

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

مدلسازی عددی روش های بهسازی زمین ناشی از حفاری تونل های مترو مطالعه موردی: (خط شش مترو تهران)

نگارنده

مهدی طهماسبی

استاد راهنما

دکتر مجید نیکخواه

استاد مشاور

مهندس حسن یازرلو

دی ماه ۱۳۹۹

شماره: ۶۹۹/۴۰۵۲
تاریخ: ۹۹/۲/۲۳

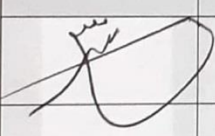
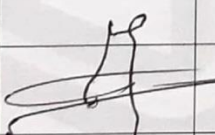
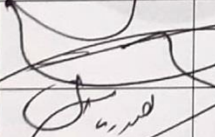
باسمه تعالی



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مهدی طهماسبی با شماره دانشجویی ۹۵۰۹۷۸۴ رشته معدن گرایش تونل و فضاهاى زیر زمینی تحت عنوان: پروپوزال (پایان نامه) "مدلسازی عددی روش های بهسازی زمین ناشی از حفاری تونل های متر (مطالعه موردی خط ۶ مترو تهران " که در تاریخ ۹۹/۱۰/۰۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-----	-----	-----
۳- استاد مشاور	-----	-----	-----
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر رامین رفیعی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر احمد رمضان زاده	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم اثر

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم

که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یآوری دلسوز و فداکار

و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

این پایان نامه حاصل تلاش جمعی است که مرا در رسیدن به نتیجه یاری کرده اند و بر خود لازم می دانم از تمام این عزیزان تشکر نمایم. در ابتدا از **دکتر مجید نیکخواه** که با راهنمایی هایشان چراغ راه من بودند و بی شک بدون همکاری ایشان این تحقیق میسر نبود. همچنین استاد مشاور گرامی جناب **مهندس یازرلو** تشکر نموده و مراتب قدردانی را به ایشان ابراز می دارم. از درگاه ایزد منان برای این عزیزان سلامتی و شادکامی همراه با موفقیت روزافزون را خواستارم.

در پایان از دوست عزیزم جناب آقای **مهندس مجتبی جباری** به دلیل یاری ها و راهنمایی های بی چشمداشت ایشان که بسیاری از سختی ها را برایم آسانتر نمود تشکر می نمایم.

و همچنین از دوست عزیز و مهربانم سرکار خانوم **سحر فیض ثانی** که در لحظه لحظه این مسیر همیشه یار و یاور من بودند تکثر ویژه می نمایم.

تعهدنامه

اینجانب مهدی طهماسبی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معدن - مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی عددی روش های بهسازی زمین ناشی از حفاری تونل های مترو تحت راهنمایی جناب آقای دکتر مجید نیکخواه متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا یافته های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه - ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

از مهم‌ترین مسائل در زمین‌های سست، بهسازی خاک (بازسازی کنترل شده خاک درجا) می‌باشد که برای استفاده مجدد در یک ساختار جدید ژئوتکنیکی و یا بهبود وضعیت ساختار فعلی مدنظر قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر، مدلسازی عددی برای پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین، قبل و بعد از حفاری و همچنین اجرای روش‌های مختلف بهسازی زمین در فرآیند حفاری تونل دسترسی شرقی ایستگاه میدان خراسان واقع در خط ۶ مترو تهران انجام و 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 زیادی در سطح زمین به وجود آورده است، که موجب ترک خوردن ساختمان‌ها و مغازه‌ها شده است. براین اساس مدلسازی عددی روش‌های بهسازی منتخب شامل: (شمع‌گذاری، فورپولینگ و مهارگذاری (انکراژ)) که برای زمین‌های سست و ریزشی مناسب می‌باشند، با استفاده از نرم‌افزار MIDAS GTS NX مدلسازی شده‌اند. در این پژوهش علاوه بر بررسی عملکرد روش‌های ذکرشده، اثر پارامترهای هندسی از جمله هم‌پوشانی لوله‌های فورپولینگ، طول شمع و قطر انکراژ مورد بررسی قرار گرفته است. معیار بررسی، جابجایی رخ داده در سطح زمین و تاج تونل در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که استفاده از تمامی روش‌های بهسازی در کاهش نشست سطح زمین و تاج تونل مفید بوده‌اند و در تمامی روش‌ها بیشینه نشست سطح زمین از نشست مجاز (۳۵ میلیمتر) کمتر است. همچنین استفاده از روش فورپولینگ موجب کاهش ۵۰ درصدی بیشینه نشست سطح زمین شده است.

واژگان کلیدی: روش پیش‌تکحیم فورپولینگ، مدل‌سازی عددی، روش بهسازی مهارگذاری، روش بهسازی شمع‌گذاری، شمع درجا، اجزا محدود.

فهرست مطالب

فصل اول:	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- بیان مسأله	۳
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق	۳
۴-۱- هدف انجام تحقیق	۴
۵-۱- روش تحقیق	۵
۶-۱- ساختار پایان نامه	۵
فصل دوم	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- روش شمع گذاری درجا	۸
۳-۲- روش پیش تحکیمی قوس چتری	۱۰
۱-۳-۲- تونل مایکو	۱۲
۲-۳-۲- تونل ساتسوما تاگامی	۱۳
۳-۳-۲- تونل گلوک	۱۳
۴-۳-۲- تونل متروی استانبول	۱۴
۵-۳-۲- تونل متروی ازمیر ترکیه	۱۵
۶-۳-۲- تونل پیشرو پلاتامون	۱۶
۷-۳-۲- تونل سن فدلہ	۱۷
۸-۳-۲- تونل دریسکوس	۱۸
۴-۲- روش بهسازی مهار گذاری	۱۸
۵-۲- جمع بندی	۲۲
فصل سوم	۲۵
۱-۳- مقدمه	۲۶
۲-۳- روش های تونلسازی	۲۶

۲۶	۳-۲-۱ روش پیشانی و پله برداری
۲۷	3-3 بهسازی خاک
۲۹	۳-۴ روش بهسازی شمع گذاری
۲۹	۳-۴-۱ شمع های بتنی درجاریز
۳۰	۳-۴-۱ روش اجرا شمع های بتنی درجاریز
۳۱	۳-۴-۲ مقاومت اصطکاکی شمع های بتنی درجاریز
۳۲	۳-۵ طبقه بندی روش چتری
۳۳	۳-۵-۱ روش لوله گذاری کوتاه
۳۴	۳-۵-۲ روش فورپولینگ
۳۵	۳-۵-۳ روش تزریق با جت
۳۷	۳-۵-۴ ساز و کار سیستم نگهداری فورپولینگ
۳۹	۳-۵-۵ نصب لوله ها
۴۳	۳-۵-۶ تزریق
۴۴	۳-۵-۷ نشست در سیکل های مختلف حفاری
۴۵	۳-۵-۸ نحوه انتقال نیرو و لنگر در لوله های فورپولینگ
۴۷	۳-۵-۹ بررسی تحلیل فورپولینگ
۵۱	۳-۵-۱۰ روش های عددی مدلسازی فورپولینگ
۵۳	۳-۶ روش بهسازی مهارگذاری (مهار)
۵۳	۳-۶-۱ اجزا روش مهارگذاری خاک
۶۱	۳-۷ جمع بندی
۶۳	فصل چهارم
۶۴	۴-۱ مقدمه
۶۴	۴-۲ معرفی کلی پروژه خط ۶ مترو تهران
۶۵	۴-۳ معرفی ایستگاه میدان خراسان
۶۶	۴-۳-۱ معرفی تونل مورد مطالعه
۶۸	۴-۴ مشکلات به وجود آمده در اثر حفاری

۶۸	۵-۴ زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک ساختگاه
۷۰	۵-۴-۱ لایه اول
۷۰	۵-۴-۲ لایه دوم
۷۰	۵-۴-۳ لایه سوم
۷۱	۵-۴-۴ لایه چهارم
۷۱	۵-۴-۵ لایه پنجم
۷۱	۵-۴-۶ لایه ششم
۷۱	۶-۴ خصوصیات مکانیکی لایه‌های خاک
۷۳	۶-۴-۱ داده‌های ابزار دقیق
۷۴	۷-۴ جمع‌بندی
۷۵	فصل پنجم
۷۶	۱-۵ مقدمه
۷۶	۲-۵ معرفی نرم افزار MIDAS GTS NX
۷۸	۳-۵ روش المان محدود در MIDAS GTS NX
۷۹	۴-۵ فرآیند مدلسازی در نرم‌افزار MIDAS GTS NX
۷۹	۵-۴-۱ انتخاب ابعاد مدل
۷۹	۵-۴-۲ ایجاد هندسه مدل
۷۹	۵-۴-۳ انتخاب مدل رفتاری مناسب
۸۰	5-4-4 مدل رفتاری موهر-کلمب اصلاح شده
۸۳	۵-۴-۵ مش‌بندی و نوع المان‌ها
۸۴	۵-۴-۶ اجرای مسئله (Analysis)
۸۴	۵-۴-۷ تحلیل و بررسی نتایج (Results)
۸۵	۵-۵ جمع‌بندی
۸۷	فصل ششم
۸۸	۱-۶ مقدمه
۸۸	۲-۶ مدلسازی اولیه و اعتبارسنجی

۱-۲-۶	ایجاد هندسه مدل	۸۹
۲-۲-۶	تعیین خصوصیات مواد تشکیل دهنده و مش بندی مدل	۸۹
۳-۲-۶	مراحل ساخت و ساز و اعمال شرایط مرزی	۹۱
۴-۲-۶	نتایج مدل و اعتبار سنجی	۹۱
۳-۶	مدلسازی روش های بهسازی خاک	۹۴
۱-۳-۶	مدلسازی روش شمع گذاری	۹۵
۲-۳-۶	مدلسازی روش فورپولینگ	۹۵
۳-۳-۶	مدلسازی روش فورپولینگ به همراه انکراژ	۱۰۴
۴-۳-۶	مقایسه تاثیر روش های بهسازی بر ناحیه پلاستیک اطراف تونل	۱۰۸
۴-۶	جمع بندی	۱۱۱
	فصل هفتم	۱۱۳
۱-۷	مقدمه	۱۱۴
۲-۷	نتیجه گیری	۱۱۴
۳-۷	پیشنهادها	۱۱۶
	منابع	۱۱۷

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: نشست سطح زمین در مقادیر مختلف فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها به قطر شمع ۱۰
- شکل ۲-۲: جزئیات نگهدارنده‌های تونل گلوک ۱۴
- شکل ۳-۲: مقادیر نشست در مدلسازی عددی و داده‌های برجا ۱۵
- شکل ۴-۲: مقادیر همگرایی در مدلسازی عددی و داده‌های برجا ۱۶
- شکل ۵-۲: اضافه حفاری تونل پیشرو پلاتامون در مرز جنوبی تونل ۱۷
- شکل ۶-۲: مقطع جنوبی تونل سن فدل در طول بازدید نویسندگان در سال ۲۰۱۱ ۱۸
- شکل ۱-۳: روش حفاری تونل پیشانی و پله برداری ۲۷
- شکل ۲-۳: دستگاه حفر چاه شمع درجا ریز ۳۰
- شکل ۳-۳: مراحل اجرای شمع‌گذاری درجا ۳۱
- شکل ۴-۳: نصب لوله‌ها از میان لتیس‌ها در هر سیکل حفاری ۳۴
- شکل ۵-۳: روش فورپولینگ ۳۵
- شکل ۶-۳: تزریق با جت مسلح شده و مسلح نشده ۳۷
- شکل ۷-۳: افزایش پایداری در روش پایپ جنکینگ ۳۸
- شکل ۸-۳: توزیع تنش عمودی در تاج تونل و موقعیت تنش در جلوی سینه‌کار (عدم استفاده از روش فورپولینگ) ۳۹
- شکل ۹-۳: توزیع تنش عمودی تاج تونل و موقعیت تنش در جلوی سینه‌کار (استفاده از روش فورپولینگ) ۳۹
- شکل ۱۰-۳: نصب لوله‌ها با روش پیش‌حفاری با استفاده از دستگاه‌های ویژه ۴۰
- شکل ۱۱-۳: عدم نصب صحیح و گیرکردن لوله در روش پیش‌حفاری ۴۱
- شکل ۱۲-۳: نصب لوله‌ها با روش حفاری لوله‌جداری با استفاده از جامبو دریل ۴۲
- شکل ۱۳-۳: نصب لوله‌ها با روش حفاری لوله‌جداری - خروج مواد حفاری شده از داخل لوله ۴۲
- شکل ۱۴-۳: تغییر شکل‌ها در روش حفاری ۴۳
- شکل ۱۵-۳: تزریق لوله‌های فورپولینگ پس از نصب ۴۴
- شکل ۱۶-۳: همپوشانی لوله‌های فورپولینگ ۴۵
- شکل ۱۷-۳: تیر عملکننده در روش چتری ۴۸
- شکل ۱۸-۳: چگونگی عملکرد لوله‌ها در روش چتری ۴۹
- شکل ۱۹-۳: شماتیکی از وضعیت توزیع تنش در لوله‌های فورپولینگ ۴۹
- شکل ۲۰-۳: مدل مکانیکی ناحیه تحکیم در حین حفاری تونل (نوع ۱) ۵۰
- شکل ۲۱-۳: مدل مکانیکی ناحیه تحکیم در حین حفاری تونل (نوع ۲) ۵۰
- شکل ۲۲-۳: اجزای موثر در روش فورپولینگ ۵۱

- شکل ۳-۲۳: اجزای تشکیل دهنده مهاره با تاندون میلگردی ۵۴
- شکل ۳-۲۴: نمایی از تاندون نوع میله ای و کابل ۵۵
- شکل ۳-۲۵: نحوه اتصال مکانیکی دو میله برای افزایش طول تاندون ۵۶
- شکل ۳-۲۶: اثر نسبت آب به سیمان روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه - روانی و مقاومت در برابر جاری شدن دوغاب ۵۹
- شکل ۳-۲۷: رابطه بین مقاومت فشاری دوغاب و سن آن برای انواع دوغابها ۶۰
- شکل ۳-۲۸: نمایی از مقطع مهار که اهمیت استفاده از جداگرها را نشان می دهد. ۶۱
- شکل ۴-۱: نقشه ایستگاههای خط ۶ مترو تهران ۶۶
- شکل ۴-۲: موقعیت تونل مورد مطالعه در ایستگاه میدان خراسان ۶۷
- شکل ۴-۳: نمایی از تونل دسترسی حفاری شده. ۶۷
- شکل ۴-۴: ترکهای ایجاد شده در کف مغازهها در اثر حفر تونل دسترسی. ۶۸
- شکل ۴-۵: مقطع عرضی گمانههای حفاری شده در محدوده مورد مطالعه ۶۹
- شکل ۴-۶: مقطع عرضی لایههای زمین و تونل دسترسی. ۷۲
- شکل ۴-۷: نشست سطح زمین کوچه لاجوردیان واقع در ایستگاه E۶ ۷۳
- شکل ۴-۸: تغییرات تجمعی نشست سطح زمین کوچه لاجوردیان واقع در ایستگاه E۶ ۷۴
- شکل ۵-۱: محیط کار نرم افزار Midas GTS NX ۷۷
- شکل ۵-۲: مدولهای تغییر شکل مختلف خاک در مدل اصلاح شده موهر-کولمب ۸۲
- شکل ۵-۴: المان خریای برنشانده شده در المان مادر ۸۴
- شکل ۶-۱: شماتیکی از مراحل ساخت مدل ۸۸
- شکل ۶-۲: ابعاد محیط دربرگیرنده مدل ۸۹
- شکل ۶-۳: مقطع عرضی از مشبندی لایهها در زمین و اطراف تونل ۹۰
- شکل ۶-۴: شرایط مرزی و بارهای اعمال شده به مدل ۹۱
- شکل ۶-۵: تنش اولیه در مدل ۹۲
- شکل ۶-۶: جابجایی قائم در مدل اولیه پس از حفر تونل. ۹۲
- شکل ۶-۷: نمودار پروفیل طولی نشست سطح زمین در مدل اولیه و دادههای ابزار دقیق (آخرین قرائت انجام شده پس از حفاری). ۹۳
- شکل ۶-۸: شماتیک مقطع عرضی روشهای بهسازی خاک مورد استفاده در پژوهش ۹۴
- شکل ۶-۹: مدلسازی روش شمع گذاری در نرم افزار Midas GTS NX ۱۰۱
- شکل ۶-۱۰: کانتور جابجایی قائم پس از شمعگذاری و قبل از حفر تونل ۱۰۲
- شکل ۶-۱۱: نمودار پروفیل طولی نشست سطح زمین در شمعهایی با عمق متفاوت. ۱۰۲
- شکل ۶-۱۲: نمودار پروفیل طولی نشست در تاج تونل در عمقهای مختلف شمع ۱۰۳
- شکل ۶-۱۳: پروفیل عرضی نشست تاج تونل در ۱۲ متری دهانه تونل برای عمق های مختلف شمع. ۱۰۴

- شکل ۶-۱۴: نیروی محوری در لوله‌های فورپول ۹۶
- شکل ۶-۱۵: اجزای مدلسازی شده در روش فورپولینگ ۹۹
- شکل ۶-۱۶: مقطع عرضی لوله‌ای فورپول ۱۰۰
- شکل ۶-۱۷: تاثیر افزایش عمق همپوشانی لوله‌های فورپول بر نشست سطح زمین ۱۰۰
- شکل ۶-۱۸: تاثیر افزایش طول همپوشانی لوله‌های فورپول بر نشست تاج تونل (پروفیل طولی) ۱۰۱
- شکل ۶-۱۹: تاثیر طول همپوشانی بر نشست تاج تونل (پروفیل عرضی در فاصله ۱۲ متری از دهانه تونل) ۱۰۲
- شکل ۶-۲۰: تاثیر افزایش قطر انکراژ بر نشست سطح زمین ۱۰۳
- شکل ۶-۲۱: کانتور جابجایی قائم در روش فورپولینگ به همراه روش مهارگذاری با قطر ۳۸ میلیمتر ۱۰۴
- شکل ۶-۲۲: پروفیل طولی نشست در تاج تونل (روش فورپولینگ به همراه انکراژ) ۱۰۴
- شکل ۶-۲۳: پروفیل عرضی نشست در تاج تونل در فاصله ۱۲ متری از دهانه (روش فورپولینگ به همراه انکراژ) ۱۰۵
- شکل ۶-۲۴: تنش ون-میسز در لوله‌های فورپولینگ ۱۰۵
- شکل ۶-۲۵: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در مدل اولیه ۱۰۶
- شکل ۶-۲۶: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در روش بهسازی شمع‌گذاری ۱۰۷
- شکل ۶-۲۷: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (روش فورپولینگ) ۱۰۸
- شکل ۶-۲۸: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (روش فورپولینگ به همراه انکراژ) ۱۰۹

فهرست جداول

- جدول (۱-۲): مقایسه نتایج مهار در مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی ۲۰
- جدول (۲-۴): خصوصیات مکانیکی لایه‌های خاک ۷۲
- جدول (۱-۵): خلاصه ای از پارامترهای استفاده شده در مدل رفتاری موهر-کلمب اصلاح شده ۸۱
- جدول (۱-۶): پارامترهای استفاده شده در معیار موهر کلمب اصلاح شده ۹۰
- جدول (۲-۶): پارامترهای الاستیک سازه‌های مورد استفاده در روش‌های بهسازی ۹۵

۱ فصل اول:

کلیات تحقیق

افزایش جمعیت خصوصاً در چند دهه اخیر و تراکم فزاینده در مناطق شهری از یک سو و نیاز به دسترسی سریع به مناطق مختلف و سفرهای درون شهری از سوی دیگر، مهندسان را ناگزیر به استفاده از فضاهای زیرزمینی شهری ساخته است. احداث تونل در مناطق شهری به علت غالب بودن شرایط زمینی ضعیف و بخاطر مسائلی نظیر ترافیک، حمل و نقل و طرح‌ریزی تجهیزات، عمدتاً در اعماق کم حفر می‌شوند. بدیهی است که ساخت این‌گونه فضاهای زیرزمینی مخاطراتی را در پی خواهد داشت که نادیده گرفتن آن‌ها می‌تواند خسارات جبران ناپذیر مالی و جانی را به بار آورد. به همین منظور تونل‌ها باید بنحوی ساخته شوند که کمترین میزان تخریب را برای سازه‌های سطحی و زیرسطحی به وجود آورند؛ از جمله این مخاطرات مسأله ناپایداری و نشست‌های سطحی زمین است که محیط اطراف تونل را تحت تأثیر خود قرار خواهد داد و ممکن است به ساختمان‌های سطحی آسیب جدی وارد کند و آنها را از سرویس‌دهی خارج نماید. احداث تونل در محیط‌های خاکی باعث افزایش مقدار نشست و در نتیجه کاهش ظرفیت باربری خاک، نزدیک به سطح زمین و در نتیجه ایجاد ناپایداری برای پی ساختمان‌های واقع در سطح زمین می‌شود.

اجرای تونل‌سازی در محیط‌های شهری همواره دشواری‌ها و خطرات خاص خود را داشته است. مهمترین قسمت قبل از حفاری این قبیل تونل‌ها، بررسی مسائل مرتبط با نشست سطح زمین است که با جان و مال مردم سروکار دارد زیرا اغلب این تونل‌ها از زیر ساختمان‌های مسکونی و تجاری عبور می‌کنند.

پیش‌بینی میزان نشست سطح زمین برای پروژه‌های تونل‌سازی مهمترین قسمت شروع فرآیند حفاری تونل می‌باشد. روش‌های نوینی برای پیش‌بینی و تخمین میزان نشست وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش مدلسازی عددی اشاره کرد که امروزه در دنیا متداول و کم هزینه‌ترین روش به شمار می‌آید.

در تحقیق حاضر به طور کامل 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 انجام و تشریح شده است.

۱-۲- بیان مسأله

حفاری تونل در محیط‌های شهری همواره با خطراتی نظیر نشست سطح زمین مواجه بوده است. این پژوهش نیز به بررسی نشست و ترک‌های ایجاد شده در سطح زمین ناشی از حفاری تونل دسترسی مسافر قسمت شرقی ایستگاه میدان خراسان می‌پردازد، که بعد از گذشت زمان و حفاری حدود ۲۰ متر از تونل شاهد ترک‌هایی در ساختمان‌ها و مغازه‌های روی سطح ساختگاه تونل شدند. این مساله باعث متوقف شدن پروژه و جلوگیری از ادامه فرآیند حفاری شد.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

انجام پروژه‌های تونل‌سازی برای اهداف مختلف در نواحی پر جمعیت شهری در طول دهه گذشته به سرعت رو به رشد بوده است. رشد فزاینده جمعیت و لزوم دسترسی سریع به نقاط مختلف و افزایش تراکم در مناطق شهری، لزوم استفاده از فضای زیرزمینی را در مناطق شهری اجتناب ناپذیر ساخته است. تونل‌سازی در مناطق کم عمق شهری و زمین‌های نرم، همواره با مخاطراتی مواجه است که نادیده گرفتن آنها می‌تواند عواقب ناخوشایندی دربرداشته باشد.

مسئله نشست سطح زمین و تاثیر آن بر سازه‌های سطحی از مهمترین این مخاطرات به شمار می‌رود. به منظور جلوگیری از خسارت ناشی از اجرای سازه‌های زیرزمینی بر سازه‌های سطحی، لزوم کنترل نشست سطح زمین طبق آیین نامه‌ها همواره باید مورد توجه قرار گیرد. این امر بخصوص در هنگام عبور تونل از زیر مناطق مسکونی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و به همین دلیل مسئله نشست ناشی از تونل‌سازی و اثرات متعاقب آن همواره از سوی محققین مختلف تحت بررسی بوده

است تا با اتخاذ شیوه‌های مناسب، میزان آن را قبل از حفاری برآورد کنند. به عبارت دیگر از جمله اهداف مهم در اجرای تونل‌های شهری، به حداقل رساندن نشست سطحی می باشد. این مسئله یکی از ملزومات در اجرای موفقیت آمیز یک تونل در مناطق شهری محسوب می شود.

ضرورت از انجام این تحقیق، بررسی روش‌های فنی متداول بهسازی خاک در حفاری تونل‌های شهری است. از آنجایی که قسمت قابل توجهی از این نشست در خلال فاز حفاری رخ می‌دهد، اجرای بهسازی خاک به نحوی موثر جهت جلوگیری از نشست و خسارات ناشی از آن به سازه‌های سطحی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

امروزه با توجه به پیشرفت فناوری نرم افزاری در حوزه مدلسازی عددی و شبیه سازی، می‌تواند یکی از بهترین گزینه‌ها برای پیش‌بینی وضعیتی که در واقعیت قرار است رخ دهد، باشد. به همین علت در این پژوهش از مدلسازی عددی در بررسی روش‌های بهسازی برای خاک ساختگاه این تونل استفاده شده است.

۱-۴-هدف انجام تحقیق

هدف اصلی این پژوهش بررسی روش‌های مناسب بهسازی خاک برای ساختگاه تونل مورد مطالعه می‌باشد. با توجه به این موضوع، هدف می‌تواند هم صنعتی و هم علمی- پژوهشی باشد، از نظر حوزه صنعت میتوان به اقتصادی بودن اجرای این طرح اشاره کرد و همچنین اجرای مجدد پروژه حفاری و تکمیل آن را در پی داشته باشد. همینطور از لحاظ علمی و پژوهش‌های دانشگاهی می‌تواند مساله ای برای شناخت و درک بهتر مکانیزم سیستم‌های بهسازی مورد استفاده در تونل‌های شهری کم عمق برای افرادی که قصد دارند در این حوزه فعالیت کنند باشد. همچنین آشنایی و شناخت نرم‌افزارهای مدلسازی عددی و کاربرد آنها را در مسائل مختلف ژئوتکنیک را در پی خواهد داشت.

۱-۵- روش تحقیق

برای رسیدن به اهداف این تحقیق ابتدا به منظور شناخت روش‌های بررسی میزان نشست ناشی از حفاری تونل و روش‌های کاهش و کنترل آن در فضاهای شهری مطالعات کتابخانه‌ای مدارک و مطالب گردآوری شده صورت می‌پذیرد. بر اساس این مطالعات و داده‌های گردآوری شده از یکی از ایستگاه‌های در حال احداث تونل خط شش متروی تهران و با توجه به شرایط محیط تونل، نرم افزار **Midas GTS NX** مبتنی بر روش عددی المان محدود که قادر به مدلسازی محیط‌های ژئوتکنیکی و سازه‌ای است، مدلسازی عددی جهت اندازه‌گیری نشست سطحی ناشی از حفاری تونل صورت می‌گیرد.

به منظور اعتبارسنجی مدل، نتایج این بخش با مقادیر حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی ابزار دقیق مقایسه و مدل کالیبره می‌شود. پس از بررسی میزان نشست با مدل عددی، روش‌های متداول بهسازی زمین برای کنترل جابه‌جایی‌ها و نشست سطح زمین مدلسازی می‌شوند. در نهایت بر اساس نتایج حاصل از مدلسازی روش‌های مختلف، روشی مناسب جهت بهسازی زمین پیشنهاد داده خواهد شد.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

این پژوهش در هفت فصل تدوین شده است:

فصل اول: مروری اجمالی رو کلیات پژوهش مانند بیان مساله، ضرورت انجام، هدف پژوهش و فرآیند کلی شیوه انجام پژوهش صورت گرفته است.

فصل دوم: در این قسمت به بررسی مطالعات موردی، مشابه پژوهش حاضر در سراسر دنیا اشاره شده است. به طوری که می‌توان نام این فصل را پیشینه تحقیقات انجام شده دانست.

فصل سوم: این فصل در واقع مکانیزم روش‌های بهسازی قابل اجرا در این پژوهش را به طور کامل مورد بررسی قرار می‌دهد. خواننده با خواندن این فصل از پایان نامه با شیوه و نحوه مکانیزم عملکرد روش پیش تحکیم فورپولینگ، روش بهسازی شمعگذاری و مهارگذاری^۱ آشنا خواهد شد.

فصل چهارم: معرفی مشخصات کامل محدوده مورد مطالعه و همچنین اطلاعات هندسی و ژئوتکنیکی گردآوری شده از محل پروژه در این فصل به طور دقیق توضیح داده شده است.

فصل پنجم: این قسمت به توضیح فرآیند روش عددی المان محدود در حل مسائل ژئوتکنیکی پرداخته شده است. به طوری که با مطالعه این فصل جزئیات کاملی در مورد عملکرد این روش عددی در نرم‌افزار MIDAS GTS NX خواهید آموخت.

فصل ششم: شیوه مدلسازی عددی روش‌های بهسازی مذکور، کالیبراسیون مدل با داده‌های ابزار دقیق و تفسیر موشکافانه ی نتایج، عناوین اصلی این فصل از پایان نامه بشمار می‌روند.

فصل هفتم: نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات کلی در این قسمت ارائه شده است.

¹ Anchors

۲ فصل دوم

مطالعات پیشین

از مهم‌ترین مسائل در زمین‌های سست، بهسازی خاک بوده که در واقع بازسازی کنترل شده خاک درجا برای استفاده مجدد در یک ساختار جدید ژئوتکنیکی و یا بهبود وضعیت ساختار فعلی مدنظر می‌باشد. در این بخش به بررسی و مرور تاریخچه‌ی روش حفاری و روش‌های بهسازی شمع‌گذاری، فورپولینگ و انکراژ جهت کاهش نشست‌های سطحی پرداخته می‌شود. خصوصاً در بحث کنترل نشست‌های ناشی از حفاری تونل سعی شده که به طیف وسیعی از مطالعات شامل مطالعات عددی و مطالعات میدانی توجه شود تا بتواند تصویری واقعی از مطالعات پژوهشی پیشین در خواننده ایجاد نماید.

۲-۲ روش شمع‌گذاری درجا

شمع درجا از خانواده شمع‌های بتنی هستند که به دلیل نامحدود بودن در قطر و عمق حفاری دارای بیشترین کاربرد و تنوع در بین تکنولوژی‌های اجرای پی‌های عمیق می‌باشد. عمده استفاده این نوع شمع‌ها در زمین‌هایی با لایه‌های بالایی سست جهت انتقال بار به لایه‌های پایین‌تر است. همچنین با ایجاد مقاومت اصطکاکی بین شمع و خاک موجب بهبود خاک اطراف شمع می‌شود.

پی ای کاویثا و همکاران (۲۰۱۶)^۱ به مطالعه پیش‌بینی رفتار ساختاری دقیق اندرکنش بین شمع-خاک تحت بارگذاری پرداختند. آنها پس از پژوهش‌های تحلیلی و عددی دریافتند که اندرکنش بین شمع و خاک به عواملی مانند خواص خاک و شمع، قطر شمع، نوع بارگذاری و شیب سطح زمین بستگی دارد. نتایج آنها نشان داد که پنج پارامتر مهم خاک نظیر وزن مخصوص، مدول برشی، نسبت پواسون، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و زاویه اتساع در بیان رفتار شمع-سازه موثر هستند. همچنین دریافتند که سختی شمع هم در اندرکنش سازه-خاک و هم در تحمل بار جانبی وارده به شمع تاثیر می‌گذارد. سختی شمع عمدتاً به خواص و گشتاور لختی شمع بستگی دارد.

¹ P. E. Kavitha et al.

بررسی‌های بسیاری نیز توسط محققین در زمینه تأثیر حفاری تونل بر پی‌های عمیق سازه‌های موجود صورت گرفته که از جمله آنها می‌توان به مطالعات لوگاناتان و همکاران^۱ (۲۰۰۱) و کیتیودوم و همکاران^۲ (۲۰۰۵) اشاره نمود که به بررسی رفتار شمع‌های تکی و گروهی و همچنین پی‌های گسترده متکی بر شمع‌ها در حین عملیات حفاری تونل پرداختند.

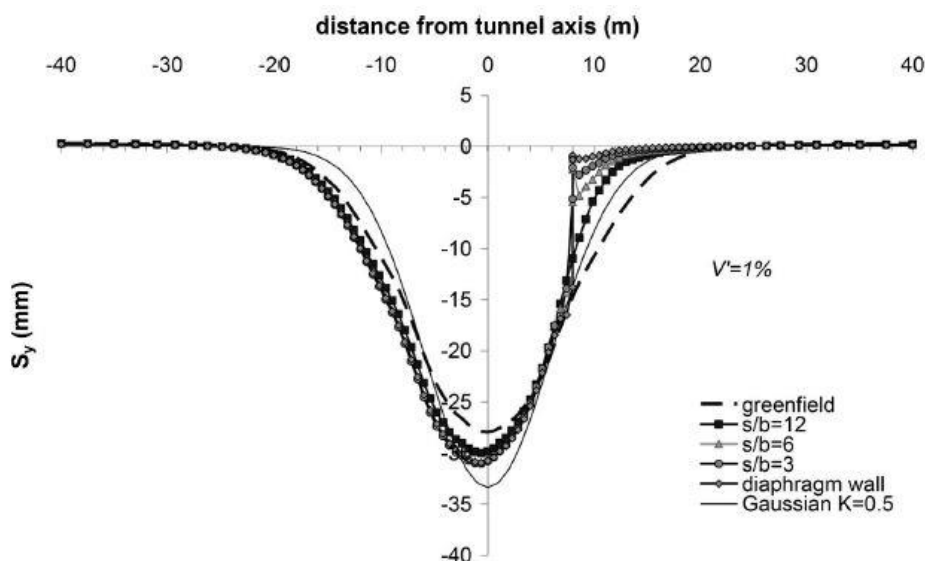
لوگاناتان و همکاران (۲۰۰۱) در مقاله ای تحت عنوان " پاسخ زمین و شمع‌های گروهی ناشی از حفاری تونل " به کمک یک روش تحلیل بسته، جابجایی‌های اطراف و سطح زمین را در حالتی که از شمع‌های تکی و گروهی استفاده شد، تخمین زدند. سپس با استفاده از روش عددی و نرم افزار FLAC3D نتایج را صحت‌سنجی کردند. نتایج حاصل از پژوهش حاکی از این بود که حفاری تونل‌های دایره‌ای در نزدیکی شمع‌ها بر جابجایی زمین تاثیرگذار است. آنها با افزایش فاصله شمع‌ها از مرکز تونل، مقادیر نشست سطح زمین و کلاhek شمع را بررسی کردند. نتایج پژوهش نشان داد که در یک فاصله ثابت شمع از تونل، نشست سطح زمین در حالتی که از شمع تکی و گروهی استفاده شد، بیشتر است. همچنین شمع گروهی نشست کمتری از شمع تکی نشان داد (Loganathan et al, 2001).

بیلوتا و روسو^۳ (۲۰۱۱)، در یک مطالعه عددی سه بعدی با نرم‌افزار پلکسیس، به بررسی کاهش نشست سطح زمین و سازه‌های سطحی بنایی با احداث شمع و دیوار دیافراگمی در فاصله مشخصی از تونل پرداختند. بر اساس مطالعات آنها، با افزایش فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها (S)، کرنش متوسط افقی در خاک کاهش یافته و این عاملی برای محدود نمودن جابجایی‌های سازه می‌باشد. همچنین آنها دریافتند که در مقادیر بسیار کم فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها (هنگامی که S، ۲ الی ۳ برابر قطر شمع باشد) کاهش چشمگیری در نشست سطح زمین در بالای تونل مشاهده می‌شود (شکل ۲-۱).

¹ Loganathan et al.

² Kitiyodom et al.

³ Bilotta, E. and Russo, G.



شکل ۱-۲: نشست سطح زمین در مقادیر مختلف نسبت فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها (S_y) به قطر شمع (b)
(Bilotta et al, 2011).

فانترآ و همکاران (۲۰۱۶) یک مطالعه عددی در موضوع نشست زمین در اثر حفر تونل و کاهش نشست سازه‌ها با احداث دیوار دیافراگمی بین سازه و تونل انجام دادند. آنها نیز دریافتند که با افزایش عمق دیوار دیافراگمی، میزان نشست سازه‌ها کمتر می‌شود (Fantera et al, 2016).

فرعی و احترامی (۱۳۹۸) در پژوهشی با عنوان "رده‌بندی ریسک سازه‌های سطحی و بررسی عملکرد شمع درجا در کاهش نشست‌های ناشی از حفر تونل‌های مترو در مناطق شهری (مطالعه موردی: متروی تبریز)"، با انجام مدلسازی عددی و کاربرد نرم‌افزار المان محدود پلکسیس، به تعیین و ارزیابی رده ریسک سازه‌های سطحی با تعداد طبقات و عرض‌های متفاوت پرداختند. نتایج حاصل از مدلسازی آنها نشان داد که در عملکرد اقدام تحکیمی پیشگیرانه، تأثیر طول شمع‌های بتنی به مراتب بیشتر از فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها می‌باشد (فرعی و همکاران، ۱۳۹۸).

۳-۲ روش پیش تحکیمی قوس چتری

در روش پیش تحکیم در زمین‌های سست، با تحت فشار قرار دادن مصالح، قبل از اجرای حفاری، خواص فیزیکی زمین‌هایی که دارای مصالح قابل تحکیم می‌باشند، افزایش می‌یابد. عملیات پیش

تحکیم باعث می‌شود که واحد وزن مخصوص افزایش و مقدار تخلخل کاهش یابد و همچنین زمان پایداری تونل تا قبل از نصب تقویت موقت افزایش یابد. در خصوص روش پیش تحکیمی قوس چتری لازم به ذکر است با وجود استفاده روز افزون از این روش، مطالعات اندکی در خصوص عملکرد آن صورت پذیرفته و الگویی مشخص به جهت طراحی مناسب آن ارائه نشده است.

پس از اوائل ۱۹۷۰ که روش پیش تحکیمی، صرفاً به عنوان یک ایده تئوری مورد نظر قرار گرفته بود، در اوایل دهه ۱۹۸۰ این روش اولین بار در ژاپن توسط ساتو و همکارانش^۱ برای ساخت ایستگاه مترو مورد استفاده قرار گرفت؛ علاوه بر این توسط روهودس و کاوسچینگر^۲ برای ساخت تونل‌هایی با قطر کم در آمریکا استفاده شد.

در مطالعه دیگر، پلیزا و پیلا^۳ در سال ۱۹۹۳، بیشتر به بررسی روش‌های بهبود و مسلح کردن خاک و سنگ برای حفاری ایمن شامل نحوه مسلح سازی پیرامون و طاق تونل، دوغاب ریزی را به روش پیش نگهداری، زهکشی صحیح، در زمان احداث تونل به روش پیش نگهداری در زمین‌هایی که سطح آب زیرزمینی بالا می‌باشد پرداختند و یک مقایسه فنی میان روش‌های پیش نگهداری صورت دادند. آنها اظهار داشتند که فورپول‌ها اغلب برای نگهداری زمین بالای جبهه تونل در حین حفاری استفاده می‌شود. آنها همچنین نگهداری اولیه قسمت بدون پوشش تونل را فراهم می‌کنند (Pelizza & Peila, 1993).

همچنین پیلا^۴ در سال ۱۹۹۴، مدلسازی‌های عددی جهت مطالعه رفتار نیم‌رخ تسلیح شده تونل با لوله‌های فایبرگلاس طولی انجام داده و دریافتند که لوله‌های تسلیح کننده طولی اثر مثبتی بر پایداری نیم‌رخ حفاری داشته و موجب کاهش تغییر مکان و کوچک شدن ناحیه پلاستیک اطراف دهانه تونل می‌شوند (Peila, 1994).

¹Satoh et al.

²Rhodes and Kauschinger

³Pelizza & Peila.

⁴ Peila et al.

موراکی در سال ۱۹۹۷ در پژوهشی با عنوان "روش قوس چتری در تونل زنی" روش پیش-نگهداری را به سه شاخه کلی، تزریق نیمه افقی، روش لوله‌ی فولادی تزریق شده به روش پیش-نگهداری و روش لوله‌گذاری در سقف تقسیم کرد. سپس به بررسی نتایج نشست‌های اندازه‌گیری شده در محل در ۲۴ نمونه موردی از تونل‌های اجرا شده به روش پیش‌نگهداری واقع در کشور ژاپن پرداخت. نتایج پژوهش آن نشان داد که روش پیش‌نگهداری تغییر شکل‌ها را کاهش داده و موجب افزایش پایداری جبهه‌کار تونل در حین حفاری می‌شود و عملاً این روش نشست‌های سطح زمین را کنترل خواهد کرد (Muraki, 1997).

همچنین در سال ۲۰۰۳ کاماتا و ماشیماتو^۱ در تحقیقات خود با استفاده از سانتریفیوژ نشان داده‌اند که فورپول‌ها از گسیختگی صفحات زمین و رسیدن آن‌ها به سطح جلوگیری می‌کنند. همچنین بیان داشتند که اگر فورپول‌ها از نصف قطر تونل، بیشتر باشد باعث بهبود پایداری سینه‌کار می‌شوند (Kamata & Mashimo, 2003).

در سال ۲۰۰۸، هیساتاکا و اهنو^۲ بود که نشان دادند که نشست بالای سینه‌کار وقتی که فورپول‌ها در ماسه‌های غیر اشباع نصب شوند، می‌توانند کاهش یابد. همچنین پارامترهای طول فورپول‌ها و طول قسمت‌های نگهداری نشده تونل به منظور بررسی اثر روی پایداری تونل تغییر یافتند و نتیجه حاصل از آن بود که فورپول‌ها به منظور کاهش طول ناحیه نشست بالای سینه‌کار موثرند؛ هرچند عرض نشست تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد (Ohno & Hisatake, 2008).

۲-۳-۱ تونل مایکو

تونل مایکو^۳ در ژاپن، تونل دوقلویی با طول ۳/۳ کیلومتر، عرض حفاری ۱۶ متر و ارتفاع ۱۱-۱۲ متر می‌باشد و جنس منطقه آن از دو نوع آبرفتی «شن و ماسه‌های سیمانی نشده در رسوبات و

^۱Kamata & Mashimo

^۲Ohno & Hisatake

^۳Maiko

خاکریزها» و «رس و شن‌های سیمانی نشده» است؛ همچنین در این محدوده سطح آب زیرزمینی نیز در نزدیکی سطح زمین قرار دارد. از این رو به علت ناپایداری منطقه، حضور شن و ماسه، روباره کم و حضور آب و از همه مهمتر قرار گرفتن منطقه در زیر یک مدرسه برای حفر تونل نیاز به پیش‌نگهدارنده‌ها احساس گردید. در سال ۱۹۹۸ طبق تحقیقات هارازاکی و همکارانش^۱، استفاده از فورپول-ها باعث کاهش همگرایی تونل و همچنین کنترل نشست‌های سطحی گردید و هیچگونه آسیبی به سازه‌های واقع در بالای تونل از جمله مدرسه وارد نشد. در این مورد طول لوله‌های فورپول ۱۲ متر و قطر آن‌ها ۱۱۴/۳ میلی‌متر و ضخامت آن‌ها ۶ میلی‌متر گزارش گردید (Harazaki et al, 1998).

۲-۳-۲ تونل ساتسوما تاگامی

ماتسومو^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ کاربرد لوله‌های فولادی دارای قطر بزرگ، که تزریق در آن‌ها انجام گرفته بود، را در تونل تاگامی^۳ در ژاپن مورد بررسی قرار دادند؛ آن‌ها نشان دادند که با بکارگیری روش لوله سقفی نشست سطح زمین قابل قبول می‌گردد (Matsumoto et al, 2001).

۲-۳-۳ تونل گلوک

تونل گلوک^۴ دارای ارتفاع ۱۰/۵ متر و میزان روباره کمتر از ۸۰ متر، در کشور اسلونیای^۵ واقع است. به منظور حفاری و همچنین کاهش نشست‌هایی که می‌تواند به طور بالقوه باعث ایجاد گسیختگی ترافیک در جاده بالایی این تونل گردد و همچنین به علت به حداقل رساندن خطر زمین لغزش، فورپول‌ها به کار گرفته شدند. طبق گزارش‌های موجود در تحقیقات آقایان بیزجاک^۶ و پتکوسک^۷ در سال ۲۰۰۴، طی اولین حفاری این تونل، زمین لغزش اتفاق افتاده است که منطقه ریزشی حاوی ماسه سنگ‌های کوارتزی به شدت هوازده بوده است. از این رو به علت وجود جاده در بالای تونل و همچنین وجود

^۱Harazaki et al.

^۲Matsumoto

^۳Satsuma Tagami

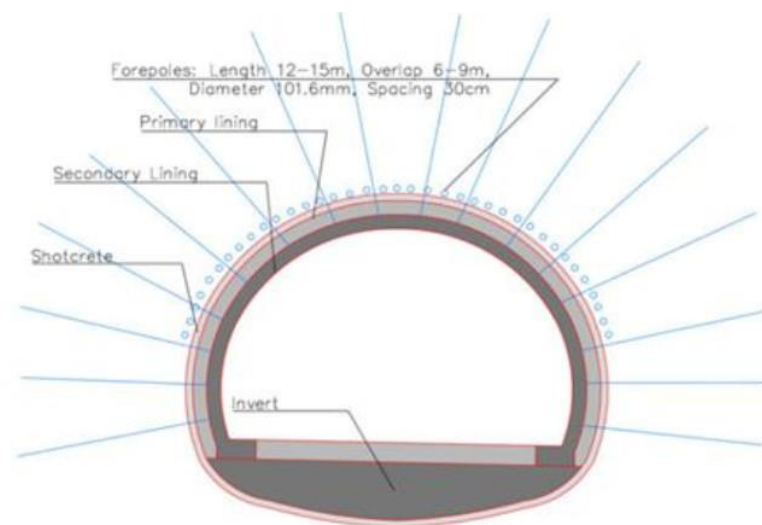
^۴Golovec

^۵Slovenia

^۶Bizjak

^۷Petkovsek

پتانسیل زمین لغزش در این منطقه از لوله‌های فورپول به منظور پیش‌نگهداری فضای حفاری شده استفاده گردید. طول این لوله‌ها ۱۵-۱۲ متر و میزان همپوشانی آن‌ها ۹-۶ متر است، همچنین لوله‌ها دارای قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و در فاصله مرکز به مرکز ۳۰ سانتی متری از یکدیگر قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است در این تونل به منظور کنترل بیشتر زمین لغزش‌ها از لوله‌هایی با طول ۹ متر، همپوشانی ۳ متر و همان قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر، در فاصله مرکز به مرکز ۳۰ سانتی‌متری از یکدیگر، در کنار فورپول‌ها استفاده شده است (شکل ۲-۲) (Bizjak & Petkovsek, 2004).



شکل ۲-۲: جزئیات نگهدارنده‌های تونل گلوک (Bizjak & Petkovsek, 2004).

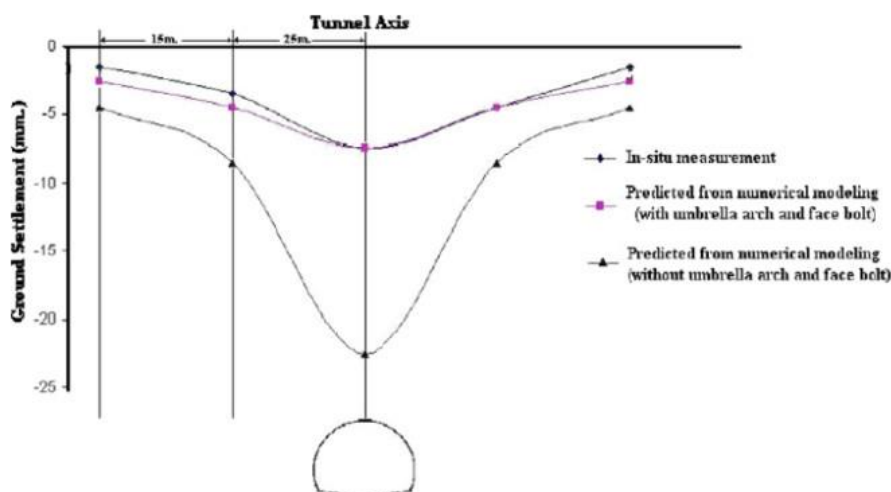
۴-۳-۲ تونل متروی استانبول

مورد دیگر در سال ۲۰۰۸، تحقیقات اوجاک^۱ بود که با مطالعه روی نتایج نشست سطح زمین اندازه‌گیری شده در محل، در مراحل مختلف حفاری متروی استانبول ترکیه با دو روش پیش‌نگهداری و NATM در مناطقی با خاک سست، نشان داد که با استفاده از روش پیش‌نگهداری چتری، نشست‌های سطح زمین عددی ۳ برابر کمتر نسبت به روش NATM نشان می‌دهند. واضح است که استفاده از روش چتری هزینه بیشتری در پی دارد اما مقادیر آن از هزینه‌های ناشی از نشست و خسارت به سازه‌های سطحی کمتر است (Ocak, 2008).

^۱Ocak

۵-۳-۲ تونل متروی ازمیر ترکیه

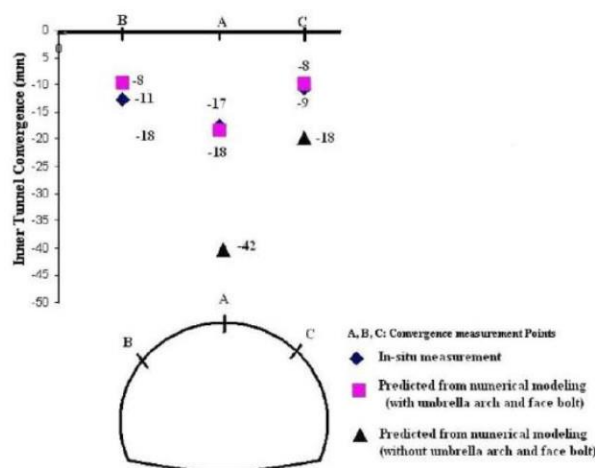
اکسوی و اونارگان^۱ در سال ۲۰۱۰، با بررسی بخشی از فاز دوم شهر ازمیر^۲ ترکیه که در ناحیه پرجمعیتی واقع است، تأثیر روش پیش‌نگهداری را روی این سازه زیرزمینی مورد تحلیل قرار دادند. در این پژوهش نقش روش پیش‌نگهداری و مسلح‌سازی سینه‌کار تونل توسط تحلیل سه‌بعدی برای روش طاق‌چتری و بدون روش طاق‌چتری جهت جلوگیری از تغییر شکل سیستم تکیه‌گاهی و خسارت واده بر ساختمان تونل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که به کارگیری روش طاق‌چتری و بولت‌های سینه‌کار، میزان نشست را تا بیش از ۶۹٪ (شکل ۳-۲) و همگرایی را نیز (شکل ۴-۲) کاهش می‌دهد (Aksoy & Onargan, 2010).



شکل ۳-۲: مقادیر نشست در مدل‌سازی عددی و داده‌های برجا (Aksoy & Onargan, 2010).

^۱Aksoy & Onargan

^۲Izmir



شکل ۲-۴: مقادیر همگرایی در مدل سازی عددی و داده های برج (Aksoy & Onargan, 2010).

۲-۳-۶ تونل پیشرو پلاتامون

در سال ۲۰۱۰، مارینوس و تسیامابس^۱ ضرورت احداث تونل پیشرو پلاتامون^۲ به منظور پیشروی در ناحیه گسیخته شده را مورد بررسی قرار دادند. در واقع تونل پلاتامون یک تونل دوقلوی بزرگراه است که آن را^۳ به تسالونیک^۴ در یونان متصل می کند و گزارش های موجود از این منطقه حاکی از ریزش حدود ۴۰ متری در سینه کار تونل از سمت شمال و حدود ۲۰ متری در سینه کار از سمت جنوب بود؛ از این رو به منظور پیشروی در ناحیه گسیخته شده، احداث یک تونل پیشرو ضروری گردید. جنس غالب منطقه رسی و ارتفاع تونل حدود ۱۷ متر است. در دسامبر ۲۰۱۰، رای عبور از منطقه ریزشی، لوله های فورپول با طول ۱۲ متر، قطر ۱۱۴ میلی متر و میزان همپوشانی ۴ متر بکار گرفته شدند. این لوله ها در ۱۰۰ درجه از تاج تونل نصب گردیدند (شکل ۲-۵) (Marinos & Tsiambaos, 2010).

¹Marinos & Tsiambaos

²Platamon

³Athens

⁴Thessaloniki



شکل ۲-۵: اضافه حفاری تونل پیشرو پلاتامون در مرز جنوبی تونل (Marinos & Tsiambaos, 2010).

۷-۳-۲ تونل سن فدل

در سال ۲۰۱۲، فاسانی و همکارانش^۱ در مورد تونل سن فدل تحقیقاتی به عمل آوردند. مصالح تشکیل دهنده مقطع جنوبی تونل سن فدل^۲ در کشور سوئیس، شامل اندکی شن‌های لای‌دار با مقدار قابل توجهی ماسه، سنگ و بلوک با حداکثر روبره ۲۵ متر است. مواد تشکیل دهنده محدوده این تونل فاقد چسبندگی حقیقی می‌باشند و فقط به مقدار ناچیزی درهم قفل شده‌اند. به منظور کاهش همگرایی، بهبود شرایط زمین با استفاده از روش فورپولینگ، پیشنهاد شده است. فورپول‌های انتخاب شده دارای طول ۱۵ متر در حدود ۶ متر بالاتر از جبهه حفاری و میزان ۵ متر همپوشانی است. لوله‌ها به فاصله ۴۰ سانتی‌متری از یکدیگر در بالای جبهه حفاری نصب گردیده و به‌منظور اطمینان از پایداری، از انکرهای سینه‌کار با طول ۱۲ متر نیز استفاده گردید (شکل ۲-۶) (Fasani et al, 2012).

^۱Fasani et al.

^۲San Fedele



شکل ۲-۶: مقطع جنوبی تونل سن فدلّه در طول بازدید نویسندگان در سال ۲۰۱۱ (Fasani et al, 2012).

۸-۳-۲ تونل دریسکوس

در سال ۲۰۱۳، طراحی ضعیف‌ترین مقطع تونل دریسکوس^۱، در یونان نیز نیازمند استفاده از فورپول‌ها به منظور حفاری مواد فیلیشی شکسته، در حدود ۶۵۰ متر از کل طول تونلگردید. روباره این تونل ۲۲۰-۱۰۰ متر و ارتفاع مقطع تونل نعل اسبی ۹/۴۷ متر می‌اشد. لوله‌های فورپول که در این منطقه با زاویه ۵/۷۸ درجه نسبت به محور تونل قرار گرفتند، با طول ۱۲ متر و قطر ۱۰۱ میلی‌متر و همچنین میزان همپوشانی آن‌ها ۴ متر، عملکرد مناسبی از خود نشان دادند. (Vlachopoulos et al, 2013).

۴-۲ روش بهسازی مهارگذاری

زمین‌مهار یا انکراژها، تاندون‌های پیش‌تنیده‌ی دائمی تزریق شده با سیمان هستند که در خاک و سنگ برای مهار و کنترل المان‌های سازه‌ای مانند دیوار (نگهداری گود) یا دال‌ها استفاده می‌شوند.

¹Driskos

اولین کاربرد مهارها حدود سال ۱۹۳۳ در سد چرفس^۱ الجزایر بر می گردد. استفاده از پیچ سنگ-های درگیر نقطه‌ای ابتدا در آمریکا گسترش یافته و در سال ۱۹۵۰ میلادی در انگلستان بکار گرفته شد. سپس با پیشرفت علم مهارهای درگیر در طول رزین با توجه به مزایا و کاربردی بسیار بالای این نوع مهار به سرعت توسعه یافته و تکنولوژی ساخت و اجرای آن گسترش یافت. با گذشت زمان استفاده از مهارهای تزریق شده با دوغاب سیمان، جای مهره‌های رزینی را گرفت و با وجود انواع مختلف مهار از لحاظ تکنولوژی ساخت و اجرا و نوع مصالح مصرفی کاربر مهارهای تزریقی با دوغاب سیمان روز به روز بیشتر و گسترده‌تر شد. (خزائی، ۱۳۷۵)

لی و یو^۲ در پژوهشی با عنوان "رفتار تونل حفر شده در مجاورت شمع‌های بارگذاری شده" 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 مهار از سطح زمین (بیشتر از ۳ متر)، جابجایی در بالای مهار بسیار زیاد می‌شود، ولی روند تغییر شکل دیواره ثابت است. طبق نتایج، ضریب ایمنی برای روش میخ‌گذاری و روش ترکیبی میخ و مهار تفاوت چندانی ندارد، این مسئله نشان می‌دهد استفاده از مهار در ردیف‌های بالایی دیوار تاثیر چندانی بر پایداری سازه نداشته و کنترل کننده جابجایی است. (Lee & Yoo, 2008)

ملاحسنی (۲۰۱۴) در پروژه‌ای با عنوان "کاربرد مهارهای غوطه‌ور در شمع‌های صفحه‌ای دیوارهای اسکله" واقع در بندر راونا^۳ ایتالیا، مطالعات گسترده‌ای در پارامترهای تاثیرگذار در روش مهارگذاری با کمک روش اجزای محدود در حالت دوبعدی و سه‌بعدی انجام داد. نتایج بدست آمده عبارتند از:

¹ Cheurfas

² Lee & Yoo

³ Ravenna

- با افزایش فاصله بین مهارها، ضریب اطمینان کاهش یافت.
- با استفاده از روش مهارگذاری در خاک موجب افزایش قابل توجه ضریب اطمینان و کاهش نشست شد.
- زاویه مهار برای کمترین تغییر شکل جانبی، کمترین نشست سطح زمین مجاور گود و بیشترین نیروی بسیج شده در مهار در حدود ۲۰ درجه می‌باشد.
- مقادیر جابجایی در امتداد طول و عرض ناحیه گودبرداری هرچه به طرف گوشه گودبرداری نزدیک‌تر شود، کمتر خواهد شد. همچنین مقادیر جابجایی نهایی حداکثر در امتداد طول بیشتر ناحیه گودبرداری از مقادیر جابجایی نهایی حداکثر در امتداد طول کمتر ، بیشتر است.
- مقایسه خروجی‌های نرم‌افزار در حالت مدلسازی دوبعدی و سه‌بعدی ، نشان داد که؛ حداکثر نشست افقی، نشست عمودی و ضریب اطمینان در حالت سه‌بعدی به‌ترتیب ۳۰ درصد، ۶۰ درصد و ۲۴ درصد بهبود داشته است. می‌توان نتیجه گرفت که نتایج در حالت سه‌بعدی حقیقی‌تر است.
- دیوار مهارگذاری شده با مدل رفتاری خاک موهر-کولمب و خاک سخت شونده مقایسه شده و نتایج نشان داد مدل موهر- کولمب مقادیر بیشتری را برای نشست پیش بینی می‌کند. اما ضریب اطمینان در دو مدل رفتاری خاک تفاوت چندانی ندارد. (Mollahasani, 2014)

(2014)

جدول (۱-۲): مقایسه نتایج مهار در مدلسازی دو بعدی و سه بعدی (Mollahasani, 2014).

ضریب اطمینان	حداکثر نیروی مهار (kN/m)	حداکثر نشست قائم (cm)	حداکثر جابجایی افقی (cm)	مدل
۱/۲۶	۳۵۷	۱۹/۷۴	۱۵/۴۷	دو بعدی
۱/۵۶	۳۴۷	۷/۷۳	۱۰/۸۱	سه بعدی

چالوچ و برابود^۱ (۱۹۹۱) تاثیر طول قسمت تزریق شده (L_b) را در طول ثابت مهار (L_t) بررسی طول مهار ۱۳/۸ متر و قسمت تزریق شده ۴/۶ و ۹/۲ متر بوده است. منحنی‌های بدست آمده نشان داد در مهار با یک طول ثابت، قسمت تزریق شده کوتاه‌تر از نظر باربری تا ۲۳ درصد رفتار بهتری نسبت به مهاری دارد که طول گیرداری بیشتری دارد. طبق این بررسی این نتایج بدست آمده:

در صورتی که با طول غیر گیرداری در مهار ثابت فرض شود:

- با کاهش گیرداری مهارها، نشست سطح زمین و جابجایی افقی دیوار افزایش پیدا می‌کند.
- با افزایش طول گیرداری مهار، نشست سطح زمین کاهش پیدا می‌کند ولی جابجایی افقی دیوار افزایش پیدا می‌کند.

با ثابت نگه‌داشتن طول گیرداری مهار:

- با کاهش طول غیر گیرداری مهار، نشست سطح زمین و جابجایی افقی دیوار افزایش می‌یابد.
- با افزایش طول غیر گیرداری مهار، نشست سطح زمین و جابجایی افقی دیوار کاهش می‌یابد.

یابد. (Chaouch & Briaud, 1991)

چانگ فو و شون جان^۲ (۲۰۰۸) در مطالعه عددی و تحلیل اندرکنش مهار نشان دادند که برای مهار، شعاع و طول بهینه‌ای وجود دارد و افزایش یکی از این دو پارامتر تاثیری دائمی بر روی افزایش ظرفیت باربری ندارد. ظرفیت باربری مهار با افزایش قطر مهار افزایش می‌یابد (اما نه بصورت دائمی). با افزایش طول مهار نیز ظرفیت باربری مهار ابتدا افزایش یافته و سپس به یک مقدار ثابت می‌رسد.

¹ Chaouch & Briaud

² Chang fu & Shun jun

در فصل به مطالعه پژوهش‌های پیشین در زمینه روش‌های بهسازی خاک نظیر شمع‌گذاری، فورپولینگ و مهارگذاری پرداخته شد. مطالعات پیشین نشان داد که روش‌های ذکر شده در بهسازی خاک‌های سست و ضعیف ماسه‌ای و رسی مفید واقع بوده است.

در روش بهسازی شمع‌گذاری، مطالعه اندرکنش بین شمع و خاک جهت توصیف بهسازی خاک مفید است. پارامترهایی نظیر خواص خاک (وزن مخصوص، مدول برشی، نسبت پواسون، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و زاویه اتساع) و شمع (سختی و پارامترهای هندسی شمع) در رفتار اندرکنش شمع-خاک تأثیرگذار هستند. همچنین استفاده از این روش موجب کاهش نشست سطح زمین می‌شود. کاهش نشست زمین به پارامترهایی نظیر قطر، طول و فاصله بین شمع‌ها (آرایش شمع‌ها) وابسته است.

روش پیش‌تحکیمی فورپولینگ با تحت فشار قرار دادن مصالح زمین، قبل از حفاری موجب بهبود خواص فیزیکی زمین می‌شود. کاربرد این روش گسترده است و از خاک‌های سست تا محیط‌های سنگی را شامل می‌شود. این روش در کاهش نشست سطح زمین و تاج تونل بسیار موثر است. همچنین این روش با ایجاد ناحیه الاستیک در بالای تونل موجب کوچک شدن ناحیه پلاستیک در اطراف تونل می‌شود. خواص دوغاب تزریقی، فشار تزریقی، مشخصات هندسی لوله‌های فورپولینگ (طول، زاویه نسبت به افق، قطر لوله، زاویه همپوشانی) در کاهش نشست زمین و پایداری تونل دخیل هستند.

روش بهسازی مهارگذاری یا انکراژ یکی دیگر از روش‌های بهسازی است که شامل تاندون‌های پیش‌تنیده دائمی تزریق شده با سیمان هستند که در خاک و سنگ استفاده می‌شود. پژوهش‌های

انجام شده بر روی این روش نشان دهنده این بود که استفاده از این روش موجب کاهش نشست زمین می‌شود. همچنین استفاده از این روش در خاک موجب افزایش ضریب اطمینان خاک می‌شود.

۳ فصل سوم

مبانی نظری روش‌های بهسازی خاک

از مهمترین مسائل در مبحث تونل‌سازی در محیط‌های شهری به خصوص در شرایطی که زمین سست و ضعیف باشد، پایداری، ایمنی و اقتصادی بودن سازه است. در حفاری تونل‌های مترو، از آنجایی که احتمال آسیب بر سازه‌های سطحی بالاست، کنترل نشست سطحی قبل و بعد از عملیات حفاری ضروری است. با پیشرفت‌های خوبی که در زمینه روش‌های عددی ایجاد شده است، می‌توان رفتار و اندرکنش سازه‌ها را به صورت دوبعدی و سه بعدی بررسی و تحلیل کرد.

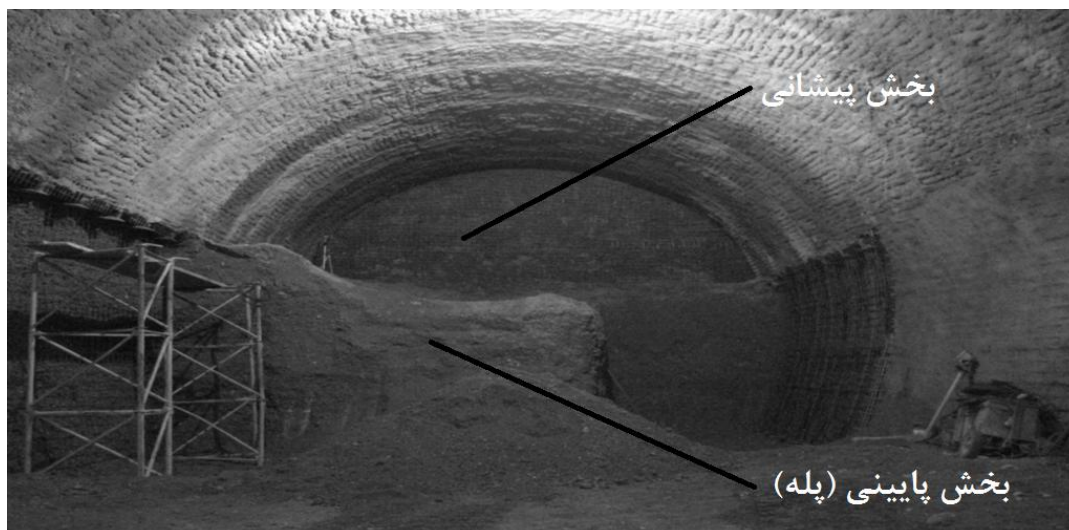
در این فصل به معرفی روش حفاری تونل که در مطالعه موردی مورد استفاده قرار گرفته است، پرداخته می‌شود. سپس مبانی نظری روش‌های بهسازی انجام شده در این پژوهش ارائه می‌شود.

۲-۳ روش‌های تونل‌سازی

تونل‌سازی در محیط‌های شهری معمولاً به دو صورت سنتی و مکانیزه صورت می‌گیرد. انتخاب نوع روش به شرایط محیطی، تکنیکی، زیست محیطی و از قبیل خصوصیات زمین و سازه‌های روی سطح زمین، تجهیزات در دسترس و ... بستگی دارد. روش‌های تونل‌سازی به طور کلی به دو روش مرحله‌ای و روش کندن و پوشاندن تقسیم می‌شود. روش پیشانی و پله از روش‌های مرحله‌ای است که که ابتدا قسمت فوقانی تونل حفر می‌شود سپس قسمت تحتانی (پله) تونل حفر می‌شود.

۱-۲-۳ روش پیشانی و پله برداری

این روش به طور معمول در تونل‌هایی که ارتفاع قسمت پیشانی بیشتر از ۵ متر باشد و مشکلات ناپایداری زیاد نباشد، استفاده می‌شود. با این حال استفاده از این روش در تونل‌هایی با ارتفاع پیشانی کمتر از ۵ متر نیز دیده شده است. بهتر است در این روش برای کنترل جابجایی‌های دیواره تونل و بالازدگی‌های کف تونل از شاتکریت استفاده شود.



شکل ۳-۱: روش حفاری تونل پیشانی و پله برداری (جووانی، ۱۳۸۳).

به دلیل کارایی خوب این روش، می‌توان از آن در زمین‌های سست و خیلی ضعیف نیز استفاده شود؛ به شرط آنکه تاج تونل را با روش‌های بهسازی تزریق چتری و یا نصب لوله‌های تزریق مسلح کرد. در شرایطی که تونل کم عمق باشد و همچنین زمین سست باشد، به دلیل عدم نگهداری در بخش پیشانی و تغییر شکل‌های ناشی از حین حفر بخش پایینی، استفاده از انکراژهای افقی و تزریق با فشار بالا در دو سمت دیواره تونل به منظور افزایش پایداری تونل پیشنهاد می‌شود (جووانی، ۱۳۸۳).

۳-۳ بهسازی خاک

بازسازی کنترل شده خاک در جا برای استفاده مجدد در یک ساختار جدید ژئوتکنیکی و یا بهبود وضعیت ساختار فعلی خاک را بهسازی خاک گویند. در اینجا نگاهی اجمالی به روش‌های نوین بهسازی زمین و زمینه‌های کاربردی آنها خواهد شد که هدف نهایی تمامی آنها، بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، کاهش هزینه، کوتاه شدن زمان اجرا و افزایش طول عمر بهره برداری بوده و به منظور تغییر خصوصیات خاک و در نهایت کاهش نشست زمین و سازه، بهبود مقاومت برشی خاک، از بین بردن فضای خالی زیاد در بافت مصالح خاکی و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری آن، افزایش ضریب اطمینان، کاهش خصوصیات فشرده شدن و تورم خاک انجام می‌شوند.

از کاربردی ترین روش های بهسازی خاک می توان به موارد زیر اشاره نمود :

میکروشمع: از روش های رایج بهسازی خاک، روش میکروشمع می باشد. میکروشمع به عنوان یک المان باربر اضافه شده و ضمن افزودن مقاومت خاک، با تزریق دوغاب سیمان خصوصیت های مکانیکی خاک را اصلاح میکند. میکروشمع، شمع هایی با قطر کمتر از ۳۰ سانتی متر هستند که پس از حفر گمانه یا کوبش لوله گذاری، آرماتور فولادی در داخل آن جایگذاری شده و بصورت درجا تزریق می شود و مزایایی چون جلوگیری از نشست خاک، افزایش ظرفیت باربری و سختی خاک، ایجاد تراکم، سرعت بالای اجرای کار، صرفه اقتصادی و ... را به همراه دارد.

بهسازی خاک به روش تزریق: روش دیگر افزایش ظرفیت باربری خاک و جلوگیری از نشست آب در سازه، تزریق سیمان به خاک می باشد. تزریق با پر کردن خلل و فرج خاک علاوه بر موارد فوق، در تثبیت شیروانی ها و جلوگیری از تورم نیز کاربرد دارد. تزریق در خاک به انواع مختلفی نظیر تزریق تراکمی، نفوذی، جت و شکست هیدرولیکی اجرا می شود.

فورپولینگ: از فورپولینگ در سازه های زیرزمینی بالاخص در مناطق شهری و یا هر منطقه ای که دارای زمین هایی با ساختارهای سست، ریزشی، خرد شده و با روباره کم استفاده می شود و این روش بر پایه حفر چال و نصب لوله در آن ایجاد شده است. در مناطق شهری به خاطر محدودیت های ترافیکی و برنامه ریزی، اغلب تونل ها در اعماق کم ساخته می شوند و همچنین این تونل ها باید به گونه ای ساخته شوند که کمترین تغییر و مزاحمت را در سطح زمین بوجود آورند. به همین دلیل فورپولینگ به روشی محبوب میان کارفرمایان و پیمانکاران تبدیل شده است و از آن در نگهداری جبهه کار در زمان حفاری استفاده می شود.

شمع گذاری در خاک: در موارد کمبود ظرفیت باربری خاک، انتقال نیرو به سطوح پایین تر خاک وجود دارد، چراکه در سطوح زیرین تراکم و اصطکاک بیشتر، مقاومت بالاتری را به دنبال دارد، لذا در

این موارد از روش شمع گذاری استفاده می شود.

۴-۳ روش بهسازی شمع گذاری

از مهم ترین روش های اصلاح، مقاوم سازی و بهسازی خاک، شمع گذاری می باشد. هنگامی که با ضعف در ظرفیت باربری خاک و یا قابلیت فشرده گی زیاد خاک در لایه های فوقانی، مواجه هستیم. به طوری که نتوان از لایه سطحی جهت توزیع بار استفاده نمود، نیاز به افزایش ظرفیت باربری و یا انتقال نیرو به سطوح زیرین خاک وجود دارد. در این راستا به کمک شمع گذاری یا اصطلاحاً شمع کوبی نیروی مازاد به سطوح زیرین خاک منتقل می شود. در سطح پایین تر تراکم و اصطکاک بیشتر بوده، به همین دلیل سازه نسبت به نشست و نیروهای موجود مقاومت لازم را خواهد داشت.

اگر شمع ها تحت تأثیر نیروی افقی قرار گیرند، در حالی که هنوز قابلیت حمل بارهای قائم را دارا هستند، می توانند به وسیله خمش، نیروهای افقی را نیز حمل نمایند. این وضعیت اغلب در شالوده سازه های حائل خاک که وظیفه آن ها مقاومت در مقابل فشار جانبی خاک است یا ساختمان های بلند که تحت تأثیر نیروی باد یا زلزله قرار دارند، پیش می آید.

۱-۴-۳ شمع های بتنی درجاریز

شمع درجا از خانواده شمع های بتنی می باشد و نام های دیگر آن شمع درجا، شمع ساخته شده در محل، شمع ریختنی، شمع جایگزینی و شمع بدون تغییر مکان است. شمع درجا به دلیل نامحدود بودن در قطر و عمق حفاری دارای بیشترین کاربرد و تنوع در بین تکنولوژی های اجرای پی های عمیق می باشد. در شمع های درجا ابتدا توسط ماشین آلات حفاری یک چاه با مقطع و عمق مورد نظر در زمین حفر شده و سپس در داخل آن اقدام به بتن ریزی با مصالح مرغوب می نمایند که البته این بتن می تواند مسلح یا غیر مسلح باشد.



شکل ۳-۲: دستگاه حفر چاه شمع درجا ریز

۱-۴-۳ روش اجرا شمع‌های بتنی درجاریز

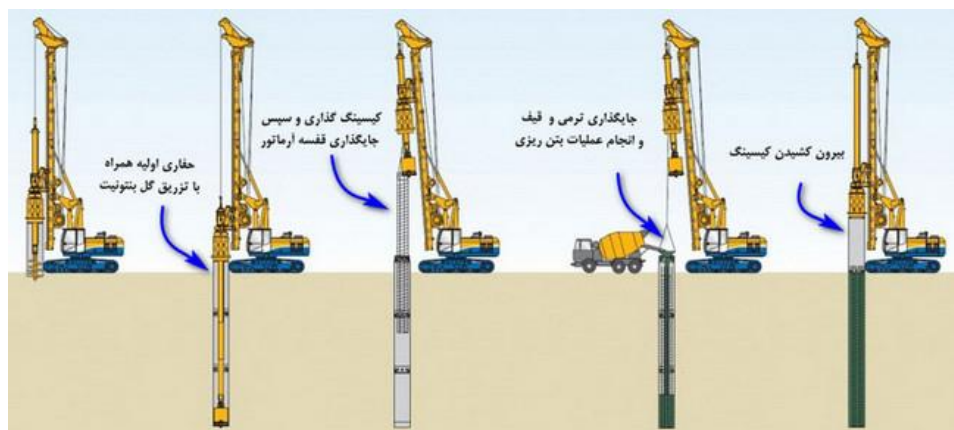
پس از تعیین محل شمع‌گذاری توسط نقشه بردار، حفر چاه توسط کارگر یا توسط دستگاه حفاری (با توجه به قطر و طول شمع، جنس و نوع خاک) با طول و قطر مورد نیاز انجام می‌گردد. در صورت استفاده از دستگاه‌های حفاری، دستگاه حفاری باید در محل مستقر شده و استقرار آن‌ها به نحوی تعیین می‌گردد که شرایط زیر را تأمین نماید (طاحونی، ۱۳۹۲):

۱- تا پایان حفاری یک شمع، نیاز به جابجایی دستگاه نباشد؛ زیرا در صورت جابجایی دستگاه حفاری و استقرار مجدد باعث اختلال در تراز و شاقول بودن دستگاه حفاری می‌شود.

۲- کمترین ضربه دینامیکی را حتی الامکان به شمع‌های اجرا شده در مراحل قبلی وارد نماید.

۳- حداقل موانع کاری را نسبت به تردد ماشین آلات مرتبط با عملیات حفاری (جرثقیل، تراک میکسر، لودر و...) ایجاد نماید.

مراحل شمع‌گذاری درجا در چند مرحله مختلف انجام می‌شود که در شکل ۳-۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳-۳: مراحل اجرای شمع گذاری درجا (طاحونی، ۱۳۹۲).

۳-۴-۲ مقاومت اصطکاکی شمع های بتنی درجا ریز

مقاومت اصطکاکی یا جداری در واقع تنش اصطکاکی موجود بین جداره شمع و خاک اطراف در طول شمع می باشد. مقدار مقاومت اصطکاکی به پارامترهایی نظیر جنس شمع، جنس خاک اطراف، شرایط زهکشی، روش اجرا، میزان جابجایی و ... بستگی دارد.

مقاومت اصطکاکی واحد سطح در هر عمق دلخواه شمع طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$f_s = k\sigma'_v \tan \delta$$

رابطه ۳-۱

که در آن k ، σ'_v و δ به ترتیب برابر با ضریب فشار جانبی خاک، تنش قائم مؤثر در عمق مورد نظر و زاویه اصطکاک بین خاک و شمع می باشد. زاویه اصطکاک بین خاک ماسه ای و شمع نیز از $0/5\varphi$ تا $0/8\varphi$ متغیر است (φ برابر اصطکاک داخلی خاک است).

مقادیر مختلف k :

مقدار k با عمق متغیر است و مقدار آن تقریباً مساوی فشار مقاوم رانکین k_p در بالای شمع و احتمالاً کمتر از فشار خاک در حالت سکون k_0 در نوک شمع بوده و به روش اجراء کوبیدن شمع نیز بستگی دارد. روابط مختلفی در ارتباط با مقاومت اصطکاکی شمعها در خاکهای ماسه ای پیشنهاد شده

که به بیان آنها می‌پردازیم (Das, 1990).

بر پایه نتایج موجود، Das، مقادیر متوسط قابل توجه برای k را پیشنهاد نموده است. برای شمع-های حفاری شده و یا حفاری شده با جت آب:

$$k = k_0 = 1 - \sin \varphi \quad \text{رابطه 3-2}$$

برای شمع‌های کوبیده شده با جابه‌جایی کم، حد پایین $k = k_0$ و حد بالا $k = 1/4 k_0$ و برای شمع‌های کوبیده شده با جابه‌جایی زیاد، حد پایین $k = k_0$ و حد بالا $k = 1/8 k_0$ در نظر گرفته می‌شود.

۵-۳ طبقه بندی روش چتری

حفاری در خاک‌های بسیار نرم، توده‌سنگ‌های ضعیف و یا مصالح دانه‌ای با چسبندگی پایین، به منظور جلوگیری از ریزش زمین، ایده یک نگهدارنده اولیه خلاقانه و اضافی، لازم بنظر می‌رسد. ایده استفاده از روش‌های پیش‌تحکیمی که در مناطق در معرض خطر، یعنی بخش‌هایی که زمان کافی برای نگهداری بعد از حفاری به دلیل شرایط ناپایدار لایه‌های سنگ یا خاک وجود ندارد، به کار برده می‌شود، تا اوائل ۱۹۷۰ صرفاً به عنوان یک ایده تئوری مورد نظر قرار نگرفته بود؛ اما با گذشت زمان به عنوان یک روش عملی و کارآمد مورد توجه واقع گردید. پیش‌نگهداری^۱ (صادقان و دادیزاده – ۲۰۱۰)، پیش‌محصور^۲ (لوناردی^۳ – ۲۰۰۸)، روش کمکی^۴ (کیمورا و همکاران^۵ – ۲۰۰۵) و پیش‌بهبود^۶ (سانگ و همکاران^۷ – ۲۰۰۶)، نام‌های دیگر این ایده در این نوع زمین‌ها می‌باشند (Oke et al, 2013).

¹Pre-support

²Pre-confinement

³Lunardi

⁴Auxiliary method

⁵Kimura et al.

⁶Pre-improvement

⁷Song et al.

در سازندهای ضعیف در سینه کار تونل، اجرای روش پیش‌نگهداری (پیش‌تحکیم) باعث افزایش ایمنی و سرعت عملیات می‌گردد. این فن در مناطق پر مخاطره، موجب ایجاد یک پوسته مقاوم و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت چسبندگی و مقدار مدول تغییر شکل‌پذیری خاک و یا توده‌سنگ در محدوده اجرای کار می‌شود (خادمی، ۱۳۹۲).

در مورد طبقه‌بندی روش‌های پیش‌تحکیمی بایستی گفت که برخی از این روش‌ها با استفاده از تعریف و یا توضیح واضح از یکدیگر تفکیک نشده و یا برای یک سیستم اسامی متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این‌رو در اینجا روش‌های پیش‌تحکیمی قوس‌چتری بر اساس روش‌های تحکیم به چهار دسته اسپایلینگ^۱ (لوله‌گذاری کوتاه)، فورپولینگ^۲ (روش چتر قوسی)، جت گروتینگ (تزریق با جت)^۳ و پایپ جکینگ^۴ (لوله‌رانی) تقسیم شده است.

۳-۵-۱ روش لوله‌گذاری کوتاه

ساده‌ترین روش از مجموعه روش چتری، نصب لوله‌ها از آخرین لتیس و یا قاب فلزی به سمت جلوی سینه کار می‌باشد. معمولاً لوله‌ها دارای طولی با طول کمتر از ارتفاع حفاری شده و قطر کمتر از ۵۰ میلی‌متر می‌باشند و با استفاده از فشار اعمالی در پشت آن‌ها و راندن در داخل زمین و یا حفاری چال‌ها و سپس قرار دادن آن‌ها در داخل چال‌ها با فاصله کم در اطراف طاق تونل نصب می‌شوند. سپس فضای بین لوله‌ها و دیواره چال با دوغاب سیمان پر می‌شود (Volkman et al, 2006).

لوله‌ها اغلب هنگامی نصب می‌شوند که ساختار ژئوتکنیکی خود بتواند گسیختگی محلی بخشی از تونل را کنترل کند (Volkman et al, 2006). در حقیقت از لوله‌های کوتاه‌تر (۳-۴ متر) به‌منظور نگهداری گسیختگی‌های موضعی در محدوده حفاری استفاده می‌شود و از لوله‌های بلندتر (تا ۸ متر) به‌منظور کاهش تداخل در عملیات تونل‌سازی به دلیل تداوم حفاری‌ها و نصب لوله‌ها استفاده می‌شود.

¹Spilling

²Forepoling

³Jet Grouting

⁴Pipe Jaking

لوله‌ها به منظور دستیابی به کنترل ساختاری و جایگزینی مناسب در زاویه‌ای بین ۵ الی ۴۰ درجه نسبت به صفحه افقی محور طولی حفاری تونل، قرار می‌گیرند (Vardakos, 2007)؛ همچنین پیشنهاد شده است که فاصله مرکز به مرکز لوله‌ها کمتر از ۳۰ سانتی‌متر باشد. میزان همپوشانی لوله‌ها به‌طور مستقیم با پتانسیل تکرار مسئله‌داری ساختار توده‌سنگ که ممکن است در پروفیل تونل موجود باشد، در ارتباط است؛ به عنوان مثال، طول همپوشانی عموماً نصف طول همه لوله‌ها است، اما حدود آن از ۱/۳ تا ۲/۳ طول لوله‌ها می‌تواند متغیر باشد (Volkman et al, 2006).



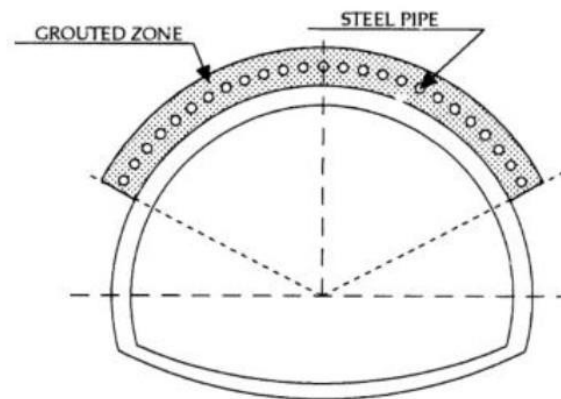
شکل ۳-۴: نصب لوله‌ها از میان لیس‌ها در هر سیکل حفاری (Volkman et al, 2006).

۳-۵-۲ روش فوربولینگ

این روش پیش نگهدارنده هنگامی که مصالح بخش بزرگی از مسیر تونل مسأله‌دار و یا ضعیف باشد و یا اینکه ساختارهای ژئوتکنیکی چندگانه‌ای در جهت‌های نامساعد، باعث گسیختگی‌های احتمالی می‌شوند، قبل از حفر تونل، جلوتر از جبهه کار، نصب می‌گردند و هدف از این روش افزایش پایداری جبهه کار، محدود کردن جابجایی و نشست و جلوگیری از گسیختگی شیروانی و لغزش زمین می‌باشد (Volkman et al, 2008).

در این روش قطر لوله‌ها از لوله‌ها بزرگتر و طول آن (برخلاف آن‌ها) بزرگتر از ارتفاع تونل است.

طی این روش لوله‌هایی با قطر کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر با استفاده از ماشین‌های مخصوص (دستگاه‌های حفاری کاساگرانده) و یا با استفاده از جامبو دریل‌های معمولی، در اطراف محدوده حفاری نصب می‌شوند. در این روش لوله‌های فولادی سوراخدار با طول ۱۲ الی ۱۵ متر در چال‌ها وارد می‌شوند، سپس دوغاب به درون لوله‌ها تزریق می‌شوند، سپس دوغاب به درون لوله‌ها تزریق می‌شود (شکل ۳-۵). این روش به خوبی بار زمین را در دو مقطع طولی و عرضی متحمل می‌شود. لوله‌های فولادی مورد استفاده در این روش بسته به روش حفاری دارای قطر، ضخامت و طول متفاوتند.



شکل ۳-۵: روش فورپولینگ (Muraki, 1997)

۳-۵-۳ روش تزریق با جت

در این روش با استفاده از دستگاه‌های حفاری دورانی چال‌هایی در اطراف طاق تونل با فواصل مشخص حفاری شده و سپس دوغاب سیمان با فشار زیاد در داخل آن‌ها تزریق می‌گردد. تزریق با فشار بالای دوغاب، چال حفاری شده را پر کرده و همچنین در صورت وجود فضاهای خالی احتمالی در پیرامون چال‌ها، موجب پر شدن فضاهای مذکور نیز می‌شود. در این روش با تزریق دوغاب با فشار و سرعت بالا از طریق یک نازل، بافت خاک متلاشی شده، قسمتی از خاک برداشته شده و مابقی به صورت درجا با دوغاب مخلوط می‌شود تا بدین ترتیب مقاومت و نفوذپذیری مصالح در محل بهبود یابد. ستون‌های جت گروت ایجاد شده در تونل به منظور ایجاد نگهداری چتری در پیرامون محیط

حفاری، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ستون‌ها می‌تواند دارای همپوشانی باشند که در این صورت چتر بسته‌ای را که اغلب مانع نفوذ آب می‌شود، تشکیل می‌دهند.

این روش در بسیاری از انواع خاک‌ها قابل کاربرد است. بر اساس نظریه موزلی^۱ (به نقل از منبع Muraki, 1997)، معمولاً ماسه‌ها برای تزریق با جت بسیار مناسب می‌باشند، زیرا که در نتیجه چسبندگی کم، ساییدگی ذرات خاک به انرژی کمتری نیاز دارد. همچنین فرار دوغاب به سطح بواسطه سیالیت و عدم چسبندگی تشدید می‌شود. گراول‌ها با نفوذ پذیری بالا منجر به از بین رفتن دوغاب و سیال‌های تزریقی می‌شوند، بنابراین تأثیر تزریق را کاهش می‌دهند. در خاک‌های چسبنده، قطر ستون خاک بستگی به چسبندگی خاک دارد. هر چه مقاومت برشی خاک بیشتر باشد، میزان کمتری از خاک تحت تأثیر دوغاب است. در خاک‌ها با مقاومت برشی بالا بایستی تزریق با انرژی بیشتری انجام گیرد. این روش به دو روش انجام می‌پذیرد:

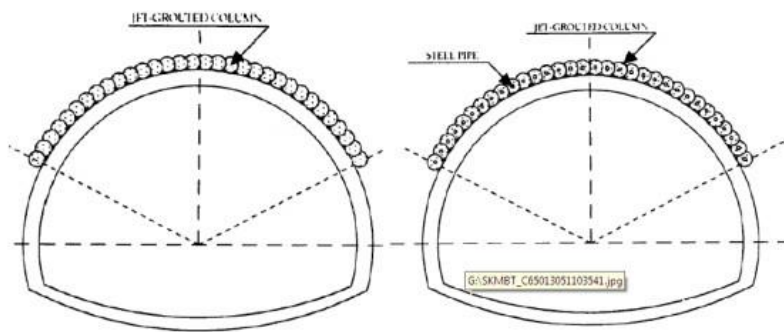
- روش تزریق با جت زیرافقی تقویت شده^۲
- روش تزریق با جت زیرافقی تقویت نشده^۳

در روش اول پس از حفر چال‌ها، لوله‌ها به درون چال فرستاده شده و سپس ستون‌های تزریق ایجاد می‌شوند. در روش دوم بلافاصله پس از حفر چال‌ها ستون‌های تزریق ایجاد می‌شوند (شکل ۳-۶).

¹Moseley

²Reinforced sub-horizontal jet grouting method

³Unreinforced sub-horizontal jet grouting method



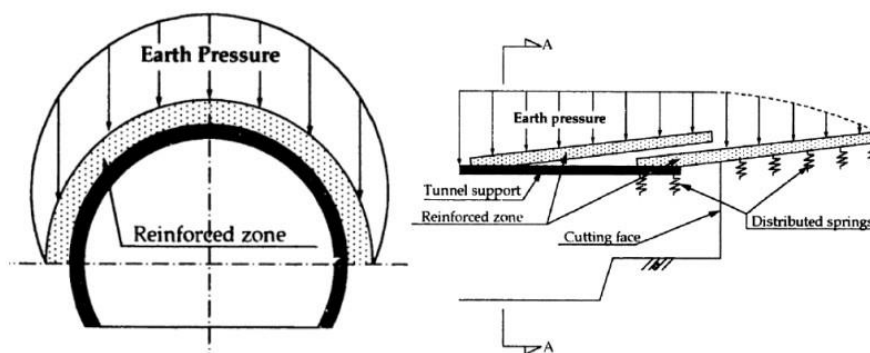
شکل ۳-۶: سمت راست) تزریق با جت مسلح شده. سمت چپ) مسلح نشده (Muraki, 1997).

خصوصیات مهندسی زمین بهسازی شده مثل مقاومت فشاری و مدل الاستیسیته بستگی به خصوصیات خاک و روش تزریق با جت دارد.

از جمله مشکلات این روش بالآآمدگی سطح زمین تحت تأثیر فشار تزریق در روباره‌های کم‌عمق می‌باشد. بنابراین در جایی که روباره به حد کافی عمیق نیست تا بستری را برای فشار تزریق فراهم کند، این روش توصیه نمی‌شود.

۳-۵-۴ ساز و کار سیستم نگهداری فورپولینگ

پایدارسازی سینه‌کار با ایجاد ناحیه قوسی شکل در دو جهت طولی و عرضی می‌باشد. در جهت طولی بار قسمتی که به تازگی حفاری شده توسط یک تیر که یک سر آن در زمین و سر دیگر بر روی سیستم نگهداری قرار گرفته، وارد می‌شود و در جهت عرضی، ناحیه قوسی شکل که به صورت قاب عمل می‌کند بار زمین را متحمل می‌شود (شکل ۳-۷).



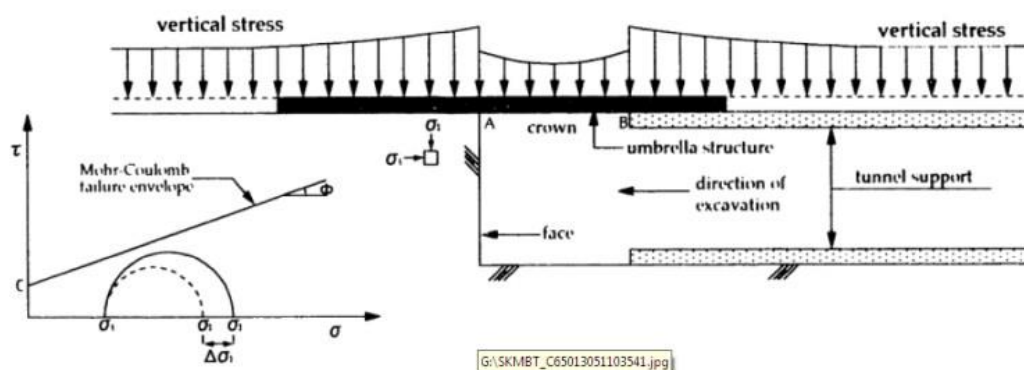
شکل ۳-۷: سمت راست) افزایش پایداری در جهت طولی. سمت چپ) افزایش پایداری در جهت عرضی (روش

پایپ جنکینگ) (Muraki, 1997).

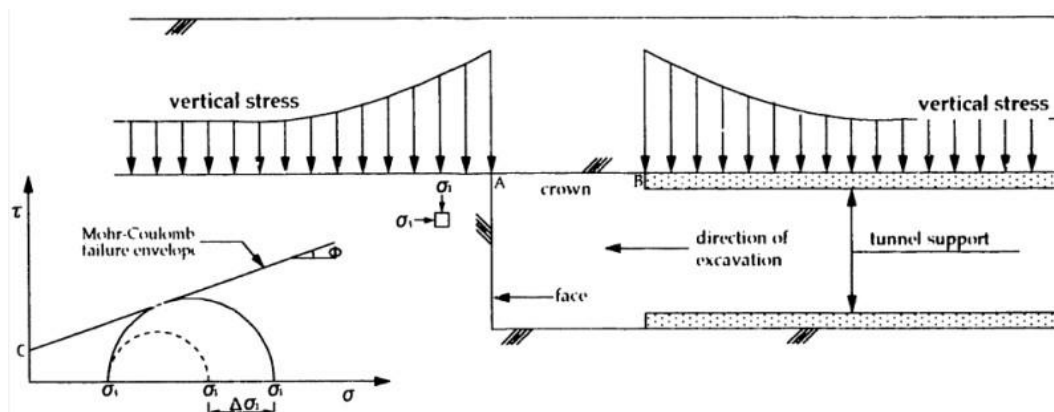
۳-۴-۵-۱ چگونگی افزایش پایداری در سینه کار توسط روش فورپولینگ

همانطور که در شکل (۳-۸) نشان داده شده است، در صورت عدم استفاده از روش فورپولینگ، تمرکز تنش با کاهش تنش عمودی به مقدار صفر در سینه کار (نقطه A) همراه است. میزان تنش در مقطع نگهداری نشده (بین نقاط A و B) باید صفر باشد. با نصب سیستم نگهداری در فاصله مشخصی در پشت جبهه کار افزایش دوباره در تنش عمودی انتظار می‌رود. در شکل (۳-۹) که از روش چتری استفاده شده، مقطع نگهداری نشده با ساختار چتری پوشیده شده است. بنابراین این ساختار فشار دوباره را متحمل می‌شود. تنش‌های عمودی وارده به ساختار چتری همانند اتصال پوشش و زمین، بستگی به صلبیت نسبی و زمین دارد. نهایتاً این روش منجر به کاهش تمرکز تنش در جلو و پشت سینه کار شده است.

همانطور که واضح است در صورت عدم استفاده از روش فورپولینگ، با افزایش تنش، دایره موهر پوش شکست را قطع می‌کند و منجر به شکست می‌شود؛ در حالی که با استفاده از این روش میزان افزایش تنش کنترل شده و منجر به شکست نمی‌شود (Muraki, 1997).



شکل ۳-۸: توزیع تنش عمودی در تاج تونل و موقعیت تنش در جلوی سینه کار (عدم استفاده از روش فورپولینگ)
(Muraki, 1997).



شکل ۳-۹: توزیع تنش عمودی تاج تونل و موقعیت تنش در جلوی سینه کار (استفاده از روش فورپولینگ)
(Muraki, 1997).

۳-۵-۵ نصب لوله‌ها

از ماشین‌های سنتی جامبو و ماشین‌های مخصوص جهت نصب لوله‌ها استفاده می‌شود. دو روش مختلف برای نصب وجود دارد: پیش حفاری^۱ و حفاری به همراه لوله‌گذاری^۲. چگونگی نصب لوله‌ها نیز بر پایداری تونل موثر است. با انتخاب روش نصب و یا لوله مناسب، می‌توان تغییر شکل‌ها را به حداقل رساند. در ادامه مشخصات و ویژگی‌های روش‌های نصب مذکور ارائه می‌گردد.

^۱Pre-drilling

^۲Cased drilling

۳-۵-۱ روش پیش حفاری

در روش پیش حفاری ابتدا چال حفاری شده و سپس مته از داخل چال بیرون کشیده شده و لوله در داخل چال قرار داده می‌شود، در انتها دوغاب سیمان در داخل لوله‌ها تزریق می‌گردد. در روش پیش حفاری معمولاً دستگاه‌های حفاری ویژه پرسنل اضافی برای نصب لوله‌ها لازم می‌باشد.

دستگاه‌های ویژه مذکور دارای یک بازوی بلند بوده که چال را در یک مرحله حفاری می‌کند (شکل ۳-۱۰). خنک کردن سرمته و شستن و خارج کردن مواد حفاری شده از داخل چال، با استفاده از آب یا هوا انجام می‌شود. مواد شوینده از داخل مته به سمت جلو (سرمته) هدایت شده و مواد حفاری شده را از فضای خالی بین مته و دیواره چال به سمت بیرون منتقل می‌کند. در زمین‌های ضعیف و ناپایدار این امر موجب بدتر شدن وضعیت دیواره چال، افزایش قطر چال و در نهایت منجر به جابجایی‌های فزاینده می‌شود. استفاده از هوا به جای آب، موجب جلوگیری از تأثیرات منفی آب بر روی پارامترهای مقاومتی بیشتر زمین‌ها می‌شود.



شکل ۳-۱۰: نصب لوله‌ها با روش پیش‌حفاری با استفاده از دستگاه‌های ویژه (Volkman et al, 2008).

پس از خارج کردن مجموعه مته و سرمته، لوله یک تکه در داخل چال قرار داده می‌شود. معمولاً پس از حفر هر چال لوله در داخل آن چال قرار داده می‌شود که این امر موجب پایداری بیشتر دیواره چال‌ها شده و همچنین زمان کمتری صرف خارج کردن و جایگزینی مته می‌شود.

زمانی که از روش پیش حفاری استفاده می‌شود، بسته شدن و جمع شدن چال در صورتی که به موقع تشخیص داده نشود، می‌تواند باعث مشکلات جدی شود. هنگامی که قطر چال کمتر از قطر لوله باشد، قوی‌ترین دستگاه‌ها نمی‌توانند لوله را در داخل چاه قرار دهند، زیرا در این صورت لوله در اثر کمانش از بین می‌رود. (شکل ۳-۱۱) گیرکردن لوله و عدم نصب به موقع را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱: عدم نصب صحیح و گیرکردن لوله در روش پیش حفاری (Volkmann et al, 2008).

۳-۵-۵-۲ روش حفاری لوله‌گذاری

در روش حفاری لوله‌گذاری نصب لوله‌ها به صورت لوله‌گذاری بوده که همزمان با عملیات حفاری در داخل تونل، نصب می‌شوند. روش حفاری لوله‌گذاری روشی یک مرحله‌ای می‌باشد. در این روش در حین حفاری چال، لوله مسقیماً پشت سرمرته حرکت کرده و پس از تکمیل پروسه حفاری در جداره خود باقی می‌ماند. در این روش برای نصب لوله‌ها از جامبو دریل‌ها استفاده می‌شود (شکل ۳-۱۲). جامبو دریل‌ها معمولاً دارای دو بازو بوده که می‌توانند به صورت موازی در حین عملیات حفاری مورد استفاده قرار گیرند که این امر زمان لازم برای نصب لوله‌ها را کاهش می‌دهد.



شکل ۳-۱۲: نصب لوله‌ها با روش حفاری لوله‌گذاری با استفاده از جامبو دریل (Volkmann et al, 2008).

در اغلب موارد از آب به عنوان خنک‌کننده و همچنین جابجاکننده مواد حفاری، استفاده می‌شود. آب از داخل مته به سمت جلو (سرسته حرکت کرده و مواد حفاری شده را از داخل لوله خارج می‌کند (شکل ۳-۱۳). زمانی که پروسه حفاری برای آخرین قسمت لوله به اتمام رسید، عملیات نصب با خارج کردن مجموعه مته و سرسته، پایان می‌پذیرد.



شکل ۳-۱۳: نصب لوله‌ها با روش حفاری لوله‌گذاری - خروج مواد حفاری شده از داخل لوله (Volkmann et al, 2008).

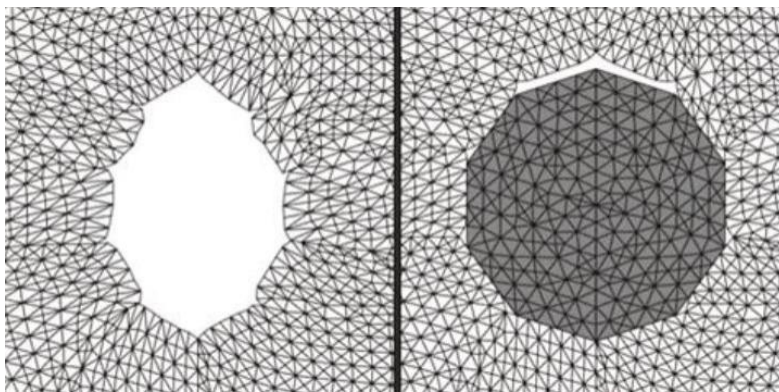
روش حفاری لوله‌گذاری دارای دو مزیت عمده نسبت به روش پیش‌حفاری می‌باشد:

- ۱- مته در داخل لوله بوده و انتقال مواد حفاری شده نیز از داخل لوله انجام می‌شود و بنابراین آب فقط در محدوده سرسته، با سنگ در تماس می‌شود. این امر موجب به حداقل رسیدن نفوذ آب در داخل توده در برگیرنده تونل، ممانعت از سست شدن زمین و بزرگ‌ترشدن

فضای چال می‌شود.

۲- چال همزمان با نصب لوله، نگهداری می‌شود. این امر موجب جلوگیری از مشکلات ناپایداری چال که ممکن است منجر به عدم نصب صحیح لوله در داخل چال و یا موجب افزایش جابجایی‌ها در نتیجه فضای باز بزرگتر اطراف چال گردد (در نتیجه شستشوی مواد دیواره چال)، می‌شود.

۳- ولکمن و شوبرت این دو روش حفاری را با استفاده از نرم‌افزار UDEC مدلسازی کردند؛ همانطور که ملاحظه می‌شود، تغییر شکل‌های ایجاد شده در دهانه چال در شکل سمت راست (حفاری با لوله‌جداری) کمتر از شکل سمت چپ (پیش‌حفاری) می‌باشد.



شکل ۳-۱۴: تغییر شکل‌ها در روش حفاری: راست) به همراه لوله‌جداری. چپ) پیش‌حفاری (Volkman et al, 2008).

۳-۵-۶ تزریق

پروسه تزریق دوغاب سیمان در روش فورپولینگ پس از نصب لوله‌ها شروع می‌شود (شکل ۳-۱۵). از دوغاب برای پرکردن لوله‌ها، فضای خالی بین لوله و مصالح در برگیرنده تونل و خلل و فرج خاک اطراف چال، استفاده می‌شود. دوغاب متشکل از مخلوط آب و سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ تا ۰/۸ می‌باشد. مخلوط مذکور معمولاً با فشار از حدود ۴ بار تا در مواردی تا حتی ۲۰ بار، به داخل لوله-

ها پمپ می‌شود. به منظور کنترل کیفیت، حجم دوغاب و همچنین فشار آن عموماً در حین پروسه تزریق کنترل می‌شود.



شکل ۳-۱۵: تزریق لوله‌های فورپولینگ پس از نصب (Volkman et al, 2008).

تأثیرات مثبت دوغاب عبارتند از:

دوغاب داخل لوله موجب افزایش مقاومت خمشی شده و در نتیجه مقطع عرضی لوله‌ها هنگامی که لوله‌ها در حسن عملیات حفاری تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، تغییر شکل ندهند.

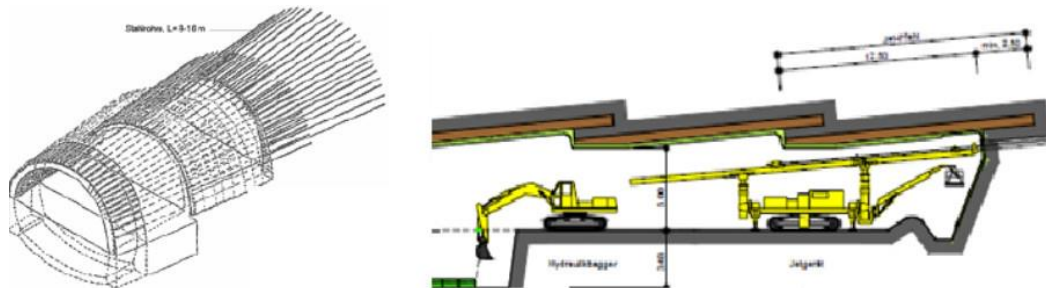
دوغاب در فضای خالی باقیمانده بین لوله و زمین، انتقال بار بین زمین و سیستم نگهدارنده را در حین عملیات حفاری، افزایش می‌دهد.

در صورت نفوذ دوغاب در زمین دربرگیرنده لوله، به محض سفت شدن دوغاب پارامترهای مقاومتی زمین افزایش می‌یابد (Volkman et al, 2008).

۳-۵-۷ نشست در سیکل‌های مختلف حفاری

در نتیجه نصب هر ردیف از لوله‌های روش فورپولینگ، حلقه‌ای از دوغاب در انتها و ابتدای سری بعدی (منطقه همپوشانی) ایجاد می‌شود (شکل ۳-۱۶). پس از لوله‌ها و آغاز عملیات حفاری در سیکل‌های اولیه (۱ تا ۳ متری) به دلیل تأثیر حلقه دوغاب که همانند یک تکیه‌گاه در جهت طولی

عمل میکند و در فرآیندهای تنش موثر است، مقادیر نشست کم می‌باشد. تأثیر تکیه‌گاهی حلقه دوغاب با تداوم مراحل حفاری و افزایش فاصله کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۱۶: همپوشانی لوله فورپولینگ- تشکیل حلقه‌ای از دوغاب در انتها و ابتدای سری بعد (Volkman et al, 2008).

در سیکل‌های میانی حفاری (در اواسط طول لوله)، نشست با خصوصیات یکسان از نظر مقدار و موقعیت آن نسبت به جبهه کار رخ می‌دهد. این مقادیر بستگی به صلیبیت زمین و سیستم نگهداری نصب شده دارد. در سیکل‌های نهایی (مقاطع انتهایی طول لوله)، بسته به پارامترهای ژئومکانیکی و هندسی تونل، تأثیر تکیه‌گاهی در انتها با کاهش طول لوله‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش اثر با افزایش نشست در جبهه کار همراه است. بنابراین در مواقعی که هدف از سیستم چتری مقادیر جابجایی‌های ایجاد شده در نتیجه حفاری است، سری دوم قوس چتری باید به موقع نصب شود (Volkman et al, 2007).

۳-۵-۸ نحوه انتقال نیرو و لنگر در لوله‌های فورپولینگ

نیروهای داخلی لوله‌ها پس از نصب تقریباً صفر است (قابل مقایسه با دیگر نگهدارنده‌های غیرفعال مانند میل‌مه‌ار). انتقال تنش ناشی از حفاری مراحل قبلی، بر روی زمین و سیستم‌های نگهداری نصب شده تأثیرگذار است. لوله‌هایی که به تازگی نصب شده‌اند تحت تأثیر فعالیت‌های قبلی قرار نمی‌گیرند؛ در حالی که هر عملیاتی که پس از نصب لوله‌ها انجام شود، منجر به انتقال تنش و فعال کردن اثر نگهداری آن‌ها می‌شود. اساس جابجایی‌ها در فرآیند حفر تونل افزایش می‌یابند، بنابراین قوانین جابجایی سه بعدی فعال شدن لوله‌ها پس از نصب را کنترل می‌کند. از آنجایی که لوله‌ها در داخل

زمین (در جلوی سینه کار) و بر روی سیستم نگهداری اولیه (پشت سینه کار) قرار گرفته‌اند، مقاومت و سختی آنها بستگی به خصوصیات زمین، سختی و مقاومت لاینینگ دارد.

ولکمن و کارن^۱ (۲۰۰۹) به منظور بررسی تغییر شکل‌های ایجاد شده در نتیجه حفاری در زیر چتر ایجاد شده، از سیستم رفتارنگاری توسط شیب‌سنج‌ها (در پروژه تروجان^۲) استفاده کردند. زنجیر شیب‌سنج که شامل سیستم جمع‌آوری داده‌ها می‌باشد در داخل لوله‌ها قرار گرفت. ابزار مورد استفاده شامل اتصال ۱۰ شیب‌سنج افقی به یکدیگر می‌باشد، هر کدام از این شیب‌سنج‌ها ۲ متر طول داشته که به شیب‌سنج بعدی متصل شده و زنجیری از شیب‌سنج پیوسته را بوجود می‌آورند. این زنجیر، تغییرات در شیب لوله‌ها و در نتیجه خط خمش لوله را تا ۲۰ متری جلوی سینه کار تونل ثبت می‌کند (Volkman & Karen, 2006).

همزمان پیشرفت حفاری و تا زمانی که تأثیر دوغاب در محل تکیه‌گاه در جلوی سینه کار کاهش نیافته، لوله‌ها در دو مقطع دچار خمش می‌شوند. موقعیت اول در فاصله ۳ متری جلوی سینه کار و دیگری ۱ متر پشت جبهه کار است. این دو مقطع، مکان‌هایی هستند که لوله‌ها به عنوان نگهدارنده عمل می‌کنند و بارها را به زمین و لاینینگ منتقل می‌کنند. از آنجایی که لوله‌ها در سیستم چتری دچار خمش می‌شوند، گشتاور دوم سطح سرعت فعال‌سازی سیستم نگهداری را از طریق خمش نشان می‌دهد. لوله با قطر بیشتر سیستم نگهداری را سریع‌تر از لوله با قطر کمتر (در جابجایی‌های برابر) فعال می‌کند. ضخامت جداره، گشتاور بحرانی و ماکزیمم خمش را تعیین می‌کند.

همچنین لوله‌ها تحت فشار طولی می‌باشند، همین امر تأثیر مثبتی بر توزیع فشار جبهه کار و کاهش جابجایی‌ها دارد. این عامل متأثر از سطحی است که نیروهای عکس‌العمل را انتقال می‌دهد، بنابراین قطر خارجی لوله اثر این عامل را تعیین می‌کند. اثر سیستم‌های نگهداری صلب همانند قوس-

¹ Volkman & Karen.

²Trojane

چتری وابسته به انتقال نیرو به محل تکیه‌گاه‌ها می‌باشد. تکیه‌گاه‌ها همان خاک در مقابل جبهه کار و لاینیگ اولیه می‌باشد.

۹-۵-۳ بررسی تحلیل فورپولینگ

به طور کلی پیلا^۱ (۲۰۰۵) طراحی روش‌های چتری را به دلایل زیر پیچیده دانست (Peila, 2005):

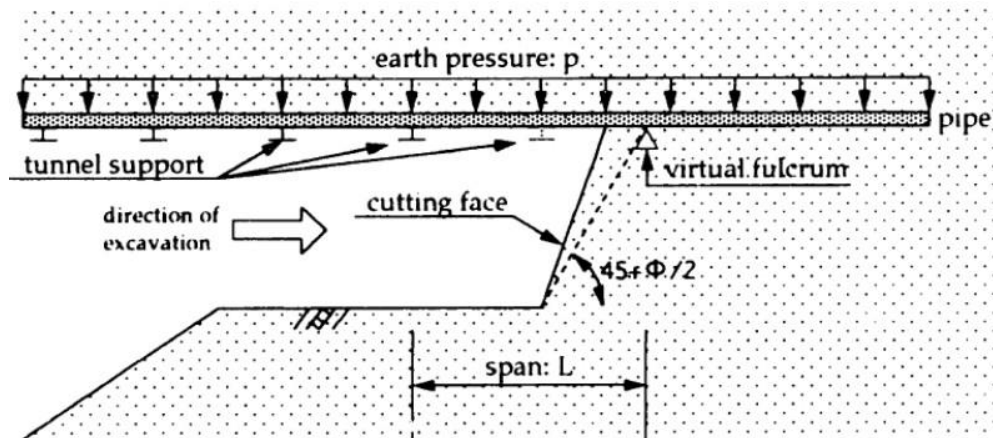
- پارامترهای تأثیرگذار زیاد است.
- در نظر گرفتن تمامی عوامل موثر از طریق روش‌های تجربی (بر اساس تجربیات انجام گرفته در زمین‌های مشابه) به طور صحیح امکان‌پذیر نیست.
- روش‌های تحلیلی به منظور شبیه‌سازی تأثیر جبهه کار تونل کافی نیست.
- محاسبات هزینه‌بردار است و انجام روش‌های عددی سه‌بعدی مشکل است.
- بررسی تأثیر همپوشانی چترها و اتصال آن‌ها با قاب فولادی، تأثیر صلبیت قاب‌های فولادی در مقایسه با بارهای عمودی و تأثیر خصوصیات ژئومکانیکی در حفاری سینه-کار مشکل است.
- تأثیر موقت جبهه حفاری بر تنش اعمالی در طول باقیمانده لوله در زمین.

پایداری از طریق محاسبه تنش‌های خمشی و برشی ایجاد شده در لوله‌ها در نتیجه بارهای وارده از سمت زمین کنترل می‌شود. تماس مناسب بین قاب‌های فولادی و لوله‌ها بایستی کنترل شود و قاب-های فولادی هیچ‌گونه حرکتی نداشته باشند. فاصله چال‌ها بر اساس خصوصیات زمین مثل ابعاد دانه-ها، نفوذپذیری و غیره تعیین می‌شود.

معمولاً فرض می‌شود که لوله‌ها بار زمین را در جهت طولی متحمل می‌شوند. در عمل از مدل‌های تحلیلی (شکل ۳-۱۷) جهت بررسی یک مقطع تیر استفاده می‌شود. همانطور که در شکل مشخص

¹Peila

است، می‌توان فرض کرد که یک سر لوله در زمین و سر دیگر به سیستم نگهداری، متصل است.



شکل ۳-۱۷: تیر عمل‌کننده در روش چتری (Peila, 2005).

پیلا دو نظریه در مورد عملکرد لوله‌های فولادی ارائه داد (Peila, 2005):

۱- لوله‌های فولادی معمولاً به‌عنوان تیرهای افقی یک سر تکیه‌گاه و سر دیگر گیردار

که در فاصله g در زمین گیردار است، در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۳-۱۶). معمولاً

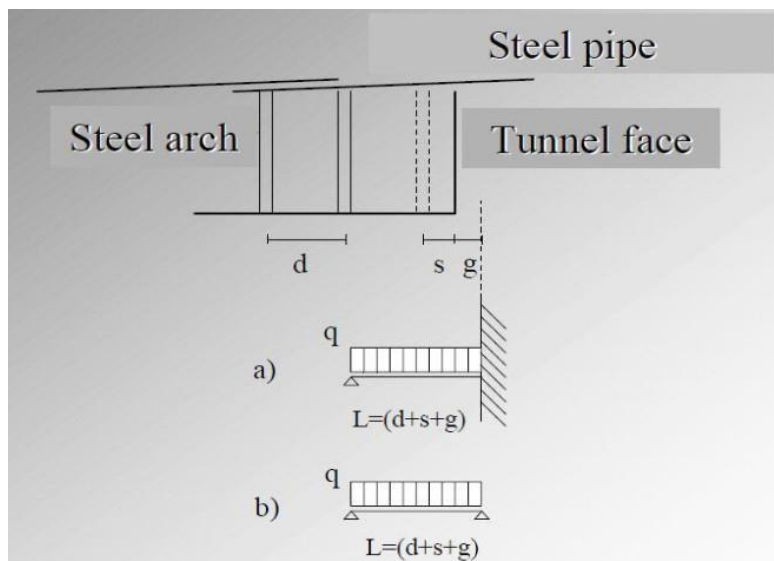
تعیین این فاصله گیرداری در طراحی‌ها مشکل است.

۲- لوله‌های فولادی به‌عنوان تیرهای افقی دو سر تکیه‌گاه در نظر گرفته می‌شوند. در

این حالت گشتاور خمشی بزرگتر است (شکل ۳-۱۸).

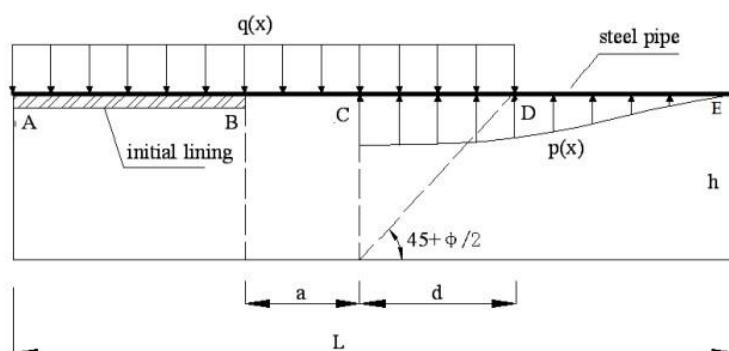
صلبیت زمین در سینه‌کار پیشروی و صلبیت قاب‌های فولادی و لوله‌ها تحت تأثیر گشتاور خمشی

لوله‌ها و ماکزیمم بارهای وارده بر قاب‌های فولادی می‌باشد.



شکل ۳-۱۸: چگونگی عملکرد لوله‌ها در روش چتری (Peila, 2005).

وانگ و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۸ به منظور بررسی رفتار مکانیکی قوس چتری از مدل‌های تحلیلی استفاده کردند. آن‌ها لوله‌های قوس چتری را به عنوان تیرهای مدفون در پی الاستیک^۲ در نظر گرفتند. این تیر بسته به شرایط تنش‌ی وارده به چهار مقطع تقسیم می‌شود: AB مقطع نگهداری شده، BC مقطع بدون سیستم نگهداری اولیه، CD ناحیه آشفته و DE ناحیه بدون اغتشاش (شکل ۳-۱۹).



شکل ۳-۱۹: شماتیکی از وضعیت توزیع تنش در لوله‌های فورپولینگ (Wang et al, 2008).

با توجه به رابطه (۳-۳) اگر ارتفاع تونل h باشد، طول ناحیه آشفته در مقابل جبهه کار بر اساس تئوری ترزاقی برابر با d است.

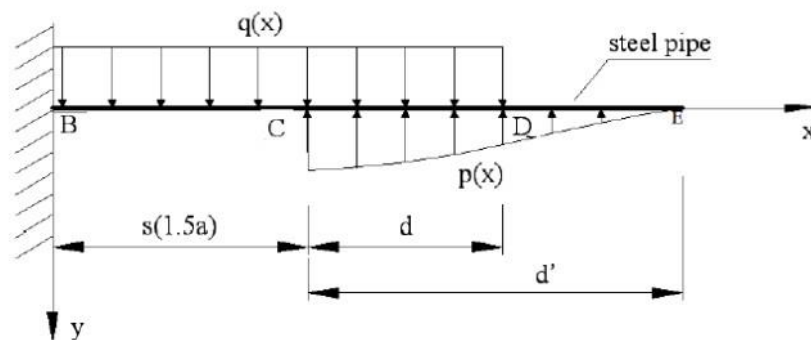
^۱Wang et al.

^۲Elastic Foundation

$$d = h \tan(45 - \frac{\phi}{2}) \quad (\text{رابطه ۳-۳})$$

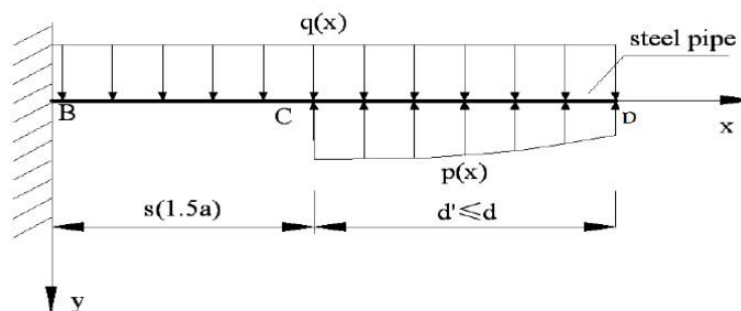
از آنجایی که همزمان با تغییر سیکل‌های حفاری، وضعیت مکانیکی و توزیع تنش وارد بر لوله‌ها تغییر می‌کند، دو مدل برای آنها در نظر گرفته می‌شود:

- ۱- طول لوله در مقابل جبهه کار (d') بیشتر از فاصله بین جبهه کار و ناحیه اغتشاش (d) در زمان حفاری تونل است. در این حالت فرض می‌شود که لوله‌ها به‌عنوان تیرهای بلند تقریباً نامحدود در پی الاستیک مدفون شده‌اند (شکل ۳-۲۰).



شکل ۳-۲۰: مدل مکانیکی ناحیه تحکیم در حین حفاری تونل (نوع ۱) (Wang et al, 2008).

- ۲- طول لوله در مقابل جبهه کار کوتاه‌تر یا برابر با فاصله بین دو جبهه کار و خط شکست (d) است. در این حالت لوله‌ها به‌عنوان تیرهای محدود مدفون در پی الاستیک فرض می‌شوند (شکل ۳-۲۱).

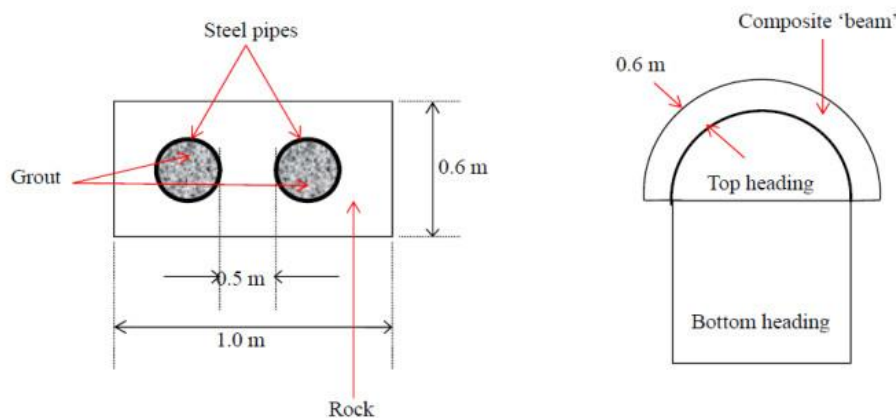


شکل ۳-۲۱: مدل مکانیکی ناحیه تحکیم در حین حفاری تونل (نوع ۲) (Wang et al, 2008).

از آنجایی که دستیابی به اطلاعات جزئی از تغییر شکل‌های زمین با استفاده از مدل‌های تحلیلی مشکل و زمان‌بر است، استفاده از روش‌های مدلسازی عددی سه‌بعدی ضرورت پیدا می‌کند.

۱۰-۵-۳ روش‌های عددی مدلسازی فورپولینگ

همانطور که در شکل (شکل ۳-۲۲) مشاهده می‌شود، پس از تزریق دوغاب درون لوله‌ها، دوغاب از شکاف‌ها و سوراخ‌های موجود در لوله‌ها خارج شده و در نتیجه ترکیب با خاک اطراف لوله‌ها تشکیل ناحیه تحکیم‌یافته‌ای را می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که روش فوق متشکل از سه جز دوغاب، لوله و ناحیه تحکیم‌یافته در اطراف لوله‌ها (سویلکریٹ^۱) می‌باشد.



شکل ۳-۲۲: اجزای موثر در روش فورپولینگ (Hefny et al, 2000).

محققان زیادی بر روی چگونگی مدلسازی عددی روش فورپولینگ (یا بطور کلی روش چتری) بحث و بررسی کرده‌اند. نیشماکی و همکاران^۲ (۱۹۹۵) مدلسازی قوس‌چتری را با استفاده از روش سه-بعدی المان محدود انجام داده‌اند. سپس نتایج حاصل از مدلسازی عددی، آنالیز برگشتی توسط نرم-افزار دوبعدی المان محدود انجام گرفت، آن‌ها به‌منظور مدلسازی روش فورپولینگ پارامترها و خصوصیات ژئومکانیکی آن ناحیه را افزایش دادند (Nishimaki et al, 1995). اوتسو و همکاران^۳ (۱۹۹۵) روش چتری و شاتکریت را به صورت ترکیبی با المان پوسته توسط روش عددی

^۱Soilcrete

^۲Nishimaki et al.

^۳Ohtsu et al.

المان محدود سه بعدی مدل سازی کردند. بسیاری از محققین فورپولینگ و دوغاب را به صورت ترکیبی و با افزایش سختی پارامترهای مقاومتی زمین در پیرامون تونل، با استفاده از المان تیر^۱، مدل سازی کردند. هوک نشان داد که می توان از روش میان گیری وزنی به منظور تعیین مقاومت و تغییر شکل ناحیه مسلح ایجاد شده در پیرامون تونل استفاده کرد که البته این روش تخمینی بوده و نتایج دقیقی را در مطالعه تأثیر روش فورپولینگ ارائه نمی دهد؛ بنابراین باید نظریه دقیق تری در مقایسه با استفاده از مواد ترکیبی، به کار گرفته شود (Ohtsu et al, 1995).

هفنی و همکاران^۲ (۲۰۰۴) به بررسی و مقایسه دو روش موجود در شبیه سازی فورپولینگ پرداختند. در روش اول که آن را روش سنتی نامیده اند، لوله های فورپولینگ و دوغاب به صورت مواد ترکیبی و افزایش پارامترهای مقاومتی زمین در پیرامون تونل، در تحلیل ها واد شده است و دومی روش جدید که در آن لوله های فولادی به طور مجزا شبیه سازی شده و در محیط تزریق شده وارد شده اند. آن ها از روش تفاضل محدود دوبعدی به منظور مقایسه جابجایی های سطحی زمین و تاج تونل، همچنین جابجایی های عمودی و افقی در پیرامون تونل استفاده کردند (Hefny et al, 2004).

روش اول جابجایی سطح و تاج تونل را دو برابر روش دوم تخمین زده است. همگرایی عمودی ایجاد شده در روش ۱، ۳۰٪ بیشتر از روش ۲ می باشد (Hefny et al, 2004).

مشاهده می شود که تخمین های متفاوت، نتایج متفاوتی را ارائه می دهند. بنابراین مقایسه این تخمین ها با موارد واقعی و آنالیزهای سه بعدی به منظور دستیابی به نتایج جامع حائز اهمیت است.

باید توجه شود که در روش ترکیبی مخلوط دوغاب با ماده سنگ خارج از لوله در نظر گرفته نمی شود، این درحالیست که در روش فورپولینگ چال با قطر بیشتر از قطر لوله حفر می شود و در نتیجه تزریق نفوذی و جابجایی، دوغاب به ترک ها و شکاف های ایجاد شده در نتیجه حفاری، به فضای

¹Beam Element

²Hefny et al.

بزرگتری در بیرون چال نفوذ می‌کند. بنابراین ناحیه تزریق بزرگتر از ناحیه تخمینی و تغییر شکل‌های اطراف منطقه حفاری شده اساساً کمتر می‌باشد، چرا که ناحیه تحکیم بزرگ‌تر است.

۳-۶ روش بهسازی مهارگذاری (مهار)

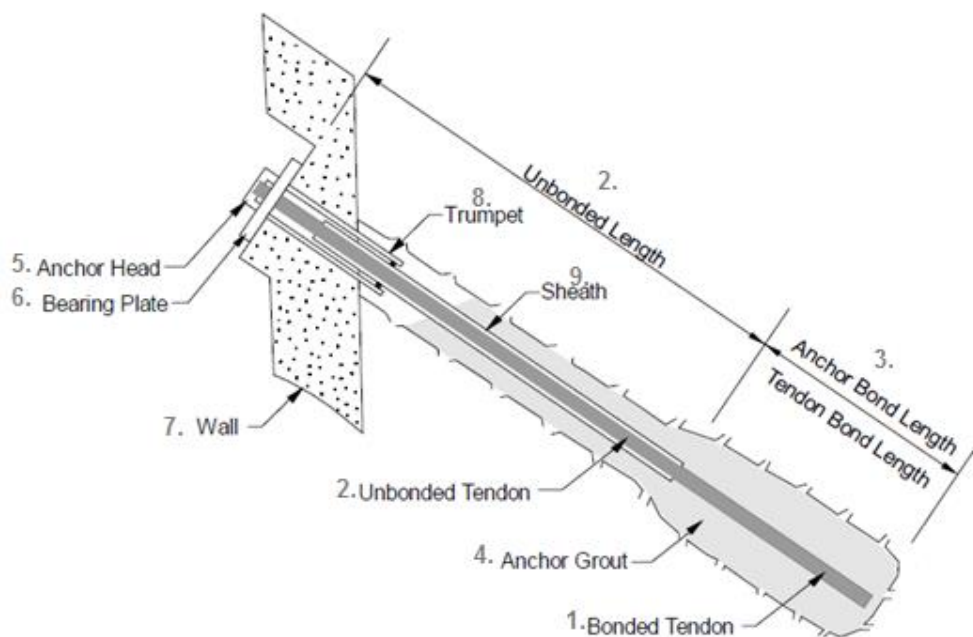
مهار بطور کلی به دو دسته فعال و غیرفعال (انفعالی) تقسیم می‌شود. در سیستم فعال مهار پس از نصب با تحمیل مقداری تنش باعث تحکیم (پایداری) نسبی توده خاک یا سنگ شده و بدین جهت فعال نامیده می‌شود، این نوع میل مهار را تنیده نیز می‌نامند. در سیستم غیرفعال (انفعالی)، مهار در هنگام نصب بار نمی‌پذیرد، بلکه پس از شروع حرکات خاک و بوجود آمدن تغییر شکل‌های جزئی، بار به آن منتقل می‌شود. مهارها در این سیستم صرفاً ناتنیده می‌باشند. (خزائی، ۱۳۷۵)

روش مهارگذاری در خاک یا دوخت به پشت^۱، شباهت زیادی به روش میخ‌گذاری دارد، در این روش به علت استفاده از خاصیت پس‌تنیدگی کابل‌ها و میلگردها، نسبت به روش میخ‌گذاری از قابلیت و توانایی بیشتری در کنترل نیروی رانش خاک برخوردار است. تفاوت عمده این دو روش از نظر مصالح مصرفی، استفاده از مسلح‌کننده با قابلیت پیش‌تنیدگی و از نظر اجرا، طول تزریق محدود و تحت کشش قرار دادن مسلح‌کننده بعد از قرارگیری در گمانه و تزریق می‌باشد. از سیستم مهارگذاری در گودبرداری‌های عمیق، شرایط مهاجم محیطی، وجود سرباره‌ای بسیار (زیاد در مجاورت گود و نیاز به کنترل و کاهش تغییر شکل‌ها باشد، استفاده می‌شود. (اشرفی، ۱۳۸۵)

۳-۶-۱ اجزای روش مهارگذاری خاک

شکل زیر شماتیکی از یک مهار دائمی را نشان می‌دهد.

¹ Tie back



شکل ۳-۲۳: اجزای تشکیل دهنده مهاره با تاندون میلگردی (Sabatini & Etal, 1999)

مولفه‌های اصلی مهار با توجه به شکل ۳-۲۳ شامل موارد زیر است:

- ۱- تاندون (استرند/ میله مهاری تک^۱)، ۲- طول آزاد، ۳- طول گیرداری، ۴- دوغاب، ۵- سر مهار، ۶- صفحه تکیه‌گاه فولادی، ۷- رویه، ۸- شیپوری و ۹- غلاف.

۳-۱-۱-۶-۳ تاندون

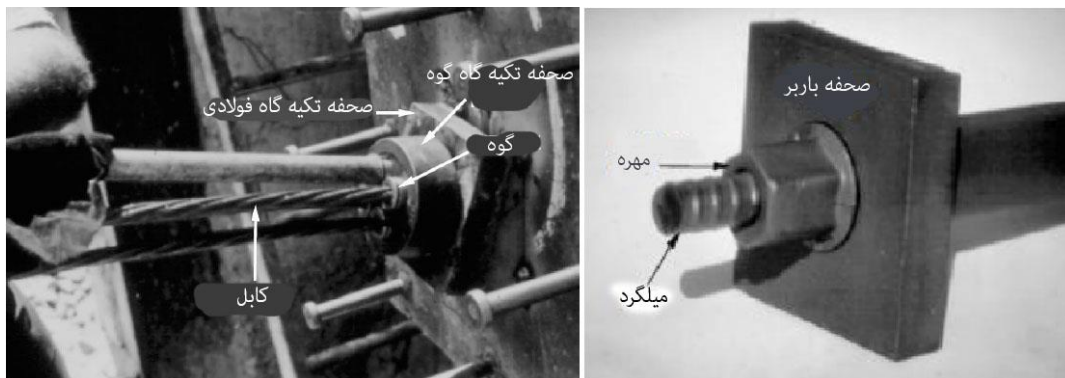
به مجموع طول پیوسته و طول آزاد تاندون گفته می‌شود. تاندون شامل اجزای فولادی پیش‌تنیده، حفاظت‌کننده در برابر فرسودگی، غلاف یا پوشش، متمرکزکننده و جداکننده می‌باشد. دوغاب، لنگرگاه و انتهای مهار جزو تاندون محسوب نمی‌شود. در تاندون‌ها از کابل‌های پیش‌تنیدگی و از میله‌ها با قابلیت پیش‌تنیدگی استفاده می‌شود (اشرفی، ۱۳۸۵).

انتخاب نوع تاندون از دید طراحی تفاوتی ندارد. همچنین عواملی مانند سیستم زهکش، موقعیت زهکش‌های عمودی و رویه بتن پاشی یا رویه بتن درجا تاثیری مستقیمی در انتخاب نوع تاندون ندارد

¹ Strand / Monobar

بلکه عواملی مانند مقاومت کششی مورد نیاز، شرایط محیطی، قیمت و دسترسی به مصالح و محدودیت کارگاهی نوع تاندون را مشخص می‌کند. یکی از نکات تأثیر گذار در انتخاب نوع تاندون فضای موجود در کارگاه است، همانطور که در شکل مشاهده می‌شود کابل‌ها انعطاف‌پذیر بوده و نگهداری و جابجایی آنها نسبت به تاندون‌های میله که صلب هستند بسیار راحت‌تر است.

(Arrizabalaga, 2014)



شکل ۳-۲۴: نمایی از تاندون نوع میله ای و کابل. (Sabatini & Etal, 1999)

بر اساس تحقیقات حداکثر مقاومت پیوند در سطح مهار-دوغاب به نوع و رفتار تاندون در انتقال بار وابسته است. در تاندون میلگرد مقاومت از طریق قفل و بست مکانیکی در هنگام بیرون کشیدگی تامین می‌شود، اما در کابل‌ها مقاومت وابسته به گیرش شیمیایی و ترکیبی از اصطکاک و قفل و بست مکانیکی است (Benmokrane & Etal, 1995). بررسی‌ها نشان داده که مقاومت برشی در سطح مهار-دوغاب برای تاندون رشته‌ای بطور کلی نسبت به تاندون‌های میلگرد کمتر است. همچنین پایین بودن مقاومت بیرون کشیدگی تاندون کابلی نسبت به تاندون میلگرد این بررسی را تایید می‌کند (Arrizabalaga, 2014).

یک تاندون میله ای تک ۶۴ میلیمتری می‌تواند بار طراحی تقریباً ۲۰۷۷ کیلونیوتن را تحمل کند. میلگردها معمولاً در قطرهای ۲۶ تا ۷۵ میلیمتری در طول‌های مستقل و حداکثر ۱۸ متری به کار می‌روند. کابل‌ها عمدتاً به صورت هفت رشته‌ای با قطر ۱۵/۲ میلیمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در

یک گمانه می‌توان چند دسته کابل هفت رشته‌ای را قرار داد، از آنجایی که کابل‌ها بصورت چند رشته ای مورد استفاده قرار می‌گیرند محدوده خاصی برای باربری در نظر گرفته نشده است. (FHWA,1999)

طول میل‌ها محدود بوده و عموماً با حداکثر طول ۱۸ متر مورد استفاده قرار می‌گیرند. و در صورت نیاز باید با استفاده از اتصال دهنده مکانیکی^۱ طول‌های بزرگتر را ایجاد کرد. اما در مورد طول کابل محدودیتی وجود ندارد و بسته به نیاز با طول‌های مختلف سفارش داده می‌شود. عموماً نیازی به اتصال دهنده برای افزایش طول کابل‌ها نیست، اما در موارد محدودی برای تعمیر و بازسازی قسمتی از کابل نیز ممکن است از اتصال دهنده خاصی در کابل‌ها استفاده شود. در صورت استفاده از اتصال دهنده برای افزایش طول تاندون باید به محافظت از عوامل محیطی و خوردگی در نقطه اتصال توجه کرد. اتصال دهنده باید به گونه‌ای بین دو تاندون قرار بگیرد که نصف طول آن با هریک از تاندون‌ها هم‌پوشانی داشته باشد (Benmokrane & Etal,1995). در قسمت مهارشده (تزریق شده) نباید از اتصال دهنده استفاده کرد. (CEN,2009)



شکل ۳-۲۵: نحوه اتصال مکانیکی دو میله برای افزایش طول تاندون (Arrizabalaga,2014).

چگونگی قفل کردن و گیر انداختن تنش در تاندون کابل و میله ای متفاوت است، در میله پیش

¹ Coopler

تنیدگی و قفل کردن بوسیله یک مهره انجام می‌گیرد ولی در کابل، رشته‌ها بعد از کشیده شدن بوسیله جک باید توسط گوه در صفحه تکیه‌گاه گیر کنند. پیش تنیدگی در تاندون میله ای و قفل کردن تاندون کشیده شده نسبت به کابل‌ها راحت‌تر است. (Arrizabalaga,2014)

۳-۶-۱-۲ طول آزاد و طول پیوند

تاندون شامل اجزای فولادی پیش تنیده، حفاظت کننده در برابر فرسودگی، غلاف یا پوشش، متمرکزکننده و جداکننده می‌باشد. بخش کامل مهار ساخته شده را تاندون می‌نامند و دوغاب، لنگرگاه و انتهای مهار جزو تاندون محسوب نمی‌شود. طول مسلح کننده در گمانه به دو قسمت تقسیم می‌شود:

۱. طول پیوند همان قسمتی می‌باشد که که تاندون در حباب تزریق شده اولیه ثابت شده و نیروی کششی را به خاک اطراف منتقل می‌کند. طول پیوستگی مهاری طوری طراحی میشود که ظرفیت بیرون کشیدگی مورد نیاز را ایجاد کند.

۲. طول آزاد به قسمتی گویند که کشیده و پیش‌تنیده می‌شود. در طول آزاد تاندون می‌تواند آزادانه تغییر شکل الاستیک دهد تا نیروی مقاوم را از طول پیوسته مهاری به المان سازه‌ای منتقل کند (یعنی دیواره، دال و...) و طوری طراحی می‌گردد که طول پیوستگی مهاری فراتر از توده خاک مستعد ناپایداری مجاور المان سازه‌ای قرار گیرد. در طول آزاد تزریق صورت نمی‌گیرد یا در صورت تزریق کابل و ملات به وسیله غلاف به یکدیگر تماس پیدا نمی‌کنند. (Arrizabalaga,2014)

۳-۶-۱-۳ غلاف

غلاف یک لوله صاف است که از فولاد پیش‌تنیده، در طول غیر پیوندی از درگیر شدن با ملات، فرسایش و زنگ زدن محافظت می‌کند. پوسته داخلی غلاف صاف بوده و تاندون آزادانه می‌تواند در آن حرکت داشته باشد. (Arrizabalaga,2014)

۳-۶-۱-۴ دوغاب

در گذشته از مواد رزینی برای تزریق استفاده می‌شد. مهارهای رزینی حداکثر جهت گیردار کردن میله‌هایی به طول ۷ تا ۸ متر و حداکثر نیروی کششی حدود ۲۰۰ کیلونیوتن کاربرد دارند. رزین مورد استفاده همراه با یک کاتالیزور در یک پلاستیک روده مانند (فشنگ) بسته‌بندی شده، جهت اجراء فشنگ مذکور درون حفره جاسازی شده و هنگامی که تاندون به درون حفره رانده می‌شود غلاف (پوشش) پلاستیکی فشنگ را پاره نموده و دو جزء مواد داخل آنرا با هم مخلوط نموده و در اطراف و درون حفره نفوذ می‌کند و تاندون فلزی مهار را محکم می‌کند. زمان لازم جهت محکم شدن رزین از ۵ تا ۹۰ دقیقه متفاوت است که بستگی به درجه حرارت و سرعت فرستادن (تزریق) رزین دارد، به عنوان مثال در دمای ۵- درجه سانتیگراد ۴ دقیقه و در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد حدود ۲۵ دقیقه جهت گیرش رزین زمان لازم است. (Duncan & Wyllie, 1992)

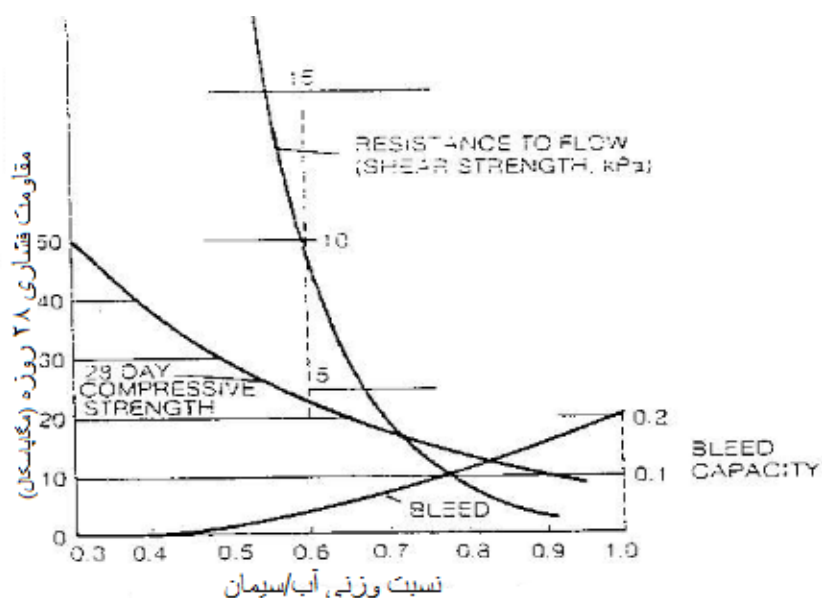
رزین علیرغم محاسن قابل توجه دارای معایبی به شرح ذیل است که باعث محدود شدن استفاده از آن در نصب مهارها و استفاده از ملات ماسه سیمان گردیده است (Duncan & Wyllie, 1992):

- گران بودن قیمت رزین که باعث شده سازنده‌ها سعی کنند از مواد پرکننده در هنگام ساخت استفاده نمایند که مقاومت و زمان مناسب اختلاط را نامطمئن می‌سازد.
- همچنین رزین نیاز به مهارت و تبحر خاص در هنگام اجراء دارد.
- زمان نصب طولانی دارد.
- حساسیت رزین به حرارت بیشتر از سیمان است.

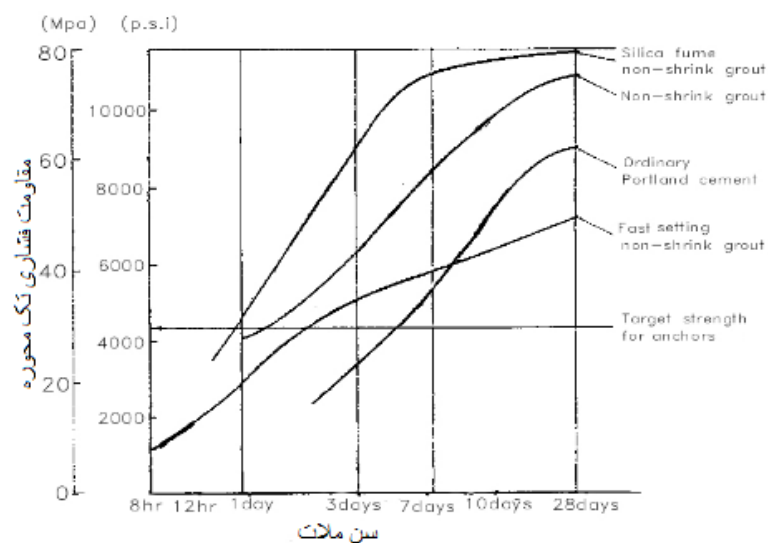
مزیت دوغاب سیمانی نسبت به سایر دوغاب‌ها در دسترس بودن، قیمت کم و سادگی نصب و اجرا و همچنین قدرت نفوذ زیاد در سنگ و خاک اطراف حفره می‌باشد. همچنین با گذشت زمان مقاومت بیشتری پیدا می‌کند (Duncan & Wyllie, 1992).

دوغاب بکار رفته در مهارهای سنگی و خاکی معمولاً ملات سیمان تمیز (بدون ذرات دانه‌ای) است. از دوغاب سیمان و ماسه برای حفاری با قطرهای بزرگتر استفاده می‌شود. سیمان نوع یک مقاومت فشاری کمینه ۲۱ مگاپاسکال در زمان تنش را تأمین می‌کند. در بعضی پروژه‌ها که مواد افزودنی برای بهبود مشخصات روانی دوغاب بکار می‌رود، روان‌کننده‌ها می‌توانند در دمای بالا و فواصل پمپ بلند مفید باشند. دوغاب مهار که دوغاب اولیه نیز نامیده می‌شود، برای انتقال نیروی مهاری به زمین استفاده می‌شود. تزریق دوغاب ثانویه در سوراخ حفاری شده می‌تواند پس از تنیدگی انجام شود تا محافظ خوردگی برای تاندون‌های بدون پوشش باشد. مشخصات کامل دوغاب در ASTM C150 درج شده است. (Duncan & Wyllie, 1992)

طبق تحقیقات انجام شده، نسبت ۰/۴۵ تا ۰/۶ بسیار مناسب است (شکل ۳-۲۶). همچنین نوع و تیپ سیمان مورد استفاده و سن بارگذاری نیز بسیار مهم است. (شکل ۳-۲۷) رابطه بین سن دوغاب و نیروی فشاری (مقاومت) و نوع سیمان را نشان می‌دهد. (Duncan & Wyllie, 1992)



شکل ۳-۲۶: اثر نسبت آب به سیمان روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه - روانی و مقاومت در برابر جاری شدن دوغاب (Duncan & Wyllie, 1992).



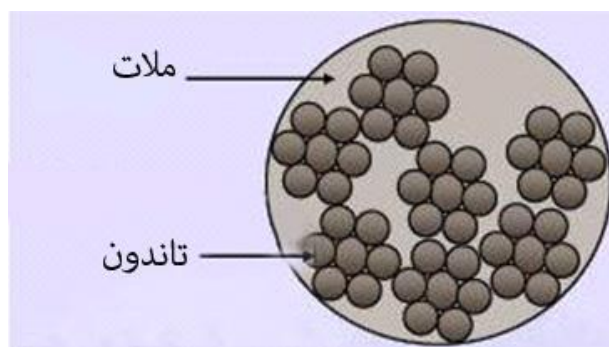
شکل ۳-۲۷: رابطه بین مقاومت فشاری دوغاب و سن آن برای انواع دوغابها (Duncan & Wyllie, 1992).

سرعت دوغاب ریزی در تاندون‌ها متفاوت است، برای تزریق در کابل نیاز به دو مرحله اتصال داخلی و خارجی هستیم، اما برای میلگرد تنها یک اتصال به شیلنگ نیاز است، به همین علت تزریق دوغاب در این مورد سریع‌تر انجام می‌شود. (Arrizabalaga, 2014)

۳-۶-۱-۵ جداگرها

این اجزا در طول مهاری در فواصل منظم حدود ۳ متر در امتداد منطقه پیوستگی قرار دارند. جداگرها^۱ و متمرکزکننده‌ها را باید از مواد فاسد نشدنی ساخت و باید طوری طراحی شوند که مانع جریان آزاد ملات نباشند. وظیفه جداگرها (فاصله‌نگهدار) این است که مانع از چسبیدن کابل‌ها شود و با رعایت فاصله بین کابل دوغاب پوشش کافی را ایجاد کند. (Sabatini & Etal, 1999)

همانطور که در شکل (۳-۲۸) مشاهده می‌شود در صورت عدم استفاده از جداگرها و فاصله‌نگهدار درون گمانه، تاندون‌ها ممکن است به یکدیگر بچسبند و ملات پیوند کافی با تاندون ایجاد نکند، که در این صورت مقاومت بیرون کشیدگی تاندون به شدت کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۳-۲۸: نمایی از مقطع مهار که اهمیت استفاده از جداگرها را نشان می‌دهد (معینی، ۱۳۹۵).

۳-۷ جمع‌بندی

در این فصل به ارائه مختصری از مبانی نظری روش حفاری تونل پیشانی و پله و روش‌های بهسازی خاک مورد استفاده در پژوهش پرداخته شد. پیش‌نگهدارنده چتری فورپولینگ، شمع‌گذاری درجا و مهارگذاری در خاک، روش‌های مورد بررسی در این پژوهش بودند. در هریک از روش‌های بهسازی محدوده کاربرد و رفتار روش در محیط خاکی، شرح داده شد. همچنین نحوه اجرای روش‌ها نیز بیان گردید.

¹ Spacer

۴ فصل چهارم

مطالعه موردی تونل دسترسی شرقی ایستگاه

مترو میدان خراسان تهران (خط ۶ مترو)

در این فصل ابتدا به معرفی پروژه خط ۶ مترو تهران؛ سپس به معرفی مطالعه موردی ایستگاه میدان خراسان که در خط ۶ واقع است، پرداخته می‌شود. اطلاعات مربوط به شرایط زمین‌شناسی و خصوصیات مکانیکی خاک و زمین شناختی مربوط به محل احداث تونل و همچنین داده‌های ابراز دقیق پین‌های نشست سنج مورد نیاز که توسط مهندسين شرکت آهاب جمع‌آوری شد، در این فصل از این پژوهش ارائه می‌شود.

۲-۴ معرفی کلی پروژه خط ۶ مترو تهران

خط ۶ مترو به عنوان یکی از خطوط اصلی متروی شهر تهران با ۳۰ ایستگاه، ۲۴ هواکش میان تونلی، ۳۱ کیلومتر تونل، یک پارکینگ شبانه قطار و ۱ پایانه، به صورت قطری شمال غرب پایتخت را به جنوب شرقی آن متصل می‌نماید. این خط دارای ۳۱ کیلومتر و ۳۰ ایستگاه بوده و از محدوده حرم حضرت عبدالعظیم آغاز شده و پس از طی یک مسیر جنوب به شمال در ایستگاه میدان شهدا با خط چهار، در ایستگاه امام حسین با خط دو، در ایستگاه هفت تیر با خط یک، و در ایستگاه میدان ولیعصر با خط سه، تقاطع خواهد داشت و سپس به سمت غرب امتداد مسیر داده و به محدوده‌ی شمال تهران خواهد رسید. (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹)

در حال حاضر ساخت مترو از جنوب به شمال ادامه دارد. لازم به ذکر است این خط در تقاطع‌های بزرگراه شهید محلاتی با خیابان ۱۷ شهریور و همچنین تقاطع بزرگراه چمران با بزرگراه آل احمد (پل-نصر) با خط در حال احداث ۷ مترو، ایستگاه تقاطعی و در ارتباط تبادل مسافر می‌باشد. طرح توسعه خط ۶ متروی تهران به سمت شهر ری شامل چهار ایستگاه و به طول تقریبی ۵ کیلومتر است.

مسئولیت تامین مالی، تامین مصالح، طراحی و ساخت تونل و ایستگاه‌های این خط در قالب کنسرسیوم بانک شهر با سه شرکت پیمانکار آهاب، سایبر بین‌الملل و چیلکو در سه قطعه به شرح زیر در حال انجام می‌باشد (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹):

۱. قطعه جنوبی از ایستگاه پایانه دولت‌آباد (A6) در جنوب شرقی تهران شروع و تا ایستگاه میدان سپاه (J6) ادامه می‌یابد و شامل ۱۰ ایستگاه می‌باشد. طول تونل این قطعه ۸ کیلومتر بوده که توسط شرکت آهاب در حال ساخت می‌باشد. روش اجرای تونل در این بخش بصورت مکانیزه توسط ماشین حفاری تونل (TBM) انجام می‌گیرد. همچنین روش ساخت ایستگاه‌های این محدوده به دو روش ترانشه‌باز و روش تونلی شمع و ریب می‌باشد.

۲. قطعه میانی از ایستگاه میدان سپاه (J6) شروع و تا ابتدای ایستگاه پارک لاله (O6) توسط شرکت آهاب در حال ساخت بوده که شامل ۴ ایستگاه می‌باشد. روش اجرای تونل در این بخش بصورت غیرمکانیزه و به روش سنتی (NATM) انجام می‌گیرد. همچنین روش ساخت ایستگاه‌های این محدوده به روش تونلی شمع و ریب می‌باشد.

۳. قطعه شمالی این خط از ایستگاه پارک لاله (O6) شروع و تا ایستگاه سولقان (شهرک نفت) (Z6-1) توسط دو شرکت سابیر بین‌الملل و چیلکو شامل ۱۳ ایستگاه در حال ساخت می‌باشد. روش اجرای تونل در این بخش بصورت غیر مکانیزه و به روش سنتی (NATM) انجام می‌گیرد. همچنین روش ساخت ایستگاه‌های این محدوده به روش تونلی شمع و ریب می‌باشد.

۳-۴ معرفی ایستگاه میدان خراسان

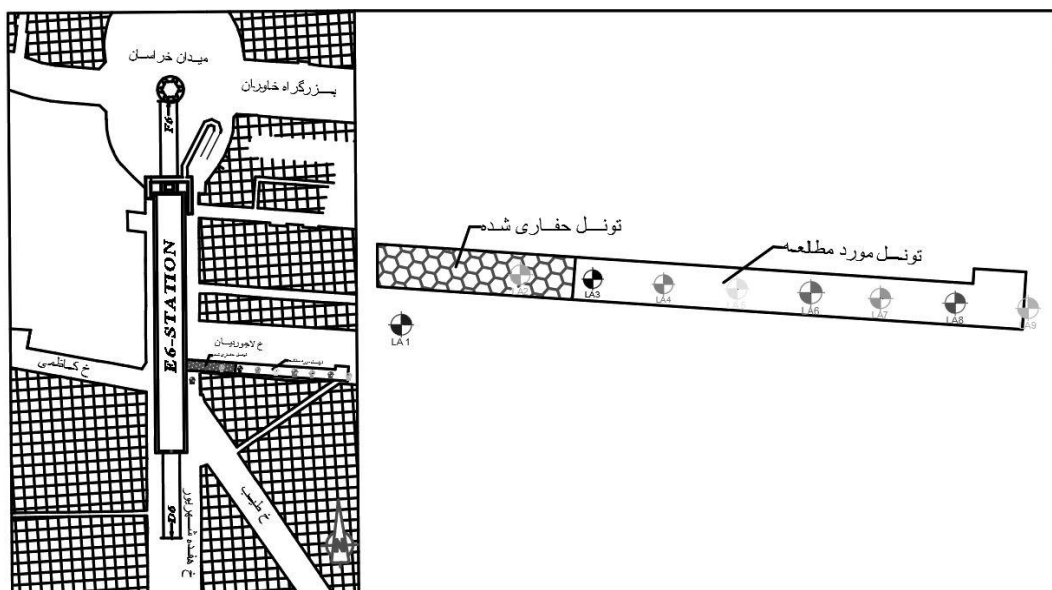
یکی از ایستگاه‌های خاص در محدوده پر ترافیک شهر می‌باشد که به لحاظ حجم جابه‌جایی مسافر و محل قرارگیری از اهمیت خاصی برخوردار است. حفاری این ایستگاه به دلیل وجود سطح آب زیرزمینی بالا با مشکلاتی روبه‌رو شده و با روش‌های خاصی اجرا گردیده البته در حال حاضر با توجه به دوره‌های خشکسالی سطح آب مقدار زیادی کاهش پیدا کرده است. ایستگاه دارای ورودی و خروجی می‌باشد. شکل (۴-۱) موقعیت ایستگاه میدان خراسان را در خط ۶ مترو تهران نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: نقشه ایستگاه‌های خط ۶ مترو تهران (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹).

۴-۳-۱ معرفی تونل مورد مطالعه

تونل مورد مطالعه یکی از معابری است که برای عبور مسافر و دسترسی مسافران در نظر گرفته شده و در محدوده خیابان لاجوردی ضلع شرقی خیابان ۱۷ شهریور و ایستگاه میدان خراسان قرار دارد. این تونل یا مجرای فضای زیرزمینی معروف به تونل دسترسی شرقی می‌باشد که از تراز سالن بلیت فروشی تا تراز پله‌های مسافر در حال حفاری می‌باشد (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۲: موقعیت تونل مورد مطالعه در ایستگاه میدان خراسان

تونل دسترسی، طولی حدود ۱۰۰ متر، عرض ۷ متر و ارتفاع تقریباً ۵/۵ متر را شامل می‌شود که به صورت D شکل حفاری می‌شود (شکل ۴-۳). حفاری این تونل از شرایط خاصی برخوردار است؛ کنار این تونل یک مجتمع ایستگاهی ساخته خواهد شد. تونل دسترسی از زیر خیابان لاجوردی حفر خواهد شد که اطراف آن مغازه‌ها و خانه‌های بسیاری وجود دارد. روباره تونل به ارتفاع ۱۳ متر از سطح زمین می‌باشد.



شکل ۴-۳: نمایی از تونل دسترسی حفاری شده.

۴-۴ مشکلات به وجود آمده در اثر حفاری

از آنجا که مسیر این تونل از زیر ساختمان‌های مسکونی و مغازه‌ها عبور می‌کند حفاری این قسمت از پروژه ایستگاه میدان خراسان موجب مقادیر نشست زیادی در سطح زمین شد، که باعث ترک خوردن ساختمان‌ها و مغازه‌ها بالای تونل شد (شکل ۴-۴). از این رو حفاری متوقف شده و مسیر حفاری شده با پوشش بتنی به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر پوشیده شده تا روشی مناسب برای ادامه حفاری انتخاب شود.

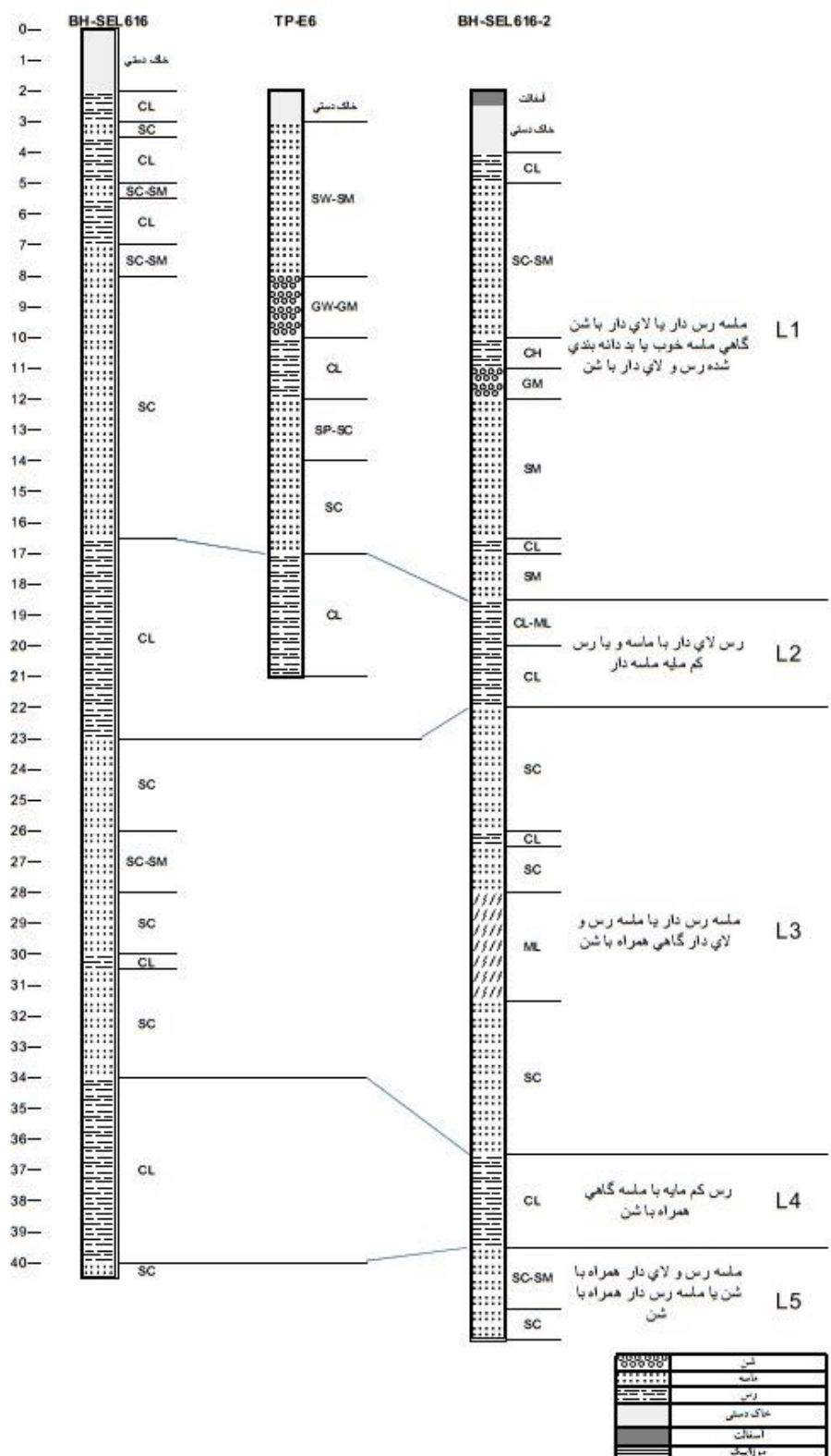


شکل ۴-۴: ترک‌های ایجاد شده در کف مغازه‌ها در اثر حفر تونل دسترسی.

۵-۴ زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک ساختگاه

با توجه به مقاطع گمانه‌های شناسایی و نتایج آزمایش‌ها و بررسی‌های آماری، ملاحظه می‌گردد که خاک ساختگاه منطقه مورد بررسی به طور متناوب از لایه‌های ریزدانه و درشت‌دانه تشکیل شده است. همچنین در محدوده گمانه‌های حفاری شده از سطح زمین تا عمق به طور میانگین ۲ متر خاک دستی وجود دارد. مقطع عرضی خاک ساختگاه در محدوده گمانه‌های حفاری شده در شکل ۴-۵)

نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: مقطع عرضی گمانه‌های حفاری شده در محدوده مورد مطالعه (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹)

۴-۵-۱ لایه اول

این لایه که خاک ساختگاه را از عمق ۱/۵ الی ۲ متری تا عمق حدود ۵/۵ الی ۸ متری تشکیل می‌دهد، ریزدانه بوده و از رس کم‌مایه، رس کم‌مایه با ماسه یا ماسه‌دار و همچنین لای تشکیل شده است. این لایه از لحاظ قوام بسیار سفت بوده و به رنگ‌های قهوه‌ای و قهوه‌ای روشن مشاهده شده است. این لایه از لحاظ طبقه بندی سیستم متحد (U.S.C.S) در رده های (CL) و (ML) طبقه بندی می‌شود. نتایج حاصل از گمانه های حفر شده نشان داد که در این لایه و در عمق ۲ تا حدود ۳ متری از جنس ماسه لای و رس‌دار با شن نیز وجود دارد که با تراکم متوسط و به رنگ خاکستری مایل به قهوه‌ای می‌باشد و از لحاظ طبقه‌بندی سیستم متحد در رده (SC-SM) قرار می‌گیرد. (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹)

۴-۵-۲ لایه دوم

این لایه که از عمق ۵/۵ الی ۸ متری تا عمق حدود ۱۶/۵ الی ۱۷/۵ متری زمین محدوده ساختگاه را شامل می‌شود، درشت دانه بوده و از ماسه رس و یا لای‌دار گاهی همراه با شن و گاهی خوب دانه-بندی شده می‌باشد. این لایه از تراکم متوسط تا بسیار متراکم متغیر بوده و به رنگ‌های قهوه‌ای گاهی تیره و خاکستری گاهی مایل به قهوه‌ای مشاهده شده است. این لایه از لحاظ طبقه‌بندی سیستم متحد (U.S.C.S) در رده‌های (SC)، (SM)، (SW - SC)، (SW - SM) و (SC - SM) قرار می‌گیرد. (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹)

۴-۵-۳ لایه سوم

این لایه که از عمق حدود ۱۶/۵ الی ۱۷/۵ متری تا عمق حدود ۲۲ الی ۲۳ متری مشاهده شده است ریزدانه بوده و از رس کم‌مایه گاهی با ماسه یا ماسه‌دار، رس ماسه و لای‌دار و همچنین لای ماسه‌دار تشکیل شده است. این لایه از لحاظ قوام سخت بوده و به رنگ‌های قهوه‌ای گاهی روشن و یا تیره و همچنین خاکستری مشاهده شده است. این لایه از لحاظ طبقه بندی سیستم متحد در رده-

های (CL)، (CL - ML) و (ML) قرار دارد. (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹)

۴-۵-۴ لایه چهارم

این لایه که خاک محل ساختگاه را از عمق حدود ۲۳ متری تا انتهای عمق حدود ۳۶/۵ متری تشکیل می‌دهد، غالباً درشت دانه بوده و از ماسه رس و لای دار گاهی با شن، ماسه خوب دانه‌بندی شده با لای و شن، ماسه رس دار گاهی با شن و همچنین شن رس یا لای دار با ماسه تشکیل شده است که از لحاظ طبقه بندی سیستم متحد در رده‌های (SC)، (SC - SM)، (SW - SM)، (GC) و (GM) قرار می‌گیرد. این لایه بسیار متراکم بوده و به رنگ‌های قهوه‌ای گاهی تیره و خاکستری نیز مشاهده شده است. (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹)

۴-۵-۵ لایه پنجم

این لایه که از عمق حدود ۳۴ الی ۳۸ متری تا انتهای عمق حفاری شده مشاهده شده است درشت دانه بوده و از ماسه رس و لای دار همراه با شن یا ماسه رس دار همراه با شن، بسیار متراکم به رنگ خاکستری تشکیل شده است. این لایه از لحاظ طبقه‌بندی سیستم متحد به طور غالب در رده‌های (SC) و (SC-SM) قرار دارد. (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹)

۴-۵-۶ لایه ششم

این لایه که از عمق حدود ۳۸ متری تا عمق ۴۰ متری مشاهده شده است ریز دانه بوده و از رس کم‌مایه با ماسه گاهی همراه با شن، سخت به رنگ خاکستری تشکیل شده است. این لایه از لحاظ طبقه بندی سیستم متحد در رده (CL) قرار دارد. (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹)

۴-۶ خصوصیات مکانیکی لایه‌های خاک

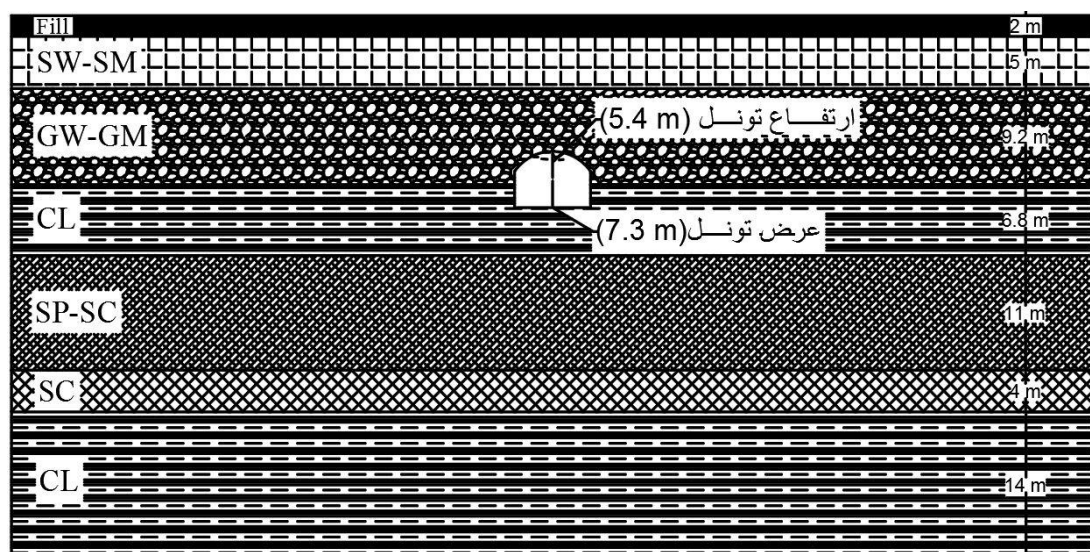
مطالعات متعددی به منظور تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک در محل ایستگاه E6 توسط شرکت راه آهن شهری تهران و حومه (مترو) صورت گرفت است. حفر گمانه‌های شناسایی، انجام

آزمایش‌های مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری خاک شامل آزمایش‌های برش مستقیم، تک محوری، سه محوری، تحکیم و بارگذاری، از فعالیت‌هایی است که به منظور تعیین خصوصیات مکانیکی لایه‌های خاک انجام شده است. خصوصیات مکانیکی لایه‌های خاک در محدوده مورد بررسی در لایه‌های مختلف در جدول (۲-۴) آمده است. (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹)

جدول (۲-۴): خصوصیات مکانیکی لایه‌های خاک (مهندسان مشاور دریاخاک پی، ۱۳۸۹)

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-ML	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

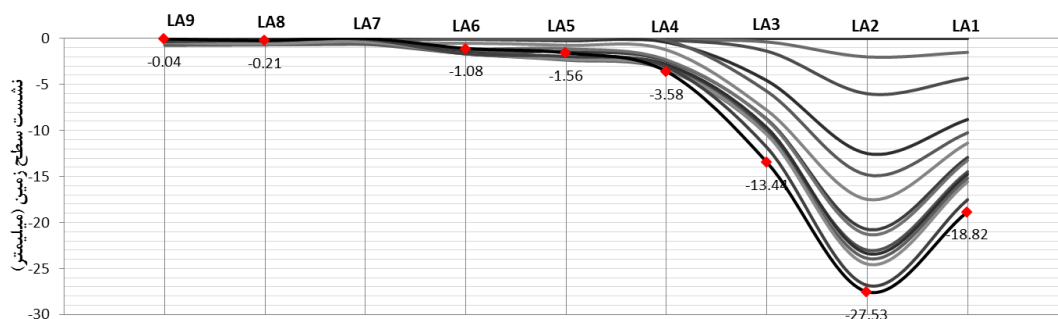
مقطع عرضی لایه‌های زمین و همچنین تونل دسترسی حفاری شده در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.



شکل ۴-۶: مقطع عرضی لایه‌های زمین و تونل دسترسی.

۱-۶-۴ داده‌های ابزار دقیق

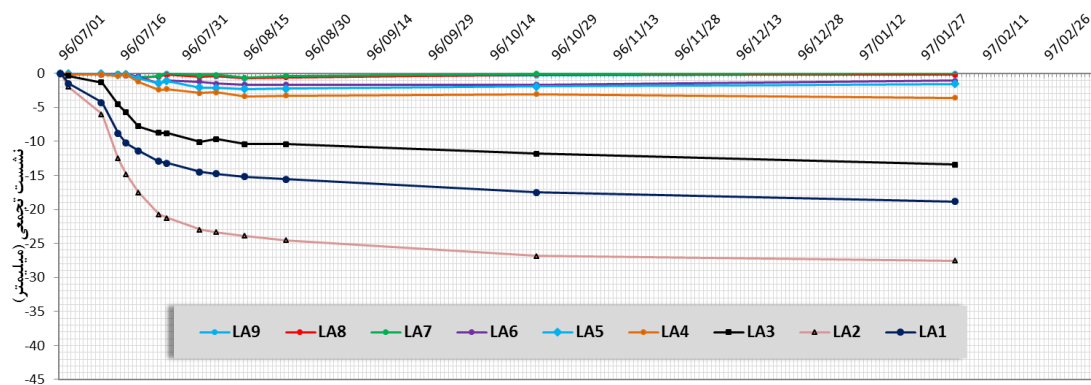
به منظور اندازه‌گیری میزان نشست سطح زمین در بالای تونل دسترسی، تعداد ۹ پین نشست‌سنج توسط شرکت آهاب نصب گردید (شکل ۴-۲). این ابزارها میزان نشست را در زمان قبل، حین و بعد از حفاری اندازه‌گیری کردند. شکل (۴-۷) نمودار نشست را در پین‌های نشست‌سنج نشان می‌دهد که شامل ۱۴ منحنی نشست است. هر منحنی نشست سطح زمین را در زمان‌های مختلف (مقادیر زمان-های اندازه‌گیری نشست در نمودار شکل ۴-۸ مشخص است) نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷: نشست سطح زمین کوچه لاجوردیان واقع در ایستگاه E6

همانطور که از نمودار بالا پیداست، بیشترین میزان نشست سطح زمین در پین LA2 که در فاصله ۱۲ متری از دهانه تونل واقع است، رخ داده است. این مقدار طبق گزارش‌های شرکت آهاب پس از حفاری ۲۰ متر تونل، اندازه‌گیری شده است.

نمودار تغییرات تجمعی نشست سطح زمین پین‌های نشست‌سنج را نشان می‌دهد. شروع حفاری تونل در تاریخ ۱ مهر ۱۳۹۶ شروع شده و در حین حفاری اندازه‌گیری نشست سطح انجام شده. در تاریخ ۳۰ آبان حفاری تونل متوقف شده است؛ با این حال نشست زمین به منظور تحقیقات تا تاریخ ۲۷ فروردین ۱۳۹۷ صورت گرفته است. همانطور که از نمودار مشخص است نشست نهایی پین LA2 پس از اتمام حفاری به ۳ میلیمتر نزدیک شده است.



شکل ۴-۸: تغییرات تجمعی نشست سطح زمین کوچه لاجوردیان واقع در ایستگاه E6

۷-۴ جمع‌بندی

در این فصل به معرفی تونل دسترسی مورد مطالعه و شرایط محیطی تونل پرداخته شده است. این تونل واقع در ایستگاه میدان خراسان (E6) خط ۶ مترو تهران است. خاک ساختگاه منطقه مورد بررسی به طور متناوب از لایه‌های ریزدانه و درشت‌دانه تشکیل شده است. هنگام حفاری تونل، مقادیر نشست قابل توجهی در سطح زمین به وجود آمده بود که در نهایت موجب توقف حفاری شد. بیشینه نشست سطح زمین که توسط ابزارهای نشست‌سنج اندازه‌گیری شد در پین LA2 مشاهده شد. مقدار این نشست ۲/۷ میلیمتر بوده که در زمان پس از اتمام حفاری برداشت شده است.

۵ فصل پنجم

مدلسازی روش‌های بهسازی در نرم‌افزار المان

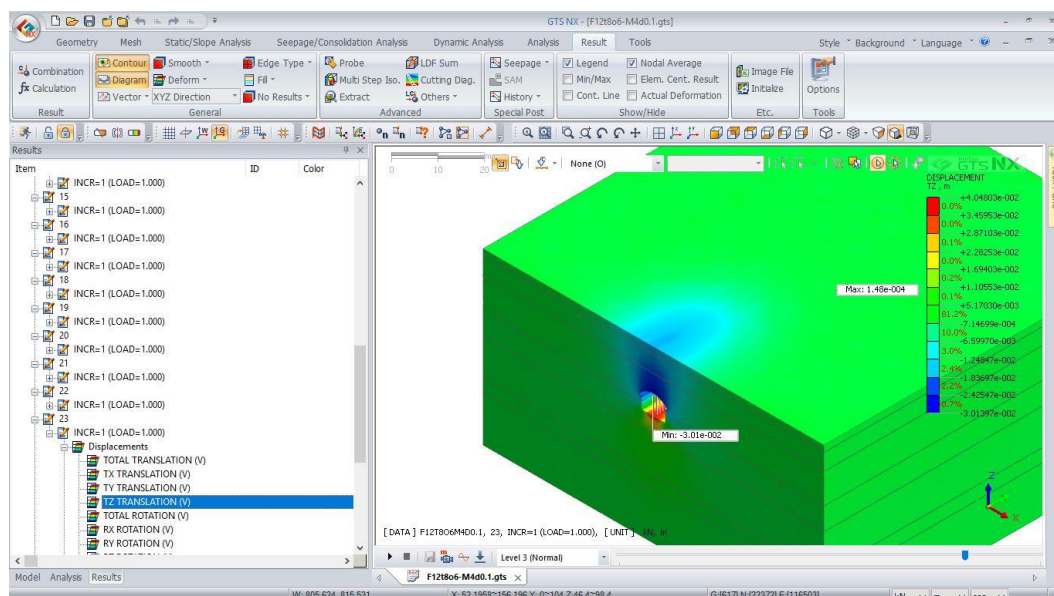
MIDAS GTS NX محدود

امروزه استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل المان محدود در بخش‌های مهندسی بسیار متداول شده است. به گونه‌ای که استفاده از این نرم‌افزارها موجب کاهش هزینه‌های تحقیق و توسعه می‌شود. از طرفی دیگر کاهش زمان طراحی و ساخت به همراه ارائه دیدگاهی شبه تجربی باعث گردیده تا علم المان محدود به ابزاری مرسوم در طراحی تبدیل شود.

در این فصل ابتدا به معرفی نرم افزار المان محدود MIDAS GTS NX پرداخته می‌شود. GTS NX یک بسته جامع نرم‌افزاری آنالیز المان محدود است که مجهز به اجرای تمام محدوده برنامه‌های طراحی ژئوتکنیکی از جمله پی‌های عمیق، خاکبرداری، سیستم‌های تونل مرکب، تحلیل نفوذ، آنالیز نشست، طراحی تحکیم، طراحی خاکریز، تجزیه و تحلیل دینامیکی و پایداری شیب است. پس از آن فرایند مدلسازی در این نرم‌افزار شرح داده خواهد شد. همچنین مدل رفتاری موهر-کلمب اصلاح شده که در این پژوهش برای رفتار لایه‌های خاک از آن استفاده شده است، توضیح داده می‌شود.

۲-۵ معرفی نرم افزار MIDAS GTS NX

Midas GTS NX محصول کشور کره جنوبی است که از سال ۱۹۸۹ به عرصه نرم‌افزارهای طراحی وارد شده است. این نرم‌افزار یک مجموعه نرم‌افزار تحلیل به روش المان محدود می‌باشد که به هدف انجام کلیه موارد طراحی ژئوتکنیکی شامل: فونداسیون‌های عمیق (شمع)، حفاری‌ها، سیستم‌های تونل بسیار پیشرفته و مقاطع به روش‌های TBM و NATM و ...، آنالیز تراوش و تحکیم، طراحی خاکریزها، بهسازی خاک، پایداری شیروانی‌ها و آنالیز پیشرفته دینامیکی و روانگرایی مجهز شده است.



شکل ۵-۱: محیط کار نرم افزار Midas GTS NX

این مجموعه نرم‌افزاری دارای یک محیط مدل‌سازی کاملاً کاربر پسند و ساده بوده و در عین حال محاسبات را با سرعت بالا انجام می‌دهد. از مزایای این نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (راهنمای نرم افزار MIDAS، ۲۰۱۸):

- توانایی فراخوانی فایل‌ها از نرم‌افزارهای دیگر (DXF, DWG و ...).
- ساخت مدل دو و سه بعدی به صورت همزمان.
- داشتن انواع مقاطع از پیش تعریف شده.
- توانایی فراخوانی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی تعریف شده در مدل‌های دیگر (EXCEL).
- داشتن محیط CAD-base برای کار آسانتر با هندسه مدل.
- توانایی تولید فیلم از خروجی آنالیزها.
- توانایی تولید فایل pdf سه بعدی.
- توانایی ساخت هندسه‌های پیچیده.
- توانایی در نظر گرفتن پارامترهای مختلف برای یک المان.
- توانایی انجام آنالیز SSR برای آنالیز شیب.

- توانایی ساخت لایه‌های زمین بر اساس اطلاعات گمانه‌ای اکتشافی.

- انجام تحلیل‌ها هم به صورت استاتیکی و دینامیکی.

۳-۵ روش المان محدود در MIDAS GTS NX

روش المان محدود^۱ (به اختصار FEM نامیده می‌شود) روش عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل انتگرال‌هاست. اساس کار این روش یا هدف کامل معادلات دیفرانسیل با ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی، که با روش عددی مثل اویلر حل می‌شوند، می‌باشد. روش المان محدود در حل معادلات جزئی روی دامنه‌های پیچیده، یا هنگامی که دامنه متغیر است، یا وقتی دقت بالا در همه جای دامنه الزامی نیست و یا اگر نتایج همبستگی کافی را ندارند، بسیار مفید است.

نرم‌افزار MIDAS GTS NX صرفاً برای شبیه‌سازی مسائل پیچیده مهندسی ژئوتکنیک در زمینه‌های مختلف تونل، سد و پی طراحی شده است. از آنجایی که انجام آزمایش‌های عملی بسیار پرهزینه است، استفاده از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود می‌تواند به عنوان ابزار جایگزین به کار برده شود.

این نرم‌افزار قابلیت گسترده‌ای را برای شبیه‌سازی در کاربردهای خطی و غیرخطی فراهم می‌کند. در تحلیل‌های غیرخطی به صورت خودکار نمودار و رواداری همگرایی مناسب را انتخاب و به‌طور پیوسته در طول تحلیل این پارامترها را تنظیم می‌کند تا از به دست آمدن نتایج دقیق اطمینان حاصل شود.

در این روش المان‌های محدود و گره‌ها، زیربنای هندسه‌ی سازه‌ای را که قرار است تحلیل شود، می‌سازند. هر المان در مدل بیانگر بخش مجزایی از سازه است که به نوبه خود از المان‌های متعدد ریزتر و متصل به یکدیگر تشکیل شده است نوع المان، شکل، موقعیت و تعداد المان‌های استفاده شده

¹Finite Element Method

در مش‌بندی جواب‌های حاصل از تحلیل را تحت تأثیر قرار می‌دهند. هر چه مش‌بندی ریزتر باشد نتایج دقیق‌تری خواهد داشت.

۴-۵ فرآیند مدلسازی در نرم‌افزار MIDAS GTS NX

فرآیند مدلسازی در نرم‌افزار شامل: انتخاب ابعاد مدل، ساخت هندسه، انتخاب مدل رفتاری و خصوصیات مواد، مش‌بندی هندسه، اعمال شرایط مرزی و در نهایت اجرای مسئله است.

۱-۴-۵ انتخاب ابعاد مدل

جهت دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت، مدل باید به اندازه‌ای بزرگ باشد که مرزهای آن خارج از محدوده تأثیر فعالیت‌های تونل‌سازی قرار گیرد. بنابراین آگاهی از ناحیه تأثیر تونل، از جمله مواردی است که به هنگام طراحی مورد نیاز است. مقصود از زون تأثیر، محدوده‌ایی در اطراف تونل است که در اثر احداث تونل، وضعیت تنش‌ها در آن بهم می‌خورد.

۲-۴-۵ ایجاد هندسه مدل

ایجاد هندسه به کمک نوار ابزار Geometry امکان‌پذیر است. این بخش شامل ابزارهای گوناگونی برای طراحی هندسه می‌باشد. لایه‌های زمین، مقاطع تونل، شمع و انکراژها و لوله‌های فورپولینگ باید در این بخش طراحی شوند.

۳-۴-۵ انتخاب مدل رفتاری مناسب

پس از تعریف مواد و خصوصیات بایستی که مدل رفتاری مناسب به مدل اختصاص داده‌شود. در نرم‌افزار MIDAS GTS NX چندین نوع مدل رفتاری برای مصالح مختلف سنگی و خاکی وجود دارد. هر یک از مدل‌های رفتاری با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی، سازه‌ای و یک سری از آزمایش‌های شاخص برای شناسایی پارامترهای لازم در مدل رفتاری انتخاب می‌شود.

در این پژوهش با توجه به شرایط زمین ابتدا از مدل رفتاری موهر-کلمب برای لایه‌ها استفاده شد؛

اما نتایج مدل بالازدگی بیش از حد در کف تونل را نشان می‌داد؛ بنابراین از این مدل رفتاری صرف نظر شده و از مدل اصلاح شده‌ی آن استفاده نمود. همچنین برای سازه‌های شمع، انکراژ، لوله‌های فورپولینگ و ناحیه‌های تقویت‌شده از مدل رفتاری الاستیک خطی استفاده شده است.

۴-۴-۵ مدل رفتاری موهر-کلمب اصلاح‌شده

مدل رفتاری موهر-کولمب اصلاح‌شده برای خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی استفاده می‌شود. این مدل ترکیبی از مدل‌های الاستیک غیرخطی و الاستوپلاستیک است که مدل مناسبی برای رفتار خواص این نوع خاک‌ها ارائه می‌کند. این مدل توانایی شبیه‌سازی رفتار سخت‌شوندگی دوگانه^۱ که تحت تأثیر شکست برشی^۲ یا مقاومت تسلیم فشاری^۳ قرار نمی‌گیرد را دارد. کرنش محوری و کاهش درسختی مواد ناشی از تنش انحرافی اولیه^۴ شبیه به مدل هایپربولیک (الاستیک غیر خطی) است، اما بیشتر به تئوری پلاستیک نزدیک است تا تئوری الاستیک و اختلافشان در نظر گرفتن زاویه اتساع و نقطه تسلیم است. پارامترهای مختلفی در این مدل رفتاری دخیل هستند، جدول (۵-۱) خلاصه‌ای از پارامترهای استفاده شده در مدل رفتاری موهر-کلمب اصلاح شده را نشان می‌دهد (راهنمای نرم افزار MIDAS، ۲۰۱۸).

جدول (۵-۱): خلاصه‌ای از پارامترهای استفاده شده در مدل رفتاری موهر-کلمب اصلاح شده.

¹Double Stiffening Behavior

²Shear failure

³Compressive yield strength

⁴Initial deviator stress

(راهنمای نرم افزار MIDAS، ۲۰۱۸)

پارامتر	توصیفات	مقدار مرجع (m.kN)
سختی خاک و شکست		
E_{50ref}	سختی متقاطع ^۱ در تست سه محوری استاندارد (زهکشی شده)	$E_{50ref}=E(2-R)/2$ (E = سختی اولیه)
E_{oedref}	سختی مماسی ^۲ در بارگذاری ادومتری اولیه	E_{50ref}
E_{urref}	سختی بارگذاری/باربرداری	$3(E_{50ref})$
M	ضریب قدرت بارگذاری وابسته به سطح تنش	$0/5 \leq m \leq 1$ (برای خاک سخت $=0/5$ و برای خاک نرم $=1$)
$C (C_{inc})$	چسبندگی موثر	پارامتر شکست در مدل موهر-کلمب
ϕ	زاویه شکست موثر	پارامتر شکست در مدل موهر-کلمب
Ψ	زاویه اتساع نهایی	$0 \leq \Psi \leq \phi$
پارامترهای پیشرفته (مقادیر مرجع پیشنهاد می شود)		
R_f	نرخ شکست	$0/9 (>1)$
P_{ref}	فشار مرجع	۱۰۰
KNC	K_0 در تراکم عادی	$1 - \sin\phi$
مقاومت کششی	مقدار قطع در فشار هیدرواستاتیک کششی	-
پارامترهای اتساع		
تخلخل	نسبت پوکی اولیه	-
تخلخل (بیشینه)	نسبت پوکی بیشینه	-
سطح تسلیم Cap		
OCR/Pc	نسبت نرخ تراکم به فشار پیش رو باره	-
α	فاکتور شکل Cap (فاکتور مقیاس برای تنش پیش تراکمی)	-
β	پارامتر سختی Cap	-

۵-۴-۱-۴-۱ مدول الاستیسیته (سه نوع مدول سختی مرجع)

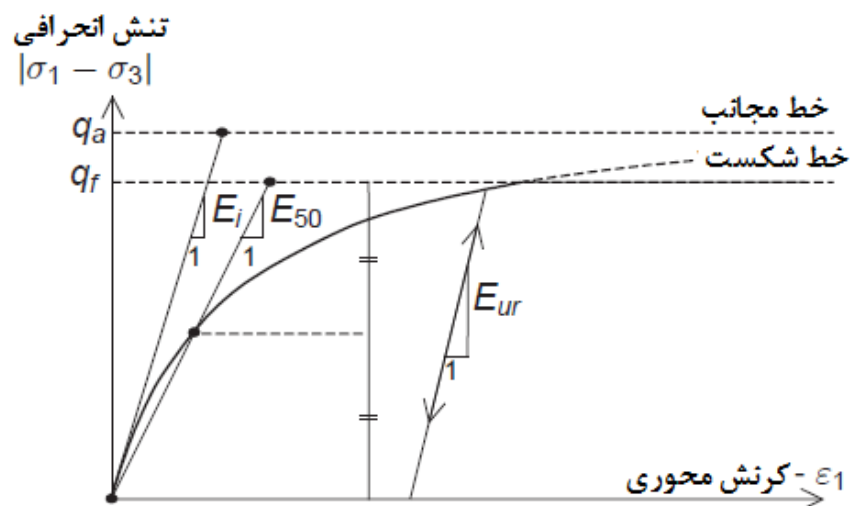
در این مدل مواد به صورت جزئی تر نسبت به مدل موهر-کولمب بیان شده است و مدول

^۱ Secant Stiffness

^۲ Tangent Stiffness

الاستیسیته را می‌توان در مقادیر مختلف برای بارگذاری و باربرداری تنظیم کرد. به دلیل انتشار تنش در زمان مدل سازی حفاری، در بسیاری از موارد، مدول الاستیسیته برای جلوگیری از بالازدگی در عملیات باربرداری از روی سطح مقداری بزرگتر در نظر گرفته می‌شود. در آزمایش سه‌محوره استاندارد خاک‌های سخت (ماسه، رس OC)، مقدار سختی باربرداری سه برابر سختی متقاطع در نظر گرفته می‌شود. اما این مقدار در خاک‌های نرم بستگی به شاخص تورم دارد؛ به طوری که مقدار سختی باربرداری تقریباً ۱۰ برابر سختی متقاطع در نظر گرفته می‌شود (راهنمای نرم افزار MIDAS، ۲۰۱۸).

شکل زیر، نمودار مدول‌های تغییر شکل مختلف خاک در مدل اصلاح شده موهر-کولمب را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲: مدول‌های تغییر شکل مختلف خاک در مدل اصلاح شده موهر-کولمب (راهنمای نرم افزار MIDAS، ۲۰۱۸).

۵-۴-۴-۲ ضریب شکست

پس از اینکه تنش انحرافی در معیار موهر-کولمب به مقدار نهایی خود برسد، مصالح به طور کامل تسلیم شده (معیار شکست ارضا می‌شود) و در ناحیه پلاستیک قرار می‌گیرد. نسبت تنش نهایی به تنش انحرافی را ضریب شکست گویند، که مقدار آن می‌بایست کمتر از ۱ باشد (راهنمای نرم افزار

MIDAS، ۲۰۱۸).

۵-۴-۴-۳ فشار مرجع

نوعی تنش مرجع است که در آزمایش‌های سه محوره برای مقاومت‌های ویژه بر روی نمودار الاستیک غیرخطی استفاده می‌شود. این تنش به ضریب پیش‌تحکیم (OCR) بستگی دارد که به نوعی نمایان‌گر تنش افقی برجا در حدوسط لایه‌های خاک است.

۵-۴-۴-۴ ضریب قدرت بارگذاری وابسته به سطح تنش

این ضریب در خاک‌های نرم مقداری برابر ۱ است و در خاک‌های سخت (ماسه، رس OC) مقداری برابر ۰/۵ را داراست.

۵-۴-۵ مش‌بندی و نوع المان‌ها

در این مرحله تعداد نوع المان‌ها با توجه به هندسه و سازه مشخص شده و مدل مش‌بندی می‌شود که با استفاده از نوار ابزار Generate mesh قابل انجام است. در روند مش‌بندی ابتدا نوع مش (مثلثی یا مربعی) تعیین و سپس اندازه و نحوه توزیع مش نسبت به هندسه شکل تعیین می‌شود. طیف وسیعی از المان‌ها در نرم‌افزار قابل استفاده است که از این جهت توانایی بسیار زیادی را به کاربر می‌دهد تا بتواند انواع مختلف مسائل را مدل کرده و تحلیل نماید. از المان سه‌بعدی Soild برای لایه‌ها و ناحیه تقویت‌شده در روش فورپولینگ استفاده می‌شود. از المان دوبعدی Shell برای شاتکریت و از المان‌های یک‌بعدی تیر^۱ و شمع مدفون شده^۲ به ترتیب برای لوله‌های فورپولینگ، شمع و انکراژ استفاده شده است (راهنمای نرم افزار MIDAS، ۲۰۱۸).

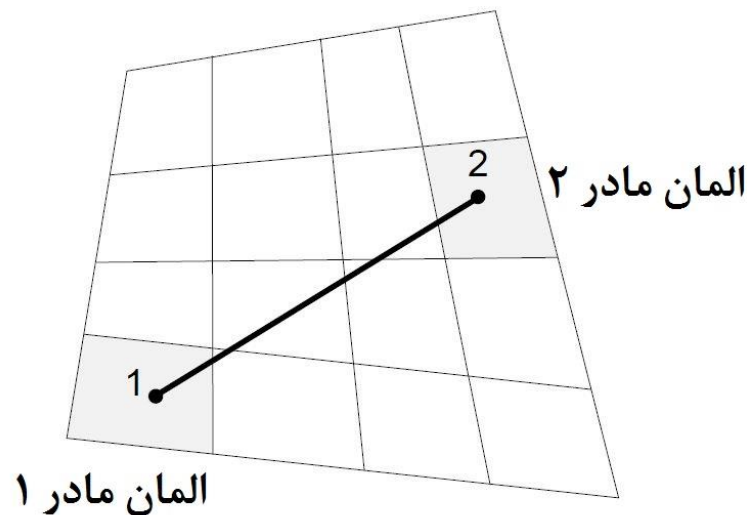
۵-۴-۵-۱ المان شمع مدفون شده

شکل، سیستم مختصات، خصوصیات مواد و ... این نوع المان همانند المان خرابی ساده است. با

^۱ Beam

^۲ Embedded Pile

این تفاوت که در شمع مدفون شده نیازی به اشتراک گذاشتن گره‌ها با المان مادر (المان مادر می‌تواند یک المان Solid یا صفحه کرنش باشد) نیست (شکل ۵-۳). از این رو برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مناسب‌تر است. المان خریای ساده یک المان یک بعدی با دو گره‌ای است که در این نرم افزار برای مدل‌سازی سازه‌هایی که از رفتار خمشی سازه صرف نظر می‌شود، به کار می‌رود.



شکل ۵-۳: المان شمع مدفون شده در المان مادر

۵-۴-۶ اجرای مسئله (Analysis)

در این مرحله ابتدا روش حل مسئله بسته به نوع سازه تعیین می‌گردد. به عنوان مثال برای حفاری تونل به صورت مرحله‌ای می‌بایست روش حل را به صورت مراحل اجرا^۱ تنظیم نمود. همچنین مراحل تحلیل و اطلاعات کلی در مورد مدل و رفتار سازه مانند میزان کل تنش یا جابه‌جایی در حین تحلیل قابل مشاهده است.

۵-۴-۷ تحلیل و بررسی نتایج (Results)

نتایج مدل‌سازی را می‌توان در این مرحله مشاهده کرد. خروجی نتایج به صورت کانتور، نمودار و جدول قابل مشاهده و بررسی است.

¹Construction Stages

۵-۵ جمع‌بندی

در این فصل فرآیند مدلسازی نرم افزار MIDAS GTS NX که شامل انتخاب ابعاد مدل، ساخت هندسه، انتخاب مدل رفتاری و خصوصیات مواد، مش‌بندی هندسه، اعمال شرایط مرزی و در نهایت اجرای مسئله است، شرح داده شده است. همچنین توضیحی درباره المان‌ها و مدل‌هایی رفتاری مورد استفاده در این پژوهش نیز ارائه شده است.

۶ فصل ششم

مدلسازی عددی مدلسازی عددی روش‌های

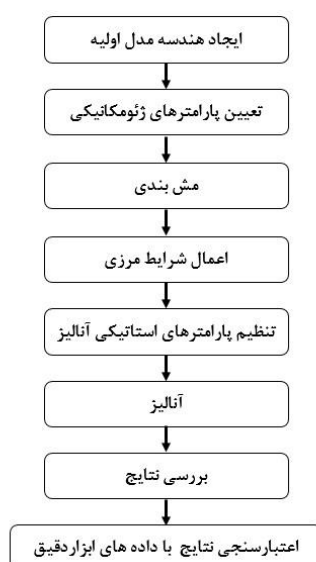
بهسازی زمین ناشی از حفاری تونل‌های مترو

مطالعه موردی: (خط شش مترو تهران)

محدوده مورد مطالعه با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش تشریح لایه‌ها، در مصالح سست و ضعیف واقع شده‌است. با توجه به محیط دربرگیرنده تونل، یکی از مناسب‌ترین روش‌های مدل‌سازی برای تحلیل این گونه تونل‌ها، استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار سه بعدی ژئوتکنیکی MIDAS GTS NX می‌باشد. همچنین مدل موهر-کلمب اصلاح شده به عنوان مدل رفتاری خاک در نظر گرفته شده است. در این فصل ابتدا مدل اولیه ساخته می‌شود؛ سپس جهت اعتبارسنجی مدل، نتایج نشست سطح زمین در مدل با داده‌های ابزار دقیق سنجیده می‌شود. پس از آن مدل‌سازی روش‌های بهسازی شمع‌گذاری، فورپولینگ و انکراژ انجام می‌شود و با توجه نشست مجاز و معیار خطر نشست، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند.

۲-۶ مدل‌سازی اولیه و اعتبارسنجی

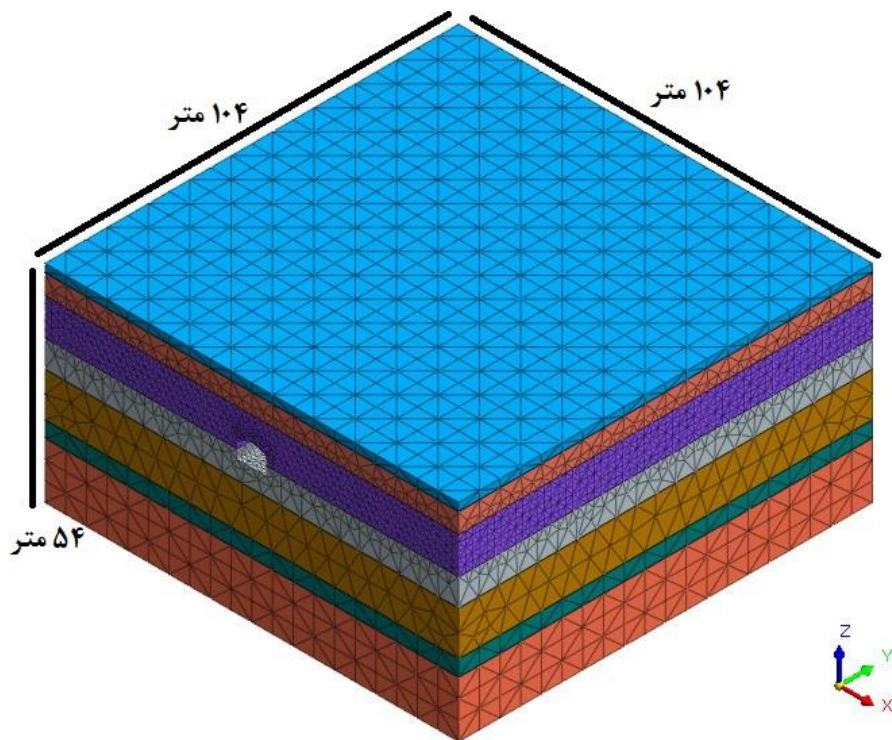
ساخت مدل و تحلیل عددی آن در این پژوهش در نرم‌افزار سه بعدی اجزاء محدود MIDAS GTS NX در هشت مرحله انجام گرفته است که در شکل (۱-۶) نشان داده شده است.



شکل ۱-۶: شماتیک از مراحل ساخت مدل

۱-۲-۶ ایجاد هندسه مدل

برای مدل‌سازی عددی حفاری تونل ابتدا مدلی با ابعاد $10.4 \times 10.4 \times 5.4$ متر (طول، عرض و ارتفاع) به طوری که جابه‌جایی‌ها به مرزهای مدل نرسد، ساخته می‌شود. تونل ذکر شده با مقطع D شکل با دهانه $7/3$ متر و ارتفاع $5/4$ متر و طول حفاری 20 متر شبیه‌سازی می‌شود (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۶: ابعاد محیط دربرگیرنده مدل

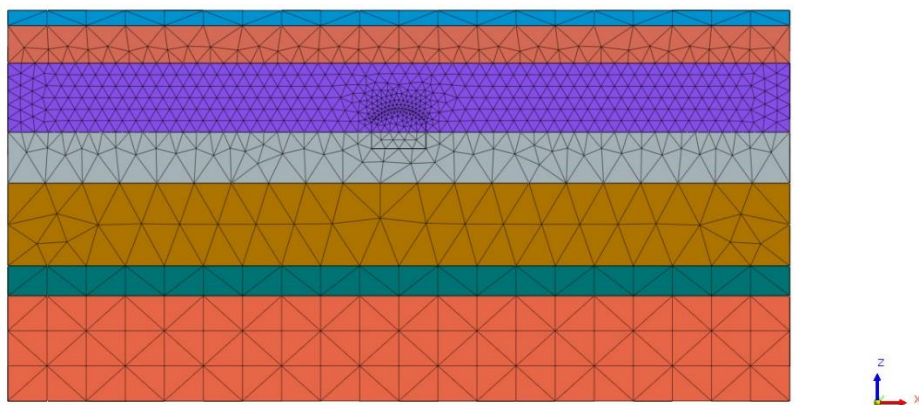
۲-۲-۶ تعیین خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده و مش‌بندی مدل

با توجه به دلایل ذکر شده در بخش ۴-۴-۵ برای لایه‌های زمین از مدل رفتاری موهر-کلمب اصلاح‌شده استفاده شده است. به منظور تعیین خصوصیات مدل رفتاری لایه‌ها، پارامترهایی نظیر نسبت پواسون، وزن مخصوص، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی با توجه به جدول (۲-۴) و همچنین پارامترهای سختی و فاکتور شکست از جدول (۱-۶) وارد شده است.

جدول (۶-۱): پارامترهای استفاده شده در معیار موهر کلمب اصلاح شده

لایه	فاکتور شکست (R)	سختی سکانت در سختی برشی (kPa)	سختی مماسی در بارگذاری ادومتری اولیه (kPa)	سختی باربرداری/بارگذاری (kPa)
	< ۱	$E_{50ref} = E(2-R)/2$	$E_{oedref} = E_{50ref}$	$E_{urref} = 3(E_{50ref})$
خاک دستی	۰/۹	۳۵۸۰	۳۵۸۰	۱۱۵۵۰
۱	۰/۹	۶۶۰۰	۶۶۰۰	۱۹۸۰۰
۲	۰/۹	۱۳۷۵۰	۱۳۷۵۰	۴۱۲۵۰
۳	۰/۹	۱۱۰۰۰	۱۱۰۰۰	۳۳۰۰۰
۴	۰/۹	۳۳۰۰۰	۳۳۰۰۰	۹۹۰۰۰
۵	۰/۹	۵۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰
۶	۰/۹	۷۵۰۰۰	۷۵۰۰۰	۲۲۵۰۰۰

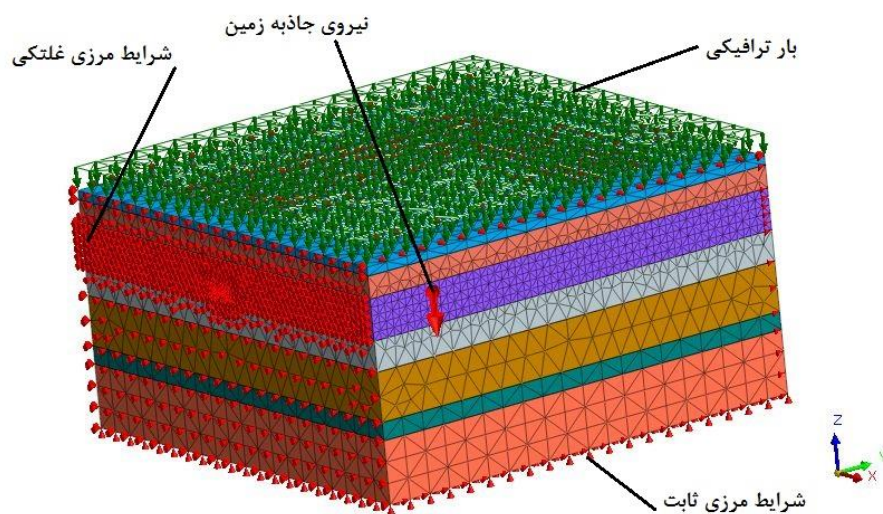
پس از ساخت هندسه مدل و تعیین خصوصیات مواد لایه‌ها و نگهدارنده اولیه تونل (شاتکریت) با استفاده از نوار ابزار Mesh اقدام به مش‌بندی هندسه مدل شده است. برای لایه‌های زمین از المان solid و شاتکریت از المان shell استفاده شده است. شکل (۶-۳) مقطع عرضی از مش‌بندی لایه‌ها در زمین و اطراف تونل را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۳: مقطع عرضی از مش‌بندی لایه‌ها در زمین و اطراف تونل

۳-۲-۶ مراحل ساخت و ساز و اعمال شرایط مرزی

از آنجایی که تونل دسترسی با روش دو مرحله ای پیشانی و پله^۱ با طول گام حفاری یک متر، ارتفاع پله ۱/۸ متر و تعداد ۲۰ گام حفاری شده است. برای مدل سازی این نوع ساخت و ساز از ابزار stge set استفاده شد. به طوری که پس از حفر دومین گام حفاری، المان شاتکریت به مدل اضافه می شود. برای نزدیک شدن شرایط مرزی مدل ساخته شده به شرایط واقعی، کف مدل ثابت (سه قید جابجایی در گره ها) و قید غلتکی در مرزهای جانبی مدل اعمال شده است. همچنین سطح فوقانی مدل آزاد در نظر گرفته شده است. نیروی جاذبه زمین نیز اعمال شد. همچنین به علت وجود بار ترافیکی و ساختمان های روی زمین، به طور میانگین فشار ثابت ۲۰ kN در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۶) شرایط مرزی، بارهای اعمالی به مدل را نشان می دهد.

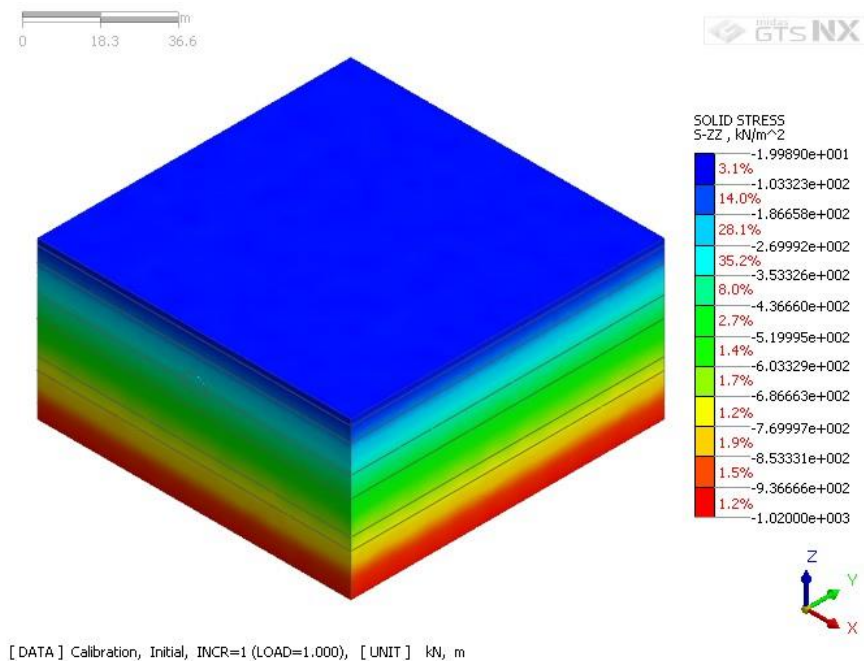


شکل ۴-۶: شرایط مرزی و بارهای اعمال شده به مدل

۴-۲-۶ نتایج مدل و اعتبار سنجی

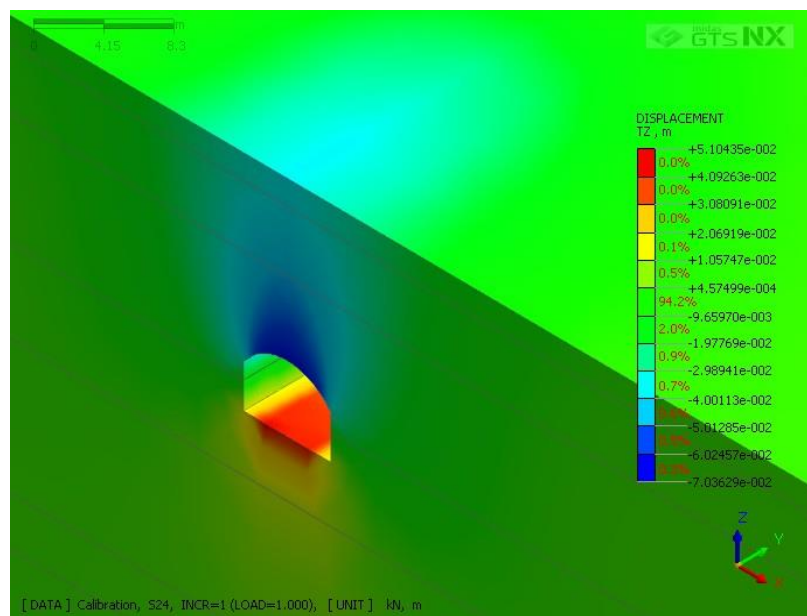
پس از انجام مدلسازی، نتایج حاصل مدل انجام شده از مسیر مورد مطالعه آورده شده است. شکل (۵-۶) کانتور تنش اولیه در مدل را قبل از حفر تونل نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست مقدار تنش سطح زمین تقریباً برابر ۲۰ kN است که معدل بار ترافیکی اعمال شده است.

¹ Two-step (top heading and bench) method



شکل ۵-۶: تنش اولیه در مدل

شکل (۶-۶) جابجایی قائم مدل را پس از حفر تونل و نصب نگهداری اولیه نشان می‌دهد. بیشترین نشست در تاج تونل به مقدار ۷ سانتی‌متر رخ داده است.

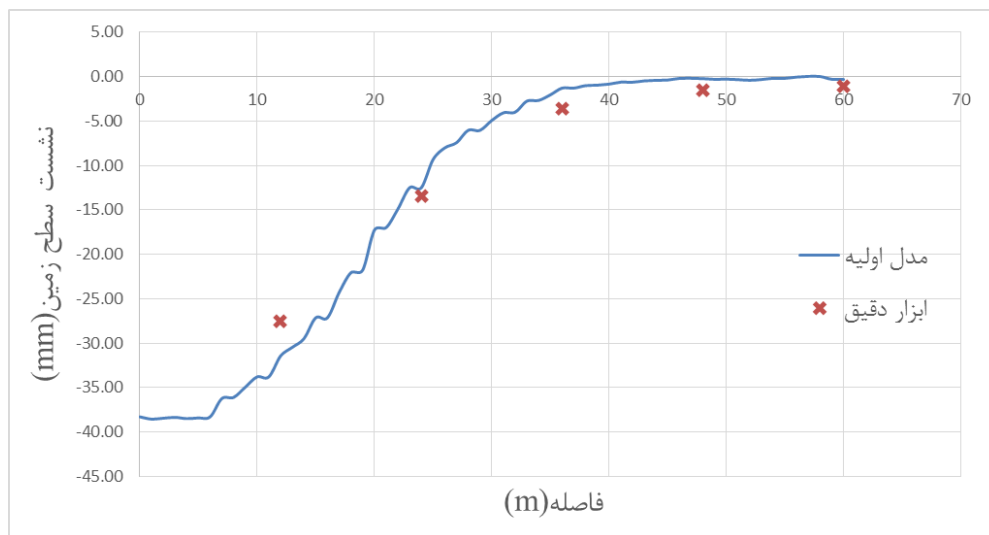


شکل ۶-۶: جابجایی قائم در مدل اولیه پس از حفر تونل.

برای مقایسه روش اجزا محدود با نتایج ابزار دقیق در بخش ۴-۶-۱، مدل اولیه ساخته شد و نتایج

پروفیل طولی نشست در سطح زمین در شکل (۶-۷) ارائه شده است. در این شکل منحنی نشست سطح زمین واقع در بالای تونل و در راستای پروفیل طولی نشان داده شده است. منحنی پس از حفاری ۲۰ متر تونل رسم شد. همچنین برای مقایسه مقادیر نشست با داده‌های ابزار دقیق از داده‌های پین‌های نشست‌سنجی پس از حفاری استفاده شد.

میزان نشست در مدل و داده‌های ابزار دقیق همخوانی بسیار خوبی را داراست، برای مثال نشست در فاصله ۱۲ متری دهانه تونل (LA2) برابر ۳۱/۴۴ میلیمتر است که تنها ۳/۹۱ میلیمتر با مقدار ابزار دقیق اختلاف دارد. که این مقدار نشان‌دهنده صحت مدل ساخته شده است.



شکل ۶-۷: نمودار پروفیل طولی نشست سطح زمین در مدل اولیه و داده‌های ابزار دقیق (آخرین قرائت انجام شده پس از حفاری).

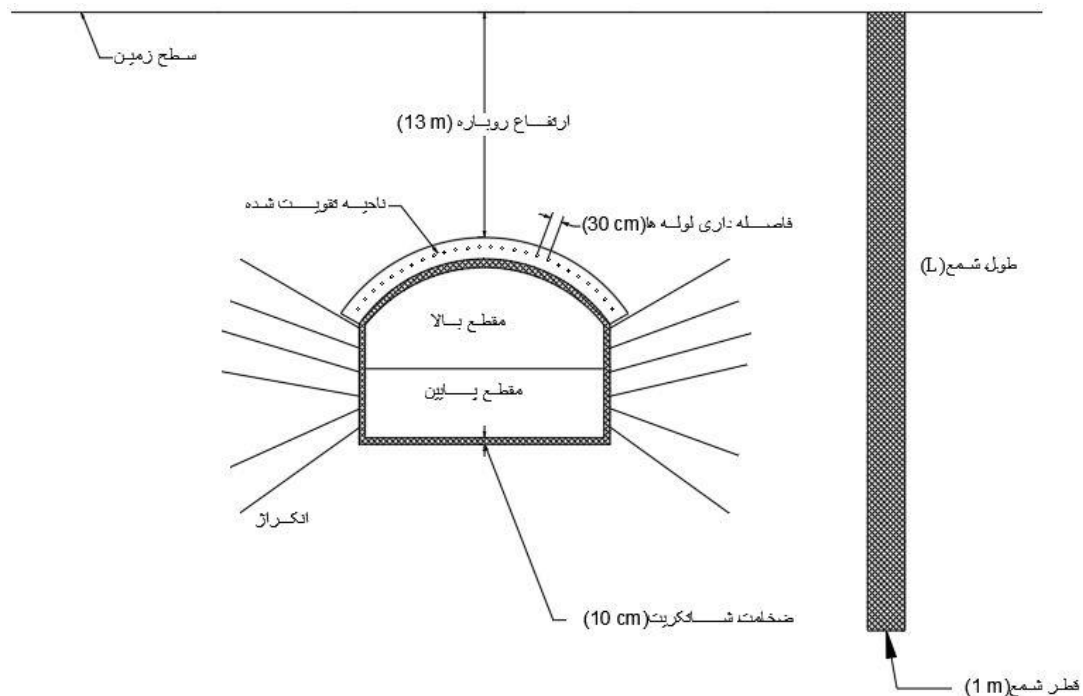
از آنجایی که مهمترین عامل ایجاد آسیب در سازه‌ها، نشست‌های نامتقارن بوده که در واقع متناسب با چرخش است و نیز با توجه به حساس بودن پروژه‌ی خط ۶ مترو، معیارهای کنترلی برای نشست در محیط‌های شهری ۳۵ میلیمتر برای بیشینه نشست مطلق در مناطق مسکونی و ۵۰ میلیمتر برای سایر مناطق در نظر گرفته شده است (بخشنده امینه، ۱۳۹۴).

چون سطح زمین در ایستگاه میدان خراسان شامل مغازه‌ها و ساختمان‌های مسکونی بود، مقدار

۳۵ میلیمتر به عنوان بیشینه نشست مجاز در نظر گرفته شد. با این حال با توجه به نتایج مدل اولیه، بیشینه نشست سطح زمین ۳۷ میلیمتر بدست آمده که از نشست مجاز فراتر رفته و نیاز به بهسازی خاک اطراف تونل می‌باشد.

۳-۶ مدل‌سازی روش‌های بهسازی خاک

به منظور کاهش نشست سطح زمین روش‌های مختلف بهسازی از جمله فورپولینگ، شمع‌گذاری و انکراژ (مهار) مدل‌سازی شده است. در هر یک از روش‌ها با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای مکانیکی سازه و تغییر تعدادی از پارامترهای هندسی، اقدام به مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل روش‌های بهسازی شده است. شکل (۸-۶) شماتیکی از هندسه روش‌های بهسازی خاک انجام شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. در این شکل تنها شماتیک کلی از روش‌های بهسازی جهت درک درستی از هندسه روش‌ها ارائه شده است. در ادامه مدل‌سازی عددی هریک از روش‌ها جداگانه صورت گرفته است.



شکل ۸-۶: شماتیک مقطع عرضی روش‌های بهسازی خاک مورد استفاده در پژوهش

در تمامی روش‌ها، مدل رفتاری الاستیک خطی برای سازه‌های بکار برده شده نظیر لوله‌های

فورپولینگ، شمع، انکراژ و... استفاده شد. خصوصیات مکانیکی این نوع سازه‌ها طبق مصالح بکار رفته شده در پروژه‌های مشابه شرکت حمل و نقل شهری در نظر گرفته شده است (جدول ۶-۲).

جدول (۶-۲): پارامترهای الاستیک سازه‌های مورد استفاده در روش‌های بهسازی

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 ^۱	بتن مسلح	۰/۳	۵۰۰۰	۲۴	-	-
شمع ^۲	بتن مسلح	۰/۳	۳۱۰۰۰	۲۴	-	-
انکراژ *	میله مهار با بتن مسلح	۰/۲	۳۱۰۰۰	۲۴	۳۳۰	۲۷۰

۱-۳-۶ مدل‌سازی روش فورپولینگ

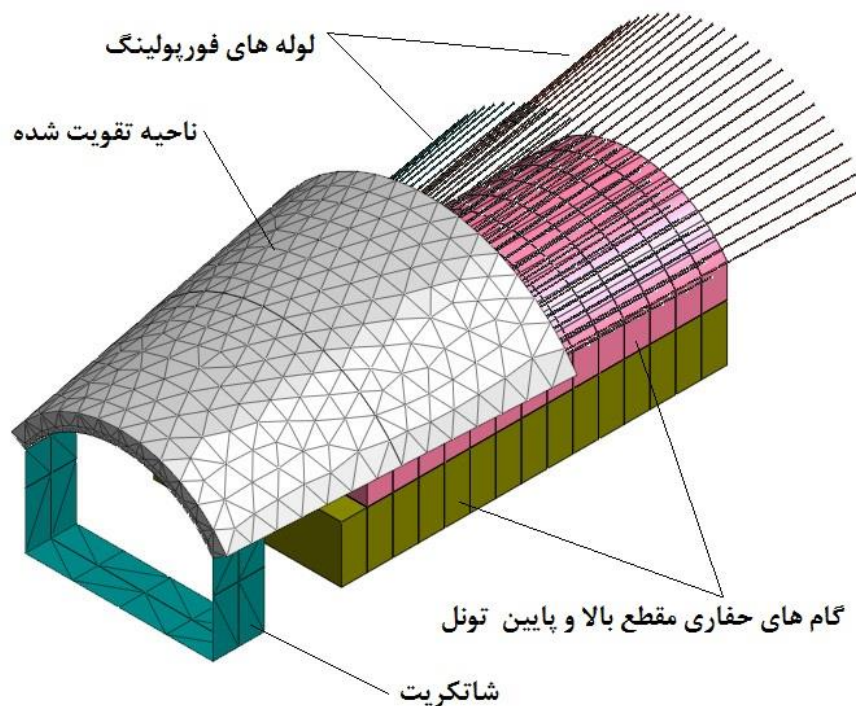
در پروژه تونل دسترسی میدان خراسان، حفاری تونل به صورت روش دو مرحله پیشانی و پله‌ای می‌باشد و به منظور تحکیم زمین (و همچنین تامین نگهداری قسمت فوقانی تونل هنگام حفاری) و کاهش نشست، روش فورپولینگ مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. جهت مدل‌سازی فورپولینگ‌ها از المان Beam برای شبیه سازی لوله‌های فورپولی و از المان Solid برای ناحیه تقویت شده اطراف لوله‌ها استفاده شده است (شکل ۶-۱۳). المان تیر از آن جهت انتخاب شد که در واقعیت نیز عملکرد لوله‌های فورپول همانند المان تیر (دارای قابلیت تحمل خمش) می‌باشد. با توجه به مدل‌های ارائه شده از سوی محققان تیرهای با یکسر تکیه گاه بر روی سیستم نگهداری اولیه و یکسر آزاد درون

* MIDAS GTS NX user manual (version ۲۰۱۷).

^۱ شرکت آهاب (۱۳۹۷)

^۲ Burkovič, K at el (2017).

خاک در نظر گرفته شده است. واقعیت امر آن است که هرگاه لوله‌ها در داخل زمین قرار می‌گیرند و تزریق درون آنها انجام می‌شود، مواد تزریق شده از انتها و جداره لوله خارج شده و می‌تواند مانند یک تکیه‌گاه در انتهای دیگر لوله عمل کند ولی همچنان جابجایی لوله به همراه خاک وجود دارد (Trinh et al., 2006). شماتیکی از مقطع عرضی آرایش لوله‌ها و ناحیه تقویت شده در شکل (۶-۸) قابل مشاهده است.



شکل ۶-۹: اجزای مدلسازی شده در روش فورپولینگ

در مدل حاضر به توصیه مهندسی مشاور طرح خصوصیات هندسی لوله‌های فورپول و شعاع ناحیه تقویت شده (با توجه با لایه قرارگیری لوله‌ها) به شرح زیر است:

قطر لوله: ۶۰ میلیمتر

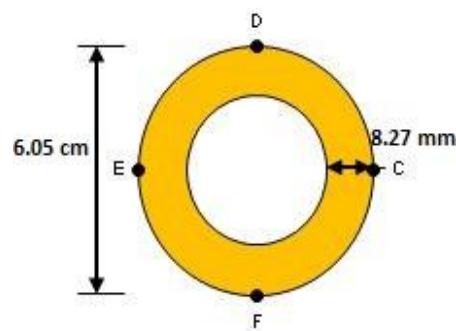
ضخامت جداره: ۸ میلیمتر

طول لوله‌ها: ۱۲ متر

زاویه قرارگیری لوله‌ها نسبت به افق: ۸ درجه

فاصله مرکز به مرکز لوله‌ها: ۳۰ سانتی متر

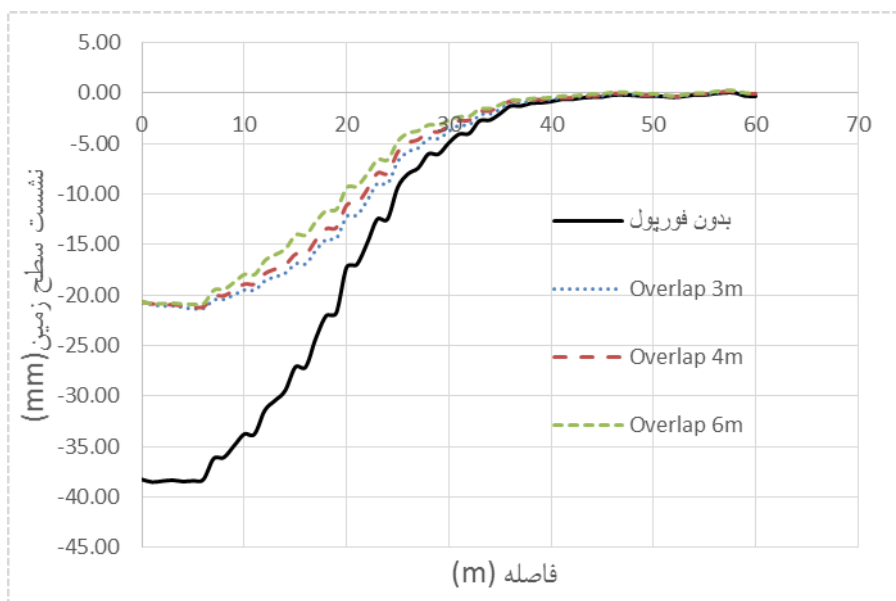
طبق مشخصات بالا، در هر مرحله از فورپولینگ تعداد ۲۷ لوله در بالای تونل قرار می‌گیرند. در این پژوهش علاوه بر مدلسازی روش فورپولینگ، تاثیر طول همپوشانی بر نشست سطح زمین نیز بررسی خواهد شد.



شکل ۶-۱۰: مقطع عرضی لوله‌های فورپول

۶-۳-۱-۱ تاثیر افزایش طول همپوشانی بر نشست سطح زمین

جهت بررسی تاثیر طول همپوشانی بر نشست زمین، سه مدل با طول‌های همپوشانی ۳، ۴ و ۶ متر متفاوت ساخته شده است و نتایج حاصل از مدلسازی‌ها مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل در شکل (۶-۱۱) نشان داده شده است.

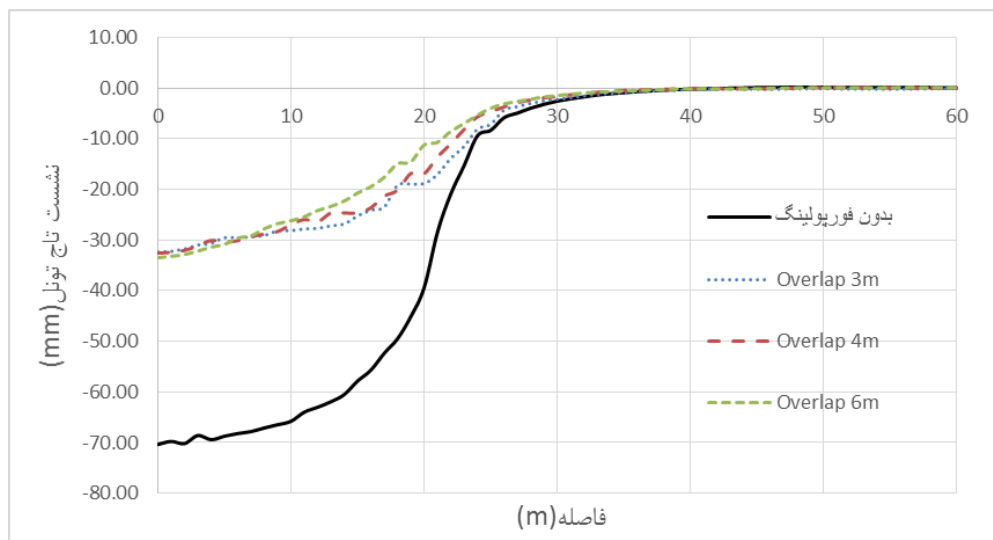


شکل ۶-۱۱: تاثیر افزایش عمق همپوشانی لوله‌های فورپول بر نشست سطح زمین.

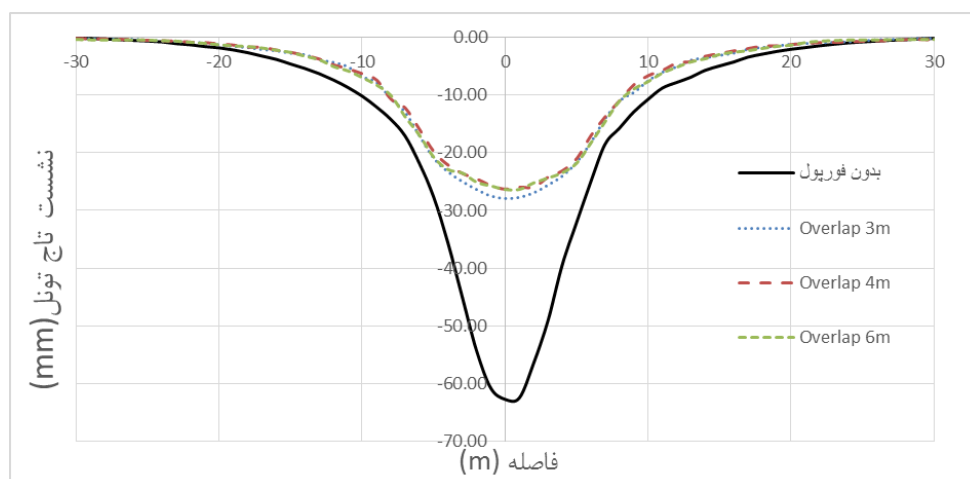
همانطور که از نمودار بالا پیداست، استفاده از روش فورپولینگ تاثیر قابل توجهی بر کاهش نشست سطح زمین داشته است؛ به گونه‌ای که باعث کاهش 50 درصدی بیشینه نشست در سطح زمین شده است (کمتر از نشست مجاز). افزایش طول همپوشانی نیز باعث کاهش نشست سطح زمین می‌شود؛ با این حال روند کاهش بسیار کم است.

۶-۳-۱-۲ تاثیر افزایش طول همپوشانی بر نشست تاج تونل

شکل (۶-۱۲) و شکل (۶-۳) به ترتیب نشست تاج تونل در پروفیل طولی و عرضی (در فاصله ۱۲ متری از دهانه تونل) نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۲: تاثیر افزایش طول همپوشانی لوله‌های فورپول بر نشست تاج تونل (پروفیل طولی)

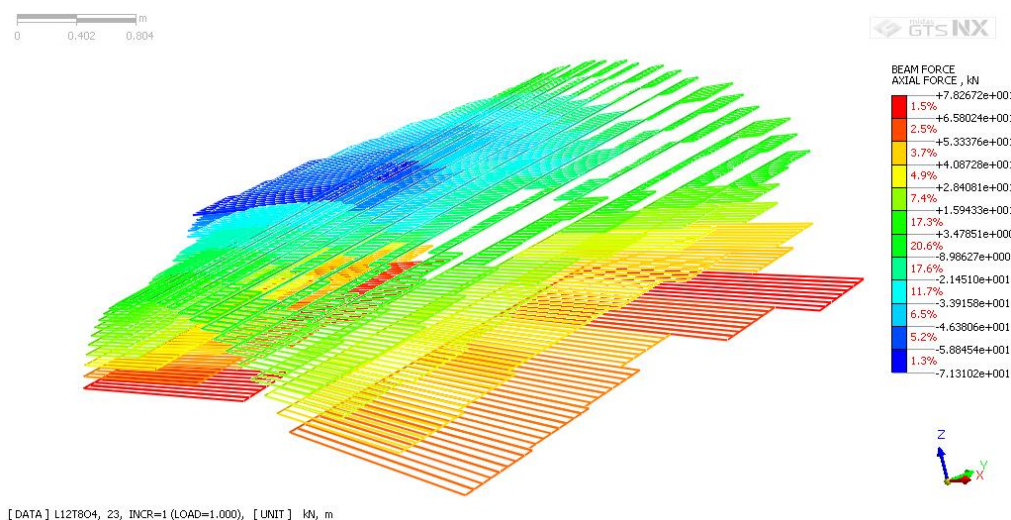


شکل ۶-۱۳: تاثیر طول همپوشانی بر نشست تاج تونل (پروفیل عرضی در فاصله ۱۲ متری از دهانه تونل)

استفاده از روش بهسازی فورپولینگ تاثیر چشمگیری در کاهش نشست تاج تونل داشته است. به طوری که منجر به کاهش ۵۰ درصدی بیشینه نشست در تاج تونل نسبت مدل اولیه 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 حالات نسبتاً 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.

۳-۱-۳-۶ بارهای وارد بر المان نگهدارنده فورپولینگ

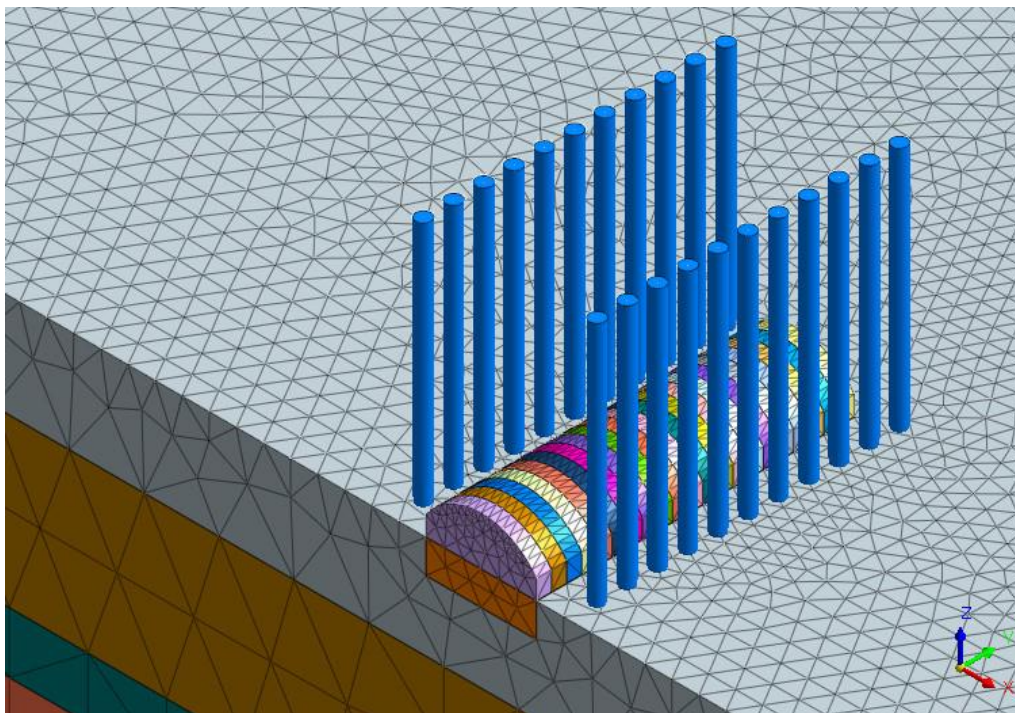
شکل (۱۴-۶) نیروی محوری وارد بر المان‌های فورپول را نشان می‌دهد. در این شکل دیاگرام نیروهای محوری در یک مقطع با فورپول‌هایی به طول ۱۲ متر را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، درگیری لوله‌ها با دوغاب تزریقی و زمین اطراف لوله مشخص است. در لوله‌های واقع در تاج، قسمت ابتدایی و انتهایی کمان D شکل، بیشینه نیروی محوری وجود دارد. از آنجایی که بیشینه نیروی محوری (۷۸ kN) از نیروی مجاز کششی (۲۵۰ kN) و فشاری (۱۴۰ kN) کمتر است، هیچگونه گسیختگی در المان لوله‌های فورپولینگ رخ نمی‌دهد.



شکل ۱۴-۶: نیروی محوری در لوله‌های فورپول

۲-۳-۶ مدلسازی روش شمع گذاری

به منظور مدلسازی روش شمع‌گذاری از سطح زمین، شمع‌های به قطر ثابت ۱ متر و طول‌های متغیر در نظر گرفته شد (شکل ۸-۶). 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 شده است (شکل ۱۵-۶).

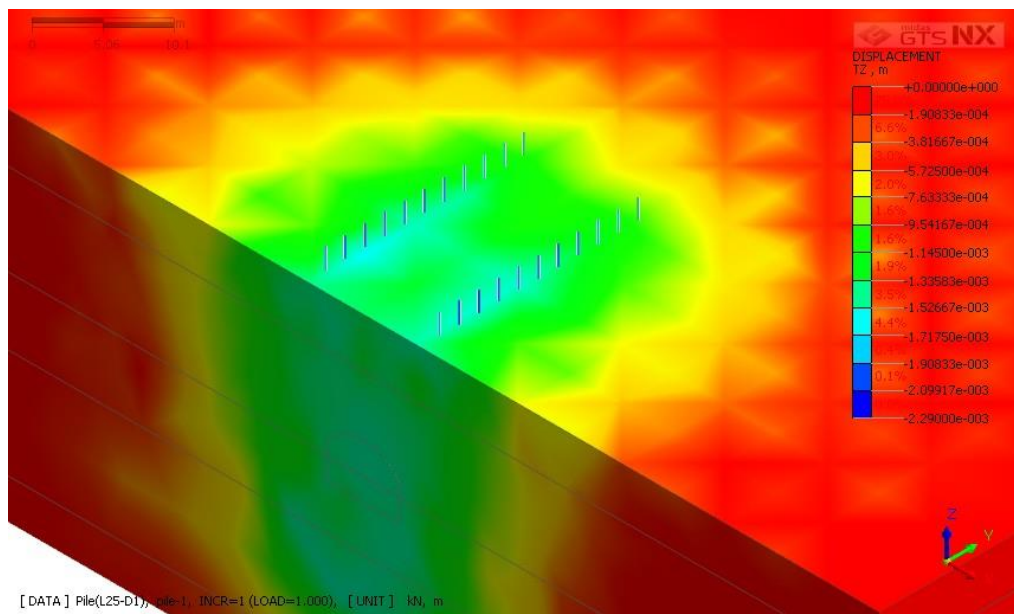


شکل ۶-۱۵: مدلسازی روش شمع گذاری در نرم افزار Midas GTS NX.

با مشورت متخصص فنی نرم افزار Midas جناب دکتر الکساندر پلازا^۱، المان Embedded Pile به دلیل ارضای خواص مکانیکی شمع و همچنین ساده سازی در روند مدلسازی و اجرای مدل به عنوان المان شمع انتخاب شد.

به منظور مدلسازی صحیح روش شمع گذاری ابتدا شمع های درجا در مدل اجرا شدند و پس از آن حفاری تونل و اجرای شاتکریت صورت گرفت. پس از مرحله اعمال شمع ها در مدل و قبل از حفر تونل، جابجایی قائم در مدل رخ می دهد. دلیل این تنش ناشی از وزن شمع ها است که به لایه ها وارد می شود. مقدار بیشینه جابجای در جهت Z برابر $\frac{2}{3}$ میلیمتر است (شکل ۶-۱۶). از انجایی که شمع ها در کاهش نشست پس از حفر تونل تاثیر بیشتری دارد، می توان از نشست زمین پس از اعمال شمع صرف نظر کرد.

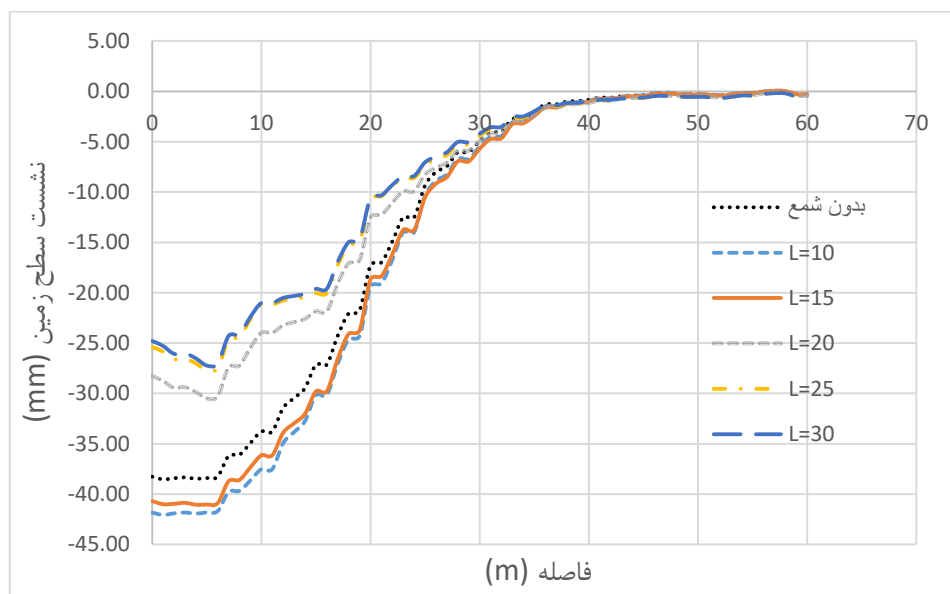
¹ Alexandre Plaza



شکل ۶-۱۶: کانتور جابجایی قائم پس از شمع گذاری و قبل از حفر تونل

۶-۳-۲-۱ تاثیر افزایش عمق شمع بر نشست سطح زمین

به منظور بررسی و مقایسه افزایش عمق شمع بر نشست سطح زمین در بالای تونل، شمع‌هایی با عمق‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ متر مدلسازی شد. سپس نشست سطح زمین در بالای تونل پس از اتمام حفاری اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل در شکل (۶-۱۷) ارائه شده است.



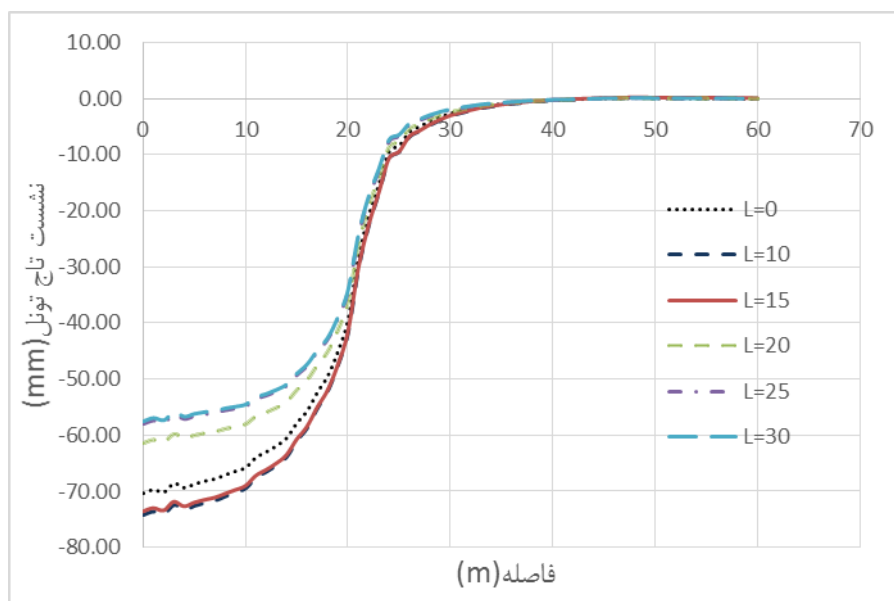
شکل ۶-۱۷: نمودار پروفیل طولی نشست سطح زمین در شمع‌هایی با عمق متفاوت.

همانطور که از نمودار بالا پیداست، وجود شمع‌هایی با عمق‌های ۱۰ و ۱۵ متر باعث افزایش نشست سطح زمین شده است. دلیل این امر قرار داشتن شمع در لایه‌های اول و دوم است. این لایه‌ها چسبندگی و مدول الاستیسیته پایین دارند که باعث کاهش مقاومت برشی و اصطکاک بین لایه و شمع می‌شود.

با افزایش عمق شمع به ۲۰ متر و بالاتر، سازه در لایه‌های سوم و چهارم قرار می‌گیرد. در این لایه‌ها بالابودن 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 عمق بیشتر از ۲۵ متر تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نشست ندارد. استفاده از شمع‌هایی با عمق بیشتر از ۲۰ متر موجب نشست سطح زمین کمتر از نشست مجاز می‌شود.

۶-۳-۲-۲ تاثیر افزایش عمق شمع بر نشست تاج تونل

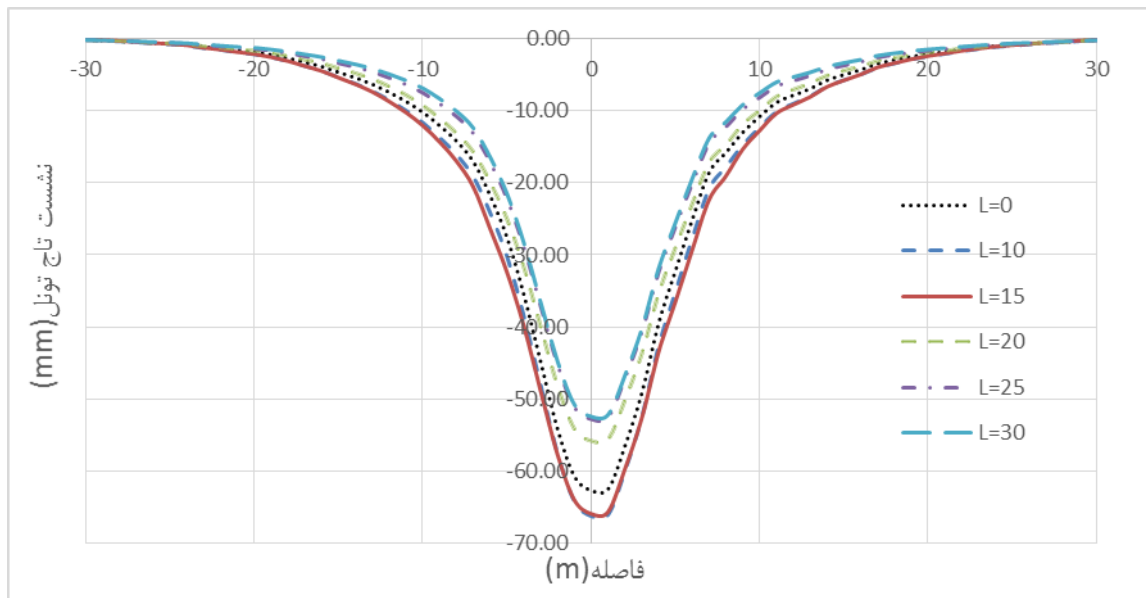
در این بخش به بررسی تاثیر شمع بر نشست تاج و سقف تونل در دو پروفیل طولی و عرضی پرداخته شده است. شکل زیر نشست تاج تونل در راستانی حفاری تونل را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۸: نمودار پروفیل طولی نشست در تاج تونل در عمق‌های مختلف شمع

با توجه به شکل (۶-۱۸) استفاده از روش شمع‌گذاری در حالتی که عمق شمع ۱۰ و ۱۵ متر باشد موجب افزایش جابجایی قائم در تاج تونل می‌شود. این نتیجه نیز در نشست سطح زمین مشاهده شد. 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 موجب افزایش مقاومت برشی و چسبندگی بین سازه و زمین می‌شود، پس از حفر تونل تنش‌های ایجاد شده در زمین از طریق شمع‌ها به این لایه‌ها منتقل شده باعث کاهش نشست در تاج تونل و سطح زمین می‌شود.

شکل (۶-۱۹) پروفیل عرضی نشست تاج تونل در فاصله ۱۲ متری از دهانه تونل را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۹: پروفیل عرضی نشست تاج تونل در ۱۲ متری دهانه تونل برای عمق‌های مختلف شمع.

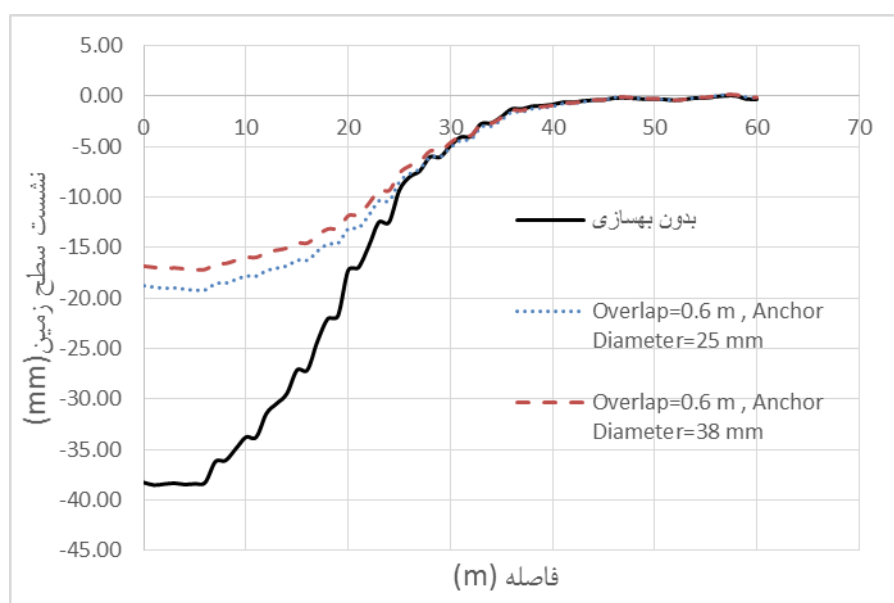
۳-۳-۶ مدل‌سازی روش فورپولینگ به همراه انکراژ

در این پروژه از المان خریای درنشانده شده برای انکراژ استفاده شده است. از آنجایی که استفاده از روش ریز شمع به تنهایی تأثیر 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 در هر دیواره قرار دارد (شکل ۶-۸). دو انکراژ در پایین دیوار با زاویه ۳۵ درجه و ۴ انکراژ با زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق در نظر گرفته شد.

این ریز شمع‌ها پس از هر مرحله گام حفاری (به طول ۱ متر) بر مدل اعمال شد.

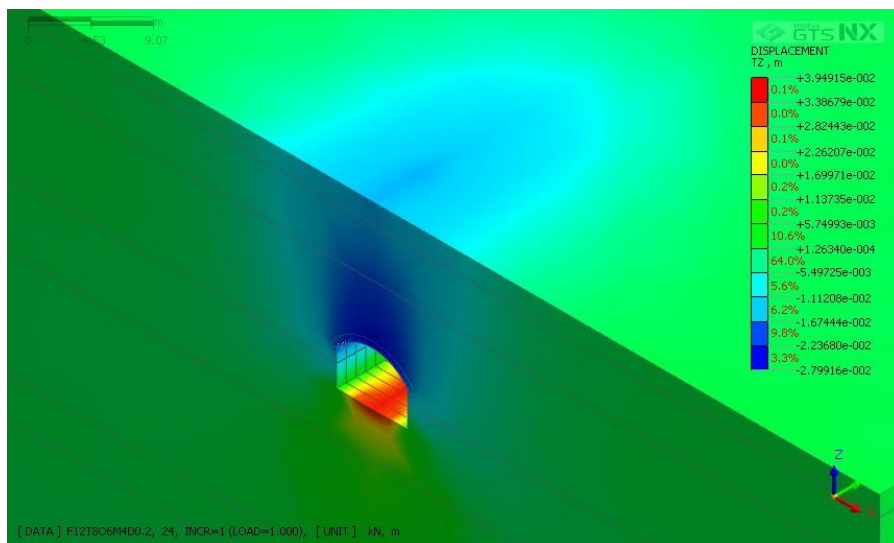
۶-۳-۳-۱ بررسی تاثیر قطر انکراژ بر نشست سطح زمین

مدلسازی انکراژهایی با قطرهای ۲۵ و ۳۸ میلی‌متر انجام شد که نتایج آن بر نشست سطح زمین در نمودار شکل (۶-۲۰) ارائه شده است. در این مدلسازی‌ها طول همپوشانی لوله‌های فورپولینگ ۶ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۶-۲۰: تاثیر افزایش قطر انکراژ بر نشست سطح زمین.

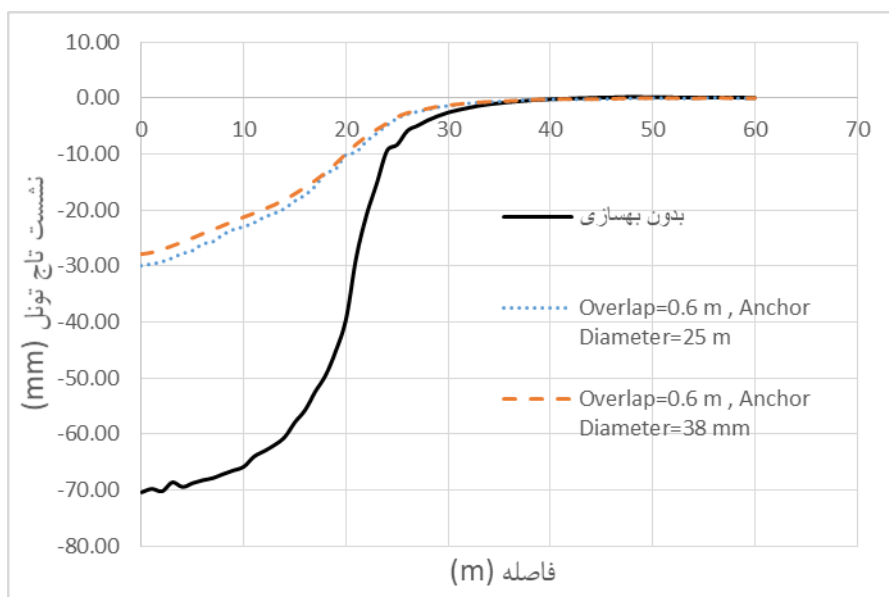
طبق نمودار بالا، استفاده از انکراژها در دیواره‌های تونل موجب کاهش نشست سطح زمین شده است. استفاده از انکراژ با قطر ۲۵ میلیمتر کاهش چشم‌گیری نداشته است (نسبت به منحنی روش فورپولینگ) اما با افزایش قطر به ۳۸ میلیمتر موجب کاهش بیشینه نشست به مقدار ۴ میلیمتر شده است. دلیل دیگر استفاده از انکراژها (همانگونه که در کانتور نشست قائم (شکل ۶-۲۱) قابل مشاهده است) کاهش بالازدگی کف تونل است. اینطور که پیداست استفاده از این روش موجب کاهش بالازدگی کف تونل می‌شود (کاهش تقریبی ۱ سانتی متر بالازدگی نسبت به مدل اولیه). بیشینه نشست سطح زمین در این روش از نشست سطح مجاز کمتر شده است.



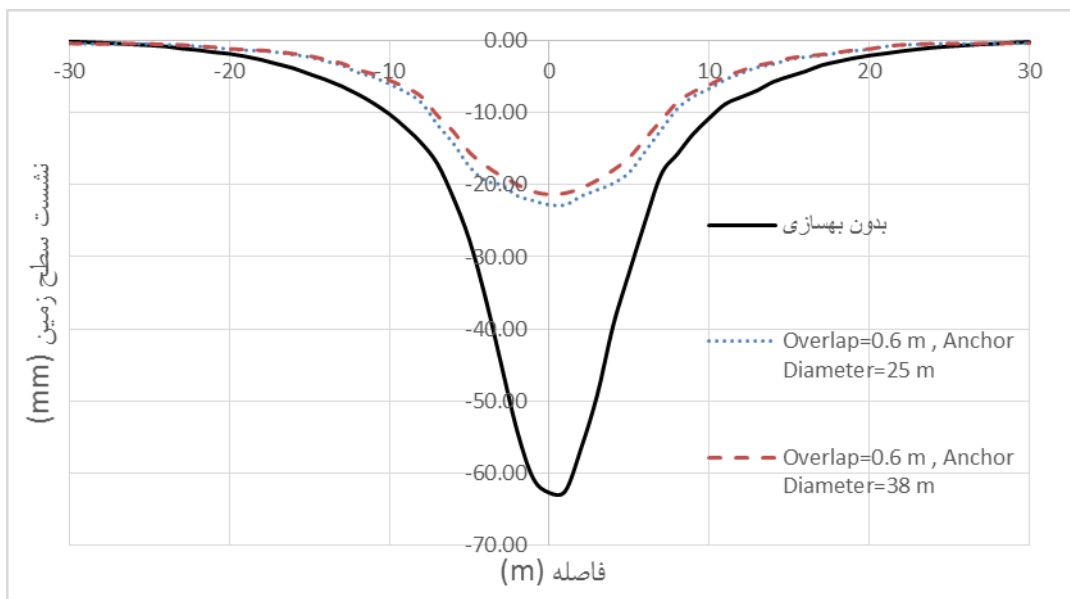
شکل ۶-۲۱: کانتور جابجایی قائم در روش فورپولینگ به همراه روش مهارگذاری با قطر ۳۸ میلیمتر.

۶-۳-۳-۲ بررسی تاثیر قطر انکراژ بر نشست تاج تونل

شکل (۶-۲۲) و شکل (۶-۲۳) به ترتیب پروفیل نشست تاج تونل در راستای طولی و عرضی (در فاصله ۱۲ متری) را نشان می‌دهد. استفاده از انکراژ در دیواره تونل جابجایی‌های قائم در تاج را کاهش داده است. استفاده از انکراژهایی با قطر ۲۵ و ۳۸ میلیمتر به ترتیب موجب کاهش ۳ و ۷ میلیمتری بیشینه نشست نسبت به روش فورپولینگ شده است.



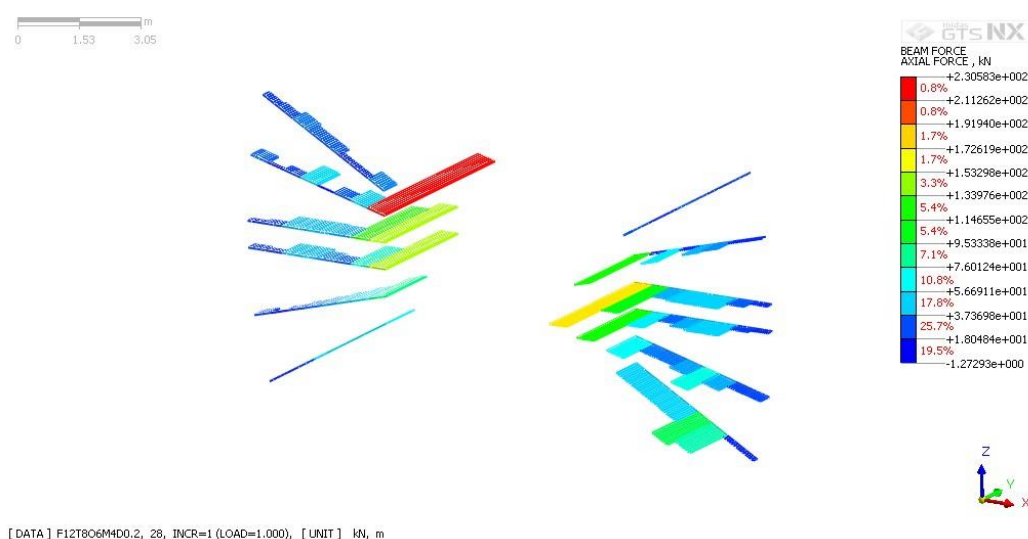
شکل ۶-۲۲: پروفیل طولی نشست در تاج تونل (روش فورپولینگ به همراه انکراژ)



شکل ۶-۲۳: پروفیل عرضی نشست در تاج تونل در فاصله ۱۲ متری از دهانه (روش فورپولینگ به همراه انکراژ)

۳-۳-۳-۶ بارهای وارد بر المان انکراژ

شکل (۶-۲۴) نیروی محوری در المان انکراژ نشان می‌دهد. بیشترین نیروی محوری در ابتدای انکراژ که در دیواره تونل واقع است به وجود آمده است. در این حالت نیز بیشینه نیروی ایجاد شده (230 kN) از نیروی مجاز المان انکراژ (330 kN) کمتر است که نشان دهنده عدم آسیب به انکراژها می‌باشد.

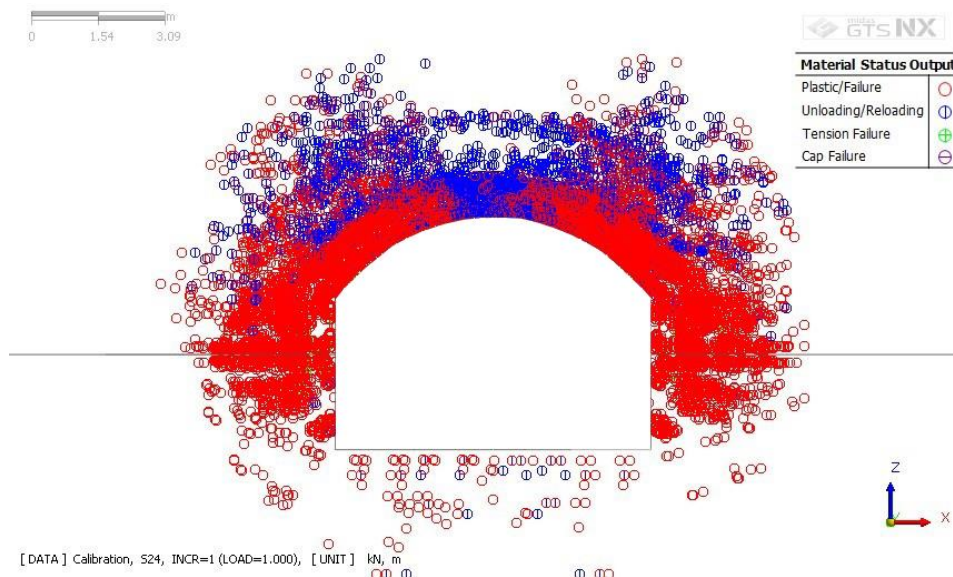


شکل ۶-۲۴: نیروی محوری در المان انکراژ

۴-۳-۶ 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 و دیواره به علت به علت وزن ناحیه پلاستیک اطراف آن افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند نقش مهمی در تحلیل پایداری تونل ایفا کند. وزن ناحیه پلاستیک منجر به توزیع تنش و در نهایت جابجایی اطراف تونل می‌شود (حیدری، ۱۳۹۶). تغییر شکل ناشی از ناحیه پلاستیک باعث افزایش نشست تاج و در لایه‌های که استحکام بالایی ندارند منجر به ریزش تاج و دیواره تونل می‌گردد.

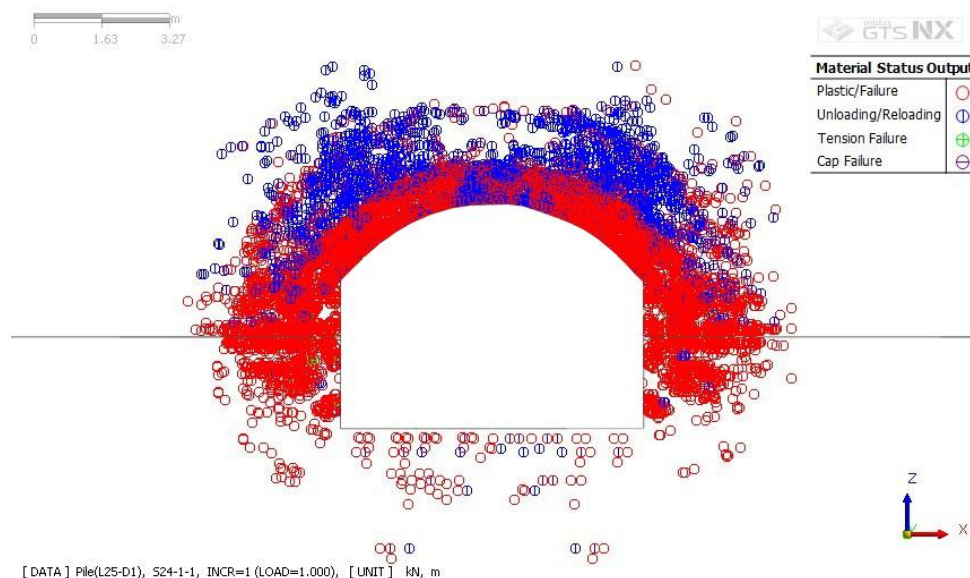
شکل (۶-۲۵) ناحیه پلاستیک ایجاد شده اطراف تونل را در حالت بدون بهسازی نشان می‌دهد. نقاط قرمز ناحیه پلاستیک را در تاج، دیواره تونل نشان می‌دهد. ناحیه بارگذاری-باربرداری نیز با نقاط آبی مشخص شده است. افزایش تراکم نقاط آبی نشان از جابجایی بالا در آن ناحیه دارد.



شکل ۶-۲۵: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در مدل اولیه.

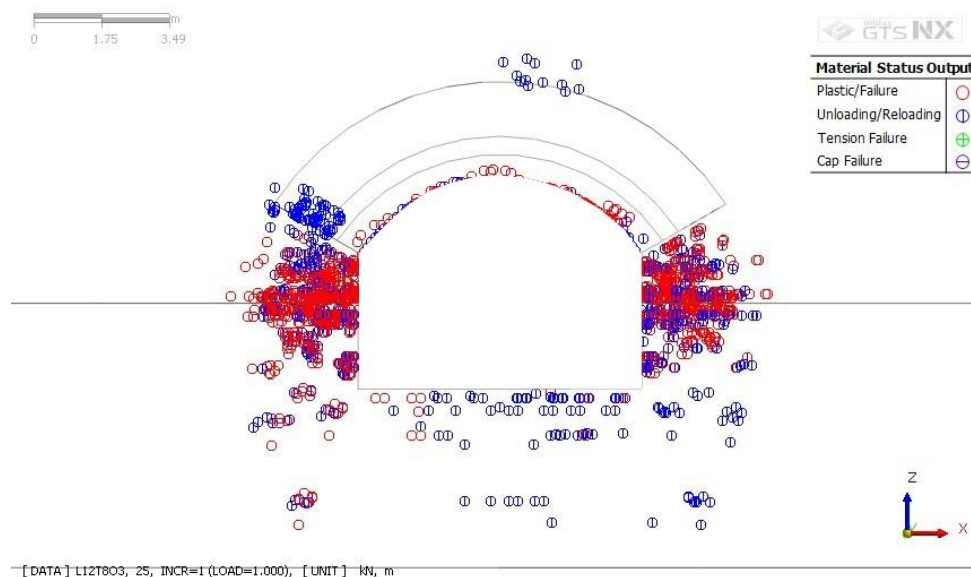
شکل (۶-۲۶) ناحیه پلاستیک اطراف تونل را در حالتی که از روش بهسازی شمع‌گذاری با طول ۲۵ متر استفاده شد را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، استفاده از روش شمع‌گذاری تاثیر

چندانی بر ناحیه پلاستیک اطراف تونل ندارد. با این حال تاحدودی باعث کاهش تراکم نقاط در ناحیه بارگذاری - باربرداری در تاج تونل شده است.



شکل ۶-۲۶: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در روش بهسازی شمع‌گذاری

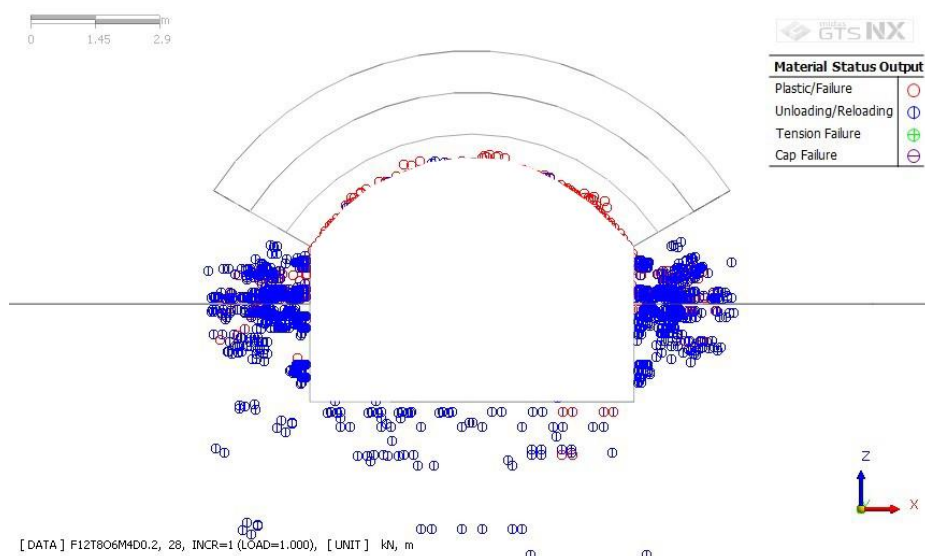
استفاده از روش بهسازی فورپولینگ به علت ایجاد ناحیه الاستیک در تاج تونل، به خوبی می‌تواند از ایجاد ناحیه پلاستیک جلوگیری کند (شکل ۶-۲۷). در این حالت تزریق دوغاب در اطراف لوله‌های فورپول باعث می‌شود که لایه بالای تونل رفتار الاستیک داشته باشد و جابجایی‌های ناشی از ناحیه پلاستیک به طرز چشم‌گیری کاهش یابد.



شکل ۶-۲۷: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (روش فورپولینگ)

هنگامی که از انکراژها در دیواره تونل استفاده شود، تراکم نقاط قرمز (ناحیه پلاستیک) به طور قابل توجه کاهش می‌یابد که در نهایت منجر به کاهش ریزش در دیواره و افزایش پایداری تونل می‌شود (شکل ۶-۲۸).

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



شکل ۶-۲۸: ناحیه پلاستیک ایجاد شده در اطراف تونل (روش فورپولینگ به همراه انکراژ)

همانطور که از شکل بالا پیداست، نقاط بارگذاری و باربرداری در دیواره تونل متمرکز شده‌اند. در صورتی که از انکراژهایی با مدول الاستیسیته و چسبندگی بالا استفاده شود به درستی می‌توان از تمرکز تنش در دیواره جلوگیری کرد.

۴-۶ جمع‌بندی

در این پژوهش به مدلسازی روش‌های بهینه سازی خاک جهت کاهش نشست سطح زمین در پروژه حفاری تونل دسترسی ایستگاه میدان خراسان واقع در خط ۶ مترو تهران پرداخته گردید. از آنجایی که پس از حفر ۲۰ متر از تونل دسترسی نشست بالایی در سطح زمین رخ داد و موجب ترک خوردن کف مغازه‌ها و ساختمان‌ها گردید روند حفاری این تونل جهت ارائه راهکارهای مناسب متوقف گردید. روش‌های بهینه‌سازی شمع‌گذاری، فورپولینگ و انکراژگذاری برای کاهش میزان این نشست مدل سازی شد.

نتایج نشان داد که تمامی روش‌های پیشنهاد شده موجب کاهش نشست سطح زمین شده است. در روش شمع‌گذاری با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای مکانیکی سازه و تغییر پارامتر هندسی نظیر طول

شمع، اقدام به بررسی تاثیر این پارامتر بر میزان نشست سطح زمین شد. بهینه ترین طول در این روش ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که روش فورپولینگ تاثیر بهتری در کاهش نشست نسبت به روش شمع گذاری داشته است. همچنین استفاده از انکراژها در دیواره های تونل موجب کاهش نشست سطح زمین و بالازدگی کف تونل شد.

گسترش ناحیه با رفتار پلاستیک در اطراف تونل می تواند نقش مهمی در تحلیل پایداری تونل ایفا کند. پس از حفر تونل و نصب پیش نگهدارنده شاتکریت بیشترین ناحیه پلاستیک در اطراف تونل ایجاد می شود. در حالتی که از روش شمع گذاری به عنوان روش بهسازی استفاده شود، تاثیر چندانی در کاهش ناحیه پلاستیک ندارد و تنها کمی در دیواره تونل را بهبود می بخشد. استفاده از روش فورپولینگ به علت ایجاد ناحیه الاستیک ناشی از تزریق دوغاب در تاج تونل، موجب کاهش رفتار پلاستیک شده و در نهایت نشست تاج تونل را کاهش می دهد. هنگامی که در روش فورپولینگ از انکراژها در دیواره تونل استفاده شود، ناحیه پلاستیک دیواره تونل کاهش می یابد در حالی که باعث افزایش آن در سینه کار تونل می شود.

استفاده از تمامی روش های بهسازی در کاهش نشست سطح زمین و تاج تونل مفید بوده اند. در تمامی روش ها بیشینه نشست سطح زمین از نشست مجاز (۳۵ میلیمتر) کمتر است.

۷ فصل هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادها

تونل‌سازی در محیط‌های شهری همواره خطرات خاص خود را داشته است. مهمترین قسمت قبل از حفاری این قبیل تونل‌ها، بررسی مسائل مرتبط با نشست سطح زمین است که با جان و مال مردم سروکار دارد زیرا اغلب این تونل‌ها از زیر ساختمان‌های مسکونی و تجاری عبور می‌کنند. تونل دسترسی ایستگاه میدان خراسان واقع در خط ۶ مترو تهران از قبیل تونل‌هایی است که هنگام حفاری موجب نشست غیرمجاز در سطح زمین شده است؛ به طوری که باعث ایجاد ترک و خسارت در کف ساختمان‌ها و مغازه‌ها شد.

در این پژوهش به مدلسازی تونل دسترسی ذکر شده جهت بررسی پایداری تونل و نشست ناشی از حفاری تونل پرداخته شده است. پس از آن از روش‌های بهسازی شمع‌گذاری، فورپولینگ و انکراژ جهت دستیابی به نشست مجاز در سطح زمین و پایداری بهتر تونل استفاده شد. برای انجام مدلسازی از نرم‌افزار اجزا محدود MIDAS GTS NX که از نرم‌افزارهای تخصصی در حوزه ژئوتکنیک و تونل‌سازی است استفاده شد. نتایج و پیشنهادات پژوهش به طور خلاصه ارائه شده است:

۲-۷ نتیجه گیری

نتایج حاصل از پژوهش به صورت زیر 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.
- 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 بالابودن مدول الاستیسیته و چسبندگی موجب افزایش مقاومت برشی و اصطکاک بین زمین و سازه شده و تاثیر چشم‌گیری در کاهش نشست سطح زمین دارد. شمع‌هایی با طول بیشتر از ۲۵ متر تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش نشست ندارند.
- استفاده از روش فورپولینگ تاثیر قابل توجهی بر کاهش نشست سطح زمین می‌گذارد؛ به گونه‌ای که باعث کاهش 50 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 می‌یابد. 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.

در این پژوهش مدلسازی روش‌های بهسازی با فرضیات ثابتی (ثابت بودن خصوصیات مکانیکی سازه‌های بهسازی و ...) انجام شده است. جهت بررسی و تحلیل دقیق‌تر موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- پیشنهاد می‌شود پیش از انجام هر گونه روش بهسازی از ابزارهای دقیق رفتارنگاری ساختمان نظیر شیب‌سنج و ترک‌سنج (در محل ترک‌های ایجاد شده) نصب شوند و داده‌های اندازه‌گیری قبل و پس از انجام روش بهسازی مقایسه و تحلیل شوند و با نتایج مدلسازی عددی مقایسه گردند.
- پیشنهاد می‌شود با توجه به عمق کم سازه زیرزمینی تحلیل دینامیکی تحت بارگذاری زلزله طرح انجام پذیرد.

۸ منابع

-اجل لوئیان ر، دادخواه ر، و حسین میرزایی ز، (۱۳۸۸)، کاربرد زمین‌شناسی مهندسی در تونل‌ها،
تالیف، انتشارات فرهیختگان علوی ۲۰۲

-اشرفی ح، (۱۳۸۵)، اصول و مبانی گودبرداری و سازه‌های نگهبان، دفتر تدوین و ترویج مقررات
ملی ساختمان.

-بخشنده امینه ح، زمزم م، (۱۳۹۴)، کنترل نشست زمین در تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های
شهری با انجام اقدامات اصلاح مؤثر در تونل خط ۷ متروی تهران، نشریه علمی پژوهشی مهندسی
معدن، دوره دهم، شماره ۲۷، صفحه ۴۵-۵۹

-خادمی خ، (۱۳۹۲)، تکنیک‌های عبور از گسله‌ها، نواحی خردشده ریزشی و جریان‌های تراوشی پرآب
و ناپایدار-تونل امامزاده هاشم، دهمین کنفرانس ملی تونل-فضاهای زیرزمینی و اهداف هزاره سوم

-خزائی ج، (۱۳۷۵)، کاربرد میل مهار در پایدارسازی توده‌های خاک و سنگ، دهمین کنفرانس
دانشجویی مهندسی عمران، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

-شرکت مهندسی آهاب، (۱۳۹۷)، دفتر فنی و اجرایی ایستگاه میدان خراسان، گزارشات دفتر فنی و
مهندسی، تهران، ایران

-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

-فرعی ا، و احترامی 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

- Aksoy, C. O., & 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.
- 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
- Benmokrane, B., Chennouf, A. and Mitri, H.S., (1995) "Laboratory Evaluation of Cement-Based and Grouted Anchors." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Volume 32, Issue 7, October, Pages 633-642.
- Bilotta, E. and Russo, G. 2010. "Use of a line of piles to prevent damages induced by tunnel excavation". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 137(3): 254-262.
- Bizjak, K. F., & Petkovšek, B. (2004). Displacement analysis of tunnel support in soft rock around a shallow highway tunnel at Golovec. *Engineering Geology*, 75(1), 89-106.
- Burkovič, K., Smirakova, M., & Mateckova, P. (2017). Testing and Modelling of Concrete Pile Foundations. In *Key Engineering Materials* (Vol. 738, pp. 287-297). Trans Tech Publications Ltd.
- CEN, (2009), "Execution of Special Geotechnical Work - Ground Anchors", European Committee for Standardization.
- Chaouch, A., & Briaud, J. L. (1992). Pull out test on a drilled and grouted pile loaded from the bottom. Res. Rep. to UNOCAL Corp.
- Chang-fu, C., 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, *J. Cent. South Univ. Technol.*,15:106-111.
- Duncan, A.U., Wyllie, C., (1992) "Foundation on Rock" E. & FN Spon an imprint of routledge London and New york, Tokyo, Melbourne Madras
- Das, B. M. (1990). Principles of geotechnical engineering. PWS Publishing Company.
- Fantera, L., Rampello, S. and Masini, L. 2016. "A mitigation technique to reduce ground settlements induced by tunnelling using diaphragm walls". *Proc. Eng.*, 158: 254-259
- Fasani, M., Ammann, E., & Rüttimann, M. (2012). Tunnel San Fedele. *Geomechanics and Tunnelling*, 5(2), 135-148.

-FHWA, (1999) "Geotechnical Engineering Circular No.4, Ground Anchors and Anchored Systems", Publication FHWA0-IF-99-015, Federal Highway Administration, Washington, D.C., pp:06-08.

-Harazaki, I., Aono, H., Matsuda, A., Aoki, T., & Hakoishi, Y. (1998). Field observation of large tunnel supported by umbrella method: Case of Maiko Tunnel in Kobe, Japan. Proc. of the World Tunnel Cong, 98, 1009-1014.

-Hefny, A. M., Tan, W. L., Ranjith, P., Sharma, J., & Zhao, J. (2004, July). Numerical analysis for umbrella arch method in shallow large scale excavation in weak rock. In tunneling and Underground Space Technology. Underground Space for Sustainable Urban Development. Proceedings of the 30th ITA-AITES World Tunnel Congress Singapore, 22-27 May 2004 (Vol. 19, No. 4-5).

-Hisatake, M., & Ohno, S. (2008). Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(2), 120-127.

-Kamata, H., & Mashimo, H. (2003). Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting. Tunnelling and Underground Space Technology, 18(2-3), 205-212.

-Kavitha, P. E., Beena, K. S., & Narayanan, K. P. (2016). A review on soil-structure interaction analysis of laterally loaded piles. Innovative Infrastructure Solutions, 1(1), 14.

-Kitiyodom, P., Matsumoto, T., & Kawaguchi, K. (2005). A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunnelling. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 29(15), 1485-1507.

-Lee, Y. J. and Yoo, C. S. 2006. Behaviour of a bored tunnel adjacent to a line of loaded piles. Tunn. Undergr. Sp. Tech., 21(3-4): 370.

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

-Lunardi, P. (2008). Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS). Springer Science & Business Media.

-Marinos, P., & Tsiambaos, G. (2010). Tunnels under construction in Greece: tunnel Platanos. National Technical University of Athens, Athens.

Matsumoto, Y., Kurose, N., Inoue, T., Kurazono, M. and Nodomi, K. (2001). "New pre support method using pipe roof by semi shield and chemical grouting for shirssu fill", Modern Tunnelling Science and Technology, Adachi et al. (eds.), Swets

&Zeitlinger,pp.751-756.

-Mollahasani, A., (2014) “Application of Submerged Grouted Anchors in Sheet Pile Quay Walls.” Ph.D .thesis, Dipartimento di ingegneria civile, ambientale e dei materiali.

-MIDAS (2017) GTS NX user manual (version 2017).

-Muraki, Y. (1997). The umbrella method in tunnelling (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

- Nishimaki, A., Mitarashi, Y., & Uematsu, S. (1995). Study on the effects of the AGF method (Proposal of a simplified AGF design technique). In South East Asian Symposium on Tunnelling and Underground Space Development (pp. 125-132).

-Ocak, I. (2008). Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(6), 674-681.

- Ohtsu, H., Hakoishi, Y., Nago, M., & Taki, H. (1995). A prediction of ground behaviour due to tunnel excavation under shallow overburden with long length forepilings. In South East Asian Symposium on Tunnelling and Underground Space Development, Japan Tunnelling Association, Bangkok (pp. 157-164).

-Oke, J., Vlachopoulos, N., & Marinos, V. (2014). Umbrella arch nomenclature and selection methodology for temporary support systems for the design and construction of tunnels. Geotechnical and geological engineering, 32(1), 97-130.

-Peila, D. (1994). A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face. Geotechnical & Geological Engineering, 12(3), 145-168.

-Pelizza, S., & Peila, D. (1993). Soil and rock reinforcements in tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology, 8(3), 357-372.

-Potts, D. M. Zdravkovic (1999): Finite element analysis in geotechnical engineering, Theory.

-Sabatini, P.J., Pass, D.G. and Bachus, R.C., (1999) “geotechnical engineering circular no. 4. Ground Anchors and Anchored Systems”. FHWA-IF-99-015, Federal Highway Administration (FHWA), Washington, DC.

- Sadaghiani, M. H., & Dadizadeh, S. (2010). Study on the effect of a new construction method for a large span metro underground station in Tabriz-Iran. *Tunnelling and underground space technology*, 25(1), 63-69.
- Schweiger, H. F. (2008). The role of advanced constitutive models in geotechnical engineering. *Geomechanik und Tunnelbau: Geomechanik und Tunnelbau*, 1(5), 336-344.
- Vardakos, S. (2007). Back-analysis methods for optimal tunnel design (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Vlachopoulos, N., Diederichs, M. S., Marinos, V., & Marinos, P. (2013). Tunnel behaviour associated with the weak Alpine rock masses of the Driskos Twin Tunnel system, Egnatia Odos Highway. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1), 91-120.
- Volkman, G. M., & Schubert, W. (2006, November). Contribution to the design of tunnels with pipe roof support. In *Asian Rock Mechanics Symposium*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd..
- Volkman, G. M., & Krenn, F. (2009). Back-calculated interacting loads on pipes of pipe umbrella support systems. In *ITA-AITES world Tunneling Congress* (pp. 23-28).
- Volkman, G. M., & Schubert, W. (2008, September). Tender document specifications for pipe umbrella installation methods. In *Proceedings of the ITA-AITES World Tunneling Congress* (Vol. 1, pp. 285-293).
- Volkman, G. M., & Schubert, W. (2007, May). Geotechnical model for pipe roof supports in tunneling. In *Ing. Conference Underground Space—the 4th Dimension of Metropolises*, Barták, Hrdina, Romancov & Zlámál (eds), Taylor & Francis Group, London.
- Wang, H., & Jia, J. (2008, December). Analytical method for mechanical behaviors of pipe roof reinforcement. In *2008 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering* (Vol. 3, pp. 352-357). IEEE.

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 current 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 forepoling 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 improvement methods have been useful in reducing ground settlement and tunnel crown. Also, In all methods, the maximum ground settlement level is less than the allowed session (35 mm). The use of the Forepoling method has also reduced the maximum of 50 % of the ground settlement level.

Keywords:

forepoling pre-consolidation method, numerical modeling, anchoring improvement method, piling method, finite element method



Shahrood University Of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Tunnel and Underground Spaces

Numerical modeling of ground improvement methods
induced by metro tunnels
(Case study: Tehran metro line 6)

By: Mahdi Tahmasebi

Supervisor:

Dr. Majid Nikkhah

Advisor:

Hasan Yazarloo

December 2020