. روش تحلیلی بر خلاف روش تجربی، می‌تواند هر دو جابه‌جایی افقی و عمودی را محاسبه کند.

امروزه روش‌های عددی با توسعه سریع ابزار محاسباتی و توانایی این روش در حل مسایل پیچیده به روشی محبوب تبدیل شده‌اند. با استفاده از روش عددی می‌توان بر بسیاری از محدودیت‌های روش‌های تجربی و روش‌های تحلیلی غلبه کرد. در این روش خواص ژئوتکنیکی زمین، هندسه تونل، عمق تونل، مدل رفتاری زمین و سیستم‌های نگهداری که روی نشست سطح زمین تاثیر می‌گذارند در مدلسازی اعمال می‌شود [۶].

در اثر حفر تونل‌های بزرگ مقطع در مناطق شهری و در اعماق کم، جابه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌هایی در محیط اطراف ایجاد می‌شود. خسارات احتمالی که در اثر حفر تونل در سطح زمین به وجود می‌آید مربوط به مولفه‌های افقی و قائم جابه‌جایی‌های سطح زمین است. مولفه افقی سبب ایجاد کشش یا فشار در سطح زمین و مولفه قائم سبب پایین آمدن و نشست تدریجی سطح زمین می‌شود، از این رو ضرورت بررسی اثرات حفر تونل در سطح زمین و پیش‌بینی پروفیل نشست، به ویژه در مناطق شهری مطرح می‌شود. به همین علت، در شرایطی که امکان نشست بر اثر حفر تونل وجود دارد، باید تدابیری اندیشه شود که مقادیر نشست زمین به حداقل ممکن برسد [۷]. قبل از حفر و احداث تونل، باید منطقه مورد نظر را مطالعه کرد و مناسب‌ترین مسیر تونل را برگزید که این مطالعات زمان‌بر و هزینه‌بر خواهند بود، اما بدون انجام آن‌ها ممکن است اشکالات اساسی در ضمن احداث تونل بروز کند.

در دوران معاصر با توجه به پیشرفت فن‌آوری و رشد جمعیت، استفاده از تونل در بخش‌های مختلف صنعت همچون سدسازی و شبکه‌های انتقال آب، راه‌سازی و حمل و نقل شهری و مترو، توسعه قابل توجهی پیدا کرده است. در سال‌های اخیر بسیاری از پروژه‌های تونل در مناطق پر ازدحام شهری برای گسترش مسیرهای ارتباطی اجرا شده‌اند [۱].

تونل‌ها علاوه بر تاثیر مستقیمی که بر کاهش بار ترافیکی دارند، باعث تسریع در حمل و نقل شهری می‌شوند، همچنین به کاسته شدن آلودگی صوتی، بصری و محیطی نیز کمک می‌کنند و باعث رونق یافتن بخش‌های مختلف شهرها می‌شوند. با کاسته شدن حجم اتومبیل‌ها در محدوده‌های پرتردد شهری و مناطقی که از لحاظ اداری و تجاری مرکزیت دارند، فضای امن‌تر و سالم‌تری برای رسیدگی به امور روزانه مردم ایجاد می‌شود از این رو تونلسازی به عنوان یک راهکار مناسب برای کاهش ترافیک در مدیریت شهری مد نظر قرار گرفته است.

حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به حذف توده‌هایی از خاک و سنگ محیط و بروز تغییرات قابل توجه در وضعیت تنش اطراف آن‌ها می‌شود. از جمله پدیده‌های مهم ناشی از این دست خوردگی وقوع نشست‌هایی در سطح زمین است. به دست آوردن این مقادیر نشست و کنترل و کاهش آن‌ها به ویژه در مورد تونل‌های کم‌عمق حفر شده در مناطق شهری و به ویژه به هنگام عبور از زیر مناطق مسکونی با بافت قدیمی شهرها اهمیت زیادی دارد [۴-۱].

درواقع مقدار نشست در یک نقطه تابع ترکیب عوامل مختلفی است که از جمله آن‌ها می‌توان به جنس خاک و روش حفر تونل اشاره کرد.

بررسی‌های انجام شده در رابطه با موضوع نشست زمین در اثر حفر تونل را می‌توان به دسته‌های زیر تقسیم کرد که در هر روش تحقیقات فراوانی انجام شده است:

- الف- تحقیق بر روی تونل‌ها در مقیاس واقعی
- ب- تحقیق برای گسترش روش‌های تئوری
- ج- تحقیق بر روی مدل‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک

د- استفاده از روش‌های عددی در مدلسازی نشست سطح زمین معمولاً بر اساس روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی تخمین زده می‌شود [۵]. روش تجربی ساده‌ترین محاسبات را فراهم می‌کند و به طور گسترده‌ای در

ضرورت بررسی اثرات حفر تونل در سطح زمین و پیش‌بینی پروفیل نشست، به ویژه در مناطق شهری مطرح می‌شود. به همین علت، در شرایطی که امکان وقوع نشست بر اثر حفر تونل وجود دارد، باید تدابیری اندیشه شود که مقادیر نشست زمین به حداقل مقدار ممکن خود برسد [۱۱].

امروزه تحلیل‌های عددی اهمیت زیادی در پروژه‌های ژئوتکنیکی دارند و به طور گسترده‌ای جایگزین روش‌های تجربی شده‌اند. هر چند از روش‌های تجربی نیز برای کنترل نتایج تحلیل‌های عددی استفاده می‌شود. به کمک مدل‌سازی‌های عددی می‌توان روند حفاری، نگهداری و اثر جریان آب را در پایداری توده‌های سنگی یا خاکی بررسی کرد. یکی از اساسی‌ترین مراحل تحلیل‌های عددی برای توصیف رفتار مکانیکی خاک، انتخاب مدل رفتاری مناسب است. انتخاب یک مدل مناسب تابع شرایط متفاوتی است اما موضوع اصلی نوع تحلیلی است که کاربر قصد انجام آن را دارد و نیز دقت صحت‌سنجی و مقادیر پیش‌بینی با مدل و نیز اطلاعات در دسترس خاک است [۱۲].

یکی از مشکل‌ترین پارامترها برای تخمین به منظور توصیف رفتار مکانیکی خاک، مدول تغییرشکل خاک است که به واسطه رفتار غیرخطی خاک در منحنی تنش- کرنش و تغییر صلبیت آن در مقادیر کرنش‌های مختلف، مدول‌های متفاوتی برای آن قابل تعریف است. به همین دلیل استفاده از مدل‌هایی که خواص غیرخطی قبل از شکست و همچنین تغییرات سختی خاک را در نظر می‌گیرند، می‌تواند پیش‌بینی دقیق‌تری از جابه‌جایی‌ها داشته باشد. یکی از مسایل مهم در مهندسی ژئوتکنیک تفاوت میان مدول اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر حاصل از تحلیل‌های برگشتی است و یکی از مهمترین دستاوردهای مهندسی ژئوتکنیک در سی سال اخیر توجه ویژه‌ای به خواص اساسی صلبیت خاک است. در دهه‌های اخیر مدل‌های رفتاری زیادی برای خاک توسعه داده شده‌اند که اغلب، پیچیدگی این مدل‌ها و تعداد زیاد پارامترهایشان، بازدارنده استفاده آن‌ها در کدهای محاسباتی شده و سودمندی آن‌ها را در مقاصد عملی کاهش داده است. در عمل، از میان مدل‌های رفتاری موجود، مدلی که علاوه بر سهولت در تعیین پارامترهای مواد نتایج واقعی‌تری به دست می‌دهد، بیشتر در مدل‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این ترتیب برای مدل‌سازی تونل‌های شهری و با توجه به ماهیت خاک شهر تهران، استفاده از مدل‌های رفتاری پرکاربرد موهر-کولمب<sup>۲</sup> (MC) و خاک سخت‌شونده<sup>۳</sup> (HS) پیشنهاد می‌شود که در

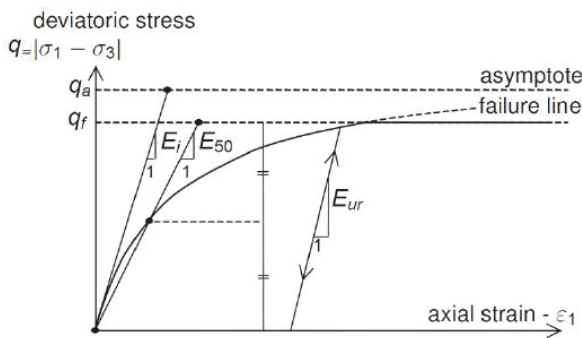
این مشکلات ممکن است به صورت افزایش هزینه‌ها، افزایش زمان انجام پروژه و در بعضی موارد تغییر مسیر تونل باشد [۸]. به طور کلی مهم‌ترین نگرانی در احداث تونل در مناطق شهری، ناپایداری‌ها و نشست‌هایی است که موجب وقوع خسارت و آسیب به شالوده سازه‌های سطحی و پدیدار شدن ترک‌ها و شیب‌دار شدن ساختمان‌های مجاور می‌شود [۹].

با توجه به اینکه پارامترهای موثر در حفاری تونل بسیار گسترده‌اند، بنابراین موثرترین راه برای کاهش هزینه‌ها و افزایش ایمنی، بهره‌گیری از روشی است که در طراحی و اجرا انعطاف پذیر باشد. NATM روشی است که این انعطاف‌پذیری را در امر حفاری، نگهداری و ابزاربندی میسر کرده است. به طور کلی مطالعه و شناخت هرچه دقیق‌تر روش NATM به عنوان روشی کارآمد و موفق با بررسی موارد عملی و تونل‌های اجرا شده به این روش، بسیار مفید خواهد بود [۱۰].

روش تونل‌سازی اتریشی جدید (NATM) شامل ترکیبی از روش‌های حفاری و تونلسازی است اما تفاوت آن با سایر روش‌ها، به کارگیری رفتارسنجی مداوم و مستمر حرکت سنگ یا خاک و بازنگری سیستم نگهداری برای دستیابی به اقتصادی‌ترین و پایدارترین روش نگهداری است. از عمده‌ترین مزایای کاربرد روش NATM می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- عدم نیاز به ماشین‌آلات خاص
- امکان اجرای مقطع دلخواه تونل
- امکان تقسیم‌بندی عملیات حفاری و افزایش تعداد جبهه‌کار برای بالا بردن سرعت حفاری تونل
- قدرت مانور بالا در اجرای سیستم‌های نگهداری با توجه به شرایط زمین

حرکات و تغییر شکل‌های زمین و تغییر سیستم توزیع تنش در خاک، از نتایج اجتناب‌ناپذیر حفاری و ساخت تونل است. به این ترتیب که بر اثر حفاری، تاج تونل نشست می‌کند که ممکن است در نهایت به نشست سطحی زمین منجر شود. حفاری تونل باعث آزادسازی تنش‌های برجا می‌شود و تنها بخش محدودی از این تغییرشکل‌ها با سیستم نگهداری تونل قابل پیش‌گیری است. تغییرشکل‌ها در عمق زمین و در محل تونل انجام می‌گیرد. این کار زنجیره‌ای از تغییرشکل‌ها را سبب می‌شود و در نهایت منجر به نشست در سطح زمین می‌شود که با کاهش عمق تونل قابل توجه‌تر و مهم‌تر خواهد بود. مقادیر این نشست‌ها عمدتاً به عواملی چون ابعاد تونل، عمق، جنس زمین، روش حفاری تونل، نوع سیستم نگهداری و حالت تنش‌های موجود در محل وابسته است. از این رو



شکل ۱: مدول‌های تغییر شکل مختلف خاک در مدل خاک سخت‌شونده [۱۵]

$q$ : تنش انحرافی

$q_a$ : تنش انحرافی مجانب

$E_{50}$ : مدول تغییر شکل به ازای ۵۰ درصد تنش انحرافی حداکثر است.

مقدار تنش انحرافی حداکثر مطابق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$q_f = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \cdot (\sigma_3' + c' \cot \phi') \quad (3)$$

$$q_f = q_a \cdot R_f \quad (4)$$

که در این رابطه‌ها:

$\phi'$ : زاویه اصطکاک

$c$ : چسبندگی موثر خاک

$R_f = 1$ : پارامتر نسبت گسیختگی که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

چنانچه ( $R_f = 1$ )،  $q_f = q_a$  باشد، در این حالت معیار گسیختگی برقرار و شرایط تسلیم پلاستیک کامل برقرار می‌شود. این شرایط در حالتی اتفاق می‌افتد که رفتار تنش- کرنش از ابتدای مسیر غیرخطی باشد.

در این مدل، مدول وابسته به تنش  $E_{50}$  به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \cdot \left( \frac{c' \cdot \cot \phi' + \sigma_3'}{c' \cdot \cot \phi' + p^{ref}} \right)^m \quad (5)$$

که در آن:

$E_{50}^{ref}$ : مدول سختی مرجع در فشار محصورکننده مرجع  $p^{ref}$

این تحقیق به مقایسه نتایج این دو مدل رفتاری در مدلسازی تونل مدرس پرداخته شده است.

مدل موهر- کولمب یک مدل الاستیک- پلاستیک کامل و رایج‌ترین مدل برای نمایش شکست‌های برشی در خاک و سنگ است. معیار تسلیم موهر- کولمب بر اساس تنش‌های اصلی یک شش وجهی نامنظم است و محور اصلی آن مکان هندسی سطح تسلیم را نمایش می‌دهد. معیار تسلیم موهر- کولمب به دلیل سادگی و پارامترهای ملموسی که در مباحث ژئوتکنیکی دارد به طور گسترده‌ای توسط طراحان و مهندسان در تحلیل‌های رایج ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همچنین مدل رفتاری HS یکی از مدل‌هایی است که بر مبنای مکانیک خاک حالت بحرانی توسعه داده شده است و شامل دو حالت استاندارد و کرنش‌های کوچک<sup>۴</sup> است. در مدل HS، کرنش کلی بر اساس مقدار تنش وابسته به سختی محاسبه می‌شود که مقدار آن در بارگذاری و باربرداری متفاوت بوده و فرض بر این است که شرایط ایزوتروپیک بر توده خاک حاکم است [۱۳]. از مدل HS می‌توان برای بررسی رفتار سیلت‌های رسی، خاک‌های شنی و ماسه‌ای و خاک‌های رسی با نسبت پیش‌تحکیمی پایین استفاده کرد. بیشترین کاربرد مدل HS در مواردی است که بحث باربرداری و بارگذاری مجدد در خاک مطرح است مانند رفتار خاک در گودبرداری‌ها و تونل‌ها [۱۴]. در این مدل مشابه مدل موهر- کولمب حالت تنش حدی با استفاده از پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع بیان می‌شود ولی وضعیت خاک پیش از گسیختگی به وسیله سه پارامتر مدول بارگذاری سه محوره  $E_{50}^{ref}$  (اندیس ۵۰ به معنی مدول سکانت در نصف مقاومت نهایی است)، مدول باربرداری  $E_{ur}^{ref}$  (شیب خط مماس بر منحنی بارگذاری- باربرداری مجدد) و مدول ادنومتري  $E_{50}^{oed}$  (مدول مماسی در مرحله اولیه بارگذاری تحکیمی یا بخش الاستیک منحنی) توصیف می‌شود. شکل ۱ مدول‌های تغییر شکل متفاوت را در منحنی تنش- کرنش خاک در مدل HS نشان می‌دهد.

فرمولاسیون مدل سخت‌شونده بر اساس تابع هایپربولیک که از آزمایش سه محوری استخراج می‌شود به صورت رابطه ۲ است:

$$\varepsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \cdot \frac{q}{q_a - q} \quad (2)$$

که در آن:

$\varepsilon_1$ : کرنش محوری

دلیل عدم در نظرگیری مدول الاستیسیته باربرداری- بارگذاری تطابق کمتری با نتایج پایش خواهد داشت [۱۷].

در مطالعات انجام شده توسط امیری، وی به عنوان مطالعه موردی به مدلسازی تونل هیترو انگلستان به کمک نرم‌افزار FLAC 2D پرداخت. این تونل در عمق ۱۶٫۸ متری از سطح زمین در خاک رس و در سال ۱۹۹۵ احداث شد. وی در تحقیقات خود به مدلسازی این تونل با مدل‌های رفتاری مختلف (موهر- کولمب، خاک سخت‌شونده و کم- کلی اصلاح شده) پرداخت و نتایج آن‌ها را با مقادیر به دست آمده از پایش‌های انجام شده مقایسه کرد و به این نتیجه رسید که مدل رفتاری کم- کلی اصلاح شده (MCC) بیشترین تطابق را با نتایج مانیتورینگ ایجاد کرده است (شکل ۳) [۱۸].

شریفزاده و همکاران در مطالعات خود پیرامون تونل خط ۴ متروی تهران با انجام مدلسازی‌های مختلف به کمک نرم‌افزار PLAXIS<sup>3D</sup> و مدل رفتاری موهر- کولمب به بررسی تاثیر طول گام و مراحل حفر در روش حفاری مرحله‌ای بر میزان نشست سطح زمین پرداختند. پس از انجام بررسی‌ها، در زیر خیابان‌ها، در قسمت فوقانی تونل گام ۲ متر و در قسمت زیرین ۳ متر و در زیر ساختمان‌ها، در قسمت فوقانی گام ۱ متر و در قسمت زیرین مقدار ۳ متر را به عنوان طول مناسب گام حفاری پیشنهاد کردند. این تونل به صورت نعل‌اسبی و به شعاع ۴٫۵ متر با روباره ۱۴ متر در تهران احداث شد [۱۹]. همچنین سون مولر<sup>۵</sup> در تحقیقات گسترده‌ای که پیرامون مدلسازی تونل‌ها به روش اجزای محدود در سال ۲۰۰۶ انجام

$m$ : کنترل‌کننده سختی وابسته تنش بر اساس قانون توان (این پارامتر برای شن و ماسه مقدار ۰٫۵ پیشنهاد شده است).

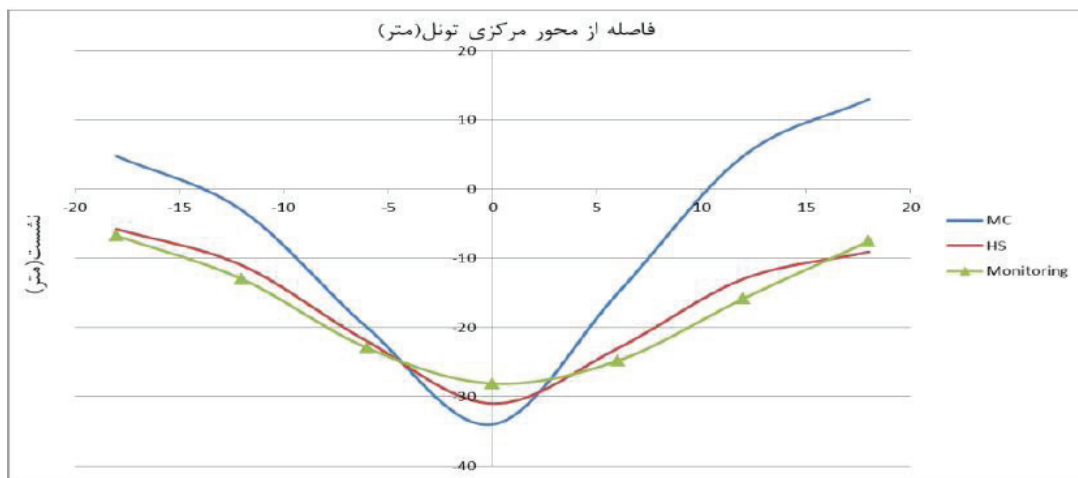
مدول بارگذاری- باربرداری اولیه  $E_{ur}$  در بردارنده مقادیر کرنش الاستیک و پلاستیک است و با در اختیار داشتن ضریب پواسون  $\nu$ ، رفتار خاک را تحت شرایط بارگذاری و باربرداری توصیف می‌کند و به صورت رابطه ۶ است.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \cdot \left( \frac{c' \cdot \cot \phi' + \sigma_3'}{c' \cdot \cot \phi' + p^{ref}} \right)^m \quad (6)$$

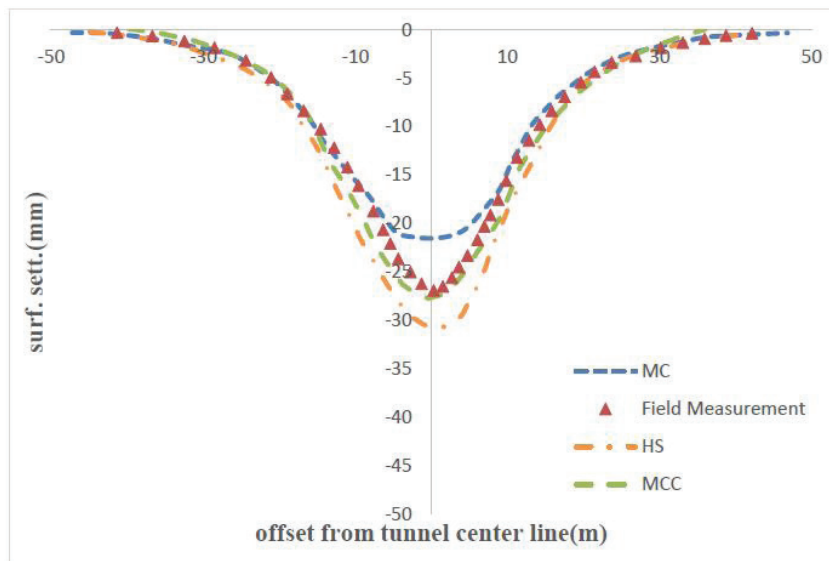
که در آن  $E_{ur}^{ref}$  مدول سختی به ازای فشار مرجع  $p^{ref}$  است.

مدول ادنومتري برای تعیین کرنش‌های پلاستیک ناشی از بارگذاری فشاری اولیه است. سه مدول تغییرشکل به همراه پارامترهای  $\nu$ ،  $\phi$ ،  $m$ ،  $c$ ،  $\psi$  هشت مولفه اصلی مدل HS است [۱۶].

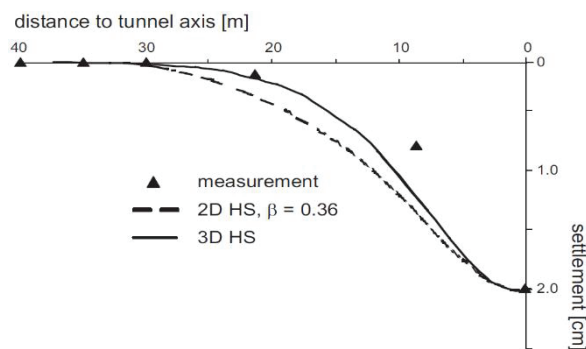
در ادامه، بعضی از مطالعات گذشته که از این مدل‌های رفتاری در مدلسازی عددی استفاده کرده‌اند ارایه می‌شود. در مطالعات انجام شده توسط رحمن‌نژاد، وی برای مدلسازی تونل حکیم تهران که به طول تقریبی یک کیلومتر به صورت دوقلو و به روش NATM حفاری شد، از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS برای پیش‌بینی جابه‌جایی‌ها و بررسی تاثیر مدل رفتاری روی نشست سطح زمین استفاده کرد. وی طی تحقیقات خود مطابق شکل ۲ به این نتیجه رسید که مدل رفتاری موهر-کولمب نسبت به مدل خاک سخت‌شونده، به



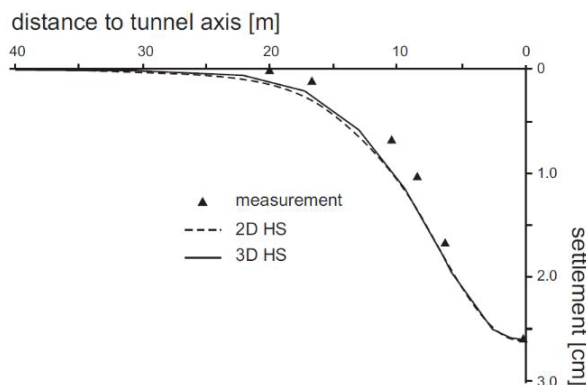
شکل ۲: منحنی نشست در مقطع عرضی تونل حکیم [۱۷]



شکل ۳: منحنی نشست در مقطع عرضی تونل هیترو [۱۸]



شکل ۴: مقایسه نشست سطحی در آنالیز دوبعدی و سه بعدی تونل استینهالدنفلد [۸]



شکل ۵: مقایسه نشست سطح زمین در آنالیز دوبعدی و سه بعدی تونل هین نورد [۸]

داد، تونل مترو استینهالدنفلد<sup>۶</sup> آلمان و تونل هین نورد<sup>۷</sup> هلند را به عنوان مطالعه موردی، به کمک نرم افزار اجزای محدود FLAC و به صورت دوبعدی و سه بعدی مدل سازی کرد [۸]. شکل های ۴ و ۵ نشان می دهند که تطابق مناسبی بین نتایج مانیتورینگ و نتایج مدل سازی های سه بعدی و دوبعدی (با در نظر گرفتن فاکتور کاهش تنش مناسب)، در این دو تونل، وجود دارد. در این نمودارها محور افقی نشانگر فاصله از محور مرکزی تونل و محور عمودی نشان دهنده میزان نشست است. همچنین سلیک در سال ۲۰۱۷ به مقایسه نتایج نشست سطح زمین با استفاده از دو مدل رفتاری موهر-کولمب و نرم افزار PLAXIS<sup>2D</sup> پرداخت. تحلیل ها نشان داد که نتایج حاصل از مدل رفتاری خاک سخت شونده در خاک ماسه ای به مقدار واقعی نشست سطح زمین نزدیک تر است [۲۰].

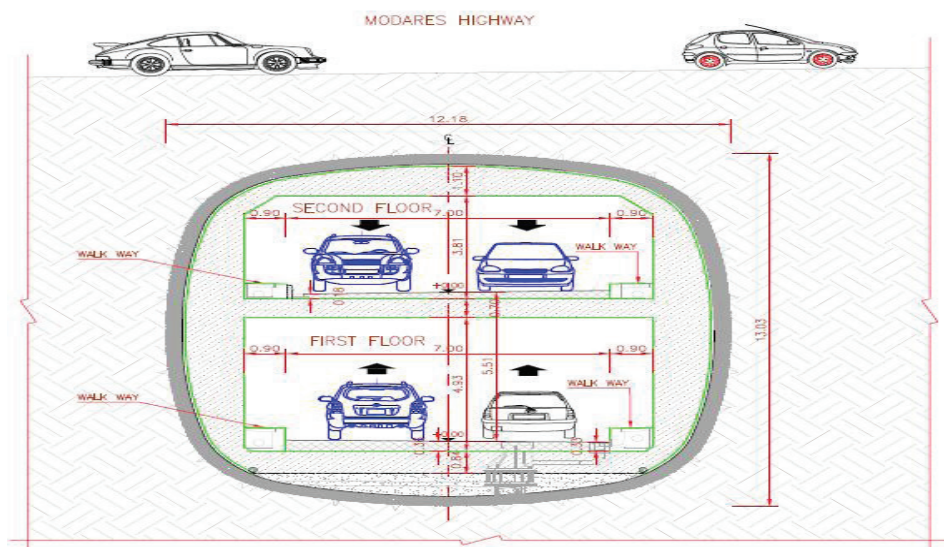
میرسالاری و همکاران در سال ۲۰۱۷ با ارایه روش عددی ترکیبی المان مرزی غیرمستقیم مرتبه بالا با تفاضل محدود (BE/FD) امکان تحلیل تنش ها، جابه جایی ها و کرنش های افقی ایجاد شده در پدیده نشست سطح زمین ناشی از حفاریات زیرزمینی را انجام دادند. این محققان چندین مساله و مدل با این روش عددی حل کردند و نتایج به دست آمده از این روش با نتایج مرتبط موجود در مطالعات دیگران مقایسه شد. این مقایسه ها، مفید بودن و اعتبار روش پیشنهادی را نشان داد [۲۱].







شکل ۷: پلان تونل دوطبقه مدرس [۲۳]



شکل ۸: مقطع عرضی تونل دوطبقه مدرس [۲۳]

### ۳- مدلسازی‌های انجام شده

#### ۳-۱- مدلسازی تونل مدرس با استفاده از مدل رفتاری خاک سخت شونده

برای مدلسازی قطعه دوطبقه تونل مدرس، با توجه به یکسان بودن شرایط روباره، بار سطحی، شرایط زمین و وضعیت آب زیرزمینی تنها یک مقطع در کیلومتر ۲۱۵۰ انتخاب شده است (شکل ۹).

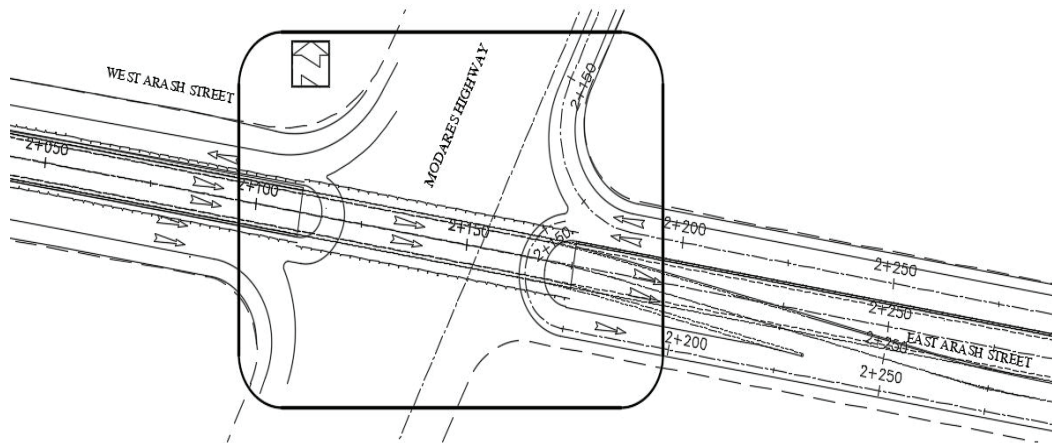
ارتفاع روباره در مقطع انتخابی حدود ۴ متر است. بارگذاری در این مقطع نیز استاتیکی و ناشی از مجموع بار خاک سربار و بار ترافیک مربوط به بزرگراه مدرس است که مقدار آن  $2 \text{ t/m}^2$

در نظر گرفته شده و در مدلسازی اعمال شده است. برای در نظر گرفتن شرایط مرزی و کاهش اثرات آن، محدوده مدلسازی عرض ۸۰ متر ارتفاع ۵۰ متر دارد. نحوه مدلسازی شرایط مرزی و تکیه‌گاه‌ها بدین صورت است که خاک در مرزهای قائم تنها قابلیت جابه‌جایی قائم دارد و در مرز افقی پایین جابه‌جایی در دو جهت افقی و قائم بسته شده است.

در ادامه به ارایه مشخصات خاک و همچنین مشخصات المان‌های سازه‌ای مورد استفاده در این مدلسازی، شامل لتیس<sup>۱</sup>، بتن پاشی (شاتکریت)<sup>۱۱</sup>، فورپولینگ<sup>۱۲</sup>، نیلینگ<sup>۱۳</sup> و میکروپایل<sup>۱۴</sup> به ترتیب پرداخته شده است.

برای مدلسازی لایه‌های زمین، از المان‌های مثلثی ۱۵

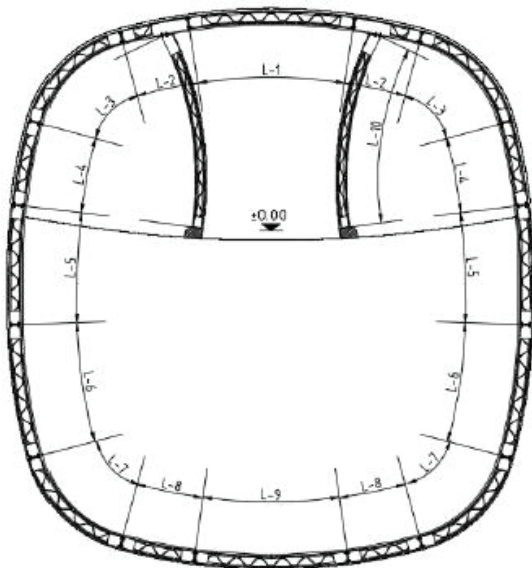




شکل ۹: مقطع انتخابی برای مدلسازی در پلان تونل مدرس [۲۳]

جدول ۱: پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای مدل رفتاری خاک سخت‌شونده [۲۳]

ψ	φ	C (kN/m <sup>2</sup> )	E <sub>ur</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	γ (kN/m <sup>3</sup> )	نوع خاک
۰	۳۰	۱۰	۱۲۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۱۷	خاک سطحی
۷	۳۷	۲۵	۲۱۰۰۰۰	۷۰۰۰۰	۱۸	GC



شکل ۱۰: لتیس‌های مقطع تونل مدرس [۲۳]

۱٫۵ متری نازل تا جبهه‌کار انجام گرفته است. سیمان استفاده شده در شاتکریت از نوع تیپ ۲ و دارای مقاومت مشخصه ۲۵ مگاپاسکال یا ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. جدول ۲ پارامترهای سختی خمشی، سختی محوری، وزن مخصوص و

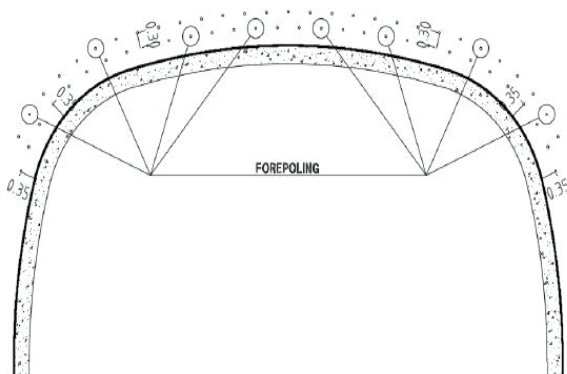
گره‌ای استفاده شده است و رفتار خاک در لایه‌های مختلف بر اساس مدل رفتاری خاک سخت‌شونده است. همچنین پارامترهای پیشنهاد شده مصالح خاک نیز با توجه به نبودن آب در اطراف تونل، از نوع زهکشی شده در نظر گرفته شده است. جدول ۱ پارامترهای ژئوتکنیکی خاک تونل را نشان می‌دهد که ضخامت خاک سطحی در آن تنها ۳٫۵ متر است. لتیس‌های استفاده شده در تونل مدرس به دو صورت تخریبی و اصلی با فواصل ۰٫۵ متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند که در بخش تخریبی دارای یک لتیس فولادی به ضخامت شاتکریت ۲۵ سانتی‌متر و در قسمت‌های اصلی در دورتادور تونل با ضخامت شاتکریت ۳۵ سانتی‌متر است. در شکل مقطع تونل مدرس در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در شکل ۱۱ در سمت چپ، مقطع لتیس با ۲۵ سانتی‌متر شاتکریت و در سمت راست، مقطع لتیس با ۳۵ سانتی‌متر ارایه شده است. نحوه اجرای شاتکریت در تونل بدین صورت است که پس از اتمام مرحله حفاری سطح مقطع مورد نظر و لتیس‌گذاری و نصب شبکه مش فولادی، نوبت به بتن‌پاشی می‌رسد. مش‌های استفاده شده در تونل مدرس دارای شبکه‌های ۱۵×۱۵ سانتی‌متر و با آرماتورهایی به قطر ۸ میلی‌متر است. همچنین عملیات اجرای شاتکریت به روش خشک و با رعایت فاصله

مقادیر مدول الاستیسیته معادل، چسبندگی معادل و وزن مخصوص معادل، حاصل از بهسازی خاک با تزریق دوغاب، برای عملیات فورپولینگ به صورت زیر است.

$$E_{eq} = 3,46 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$$

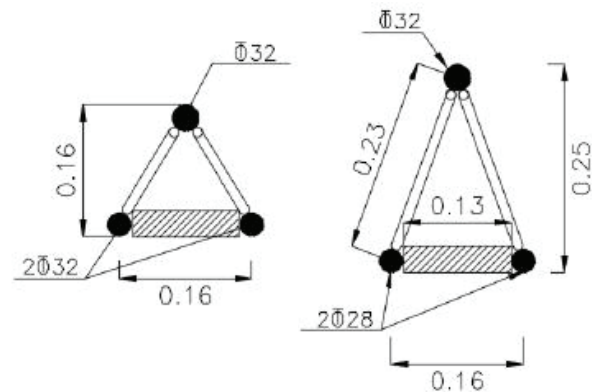
$$C_{eq} = 84 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma_{eq} = 20 \text{ kN/m}^3$$



شکل ۱۲: عملیات فورپولینگ تونل مدرس [۲۳]

در تونل مدرس و در مراحل مختلف عملیات حفاری، برای کنترل نشست‌ها و جابه‌جایی خاک اطراف دیواره تونل، از ۳ ردیف میکروپایل، به صورت لوله‌های ۳ اینچ به عنوان غلاف و آرماتورهای به قطر ۳۲ میلی‌متر به عنوان میلگرد طولی و همچنین از ۲ ردیف نیل با رادهای توخالی از نوع IBO R32S استفاده شده است. شکل ۱۳ محل قرارگیری المان‌های نیل و

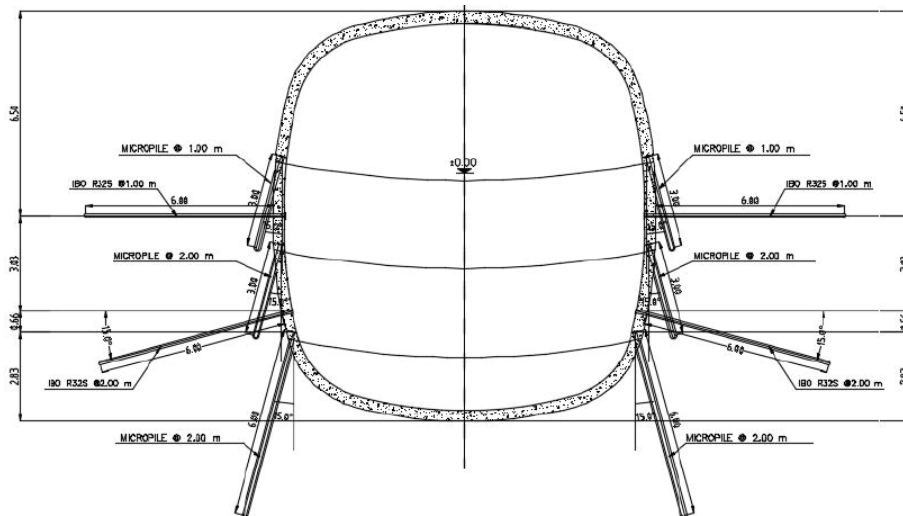


شکل ۱۱: لتیس‌ها با شاکریت ۳۵ و ۲۵ سانتی‌متری [۲۳]

جدول ۲: پارامترهای مقاومتی لتیس‌های تونل مدرس

EI (kN.m <sup>2</sup> /m)	EA (kN/m)	W (kN/m <sup>2</sup> )	ν	ضخامت شاکریت لتیس
۱۵۲۵۰	۵۸۵۵۰۰۰	۵,۸۸۶	۰,۲	-۲۵ cm تخریبی
۴۱۸۴۰	۸۱۹۸۰۰۰	۸,۲۴	۰,۲	-۳۵ cm اصلی

نسبت پواسون مربوط به لتیس‌های تونل مدرس را نشان می‌دهد. پیش از شروع حفاری تونل مدرس، برای مقاوم‌سازی خاک قسمت بالای تونل و کنترل نشست‌ها با ایجاد سازه چتری، تعداد ۶۰ فورپول در دو ردیف و در فواصل ۳۵ و ۶۵ سانتی‌متری از تاج تونل حفاری و اجرا شده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۳: محل قرارگیری المان‌های نیل و میکروپایل [۲۳]

به عدم وجود محدودیت سخت‌افزاری، از ابعاد مش بسیار ریز استفاده شده است. شکل ۱۴ مدل نهایی ساخته شده در نرم‌افزار پلکسیس را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در مش‌بندی مدلسازی به گونه‌ای عمل شده است که مش داخل تونل و ناحیه اطراف آن چندین برابر از ابعاد مش نواحی دورتر نسبت به تونل ریزتر باشد.

میکروپایل در تونل مدرس را نشان می‌دهد. در جدول‌های ۳ و ۴ نیز به ترتیب مشخصات مکانیکی میکروپایل‌ها و نیل‌های به کار برده شده در تونل، ارایه شده است.

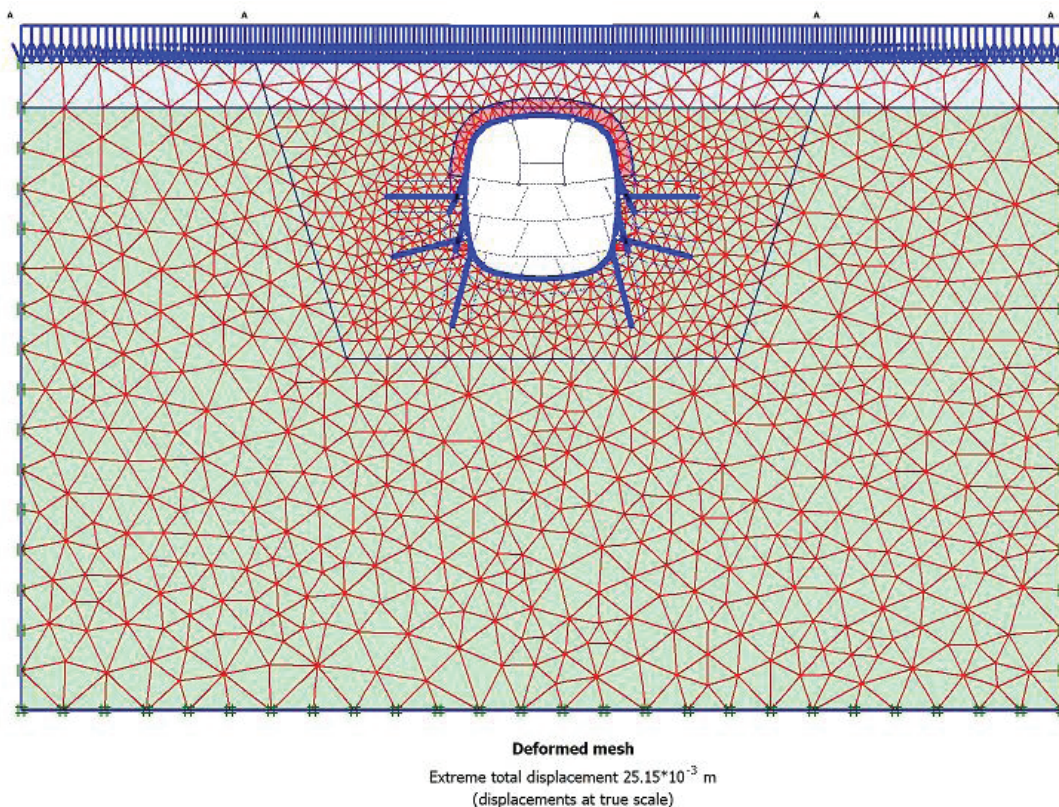
برای مدلسازی لایه‌های زمین، از مدل کرنش صفحه‌ای با المان‌های مثلثی ۱۵ گره‌ای استفاده شده است. برای شبکه‌بندی مدل دوبعدی نیز به منظور افزایش دقت در جواب‌ها و با توجه

جدول ۳: مشخصات مکانیکی میکروپایل‌های تونل مدرس

EI (kN.m <sup>2</sup> /m)	EA (kN/m)	W (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	Length (m)	Spacing (m)	
۴۶٫۹	۱۲۹۰۰۰	۰٫۰۸۵	۰٫۲۵	۳	۱	ردیف اول و دوم
۱۵۲٫۸۶	۴۲۲۰۰۰	۰٫۲۱	۰٫۲۵	۶	۲	ردیف سوم

جدول ۴: مشخصات مکانیکی نیل‌های تونل مدرس

EI (kN.m <sup>2</sup> /m)	EA (kN/m)	W (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$
۶۴٫۵۹	۱۴۰۰۰۰	۰٫۱۲۶	۰٫۲۵



شکل ۱۴: مدل نهایی ساخته شده با مدل رفتاری خاک سخت‌شونده



d صحیح است [۱۸]. در این تحقیق نیز برای افزایش دقت نتایج حاصل از مدلسازی دوبعدی تونل مدرس، مطابق روش باون دیستل، ضرایب  $\beta$  برای گام‌های حفاری متفاوت اعمال شده‌اند (جدول ۶).

جدول ۵: مقادیر پیشنهادی باون دیستل برای پارامتر  $\beta$  [۲۴]

d	۱,۵D	D	۰,۵D	۰,۲۵D	۰,۱۲۵D	۰
$\beta$	۰	۰,۰۲	۰,۱۱	۰,۲۳	۰,۴۱	۰,۷۲

جدول ۶: مقادیر  $\beta$  استفاده شده در مدل سازی

Top Heading	Bench	Invert	
۰,۵	۱,۲	۱,۲	طول گام حفاری
۰,۴۰۳	۰,۲۰۶	۰,۱۷۷	ضریب $\beta$

### ۳-۲- مدلسازی تونل مدرس با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب

برای بررسی تاثیر مدل رفتاری بر مقادیر نشست در تاج تونل و سطح زمین، تونل مدرس تحت مدل رفتاری موهر-کولمب نیز مدلسازی شده است و مشخصات مکانیکی خاک در این مدل رفتاری در جدول ۷ ارائه شده است. به دلیل مشابه بودن سایر مراحل مدلسازی از ارائه مجدد آن صرف نظر شده است. شکل ۱۵ مدل نهایی ساخته شده با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب را نشان می‌دهد.

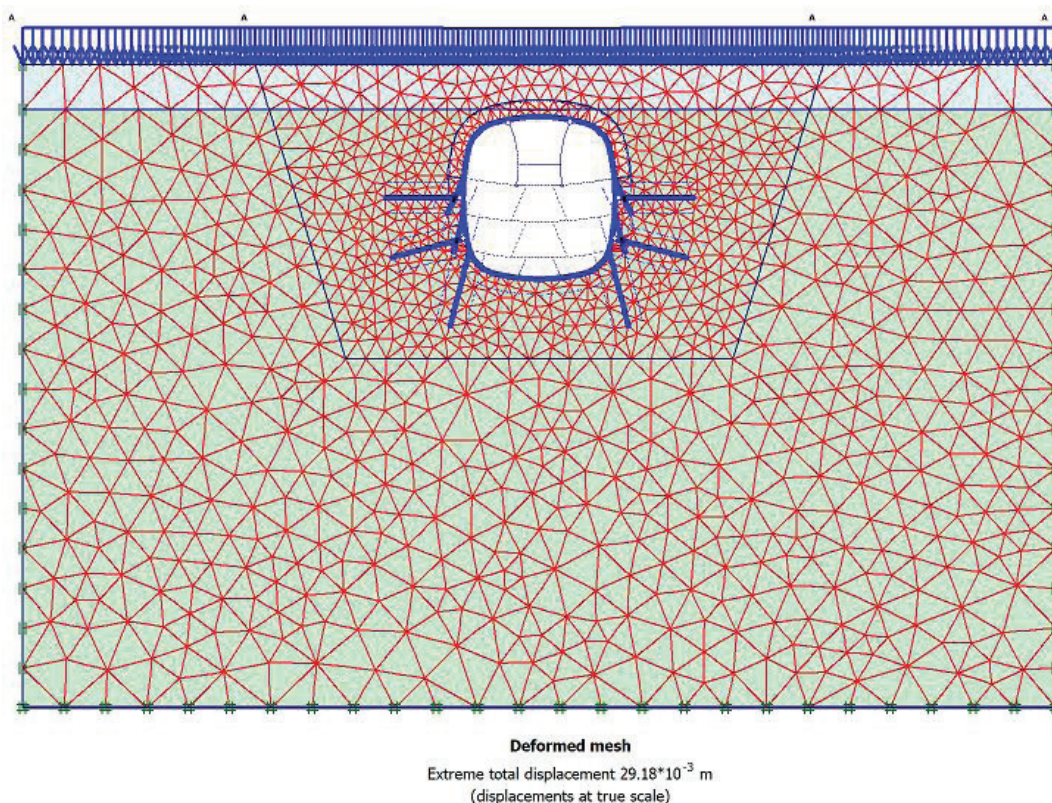
جدول ۷: پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای مدل رفتاری موهر-کولمب

نوع خاک	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$E_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	C (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$	$\psi$
GC	۱۸	۰,۲	۲۱۰۰۰۰	۲۵	۳۷	۷

در تونل‌سازی فرآیند حفاری و ساخت اساسا یک فرآیند سه‌بعدی است ولی به هر حال مدلسازی سه‌بعدی مراحل حفاری تونل بسیار وقت‌گیر و هزینه بر خواهد بود. به همین دلیل مناسب‌ترین و رایج‌ترین روش برای انجام مدلسازی‌های دوبعدی و کنترل میزان آزادسازی تنش در آن‌ها، استفاده از روش کاهش تنش یا روش  $\beta$  است. در این روش، مفهوم آزادسازی تنش ناشی از نصب با تاخیر پوشش و تقسیم بار بین زمین و پوشش تونل، به خوبی در مدلسازی اعمال می‌شود. مقدار ضریب  $\beta$  مابین صفر و ۱ قرار دارد و به طور کلی ضرایب کوچک  $\beta$  مربوط به گام‌های حفاری با طول بلند و یا تاخیر در زمان نصب لاینینگ است که در این مورد تغییر شکل‌های زمین نسبتا بزرگ بوده ولی در عوض نیروهای سازه‌ای لاینینگ کاهش خواهند یافت. از طرفی بزرگ بودن ضرایب  $\beta$  به تغییر شکل‌های کوچکتر زمین و نیروهای سازه‌ای بزرگتر لاینینگ منجر خواهد شد [۶]. امروزه، تحلیل اجزای محدود دوبعدی در تحلیل تونل بسیار رایج است. برای تاثیر دادن اثر سه‌بعدی تونل، فرضیات زیادی درباره بزرگی ضریب آزادسازی تنش وجود دارد. برای تشخیص مقدار این ضرایب، محققان مقادیر متنوعی را، خواه بر اساس تجربیات مهندسی و اندازه‌گیری‌ها یا فرضیات تئوری و یا بر اساس مقایسه محاسبات دوبعدی و سه‌بعدی پیشنهاد کرده‌اند. مایروود<sup>۱۵</sup> در سال ۱۸۱۱ یک روش حل بسته برای پیش‌بینی بارهای وارد بر پوشش تونل ارائه داد، او توصیه کرد قبل از نصب سیستم نگهداری، تنش‌ها را می‌توان با میزان ۱۵ درصد کاهش داد، البته این مقدار کاهش یک مقدار تجربی برای حالت‌های خاص بود. همچنین برای کاهش تنش مقادیر مختلفی توسط افراد دیگر پیشنهاد شد که می‌توان به کاهش ۳۳ درصدی که توسط پانت ارائه شد، اشاره کرد. پانت در سال ۱۸۱۱ نیز نشان داد که پاسخ‌های سه‌بعدی زمین در تونلسازی را می‌توان با تنش‌هایی در مرزهای تونل در مدل دو بعدی اعمال کرد که در واقع این تنش‌ها همان تنش‌های ژئواستاتیک اولیه ایجاد شده در زمین است [۱۸].

باون دیستل با مدلسازی سه‌بعدی تونل و محاسبه تغییر شکل قائم سطح زمین به محاسبه ضریب آزادسازی تنش پرداخته است. وی بر اساس این مدلسازی‌ها، مقدار آزادسازی تنش برای تونل‌های با مقطع نعل اسبی را متناظر با قطر مقطع حفاری (D) و همچنین طول گام حفاری (d)، به صورت جدول ۵ ارائه کرد که بدون شک ایده رابطه  $\beta$  با





شکل ۱۵: مدل نهایی ساخته شده با مدل رفتاری موهر-کولمب

#### ۴- تحلیل نتایج

##### ۴-۱- تحلیل نتایج مدلسازی با مدل خاک سخت‌شونده

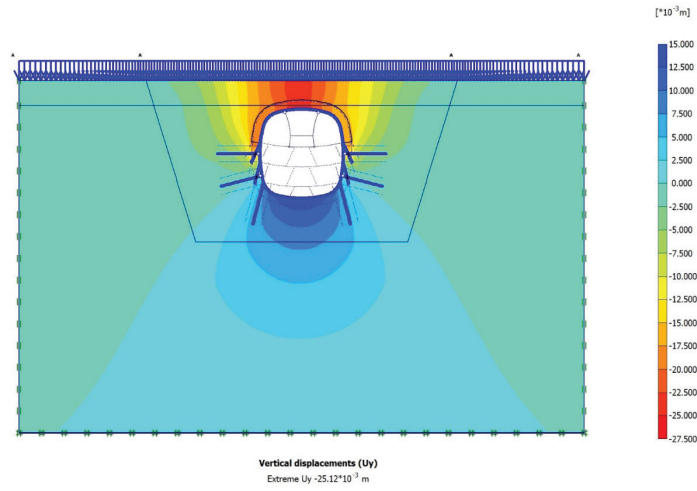
جابه‌جایی‌های ایجاد شده در زمین، ناشی از حفر تونل، شامل مولفه‌های افقی و قائم است. جابه‌جایی‌های قائم در بخش‌های مختلف تونل در اثر حفر تونل در دو جهت رو به بالا و پایین است. همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است در محدوده دوزنقه‌ای کف تونل که که دارای رنگ آبی است با توجه به مقادیر ارایه شده در نوار سمت راست شکل، بیشترین مقدار بالازدگی‌ها اتفاق افتاده است. همچنین ماکزیمم نشست اتفاق افتاده در این مقطع مدلسازی شده مقدار ۲۵٫۱۲ میلی‌متر است که طبیعتاً در محور مرکزی تاج تونل رخ داده است. از طرفی جابه‌جایی‌های افقی ایجاد شده بر روی سطح زمین ناشی از حفر تونل، موجب ایجاد کشش و فشار در بخش‌های مختلف اطراف تونل می‌شود و در صورت وجود سازه‌های سطحی، در آن‌ها ترک‌هایی ایجاد خواهد کرد (شکل ۱۷).

مطابق نوار سمت راست، مقادیر مثبت مربوط به جابه‌جایی‌های رو به سمت راست و مقادیر منفی مربوط به

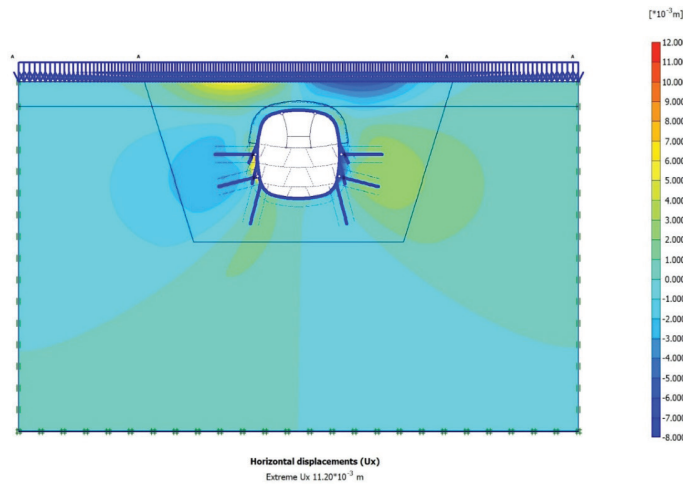
جابه‌جایی‌های رو به سمت چپ است که بیشترین مقدار این جابه‌جایی‌ها، در سطح زمین و به بزرگی ۱۱٫۲ میلی‌متر محاسبه شده است. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نیز به ترتیب منحنی نشست تاج تونل و سطح زمین را نشان می‌دهند. مطابق شکل ۱۹ مشاهده می‌شود ماکزیمم نشست سطح زمین در محور مرکزی تونل و به میزان ۲۳٫۳۷ میلی‌متر به دست آمده است.

##### ۴-۲- تحلیل نتایج مدلسازی با مدل موهر کولمب

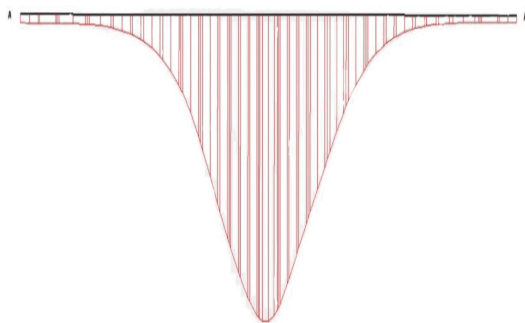
شکل ۲۰ جابه‌جایی‌های قائم ایجاد شده حاصل از انجام مدلسازی با مدل رفتاری موهر-کولمب را نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیشترین جابه‌جایی قائم خاک در تاج تونل به میزان ۲۹٫۱۶ میلی‌متر محاسبه شده است که نسبت به مدل رفتاری خاک سخت‌شونده به مقدار ۴٫۰۴ میلی‌متر عدد بزرگتری را نشان می‌دهد. همچنین مطابق شکل ۲۱ بیشترین مقدار جابه‌جایی افقی ایجاد شده در سطح زمین ۱۱٫۴۵ میلی‌متر است که نسبت به مدل رفتاری خاک سخت‌شونده ۰٫۲۵ میلی‌متر افزایش جابه‌جایی داشته است.



شکل ۱۶: توصیف با رنگ میزان تغییر مکان قائم خاک در مدل رفتاری خاک سخت شونده

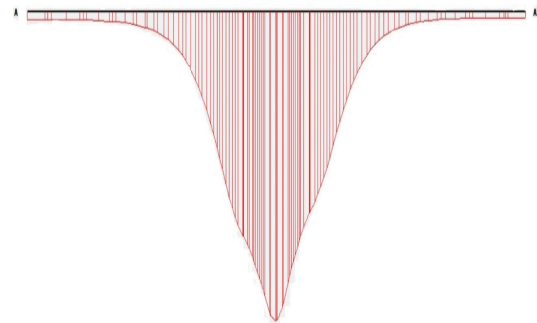


شکل ۱۷: توصیف با رنگ میزان تغییر مکان افقی خاک در مدل رفتاری خاک سخت شونده



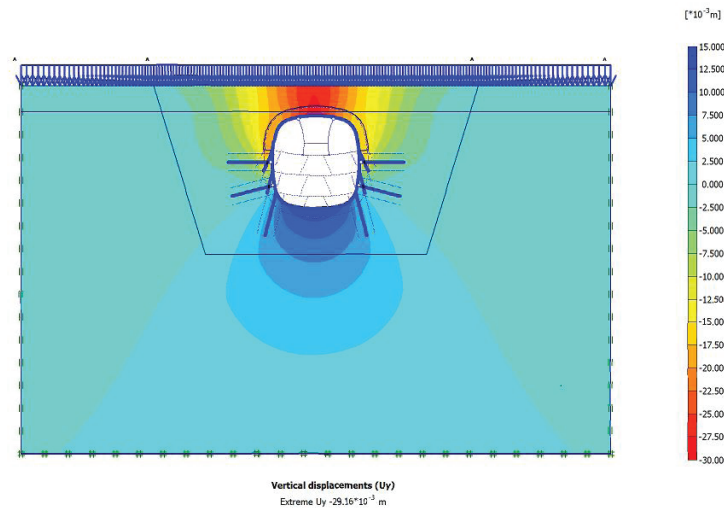
Vertical displacements (Uy)  
Extreme Uy -23.37\*10<sup>-3</sup> m

شکل ۱۹: منحنی تغییر مکان قائم سطح زمین در مدل رفتاری خاک سخت شونده

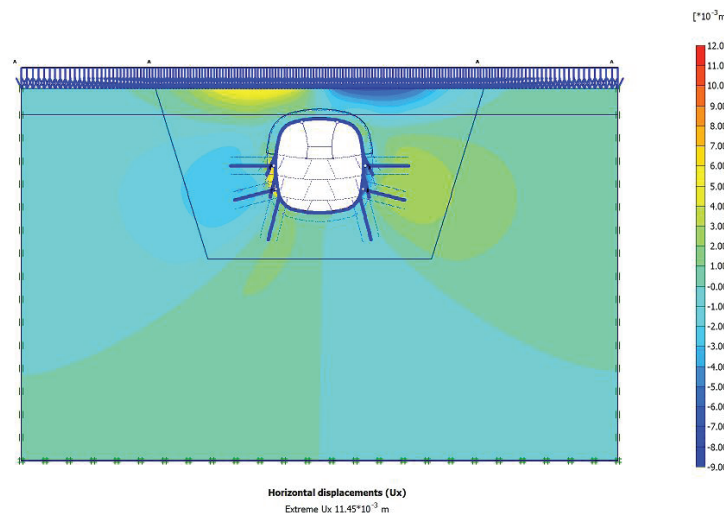


Vertical displacements (Uy)  
Extreme Uy -25.12\*10<sup>-3</sup> m

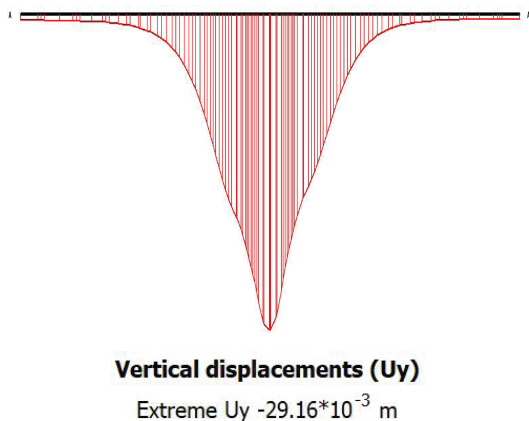
شکل ۱۸: منحنی تغییر مکان قائم سقف تونل در مدل رفتاری خاک سخت شونده



شکل ۲۰: توصیف با رنگ میزان تغییر مکان قائم خاک در مدل رفتاری موهر-کولمب



شکل ۲۱: توصیف با رنگ میزان تغییر مکان افقی خاک در مدل رفتاری موهر-کولمب



شکل ۲۲: منحنی تغییر مکان قائم سقف تونل در مدل رفتاری موهر-کولمب

شکل های ۲۲ و ۲۳ نیز به ترتیب منحنی نشست تاج تونل و سطح زمین را نشان می دهند. مطابق شکل ۲۳ حداکثر نشست سطح زمین در مدل موهر-کولمب ۲۷٫۰۴ میلی متر محاسبه شده که به مقدار ۳٫۶۷ میلی متر بیشتر از حداکثر نشست سطحی در مدل رفتاری خاک سخت شونده به دست آمده است.

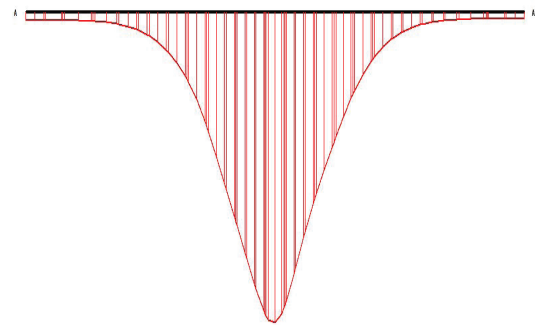
تونل دو طبقه مدرس، با توجه به سطح مقطع بسیار بزرگ، نزدیک بودن به سطح زمین و همچنین با توجه به عبور آن از زیر بزرگراه مدرس، جزو حساس ترین و هزینه برترین مقاطع پروژه تونل آرش- اسفندیار- نیایش و حتی دیگر تونل های شهری حفاری شده در سرتاسر ایران است. به همین دلیل لزوم

## ۵- نتیجه گیری

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته نتیجه گرفته می‌شود که حفاری تونل مدرس، با توجه نتایج مدلسازی‌ها و انجام مقایسه با نتایج پایش‌های انجام گرفته، با به کارگیری روش حفر مرحله‌ای NATM و بهره بردن از المان‌های تقویت خاک همچون فورپولینگ، نیل و میکروپایل، می‌تواند به خوبی و به صورت کنترل شده و ایمن انجام گیرد و باید در مقاطع مشابه در تونل از این تجربه استفاده شود. از طرفی انتخاب و اعمال فاکتور کاهش تنش متناسب با شرایط حفاری تونل مانند سطح مقطع تونل، طول گام حفاری، پارامترهای ژئوتکنیکی و ترتیب و آرایش حفاری، می‌تواند در مدلسازی‌های دوبعدی مربوط به تونل‌های شهری حفر شده به روش NATM، به میزان مطلوبی نتایج نشست‌های سطح زمین را به مقادیر واقعی نزدیک کند و اثر سه‌بعدی حفاری تونل و آزادسازی تنش‌ها را در نظر گیرد. همچنین انتخاب مدل رفتاری خاک سخت‌شونده منجر به حصول نتایج قابل قبول‌تری نسبت به مدل موهر-کولمب در انجام این مدلسازی‌ها شده است و استفاده از این مدل رفتاری در مدلسازی دیگر مقاطع تونل آرش-اسفندیار-نیایش با شرایط مشابه و سایر خاک‌های درشت دانه توصیه می‌شود. نتایج مدلسازی با مدل خاک سخت شونده نشان می‌دهد بیشترین جابه‌جایی قائم خاک در تاج تونل به میزان ۲۵/۱۲ میلی‌متر بیشترین مقدار جابه‌جایی افقی ایجاد شده در سطح زمین ۱۱/۲ میلی‌متر و حداکثر نشست سطح زمین ۲۳/۲۷ میلی‌متر محاسبه شده است در مدل موهر-کولمب بیشترین جابه‌جایی قائم خاک در تاج تونل به میزان ۲۹/۱۶ میلی‌متر محاسبه شده است که نسبت به مدل رفتاری خاک سخت‌شونده به مقدار ۴/۰۴ میلی‌متر عدد بزرگتری را نشان می‌دهد. همچنین بیشترین مقدار جابه‌جایی افقی ایجاد شده در سطح زمین ۱۱/۴۵ میلی‌متر است که نسبت به مدل رفتاری خاک سخت‌شونده ۰/۲۵ میلی‌متر افزایش جابه‌جایی داشته است. در ضمن، حداکثر نشست سطح زمین در مدل موهر-کولمب ۲۷/۰۴ میلی‌متر محاسبه شده که به مقدار ۳/۶۷ میلی‌متر بیشتر از حداکثر نشست سطح زمین در مدل رفتاری خاک سخت‌شونده به دست آمده است.

## ۶- مراجع

- [1] Chakeri, H., Ozcelik, Y., and Unver, B. (2013). "Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB". Tunnelling and



Vertical displacements (Uy)

Extreme Uy -27.04\*10<sup>-3</sup> m

شکل ۲۳: منحنی تغییرمکان قائم سطح زمین در مدل رفتاری موهر-کولمب

بررسی کارآمدی شیوه حفاری، برای استفاده در مقاطع حفاری نشده تونل و یا استفاده در تونل‌های شهری با شرایط مشابه، غیرقابل انکار است که این مهم تنها به وسیله مدلسازی‌های عددی و مقایسه نتایج این مدلسازی‌ها با شرایط واقعی اتفاق افتاده در طول مراحل حفاری، امکان‌پذیر است. یکی از مهم‌ترین مراحل در انجام هرچه دقیق‌تر این مدلسازی‌ها انتخاب مناسب‌ترین مدل رفتاری برای مدلسازی تونل در خاک‌های مختلف است. در این تحقیق سعی شد تا با مدلسازی دوبعدی تونل بزرگ مقطع مدرس تحت فاکتور کاهش تنش مناسب، ضمن نزدیک‌تر کردن نتایج مدلسازی به مقادیر واقعی مناسب، با صرف زمان و هزینه کمتر، سازگارترین مدل رفتاری با خاک تهران در مدلسازی تونل در قسمت‌های درشت دانه تعیین شود. بررسی داده‌های حاصل از قرائت‌های نشست‌سنج‌های نصب شده مربوط به تونل مدرس واقع در کیلومتر ۲۱۵۰ نشان می‌دهد که بیشترین نشست‌های رخ داده در این مقطع، ۲۰/۲ میلی‌متر و در مرحله پایانی مراحل حفاری تونل است. با توجه به امکان مدلسازی حالت باربرداری ناشی از خاکبرداری تونل و تغییرات سختی وابسته به تنش و کرنش در مدل رفتاری خاک سخت‌شونده، حصول نشست‌های کمتر نسبت به مدل رفتاری موهر-کولمب و میزان تطابق بیشتر این مدل با نتایج مانیتورینگ، دور از انتظار نبوده است. با این حال مدل رفتاری موهر-کولمب به علت سادگی و ملموس‌تر بودن پارامترها، امروزه به دفعات توسط محققان و طراحان برای انجام مدلسازی‌های مختلف به منظور آنالیز پایداری تونل در خاک درشت دانه، مورد استفاده قرار گرفته است.



- "Numerics in geotechnics and structures". Elmeppress International, Lausanne.
- [15] Ju, J. (2015). "Prediction of the Settlement for the Vertically Loaded Pile Group Using 3D Finite Element Analyses". Marine Georesources & Geotechnology, 33(3): 264-271.
- [16] Cundall, P. (2008). "FLAC 3D Manual: a computer program for fast Lagrangian analysis of continua (Version 4.0)". Minneapolis, Minnesota, USA.
- [۱۷] رحمن‌نژاد، ا.؛ ۱۳۹۴؛ "اثر مدل رفتاری در نشست سطحی در تونل‌های حفر شده به روش NATM". پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۱۸] امیری، ح. ر.؛ ۱۳۹۵؛ "مدلسازی تونل با روش حفاری NATM در خاک ریزدانه". پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۱۹] شریف زاده، م.؛ عقیقی پور، م.؛ تسوجی زاده، م.؛ ۱۳۸۹؛ "تاثیر طول گام و مراحل حفر در روش حفاری مرحله ای بر میزان نشست سطح زمین در خط ۴ متروی تهران". نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۵، شماره ۱۰، ص ۳۹-۴۶.
- [20] ÇELİK, S. (2017). "Comparison of Mohr-Coulomb and Hardening Soil Models' Numerical Estimation of Ground Surface Settlement Caused by Tunneling". Iğdir University Journal of the Institute of Science and Technology, 7(4): 95-102.
- [21] Mirsalari, S. E., Fatehi Marji, M., Gholamnejad, J., and Najafi, M. (2017). "A boundary element/finite difference analysis of subsidence phenomenon due to underground structures". *Journal of Mining and Environment*, 8(2): 237-253.
- [22] Xie, X., Yang, Y., and Ji, M. (2016). "Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shield-driven tunnel in Shanghai, China". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 51: 120-132.
- [۲۳] مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار؛ ۱۳۹۴؛ "مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک طرح زیرگذر آرش-اسفندیار-نیایش".
- [24] Berisavljevic, Z., Milenkovic, S., Berisavljevic, D., and Susicet, N. (2015). "Convergence Predictions and Primary Support Optimization of the Tunnel Progon". *Engineering Geology for Society and Territory*, Springer, 6: 323-328.
- Underground Space Technology, 36: 14-23.
- [2] Fasihnikoutalab, M. H., Huat, B. B. K., Asadi, A., and Daneshmand, S. (2012). "Numerical stability analysis of tunnel by PLAXIS". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17: 451-461.
- [3] Papastamos, G., Stiros, S., Saltogianni, V., and Kontogianni, V. (2015). "3-D strong tilting observed in tall, isolated brick chimneys during the excavation of the Athens Metro". *Applied Geomatics*, 20: 115-121.
- [4] Melis, M., Medina, L., and Rodríguez, J. M. (2002). "Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension". *Canadian Geotechnical Journal*, 39(6): 1273-1287.
- [5] Migliazza, M., Chiorboli, M., and Giani, G. P. (2009). "Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of Milan underground". *Computers and Geotechnics*, 36: 113-124.
- [6] Yahya, S. M., and Abdullah, R. A. (2014). "A Review on Methods of Predicting Tunneling Induced Ground Settlements". *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19: 5813-5826.
- [7] Peck, R. B. (1969). "Deep excavation and tunneling in soft ground". In proceeding of 7th International Conference on SMFE, Mexico, 225-290.
- [8] Möller, S. C. (2006). "Tunnel induced settlements and structural forces in linings". University of Stuttgart - Institute of Geotechnik Stuttgart, Germany, 108-125.
- [۹] فلاح‌زاده شهرکتی، م.؛ ۱۳۹۱؛ "مدلسازی عددی دوراهی تونل‌های شهری- مطالعه موردی تونل نیایش در آبرفت درشت‌دانه تهران". پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس.
- [10] Kuesel, T. R., King, E. H., and Bickel, J. O. (2012). "Tunnel engineering handbook". Springer Science & Business Media.
- [11] Peck, R. B., Hendron, A., and Mohraz, B. (1972). "State of the art of soft-ground tunneling". In North American Rapid Excavation & Tunneling Conference proceeding, 259-286.
- [12] Gulvanessian, H., Calgaro, J. A., and Holický, M. (2002). "Designer's guide to EN 1990: eurocode: basis of structural design". Thomas Telford.
- [13] Obrzud, R. F. (2010). "On the use of the Hardening Soil Small Strain model in geotechnical practice". *Numerics in Geotechnics and Structures*, 15-32.
- [14] Zimmermann, T., Truty, A., and Podles, K. (1985-2010).

- <sup>۱</sup> Peck
- <sup>۲</sup> Mohr-Coulomb
- <sup>۳</sup> Hardening Soil
- <sup>۴</sup> Small Strain
- <sup>۵</sup> Sven Moller
- <sup>۶</sup> Steinhaldenfeld
- <sup>۷</sup> Heinenoord
- <sup>۸</sup> Xie et al.
- <sup>۹</sup> Yingbin San Road
- <sup>۱۰</sup> Lattice Girder
- <sup>۱۱</sup> Shotcrete
- <sup>۱۲</sup> Forepoling
- <sup>۱۳</sup> Nailing
- <sup>۱۴</sup> Micropile
- <sup>۱۵</sup> Muir Wood