

صلى الله عليه وسلم



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
رشته‌ی مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی روش‌های حفاری ایستگاه‌های زیرزمینی مترو
و انتخاب روش مناسب با بررسی فنی و هزینه‌ای
(مطالعه‌ی موردی خط ۶ متروی تهران)

نگارنده: وحید نعمتی

استاد راهنما

دکتر شکرا... زارع

استاد مشاور:

دکتر رامین رفیعی

شهریورماه ۱۳۹۷

با تشکر و قدردانی از جناب آقای دکتر زارع استاد راهنما و جناب آقای دکتر رفیعی استاد مشاور

محترم و کلیه‌ی دوستان و عزیزانی که حقیر را در انجام این تحقیق یاری رساندند.

تعهدنامه

اینجانب وحید نعمتی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تونل و فضاهاى زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **بررسی روش‌های حفاری ایستگاه‌های زیرزمینی مترو و انتخاب روش مناسب با بررسی فنی و هزینه‌ای (مطالعه‌ی موردی خط ۶ متروی تهران)** تحت راهنمایی دکتر شکرآ... زارع متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های 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 ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه صنعتی شاهرود و یا **Shahrood University of Technology** 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 می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) 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

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به گسترش روزافزون استفاده از فضاهای شهری، بهره‌برداری از فضاهای زیرزمینی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. یکی از موارد چالش برانگیز در حفر فضاهای زیرزمینی بزرگ در مناطق شهری، حفر ایستگاه‌های مترو است. از آنجا که اکثر شهرها در مناطق آبرفتی قرار دارند، حفر فضاهای زیرزمینی بزرگ همواره خطراتی دارد که عمده‌ترین آن‌ها مسئله‌ی نشست سطح زمین و تاثیر آن بر سازه‌های اطراف است. با توجه به اهمیت پایداری سطح زمین در مناطق شهری، تحلیل پایداری روش‌های مختلف حفر ایستگاه مترو از جمله عواملی است که باید توسط طراحان ایستگاه‌های مترو مورد توجه قرار گیرد. به طور معمول ایستگاه‌های مترو به روش حفر و پوش یا زیرزمینی اجرا می‌شوند و انتخاب روش اجرا به شرایط مختلفی چون عمق ایستگاه، مسایل ترافیکی، جنبه‌های اقتصادی و ... مرتبط است. بنابراین یکی دیگر از مسائلی که طراحان ایستگاه‌های مترو باید مورد توجه قرار دهند جنبه‌های شهری و هزینه‌ای روش‌های مختلف حفر ایستگاه مترو است. برای هر ایستگاه مترو، فقط یک روش حفاری وجود ندارد و معمولاً دو یا چند روش قابل استفاده است. هر روش دارای مزایا و معایبی است اما روشی مناسب است که علاوه بر داشتن معایب کمتر، ایمنی فضای زیرزمینی و پایداری دراز مدت آن را تأمین کرده و از نظر هزینه‌ای هم بهترین گزینه باشد. در این تحقیق پس از مطالعه‌ی تاریخچه‌ی روش‌های مختلف حفر ایستگاه مترو، دو روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی و روش گالری‌کناری بر مبنای مطالعات انجام گرفته، برای مقایسه انتخاب شده‌اند. برای بررسی پایداری هر دو روش انتخاب شده و مقایسه‌ی آن‌ها از روش عددی تفاضل محدود و نرم افزار FLAC3D استفاده شده است. از آنجا که پاسخ مدل‌سازی‌های عددی به داده‌های ورودی بسیار وابسته است، بنابراین اطلاعات ایستگاه مرزداران از خط ۶ متروی تهران که با روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی ساخته شده، برای مدل‌سازی هر دو روش مورد استفاده قرار گرفته است. پس از انتخاب نرم‌افزار عددی متناسب با شرایط مسئله، مدل سه بعدی از سازند دربرگیرنده‌ی ایستگاه در محیط نرم‌افزار FLAC3D ایجاد شده و پس از برقراری شرایط اولیه و مرزی مراحل مختلف حفر و نگهداری

ایستگاه با دو روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق‌بتنی و روش گالری‌کناری مدل‌سازی و باهم مقایسه شده‌اند. تاثیر برخی از پارامترهای خاک و المان‌های نگهداری نیز با استفاده از مدل‌سازی عددی تحلیل شده است. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی با نتایج واقعی ایستگاه مرزداران خط ۶ متروی تهران مقایسه شده است. همچنین هزینه‌ی تقریبی مجموع عملیات حفاری و نگهداری در هر دو روش بر مبنای فهرست بهای راه، باند و فرودگاه برآورد شده و باهم مقایسه شده‌اند. در نهایت مناسب‌ترین روش برای حفر ایستگاه متروی مرزداران از لحاظ پایداری و هزینه‌ای معرفی شده است.

کلمات کلیدی: (۱) نرم‌افزار FLAC3D (۲) ایستگاه مترو (۳) روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق‌بتنی

(۴) روش گالری‌کناری (۵) نشست سطح زمین

فهرست مطالب

۱- فصل ۱: کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ بیان مسئله	۲
۳-۱ اهمیت تحقیق	۳
۴-۱ اهداف تحقیق	۴
۵-۱ ساختار تحقیق	۴
۲- فصل دوم: طبقه‌بندی ایستگاه‌های مترو و معرفی روش‌های حفر ایستگاه‌های زیرزمینی مترو..	۵
۱-۲ مقدمه	۶
۲-۲ طبقه‌بندی انواع ایستگاه	۶
۳-۲ روش‌های حفاری ایستگاه‌های زیرزمینی مترو	۷
۱-۳-۲ روش حفاری مرحله‌ای	۷
۲-۳-۲ روش‌های مکانیزه	۱۵
۳-۳-۲ روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی	۱۸
۴-۳-۲ روش سیستم پیش‌نگهدارنده با استفاده از لوله‌های قوسی:	۲۰
۵-۳-۲ روش قوس سلولی:	۲۲
۶-۳-۲ روش استفاده از میکروتونل‌های قوسی:	۲۷

۲۸-۳-۲	روش تعریض تونل حفر شده توسط سپر با قطر بزرگ، با استفاده از شمع-تیر-قوس.
۳۰-۳-۲	روش تونلسازی کم عمق:.....
۳۱-۳-۲	روش طاق سوپر لوله‌ای.....
۳۳-۳-۲	جمع بندی ۱۰-۳-۲.....
۳۵-۳	فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته.....
۳۶-۳-۱	مقدمه:.....
۳۶-۳-۲	سابقه‌ی موضوع.....
۴۵-۳-۳	جمع بندی.....
۴۷-۴	فصل چهارم: مدل‌سازی روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی و روش گالری کناری.....
۴۸-۴-۱	مقدمه.....
۴۸-۴-۲	انتخاب نرم‌افزار مناسب برای حل مساله.....
۴۸-۴-۳	معرفی نرم‌افزار FLAC3D.....
۴۹-۴-۴	روند مدل‌سازی عددی سه بعدی با نرم‌افزار FLAC3D.....
۵۰-۴-۵	معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه.....
۵۰-۴-۶	تعیین مدل و خصوصیات مواد.....
۵۱-۴-۷	تعیین خصوصیات فصل مشترک لایه‌ها.....
۵۲-۴-۸	شرایط اولیه و مرزی.....

۵۳	۹-۴ مدلسازی روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی.....
۵۳	۱-۹-۴ مشخصات هندسه‌ی مدل.....
۵۴	۲-۹-۴ تعادل اولیه.....
۵۶	۳-۹-۴ مراحل حفر و نگهداری ایستگاه.....
۶۰	۴-۹-۴ نتایج مدلسازی روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی.....
۶۴	۵-۹-۴ اعتبار سنجی.....
۶۵	۱۰-۴ مدلسازی روش گالری کناری :.....
۶۵	۱-۱۰-۴ مشخصات هندسه‌ی مدل.....
۶۶	۲-۱۰-۴ تعادل اولیه.....
۶۷	۳-۱۰-۴ مراحل حفاری و نگهداری ایستگاه.....
۷۰	۴-۱۰-۴ نتایج مدل‌سازی روش گالری کناری.....
۷۴	۱۱-۴ جمع‌بندی و تحلیل نتایج.....
۷۷	۵- فصل پنجم: مقایسه‌ی هزینه‌ای دو روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی و گالری کناری.....
۷۸	۱-۵ مقدمه.....
۷۸	۲-۵ محاسبه‌ی هزینه‌حفر و نگهداری روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی.....
۷۸	۱-۲-۵ تونل اولیه.....
۸۰	۲-۲-۵ ریب‌ها.....
۸۱	۳-۲-۵ شمع‌ها.....
۸۲	۴-۲-۵ طبقه‌ی بالا.....
۸۳	۵-۲-۵ طبقه‌ی پایین.....

- ۵-۲-۶ مجموع هزینه‌های روش روش پیشنهادکننده‌ی طاق بتنی برای ده متر طول.....۸۴
- ۵-۳-۳ محاسبه‌ی هزینه‌حفر و نگهداری روش گالری کناری.....۸۵
- ۵-۳-۱ حفاری ایستگاه.....۸۵
- ۵-۳-۲ شاتکریت کل ایستگاه.....۸۶
- ۵-۳-۳ هزینه تخریب دیوارهای حائل میانی.....۸۶
- ۵-۳-۴ مجموع هزینه‌های روش گالریکناری در ۱۰ متر طول.....۸۷
- ۵-۴ جمع‌بندی و تحلیل نتایج مقایسه‌ی هزینه‌های دو روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی و گالری کناری.....۸۷
- ۶- فصل ششم: آنالیز حساسیت.....۹۱
- ۶-۱ مقدمه۹۲
- ۶-۲ تاثیر مدول الاستیسیته خاک بر روی نشست سطح زمین۹۲
- ۶-۲-۱ بررسی حساسیت مدول الاستیسیته‌ی خاک در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی۹۳
- ۶-۲-۲ بررسی حساسیت مدول الاستیسیته‌ی خاک در روش گالری‌کناری.....۹۴
- ۶-۳ تاثیر مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری ایستگاه بر روی نشست سطح زمین۹۵
- ۶-۳-۱ بررسی حساسیت مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی۹۶
- ۶-۳-۲ بررسی حساسیت مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری در روش گالری‌کناری.....۹۸
- ۶-۴ تاثیر نسبت پواسون المانهای نگهداری ایستگاه بر روی نشست سطح زمین.....۹۹

۱-۴-۶	بررسی حساسیت نسبت پواسون المان‌های نگهداری در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی.....	۱۰۰
۲-۴-۶	بررسی حساسیت نسبت پواسون المان‌های نگهداری در روش گالریکناری.....	۱۰۲
۵-۶	تاثیر فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت.....	۱۰۳
۱-۵-۶	بررسی تاثیر فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی.....	۱۰۴
۲-۵-۶	تاثیر فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش گالری کناری.....	۱۰۵
۶-۶	جمع‌بندی و تحلیل نتایج.....	۱۰۷
۷-۷	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....	۱۰۹
۱-۷	نتیجه‌گیری.....	۱۱۰
۲-۷	پیشنهادات.....	۱۱۱
۸-۸	منابع.....	۱۱۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ تصویر مقطع تونل در روش گالری‌کناری ۹
- شکل ۲-۲ ترتیب حفاری در روش دیافراگم میانی ۱۱
- شکل ۳-۲ مراحل حفاری و احداث ستون در روش ستون میانی ۱۲
- شکل ۴-۲ روش حفاری طاق و پا طاق ۱۳
- شکل ۵-۲ بهینه شده برای انتخاب روش حفر مناسب بر مبنای قطر دهانه‌ی تونل و نسبت مقاومت به تنش ۱۴
- شکل ۶-۲ تونل آزادراه چهارباندی حفر شده به روش دوال ساید دریافت در مجاورت یک شیب کم عمق ۱۴
- شکل ۷-۲ مراحل نصب سپر تعریض شده و حفر فضای زیرزمینی ۱۶
- شکل ۸-۲ سپر دومقطعی عمودی و ماشین سپر سه مقطعی ۱۷
- شکل ۹-۲ نمایی از ماشین پیش تونل سازی ۱۸
- شکل ۱۰-۲ تصویر نمادین مراحل اجرای روش یش نگهدارنده‌ی طاق بتنی ۱۹
- شکل ۱۱-۲ سیستم پیش نگهدارنده‌ی طاق بتنی که قبل از حفاری نهایی اجرا میشود ۲۰
- شکل ۱۲-۲ مرحله‌ی پایانی حفر و نگهداری ایستگاه به روش سیستم پیش نگهدارنده با استفاده از لوله‌های قوسی ۲۱
- شکل ۱۳-۲ مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری موقت ودائم ۲۱
- شکل ۱۴-۲ نمای کلی از روش قوس سلولی ۲۳
- شکل ۱۵-۲ فعالیت همزمان کارگاه شفت لوله رانی و تونل کناری ۲۴
- شکل ۱۶-۲ مراحل ساخت قوس سلولی ۲۶
- شکل ۱۷-۲ تصویر نمادین ایستگاهی در میلان که به روش قوس سلولی ساخته شده است ۲۷

- شکل ۲-۱۸ نمایی کامل از ایستگاه VENEZIA ۲۷
- شکل ۲-۱۹ نمونه ای از سیستم پیش نگهدارنده با میکروتونل های قوسی ۲۸
- شکل ۲-۲۰ مراحل توسعه روش PBA ۲۹
- شکل ۲-۲۱ قرارگیری لوله ها در روش PBA ۳۲
- شکل ۲-۲۲ سازه ی نهایی ایستگاه در روش PBA ۳۲
- شکل ۳-۱ ماشین سپر سه مقطعی ۳۹
- شکل ۳-۲ تصویر نمادین روش پیش نگهدارنده با استفاده از لوله های قوسی ۴۰
- شکل ۳-۳ (الف) هندسه ی مدل روش حفاری ترتیبی (ب) میزان نشست سطح زمین در ایستگاه برای گام های پیشروی مختلف ۴۱
- شکل ۳-۴ (الف) هندسه ی مدل روش پیش نگهدارنده ی طاق بتنی (ب) میزان نشست سطح زمین در ایستگاه برای فاصله داری های مختلف لوله های نگهدارنده ۴۲
- شکل ۳-۵ (الف) هندسه ی مدل روش حفاری ترتیبی با استفاده از ستون میانی (ب) میزان نشست سطح زمین در ایستگاه برای گام های پیشروی مختلف ۴۲
- شکل ۰-۶ مقایسه ی مقادیر تنش فشاری با مقاومت مجاز در فاصله داری های مختلف برای قسمت های مختلف ایستگاه ۴۳
- شکل ۰-۷ مقایسه ی نشست سطح در دو روش گالری کناری و پیش نگهدارنده ی طاق بتنی ۴۴
- شکل ۴-۱ روند نمادین حل مسائل با نرم افزار ۵۰
- شکل ۴-۲ هندسه ی کامل مدل در روش ۵۴
- شکل ۴-۳ . تاریخچه نیروی نامتعادل ۵۵
- شکل ۴-۴ کانتور جابجایی قائم ۵۶
- شکل ۴-۵ کانتور تنش قائم ۵۶
- شکل ۴-۶ سازه نگهبان (شمع و ریب) ۵۷

- شکل ۴-۷ تونل اولیه. رنگ زرد خاک، رنگ قرمز شاکریت و رنگ صورتی لاینینگ است..... ۵۸
- شکل ۴-۸ تصاویری از مراحل حفر طبقه بالا. رنگ زرد خاک، رنگ قرمز شاکریت و رنگ صورتی لاینینگ و شمع و ریب است..... ۵۸
- شکل ۴-۹ حفر و نگهداری طبقه‌ی بالا بصورت کامل..... ۵۹
- شکل ۴-۱۰ تصاویری از مراحل حفر طبقه‌ی پایین..... ۵۹
- شکل ۴-۱۱ سازه نگهبان و نگهداری اصلی پس از اتمام ساخت..... ۶۰
- شکل ۴-۱۲ جابجایی حاصل از حفر ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی از نمای روبرو..... ۶۰
- شکل ۴-۱۳ مقطع طولی از جابجایی حاصل از حفر ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی..... ۶۱
- شکل ۴-۱۴ توزیع نواحی پلاستیک در مدل حاصل از حفر ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی از نمای روبرو..... ۶۲
- شکل ۴-۱۵ مقطع طولی از توزیع نواحی پلاستیک در مدل حاصل از حفر ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی..... ۶۲
- شکل ۴-۱۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در مرکز مدل از ابتدا تا انتهای مدل..... ۶۳
- شکل ۴-۱۷ پروفیل عرضی نشست سطح زمین در مرکز مدل..... ۶۳
- شکل ۴-۱۸ نمودار نشست سطح زمین در مرکز ایستگاه در طول یک سال و نیم پس از اتمام ایستگاه..... ۶۴
- شکل ۴-۱۹ مقایسه‌ی میزان نشست سطح حاصل از مدلسازی در مرکز ایستگاه با بیشترین نشست سطح ثبت شده توسط ابزار دقیق نصب شده در ایستگاه..... ۶۴
- شکل ۴-۲۰ هندسه‌ی کامل مدل..... ۶۵
- شکل ۴-۲۱ تاریخچه نیروی نامتعادل بلوک..... ۶۶
- شکل ۴-۲۲ کانتور جابجایی قائم..... ۶۷
- شکل ۴-۲۳ کانتور تنش قائم..... ۶۷

- شکل ۴-۲۴ حفر ۱۸ متر ابتدایی و اعمال شاکریت در طبقه‌ی بالا..... ۶۸
- شکل ۴-۲۵ حفر ۱۸ متر ابتدایی و احداث ۶ متر اول از نگهداری اصلی در طبقه‌ی بالا..... ۶۸
- شکل ۴-۲۶ حفر کامل طبقه‌ی بالا..... ۶۹
- شکل ۴-۲۷ حفر ۱۸ متر اول و اعمال ۶ متر اول نگهداری اصلی در طبقه‌ی پایین..... ۶۹
- شکل ۴-۲۸ حفر و نگهداری دو طبقه بصورت کامل..... ۷۰
- شکل ۴-۲۹ جابجایی حاصل از حفر ایستگاه به روش گالری کناری از نمای روبرو..... ۷۰
- شکل ۴-۳۰ مقطع طولی از جابجایی حاصل از حفر ایستگاه به روش گالری کناری..... ۷۱
- شکل ۴-۳۱ توزیع نواحی پلاستیک در مدل بعد از حفر ایستگاه به روش گالری کناری از نمای روبرو
..... ۷۱
- شکل ۴-۳۲ مقطع طولی توزیع زون‌های پلاستیک در مدل بعد از حفر ایستگاه به روش گالری کناری
..... ۷۲
- شکل ۴-۳۳ پروفیل طولی نشست سطح زمین از ابتدا تا انتهای مدل..... ۷۳
- شکل ۴-۳۴ پروفیل عرضی نشست سطح زمین در مرکز مدل..... ۷۳
- شکل ۴-۳۵ مقایسه‌ی پروفیل عرضی نشست سطح زمین حاصل از هر روش در مرکز مدل..... ۷۴
- شکل ۴-۳۶ مقایسه‌ی پروفیل طولی نشست سطح زمین حاصل از هر روش در مرکز مدل..... ۷۵
- شکل ۵-۱ سطح مقطع قسمت‌های مختلف روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی از نمای روبرو..... ۷۹
- شکل ۵-۲ مقایسه‌ی هزینه‌ی حفاری دو روش "گالری‌کناری" و "پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی" در هر
متر..... ۸۸
- شکل ۵-۳ مقایسه‌ی هزینه‌ی نگهداری (شاکریت و لاینینگ) دو روش "گالری‌کناری" و "پیش-
نگهدارنده‌ی طاق بتنی" در هر متر..... ۸۹
- شکل ۵-۴ مقایسه‌ی هزینه‌ی کل (حفر و نگهداری) دو روش "گالری‌کناری" و "پیش‌نگهدارنده‌ی
طاق بتنی" در هر متر..... ۸۹

- شکل ۱-۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی خاک ۹۳
- شکل ۲-۶ پروفیل عرضی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی خاک ۹۴
- شکل ۳-۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش گالری‌کناری برای مقادیر مختلف مدول ۹۵
- شکل ۴-۶ پروفیل عرضی نشست سطح زمین در روش گالری‌کناری برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی خاک ۹۵
- شکل ۵-۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری ۹۷
- شکل ۶-۶ گسترش عرضی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری ۹۷
- شکل ۷-۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش گالری‌کناری برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری ۹۸
- شکل ۸-۶ گسترش عرضی نشست سطح زمین در روش گالری‌کناری برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری ۹۹
- شکل ۹-۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف نسبت پواسون المان‌های نگهداری ۱۰۱
- شکل ۱۰-۶ گسترش عرضی نشست سطح زمین در تاج ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف نسبت پواسون المان‌های نگهداری ۱۰۱
- شکل ۱۱-۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش گالری‌کناری برای مقادیر مختلف نسبت پواسون المان‌های نگهداری ۱۰۲
- شکل ۱۲-۶ گسترش عرضی نشست سطح زمین در روش گالری‌کناری برای مقادیر مختلف نسبت

- ۱۰۳.....یواسون المان‌های نگهداری.....
- شکل ۱۳-۶ نشست سطح زمین در فاصله‌داری‌های طولی مختلف اجرای لاینینگ و شاتکریت در
- ۱۰۵.....روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی.....
- شکل ۱۴-۶ پروفیل عرضی نشست سطح زمین در فاصله‌داری‌های طولی مختلف اجرای لاینینگ و
- ۱۰۵.....شاتکریت در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی.....
- شکل ۱۵-۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در فاصله‌داری‌های طولی مختلف اجرای لاینینگ و
- ۱۰۶.....شاتکریت در گالری کناری.....
- شکل ۱۶-۶ پروفیل عرضی جابجایی زمین در تاج ایستگاه در فاصله‌داری‌های طولی مختلف اجرای
- ۱۰۶.....لاینینگ و شاتکریت در روش گالری کناری.....

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ کاربرد روش طاق و پا طاق در محیط‌های مختلف ۱۵
- جدول ۱-۴ پارامترهای مدل برگرفته از ایستگاه S6 خط ۶ متروی تهران ۵۱
- جدول ۲-۴ پارامترهای شاکریت ۵۱
- جدول ۳-۴ پارامترهای لاینینگ ۵۱
- جدول ۴-۴ خواص انواع فصل مشترک‌های استفاده شده در مدل‌سازی ۵۲
- جدول ۵-۴ مقدار تنش در سه جهت ۵۳
- جدول ۶-۴ توصیف حالت‌های مختلف زون‌ها ۶۱
- جدول ۷-۴ توصیف حالت‌های مختلف زون‌ها ۷۲
- جدول ۱-۵ هزینه‌ی حفاری تونل اولیه به طول ۱۰ متر در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی ۷۹
- جدول ۲-۵ هزینه‌ی لاینینگ تونل اولیه به طول ۱۰ متر در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی ۸۰
- جدول ۳-۵ هزینه‌ی حفاری ریب‌ها در طول ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی ۸۰
- جدول ۴-۵ هزینه‌ی بتن ریزی ریب‌ها در طول ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی ۸۱
- جدول ۵-۵ هزینه‌ی حفاری شمع‌ها در طول ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی ۸۱
- جدول ۶-۵ هزینه‌ی بتن ریزی شمع‌های موجود در ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی ۸۲
- جدول ۷-۵ هزینه‌ی حفاری طبقه‌ی بالا در طول ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی ۸۲
- جدول ۸-۵ هزینه‌ی لاینینگ طبقه‌ی بالا برای ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی ۸۲

- ۸۳بتنی
- جدول ۹-۵ هزینه حفاری طبقه ی پایین برای ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش نگهدارنده ی طاق
- ۸۳بتنی
- جدول ۱۰-۵ هزینه لاینینگ طبقه ی پایین برای ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش نگهدارنده ی طاق
- ۸۴بتنی
- جدول ۱۱-۵ مجموع هزینه های روش پیش نگهدارنده ی طاق بتنی برای ده متر طول.....
- ۸۶جدول ۱۲-۵ هزینه حفاری ایستگاه به روش گالری کناری در طول ۱۰ متر.....
- ۸۶جدول ۱۳-۵ هزینه تخریب دیوار حائل در طول ۱۰ متر از ایستگاه در روش گالری کناری.....
- ۸۷جدول ۱۴-۵ هزینه لاینینگ برای ۱۰ متر از ایستگاه به روش گالری کناری.....
- ۸۷جدول ۱۵-۵ مجموع هزینه های روش SEM برای ده متر طول.....
- ۹۳جدول ۱-۶ مقادیر مختلف مدول الاستیسیته ی خاک.....
- ۹۶جدول ۲-۶ مقادیر مختلف مدول الاستیسیته ی المان های نگهداری.....
- ۱۰۰جدول ۳-۶ مقادیر مختلف نسبت پواسون المان های نگهداری.....
- ۱۰۴جدول ۴-۶ مقادیر مختلف فاصله داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت.....

کلیات

۱-۱ مقدمه

روش‌های مختلفی برای حفر ایستگاه‌های زیرزمینی مترو وجود دارد و انتخاب روش حفر مناسب تاثیر زیادی بر پایداری سطح زمین در محیط‌های شهری دارد. نشست سطح زمین پدیده‌ای است که پس از ایجاد فضای خالی در زیر زمین رخ می‌دهد. سازه‌های بزرگ زیرزمینی از جمله ایستگاه‌های مترو که در محیط شهری ساخته می‌شوند باعث نشست سطح زمین شده و پایداری بناهای سطحی را تهدید می‌کنند. طراحان ایستگاه‌های مترو همواره به دنبال روشی هستند که بیشترین پایداری و کمترین نشست سطح زمین در محیط‌های شهری را به دنبال داشته باشد. طراحان برای انتخاب روش حفر ایستگاه مترو هم مانند هر پروژه‌ی مهندسی دیگر به دنبال ارزان‌ترین روش ممکن قابل اجرا هستند از این رو برآورد و مقایسه‌ی هزینه‌های هر کدام از روش‌های حفر ایستگاه‌های مترو امری است که مورد توجه مهندسان قرار می‌گیرد.

۲-۱ بیان مسئله

از آنجا که بیشتر شهرها در زمین‌های نرم و آبرفتی قرار دارند، اجرای فضاهای زیرزمینی در زمین‌های شهری همواره همراه با خطراتی است که عمده‌ترین آن‌ها مسأله نشست سطح زمین و تأثیر آن بر سازه‌های اطراف است. بنابراین تأمین ایمنی فضاهای زیرزمینی در هنگام ساخت و پایداری دراز مدت آن از جمله عواملی است که باید توسط طراحان سازه‌های زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. در این خصوص ساخت فضاهای زیرزمینی بزرگ مقطع مانند ایستگاه‌های خطوط مترو از اهمیت خاصی برخوردار است. به طور معمول ایستگاه‌های مترو به روش حفر و پوش یا زیرزمینی اجرا می‌شوند و انتخاب روش اجرا به شرایط مختلفی چون عمق ایستگاه، مسایل ترافیکی، جنبه‌های اقتصادی و ... مرتبط است. ساخت ایستگاه در مناطق شهری باعث حذف توده‌ای از خاک و ایجاد تغییرات قابل توجهی در وضعیت تنش‌های اطراف آن می‌شود. این دست خوردگی خاک باعث ایجاد پدیده نشست در سطح زمین می‌شود. در نتیجه باید میزان این جابجایی‌های سطحی زمین در حین حفاری فضای مورد نظر و همچنین در پایان حفاری برآورد شده و از ایجاد خسارات محتمل جلوگیری شود. انتخاب

روش صحیح حفاری تأثیر زیادی در به حداقل رساندن نشست‌های سطحی داشته، ولی در عین حال تصمیمی پیچیده بوده که مستلزم در نظر گرفتن بسیاری از عوامل فنی، اقتصادی و محیطی است. برای ایستگاه‌های مترو فقط یک روش حفاری وجود ندارد و معمولاً دو یا چند روش قابل استفاده است. هر روش دارای مزایا و معایبی است، در نتیجه روشی مناسب است که علاوه بر داشتن معایب کمتر، ایمنی فضای زیرزمینی و پایداری دراز مدت آن را تأمین کرده و همچنین از نظر هزینه‌ای مناسب‌ترین گزینه باشد.

۱-۳ اهمیت تحقیق

امروزه با توجه به گسترش روز افزون محیط‌های شهری، افزایش تراکم سازه‌های سطحی و کمبود فضای لازم برای حمل و نقل درون شهری، نیاز به اجرای سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل و ایستگاه‌های زیرزمینی مترو در محیط‌های شهری بیش از گذشته احساس می‌شود. در شبکه‌ی مترو علاوه بر اهمیت مسیر عبور تونل، ایستگاه‌های مترو نیز از مهمترین سازه‌هایی هستند که دارای اهمیت اجرا است. با توجه به قرارگیری این سازه‌ها در بافت شهری، روش‌های حفاری و ساخت از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند و برحسب موقعیت آن نسبت به عوارض شهری، روش‌های مختلفی می‌تواند برای اجرا مطرح شود. یکی از عوامل مهم در اجرای ایستگاه‌های عمیق مترو در محیط‌های شهری انتخاب روش مناسب حفاری است که تأثیر زیادی در پایداری فضای اطراف تونل در حین حفاری، نشست‌های سطحی ناشی از حفاری و همچنین پایداری درازمدت محیط حفاری شده (ایستگاه مترو) دارد. امروزه در کشور شاهد استفاده از روش‌های مشابه و یکسان در اکثر پروژه‌ها هستیم و این دغدغه وجود دارد که آیا واقعاً همین روش‌ها بهترین و مناسب‌ترین هستند یا خیر؟ لازم است در اجرای روش‌های متداول زمان‌بر، غیر ایمن و پرهزینه‌ی مرسوم در کشور بازنگری شده و روش‌های ساخت سریع، مکانیزه، ایمن و کم هزینه جایگزین شود. بنابراین مطالعه و بررسی روش‌های جدیدتر و مقایسه‌ی آن‌ها با روش‌های مرسوم قدیمی از نظر پایداری و هزینه‌ای ضروری است.

۴-۱ اهداف تحقیق

اهدافی که در این تحقیق دنبال می‌شوند عبارت‌اند از :

- مقایسه‌ی نشست سطح زمین تحت تاثیر حفر ایستگاه مترو با روش‌های پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی و گالری کناری
- برآورد هزینه‌های حفر و نگهداری ایستگاه مترو با روش‌های پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی و گالری کناری و مقایسه‌ی آن‌ها باهم
- معرفی روش مناسب از نظر پایداری و هزینه‌ای

۵-۱ ساختار تحقیق

تحقیق حاضر شامل ۷ فصل است که فصل اول آن به کلیاتی همچون تعریف مسئله، ضرورت تحقیق و اهداف تحقیق می‌پردازد. فصل دوم شامل مروری بر مطالعات گذشته در زمینه‌های مشابه با موضوع این پژوهش است. در فصل سوم طبقه‌بندی ایستگاه‌های مترو و روش‌های مختلف حفر ایستگاه‌های زیرزمینی آورده شده است. در ابتدای فصل چهارم، انتخاب نوع مدل‌سازی عددی و نرم افزار بیان شده و در ادامه دو روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی^۱ و گالری کناری^۲ با توجه به اطلاعات ایستگاه مرزداران خط ۶ متروی تهران مدل‌سازی شده است. مراحل مدل‌سازی این دو ایستگاه و نتایج مدل‌سازی که نشست سطح زمین و جابجایی زمین در تاج هر ایستگاه بوده در این فصل آورده شده و به تحلیل نتایج پرداخته شده است. در فصل پنجم هزینه‌های حفر و نگهداری هر ایستگاه بر طبق فهرست‌بهای راه و باند برآورد و مقایسه شده است. فصل ششم به تحلیل حساسیت برخی از پارامترهای خاک و المان‌های نگهداری پرداخته شده است. و در نهایت در فصل هفتم نیز نتایج و پیشنهادات ارائه شده است.

¹ Concrete Arc Pre-Supporting System

² Side Drift

فصل دوم

طبقه‌بندی ایستگاه‌های مترو و معرفی روش‌های

حفر ایستگاه‌های زیرزمینی مترو

۱-۲ مقدمه

ایستگاه‌های مترو از نظر عمق قرارگیری نسبت به سطح زمین در سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند. بعضی از ایستگاه‌های کم عمق، با توجه به شرایط محیطی از قبیل فضای دسترسی و ... به روش سطحی کند و پوش^۱ حفاری می‌شوند که این روش خارج از موضوع تحقیق حاضر است. در این فصل انواع روش‌های حفاری ایستگاه‌های زیرزمینی مترو معرفی شده است. این روش‌ها را می‌توان به چند دسته‌ی کلی تقسیم بندی کرد که عبارتند از: روش‌های حفاری مرحله‌ای، روش‌های مکانیزه، روش‌های دارای سیستم پیش‌نگهدارنده و ...

۲-۲ طبقه‌بندی انواع ایستگاه

از نظر طبقه‌بندی کلی، موقعیت ایستگاه‌ها به دو دسته‌ی زیرزمینی و روزمینی تقسیم می‌شوند. در اصل عمق ایستگاه براساس تراز ریل تونل تعیین می‌شود. در شرایطی که پروفیل طراحی شده در مسیر مترو در روی زمین قرار گیرد، ایستگاه به صورت روزمینی و در شرایطی که پروفیل طراحی شده مسیر مترو در تراز زیر سطح زمین قرار گیرد، ایستگاه به صورت زیرزمینی طراحی می‌شود. به طور کلی سه نوع ایستگاه زیرزمینی در شبکه مترو پیش‌بینی می‌شود که تقسیم‌بندی آنها به شرح زیر است (مهندسین مشاور ساحل ۱۳۸۹):

- ایستگاه کم عمق^۲: عمق ریل تا سطح زمین کمتر از ۱۳ متر است.
- ایستگاه نیمه عمیق^۳: عمق ریل تا سطح زمین بین ۱۳ تا ۲۰ متر است.
- ایستگاه عمیق^۴: عمق ریل تا سطح زمین بیشتر از ۲۰ متر است.

¹ Cut & Cover

² Shallow Station

³ Station Medium Depth

⁴ Deep Station

۲-۳ روش‌های حفاری ایستگاه‌های زیرزمینی مترو

۲-۳-۱ روش حفاری مرحله‌ای (SEM^۱ یا NATM^۲)

روش حفر مرحله‌ای (SEM) که معمولاً به عنوان روش تونل‌سازی جدید اتریشی (NATM) شناخته می‌شود، یک مفهوم براساس مشاهده‌ی رفتار زمین در واکنش به احداث یک دهانه‌ی زیرزمینی است. در حالت کلاسیک SEM یا NATM تلاش می‌کند تا ظرفیت خودنگهداری زمین را به حد بهینه برساند که در نتیجه‌ی آن صرف جویی اقتصادی در نگهداری زمین حاصل شود. این روش در ابتدا در اوایل سال ۱۹۶۰ برای تونل‌سازی در محیط سنگی ارائه شده بود. NATM در اواخر دهه‌ی ۶۰ در زمین نرم در تونل‌های شهری کاربرد پیدا کرد و از آن به بعد از کاربرد بین‌المللی گسترده‌ای در محیط روستایی و شهری پیدا کرد. در دهه‌ی ۷۰ و اوایل دهه‌ی ۸۰ عبارت "روش شاتکریت" به کرات در آلمان و سوئیس استفاده شد. علاوه بر عبارت NATM، تحولات در انگلستان در اواخر دهه‌ی ۹۰ اجازه استفاده از عبارت "نگهداری با بتن اسپری شده" یا SCL^۳ را داد. عبارت "روش تونل‌سازی مرسوم" هم در اتریش و آلمان مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که این روش مبتنی بر مشاهده است عبارت "روش مشاهده‌ای" در بسیاری از کشورها معرفی و استفاده شد. عبارت "مرسوم" در مخالفت با روش استفاده از TBM^۴ توسط انجمن بین‌المللی تونل راه خود را به انتشارات باز کرد. در کشورهای آلمانی زبان از جمله آلمان و اتریش، استانداردهای جدید عبارت "روش تونل‌سازی چرخه‌ای" (CTM^۵) را استفاده می‌کنند. در ایالات متحده آمریکا در اواخر دهه‌ی ۷۰ و اوایل دهه‌ی ۸۰ عبارت تصویب شده، NATM بود. اما به تدریج این عبارت ترک شده و عبارت SEM جایگزین آن شد. امروزه SEM در آمریکا برای ساخت تونل‌ها، ایستگاه‌ها، چاه‌ها و سایر فضاهای زیرزمینی به طور فزاینده‌ای محبوب شده است. SEM انعطاف‌پذیری زیادی در هندسه ارائه می‌دهد

¹ New Ausrian Tunneling Method

² Sequential Excavation Method

³ Sprayed Concrete Lining

⁴ Tunnel Boring Machine

⁵ Cyclice Tunneling Method

به طوری که با این روش می توان دهانه‌هایی با هر اندازه ایجاد کرد. کاربرد SEM مستلزم تجارب عملی و مهارت اجرا است (Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels) (2009).

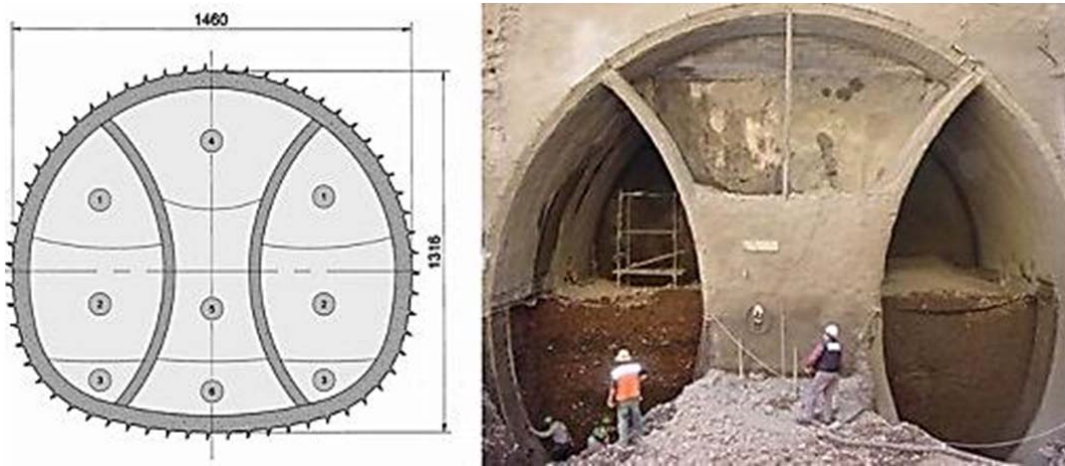
در بسیاری از کشورها به منظور حفاری به روش زیرزمینی از روش حفاری جدید اتریشی (NATM یا SEM) استفاده می‌شود. علت محبوبیت این روش سادگی ابزار حفر فضای زیرزمینی در آن و نیز انعطاف‌پذیری این روش در مواجهه با شرایط مختلف ژئوتکنیکی است. در این روش حفاری، طراحی متناسب با تغییر در پاسخ زمین مجاور فضای زیرزمینی که با ابزار دقیق پایش می‌شود، تغییر می‌کند (Tonon., 2010). در این روش با حفاری تدریجی فضای زیرزمینی، به خاک یا توده‌ی اجازه تغییر شکل داده می‌شود. پس از مقداری تغییر شکل و نصب سیستم نگهداری، تعادل نسبی خود را بدست آورد. روش اجرا در این حالت تابع شرایط خاک است و بر مبنای جنس خاک، حفاری ممکن است در کل سطح مقطع، نیمی از آن و یا در مقاطع کوچکتر انجام شود (Tonon., 2010). NATM بر این فلسفه استوار است که زمین پیرامون تونل به عنوان بخش جدا نشدنی سیستم نگهداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاکریت تغییر شکل‌پذیر اولیه اجازه‌ی تغییر شکل کنترل شده- ای به زمین می‌دهد که باعث توزیع مجدد بار در زمین می‌شود. کلید استفاده‌ی موفقیت آمیز از یک لایه‌ی به نسبت نازک ایجاد شده بر روی سطح این است که باعث جلوگیری از تمرکز تنش و ایجاد یک تماس تنگاتنگ بین نگهداری و زمین پیرامون تونل می‌شود و به عبارتی نگهداری اصلی را تقویت کرده و همچنین به عنوان نگهداری اولیه هم عمل می‌کند (Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels 2009).

شکل سطح مقطع تونل طوری طراحی می‌شود که با اصول SEM منطبق باشد و قوس خود نگهداری را در زمین پیرامون تونل فعال کند. برای تطبیق این اصول باید هندسه‌ی مقطع تونل منحنی باشد. از هر دیوار راست و گوشه‌ی تیز باید اجتناب شود. هندسه‌ی مقطع تونل می‌تواند جریان

ملایمی از تنش را در زمین پیرامون دهانه ایجاد کند که بارهای وارد بر لاینینگ تونل را به حداقل می‌رساند. در محیط سنگ سخت کف تونل باید مسطح باشد در حالی که در زمین نرم، مقطع تونل باید به شکل یک رینگ بسته باشد که در نتیجه کف تونل به شکل قوسی ایجاد می‌شود (Hung, C et al 2009).

۲-۳-۱-۱ روش گالری کناری:

در حفاری به روش گالری‌های کناری، مقطع مورد نظر به قسمت‌های مختلفی تقسیم شده و حفاری در امتداد ایستگاه در جبهه‌های مختلف انجام می‌شود. در این روش حفاری، ستونی از خاک نقش پایداری فضای حفر شده را تأمین می‌کند. سپس به تدریج و با مراحل زمانی مختلف بدنه اصلی ایستگاه ساخته شده و همچنین تکیه‌گاه‌های موقت و قسمت‌های باقی‌مانده خاک تخریب گشته و احداث بدنه ایستگاه تکمیل می‌شود. لازم به ذکر است که در این روش نگهداری اولیه با شاتکریت صورت می‌گیرد (Sadaghiani & Taheri 2008). در شکل ۳-۱ تصویر مقطع تونل در روش گالری کناری نشان داده شده است:



شکل ۳-۱ تصویر مقطع تونل در روش گالری کناری (<http://projects.dr-sauer.com>)

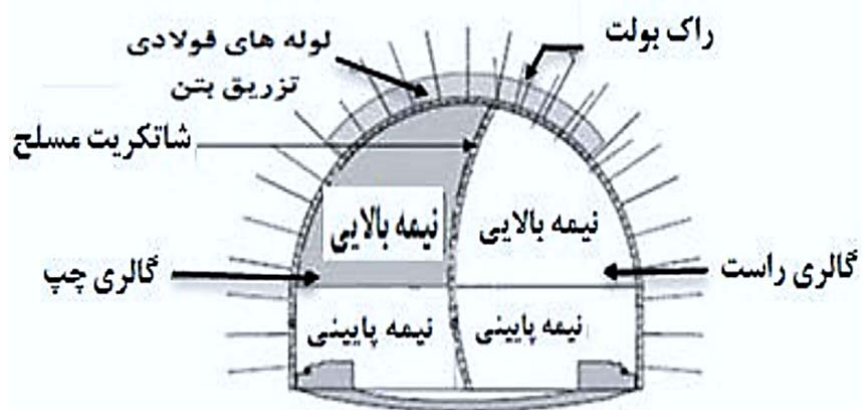
از روش گالری کناری در زمین‌های سست و از طریق کاهش سطح مقطع حفاری در هر مرحله بهره می‌گیرند، که نتیجه آن کاهش پتانسیل ناپایداری در جبهه کار حفاری است. این شیوه نیاز به مراحل ساخت و حفاری زیادی دارد که نتیجه‌ی آن کاهش نرخ پیشروی است. ترتیب حفاری در این روش

بدین صورت است که ابتدا گالری‌های کناری حفر می‌شوند، سپس نگهداری اولیه در گالری‌ها اعمال می‌شود. در ادامه قسمت مرکزی حفر می‌شود به صورتی که بعد از اتمام حفاری قسمت مرکزی دو دیوار حایل از جنس شاتکریت در مرکز باقی می‌ماند. روند عملیات اجرایی شامل ایجاد دو تونل کناری در مرحله‌ی ابتدایی، اتصال دو تونل کناری از طریق سازه‌ی قوسی میانی پس از پیشروی تونل‌ها به اندازه‌ی معینی بسته به شرایط زمین، خاکبرداری و برداشتن پایه‌های داخلی تونل‌های کناری، انجام می‌شود. کنترل خوب نشست زمین، توزیع مناسب تنش، امکان ایجاد فضاهای بزرگ و ناحیه‌ی پلاستیک محدود نسبت به دیگر روش‌ها از جمله مزایای این روش است. و معایبی چون پرت مصالح بالا نیز از ویژگی‌های این روش است (مهندسیین مشاور طرح جامع ۱۳۸۳).

۲-۱-۳-۲ روش دیافراگم مرکزی^۱:

روش دیگر حفر فضاهای زیرزمینی بزرگ مقطع، روش دیافراگم میانی است که در آن جبهه‌کار حفاری به دو گالری چپ و راست تقسیم شده و حین اجرای عملیات حفاری یک لایه شاتکریت مسلح موسوم به دیافراگم، جهت کنترل تغییر شکل‌ها در سقف بین دو گالری کار گذاشته می‌شود. ترتیب حفاری در این روش همان طور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، بدین صورت است که ابتدا قسمت بالایی گالری سمت راست حفر می‌شود؛ پس از اعمال نگهداری اولیه به دیواره‌ها، قسمت زیرین گالری حفر می‌شود. این عمل تا رسیدن به یک مسافت معین ادامه می‌یابد و سپس حفاری گالری سمت چپ با استفاده از الگوی حفاری مشابه انجام خواهد شد. در این روش میزان کرنش بسیار محدود بوده اما در مقابل پرت مصالح و زمان حفر زیاد است. (Aydin et al., 2004)

¹ Central Diaphragm



شکل ۲-۲ ترتیب حفاری در روش دیافراگم میانی (Aydin, A et al 2004)

۳-۱-۳-۲ روش حفر تمام مقطع^۱:

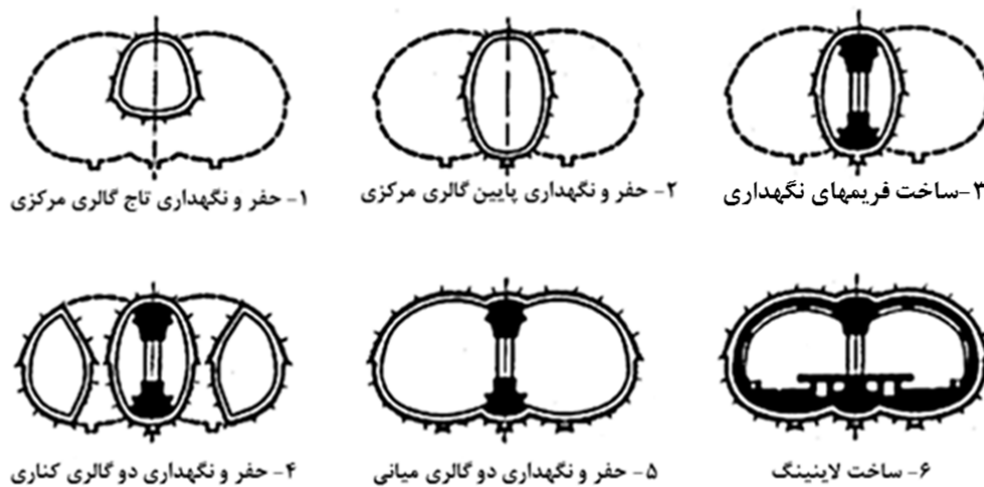
روش حفاری و ساخت تمام مقطع در زمین های سست و حتی در زمین های مچاله شونده به طور کامل و کارآمد با بکارگیری هم زمان تکنیک های مسلح سازی متقارن زمین قابل اجرا است. روش تمام مقطع در زمین های سست و مچاله شونده با دهانه های بزرگ (فضایی با دهانه های ۱۹ متر در فرانسه) توسط لوناردی معرفی گردید. وی اولین کسی است که عقیده داشت درک صحیح کنترل رفتار هسته-ی پیشرو که در طول حفاری با آن مواجه هستیم، رمز موفقیت روش تمام مقطع است. (Lunardi, P 2008).

۴-۱-۳-۲ روش حفاری ترتیبی با استفاده از ستون میانی (دو قوسی)

یکی از روش های دیگری که به پایداری مقطع کمک می کند و نشست سطحی را تا حد زیادی کاهش می دهد روش ستون میانی در تونل است که به صورت ترکیبی با روش NATM استفاده می شود و اولین بار توسط واگنر و همکاران در سال ۱۹۸۷ پیشنهاد شد (Wagner et al 1992). اساس این روش افزایش صلبیت سازه، پیش از حفر تمام مقطع است. در این روش افزایش صلبیت باعث کاهش ترخیص تنش و به تبع آن نشست می شود. در این روش در چند گام جلوتر از جبهه ی حفاری در روش NATM با استفاده از تونل پیشرو، ستونی در وسط دهانه ساخته می شود و بین این ستون ها

^۱ Full Face

نیز تیرهایی قرار می‌گیرد که بار جدار و پوشش تونل روی این تیرها قرار می‌گیرد و به ستون‌ها منتقل می‌شود. البته بایستی در نظر داشت که استفاده از این ردیف تیر و ستون محدود به ایستگاه‌های متروی جزیره‌ای و یا تونل‌هایی است که هندسه آنها امکان استفاده از این سیستم را ممکن می‌سازد. در این روش ابتدا فضای مورد نظر برای اجرای ستون‌های میانی به صورت مرحله‌ای حفاری می‌شود و پس از اجرای ستون‌ها، حفاری فضای مورد نظر در پناه این سازه نگهبان با ایمنی بالا صورت می‌گیرد از این روش برای حفاری تونل در شرایطی که فضای مورد نظر هنگام حفر برای قرارگیری ستون‌ها پایدار بوده و شرایط محیطی تونل خشک باشد، استفاده می‌شود (Kivi et al, 2012). شکل ۲-۳ مراحل حفاری و احداث ستون در این روش را نشان می‌دهد.



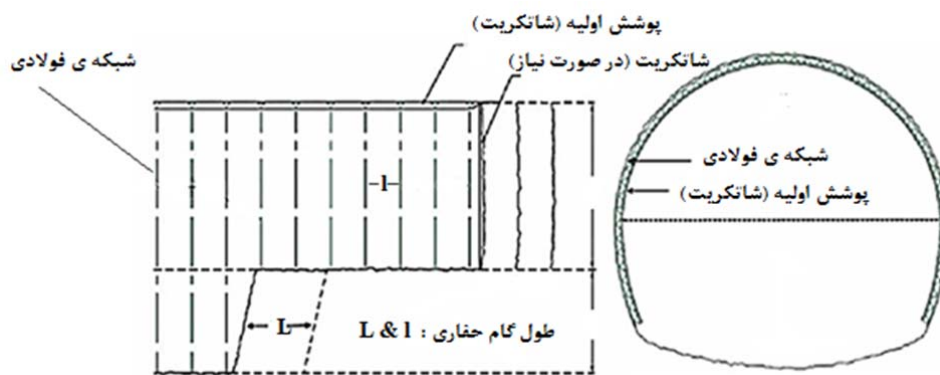
شکل ۲-۳ مراحل حفاری و احداث ستون در روش ستون میانی (Kivi et al, 2012)

۲-۳-۱-۵ روش طاق و پطاق^۱:

حفاری در این روش به صورت پله‌ای است که از تاج شروع شده و به سمت پایین می‌رود. جبهه‌کار با فاصله‌ی ۵۰ الی ۱۵۰ متری به دلیل ایمنی و عدم تداخل کاری به صورت پله‌ای حفر می‌شود. این روش به دلیل فضای خوب کاری اجازه‌ی درجه‌ی بالای مکانیزاسیون را می‌دهد. در این روش ضروری است که جبهه‌کار با پیچ سنگ‌های افقی نگهداری شود.

^۱ Top & Bench

با بررسی مشکلاتی که در این روش در سنگ‌هایی با فشارندگی بالا به وجود آمده، می‌توان به این نتیجه رسید که در این روش دو ناحیه بحرانی در سطح حفاری جبهه‌کار و سطح حفاری پله به وجود می‌آید. برای جلوگیری از تاثیر این دو ناحیه بر روی هم باید سعی شود که به یک فاصله مکانی و زمانی مناسب این دو سطح حفاری از هم رسید. این روش در زمین‌هایی که قابلیت جابجایی زیاد دارند قابل کاربرد نیست (Okada & Hamazuka., 1995).

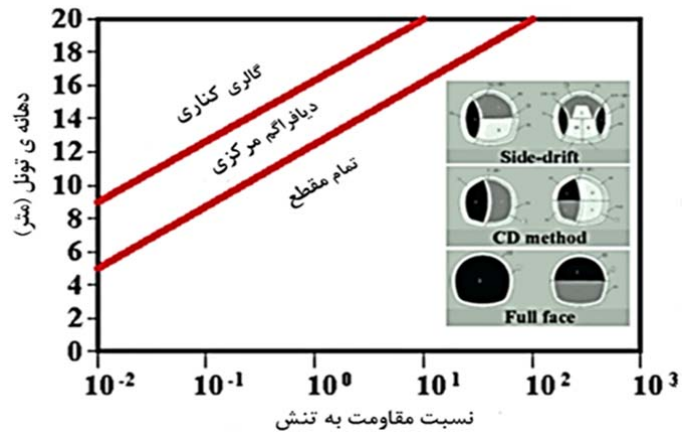


شکل ۲-۴ روش حفاری طاق و پا طاق (Okada & Hamazuka 1995)

۲-۳-۱-۶ انتخاب نوع روش حفر مرحله ای با روش ساخت و ساز بهینه:

سیستم تصمیم‌گیری کمکی^۱ (TUN_AUX) یک تابع برای انتخاب روش ساخت بهینه ارایه می‌دهد. روش‌های حفر مناسب برای دهانه‌های مختلف تونل و شرایط مختلف زمین به سه روش تمام مقطع، دیاگرام مرکزی (CD) و Side Drift طبقه‌بندی شده است. بر مبنای دانش کارشناسی جمع آوری شده از مهندسان تونل با تجربه و مدل‌سازی شرایط مختلف ساخت، روش ساخت بهینه با استفاده از قطر دهانه و نسبت مقاومت به تنش زمین پیشنهاد می‌شود. جدول انتخاب روش مناسب در شکل شماره ۲-۵ مشاهده می‌شود (Yu & Chern., 2007):

^۱ Decision Making Auxiliary System



شکل ۵-۲ بهینه شده برای انتخاب روش حفر مناسب بر مبنای قطر دهانه‌ی تونل و نسبت مقاومت به تنش (Yu & Chern., 2007)



شکل ۶-۲ تونل آزادراه چهارباند حفر شده به روش دوال سایید دریافت در مجاورت یک شیب کم عمق (Yu & Chern., 2007)

۷-۱-۳-۲ کاربرد روش طاق و پاتاق (Top & Bench) در محیط‌های مختلف (Hung, C et al) (2009)

در جدول ۱-۲ کاربرد روش طاق و پاتاق در محیط‌های مختلف آورده شده است.

جدول ۱-۲ کاربرد روش طاق و پا طاق (Top & Bench) در محیط های مختلف (Yu & Chern., 2007)

طاق و پاتاق و قسمت پایین تونل (کفبند)، وابسته به سایز تونل، بعلاوه بخش های فرعی که ممکن است داخل دریفت نیاز باشد	خاک چسبنده ی سفت/سخت بالای سطح ایستابی
طاق و پاتاق و قسمت پایین تونل (کفبند)، وابسته به مقاومت زمین، دریفت های کوچکتر از بالا نیاز است	خاک چسبنده ی سفت/سخت پایین سطح ایستابی
طاق و پاتاق و قسمت پایین تونل (کفبند)، وابسته به سایز تونل، بعلاوه بخش های فرعی که ممکن است داخل دریفت نیاز باشد	خاک غیر چسبنده و تثبیت شده ی خوب، بالای سطح ایستابی
طاق و پاتاق و قسمت پایین تونل (کفبند)، وابسته به سایز تونل، بعلاوه بخش های فرعی که ممکن است داخل دریفت نیاز باشد، حفاری با فشار هوا و/یا تثبیت جبهه کار در صورت نیاز	خاک غیر چسبنده و تثبیت شده ی خوب، زیر سطح ایستابی
طاق و پاتاق و قسمت پایین تونل (کفبند)، وابسته به سایز تونل، بعلاوه بخش های فرعی که ممکن است داخل دریفت نیاز باشد، حفاری با فشار هوا و/یا تثبیت جبهه کار در صورت نیاز	خاک غیر چسبنده ی سست بالای سطح ایستابی
طاق و پاتاق و قسمت پایین تونل (کفبند)، وابسته به سایز تونل، بعلاوه بخش های فرعی که ممکن است داخل دریفت نیاز باشد، حفاری با فشار هوا و/یا تثبیت جبهه کار در صورت نیاز	خاک غیر چسبنده ی سست زیر سطح ایستابی

۲-۳-۲ روش های مکانیزه

۲-۳-۲-۱ روش حفاری با استفاده از سپر تعریض شده^۱:

این روش یک شیوهی امن برای حفر فضاهای زیرزمینی با پهنای بیشتر از داخل تونل اولیه می باشد. سطح مقطع تونل بزرگ شده می تواند به اشکال مختلفی غیر از دایره هم تبدیل شود. گسترش و تعریض سطح مقطع را می توان از سرتاسر مقطع تونل و یا از یک جهت خاص انجام داد. روش حفر فضاهای زیرزمینی با استفاده از سپر تعریض شده شامل سه بخش اصول "فنی سپر"^۲، روش "هدایت سپر"^۳، روش مربوط به "هل دادن سپر"^۴ است. ماشین سپر تعریض شده، بزرگتر از سپر استاندارد، در محل ساخته می شود. حفاری های محیطی با استفاده از ماشین سپر محیطی که به داخل استوانه

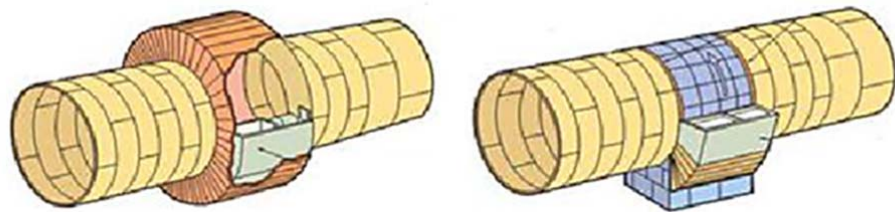
¹ Enlargement Shield Tunneling Method

² Shield Technique

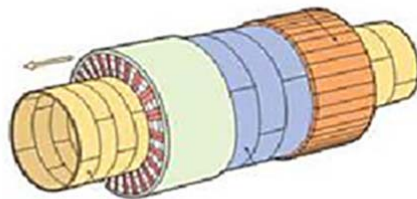
³ Hauling Method

⁴ Push-Home Method

انتقال داده می‌شود صورت می‌گیرد. مراحل کلی مربوط به این روش را در شکل ۲-۷ می‌بینید
 (Honda, M Yuasa, Y 2005):



الف) حفاری با استفاده از ماشین سپر محیطی (ب) نصب و اجرای سپر تعریض شده



ج) ادامه ی عملیات حفر با استفاده از سپر تعریض شده

شکل ۲-۷ مراحل نصب سپر تعریض شده و حفر فضای زیرزمینی (Honda, M Yuasa, Y 2005)

۲-۲-۳-۲ روش استفاده از سپر چند مقطع^۱:

در این روش دو یا چند سپر به صورت افقی یا عمودی به هم متصل شده‌اند، درحالی که هرکدام کمی جلوتر از دیگری قرار دارد. در تصاویر زیر نمونه‌هایی از سپرهای چند مقطع را می‌بینید. با ترکیب دو یا چند مقطع دایره‌ای یک مقطع بزرگتر غیر دایره‌ای ایجاد می‌شود (Goto T et al 2005):

¹ Multi-face Shield Construction Method



شکل ۲-۸ سپر دومقطعی عمودی و ماشین سپر سه مقطعی (Goto T et al 2005)

۳-۲-۳-۲ روش پیش تونل سازی مکانیکی^۱:

در این روش با استفاده از ماشین مخصوص مجهز به بازوی طولی حفار نصب شده بر روی شاسی مشابه مقطع تونل و هم اندازه‌ی مقطع داخلی، شیاری با ضخامت ۴۰ تا ۸۰ سانتی متری و طول ۸ تا ۱۰ متر، با زاویه‌ی ۳ تا ۵ درجه به بیرون ایجاد شده و با بتن پر می‌شود. پس از رسیدن بتن به مقاومت مورد نظر، خاک زیر آن به صورت تمام مقطع حفاری شده و پوشش نهایی در صورت نیاز نصب می‌گردد. با این روش دهانه‌های بزرگی همچون مترو شهر روم (دهانه‌ی ۲۱ متر) با کمترین تغییر شکل قابل اجراست (Lunardi. P 2005).

^۱ Mechanical Pre-Tunneling



شکل ۲-۹ نمایی از ماشین پیش تونل سازی (Lunardi, P 2005)

۲-۳-۳ روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی (روش CAPS^۱):

یکی از روش‌هایی که امروزه جهت اجرای سازه‌های زیرزمینی و ایستگاه‌های مترو با استقبال بالایی مواجه است، روش سیستم پیش‌نگهدارنده طاق بتنی است. در این روش المان‌های بتنی مسلح زیرزمینی شامل شمع‌ها و طاق‌های قوسی (ریب)، در اطراف فضای زیرزمینی مورد نظر، پیش از حفاری به منظور نگهداری زمین در حین حفاری اجرا می‌شود. این طرح بر اساس ایده دال بتنی در سقف تونل و نیز روش استفاده از ریب در اطراف تونل ارایه شده است. مراحل تشکیل دهنده روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی عبارتند از:

- (۱) ابتدا یک تونل با مقطعی کوچک در طول فضای زیرزمینی اجرا می‌شود.
- (۲) گالری‌های دسترسی کوچکی به فواصل معین به صورت عرضی در دو طرف، در فضای زیرزمینی مورد نظر حفاری می‌شود.

^۱ Concret Arc pre support System

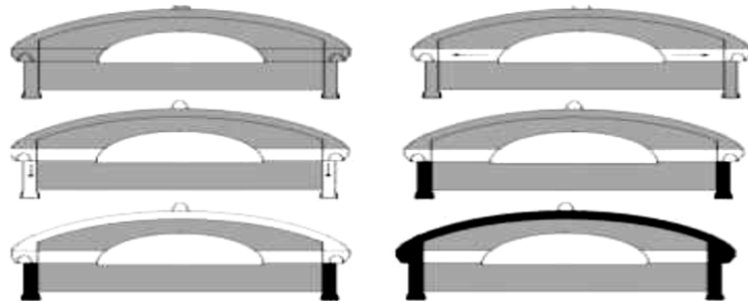
۳) از انتهای گالری‌های دسترسی عرضی ایجاد شده، دو گالری جانبی به موازات تونل میانی اولیه و با طولی برابر با فضای زیرزمینی اصلی حفاری می‌شود.

۴) شمع‌ها از درون این گالری‌های جانبی با فواصل معینی اجرا می‌شوند.

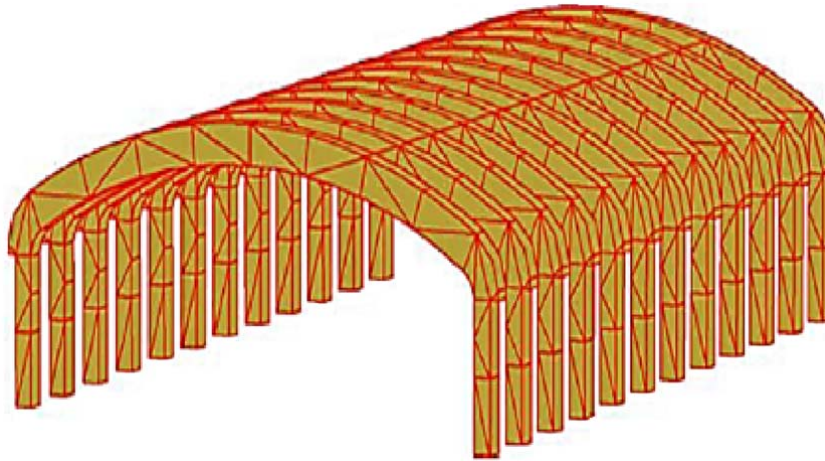
۵) از بالای شمع‌ها یک مقطع نعل اسبی که همان ریب می‌باشد اجرا می‌شود. دو شمع مقابل توسط یک طاق نگهدارنده به هم متصل شده و این طاق نگهدارنده شرایطی برای حفاری ایمن را برای ما فراهم می‌سازد (Sadaghiani & Taheri 2008).

در این روش شمع‌ها (که به صورت راهروهای کوچک عمودی هستند) و ریب‌ها (که به صورت راهروهای قوسی هستند) و همچنین راهروهای ارتباط دهنده افقی، همگی به صورت دستی حفر می‌شوند. سرعت حفاری راهروها به صورت دستی ۳ متر در روز است که با افزایش نیروی انسانی می‌توان در سطوح مختلف و به طور همزمان حفاری کرد. ریب‌های قوسی و شمع‌های حفاری شده، قبل از حفاری اصلی به منظور ایجاد پشت بندها با بتن مسلح پر می‌شوند. در این روش حفاری ایستگاه ابتدا تونل خط مترو حفر می‌شود و از داخل تونل‌های حفر شده راهروهای مربوط به اجرای سیستم پیش نگهدارنده حفر می‌شود. پس از تکمیل نگهداری موقت که در شکل چهار می‌بینید، حفاری فضای اصلی از داخل سیستم پیش نگهدارنده شروع می‌شود به صورتی که تونل اولیه تعریض می‌شود تا به مقطع نهایی ایستگاه برسد (Sadaghiani & Dadizadeh 2010).

شماتیک مراحل اجرای این روش را در شکل ۲-۳-۱- مشاهده می‌کنید:



شکل ۲-۱۰ تصویر نمادین مراحل اجرای روش CAPS (Sadaghiani & Taheri 2008)

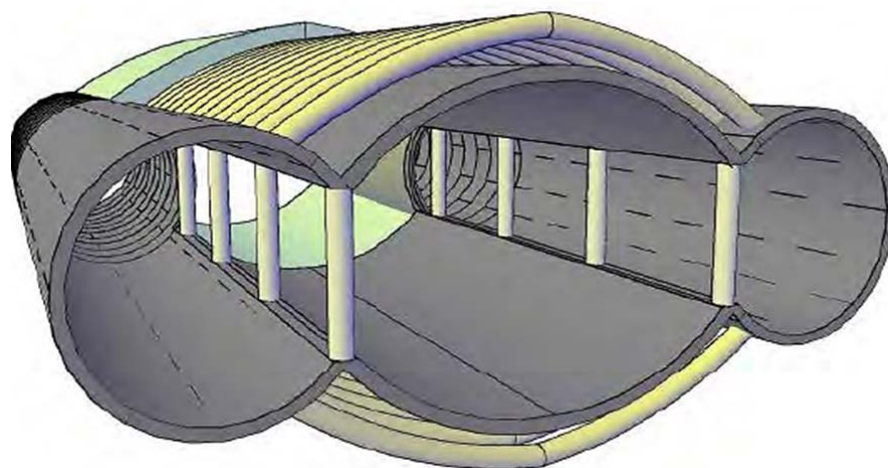


شکل ۲-۱۱ سیستم پیش نگهدارنده ی طاق بتنی که قبل از حفاری نهایی اجرا می شود (Sadaghiani & Dadizadeh 2010)

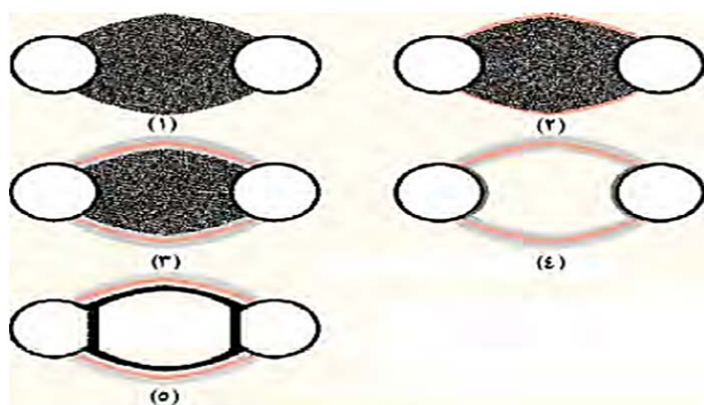
۲-۳-۴ روش سیستم پیش نگهدارنده با استفاده از لوله های قوسی^۱:

این روش به دو صورت اجرای سیستم پیش نگهدارنده با لوله های قوسی قطر بزرگ و یا روش حفر گمانه با استفاده از لوله های قوسی با قطر کوچک قابل اجرا است. در این روش لوله های فولادی قوسی به عنوان سیستم پیش نگهدارنده همراه با انجماد خاک یا تزریق، برای ایجاد یک ناحیه ی مقاوم در زمین قرار داده می شوند تا داخل فضای ایجاد شده با اطمینان بالا برداشته شود. این روش در فضاهای زیرزمینی با سطح مقطع بزرگ و همچنین عمق زیاد، به منظور نگهداری خاک و جلوگیری از نفوذ آب، دارای قابلیت اعتماد و ایمنی بالا می باشد. شیوه ی انجماد خاک به منظور مقاوم سازی خاک و جلوگیری از نفوذ آب در بخش های بین لوله های پوشش دهنده، استفاده می شود اما عملیات انجماد به صورت موقت است و این روش همراه با خطراتی نظیر افت انجماد و کاهش چسبندگی خاک همراه است (Kunihiko & Kenichi 2006).

^۱ Carved Pipe Roofing Method



شکل ۲-۱۲ مرحله‌ی پایانی حفر و نگهداری ایستگاه به روش سیستم پیش نگهدارنده با استفاده از لوله های قوسی (Kunihiko & Kenichi 2006)



شکل ۲-۱۳ مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری موقت ودائم. (۱) حفر تونلهای مترو (۲) نصب لوله‌های انجماد (۳) انجماد زمین (۴) حفر فضای ایستگاه و نگهداری پشت سگمنتها (۵) اجرای نگهداری دائم و اتمام مرحله‌ی انجماد (Kunihiko & Kenichi 2006)

ویژگی های مربوط به روش حفر ایستگاه مترو با استفاده از سیستم پیش‌نگهدارنده با استفاده از لوله‌های قوسی:

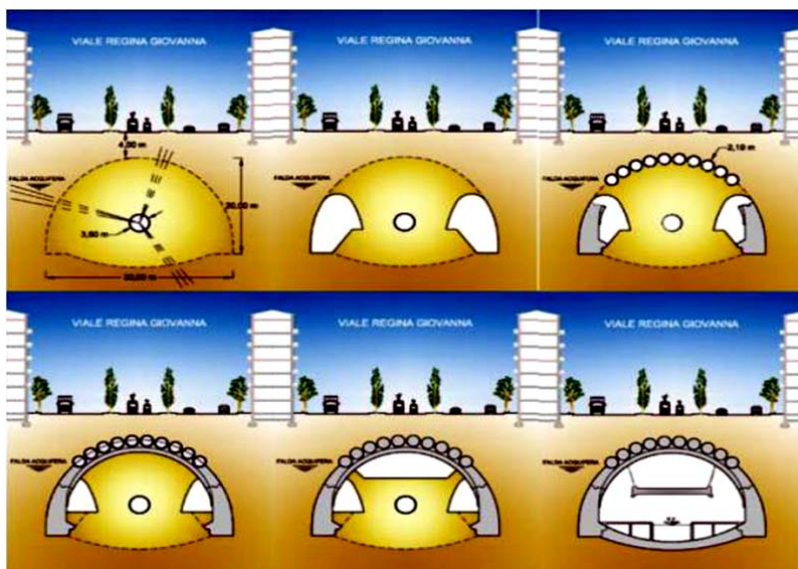
- با استفاده از پوشش لوله‌های قوسی با قطر بزرگ امکان پایداری در برابر فشار خاک و فشار آب وجود دارد و با پایان عایق‌بندی در برابر آب با استفاده از خاک منجمد شده، یک فضای زیرزمینی با سطح مقطع بزرگ بدون استفاده از روش روباز قابل ساخت می‌باشد.

- لوله‌های قوسی با قطر بزرگ، دارای قابلیت اجرا از یک تونل هستند. که این تونل‌های جانبی با استفاده از سپر یا با روش‌های دیگر از قبیل روش حفاری ترتیبی، از پیش حفر شده‌اند.
- لوله‌های فولادی با مقطع دایره و یا مستطیل برای پوشش در مقاطع بزرگ به کار می‌رود که شعاع و مقطع آن‌ها قابل تنظیم است و شعاع انحنای لوله‌ها نیز متغیر است.
- برای منجمد کردن فضای بین لوله‌های فولادی قوسی با قطر بزرگ، ضخامت منجمد شده‌ی خاک برای جلوگیری از ورود آب، می‌تواند با استفاده از لوله‌های منجمد کننده در هر مکان مشخص صورت گیرد (Kunihiko & Kenichi 2006).

۲-۳-۵ روش قوس سلولی^۱:

قوس سلولی یک تکنولوژی نوین ساخت طراحی شده برای ایجاد فضاهای بزرگ زیرزمینی در محیط‌های شهری با شرایط تنش-کرنش و شرایط ژئوتکنیکی خاص و روباره‌ی کم است، به طوری که ایجاد چنین فضایی با روش‌های متداول غیرممکن باشد. قوس سلولی یک سازه‌ی مرکب با مقطع نیم دایره بوده و اعضای طولی (سلول‌ها) شامل لوله‌هایی است که با یک سری ریب‌های قوسی عرضی به یکدیگر متصل شده‌اند. مطالعات انجام شده جهت کشف محدودیت این روش نشان می‌دهد که می‌توان به طور موفق برای حفر فضاهایی با دهانه‌ی بیش از ۶۰ متر و حتی در خاک‌های سست زیر سطح ایستایی با روباره‌ی کم، بدون ایجاد هرگونه نشست سطحی محسوس، این روش را به کار برد. در اصل روش قوس سلولی یک روش نوین تمام مکانیزه‌ی مرحله‌ای با پیش‌نگهدارنده است. در عمل لوله‌های رانده شده نقش تیرهای باربر سقف را دارند که با روشی هوشمندانه با قوس‌هایی با فاصله‌های ۶ متر به پایه‌های دوطرف در تونل‌های کناری متصل شده‌اند. روش قوس سلولی می‌تواند الگویی برای ابداع روش‌های نوین مرحله‌ای یا تمام‌مقطع با بکارگیری تجهیزات مکانیزه‌ی جدید در نزد طراحان و پیمانکاران برای ایجاد فضای زیرزمینی بزرگ باشد (Lunardi, P 2008).

¹ Celular Arc Method



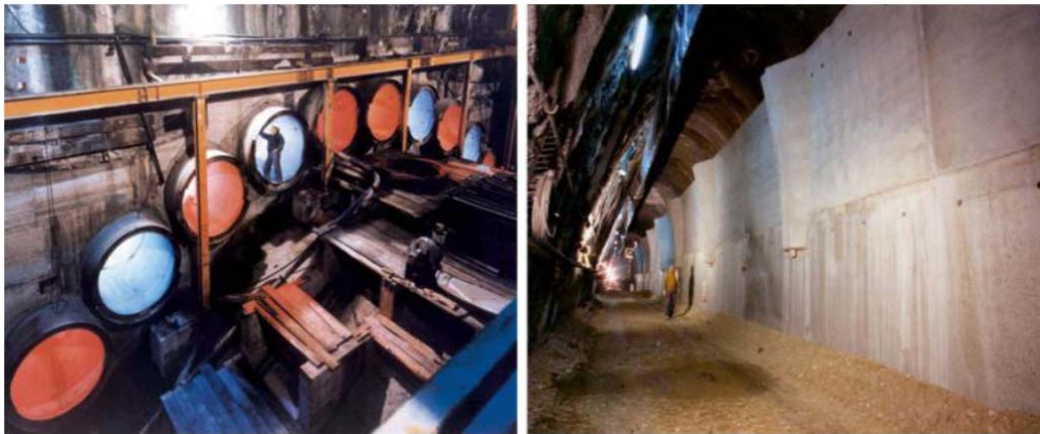
شکل ۲-۱۴ نمای کلی از روش قوس سلولی (Lunardi, P 2008)

۲-۳-۵-۱ مزیت های این روش نسبت به روش های متداول:

- نحوه انتقال از شرایط پایدار اولیه غیر آشفته به شرایط پایدار نهایی.
- پرت مصالح در این روش وجود ندارد درحالی که روش های متداول پرت مصالح بالایی دارند. به خصوص روش هایی که تعداد فضاهای کوچک بیشتری دارند. (به خصوص روش دیافراگم میانی)
- در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق‌بتنی سازه‌ی نگهدارنده‌ی اولیه نقش بسیار کمی را در باربری و نگهداری داشته اما در این روش، نگهدارنده‌ی اولیه همان سازه‌ی نهایی است
- به دلیل ایجاد پیش‌طاق سلولی صلب، حفاری خاک زیر لوله‌ها به صورت تمام مقطع انجام شده و راندمان حفاری بسیار بالاست. (۵۷ متر مکعب در روز)
- براساس تحلیل‌های کامپیوتری انجام شده امکان ایجاد فضاهای زیرزمینی با دهانه‌ی بیش از ۶۰ متر با روبراه‌ی بسیار کم با روش قوس سلولی وجود دارد و تنها با افزایش ضخامت پوشش نهایی می‌توان هر فضایی را ایجاد کرد (Lunardi, P 2008).

۲-۳-۵-۲ مراحل اجرای روش قوس سلولی:

- ۱- حفاری نیمی از سینه کار تونل‌های کناری جهت ساخت دیواره‌های تونل نهایی.
- ۲- تکمیل حفاری محل دیوار تونل نهایی و قالب بندی آن در تونل‌های کناری، همزمان با اجرای مجموعه لوله‌های رانده شده متصل به هم در زمین با قطر ۲.۱ در طول مقطع سقف نهایی از شفت رانش در کارگاه بالادست.
- ۳- حفاری نیم‌دایره‌ای لوله‌های رانده شده از داخل و در فواصل معین به صورت عرضی در زمین به منظور استفاده به عنوان قالب برای قالب بندی قوس اتصال دهنده لوله‌ها و سپس آرماتور و قالب بندی قوس‌ها
- ۴- بتن ریزی در لوله‌های رانده شده که قوس ایستگاه را شکل می‌دهند و حفاری خاک زیرین. بتن ریزی بخش تحتانی تونل در مراحل مختلف (Lunardi, P 2008).



شکل ۲-۱۵ فعالیت همزمان کارگاه شفت لوله رانی و تونل کناری (Lunardi, P 2008)

این روش ساخت که توسط P.Lunardi ابداع شد و به عنوان مرد سال در زمینه‌ی ساخت، جایزه‌ی معتبر بین المللی Engineering News-Record را دریافت کرد. این روش اولین بار برای ایستگاه مترو Veezia شهر میلان ایتالیا به کار گرفته شد. این ایستگاه از زیر پی ساختمان‌های قرن ۱۶ میلادی و زیر سطح ایستایی با روبره‌ی فقط ۴ متر عبور می‌کند. به دلیل مقطع عرضی بسیار بزرگ این ایستگاه، ساخت فضایی با این هندسه بدون استفاده از فناوری قوس سلولی امکان پذیر نبود. در

این روش ابتدا تونل‌های کناری به اندازه ی طول ایستگاه حفر شده و نگهداری موقت آن‌ها نصب می‌شود. هم‌زمان با ساخت دیوار تونل نهایی عملیات لوله‌رانی هم از شفتی در بالادست انجام می‌شود. عملیات لوله‌رانی شامل ۱۰۸۰ لوله‌ی ۲ متری پیش‌ساخته‌ی بتنی مقاوم رانده شده در طول مقطع تاج تونل، با قطر داخلی ۱۸۰۰ میلی‌متر و قطر خارجی ۲۱۰۰ میلی‌متر بود. لوله‌ها از یک شفت با استفاده از تجهیزاتی شامل سپرهای فلزی سیلندری به قطر ۲۱۰۰ میلی‌متر و طول ۷.۷ متر با نرخ پیشروی ۸ تا ۹ متر در روز در داخل زمین رانده شده‌اند. رفتارنگاری زمین در طول لوله‌رانی به‌طور دقیق همراه با انحراف سنجی لوله‌ها انجام گرفته است. پس از ساخت دیوارهای کناری و راندن تمامی لوله‌ها در محل خود، عملیات ساخت ۳۵ عضو عرضی قوسی باربر تونل با فاصله ۶ متری که بدون شک مهمترین بخش از سلول‌های قوسی است، شروع شدند. عملیات ساخت قوس به ترتیب زیر است:

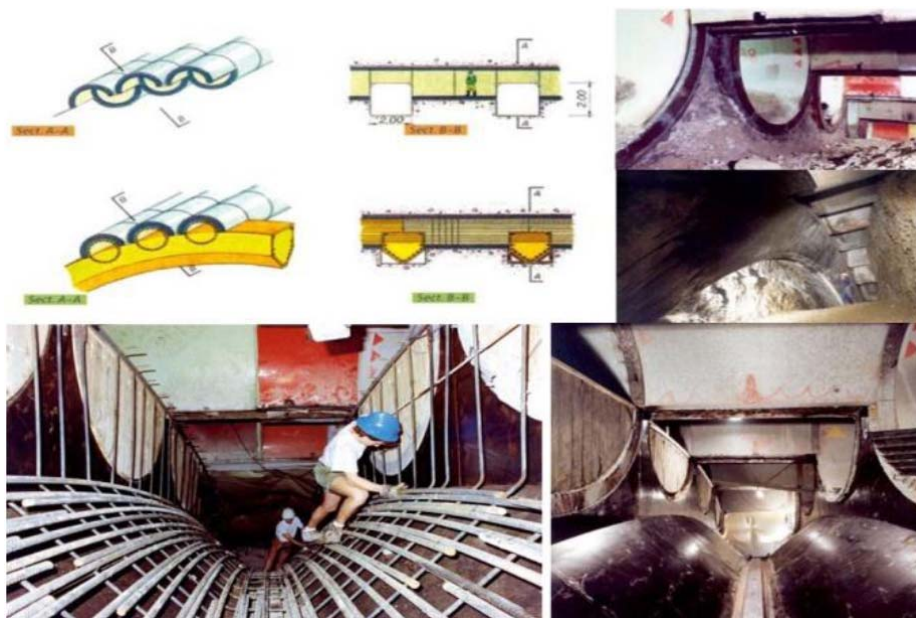
۱- برش و برداشتن نیمه‌ی پایینی لوله‌ها و حفاری قسمت پایینی به صورت قوسی تا دیوارهای

کناری دو طرف

۲- نصب قالب‌های پیش‌ساخته فلزی در محل حفاری شده، آرماتوربندی سلول‌ها و قوس و

بتن‌ریزی قوس تا روی دیوارهای کناری از پیش ساخته شده.

۳- بتن‌ریزی داخل لوله‌ها (Lunardi, P 2008)



شکل ۲-۱۶ مراحل ساخت قوس سلولی (Lunardi, P 2008)

نرخ پیشروی در ایستگاه Venezia با بکار گیری فناوری قوس سلولی، ۵۷ متر مکعب در روز و هزینه‌ی نهایی تقریبی ۵۱۶ یورو به ازای هر متر مکعب بوده که قابل قیاس با قیمت یک گاراژ اتومبیل در مرکز شهر میلان است. این ارقام نسبت به دیگر کارهای عمرانی بسیار جالب توجه است.

۳-۵-۳-۲ سیستم رفتارنگاری در فناوری قوس سلولی:

به طور کلی قطر زیاد فضای ایجاد شده، روش ساخت و سازه‌های حساس در سطح ایجاب می‌نماید که برنامه‌ی وسیع جهت رفتارنگاری طراحی و جهت اندازه گیری موارد ذیل اجرا کرد:

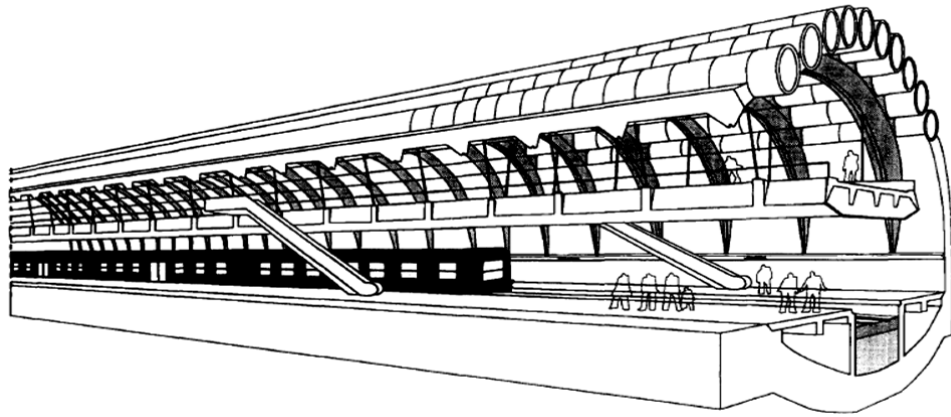
۱- نشست در تراز زمین به خصوص در ساختمان‌ها در طول مراحل کاری

۲- تغییر شکل زمین در اطراف تونل

۳- میزان تنش و کرنش در پوشش نهایی تونل (Lunardi, P 2008)

نتایج نشان می‌دهد که حرکت سطح زمین همیشه کمتر از مقادیر محاسبه شده بوده و بیشترین

میزان نشست در طول حفاری در قسمت تاج تونل رخ داده است.



شکل ۲-۱۷ تصویر نمادین ایستگاهی در شهر میلان که به روش قوس سلولی ساخته شده است (Lunardi, P 2008)



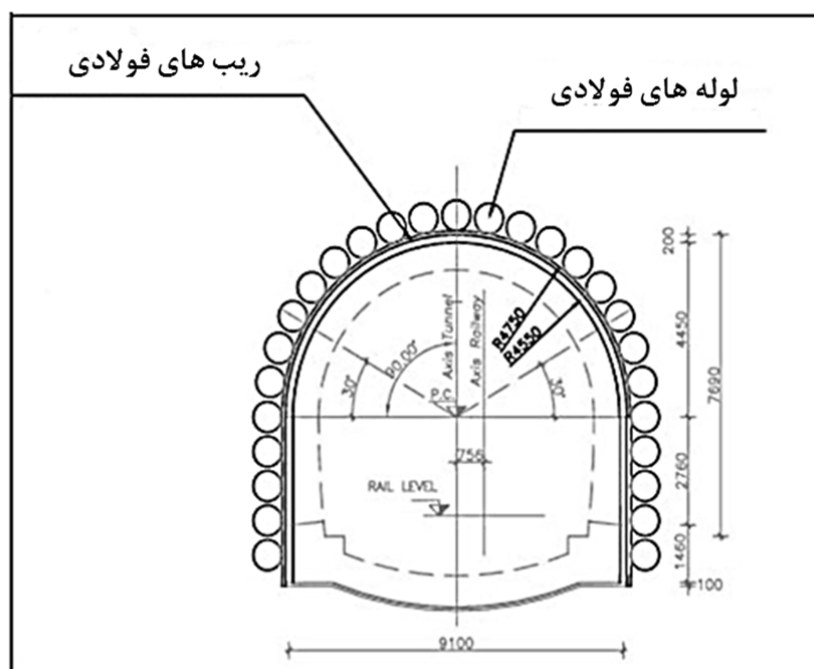
شکل ۲-۱۸ نمایی کامل از ایستگاه Venezia (Lunardi, P 2008)

۲-۳-۶ روش استفاده از میکروتونل‌های قوسی^۱:

این روش می‌تواند همراه با روش حفاری ترتیبی استفاده شود. قوس پیش‌نگهدارنده که شامل مجموعه‌ای از میکروتونل‌ها است در بالای سطح حفاری برای پایدار کردن و افزایش زمان خودپایداری

^۱ Microtunneled Arch Method

فضای حفاری اجرا می‌شود. به منظور کنترل نشست در مناطق پر جمعیت شهری، هیچگونه وارفتگی در زمین قبل از نصب پوشش اولیه نباید صورت گیرد که این نیاز با قرارگیری قوس پیش‌نگهدارنده در پشت سطح حفاری برآورده می‌شود. قوس پیش‌نگهدارنده با ساخت محکم خود از هرگونه تغییر شکل زود هنگام در زمین جلوگیری می‌کند. قوس پیش‌نگهدارنده در سطح مقطع عرضی باید به طور پیوسته اجرا گردد تا بتواند تاثیر قوسی خود را در عکس العمل با زمین به منظور پایدارسازی آن بگذارد (Desai, D.B 2000).



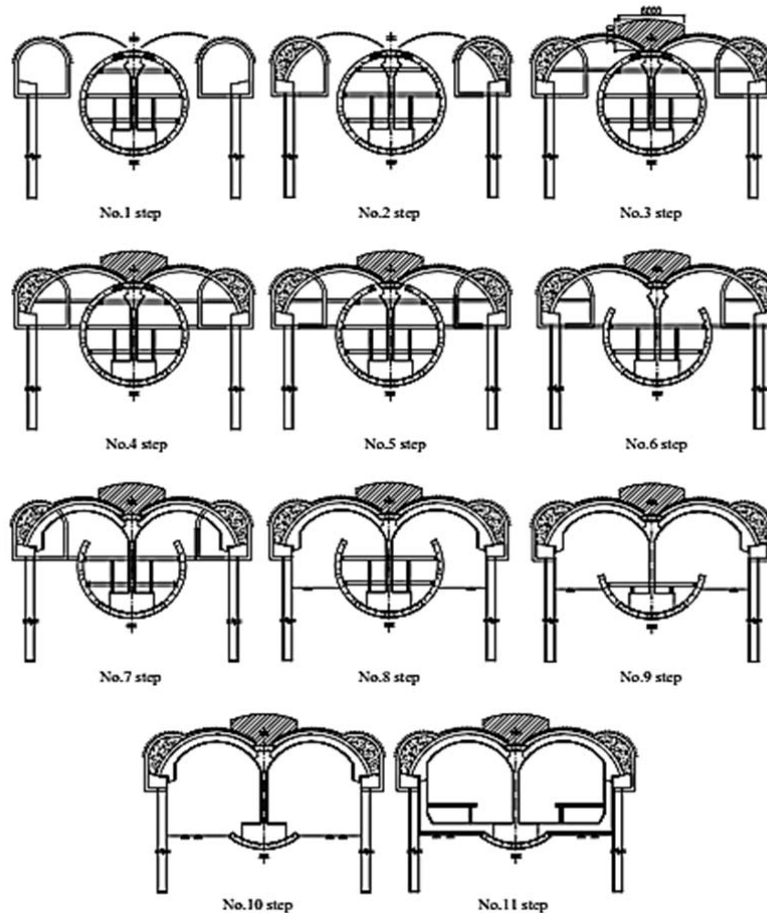
شکل ۲-۱۹ نمونه ای از سیستم پیش‌نگهدارنده با میکروتونل های قوسی (Desai, D.B 2000)

۲-۳-۷ روش تعریض تونل حفر شده توسط سپر با قطر بزرگ، با استفاده از شمع-تیر- قوس^۱ (PBA):

این روش که توسط محققان چینی مطرح شده است، یک رویکرد موثر است برای تعریض تونل حفر شده توسط سپر با قطر بزرگ، بخصوص زمانی که نتوان از روش های سنتی بدلیل وجود

^۱ Pile-Beam-Arc

ساختمان های متراکم و راه های باریک استفاده کرد. ایستگاه های زیادی در چین با این روش ساخته شده است. این روش یک رویکرد جدید است و در نتیجه با اندکی ریسک همراه است. مفهوم روش PBA به صورت یک چارچوب سیستم نگهداری در زیر زمین است. مراحل اجرای این روش به این صورت است که در مرحله ی اول تونل اولیه باید ساخته شود تا فضای کافی برای احداث شمع ها محیا شود. بالای شمع ها به تیر های کلاهکی متصل می شود. در مرحله ی دوم خاک موجود از بالا به پایین حفر می شود. سپس قوس ها ساخته می شوند و دو طرف قوس ها بر روی تیر های کلاهکی می رسد. در مرحله ی سوم طبقه ی وسط بعد از حفر خاک لایه ی میانی ساخت می شود. در مرحله ی چهارم طبقه ی پایین بعد از حفر خاک لایه ی پایینی ساخته می شود. در آخر، لوازم و ساختارهای جانبی ساخته می شوند همانطور که در شکل می بینید (Jun Liu et al 2014).



شکل ۲-۲ مراحل توسعه روش PBA (Jun Liu et al 2014)

۲-۳-۸ روش تونلسازی کم عمق^۱:

این روش برای تونل‌های مدفون کم‌عمق در زمین‌های نرم به کار می‌رود. اثر قوسی محدود و همچنین فعال نمودن محدود مقاومت زمین دو مشخصه‌ی مکانیکی STM است. پایداری سینه‌کار و شرایط تونلسازی خشک دو پیش‌شرط کاربرد این روش هستند. در تونلسازی به روش STM برخی روش‌های کمکی الزامی که عمدتاً برای تضمین دو پیش‌شرط لازم هستند، به کار گرفته می‌شوند. این روش‌های کمکی عبارت‌اند از: حفاری متوالی با طول پیشروی کوتاه، تکیه‌گاه صلب با نصب سریع، زمان انسداد حلقه‌ی کوتاه و پایش تغییر شکل سیستماتیک. روش STM پنج رویکرد اجرایی متفاوت بر طبق توالی تونلسازی دارد. در سال ۱۹۸۷ وزارت ساخت جمهوری چین عنوان "تونلسازی کم عمق" را برای تمایز با "NATM" انتخاب کرد که تفاوت روش STM با روش NATM در همان دو پیش‌شرط لازم برای STM است. این روش به طور گسترده در اغلب شهرهای کشور چین از قبیل پکن، شانگهای، گوانگژو و ... برای ساخت مترو استفاده شده‌است. اگرچه دستاوردهای بزرگی در ساخت و ساز به واسطه‌ی به کارگیری این روش حاصل شده‌است، مقالات پژوهشی محدودی در این موضوع در ژورنال‌های بین‌المللی چاپ شده‌است. STM یک مفهوم و یا یک فلسفه برای تونلسازی در زمین‌های نرم است نه اینکه مجموعه‌ای از تکنیک‌های حفر و نگهداری باشد. عمق بحرانی برای تمایز بین تونلسازی کم عمق و عمیق با توجه به اینکه آیا اثر قوسی می‌تواند به اندازه‌ی مناسب توسعه پیدا کند، تعیین می‌شود. در شرایط عمیق، فرض می‌شود که ارتفاع زون قوسی غیر قابل تغییر باشد در حالی که در شرایط کم‌عمق زون شکست به آسانی تا سطح زمین گسترش پیدا می‌کند. عمق روباره‌ی بحرانی ۲.۵ برابر ارتفاع زون قوسی تعیین شده بر مبنای شرایط عمیق در نظر گرفته شده است. در عمل عمق بحرانی روباره معمولاً ۴ تا ۶ برابر قطر تونل، به عنوان ارتفاع زون قوس در نظر گرفته می‌شود که با شرایط مختلف خاک متفاوت است (Fang, Q et al 2011).

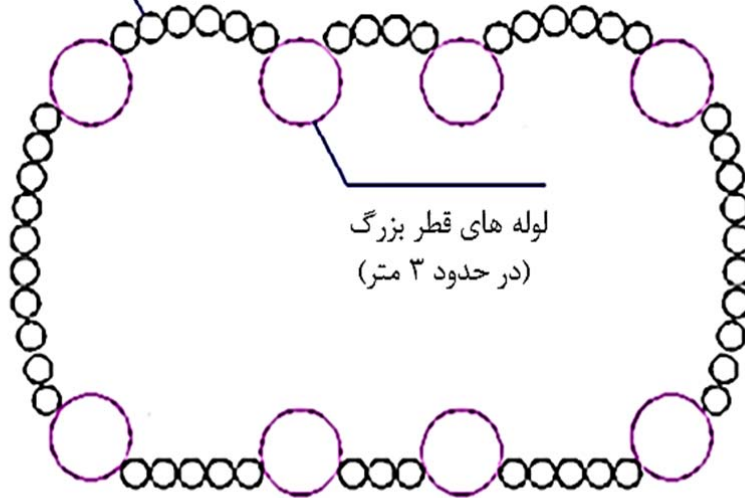
^۱ Shallow Tunneling Method

۲-۳-۹ روش طاق سوپر لوله ای^۱ (STR):

این روش برای ساخت ایستگاه مترو در محیط‌های آبدار و عمیق ارایه شده است. تفاوت‌هایی بین ساخت ایستگاه مترو در اقشار عمیق تر و ایستگاه‌های ساخته شده از اعماق کم وجود دارد. در عمق زیاد، محیط ساخت و ساز تغییرات زیادی می‌کند که باعث بروز مشکلات زیادی در استفاده از روش-های سنتی کم‌عمق می‌شود. روش STR از ساختار لوله‌ای برای ایجاد یک مانع نفوذ ناپذیر و همچنین سیستم نگهداری و سیستم تنش استفاده می‌کند. با حفاظت سقف لوله‌ای، ایستگاه مترو می‌تواند در شرایط ایمن ساخته شود. یک تکنولوژی حفاری که معمولاً پایپ جکینگ است برای ساخت یک مانع نفوذ ناپذیر با استفاده از لوله‌های فلزی با قطر کوچک (به عنوان مثال با قطر ۱ متر) و لوله‌های فلزی با قطر بزرگ (به عنوان مثال با قطر ۳ متر) در کانتور بیرونی استفاده می‌شود. لوله‌های فلزی با قطر بزرگ مانند تونل کوچکی برای ساخت دیوار دوغابی طولی نفوذ ناپذیر، که شبیه لخته‌ی خون در رگ-های خونی است، در داخل سقف لوله‌ای به کار گرفته می‌شوند (Kai Zhao et al 2015). شکل ۳-۲۳ محل قرارگیری لوله‌ها در روش طاق سوپر لوله‌ای و شکل ۳-۲۴ سازه‌ی نهایی ایستگاه حفر شده با روش طاق سوپر لوله‌ای را نشان می‌دهد.

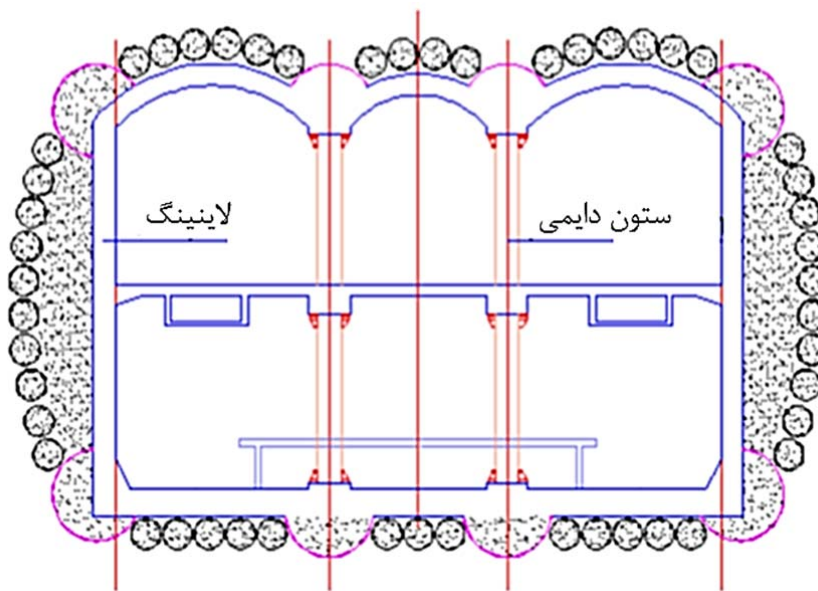
^۱ Super Tubular Roof Method

لوله های قطر کوچک
(در حدود ۱ متر)



لوله های قطر بزرگ
(در حدود ۳ متر)

شکل ۲۱-۲ قرارگیری لوله ها (Kai Zhao et al 2015)



شکل ۲۲-۲ سازه ی نهایی ایستگاه (Kai Zhao et al 2015)

۲-۳-۱۰ جمع بندی

روش‌های حفاری ایستگاه‌های زیرزمینی مترو به سه دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: روش‌های حفاری مرحله‌ای، روش‌های دارای سیستم پیش‌نگهدارنده و روش‌های مکانیزه. در این تحقیق بر مبنای مطالعات انجام شده دو روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی و گالری‌کناری برای مقایسه‌ی فنی و هزینه‌ای انتخاب شده‌اند.

فصل سوم

مروری بر مطالعات گذشته

۱-۳ مقدمه:

در سال‌های اخیر با توجه به گسترش روزافزون استفاده از فضاهای شهری، بهره‌برداری از فضاهای زیرزمینی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. یکی از موارد چالش برانگیز در حفر فضاهای زیرزمینی بزرگ در مناطق شهری، حفر ایستگاه‌های مترو است. روش‌های مختلفی برای حفر ایستگاه‌های زیرزمینی مترو وجود دارد. در این فصل تاریخچه‌ی روش‌های مختلف حفاری ایستگاه‌های زیرزمینی مترو از قبیل انواع روش‌های حفر مرحله‌ای، روش‌های مکانیزه و روش‌های دارای سیستم پیش-نگهدارنده از ابتدای ساخت دهه‌ی ۶۰ میلادی تا به عصر حاضر آورده شده است.

۲-۳ سابقه‌ی موضوع

در سال ۱۸۶۳ اولین مترو در لندن ساخته شد و پس از آن ساخت مترو و ایستگاه‌های مترو به طور وسیعی در سرتاسر جهان گسترش پیدا کرد. روش حفاری ترتیبی (NATM)^۱ که روشی مبتنی بر استفاده از شاتکریت^۲ است در سال ۱۹۶۴ توسط رابسویچ^۳ معرفی شد. این روش به دلیل امکان‌پذیری فنی، ایمنی و توجیه اقتصادی در تمام جهان کاربرد فراوانی یافت (Rabcewicz 1965). این روش در ابتدا برای تونلسازی در محیط سنگی تنظیم شده بود. روش NATM در اواخر دهه‌ی ۶۰ در زمین‌های نرم در تونل‌های شهری کاربرد پیدا کرد و با گذشت زمان به عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های تونلسازی در زمین‌های نرم مورد استفاده قرار گرفت. (Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels 2010). در استفاده از روش NATM در زمین نرم پرفسور مولر^۴ در ساخت مترو فرانکفورت^۵ در سال ۱۹۶۸ پیشگام بود و در اوایل سال ۱۹۹۰ توسط کمیته‌ی فضاهای زیرزمینی لندن توسعه پیدا کرد. در سال ۱۹۹۶ نوع دیگری از شاتکریت برای تونلسازی در زمین نرم توسط ICE معرفی شد که برای زمین نرم مناسب‌تر بود (Fang, Q et al 2011). اگرچه

¹ New Austrian Tunneling Method

² Shotcrete

³ Rabcewicz

⁴ Muller

⁵ Frankfurt

روش NATM موفقیت‌های زیادی بدست آورده است و کاربرد زیادی در سراسر جهان دارد (Kolymbas, 2005). با این وجود اختلاف نظرهایی مختلفی در اجرای این روش وجود دارد (Karakus and Fowell, 2004). یکی از مباحث مطرح پیرامون روش NATM این است که آیا برای ساخت و ساز در زمین‌های نرم مناسب است یا نه (Brown, 1981). عبارت تونلسازی کم‌عمق^۱ (STM) نام روشی متمایز از NATM است که توسط وزارت ساخت جمهوری چین در سال ۱۹۸۷ انتخاب شد. این روش به طور وسیع در سازه‌های مربوط به مترو در مناطق شهری کشور چین مورد استفاده قرار گرفت. مقالات پژوهشی محدودی با تمرکز بر این موضوع در نشریات بین‌المللی چاپ شده‌اند. اثر قوسی محدود و همچنین فعال نمودن محدود مقاومت زمین دو مشخصه‌ی مکانیکی STM است. پایداری سینه‌کار و شرایط تونلسازی خشک دو پیش‌شرط کاربرد این روش هستند. در تونلسازی به روش STM برخی روش‌های کمکی الزامی که عمدتاً برای تضمین دو پیش‌شرط لازم هستند، به کار گرفته می‌شوند. این روش‌ها کمکی عبارت‌اند از: حفاری متوالی با طول پیشروی کوتاه، تکیه‌گاه صلب با نصب سریع، زمان انسداد حلقه‌ی کوتاه و پایش تغییر شکل سیستماتیک. این روش به طور گسترده در اغلب شهرهای کشور چین از قبیل پکن، شانگهای، گوانگژو و ... برای ساخت مترو استفاده شده است (Xiang et al 2005). روش حفاری ترتیبی با استفاده از ستون میانی برای ساخت ایستگاه مترو نخستین بار توسط ایرشاد^۲ در سال ۱۹۸۸ مطرح گردید. اساس این روش افزایش صلبیت سازه‌ی فضای زیرزمینی به منظور کاهش نشست است که به صورت ترکیبی با روش NATM استفاده شده است. در این روش در چند گام جلوتر از جبهه حفاری در روش NATM با استفاده از تونل پیشرو، ستونی در وسط دهانه ساخته می‌شود و بین این ستون‌ها نیز تیرهایی قرار می‌گیرد که بار جدار و پوشش تونل روی این تیرها قرار می‌گیرد و به ستون منتقل می‌شود. البته بایستی در نظر داشت که استفاده از این ردیف تیر و ستون محدود به ایستگاه‌های مترو جزیره‌ای و یا تونل‌هایی

^۱ Shallow tunneling method

^۲ Irshad

است که هندسه آنها امکان استفاده از این سیستم را ممکن می‌سازد (Narasaki et al 1992). لاناردی^۱ در سال ۱۹۹۰ به بررسی متروی میلان به روش قوس سلولی^۲ پرداخت. این روش برای روباره‌های کم و دهانه‌های بزرگ و شرایط ژئوتکنیکی خاص، یعنی جایی که ایجاد فضای زیرزمینی با روش‌های متداول دیگر بدون تاثیر بر ساختمان‌های سطحی غیر ممکن باشد، کاربرد دارد. قوس سلولی یک سازه‌ی مرکب با مقطع نیم دایره بوده و اعضای طولی (سلول‌ها) شامل لوله‌هایی هستند که با یک سری ریب‌های قوسی عرضی به یکدیگر متصل شده‌اند. مطالعات انجام شده برای بررسی محدودیت این روش نشان می‌دهد که می‌توان به طور موفق برای حفر فضاهایی با دهانه‌ی بیش از ۶۰ متر و حتی در خاک‌های سست زیر سطح ایستایی با روباره‌ی کم، بدون ایجاد هرگونه نشست سطحی محسوس، این روش را به کار برد. این روش ساخت که توسط لاناردی ابداع شد و به عنوان مرد سال در زمینه‌ی ساخت، جایزه‌ی معتبر بین المللی ثبت اخبار مهندسی^۳ را دریافت کرد، اولین بار برای ایستگاه مترو ونیز شهر میلان ایتالیا به کار گرفته شد. این ایستگاه از زیر پی ساختمان های قرن ۱۶ میلادی و زیر سطح ایستایی با روباره‌ی فقط ۴ متر عبور می‌کند. به دلیل مقطع عرضی بسیار بزرگ این ایستگاه، ساخت فضایی با این هندسه بدون استفاده از فناوری قوس سلولی امکان پذیر نبود (P. Lunardi 1990). در سال ۲۰۰۰ روش تونل‌سازی با سپر قطر بزرگ برای ساخت ایستگاه‌های مترو با سه آرک توسط بارسکی و هنگ^۴ در روسیه توسعه یافت. این روش برای ایستگاه‌های عمیق استفاده می‌شود (Barski, & Hong 2000). در سال ۲۰۰۵ گوتو و همکاران^۵ روش استفاده از سپر چند مقطع را معرفی کردند که در این روش دو یا چند سپر به صورت افقی یا عمودی به هم متصل شده اند، درحالی که هرکدام کمی جلوتر از دیگری قرار دارد. در شکل ۱-۲ نمونه‌هایی از سپر های چند مقطع نشان داده شده است. با ترکیب دو یا چند مقطع دایره‌ای یک مقطع بزرگتر غیر

¹ Lunardi

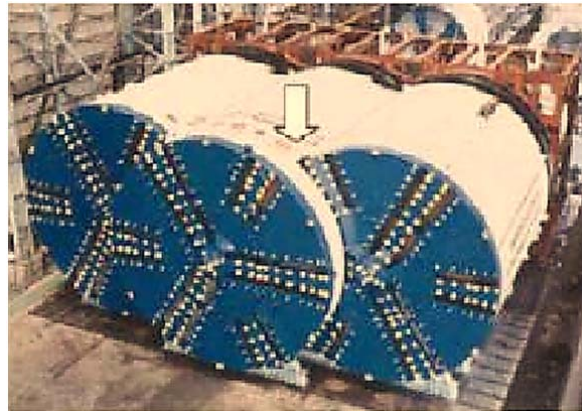
² Cellular arch technology

³ Engineering News-Record

⁴ Barski and Hong

⁵ Goto et al

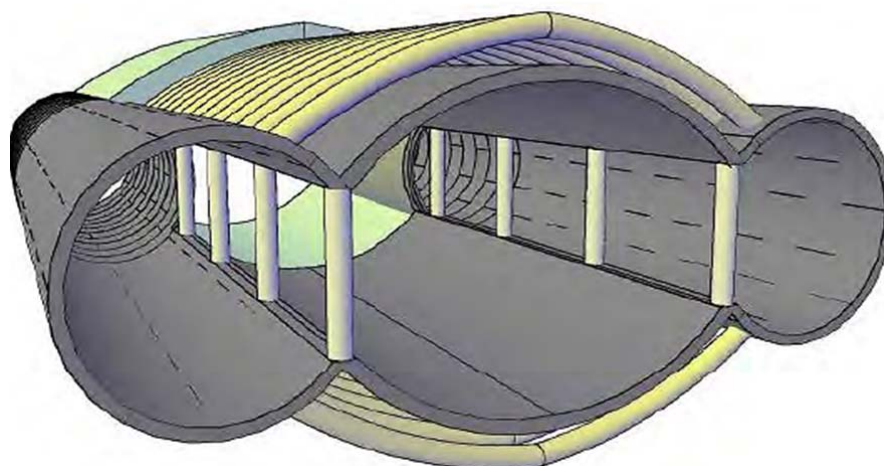
دایره ای ایجاد می شود (Goto et al 2005).



شکل ۲-۱ ماشین سپر سه مقطعی (Goto et al 2005)

کانیهیکو و کنیچی^۱ در سال ۲۰۰۶ روش پیش‌نگهدارنده با استفاده از لوله‌های قوسی را ارائه کردند. در این روش لوله‌های فولادی قوسی به عنوان سیستم پیش‌نگهدارنده همراه با انجماد خاک یا تزریق، برای ایجاد یک ناحیه‌ی مقاوم در زمین قرار داده می‌شوند تا داخل فضای ایجاد شده با اطمینان بالا برداشته شود. این روش در فضاهای زیرزمینی با سطح مقطع برزرگ و همچنین عمق زیاد، به منظور نگهداری خاک و جلوگیری از نفوذ آب، دارای قابلیت اعتماد و ایمنی بالایی است. شیوه‌ی انجماد خاک به منظور مقاوم‌سازی خاک و جلوگیری از نفوذ آب در بخش‌های بین لوله‌های پوشش دهنده، استفاده می‌شود اما عملیات انجماد به صورت موقت است و این روش همراه با خطراتی نظیر افت انجماد و کاهش چسبندگی خاک همراه است. در شکل ۲-۲ تصویری از این روش را نشان داده شده است. (Kunihiko & Kenichi 2006).

^۱ Kunihiko & Kenichi



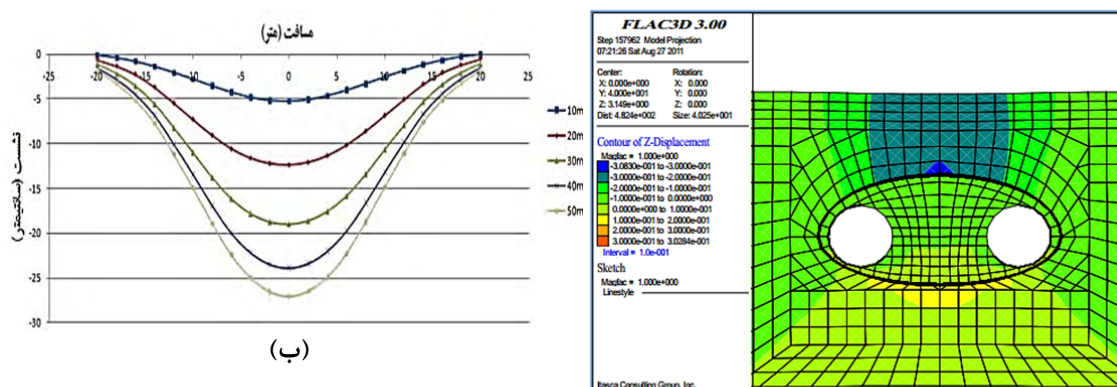
شکل ۳-۲ تصویر نمادین روش پیش‌نگهدارنده با استفاده از لوله‌های قوسی (Kunihiko & Kenichi)

(2006)

در سال ۲۰۰۷ روش دیگری توسط لو^۱ معرفی شد که در آن دو تونل سپری موازی که با کانال‌های متقابل به هم متصل می‌شوند تا ایستگاهی شبیه عینک ایجاد شود که این روش در ژاپن و آلمان مورد استفاده قرار گرفته است (Lu & M.L 2007). همچنین روشی با استفاده از دو تونل سپری با قطر بیرونی ۶ متر نیز برای ساخت ایستگاه مترو بوسیله‌ی روش Shollow-Buried توسط لو در چین توسعه داده شد (Lu & M.L 2007). در سال ۲۰۱۰ صدقیانی و دادیزاده روش جدیدی به نام سیستم بتن قوسی پیش‌نگهدارنده را در ایستگاه منصور تبریز مورد استفاده قرار دادند. این روش که نام دیگر آن کپس (CAPS) می‌باشد به این صورت است که در آن یک ساختمان زیرزمینی بتنی شامل شمع و ریب پیرامون تونلی که ابتدا به روش حفر بخشی یا مکانیزه حفر شده، ساخته می‌شود. پس از اتمام سازی نگهبان بتنی عملیات تعریض تونل به اندازه‌ی ابعاد ایستگاه انجام می‌شود. برخلاف روش قوس سلولی در این روش سازه نگهبان اولیه نقش زیادی در تحمل بار نهایی ندارد (Sadaghiani & Dadizadeh 2010). والی زاده و صدقیانی و احمدی در سال ۲۰۱۱ تاثیر استفاده از روش ستون میانی

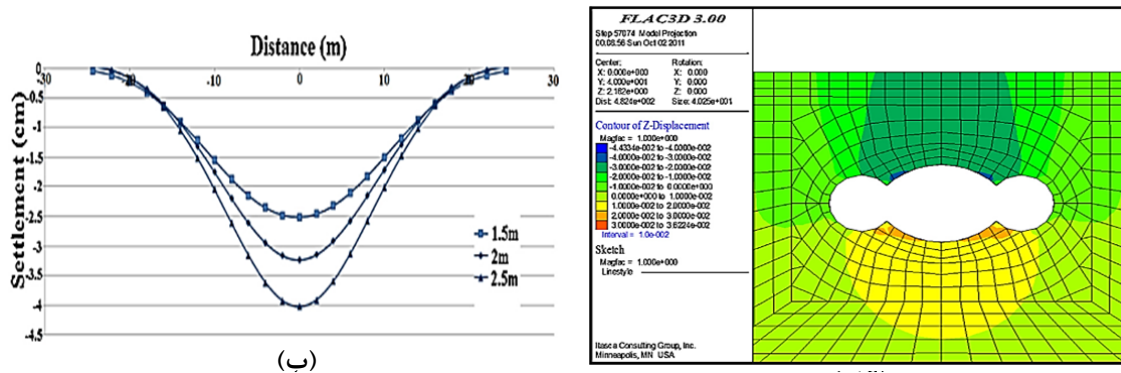
¹Lu

¹(CBC) در حفريات زیرزمینی با دهانه‌ی بزرگ را بر روی نشست سطح زمین با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش (CBC) در اعماق کم می‌تواند باعث کاهش میزان نشست سطح زمین و کاهش تمرکز تنش بر روی نگهداری اولیه شود (A. Valizadeh et al 2011). عبدی و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از مدل‌سازی عددی سه روش حفاری ترتیبی، پیش‌نگهدارنده با استفاده از لوله‌های قوسی و حفاری ترتیبی با استفاده از ستون میانی را برای ایستگاه نقش جهان اصفهان بررسی کردند که به ترتیب کمترین نشست سطح را برای روش پیش‌نگهدارنده با استفاده از لوله‌های قوسی، حفاری ترتیبی با استفاده از ستون میانی و حفاری ترتیبی مشاهده کردند. در شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴ و ۲-۵ به ترتیب هندسه‌ی مدل و بخشی از نتایج مدل‌سازی سه روش حفاری ترتیبی، پیش‌نگهدارنده با استفاده از لوله‌های قوسی و حفاری ترتیبی با استفاده از ستون میانی نشان داده شده است. (M. Abdi et al 2013).

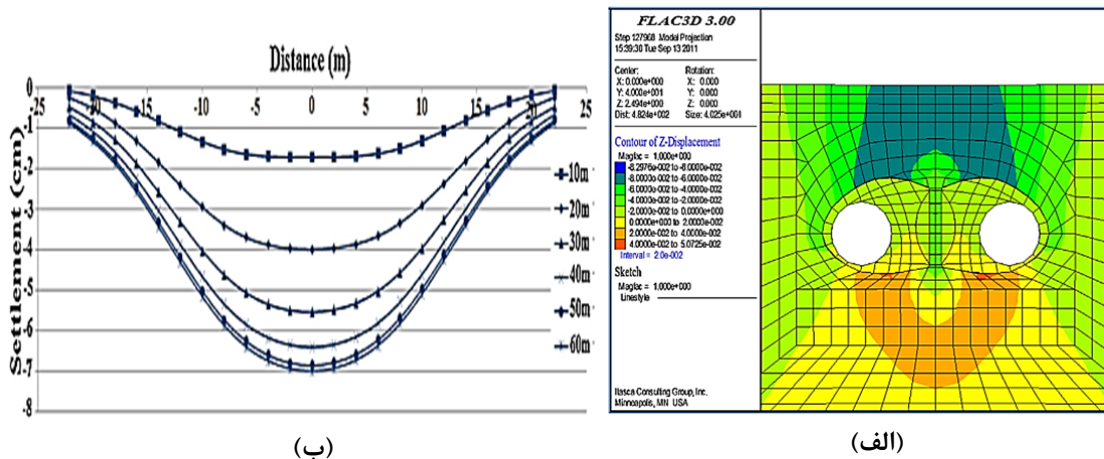


شکل ۳-۰ الف) هندسه‌ی مدل روش حفاری ترتیبی (ب) میزان نشست سطح زمین در ایستگاه برای گام های پیشروی مختلف (M. Abdi et al 2013)

¹ Central Beam Column

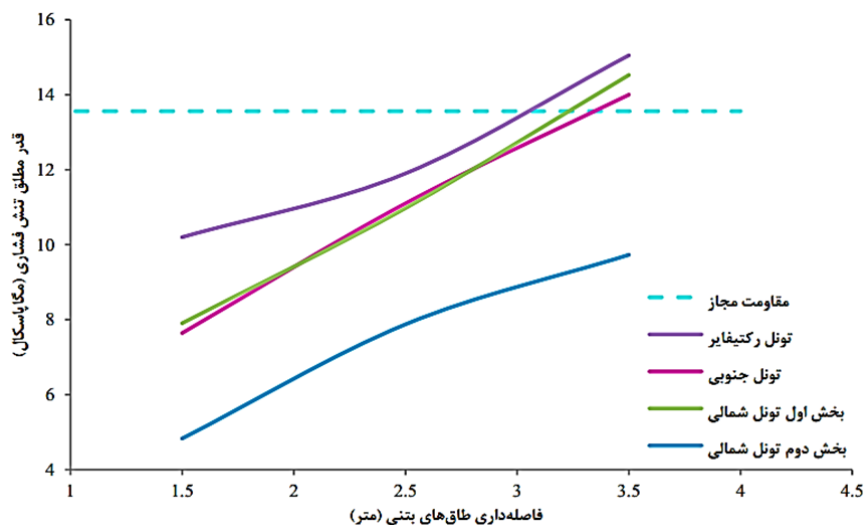


شکل ۳-۴ (الف) هندسه‌ی مدل روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی (ب) میزان نشست سطح زمین در ایستگاه برای فاصله‌داری‌های مختلف لوله‌های نگهدارنده (M. Abdi et al 2013)



شکل ۳-۵ (الف) هندسه‌ی مدل روش حفاری تریبی با استفاده از ستون میانی (ب) میزان نشست سطح زمین در ایستگاه برای گام‌های پیشروی مختلف (M. Abdi et al 2013)

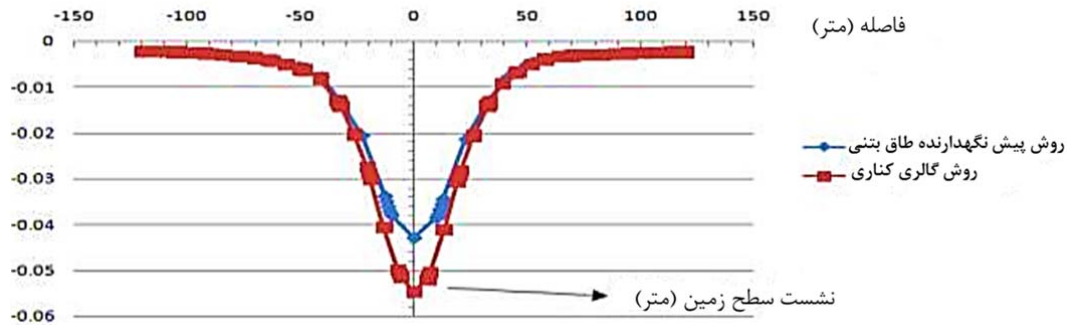
در سال ۲۰۱۳ ریحانیان زواره و همکاران فاصله‌داری بهینه‌ی طاق‌های بتنی را در روش پیش-نگهدارنده‌ی طاق‌بتنی (CAPS) در ایستگاه هفت تیر خط ۶ متروی تهران با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی کرده برای هر قسمت فاصله‌داری بهینه را پیشنهاد کردند. آن‌ها با کنترل نتایج مدل-سازی عددی فاصله‌داری ۲.۵ تا ۳.۵ متری را برای قسمت‌های مختلف ایستگاه پیشنهاد کردند. مقایسه‌ی مقادیر تنش فشاری با مقاومت مجاز در فاصله‌داری‌های مختلف برای قسمت‌های مختلف ایستگاه را در شکل ۲-۶ می‌بینیم (ریحانیان زواره و همکاران ۱۳۹۲).



شکل ۶-۰ مقایسه‌ی مقادیر تنش فشاری با مقاومت مجاز در فاصله‌داری‌های مختلف برای قسمت‌های مختلف ایستگاه (ریحانیان زواره و همکاران ۱۳۹۲)

همچنین قارونی نیک و همکاران در سال ۲۰۱۳ تقدم ساخت ایستگاه بر تونل و یا تقدم تونل بر ایستگاه را در یکی از ایستگاه‌های خط ۷ متروی تهران بررسی کردند. در حالی که تونل از موقعیت ایستگاه عبور کرده و ایستگاه بعد از تونل ساخته شود هزینه‌ی برچیدن سگمنت‌ها نیز علاوه بر هزینه‌ی پنهان تخریب تونل، به عنوان یک عامل هزینه‌بر مطرح می‌شود. از طرفی به اندازه‌ی حجم تونل از خاکبرداری ایستگاه کم می‌شود که این مورد با هزینه‌ی منفی لحاظ شده است. در کل بعد از بررسی همه‌ی موارد این نتیجه گرفته شد که اگر ایستگاه قبل از تونل ساخته شود بهتر است. به این دلیل که هم هزینه ساخت ایستگاه کمتر می‌شود و هم اینکه ساخت ایستگاه قبل از تونل مزایایی از قبیل موارد ذیل دارد: ایجاد فضای مناسب برای تعمیرات و رسیدگی به تی بی ام پس از رسیدن به تونل؛ ایجاد فضایی برای تخلیه‌ی مصالح حفاری و دپوی سگمنت و ... (قارونی نیک و همکاران ۱۳۹۲). حجاری-راد و همکاران در سال ۲۰۱۳ دو روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی و گالری کناری را در ایستگاهی از خط ۷ متروی تهران، با مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار پلکسیس مقایسه بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سیستم پیش‌نگهدارنده طاق بتنی علاوه بر تامین پایداری فضای زیر زمینی، نشست قابل قبولی در تاج تونل و سطح خیابان در مقایسه با روش گالری‌های کناری داشته

است. در شکل ۱-۲ نمودار پروفیل نشست سطح زمین در مقطع اواسط حفاری در دو روش مشاهده می‌شود (حجاری‌راد و همکاران ۱۳۹۲):



شکل ۷-۰ مقایسه‌ی نشست سطح در دو روش گالری کناری و پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی (حجاری‌راد و همکاران ۱۳۹۲)

در سال ۲۰۱۴، جان^۱ و همکاران روش PBA را بررسی کردند. در این روش عمل بزرگ کردن یک تونل سپری بزرگ با استفاده از شمع-تیر-قوس^۲، به منظور ساخت ایستگاه مترو انجام می‌شود که توسط محققان چینی معرفی شده است و ایستگاه‌های زیادی در پکن با این روش ساخته شده است. کاربرد این روش زمانی است که نتوان از روش‌های سنتی بدلیل وجود ساختمان‌های متراکم و راه‌های باریک استفاده کرد (Jun et al 2014). در سال ۲۰۱۵ ژائو^۳ و همکاران روش STR^۴ را معرفی کردند که این روش برای حل مشکلات ساخت ایستگاه‌های عمیق و در محیط آبدار ابزار مناسبی است. اما نیاز به مطالعات بیشتر و اعتبارسنجی دارد، چراکه این روش هنوز روشی جدید و خام است. روش STR از ساختار لوله‌ای برای ایجاد یک مانع نفوذ ناپذیر و همچنین سیستم نگهداری و سیستم تنش استفاده می‌کند. با حفاظت سقف لوله‌ای، ایستگاه مترو می‌تواند در شرایط ایمن ساخته شود (Kai Zhao et al 2015).

¹ Jun

² Pile-Beam-Arc

³ Zhao

⁴ Super Tubular Roof Method

۳-۳ جمع بندی

تمامی روش‌های حفاری ایستگاه مترو در طول تاریخ بررسی و مطالعه شده اند اما در سال‌های اخیر بیشتر به بررسی روش‌های مکانیزه پرداخته شده است. همچنین اخیرا با پیشرفت نرم‌افزارهای عددی، روش‌های مختلف در شرایط یکسان، با هم مقایسه شده اند و امکان مطالعه‌ی تاثیر عوامل مختلف بر پایداری روش‌ها فراهم شده است.

فصل چهارم

مدلسازی روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق‌بتنی

و (CAPS)

روش گالری کناری (Side Drift)

۱-۴ مقدمه

امروزه مدل‌سازی عددی به عنوان ابزاری کارآمد در برآوردهای مهندسی معرفی شده است. مدل‌سازی عددی ابزار مناسبی برای درک رفتار توده سنگ و خاک و پیش‌بینی نواحی و مقادیر تغییر شکل ناشی از حفاری است. امروزه از این روش به‌طور وسیع برای طراحی سازه‌های سنگی و خاکی نظیر تونل‌ها، فضاهای بزرگ زیرزمینی و ... استفاده می‌شود. امروزه روش CAPS یکی از پرکاربردترین روش‌های حفر ایستگاه مترو در کشور است. بر مبنای مطالعات گذشته، روش گالری‌کناری SEM (Side Drift) از انواع روش‌های حفر مرحله‌ای برای مقایسه با روش CAPS انتخاب شد. روش گالری‌کناری حجم حفاری و مصرف مصالح کمتری نسبت به روش CAPS دارد. در این فصل با استفاده از مدل‌سازی عددی، پایداری و نشست سطح حاصل از دو روش یاد شده بررسی شده است.

۲-۴ انتخاب نرم‌افزار مناسب برای حل مساله

در حال حاضر تعدادی نرم‌افزار تحلیلی وجود دارد که با استفاده از روش‌های عددی قادر به حل مسائل ژئومکانیکی هستند ولی اغلب این برنامه‌ها ویژه‌ی محیط‌های خاکی نیستند اما نرم‌افزار FLAC3D با قابلیت‌های فراوان از جمله در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، محاسبه‌ی کرنش‌های بزرگ، مدل‌های رفتاری مختلف خاک، وجود المان‌های سازه‌ای متنوع با قابلیت مدل کردن رفتار طیف وسیعی از سازه‌های مرتبط با خاک از سابقه‌ی بیشتری برخوردار است. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده در این پایان‌نامه از نرم‌افزار FLAC3D استفاده شده است.

۳-۴ معرفی نرم‌افزار FLAC3D

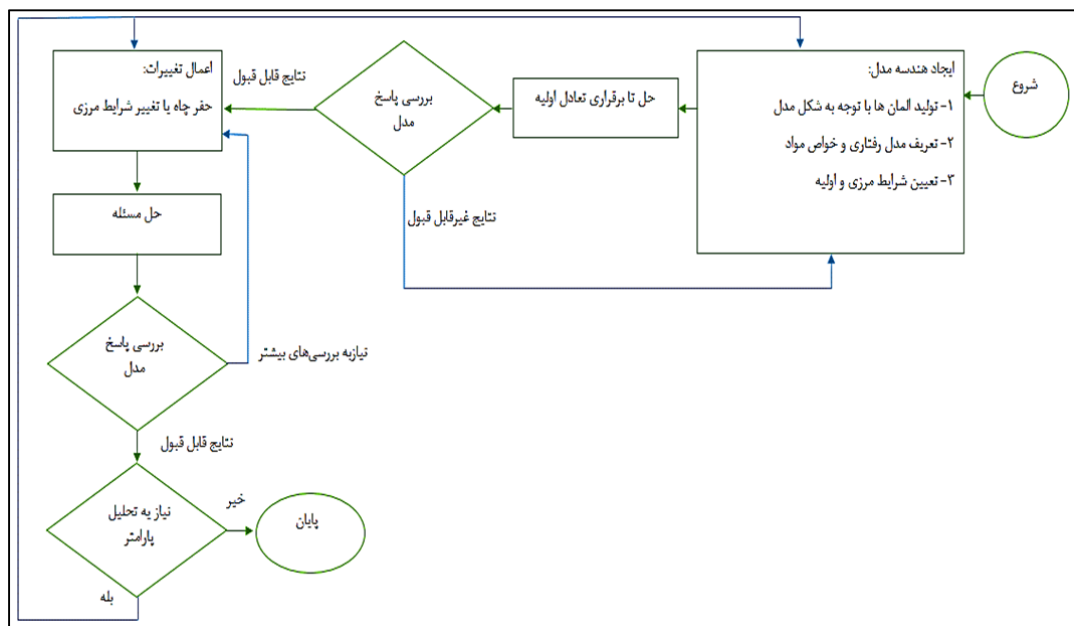
FLAC3D نرم‌افزار تفاضل محدودی است که برای محاسبات مکانیکی به کار می‌رود. نرم‌افزار FLAC3D رفتارهای مکانیکی سه بعدی مواد را با عناوین تعادل حدی و یا جریان پلاستیک پایدار محاسبه می‌کند. همچنین در این نرم‌افزار زمانی که گام زمانی به کار می‌رود، از فرمولاسیون حل صریح استفاده می‌شود. این نرم‌افزار کاربردهای مختلفی در مسائل ژئومکانیکی دارد. در این نرم‌افزار مواد با شبکه‌های چند گوشه‌ای در سه جهت X, Y و Z تولید می‌شوند. مواد می‌توانند تسلیم شوند، جریان

یابند و گره‌ها می‌توانند تغییر شکل بزرگی در حالت کرنش بزرگ انجام دهند. به منظور اعمال نیرو و شرایط مرزی قوانین تنش-کرنش خطی و غیرخطی می‌توانند به هر المان اعمال شوند. نرم افزار FLAC3D از طرح محاسباتی صریح^۱ استفاده می‌کند. در روش صریح، جابجایی هر گره با توجه به شتاب آن گره در هر گام بارگذاری محاسبه می‌شود. در این روش، تأثیر نیروهای خارجی بر روی جسم به شکل انتشار امواج تنشی خواهد بود و مسئله به صورت دینامیکی حل می‌شود. همچنین روش محاسبات به گونه‌ای است که لازم به تشکیل ماتریس سختی برای کل سازه نیست. به طور کلی روش حل صریح شامل مراحل خرد کردن و جزئی کردن مسئله به مسایل کوچک‌تر و حل مسئله بصورت محلی می‌باشد. استفاده از این روش در حل مسائل غیرخطی برای موادی با رفتار غیرخطی بسیار کارآمد است. با این وجود نکته مهمی که نباید از آن غافل شد این است که اعتبار نتایج در روش حل صریح مشروط به انتخاب گام‌های زمانی کوچک است (Lau, 2010).

۴-۴ روند مدل‌سازی عددی سه بعدی با نرم‌افزار FLAC3D

در مدل‌سازی با هر نرم‌افزار عددی، پیروی از روندی خاص به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی بسیار اهمیت دارد. بنابراین در مطالعه کنونی روند حل منطبق بر اصول ارائه شده در دستورالعمل کاربردی نرم‌افزار و مطابق شکل ۴-۱ است. ایجاد هندسه مدل و برقراری شرایط اولیه و مرزی نخستین مراحل مدل‌سازی با نرم‌افزار FLAC3D هستند که نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای در دقت حل مسئله دارند. پس از اطمینان یافتن از اعمال شرایط مورد نظر در هندسه اولیه، تغییرات متناسب با هدف در مدل ایجاد شده و پس از بررسی و تأیید صحت نتایج اولیه در صورت نیاز به تحلیل حساسیت بخش‌های مختلف مدل پرداخته می‌شود.

^۱ explicit



شکل ۴-۱ روند نمادین حل مسائل با نرم افزار FLAC3D (Itasca Consulting Group, Inc., 2013)

۴-۵ معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

خط شش مترو تهران یکی از خطوط درون شهری با ۳۰ ایستگاه به طول ۳۱ کیلومتر است. این خط از محدوده‌ی 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 محدوده شمال غربی تهران خواهد رسید. در تحقیق حاضر ایستگاه نوزدهم این خط به نام ایستگاه مرزداران مورد مطالعه قرار گرفته است. این ایستگاه در عمق ۳۰ متری از سطح زمین و با طول ۱۴۰ متر و عرض ۲۱ متر در محل تقاطع خیابان سرسبز و بلوار مرزداران شهر تهران واقع شده است.

۴-۶ تعیین مدل و خصوصیات مواد

در نرم افزار FLAC3D با استفاده از دستور "Model mechanical" مدل رفتاری بخش‌های مختلف مسئله تعیین می‌شود. در این پژوهش برای خاک مدل موهر-کلمب و برای المان‌های نگهداری از مدل الاستیک استفاده شده است. جداول ۴-۱ تا ۴-۳ پارامترهای خاک، شاکریت و

لاینینگ را نشان می‌دهند.

جدول ۴-۱ پارامترهای مدل برگرفته از ایستگاه S6 خط ۶ متروی تهران (گزارش ژئوتکنیک خط ۶ متروی تهران)

پارامتر (واحد)	مقدار
مدول حجمی (پاسکال)	8.18e7
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	2000
مدول برشی (پاسکال)	2.73e7
چسبندگی (پاسکال)	2e4
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	36

با توجه به اینکه خواص شاتکریت و لاینینگ به کار رفته در ایستگاه در اختیار نبود، از خواص موجود در مقالات استفاده شده است.

جدول ۴-۲ پارامترهای شاتکریت (F. Perman & J. Sjöberg 2007)

پارامتر (واحد)	مقدار
مدول حجمی (گیگاپاسکال)	1.067e10
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	2300
مدول برشی (گیگاپاسکال)	6.4e9

جدول ۴-۳ پارامترهای لاینینگ (Chakeri et al 2013)

پارامتر (واحد)	مقدار
مدول حجمی (گیگاپاسکال)	1.067e10
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	2300
مدول برشی (گیگاپاسکال)	6.4e9

۷-۴ تعیین خصوصیات فصل مشترک لایه‌ها

برای برقراری اندرکنش مناسب، جلوگیری از خطای ناشی از فرورفتن مواد با سختی‌های متفاوت

در هم و همچنین بهبود سرعت حل مسئله، استفاده از المان فصل مشترک^۱ ضروری است. در این مدل سازی سه نوع فصل مشترک شامل فصل مشترک میان خاک و بتن (شمع و ریب)، فصل مشترک خاک با شاتکریت، و در نهایت فصل مشترک شاتکریت و بتن (لاینینگ) استفاده شده است. بر اساس دستورالعمل نرم افزار، در شرایطی مشابه مدل سازی کنونی به دلیل وجود موادی با سختی های متفاوت، سختی نرمال و برشی هر فصل مشترک ۱۰ برابر سخت تر از سختی ظاهری نرم ترین لایه مجاور آن پیشنهاد شده است (ITASCA Consulting Group, Inc., 2016). بنابراین با استفاده از رابطه ۴-۱ سختی ظاهری تمام بخش های مدل محاسبه شده است. خواص انواع فصل مشترک استفاده شده در مدل سازی در رابطه ی ۴-۱ ارائه شده است.

رابطه ۴-۱

$$K = \max \left\{ \frac{bu + \frac{4}{3}G}{\Delta L_{\min}} \right\}$$

در این رابطه K سختی ظاهری (پاسکال)، bu مدول بالک (پاسکال)، G مدول برشی (پاسکال) و ΔL_{\min} کمترین بعد ناحیه (متر) مجاور فصل مشترک در المان نرم تر است (ITASCA Consulting Group, Inc., 2016). جدول ۴-۴ خواص انواع فصل مشترک در مدل سازی را نشان می دهد.

جدول ۴-۴ خواص انواع فصل مشترک های استفاده شده در مدل سازی

نوع فصل مشترک	سختی نرمال (پاسکال)	سختی برشی (پاسکال)
خاک با بتن (شمع و ریب)	1.69e10	1.69e10
خاک با شاتکریت	2.36e9	2.36e9
شاتکریت با بتن (لاینینگ)	6.4e11	6.4e11

۴-۸ شرایط اولیه و مرزی

شرایط اولیه شامل برقراری مقادیر تنش برجا در مدل سه بعدی است. در نرم افزار FLAC3D می-

^۱ Interface

توان تمام مقادیر تنش را با دستور "Initial" در مدل سازی اعمال کرد. با توجه به اطلاعات موجود تنش های برجا، تنش قائم بر مبنای رابطه ی ۲-۴ محاسبه می شود و تنش های افقی نیز نصف تنش قائم در نظر گرفته می شود.

$$S_{zz} = \rho gh$$

رابطه ی ۲-۴

در این رابطه ρ چگالی، g شتاب گرانش زمین و h عمق قرارگیری ایستگاه است. جدول ۴-۵ مقدار تنش در سه جهت آورده شده است.

جدول ۴-۵ مقدار تنش در سه جهت

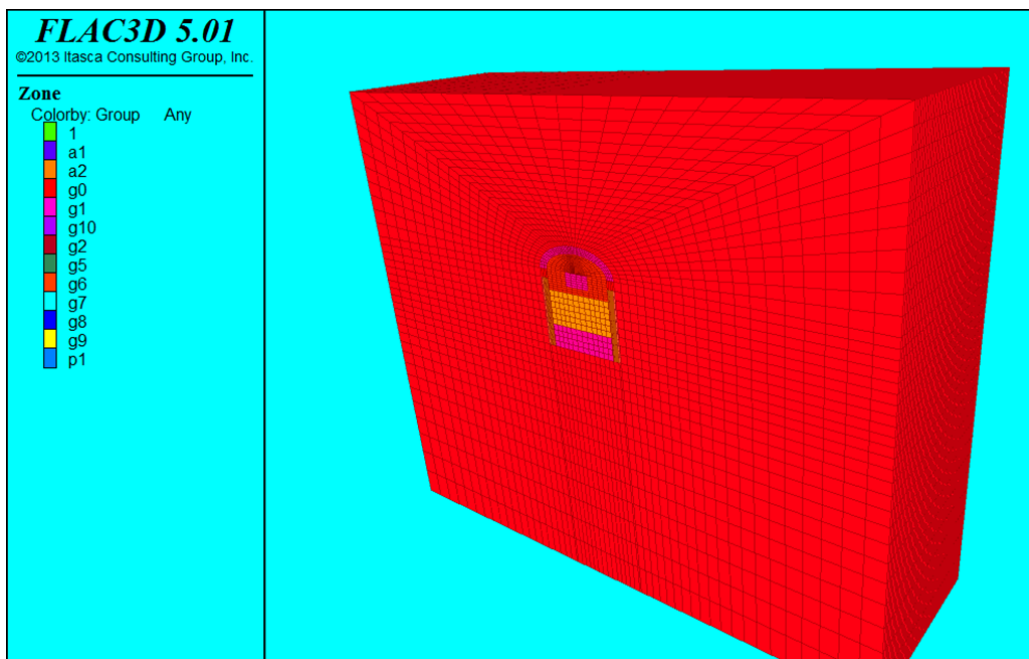
مقدار (پاسکال)	نوع تنش
6e5	S_{zz}
3e5	S_{yy}
3e5	S_{xx}

با استفاده از دستور "Apply szz" مقدار بار قائم ثابت $3e3$ - پاسکال به مرز بالایی هر دو مدل (SEM و CAPS) اعمال شده است. سایر مرزهای هر دو مدل نیز با دستور "Fix" ثابت می شوند.

۴-۹ مدل سازی روش CAPS

۴-۹-۱ مشخصات هندسه ی مدل

مدل اول، روش پیش نگهدارنده ی طاق بتنی یا روش شمع و ریب یا همان CAPS است که هندسه ی کامل مدل در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



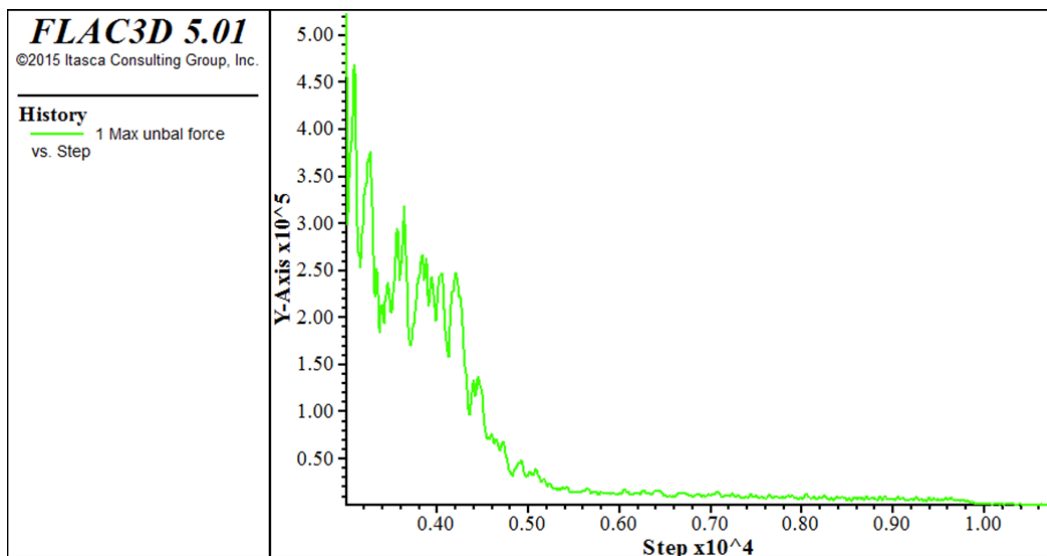
شکل ۴-۲ هندسه‌ی کامل مدل در روش CAPS

ابعاد مدل $114 \times 42 \times 140$ است. فاصله‌ی تاج ایستگاه تا بالاترین سطح مدل که همان سطح زمین است، مشابه ایستگاه مورد مطالعه ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی مرکز مدل تا مرزهای کناری ۷۰ متر است که حدود ۳.۵ برابر قطر مدل است. و فاصله‌ی کف ایستگاه تا پایین‌ترین سطح مدل ۶۰ متر در نظر گرفته شده است. هرچه ابعاد مدل نهایی بزرگ‌تر شود باعث افزایش زمان محاسبات می‌شود. از آنجایی که هندسه‌ی مدل در طول ایستگاه، متقارن و یکنواخت در نظر گرفته شده است، طول مدل هم کوچکتر از ابعاد واقعی ایستگاه و ۴۲ متر در نظر گرفته شده است. در مورد ابعاد مدل ساخته شده این نکته قابل ذکر است که با توجه به بزرگی ابعاد ایستگاه، سعی بر آن شد که ابعاد نهایی مدل خیلی بزرگ نباشد تا محاسبات سریع‌تر انجام شود.

۴-۹-۲ تعادل اولیه

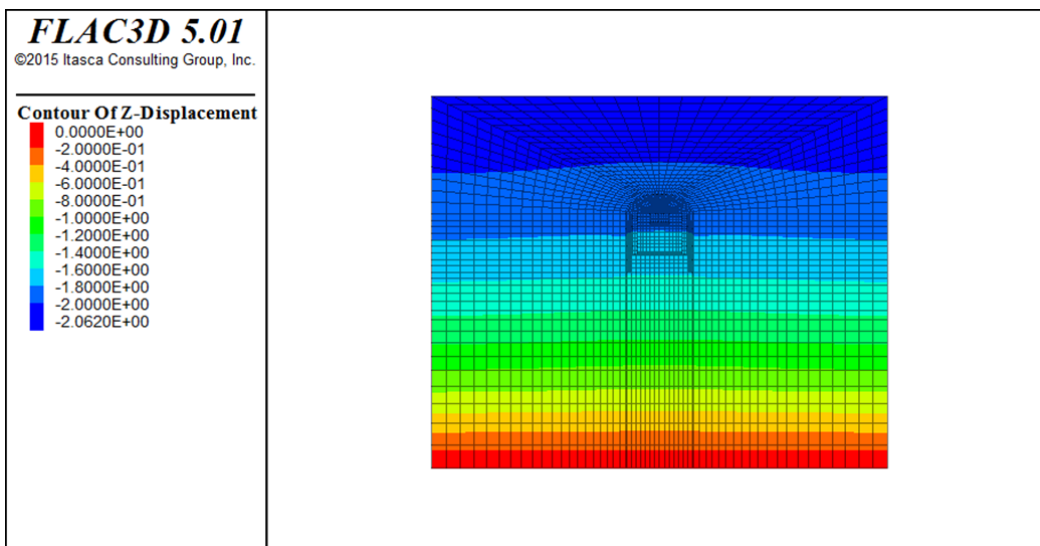
قبل از حل مسئله، رسیدن به تعادل مکانیکی نیاز است (Lau, 2010). پس از حل مدل بصورت مکانیکی، پارامترهای خاصی هستند که در طول مدل‌سازی با FLAC3D محاسبه می‌شوند. این پارامترها در موقعیت‌های کلیدی از مدل اعتبارسنجی می‌شوند که شامل تنش قائم، جابجایی قائم و

نرخ نیروی نامتعادل می‌شوند. نیروی نامتعادل در واقع نسبت بین مقاومت کلی و بارگذاری نیروی کلی در مجموعه است. هنگامی که نیروی نامتعادل به صفر می‌رسد، سیستم به تعادل مکانیکی رسیده که برای مرحله بعد آماده شده است. تاریخچه نیروی نامتعادل بلوک در شکل ۳-۴ و کانتور جابجایی قائم در شکل ۴-۴ و کانتور تنش قائم در شکل ۴-۵ ارائه شده است.

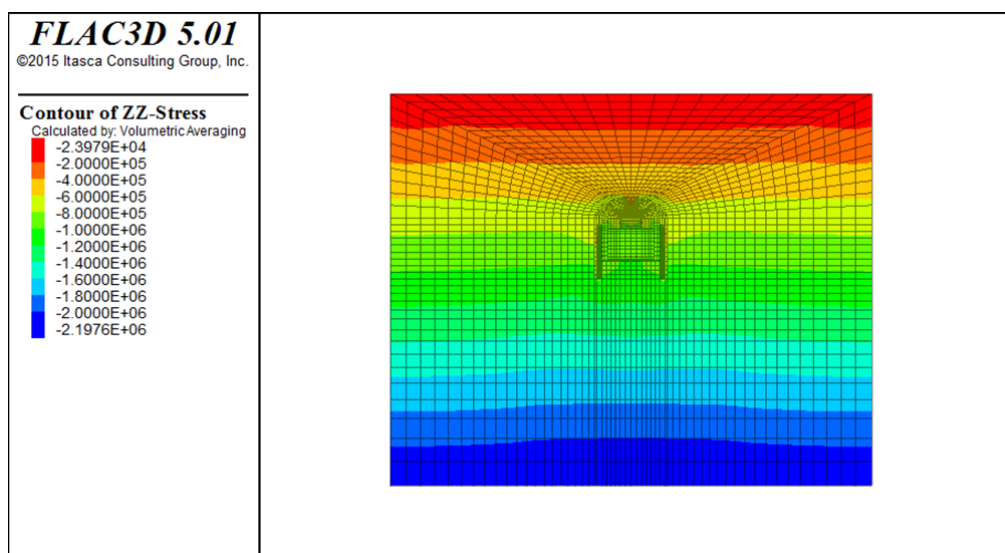


شکل ۳-۴. تاریخچه نیروی نامتعادل

با توجه به شکل ۳-۴ مشاهده می‌کنیم که تاریخچه نیروی نامتعادل بلوک به درستی به صفر میل می‌کند.



شکل ۴-۴ کانتور جابجایی قائم



شکل ۴-۵ کانتور تنش قائم

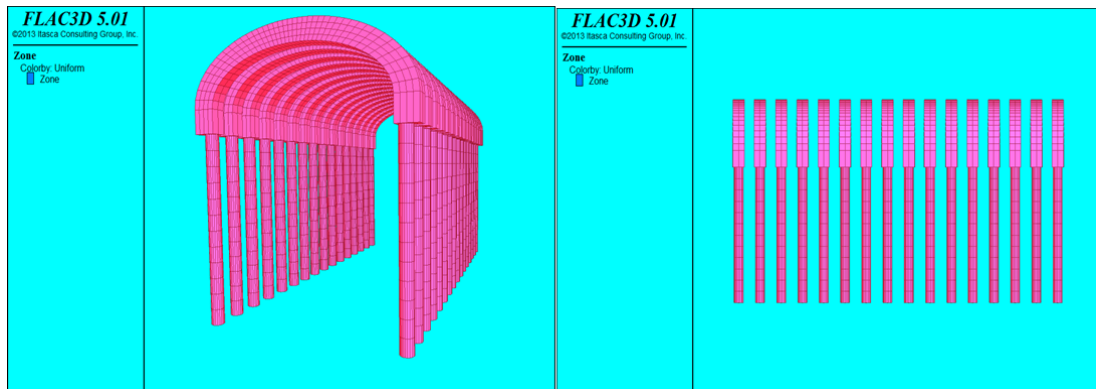
اختلاف سطح تنش‌ها و جابجایی‌ها ناشی از اعمال نیروی وزن خود بلوک است. همانطور که در شکل ۴-۴ و شکل ۴-۵ مشخص است اختلاف سطح تنش‌ها و جابجایی‌ها بصورت صحیح (افقی و منظم) طبقه بندی شده است.

۴-۹-۳ مراحل حفر و نگهداری ایستگاه

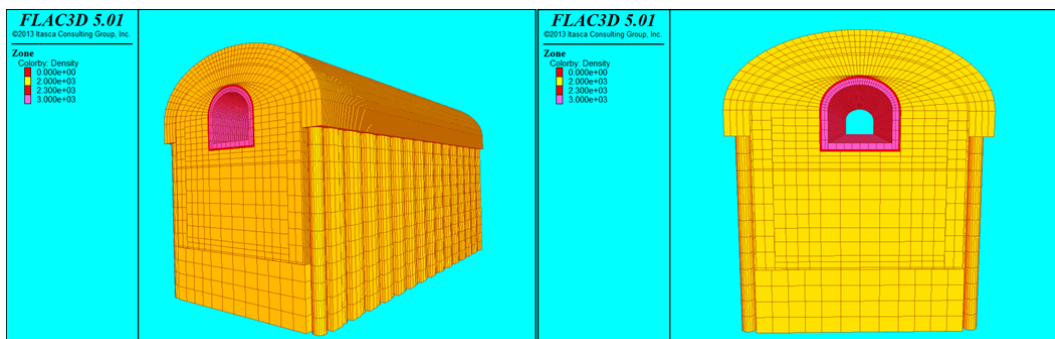
در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی تونل اولیه با گام حفاری یک متر حفاری می‌شود یعنی

بلافاصله بعد از یک متر پیشروی شاتکریت اجرا شده و یک مرحله محاسبات نرم‌افزار انجام می‌شود. پس از رسیدن طول حفاری به ۱۸ متر، ۶ متر ابتدای نگهداری اصلی اجرا می‌شود. سپس حفر تونل ۶ متر دیگر ادامه پیدا می‌کند تا به طول ۲۴ متری برسد و در ادامه نگهداری اصلی در ۶ متر دوم اجرا می‌شود. پس از هر مرحله اجرای لاینینگ نیز یک مرحله از محاسبات نرم‌افزار انجام می‌شود. این روند تا اتمام حفاری تونل اولیه ادامه پیدا می‌کند. در این روش حداکثر فاصله‌ی بین نگهداری موقت (شاتکریت) و نگهداری اصلی (لاینینگ) ۱۸ متر است. نگهداری موقت در تونل اولیه یک لایه شاتکریت به ضخامت ۱۵ سانتیمتر است و نگهداری اصلی لاینینگ به ضخامت ۵۰ سانتیمتر است. پس از تکمیل حفر و نگهداری تونل اولیه، شمع‌ها و ریب‌ها مدل‌سازی می‌شوند. فاصله‌ی مرکز به مرکز شمع‌ها و ریب‌ها مطابق ایستگاه مورد مطالعه ۲.۸ متر در نظر گرفته شده است. محل قرارگیری سازه نگهبان (شمع و ریب‌ها) در شکل ۴-۶ آورده شده است.

وضعیت مدل پس از اتمام حفر و نگهداری تونل اولیه در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



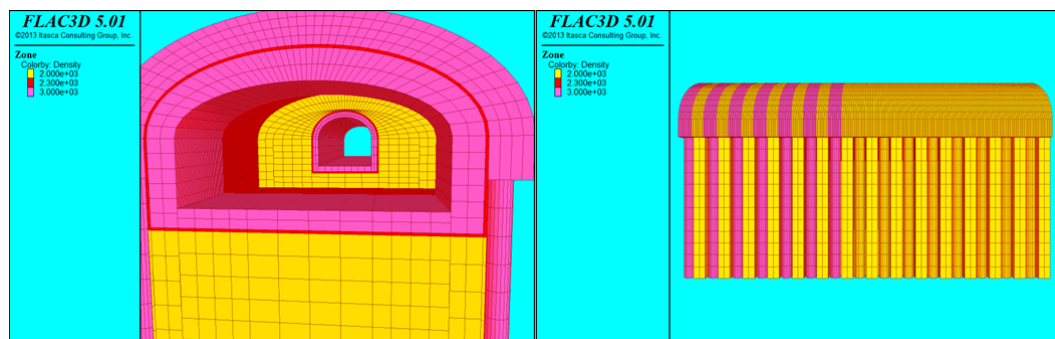
شکل ۴-۶ سازه نگهبان (شمع و ریب)



شکل ۴-۷ تونل اولیه. رنگ زرد خاک، رنگ قرمز شاتکریت و رنگ صورتی لاینینگ است.

بعد از اتمام تونل اولیه نوبت به حفر طبقه‌ی بالای ایستگاه می‌رسد. ابتدا شمع‌ها و ریب‌ها ایجاد شده و سپس لاینینگ تونل اولیه تخریب می‌شود و خاک‌برداری طبقه‌ی اول تارسیدن به ابعاد نهایی انجام می‌شود. در این قسمت هم گام حفاری یک متر است. یعنی بلافاصله بعد از یک متر پیشروی شاتکریت اجرا شده و یک مرحله محاسبات نرم‌افزار انجام می‌شود. پس از رسیدن طول حفاری به ۱۸ متر، ۶ متر ابتدای نگهداری اصلی اجرا می‌شود. سپس حفر طبقه‌ی بالا ۶ متر دیگر ادامه پیدا می‌کند تا به طول ۲۴ متری برسد و در ادامه نگهداری اصلی در ۶ متر دوم اجرا می‌شود. پس از هر مرحله اجرای لاینینگ نیز یک مرحله از محاسبات نرم‌افزار انجام می‌شود. این روند تا اتمام حفاری طبقه‌ی اول ادامه پیدا می‌کند. در این روش حداکثر فاصله‌ی بین نگهداری موقت (شاتکریت) و نگهداری اصلی (لاینینگ) ۱۸ متر است. نگهداری موقت در طبقه‌ی بالا یک لایه شاتکریت به ضخامت ۱۵ سانتیمتر است و نگهداری اصلی لاینینگ به ضخامت ۱۵۰ سانتیمتر است

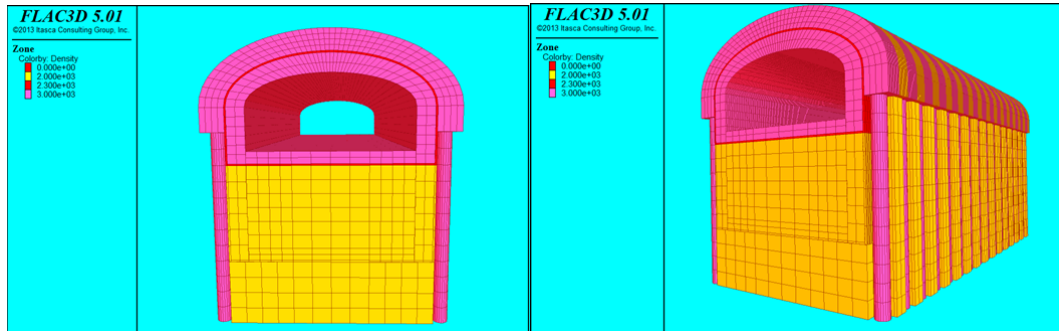
در شکل ۴-۸ تصاویری از مراحل حفر طبقه‌بالا را مشاهده می‌کنید.



شکل ۴-۸ تصاویری از مراحل حفر طبقه‌بالا. رنگ زرد خاک، رنگ قرمز شاتکریت و رنگ صورتی لاینینگ و

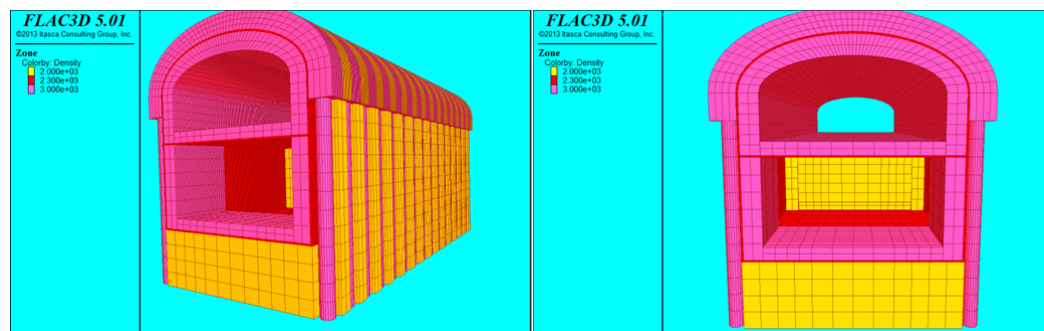
شمع و ریب است. (خاک دور شمع‌ها برداشته شده است تا شمع‌ها بخوبی نمایان باشند)

شکل ۴-۹ وضعیت ایستگاه را پس از اتمام حفر و نگهداری طبقه‌ی اول نشان می‌دهد.



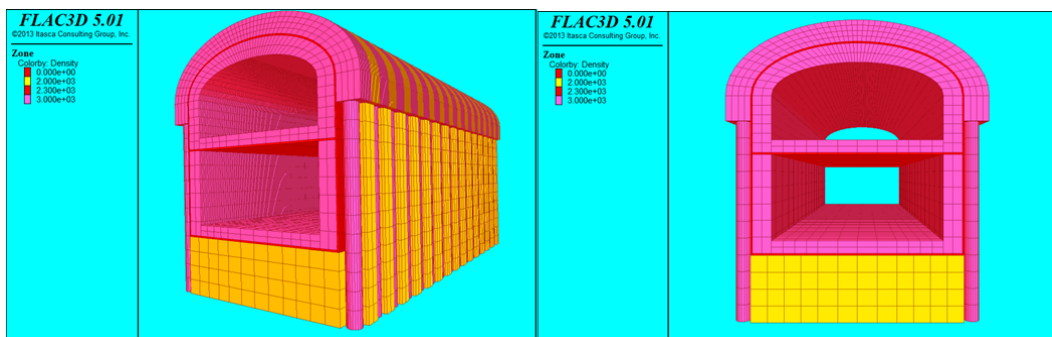
شکل ۴-۹ حفر و نگهداری طبقه‌ی بالا بصورت کامل. رنگ زرد خاک، رنگ قرمز شاتکریت و رنگ صورتی لاینینگ و شمع و ریب است.

طبقه‌پایین نیز مشابه طبقه‌ی بالا حفر و نگهداری می‌شود با این تفاوت که دیگر تمام شمع‌ها و ریب‌ها در طول ایستگاه ایجاد شده‌اند و در طبقه‌ی پایین فقط عملیات خاکبرداری و نگهداری انجام می‌شود. شکل ۴-۱۰ تصاویری از مراحل حفر طبقه‌ی پایین را نشان می‌دهد. در طبقه‌ی پایین نیز مشابه طبقه‌ی بالا نگهداری موقت یک لایه شاتکریت به ضخامت ۱۵ سانتیمتر است و نگهداری اصلی لاینینگ به ضخامت ۱۵۰ سانتیمتر است.



شکل ۴-۱۰ تصاویری از مراحل حفر طبقه‌ی پایین. رنگ زرد خاک، رنگ قرمز شاتکریت و رنگ صورتی لاینینگ و شمع و ریب است.

در شکل ۴-۱۱ تکمیل حفر و نگهداری طبقه‌ی پایین و وضعیت نهایی ایستگاه مشاهده می‌شود.

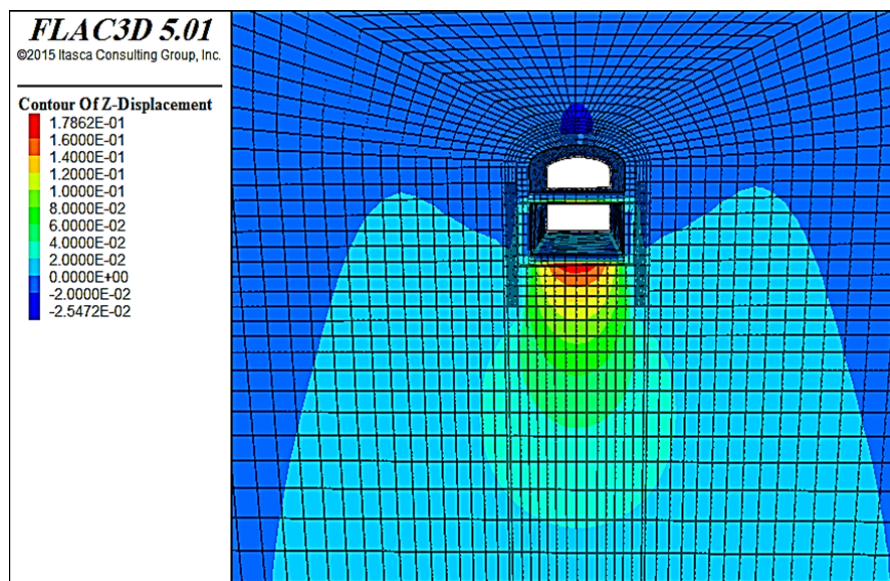


شکل ۴-۱۱ سازه نگهبان و نگهداری اصلی پس از اتمام ساخت. رنگ زرد خاک، رنگ قرمز شاتکریت و رنگ صورتی لاینینگ و شمع و ریب است.

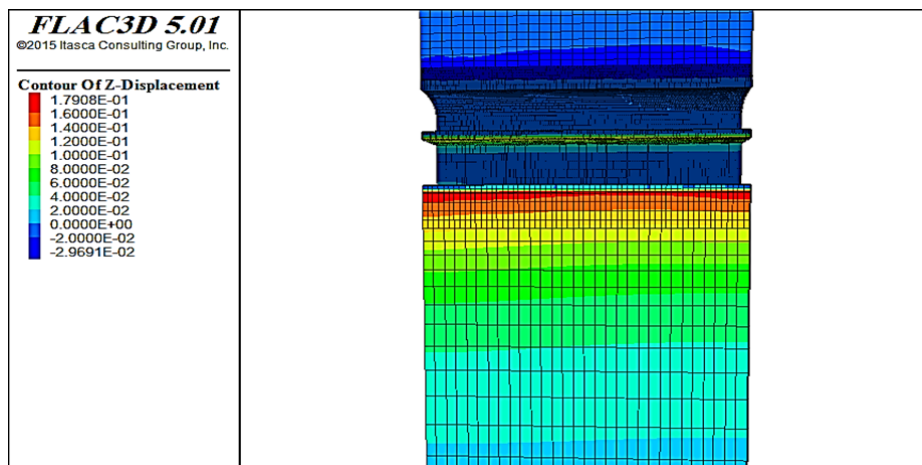
۴-۹-۴ نتایج مدلسازی روش CAPS

۴-۹-۴-۱ جابجایی زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

در شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ جابجایی زمین پس از حفر ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل نمایان است، جابجایی زمین در محل تاج ایستگاه به مقدار ۲.۵۴۷ سانتی‌متر است.



شکل ۴-۱۲ جابجایی حاصل از حفر ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی از نمای روبرو



شکل ۴-۱۳ مقطع طولی از جابجایی حاصل از حفر ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

۴-۹-۲ توزیع زون‌های پلاستیک در مدل بعد از حفر ایستگاه

در جدول ۴-۶ توصیف حالت‌های مختلف نواحی موجود در مدل آورده شده است.

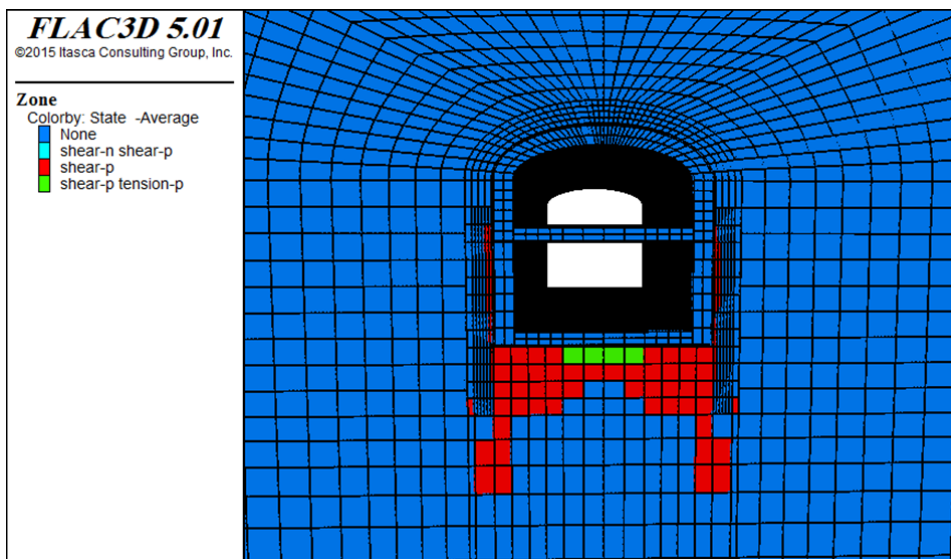
جدول ۴-۶ توصیف حالت‌های مختلف زون‌ها (Itasca Consulting Group, Inc., 2013)

ناحیه حالت پلاستیک ندارد	None
برای توصیف حالتی به کار می‌رود که حالت تسلیم برشی را تجربه کرده‌است ولی در حال حاضر تحت نیروی کمتر از تسلیم برشی قرار دارد	Shear-p
این حالت نشان می‌دهد که زون تحت تنش کششی و برشی قرار گرفته‌است ولی در حال حاضر در شرایط تنش کمتر از تسلیم قرار دارد	Shear-p tension-p
برای توصیف نواحی گسیخته به صورت برشی است.	Shear-n shear-p

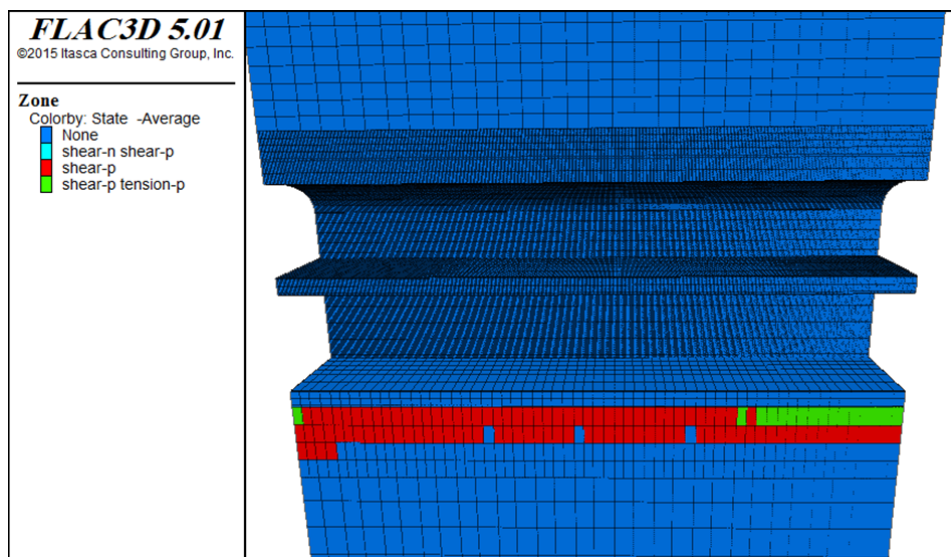
همانطور که در شکل‌های ۴-۱۵ و ۴-۱۶ مشخص است بیشتر نواحی پلاستیک در زیر ایستگاه

تشکیل شده‌اند که با توجه به جدول ۴-۶ بیشتر این نواحی پلاستیک، حالت تسلیم برشی را تجربه

کرده‌اند ولی در حال حاضر تحت نیروی کمتر از تسلیم برشی قرار دارند.



شکل ۴-۱۴ توزیع نواحی پلاستیک در مدل حاصل از حفر ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی از نمای روبرو

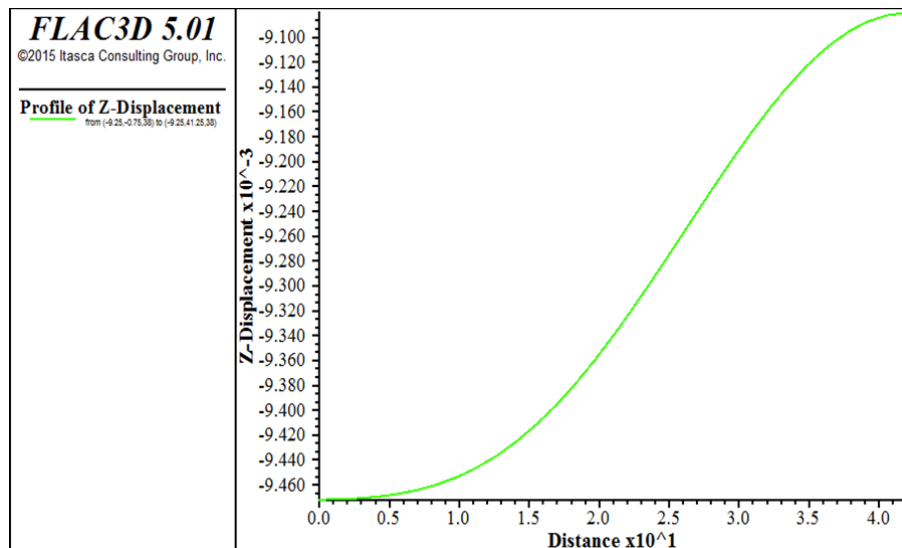


شکل ۴-۱۵ مقطع طولی از توزیع نواحی پلاستیک در مدل حاصل از حفر ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده-ی طاق بتنی

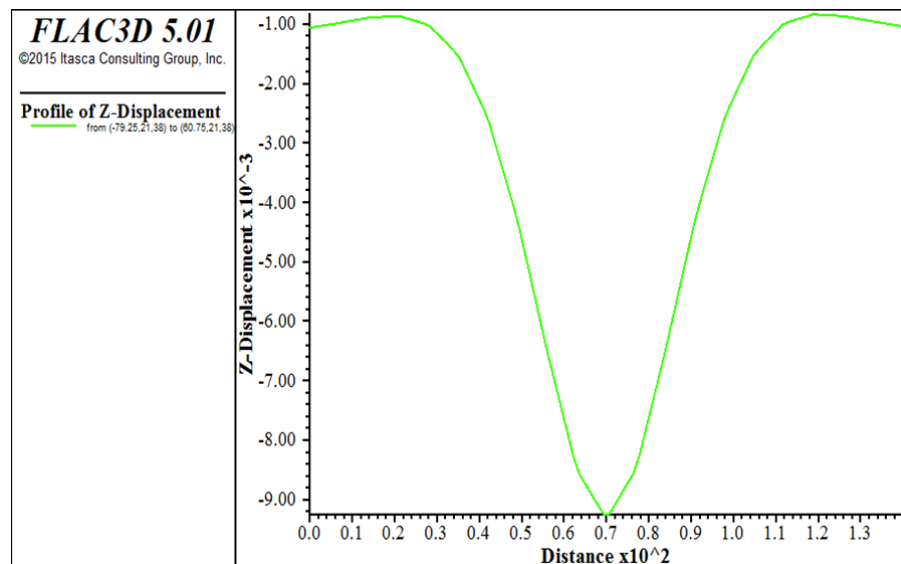
۴-۹-۳ نشست سطح زمین

پس از اتمام حفر و نگهداری دو طبقه و اتمام محاسبات نرم‌افزار نتایج مدل گرفته می‌شود. پروفیل طولی نشست سطح زمین از ابتدا تا انتهای مدل و بر روی بالاترین سطح مدل (روی سطح زمین) و پروفیل عرضی نشست سطح زمین در مرکز مدل و بر روی بالاترین سطح مدل (روی سطح زمین) به

ترتیب در شکل‌های ۱۶-۴ و ۱۷-۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۶-۴ مشاهده می‌شود، نشست سطح زمین از ابتدا تا انتهای مدل روند کاهشی دارد و بیشترین نشست مربوط به ابتدای مدل به میزان ۹.۴۶ میلی‌متر است.



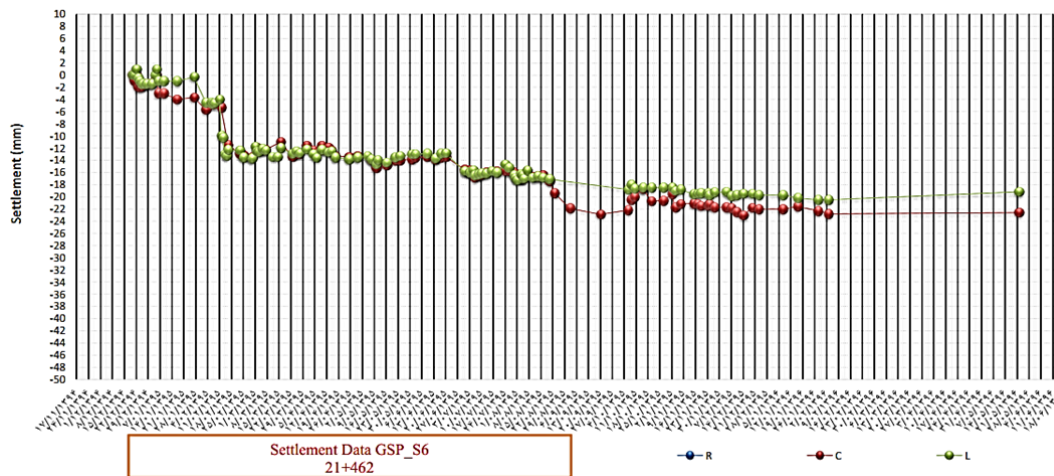
شکل ۱۶-۴ پروفیل طولی نشست سطح زمین در مرکز مدل از ابتدا تا انتهای مدل



شکل ۱۷-۴ پروفیل عرضی نشست سطح زمین در مرکز مدل

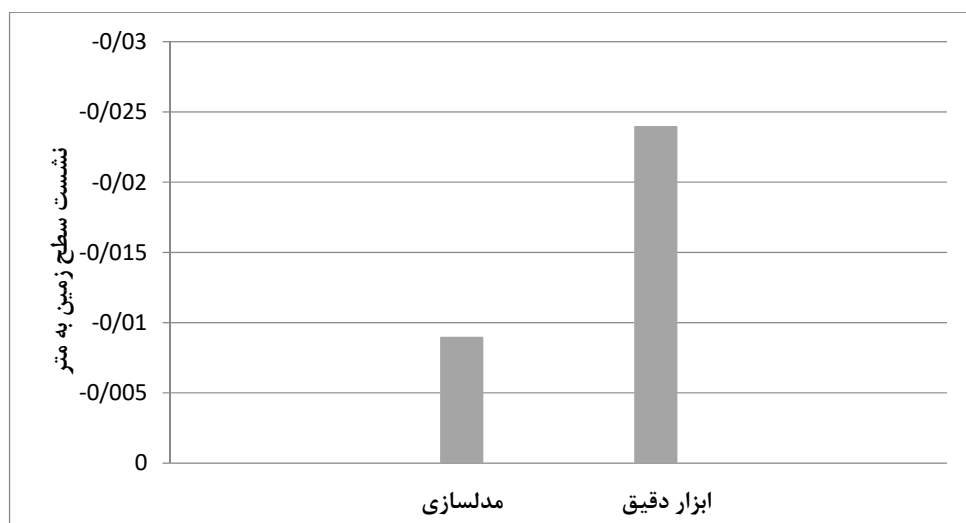
۴-۹-۵ اعتبار سنجی

در شکل ۴-۱۸ نمودار نشست سطح زمین در مرکز ایستگاه در طول یک سال و نیم پس از اتمام ایستگاه مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است بیشترین نشست سطح، حدود یک سال بعد از اتمام حفاری به حدود ۲۳ میلی‌متر رسیده است.



شکل ۴-۱۸ نمودار نشست سطح زمین در مرکز ایستگاه در طول یک سال و نیم پس از اتمام ایستگاه

در شکل ۴-۱۹ نمودار مقایسه‌ی میزان نشست سطح زمین بر مبنای نتیجه‌ی مدل‌سازی و میزان نشست سطح زمین بر مبنای اطلاعات ابزار دقیق موجود در ایستگاه مرزداران آورده شده است.

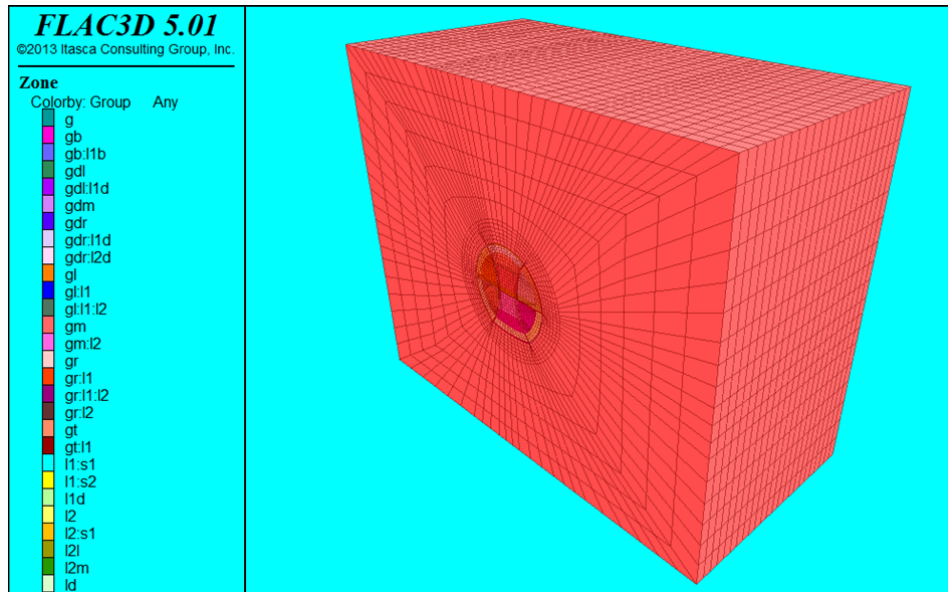


شکل ۴-۱۹ مقایسه‌ی میزان نشست سطح حاصل از مدل‌سازی در مرکز ایستگاه با بیشترین نشست سطح ثبت شده توسط ابزار دقیق نصب شده در ایستگاه

۴-۱۰ مدل سازی روش SEM :

۴-۱۰-۱ مشخصات هندسه‌ی مدل

هندسه‌ی کامل مدل در شکل ۴-۲۰ مشاهده می‌شود:

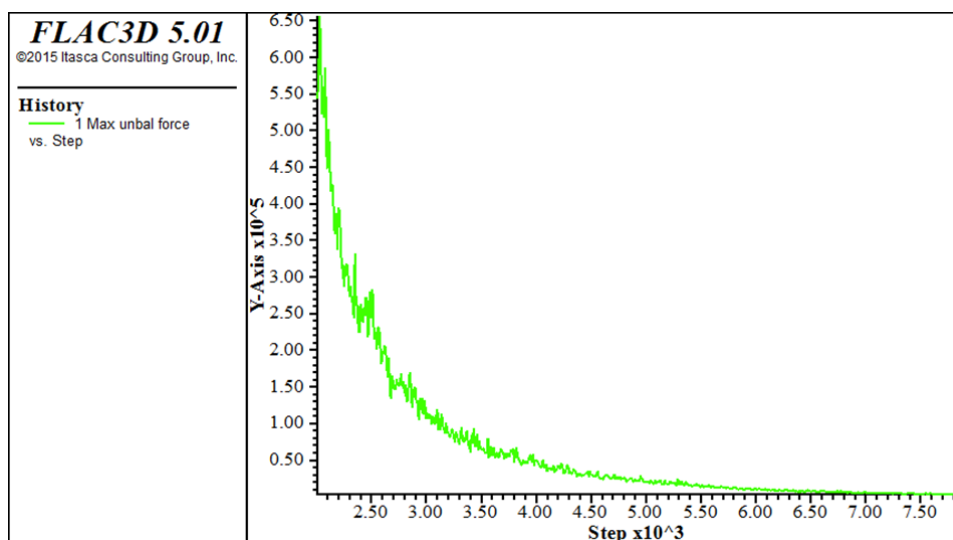


شکل ۴-۲۰ هندسه‌ی کامل مدل

ابعاد مدل ۱۰۰×۴۲×۸۸.۵ است. فاصله‌ی تاج ایستگاه تا بالاترین سطح مدل که همان سطح زمین است، مشابه ایستگاه مورد مطالعه ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی مرکز مدل تا مرزهای کناری ۵۰ متر است که حدود ۲.۵ برابر قطر مدل است. فاصله‌ی کف ایستگاه تا پایین ترین سطح مدل ۴۲.۵ متر در نظر گرفته شده است. از آنجایی که هندسه‌ی مدل در طول ایستگاه، متقارن و یکنواخت در نظر گرفته شده، طول مدل هم کوچکتر از ابعاد واقعی ایستگاه، ۴۲ متر در نظر گرفته شده است. هرچه ابعاد مدل نهایی بزرگ تر شود باعث افزایش زمان محاسبات می‌شود. در مورد ابعاد مدل ساخته شده این نکته قابل ذکر است که باتوجه به بزرگی ابعاد ایستگاه، سعی بر آن شد که ابعاد نهایی مدل خیلی بزرگ نباشد تا محاسبات سریع تر انجام شود.

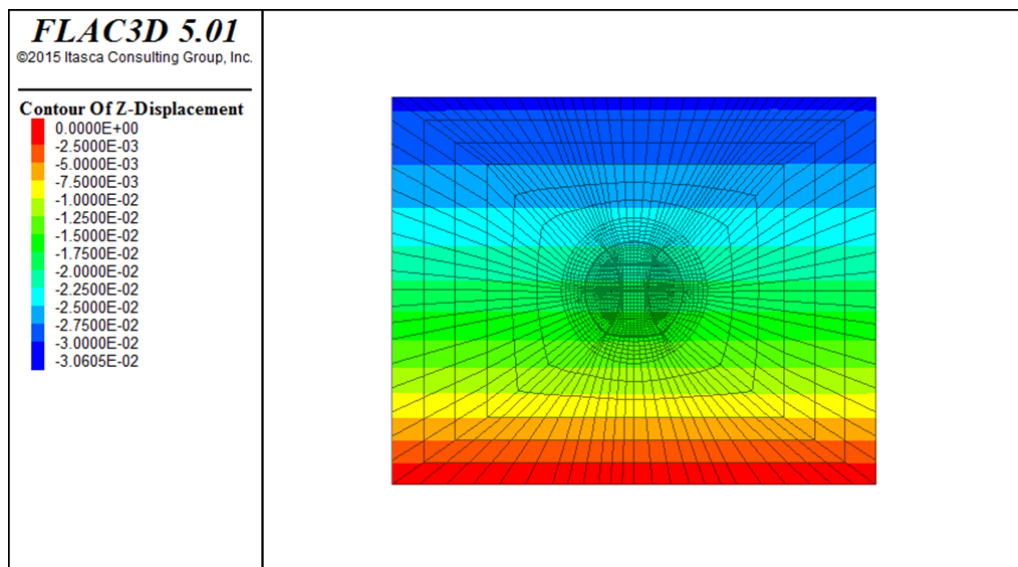
۴-۱۰-۲ تعادل اولیه

طبق توضیحاتی که در مدل قبلی ارائه شد تاریخچه‌ی نیروی نامتعادل بلوک، کانتور جابجایی قائم و کانتور تنش قائم باید بررسی شود. تاریخچه‌ی نیروی نامتعادل بلوک، کانتور جابجایی قائم و کانتور تنش قائم به ترتیب در شکل ۴-۲۱، شکل ۴-۲۲ و شکل ۴-۲۳ آورده شده است. در شکل ۴-۲۱ مشاهده می‌شود که تاریخچه‌ی نیروی نامتعادل بلوک به درستی به صفر میل می‌کند.

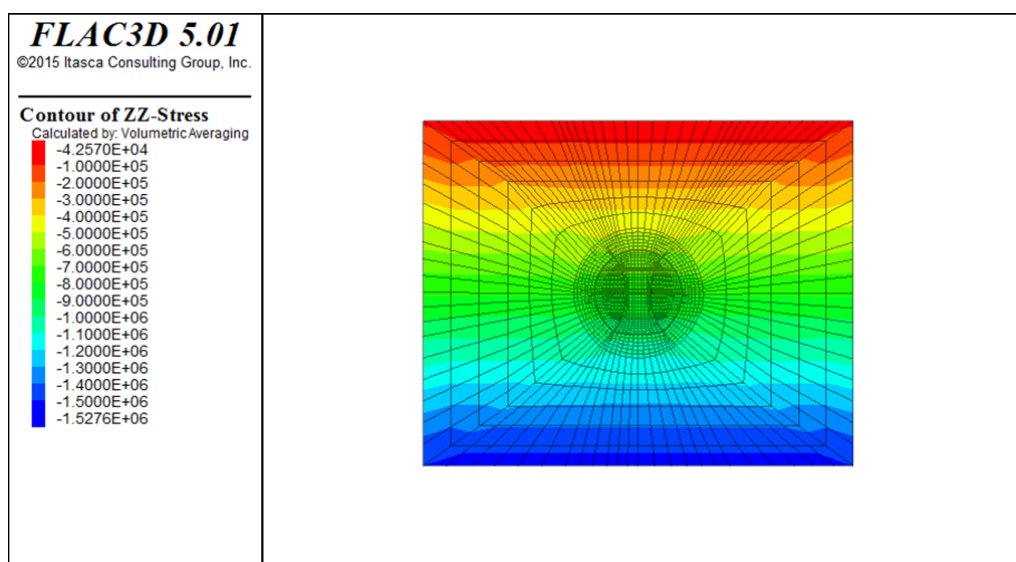


شکل ۴-۲۱ تاریخچه نیروی نامتعادل بلوک

همانطور که در شکل ۴-۲۲ و شکل ۴-۲۳ مشخص است اختلاف سطح تنش‌ها و جابجایی‌ها بصورت صحیح (افقی و منظم) طبقه بندی شده است. اختلاف سطح تنش‌ها و جابجایی‌ها ناشی از اعمال گرادیان وزن بلوک است.



شکل ۴-۲۲ کانتور جابجایی قائم

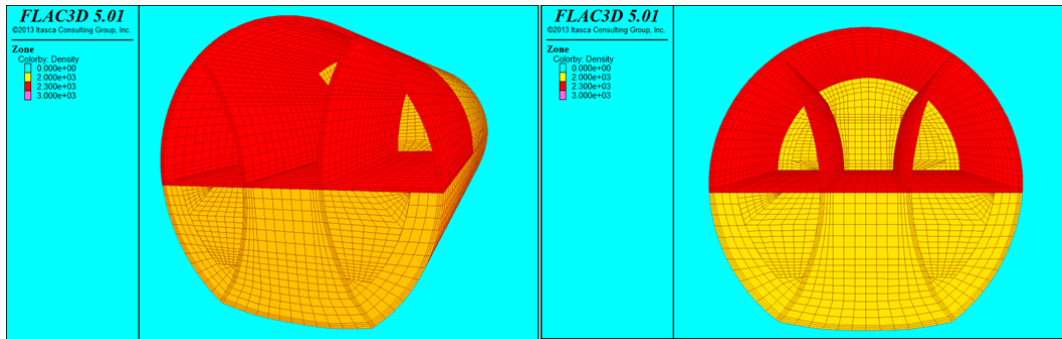


شکل ۴-۲۳ کانتور تنش قائم

۴-۱۰-۳ مراحل حفاری و نگهداری ایستگاه

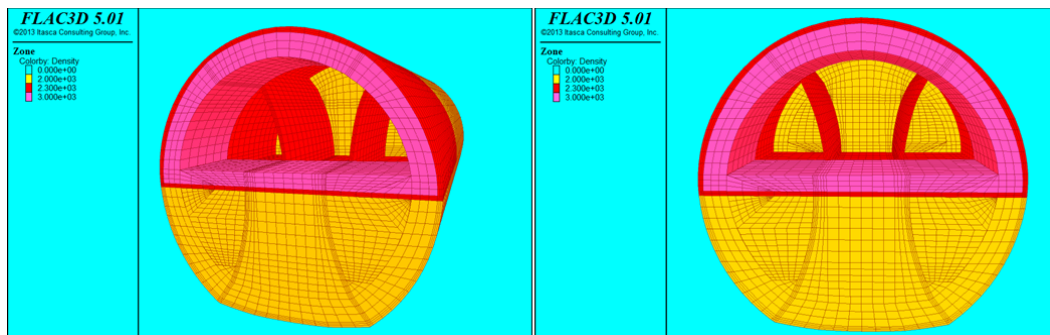
مراحل حفاری در این روش به این صورت است که ابتدا در طبقه‌ی بالا گالری‌های کناری به نوبت تا متر ۱۸ معینی حفر می‌شود که در این مدل مشابه روش CAPS، ۱۸ متر در نظر گرفته شده است. پس از این که گالری سمت راستی به ۱۸ متر رسید، گالری سمت چپ شروع می‌شود و سپس بخش مرکزی حفر می‌شود. شکل ۴-۲۴ وضعیت ایستگاه پس از حفر ۱۸ متر ابتدایی در طبقه‌ی بالا را نشان

می دهد.



شکل ۴-۲۴ حفر ۱۸ متر ابتدایی و اعمال شاکریت در طبقه بالا. رنگ زرد خاک، رنگ قرمز شاکریت. گام حفاری در تمام گالری‌ها، مشابه روش CAPC، یک متر در نظر گرفته شده است. یعنی بلافاصله بعد از حفر یک متر از گالری، شاکریت اعمال می‌شود و یک مرحله از محاسبات نرم‌افزار نیز انجام می‌شود. دو دیواره‌ی حایل مرکزی از جنس شاکریت، تا قبل از اجرای نگهداری اصلی، مطابق تصویر در مرکز طبقه باقی می‌ماند. پس از اینکه هر سه مقطع حفاری به ۱۸ متر رسید، ۶ متر از دیواره‌های حائل تخریب می‌شود و بلافاصله لاینینگ (نگهداری اصلی) اجرا می‌شود. پس از هر مرحله اجرای لاینینگ نیز یک مرحله از محاسبات نرم‌افزار انجام می‌شود.

شکل ۴-۲۵ وضعیت ایستگاه پس از حفر ۱۸ متر ابتدایی و احداث ۶ متر اول از نگهداری اصلی در طبقه‌ی بالا را نشان می‌دهد.

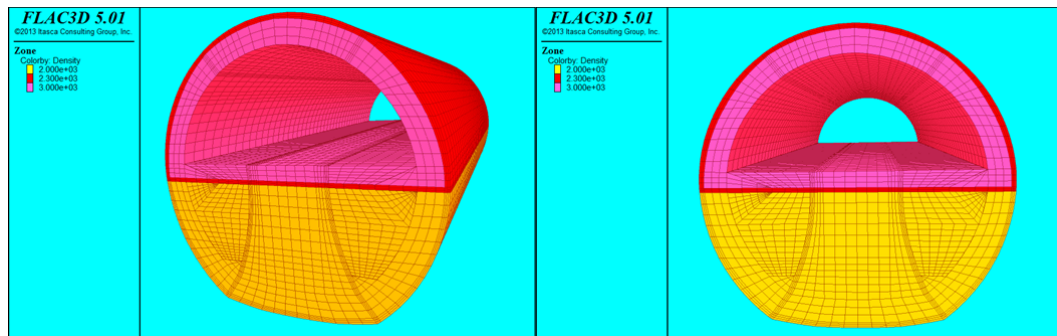


شکل ۴-۲۵ حفر ۱۸ متر ابتدایی و احداث ۶ متر اول از نگهداری اصلی در طبقه‌ی بالا. رنگ زرد خاک، رنگ قرمز شاکریت و رنگ صورتی لاینینگ است.

سپس در ادامه هر سه گالری به ترتیب قبل به اندازه‌ی ۶ متر دیگر حفر می‌شوند و دوباره یک

مرحله لاینینگ ۶ متری اعمال می‌شود. تمام این مراحل تا رسیدن به طول نهایی ایستگاه ادامه پیدا می‌کند. در این مدل، حداکثر طول حفاری که با نگهداری موقت (شاتکریت) باقی می‌ماند ۱۸ متر است. نگهداری موقت در این روش یک لایه شاتکریت به ضخامت ۱۵ سانتیمتر و نگهداری اصلی، لاینینگ به ضخامت ۱۵۰ سانتیمتر است. (ضخامت المان‌های نگهداری مطابق با ضخامت‌های اجرا شده در ایستگاه مرزداران است).

شکل ۴-۲۶ وضعیت ایستگاه پس از حفر کامل طبقه‌ی بالا را نشان می‌دهد.

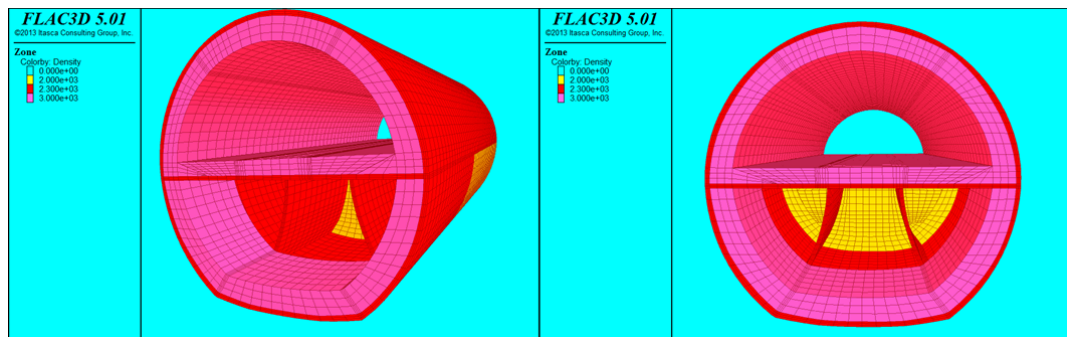


شکل ۴-۲۶ حفر کامل طبقه‌ی بالا. رنگ زرد خاک، رنگ قرمز شاتکریت و رنگ صورتی لاینینگ است.

طبقه‌ی پایین نیز کاملاً شبیه طبقه‌ی بالا اجرا می‌شود.

در شکل ۴-۲۷ وضعیت ایستگاه پس از حفر ۱۸ متر اول و اعمال ۶ متر اول نگهداری اصلی در

طبقه‌ی پایین را مشاهده می‌کنیم.

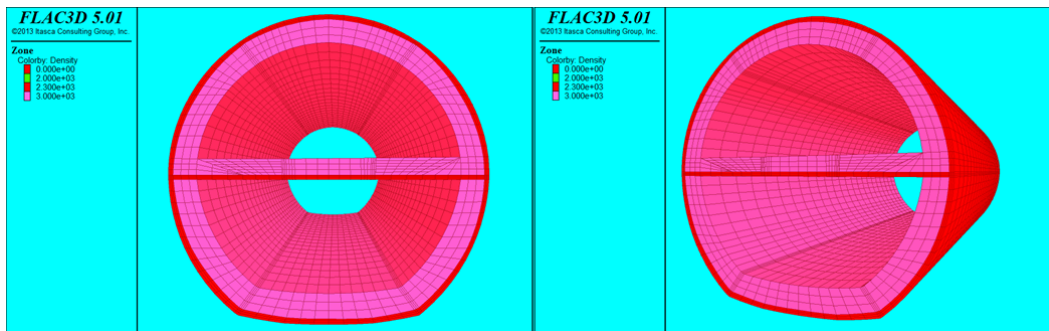


شکل ۴-۲۷ حفر ۱۸ متر اول و اعمال ۶ متر اول نگهداری اصلی در طبقه‌ی پایین. رنگ زرد خاک، رنگ

قرمز شاتکریت و رنگ صورتی لاینینگ است.

شکل ۴-۲۸ وضعیت نهایی ایستگاه را نشان می‌دهد که در آن دو طبقه بصورت کامل حفر و

نگهداری شده.

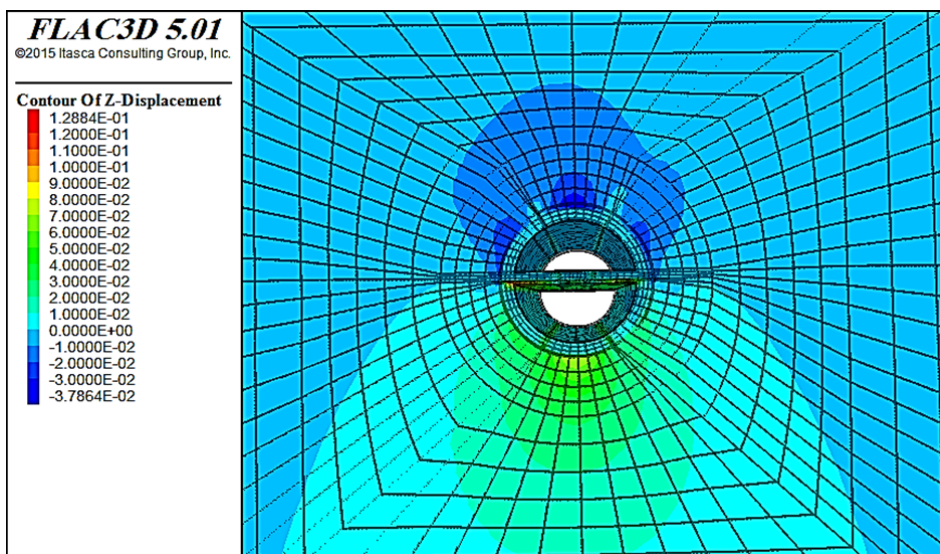


شکل ۴-۲۸ حفر و نگهداری دو طبقه بصورت کامل. رنگ قرمز شاکریت و رنگ صورتی لاینینگ است.

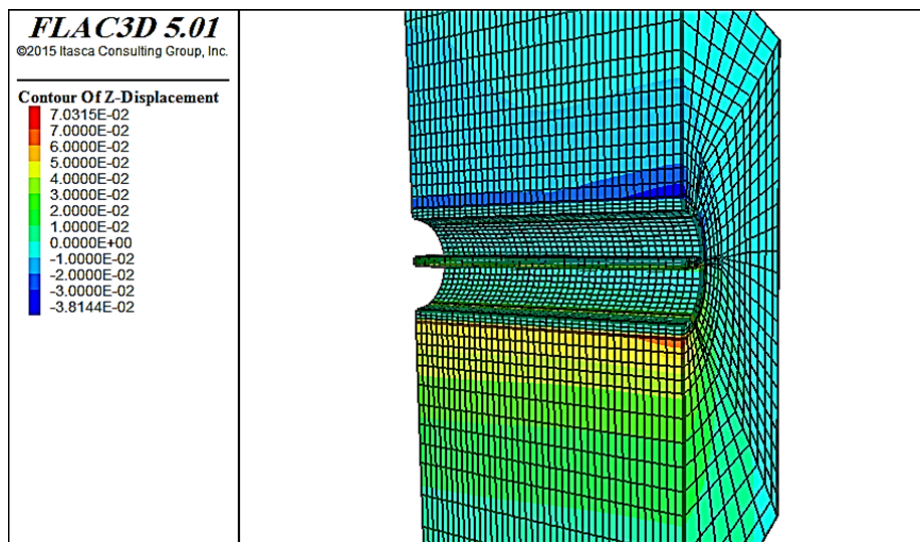
۴-۱۰-۴ نتایج مدلسازی روش گالری کناری

۴-۱۰-۴-۱ جابجایی زمین در روش گالری کناری

در شکل‌های ۴-۲۹ و ۴-۳۰ جابجایی زمین پس از حفر ایستگاه به روش گالری کناری نشان داده شده است. همانطور که در شکل نمایان است بیشترین جابجایی زمین در محل تاج و کف ایستگاه رخ داده است.



شکل ۴-۲۹ جابجایی حاصل از حفر ایستگاه به روش گالری کناری از نمای روبرو

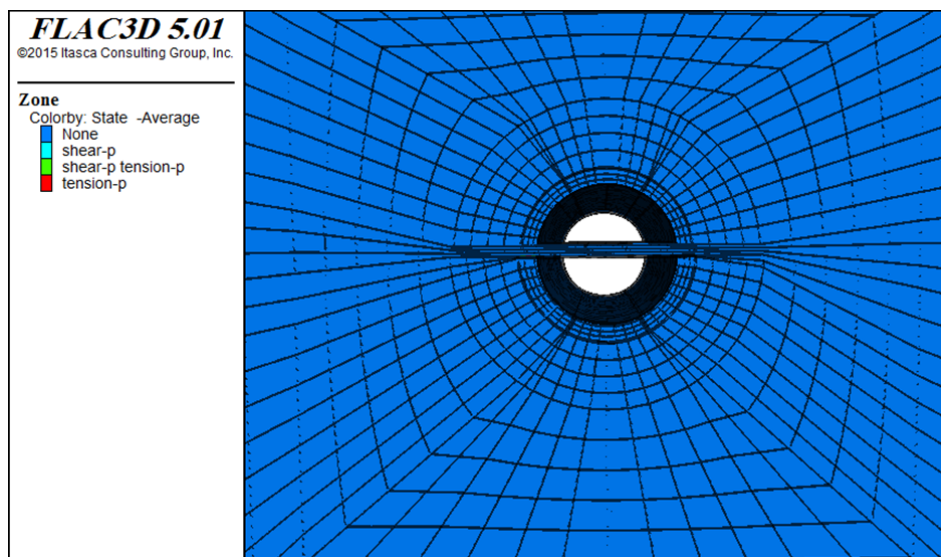


شکل ۴-۳۰ مقطع طولی از جابجایی حاصل از حفر ایستگاه به روش گالری کناری

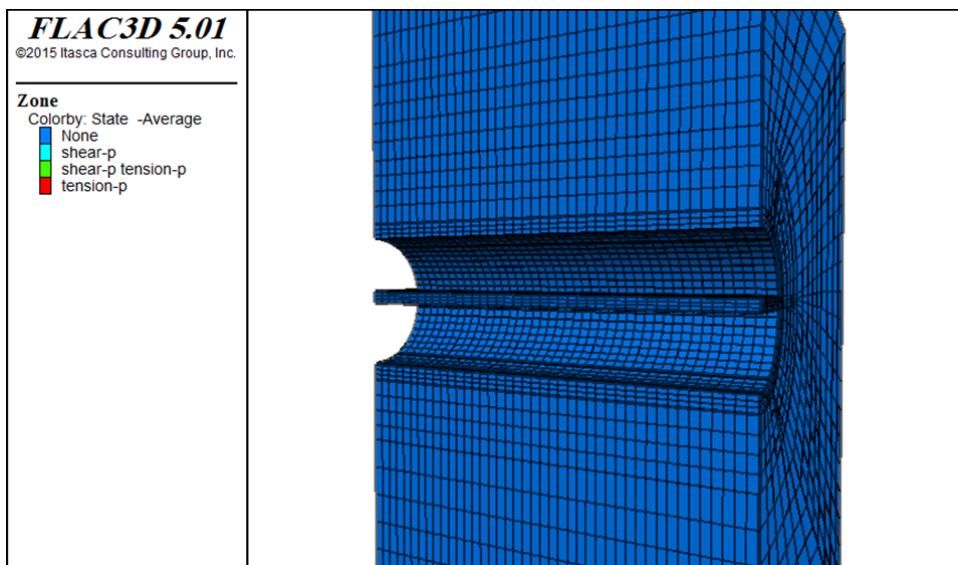
۴-۱۰-۲ توزیع نواحی پلاستیک در مدل بعد از حفر ایستگاه

در شکل‌های ۴-۳۱ و ۴-۳۲ توزیع نواحی پلاستیک در مدل بعد از حفر ایستگاه به روش گالری

کناری نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۱ توزیع نواحی پلاستیک در مدل بعد از حفر ایستگاه به روش گالری کناری از نمای روبرو



شکل ۴-۳۲ مقطع طولی توزیع زون‌های پلاستیک در مدل بعد از حفر ایستگاه به روش گالری کناری

در جدول ۴-۷ توصیف حالت‌های مختلف زون‌های موجود در مدل آورده شده است.

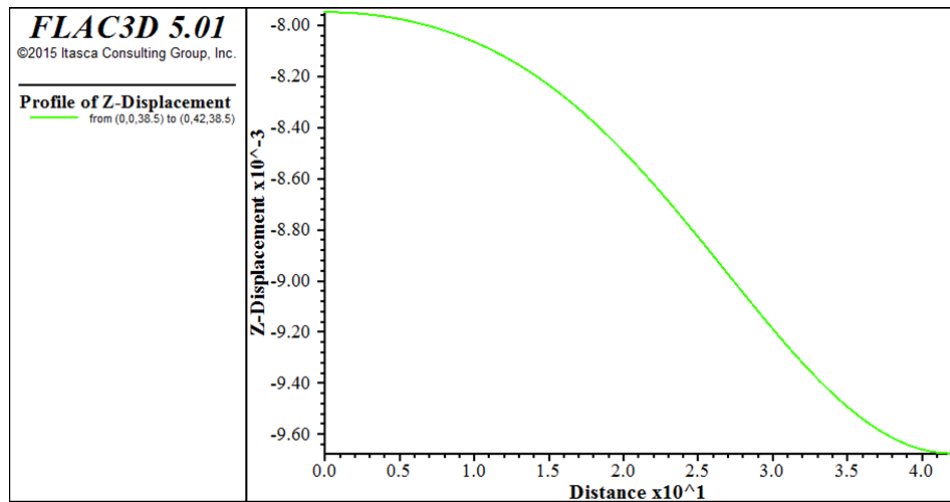
جدول ۴-۷ توصیف حالت‌های مختلف زون‌ها

ناحیه حالت پلاستیک ندارد	None
برای توصیف حالتی به کار می‌رود که حالت تسلیم برشی را تجربه کرده‌است ولی در حال حاضر تحت نیروی کمتر از تسلیم برشی قرار دارد	Shear-p
این حالت نشان می‌دهد که ناحیه تحت تنش کششی و برشی قرار گرفته‌است ولی در حال حاضر در شرایط تنش کمتر از تسلیم قرار دارد	Shear-p tension-p
برای توصیف حالتی به کار می‌رود که حالت تسلیم کششی را تجربه کرده‌است ولی در حال حاضر تحت نیروی کمتر از تسلیم کششی قرار دارد	Tension-p

همانطور که در شکل‌های ۴-۳۱ و ۴-۳۲ نشان داده شد، در این روش اکثر نواحی مدل بعد از حفر ایستگاه حالت غیر پلاستیک دارند. بنابراین روش گالری کناری مناسب‌تر از روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی است، چراکه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی نواحی پلاستیک زیادی در اطراف ایستگاه مشاهده شد.

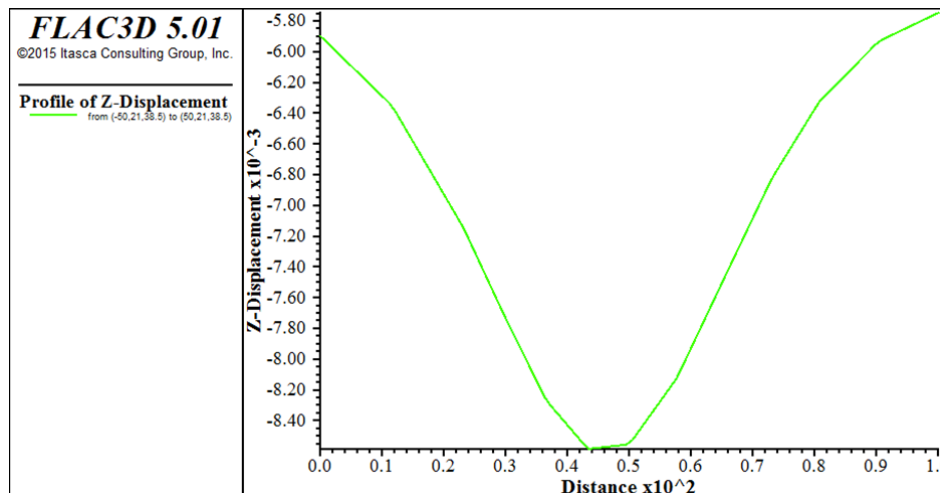
۳-۴-۱۰-۴ نشست سطح زمین

پس از اتمام حفر و نگهداری دو طبقه و اتمام محاسبات نرم افزار نتایج مدل گرفته می شود. پروفیل طولی از ابتدا تا انتهای مدل و در بالاترین سطح مدل (سطح زمین) و پروفیل عرضی نشست سطح زمین در مرکز مدل و در بالاترین سطح مدل (سطح زمین) به ترتیب در شکل های ۳۳-۴ و ۳۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳۳-۴ پروفیل طولی نشست سطح زمین از ابتدا تا انتهای مدل

همانطور که مشاهده می شود بیشترین نشست به میزان ۹.۶۴ میلی متر است.

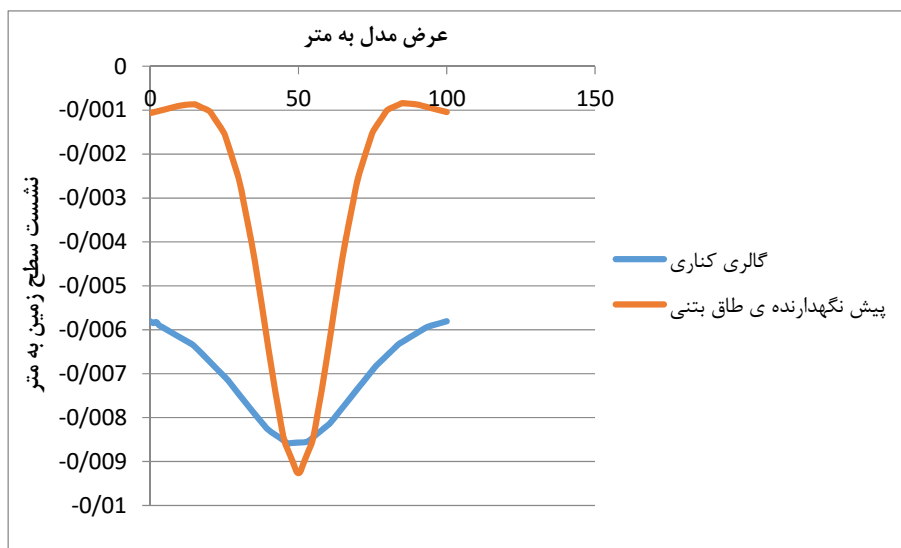


شکل ۳۴-۴ پروفیل عرضی نشست سطح زمین در مرکز مدل

۱۱-۴ جمع‌بندی و تحلیل نتایج

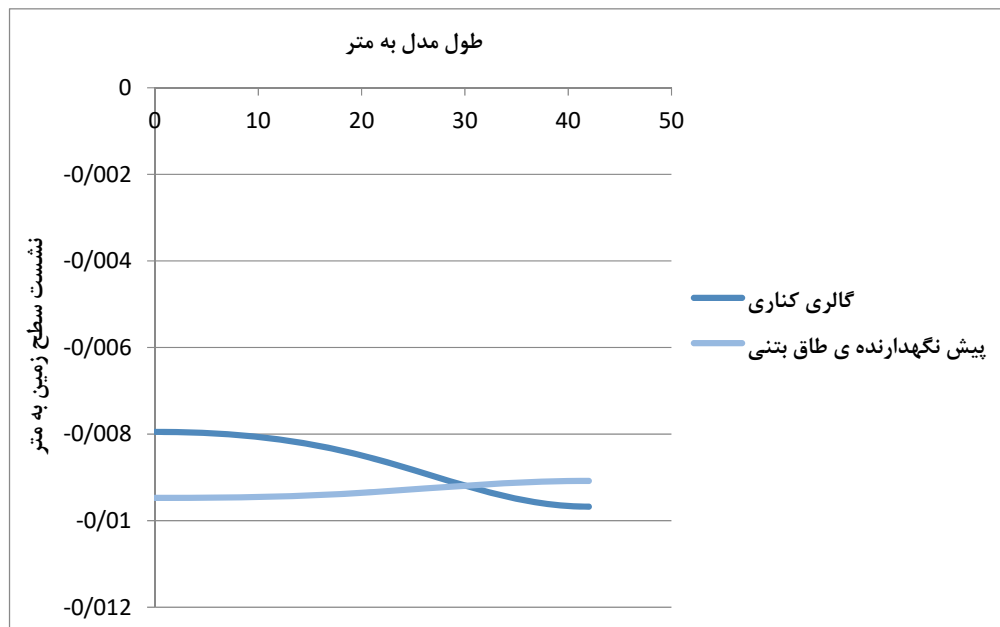
پس از اتمام مدلسازی، نتایج هر دو ایستگاه با هم مقایسه می‌شود. در شکل ۴-۳۵ مقایسه‌ی پروفیل عرضی نشست سطح حاصل از هر روش و در شکل ۴-۳۶ مقایسه‌ی پروفیل طولی نشست سطح زمین حاصل از هر روش در مرکز مدل، آورده شده است.

در شکل ۴-۳۵ مشاهده می‌شود که روش گالری‌کناری به نسبت روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی، در مرکز مدل پایدارتر است. یعنی نشست سطح کمتری دارد. اما در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی، به دلیل وجود سیستم پیش‌نگهدارنده (شمع و ریب‌ها) عرض گودی نشست، کمتر از روش گالری‌کناری است. به عبارتی دیگر می‌توان گفت که در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی، عرض کمتری از سطح زمین دچار نشست می‌شود. همچنین مقادیر ابتدا و انتهای پروفیل عرضی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی بسیار کمتر از مقادیر ابتدا و انتهای پروفیل عرضی نشست سطح زمین در روش گالری‌کناری است.



شکل ۴-۳۵ مقایسه‌ی پروفیل عرضی نشست سطح زمین حاصل از هر روش در مرکز مدل

در شکل ۴-۳۶ مشاهده می‌شود که میزان نشست سطح زمین در طول مدل طوری است که به طور کلی روش گالری کناری به نسبت روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی پایدارتر است. یعنی به طور کلی نشست سطح کمتری دارد. همچنین به دلیل وجود سیستم پیش‌نگهدارنده، میزان تغییرات نشست سطح زمین از ابتدا تا انتهای مدل در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی کمتر از روش گالری کناری است.



شکل ۴-۳۶ مقایسه‌ی پروفیل طولی نشست سطح زمین حاصل از هر روش در مرکز مدل

باتوجه به شکل‌های ۴-۱۴ و ۴-۳۱ مشخص است که تشکیل نواحی پلاستیک پس از اتمام حفر و نگهداری ایستگاه به روش گالری کناری کمتر از روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی است. بنابراین، روش گالری کناری مناسب‌تر است.

فصل پنجم

مقایسه‌ی هزینه‌ای دو روش پیش‌نگهدارنده‌ی

طاق بتنی (CAPS) و گالری کناری (Side Drift)

۱-۵ مقدمه

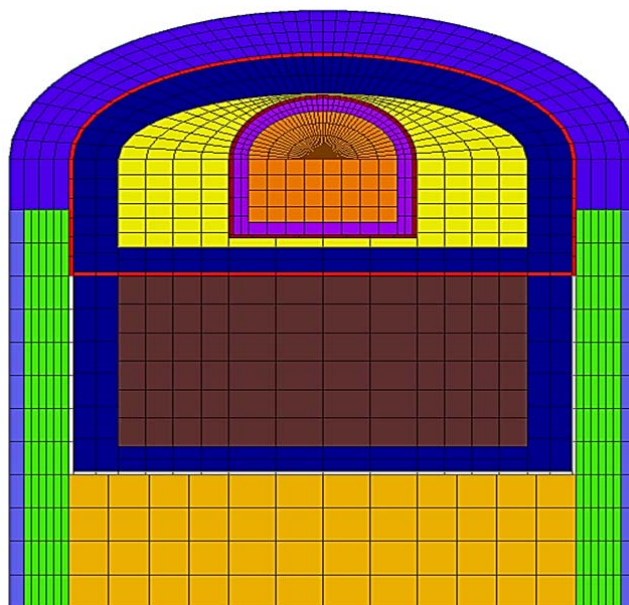
در این فصل با استفاده از فهرست بهای راه، باند و فرودگاه سال ۹۶ هزینه‌ی تمام شده‌ی حفر و نگهداری دو ایستگاه (هزینه‌ی سه عملیات حفاری، شاتکریت و لاینینگ برای هر دو ایستگاه) با احتساب احجام مربوط به هر عمل و ضرب در هزینه‌ی آن برآورد شده است. با توجه به اینکه هر دو ایستگاه را در راستای طول یکنواخت و متقارن در نظر گرفته شده، برای ساده سازی محاسبات، فقط هزینه‌ی ۱۰ متر از هر ایستگاه محاسبه و با هم مقایسه شده است. از هزینه‌ی تخریب تونل خط مترو، به دلیل اینکه در هر دو روش تقریباً یکسان است صرف نظر شده.

۲-۵ محاسبه‌ی هزینه حفر و نگهداری روش CAPS

۱-۲-۵ تونل اولیه

الف) خاک برداری تونل اولیه

در شکل ۱-۵ سطح مقطع قسمت‌های مختلف روش CAPS از نمای روبرو نشان داده شده است. سطح مقطع تونل اولیه در مرکز طبقه‌ی بالا در شکل ۱-۵ مشخص است.



شکل ۵-۱ سطح مقطع قسمت‌های مختلف روش CAPS از نمای روبرو

هزینه‌ی حفاری تونل اولیه به طول ۱۰ متر در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱ هزینه‌ی حفاری تونل اولیه به طول ۱۰ متر در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

۳۵۴.۳	حجم حفاری تونل اولیه به طول ۱۰ متر (متر مکعب)
۵۲۶۰۰۰	هزینه‌ی حفاری یک متر مکعب در زمین نیمه پایدار (ریال)
۱۸۶۳۶۱۸۰۰	هزینه‌ی حفاری تونل اولیه به طول ۱۰ متر (ریال)

(ب) شاتکریت تونل اولیه

هزینه‌ی یک لایه شاتکریت بصورت اضافه‌بها بر حفاری حساب می‌شود.

(ریال) ۱۹۵۵۰۰

اضافه‌بها بابت شاتکریت برای هر متر مکعب

(ریال) ۶۹۲۶۵۶۵

هزینه‌ی شاتکریت برای ۱۰ متر از تونل اولیه

ج) لاینینگ تونل اولیه

سطح مقطع لاینینگ تونل اولیه در شکل ۵-۱ با رنگ بنفش مشخص است. هزینه‌ی لاینینگ تونل اولیه به طول ۱۰ متر در جدول ۵-۲ آورده شده است.

جدول ۵-۲ هزینه‌ی لاینینگ تونل اولیه به طول ۱۰ متر در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

۹۰.۳	حجم کل لاینینگ برای ۱۰ متر تونل اولیه (متر مکعب)
۷۱۱۰۰۰	هزینه یک متر مکعب بتن درجا (ریال)
۶۴۲۰۳۳۰۰	هزینه‌ی لاینینگ برای ۱۰ متر از تونل اولیه (ریال)

۵-۲-۲ ریب‌ها

الف) حفاری محل ریب‌ها

سطح مقطع ریب در شکل ۵-۱ با رنگ آبی مشخص شده است. هزینه حفاری ریب‌ها در طول ۱۰ متر از ایستگاه در جدول ۵-۳ آورده شده است.

جدول ۵-۳ هزینه حفاری ریب‌ها در طول ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

۸۱.۷۲	حجم حفاری ریب‌ها در طول ۱۰ متر از ایستگاه (متر مکعب)
۵۲۶۰۰۰	هزینه حفاری یک متر مکعب در زمین نیمه پایدار (ریال)
۱۷۱۹۳۸۸۸۰	هزینه حفاری ریب‌ها در طول ۱۰ متر از ایستگاه (ریال)

ب) هزینه‌ی میلگرد ریب‌ها

بهای تهیه، خمکاری و نصب هر کیلوگرم میلگرد AII به قطر ۲۰ و بیش از ۲۰ میلی‌متر برای بتن مسلح (ریال) ۱۸۶۰۰

هزینه‌ی میلگرد لازم برای ۴ ریب موجود در ۱۰ متر از طول ایستگاه (ریال) ۱۰۱۱۸۴۰۰۰

ج) بتن ریزی محل ریبها

هزینه بتن ریزی ریبها در طول ۱۰ متر از ایستگاه در جدول ۴-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۵ هزینه بتن ریزی ریبها در طول ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

۳۲۶.۸۸	حجم کل بتن ریزی برای ریبهای موجود در ۱۰ متر از ایستگاه (متر مکعب)
۷۱۱۰۰۰	هزینه یک متر مکعب بتن درجا (ریال)
۲۳۲۴۱۱۶۸۰	هزینه‌ی بتن ریزی برای ریبهای موجود در ۱۰ متر از ایستگاه (ریال)

۵-۲-۳ شمعها

الف) حفاری محل شمعها

در ۱۰ متر از طول ایستگاه، ۸ شمع وجود دارد. هزینه حفاری محل ۸ شمع در جدول ۵-۵ آورده

شده است.

جدول ۵-۵ هزینه حفاری شمعها در طول ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

۱۴۴.۷۲	حجم حفاری شمعها در طول ۱۰ متر از ایستگاه (متر مکعب)
۵۲۶۰۰۰	هزینه حفاری یک متر مکعب در زمین نیمه پایدار (ریال)
۷۶۱۲۲۷۲۰	هزینه حفاری شمعها در طول ۱۰ متر از ایستگاه (ریال)

ب) هزینه‌ی میلگرد شمعها

بهای تهیه، خمکاری و نصب هر کیلوگرم میلگرد AII به قطر ۲۰ و بیش از ۲۰ میلی‌متر برای

بتن مسلح (ریال) ۱۸۶۰۰

(ریال) ۱۱۹۰۴۰۰۰۰

هزینه‌ی میلگرد لازم برای ۸ شمع

ج) بتن ریزی شمع ها

در ۱۰ متر از طول ایستگاه، ۸ شمع وجود دارد. هزینه بتن ریزی ۸ شمع در جدول ۵-۶ آورده شده است.

جدول ۵-۶ هزینه بتن ریزی شمع های موجود در ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش نگهدارنده ی طاق بتنی

۱۴۴.۷۲	حجم کل بتن ریزی برای شمع های موجود در ۱۰ متر از ایستگاه (متر مکعب)
۷۱۱۰۰۰	هزینه یک متر مکعب بتن درجا (ریال)
۱۰۲۸۹۵۹۲۰	هزینه ی بتن ریزی برای شمع های موجود در ۱۰ متر از ایستگاه (ریال)

۵-۲-۴ طبقه ی بالا

الف) حفاری و خاکبرداری طبقه ی بالا

هزینه حفاری و خاکبرداری محیط پیرامون تونل اولیه در طبقه ی بالا در جدول ۵-۷ آورده شده است.

جدول ۵-۷ هزینه حفاری طبقه ی بالا در طول ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش نگهدارنده ی طاق بتنی

۱۰۱۱.۷	حجم حفاری طبقه ی بالا در طول ۱۰ متر از ایستگاه (متر مکعب)
۵۲۶۰۰۰	هزینه حفاری یک متر مکعب در زمین نیمه پایدار (ریال)
۵۳۲۱۵۴۲۰۰	هزینه حفاری طبقه ی بالا در طول ۱۰ متر از ایستگاه (ریال)

ب) شاتکریت طبقه ی بالا

هزینه ی مش بندی و شاتکریت بصورت اضافه بها بر حفاری حساب در نظر گرفته شده است.

اضافه بها بابت شاتکریت برای هر متر مکعب (ریال) ۱۹۵۵۰

هزینه ی شاتکریت برای ۱۰ متر از طبقه اول (ریال) ۱۹۷۷۸۷۳۵

ج) لاینینگ طبقه ی بالا

در شکل ۵-۱ لاینینگ با رنگ سرمه ای نشان داده شده است. هزینه ی لاینینگ طبقه ی بالا برای

۱۰ متر از ایستگاه در جدول ۵-۸ آورده شده است.

جدول ۵-۸ هزینه لاینینگ طبقه‌ی بالا برای ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

۴۹۸.۵	حجم کل بتن ریزی لاینینگ طبقه‌ی بالا در ۱۰ متر از ایستگاه (متر مکعب)
۷۱۱۰۰۰	هزینه یک متر مکعب بتن درجا (ریال)
۳۵۴۴۳۳۵۰۰	هزینه‌ی لاینینگ طبقه‌ی بالا برای ۱۰ متر از ایستگاه (ریال)

۵-۲-۵ طبقه‌ی پایین

الف) حفاری و خاکبرداری طبقه پایین

هزینه‌ی حفاری و خاکبرداری طبقه‌ی پایین در جدول ۵-۹ آورده شده است.

جدول ۵-۹ هزینه‌ی حفاری طبقه‌ی پایین برای ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

۱۳۶۰	حجم حفاری طبقه‌ی بالا در طول ۱۰ متر از ایستگاه (متر مکعب)
۵۲۶۰۰۰	هزینه‌ی حفاری یک متر مکعب در زمین نیمه پایدار (ریال)
۷۱۵۳۶۰۰۰۰	هزینه‌ی حفاری طبقه‌ی پایین در طول ۱۰ متر از ایستگاه (ریال)

ب) شاتکریت طبقه‌ی پایین

۱۹۵۵۰ (ریال) اضافه‌بها بابت شاتکریت برای هر متر مکعب

۲۶۵۸۸۰۰۰ (ریال) هزینه‌ی شاتکریت طبقه‌ی پایین در طول ۱۰ متر

ج) لاینینگ طبقه‌ی پایین

هزینه‌ی لاینینگ طبقه‌ی پایین برای ۱۰ متر از ایستگاه در جدول ۵-۱۰ آورده شده است

جدول ۵-۱۰ هزینه لاینینگ طبقه پایین برای ۱۰ متر از ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

۴۴۰.۷	حجم کل بتن ریزی لاینینگ طبقه پایین در ۱۰ متر از ایستگاه (متر مکعب)
۷۱۱۰۰۰	هزینه یک متر مکعب بتن درجا (ریال)
۳۱۳۳۳۷۷۰۰	هزینه لاینینگ طبقه پایین برای ۱۰ متر از ایستگاه (ریال)

۵-۲-۶ مجموع هزینه‌های روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای ده متر طول

مجموع هزینه‌های روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای ده متر طول به تنکیک هر قسمت در

جدول ۵-۱۱ آورده شده است. در این جدول تمام عملیات‌های انجام گرفته برای حفر و نگهداری

ایستگاه به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی به صورت یکجا آورده شده است.

جدول ۵-۱۱ مجموع هزینه‌های روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای ده متر طول

شرح فعالیت	واحد	بهای واحد (ریال)	مقدار	بهای کل (ریال)
حفاری در زمین نیمه پایدار (تونل اولیه)	مترمکعب	۵۲۶۰۰۰	۳۵۴.۳	۱۸۶۳۶۱۸۰۰
شاتکریت تونل اولیه	اضافه بها بر حفاری	۱۹۵۵۰	۳۵۴.۳	۶۹۲۶۵۶۵
بتن درجا (لاینینگ تونل اولیه)	مترمکعب	۷۱۱۰۰۰	۹۰.۳	۶۴۲۰۳۳۰۰
حفاری در زمین نیمه پایدار (محل ریب‌ها)	مترمکعب	۵۲۶۰۰۰	۳۲۶.۸۸	۱۷۱۹۳۸۸۸۰
هزینه‌ی میلگرد برای ریب‌ها	کیلوگرم	۱۸۶۰۰	۵۴۴۰	۱۰۱۱۸۴۰۰۰
بتن درجا (بتن ریزی ریب‌ها)	مترمکعب	۷۱۱۰۰۰	۳۲۶.۸۸	۲۳۲۴۱۱۶۸۰
حفاری در زمین نیمه پایدار (محل شمع‌ها)	مترمکعب	۵۲۶۰۰۰	۱۴۴.۷۲	۷۶۱۲۲۷۲۰
هزینه‌ی میلگرد برای شمع‌ها	کیلوگرم	۱۸۶۰۰	۶۴۰۰	۱۱۹۰۴۰۰۰۰
بتن درجا (بتن ریزی شمع‌ها)	مترمکعب	۷۱۱۰۰۰	۱۴۴.۷۲	۱۰۲۸۹۵۹۲۰
حفاری در زمین نیمه پایدار (طبقه‌ی بالا)	مترمکعب	۵۲۶۰۰۰	۱۰۱۱.۷	۵۳۲۱۵۴۲۰۰
شاتکریت طبقه‌ی بالا	اضافه بها بر حفاری	۱۹۵۵۰	۱۰۱۱.۷	۱۹۷۷۸۷۳۵
بتن درجا (لاینینگ طبقه‌ی بالا)	مترمکعب	۷۱۱۰۰۰	۴۹۸.۵	۳۵۴۴۳۳۵۰۰
حفاری در زمین نیمه پایدار (طبقه‌ی پایین)	مترمکعب	۵۲۶۰۰۰	۱۳۶۰	۷۱۵۲۶۰۰۰۰
شاتکریت طبقه‌ی پایین	اضافه بها بر حفاری	۱۹۵۵۰	۱۳۶۰	۲۶۵۸۸۰۰۰۰
بتن درجا (لاینینگ طبقه‌ی پایین)	مترمکعب	۷۱۱۰۰۰	۴۴۰.۷	۳۱۳۳۳۷۷۰۰
مجموع هزینه‌ها				۳۰۲۲۷۳۷۰۰۰

۵-۳ محاسبه‌ی هزینه‌حفر و نگهداری روش گالری کناری

۵-۳-۱ حفاری ایستگاه

به دلیل هندسه‌ی ساده تر و متقارن تر نسبت به روش CAPS، تمام حجم حفاری ایستگاه به روش

گالری کناری به صورت یکجا محاسبه شده است.

جدول ۵-۱۲ هزینه حفاری ایستگاه به روش گالری کناری در طول ۱۰ متر

۲۲۶۸.۶۵	حجم کل حفاری ایستگاه در طول ۱۰ متر (متر مکعب)
۵۲۶۰۰۰	هزینه حفاری یک متر مکعب در زمین نیمه پایدار (ریال)
۱۱۹۳۳۰۹۹۰۰	هزینه حفاری ایستگاه در طول ۱۰ متر (ریال)

۵-۳-۲ شاتکریت کل ایستگاه

هزینه‌ی دولایه مش‌بندی و شاتکریت بصورت اضافه‌بها بر حفاری حساب می‌شود.

۱۹۵۵۰ (ریال)	اضافه‌بها بابت شاتکریت برای هر متر مکعب
۴۴۳۵۲۱۰۷.۵ (ریال)	هزینه‌ی شاتکریت سطوح اصلی برای ۱۰ متر

۵-۳-۳ هزینه تخریب دیوارهای حائل میانی

یکی از تفاوت‌های روش گالری کناری با روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی وجود دیوارهای حایل و موقت میانی است که قبل از اجرای نگهداری اصلی (لاینینگ) باید تخریب شود. در جدول ۵-۱۳ هزینه‌ی تخریب دیوارهای حایل میانی در طول ۱۰ متر از ایستگاه آورده شده است.

جدول ۵-۱۳ هزینه‌ی تخریب دیوار حائل در طول ۱۰ متر از ایستگاه در روش گالری کناری

۱۰۶.۷۶	حجم کل کل دیوارهای حایل در طول ۱۰ متر از ایستگاه (متر مکعب)
۱۳۵۹۰۰۰	هزینه‌ی تخریب دیوار حائل برای هر متر مکعب (ریال)
۱۴۵۰۸۶۸۴۰	هزینه‌ی تخریب دیوار حائل در طول ۱۰ متر از ایستگاه (ریال)

۵-۳-۳-۱ لاینینگ ایستگاه

مجموع هزینه‌های لازم برای اجرای نگهداری اصلی ایستگاه (لاینینگ) در روش گالری کناری در

جدول ۵-۱۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱۴ هزینه‌ی لاینینگ برای ۱۰ متر از ایستگاه به روش گالری کناری

۹۰۰.۰۵	حجم کل بتن ریزی لاینینگ در ۱۰ متر از ایستگاه (متر مکعب)
۷۱۱۰۰۰	هزینه یک متر مکعب بتن درجا (ریال)
۶۳۹۹۳۵۵۵۰	هزینه‌ی لاینینگ برای ۱۰ متر از ایستگاه (ریال)

۵-۳-۴ مجموع هزینه‌های روش گالری کناری (SEM) در ۱۰ متر طول

مجموع هزینه‌های روش SEM برای ده متر طول به تکنیک هر قسمت در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱۵ مجموع هزینه‌های روش SEM برای ده متر طول

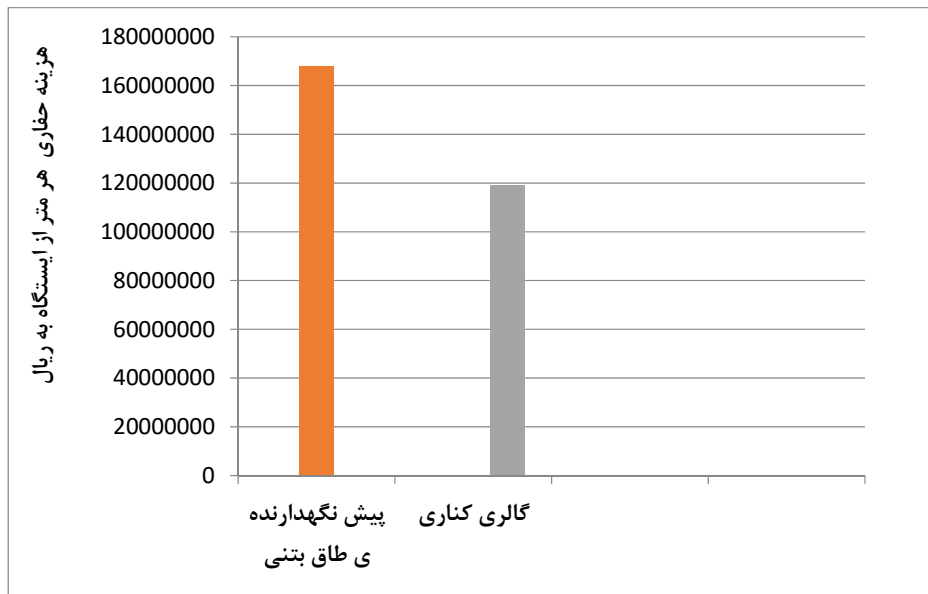
شرح فعالیت	واحد	بهای واحد (ریال)	مقدار	بهای کل (ریال)
حفاری در زمین نیمه پایدار (کل ایستگاه)	مترمکعب	۵۲۶۰۰۰	۲۲۶۸.۶۵	۱۱۹۳۳۰۹۹۰۰
شاتکریت سطوح اصلی ایستگاه	اضافه بها بر حفاری	۱۹۵۵۰	۲۲۶۸.۶۵	۴۴۳۵۲۱۰۷.۵
هزینه تخریب دیوارهای حائل میانی	مترمکعب	۲۱۳۸۰۰۰	۱۰۶.۷۶	۱۴۵۰۸۶۸۴۰
بتن درجا (لاینینگ ایستگاه)	مترمکعب	۷۱۱۰۰۰	۹۰۰.۰۵	۶۳۹۹۳۵۵۵۰
مجموع هزینه‌ها				۲۰۲۲۶۸۴۳۹۸

۵-۴ جمع‌بندی و تحلیل نتایج مقایسه‌ی هزینه‌ای دو روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق

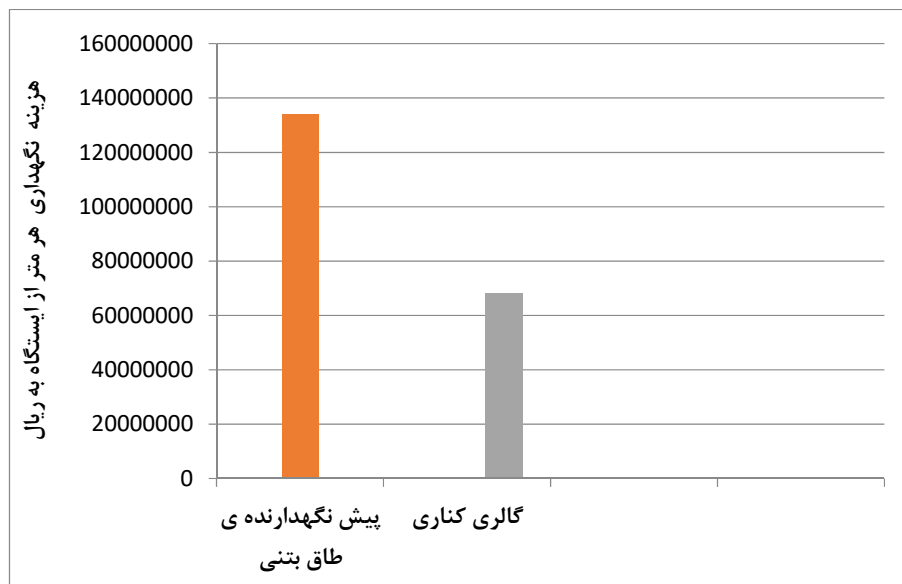
بتنی (CAPS) و گالری کناری (Side Drift)

در شکل‌های ۵-۲، ۵-۳ و ۵-۴ هزینه‌ی نگهداری، حفاری و مجموع هزینه‌ها در واحد متر طول در دو روش باهم مقایسه شده است. همانطور که مشخص است هزینه‌ی حفاری، هزینه‌ی نگهداری و مجموع هزینه‌های روش گالری کناری از روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی کمتر است. روش گالری کناری یک

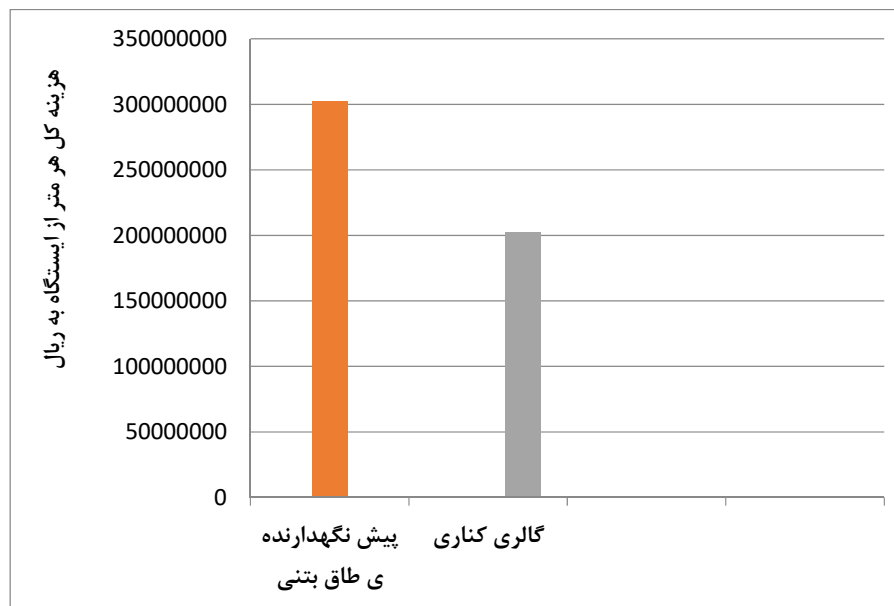
عملیات اضافی نسبت به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی تحت عنوان تخریب دیوارهای حایل میانی دارد که این عملیات جدای از عملیات حفاری و نگهداری فرض شده است. بنابراین عملیات تخریب دیوارهای حایل میانی در مقایسه‌ی هزینه‌ی کل لحاظ شده ولی در نمودارهای مقایسه‌ی هزینه‌ی حفاری و نگهداری در نظر گرفته نشده است.



شکل ۲-۵ مقایسه‌ی هزینه‌ی حفاری دو روش "گالری کناری" و "پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی" در هر متر



شکل ۳-۵ مقایسه‌ی هزینه‌ی نگهداری (شاتکریت و لاینینگ) دو روش "گالری کناری" و "پیش-نگهدارنده‌ی طاق بتنی" در هر متر



شکل ۴-۵ مقایسه‌ی هزینه‌ی کل (حفر و نگهداری) دو روش "گالری کناری" و "پیش نگهدارنده‌ی طاق-بتنی" در هر متر

همانطور که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است، مجموع هزینه‌های روش پیش نگهدارنده‌ی طاق

بتنی حدود یک و نیم برابر روش گالری کناری است.

فصل ششم

تحليل حساسیت

۱-۶ مقدمه

در این فصل میزان اثرگذاری بعضی از پارامترهای خاک و المان‌های نگهداری از قبیل مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و همچنین فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت برای هر دو روش حفاری ایستگاه مترو بررسی شده است. هدف از انجام تحلیل حساسیت بررسی میزان تاثیر این پارامترها در هر روش و مقایسه‌ی مقادیر مختلف هر پارامتر است.

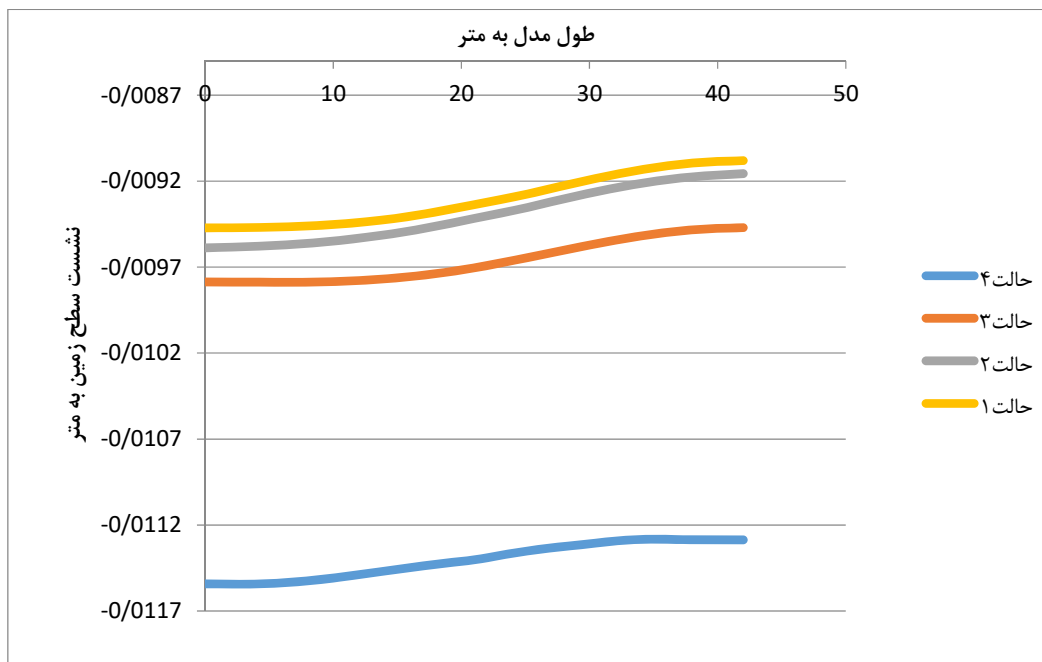
۲-۶ تاثیر مدول الاستیسیته خاک بر روی نشست سطح زمین

در جدول ۱-۶ مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی خاک آورده شده است. حالت ۱ در این جدول مقادیر اصلی به کار رفته در مدل اصلی ایستگاه است. در حالت ۲ مقادیر مدول الاستیسیته‌ی خاک ۱۰٪ کمتر از حالت ۱ در نظر گرفته شده است. در حالت ۳ مقادیر مدول الاستیسیته‌ی خاک ۲۰٪ کمتر از مقادیر اصلی مدل ایستگاه (حالت ۱) در نظر گرفته شده است و در حالت ۴ مقادیر مدول الاستیسیته‌ی خاک ۵۰٪ کمتر از مقادیر اصلی ایستگاه (حالت ۱) در نظر گرفته شده است. با توجه به این که مدول الاستیسیته خاک در منطقه بالا بوده و میزان نشست کمی برداشت شده است، برای تحلیل حساسیت نسبت به مدول الاستیسیته، فقط مقادیر کمتر از مقدار واقعی منطقه بررسی شده است.

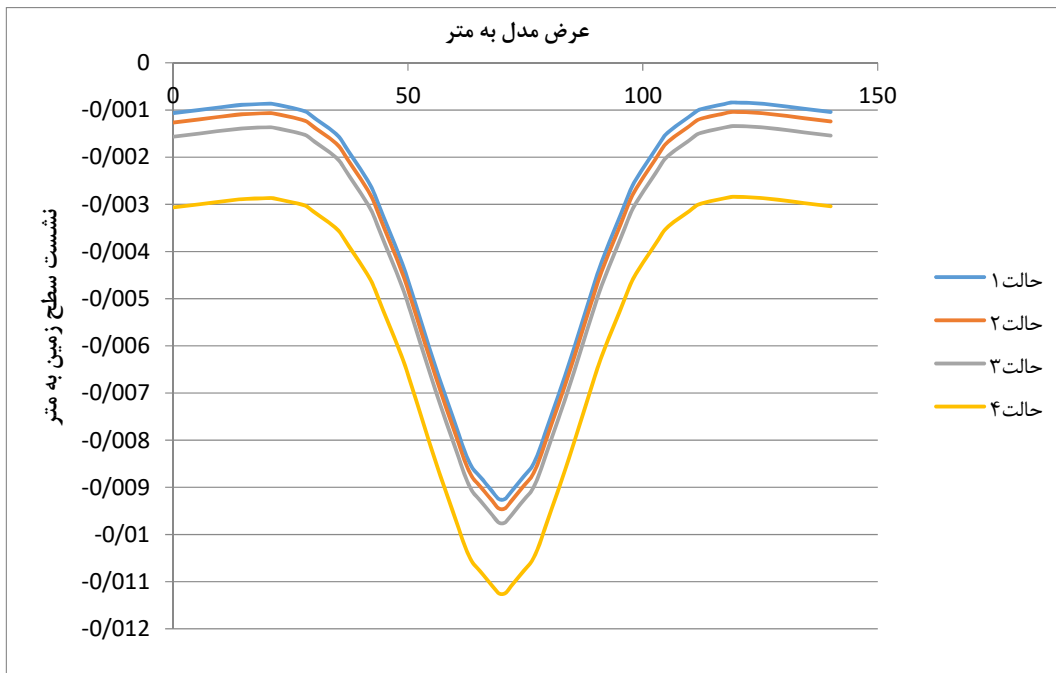
جدول ۱-۶ مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی خاک

حالت ۴	حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	مدول الاستیسیته
E=1.6e10	E=1.6e10	E=1.6e10	E=1.6e10	مدول الاستیسیته‌ی شاتکریت (پاسکال)
E=3.6e10	E=3.6e10	E=3.6e10	E=3.6e10	مدول الاستیسیته‌ی لاینینگ (پاسکال)
E=3.68e7	E=5.888e7	E=6.624e7	E=7.36e7	مدول الاستیسیته‌ی خاک (پاسکال)

۱-۲-۶ بررسی حساسیت مدول الاستیسیته‌ی خاک در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی
 پروفیل طولی و عرضی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی در شکل‌های ۱-۶ و
 ۲-۶ آورده شده است، همانطور که در این شکل‌ها نشان داده شده، با کاهش مدول الاستیسیته‌ی
 خاک، میزان نشست سطح زمین افزایش یافته است.



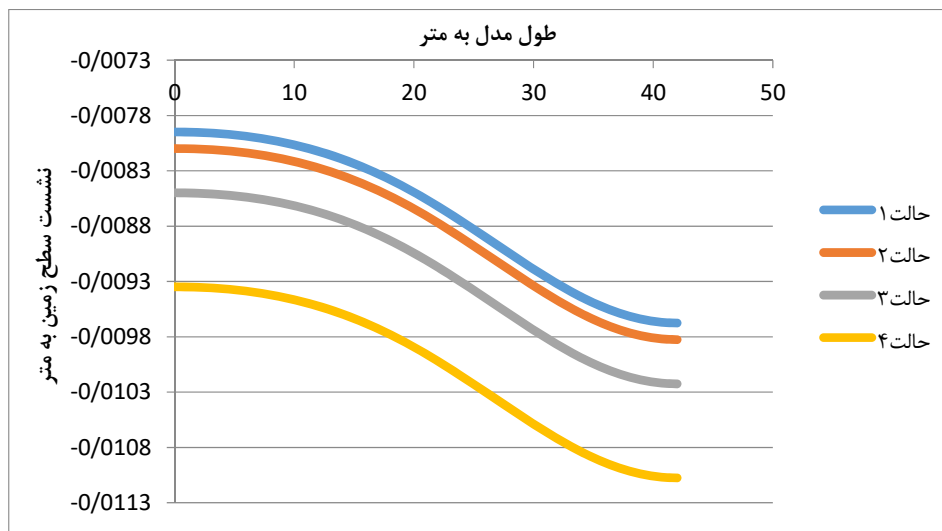
شکل ۱-۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی خاک



شکل ۲-۶ پروفیل عرضی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی خاک

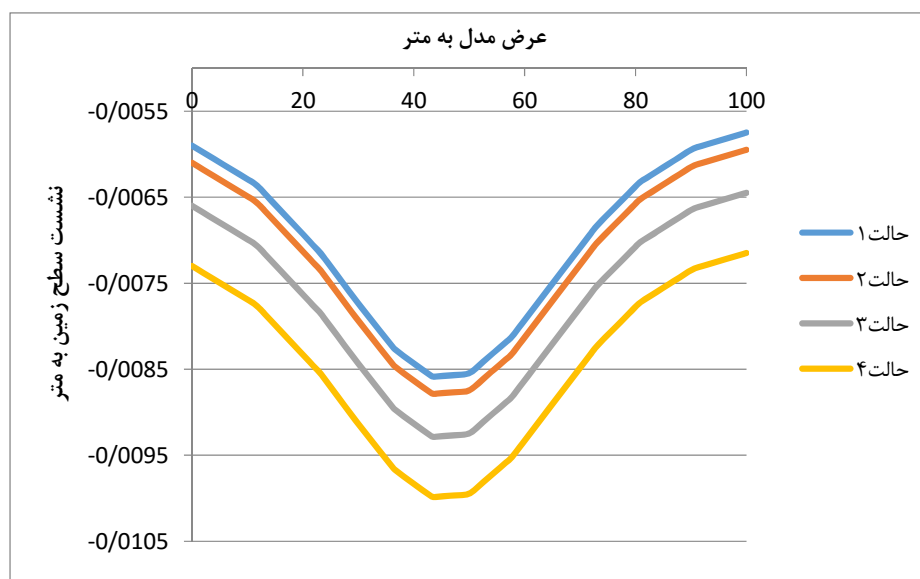
۲-۲-۶ بررسی حساسیت مدول الاستیسیته‌ی خاک در روش گالری کناری

پروفیل طولی و عرضی نشست سطح زمین در روش گالری کناری در شکل‌های ۳-۶ و ۴-۶ آورده شده است، همانطور که در این شکل‌ها نشان داده شده، با کاهش مدول الاستیسیته‌ی خاک، میزان نشست سطح زمین افزایش یافته است.



شکل ۳-۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش گالری کناری برای مقادیر مختلف مدول

الاستیسیتتهی خاک



شکل ۴-۶ پروفیل عرضی نشست سطح زمین در روش گالری کناری برای مقادیر مختلف مدول

الاستیسیتتهی خاک

۳-۶ تاثیر مدول الاستیسیتتهی المانهای نگهداری ایستگاه بر روی نشست سطح

زمین

در جدول ۲-۶ مقادیر مختلف مدول الاستیسیتتهی شاتکریت و لاینینگ آورده شده است. حالت ۱

در این جدول مقادیر اصلی به کار رفته در مدل اصلی ایستگاه است. در حالت ۲ مقادیر مدول

الاستیسیته‌ی شاتکریت و لاینینگ ۲۰٪ بیشتر در نظر گرفته شده است. در حالت ۳ مقادیر مدول الاستیسیته‌ی شاتکریت و لاینینگ ۲۰٪ کمتر از مقادیر مدل اصلی ایستگاه (حالت ۱) در نظر گرفته شده است و در حالت ۴ مقادیر مدول الاستیسیته‌ی شاتکریت و لاینینگ ۵۰٪ کمتر از مقادیر مدل اصلی ایستگاه (حالت ۱) در نظر گرفته شده است.

جدول ۶-۲ مقادیر مختلف مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری

حالت ۴	حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	مدول الاستیسیته
E=8e9	E=1.28e10	E=1.92e10	E=1.6e10	مدول الاستیسیته‌ی شاتکریت (پاسکال)
E=1.8e10	E=2.88e10	E=4.32e10	E=3.6e10	مدول الاستیسیته‌ی لاینینگ (پاسکال)
E=7.36e7	E=7.36e7	E=7.36e7	E=7.36e7	مدول الاستیسیته‌ی خاک (پاسکال)

۶-۳-۱ بررسی حساسیت مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق

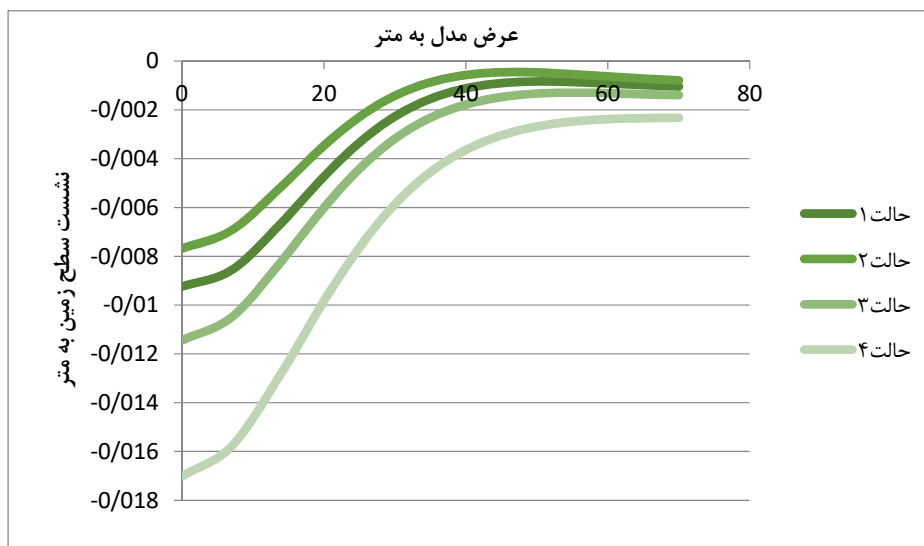
بتنی

شکل‌های ۶-۵ و ۶-۶ پروفیل‌های طولی و عرضی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته المان‌های نگهداری را نشان می‌دهند. با کاهش مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری میزان نشست سطح زمین زیاد شده و با افزایش مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری میزان نشست سطح زمین کم شده است. این نتیجه به این دلیل است که مدول الاستیسیته با مدول حجمی و برشی نسبت مستقیم دارد. افزایش مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری مدول برشی و حجمی المان‌های نگهداری را زیاد می‌کند که باعث افزایش مقاومت المان‌های نگهداری و در نتیجه نشست کمتر می‌شود و کاهش مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری مدول حجمی و برشی المان‌های نگهداری را کم می‌کند که باعث کاهش مقاومت المان‌های نگهداری و در نتیجه نشست سطح بیشتر می‌شود.



شکل ۶-۵ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته المان‌های نگهداری

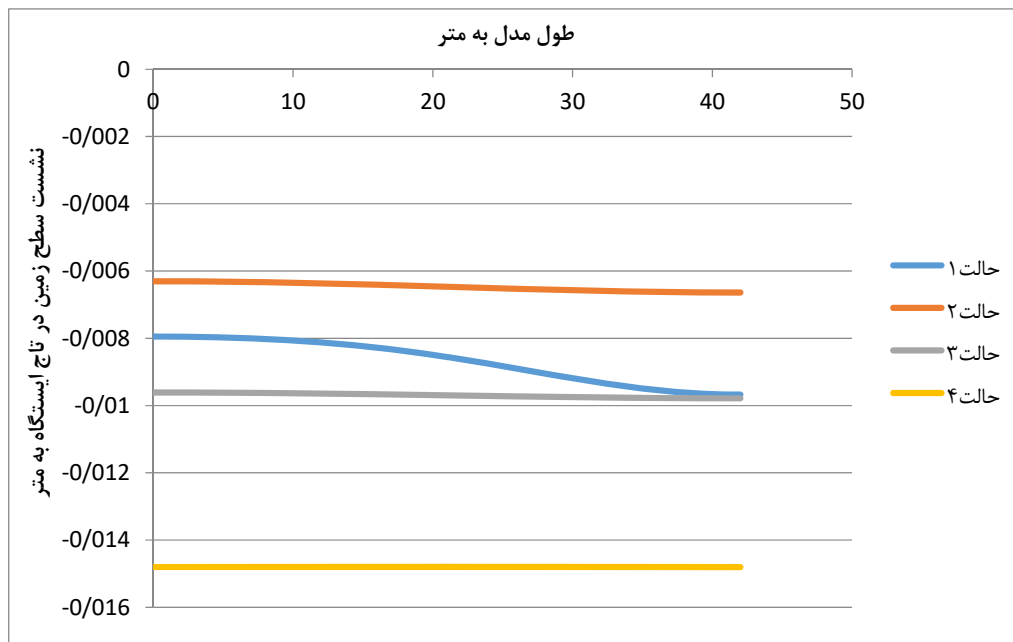
در این مرحله به دلیل کمبود وقت، با توجه به تقارن کامل این مدل، برای کاهش زمان انجام محاسبات، هندسه‌ی مدل از وسط به دو نصف تقسیم شده و فقط نیمه‌ی سمت راستی در نظر گرفته شده است. بنابراین همانطور که در شکل ۶-۶ مشخص است، فقط نیمه‌ی از گودی نشست در پروفیل عرضی نشست سطح زمین نشان داده شده است.



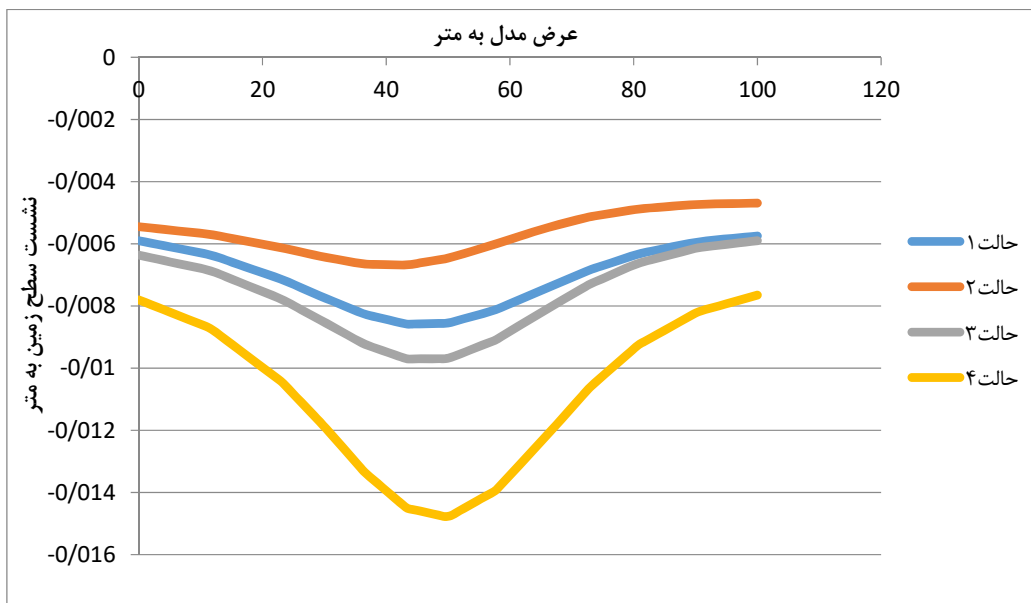
شکل ۶-۶ گسترش عرضی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته المان‌های نگهداری

۶-۳-۲ بررسی حساسیت مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری در روش گالری‌کناری

شکل‌های ۵-۶ و ۶-۶ پروفیل‌های طولی و عرضی نشست سطح زمین در روش گالری‌کناری برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته المان‌های نگهداری را نشان می‌دهند. با کاهش مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری میزان نشست سطح زمین زیاد شده و با افزایش مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری میزان نشست سطح زمین کم شده است. این نتیجه به این دلیل است که مدول الاستیسیته با مدول حجمی و برشی نسبت مستقیم دارد. افزایش مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری مدول برشی و حجمی المان‌های نگهداری را زیاد می‌کند که باعث افزایش مقاومت المان‌های نگهداری و در نتیجه نشست کمتر می‌شود و کاهش مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری مدول حجمی و برشی المان‌های نگهداری را کم می‌کند که باعث کاهش مقاومت المان‌های نگهداری و در نتیجه نشست سطح بیشتر می‌شود.



شکل ۶-۷ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش گالری‌کناری برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته المان‌های نگهداری



شکل ۶-۸ گسترش عرضی نشست سطح زمین در روش گالری کناری برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته المان‌های نگهداری

۶-۴ تاثیر نسبت پواسون المان‌های نگهداری ایستگاه بر روی نشست سطح زمین

در جدول ۶-۳ مقادیر مختلف نسبت پواسون شاتکریت و لاینینگ آورده شده است. حالت ۱ در این جدول مقادیر اصلی به کار رفته در مدل اصلی ایستگاه است. در حالت ۲ مقادیر نسبت پواسون شاتکریت و لاینینگ ۲۰٪ بیشتر در نظر گرفته شده است. در حالت ۳ مقادیر نسبت پواسون شاتکریت و لاینینگ ۲۰٪ کمتر از مقادیر مدل اصلی ایستگاه در نظر گرفته شده است و در حالت ۴ مقادیر نسبت پواسون شاتکریت و لاینینگ ۵۰٪ کمتر از مقادیر مدل اصلی ایستگاه در نظر گرفته شده است

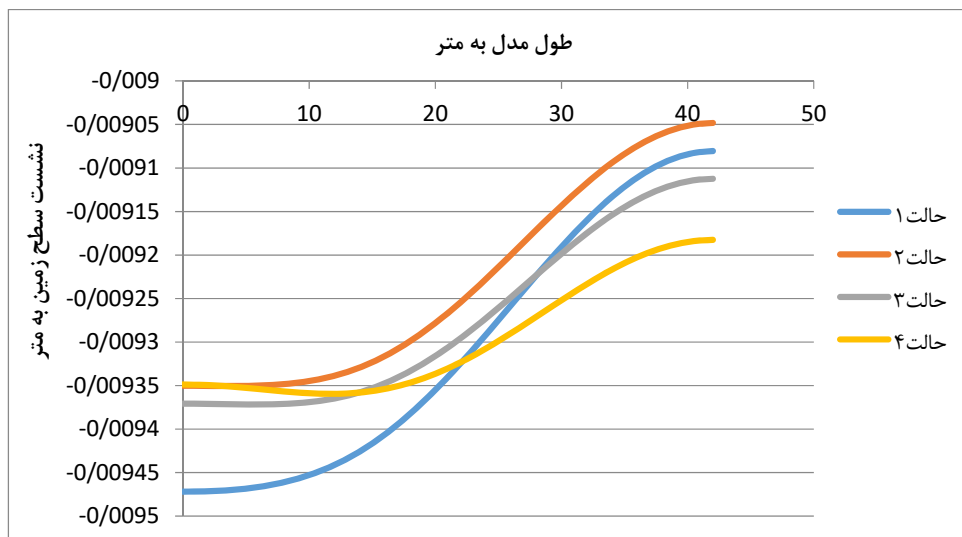
جدول ۳-۶ مقادیر مختلف نسبت پواسون المان‌های نگهداری

نسبت پواسون	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
نسبت پواسون لاینینگ	$\nu = 0.2$	$\nu = 0.24$	$\nu = 0.16$	$\nu = 0.1$
نسبت پواسون شاتکریت	$\nu = 0.25$	$\nu = 0.3$	$\nu = 0.2$	$\nu = 0.125$

۶-۴-۱ بررسی حساسیت نسبت پواسون المان‌های نگهداری در روش پیش‌نگهدارنده‌ی

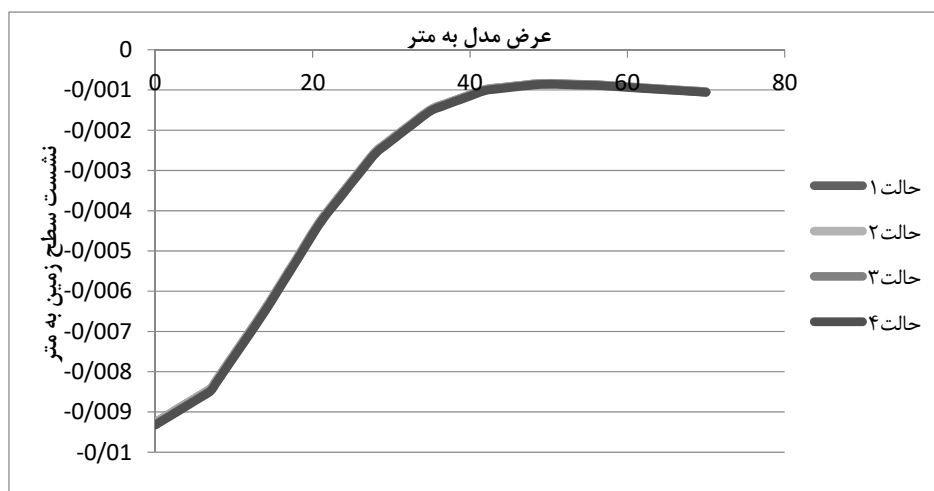
طاق بتنی

شکل‌های ۶-۹ و ۶-۱۰ پروفیل‌های طولی و عرضی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی را برای مقادیر مختلف نسبت پواسون المان‌های نگهداری را نشان می‌دهند. با توجه به مقیاس محور عمودی شکل ۶-۹ مشخص است که تغییرات نسبت پواسون المان‌های نگهداری تاثیر زیادی بر روی نشست سطح زمین نمی‌گذارد و مقادیر نشست سطح زمین در هر چهار حالت بسیار نزدیک به هم است. تغییرات نسبت پواسون در بیشترین حالت میزان نشست سطح زمین را به مقدار ناچیز ۰.۱۲ میلی‌متر تغییر داده است. این نتیجه به این دلیل است نسبت پواسون با مدول حجمی نسبت مستقیم و با مدول برشی نسبت عکس دارد و افزایش نسبت پواسون مدول حجمی را زیاد و مدول برشی را کم می‌کند. در نتیجه مقاومت المان‌های نگهداری با تغییر نسبت پواسون تغییر خاصی نمی‌کند که در نتیجه نشست سطح زمین هم تغییر خاصی نمی‌کند.



شکل ۶-۹ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف نسبت پواسون المان‌های نگهداری

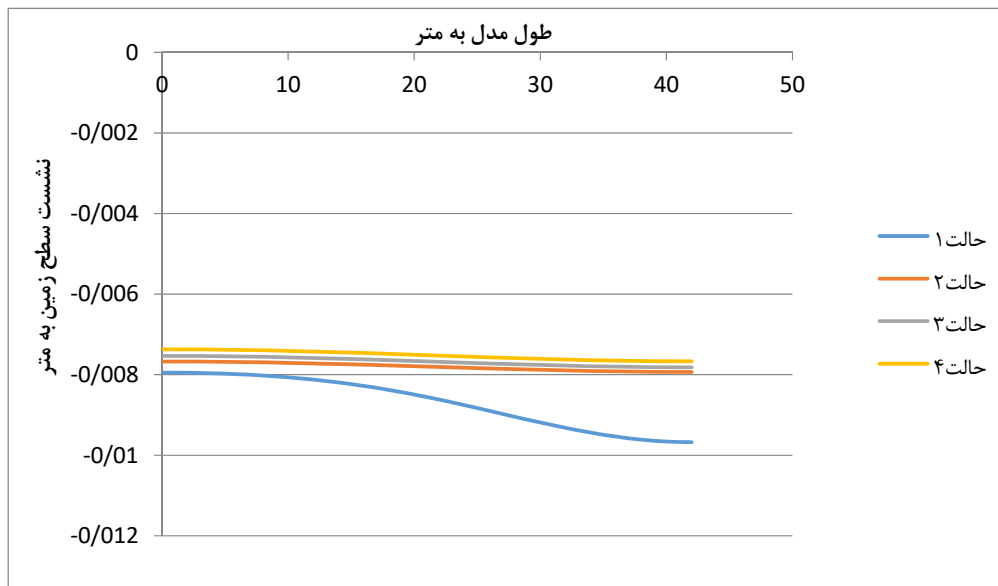
در این مرحله نیز به دلیل کمبود وقت، با توجه به تقارن کامل این مدل، برای کاهش زمان انجام محاسبات، هندسه‌ی مدل از وسط به دو نصف تقسیم شده و فقط نیمه‌ی سمت راستی در نظر گرفته شده است. بنابراین همانطور که در شکل ۶-۶ مشخص است، فقط نیمی از گودی نشست در پروفیل عرضی نشست سطح زمین نشان داده شده است.



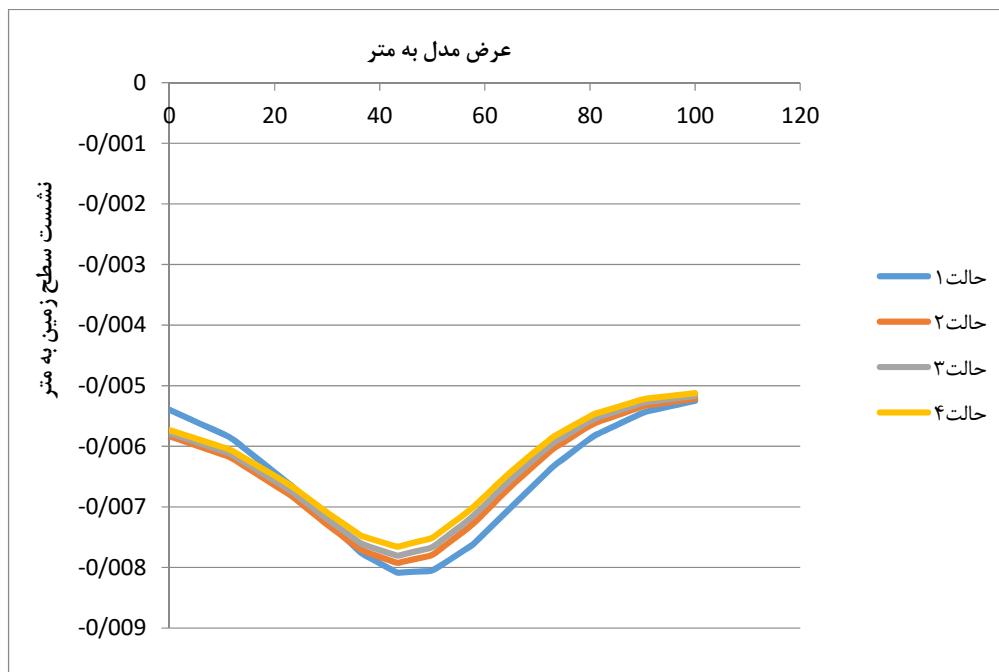
شکل ۶-۱۰ گسترش عرضی نشست سطح زمین در تاج ایستگاه در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی برای مقادیر مختلف نسبت پواسون المان‌های نگهداری

۶-۴-۲ بررسی حساسیت نسبت پواسون المان‌های نگهداری در روش گالری کناری

در روش گالری کناری نیز مانند روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی باتوجه به مقیاس محور عمودی شکل‌های ۶-۱۱ و ۶-۱۲ که به ترتیب پروفیل‌های طولی و عرضی نشست سطح زمین در روش گالری کناری را برای مقادیر مختلف نسبت پواسون المان‌های نگهداری را نشان می‌دهند، مشخص است که تغییرات نسبت پواسون المان‌های نگهداری تاثیر زیادی بر روی نشست سطح زمین نمی‌گذارد و مقادیر نشست سطح زمین در هر چهار حالت بسیار نزدیک به هم است. این نتیجه به این دلیل است نسبت پواسون با مدول حجمی نسبت مستقیم و با مدول برشی نسبت عکس دارد و افزایش نسبت پواسون مدول حجمی را زیاد و مدول برشی را کم می‌کند. در نتیجه مقاومت المان‌های نگهداری با تغییر نسبت پواسون تغییر خاصی نمی‌کند که در نتیجه نشست سطح زمین هم تغییر خاصی نمی‌کند.



شکل ۶-۱۱ پروفیل طولی نشست سطح زمین در روش گالری کناری برای مقادیر مختلف نسبت پواسون المان‌های نگهداری



شکل ۶-۱۲ گسترش عرضی نشست سطح زمین در روش گالری کناری برای مقادیر مختلف نسبت پواسون
المان‌های نگهداری

۵-۶ بررسی تاثیر فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت

در جدول ۶-۴ مقادیر مختلف فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت آورده شده است. حالت ۱ در واقع دیرترین زمان اجرای لاینینگ و حالت ۳ سریع‌ترین زمان اجرای لاینینگ را نشان می‌دهد.

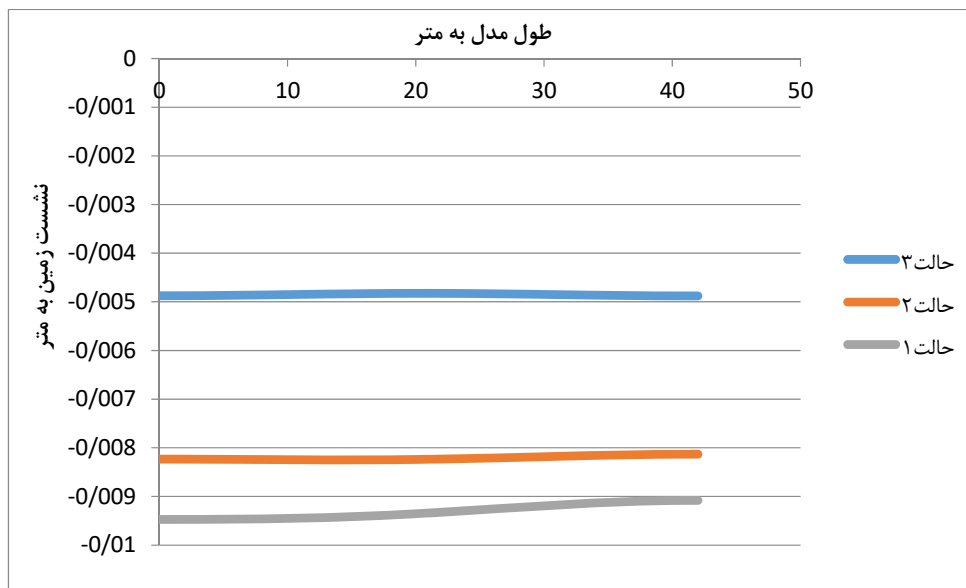
جدول ۴-۶ مقادیر مختلف فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت

<p>حداکثر فاصله‌داری طولی شاتکریت و لاینینگ ۱۸ متر است (بعد از اینکه تمام مقاطع ایستگاه به طول ۱۸ متر حفر و با شاتکریت نگهداری شوند، یک مرحله لاینینگ به طول ۶ متر اجرا می‌شود).</p>	<p>حالت ۱</p>
<p>حداکثر فاصله‌داری طولی شاتکریت و لاینینگ ۱۲ متر است (بعد از اینکه تمام مقاطع ایستگاه به طول ۱۲ متر حفر و با شاتکریت نگهداری شوند، یک مرحله لاینینگ به طول ۶ متر اجرا می‌شود).</p>	<p>حالت ۲</p>
<p>حداکثر فاصله‌داری طولی شاتکریت و لاینینگ ۶ متر است (بعد از اینکه تمام مقاطع ایستگاه به طول ۶ متر حفر و با شاتکریت نگهداری شوند، یک مرحله لاینینگ به طول ۶ متر اجرا می‌شود).</p>	<p>حالت ۳</p>

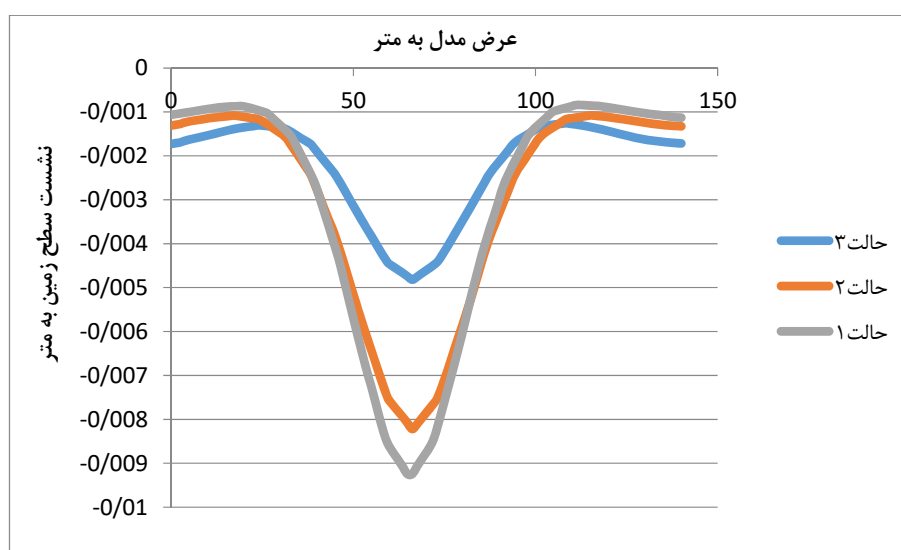
۶-۵-۱ بررسی تاثیر فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق

بتنی

شکل‌های ۶-۱۳ و ۶-۱۴ پروفیل‌های طولی و عرضی نشست سطح زمین در فاصله‌داری‌های طولی مختلف اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی را نشان می‌دهند، مطابق انتظار با افزایش فاصله‌داری‌های طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی، میزان نشست سطح زمین بیشتر می‌شود. یعنی هرچقدر که لاینینگ دیرتر اجرا شود افزایش نشست سطح زمین را به‌دنبال خواهد داشت و بالعکس.



شکل ۶-۱۳ نشست سطح زمین در فاصله‌داری‌های طولی مختلف اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

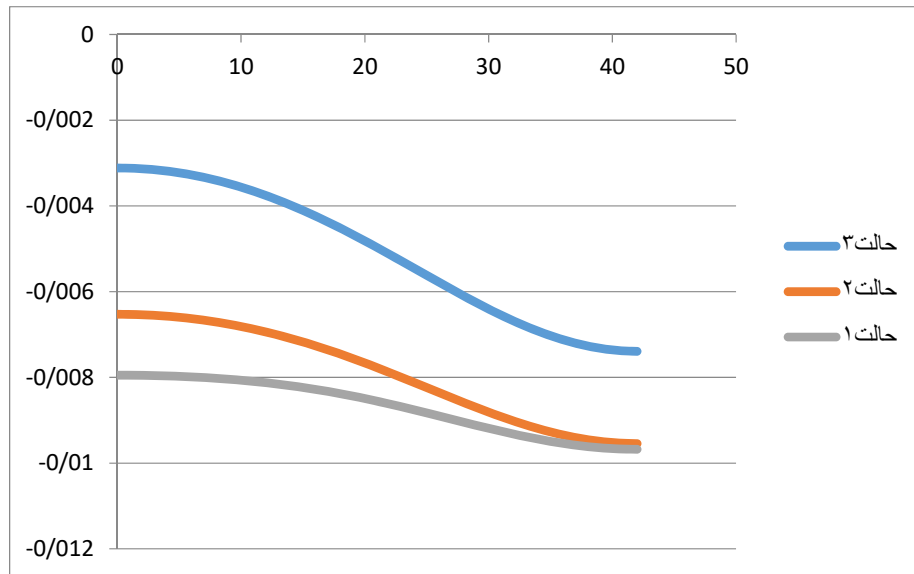


شکل ۶-۱۴ پروفیل عرضی نشست سطح زمین در فاصله‌داری‌های طولی مختلف اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی

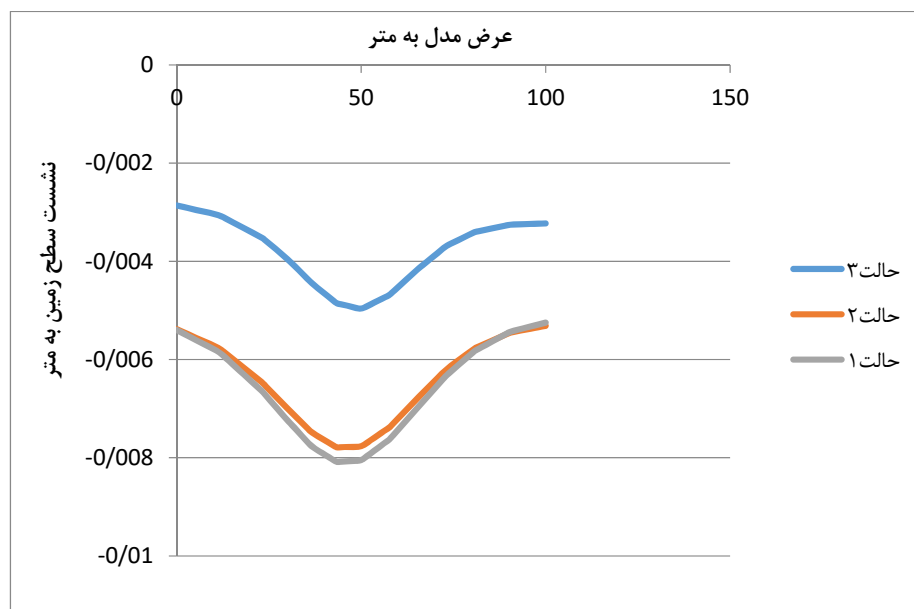
۶-۵-۲ بررسی تاثیر فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش گالری کناری

شکل‌های ۶-۱۵ و ۶-۱۶ پروفیل‌های طولی و عرضی نشست سطح زمین در فاصله‌داری‌های طولی مختلف اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش گالری‌کناری را نشان می‌دهند، مطابق انتظار با افزایش فاصله‌داری‌های طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش گالری‌کناری، میزان نشست سطح زمین

بیشتر می‌شود. یعنی هرچه قدر که لاینینگ دیرتر اجرا شود افزایش نشست سطح زمین را به‌دنبال خواهد داشت و بالعکس.



شکل ۶-۱۵ پروفیل طولی نشست سطح زمین در فاصله‌داری‌های طولی مختلف اجرای لاینینگ و شاتکریت در گالری کناری



شکل ۶-۱۶ پروفیل عرضی جابجایی زمین در تاج ایستگاه در فاصله‌داری‌های طولی مختلف اجرای لاینینگ و شاتکریت در روش گالری کناری

۶-۶ جمع‌بندی و تحلیل نتایج

- با کاهش مدول الاستیسیته‌ی خاک، میزان پایداری در هر دو روش کم می‌شود و میزان نشست افزایش می‌یابد.
- با کاهش مدول الاستیسیته‌ی المان‌های نگهداری، میزان پایداری در هر دو روش کم می‌شود و میزان نشست سطح زمین افزایش می‌یابد.
- تغییرات نسبت پواسون المان‌های نگهداری تاثیر قابل توجهی بر روی پایداری و نشست سطح زمین نمی‌گذارد.
- هرچه فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت بیشتر شود، یعنی لاینینگ دیرتر اجرا شود، نشست سطح و جابجایی زمین در هر دو روش بیشتر خواهد بود.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۷ نتیجه گیری

در این پژوهش پس از مطالعه‌ی اجمالی پیرامون سیر تاریخی روش‌های مختلف حفر ایستگاه مترو، دو روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی و گالری‌کناری برای حفر ایستگاه مترو با استفاده از اطلاعات ایستگاه مرزداران خط ۶ متروی تهران مدلسازی شده است. با توجه به شرایط و اهداف مسئله، نرم‌افزار Flac3D برای این مدلسازی استفاده شد. همچنین هزینه‌ی حفر و نگهداری هر دو روش بر مبنای فهرست‌بهای راه، باند و فرودگاه برآورد شده است. برجسته‌ترین نتایج حاصل از مقایسه‌ی مدلسازی و برآورد هزینه‌ی این دو روش را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

(۱) با توجه به دهانه‌ی بزرگ ایستگاه‌ها، میزان گام حفاری تاثیر بسیار زیادی بر نشست سطح و پایداری زمین دارد.

(۲) میزان نشست سطح زمین در شرایط و گام حفاری یکسان در روش گالری‌کناری به‌طور کلی کمتر از روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی است در نتیجه روش گالری‌کناری از نظر پایداری بهتر از روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی است.

(۳) استفاده از سیستم پیش‌نگهدارنده (شمع و ریب‌ها) در روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی باعث افزایش پایداری زمین و کاهش میزان نشست سطح و جابجایی زمین می‌شود.

(۴) حفر مرحله‌ای، کوچکتر بودن سطح مقطع هر مرحله از حفاری در روش گالری‌کناری نسبت به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی و حضور دیوارهای حائل میانی موقت باعث کاهش نشست و افزایش پایداری روش گالری‌کناری نسبت به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی می‌شود.

(۵) نتایج مربوط به آنالیز حساسیت:

- مدول الاستیسیته‌ی خاک و المان‌های نگهداری با نشست سطح زمین نسبت عکس دارند. یعنی هرچی مدول الاستیسیته‌ی خاک و المان‌های نگهداری کم شود نشست سطح زمین زیاد می‌شود. بنابراین در صورت لزوم می‌توان با تقویت

خاک و یا المان‌های نگهداری به میزان پایداری بالاتر و نشست سطح کمتری دست یافت.

- تغییرات نسبت پواسون المان‌های نگهداری تاثیر قابل توجهی بر روی نشست سطح و جابجایی زمین نمی‌گزارد.
- هرچه فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت بیشتر شود، یعنی لاینینگ دیرتر اجرا شود، نشست سطح و جابجایی زمین در هر دو روش بیشتر خواهد بود. بنابراین در صورت لزوم می‌توان با کاهش فاصله‌داری طولی اجرای لاینینگ و شاتکریت به میزان پایداری بالاتر و نشست سطح کمتری دست یافت.

۶) با توجه به برآورد صورت گرفته بر مبنای فهرست بهای راه، باند و فرودگاه، مجموع هزینه های حفر و نگهداری در روش گالری کناری کمتر از روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی است در نتیجه روش گالری کناری از نظر هزینه‌ای ارزان‌تر از روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی است.

۲-۷ پیشنهادات

- ۱) با توجه به تحقیق حاضر، در شرایط یکسان روش گالری کناری نسبت به روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی هزینه‌ی کمتر و پایداری بیشتری دارد. بنابراین استفاده از روش گالری کناری بجای روش پیش‌نگهدارنده‌ی طاق بتنی توصیه می‌شود.
- ۲) با توجه به اینکه وجود دیوارهای حایل موقت میانی در روش گالری کناری باعث افزایش هدر رفت مصالح می‌شود و هزینه‌ی مجزایی هم برای تخریب نیاز دارد، لازم است که تحقیق جامعی پیرامون میزان اثرگذاری این دیوارهای حایل صورت گیرد تا ضرورت لزوم یا عدم لزوم ایجاد دیوارهای حایل موقت میانی در شرایط مختلف بررسی شده و همچنین بهترین شکل هندسی این دیوارها و بهینه‌ترین حجم بتن لازم برای احداث این دیوارها

بررسی شود.

۳) پایداری روش گالری کناری تحت تاثیر تنش‌های دینامیکی، اثر حضور آب زیرزمینی و تاثیر رفتارهای وابسته به زمان سازندهای شکل پذیر بر روی پایداری روش گالری کناری مطالعه شود.

۴) اطلاعات دقیق و واقعی هزینه‌های ایستگاه‌های مترو برای برآورد و مقایسه‌های دقیق تر در اختیار پژوهشگران قرار گیرد.

منابع

- حجازی راد، گنجیان، نوید، منصور. (۲۰۱۵). بررسی روش‌های مناسب حفاری چندمرحله‌ای ایستگاه‌های زیرزمینی عمیق-مطالعه موردی ایستگاه X7 خط هفت مترو تهران. *مهندسی تونل و فضاها*ی زیرزمینی-33, 4(1), 52.
- ریحانیان زواره، حسینی محمد فاروق، طالبی‌نژاد علی‌رضا. (۲۰۱۳). تعیین فاصله‌داری بهینه‌ی طاق‌های بتنی و برآورد نشست در ایستگاه‌های مترو-مطالعه‌ی موردی: ایستگاه هفت تیر خط ۶ متروی تهران. *مهندسی تونل و فضاها*ی زیرزمینی. 121-132, 2(2).
- شرکت راه‌آهن شهری تهران و حومه، (۱۳۹۴). "گزارش خدمات مهندسی ژئوتکنیک بخش شمالی خط ۶ متروی تهران"
- قارونی نیک، مرتضی؛ مجید زعیمی فشانی و بهنام فخری، (۱۳۹۲). "بررسی فنی و اقتصادی حفر ایستگاه و عبور تونل‌های مترو در نواحی شهری". *سومین کنفرانس بین‌المللی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی راه‌آهن، ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت.*
- مرتضی عبدی چرلو، مسعود چراغی، سعید مهدوری، (۱۳۹۱)، "بررسی پایداری ایستگاه‌های مترو در روش اجرای سیستم پیش‌نگهدارنده با استفاده از لوله‌های قوسی فولادی" *نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان*
- مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۹) بررسی روش اجرای تقاطع خطوط ۳ و ۷.
- مهندسین مشاور طرح جامع، (۱۳۸۳). *انتشارات قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء، تهران، چاپ اول*
- Aydin, A., Ozbek, A., & Cobanoglu, I. (2004). Tunnelling in difficult ground: a case study from Dranaz tunnel, Sinop, Turkey. *Engineering geology*, 74(3-4), 293-301.
- Barla, G. (2002). Tunnelling mechanics Tunnelling under squeezing rock conditions. *Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling. D. Kolymbas Ed., pp. 169-268.*
- Barski, E.S., Hong, D.L., (2000). "Design of deep-buried subway station in Moscow". *Tunn. Undergr. Eng.* 1, 33–39 (in Chinese).
- Brown, E. T. (1981). Putting the NATM into perspective. *Tunnels & Tunnelling International*, 13(10).
- C.W.Yu & J.C. Chern. (2007.) Expert system for D&B tunnel construction *Sinotech Engineering Consultants, Inc., Taipei, Taiwan.*
- Chakeri, H., Ozcelik, Y., & Unver, B. (2013). Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. *Tunnelling and*

Underground Space Technology, 36, 14-23.

Cherlo, M. A., Hashemolhosseini, H., Cheraghi, M., & Mahdevari, S. (2013). Feasibility evaluation for excavation of Naghshe Jahan Square subway station by underground methods. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(6), 452-459.

Desai, D. B., Rossler, K., & Wagner, H. (2000). Large station design for Tren Urbano's Minillas Extension. In *North American Tunneling 2000* American Underground Construction Association.

Donde, P. M., & Wagner, H. (1992). NATM subway station in soft ground. In *Proceedings of the international congress'towards new worlds in tunneling; held Acapulco, 16-20 May 1992. Volume 2*.

Fang, Q., Zhang, D., & Wong, L. N. Y. (2012). Shallow tunnelling method (STM) for subway station construction in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 29, 10-30

Goto, T., Masaka, T., Miki, K., & Takaku, S. (2005). Shield tunneling technologies in Japan. In *Proceedings of the international world tunnel congress and the 31st ita general assembly, Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future, Istanbul, Turkey:[sn]* (pp. 773-778).

Honda, M Yuasa,Y. (2006) "Under ground shield Tunnel enlargement work" Mitsui construction., CO., Ltd, Tokyo, Japan, pp 263-269

Irshad, M., & Heflin, L. H. (1988). Soft-ground NATM tunnel designs for the Washington, DC Metro. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 3(4), 385-392.

Itasca. (2012). FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 5.01. Itasca Consulting Group Inc.

Karakus, M., & Fowell, R. J. (2005). Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), 514-524.

Kivi, A. V., Sadaghiani, M. H., & Ahmadi, M. M. (2012). Numerical modeling of ground settlement control of large span underground metro station in Tehran Metro using Central Beam Column (CBC) structure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 1-9.

Kolymbas, D. (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling*. Springer Science & Business Media.

Kunihiko, T., & Kenichi, Y. (2006). The state of affairs of large diameter shield tunnel method for subway and the recent trend of shield technology in Japan. In *International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling, Bangkok, Thailand* (pp. 57-66).

Lau, L. I. H. (2010). *Performance of Pillars in Rock Salt Mines*(Master's thesis, University of Waterloo).

Liu, J., Wang, F., He, S., Wang, E., & Zhou, H. (2015). Enlarging a large-diameter shield tunnel using the Pile–Beam–Arch method to create a metro station. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, 130-143.

Liu, J., Wang, F., He, S., Wang, E., & Zhou, H. (2015). Enlarging a large-diameter shield tunnel using the Pile–Beam–Arch method to create a metro station. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, 130-143.

Lu, M. L. (2007). *Study on Schemes and Risk Analysis of the Expanded Metro Station under Shield Running Tunnel* (Doctoral dissertation, Dissertation for Doctor's Degree, Beijing Jiaotong University (in Chinese)).

Lunardi, P. (1990). The cellular arch method: technical solution for the construction of the Milan railway's venezia station. *Tunnelling and underground space Technology*, 5(4), 351-356.

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

Narasaki, M., Okuda, M., & Matsushashi, S. (1992). Design and construction of the large underground station by NATM in unconsolidated sand stratum *Proceedings of the international congress'towards new worlds in tunneling; held Acapulco, 16-20 May 1992. Volume 2.*

Okada, M., Hamazuka, Y., & Okano, S. (1995). Field measurement controlling method of CD-NATM in urban tunnel. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 3, No. 32, p. 123A)

Oteo, C., Paramer, J., Rodriguez, J., Romana, M. (1996). Construction of twin tunnels 20m width in the Madrid Sands, *North American Tunneling*, 411-420

Rabcewicz, L. V. (1965). The New Austrian Tunnelling Method, Part III. *Water Power*, 19-24.

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.

Sadaghiani, M. H., & Taheri, S. R. (2008). Numerical investigations for stability analysis of a large underground station of Tehran metro. In *World Tunnel Congress, Underground Facilities for Better Environment and Safety, India.*

Hung, C. J., Monsees, J., Munfah, N., & Wisniewski, J. (2009). Technical manual for design and construction of road tunnels. *Report to US Department of Transportation prepared by Parsons Brinckerhoff, Inc. New York, USA, FHWA-NHI-09-010.*

Tonon, F. (2010). Sequential excavation, NATM and ADECO: What they have in common and how they differ. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(3), 245-265.

Xiang, Y., He, S., Cui, Z., & Ma, S. (2005). A subsurface “drift and pile” protection scheme for the construction of a shallow metro tunnel. *Tunnelling and underground space technology*, 20(1), 1-5.

Zhao, K., Hao, Z., Luo, F., & Li, S. (2015). A New Construction Method for Deeply Buried Metro Station in Rich Water Strata.

ABSTRACT

Today, numerical methods are used as an effective tool for predicting behavior of ground. Tendency to use the numerical methods have increased due to the ability to simulate different material, high speed and precision, as well as the ability to change the properties of the ground and structures materials to investigate the effect of each of these factors, in solving geomechanical problems.

In recent years, the need for underground spaces has increased due to the expansion of urban area. It should be note that most cities are located in alluvial areas. Therefore, ground surface settlement and its impact on surrounding structures must be considered in excavation of large underground spaces such as Tunnels and Statins of subways. So it is important to analysis of the stability of different methods of subway station.

Typically, subway stations are drilled by Cut and Field method or underground method. The selection of subway station drilling method is depended on various conditions such as station depth, traffic Considerations, economic aspects, and so on. Each method of drilling the metro station has advantages and disadvantages, but it is a suitable method that, in addition to having less disadvantages, provides underground space safety and long-term sustainability, and is also the best option in terms of cost.

In this research, in order to select the methods for numerical investigation, at the first various methods of drilling the subway stations have been studied on variety of Sequential methods, Mechanical methods and variety of Pre-Supporting methods. The Sequential methods including Side Drift, Centural Diaphragm. The Mechanical methods including Mechanical Pre-Tunnelin methods and the use of Multi-face Shield

Construction. Also the Pre-Supporting , including Carved Pipe Roofing Method and Celular Arc Method . Finally, the Concrete Arc Pre-Supporting System method and Side Drift method have been selected for comparison.

Then, the FLAC3D software has been used to investigate the stability of subway station drilling methods. The data of the Marzdaran station of subway-Line 6 of Tehran have been used to make a numerical model. The Marzdaran station of subway-Line 6 of Tehran is built by Concrete Arc Pre-Supporting System method. The effect of some soil parameters and maintenance elements is also analyzed using numerical modeling.

The results of the numerical modeling are compared with the results instrumentation of The Marzdaran station of subway-Line 6 of Tehran. Also, the approximate cost of drilling and maintenance operations in both methods is estimated and compared based on the road, runway and airport prices. Finally, the most suitable method for drilling The Marzdaran station of subway-Line 6 of Tehran is presented in terms of sustainability and cost.

Keyword: FLAC3D software – Subway station – Concrete Arc Pre-Supporting System – Side Drift - ground surface settlement



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

MSC Thesis in Tunnel and Underground Spaces Engineering

**Study of underground metro station excavation methods
and choosing the suitable method considering technical
and costs item (case study line 6 of metro of Tehran)**

Vahid Nemati

Supervisor:

Dr. Shokrollah Zare

Advisor:

Dr. Ramin Rafiei

September 2018