بررسی روش تونل کاری کم عمق برای حفاری ایستگاه در خاک‌های ضعیف و کم روباره (مطالعه موردی: ایستگاه استقلال مترو خط ۲ شیراز)

مقاله علمی – پژوهشی

محمود سلیمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
سید یعقوب ذوالفقاری‌فر*، استادیار، گروه مهندسی عمران و معماری، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران
زریر صالح پور سروک، استادیار، گروه مهندسی عمران و معماری، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: syzoalfeghary@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸- پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵
صفحه ۳۹۲-۳۷۵

چکیده

روش‌های مختلفی برای حفر تونل‌ها ابداع و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها به طور عام دارای نقاط مشترک بوده ولی در اجرا هر کدام از آنها با هم تفاوت داشته و از هم جدا می‌باشند. انتخاب روش بهینه برای حفر تونل مستلزم شناخت کامل روش‌های حفر تونل و پارامترهای تأثیرگذار بر آنها می‌باشد. از جمله پارامترهای مهم که باید مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد می‌توان به مشخصات هندسی، مشخصات زمین شناسی و ژئومکانیکی، شرایط پروژه و زیرساخت‌های موجود، زمان به اتمام رسیدن پروژه و مسائل زیست محیطی اشاره کرد. همچنین پیش بینی و کنترل نشست هم از لحاظ ایمنی و هم از نقطه نظر اقتصادی از اهمیت قابل توجهی در مناطق شهری برخوردار می باشد. در سال‌های اخیر، استفاده از تونل کاری در عمق کم برای حفاری فضاهای زیرزمینی از جمله ایستگاه مترو و فضاهای مشابه در خاک‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته که به دلیل عدم ایجاد خلل در ترافیک، در فضاهای شهری مورد علاقه می‌باشد. تونل کاری در عمق کم و در خاک ضعیف، (Shallow Tunneling Method) STM نام‌گذاری می‌شود. استفاده از STM در فضاهای شهری می‌بایست از نظر نشست در سطح زمین و اثرات آن بر سازه‌های روزمینی به طور دقیق ارزیابی گردد. به منظور بررسی هر کدام از روش‌ها از مدل سازی عددی به روش سه بعدی استفاده و هدف از مدل سازی عددی به روش سه بعدی، بررسی دقیق میزان نشست حین اجرا و تعیین بهترین روش اجرا با کمترین میزان نشست بوده است. روش‌های مختلفی با تقسیم بندی‌های متفاوت جهت حفاری مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت روش قابل استفاده در این مطالعه ارائه و بهترین روش با کمترین میزان نشست به عنوان گزینه برتر معرفی گردید.

واژه‌های کلیدی: خاکریز سست و نرم، تسلیح کننده، ژئوگرید، ظرفیت باربری، پی، بارگذاری ترکیبی استاتیکی

۱- مقدمه

تا سال ۲۰۵۰، حدود ۷۰ درصد جمعیت جهان(حدود ۱۰ میلیارد نفر) در مناطق شهری زندگی خواهند کرد. توسعه زیرساخت‌ها و فضاهای زیرزمینی مرتبط، از ملزومات توسعه پایدار محیط‌های شهری هستند. چالش اساسی کارفرمایان، طراحان و پیمانکاران زیرساخت‌های شهری، به حداقل رساندن اختلال در انجام فعالیت‌های روزانه شهرها

و تضمین همزمان کیفیت، ایمنی و هزینه بر اساس اهداف توسعه می‌باشد(Arioglu, 1992).

عوامل مؤثر در طراحی و ساخت تونل‌های شهری عبارتند از: به حداقل رساندن تخریب سطح زمین و محیط‌زیست؛ در نظر گرفتن سازه‌های سطحی و زیرسطحی شامل ساختمان‌ها، پل‌ها، راه‌ها، سیستم‌های انتقال فاضلاب و سازهای خطی شامل خطوط انتقال آب و گاز و تلفن و...؛ به حداقل رساندن نشست سطح زمین؛ پایداری تحکیمات موقت تونل و جلوگیری کامل از ناپایداری سینه‌کار تونل؛ اقتصادی بودن طراحی و اجرا است(Ercelebi, Copur & Ocak, 2011). احداث تونل در مناطق شهری با توجه به عمق کم تونل و سست بودن زمین باعث ایجاد تغییراتی در محیط اطراف تونل می‌شود که به صورت نشست در سطح زمین نمود پیدا می‌کند(Guglielmetti, Grasso, Mahtab, & Xu, 2007). و باعث تأثیرات مخرب بر سازه‌های سطحی و زیر سطحی می‌شود، لذا بایستی نشست زمین تا حد امکان پیش‌بینی و تمهیدات کنترلی مد نظر قرار گیرد(javadi, Mohammadnejad, Hoseini, Mikaeil & Tolooiyan, 1399). مشخصات و مخاطرات تونل سازی در محیط‌های شهری در مقایسه با تونل‌های برون شهری عبارتند از: معارضه با ساختمان‌های سطحی، زیرساخت‌های شهری، تأسیسات زیرزمینی و سایر سازه‌های زیرزمینی موجود؛ محدودیت انجام مطالعات ساختگاهی موردنیاز به دلیل نبود مجوز و یا کمبود فضا(Kao and Li, 2018)؛ وجود تأسیسات زیرزمینی در اعماق کم؛ بیشینه تاریخی شهرها؛ محدودیت نصب ابزاردقیق در مسیر پروژه و بر روی ساختمان‌ها و زیرساخت‌های موجود؛ حفاری در اعماق کم خاک‌های ضعیف، نهشته‌های آبرفتی و خاک‌های دستی؛ نشست سطح زمین و تأثیر آن بر روی ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها و تأسیسات موجود؛ لزوم رفتارسنجی ژئوتکنیکی، سازه‌ای و زیست‌محیطی جامع و گسترده؛ انحراف ترافیکی در محدوده‌های کارگاهی؛ مسائل زیست محیطی، کنترل گرد و غبار و رعایت مسائل ایمنی؛ هزینه و نیروی انسانی زیاد؛ مسائل سیاسی می‌باشد(Loganathan & Poulos, 1998).

در زمینه نشست پارامترهای زیادی به صورت مستقیم تأثیرگذار هستند که از آن جمله می‌توان به تکنیک‌های تونل سازی، شرایط تنش اولیه، تأثیر ضریب فشار جانبی، آنیزوتروپی خاک، سکانس‌بندی حفاری، طول گام حفاری، فاصله بهینه بین جبهه‌های کاری، شرایط آب زیرزمینی و پارامترهای ژئوتکنیکی اشاره نمود(Shariful and Iskander, 2021).

تانگ(۲۰۲۱)، یک رویکرد ترکیبی از شبیه‌سازی حفاری تونل با نفوذ یک تونل مجاور و سپس یافتن بهترین مکان تونل جدید از طریق یک فرآیند MOO با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ژئوتکنیکی را توسعه داد(Tang, 2021). جوادی و همکاران در سال۱۳۹۹ در پروژه امیرکبیر تهران برای تونل T4 با استفاده از مدلسازی عددی اندرکنش تونل و زمین درونگیر، این تونل را با استفاده از روش المان محدود و مطابق با فرآیند اجرایی انجام داد. و نتایج بدست آمده نشان داد مدل‌های سخت شونده بیشترین انطباق را با نتایج حاصل از رفتار سنجی داشته اند(Javadi and others, 1399). ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ در پروژه خط ٤ مترو چانگشا به منظور تعیین مدل مناسب برای پیش‌بینی حداکثر نشست سطحی ناشی از تونل زنی سپر EPB، سه روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، شبکه عصبی پس انتشار (BP)، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی(RBF) و شبکه عصبی رگرسیون عمومی (GRNN)، به کار گرفته و نتایج را مقایسه نمودند. یک شاخص اصلاح‌شده که اهمیت فیزیکی پارامترهای ورودی را تعریف می‌کند برای تعیین کمیت پارامترهای زمین‌شناسی پیشنهاد شد که دقت پیش‌بینی مدل‌های ANN را بهبود می‌بخشد. براساس این تحلیل، مشخص شد که مدل GRNN عملکرد بهتری نسبت به شبکه‌های عصبی BP و RBF از نظر دقت و زمان محاسباتی دارد. همچنین یانگ در سال۲۰۱۸، مطالعه‌ای در خصوص استفاده از تونل کاری کم عمق در ایستگاه گوجیائون در بیژین انجام داده‌اند و آنها به این نتیجه رسیدند که ترکیبی از تونل کاری کم عمق به همراه ستون‌های جت گروتینگ برای کاهش نشست‌ها موثر است. تحقیقات یانگ(۲۰۱۸) در خصوص استفاده از لوله‌های فورپولینگ برای کاهش نشست‌های ناشی از ساخت ایستگاه انجام گردید، براساس بررسی‌های انجام شده و با پایش در زمان ساخت مشاهده شد که بیشترین نشست‌ها در زمان رانش لوله اتفاق می‌افتد و پس از نصب لوله‌ها نشست‌های زیادی در زمان ساخت ایستگاه بوجود نمی‌آید. یانگ به بررسی استفاده از روش شمع و ریب در ساخت ایستگاه مترو پرداخت که در این مطالعه مقایسه ای در خصوص روش‌های مختلف اجرا از لحاظ پایداری، ایمنی و همچنین قابلیت اجرا انجام

گردید(Yang, 2018). هدف از مدل سازی عددی به روش سه بعدی، بررسی دقیق میزان نشست حین اجرا و تعیین بهترین روش اجرا با کمترین میزان نشست می‌باشد. روش‌های مختلفی با تقسیم بندی‌های متفاوت جهت حفاری مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت روش قابل استفاده در این مطالعه ارائه و بهترین روش با کمترین میزان نشست به عنوان گزینه برتر معرفی می‌گردد(Zhang, Lyu, Shen, Zhou & Yin, 2020).

۲-پیشینه تحقیق

- تحلیل و مقایسه نشست‌های ایجاد شده در هر کدام از روش‌های حفاری.
- ارزیابی ریسک ساختمان‌های محدوده ایستگاه در روش‌های مختلف حفاری ایستگاه.
- تعیین مشکلات اجرایی روش‌های مختلف حفاری ایستگاه.
- مقایسه کاربرد روش های حفاری STM، شمع و ریب، ترانشه باز در ساخت ایستگاه مترو.
- تعیین مناسب و بهترین روش حفاری برای ایستگاه استقلال خط۲ متروی شیراز.

مشخصات پروژه

با توجه به موقعیت ایستگاه استقلال و تراز قرارگیری خط در موقعیت ایستگاه، روش اجرای زیرزمینی به منظور اجرای هسته مرکزی ایستگاه استقلال درنظر گرفته شده است. روش شمع و ریب و حفاری مرحله‌ای (NATM) دو روش زیرزمینی قابل استفاده در اجرای هسته مرکزی می‌باشد. از نکات حائز اهمیت در اجرای زیرزمینی ایستگاه‌ها، بررسی نشست حاصل در سطح زمین و تأثیر آن در سازه‌های روسطحی می‌باشد. باتوجه به وجود روباره ۹ متری (تا روی تاج سازه نهایی) و دهانه ۲۲ متری (بیشترین دهانه داخلی در طبقه بلیط فروشی) و موقعیت قرارگیری ایستگاه در محدوده شهری و ساختمان، جهت ارزیابی نشست، ریسک و خسارت وارد به سازه های روزمینی حاصل از اجرای زیرزمینی ایستگاه به روش حفاری مرحله ای، آنالیز ریسک براساس نتایج حاصل از مدل سازی نرم افزاری (سه بعدی و دوبعدی) انجام گرفته است. همانطور که اشاره شد، جهت بررسی روش اجرا و تعیین میزان نشست از مدل سازی نرم افزاری استفاده شده است. به دلیل حساسیت این بررسی و افزایش دقت، مدل سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS-3D تهیه شده و اجرای ایستگاه به صورت حفاری مرحله ای به طور کامل در آن شبیه سازی گردیده است. در این شبیه سازی مشخصات خاک براساس نتایج حاصل از مطالعات ژئوتکنیک مهندسی ایستگاه مورد نظر و هندسه ایستگاه براساس معماری فاز ۱ و درنظرگرفتن اعضای مناسب سازه نگهبان مدل سازی شده است.

- ✓ کیلومتراژ ایستگاه: ۷+۷۷٤
- ✓ طول ایستگاه: ۱٤۷ متر
- ✓ عرض ایستگاه: ۲۲/۵ متر (داخل به داخل سازه نهایی)
- ✓ تعداد طبقات: ۲ طبقه
- ✓ تراز ریل: ۲۲/۸۰- متر
- ✓ روباره تا تاج ایستگاه: ۸/٦ متر

مشخصات ایستگاه و مسیر

کریدور خط ۲ قطار شهری شیراز، شامل بر ۱۳ ایستگاه می باشد. این خط از میدان گلستان شروع می شود و پس از عبور از فلکه گاز و میدان ستاد، در امتداد خیابان انقلاب به سمت میدان بسیج و از آنجا در امتداد بلوار عدالت به سمت میانرود و میدان شکوفه ادامه می‌یابد. ایستگاه استقلال از ایستگاه‌های خط ۲ قطار شهری شیراز است که در محدوده تقاطع خیابان‌های انقلاب و مشیر واقع شده است. ایستگاه استقلال پس از ایستگاه امیرکبیر و پیش از ایستگاه ۱۵ خرداد قرار دارد.

شکل ۱. موقعیت ایستگاه استقلال

۳-روش‌های اجرای زیرزمینی

روش‌های معمول جهت اجرای زیرزمینی ایستگاه‌ها عبارتند از:

- روش شمع و ریب (طاق بتنی)
- روش حفاری مرحله‌ای (NATM)

۳-۱- اجرای ایستگاه به روش شمع و ریب (طاق بتنی)

در این روش گالری‌هایی در امتداد کناره‌ها و سقف ایستگاه حفر می‌گردد. در امتداد گالری‌های جانبی ایستگاه و درفواصلی منظم (۲ الی ۲/۵ متر) شمع‌هایی حفر می‌گردد. در بالای سقف ایستگاه و در امتداد شمع‌های حفاری شده، طاق‌های بتنی حفاری و بتن‌ریزی می‌گردند. در پناه این طاق‌های بتنی و شمع‌های کناری، خاکبرداری‌ها انجام شده و سازه احداث می‌گردد. این روش علیرغم هزینه اجرایی نسبتا بالاتری در قیاس با سایر روش‌های اجرایی موجود، به دلیل عدم بتن ریزی مناسب در طاق‌ها و وجود فواصل بین اعضا از ایمنی کمتری برخوردار بوده و امکان بروز ریزش در آن بیشتر است ولی به دلیل ایجاد سازه نگهبان با سختی بالاتر نشست‌های غیر قابل کنترل در سطح زمین را در حین اجراء کاهش خواهد داد. همچنین اجرای ایستگاه در پناه ریب‌های بتنی بدلیل فراهم کردن فضای کافی‌برای پیمانکار کیفیت ساخت‌را ارتقاء داده و سرعت اجرای ایستگاه را نیز افزایش می‌دهد. با توجه به عرض زیاد ایستگاه و روباره کم آن، لازم است از شمع میانی در این ایستگاه استفاده شود.

۳-۲- اجرای ایستگاه به روش حفاری مرحله‌ای

در این روش مقطع عرضی ایستگاه به چندین بخش تقسیم شده و حفاری آن در امتداد طول ایستگاه در جبهه‌ها و زمان‌های مختلف انجام می‌گیرد، به این صورت بخش‌هایی از مقطع عرضی به صورت تونلی سنتی حفاری شده و تدریجا مقطع عرضی کامل می‌گردد. در این روش می‌توان اجرای بخشی از سازه نهایی ایستگاه را در اجرا دخیل کرده و از سختی آن در ایجاد پایداری جهت اجرا استفاده نمود. سازه نگهبان مورد استفاده در این روش از نوع شاتکریت به همراه لتیس یا فریم می‌باشد. اجرای بتن پاششی مورد استفاده در این روش نسبت به روش‌های دیگر دارای صعوبت کمتری می‌باشد. همچنین استفاده از اعضای با ابعاد کمتر هزینه‌های ساخت را کاهش می‌دهد. انجام حفاری مرحله‌ای در پناه پوسته‌های بتنی با هسته میلگرد و یا

فریم و پیشرفت تدریجی در عرض و طول ایستگاه ایمنی ساخت را بسیار افزایش داده و بروز ریزش‌های موضعی را کاهش می‌دهد.

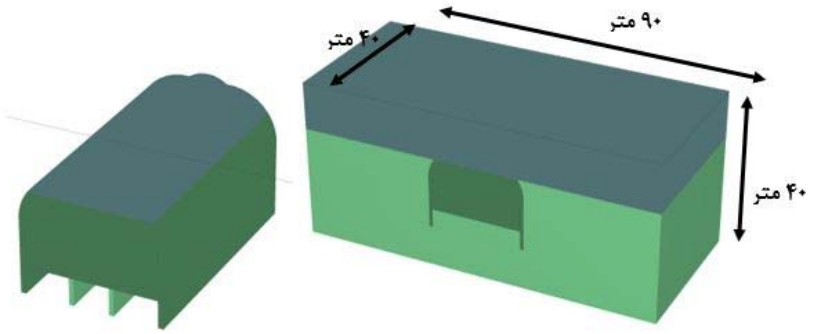
سختی کمتر این اعضا نسبت به شمع و ریب منجر به نشست‌های بیشتری در سطح زمین می‌گردد

٤- مدلسازی

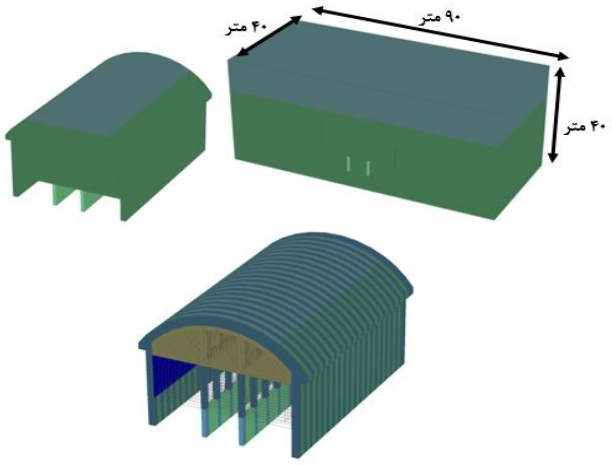
٤-١- ساخت هندسه مدل

اولین مرحله از مدل سازی، ساخت هندسه مدل است. ساخت هندسه در نرم افزار PLAXIS-3D با استفاده از امکانات گرافیکی نرم افزار و تعریف ایستگاه با استفاده از دستور TUNNEL به منظور شبیه سازی مراحل و گام‌های حفاری انجام شده است.

پلکسیس نرم افزاری است که برای تحلیل تغییر شکل‌ها و پایداری در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد. معمولاً در مسائل مهم ژئوتکنیک، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاک‌ها بسته به هدف موردنظر لازم است. با این نرم افزار می‌توان خاک‌برداری و خاک‌ریزی مرحله‌ای با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را مدل سازی نمود. هندسه مدل‌های ساخته شده در نرم افزار در شکل‌های زیر ارائه شده است.



شکل ۲. هندسه مدل ساخته شده برای روش حفاری مرحله ای با شمع در طبقه سکو با استفاده از نرم افزار PLAXIS-3D

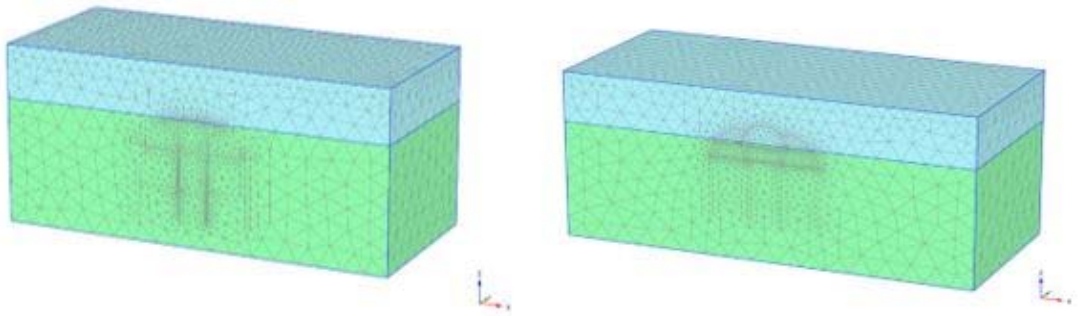


شکل ۳. هندسه مدل ساخته شده برای حالت شمع و ریب با استفاده از نرم افزار PLAXIS-3D

مش‌بندی یکی از مهمترین مراحل در مدل سازی می‌باشد. مسلماً هر چه تعداد المان‌های بکار رفته در تشکیل مدل‌های عددی بیشتر باشد، می‌توان انتظار نتایج دقیق تری را داشت اما از آنجا که مدل‌های بکار رفته سه بعدی اند، افزایش تعداد المان‌ها موجب افزایش زمان اجرای مدل‌ها و حجم فایل‌های حاصل می‌شود در انتخاب بزرگی مش‌ها در مدل سازی فضاهای زیرزمینی بایستی سعی نمود با استفاده از المان‌های کوچک‌تر در قسمت‌هایی از مدل که انتظار تغییرات بیشتری در تنش‌ها و کرنش‌های آن وجود دارد (نواحی اطراف فضاهای زیرزمینی) و افزایش تدریجی ابعاد المان‌ها با دور شدن از نواحی یاد شده، حالت بهینه ای مابین دقت حاصل از مدل‌های عددی از یک سو و زمان لازم برای اجرای آنها از سوی دیگر بدست آورد. این حالت بهینه پس از چندین بار اجرای مدل ساخته شده (با مش‌بندی مختلف) و بررسی نتایج حاصله و زمان اجرای مربوطه بدست می‌آید.

٤-٢- انتخاب محدوده مناسب از محیط در برگیرنده و مش بندی مناسب

با توجه به اینکه زمین در شرایط طبیعی رفتار الاستیک از خود نشان نمی‌دهد و نظر به اینکه زمین پیرامون فضاهای حفاری مورد بحث از جنس سنگ نیست، لذا اقدام به ساخت مدل‌هایی با ابعاد مختلف شد که در این مدل‌ها فاصله‌ی مرزها از مرکز حفاری ۲، ۳ و ٤ برابر دهانه حفره در نظر گرفته شد و پلات‌های مربوط به تنش‌ها در اطراف فضاهای زیرزمینی قبل و بعد از حفاری مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، فاصله ۲ برابر دهانه حفره از مرکز حفره به عنوان فاصله بهینه‌ای که مرزها بایستی از مرکز حفره داشته باشند تا تأثیر حفر فضای زیرزمینی بر آنها از بین برود و تنش‌ها در آن فاصله به وضعیت اولیه خود برسند انتخاب شد.



شکل ٤. المان‌بندی مدل ساخته شده برای روش حفاری مرحله‌ای با شمع و حالت شمع و ریب در طبقه سکو با استفاده از نرم افزار PLAXIS-3D

٤-٣-انتخاب مدل رفتاری مناسب و تعیین پارامترهای آن

روش‌های عددی در ژئوتکنیک شامل ارکان زیر است : شرایط مرزی، معادلات سازگاری، معادلات تعادل و معادلات رفتاری. معادلات رفتاری رابطه بین نیرو و تغییرمکان را تشکیل می‌دهد. این معادلات رفتاری را می‌توان مدل رفتاری نامید. یکی‌از مراحل اصلی در مدل‌سازی انتخاب مدل رفتاری سازگار با نوع خاک، نوع مسأله و میزان اطلاعات در دسترس می‌باشد. یکی از مدل‌های رایج برای خاک و سنگ مدل موهر کولمب است که بدلیل تعداد کم پارامترهای ورودی و درک فیزیکی ملموس از آن، در بسیاری از پروژه‌ها و مسائل انتخابی معقول است. اما در مسائل‌خاص همچون خاکبرداری و تونل، مدل‌های‌کمی پیچیده‌تر و هوشمندتر که از تکامل معیار کولمب حاصل شده می‌تواند پاسخ‌های واقع گرایانه‌تری ارائه دهد. یکی از این مدل‌ها مدل Hardening Soil است که تاریخچه تنش را در نظر می‌گیرد و بین‌بارگذاری و باربرداری تفاوت قائل است. بررسی جامعی که به این موضوعات می‌پردازد در ادامه بحث آورده شده است.

٤-٤- موهر کولمبMohr-Coulomb

مدل موهر کولمب یک مدل از نوع پلاستیک کامل است که ۵ پارامتر مدول یانگ و ضریب پواسون برای الاستیسیته و چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و اتساع برای پلاستیسیته تشکیل‌دهنده پارامترهای ورودی آن هستند. این مدل یک تقریب مرتبه اول از رفتار خاک و سنگ است. در مکانیک خاک، بیشتر راه حل‌ها بر اساس مفهوم تعادل حدی/تحلیل حدی و پلاستیک کامل است مثل پایداری شیب، توزیع فشار زمین و ظرفیت باربری.

٤-٤-١- پارامترهای ورودی

مدول الاستیسیته: E

ضریب پواسون: υ

چسبندگی: C

ضریب اصطکاک داخلی: Ø

اتساع: Ψ

فرمولاسیون معیار تسلیم کولمب که در سال ۱۷۷۳ ارائه شد به این صورت رابطه (۱) است:

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \qquad (۱)$$

که در اینجا τ و σ تنش برشی و نرمال روی سطح فیزیکی که شکست ماده روی آن اتفاق افتاده است می‌باشد. بعدها موهر این معیار را با تنش‌های اصلی ترکیب کرد و مدل موهر کولمب شکل گرفت. معادله این مدل در رابطه (۲) ارائه شده است.

(۲)

$$\dot{\sigma}' = \left(\underline{\underline{D}}^e - \frac{\alpha}{d} \underline{\underline{D}}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}'}^T \underline{\underline{D}}^e \right) \dot{\underline{\epsilon}}$$

f : معادله سطح تسلیم

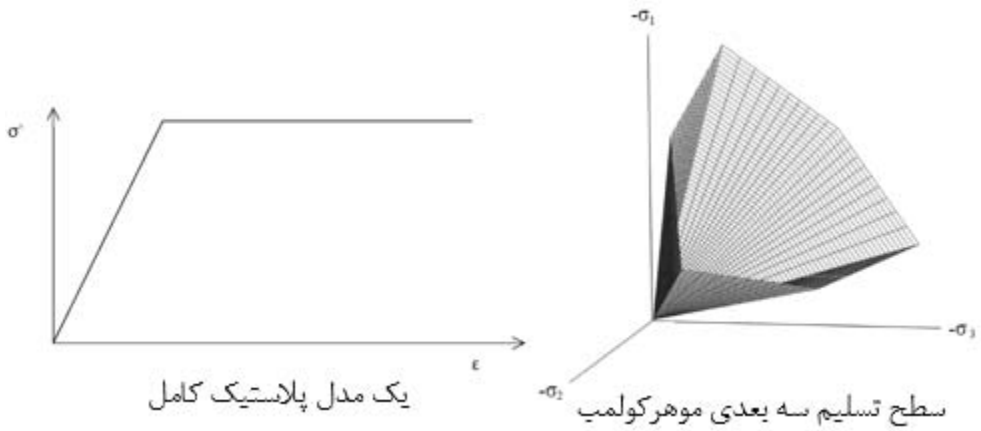
g : معادله سطح پتانسیل

α : شاخص تغییر حالت الاستیک و پلاستیک

$$d = \frac{\partial f}{\partial \underline{\sigma}'}^T \underline{\underline{D}}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'}$$

De : ماتریس سختی الاستیک

شکل مدل پلاستیک کامل و سطح تسلیم در فضای تنش‌های اصلی بصورت زیر است. ذکر این نکته ضروری است که شرایط سطح تسلیم با کرنش پلاستیک تغییری نمی‌کند یعنی نرم‌شوندگی و سخت شوندگی رخ نمی‌دهد.



شکل ۵. سطح تسلیم در فضای تنش‌های اصلی

٤-٥- مدل Hardening Soil

مدل خاک سخت‌شونده یک مدل الاستوپلاستیک از نوع هایپربولیک است که در قالب پلاستیسیته سخت شونده اصطکاکی فرموله شده و سخت شوندگی فشاری را در نظر می‌گیرد. سختی خاک با سه پارامتر تعریف می‌شود. سختی بار سه محوری E50، سختی باربرداری سه محوری E ur و سختی بار ادئومتر Eoed.

معمولاً Eoed=E50 ; Eur=(3~5) E50 است.

بر خلاف مدل MC، این مدل وابستگی سختی به تنش را در نظر می‌گیرد یعنی سختی با فشار زیاد می‌شود. بنابراین سه ورودی سختی به فشار مرجع مربوط می‌شوند. در این مدل سطح تسلیم مثل مدل‌های پلاستیک کامل (MC) ثابت نیست و بخاطر کرنش پلاستیک

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref}\left(\frac{\sigma}{p^{ref}}\right)^{m} \qquad (۳)$$

عامل وابستگی سختی به تنش: m

سختی سکانت در آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد: E_50^ref

سختی مماسی در بارگذاری ائودیومتری اولیه: E_oed^ref

باربرداری/ بارگذاری مجدد الاستیک: E_ur^ref ; υ_ur

پارامترهای گسیختگی مطابق معیار موهرکولمب: c ; ϕ ; ψ

مدل سه محوری عموماً با سطح تسلیم برشی و مدل ادئومتر با سطح تسلیم cap کنترل می‌شود. E_50^ref با بزرگی کرنش برشی مربوط به سطح تسلیم برشی کنترل می‌شود.

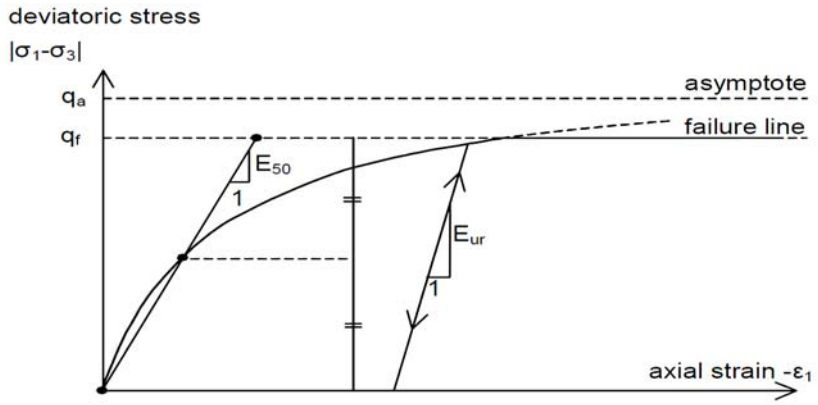
منبسط می‌شود. در این مدل رفتاری دو نوع سخت‌شوندگی برشی و فشاری تعریف شده است. این مدل برای خاک‌های نرم و خاک‌های سخت مناسب است. ویژگی بارز این مدل، وابستگی مدول‌های سختی به تنش است.

٤-٥-١- فرمولاسیون

ایده اساسی فرمولاسیون مدل سخت شونده خاک، رابطه هیپربولیک بین کرنش عمودی ε1 و تنش اضافی q در بارگذاری سه محوری اولیه است. آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده استاندارد منحنی‌هایی با روابط (٤) را تعریف می‌کنند.

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}}\frac{q}{1-\frac{q}{q_a}} \qquad (٤)$$

که در این رابطه q_a مجانب مقاومت برشی است و بصورت نمودار زیر ترسیم شده است.



شکل ٦. رابطه تنش-کرنش هیپربولیک در بارگذاری اولیه برای آزمایش سه محوری زهکشی شده استاندارد

٤-٦- سختی بارگذاری اولیه

رفتار تنش-کرنش برای بارگذاری اولیه بسیار غیر خطی است. پارامتر E_{50} مدول سختی وابسته به تنش محدود کننده برای بارگذاری اولیه است. E_{50} به جای مدول اولیه مماسی (E_i) مربوط به کرنش‌های اولیه می‌شود. مقدار این مدول از رابطه (٥) تعیین می‌شود.

$$E_{50} = E_{50}^{ref}\left(\frac{\sigma_3 + c\cot\varphi_p}{\sigma^{ref} + c\cot\varphi_p}\right)^{m} \qquad (٥)$$

مقدار E_{50}^{ref} در رابطه بالا از منحنی تنش-کرنش سه محوری متناظر با ایجاد ٥٠٪ مقاومت برشی حداکثر تعیین می‌شود.

پارامتر E_{50} مدول سختی وابسته به تنش محدود کننده برای بارگذاری اولیه است و با رابطه (٦) بدست می‌آید.

$$E_{50} = E_{50}^{ref}\left(\frac{c\cos\varphi-\sigma_3'\sin\varphi}{c\cos\varphi+p^{ref}\sin\varphi}\right)^{m} \quad (۶)$$

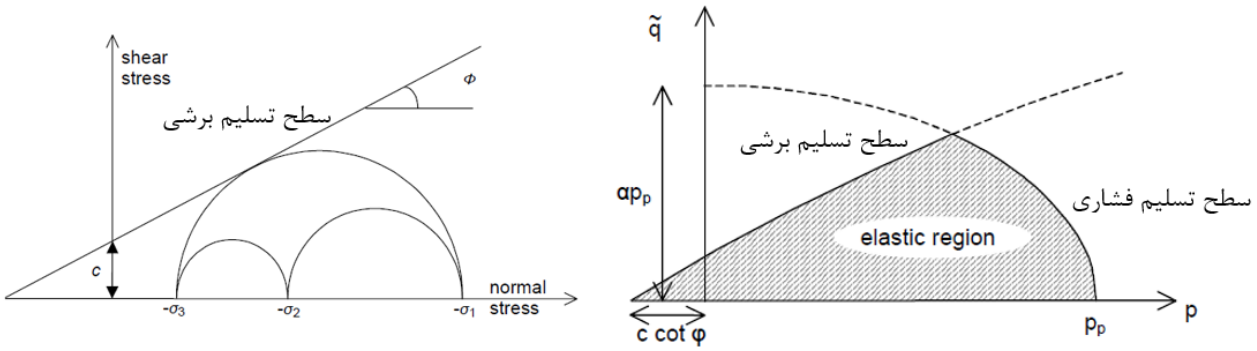
که E_{50}^{ref} مدول سختی مطابق با فشار محدودکننده مرجع p^{ref} می‌باشد. سختی واقعی به تنش اصلی کوچکتر (σ_3) بستگی دارد. مقدار وابستگی تنش با استفاده از توان m اعمال می‌شود. تنش انحرافی نهایی q_f به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود.

$$q_f = (c\ \cot\varphi - \sigma_3')\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \quad \text{and} \quad q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (۷)$$

مقدار q_f در رابطه بالا با استفاده از معیار گسیختگی موهر-کولمب تعیین می‌شود. نسبت q_f به q_a که نسبت گسیختگی (R_f) نامیده می‌شود و عددی کمتر از یک است به صورت پیش فرض ۰/۹ در نظر گرفته شده است که فرض مناسبی از سوی نرم افزار است. برای مسیر تنش باربرداری و بارگذاری مجدد، مدول سختی وابسته به تنش به صورت رابطه (۸) استفاده می‌شود.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref}\left(\frac{c\cos\varphi-\sigma_3'\sin\varphi}{c\cos\varphi+p^{ref}\sin\varphi}\right)^{m} \quad (۸)$$

در بسیاری از موارد عملی درنظرگرفتن E_{ur}^{ref} برابر $3\sim5E_{50}^{ref}$ فرض مناسب است.



مدل خاک سخت شونده — مدل موهرکولمب

شکل۷. سطح تسلیم مدل‌های MC و HS

٤-۷- جمع‌بندی

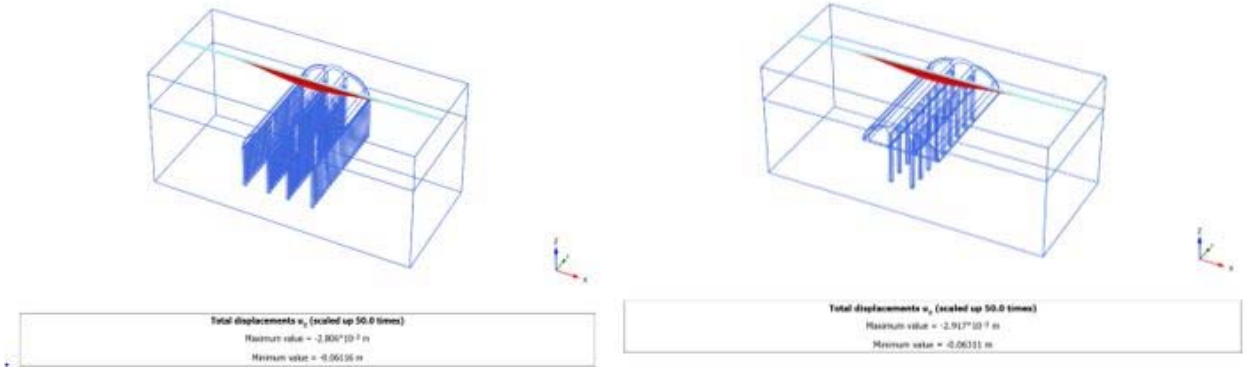
مدل موهر کولمب مدل پلاستیک کامل است که بدون در نظرگیری سخت شوندگی، سطح تسلیم ثابت دارد و تاریخچه تنش را در نظر نمی گیرد. مدل سخت شونده HS، مدلی الاستوپلاستیک از نوع هایپربولیک است که در قالب پلاستیسیته سخت شونده سطح تسلیم آن با کرنش بزرگ می‌شود و همچنین تاریخچه تنش را در نظر می‌گیرد. بطوریکه سختی خاک براساس شرایط تنش طبق معادلات مشخصی تغییر می‌کند. لازم بذکر است که مدل HS، مدل MC را در بخش سطح تسلیم برشی خود استفاده نموده است و سطح تسلیم cap را در کنار آن قرار داده است. در مسائلی همچون گودبرداری و تونل که ماهیت مسأله عمدتاً باربرداری است، استفاده از مدلی که تفاوت رفتار در بارگذاری و تاریچه تنش را لحاظ نماید مطلوب‌تر خواهد بود. همانطور که در بالا اشاره شد مدل MC توانایی در نظر گرفتن تفاوت رفتار در بارگذاری و باربرداری را ندارد و در واقع تاریخچه تنش را در نظر نمی گیرد. اما مدل HS این توانایی را دارد. همانگونه که اشاره شد مدل MC توانایی تشخیص ماهیت بارگذاری را ندارد و به تاریخچه تنش که یکی از مهمترین مباحث در خاک است اعتنایی ندارد. برای مثال در نتیجه این ضعف، بالازدگی در کف خاکبرداری یا تونل به طور غیرواقع گرایانه بالا محاسبه می‌شود. اما در مدل HS، تعریف سه ورودی سختی و نیز وارد کردن شرایط تنش در پارامترهای سختی، این قابلیت را به مدل داده تا تاریخچه تنش را در نظر بگیرد و تفاوت رفتار را در بارگذاری‌های مختلف تشخیص و ارائه دهد. باید گفت که مدل MC عکس العملی در مقابل مسیر تنش ندارد و در واقع در مسائلی شبیه به حفاری فضاهای زیرزمینی رفتار خلاف واقع را برای خاک و سنگ نمایان می‌کند. بعبارت دیگر مدل MC یک مدل صرفاً حساس به برش است. این ضعف در مدل HS، با در نظر گرفتن یک سطح تسلیم Cap حل شده است. نقش سطح تسلیم Cap، کنترل تسلیم فشاری است. در نهایت می‌توان گفت در مسائل مربوط به خاکبرداری، تونل سازی و حفاری فضاهای زیرزمینی

نظیر ایستگاها استفاده از مدل HS نتایجی نزدیک‌تر به واقعیت و در نتیجه مطلوب‌تر در بر خواهد داشت. به همین دلیل این مدل رفتاری در این گزارش مبنای مدل سازی و تحلیل قرار گرفته است

۵- نتایج و بحث

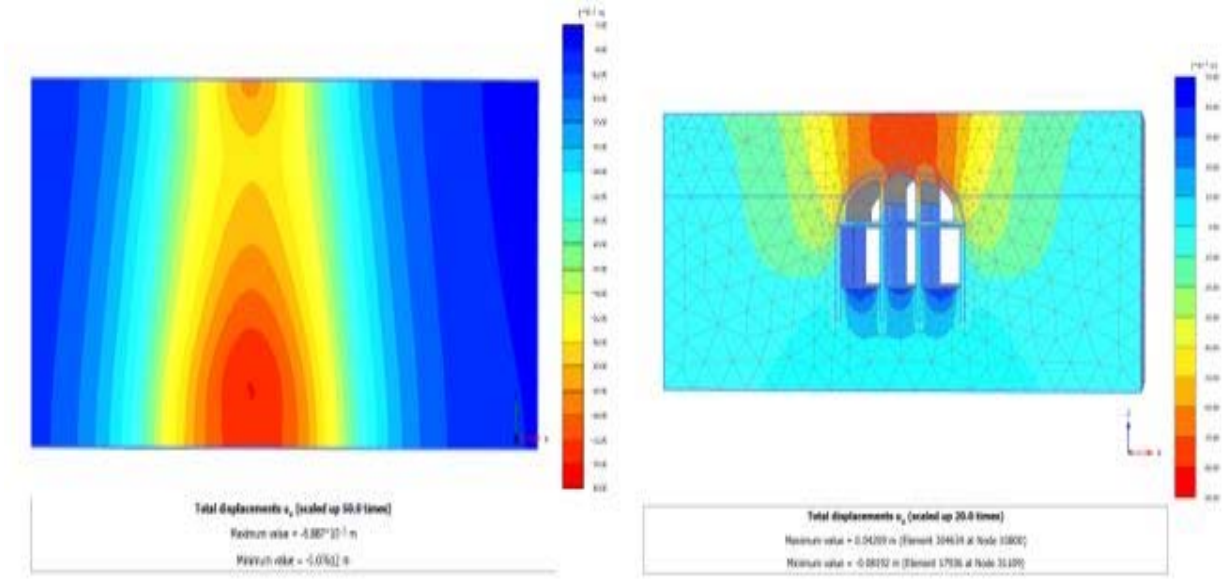
۵-۱-نتایج تحلیل و مدل سازی روش حفاری مرحله‌ای با شمع در طبقه سکو

در این بخش نتایج حاصل از مدل سازی عددی در روش حفاری مرحله‌ای با شمع در طبقه سکو ارائه شده است. یعنی بخش بلیط فروشی در این روش مشابه حفاری و لاینینگ می‌شوند. در این روش در جناحین ایستگاه شمع‌هایی به منظور حفاری بخش سکو حفاری و بتن ریزی می‌شود. در این بخش فقط نتایج حاصل از حفاری بخش سکو ارائه شده است. در شکل زیر مقادیر نشست در سطح زمین پس از حفاری و لاینینگ بلیط فروشی در هر دو حالت حفاری مرحله ای و حفاری مرحله ای با شمع در طبقه سکو ارائه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود نشست در سطح زمین در دو مدل برابر ۶۱ و ۶۳ میلی‌متر می‌باشد که دارای تطابق کاملی هست. در ادامه جابجایی‌ها و نشست‌ها در سایرمراحل مدل سازی ارائه شده است.

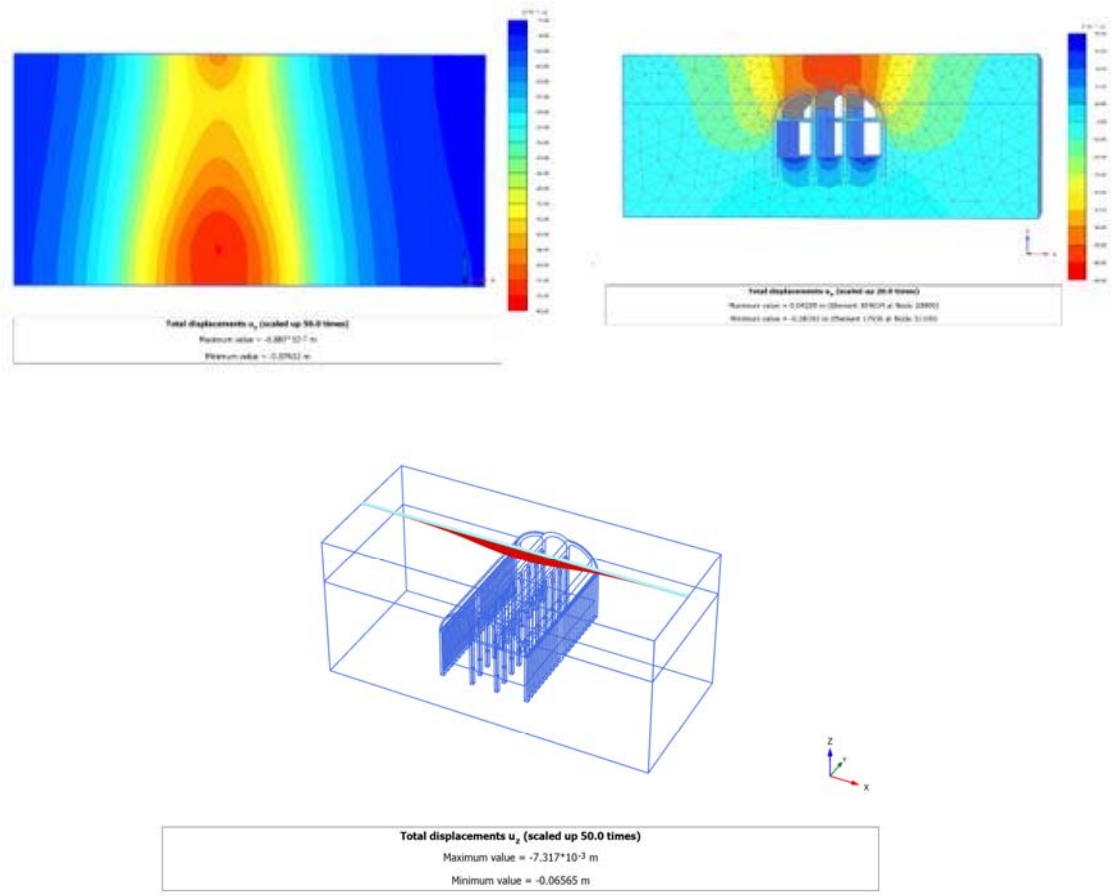


الف) روش حفاری مرحله ای، ب)روش حفاری مرحله‌ای با شمع در طبقه سکو

شکل۸. نشست در سطح زمین پس از حفاری و لاینینگ بلیط فروشی



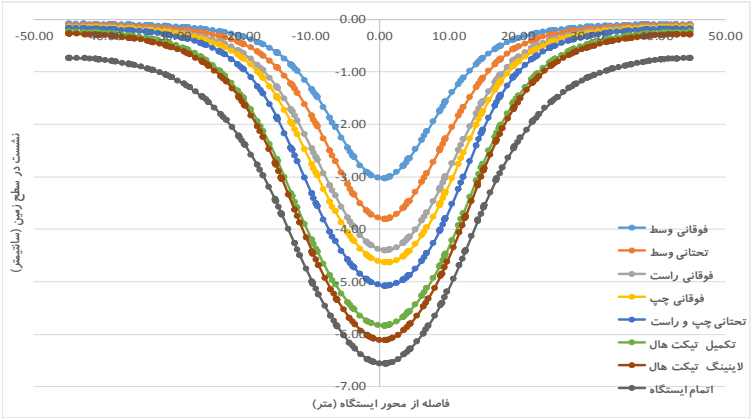
شکل۹. جابجایی قائم و نشست در سطح زمین پس از حفاری و لاینینگ بلیط فروشی



شکل ۱۰. جابجایی قائم و نشست در سطح زمین پس از از حفاری بلیط فروشی

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود ماکزیمم نشست در سطح زمین پس از اتمام حفاری طبقه بلیط فروشی و سکو به ترتیب برابر ۶۱ و ۶۵ میلی‌متر می‌باشد.

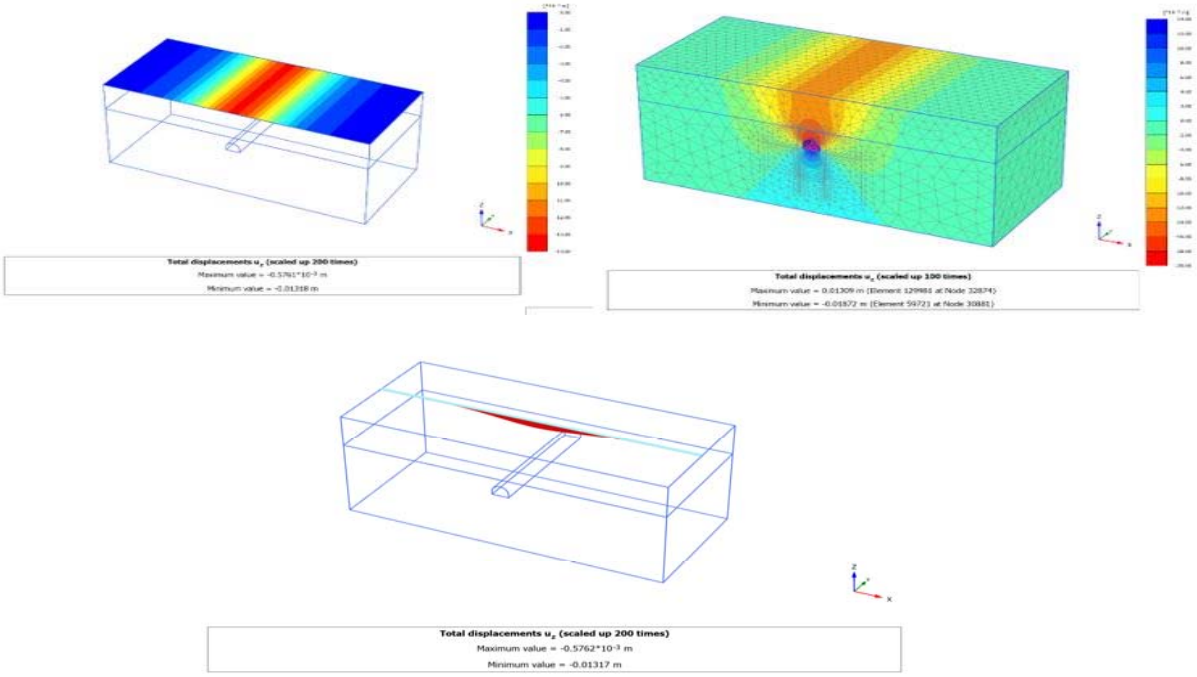
همانطور که در شکل بالا مشاهده می‌شود بیشترین مقدار نشست در سطح زمین در این روش حفاری برابر ۶۵ میلی‌متر می‌باشد.



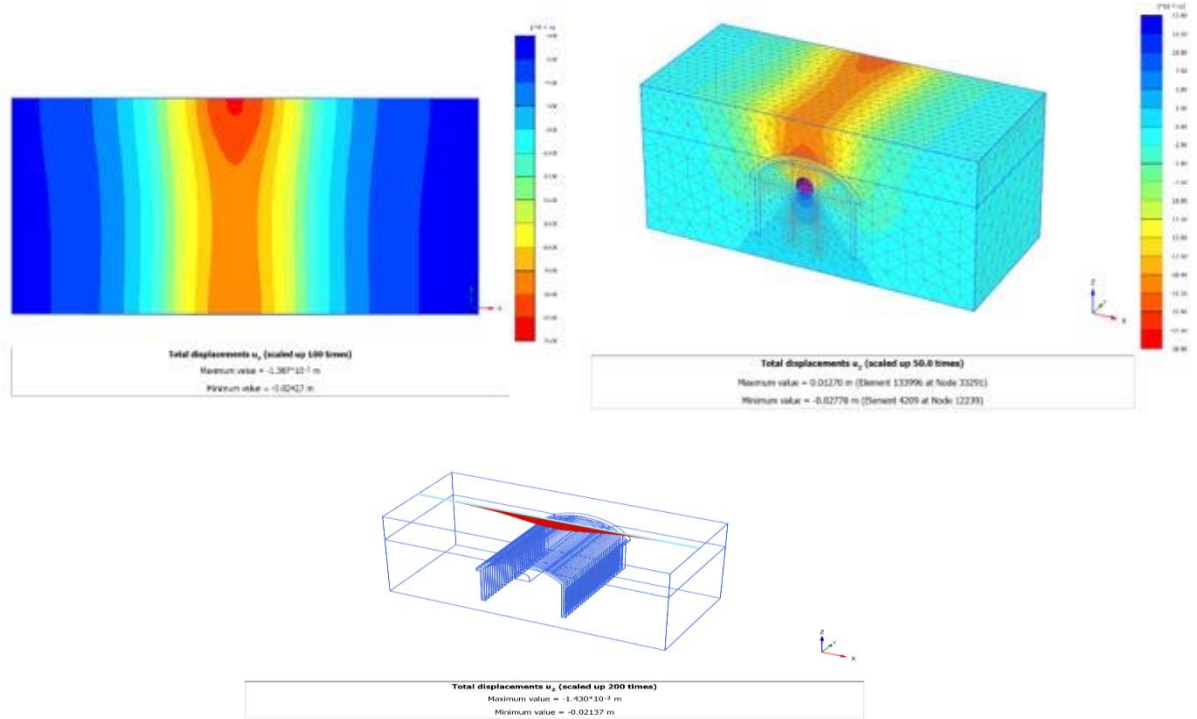
شکل ۱۱. نشست در سطح زمین در روش حفاری مرحله ای با شمع در طبقه سکو

۵-۲- نتایج تحلیل و مدل سازی روش حفاری شمع و ریب

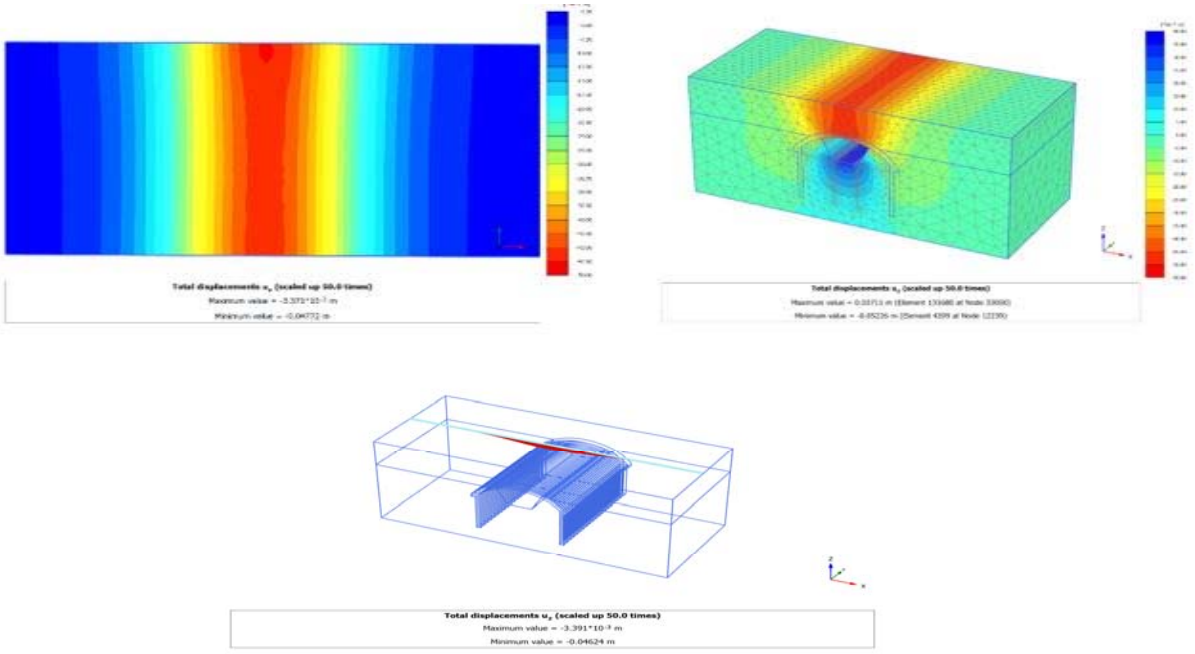
در این بخش نتایج حاصل از مدل سازی عددی در روش حفاری با شمع و ریب ارائه شده است. مدل سازی مراحل حفاری بر اساس آنچه در بخش‌های قبلی توضیح داده شده بود انجام شده است. در ادامه مقادیر جابجایی قائم و نشست‌های بوجود آمده در سطح زمین در مراحل مختلف حفاری ارائه شده است.



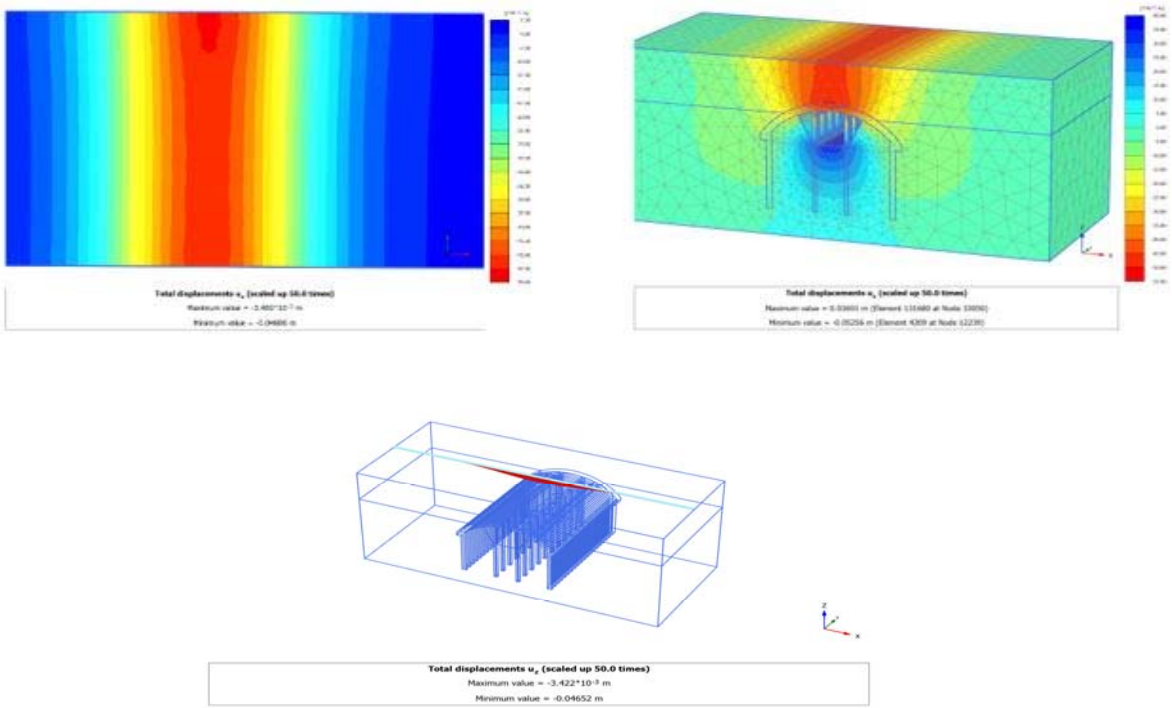
شکل۱۲. جابجایی قائم و نشست در سطح زمین پس از حفاری تونل پاترول رو



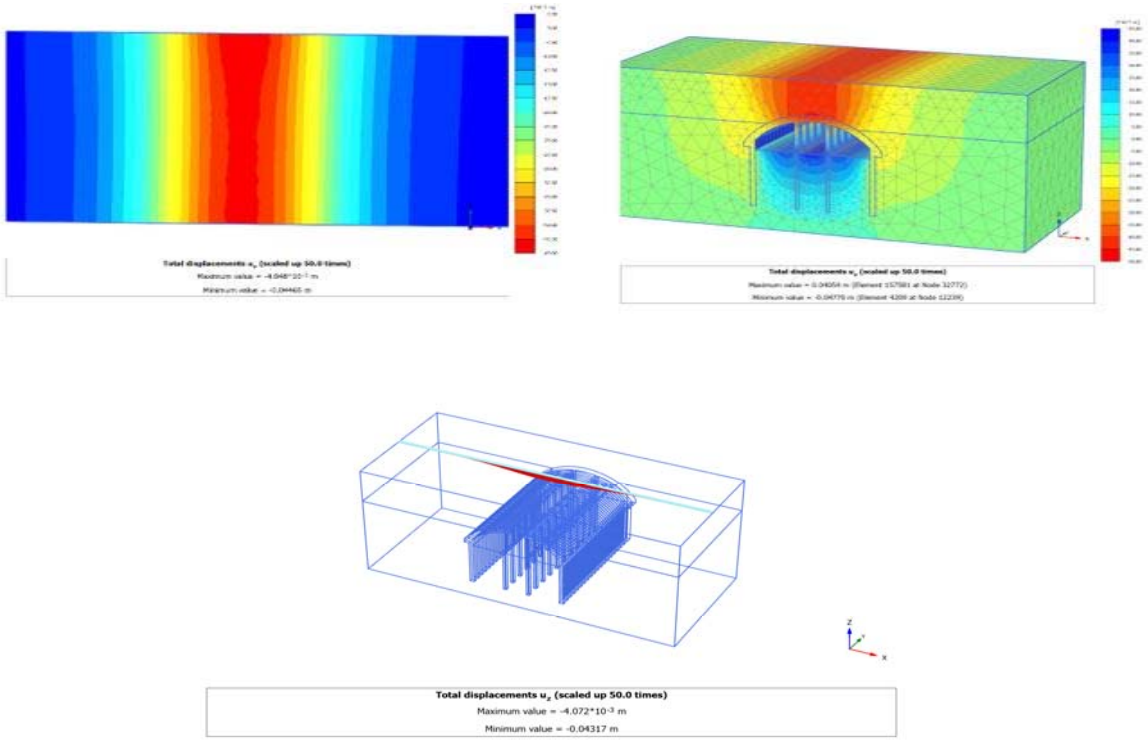
شکل ۱۳. جابجایی قائم و نشست در سطح زمین پس از حفاری و بتن ریزی شمع و ریب



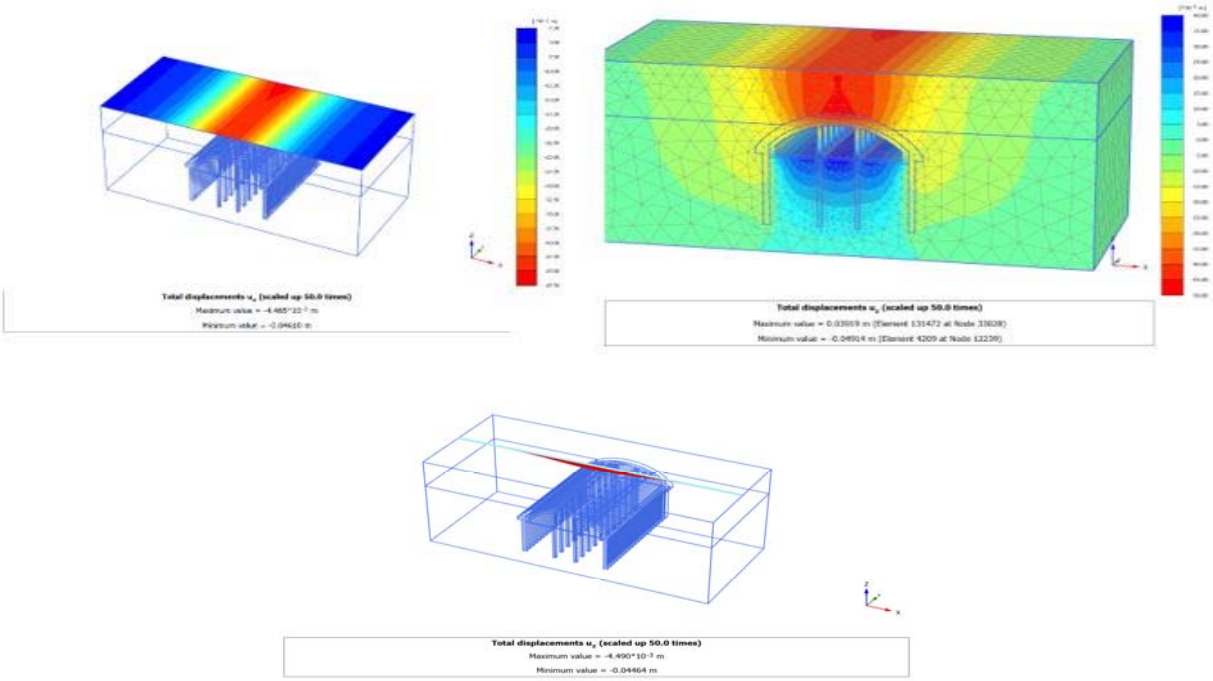
شکل ۱۴. جابجایی قائم و نشست در سطح زمین پس از حفاری بخش میانی بلیط فروشی



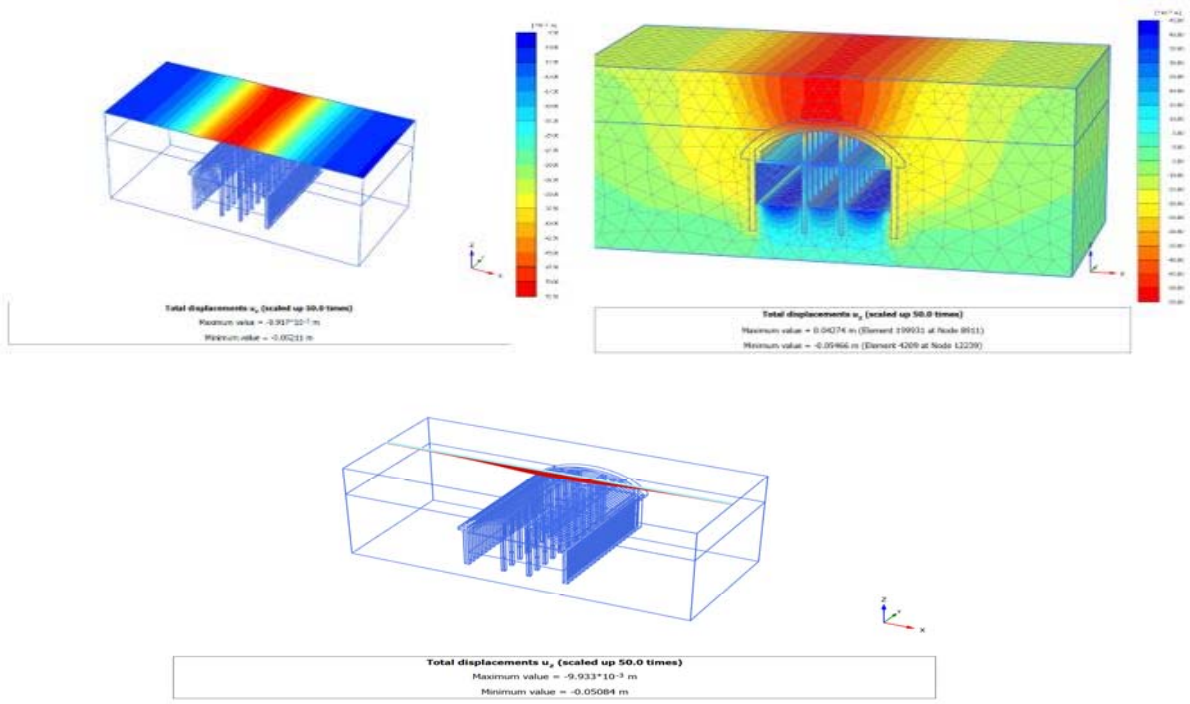
شکل ۱۵. جابجایی قائم و نشست در سطح زمین پس از حفاری و بتن ریزی شمع‌های میانی



شکل ۱۶. جابجایی قائم و نشست در سطح زمین پس از حفاری کامل بلیط فروشی



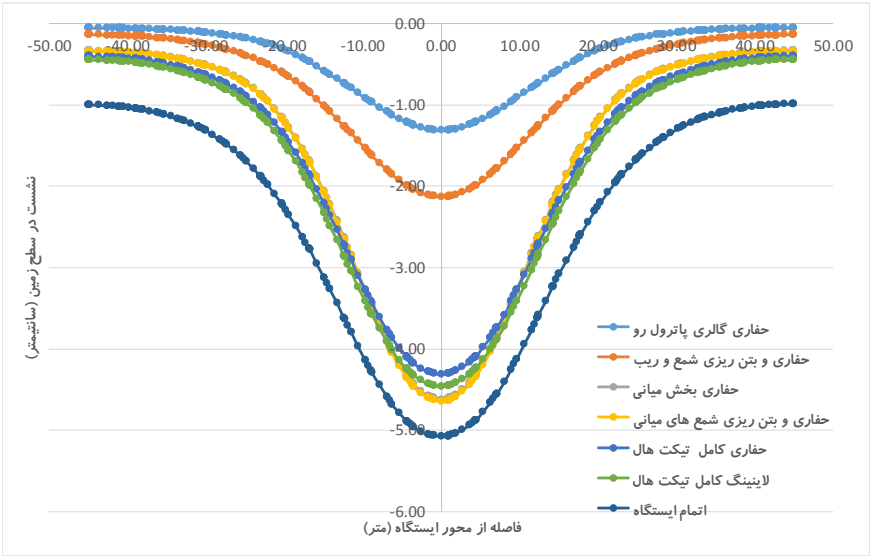
شکل ۱۷. جابجایی قائم و نشست در سطح زمین پس از لاینینگ کامل بلیط فروشی



شکل۱۸. جابجایی قائم و نشست در سطح زمین پس از حفاری کامل سکو

همانطور که در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود بیشترین مقدار نشست در سطح زمین در این روش حفاری پس از تکمیل تیکت‌ها و سکو به ترتیب برابر ٤٤ و ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. در شکل زیر مقادیر نشست سطح زمین در مراحل مختلف حفاری ارائه شده است.

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود اولا نشست‌ها در این روش در زمان حفاری طبقه بلیط فروشی در حدود ۲۰ میلی‌متر کمتر از روش‌های قبلی می‌باشد و ثانیاً نشست نهایی ناشی از ساخت ایستگاه در این روش کمتر می‌باشد.



شکل ۱۹. نشست در سطح زمین در روش حفاری شمع و ریب

٦- نتیجه‌گیری

روش‌های گوناگونی برای فعالیت‌های زیر زمینی ارائه و بکارگیری شده است. این روش‌ها به طور عام دارای نقاط مشترک بوده ولی در اجرا هر کدام از آنها با هم تفاوت داشته و از هم جدا می‌باشند. از جمله پارامترهای مهم که باید در حفاری مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد می‌توان به مشخصات هندسی، مشخصات زمین‌شناسی و ژئومکانیکی، شرایط پروژه و زیرساخت‌های موجود، زمان به اتمام رسیدن پروژه و مسائل زیست محیطی را نام برد. همچنین پیش بینی و کنترل نشست هم از لحاظ ایمنی و هم از نقطه نظر اقتصادی از اهمیت قابل توجهی در مناطق شهری برخوردار است. در سال‌های اخیر، استفاده از تونل کاری در عمق کم برای حفاری فضاهای زیرزمینی از جمله ایستگاه مترو و فضاهای مشابه در خاک‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته که به دلیل عدم ایجاد خلل در ترافیک، در فضاهای شهری مورد علاقه می‌باشد. در این‌مطالعه به بررسی روش‌های‌حفاری مختلف در ایستگاه استقلال‌شیراز پرداخته شد. به منظور بررسی هر کدام از روش‌ها از مدل سازی عددی به روش سه بعدی با نرم افزار PLAXIS-3D استفاده شد. هدف‌از مدل سازی عددی به روش سه بعدی،بررسی‌دقیق میزان نشست‌حین‌اجرا و تعیین بهترین روش اجرا با کمترین میزان نشست می‌باشد. باتوجه به وجود روباره ۹ متری تا روی تاج سازه نهایی و دهانه ۲۲متری (بیشترین دهانه داخلی در طبقه بلیط فروشی) و موقعیت قرارگیری ایستگاه در محدوده شهری و ساختمان، ارزیابی‌نشست، در روش‌های‌مختلف حفاری از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. روش‌های حفاری مورد بررسی شامل اجرای ایستگاه به روش شمع و ریب (طاق بتنی)، اجرای ایستگاه به روش حفاری مرحله ای و اجرای ایستگاه به روش حفاری مرحله‌ای با شمع در طبقه سکو بود. به منظور بررسی هر کدام از روش‌ها مدلی با ابعاد ٤٠×٩٠×٤٠ متر در نرم افزار ساخته شد. با توجه به بررسی‌های انجام شده از مدل رفتاری سخت شونده خاک برای مدل سازی رفتار خاک استفاده شد. در مسائلی همچون گودبرداری و تونل که ماهیت مسأله عمدتاً باربرداری است روشن است استفاده از مدلی که تفاوت رفتار در بارگذاری و تاریچه تنش را لحاظ می‌نماید مطلوب‌تر خواهد بود. روش حفاری مرحله‌ای با شمع در طبقه سکو جهت بررسی دقیق‌تر مدل سازی شد. در روش حفاری مرحله‌ای با شمع در طبقه سکو در بخش بلیط فروشی، مقدار نشست‌های آن در حدود ٦١ میلی-متر بود. پس از حفاری سکو در این روش‌با استفاده از شمع‌ها، مشاهده شد افزایش نشست در این روش در زمان حفاری بخش سکو بسیار کم و در حدود ٤ میلی‌متر می‌باشد ماکزیمم نشست در سطح زمین پس از اتمام حفاری طبقه بلیط فروشی و سکو به ترتیب برابر ٦١ و ٦٥ میلی‌متر می‌باشد. به منظور کاهش نشست‌ها در حفاری ایستگاه استفاده از روش‌های دیگر ممکن مورد بررسی قرار گرفت. یکی از روش‌های بسیار متداول در حفاری ایستگاه‌های زیرزمینی در ایران، استفاده از روش شمع و ریب می‌باشد. مزیت اصلی این روش احداث سازه نگهبان قبل از حفاری خاک می‌باشد که می‌تواند به عنوان یک سیستم پیش نگهداری عمل کند. مشکل اصلی در این روش نیز حفاری شمع و ریب‌ها و آرماتور بندی و بتن ریزی آنها می‌باشد. بر اساس نتایج مدل سازی در این روش، مشاهده شد که ماکزیمم نشست در این روش در حدود ۵۰ میلی‌متر می‌باشد که نسبت به روش حفاری مرحله ای با شمع در طبقه سکو دارای کاهش ۱۵ میلی‌متر بود. بر اساس بررسی‌های انجام شده در مراحل مختلف حفاری مقدار نشست در مرحله حفاری تونل پاترول رو در حدود ۲۵ درصد نشست نهایی یعنی ١٤ میلی‌متر بود. پس از آن حفاری و بتن ریزی شمع‌ها باعث افزایش نشست‌ها تا حدود ٤٠ درصد نشست نهایی (۲۰ میلی‌متر) شد. ماکزیمم نشست بوجود آمده در این روش در زمان حفاری طبقه تیکت‌ها در حدود ٤٥ میلی‌متر بود که در مقایسه با روش حفاری مرحله‌ای با شمع در طبقه سکو دارای کاهش ۱۵میلی‌متر بود. در نهایت با توجه به یکسان بودن عملکرد سازه نگهبان در بخش سکو نسبت به روش حفاری مرحله‌ای با شمع در طبقه سکو، افزایش نشست‌ها در مرحله حفاری طبقه سکو بسیار ناچیز و در حدود ۵ میلی‌متر بود. بنابراین براساس بررسی‌های انجام شده اجرای‌شمع در طبقه سکو کمک زیادی در کاهش نشست‌های ناشی از حفاری این بخش می‌کند و بهترین روش از لحاظ میزان نشست‌ها، روش حفاری با استفاده از شمع و ریب می‌باشد.

۷-مراجع

- Arioglu, E., (1992). Surface movements due to tunnelling activities in urban areas and minimization of building damages. Short Course, *Istanbul Technical University.* Mining Engineering Department (in Turkish).

- Ercelebi, S. G., Copur, H., & Ocak, I., (2011). Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM. *Environmental Earth Sciences*, 62(2), 357-365.

- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2007). Mechanized Tunneling in Urban Areas. London, UK: E-Library, *Taylor & Francis.*

- Javadi, S. A., Mohammadnejad, M., Hoseini, S. M., Mikaeil, R., & Tolooiyan, A. (1399). Numerical and analytical investigation of ground surface settlement due to subway excavation. *Geosciences*, 2(6), 185-191.

- Kao, M. and Li Z., (2018). A simplified analysis method for the influence of tunneling on grouped piles. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 410-422.

-Loganathan, N., & Poulos, H. G., (1998). Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays. *Journal of Geotechnical and Geo- environmental Engineering*, 124(9), 846-856.

- Shariful Islam Md, Iskander M. (2021). Twin tunneling induced ground settlements: A review. Tunneling and Underground Space Technology, 110-103614. **doi.org/10.1016/j.tust.2020.103614**

-Tang L, Na S. (2021). Comparison of machine learning methods for ground settlement prediction with different tunneling datasets. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.

doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.08.006

-Yang, Li. A. (2018). Effects of surface buildings on twin tunneling induced ground settlements. *Tunneling and Underground Space Technology*, 40-51.

- Zhang P. and carter J. (2019). Flac 3D modeling for effects of tunneling on existing support systems in the Sydney region. *Tunneling and Underground Space Technology*, 399-420.

-Zhang, K., Lyu. H. M., Shen, S. L., Zhou, A., & Yin, Z. Y. (2020). Evolutionary hybrid neural network approach to predict shield tunneling-induced ground settlements.

Tunneling and Underground Space Technology, 106, 103594.

doi.org/10.1016/j.tust.2020.103594.

Investigation of Shallow Tunneling Method (STM) for Metro Station Construction in Weak Soils and Low Overburden (Case Study: Esteghlal Metro Station in Shiraz)

Mahmood Salimi, M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran.

Sayyed Yaghoub Zolfegharifar, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran.

Zarir Salehpourservak, Assistant Professor, Departmnt of Civil Engineering and Architecture, Yasuj Branch, Islamic Azad University, Yasuj, Iran.

E-mail: syzoalfeghary@gmail.com

Received: February 2024- Accepted: June 2024

ABSTRACT

Different methods for digging tunnels have been invented and used. These methods generally have common points, but in the implementation of each of them, they are different and separate from each other. Always considering risk, cost and time reduction, the best method for tunnel excavation should be selected and implemented. Choosing the optimal method for tunnel digging requires full knowledge of tunnel digging methods and the parameters affecting them. Among the important parameters that should be studied and evaluated are geometrical characteristics, geological and geotechnical characteristics, project conditions and existing infrastructure, project completion time, and environmental issues. Also, the prediction and control of settlement is of significant importance in urban areas, both from the point of view of safety and from the economic point of view. In recent years, the use of working tunnels at a shallow depth has been used to dig underground spaces, including subway stations and similar spaces in different soils, which is popular in urban spaces due to the lack of disruption to traffic. Tunneling at a shallow depth and in weak soil is called STM (Shallow Tunneling Method).Using STM in urban spaces it should be accurately evaluated in terms of settlement on the ground surface and its effects on surface mining structures. In order to check each of the methods, three-dimensional numerical modeling will be used. The purpose of numerical modeling by 3D method is to accurately check the amount of settlement during execution and to determine the best execution method with the least amount of settlement. Different methods with different classifications for drilling have been examined and finally the method that can be used in this study is presented and the best method with the least amount of settlement is introduced as the best option.

Keywords: Loose Embankment, Reinforcement, Geogrid, Foundation, Static Combined Loading, Bearing Capacity