نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE)

دوره هفتم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱، صفحه ۸۱ تا ۹۷
Vol. 7, No. 1, Spring 2022, pp. 81-97

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14590.1469

علمی-پژوهشی

مدلسازی عددی روش‌های بهسازی زمین در حفاری تونل خط شش مترو تهران

مهدی طهماسبی[1]، مجید نیکخواه[2*]

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

(دریافت ۱۳۹۹/۰۸/۳۰، پذیرش ۱۴۰۰/۰۶/۰۶)

چکیده

از مهم‌ترین مشکلات موجود زمین‌های سست در پی‌ها و تونل‌زنی، بهسازی خاک است که در این ارتباط تقویت خاک درجا برای استفاده مجدد در یک ساختار جدید ژئوتکنیکی و یا بهبود وضعیت ساختار فعلی مد نظر است. در تحقیق حاضر شیوه اجرای روش عددی المان محدود برای پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین قبل و بعد از اجرای بهسازی زمین در فرآیند حفاری تونل دسترسی شرقی ایستگاه میدان خراسان واقع در خط ۶ مترو تهران تشریح شده است. از آنجا که مسیر این تونل از زیر ساختمان‌های مسکونی و مغازه‌ها عبور می‌کند، با حفاری این قسمت از پروژه ایستگاه میدان خراسان، مقادیر نشست قابل توجهی در سطح زمین به وجود آمده است که موجب ترک خوردن ساختمان‌ها و مغازه‌ها شده است. بر این اساس در این تحقیق چندین روش بهسازی شامل روش‌های شمع‌گذاری، فورپولینگ و مهارگذاری (انکراژ) که برای زمین‌های سست و ریزشی قابل استفاده‌اند، به صورت عددی به وسیله نرم‌افزار MIDAS GTS NZ مدلسازی و بررسی شده است. در این پژوهش علاوه بر بررسی عملکرد روش‌های یاد شده، اثر پارامترهای هندسی از جمله همپوشانی لوله‌های فورپولینگ، طول شمع و قطر انکراژ مورد بررسی قرار گرفته است. معیار بررسی، جابه‌جایی رخ داده در سطح زمین و تاج تونل در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از روش‌های بهسازی بررسی شده در کاهش نشست سطح زمین و تاج تونل کارا و در روش‌های بررسی شده بیشینه نشست سطح زمین از نشست مجاز (۳۵ میلی‌متر) کمتر است. از میان روش‌های بهسازی یاد شده، روش استفاده از روش فورپولینگ به همراه انکراژ علاوه بر آنکه نقاط پلاستیک در اطراف تونل را کاهش می‌دهد، تاثیر بیشتری در کاهش نشست سطح زمین دارد، به طوری که موجب کاهش حدود ۰۵ درصدی بیشینه نشست سطح زمین شده است.

کلمات کلیدی

بهسازی، فورپولینگ، مدلسازی عددی، مهارگذاری، شمع‌گذاری، اجزا محدود.

*نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: madjid.nikkhah@gmail.com

حق‌مؤلف © نویسندگان
ناشر: دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

۱- مقدمه

اجرای تونل‌سازی در محیط‌های شهری همواره دشواری‌ها و خطرات خاص خود را داشته است. مهم‌ترین قسمت طراحی قبل از حفاری این قبیل تونل‌ها به ویژه در حالت کم‌عمق، بررسی مسایل مرتبط با نشست سطح زمین است؛ زیرا اغلب این تونل‌ها از زیر ساختمان‌های مسکونی و تجاری عبور می‌کنند. مطالعات زیادی در خصوص نشست‌های ناشی از تونلسازی و همچنین روش‌های مختلف کنترل و کاهش میزان تغییر شکل‌ها و آسیب‌های وارده بر سازه‌های سطحی انجام یافته است.

پی ای کاویثا و همکاران[۱] به مطالعه پیش‌بینی رفتار ساختاری دقیق اندرکنش بین شمع- خاک تحت بارگذاری پرداختند. نتایج آنها نشان داد که پنج پارامتر مهم خاک شامل وزن مخصوص، مدول برشی، نسبت پواسون، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و زاویه اتساع در بیان رفتار شمع- سازه موثر است[۱]. لوگاناتان و همکاران[۲] در مقاله‌ای به کمک یک روش تحلیلی، جابه‌جایی‌های اطراف و سطح زمین را در حالتی که از شمع‌های تکی و گروهی استفاده شد، تخمین زدند. آنها با افزایش فاصله شمع‌ها از مرکز تونل، مقادیر نشست سطح زمین و کلاهک شمع را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که در یک فاصله ثابت شمع از تونل، نشست سطح زمین در حالتی که از شمع تکی و گروهی استفاده شده، بیشتر است. همچنین شمع گروهی نشست کمتری از شمع تکی نشان می‌دهد [۲]. فرعی و احترامی در پژوهشی با انجام مدلسازی عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پلکسیس، به تعیین و ارزیابی ریسک سازه‌های سطحی با تعداد طبقات و عرض‌های متفاوت پرداختند. نتایج حاصل از مدلسازی آنها نشان داد که در عملکرد اقدام تحکیمی پیشگیرانه، تاثیر طول شمع‌های بتنی به مراتب بیشتر از فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها است [۳].

در پژوهشی دیگر بیلوتا و روسو[۳]، در یک مطالعه عددی سه‌بعدی، به بررسی کاهش نشست سطح زمین و سازه‌های سطحی با احداث شمع و دیوار دیافراگمی در فاصله مشخصی از تونل پرداختند. بر اساس مطالعات آنها، با افزایش فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها، کرنش متوسط افقی در خاک کاهش یافته و این عاملی برای محدود کردن جابه‌جایی‌های سازه است [۴]. فانترا و همکاران[۴] یک مطالعه عددی در موضوع نشست زمین در اثر حفر تونل و کاهش نشست سازه‌ها با احداث دیوار[۵] دیافراگمی بین سازه و تونل انجام دادند که طبق مطالعه آنها نیز با افزایش عمق دیوار دیافراگمی، میزان نشست سازه‌ها کمتر شده است [۵].

در روش پیش‌تحکیم فورپولینگ در زمین‌های سست، قبل از اجرای حفاری، خواص زمین‌هایی که مصالح قابل تحکیم دارند، افزایش می‌یابد. پس از اوایل ۱۹۷۰ که روش پیش‌تحکیمی فضا، به عنوان یک ایده تئوری مورد نظر قرار گرفته بود، در اوایل دهه ۱۹۸۰ این روش اولین بار در ژاپن توسط ساته و همکارانش[۶] برای ساخت ایستگاه مترو استفاده شد [۶]. طبق تحقیقات هارازاکی و همکاران[۷]، استفاده از فورپول‌ها باعث کاهش همگرایی تونل و همچنین کنترل نشست‌های سطحی شده و هیچگونه آسیبی به سازه‌های واقع در بالای تونل وارد نشده است. در این مورد طول لوله‌های فورپول ۱۲ متر، قطر آن‌ها ۱۱۴٫۳ میلی‌متر و ضخامت آن‌ها ۶ میلی‌متر گزارش شده است[۷]. اکسوی و اونارگان[۸] در پژوهشی تاثیر روش پیش‌نگهداری را روی تونل مترو ازمیر ترکیه تحلیل کردند. در این پژوهش نقش روش پیش‌نگهداری و مسلح‌سازی جبهه‌کار تونل به وسیله تحلیل سه‌بعدی برای روش طاق‌چتری و بدون روش طاق‌چتری جهت جلوگیری از تغییر شکل سیستم تکیه‌گاهی و خسارت وارده بر تونل بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که به کارگیری روش طاق‌چتری و بولت‌های جبهه‌کار، میزان نشست را تا بیش از ۶۹٪ و همگرایی را نیز کاهش می‌دهد [۸].

روش بهسازی مهارگذاری (انکراژ) یکی دیگر از روش‌های بهسازی است که شامل انکرهای پیش‌تنیده دایمی تزریق شده با دوغاب سیمان است که در خاک و سنگ استفاده می‌شود [۹]. لی و یوو [۹] در پژوهشی به مطالعه و مدلسازی عددی تاثیر حفاری‌های عمیق در نشست سطح زمین‌های خاک پرداختند. بدین منظور آنها از روش مهارگذاری و میخ‌گذاری برای پایداری دیوار و بهسازی زمین اطراف استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که با افزایش فاصله اولین مهاری از سطح زمین، جابه‌جایی در بالای مهار بسیار زیاد می‌شود، ولی روند تغییر شکل دیواره ثابت است [۱۰]. ملاحسنی مطالعات گسترده‌ای در پارامترهای تاثیرگذار در روش مهارگذاری با کمک روش اجزای محدود در حالت دوبعدی و سه‌بعدی انجام داد. نتایج او نشان داد که استفاده از روش مهارگذاری در خاک موجب افزایش قابل توجه ضریب اطمینان و کاهش نشست می‌شود و همچنین زاویه مهار برای کمترین تغییر شکل جانبی، کمترین نشست سطح زمین مجاور گود و بیشترین نیروی بسیج شده در مهار در حدود ۲۰ درجه است [۱۱].

چانگ فو و شون جان[10] در پژوهشی نشان دادند که برای مهاری، شعاع و طول بهینه‌ای وجود دارد و افزایش یکی از این دو پارامتر تاثیری دایمی بر روی افزایش ظرفیت باربری ندارد. با افزایش طول مهاری نیز ابتدا ظرفیت باربری مهاری افزایش یافته و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد [۱۲].

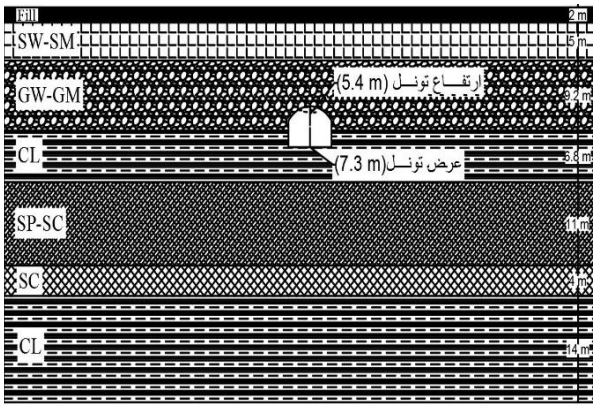
بخشنده و همکاران ۱۳۹۲ بهسازی خاک در حفاری به روش EPB تونل خط ۷ متروی تهران را که اغلب به وسیله فوم انجام می‌شود را پیشنهاد دادند. در مطالعه انجام گرفته پارامترهای بهسازی با به کارگیری سه نوع فوم در طول مسیر تونل با توجه به بررسی‌های تئوری، آزمایشگاهی و میدانی ارایه شده است[۱۳]. کرم نیای فر و نقی دهقان در سال ۱۳۹۷ روش فورپولینگ بر کنترل نشست سطحی را با مدلسازی سه‌بعدی عددی مراحل حفاری با لحاظ کردن مقطع تغییر شکل جبهه‌کار تونل در تونل‌های کم‌عمق مطالعه کردند [۱۴].

در پژوهش حاضر به مدلسازی تونل دسترسی شرقی ایستگاه میدان خراسان واقع در خط ۶ مترو تهران برای بررسی پایداری تونل و نشست ناشی از حفاری تونل پرداخته شده است. پس از آن روش‌های بهسازی شمع‌گذاری، فورپولینگ و انکراژ جهت دستیابی به نشست مجاز در سطح زمین و پایداری بهتر تونل مطالعه شده است. برای انجام مدلسازی از نرم‌افزار اجزا محدود MIDAS GTS NX که از نرم‌افزارهای تخصصی در حوزه ژئوتکنیک و تونل‌سازی است استفاده شده است.

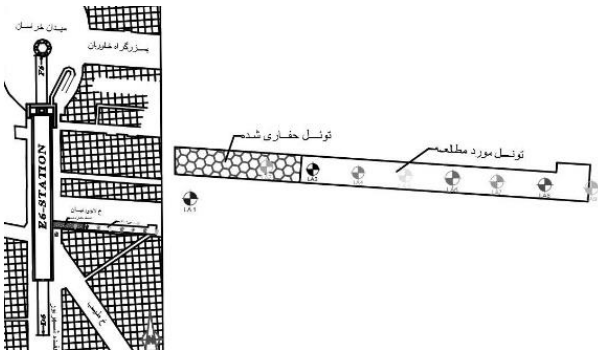
۲- مشخصات مطالعه موردی

ایستگاه میدان خراسان یکی از ایستگاه‌های خاص در محدوده پر ترافیک شهر است که به لحاظ حجم جابه‌جایی مسافر و محل قرارگیری اهمیت خاصی دارد. حفاری این ایستگاه به دلیل وجود سطح آب زیرزمینی نسبتا بالا با مشکلاتی روبه‌رو شده و با روش‌های خاصی اجرا شده است. البته در حال حاضر با توجه به دوره‌های خشکسالی سطح آب مقدار زیادی کاهش پیدا کرده است. تونل دسترسی مورد مطالعه در شرق ایستگاه میدان خراسان قرار دارد که تقریبا طولی حدود ۱۰۰ متر، عرض ۷٫۳ متر و ارتفاع تقریبا ۵٫۴ متر را شامل می‌شود که به صورت D شکل حفاری می‌شود. شکل ۱ مقطع عرضی لایه‌های خاک و موقعیت تونل و شکل ۲ نیز موقعیت تونل مورد مطالعه در ایستگاه میدان خراسان را نشان می‌دهد.

خاک ساختگاه منطقه مورد بررسی به طور متناوب از



شکل ۱: مقطع عرضی لایه‌های زمین و موقعیت تونل [۱۵]



شکل ۲: موقعیت تونل مورد مطالعه در ایستگاه میدان خراسان[۱۶]

لایه‌های ریزدانه و درشت‌دانه تشکیل شده است. پارامترهای ژئومکانیکی منطقه مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

۳- مدلسازی عددی

از آنجایی که محدوده مورد مطالعه در مصالح خاکی تا حدودی سست و ضعیف واقع شده است و با توجه به محیط دربرگیرنده تونل، یکی از مناسب‌ترین روش‌های مدلسازی برای تحلیل این گونه تونل‌ها، استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار سه‌بعدی ژئوتکنیکی MIDAS GTS NX (نرم‌افزار قدرتمند تحلیل محیط‌های خاکی) است. در این ارتباط مدل موهر-کلمب اصلاح شده به عنوان مدل رفتاری خاک در نظر گرفته شده است. هدف این پژوهش مقایسه روش‌های مختلف بهسازی خاک در مطالعه موردی یاد شده است؛ بدین منظور ابتدا مدل اولیه ساخته شده، سپس برای اعتبارسنجی مدل، نتایج نشست سطح زمین در مدل با داده‌های ابزار دقیق نشست‌سنجی سطحی سنجیده شده است. پس از آن مدلسازی

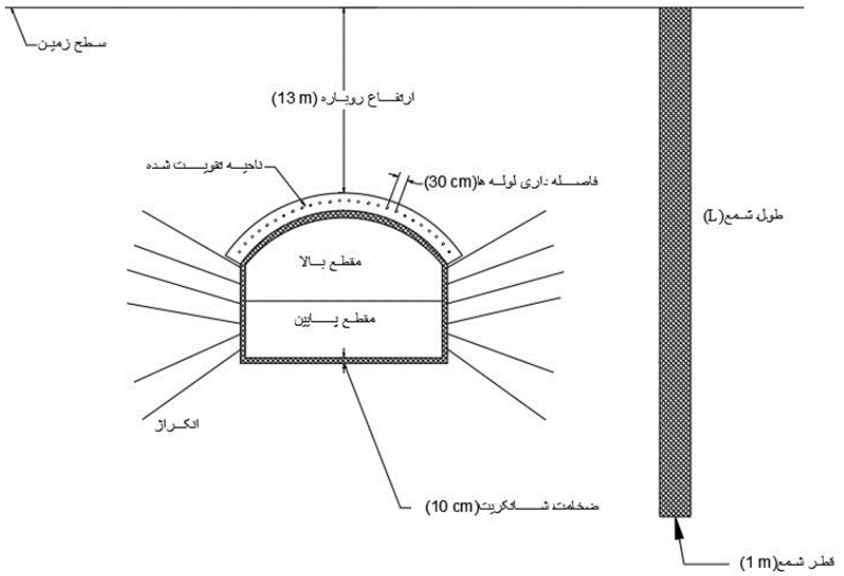
روش‌های بهسازی شمع‌گذاری، فورپولینگ و انکراژ انجام و با توجه به نشست مجاز و معیار خطر نشست، بررسی و تحلیل شدند.

برای مدلسازی عددی حفاری تونل ابتدا مدلی با ابعاد ۱۰۴*۱۰۴*۵۴ متر (طول، عرض و ارتفاع) به طوری که جابه‌جایی‌ها به مرزهای مدل نرسد، ساخته شده است. تونل یاد شده با مقطع D شکل با دهانه ۷٫۳ متر، ارتفاع ۵٫۴ متر و طول حفاری ۲۰ متر شبیه‌سازی شده است.

برای کاهش نشست سطح زمین روش‌های مختلف متداول شامل بهسازی فورپولینگ، شمع‌گذاری و انکراژ، مدلسازی و مطالعه شده است. در هر یک از روش‌ها با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای مکانیکی سازه و تغییر تعدادی از پارامترهای هندسی، به مدلسازی و تجزیه و تحلیل روش‌های بهسازی اقدام شده است. شکل ۳ طرح شماتیکی از هندسه روش‌های بهسازی خاک انجام شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. در این شکل تنها شماتیک کلی از روش‌های بهسازی برای درک درستی از هندسه روش‌ها ارایه شده است. در تمامی روش‌ها، مدل رفتاری الاستیک خطی برای سازه‌های به کار برده شده مانند لوله‌های فورپولینگ، شمع، انکراژ و نظایر آنها استفاده شد. ویژگی‌های مکانیکی این نوع سازه‌ها طبق مصالح به کار رفته شده در پروژه‌های مشابه شرکت حمل و نقل شهری در نظر گرفته شده است (جدول ۲).

جدول ۱: پارامترهای ژئومکانیکی مصالح خاک دربرگیرنده تونل [۱۵]

لایه	جنس	ضخامت (m)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (kPa)	وزن مخصوص (kN/m^3)
خاک دستی	-	۲	۰٫۴	۷	۱۰	۱۵	۲۰
۱	SW-SM	۵	۰٫۴	۱۲	۱۵	۳۰	۲۰
۲	GW-GM	۹٫۲	۰٫۳۵	۲۵	۲۷	۳۰	۲۰
۳	CL	۶٫۸	۰٫۴	۲۰	۲۰	۷۵	۱۹٫۵
۴	SP-SC	۱۱	۰٫۳۵	۸۰	۳۰	۴۰	۱۹
۵	SC	۴	۰٫۴	۹۰	۲۰	۵۰	۲۰٫۵
۶	CL	۱۴	۰٫۳۵	۱۳۵	۲۵	۴۰	۲۰



شکل ۳: طرح شماتیک مقطع عرضی روش‌های بهسازی خاک مورد استفاده در پژوهش

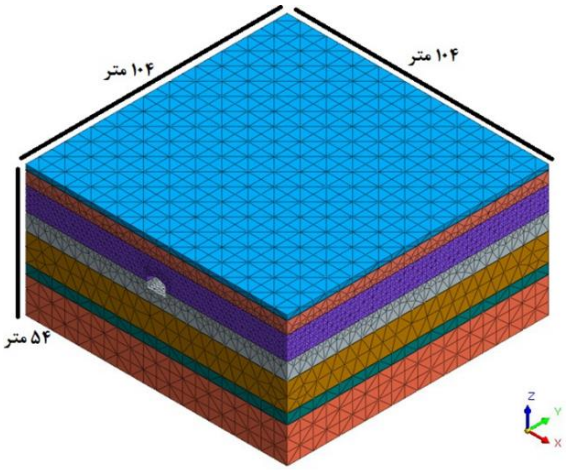
۴- بحث و نتایج

۴-۱- مدلسازی اولیه و اعتبارسنجی مدل

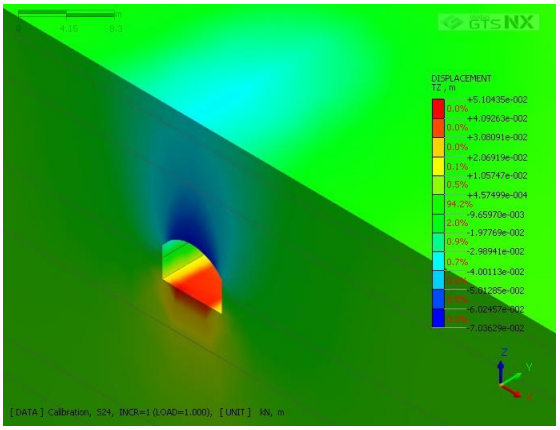
از آنجایی که تونل دسترسی به روش سنتی به صورت دو مرحله‌ای پیشانی و پله با طول گام حفاری یک متر، ارتفاع پله ۱٫۸ متر و تعداد ۲۰ گام حفاری شده است. لازم به ذکر است، مدلسازی مطابق با عملیات اجرایی از نظر توالی حفاری و اجرای تحکیمات و نگهدارنده‌های اجرا شده انجام شده است، سپس روش‌های مختلف بهسازی برای طرح مورد بررسی و تحلیل عددی قرار گرفته‌اند. برای مدلسازی این نوع ساخت و ساز از ابزار stage set در نرم‌افزار استفاده شد. به طوری که پس از حفر دومین گام حفاری، المان شاتکریت به مدل اضافه می‌شود. در ارتباط با بار ترافیکی و ساختمان‌های سطحی، در قسمت بالای تونل، بار ترافیکی ۲۴ کیلونیوتن بر مترمربع مطابق به عرض خیابان اعمال و در طرفین خیابان، نیز با توجه به سازه‌های سطحی بار ۲۰ کیلونیوتن بر مترمربع به عنوان بار سازه‌های اطراف ساختمان‌های مورد مطالعه اعمال شده است. شکل ۴ ابعاد و مش‌بندی مدل اولیه را نشان می‌دهد.

شکل ۵ کانتور جابه‌جایی قائم مدل را پس از حفر تونل و نصب نگهداری اولیه نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود و انتظار می‌رود، بیشترین نشست در تاج تونل به دست آمده است.

با توجه به آنکه تعدادی نقاط ترازیابی نقشه‌برداری به عنوان طرح ابزارگذاری و رفتارسنجی در محدوده پروژه نصب و اندازه‌گیری شده است، از این داده‌های ابزار دقیق برای واسنجی مدلسازی عددی استفاده شده است. برای مقایسه مدلسازی با نتایج ابزار دقیق، مدل اولیه ساخته شد و نتایج مقطع طولی نشست در سطح زمین در شکل ۶ ارایه شده است. در این شکل منحنی نشست سطح زمین واقع در بالای تونل و در راستای مقطع طولی نشان داده شده است. منحنی پس از حفاری ۲۰ متر تونل رسم شده است.



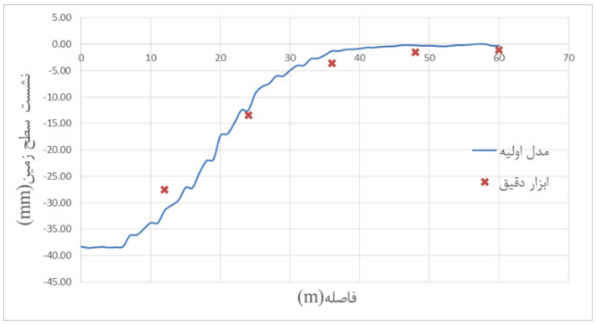
شکل ۴: ابعاد محیط دربرگیرنده مدل



شکل ۵: کانتور جابه‌جایی قائم در مدل اولیه پس از حفر تونل

جدول ۲: پارامترهای سازه‌های مورد استفاده در روش‌های بهسازی[۱۷-۱۵]

سازه	جنس	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	وزن مخصوص (kN/m^3)	نیروی کششی تسلیم(kN)	نیروی فشاری تسلیم(kN)
ناحیه تقویت شده فورپولینگ	دوغاب و خاک اطراف	۰٫۳	۱۴۷۰٫۹	۲۱٫۵	-	-
لوله فورپولینگ	فولاد	۰٫۳	۲۰۶۰۰۰	۷۷	۲۵۰	۱۴۰
شاتکریت	بتن	۰٫۳	۲۵۰۰۰	۲۴	-	-
شمع	بتن مسلح	۰٫۳	۳۱۰۰۰	۲۴	-	-
انکراژ	بتن مسلح با میله مهار	۰٫۲	۳۱۰۰۰	۲۴	۳۳۰	۲۷۰



شکل ۶: نمودار مقطع طولی نشست سطح زمین در مدل اولیه و داده‌های ابزار دقیق

چنانچه مشاهده می‌شود میزان نشست به دست آمده از مدل عددی و داده‌های ابزار دقیق همخوانی قابل قبولی دارند، برای مثال نشست در فاصله ۱۲ متری دهانه تونل (LA۲) برابر ۳۱٫۴۴ میلی‌متر است که حدود ۴ میلی‌متر با مقدار داده ابزار دقیق اختلاف دارد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدلسازی و اعتبارسنجی آن شامل مدل رفتاری و پارامترهای ورودی مدل رفتاری قابل قبول است و می‌توان روش‌های بهسازی را بر روی مدل‌های صحت‌سنجی شده انجام داد.

از آنجایی که مهم‌ترین عامل ایجاد آسیب در سازه‌ها، نشست‌های نامتقارن بوده که در واقع متناسب با چرخش است و نیز با توجه به حساس بودن پروژه خط مترو ۶، معیارهای کنترلی برای نشست در محیط‌های شهری ۳۵ میلی‌متر برای بیشینه نشست مطلق در مناطق مسکونی و ۵۰ میلی‌متر برای سایر مناطق در نظر گرفته شده است [۱۸].

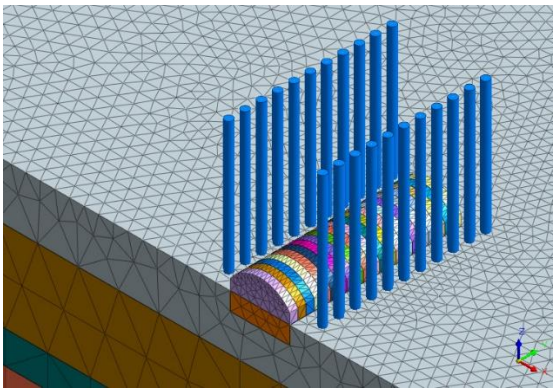
با توجه به آنکه سطح زمین در ایستگاه میدان خراسان شامل تعدادی مغازه و ساختمان‌های مسکونی است، مقدار ۳۵ میلی‌متر به عنوان بیشینه نشست مجاز در نظر گرفته شده است. با این حال با توجه به نتایج مدل اولیه، بیشینه نشست سطح زمین ۳۷ میلی‌متر به دست آمده که از نشست مجاز فراتر رفته و نیاز به بهسازی خاک اطراف تونل است. از سوی دیگر چندین ترک خوردگی نیز در برخی ساختمان‌ها و مغازه‌ها رویت و برداشت شده‌اند.

۴-۲- بررسی روش شمع‌گذاری

برای مدلسازی روش شمع‌گذاری از سطح زمین، شمع‌های به قطر ثابت ۱ متر و طول‌های متغیر در نظر گرفته شده است (شکل ۲). این شمع‌ها در دو طرف تونل و به فاصله ۲ متر از دیواره‌های تونل قرار دارند. همچنین فاصله بین شمع‌ها نیز ۲ متر در نظر گرفته شده‌اند. در این ارتباط المان Embedded Truss به دلیل برآورد ویژگی‌های مکانیکی شمع و همچنین ساده‌سازی در روند مدلسازی و اجرای مدل به عنوان المان شمع انتخاب شده است. برای مدلسازی صحیح روش شمع‌گذاری ابتدا شمع‌های درجا در مدل اجرا شده‌اند و پس از آن حفاری تونل و اجرای شاتکریت انجام شده است. پس از مرحله اعمال شمع‌ها در مدل و قبل از حفر تونل، جابه‌جایی قائم در مدل رخ می‌دهد. دلیل این تنش ناشی از وزن شمع‌ها است که به لایه‌ها وارد می‌شود. مقدار بیشینه جابه‌جایی در جهت Z برابر ۲٫۳ میلی‌متر است. از آنجایی که شمع‌ها در کاهش نشست پس از حفر تونل تاثیر بیشتری دارند، می‌توان از نشست زمین پس از اعمال شمع صرفنظر کرد. شکل ۷ هندسه مدلسازی روش شمع‌گذاری را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است به دلیل وضوح شکل و نشان دادن شمع‌ها، لایه‌های خاک تا سطح زمین در شکل نشان داده نشده‌اند.

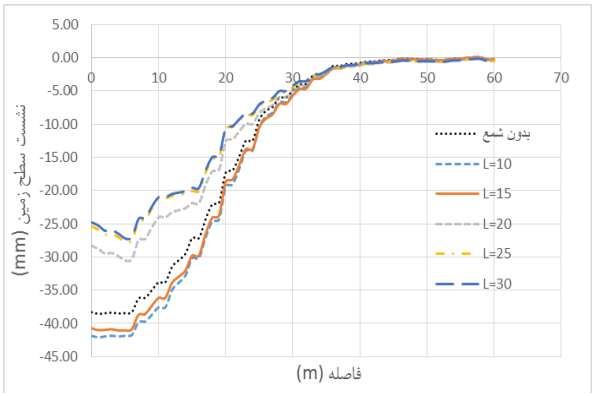
۴-۲-۱- تاثیر افزایش طول شمع بر نشست سطح زمین

برای بررسی و مقایسه افزایش طول و عمق شمع بر نشست سطح زمین در بالای تونل، شمع‌هایی با عمق‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر مدلسازی شده‌اند، سپس نشست سطح زمین در بالای تونل پس از اتمام حفاری اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصل در شکل ۸ ارایه شده است. وجود شمع‌هایی با طول‌های ۱۰ و ۱۵ متر باعث افزایش نشست سطح زمین نسبت به حالت بدون شمع است. دلیل این امر قرار داشتن شمع در لایه‌های اول و دوم است. این لایه‌ها پارامترهای چسبندگی و مدول الاستیسیته پایین دارند که باعث کاهش مقاومت برشی و



شکل ۷: مدلسازی روش شمع‌گذاری

اصطکاک بین لایه و شمع می‌شود. از آنجایی که شمع‌هایی با طول بیشتر از ۲۵ متر تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نشست ندارند، استفاده از شمع‌هایی با طول بیشتر از ۲۰ متر موجب نشست سطح زمین کمتر از نشست مجاز می‌شوند.



شکل ۸: نمودار مقطع طولی نشست سطح زمین در شمع‌هایی با طول متفاوت

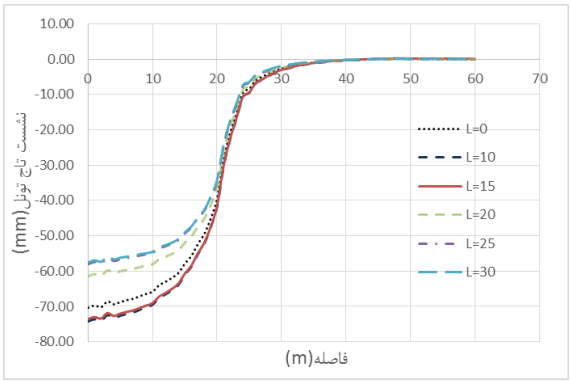
۴-۲-۲- تاثیر افزایش طول و عمق شمع بر نشست تاج تونل

استفاده از روش شمع‌گذاری در حالتی که طول و عمق شمع ۱۰ و ۱۵ متر باشد موجب افزایش جابه‌جایی قائم در تاج تونل می‌شود. این نتیجه نیز در نشست سطح زمین مشاهده می‌شود. به طوری که هنگامی که عمق شمع از ۱۸ متر بیشتر می‌شود، انتهای شمع در لایه سوم قرار می‌گیرد. در این حالت به دلیل اینکه این لایه و لایه‌های پایین‌تر استحکام بیشتری دارند، مقاومت برشی و چسبندگی بین سازه و زمین افزایش می‌یابد. پس از حفر تونل تنش‌های ایجاد شده در زمین از طریق شمع‌ها به این لایه‌ها منتقل شده و باعث کاهش نشست در تاج تونل و سطح زمین می‌شود. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب مقاطع طولی و عرضی در تاج تونل را نشان می‌دهند.

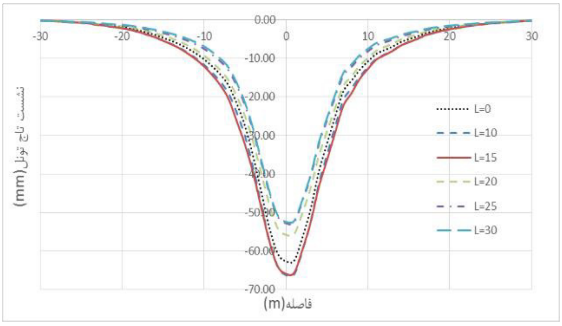
۴-۳- بررسی روش فورپولینگ

در مدلسازی فورپولینگ طبق طرح مهندسین مشاور طرح، ویژگی‌های هندسی لوله‌های فورپول و شعاع ناحیه تقویت شده (با توجه با لایه قرارگیری لوله‌ها) به شرح ارایه شده از جدول ۳ به کار برده شده است.

در هر مرحله از فورپولینگ تعداد ۲۷ لوله در بالای تونل قرار می‌گیرد. در این پژوهش علاوه بر مدلسازی روش فورپولینگ،



شکل ۹: نمودار مقطع طولی نشست در تاج تونل در روش شمع‌گذاری



شکل ۱۰: مقطع عرضی نشست تاج تونل در ۱۲ متری دهانه تونل در روش شمع‌گذاری

جدول ۳: ویژگی‌های هندسی لوله‌های فورپول و شعاع ناحیه تقویت شده

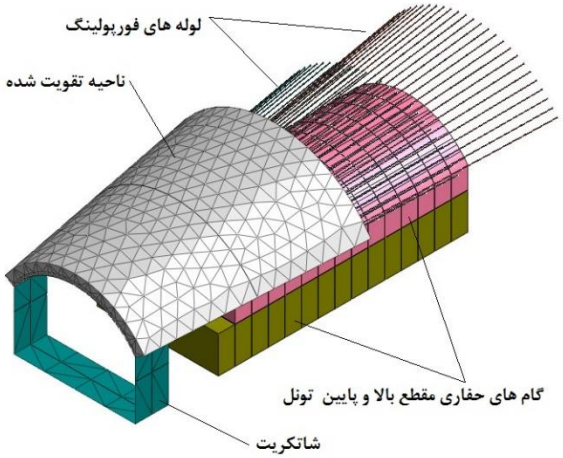
قطر لوله	۶۰ میلی‌متر
ضخامت جداره	۸ میلی‌متر
طول لوله‌ها	۱۲ متر
زاویه قرارگیری لوله‌ها نسبت به افق	۸ درجه
فاصله مرکز به مرکز لوله‌ها	۳۰ سانتی‌متر

تاثیر طول همپوشانی بر نشست سطح زمین نیز بررسی شده که در ادامه ارایه شده است. شکل ۱۱ هندسه مدلسازی روش فورپولینگ را نشان می‌دهد.

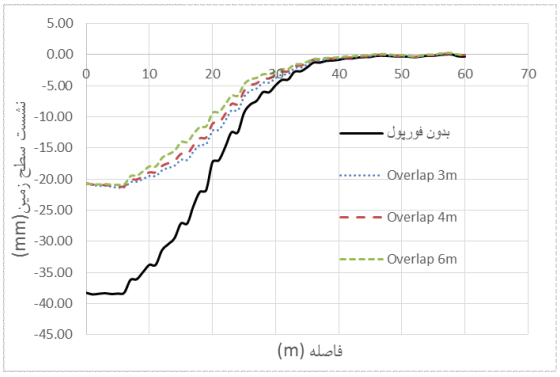
۴-۳-۱- تاثیر افزایش طول همپوشانی بر نشست سطح زمین

نتایج حاصل از مدلسازی فورپولینگ با طول‌های همپوشانی ۳ ، ۴ و ۶ متر در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور

که از شکل ۹ پیداست، استفاده از روش فورپولینگ تاثیر قابل توجهی بر کاهش نشست سطح زمین داشته است؛ به گونه‌ای که باعث کاهش ۵۰ درصدی بیشینه نشست در سطح زمین شده است (کمتر از نشست مجاز). چنانچه انتظار می‌رود افزایش طول همپوشانی نیز باعث کاهش نشست سطح زمین می‌شود؛ با این حال روند کاهش بسیار کم است.



شکل ۱۱: مدلسازی در روش فورپولینگ



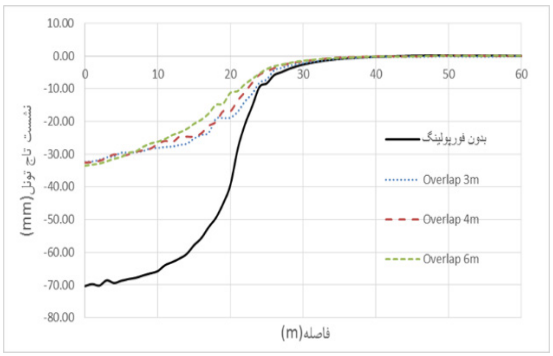
شکل ۱۲: مقطع طولی تاثیر افزایش طول همپوشانی لوله‌های فورپولینگ بر نشست سطح زمین

۴-۳-۲- تاثیر افزایش طول همپوشانی بر نشست تاج تونل

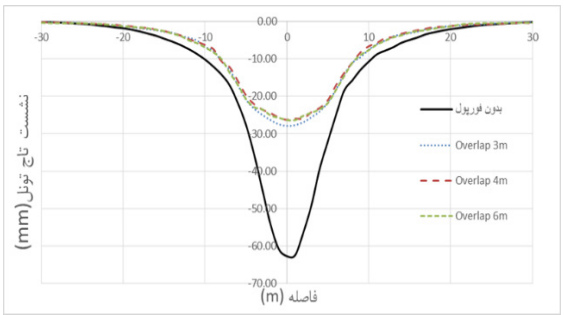
شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نشست تاج تونل در مقاطع طولی و عرضی (در فاصله ۱۲ متری از دهانه تونل) را نشان می‌دهد. استفاده از روش بهسازی فورپولینگ تاثیر چشمگیری در کاهش نشست تاج تونل داشته است. به طوری که به کاهش ۵۰ درصدی بیشینه نشست در تاج تونل نسبت به مدل اولیه منجر شده است. دلیل این کاهش، ناحیه تقویت شده‌ای است که بر اثر تزریق دوغاب در بالای تونل ایجاد می‌شود. همان‌طور که از شکل‌های بالا پیداست، افزایش طول همپوشانی باعث کاهش نشست می‌شود؛ اما روند کاهش نشست در این حالت نسبتا کم است. از آنجایی که افزایش طول همپوشانی موجب افزایش هزینه و اتلاف زمان حین حفاری می‌شود بهتر است اگر از این روش در پروژه استفاده می‌شود از همپوشانی با طول ۳ متر استفاده شود.

۴-۳-۳- نیروی‌های وارده بر المان نگهدارنده فورپولینگ

برای بررسی اثر بخشی المان نگهدارنده فورپول و کنترل ظرفیت باربری آنها در شکل ۱۵ نیروی محوری وارده بر المان‌های فورپول نشان داده شده است. این شکل دیاگرام نیروهای محوری در یک مقطع با فورپول‌هایی به طول ۱۲ متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، درگیری

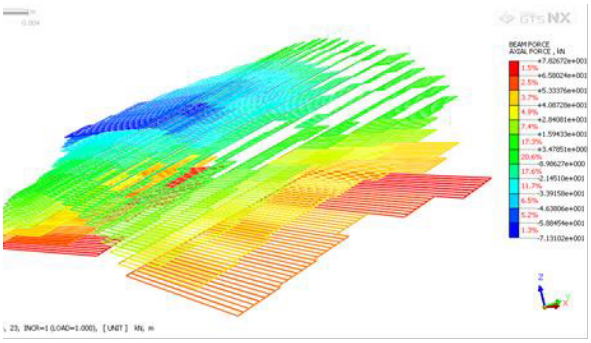


شکل ۱۳: مقطع تونلی تاثیر افزایش طول همپوشانی لوله‌های فورپول بر نشست تاج تونل



شکل ۱۴: تاثیر طول همپوشانی بر نشست تاج تونل (مقطع عرضی در فاصله ۱۲متری از دهانه تونل)

لوله‌ها با دوغاب تزریقی و زمین اطراف لوله مشخص است. در لوله‌های واقع در تاج، قسمت ابتدایی و انتهایی کمان D شکل، بیشینه نیروی محوری وجود دارد. از آنجایی که بیشینه نیروی محوری (۷۸kN) از نیروی مجاز کششی (۲۵۰kN) و فشاری (۱۴۰kN) کمتر است، هیچگونه گسیختگی در المان لوله‌های فورپولینگ رخ نمی‌دهد.



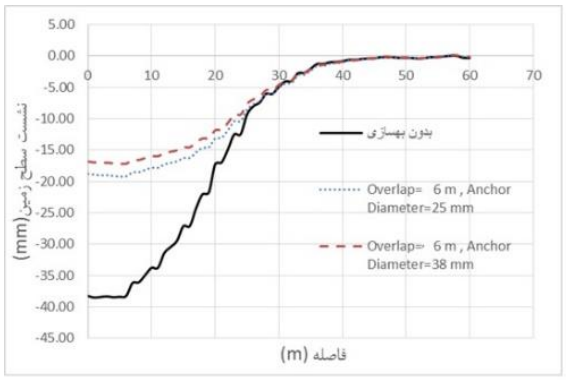
شکل ۱۵: نیروی محوری در لوله‌های فورپولینگ

۴-۴- بررسی روش فورپولینگ به همراه انکراژ (مهاری)

در مدلسازی از المان خرپای نهانیده شده در نرم‌افزار استفاده شده برای اعمال و شبیه‌سازی انکراژ استفاده شده است. از آنجایی که استفاده از روش ریز شمع به تنهایی تاثیر چندانی بر کاهش نشست ندارد، از این روش به همراه روش فورپولینگ استفاده شده است. انکراژهایی به تعداد ۶ عدد و طول ۳٫۴ متر با توجه به ابعاد فضای تونل، در هر دیواره قرار دارد. دو انکراژ در پایین دیوار با زاویه ۳۵ درجه و ۴ انکراژ با زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق در نظر گرفته شد. این مهاری‌ها پس از هر مرحله گام حفاری (به طول ۱ متر) بر مدل اعمال شده‌اند.

۴-۴-۱- بررسی تاثیر قطر انکراژ بر نشست سطح زمین

برای بررسی تاثیر قطر انکراژ مدلسازی انکراژهایی با قطرهای ۲۵ و ۳۸ میلی‌متر انجام شده است. به طور کلی استفاده از انکراژها در دیواره‌های تونل موجب کاهش نشست سطح زمین شده است (شکل ۱۶). استفاده از انکراژ با قطر ۲۵ میلی‌متر کاهش چشمگیری نداشته است (نسبت به منحنی روش فورپولینگ) در حالی که با افزایش قطر به ۳۸ میلی‌متر موجب کاهش بیشینه نشست به مقدار ۴ میلی‌متر شده است. دلیل دیگر استفاده از انکراژها، کاهش بالازدگی کف تونل است. نتایج مبین آن است که استفاده از این روش موجب کاهش بالازدگی کف تونل شده و همچنین بیشینه نشست سطح زمین در این روش از نشست سطح مجاز کمتر شده است.



شکل ۱۶: تاثیر افزایش قطر انکراژ (مهاری) بر نشست سطح زمین

۴-۴-۲- بررسی تاثیر قطر انکراژ بر نشست تاج تونل

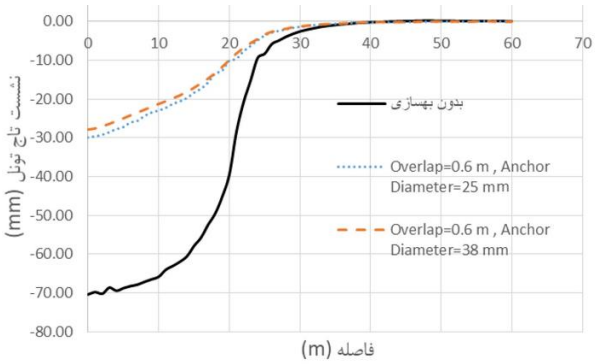
برای بررسی بیشتر، علاوه بر بررسی نشست سطح زمین، شکل‌های ۱۷ و ۱۸ به ترتیب مقطع نشست تاج تونل در راستای طولی و عرضی (در فاصله ۱۲ متری) را نشان می‌دهند. استفاده از انکراژ در دیواره تونل جابه‌جایی‌های قائم در تاج را کاهش داده است. به طوری که استفاده از انکراژهایی با قطر ۲۵ و ۳۸ میلی‌متر به ترتیب موجب کاهش ۳ و ۷ میلی‌متری بیشینه نشست نسبت به استفاده از فقط روش فورپولینگ شده است.

۴-۴-۳- بارهای وارد بر المان انکراژ

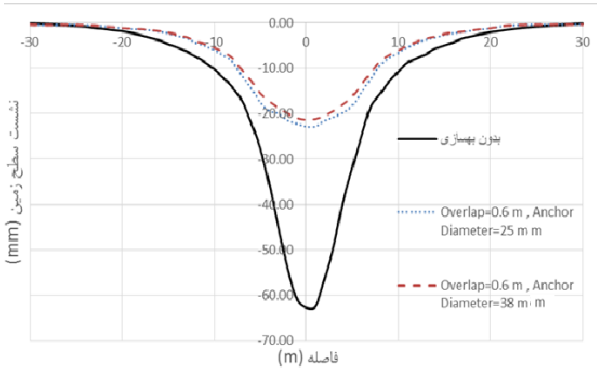
در این بخش نیز برای بررسی درگیری انکراژ و کنترل ظرفیت کاری آنها، در شکل ۱۹ نیروی محوری در المان انکراژ نشان داده شده است. بیشترین نیروی محوری در ابتدای انکراژ واقع در دیواره تونل به وجود آمده است. در این حالت نیز بیشینه نیروی ایجاد شده ۲۳۰kN است که از مقاومت کششی مجاز (با در نظر گرفتن فاکتور ایمنی) المان انکراژ (۳۳۰kN) کمتر است که نشان‌دهنده عدم گسیختگی انکراژها است.

۴-۵- مقایسه تاثیر روش‌های بهسازی بر ناحیه پلاستیک اطراف تونل

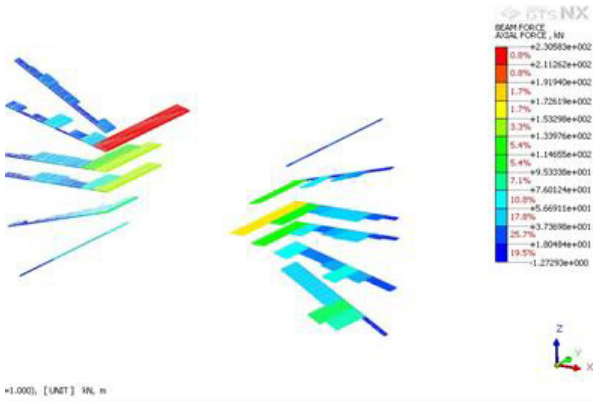
با شروع تغییر شکل‌های غیرالاستیک و گسترش ناحیه با رفتار پلاستیک در اطراف تونل، میزان فشار وارده بر سقف تونل



شکل ۱۷: مقطع طولی نشست در تاج تونل (روش فورپولینگ به همراه انکراژ)



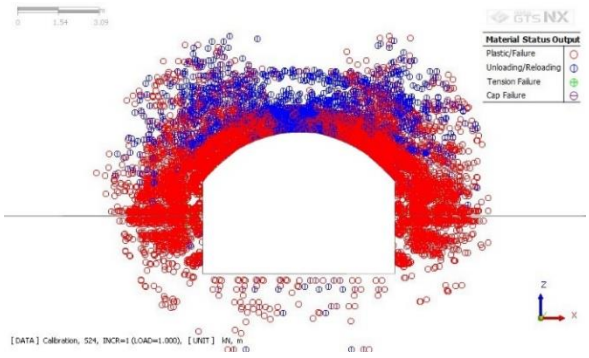
شکل ۱۸: مقطع عرضی نشست در تاج تونل در فاصله ۱۲ متری از دهانه (روش فورپولینگ به همراه انکراژ)



شکل ۱۹: نیروی محوری در المان انکراژ

و دیواره به علت وزن ناحیه پلاستیک اطراف آن افزایش می‌یابد که این امر نقش مهمی در تحلیل پایداری تونل ایفا می‌کند. وزن ناحیه پلاستیک به توزیع تنش و در نهایت جابه‌جایی اطراف تونل منجر می‌شود. تغییر شکل ناشی از ناحیه پلاستیک باعث افزایش نشست تاج و در لایه‌هایی که استحکام بالایی ندارند، ممکن است حتی به ریزش تاج و دیواره تونل منجر شود.

شکل ۲۰ ناحیه پلاستیک ایجاد شده اطراف تونل را در حالت بدون بهسازی نشان می‌دهد. نقاط قرمز ناحیه پلاستیک را در تاج، دیواره تونل نشان می‌دهد. ناحیه بارگذاری- باربرداری نیز با نقاط آبی مشخص شده است. افزایش تراکم نقاط آبی نشان از جابه‌جایی بالا در آن ناحیه دارد.



شکل ۲۰: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در مدل اولیه

شکل ۲۱ ناحیه پلاستیک اطراف تونل را در حالتی که از روش بهسازی شمع‌گذاری با طول ۲۵ متر استفاده شد را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌های یاد شده پیداست، استفاده از روش شمع‌گذاری تاثیر چندانی بر ناحیه پلاستیک اطراف تونل ندارد. با این حال تاحدودی باعث کاهش تراکم نقاط در ناحیه بارگذاری- باربرداری در تاج تونل شده است.

استفاده از روش بهسازی فورپولینگ به علت ایجاد ناحیه الاستیک در تاج تونل، به خوبی از ایجاد و گسترش ناحیه پلاستیک جلوگیری می‌کند (شکل ۲۲). در این حالت تزریق دوغاب در اطراف لوله‌های فورپول باعث می‌شود که لایه بالای تونل رفتار الاستیک داشته باشد و جابه‌جایی‌های ناشی از ناحیه پلاستیک به طرز چشمگیری کاهش یابد.

هنگامی که از فورپلینگ به همراه انکراژها در دیواره تونل استفاده شود، تراکم نقاط قرمز (ناحیه پلاستیک) به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد که در نهایت به کاهش ناپایداری و گسیختگی و افزایش پایداری تونل منجر می‌شود (شکل ۲۳).

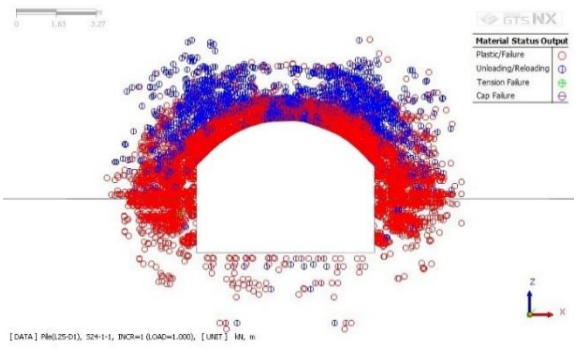
در حالتی که از روش بهسازی فورپولینگ به همراه انکراژ استفاده شود، توزیع تنش در تاج و دیواره تونل کاهش می‌یابد و به سمت جبهه‌کار تونل روانه می‌شود. افزایش تراکم نقاط قرمز در جبهه‌کار ناشی از ایجاد ناحیه الاستیک در تاج و اطراف دیواره است.

در صورتی که از انکراژهایی با مدول الاستیسیته و چسبندگی بالا استفاده شود به درستی می‌توان از تمرکز تنش در دیواره جلوگیری کرد.

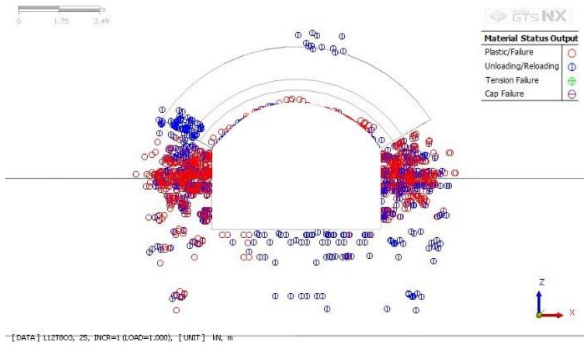
۵- نتیجه‌گیری

بر اساس پژوهش انجام شده، اهم نتایج به دست آمده به شرح ذیل است:

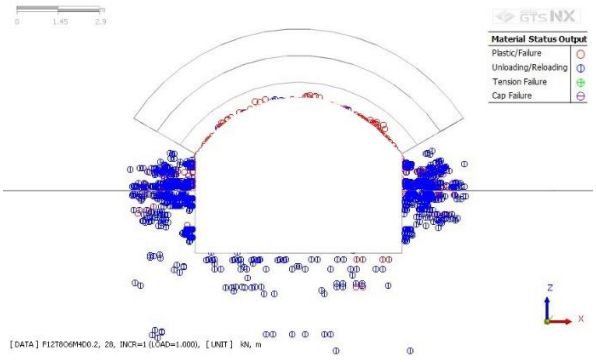
- پس از مدلسازی اولیه تونل دسترسی با خواص و شرایط نزدیک به واقعیت، مشخص شد که بیشینه نشست سطح زمین تا ۲۰ متر حفاری تونل از نشست مجاز ناحیه بیشتر است، که این امر ضرورت اجرای بهسازی خاک اطراف تونل را نشان می‌دهد.
- از آنجایی که انتخاب مدل رفتاری موهر-کلمب برای لایه‌های خاک، خروجی غیر واقعی از مدل ارایه می‌دهد، استفاده از مدل رفتاری موهر-کلمب اصلاح شده، مدل نتایج واقعی‌تری نسبت شرایط واقعی ارایه داد.
- در روش شمع‌گذاری، تغییر طول شمع موجب تغییر نشست سطح زمین و تاج تونل شد. هنگامی که طول شمع‌ها کمتر از ۱۸ متر باشد، مقدار نشست سطح زمین و تاج تونل افزایش می‌یابد؛ دلیل این امر قرار داشتن شمع‌ها در لایه‌های اول و دوم خاک است. این لایه‌ها چسبندگی و مدول الاستیسیته پایین دارند که باعث کاهش مقاومت برشی و اصطکاک بین لایه و شمع می‌شود.
- در روش شمع‌گذاری، با افزایش طول شمع به ۲۰ متر و بالاتر، سازه در لایه‌های سوم و چهارم قرار می‌گیرد. در این لایه‌ها بالا بودن مدول الاستیسیته و چسبندگی موجب افزایش مقاومت برشی و اصطکاک بین زمین و سازه شده و تاثیر چشمگیری در کاهش نشست سطح زمین دارد. از آنجایی که شمع‌هایی با طول بیشتر از ۲۵ متر تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نشست ندارد.



شکل ۲۱: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در روش بهسازی شمع‌گذاری



شکل ۲۲: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (روش فورپولینگ)



شکل ۲۳: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (روش فورپولینگ به همراه انکراژ)

• استفاده از روش فورپول‌ینگ تاثیر قابل توجهی بر کاهش نشست سطح زمین دارد؛ به گونه‌ای که باعث کاهش حدود ۵۰ درصدی بیشینه نشست در سطح زمین شده است. افزایش طول همپوشانی نیز باعث کاهش نشست سطح زمین می‌شود.

• هنگامی که در کنار روش فورپولینگ از انکراژها در دیواره تونل استفاده شود، نشست سطح زمین و تاج تونل کاهش بیشتری می‌یابد و به علاوه نقاط پلاستیک اطراف تونل کاهش می‌یافته است. همچنین استفاده از انکراژها در دیواره در کاهش بالازدگی کف تونل تاثیر دارد. همچنین با افزایش قطر انکراژ، نشست کاهش می‌یابد.

• در حالتی که از روش شمع‌گذاری استفاده شود، تاثیر چندانی در کاهش ناحیه پلاستیک ندارد و تنها کمی در دیواره تونل را بهبود می‌بخشد. استفاده از روش فورپول‌ینگ با ایجاد ناحیه ناشی از تزریق دوغاب در تاج تونل، موجب کاهش رفتار پلاستیک شده و در نهایت نشست تاج تونل را کاهش می‌دهد. هنگامی که در روش فورپولینگ از انکراژها در دیواره تونل استفاده شود، ناحیه پلاستیک دیواره تونل کاهش می‌یابد.

۶- مراجع

[1] Kavitha, P. E., Beena, K. S., and Narayanan, K. P. (2016). *"A review on soil–structure interaction analysis of laterally loaded piles"*. Innovative Infrastructure Solutions, 1(1): 14.

[2] Loganathan, N., Poulos, H. G., and Xu, K. J. (2001). *"Ground and pile-group responses due to tunneling"*. Soils Found, 41(1): 57-67.

[۳] فرعی، ا.، احترمی، ع.؛ ۱۳۹۸؛ "**رده‌بندی ریسک سازه‌های سطحی و بررسی عملکرد شمع درجا در کاهش نشست‌های ناشی از حفر تونل‌های مترو در مناطق شهری (مطالعه موردی: متروی تبریز)**". مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، سال پنجم، پیاپی هفدهم، ص ۱۱۹-۹۷.

[4] Bilotta, E., and Russo, G. (2010). *"Use of a line of piles to prevent damages induced by tunnel excavation"*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(3): 254-262.

[5] Fantera, L., Rampello, S., and Masini, L. (2016). *"A mitigation technique to reduce ground settlements induced by tunnelling using diaphragm walls"*. Procedia Engineering, 158: 254-259

[6] Moriwaki, T., and Satoh, T. (2009). *"Method for determining the horizontal coefficient of permeability of clay"*. Proceedings of the 44th Annual Presentation of Geotechnical Engineering, 219-220.

[7] Harazaki, I., Aono, H., Matsuda, A., Aoki, T., and Hakoishi, Y. (1998). *"Field observation of large tunnel supported by umbrella method: Case of Maiko Tunnel in Kobe, Japan"*. Proceedings of the World Tunnel Congress, 98: 1009-1014.

[8] Aksoy, C. O., and Onargan, T. (2010). *"The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages"*. Tunnelling and Underground Space Technology, 25(5): 553-559.

[9] Arrizabalaga, I. A. (2014). *"Comparison of the installation of strand with steel bar tendons in anchored drilled shaft wall"*. Master Thesis, Arlington College, University of Texas

[10] Lee, Y. J., and Yoo, C. S. (2006). *"Behaviour of a bored tunnel adjacent to a line of loaded piles"*. Tunneling and Underground Space Technology, 21(3-4): 370.

[11] Mollahasani, A. (2014). *"Application of Submerged Grouted Anchors in Sheet Pile Quay Walls"*. Ph.D. Thesis, Dipartimento di ingegneria civile, Università di Bologna.

[12] Chang-fu, C., and Shu-jun, X. (2008). *"Mechanical mechanism analysis of tension type anchor based on shear displacement method"*. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China, Journal of Central South University,15: 106-111.

[۱۳] بخشنده امنیه، ح.، زمزم، م.، موسوی، ا.، طریق ازلی، ص.؛ ۱۳۹۲؛ "**انتخاب مناسب‌ترین مجموعه‌ی بهسازی خاک در حفاری مکانیزه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران**". نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی دوره ۲، شماره۲، ص ۱۵۴-۱۴۵.

[۱۴] کرم نیای فر، م.، دهقان، ع. ن.؛ ۱۳۹۷؛ "**بررسی اثر سیستم پیش نگهداری(فورپولینگ) بر کنترل نشست سطح زمین ناشی از حفاری تونلها ی کم عمق شهری تحت بارگذاری ترافیک ریلی**". نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره ۷، شماره ۲، ص ۸۵-۶۳.

[۱۵] شرکت مهندسان مشاور دریا خاک پی؛ ۱۳۸۹؛ "**گزارش مطالعات ژئوتکنیک بخش جنوبی خط ۶ مترو تهران**". شرکت راه آهن شهری تهران و حومه (مترو)، تهران، ایران.

[۱۶] شرکت مهندسی آهاب؛ ۱۳۹۷؛ "**دفتر فنی و اجرایی ایستگاه میدان خراسان**". گزارشات دفتر فنی و مهندسی، تهران، ایران.

[17] Burkovič, K., Smirakova, M., and Mateckova, P. (2017). *"Testing and Modelling of Concrete Pile Foundations"*. In Key Engineering Materials, Trans Tech Publications Ltd, 738: 287-297.

[۱۸] بخشنده امینه، ح.، زمزم، م.؛ ۱۳۹۴، "**کنترل نشست زمین در تونل سازی مکانیزه در محیط‌های شهری با انجام اقدامات اصلاح مؤثر درتونل خط ۷ متروی تهران**". نشریه علمی مهندسی

معدن، دوره دهم، شماره ۲۷، ص ۵۹-۴۵.

[1] P. E. Kavitha et al
[2] Loganathan et al
[3] Bilotta, E. and Russo, G.
[4] Fantera et al.
[5] Diaphragm wall
[6] Satoh et al
[7] Harazaki et al
[8] Aksoy & Onargan
[9] Yoo & Lee
[10] Chang fu & Shun jun

Imam Khomeini International University
Vol. 7, No. 1, Spring 2022, pp. 21-24

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE)

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14590.1469

Research Paper

Numerical Modeling of Ground Improvement Methods Tehran Metro Line 6 Excavation

Tahmasebi M.[1], Nikkhah M.[2*]

1- M.Sc, Dept. of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
me.tahmasebi92@gmail.com

2- Assistant Professor, Dept. of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
m.nikkhah@shahroodut.ac.ir

(Received: 20 Nov. 2020, Accepted: 28 Aug. 2021)

Abstract: One of the most critical issues in weak grounds is soil improvement, which is considered reused in a new geotechnical structure or improves the current structure condition. In the present research, implementing a limited, finite element numerical method to predict the rate of ground settlement level before and after the implementation of ground improvement in the eastern access tunnel drilling process of Khorasan Square Station located in Tehran Metro Line 6. Since the tunnel route passes under residential buildings and shops, with the excavation of this part of the Khorasan Square Station project, large amounts of settlement exist on the ground surface, which cracked buildings and shop structures. Based on this, piling, fore poling, and anchoring improvement methods can be used for loose and fallen grounds that were modeled numerically by MIDAS GTS NZ software. In this research, in addition to investigating the performance of the mentioned methods, the effect of geometric parameters, including the covering of fore poling pipes, pile length, and the diameter of anchors, was investigated. The criteria for investigating, the Displacement occurred at ground level, and tunnel crown is considered. Results showed that all methods have been useful in reducing ground settlement and tunnel crown. Also, Among the above-mentioned improvement methods, the method of using the fore poling method with anchorage has reduced the plastic points surrounding the tunnel and also has a greater effect in reducing the settlement of the ground, so that it has reduced the maximum settlement of the ground surface by 50%.

Keywords: Fore poling pre-consolidation method, Numerical modeling, Anchoring improvement method, Piling method, Finite element method.

INTRODUCTION

Tunneling in urban environments has always had its difficulties and risks. The most important part of the design of such tunnels, especially in shallow conditions, is to study the issues associated with settlement; because most of these tunnels pass through residential and commercial infrastructure. Numerous studies

COPYRIGHTS
©2022 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.
This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

have been performed on settlement caused by tunneling as well as various methods to control and reduce the amount of deformation and damage to surface structures.

Loganathan et al. (2001) in their paper used an analytical method to estimate the displacements around the surface of the earth in the case of single and group piles. As the distance of the piles from the center of the tunnel increased, they examined the settlement amounts of the ground surface and the pile cap [1]. Kavitha et al. (2006) studied the prediction of the exact structural behavior of the interaction between pile-soil under loading. In a study, Lee and Yoo (2006) studied numerically the impact of deep excavation on soil settlement[2]. For this purpose, they used anchorage and nailing methods to stabilize the wall and improve the surrounding ground[3]. In other research, Aksoy and Onargan in 2010 analyzed the effect of the support method on the Izmir metro tunnel in Turkey. In this study, the role of tunnel pre-support and reinforcement methods consisting of fore poling were investigated by 3D analysis to prevent deformation and damage to the tunnel [4].

METHODS

In the present study, the eastern access tunnel of Khorasan Square station located in line 6 of Tehran metro has been modeled to investigate the stability of the tunnel and the settlement resulting from tunnel excavation. After that, the methods of improving the piling, fore poling pre-consolidation method, and anchoring improvement method to achieve the allowable settlement at the ground level and better stability of the tunnel have been studied. MIDAS GTS NX software based on the finite element method, which is a specialized software in the field of geotechnics and tunneling, has been used for modeling.

Khorasan Square Station, the case study, is one of the special stations in the crowded area of the city Tehran, which is of special importance in terms of passenger traffic. Underground excavation of this station has faced problems due to the relatively high groundwater level and has been carried out by special methods.

In numerical modeling for the verification of the model, the results of ground settlement in the model are compared with the data of surface settlement instrumentation. After that, the modeling methods of piling improvement, fore poling and anchorage methods were performed and evaluated.

Figure 1 shows the vertical displacement contour of the model after excavation and initial support. As seen, most settlement is obtained in the crown of the tunnel.

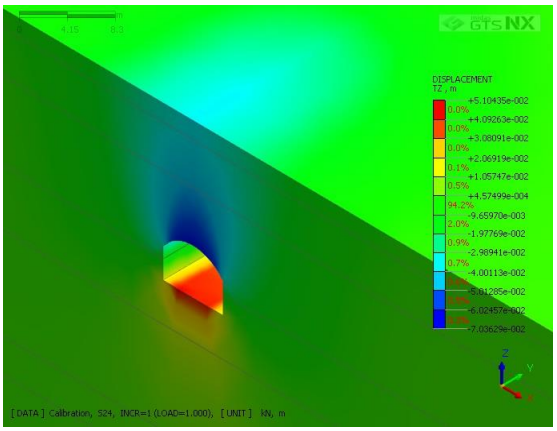


Figure 1. Vertical displacement contour of the model after excavation

FINDINGS AND ARGUMENT

To model the piling method from the ground, piles with a constant diameter of 1 meter and variable lengths have been studied. The performed piles with lengths of 10 and 15 meters increase the settlement of the ground compared to the state without piles. The reason for this is that these piles would be in the first and second layers. These layers have low cohesion parameters and modulus of elasticity, which reduces the shear strength and friction between the layer and the pile.

In modeling of fore poling ,modeling has been done first according to the design of the consulting

engineers .At each stage of the fore poling 27 ,pipes are placed at the top of the tunnel .In this study ,in addition to modeling the fore poling method ,the effect of overlap length on ground settlement has also been investigated .Figure 2 shows the modeling geometry of the fore poling method.

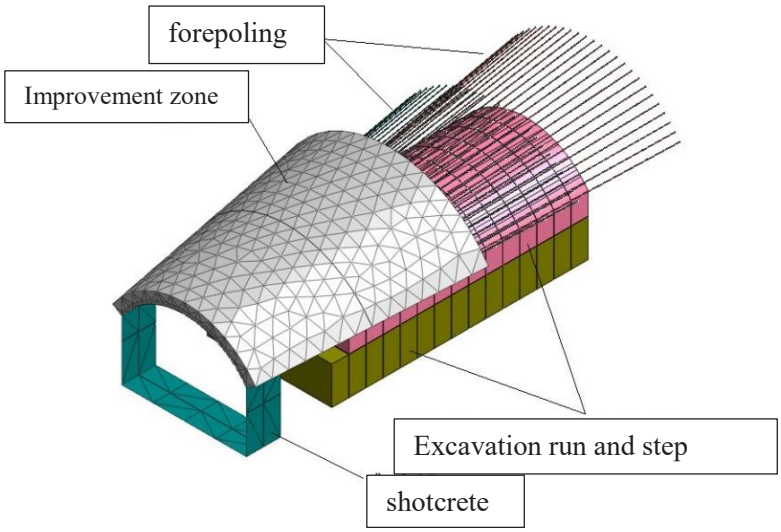


Figure 2. Modeling geometry of the fore poling method

The use of the fore poling has had a significant effect on reducing settlement; In a way that has reduced by 50% the maximum settlement at ground level (less than the allowable settlement). As expected, increasing the overlap length also reduces ground settlement; However, the downward trend is very small.

The study of fore poling method along with anchorage has also been examined numerically. To investigate the effect of anchorage diameter, modeling of anchorages with diameters of 25 and 38 mm has been performed. In addition, the effect of different improvement methods on the plastic area around the tunnel has been compared. With the onset of inelastic deformations and the expansion of the area with plastic behavior around the tunnel, the amount of pressure on the tunnel roof and wall increases due to the weight of the surrounding plastic area, which can play an important role in tunnel stability analysis. The weight of the plastic area leads to stress distribution and ultimately displacement around the tunnel. Deformation due to the plastic area increases the crown settlement and in layers that do not have high strength, it can even lead to the collapse of the crown and the tunnel wall.

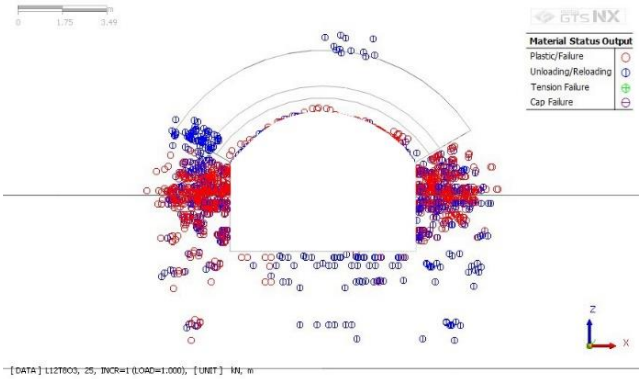


Figure 3. Plastic zone around the tunnel (fore poling with anchorage)

CONCLUSIONS

Since the selection of the Mohr-Columb constitutive model for soil layers provides an unrealistic output, the use of the modified Mohr-Columb model provided more realistic results than the actual conditions. In the piling method, changing the length of the pile changed the settlement of the ground and the crown of the tunnel. When the length of the piles is less than 18 meters, the amount of settlement of the ground and the crown of the tunnel increases. The use of the fore poling method has a significant effect on reducing ground settlement; In a way that has reduced the maximum settlement at ground level by about 50%. Increasing the overlap length also reduces ground settlement. When anchorages are used in the tunnel wall in addition to the fore poling method, the settlement of the ground surface and the crown of the tunnel is further reduced, as well as the plastic points around the tunnel. Also, the use of anchors in the wall is effective in reducing the elevation of the tunnel floor.

REFERENCES

[1] Loganathan, N., Poulos, H. G., and Xu, K. J. (2001). *"Ground and pile-group responses due to tunneling"*. Soils Foundation, 41(1): 57-67.

[2] Kavitha, P. E., Beena, K. S., and Narayanan, K. P. (2016). *"A review on soil–structure interaction analysis of laterally loaded piles"*. Innovative Infrastructure Solutions, 1(1) : 14.

[3] Lee, Y. J., and Yoo, C. S. (2006). *"Behaviour of a bored tunnel adjacent to a line of loaded piles"*. Tunneling and Underground Space Technology, 21(3-4): 370.

[4] Aksoy, C. O., and Onargan, T. (2010). *"The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages"*. Tunnelling and Underground Space Technology, 25(5): 553-559.