

### بررسی تاثیر مدل رفتاری خاک بر مدل سازی نشست ناشی از حفر تونل در مترو خط سه تهران

#### مقاله پژوهشی

موسی علی‌محمدی<sup>۱\*</sup>؛ شکرالله زارع<sup>۲</sup>؛ سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، mousaalimohamadi@yahoo.com

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، zare@shahroodut.ac.ir

۳- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، jalalisme@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۳/۱۰/۱۳؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹

شماره صفحات: ۱۳۳ تا ۱۴۷

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2025.15547.1495

واژگان کلیدی	چکیده
اندرکنش تونل و زمین مدل رفتاری خاک سخت‌شونده مدل سازی عددی نشست ناشی از حفر تونل <i>PLAXIS 3D 2020</i>	ل‌زوم بررسی و تخمین در ست نشست‌های سطح زمین از مهمترین اصول طراحی تونل‌های کم عمق شهری است. هدف از این مقاله، بررسی اثر مدل‌های رفتاری الاستوپلاستیک شامل مدل موهر-کلمب، سخت شونده و مدل سخت شونده با کرنش کوچک بر نتایج مدل‌سازی عددی ان‌درکنش تونل و زمین درون‌گیر (محیط اطراف تونل) است. بدین منظور، تونل مترو خط سه تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب و مدل‌سازی عددی ان‌درکنش تونل و زمین درون‌گیر این تونل با استفاده از روش اجزای محدود (نرم افزار <i>PLAXIS 3D 2020</i> ) و مطابق با فرآیند اجرایی انجام و نتایج حاصل در قالب جابه‌جایی‌های اطراف تونل مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی با استفاده از نتایج رفتار سنجی و مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده نشست سطح زمین اعتبار سنجی شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد، جابه‌جایی‌های قائم پیش‌بینی شده با مدل موهر-کلمب از هر دو مدل رفتاری سخت شونده کمتر بوده است. علاوه بر این، مدل موهر-کلمب برای تمام مراحل حفاری، یک بالا آمدگی شدید را نسبت به دو مدل سخت شونده پیش‌بینی می‌کند. همچنین، نتایج حاصل از نشست سطح زمین در مدل‌های موهر-کلمب (۱۲ در حدود میلی‌متر)، بیشترین انطباق را با نتایج حاصل از رفتار سنجی (در حدود ۱۰ میلی‌متر) داشته است.

پیش‌بینی‌ها افزایش یافته که این موضوع در نهایت منجر به افزایش کارایی و کاهش مخاطرات پروژه خواهد شد. پیش‌بینی جابه‌جایی‌های سطحی (نشست سطح زمین) در فرآیند احداث تونل یک امر بسیار مهم بوده و مطالعات گسترده‌ای در این خصوص انجام شده است. به طور کلی، مطالعات انجام شده در خصوص جابه‌جایی‌ها (به ویژه نشست) ناشی از حفر تونل را می‌توان به روش‌های تجربی ( *PECK*, *Mair et al.*, 1969)؛ تحلیلی ( *Mair et al.*, 1983)؛

#### ۱- مقدمه

حفر فضاها‌ی زیرزمینی از قبیل تونل با جابه‌جایی و تغییر شکل زمین اطراف (محیط درون‌گیر) و نشست سطح زمین همراه است. بررسی و پیش‌بینی این تغییر شکل‌ها به‌ویژه برای تونل‌های شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و دقت این نوع پیش‌بینی‌ها به شدت به نوع و سطح مدل‌های مورد استفاده وابسته است. با به‌کارگیری مدل مناسب برای بررسی رفتار جابه‌جایی‌های اطراف فضاها‌ی زیرزمینی مثل تونل، دقت

\* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه شاهرود؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه‌ی سوم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره‌ی تلفن: ۰۳۰۰-۳۲۳۰۰۲۳۰؛ دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۰۰۲۸۰

در پژوهشی با عنوان تاثیر مدل های رفتاری بر تحلیل عددی سازه های زیرزمینی، به بررسی سه مدل رفتاری موهر کلمب، مدل سخت شونده و مدل سخت شونده با کرنش کوچک پرداخته است و در این پژوهش، این گونه نتیجه گرفتند که استفاده از مدل های رفتاری پیشرفته تر که شامل خطی بودن پیش از شکست و صلبیت بالا در کرنش های بسیار کوچک می باشد، به طور قابل توجهی بر آورد جابه جایی ها را بهبود می بخشد. نعمت الهی و دیاس (۲۰۱۹) به بررسی تاثیر مدل رفتاری موهر کلمب و مدل رفتاری پوش تسلیم در خط دو مترو شیراز پرداخته و نتایج نشان از بهتر بودن مدل رفتاری پوش تسلیم نسبت به مدل رفتاری موهر کلمب می باشد. اسلامی و همکاران (۲۰۲۰) تاثیر مدل های رفتاری موهر کلمب و کم کلی اصلاح شده را به میزان نشست سطح زمین در خط دو مترو مشهد مورد بررسی قرار دادند. اسلامی بیان داشت که مدل کم کلی اصلاح شده نسبت به مدل موهر کلمب نتایج نشست طولی و عرضی را با دقت بیشتری نشان می دهد. زاکم و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تاثیر مدل رفتاری سخت شونده، سخت شونده با کرنش کوچک، مدل کم کلی اصلاحی و مدل نرم شونده در تونلی در شانگهای چین پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که مدل رفتاری سخت شونده با کرنش کوچک نسبت به سایر مدل ها نتایج بهتری دارد. صیادی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی تاثیر انتخاب مدل رفتاری خاک (مدل موهر کلمب، مدل سخت شونده و مدل سخت شونده با کرنش کوچک) بر مدل سازی نشست ناشی از حفر تونل در تونل امیر کبیر تهران پرداخته اند و نتایج این تحقیق نشان می دهد که مدل رفتاری سخت شونده، بیشترین انطباق را با نتایج حاصل از رفتارسنجی داشته است. به طور کلی، مدل رفتاری موهر کلمب رایج ترین مدل رفتاری مورد استفاده در شبیه سازی عددی اندرکنش تونل و زمین درون گیر بوده و عمده شبیه سازی های عددی با استفاده از این مدل رفتاری انجام شده است. با این وجود، بررسی متون علمی در زمینه مدل سازی عددی تونل های شهری (به ویژه مقالات متعدد منتشر شده با مطالعه موردی تونل های شهری در کلان شهرهای ایران از جمله، تهران، شیراز، مشهد، کرج و اصفهان) نشان می دهد در عمده مطالعاتی این زمینه، قریب به اتفاق محققین از مدل رفتاری موهر-کلمب برای مدل سازی استفاده نموده و مطالعات بسیار

(wang et al., 1983; wang et al., 2018) و عددی (wang et al., 2018; meng et al., 2018) تقسیم بندی نمود. اولین تلاش ها برای پیش بینی نشست ناشی از حفر تونل با استفاده از روش های تجربی انجام شده است. روش های تجربی دارای چارچوب محاسباتی ساده ای بوده و یک تخمین کلی و ابتدایی از جابه جایی های ناشی از حفر تونل را ارائه می کنند (sarder & Rini, 2014; miglizza et al., 2009). معادلات حاکم بر جابه جایی های ناشی از حفر تونل در مطالعات جدیدتر به سمت توسعه روش های تحلیلی و راه حل های فرم بسته گرایش پیدا کردند (zhang et al., 2017; wong et al., 2018). مدل های تحلیلی دارای فرضیات ساده کننده بسیار زیادی بوده و در اعمال بسیاری از پارامترهای موثر در اندرکنش تونل و زمین درون گیر شامل پارامترهای ژئومکانیکی زمین، اثر آب زیرزمینی، شکل مقطع تونل و روش حفاری و نصب سیستم نگهداری دارای ضعف شدید هستند. به همین دلیل در سالیان اخیر، استفاده از روش های عددی با قابلیت هایی همچون امکان مدل سازی رفتارهای مختلف زمین، امکان در نظر گرفتن رفتار ناهمسانگرد و ناهمگن محیط، قابلیت تحلیل مسائل غیرخطی، قابلیت مدل سازی تونل با اشکال مختلف و امکان اعمال روش اجرایی، استفاده از مدل های عددی برای شبیه سازی تغییر شکل های اطراف تونل و پیش بینی نشست ناشی از حفر تونل به شدت گسترش یافته است (daling et al., 2018; sainoki et al., 2017). کارایی مدل سازی عددی به شدت تحت تاثیر پارامترهای ورودی، میزان ساده سازی معادلات حاکم و سطح گسسته سازی معادلات است (Brinkgreve, 2005; Lade, 2005). به طور خاص، مدل رفتاری نقش بسیار کلیدی در صحت و دقت نتایج مدل های عددی به ویژه در مسائل غیرخطی مرتبط با اندرکنش تونل و زمین درون گیر خواهد داشت (Atkinson & sallfors, 1991; obrzud, 1983). وجود پدیده های شاخصی از جمله رفتار بازگشت ناپذیر، شکست (تسلیم) و اتساع در مصالح خاکی، اهمیت مدل رفتاری خاک را در مسائل مهندسی بیش از پیش آشکار نموده و این پدیده ها نشان می دهند که مدل های رفتاری خطی ساده و یا مدل های الاستوپلاستیک کامل کفایت لازم برای بررسی مسائل مهندسی مرتبط با اندرکنش زمین و تونل را ندارند (Addenbrooke et al., 1997). حجازی و همکاران (۲۰۱۸)

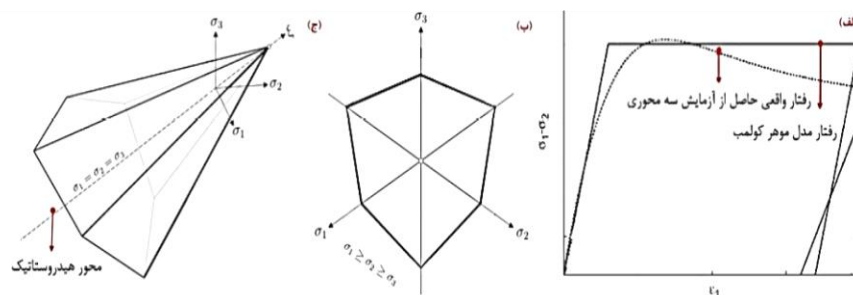
پیوسته، مجموعه‌ای از معادلات شامل معادلات عمومی تعادل، سینتیک و معادلات رفتاری مورد نیاز است. معادلات رفتاری در برگرفته خصوصیات محیط هستند و رابطه بین مؤلفه‌های تانسورهای تنش و تغییر شکل را بیان کنند. ساده‌ترین نوع مدل‌های رفتاری، در قالب مدل الاستیک و بر اساس قانون هوک بیان می‌شود. مدل الاستیک قادر به بررسی رفتار پلاستیک نبوده و علاوه بر این، به دلیل هم جهتی نمو تغییر شکل و تنش، در پیش‌بینی اتساع نیز دارای عملکرد مناسبی نیستند. بخشی از این محدودیت‌ها در مدل‌های رفتاری الاستو پلاستیک رفع شده و با افزایش سطح پیچیدگی و تعداد پارامترهای رفتاری، دقت پیش‌بینی مدل‌های رفتاری افزایش می‌یابد. مدل موهر کولمب (الاستیک-پلاستیک کامل) یکی از ساده‌ترین و پر کاربردترین مدل‌های رفتاری غیرخطی در خاک است (شکل ۱ الف). این مدل، دربرگیرنده دو پارامتر الاستیک از قانون هوک شامل مدول یانگ ( $E$ ) و نسبت پواسون ( $\nu$ )، دو پارامتر از معیار شکست کولمب شامل زاویه اصطکاک ( $\phi$ ) و چسبندگی ( $C$ ) و یک پارامتر از قانون جریان شامل زاویه اتساع ( $\psi$ ) است. معادله سطح تسلیم در مدل موهر-کولمب مطابق با رابطه (۱) بیان می‌شود  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  معرف تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه است.

$$f(\sigma_{ij}) = \sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi - 2c \cos \phi \leq 0 \quad (1)$$

معدودی با به کارگیری مدل‌های رفتاری پیشرفته و به طور خاص مدل‌های رفتاری سخت شونده انجام شده است. همچنین، مطالعات بسیار محدودی در رابطه با نقش مدل رفتاری خاک (به ویژه مدل‌های سخت شونده) بر دقت نتایج حاصل از مدل‌های عددی پیش‌بینی نشست ناشی از حفر تونل در محیط‌های شهری انجام شده که این مطالعات اندک نیز به بررسی پارامتری محدود هستند. در این مقاله، نقش مدل رفتاری خاک بر دقت و کارایی نتایج مدل‌سازی عددی نشست ناشی از حفر تونل در نواحی شهری مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌سازی جابه‌جایی‌ها (نشست سطح زمین) ناشی از حفر تونل با استفاده از سه مدل رفتاری مختلف شامل مدل موهر کولمب ( $Mohr-coulomb; MC$ )، مدل سخت شونده استاندارد ( $Hardening Soil; HS$ )، و مدل سخت شونده با کرنش‌های کوچک ( $HS-Small; HSS$ ) انجام شده است. بدین منظور، ابتدا از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا، بر روی توده خاک درون‌گیر تونل مترو خط سه تهران استفاده شده و پس از تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی، مدل‌سازی عددی مطابق با شرایط واقعی اجرایی تونل انجام شده است. در نهایت نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با یکدیگر و با نتایج رفتارسنجی مقایسه و نقش مدل رفتاری در دقت نتایج مدل‌سازی عددی ارزیابی شده است.

## ۲- تئوری مدل‌های رفتاری

برای مطالعه رفتار خاک در چارچوب مکانیک محیط‌های



شکل ۱- نمایش خصوصیات مدل موهر کولمب. الف: رفتار الاستوپلاستیک مدل موهر کولمب در مقایسه با نتایج آزمایش (Herle, et al., 2000) ب: سطح گسیختگی مدل موهر کولمب در پلان ج: سطح گسیختگی موهر کولمب در فضای تنش‌های اصلی

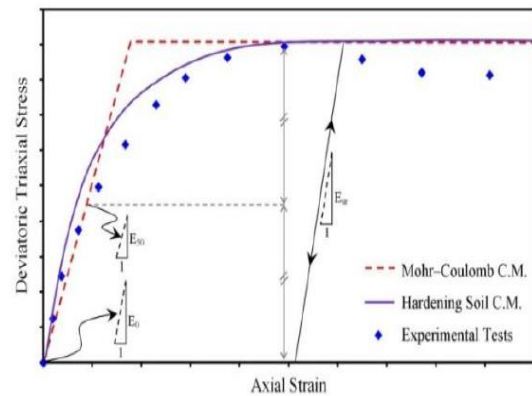
اصلی آن در امتداد محور هیدرواستاتیک قرار دارد (شکل ۱- ب). عدم اعمال تنش اصلی میانی  $\sigma_2$  منجر به ایجاد سطح

در فضای تنش‌های اصلی، سطح گسیختگی مدل موهر کولمب یک هرم با مقطع شش وجهی نامنظم بوده که محور

گسیختگی غیر پیوسته (شکل ۱-ج) در مدل موه‌ر کولمب شده (peck, 1969; zhang et al., 2017; ochial & lade, 1983) و همچنین، سطح تنش پس از رسیدن به مقدار تنش تسلیم، با افزایش کرنش‌های پلاستیک، ثابت می ماند که این موضوع بیانگر وقوع اتساع پیوسته خواهد بود (lade, 1983; ochiai & lade, 2005). برخلاف مدل‌های الاستوپلاستیک ایده آل، مدل سخت شونده خاک مدلی مطلوب برای گستره وسیعی از خاک‌ها است. این مدل، با هدف بازتولید پدیده‌های ماکروسکوپی موجود در خاک طراحی شده است. سطح تسلیم در مدل‌های با مکانیزم سخت شونده، در فضای تنش‌های اصلی موقعیت ثابتی نداشته امکان توسعه سطح تسلیم در اثر تغییر شکل پلاستیک و امکان بازتولید حالت‌های پس از شکست به صورت واقع بینانه‌تری فراهم می‌شود. در مدل رفتاری با مکانیزم سخت شونده، حالت تنش حدی با استفاده از پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک و زاویه اتساع بررسی شده و رفتار پیش از شکست خاک با استفاده از سه پارامتر مدول صلبیت شامل مدول بارگذاری سه محوره ( $E_{50}^{ref}$ )، مدول باربرداری و بارگذاری ( $E_{ur}^{ref}$ )، مدول بارگذاری ادنومتري ( $E_{50}^{Oed}$ ) توصیف می‌شود (شکل ۲).

(Brinkgreve, 2005). سخت شوندگی برشی، تابعی از صلبیت بارگذاری سه محوری ( $E_{50}^{ref}$ ) بوده و سخت شوندگی تراکمی نیز برای تعیین کرنش پلاستیک ناشی از بارگذاری فشاری اولیه، توسط صلبیت ادنومتري ( $E_{50}^{Oed}$ ) کنترل می شود. با توجه به عدم توانایی سطح تسلیم برشی در پوشش‌دهی کرنش‌های حجمی رخ داده در بارگذاری فشاری، نوع دیگری از سطح شده است. این سطح تسلیم پیش از آنکه در این مدل مورد استفاده قرار گیرد، با هدف رفع محدودیت‌های ناشی از آن در برخی مدل‌های کلاسیک توسط تعدادی از محققین مورد استفاده قرار گرفته بود (Drucker at al., 1957). وجود سطح تسلیم کپ (Cap) در این مدل، امکان باز تولید رفتار مربوط به اتساع خاک را فراهم آورده است. در مصالح با رفتار اتساعی از جمله خاک‌ها، پس از فرایند برش، با رسیدن چگالی دانه‌ها به حد چگالی بحرانی، اتساع (Dilation Cut Off) پایان می‌یابد (Rowe, 1962). این ویژگی از رفتار خاک در مدل سخت شونده با بهره‌گیری از حد اتساع به خوبی باز تولید می‌شود (Gryczmanski, 2009). یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های مدل رفتاری سخت شونده، وجود صلبیت بالا در سطوح کرنش کوچک (کمتر از ۵-۱۰) است (Burland, 1989). علاوه بر این، در مدل سخت شونده خاک، فرض بر این است که رفتار مصالح در طول باربرداری و بارگذاری مجدد، خطی است (Gryczmanski, 2009)؛ در حالی که گستره کرنشی که در آن می‌توان رفتار خاک را به صورت الاستیک واقعی در نظر گرفت، بسیار کوچک بوده و با افزایش دامنه کرنش، صلبیت خاک به طور غیرخطی زوال می‌یابد (Jardine, at al., 1986; Mair, 1993; Clayton, 2011). به منظور ارائه تخمین دقیق تر و قابل اعتمادتری از جابه‌جایی‌ها، مدل سخت شونده با کرنش‌های کوچک (Benz, 2007) معرفی شده است. از جمله ویژگی‌های این مدل می‌توان از احتساب رفتار پسماند و روابط الاستیک غیرخطی بین تنش و کرنش در گستره کرنش‌های کوچک و همچنین لحاظ نمودن تغییرات شدید صلبیت با افزایش دامنه کرنش برشی در گستره کرنش‌های کوچک اشاره نمود. علاوه بر پارامترهای معرفی شده در مدل سخت شونده، دو پارامتر دیگر شامل مدول برشی در کرنش‌های کوچک ( $G_0^{ref}$ ) در فشار مرجع و حد آستانه‌ای کرنش برشی ( $\gamma_{0.7}$ ) در بارگذاری اولیه، به مدل سخت شونده

شکل ۲- مقایسه عملکرد مدل رفتاری سخت شونده با موه‌ر کولمب در پیش بینی کرنش نمونه خاک تحت تنش سه محوره (wong, 1975)



شکل ۲- مقایسه عملکرد مدل رفتاری سخت شونده با موه‌ر کولمب در پیش بینی کرنش نمونه خاک تحت تنش سه محوره (wong, 1975)

این مدل در بردارنده دو مکانیزم سخت شوندگی شامل، مکانیزم برشی (Shear Hardening Mechanism) برای مدل سازی کرنش‌های برشی برگشت ناپذیر تحت بارگذاری تفاضلی و مکانیزم سخت شوندگی تراکمی (Compression Hardening Mechanism) به منظور مدل سازی کرنش‌های حجمی بازگشت ناپذیر در اثر بارگذاری فشاری اولیه است

### ۳-۲- وضعیت زمین شناسی و ژئوتکنیکی

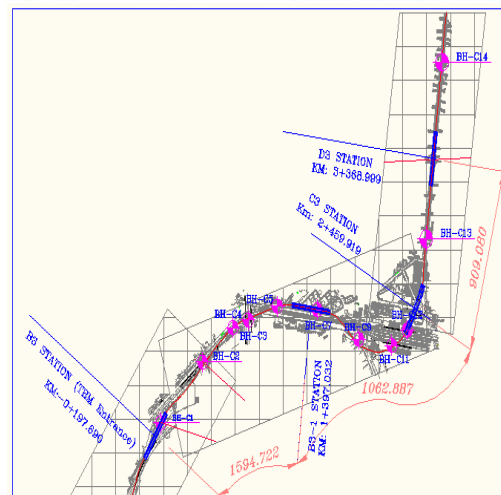
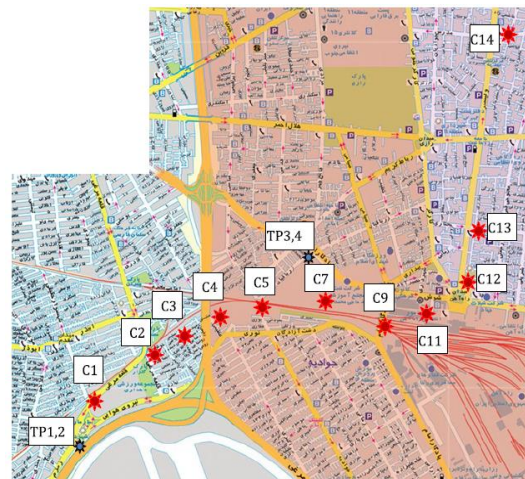
شهر تهران بر روی نهشته‌های آبرفتی که از کوهپایه‌های البرز تا کناره کویر جنوبی تهران گسترش دارند، بنا شده است. این رسوبات حاصل فعالیت رودخانه‌ها و سیلاب‌های جریان یافته از کوه‌های البرز هستند و به دنبال چرخه‌های فرسایشی پلیوسن-پلیستوسن (سازند هزار دره) انباشته شده‌اند. آبرفت تهران از نظر خاستگاه ویژگی‌های یکسانی دارند ولی تناوب چرخه‌های آب و هوایی و حتی رخداد‌های زمین ساختی بر ویژگی‌های این آبرفت‌ها اثر گذار بوده و با توجه به ویژگی‌های ظاهری، تغییرات فیزیکی و مکانیکی از جمله لایه‌بندی، دانه بندی، جورشدگی، تخلخل، نفوذپذیری، هوازدگی، درجه سمانتاسیون، ناپیوستگی‌های رسوبی، مقاومت مکانیکی و تکتونیک از قدیم به جدید سازند اصلی تقسیم شده است. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر روی آبرفت‌های دشت تهران انجام شده است. بر اساس حفاری‌های انجام شده در مطالعات مترو که به صورت گمانه‌های اکتشافی و چاهک‌های دستی به صورت پراکنده در سرتاسر تهران به عمل آمده و همچنین با استفاده از نتایج آزمایشگاه‌های صحرایی و نیز آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های حاصل از حفاری‌ها، نهشته‌های دشت تهران را از شمال به جنوب از نظر خصوصیات ژئوتکنیکی به چهار بخش متمایز تقسیم کرده است. ایشان این بخش‌ها را با علائم *A, B, C, D* مشخص کرده و مرز بین آن‌ها را تقریبی مطرح می‌نماید. این بخش‌ها تقریباً بصورت نوارهای شرقی-غربی بوده که به ترتیب از شمال به جنوب تهران گسترده شده‌اند. در بخش‌های شمالی، آبرفت‌ها از شن و ماسه قلوه‌سنگ دار با دانسیته زیاد تشکیل شده است. در بخش میانی نیز که به دو زیر بخش درشت‌دانه و ریزدانه تفکیک شده، مقاومت مکانیکی و دانسیته خاک نسبت به بخش‌های شمالی کمتر ذکر شده است. رسوبات بخش جنوبی نیز عموماً از ریزدانه تشکیل شده است. شکل ۴، به عنوان جمع بندی کلی حاصل از مطالعات انجام شده و نتایج بدست آمده از حفاری گمانه‌ها و چاهک‌های دستی، سایت پروژه بیشتر منطبق بر نهشته‌های (C) آبرفت‌های تهران می‌باشد.

با کرنش‌های کوچک اضافه شده‌اند ( Santos, 2001; ) و ویژگی‌هایی از این قبیل، مدل سخت شونده با کرنش کوچک را برای استفاده در مسائل مرتبط با بارگذاری و باربری مانند حفاری تونل و یا دیوارهای حائل مناسب نموده است.

### ۳-۳- مطالعه موردی: تونل مترو خط سه تهران

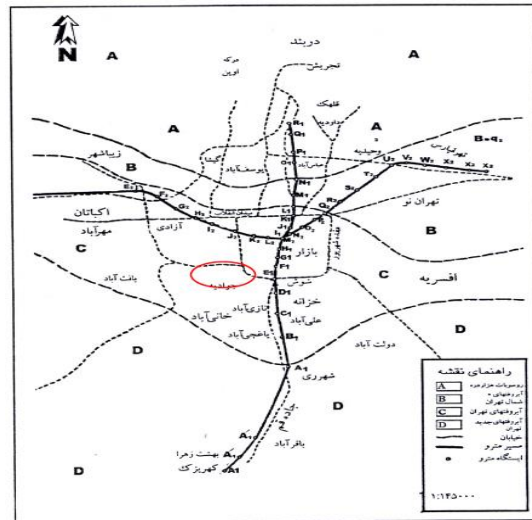
#### ۱-۳- معرفی پروژه

موقعیت پروژه در تهران، خیابان ولیعصر از خیابان فروزش تا میدان راه آهن و از ایستگاه راه آهن تا بزرگراه نواب و در ادامه تا انتهای خیابان قلعه مرغی قرار دارد. شکل ۳، موقعیت پروژه و محل گمانه‌ها را بر روی نقشه تهران نشان می‌دهد.



شکل ۳- موقعیت جغرافیایی پروژه و محل گمانه‌های ماشینی و چاهک‌های دستی (Ghaem, 2010)

خط سه تهران (BH2) با استفاده از روش عددی اجزای محدود و نرم افزار *PLAXIS3D 2020* انجام شده است. با توجه به تقارن مسئله، از یک مقطع نیم دایره و گسترش عرضی و عمقی به ترتیب ۷۰ در ۴۰ متر برای مدل سازی عددی استفاده شده فاصله قائم تاج تونل تا سطح زمین ۱۰ متر (معادل بر روباره تونل) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، ابعاد مدل به گونه ای انتخاب شده که اثر مرزهای مدل بر روی نتایج محسوس نبوده و بعد از حفاری تونل، در مقادیر تنش های مرزی (بر روی مرزهای خارجی قائم مدل) دچار تغییر چندانی نشود. بعد از ساخت مدل هندسی، کل محدوده داخلی مدل با استفاده از المان های مثلثی ۱۵ گره ای مش بندی شده است (شکل ۵). برای تخصیص ویژگی های ژئوتکنیکی (پارامترهای رفتاری خاک) به زمین از مقادیر مندرج در جدول ۱، استفاده شده است. با توجه به پایین بودن سطح آب زیرزمینی، ملاحظات مربوط به آب زیرزمینی در تحلیل های عددی لحاظ نشده است. برای اعمال شرایط اولیه، تنش قائم به صورت ثقلی و تنش افقی با استفاده از نسبت  $k_0$  (تابعی از زاویه اصطکاک داخلی خاک) در نظر گرفته شده است. فشار سینه کار ۹۰ کیلو پاسکال و فشار تزریق ۱۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- نقشه حدود مرز بندی نهشته های رسوبی دشت تهران و موقعیت ساختگاه به روی آن (Ghaem, 2010)

#### ۴- مدل سازی مساله

به منظور بررسی نقش مدل رفتاری بر روی اندرکنش تونل- زمین درون گیر ( محیط اطراف تونل) و به ویژه نشست ناشی از حفر تونل، از روش مدل سازی عددی استفاده شده است. مدل سازی عددی اندرکنش تونل و زمین درون گیر برای مترو

جدول ۱- مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطقه مورد مطالعه

پارامتر	Clay1	Ge1	Clay2	sand	Clay3	Ge2	Clay4	به کارگیری در مدل رفتاری		
								HSS	HS	MC
$C$ (KN/m2)	۱۱,۷۶	۲۹,۴	۱۱,۷۶	۲۹,۴	۱۱,۷۶	۲۹,۴	۳۱,۳	✓	✓	✓
$\phi$	۳۸,۹	۳۱,۳	۳۸,۹	۳۱,۳	۳۸,۹	۳۱,۳	۳۱,۳	✓	✓	✓
$\theta$	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	✗	✗	✓
$\gamma_{Sat}$ (KN/m3)	۱۹,۶۱	۱۸,۳۸	۱۸,۳۲	۱۸,۳۲	۱۹,۱۳	۲۰,۲۵	۱۸,۳۲	✓	✓	✓
$\gamma_{unsat}$ (KN/m3)	۱۶,۸۱	۱۶,۴۸	۱۶,۸۱	۱۶,۴۸	۱۶,۸۱	۱۸,۰۵	۱۶,۴۸	✓	✓	✓
$E_{50}^{ref}$ (KN/m2)	$33,26e^3$	$69,85e^3$	$69,85e^3$	$69,85e^3$	$69,85e^3$	$69,85e^3$	$69,85e^3$	✓	✓	✗
$E_{50}^{Oed}$ (KN/m2)	$33,26e^3$	$69,85e^3$	$69,85e^3$	$69,85e^3$	$69,85e^3$	$69,85e^3$	$69,85e^3$	✓	✓	✗
$E_{ur}^{ref}$ (KN/m2)	$99,78e^3$	$209,6e^3$	$209,6e^3$	$209,6e^3$	$209,6e^3$	$209,6e^3$	$209,6e^3$	✓	✓	✗
$\gamma_{0.7}$	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۲	۰,۰۰۰۲	✓	✗	✗

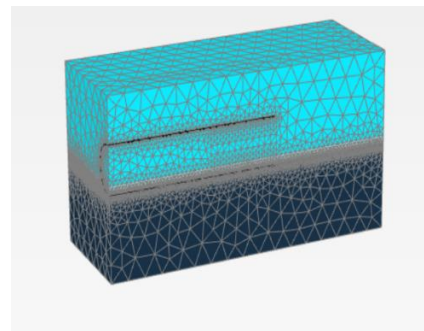
جدول ۲- مشخصات لاینینگ تونل

پارامتر	$\gamma_{Sat}$ (KN/m3)	$\gamma_{unsat}$ (KN/m3)	$E$ (KN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (KN/m3)	$G$ (KN/m <sup>2</sup> )	$E_{0ed}$ (KN/m <sup>2</sup> )
لاینینگ	۲۷	۲۷	۳۱e <sup>۶</sup>	۰٫۱	۱۴٫۰۹e <sup>۶</sup>	۳۱٫۷e <sup>۶</sup>

جدول ۳- مشخصات سپر TBM

پارامتر	$d$ (m)	$\gamma$ (KN/m3)	$E_1$ (KN/m <sup>2</sup> )	$E_2$ (KN/m <sup>2</sup> )
TBM	۸٫۹	۲۴۷	۲۰۰e <sup>۶</sup>	۲۰۰e <sup>۶</sup>

شده‌اند. الگوی جابه‌جایی قائم در اطراف تونل به گونه‌ای است که محدوده زیرین تونل دارای جابه‌جایی قائم در جهت مثبت بوده (جابه‌جایی به صورت بالا آمدگی) و در بخش بالای تونل، عمده جابه‌جایی‌های قائم در جهت منفی (معادل با نشست) است. تفاوت اصلی نتایج در این همه مراحل مربوط به بالا آمدگی کف بوده و این تفاوت در مدل رفتاری MC بسیار مشهود است. مطابق با شکل ۹ تا شکل ۱۱، در مدل MC، توزیع و بزرگی جابه‌جایی قائم مربوط به بالا آمدگی کف به طور قابل توجهی بیش از دو مدل سخت شونده بوده است. به عبارت دیگر، در هر سه مدل رفتاری، جابه‌جایی کف تونل (محدوده‌ای که خاک روی آن برداشته شده) از نوع بالا آمدگی بوده که مقادیر این نوع جابه‌جایی در مدل رفتاری MC بسیار بیشتر از دو مدل دیگر است. در این حالت، مدل‌های رفتاری HSS و HS هم مقدار نشست در بالای تاج تونل و هم مقدار نشست سطح زمین را بیشتر از مدل MC پیش‌بینی می‌کنند. همچنین، در مدل رفتاری MC، توزیع و بزرگی جابه‌جایی قائم مربوط به بالا آمدگی کف، به طور قابل توجهی بیش از دو مدل سخت شونده است.

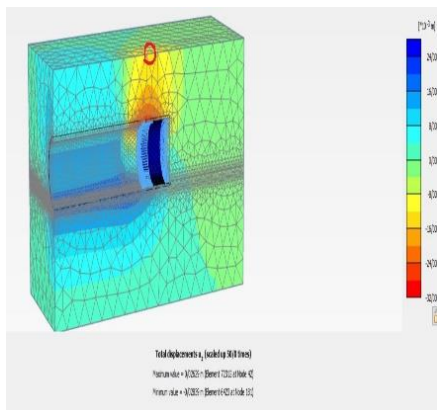


شکل ۵- مش بندی مدل

مدل‌سازی اندرکنش تونل و زمین، مطابق با روش اجرایی تونل انجام شده است. در این مدل‌سازی ۲۵ متر از تونل، حفاری و لاینینگ شده و بعد از آن ۱۶٫۵ متر در یازده گام ۱٫۵ متری حفاری می‌شود و مراحل حفاری اینگونه است که اول فشار سینه کار اعمال می‌شود و حفاری ۱٫۵ متر انجام می‌گیرد و بعد از آن مخروطی بودن حفاری اعمال و فشار تزریق پشت سگمنت انجام و در نهایت فشار جک برای جابجایی TBM اعمال می‌شود و مابقی سیکل‌ها نیز به همین صورت تکرار می‌شود.

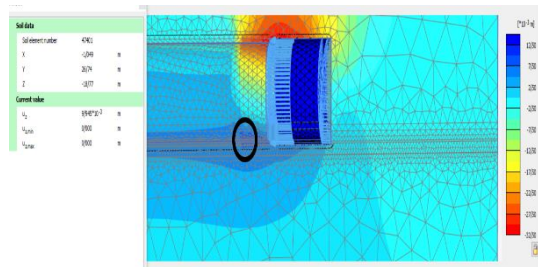
## ۵- نتایج

به منظور مقایسه نقش مدل‌های رفتاری مختلف (مدل موهر کولمب یا MC، مدل سخت شونده یا HS، مدل سخت شونده با کرنش کوچک یا HSS) بر روی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی اندرکنش تونل و زمین درون‌گیر، از خروجی مدل‌های عددی استفاده شده است. بدین منظور، در گام نخست مقدار جابه‌جایی قائم در اطراف تونل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۶ تا شکل ۸، مقدار جابه‌جایی قائم (نشست زمین) در اطراف تونل را برای هر سه مدل رفتاری نشان می‌دهد. مقدار جابه‌جایی قائم هم برای مراحل حفاری ترسیم

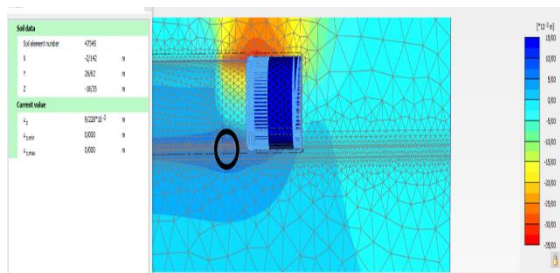


شکل ۶- میزان نشست سطح زمین در مدل موهر کولمب

بررسی تاثیر مدل رفتاری خاک بر مدل سازی نشست ناشی از حفر تونل در مترو ... موسی علی محمدی و ...، ص ۱۳۳-۱۴۷

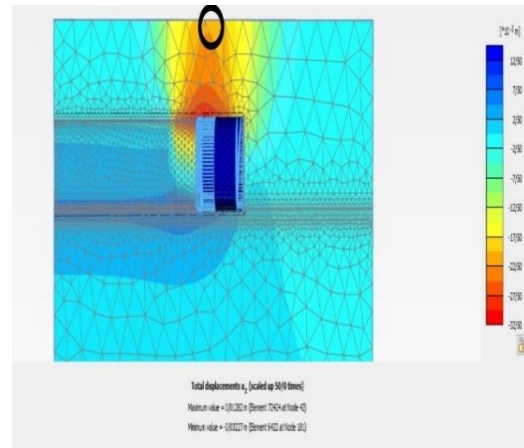


شکل ۱۰- بالا آمدگی کف تونل در مدل سخت شونده

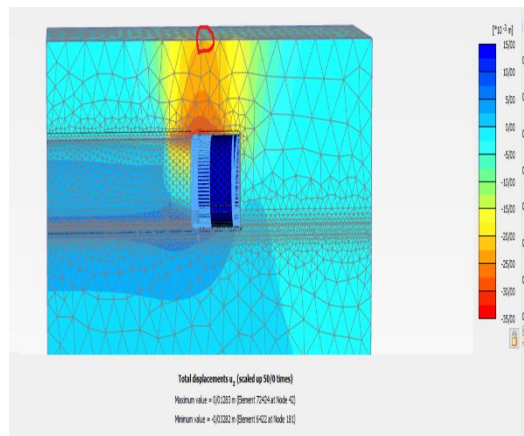


شکل ۱۱- بالا آمدگی کف تونل در مدل سخت شونده با کرنش کم

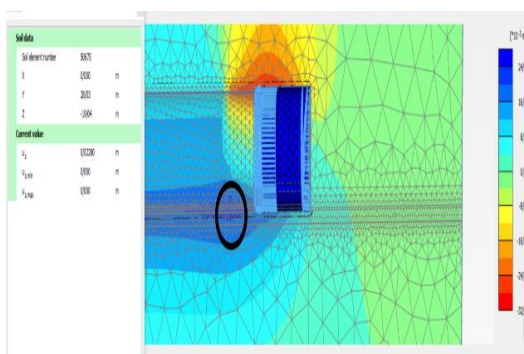
مقایسه مقدار جابه جایی های قائم در شکل ۶ تا شکل ۸، نشان می دهد که بیشترین و کمترین شدت جابه جایی های قائم (مقادیر نشست) به ترتیب در مدل رفتاری *HSS* و *MC* پیش بینی شده است. الگوی جابجایی در تمام مدل ها به صورت گسترش پیاپی شکل است. این الگوی گسترشی برای مدل های سخت شونده، تقریباً مشابه است و تفاوت عمده را می توان به کاهش بالا آمدگی کف و افزایش میزان جابه جایی ها در مدل رفتاری *HSS* و *HS* نسبت به *MC* نسبت داد. به عبارت دیگر، در مدل رفتاری *MC*، مقادیر نشست زمین درون گیر تونل کمتر از دو مدل رفتاری *HS* و *HSS* پیش بینی شده است. همچنین، مدل *HSS* کمترین و مدل *MC* بیشترین میزان بالا آمدگی کف را پس از حفاری و نگهداری نشان داده اند. در تمامی مدل ها روند تغییرات جابه جایی قائم به گونه ای است که با افزایش فاصله از تاج تونل، میزان نشست یا جابه جایی قائم کاهش می یابد. به عبارت دیگر، بیشترین جابه جایی قائم در تاج تونل حادث شده و با افزایش فاصله قائم از تاج تونل (حرکت به سطح زمین) بتدریج از مقدار نشست کاسته می شود (شکل ۱۲).



شکل ۷= میزان نشست سطح زمین در مدل سخت شونده

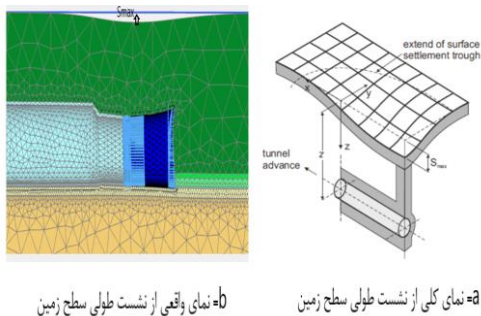


شکل ۸- میزان نشست در مدل سخت شونده با کرنش کم



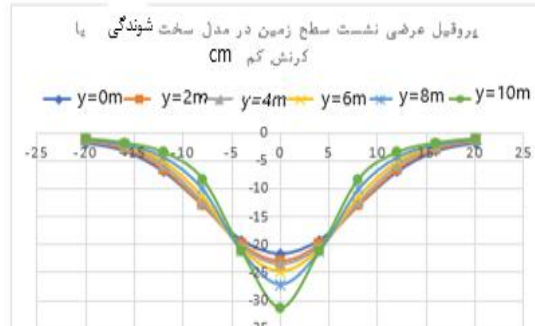
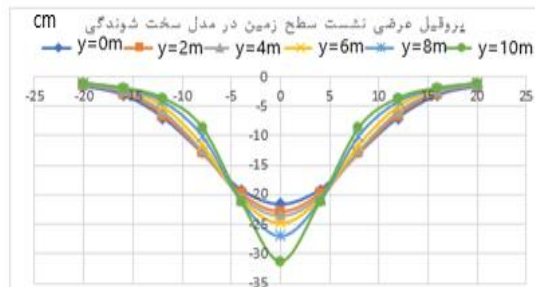
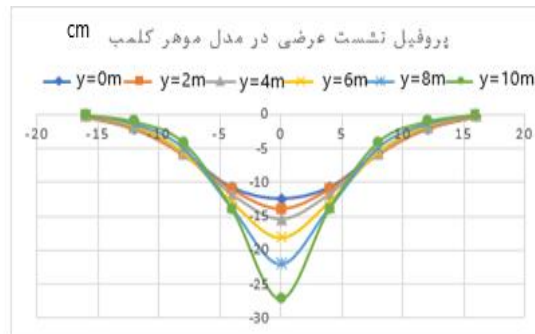
شکل ۹- بالا آمدگی کف تونل در مدل موهر کلمب

شهری، پروفیل نشست سطح زمین است. برای ترسیم پروفیل نشست سطح زمین، لازم است مقادیر جابه‌جایی قائم مربوط به نقاط واقع در سطح زمین از نتایج مدل‌سازی استخراج شده و مقادیر حاصل بر اساس فاصله عرضی ترسیم شود. بدین منظور، مقادیر نشست حاصل از تحلیل‌های عددی برای مدل‌های رفتاری مختلف و مراحل مختلف اجرایی تونل در سطح زمین محاسبه شده و نتایج آن به صورت پروفیل‌های نشست در شکل ۱۳، ترسیم شده است. در این حالت، بیشینه نشست در محل آکس یا محور تقارن تونل حادث شده و با افزایش فاصله عرضی از آکس تونل (دور شدن از محور تونل)، به تدریج مقادیر نشست سطحی کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله از آکس تونل، مقدار نشست ابتدا یک کاهش جزئی را نشان داده و سپس نرخ تغییرات به شدت افزایش می‌یابد. در ادامه و با افزایش فاصله از آکس تونل، مقادیر نشست با یک شیب تقریباً ثابت کاهش یافته و با رسیدن به نقطه عطف، مجدداً نرخ تغییرات نشست کاهش می‌یابد (در نقطه عطف، تقعر پروفیل نشست عوض می‌شود). مقایسه نتایج حاصل از پروفیل‌های عرضی نشست ناشی از حفر تونل نشان می‌دهد که در تمام مراحل حفاری، بیشترین مقادیر نشست سطحی توسط مدل رفتاری *HSS* و کمترین مقادیر نشست با استفاده از مدل رفتاری *MC* پیش‌بینی شده است. در عمده مراحل، پروفیل‌های عرضی نشست مربوط به دو مدل رفتاری سخت شونده (مدل‌های *HSS* و *HS*) شباهت بسیار زیادی به یکدیگر داشته و فقط مقادیر نشست محاسبه شده در مدل *HSS* اندکی بیشتر از مدل *HS* است.



شکل ۱۳- نمای کلی از نشست طولی سطح زمین و واقعی از نشست طولی سطح زمین

شکل ۱۴، میزان نشست سطح زمین از تاج تونل تا فاصله ۴۰ متری سطح زمین در سه مدل *MC*، *HS* و *HSS* را نشان



شکل ۱۲- نشست عرضی از محور تونل به فواصل ۴ متر از تونل در نقاط مختلف تا سطح زمین در مدل‌های *MC* و *HSS* و *HS*

الگوی تغییرات جابه‌جایی قائم در مدل سخت شونده (*HS* و *HSS*) بسیار مشابه هم بوده و همین‌الگو با تغییراتی در شدت شیب منحنی، برای مدل *MC* تکرار می‌شود. در حقیقت، نرخ جابه‌جایی‌ها در مدل‌های سخت شونده در اعماق نزدیک‌تر به سطح زمین، با شیب شدیدتری تغییر می‌کند، در حالی که برای مدل *MC* تغییر در نرخ جابه‌جایی‌ها در اعماق نزدیک به سطح، در مقایسه با مدل‌های سخت شونده محسوس نیست. همچنین، در مدل *MC* در اعماق نزدیک به تاج تونل روند جابه‌جایی‌ها شدیدتر است. یکی از فاکتورهای مهم در طراحی و اجرای تونل‌های

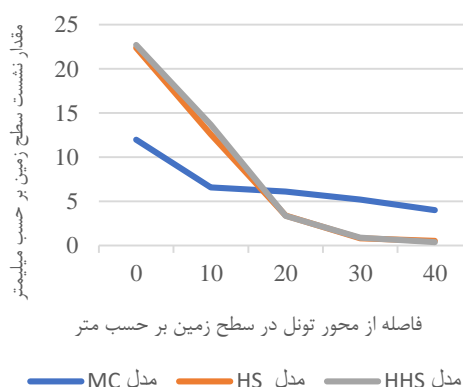
**جدول ۴- مقایسه میزان نشست سطح زمین در اثر حفر**

ردیف	مدل رفتاری	میزان جابه جایی به میلی متر
۱	نشست واقعی سطح زمین	۱۰
۲	مدل رفتاری موهر کلمب	۱۲
۳	مدل رفتاری سخت شونده	۲۲
۴	مدل رفتاری سخت شوندگی با کرنش کوچک	۲۳

**۶- بحث**

روش های متعددی برای پیش بینی و برآورد مقدار و همچنین توزیع فضایی جابه جایی های اطراف تونل توسعه داده شده اند. این روش ها را می توان در قالب روش های تجربی، روش های تحلیلی و روش های عددی تقسیم بندی نمود. روش های عددی نسبت به سایر روش ها از انعطاف پذیری و توانایی بیشتری برخوردار هستند. این انعطاف پذیری از توانایی مدل سازی انواع مختلف شکل هندسی تونل، توانایی اعمال تاثیر مراحل حفاری، اعمال اندرکنش خاک و سازه، اعمال رفتارهای غیرخطی و در نظر گرفتن مدل های رفتاری مختلف ناشی می شود. صرف نظر از توانایی های روش های عددی، دقت نتایج خروجی مدل سازی عددی، کاملا وابسته به اطلاعات و داده های ورودی خواهد بود. دو مولفه اصلی ورودی در مدل سازی عددی، نوع مدل رفتاری اجزای تشکیل دهنده محیط (به طور مثال خاک اطراف تونل) و پارامترهای رفتاری (خواص و ویژگی های خاک) است. بنابراین، برای حصول نتیجه مناسب در تحلیل های عددی و به خصوص برای مدل سازی جابه جایی های اطراف تونل، انتخاب مدل رفتاری مناسب با رفتار واقعی خاک از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مدل رفتاری مورد استفاده برای تحلیل های عددی، علاوه بر توانایی پیش بینی دقیق رابطه تنش-کرنش، باید رفتار پس از شکست (بعد از نقطه تسلیم) را نیز به خوبی رفتار قبل از شکست، مدل سازی نماید. با این وجود، در عمده مطالعات پیشین (بیش از ۸۵ درصد مطالعات در زمینه مدل سازی اندرکنش تونل و خاک درونگیر (به ویژه برای پروژه های زیرزمینی شهر تهران و خاک تهران) از مدل رفتاری موهر-کلمب استفاده شده است. با توجه به این موارد، لازم است

می دهد. که در آن کمترین نشست در سطح زمین، مربوط به مدل موهر کلمب و بیشترین نشست در مدل سخت شونده با کرنش کم می باشد. در دو مدل سخت شونده این نشست بسیار شبیه به هم است و به تدریج که از تاج تونل فاصله می گیریم در دو مدل سخت شونده نشست بسیار کم می شود در صورتی که در مدل موهر کلمب این میزان نشست بعد از ۴۰ متر در سطح زمین بیشتر از دو مدل سخت شونده می باشد.



**شکل ۱۴- نشست طولی در سطح زمین از بیشترین نشست تا فاصله ۴۰ متر در مدل های  $mc$  و  $HS$  و  $HSS$**

برای استفاده موثر و صحیح از مدل سازی عددی، همواره لازم است مراحل مربوط به صحت سنجی و اعتبار سنجی انجام شود. در حقیقت، استفاده از نتایج مدل سازی عددی برای بررسی یک مسئله خاص بدون طی شدن مراحل مربوط به صحت سنجی و اعتبار سنجی فاقد وجهه علمی مناسب خواهد بود. در این مطالعه، برای بررسی صحت تحلیل عددی و همچنین ارزیابی مدل های رفتاری، از نتایج مربوط به رفتارسنجی (اندازه گیری های حین اجرا) استفاده شده است. بدین منظور، نتایج مربوط به نشست سطح زمین در تحلیل عددی و نتایج اندازه گیری های مربوط به پین های نشست سنج سطحی در موقعیت محور تونل برای مراحل حفاری تونل با یکدیگر مقایسه شده اند. جدول ۴، نشان می دهد با اندازه گیری واقعی نشست سطح زمین و تحلیل سه مدل رفتاری موهر کلمب و سخت شونده و سخت شونده با کرنش کوچک، مدل رفتاری موهر کلمب بیشترین انطباق را با نتایج سنجی دارد.

مقادیر اندازه‌گیری شده نشست سطح زمین اعتبارسنجی شده است. مهم‌ترین جنبه‌های رفتاری و نتایج حاصل از این مطالعه ارائه شده است.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد، در مدل موهر - کولمب، گسترش جابه‌جایی‌ها تا شعاع کمتری از محور تونل ادامه یافته و در فاصله کمتری از تونل زوال می‌یابد. مدل موهر - کولمب برای تمام مراحل حفاری، یک بالا آمدگی شدید را در کف تونل پیش بینی می‌کند. این موضوع به گونه‌ای است که بیشترین جابه‌جایی مشاهده شده در مدل موهر - کولمب مربوط به بالا آمدگی کف تونل است. جابه‌جایی‌های قائم محاسبه شده در بالای تونل و همچنین مقدار نشست پیش بینی شده با مدل موهر - کولمب از هر دو مدل رفتاری سخت شونده کمتر بوده که این اختلاف با تکمیل مراحل حفر و نگهداری تونل افزایش می‌یابد. در مقابل، مدل‌های سخت شونده گسترش شعاعی بیشتری از جابه‌جایی‌ها را نسبت به محور تونل نشان داده‌اند. الگوی گسترش جابه‌جایی‌ها برای مدل‌های سخت شونده، تقریباً مشابه بوده و تفاوت عمده بین آن‌ها مربوط به کاهش بالا آمدگی کف و افزایش میزان جابه‌جایی‌ها در مدل سخت شونده با کرنش کوچک است. همچنین، عمق، شیب عرضی و دامنه تغییرات شیب عرضی پروفیل نشست سطحی برای مدل‌های سخت شونده بزرگ‌تر از مدل موهر - کولمب است. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج حاصل از رفتارسنجی تونل نشان می‌دهد که به طور کلی نتایج حاصل از مدل موهر کولمب، بیشترین انطباق را با نتایج حاصل از رفتارسنجی دارند.

میزان تاثیر نوع مدل رفتاری مختلف مورد استفاده در نتایج تحلیل‌ها و مدل‌سازی عددی بررسی شود که این موضوع در مقاله پیش‌رو مورد مطالعه قرار گرفته است. در عمده مطالعات مربوط به تحلیل اندرکنش تونل و زمین درونگیر، از مدل رفتاری موهر - کولمب استفاده شده است. علاوه بر این، رفتار قبل از شکست مصالح در الگوی جابه‌جایی نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین، استفاده از مدل‌های رفتاری مختلف، نتایج متفاوتی در محیط‌های مختلف می‌دهد که قابل بررسی و بحث می‌باشد.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، به بررسی اثر مدل‌های رفتاری بر جابه‌جایی‌های ناشی از احداث تونل در محیط‌های خاکی پرداخته شده است. بدین منظور، تونل مترو خط سه تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و با توجه به نوع خاک ساختگاه تونل، سه مدل رفتاری الاستوپلاستیک با افزایش سطح پیچیدگی مورد مطالعه قرار گرفت. مدل‌های رفتاری مورد استفاده شامل مدل موهر - کولمب، مدل سخت شونده و مدل سخت شونده با کرنش کوچک است. داده‌های مورد نیاز برای این سه مدل رفتاری با استفاده از نتایج مطالعات برجا و آزمایشگاهی در محدوده مورد بررسی انتخاب شده و در مدل‌سازی اعمال شده است، برای هر سه مدل رفتاری فوق، فرآیند اجرایی تونل مدل‌سازی شده و نتایج آنها در قالب جابه‌جایی‌های قائم اطراف تونل مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی با استفاده از نتایج رفتارسنجی و مقایسه با

## ۸- مراجع

- Addenbrooke T.I, Potts D.M, Puzrin A.M. (1997). The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction. *Geotechnique*.
- Atkinson J, Sallfors G. (1991). Experimental determination of soil properties. In Proc. *10th ECSMFE*, V 3.
- Benz T. (2007). Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences. PhD, University of Stuttgart.
- Brinkgreve R.B.J. (2005). Selection of Soil Models and Parameters for Geotechnical Engineering Application, engineering application, *ACSE Geotech. Spec. Publ.*
- Burland J.B. (1989). Small is beautiful: the stiffness of soils at small strains. Ninth Laurits Bjerrum Lecture. *Can. Geotech.*

- Chen W.F, McCarron W.O. (1986). Plasticity modelling and its application to geomechanics. In Balasubramaniam et al (eds) Proc. Intl. Symposium on Recent Developments in Laboratory and Field Testing and Analysis of Geotechnical Problems, A.A. Balkema, Bangkok.
- Clayton C.R.I. (2011). Stiffness at small strain: research and practice. *Geotechnique*.
- Dalong J, Dajun Y, Xinggao L, Haotian Z. (2018). Analysis of the settlement of an existing tunnel induced by shield tunneling underneath Tunnell. *Underground Space Technol*.
- Darendeli M.B, Stokoe K.H. (2001). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Engrg. Rpt. GD01-1, University of Texas, Austin, Texas.
- Drucker D.C, Gibson R.E, Henkel D.J. (1957). Soil mechanics and work hardening theories of plasticity. Transactions American Society of Civil Engineering.
- Eslami, B. Golshani, A. and Arefizade, S., (2020). Evaluation of constitutive Models in Prediction of surface settlements in Cohesive soil-A case Study: Mashhad Metro Line 2. *ISSMGE International Journal of Geoengineering Case Histories*. 5(3). pp. 182-198.
- Gryczmanski M. (2009). State of the art in modelling of soil behavior at small strains. *Architecture Civil Engineering Environment Journal V2*.
- Ghaem, R. P. (2010). Report on supplementary geotechnical studies of the fourth section of Tehran Metro Line 3. *Sabir International Company*.
- Hejazi Y, Dias D, & Kastner, R. (2008). Impact of constitutive models on the numerical analysis of underground constructions. *Acta Geotechnica*, 3(4) ,pp.251-258.
- Jardine R J, Potts D.M, Fourie A.B, Burland J.B. (1986). Studies of the influence of nonlinear stress–strain characteristics in soil–structure interaction. *Geotechnique*.
- Lade P.V. (2005). Overview of constitutive models for soils, in Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration, edited by J. A. Yamamuro, and V. N. Kalaikin, *ASCE Geotech. Spec. Publ*.
- Mair R.J. (1993). Developments in geotechnical engineering research: applications to tunnels and deep excavations. *Proc. Instn Civ. Engrs, Civ. Engng*.
- Mair RJ, Gunn MJ, O'Reilly MP. (1983). Ground movements around shallow tunnel in soft clay. *10th int conf on soil mechanics and foundation engineering*, Stockholm.
- Meng F.Y, Chen R.P, Kang X. (2018). Effects of tunneling-induced soil disturbance on the post-construction settlement in structured soft soils, *Tunnelling and Underground Space Technology*, V 80.
- Migliazza M, Chiorboli M, Giani G.P. (2009). Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground, *Computers and Geotechnics*, V 36.
- Nematollahi, M. and Dias, D., (2009). Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction-case of the shiraz subway line. *Tunnelling and under ground space Technology*, 86. pp.75-88.

- Obrzud R.F. (2010). The haedening soil model-a practical guidebook. *Technical report Z\_Soil*. PC 100701, Zace Services Ltd.
- Ochiai H, Lade P.V. (1983). Three-dimensioal behavior of sand with anisotropic fabric. *J. Geotechn. Eng.*
- Peck RB. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. State-of-the-art report. In Proc 7th int conf soil mechanics and found engineering, Mexico.
- Rowe P.W. (1962). The stress- dilatancy relation for static equilibrium of an assmebly of particles in contact. In proc of the Royal Society of London, V 62 of A, Mathematical and Physics Sciences.
- Sainoki A, Tabata S, Mitri H, Fukuda D, Kodama J. (2017). Time-dependent tunnel deformations in homogeneous and heterogeneous weak rock formations. *Computers and Geotechnics*.
- Santos J.A, Correia A.G. (2001). Reference threshold shear strain of soil: Its application to obtain a unique strain dependent shear modulus curve for soil. *In 15th Int.Conf. SMGE*, V1, Istanbul.
- Sarder Y, Rini A. (2014). A review on Methods of Predicting Tunneling Induced Ground Settlements. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*.
- Wang H.N, Chen X.P, Jiang M.J, Song F, Wu L. (2018). The analytical predictions on displacement and stress around shallow tunnels subjected to surcharge loadings, *Tunnell. Underground Space Technol.*, V 71.
- Wang H.N, Zeng G.S, Jiang, M.J. (2018). Analytical stress and displacement around non-circular tunnels in semi-infinite ground, *Applied Mathematical Modelling*, V.63.
- Wong P.K.K, Mitchell R.J. (1975). Yielding and plastic flow of sensitive cemented clay. *Geotechnique*.
- Zhang Z, Zhang M, Jiang Y, Bai Q, Zhao Q, (2017). Analytical prediction for ground movements and liner internal forces induced by shallow tunnels considering non-uniform convergence pattern and ground-liner interaction mechanism, *Soils and Foundations*, V 57.

## Investigating the effect of soil behavior model on ground settlement caused by tunnel excavation in Tehran Metro Line 3

M. Alimohammadi<sup>1</sup>; S. Zare<sup>\*2</sup>; S. E. Jalali<sup>3</sup>

1- PhD Student; Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics, Shahrood University of Technology, mousaalimohamadi@yahoo.com

2- Associate Professor; Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics, Shahrood University of Technology, zare@shahroodut.ac.ir

3- Professor; Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics, Shahrood University of Technology, jalalisme@gmail.com

Received: 2 Jan 2025; Accepted: 1 Oct 2025

DOI: 10.22044/tuse.2025.15547.1495

### Keywords

**Keywords;**  
**Tunnel-ground interaction**  
**Behavioral model**  
**Hardening soil,**  
**Numerical modeling,**  
**Tunneling settlement,**  
**PLAXIS 3D 2020**

### Extended Abstract

#### Summary

This study investigated and compared the effects of different soil behavior models (Mohr-Coulomb, hardening soil, and small strain hardening soil) on the results of numerical modeling of tunnel-soil interaction in the Tehran Metro Line 3 tunnel. The results showed that the Mohr-Coulomb model predicted less vertical displacements and showed more severe heave phenomena compared to more advanced models. However, the Mohr-Coulomb model was most accurate in estimating ground surface settlement (12 mm predicted versus 10 mm measured). This finding emphasizes the importance of validating modeling results with real data and shows that simpler models can also provide acceptable results in predicting key parameters such as ground settlement.

### Introduction

The design and implementation of urban tunnels, especially in dense and sensitive areas, require a careful assessment of the consequences of the excavation on the surrounding environment. One of the most important of these consequences is the displacement and settlement of the soil mass at the ground surface that can affect surface structures. Therefore, accurate and reliable estimation of ground surface settlements is a key principle in the design of shallow urban tunnels. Numerical modeling is a powerful tool for predicting these phenomena, but the accuracy of its results is highly dependent on the selection of an appropriate behavioral model to describe the mechanical properties of the soil. This study aims to evaluate and compare the impact of different elastoplastic behavioral models – including the Mohr-Coulomb model, the hardening soil model, and the hardening soil small strain model – on the results of numerical modeling of tunnel-soil interaction in a real case study.

### Methodology and Approaches

In order to conduct this study, the Tehran Metro Line 3 tunnel was selected as a case study. The numerical modeling process was carried out using the specialized finite element software PLAXIS 3D 2020. The excavation and lining stages of the tunnel were simulated in accordance with the actual implementation process of this project. The necessary parameters for the soil behavior models were taken from the results of geotechnical studies and laboratory tests of the project. After running the simulations for each of the mentioned behavior models, the main outputs, including the displacement field in the areas around the tunnel, were examined. Then, in order to validate the numerical modeling results, these predictions were

---

compared with the actual data from the behavior measurement (monitoring) systems that were collected during the tunnel construction, in particular the measured values of the ground surface settlement.

### **Results and Conclusions**

Analysis of the results of numerical modeling for three different behavioral models showed lower values of vertical displacements predicted by the Mohr-Columbus model compared to both hardening behavioral models (hardening soil and hardening soil small strain). The Mohr-Columbus model showed significantly more heave phenomenon in the tunnel floor during all excavation stages than that predicted by the hardening models. In terms of ground settlement, the results of the Mohr-Columbus model (with a predicted settlement of about 12 mm) showed the greatest agreement with the actual data from the behavior measurements (with measured values of about 10 mm). This study shows that the choice of soil behavioral model has a significant impact on the results of numerical modeling of the tunnel-soil interaction. In the case study of the Tehran Metro Line 3 tunnel, although the Mohr-Columbus model showed some differences with more recently developed models in predicting vertical displacements and uplift, the highest accuracy in estimating ground settlement was obtained using this model. This finding emphasizes the critical importance of validating modeling results with real and field data and indicates that in some cases, a simpler behavioral model can also provide satisfactory results in predicting key parameters such as ground settlement.

---