

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

ارزیابی فنی روش حفاری NATM در تونل با مقایسه آن با روش کند و پوش-

مطالعه موردی: تونل راه آهن تهران- تبریز

مدی فرقانی

استاد راهنما:

دکتر سکرانه زارع

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

استاد مشاور:

مهندس فنونوش باسلیمه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد به منظور اخذ درجه کارشناسی ارشد

تهران ۹۱



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهدی فرقانی رشته معدن گرایش استخراج، تحت عنوان: *ارزیابی فنی روش حفاری NATM در تونل ها و مقایسه آن با روش کند و پوش- مطالعه موردی تونل راه آهن تهران- تبریز*، که در تاریخ ۹۱/۶/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید، به شرح زیر می باشد:

تقدیم بہ

والدین مہربانم کہ دعائشان بدرقہ مسیر زندگی ام است

تشکر و قدردانی

اینجانب بر خود لازم می‌دانم که در این چند خط محدود از تلاش‌ها و کمک‌های اساتید راهنمای خود آقایان دکتر شکر... زارع و دکتر سید محمد اسماعیل جلالی کمال تشکر را داشته باشم، که در مسیر تهیه و ارائه این پروژه کمال همکاری را با اینجانب داشته‌اند.

در ادامه از آقای مهندس فرنوش باسلیقه کمال تشکر را داشته که اینجانب را در انجام این تحقیق یاری کرده و همواره مورد عنایت خود قرار داده‌اند.

همچنین از مدیریت محترم شرکت مهندسین مشاور ساحل و همچنین مهندس پژوهی و دیگر دوستان، آقایان مهندس محمد زمانی، حسین جهانی، حامد کریم‌نیا، رضا حیدری شیبانی، محسن حبیبیان و ... به خاطر زحماتی که کشیده‌اند تشکر می‌کنم.

در انتها از خانواده‌ام که در تمامی مراحل زندگی یار و همراه من بودند، تشکر و قدردانی

می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب مهدی فرقانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی روش حفاری NATM در تونل‌ها و مقایسه آن با روش کند و پوش - مطالعه موردی: تونل راه آهن تهران - تبریز تحت راهنمایی دکتر شکرآ... زارع و دکتر سید محمد اسماعیل جلالی متعهد می شوم:

- 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 می باشد 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 می گردد.
- 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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

با توجه به رشد روز افزون جمعیت و در نتیجه ترافیک شهری، لزوم استفاده از وسایل حمل و نقل ریلی به سرعت در حال گسترش است. امروزه سازه‌های زیرزمینی نقش مهمی در توسعه حمل و نقل شهری ایفا می‌کنند. یکی از مهمترین عوامل اصلی در زمینه پیشرفت و تکامل صنعت تونلسازی، پیشرفت‌هایی است که در مورد روش‌های حفاری آن انجام گرفته است. روش‌های مختلفی به منظور حفر و احداث تونل‌ها اعم از تونل‌های شبکه مترو، راه آهن، انتقال آب، صنعتی، معدنی و غیره وجود دارد. این روش‌ها به دو دسته کلی حفاری سنتی و مکانیزه طبقه بندی می‌شوند. حفاری سنتی در نواحی شهری عمدتاً شامل روش‌های کند و پوش (Cut & Cover)، پوش و کند (Cover & Cut) و روش جدید حفاری اتریشی (NATM)^۱ می‌باشد. مورد مطالعاتی مورد نظر در این طرح تونل راه آهن تهران- تبریز می‌باشد. این تونل در منطقه ۱۷ تهران به روش پوش و کند در حال کار است. عرض هر تونل ۱۱ متر و ارتفاع هرکدام ۷/۷ متر می‌باشد. بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که این تونل می‌تواند به روش NATM نیز ادامه پیدا کند. از ویژگی‌های قطعه مورد بررسی، تونل بزرگ مقطوع با روباره کم عمق شهری می‌باشد. همچنین امکان حفاری مکانیزه به دلیل طول کم در این محل وجود ندارد. لذا این موضوع مشکلات و بحث‌هایی را در زمینه انتخاب روش حفاری مناسب برای کارفرما ایجاد کرده است. در این طرح با توجه به محدودیت‌های موجود تونلسازی در نواحی شهری، ابتدا به امکان سنجی حفر تونل به روش NATM و نیز مدلسازی عددی این روش با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و نرم افزار تحلیل عددی ۳D FLAC پرداخته شده و نیز تحلیل حساسیت پارامتری بر روی تاثیر ترتیب حفاری و نگهداری، میزان گام پیشروی و نیز وجود و یا عدم وجود نگهداری مناسب بر روی این امکان‌پذیری پرداخته شده و سپس نتایج بدست آمده با طراحی‌های روش پوش و کند مقایسه و در نهایت روش مناسب حفر تونل به‌مراه سیستم نگهداری مناسب

^۱ New Austrian Tunneling Method

در این قطعه ارائه شده است. این طرح پیشنهادی شامل یک تونل دوقلوی NATM با دهانه ۱۳ متر و ارتفاع ۹ متر و سطح مقطع ۱۰۹ متر مربع، تحت روباره ۶ متر بوده که عرض ستون بین دو تونل ۲ متر می‌باشد و در سطح زمین نیز ساختمان و یا تاسیساتی وجود ندارد. همچنین مدلسازی تونل پوش و کند در سه حالت با وجود ترانشه قائم، ترانشه شیبدار با زاویه ۴۵ درجه و ترانشه شیبدار با زاویه ۶۰ درجه انجام گرفت که نتایج مدلسازی نشان داد که در این ناحیه امکان اجرای تونل به روش پوش و کند با استفاده از ترانشه قائم و یا شیبدار با زاویه بیش از ۴۵ درجه وجود نداشته و تنها با ایجاد ترانشه با زاویه ۴۵ درجه یا کمتر می‌توان این تونل را اجرا کرد. با توجه به مدلسازی‌های انجام گرفته از دو تونل NATM پیشنهادی و پوش و کند با کمک نرم افزار ۳D FLAC، طرح NATM پیشنهادی از نظر میزان نشست ایجاد شده در سطح زمین و نیز نواحی تنش ایجاد شده نسبت به تونل پوش و کند با وجود ترانشه شیبدار با زاویه ۴۵ درجه مناسبتر و بهینه‌تر بوده و بعنوان جایگزین روش اجرایی پوش و کند در این ناحیه بحرانی معرفی شده است.

کلمات کلیدی: حفاری، تونلسازی، NATM، محیط شهری، پوش و کند، تحلیل پارامتری، بررسی، مدلسازی عددی.

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- مشخصات عمومی طرح	۳
۱-۳- اهمیت استفاده از فضای زیرزمینی در مسیر پروژه	۴
۱-۴- ضرورت انجام تحقیق	۵
۱-۵- سوابق مطالعات انجام شده	۵
۱-۶- اهداف پایان نامه	۵
۱-۷- روش انجام تحقیق	۶
۱-۸- ساختار پایان نامه	۶

فصل دوم: مقدمه ای بر کاربرد روش NATM در تونلسازی در نواحی

شهری

۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- روش‌های مشاهده‌ای	۱۱
۳-۲- روش جدید تونلسازی اتریشی (NATM)	۱۱
۱-۳-۲- پیشینه تاریخی NATM	۱۲
۲-۳-۲- مفاهیم و اصول کلی NATM	۱۴
۳-۳-۲- فلسفه و ویژگی‌های ساختاری NATM	۱۶
۴-۳-۲- تنش‌های موجود در تونل و مکانیزم شکست از دیدگاه رابسویچ	۱۶
۵-۳-۲- تئوری شکست برشی رابسویچ اطراف یک فضای زیرزمینی	۲۰
۶-۳-۲- معیار طراحی در روش NATM	۲۱
۴-۲- روش‌های اجرا، نگهداری و پیش‌نگهداری در تونل‌های NATM بزرگ مقطع و کم عمق	۲۱
۱-۴-۲- اجرای NATM در زمین‌های خاکی	۲۶

۲۷.....	۲-۴-۱-۱- تاثیر طول گام حفاری و ترتیب حفاری و نگهداری بر نشست سطح زمین
۲۸.....	۲-۴-۲- نگهداری و پیش‌نگهداری در تونل‌های NATM در نواحی شهری
۳۲.....	۲-۵- پیشرفت‌ها در NATM
۳۳.....	۲-۶-۱- ابزاربندی و رفتارسنجی در تونل‌های NATM بزرگ مقطع و کم عمق شهری
۳۴.....	۲-۶-۱- اصول ابزاربندی و رفتارنگاری در محیط شهری
۳۷.....	۲-۶-۲- روش‌های رفتارسنجی در تونل‌های شهری
	۲-۷- موارد مطالعاتی از احداث تونل‌های بزرگ مقطع NATM در محیط‌های کم عمق شهری
۴۱.....	
۴۳.....	۲-۸- نتیجه‌گیری

فصل سوم: مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر پروژه راه آهن

تهران - تبریز

۴۷.....	۳-۱- مقدمه
۴۷.....	۳-۲- موقعیت طرح و مشخصات عمومی
۴۸.....	۳-۳- اهداف و نحوه انجام مطالعات
۴۹.....	۳-۴- بررسی لاگ گمانه‌های اکتشافی
۴۹.....	۳-۵- نمونه‌برداری و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی
۵۰.....	۳-۶- زمین‌شناسی مسیر تونل
۵۰.....	۳-۷- وضعیت آب زیرزمینی
۵۰.....	۳-۷-۱- تراز آب زیرزمینی و جهت جریان آب
۵۱.....	۳-۷-۲- وضعیت عمق برخورد به آب‌های زیرزمینی
۵۳.....	۳-۸- ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک
۵۳.....	۳-۸-۱- توزیع دانه بندی
۵۵.....	۳-۸-۲- مقاومت برشی

شماره صفحه	عنوان
۵۶	۳-۸-۳- پارامترهای تراکم پذیری
۵۷	۳-۸-۴- پارامترهای شیمیایی خاک
۵۷	۳-۸-۵- آزمایش های نفوذپذیری
۵۸	۳-۸-۵-۱- نفوذپذیری در آبرفت (آزمایش لوفران)
۵۸	۳-۸-۶- برآورد ضرایب فشار جانبی خاک
۵۹	۳-۸-۷- پارامترهای ژئوتکنیکی
۵۹	۳-۹- نتیجه گیری

فصل چهارم: معرفی پروژه راه آهن تهران - تبریز و روش اجرای

تونل های مسیر

۶۲	۴-۱- مقدمه
۶۶	۴-۲- طراحی مقطع تونل و انتخاب روش اجرای مناسب
۶۶	۴-۲-۱- روش کند و پوش (شمع های کناری به عنوان دیوار حائل خاک)
	۴-۲-۲- روش کند و پوش (شمع های کناری به عنوان دیوار حائل خاک و ستون سازه ای - ستونهای میانی)
۶۷	۴-۲-۳- روش کند (شمع های کناری به عنوان دیوار حائل خاک و ستون سازه ای - شمع های درجاریز میانی)
۷۰	۴-۲-۳-۱- روش پوش و کند (شمع - ستونهای کناری و میانی و سقف درجاریز)
۷۱	۴-۲-۳-۲- روش پوش و کند (شمع - ستونهای کناری و میانی و سقف پیش ساخته)
۷۳	۴-۳- بخش دو طبقه تونل
۷۵	۴-۴- ملاحظات سازه ای
۷۶	۴-۵- نتیجه گیری

فصل پنجم: ارزیابی و تحلیل عددی اجرای تونل به روش NATM در پروژه راه آهن تهران - تبریز

۷۸	۱-۵- مقدمه
۸۰	۲-۵- طراحی مقطع پیشنهادی برای تونل NATM
۷۹	۳-۵- مدلسازی با استفاده از نرم افزار ۳D FLAC
۷۹	۱-۳-۵- انتخاب محدوده مناسبی از زمین مورد مطالعه
۸۱	۲-۳-۵- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن
۸۳	۳-۳-۵- ترسیم هندسه و ابعاد مدل
۸۲	۴-۳-۵- به تعادل رساندن مدل پیش از حفاری
۸۷	۵-۳-۵- انتخاب روش حفاری مناسب
۹۱	۶-۳-۵- تحلیل پارامتری بمنظور تعیین گام بهینه حفاری
۹۲	۷-۳-۵- تحلیل پارامتری استفاده و یا عدم استفاده از شمع‌های بتنی
۹۴	۸-۳-۵- تحلیل پارامتری ترتیب بهینه حفاری و نگهداری
۹۶	۴-۵- روند مدلسازی تونل NATM در نرم افزار ۳D FLAC
۱۰۳	۵-۵- ارزیابی نتایج حاصل از مدلسازی تونل NATM
۱۱۰	۶-۵- تحلیل پایداری تونل
۱۱۱	۱-۶-۵- تعیین نرخ همگرایی بر حسب فاصله تا جبهه کار
۱۱۲	۲-۶-۵- آزاد سازی تنش
۱۱۳	۷-۵- تحلیل پایداری تونل بعد از ترخیص تنش
۱۱۴	۱-۷-۵- کرنش بحرانی
۱۱۵	۲-۷-۵- تراز هشدار خطر
۱۱۸	۳-۷-۵- تحلیل پایداری با استفاده از مفهوم کرنش برشی بحرانی
۱۱۹	۸-۵- نتیجه‌گیری

فصل ششم: مقایسه روش اجرایی NATM و پوش و کند در پروژه

راه آهن تهران - تبریز

۱-۶-۱- مقدمه	۱۲۱
۲-۶-۲- مقایسه کلی روش کند و پوش (یا پوش و کند) و روش NATM	۱۲۱
۳-۶-۳- مدلسازی روش پوش و کند (شمع‌های میانی و سقف پیش ساخته)	۱۲۳
۱-۳-۶-۱- مدلسازی تونل پوش و کند با استفاده از ترانسه قائم	۱۲۳
۲-۳-۶-۲- مدلسازی تونل پوش و کند با استفاده از ترانسه شیبدار	۱۲۳
۴-۶-۴- ارزیابی نتایج مدلسازی تونل پوش و کند	۱۲۷
۱-۴-۶-۱- تونل پوش و کند با استفاده از ترانسه قائم	۱۲۳
۲-۴-۶-۲- تونل پوش و کند با استفاده از ترانسه شیبدار	۱۲۳
۵-۶-۵- مقایسه دو مدل پوش و کند و NATM پیشنهادی	۱۳۴
۶-۶-۶- نتیجه‌گیری	۱۴۰

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۷-۱- نتیجه‌گیری	۱۴۲
۲-۷-۲- پیشنهادات	۱۴۴
منابع فارسی	۱۴۶
منابع لاتین	۱۴۷

فهرست جداول

عنوان	شماره صفحه
جدول ۱-۲- نمونه‌ای از تجهیزات اندازه‌گیری در تونل NATM	۳۷
جدول ۲-۲- تونل‌های بزرگ مقطع اجراشده به روش NATM در نواحی شهری در سرتاسر دنیا	۴۲
جدول ۱-۳- توصیف و طبقه‌بندی مهندسی واحدهای خاکی	۵۵
جدول ۲-۳- روابط وزنی- حجمی برای گروه‌های خاکی مسیر تونل	۵۵
جدول ۳-۳- میانگین نتایج آزمون سه محوره در واحدهای مختلف	۵۶
جدول ۴-۳- مقادیر C و ϕ بدست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم برای گونه‌های خاک در مسیر تونل	۵۶
جدول ۵-۳- پارامترهای تحکیم واحد خاک رس	۵۷
جدول ۶-۳- نفوذپذیری واحدهای مختلف خاکی	۵۸
جدول ۷-۳- پارامترهای مهندسی و داده‌های طراحی پیشنهادی برای واحدهای خاکی مسیر تونل	۵۹
جدول ۱-۵- پارامترهای مهندسی و داده‌های طراحی پیشنهادی در تحلیل عددی مقطع مورد مطالعه	۸۲
جدول ۲-۵- میزان جابجایی‌های قائم در چند نقطه پس از حفاری بخش ۱	۸۷
جدول ۳-۵- میزان جابجایی قائم حاصل از دو ترتیب حفاری و نگهداری مختلف	۹۴
جدول ۴-۵- پارامترهای پیشنهادی در تحلیل عددی برای طراحی تونل‌های NATM مورد مطالعه	۹۲
جدول ۵-۵- مقادیر محاسبه شده احجام و سطوح در طرح تونل NATM پیشنهادی	۱۰۱
جدول ۶-۵- جابجایی‌های حاصل از پیشروی تونل NATM در چند نقطه از مدل	۱۰۵
جدول ۷-۵- میزان گسترده‌گی جابجایی در سطح زمین پس از اجرای ۵ گام پیشروی تونل	۱۰۶
جدول ۸-۵- مقادیر محاسبه شده کرنش بحرانی توسط روابط ساکورایی	۱۱۷
جدول ۱-۶- پارامترهای مهندسی و داده‌های طراحی در تحلیل عددی برای ناحیه پیش از مقطع بحرانی	۱۲۳
جدول ۲-۶- مقادیر جابجایی افقی و قائم در چند نقطه از مدل با ترانشه قائم	۱۳۲
جدول ۳-۶- مقادیر جابجایی افقی و قائم در چند نقطه از مدل با ترانشه شیبدار با زاویه ۴۵ درجه	۱۳۷
جدول ۴-۶- مقادیر جابجایی افقی و قائم در چند نقطه از مدل با ترانشه شیبدار با زاویه ۶۰ درجه	۱۳۷
جدول ۵-۶- مقادیر جابجایی‌ها و نشست سطح زمین حاصل از مدلسازی دو روش پس از گام‌های مختلف	۱۳۸

فهرست اشکال

عنوان	شماره صفحه
شکل ۱-۱- نمایشی از محل پروژه.....	۴
شکل ۲-۱- فلوجارت سازماندهی پایان نامه.....	۸
شکل ۱-۲- تعریف شماتیک تنش‌ها در اطراف یک تونل.....	۱۷
شکل ۲-۲- ارتباط بین تنش شعاعی، تغییر شکل تونل، فشار و زمان نصب نگهدارنده.....	۱۸
شکل ۳-۲- روند و ترتیب مکانیکی شکست اطراف یک حفره با اعمال تنش.....	۲۰
شکل ۴-۲- حفاری تونل با دیواره موقت میانی.....	۲۳
شکل ۵-۲- حفاری تونل به روش گالری‌های کناری.....	۲۴
شکل ۶-۲- حفاری تونل به روش برش حلقه‌ای.....	۲۵
شکل ۷-۲- تونلسازی به روش حفاری مرحله‌ای و زون‌های آشفستگی زمین.....	۲۸
شکل ۸-۲- جانمایی دو لایه مش در شاتکریت.....	۲۹
شکل ۹-۲- عناصر موجود در روش NATM.....	۲۹
شکل ۱۰-۲- نمونه‌ای از یک مقطع اصلی رفتارسنجی در NATM.....	۳۶
شکل ۱۱-۲- ترازبایی عمود بر محور تونل و برداشت موضعی نقاط روی محیط تونل.....	۳۸
شکل ۱۲-۲- مقاطع همگرایی سنجی. (a) تاج، (b) دریفتهای جانبی.....	۳۹
شکل ۱۳-۲- نصب یک کشیدگی سنج چندمیله‌ای.....	۳۹
شکل ۱۴-۲- اصول اندازه‌گیری یک لوله انحراف سنج. (a) اندازه‌گیری، (b) ارزیابی.....	۴۰
شکل ۱۵-۲- جانمایی سلول‌های فشار در پوشش شاتکریتی برای اندازه‌گیری تنش بتن و توده.....	۴۱
شکل ۱-۳- موقعیت مسیر تونل و گمانه‌ها و چاهک‌های حفاری شده.....	۴۸
شکل ۲-۳- نقشه پیزومتری منطقه اطراف مسیر طرح (متوسط تراز سطح آب زیرزمینی سال آبی ۸۳-۸۴) ..	۵۱
شکل ۳-۳- نقشه هم عمق برخورد به آب (متوسط سال آبی ۸۳-۸۴).....	۵۳
شکل ۱-۴- نقشه موقعیت تونل در مناطق ۱۷ و ۱۸ تهران (الف) و مسیر Bypass (ب).....	۶۴
شکل ۲-۴- مقطع عرضی تونل.....	۶۵
شکل ۳-۴- نمایشی از مقطع اجرایی تونل.....	۶۶
شکل ۴-۴- شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کند و پوش (ترانشه باز).....	۶۷

فهرست اشکال

- شکل ۴-۵- شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کند و پوش ۶۹
- شکل ۴-۶- شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش پوش و کند ۷۲
- شکل ۴-۷- شماتیکی از مقطع عرضی تونل در بخش دوطبقه ۷۴
- شکل ۵-۱- هندسه کلی پیشنهادی برای تونل دوقلوی NATM ۷۹
- شکل ۵-۲- مقطع طولی زمین شناسی مسیر تونل ۸۱
- شکل ۵-۳- مقطع طولی مسیر تونل حد فاصل کیلومتراژ ۶ تا ۷ ۸۲
- شکل ۵-۴- مدل ایجاد شده در نرم افزار به همراه لایه بندی ۸۴
- شکل ۵-۵- ابعاد مدل ایجاد شده در نرم افزار ۸۵
- شکل ۵-۶- کنتورهای تنش عمودی در مدل ۸۶
- شکل ۵-۷- کنتورهای تنش افقی در مدل ۸۷
- شکل ۵-۸- ریزش بوجود آمده در سقف تونل بواسطه حفاری تمام مقطع ۸۸
- شکل ۵-۹- بخش‌های تقسیم بندی شده تونل NATM پیشنهادی ۸۹
- شکل ۵-۱۰- مقایسه جابجایی‌های دو روش حفاری تاج و پله (الف) و گالری‌های جانبی (ب) ۹۱
- شکل ۵-۱۱- شکست ایجاد شده در سقف تونل در صورت عدم استفاده از سیستم نگهداری ۹۲
- شکل ۵-۱۲- میزان جابجایی‌های قائم در مدل با وجود شمع‌های بتنی کناری و میانی ۹۴
- شکل ۵-۱۳- میزان جابجایی‌های قائم در مدل بدون استفاده از شمع‌ها ۹۵
- شکل ۵-۱۴- طرح پیشنهادی پیشروی یک گام از تونل به روش NATM ۹۹
- شکل ۵-۱۵- مقطع A-B در تونل NATM پیشنهادی ۱۰۰
- شکل ۵-۱۶- طراحی شاتکریت برای مقطع A-B واقع در سقف تونل در نرم افزار SAP ۲۰۰۰ ۱۰۱
- شکل ۵-۱۷- مقایسه نمودارهای نیروی محوری- گشتاور خمشی حاصل از طراحی شاتکریت در نرم افزارهای FLAC ۳D و SAP ۲۰۰۰ ۱۰۲
- شکل ۵-۱۸- روند نیروهای نامتعادل کننده پس از اجرای گام اول از مدل ۱۰۳
- شکل ۵-۱۹- پوشش شاتکریتی سطح حفاری شده تونل پس از حفاری بخش ۱، ۲ و ۳ از گام پیشروی اول ۱۰۳
- شکل ۵-۲۰- پوشش شاتکریتی سطح حفاری شده تونل پس از اجرای گام ۵ از تونل ۱۰۴
- شکل ۵-۲۱- کنتورهای جابجایی عمودی پس از اجرای گام پیشروی اول ۱۰۵
- شکل ۵-۲۲- کنتورهای جابجایی عمودی پس از اجرای گام پیشروی دوم ۱۰۵
- شکل ۵-۲۳- کنتورهای جابجایی عمودی پس از اجرای گام پیشروی سوم ۱۰۶
- شکل ۵-۲۴- کنتورهای جابجایی عمودی پس از اجرای گام پیشروی چهارم ۱۰۶
- شکل ۵-۲۵- کنتورهای جابجایی عمودی پس از اجرای گام پیشروی پنجم ۱۰۷

فهرست اشکال

- شکل ۵-۲۶- کنتورهای جابجایی افقی پس از اجرای گام پیشروی پنجم..... ۱۰۷
- شکل ۵-۲۷- نمایی از مقطع تونل سمت راست پس از اجرای پوشش بتنی و دال کف تونل در مدل..... ۱۰۸
- شکل ۵-۲۸- گسترش زون جابجایی پس از اجرای گام پنجم در مدل..... ۱۰۹
- شکل ۵-۲۹- شرایط حالت پلاستیک در مدل سه بعدی..... ۱۱۰
- شکل ۵-۳۰- تغییرات نرخ همگرایی بر حسب فاصله از جبهه کار..... ۱۱۲
- شکل ۵-۳۱- تاریخچه جابجایی تاج تونل پس از اعمال ترخیص تنش..... ۱۱۳
- شکل ۵-۳۲- نمودار تعیین Rf با استفاده از مقاومت فشاری تک محوره..... ۱۱۵
- شکل ۵-۳۳- رابطه بین کرنش بحرانی (ϵ_{cr}) و کرنش شکست ϵ_f ۱۱۵
- شکل ۵-۳۴- تراز هشدار خطر برای ارزیابی پایداری تونل‌ها..... ۱۱۶
- شکل ۵-۳۵- رابطه پیشنهادی ساکورایی بین کرنش بحرانی و مدول الاستیسیته..... ۱۱۷
- شکل ۶-۱- مدل پوش و کند ایجاد شده در نرم افزار ۳D FLAC..... ۱۲۴
- شکل ۶-۲- ابعاد مدل و تونل پوش و کند و سه پله حفاری در جبهه کار تونل..... ۱۲۵
- شکل ۶-۳- نمایی از شمع‌های کناری (الف) و شمع‌های میانی (ب) در روش پوش و کند..... ۱۲۷
- شکل ۶-۴- مدل پوش و کند با استفاده از ترانسه شیبدار..... ۱۲۷
- شکل ۶-۵- کنتورهای جابجایی افقی پس از اجرای گام اول از مدل پوش و کند با ترانسه قائم..... ۱۲۹
- شکل ۶-۶- کنتورهای جابجایی قائم پس از برداشت روباره ۶ متری اول در مدل پوش و کند با ترانسه قائم..... ۱۳۰
- شکل ۶-۷- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری پله اول از گام اول پیشروی درمدل پوش و کند با ترانسه قائم..... ۱۳۰
- شکل ۶-۸- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری پله دوم از گام اول پیشروی درمدل پوش و کند با ترانسه قائم..... ۱۳۱
- شکل ۶-۹- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری پله سوم از گام اول پیشروی درمدل پوش و کند با ترانسه قائم..... ۱۳۱
- شکل ۶-۱۰- شرایط حالت پلاستیک ایجاد شده در مدل پس از اجرای گام اول از مدل پوش و کند با ترانسه قائم..... ۱۳۲
- شکل ۶-۱۱- روند نیروهای نامتعادل کننده پس از اجرای گام پیشروی اول درمدل پوش و کند با ترانسه قائم..... ۱۳۳
- شکل ۶-۱۲- کنتورهای جابجایی قائم پس از برداشت روباره ۶ متری اول بصورت شیبدار..... ۱۳۳
- شکل ۶-۱۳- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری گام پیشروی اول در حالت ترانسه شیبدار..... ۱۳۳
- شکل ۶-۱۴- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری گام پیشروی دوم در حالت ترانسه شیبدار..... ۱۳۳
- شکل ۶-۱۵- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری گام پیشروی سوم در حالت ترانسه شیبدار..... ۱۳۳
- شکل ۶-۱۶- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری گام پیشروی چهارم در حالت ترانسه شیبدار..... ۱۳۳
- شکل ۶-۱۷- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری گام پیشروی پنجم در حالت ترانسه شیبدار..... ۱۳۳

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

در طول دهه‌های اخیر انواع مختلفی از روش‌های عددی مثل روش المان‌های محدود، تفاضل محدود، المان‌های مرزی و المان‌های مجزا در حل مسائل مهندسی بکار برده شده‌اند. این روش‌ها امروزه به طور وسیعی در طراحی فضاهای زیرزمینی مثل تونل‌ها، مغارهای زیرزمینی، شیب‌ها و پی سدها مورد استفاده قرار می‌گیرند. قابلیت اعتماد فرضیات طراحی به طور کامل به دقت اطلاعات ورودی تحلیل بستگی دارد. به طوریکه اگر این اطلاعات به اندازه کافی دقیق نباشد یا نماینده مقادیر پارامترهای مکانیکی محیط مورد نظر نباشد، پیش بینی رفتار توده‌سنگ و یا خاک مشکل خواهد بود. تعیین مقادیر خصوصیات ژئومکانیکی سنگ برجا، تنش‌های بر جای محیط، سطح آب‌های زیرزمینی و نفوذپذیری منطقه که نماینده رفتار توده‌سنگ باشند بسیار دشوار هستند، بنابراین جای تعجب نیست که حتی در مواردی که پی‌جویی‌های زمین‌شناسی دقیق، آزمایش‌های زیاد و تحلیل‌های پیچیده کامپیوتری انجام شده است، رفتار واقعی ساختگاه با رفتار پیش بینی شده برای آن تفاوت بارزی داشته باشد.

اندازه‌گیری‌های برجا در طی فرآیند اجرای پروژه انجام می‌شود و این نه تنها به‌خاطر کنترل پایداری سازه‌ها، بلکه برای تخمین مجدد داده‌های ورودی مربوط به پارامترهای زمین‌شناسی و ژئومکانیکی است که در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

امروزه پروژه‌های تونلسازی جدید در زیر محیط‌های شهری پرتراکم احداث می‌شوند. در اجرای تونل‌های شهری می‌بایست تداخل با انسان، محیط زیست و منابع آبی کاهش یابد و آلودگی‌های صوتی، گرد و خاک و ایجاد ترافیک می‌بایست به حداقل ممکن برسد.

بطور کلی عوامل موثر در طراحی و ساخت تونل‌های شهری شامل موارد زیر می‌باشد: به حداقل رساندن تخریب سطح زمین و محیط زیست، در نظر گرفتن سازه‌های سطحی و زیرسطحی شامل ساختمان‌ها، پل‌ها، راه‌ها، سیستم‌های انتقال فاضلاب و سازه‌های خطی شامل خطوط انتقال آب و گاز و تلفن و ...، به حداقل رساندن نشست سطح زمین، پایداری موقت تونل و جلوگیری کامل از ناپایداری جبهه کار تونل و اقتصادی بودن طراحی و اجرا.

۱-۲- مشخصات عمومی طرح

طرح پروژه راه آهن تهران- تبریز از سال ۱۳۸۶ آغاز گردیده است. مسیر ریلی راه آهن تهران- تبریز به صورت شرقی- غربی و با طولی بیش از ۱۰ کیلومتر شامل ۲ کیلومتر رمپ در ابتدا و انتها و ۸ کیلومتر تونل، در مناطق ۱۷ و ۱۸ شهر تهران از ایستگاه راه آهن تهران تا رودخانه کن از محیط شهری که بافتی قدیمی و فرسوده دارد، عبور می‌کند (گزارش تکمیلی مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک پروژه راه آهن تهران- تبریز). نمایی از محل اجرای پروژه تبدیل راه آهن تهران- تبریز به تونل زیرزمینی در شکل (۱-۱) دیده می‌شود.



شکل ۱-۱- نمایی از محل پروژه (خبرگزاری فارس)

کارفرمای خط پروژه راه آهن تهران- تبریز، راه آهن جمهوری اسلامی ایران می‌باشد. مشاور کارفرما (ناظر پروژه) شرکت مهندسی مترا و پیمانکار طرح قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا (ص)- موسسه رهاب- و مشاور پیمانکار موسسه مهندسین مشاور ساحل می‌باشند.

۱-۳- اهمیت استفاده از فضای زیرزمینی در مسیر پروژه

ایستگاه راه آهن تهران، مرکز اصلی فعالیت‌های ریلی استان تهران و به گونه‌ای سراسر کشور می‌باشد و هر روز حجم سنگینی از آمد و شدهای ریلی از این پایگاه به دیگر شهرهای کشور انجام می‌پذیرد. در بخش‌های جنوبی شهر خطوط راه آهن در نزدیکی مناطق مسکونی ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۲۰ قرار دارد. تداخل مسیرهای راه آهن با خیابان‌های شهر، خطر ناشی از تصادف قطار با خودروها و رهگذران پیاده و یا بیرون رفتن قطار از مسیر راه آهن را موجب می‌گردد.

خطرهای ذکر شده در بالا ایجاب می‌نماید تا بخشی از راه آهن تهران- تبریز از وضعیت کنونی به تونل زیرزمینی تبدیل گردد. بر پایه این طرح، تصمیم بر آن شده که مسیری به طول تقریبی ۱۱ کیلومتر زیرزمینی شود.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

بدلیل افزایش تدریجی روباره در کیلومتراژ ۱۰۰+۶ تا ۸۰۰+۶ تا حدود ۶ متر، امکان ادامه حفاری به روش پوش و کند و نیز بصورت ترانشه باز تا تراز بالای سر شمع‌ها وجود نداشته و یا بسیار دشوار می‌باشد. بعلت سست و ضعیف بودن خاک این منطقه احتمال ریزش دیواره با ارتفاع مذکور بسیار زیاد بوده و لذا با توجه به روش‌های موجود، روش تونلسازی گزینه ایده‌آلی برای جایگزینی در این محدوده از طرح بنظر می‌رسید. از آنجاییکه در محیط‌های شهری و تحت روباره کم، روش تونلسازی جدید اتریشی (NATM) در تونل‌های بزرگ مقطع در ایران و سرتاسر جهان بعنوان یک روش حفاری مرحله‌ای نتایج و سابقه بسیار خوبی داشته و نیز بطور کلی اثر کاهشی در نشست سطح زمین داشته است لذا ضرورت مطالعه و تحلیل دقیق این روش حفاری مرحله‌ای در این قطعه حدودا ۱ کیلومتری از طرح شدیداً حس می‌شود تا پس از تحلیل و بررسی نتایج حاصل از تونلسازی به این روش، نتایج و میزان جابجایی‌ها با روش اجرایی پوش و کند مقایسه شده و راهکار بهتر و بهینه ارائه شود.

۱-۵- سوابق مطالعات انجام شده

مطالعات و تلاش‌های صورت گرفته در زمینه بحث مقایسه بین دو روش تونلسازی در محیط‌های شهری و امکان‌سنجی تغییر روش از کند و پوش و یا پوش و کند به روش NATM بخصوص تحت شرایط خاص روباره بسیار کم و سطح مقطع بزرگ بسیار محدود و پراکنده بوده و عملاً در این حیطه کار چشمگیر چندانی صورت نگرفته است، لذا ضرورت این امکان‌سنجی درک می‌شود.

۱-۶- اهداف پایان نامه

استفاده از روش حفاری مرحله‌ای با کمک تکنیک NATM و اصول اساسی این روش، در تونل‌های

شهری دارای کاربرد فراوانی می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق، بررسی امکان اجرای تونل دوقلوی بزرگ مقطع تحت روباره کم به روش NATM در محدوده‌ای از مسیر پروژه راه آهن تهران- تبریز با استفاده از نتایج حاصل از مدلسازی عددی و مقایسه آن با نتایج حاصل از مدلسازی روش اجرایی پوش و کند در این پروژه و در نهایت انتخاب روش اجرای مناسب حفاری و نگهداری تونل در این قطعه می‌باشد.

۱-۷- روش انجام تحقیق

ابتدا با استفاده از اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های ژئوتکنیکی مختلف بر روی مغزه‌های حفاری شده پارامترهای ژئومکانیکی خاک به دست آمده است. این پارامترهای ژئومکانیکی مبنای طراحی و تحلیل پایداری فضاها و زیرزمینی این طرح می‌باشد. از این پارامترها برای تحلیل پایداری و طراحی تونل و سیستم نگهداری آن استفاده شده است. بطور کلی دو روش عددی متداول در تحلیل محیط‌های پیوسته، روش تفاضل محدود و روش المان محدود می‌باشد که هر دو روش در محیط‌های خاکی بسیار مورد استفاده واقع شده و بخوبی جوابگوی مسائل ژئوتکنیکی بوده‌اند. در این تحقیق با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و نرم افزار ۳D FLAC بدلیل سرعت بیشتر در حل مسائل ژئومکانیکی نسبت به روش المان محدود به تحلیل پرداخته شده و همچنین با به کارگیری مدل رفتاری موهر کولمب برای خاک، این مهم انجام گرفته است. همچنین در مرحله بعد باید با استفاده از همین روش عددی، روش اجرا شده در این طرح مورد بررسی قرار گرفته و نهایتاً به تحلیل و ارزیابی نتایج حاصل از روش NATM و پوش و کند پرداخته می‌شود.

۱-۸- ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر مشتمل بر ۷ فصل می‌باشد که به شرح زیر توضیح داده می‌شود:

فصل حاضر که شامل کلیات طرح اعم از مشخصات عمومی طرح و منطقه مورد حفاری و ضرورت و

روش انجام تحقیق می‌باشد.

فصل دوم تحت عنوان مقدمه ای بر کاربرد روش NATM در تونلسازی در نواحی شهری می‌باشد. در این فصل پس از معرفی روش NATM و اصول کلی و اساسی آن، نحوه اجرا، نگهداری، پیش نگهداری و نیز رفتارسنجی در تونل‌های NATM در نواحی کم عمق شهری مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل سوم تحت عنوان مطالعات زمین شناسی و ژئوتکنیکی مسیر پروژه راه آهن تهران- تبریز می‌باشد که در آن ساختار زمین شناسی و وضعیت لایه‌ها، نوع خاک، نتایج مطالعات آزمایشگاهی و خواص فیزیکی و شیمیایی و همچنین پارامترهای مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک منطقه مورد بررسی آورده شده است.

فصل چهارم تحت عنوان معرفی پروژه راه آهن تهران- تبریز و روش اجرایی تونل‌های مسیر می‌باشد. در این فصل به معرفی مسیر پروژه و نیز روش‌های اجرای تونل‌های مسیر تا پیش از مقطع بحرانی با حداکثر روباره ۶ متر پرداخته شده است.

فصل پنجم تحت عنوان ارزیابی و تحلیل اجرای تونل به روش NATM در پروژه راه آهن تهران- تبریز با استفاده از روش عددی می‌باشد. در این فصل با استفاده از نرم افزار ۳D FLAC مدل‌سازی و تحلیل پایداری تونل NATM پیشنهادی انجام شده است.

فصل ششم تحت عنوان مقایسه روش اجرایی NATM و پوش و کند در پروژه تونل راه آهن تهران- تبریز می‌باشد. در این فصل به مدل‌سازی و ارزیابی نتایج روش اجرایی پوش و کند پرداخته شده و سپس نتایج حاصل با روش حفاری مرحله‌ای مقایسه شده است.

فصل هفتم نیز مربوط به نتایج تحقیق و پیشنهادها می‌باشد.

فلوچارتی از نحوه سازماندهی پایان‌نامه، در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- فلوچارت سازماندهی پایان نامه

فصل دوم

مقدمه ای بر کاربرد روش NATM در تونلسازی در نواحی شهری

۲-۱- مقدمه

با توجه به شرایط اقلیمی و جغرافیایی کشور و توسعه و گسترش شهرها و مراکز صنعتی، تونل و فضاهای زیرزمینی برای استفاده‌های حمل و نقل داخل و خارج از شهر، انتقال آب و فاضلاب، لوله‌رانی بدون حفاری سطحی برای انتقال مواد سوختنی و انرژی از قبیل نفت و گاز، احداث فضاهای زیرزمینی استراتژیکی و دفاعی، تولید برق، ایستگاه‌های مترو و پارکینگ به‌طور فزاینده‌ای در حال مطالعه، ساخت و یا در حال بهره‌برداری هستند. عوامل زمین‌شناسی و اقتصادی در گذشته از جمله موانع توسعه فضاهای زیرزمینی بوده است. با توجه به توسعه علم و فناوری در مطالعات زمین‌شناسی و مهندسی ژئوتکنیک و آشنایی بهتر و بیشتر با شرایط زمین و ساخت و گسترش تجهیزات ساخت و بهره‌برداری تونل‌ها باعث شده است که رویکرد به این ساختار زیرزمینی بیشتر شود. اغلب شهرهای بزرگ توانایی و گنجایش داشتن حمل و نقل روی سطحی را نداشته و در نتیجه به سیستم‌های زیرزمینی از قبیل مترو روی آورده و بدون دست‌خوردگی در سطح زمین، با احداث خطوط متعدد مترو، شبکه وسیعی از حمل و نقل را در شهرها ایجاد نموده‌اند. در اغلب موارد فضاهای زیرزمینی در دراز مدت با صرفه‌تر خواهد بود. از مزایای استفاده از فضاهای زیرزمینی و تونل‌ها، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: حفظ محیط زیست، تأمین ایمنی و امنیت بیشتر، صرفه‌جویی در هزینه‌های تأمین انرژی، صرفه‌جویی در هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، صرفه‌جویی در هزینه‌های جابجائی تاسیسات شهری و هزینه تملک و خرید زمین.

۲-۲- روش‌های مشاهده‌ای

از آنجاییکه روش جدید تونلسازی اتریشی یا NATM^۱ بطور کلی بر اساس یک روند مشاهداتی است اصطلاح "روش مشاهده‌ای"^۲ معرفی و در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار گرفت. در کشورهای آلمانی زبان اروپا بویژه در اتریش و آلمان، استانداردها و کدهای اخیر از اصطلاح "روش تونلسازی تناوبی" استفاده می‌کنند. پیش بینی رفتار ژئوتکنیکی اغلب دشوار است، به این دلیل "روش مشاهده‌ای" مورد پذیرش واقع می‌شوند که در آنها طراحی حین ساخت بازبینی و تجدیدنظر می‌شود. اصول روش مشاهده‌ای اولین بار به تفصیل در سال ۱۹۶۹ توسط پک^۳ شرح داده شد. روش پک اساسی برای درک الزامات بود گرچه بعدها متوجه شد که تلاش-هایش برای رسمی کردن آنها ناقص بوده است. روش‌های مشاهده‌ای همیشه تا حدودی در مکانیک کاربردی خاک مورد استفاده قرار می‌گرفته است.

۲-۳- روش جدید تونلسازی اتریشی (NATM)

یکی از شناخته شده ترین روش‌هایی که از برخی عناصر یک روش مشاهده‌ای استفاده می‌کند روش جدید تونلسازی اتریشی یا NATM است. روش حفاری مرحله‌ای (SEM)^۴ که از آن به روش جدید تونلسازی اتریشی (NATM) تعبیر می‌شود مفهومی است که بر پایه درک رفتار زمین هنگام وقوع یک بازکننده زیرزمینی می‌باشد. این روش که در واقع مفهوم وسیعتری از مهندسی ژئوتکنیک است تا صرفاً یک روش مستقل، اغلب بعلت استفاده از سیستم نگهداری غیرمعمولی و سبک، بعنوان نسخه "مهندسی ارزش شده" تونلسازی بیان می‌شود. اصطلاح روش جدید تونلسازی اتریشی که عموماً به عنوان NATM شناخته می‌شود از سالزبورگ

^۱ New Austrian Tunneling Method

^۲ Observational Method

^۳ R.B. Peck

^۴ Sequential Excavation Method

اتریش آمده و اولین بار توسط رابسویچ^۱ (۱۹۶۲) استفاده و در سال ۱۹۶۴ به جهان شناسانده شد (Karakus M. et al, ۲۰۰۷). این روش نتیجه تجربه تونلسازی در آلباین اتریش بوده است. هدف اصلی NATM بکارگیری سیستم‌های نگهداری پایدار و اقتصادی در تونل‌هاست. این روش در شرایط زمین‌شناسی متنوع و پیچیده که پیش‌بینی توده سنگ بعلت زمین شناسی متغیر دشوار است بسیار مفید بوده است. از دیرباز این مطلب درک می‌شد که اگر به زمین اجازه اندکی تغییر شکل داده شود، زمین قادر به نگهداری از خود می‌باشد. روش NATM با استفاده از وسایل پیشرفته رفتارسنجی و پایدارسازی سطح، مانند شاتکریت و پیچ سنگ (راک بولت) از این مطلب بهره می‌گیرد.

۲-۳-۱- پیشینه تاریخی NATM

در تونلسازی سنتی در ابتدا از نگهداری چوبی و بعدها از قوس‌های فولادی برای پایداری موقت تونل تا نصب نگهدارنده نهایی استفاده می‌شد. نگهدارنده نهایی آجر یا قوس بتنی بود. وزن سنگ بعلت عدم یکپارچگی و سست شدن سنگ دربرگیرنده به سیستم نگهداری منتقل می‌شد. این موضوع منجر به انتخاب قوس‌های ضخیم بتنی می‌شد که درصد قابل توجهی از مقطع تونل را دربرمی‌گرفت (در اوایل تونل آلباین، سازه دائمی حدود ۴۰٪ از مقطع حفاری را اشغال کرده بود).

آقای مارک ایزامبارد برونل در اوایل قرن ۱۹، سپری دایره‌ای را برای تونلسازی در زمین‌های نرم معرفی کرد. بدنبال آن ریژا (یک مهندس تونل آلمانی) نگهداری فولادی را بجای الوار سنگین پیشنهاد کرد. او همچنین اشاره کرد که سیستمی که باید فشار زیاد سنگ را تحمل کند باید همان منبع یعنی سنگ دربرگیرنده باشد که بخشی از سیستم نگهداری است و بنظر می‌رسد همان اصول کلی NATM توسط رابسویچ در ۱۹۶۴ می‌باشد. حدود سال ۱۹۱۰ و با اختراع و بکارگیری شاتکریت در معادن آمریکا و شیوع آن به اروپا در سال ۱۹۲۰ این تحولات ادامه داشت. روش NATM از دل تجارب قدیمی رشد کرد. پروفیسور رابسویچ در کتاب خود بنام

^۱ Rabcewicz

"Gebirgsdruck und Tunnelbau" در ۱۹۴۴ راجع به پدیده فشار سنگ و تفسیرهایش نوشت. در ۱۹۴۸ در

ثبت اختراع خود اصول آن را فرموله کرد که خلاصه آن به این شرح است (Karakus M. et al, ۲۰۰۷):

"با یک سیستم نگهداری اولیه انعطاف‌پذیر، تعادل جدید ایجاد خواهد شد که می‌توان آن را با اندازه گیری برجای تغییرشکل‌ها کنترل نمود. پس از رسیدن به این تعادل جدید، یک قوس داخلی ساخته خواهد شد. در موارد خاص این قوس داخلی می‌تواند حذف شود."

در ۱۹۴۸ رابسویچ نگهداری با پوشش دولایه را ابداع کرد و ایده اجازه تغییرشکل زمین تا پیش از نصب پوشش نهایی برای کاهش بار وارد بر پوشش را مطرح کرد. از ۱۹۵۶ تا ۱۹۵۸ رابسویچ اولین تونل‌های بزرگ مقطع را در ونزوئلا برطبق همین اصول خود ساخت. در اتریش اولین تلاش‌ها در دهه ۵۰ در تونل‌های آبدار کوچکتر صورت گرفت. پس از ایده پوشش دولایه اصطلاح روش جدید تونلسازی اتریشی طی مقاله‌ای از رابسویچ در ۱۹۶۲ بکار رفت و دو سال بعد شناخت جهانی پیدا کرد. در سال ۱۹۶۳ روش جدید تونلسازی اتریشی در کنفرانس ژئومکانیک در سالزبورگ اتریش معرفی شد (Wittke W. et al, ۲۰۰۲). اولین استفاده از NATM در زمین نرم و سست، توسط لئوپولد مولر در مترو فرانکفورت در سال ۱۹۶۹ بود. سیستم تونلسازی جدید اتریشی در بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ میلادی یکی از پرکاربردترین سیستم‌های تونلسازی در جهان به شمار می‌رفت. در اوایل قرن بیستم تونلسازان و دانشمندان به ضرورت کاهش تغییرشکل‌ها برای استفاده از ظرفیت باربری توده سنگ و نیز به رابطه معکوس بین مقاومت نگهدارنده و تغییرشکل‌ها پی بردند. این روش بعدها با توجه به ترتیب حفاری و نگهداری توسعه پیدا کرد. پیشرفت سیستم‌های نگهداری، ابزاربندی‌ها و مهارت‌های تفسیر داده‌ها، کاربرد NATM را در زمین‌های مچاله شونده با تغییرشکل‌های بزرگ، در زمین‌های سست و در تونل‌های بزرگ مقطع با شرایط هندسی پیچیده گسترش داد. وقتی از NATM بحث می‌شود اغلب به معنی شرایط مختلف زیادی است که مهندسين مجرب تونلسازی با آن مواجه می‌شوند. صنعت تونلسازی هنوز نتوانسته نام واحدی را برای روش تونلسازی‌ای که اتریشی‌ها در اواخر قرن بیستم پیشرو آن بودند انتخاب

کند. نام‌های مختلف بکار رفته عبارتند از: روش جدید تونلسازی اتریشی (NATM) (اتریش، ۱۹۶۲)، روش حفاری مرحله‌ای (SEM)، پوشش با بتن‌پاشی یا تونل پوشیده با بتن (SCL^۱) (انگلستان، ۱۹۹۶)، روش بتن‌پاشی (آلمان، ۱۹۷۰)، روش سلول همگرا (فرانسه، ۱۹۹۲)، NMT^۲ (نروژ)، UHVS^۳ و CDM^۴ (ژاپن) و (شریف زاده، ۱۳۸۹)

۲-۳-۲- مفاهیم و اصول کلی NATM

از نظر جامعه مهندسين اتریش، " NATM روشی را ایجاد می‌کند که سنگ دربرگیرنده یا تشکیلات خاکی یک تونل با یک سازه نگهدارنده حلقه ای شکل یکپارچه می‌شود. بنابراین تشکیلات نگهدارنده خود، جزیی از این سازه نگهدارنده می‌شود". همانطور که در مقاله آقایان امیت و براون بیان شده است، NATM می‌تواند هم به یک فلسفه طراحی تعبیر شود و هم به یک روش ساخت. عناصر کلیدی فلسفه طراحی و روش ساخت NATM بصورت زیر است (Hung C.J. et al, ۲۰۰۹):

۱- تقویت و افزایش مقاومت توده سنگ: این روش بر این اصل استوار است که از مقاومت ذاتی توده سنگ بعنوان جزء اصلی سیستم نگهداری استفاده می‌شود. نگهداری اولیه سنگ را قادر می‌سازد از خود پشتیبانی کند. به عبارت دیگر عنصر اصلی متحمل بار در تونل، توده سنگ یا خاک دربرگیرنده تونل است. این افزایش و تقویت تونل با کمک تغییرشکل‌های کنترل شده زمین حاصل می‌شود.

^۱ Sprayed Concrete Lining

^۲ Norwegian Method of Tunneling

^۳ Upper Half Vertical Subdivision

^۴ Cross Diagram Method

۲- حفاظت بواسطه شاتکریت: با استفاده از یک لایه ۲۵ تا ۵۰ میلیمتری شاتکریت، باید لقی شدن و تغییر شکل بیش از حد توده سنگ حداقل شود. پوشش باید در تماس کامل با سنگ باشد که شاتکریت دارای این ویژگی می‌باشد.

۳- اندازه‌گیری: مشاهده رفتار تونل حین ساخت از بخش‌های NATM محسوب می‌شود. طی حفاری هر تغییرشکلی باید اندازه‌گیری شود. روش NATM مستلزم نصب دستگاه‌های دقیق اندازه‌گیری می‌باشد که در پوشش یا در زمین بصورت سلول، کشیدگی سنج یا غیره جاسازی می‌شوند. با رفتارسنجی و تفسیر تغییرشکل‌ها، کرنش‌ها و تنش‌ها، روند کاری و نگهداری بهینه می‌شود.

۴- پوشش اولیه: این پوشش نازک و بصورت فعال بوده و با استفاده از ترکیب انعطاف پذیری از پیچ سنگ، تور سیمی و قاب فولادی باعث تقویت تونل می‌شود. زمان نصب این سیستم نگهداری انعطاف پذیر باید مطابق با تغییرشکل‌های زمین باشد. برای حداقل کردن ممان‌های خمشی، نگهدارنده اولیه باید سطحی نازک باشد. نگهداری اضافی نباید با افزایش ضخامت پوشش انجام شود بلکه باید از پیچ سنگ استفاده شود. شاتکریت و پیچ سنگ در نزدیکی جبهه کار حفاری برای حفظ یکپارچگی توده سنگ بکار برده می‌شود.

۵- بستن کفبند: بستن فوری کفبند (کفبند کردن تونل) بمنظور تکمیل قوس و ایجاد یک حلقه تحمل کننده بار مهم می‌باشد. این امر در تونلسازی در زمین‌های سست و نرم بحرانی است. اینکار باعث پرهیز از تمرکز تنش در گوشه‌ها که مکانیزم‌های شکست تدریجی از آنجا شروع می‌شود می‌گردد. بستن حلقه باربر مهم است و کل محیط شامل کفبند باید شاتکریت پاشی شود. نصب سریع کفبند و پاشیدن شاتکریت مربوط به آن برای تکمیل حلقه باربر در تونل‌های حفر شده در زمین‌های خاکی یا سنگی انجام می‌شود. این امر یکی از اصول کاری اولیه NATM است.

- ۶- طبقه‌بندی توده سنگ: حضور زمین شناسان متخصص در تعیین نگهداری اولیه بسیار مهم است همانگونه که بمنظور طراحی نهایی نگهدارنده حین حفاری به طبقه‌بندی توده سنگ نیاز است.
- ۷- طراحی پویا: طراحی حین ساخت تونل، طراحی پویا و دینامیکی است. برای ایجاد هر جبهه کار طبقه‌بندی انجام و سیستم متناظر با آن انتخاب می‌شود. هرچند این طراحی با توجه به تغییرشکل‌های ایجاد شده بهبود می‌یابد (Barton, N. et al. ۱۹۹۵).

۲-۳-۳- فلسفه و ویژگی‌های ساختاری NATM

پروفسور رابسویچ در نوامبر ۱۹۶۴ اصول NATM را بصورت زیر توضیح می‌دهد:

"روشی جدید شامل پوشش نازک بتنی پاشیده شده که در زودترین زمان ممکن توسط یک کفبند (که به آن قوس کمکی اطلاق می‌شود) بسته شده تا حلقه تکمیل شود. تغییرشکل‌ها طی زمان اندازه گیری شده تا به تعادل برسد."

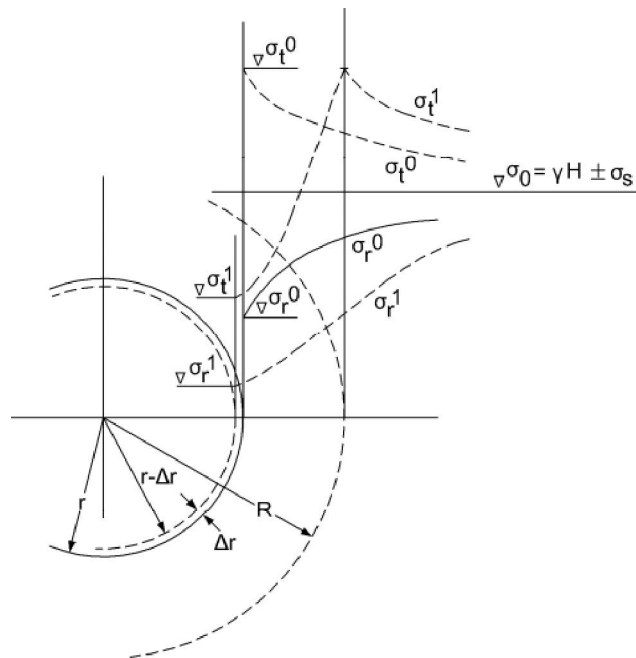
او به سه نکته کلیدی اشاره کرد: بکارگیری پوشش نازک بتنی پاشیده شده، بستن هرچه سریعتر حلقه و اندازه گیری منظم تغییرشکل‌ها. پروفسور لئوپولد مولر، یکی دیگر از حامیان NATM، در سال ۱۹۷۸ پیشنهاد کرد که: "روش NATM یک مفهوم تونلسازی با یک سری اصول است. بنابراین نباید صرفاً بدلیل اینکه یک تونل را ایجاد می‌کند به آن یک روش احداث اطلاق شود."

بعنوان نتیجه‌ای از نظرات ذکر شده توسط متخصصین اتریشی باید گفت که NATM یک روش تونلسازی یا یک فلسفه است تا یک سری از تکنیک‌های حفاری و نگهداری. گالسر (۱۹۷۹)، براون (۱۹۹۰)، هاگنهوفر (۱۹۹۰) و بارتن (۱۹۹۴) جزء حامیان این نظریه بوده اند.

۲-۳-۴- تنش‌های موجود در تونل و مکانیزم شکست از دیدگاه رابسویچ

روش NATM اولین ایده ای بود که در آن از زمین و مقاومت آن بعنوان یک ماده استفاده شد و

بخشی از سیستم نگهداری تلقی شد. شرایط تنش اطراف یک حفره زیرزمینی پس از کاستنر^۱ بصورت شکل زیر ارائه شد. تنش اولیه σ در زمین دربرگیرنده پی از حفره فضا اساسا بستگی به روباره، وزن مخصوص و تنش‌های تکتونیکی σ_s دارد. طی حفر تونل، تنش‌های مماسی در اطراف تونل افزایش می‌یابد. اگر تنش‌های مماسی و شعاعی القایی (σ_r و σ_t) در اطراف تونل از مقاومت زمین دربرگیرنده تجاوز کند تسلیم اتفاق افتاده و ناحیه پلاستیک شده‌ای با شعاع خاص R ایجاد می‌شود (شکل (۲-۱)).



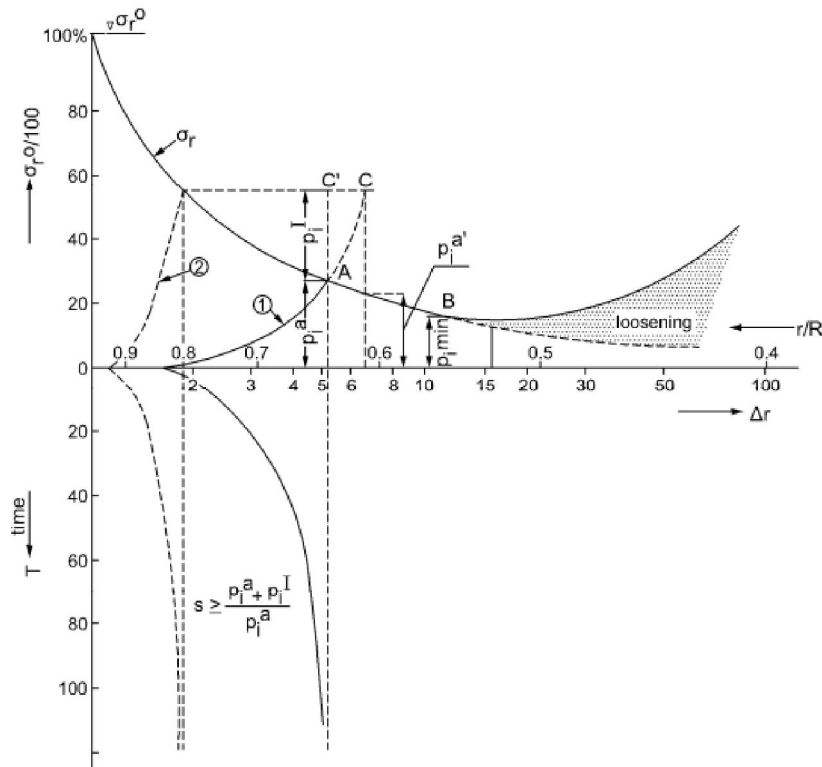
شکل ۲-۱- تعریف شماتیک تنش‌ها در اطراف یک تونل (رابسویچ و همکاران، ۱۹۷۳)

در شکل (۲-۲) رابطه بین تنش‌های شعاعی σ_r ، تغییر شکل تونل Δr ، فشار بیرونی و درونی نگهداری بترتیب P_i^a و P_i^l ، زمان نصب نگهداری T نشان داده شده است. بر اساس نظریه رابسویچ فشار بیرونی نگهداری شامل زمین و تقویت کننده آن (بولت یا شاتکریت مهباری^۲ یا بتن یا قاب فولادی) می‌باشد. فشار درونی شامل پوشش ثانویه است که پس از بازکردن تونل با کمک قوس بیرونی تعادل برقرار

^۱ Kastner

^۲ Flashcrete

می‌شود. در منحنی عکس‌العمل زمین در هر نقطه تماس تعادل برقرار می‌شود. از ویژگی‌های NATM این است که تقاطع منحنی نگهداری و σ_r در سمت نزولی منحنی اتفاق می‌افتد.



شکل ۲-۲- ارتباط بین تنش شعاعی، تغییر شکل تونل، فشار و زمان نصب نگهدارنده (رابسویچ و همکاران، ۱۹۷۳)

حداقل نگهداری مورد نیاز در نقطه B و برای پیشگیری از لق شدگی در زمین دربرگیرنده می‌باشد. این نقطه منجر به بیشترین تغییر شکل زمین ولی در عین حال اقتصادی‌ترین سیستم نگهداری تونل خواهد شد. منحنی ۱ که منحنی σ_r را در نقطه A قطع می‌کند نیازمند فشار P_i^a بوده و تغییر شکل کمتر و فاکتور ایمنی بالاتری را ایجاد می‌کند. انتخاب یک قوس بیرونی سفت‌تر در منحنی ۲ منجر به فشار نگهداری بیشتری خواهد شد زیرا اجازه تغییر شکل و استفاده از مقاومت ذاتی به زمین داده نشده و کاهش فاکتور اطمینان را نتیجه می‌دهد. نقاط C و C' در نمودار بالا بترتیب نقاط بارگذاری و باربرداری قوس داخلی را نشان می‌دهند.

استفاده از NATM از تونلسازی برون شهری در سنگ، به تونلسازی شهری در زمین نرم و بطور برجسته زیر محیط‌های دارای سازه‌های حساس توسعه یافت. در فضاهای شهری بویژه در تونلسازی تحت روباره کم در زمین سست و نرم، هدف اصلی حداقل کردن تاثیر تونلسازی بر سطح و سازه‌های مجاور و نشست می‌باشد. همانطور که در شکل بالا دیده می‌شود در تونلسازی در اعماق کم، نصب کمتر و با تاخیر سیستم نگهداری همراه با تغییر شکل‌های بیشتر تونل و نیز نشست بیشتر سطح می‌شود. منحنی ۱ نگهداری نرمتر و منحنی ۲ نگهداری زودتر و صلبتری را نشان می‌دهد. کاهش طول گام حفاری و تقسیم سطح مقطع تونل به نصب زودهنگام سیستم نگهداری و نیز کاهش تغییر شکل‌ها و جابجایی‌ها منجر می‌شود. با افزایش ضخامت شاتکریت اولیه تا مقداری و استفاده سریع از شاتکریت با مقاومت بالاتر می‌توان به صلبیت سیستم نگهداری رسید.

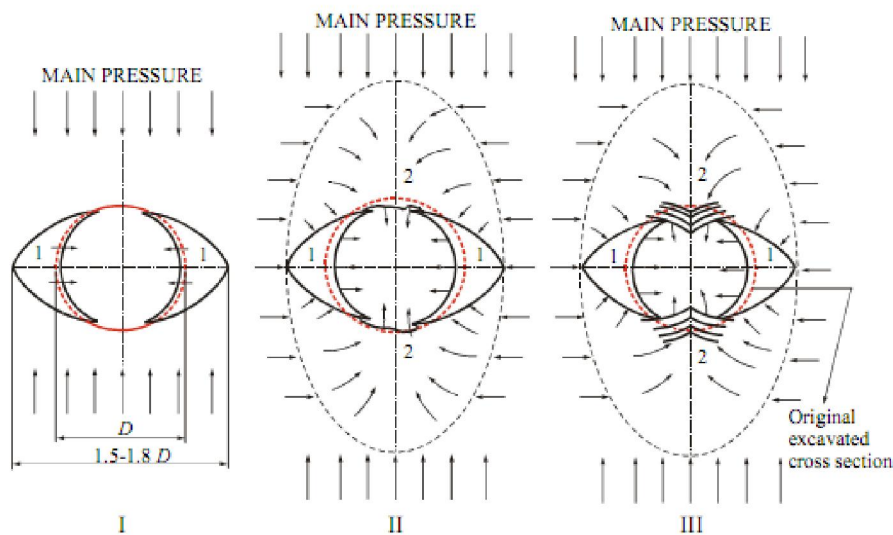
مشخصات و محدودیت‌های تونلسازی در محیط‌های شهری شامل موارد زیر می‌باشد: معارضه با ساختمان‌های سطحی، تأسیسات زیرزمینی و سایر سازه‌های زیرزمینی موجود، محدودیت انجام مطالعات ساختمانی، عمق کم حفاری در مصالح خاک‌های ضعیف، نهشته‌های آبرفتی و خاک‌های دستی، وجود تأسیسات زیرزمینی در اعماق کم، چالش‌های فرهنگی و تاریخی، نشست‌های سطح زمین و تأثیر آن بر روی ساختمان‌ها و تأسیسات، هزینه و نیروی انسانی زیاد و اینکه تونل‌های شهری عمدتاً با اجرای زیرساخت‌های استراتژیک و سیاسی مرتبط می‌باشند. سیاستمداران، سرمایه‌گذاران به همراه افکار عمومی همگی خواستار قطعیت در مورد هزینه و زمان اجرای پروژه می‌باشند.

اقتصاد امروزی احداث تونل، نیازمند پیشرفت‌هایی در تونلسازی است که با روش‌های تمام مکانیزه توسط TBM با هزینه اولیه سنگین قابل رقابت باشد. زمینه اصلی کاربرد حفاری مرحله‌ای، جدا از تونل‌های راه آهن و شهری و بزرگراه‌ها، در احداث طرح تونل‌های با هندسه پیچیده، تونل‌های کوتاه، تونل‌ها و مغارهای بزرگ مقطع در نواحی شهری در اعماق کم می‌باشد. تونل‌های با اعماق کم عموماً شامل

مشکلات تونلسازی در زمین‌های سست می‌باشد. انعطاف‌پذیری روش حفاری مرحله‌ای از مزایای این روش است (Hung C.J. et al, ۲۰۰۹).

۲-۳-۵- تئوری شکست برشی رابسویچ اطراف یک فضای زیرزمینی

با توجه به تئوری شکست رابسویچ هنگام ایجاد یک حفره در سنگ، ترتیب مجدد تنش در سه مرحله مانند شکل (۲-۳) اتفاق می‌افتد. در مرحله اول، بدنه‌های گوه‌ای شکل در دو طرف تونل در امتداد سطوح موهر برش خورده و به سمت حفره پیش می‌رود (۱). در مرحله دوم، افزایش این محدوده منجر به همگرایی سقف و کف می‌شود (۲). تغییر شکل در تاج و کف حفره افزایش یافته و تحت فشار جانبی ثابت، توده سنگ به درون حفره خم می‌شوند (۳). فشارها در مرحله سوم بعنوان فشارهای مچاله شونده تعریف می‌شوند و بندرت در فعالیت‌های عمرانی بعزت عمق کم حفاری‌ها رخ می‌دهد. سپس رابسویچ در سال ۱۹۶۴ به این نتیجه رسید که با توجه به ایجاد تدریجی این پدیده فشاری، معمولاً مقاطع بصورت تمام مقطع اجرا نشده بلکه باید برای حفاری به بخش‌هایی تقسیم شوند. او این روش حفاری مرحله‌ای خود بجای روش تمام مقطع را با این تئوری اعتبارسنجی کرد (Karakus M. et al, ۲۰۰۷).



شکل ۲-۳- روند و ترتیب مکانیکی شکست اطراف یک حفره با اعمال تنش (رابسویچ، ۱۹۶۴)

۲-۳-۶- معیار طراحی در روش NATM

اصول طراحی مناسب برای NATM به دو دسته کلی طراحی تقسیم می‌شوند. دسته اول بعنوان تابعی از الزامات فنی NATM با کاربرد در زمین نرم و محیط شهری و نگهداری‌های مربوطه می‌تواند تلقی شود. دسته دوم وابسته به محدودیت‌های بیرونی مانند مشکلات نشست، تاثیرات زیست‌محیطی، ایمنی، فناوری مهندسی و محدودیت‌های قراردادی و مالی می‌باشد. گالسر و موسگر (۱۹۷۸) به اهمیت طراحی قراردادی برای NATM که نقش عمده‌ای در کاربرد اقتصادی موفقیت‌آمیز NATM ایفا می‌کند اشاره داشتند. بنابراین، از NATM بعنوان ترکیبی از فلسفه‌های تونلسازی سنتی در زمین نرم و سخت تعبیر می‌شود. طراحی مجزای هر کدام از این ویژگی‌ها بدون در نظر گرفتن بقیه منجر به شکست NATM می‌شود. پس از تعیین هندسه و ابعاد با توجه به کاربرد آن در زمین نرم یا سنگ سخت، طراحی NATM بطور عمده وابسته به ویژگی‌های سیستم نگهداری آن می‌باشد (Karakus M. et al, ۲۰۰۷).

۲-۴- روش‌های اجرا، نگهداری و پیش‌نگهداری در تونل‌های NATM بزرگ

مقطع و کم عمق شهری

امروزه احداث فضای زیرزمینی در نواحی شهری، بدون نیاز به اختلال در فعالیت‌های سطحی بسیار رایج شده است. صنعت ساخت فضاهاى زیرزمینی با استفاده از روش‌های تقویت زمین، روش‌های پیش‌نگهداری و روش‌های تونلسازی به این شرایط عکس‌العمل نشان داده است. تونلسازی NATM با توجه به انعطاف‌پذیری آن جایگاه خود را در شرایط و هندسه مختلف زمین پیدا کرده است. در این قسمت پس از معرفی روش‌های مختلف سنتی و جدید اجرایی در تونل‌های NATM و سپس روش‌های نگهداری و پیش‌نگهداری بکار رفته در تونل‌های NATM در خاک، به پروژه‌های موفقیت‌آمیز تونلسازی NATM طی دهه‌های اخیر اشاره شده که کاربرد روش‌های پیش‌نگهداری در تونلسازی NATM در اعماق کم شهری

را بیان می‌کند.

بطور کلی می‌توان این روش‌ها را به دو دسته روش‌های سنتی و روش‌های جدید تونلسازی تقسیم کرد. روش‌های سنتی روش‌هایی هستند که در زمین‌های نرم و سست بر اساس تفکیک مقطع تونل به چند بخش و حفر هر بخش به روش گالری‌های چوب بست شده پایه‌ریزی شده است. اصول حفاری‌های سنتی به صورت زیر است: تقسیم سطح مقطع تونل به گالری‌های کوچک، نگهداری موقت با چوب بست و گاه‌ا‌ها پرکردن با مصالح حفاری، تعریض تونل با حفظ چوب بست‌ها، جمع‌آوری چوب بست‌ها و نصب نگهداری دائم، پیشروی در چندین مرحله و نصب پوشش نهایی تونل بوسیله بنایی با سنگ و آجر. از جمله محدودیت‌های این روش‌ها می‌توان به حفاری دستی، سرعت پیشروی کم و فضای کاری محدود اشاره کرد. روش‌های مختلف حفاری سنتی شامل روش‌های زیر می‌شود: روش بلژیکی، روش آلمانی، روش انگلیسی، روش ایتالیایی، روش آمریکایی و روش سنتی اتریشی.

روش‌های جدید تونلسازی مرحله‌ای در زمین‌های سست شامل روش‌های زیر می‌باشد:

روش نیمه بالایی با پله کوتاه^۱: در این روش حفاری به صورت پله‌ای بوده که از تاج شروع شده و به سمت پایین ادامه می‌یابد. به خاطر ایمنی و عدم تداخل کاری، بین جبهه‌کارهای بالا فاصله ۱۵۰-۵۰ متری رعایت می‌شود. ارتفاع بخش بالایی معمولاً بیش از ۴/۵ متر می‌باشد. این روش معمولاً با فرورفتگی پایه قاب‌های نگهداری و بالازدگی کف در قسمت بالایی همراه است که در این صورت کفبند موقت مورد نیاز است. در زمین‌هایی که قابلیت جابجایی بسیار بالایی دارند، کاربرد ندارد.

روش تاج و پله^۲: در مواردی که قسمت تاج (هدینگ) دارای ارتفاع بیش از ۵ متر باشد و مشکلات

ناپایداری نیز چندان زیاد نباشد از این روش استفاده می‌شود. پله پایینی (بنچینگ) با فاصله مناسب از

^۱ Top heading short bench

^۲ Top heading and benching

بخش بالایی (هدینگ)، که بستگی به جنس زمین دارد، حفر می‌شود. جهت جلوگیری از بالازدگی و کنترل همگرایی‌ها از کفبند موقت در کف پله بالایی استفاده می‌شود. همچنین جهت اتصال پله بالایی و پایینی از رمپ استفاده می‌شود. در صورت جانمایی رمپ در قسمت میانی، متمرکز شدن تنش‌ها یکی از موارد ایجاد ناپایداری می‌باشد، به همین دلیل رمپ را عمدتاً در دیواره‌ها احداث می‌کنند.

روش دیافراگم میانی^۱: در این روش مقطع تونل توسط یک حائل مرکزی به دو قسمت تقسیم می‌شود و باتوجه به ابعاد تونل هر قسمت ممکن است در چند مرحله حفاری شود. برای ایجاد دیافراگم مرکزی از شاتکریت مسلح و در صورت لزوم از راک بولت استفاده می‌شود (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴- حفاری تونل با دیواره موقت میانی (سمت راست: تونل Beacon hill، واشنگتن) (Hung C.J. et al, ۲۰۰۹)

روش گالری‌های کناری^۲: روند کلی عملیات در این روش به این صورت است که ابتدا دو گالری مانند شکل (۲-۵) در کناره‌های تونل حفر و نگهداری شده سپس قسمت مرکزی حفاری و نگهداری می‌شود و در نهایت نگهداری‌های داخل مقطع حذف و برداشته می‌شود. ویژگی‌های خاص این روش شامل موارد زیر است: برای تونل‌های با سطح مقطع عرضی زیاد، حفاری در گالری‌ها از بالا به پایین، کنترل

^۱ Center Drift

^۲ Side Drift

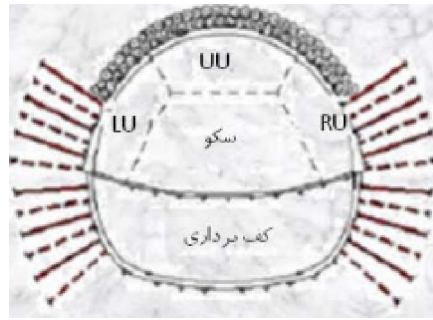
خوب نشست زمین، توزیع مناسب تنش در زمین و زون پلاستیک ایجاد شده کوچکتر در این روش نسبت به سایر روش‌ها.



شکل ۲-۵- حفاری تونل به روش گالری‌های کناری (Sauer, G. et al, ۲۰۱۰)

روش آلمانی: مراحل اجرایی در روش جدید آلمانی به ترتیب بصورت زیر می‌باشد: حفر گالری‌ها در گوشه‌های پایین تونل و نگهداری آنها، حفر و بتن‌ریزی کف گالری، بتن‌ریزی دیوارهای جانبی، نگهداری سقف پیش از حفر بدلیل بزرگی و عرض زیاد، حفاری بخش بالایی و مرکزی تونل، حفر قسمت بعدی در پایین تونل و تخریب دیواره‌های داخلی گالری‌ها، بتن‌ریزی کف بین گالری‌ها و بستن حلقه نگهداری و در نهایت بتن‌ریزی نهایی سقف که تقریباً روی دیواره‌های جانبی قرار می‌گیرد.

روش برش حلقه‌ای: مراحل اجرای این روش برطبق شکل (۲-۶) به ترتیب زیر می‌باشد: حفاری UU، LU و RU با گام یک تا نیم متری، استفاده از بتن پاشیده در سطح حفاری، تکرار مراحل فوق برای گام بعدی، حفاری سکو، نصب کفبند موقت، حفاری بخش تحتانی با گام یک متری، استفاده از بتن پاشیده در بخش تحتانی (کف) و تکرار این مراحل تا زمانیکه کل مقطع تونل حفاری شود.



شکل ۲-۶- حفاری تونل به روش برش حلقه‌ای (شریف زاده، ۱۳۸۹)

روش پوشش بتنی (SCL): از این روش در محدوده‌های شهری و با روباره کم و با هدف محدود کردن تغییرشکل‌ها استفاده می‌شود. اساس روش در استفاده از شاتکریت مسلح شده با مقطع فولادی و تورهای سیمی می‌باشد. مراحل حفاری با حفر دو گالری در جوانب شروع و در مراحل بعدی پایه وسط برداشته می‌شود که هر کدام از گالری‌ها و پایه مرکزی طی چند مرحله حفر می‌شوند. نگهداری اولیه شامل یک لایه شاتکریت به ضخامت ۳۰ تا ۵۰ سانتیمتر بوده که توسط آرماتوربندی و شبکه‌های تور سیمی، مسلح شده است. در این روش کیفیت و پیوستگی مراحل بتن‌ریزی و مناسب بودن همپوشانی آرماتورها اهمیت بسیار زیادی دارد.

طی مقایسه‌ای که بین روش‌های جدید صورت گرفته نتایج زیر بدست آمده است: روش تونل‌های جانبی بیشترین تأثیر را در محدود کردن نشست سطح زمین دارد. ۸۰٪ نشست‌های سطحی در روش تاج و پله هنگام حفاری پله بالایی می‌باشد. پایداری جبهه کار در روش تاج و پله، ۱/۲۵ برابر روش حفاری تمام مقطع می‌باشد. روش دیافراگم میانی، در مقایسه با روش تاج و پله دارای نشست کمتر و جبهه کار پایدارتر می‌باشد (شریف زاده، ۱۳۸۹).

روش جدید تونلسازی اتریشی (NATM): در بخش‌های بعدی به تفصیل درباره این روش صحبت خواهد شد.

طی مقایسه بین روش‌های SCL و اتریشی، از نظر نحوه حفر، روش اتریشی با حفاری نیمه بالایی

در وسط، شروع و پس از آن قسمت‌های جانبی حفر می‌شود. روش SCL ابتدا قسمت‌های جانبی و سپس پایه مرکزی حفر می‌شود. از نظر اجرای نگهداری، در روش اتریشی بولت‌گذاری بصورت منظم همراه با لایه‌ای از شاتکریت نازک انجام می‌شود که با شبکه سیمی یا الیاف مسلح گردیده است. همچنین در روش SCL از شاتکریت ضخیم مسلح شده با شبکه سیمی یا الیاف فولادی استفاده می‌شود. زمان نصب پوشش در روش اتریشی حدود ۴/۵ ساعت و در روش SCL حدود ۹ ساعت می‌باشد. از نظر نرخ پیشروی نیز نرخ پیشروی در روش NATM بیشتر از روش SCL می‌باشد (شریف زاده، ۱۳۸۹).

۲-۴-۱- اجرای NATM در زمین‌های خاکی

زمین‌های خاکی از نظر حفاری، آسان ولی از نظر نگهداری، سختی‌ها و مشکلات زیادی را به پیمانکار تحمیل می‌کنند. در این نوع زمین‌ها به دلیل عدم یکپارچگی مواد اطراف تونل و هم چنین مشکل نشست زمین، نگهداری تونل بسیار مشکل است و به علاوه، مساله نشست نیز مساله بسیار مهمی است و به همین دلیل، حتی الامکان سعی می‌شود که مسیر تونل به گونه‌ای انتخاب شود که در حین حفر تونل با این نوع زمین‌ها برخورد نشود. مشکل دیگری که در این نوع زمین‌ها وجود دارد مشکل تخلخل و نفوذپذیری زمین و ورود آب به داخل تونل است. به همین علت نیز تونل‌های حفر شده در زمین‌های خاکی در زیر سطح ایستایی را از جمله بدترین نوع تونل‌ها به شمار می‌آورند. طی سالیان گذشته کاربرد روش NATM برای محدوده وسیعی از شرایط زمین توسعه یافته است. با توسعه و بهبود وسایل نگهداری، کاربرد روش حفاری مرحله‌ای نیز گسترش پیدا کرده است. از اولین اجرای آن در آلمان در تونل‌های سنگی این روش به سمت محیط‌های شهری و تونل‌های خاکی حرکت کرده است. حفاری مرحله‌ای در سنگ سخت با استفاده از تکنیک‌های حفاری و آتشباری اجرا می‌شود. همچنین در زمین‌های با سختی متوسط و نیز سنگ نرم از رودهدر (Road header) و در زمین‌های نرم و سست از حفاری با بیل مکانیکی

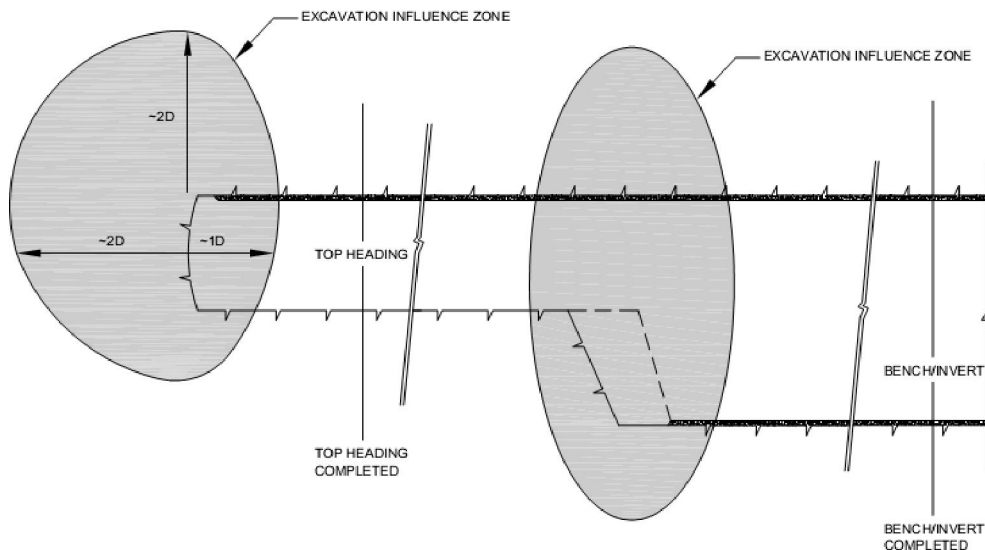
(Backhoe) بهره برده می‌شود. حفاری در زمین‌های با رده عالی، بسیار خوب و خوب می‌تواند بصورت تمام مقطع صورت گیرد ولی در توده‌سنگ‌های نامرغوب حفاری می‌تواند به تاج و کف تقسیم شود. برای توده‌سنگ‌های با رده ضعیف و خیلی ضعیف حفاری به زیربخش‌ها تقسیم می‌شود. بر اساس مطالعات، رابسونج (۱۹۶۵) بیان کرد که با تفکیک کردن جبهه‌کار حفاری به بخش‌های کوچکتر به پایداری زمین تا تکمیل پوشش کمک می‌شود. ایشان پیشنهاد کرد که حفاری تونل با توجه به ابعاد و هندسه تونل می‌تواند طی ۶ مرحله یا بیشتر انجام شود.

۲-۴-۱-۱- تاثیر طول گام حفاری و ترتیب حفاری و نگهداری بر نشست سطح زمین

در روش حفاری مرحله‌ای اصلی‌ترین عوامل تاثیرگذار در میزان نشست سطح، طول گام حفاری در جبهه‌کار و ترتیب مراحل حفاری تونل است. تاثیر عرض حفاری در میزان نشست، در تقسیم جبهه کار به مقاطع کوچکتر دیده می‌شود. بطور کلی طول گام بعنوان فاصله طولی از دهانه نگهداری نشده است که در یک مرحله اجرا می‌شود. محققین معتقدند که طول گام حفاری تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی پتانسیل ریزش جبهه‌کار و دهانه خودپایدار و در کل پایداری تونل دارد و نیز هزینه و زمان اجرای تونل وابسته به این عامل می‌باشد. در نواحی شهری می‌توان در زیر خیابان‌ها، مقدار طول گام را در هر قسمت افزایش داد ولی در زیر ساختمان‌ها به دلیل روبراه کم و نزدیکی مقادیر نشست حداکثر با مقادیر مجاز نشست، طول گام حفاری کوچکتری پیشنهاد می‌شود. انتخاب صحیح و بهینه طول گام حفاری همچنین برای جلوگیری از تنش بیش از حد بر پوشش تونل، ریزش‌های احتمالی و کاهش بیش خردایش می‌باشد (کولیوند و همکاران، ۱۳۹۰).

حفاری تونل باعث ایجاد آشفتگی در حالت اولیه تنش در زمین شده و یک رژیم سه بعدی تنش به شکل حبابی اطراف جبهه‌کار در حال پیشروی ایجاد می‌کند. در جبهه‌کار تونل، جریان اطراف بازکننده بصورت اثری قوسی در امتداد و عمود بر جهت حرکت تونل می‌باشد. همانطور که در شکل (۲-۷) دیده

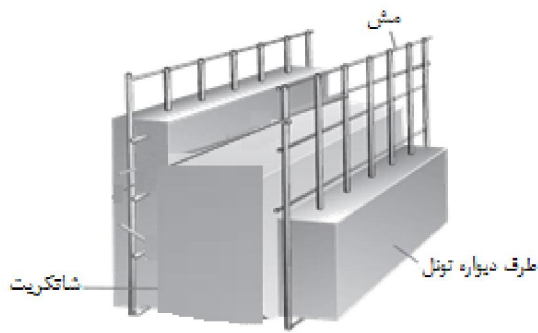
می‌شود باید یک فاصله مکانی و یک فاصله زمانی بین دو زون بحرانی، با هدف کاهش تأثیر این دو ناحیه بحرانی بر روی هم وجود داشته باشد. وسعت ناحیه آشفته تنش اطراف تاج فعال متأثر از شرایط زمین، ابعاد حفاری و طول هر گام می‌باشد. این آشفستگی از دو برابر قطر حفاری در جلوی جبهه کار فعال شروع می‌شود. همچنین این ترتیب حفاری و نگهداری در NATM بویژه در زمین نرم و سست و در نواحی شهری با روباره کم باید بدقت در تحلیل های عددی نشان داده شود (Hung C.J. et al, ۲۰۰۹).



شکل ۲-۷- تونلسازی به روش حفاری مرحله‌ای و زون‌های آشفستگی زمین (OGG, ۲۰۰۷)

۲-۴-۲- نگهداری و پیش نگهداری در تونل‌های NATM در نواحی شهری

بطور کلی در روش NATM و بخصوص در تونل‌های بزرگ مقطع و کم عمق شهری که عمدتاً در لایه‌های خاکی نرم و سست اجرا می‌شود عناصر نوعی نگهداری شامل ترکیبی از شاتکریت (چند لایه متفاوت)، شبکه تور سیمی، قاب فولادی، میل مهار یا راک بولت و یا به‌همراه تزریق می‌باشد (شکل ۲-۸).

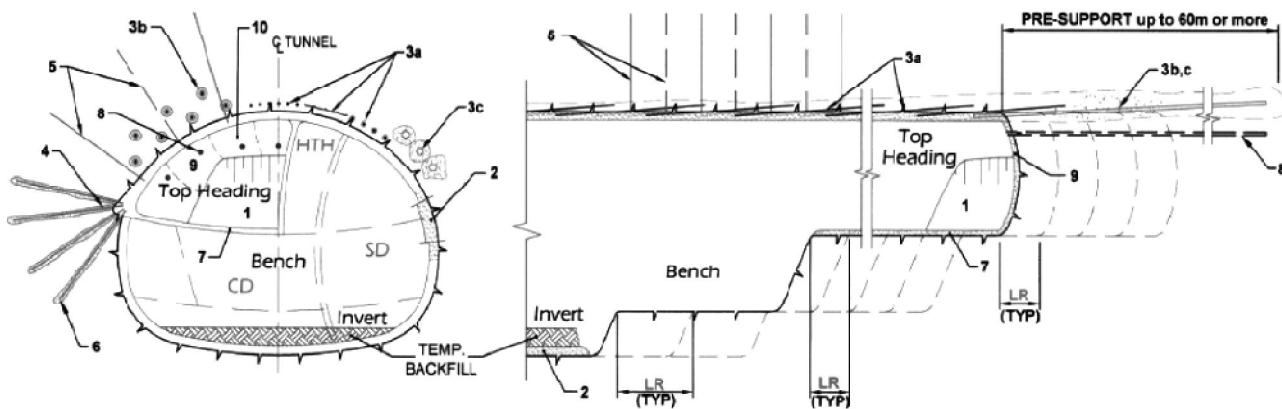


شکل ۲-۸- جانمایی دو لایه مش در شاتکریت (غدیری، ۱۳۸۹)

بطور کلی امروزه مهمترین عناصر نگهدارنده در تونلسازی به روش NATM در زمین‌های شهری و

سست بر اساس شکل (۲-۹) شامل موارد زیر می‌باشد:

- ۱- پایدارسازی جبهه کار با استفاده از گوه‌های جبهه‌کار. ۲- پوشش شاتکریتی. ۳- اسپایلینگ^۱ با میلگردهای عاجدار یا لوله‌های دوغابریزی (۳a)، قوس لوله‌های فولادی (۳b)، روش دوغابریزی افقی (۳c).
- ۴- افزایش عرض با پی شاتکریتی. ۵- تقویت ظرفیت باربری با میل مهار و دوغابریزی. ۶- استفاده از کفبند موقت شاتکریتی. ۷- آبکشی ناحیه حفاری. ۸- پایدارسازی جبهه‌کار با شاتکریت و میخکوبی. ۹- اجرای روش حفاری بخشی (مرحله‌ای) و نیز تعیین گام حفاری مناسب (Sauer, G., ۲۰۱۰).



شکل ۲-۹- عناصر موجود در روش NATM

^۱ Spiling

عناصر پیش نگهداری موجود در تونل‌های NATM شامل موارد زیر می‌باشد:

اسپایلینگ: یکی از عناصر مکانیکی رایج در پیش نگهداری شامل اسپایلینگ دوغابریزی شده با قطر ۵۰ میلیمتر می‌باشد. این ابزار در ابتدا در محیط سقف و شانه‌های تونل و در صورت نیاز در دیواره‌ها و کفبند نصب می‌شوند. دوغابریزی این اسپایل‌ها باعث تماس مستحکم بین میله‌ها و زمین می‌شود. در سنگ‌های شل و سست، اسپایل‌های فولادی بعنوان یک نگهدارنده پیشرو در جبهه کار تونل بکار می‌روند تا بیش خردایش را کاهش داده و از ریزش سنگ جلوگیری کنند. این میله‌ها با فاصله در محیط سقف و موازی با محور تونل و نیز پیش از آغاز هر دور حفاری بکار می‌روند. طول اسپایل‌ها باید حداقل سه برابر گام حفاری باشند تا همپوشانی کافی را فراهم نمایند. از انواع اسپایل‌ها بیشتر در تونلسازی در محیط‌های سنگی استفاده می‌شود (Wittke W. et al, ۲۰۰۲).

چتر لوله‌های فولادی: اگر اسپایل‌ها نگهداری کافی را فراهم ننمایند از چتر لوله‌های فولادی^۱ استفاده می‌شود. این لوله‌ها بیشتر در زمین‌های نرم و فاقد چسبندگی و جایی که روباره کم بوده و در سطح زمین خیابان یا ساختمان وجود داشته باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند. درست مانند اسپایل‌ها، چتر لوله‌های فولادی در محیط پروفیل حفاری تونل و جلوتر از جبهه کار نصب می‌شوند. بعلاوه ابعاد لوله‌ها این چتر قوی‌تر از چتر اسپایل‌ها بوده و فضای بیشتری از پیش روی جبهه کار را می‌پوشانند. نصب لوله‌های فولادی تسلیح کننده هنگامی که بعنوان سازه ای حائل در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند بطور قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش نشست سطح زمین و افزایش چسبندگی موثر در توده خاکی اطراف تونل می‌شود. در تونل‌های NATM مخصوصا بزرگ مقطع بجای چتر لوله‌ای، از شمع‌های ترکیبی و چتر دوغابریزی فشاری^۲ نیز استفاده می‌شود (مطهری و همکاران، ۱۳۸۷).

^۱ Forepoling

^۲ Jet Grouting

نصب Dowel و میخکوبی در جبهه کار: پیش نگهداری جبهه کار در جبهه کار حفاری تونل نصب شده تا مجاله شوندگی یا ریزش‌های جبهه کار پیش از حفاری را پایدار سازد. المان‌های انفعالی (passive) در زمین نصب و دوغابریزی می‌شوند تا مقاومت برشی و کششی زمین را افزایش دهند. عناصر فولادی در نصب Dowel در جبهه کار، از پیشروی جبهه کار و انتقال نیروی کششی زمین جلوگیری می‌کنند. این Dowel ها می‌توانند با دوغاب نیز ترکیب شده تا مقاومت کلی زمین در سطح مقطع را بهبود بخشند. جنس این Dowel ها معمولاً از GFRP (رزین پلی استر تقویت شده با فیبر شیشه‌ای) می‌باشد و باعث افزایش مقاومت کششی و نیز حفاری آسان بواسطه مقاومت برشی پایین می‌شوند. این روش تونلسازی شامل نصب تقویت فولادی در سنگ (مثلاً راک بولت) به همراه کاربرد شاتکریت مسلح می‌باشد. هرگاه این روش به جای سنگ در خاک انجام پذیرد به میخکوبی خاکی معروف است. میخکوبی خاکی شامل تقویت زمین موجود بوسیله نصب میله‌های فولادی فاصله‌دار (Nail) می‌باشد که توسط دوغاب سیمان پوشانده می‌شود. در مقایسه با سایر روشهای پایدارسازی، میخکوبی خاکی دارای مزیت‌های بسیاری از جمله ایمنی مناسب، صرفه اقتصادی و سرعت اجرای بالاتر می‌باشد (Gall, V. et al, ۲۰۰۹).

نصب میکروپایل: میکروپایل‌ها (ریزشمع‌ها)^۱ به گروهی از شمع‌ها اطلاق می‌گردد که دارای قطر کمتر از ۳۰۰ میلیمتر بوده و اجرای آن غالباً با تسلیح فولادی سبک و نیز تزریق دوغاب سیمان همراه است. ریزشمع‌ها که دارای روش‌های اجرای مختلفی هستند، به مقاصد متفاوتی نظیر انتقال بار به لایه‌های مقاوم عمیق، کنترل نشست، تقویت پی سازه‌های آسیب دیده، افزایش توان باربری پی‌های موجود، کنترل روانگرایی خاک‌ها در هنگام زلزله و پایدار سازی شیب‌های خاکی و ترانشه‌ها و غیره بکار می‌روند. ریزشمع‌ها علاوه بر آنکه به عنوان یک المان باربر و مقاوم در برابر نشست عمل می‌کنند، به دلیل تزریق دوغاب سیمان، سبب بهبود مشخصات مقاومتی خاک اطراف نیز می‌گردند.

^۱ Micropile

روش‌های تقویت و بهسازی زمین: روش‌های تقویت زمین در ابتدا به بافت زمین کمک کرده تا مقاومت برشی (چسبندگی) و فشاری آن افزایش یابد و نیز افزایش سفتی (مدول تغییرشکل) را دنبال دارد. این روش‌ها شامل پایین کشیدن تراز آب زیرزمینی یا کاهش فشار آب منفذی یا تغییرات در ترکیب زمین مانند دوغابریزی فشاری، مخلوط کردن خاک یا انجماد خاک می‌باشد (Brady B. et al, ۱۹۹۲).

۲-۵- پیشرفت‌ها در NATM

بهترین نمونه از پیشرفت فناوری NATM در بریتانیا بود، روش Lasershell™ توسعه یافته توسط شرکت Morgan Est با همکاری یک شرکت اتریشی بوده است. اولین استفاده عمده از این روش در پروژه Terminal^۵ در منطقه هیترو^۱ شهر لندن بود که قابلیت ساخت تونل‌های NATM بدون قاب فولادی برای کنترل شکل تونل، با تکیه بر مسافت سنج لیزری در دوربین Total station اصلاح شده (مجهز به رایانه) را تشریح می‌کند. این روش یک پوشش یک لایه بوده که این پوشش، شاتکریت تقویت شده با فیبر فولادی بدون استفاده از تور سیمی یا قاب فولادی می‌باشد. با برطرف شدن نیاز به قاب فولادی، زمان اتلافی توسط کارگران در جبهه کار حداقل شده، کیفیت پوشش ارتقا پیدا کرده، سرعت روند ساخت و ایمنی افزایش یافته، نشست سطح زمین کاهش یافته، پایداری زمین حفظ شده و یک منبع اصلی پتانسیل خوردگی حذف می‌شود. همچنین برای کاهش خطر خوردگی در این روش تک پوشش، فیبرهای فولادی جایگزین تور سیمی شده است. در روش Lasershell™ که در جبهه کار از بیل مکانیکی استفاده می‌شود، دارای پیشرفتی مداوم بوده اما بمنظور پایداری جبهه کار، پیشروی بالای جبهه کار بیشتر از پایین آن می‌باشد. هندسه پوشش شاتکریتی بدقت با کمک برداشت لیزری کنترل می‌شود. تونل در این روش بصورت تمام مقطع ساخته می‌شود. بیل مکانیکی و دستگاه شاتکریت پاشی تحت حفاظت چتر پوشش

^۱ Heathrow

تونل است. تفاوت این روش با روش‌های سنتی حفاری مرحله‌ای در این است که در آن دسته روش‌ها پوشش تونل تا پیشروی بعدی نمی‌تواند بطور کامل تکمیل شود (Thomas, A.H. et al, ۲۰۰۴).

۲-۶- ابزاربندی و رفتارسنجی در تونل‌های NATM بزرگ مقطع و کم عمق

شهری

هدف از رفتارنگاری با استفاده از ابزاربندی ژئوتکنیکی به شرح زیر است:

۱. ایمنی ساختمان‌ها و تاسیسات: رفتارنگاری به منظور اعلام هشدار زود هنگام طی رفتارنگاری پیوسته جابجایی‌های بیش از حد زمین در محدوده تاثیر تونل‌ها که بر سازه‌ها و تاسیساتی مانند راه آهن، خطوط برق، لوله‌های آب و غیره تاثیرگذار است باید صورت گیرد. این کار نوعی اجرای اعمال پیشگیرانه می‌باشد.
۲. ارزیابی طراحی: برای تهیه اطلاعات تغییرشکل‌ها و نشست بمنظور ارزیابی طراحی اولیه سازه‌های دائمی و موقت باید رفتارنگاری انجام شود.
۳. کنترل احداث: برای تعیین اینکه آیا پارامترهایی مانند نشست کلی، جابجایی‌های جانبی دیواره‌ها، فشار زمین، بار شمع‌ها، بالازدگی کف و غیره در محدوده مجاز هستند یا نه. اگر از حد مجاز فراتر باشند باید تغییر یابند. رفتارنگاری، فرایند ساخت را مطمئن می‌سازد.
۴. رفتارنگاری و ارزیابی اجرا: برای ارزیابی اجرا، بطور کلی ابزارهای پیشنهادی برای ارزیابی طراحی باید استفاده شوند. بعضی اوقات ابزارهای دیگری به منظور پایش رفتار دینامیکی سازه‌های مختلف اضافه می‌شوند.
۵. رفتارنگاری بلندمدت برای ایمنی (در صورت نیاز): رفتارنگاری دوره ای شرایط سازه‌های زیرزمینی بمنظور حصول اطمینان از حفظ و نگهداری سازه ضروری می‌باشد. فاکتورهای اصلی موثر در اجرا

عبارتند از خوردگی فولاد، از هم پاشیدگی بتن طی زمان، نشست اضافی و تغییر در الگوی بارگذاری بعلت افزایش تردد مسافران.

۲-۶-۱- اصول ابزاربندی و رفتارنگاری در محیط شهری

ابزاربندی ساخت NATM تفاوتی با انواع مختلف ساخت و سازه‌های ژئوتکنیکی ندارد. رفتارسنجی ژئوتکنیکی یک فرآیند استاندارد در روش طراحی مشاهده‌ای تونل با هدف حداقل سازی ریسک و کاهش هزینه‌ها است. ریسک‌های موجود در فرآیند طراحی شامل نشست سطح زمین (پی ساختمان‌ها، پایه پل، خیابان)، لغزش دیواره رمپ‌ها و ترانشه‌ها، همگرایی توده خاک دیواره و اطراف تونل، تغییرات ساختمان‌ها (ترک خوردن، اعوجاج و انحراف ساختمان‌ها) و تغییرات سطح آب زیرزمینی و کنترل ریسک‌ها شامل افزایش تعداد اندازه‌گیری‌ها، سازماندهی و کوتاه‌تر شدن بازه زمانی برای ارسال اطلاعات و اصلاح روش و اقدامات دیگر می‌باشد. بررسی نتایج قرائت‌های انجام شده ممکن است با هدف‌های مختلفی انجام شود که مهمترین آنها عبارتند از: کنترل ایمنی، تعیین خواص مواد و احتمالاً حالت اولیه تنش، تعیین رفتار سازه در مقابل اعمال یک روش اجرای خاص و مقایسه پیش‌بینی‌های تئوری و رفتار واقعی سازه. یک برنامه ابزاربندی شامل انتخاب ابزار مناسب، آرایش ایستگاه‌های ابزار دقیق، نصب و بکارگیری ابزار دقیق، قرائت، پردازش و تفسیر داده‌ها می‌باشد.

انواع رفتارنگاری از نظر زمان شامل رفتارنگاری قبل از اجرا، رفتارنگاری حین اجرا و رفتارنگاری پس

از اجرا می‌باشد. مقاطع مهم از نظر رفتارسنجی شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. مقاطعی که انتظار می‌رود از نظر شرایط ژئوتکنیکی ضعیف باشند.
۲. مقاطعی که ارتفاع روباره کم است.
۳. مقاطعی که تونل‌های زیرزمینی از زیر جاده‌های موجود و یا کانال آب عبور می‌کند.
۴. مقاطعی که ساختمان‌ها در محدوده نشست قرار گرفته‌اند.

۵. مقاطعی که تونل‌ها و سایر سازه‌ها در معرض جابجایی و تنش‌های زیاد هستند.

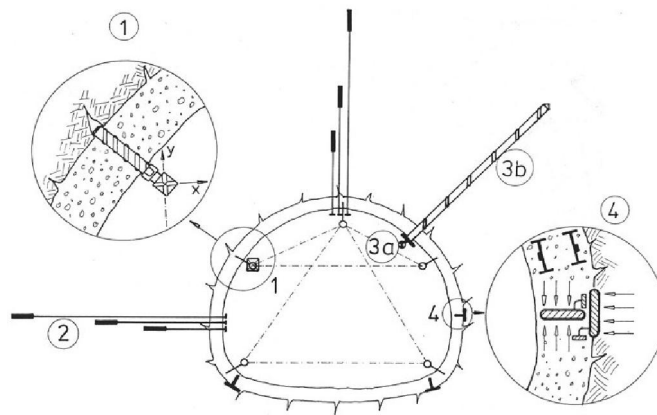
ابزارهای مختلف رفتارنگاری در مقاطع پایش در یک تونل NATM نصب می‌شود که بصورت زیر طبقه بندی می‌شوند: مقاطع استاندارد رفتارنگاری شامل تنها اهداف جابجایی مطلق زیرزمینی و مقاطع اصلی رفتارنگاری شامل ابزارهایی مانند کشیدگی سنج گمانه‌ای، سلول فشار شاتکریت، کرنش سنج، سلول بار، انکرهای اندازه‌گیری، اهداف سه بعدی و غیره. این ابزار ارزیابی بارگذاری بر پوشش اولیه و جابجایی های زمین را آسان می‌سازد. هدف از نصب ابزارهای مختلف موارد زیر است:

۱. کشیدگی‌سنج های گمانه‌ای برای تعیین جابجایی‌های زمین خارج از محدوده حفاری می‌باشند. این ابزار روند افزایش کرنش ها در زمین دربرگیرنده و پایدار شدن جابجایی‌ها را نشان می‌دهد. کشیدگی سنج‌ها عموماً متشکل از چند راد همراه انکرهایی که در نقاط تعیین شده ای با دوغاب به زمین متصل می‌شود.

۲. کرنش سنج‌های شاتکریت به منظور تعیین توسعه تنش در پوشش شاتکریتی با اندازه‌گیری کرنش‌ها می‌باشند. همواره بصورت جفتی نصب شده تا امکان تعیین نیروهای مقطعی مانند نیروی عمودی و ممان‌های خمشی وجود داشته باشد. براساس کرنش‌های ثبت شده، تنش‌ها در پوشش شاتکریتی با استفاده از قانون مواد غیرخطی محاسبه می‌شوند. پارامترهای ورودی متعددی برای این قانون مواد نیاز است، آزمون‌های خزش بلندمدت بر شاتکریت تازه اجرا می‌شود که منجر به تعیین پارامترهای موردنیاز می‌شود.

۳. به کمک سلول‌های شعاعی فشار شاتکریت فشار افزایش یافته بر روی سیستم نگهداری اولیه اندازه‌گیری می‌شود. سلول‌های مماسی فشار شاتکریت در تعیین تنش پوشش شاتکریتی کمک می‌کنند و در نواحی خاصی مانند تقاطع ها نصب می‌شوند.

۴. انکرهای اندازه‌گیری توسعه بار در طول انکر از نوک آن تا صفحه انکر را تعیین می‌کنند. این انکرها به همراه سلول بار بولت‌ها و کشیدگی سنج‌ها نصب می‌شوند.
۵. سلول بار چال میانی با یک بولت و در صفحه انکر نصب شده و اطلاعاتی درباره حداکثر بار انکر و میزان بازدهی انکر ارائه می‌کند.
۶. کشیدگی سنج‌های نواری برای اندازه‌گیری همگرایی بوسیله اندازه‌گیری مسافت بین نقاط ثابت روی دیواره‌ها و سقف فضای حفاری می‌باشد.



شکل ۱-۲- نمونه‌ای از یک مقطع اصلی رفتارسنجی در NATM (Wittke W. et al, ۲۰۰۲)

یکی از مهمترین عوامل در کاربرد موفقیت آمیز روش‌های مشاهده‌ای مانند NATM، مشاهده رفتار تونل حین ساخت است. رفتارسنجی و تفسیر تغییرشکل‌ها، کرنش‌ها و تنش‌ها برای بهینه کردن روند کاری و سیستم نگهداری مهم است. این مشاهدات برجا برای کنترل شکست‌های محتمل ضروری می‌باشد. جدول (۱-۲) یک نمونه ابزاربندی را مطابق با مقطع شکل (۱-۲) نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲- نمونه‌ای از تجهیزات اندازه‌گیری در تونل NATM (Wittke W. et al, ۲۰۰۲)

ابزار	هدف از اندازه‌گیری	
نوار همگرایی نقاط مشخص شده	تغییرشکل سطح حفاری شده تونل	۱
کشیدگی سنج	تغییرشکل زمین در برگیرنده تونل	۲

نیروی کلی انکر	رفتارسنجی المان نگهداری زمین (انکر)	۳
سلول‌های فشار گیج‌های جاسازی شده	رفتارسنجی المان نگهداری زمین (شاتکریت)	۴

۲-۶-۲- روش‌های رفتارسنجی در تونل‌های شهری

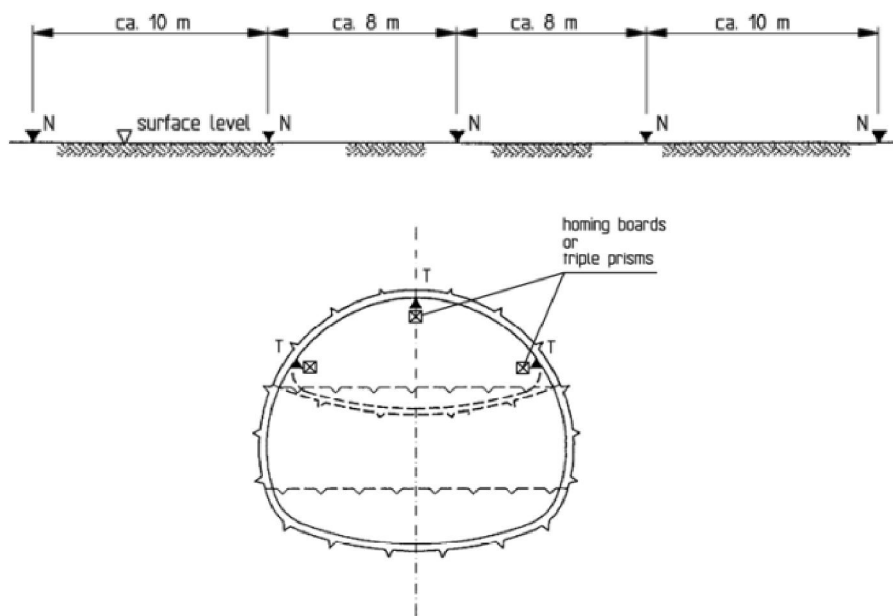
- رفتارسنجی زمین شناسی
- رفتارسنجی تغییرشکل تونل (همگرایی سنجی)
- رفتارسنجی تغییرشکل دهانه‌های تونل
- رفتارسنجی تغییرشکل در ترانشه‌ها و دهانه‌ها
- رفتارسنجی ساختمان‌ها
- رفتارسنجی نشست سطح در نقاط مبنا
- انحراف سنجی در گمانه‌ها
- کشیدگی سنج‌های عمودی چند نقطه‌ای در گمانه‌ها
- رفتارسنجی فشارهای وارد بر دیواره‌ها و پایه‌ها
- چاه‌های مشاهده‌ای آب زیرزمینی (پیزومتر سنجی)

اندازه‌گیری‌های ژئوتکنیکی همانند نقشه برداری ژئوتکنیکی یکی از عناصر اصلی NATM می‌باشد که منجر به رفتارسنجی موارد زیر می‌شود: پایداری تونل و سازه‌های مجاور، تغییرشکل‌های زمین و جابجایی‌های سطح، باربری پوشش شاتکریتی و لرزش‌های حین اجرا. این اندازه‌گیری‌ها باعث انتخاب سیستم‌های نگهداری مناسب برای شرایط زمین می‌شوند. در نهایت، تفسیر نتایج این اندازه‌گیری‌ها باید برای ارزیابی و بهینه‌سازی پوشش موقت و نهایی مورد استفاده قرار گیرند. تحلیل پایداری بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌ها منجر به حذف یا کاهش عدم قطعیت‌ها در مورد پارامترها می‌شود (تحلیل بازگشتی).

رفتار سنجی ژئوتکنیکی شامل موارد زیر می‌باشد (Wittke W. et al, ۲۰۰۲):

۱. برداشت موقعیت و تراز یابی

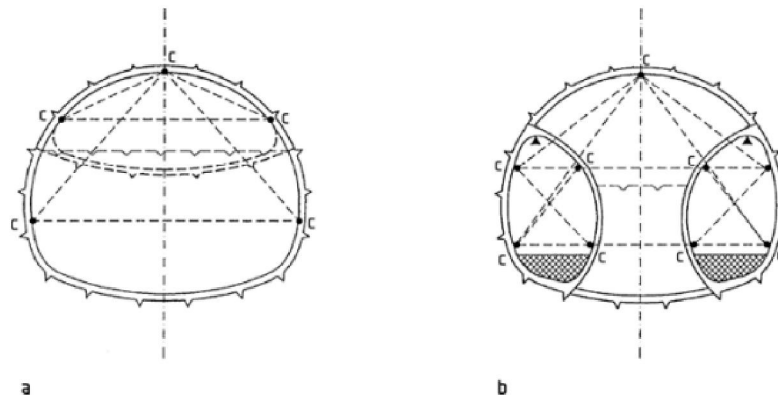
جابجایی‌های نقاط واقع در سطح زمین و روی کنتور تونل با قواعد پیمایش و با استفاده از تراز یابی و نوعی دوربین تئودولیت (تاکنومتر) اندازه‌گیری می‌شوند. برای اندازه‌گیری نشست، مقاطع اندازه‌گیری با نقاط تراز یابی بصورت عمود بر محور تونل نصب می‌شوند. در مکانهای شیبدار مولفه‌های افقی جابجایی باید اندازه‌گیری شوند. با استفاده از تاکنومتر نه تنها مولفه‌های قائم جابجایی بلکه مولفه‌های افقی جابجایی نیز بصورت موازی و عمود بر محور تونل اندازه‌گیری می‌شوند (شکل ۱۱-۲).



شکل ۱۱-۲- تراز یابی عمود بر محور تونل و برداشت موضعی نقاط روی محیط تونل (Wittke W. et al, ۲۰۰۲)

۲. اندازه‌گیری‌های همگرایی

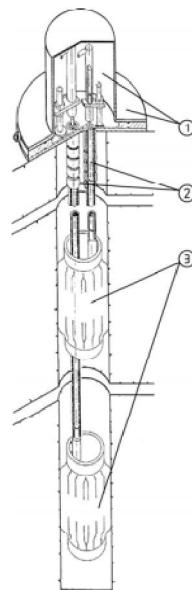
در شکل (۱۲-۲) نمونه‌ای از ترتیب مقاطع همگرایی سنجی در یک تاج و یک تاج با دریفت‌های جانبی دیده می‌شود. نقاط اندازه‌گیری با یک نوار کششی یا سیم اندازه‌گیری و ابزار همگرایی بهم متصل می‌شوند.



شکل ۲-۱۲- مقاطع همگرایی سنجی. (a) تاج، (b) دریفتهای جانبی (Wittke W. et al, ۲۰۰۲)

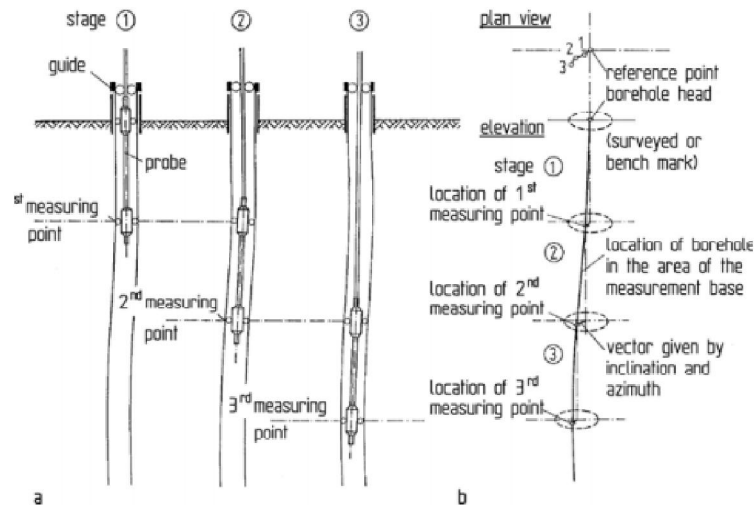
۳. اندازه‌گیری‌های کشیدگی سنج و انحراف سنج

جابجایی‌ها و جابجایی‌های نسبی در زمین (کششی یا فشاری) در چال‌های گمانه‌ای با گیج‌های ثابت یا در لوله‌ها اندازه‌گیری می‌شوند. جابجایی‌های موازی با محور یک گمانه بطور کلی با استفاده از کشیدگی سنج‌ها (ثابت) یا میکرومترهای کشویی (لوله‌های گمانه‌ای) اندازه‌گیری می‌شوند (شکل ۲-۱۳)



شکل ۲-۱۳- نصب یک کشیدگی سنج چندمیله‌ای (Interfels, ۲۰۰۰)

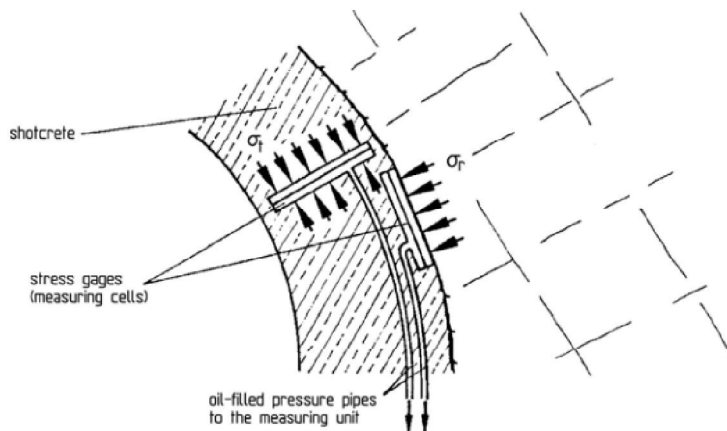
جابجایی‌های عمود بر محور یک گمانه مانند شکل (۲-۱۴) معمولاً با استفاده از لوله‌های انحراف سنج یا انحراف سنج‌های ثابت اندازه‌گیری می‌شوند. با یک لوله اندازه‌گیری، تغییرات در انحراف از محور گمانه و جابجایی عمود بر محور در دو بعد تعیین می‌شود.



شکل ۲-۱۴- اصول اندازه‌گیری لوله انحراف سنج. (a) اندازه‌گیری، (b) ارزیابی (Wittke W. et al, ۲۰۰۲)

۴. اندازه‌گیری‌های تنش

اندازه‌گیری‌های تنش برای تعیین میزان باربری پوشش شاتکریتی و نهایی اجرا می‌شود. در شکل (۲-۱۵) سلول‌های فشار در یک پوشش شاتکریتی نشان داده شده است. یکی از سلول‌ها بصورت مماسی روی شاتکریت برای اندازه‌گیری تنش شعاعی نصب شده (فشار توده سنگ یا خاک) و سلول دیگر بصورت شعاعی نصب شده تا تنش مماسی حاصل از بارگذاری را اندازه‌گیری کند (فشار بتن).



شکل ۲-۱۵- جانمایی سلول فشار در پوشش شاتکریتی برای اندازه‌گیری تنش بتن و توده (Wittke W. et al, ۲۰۰۲)

۵. اندازه‌گیری‌های نیروی انکر

برای اندازه‌گیری نیروی انکر در انکرهای تنیده نشده، سلول‌های اندازه‌گیری نیرو مجهز به کرنش سنج یا گیج سیم نوسانی در سر انکر نصب می‌شوند.

۶. رفتارنگاری آب زیرزمینی

برای پایش آب زیرزمینی، لوله عمودی و پیزومترهای کاساگراند در نقاط حساس زمین و در همان مقاطع رفتارنگاری نصب می‌شوند. می‌توان از لوله‌های عمودی که حین تحقیقات اولیه پروژه نصب شده‌اند برای رفتارنگاری حین ساخت استفاده کرد.

۲-۷- موارد مطالعاتی از احداث تونل‌های بزرگ مقطع NATM در محیط‌های

کم عمق شهری

در جدول (۲-۲) چندین پروژه تونل‌های بزرگ مقطع تحت روباره کم در نواحی شهری در سرتاسر دنیا به همراه روش‌های اجرایی حفاری، پیش‌نگهداری، نگهداری و ابزاربندی معرفی خواهد شد. این پروژه‌ها با آنچه در این فصل بیان شد دارای شرایط مشابه می‌باشند.

جدول ۲-۲- تونل‌های بزرگ مقطع اجرا شده به روش NATM در نواحی شهری در سرتاسر دنیا

نام پروژه / کشور / نوع کاربری	شرایط زمین شناسی / تراز آب زیرزمینی	روباره تونل / ابعاد و سطح مقطع تونل	پیش نگهداری	نوع و ترتیب حفاری و نگهداری	تحلیل عددی تونل	ابزاربندی و رفتارسنجی تونل	توضیحات
تونل دوطبقه Ome / ژاپن / بزرگراه بین شهری	آبرفت های ماسه/سیلت و لایه‌های سنگریزه/ از ۱۲ تا ۲۰ متر زیر سطح زمین	متوسط ۸.۶ متر/ طول: ۲۰۹۵ متر عرض: ۱۵ متر ارتفاع: ۱۸ متر مساحت: ۲۲۱-۲۲۶ مترمربع	شاتکریت پاشی جبهه کار / Forepoling با تزریق / تزریق افقی و قائم دوغاب / زهکشی تونل	تفکیک مقطع تونل به ۴ پله/ شاتکریت، قاب فولادی، شمع های موقت نگهدارنده، پوشش بتنی	تحلیل بازگشتی با استفاده از مدل عددی غیرخطی	همگرایی سنجی، نشست سنجی، اندازه گیری مداوم ظرفیت باربری سیستم نگهداری	تکمیل پس از ۶ سال/ حداکثر نشست سطح زمین حدود ۲۰ میلیمتر
تونل Fort /Canning / سنگاپور / تونل راه	سیلت رسی، متراکم، رس، عدسی های ماسه ای و بولدر / تراز آب در سطح زمین	از ۳ تا ۹ متر / طول: ۱۸۰ متر عرض: ۱۵ متر ارتفاع: ۱۱ متر	Forepoling با تزریق دوغاب شیمیایی در لوله ها	بترتیب تاج، کفبند، موقت، پله و کفبند/ شاتکریت، قاب فولادی، پوشش بتنی	تحلیل المان محدود با نرم افزار آباکوس و نیز مدل سازی Forepoling	اعتبارسنجی نتایج مدل سازی با اندازه گیری های میدانی	تکمیل ۲۰۰۶ / حداکثر نشست سطح زمین از ۰.۱۱ تا ۰.۱۵ متر
تونل های دوقلوی Mission /Valley / آمریکا / تونل راه آهن	لایه ماسه ای ریزدانه متراکم و خوب بهم نچسبیده با سنگهای درشت دانه/ تراز آب زیر تاج تونل	حداکثر ۱۶ متر / طول: ۳۳۰ متر عرض: ۱۱.۲۴ متر ارتفاع: ۸.۸ متر	شاتکریت پاشی جبهه کار / میخکوبی و لوله های پوششی / حفاری چالهای پیشرو برای زهکشی آب تونل	بسته به میزان آب ورودی به تونل، ۳ نوع ترتیب حفاری و نگهداری / شاتکریت، قاب فولادی، پوشش بتنی	مدلسازی ۳ مقطع مورد استفاده در تونل با کد عددی FLAC با کمک پارامترهای زهکشی شده	رفتارسنجی تغییر شکل های زمین و پوشش، انحراف سنجی، کشیدگی سنجی، نصب پیرومترها	تکمیل ۲۰۰۲ / نوع ۱، تاج کامل / نوع ۲، گالری جانبی و گسترش آن / نوع ۳، گالری های جانبی و ستون میانی
تونل اتصال مترو دهلی به فرودگاه / هند / تونل راه آهن	ماسه وسیلت تا سنگ کوارتزیت کاملاً مناسب / از ۱۶ تا ۲۰ متر زیر سطح زمین	حداقل ۱.۵ متر / طول: ۲۶۰۰ متر عرض: حدود ۱۱ متر مساحت: ۸۵ مترمربع	Forepoling سقف تونل	تاج، پله و کفبند برای همه رده ها / شاتکریت، قاب فولادی، تور سیمی، میل مهار، پوشش بتنی	مدلسازی با کد عددی FLAC ۲D با گام حفاری از ۱ متر در خاک تا ۲.۵ متر در سنگ خوب	تراز یابی سطح زمین و اندازه گیری جابجایی های داخل تونل	استفاده از کفبند موقت در آبرفتها/ حداکثر نشست سطح بین ۲۰ تا ۳۰ میلیمتر

نام پروژه / کشور / نوع کاربری	شرایط زمین شناسی / تراز آب زیرزمینی	روباره تونل / ابعاد و سطح مقطع تونل	پیش نگهداری	نوع و ترتیب حفاری و نگهداری	تحلیل عددی تونل	ابزاربندی و رفتارسنجی تونل	توضیحات
تونل توسعه جنوبی خط آبی مترو بانکوک / تایلند / ایستگاه مترو	لایه های رس سیلتی، ماسه سیلتی، رس نرم بانگکوک، رس سفت و ماسه متراکم / در مسیر تونل آب وجود ندارد.	حدود ۷ متر / ارتفاع: ۱۱.۷۵ متر عرض: ۱۱.۸۵ متر (قطر حدود ۱۱.۷۵)	شاتکریت پاشی جبهه کار	تفکیک مقطع به ۶ قسمت با دیواره میانی / ۲ الگوی حفاری و نگهداری / شاتکریت، قاب فولادی، پوشش بتنی	تحلیل عددی با استفاده از روش المان محدود و نرم افزار آباکوس و مدل رفتاری موهر-کولمب برای ایستگاه / حداکثر جابجایی قائم ۰.۰۲۵ متر	اطلاعاتی موجود نمی باشد.	تکمیل ۲۰۰۸ / تفاوت دو الگو در طول گام حفاری است، بترتیب گام های ۱ متری و ۲ متری / حداکثر جابجایی قائم بترتیب ۰.۰۱۸ و ۰.۰۵۴ متر
تونل های Kralovo / Pole جمهوری چک / تونل راه	خاک رسی سیلت دار و آهکی معروف به رس Brno و گراول های ماسه ای / تراز آب در سطح مشترک رس Brno و گراول	از ۶ تا ۲۱ متر / طول: ۱۲۵۰ متر عرض: ۱۴ متر ارتفاع: ۱۲ متر	ایجاد خاکریز در تونل / Forepoling در سقف تونل	تفکیک مقطع به ۶ قسمت با گالری های جانبی / شاتکریت، قاب فولادی، پوشش بتنی	مدلسازی تونل و دریافتها باروش المان محدود ۳ بعدی با پارامترهای زهکشی نشده و نرم افزار Technog Professional و بهینه سازی پارامترها با تحلیل برگشتی	کشیدگی سنجی، اندازه گیری نشست سطح زمین	از ۲۰۰۶ تا کنون / حفاری ۳ دریفت اکتشافی مثلثی / گام حفاری ۱.۲ متر / فاصله ثابت ۸ متر بین جبهه کارها / سازگاری بین نتایج شبیه سازی و اندازه گیری
تونل های دو قلوی Valik / جمهوری چک / تونل بزرگراه	شیل شدیداً هوازده و دگرگون شده با گسل خوردگی فراوان / اجرا در شرایط خشک انجام شده است.	از ۸ تا ۱۴ متر / طول: ۳۸۰ و ۳۹۰ متر عرض: دو دهانه ۱۱.۵ متری ارتفاع: ۱۰ متر	Forepoling سقف دو تونل با تزریق دوغاب / نصب میکروپایلها در پایین ستون	حفاری تونل میانی، نصب ستون بتنی تقویت شده مرکزی، بترتیب گالریهای جانبی، تاج و پله / شاتکریت، قاب فولادی، میل مهار، مش، پوشش بتنی	اطلاعاتی موجود نمی باشد.	رفتارسنجی از طریق گالری میانی اکتشافی / اندازه گیری بار وارد بر ستون با نیروسنج کششی	تکمیل ۲۰۰۵ / حداقل عرض ستون ۱.۲ متر / تقویت ستون با انکر در بالا و پایین / بتن ریزی ستون بفاصله حداقل ۴۰ متر جلوتر از تاج

۲-۸ - نتیجه گیری

از حدود ۶۰ سال پیش، استفاده از روش NATM و کاربردهای آن بخصوص در زمین های سست و

در اعماق کم مانند متروها در مناطق شهری و متراکم، بطور وسیعی گسترش پیدا کرده است. علیرغم پیشرفت‌ها و بهبودهای روش NATM طی سالهای اخیر عناصر کلیدی آن همچنان بدون تغییر باقی مانده که شامل موارد زیر می‌باشند: تجهیز ظرفیت (افزایش مقاومت) خودنگهداری توده سنگ اطراف فضای حفاری با حفظ وضعیت تنش سه محوری و رفتارسنجی پیوسته رفتار تونل و توده سنگ دربرگیرنده و سازگار کردن طراحی پیشرفته برای مواجهه با شرایط حین حفاری (روش مشاهده‌ای). این فرآیند طراحی در حین ساخت براساس ارزیابی نتایج رفتارسنجی نیز ادامه خواهد داشت (Brandl, J. et al, ۲۰۰۴).

روش NATM در ساخت تونل‌ها به علت مزایایی نسبت به روش سنتی تونلسازی دارای مقبولیت است. این مزایا شامل سرمایه گذاری کمتر در تجهیزات تونلسازی، انعطاف پذیری در بکارگیری هندسه های پیچیده، هزینه کلی کمتر سیستم نگهداری و مقبولیت در شرایط زمین شناسی مختلف می‌باشد. نگرانی عمده در تونلسازی در نواحی شهری، کنترل نشست سطح بمنظور جلوگیری از واردشدن خسارت به سازه های موجود در سطح و خود تونل بوده است. هدف از آنالیز حفاری با NATM با ترتیب‌های مختلف حفاری، توسعه روش تحلیل منطقی برای کمک به ملاحظات طراحی می‌باشد.

برای مقابله با خطرات و ایجاد انعطاف‌پذیری حین ساخت، ترتیب‌های مختلف حفاری و نگهداری و نیز نگهداری‌های اضافی وجود دارد. ارزیابی اجرای طراحی، حین مراحل اولیه حفاری ضروری بوده و ابراربندی و تجهیزات رفتارسنجی به این منظور بکار رفته‌اند. طراحی حین ساخت بتدریج بروز خواهد شد. انواع نگهداری و ترتیب حفاری مطابق با شرایط واقعی زمین تنظیم می‌شود (Powell, D. et al, ۲۰۰۱). یکی از عوامل مهم و موثر در کاهش نشست‌های حاصل از تونلسازی در نواحی شهری، تعیین گام حفاری مناسب می‌باشد. بطور کلی در روش NATM، کاهش طول گام حفاری و تقسیم سطح مقطع تونل به چند مقطع کوچکتر، به نصب سریعتر سیستم نگهداری و در نتیجه کاهش تغییرشکل‌ها در تونل می‌شود.

احداث تونل‌های کم عمق و غیر مکانیزه در نواحی شهری با توجه به سست بودن زمین و عمق کم تونل، باعث ایجاد تغییراتی در محیط اطراف و در نتیجه ایجاد نشست در سطح زمین شده که مخاطراتی برای سازه‌های سطحی و زیرسطحی در پی دارد. لذا بایستی علاوه بر پایداری تونل تغییر مکان‌های اطراف نیز تا حد امکان پیش بینی و کنترل شوند.

فصل سوم

مطالعات زمین شناسی و ژئوتکنیکی مسیر پروژه راه آهن تهران - تبریز

۳-۱- مقدمه

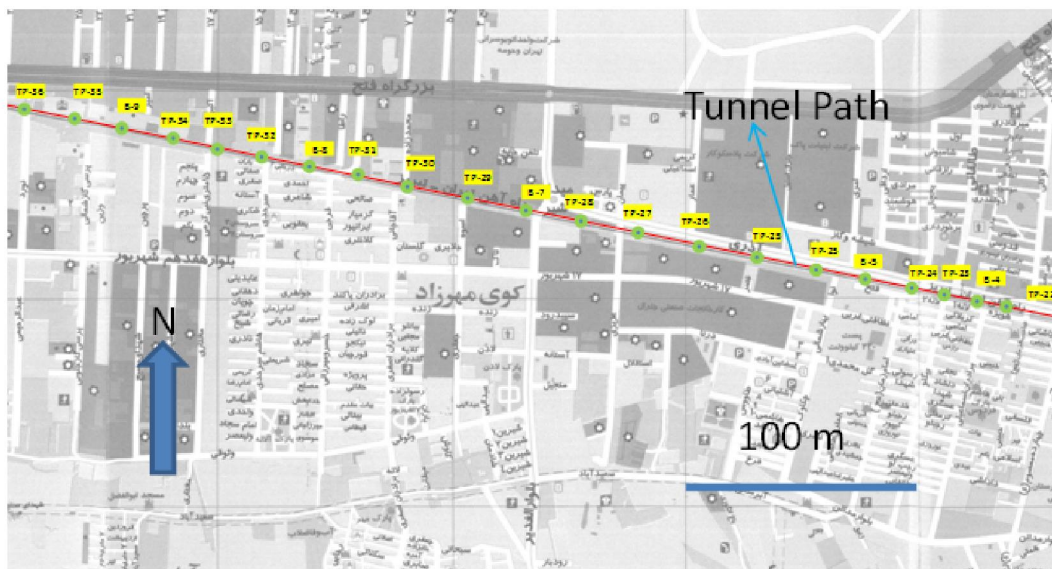
در این فصل، نتایج مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک در محدوده مسیر راه آهن تهران - تبریز در منطقه ۱۷ و ۱۸ شهر تهران، حد فاصل کیلومتر ۴۰۰+۶ تا ۲۰۰+۱۰ ارائه شده است. این مطالعات به منظور شناخت ویژگی‌های مصالح مسیر تونل، شناسایی و تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی، ترسیم نیمرخ خاک و برآورد پارامترهای مهندسی واحدهای شناسایی شده، انجام شده است. بدین منظور، در این فصل با توجه به حفاری‌های اکتشافی، آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی و مطالعات دفتری، به گردآوری و بررسی داده‌ها، پرداخته شده و داده‌های مورد نیاز طراحی تعیین گردیده است.

۳-۲- موقعیت طرح و مشخصات عمومی

ایستگاه راه آهن تهران، مرکز اصلی فعالیت‌های ریلی استان تهران و به گونه‌ای سراسر کشور می‌باشد و هر روز حجم سنگینی از آمد و شدهای ریلی از این پایگاه به دیگر شهرهای کشور انجام می‌پذیرد. در بخش‌های جنوبی شهر خطوط راه آهن در نزدیکی مناطق مسکونی ۱۱، ۱۲، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۲۰ قرار دارد. تداخل مسیرهای راه آهن با خیابانهای شهر خطر ناشی از تصادف قطار با خودروها و رهگذران پیاده و یا بیرون رفتن قطار از مسیر راه آهن را موجب می‌گردد. خطرهای ذکر شده در بالا ایجاب می‌نماید تا بخشی از راه آهن تهران - تبریز از وضعیت کنونی به تونل زیرزمینی تبدیل گردد. بر پایه این

طرح، مسیری به طول تقریبی ۱۱۰۰۰ متر زیرزمینی خواهد شد.

در این فصل بخشی از مسیر اصلی که بصورت زیرزمینی اجرا خواهد شد در حد فاصل کیلومتر ۶+۴۰۰ تا ۱۰+۲۰۰ از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱- موقعیت مسیر تونل و گمانه‌ها و چاهک‌های حفاری شده (گزارش مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل راه آهن تهران- تبریز)

۳-۳- اهداف و نحوه انجام مطالعات

در راستای شناسایی شرایط ژئوتکنیکی زمین اهداف زیر مد نظر بوده است:

- شناسایی وضعیت زمین‌شناسی و چینه‌شناسی زیرسطحی
- شناسایی وضعیت آب زیرزمینی در مسیر تونل
- گردآوری و تحلیل نتایج آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی به منظور تعیین پارامترهای مهندسی خاک
- ارائه پارامترهای مهندسی و ژئوتکنیکی خاک (داده‌های طراحی)

• ترسیم برش زمین‌شناسی مهندسی خاک در مسیر تونل

در نخستین گام، اطلاعات موجود در گستره مورد مطالعه، بررسی شده و موارد مهم و قابل استفاده استخراج گردید. اصلی‌ترین منبع در این زمینه پروفیل و گزارش مطالعات مرحله اول طرح ساماندهی خط راه آهن تهران - تبریز در محدوده منطقه ۱۷ و ۱۸ شهر تهران بوده است. همچنین در این مرحله، گزارش‌های سازمان زمین‌شناسی و گزارش‌های پروژه‌هایی با شرایط مشابه (پروژه خط ۷ مترو) مورد مطالعه و استفاده قرار گرفتند.

۳-۴- بررسی لاگ گمانه‌های اکتشافی

جهت بررسی شرایط عمقی و زیر سطحی مصالح دربرگیرنده این بخش از تونل اقدام به حفاری ۱۵ چاهک دستی و ۵ گمانه اکتشافی ماشینی در محدوده کیلومتر ۶+۴۰۰ تا ۱۰+۱۵۰ تونل گردیده و متعاقباً اقدام به برداشت لاگ و بررسی اطلاعات بدست آمده از چاهک‌های مذکور گردیده است.

۳-۵- نمونه‌برداری و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی

به منظور انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مصالح زیر سطحی، نمونه‌هایی از نوع دست‌خورده و دست‌نخورده از چاهک‌ها گرفته شده و آزمایش‌هایی بر روی آن‌ها انجام گرفته است. این آزمون‌ها شامل آزمایش‌های مربوط به دانه‌بندی خاک و حدود آتربرگ، آزمایش تک محوری، آزمایش سه محوری در شرایط CU با اندازه‌گیری فشار آب منفذی، آزمایش برش مستقیم، آزمایش تحکیم، آزمایش‌های شیمیایی و آزمایش نفوذپذیری بوده که نتایج آن‌ها جهت بدست آوردن پارامترهای مهندسی خاک مورد استفاده قرار گرفته است. جهت تعیین پارامترهای مهندسی برجای مصالح، در چاهک‌های اکتشافی و گمانه‌های ماشینی آزمون‌های برجا صورت گرفته که این آزمون‌ها شامل دانسیته در محل بروش مخروط ماسه، آزمون لوفران، برش برجا، بارگذاری صفحه‌ای، پرسیومتر و آزمون نفوذ استاندارد (SPT) می‌باشد.

۳-۶- زمین‌شناسی مسیر تونل

نتایج مطالعات زمین‌شناسی زیرسطحی مسیر تونل بر روی برش زمین‌شناسی مهندسی (ژئوتکنیکی) مسیر تونل ارائه شده است. به طور کلی، تونل مورد مطالعه در رسوبات کواترنری قرار گرفته است. رسوبات کواترنر محدوده تهران را می‌توان به چهار گروه A، B، C و D تقسیم نمود. تونل مورد مطالعه در رسوبات سری D تهران می‌باشد که بیشتر شامل ترکیبی از رسوبات ریزدانه، شن، ماسه و قلوه سنگ است و به شکل روکشی روی رسوبات قدیمی تر را پوشانده است.

بر اساس نتایج بدست آمده، دانه بندی رسوبات مذکور در محدوده پروژه متغیر بوده و اندازه ذرات از رس تا دانه درشت متغیر است. در این تشکیلات آبرفتی، تناوبی از لایه های خاکی درشت دانه و ریزدانه به صورت متناوب قرار گرفته اند (گزارش مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر، ۱۳۹۰).

۳-۷- وضعیت آب زیرزمینی

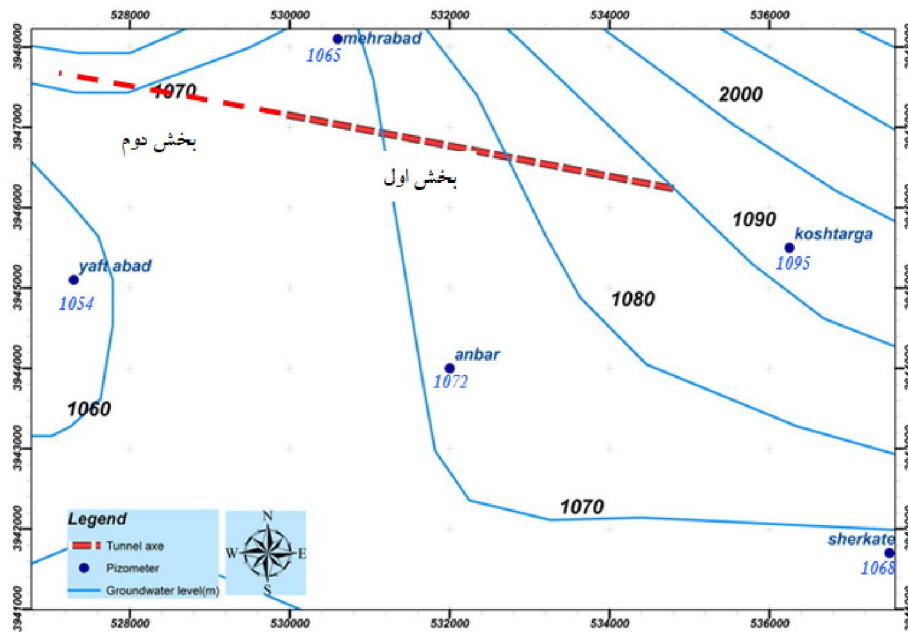
پروژه راه آهن تهران - تبریز به لحاظ مطالعات آب‌شناسی در محدوده مطالعاتی تهران - کرج واقع شده است. این محدوده دارای دو دشت پیوسته تهران و کرج می‌باشد که به لحاظ هیدروژئولوژیکی با یکدیگر ارتباط دارند. پروژه راه آهن تهران - تبریز در گستره آبخوان تهران در حال اجرا می‌باشد. بنابراین بررسی‌های هیدروژئولوژی در محدوده پروژه در زیر ارائه می‌شود.

۳-۷-۱- تراز آب زیرزمینی و جهت جریان آب

تراز سطح آب زیرزمینی در طی یک دوره ۱۲ ساله (۸۴-۷۲) به میزان ۲/۷۲ متر افت نموده است. در واقع به طور متوسط سالانه در حدود ۲۲ سانتیمتر در کل آبخوان افت سطح آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. به طور کلی سطح آب از ماه آذر تا اردیبهشت روندی صعودی داشته و از خرداد تا آبان روندی

نزولی دارد. در محل اجرای پروژه، جهت جریان آب زیرزمینی به طور کلی از شمال شرق به سمت جنوب غرب می‌باشد. به طور کلی سطح آب در منطقه در حال افت می‌باشد.

به منظور بررسی توزیع بار هیدرولیکی آبخوان در مسیر پروژه از متوسط تراز آب زیرزمینی محدوده پروژه در سال آبی ۸۳-۸۴ استفاده گردیده و نقشه پیزومتری این محدوده ترسیم شده است (شکل ۳-۲). این نقشه نشان می‌دهد تراز آب زیرزمینی از حدود ۱۰۹۰ متر در ابتدای مسیر پروژه تا کمتر از ۱۰۷۰ متر در انتهای مسیر پروژه کاهش یافته است. به نظر می‌رسد این افت به دلیل برداشت‌های بیش از حد آب از چاه‌های بهره برداری یافت آباد است که تاثیر قابل توجهی در رژیم هیدروژئولوژیک این منطقه دارد.



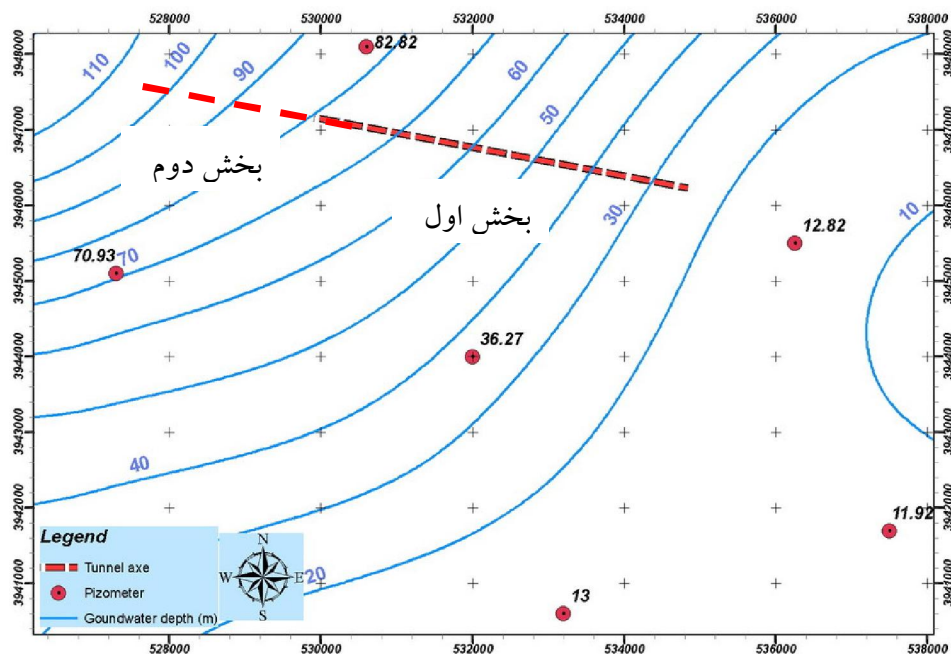
شکل ۳-۲- نقشه پیزومتری منطقه اطراف مسیر طرح (متوسط تراز سطح آب زیرزمینی سال آبی ۸۳-۸۴)

۳-۷-۲- وضعیت عمق برخورد به آب‌های زیرزمینی

به طور کلی عمق برخورد به سطح ایستابی آبخوان دشت تهران از شمال به جنوب کاهش می‌یابد.

بنحوی که این عمق از بیش از ۱۰۰ متر در نواحی شمالی به کمتر از ۱۰ متر در نواحی جنوبی دشت می‌رسد. روند شیب هیدرولیکی و شیب توپوگرافی شمالی- جنوبی بوده و به دلیل آنکه میزان شیب توپوگرافی بیش از شیب هیدرولیکی است، عمق برخورد به آب به سمت انتهای دشت کاهش می‌یابد. در نواحی جنوبی شهر تهران نیز به دلیل میزان پساب بالا، سطح آب زیرزمینی بالا آمده و عمق برخورد به آب کاهش می‌یابد. با توجه به بررسی نقشه‌های هم عمق برخورد به آب (شکل ۳-۳)، به طور کلی می‌توان عنوان نمود که عمق برخورد به آب در محدوده پروژه بیش از ۷۰ متر است. در برخی از نواحی ممکن است به آب‌های برخورد شود که نبایستی به عنوان سطح واقعی آب‌های زیرزمینی تلقی شود. این مسئله می‌تواند به وجود آبخوان‌های معلق و کوچک محلی در منطقه نسبت داده شود. همچنین از احتمال نفوذ فاضلاب‌های شهری در منطقه نیز نبایستی غافل شد. به دلیل بحث پساب‌های فراوان شهری، احتمال وجود چنین نوسانات در سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه وجود دارد. از آنجا که عمق آب زیرزمینی به سمت غرب پروژه افزایش می‌یابد، بنابراین در بخش غربی تونل (بخش دوم) مسیر تونل در مقایسه با سایر قسمت‌های مسیر تونل به لحاظ آب‌های زیرزمینی از حساسیت کمتری برخوردار است. در هر حال با اطلاعات موجود، می‌توان عمق برخورد به آب را در محدوده پروژه از ۲۵ متر در نواحی نواب تا بیش از ۱۰۰ متر در انتهای مسیر پروژه (نواحی شرقی بخش دوم) در نظر گرفت. بنابراین در طول محدوده این پروژه عمق برخورد به آب از شرق به سمت غرب افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که نوسانات سطح آب زیرزمینی در طول چند سال می‌تواند از ۵ متر در نواحی بزرگراه نواب تا حتی ۲۰ متر در نواحی بزرگراه آیت الله سعیدی نیز برسد. عوامل متعددی در میزان تراز سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی محدوده پروژه مؤثر می‌باشد که می‌توان آن‌ها را به دو دسته عوامل طبیعی و مصنوعی تقسیم‌بندی نمود. از جمله عوامل طبیعی می‌توان به جنس، میزان نفوذپذیری لایه‌های آبرفتی و همچنین عملکرد گسله‌های مختلف بر روی آن‌ها اشاره نمود. از مهمترین عوامل مصنوعی نیز می‌توان به برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در پاره‌ای

از مناطق (مانند یافت آباد) و تزریق آب از منابع مختلف در مناطق خاص (همچون چاه‌های جذبی) و مشکلات مربوط به فاضلاب اشاره نمود (گزارش مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل راه آهن تهران- تبریز (کیلومتر ۴۰۰+۶ تا ۲۰۰+۱)).



شکل ۳-۳- نقشه هم عمق برخورد به آب (متوسط سال آبی ۸۴-۸۳)

۳-۸- ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک

در این بخش، ویژگی‌های ژئوتکنیکی زمین بر اساس مطالعات صحرایی و آزمون‌های آزمایشگاهی و صحرایی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۸-۱- توزیع دانه بندی

بطور کلی تعداد ۱۷۰ آزمون توزیع دانه‌بندی خاک با انجام آنالیز اندازه ذرات (آزمون‌های الک) بر روی نمونه‌های اخذ شده از چاهک‌ها انجام گردیده است. بر اساس نتایج بدست آمده لایه‌های خاکی مسیر تونل عمدتاً از ۴ تیپ اصلی خاک شامل رس (CL, CL-ML)، سیلت (ML)، ماسه (SC, SM, SC-SM, SP-)،

(SM,SW-SM) و شن (GM,GW-GM, GC,GC-GM,GP-GC,GP-GM) تشکیل شده‌اند. بر همین اساس واحدهای ماسه‌ای که دارای گسترش بسیاری نیستند در یک گروه طبقه بندی شدند. همچنین خاک‌های در اندازه رس و سیلت نیز در دو گروه مجزا قرار گرفته‌اند. واحدهای گراولی در مسیر تونل دارای بیشترین گسترش هستند و در بخش‌های پایانی مسیر تقریباً همه تونل را در بر می‌گیرند. با توجه به گسترش زیاد و به دلیل تفاوت در مقدار ریزدانه و برخی ویژگی‌های مهندسی، واحدهای گراولی مسیر به واحدهای کوچکتری تقسیم بندی شدند. با توجه به حضور یا عدم حضور رس در ترکیب خاک‌های گراولی می‌توان این خاک‌ها را به دو گروه کلی تقسیم بندی نمود، گروه نخست شامل خاک‌های GP-GM , GM و GW-GM هستند و گروه دوم شامل GP-GC و GC می‌باشند. همچنین قابل ذکر است که با در نظر گرفتن اینکه بخش انتهایی مسیر تماماً از واحد گراول سیلتی و بدون رس تشکیل شده است برای شناسایی بهتر خاک و ویژگی‌های آن بر اساس دانه بندی گراول واحدهای خاکی به دو بخش خوب دانه بندی شده و بد دانه بندی شده تقسیم شده‌اند (گروه اول GM و GW-GM و گروه دوم GP-GM).

با توجه به نتایج آزمون‌های انجام شده می‌توان گونه‌های خاکی مسیر تونل را به شش واحد خاکی

مختلف به شرح زیر تفکیک نمود:

۱ - واحد C-I شامل خاک‌های رسی.

۲ - واحد C-II شامل خاک‌های سیلتی و رسی سیلتی.

۳ - واحد C-III شامل خاک‌های ماسه‌ای.

۴ - واحد C-IV شامل گراول‌های رس‌دار.

۵ - واحد C-V شامل گراول‌های بدون رس بد دانه بندی شده.

۶ - واحد C-VI شامل گراول‌های بدون رس خوب دانه بندی شده.

جدول (۱-۳) واحدهای تفکیک شده و توصیف هر واحد را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱- توصیف و طبقه‌بندی مهندسی واحدهای خاکی

علامت واحد خاکی	طبقه بندی خاک (USCS)	ذرات کوچکتر از ۰.۰۷۴ میلی‌متر (%)	توصیف
I-C	CL	> ۵۰	Low Plasticity Clay
II-C	CL-ML sML	> ۵۰	Low Plasticity Silt
III-C	SC	> ۱۲	Sand with clay
IV-C	GC	> ۱۲	Gravel with clay
V-C	GP	< ۵	Poorly Graded Gravel
VI-C	GW	< ۵	Well Graded Gravel

مقدار میانگین پارامترهای وزنی - حجمی خاک برای هر گروه خاکی در کل مسیر مورد مطالعه به طور خلاصه در جدول (۳-۲) ارائه گردیده است.

جدول ۳-۲- روابط وزنی - حجمی برای گروه‌های خاکی مسیر تونل

روابط وزنی حجمی	Unit	CL (C-I)			ML (C-II)			SC (C-III)			GC (C-IV)			GP-GM&GW-GM (C-V & C-VI)		
		Mi n	Ma x	Me an	Mi n	Ma x	Me an	Mi n	Ma x	Me an	Mi n	Ma x	Me an	Mi n	Ma x	Mean
مقدار رطوبت (w)	%	۲.۵	۲۸	۱۶.۵	۴	۲۷	۱۶	۴	۱۵	۹	۱	۹	۴	۲.۵	۵	۴
جرم واحد حجم کل (ρ_t)	gr/c m ^۳	۱.۹	۲.۷	۲.۲	۱.۹	۲	۲	۱.۳	۲	۱.۶	۲	۲.۲	۲.۱	-	-	۲.۵
جرم واحد حجم خشک (ρ_d)	gr/c m ^۳	۱.۵	۲	۱.۷	۱.۶	۱.۷	۱.۷	-	-	۱.۵	۱.۹	۲.۲	۲	-	-	۲

۳-۸-۲- مقاومت برشی

به منظور مطالعه رفتار برشی خاک و تعیین پارامترهای مقاومت برشی، تعدادی آزمون آزمایشگاهی (شامل آزمون‌های سه محوره و برش مستقیم) و آزمون برش برجا انجام شده است که در ادامه نتایج این آزمون‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر میانگین پارامترهای مقاومت برشی شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در حالت موثر و زهکشی نشده (نتایج حاصل از آزمون‌های سه محوری) واحدهای خاکی

مختلف در هر بخش در جدول (۳-۳) ارائه شده است.

جدول ۳-۳- میانگین نتایج آزمون سه محوره در واحدهای مختلف

گروه های خاک	پارامترهای مقاومت برشی با استفاده از نتایج آزمون سه محوری (CU)			
	c'	ϕ'	c_u	ϕ_u
	(kg/cm ^۲)	(deg.)	(kg/cm ^۲)	(deg.)
ML(C-II)	۰.۲۳	۳۳.۲	۰.۲۸	۲۶.۶
	۰.۴۳	۱۸.۳	۰.۵۴	۱۰.۲
	۰.۴	۲۱	۰.۴۵	۱۶
	۰.۰۵	۲۳.۲	۰.۰۸	۱۵.۴
GC(C-IV)	۰.۰۶	۲۵.۵	۰.۱	۱۸.۹

مقادیر C و ϕ به دست آمده از این آزمایش‌ها برای واحدهای خاکی مسیر تونل در جدول (۳-۴) ارائه شده است. لازم به ذکر است که پارامترهای مقاومت برشی واحدهای خاکی مختلف بر اساس نتایج آزمون‌های سه محوری و برش مستقیم و در نهایت قضاوت مهندسی برآورد و تعیین شده‌اند.

جدول ۳-۴- مقادیر C و ϕ بدست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم برای گونه‌های خاک در بخش‌های مسیر تونل

گروه های خاک	پارامترهای مقاومت برشی با استفاده از نتایج آزمون برش مستقیم	
	C (kg/cm ^۲)	ϕ (deg.)
CL (C-I)	۰.۵	۲۹
ML (C-II)	۰.۳۶	۳۳
SC (C-III)	۰.۲	۳۴
GC (C-IV)	۰.۱	۳۸
GP (C-V)	۰.۰۸	۴۱
GW (C-VI)	۰.۰۹	۴۰

۳-۸-۳- پارامترهای تراکم پذیری

با توجه به اطلاعات بدست آمده از حفاری‌های اکتشافی، واحدهای خاکی تشکیل دهنده مسیر تونل در زیر شمع‌ها (در محدوده مورد مطالعه در این فصل)، اکثراً از نهشته‌های درشت دانه تشکیل شده‌اند،

لذا انجام آزمون‌های تحکیم جهت بررسی وضعیت تراکم پذیری این واحدها امکان پذیر نبوده است. پارامترهای تراکم پذیری شامل شاخص فشردگی (C_c)، شاخص تورم (C_s) و فشار پیش تحکیمی (P_c) برای واحد رسی در جدول (۳-۵) ارائه شده است.

جدول ۳-۵- پارامترهای تحکیم واحد خاک رس

پارامترهای تحکیم				گونه خاکی
OCR	C_s	C_c	P_c (kg/cm ²)	
۲-۶	۰.۰۲-۰.۰۳	۰.۲-۰.۳	۴-۸	CL (C-I)

۳-۸-۴- پارامترهای شیمیایی خاک

خصوصیات شیمیایی خاک با انجام ۱۲ آنالیز شیمیایی در آزمایشگاه تعیین گردیده است. تعیین مقدار PH، درصد سولفات و کلر به دلیل اهمیت در تعیین نوع سیمان مورد استفاده در پروژه دارای اهمیت است. همچنین با توجه به اینکه میزان کربنات خاک در پتانسیل آبشستگی و پوکی خاک و تغییرات ساختاری آن دارای اهمیت است، این پارامتر نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس استاندارد ارائه شده در آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، با توجه به این که درصد سولفات خاک کمتر از ۰/۲ درصد است و با در نظر گرفتن تراز آب زیرزمینی که پایین‌تر از سطح قرارگیری شمع‌هاست، استفاده از سیمان نوع ۱ برای پروژه بلامانع است. همچنین با توجه به درصد بسیار پایین یون کلرید (کمتر از ۰/۱۵٪) در خاک خطری از دیدگاه خوردگی، شمع‌ها را تهدید نمی‌کند. همچنین درصد کربنات خاک به اندازه ای نیست که موجب پوکی خاک گردد و PH نیز در بازه خنثی تا قلیایی کم بوده و از دیدگاه واکنش زایی بی‌خطر است.

۳-۸-۵- آزمایش‌های نفوذپذیری

با وجود اینکه تونل مورد نظر در تمام مسیر خود بالاتر از تراز آب زیرزمینی است ولی با توجه به امکان ایجاد شرایط خاص از جمله نفوذ آب‌های سطحی و یا ایجاد سفره‌های آب زیرزمینی موقت بر اثر

فاضلاب یا قنات‌ها لازم است تا برآوردی از نفوذپذیری واحدهای مختلف در دست باشد. مجموعاً ۳۳ آزمایش نفوذپذیری آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های به دست آمده از گمانه‌ها و چاهک‌ها صورت گرفته است که تعداد ۲۵ آزمون به صورت بار ثابت و ۸ آزمون با بار افتان انجام شده‌اند. همانگونه که از آزمون‌ها می‌توان دریافت، واحدهای رسی و سیلتی دارای کمترین نفوذپذیری هستند که در بازه 10^{-4} cm/s تا 10^{-6} cm/s تغییر می‌کند. بیشترین میزان نفوذپذیری هم در واحد C-VI مشاهده می‌شود که در حدود 10^{-2} cm/s است.

۳-۸-۵-۱- نفوذپذیری در آبرفت (آزمایش لوفران)

این روش برای تعیین نفوذپذیری در مصالح آبرفتی انجام می‌شود. نتایج آزمایش‌های لوفران، داده‌های به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی را تا حد زیادی تأیید می‌کنند. تفاوت عمده این داده‌ها با داده‌های آزمایشگاهی در واحدهای گراولی است که این آزمایش‌ها نفوذپذیری این واحدها را کمی کمتر نشان می‌دهد. با توجه به هر دو دسته آزمایش و قضاوت مهندسی نفوذپذیری واحدهای مختلف به صورت جدول (۳-۶) قابل ارائه می‌باشد.

جدول ۳-۶- نفوذپذیری واحدهای مختلف خاکی

	Permeability(field)	
	Max	Min
	cm/s	cm/s
CL(C-I)	1×10^{-4}	1×10^{-6}
ML(C-II)	1×10^{-4}	1×10^{-5}
SC(C-III)	1×10^{-3}	1×10^{-4}
GC(C-IV)	1×10^{-3}	1×10^{-5}
GP-GM(C-V)	1×10^{-2}	1×10^{-3}
GM-GW(C-VI)	1×10^{-2}	1×10^{-3}

۳-۸-۶- برآورد ضرایب فشار جانبی خاک

در این گزارش به منظور تخمین ضریب فشار جانبی ساکن خاک (K_0) برای واحدهای C-I و C-II از

روش‌های پیشنهادی Alpan (۱۹۶۷) و Holtz (۱۹۸۱) و برای واحدهای C-II تا C-VI از روش پیشنهادی Jaky (۱۹۴۸) استفاده شده است. البته با توجه به نتایج آزمون تحکیم میزان K برای شرایط پیش‌تحکیمی نیز محاسبه گردیده است. جهت تخمین ضریب فشار جانبی محرک خاک (K_a) و ضریب فشار جانبی مقاوم خاک (K_p) از روش‌های رانکین و کلمب استفاده شده است. این مقادیر در جدول (۷-۳) ذکر شده است.

۷-۸-۳- پارامترهای ژئوتکنیکی

بر اساس ویژگی‌های ژئوتکنیکی لایه‌های خاکی و آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های اخذ شده از چاهک‌های اکتشافی و داده‌های ارائه شده در مطالعات، داده‌های طراحی مناسب به تفکیک واحدهای خاکی مختلف در طول محدوده مورد مطالعه تعیین شده و در جدول (۷-۳) ارائه گردیده است.

جدول ۷-۳- خلاصه‌ای از پارامترهای مهندسی و داده‌های طراحی برای واحدهای خاکی مسیر تونل

واحد زمین شناسی مهندسی	طبقه - بندی خاک	w	حدود آتریرگ		وزن واحد حجم		پارامترهای مقاومت برشی				پارامترهای دگر شکلی E_t	K	K_p	K_a
			LL	PI	γ_d	γ_t	c'	ϕ'	c	ϕ				
			%	%	(gr/cm^3)	(gr/cm^3)	(kg/cm^2)	($deg.$)	(kg/cm^2)	($deg.$)				
C-I	CL	۱۶.۵	۲۸	۹	۱.۷	۲.۲	-۰.۱	۲۶	-۰.۲	۲۲	۱۵۰-۲۰۰	-۰.۷۲	۴.۲۵	-۰.۳۵
C-II	ML	۱۶	۲۶	۷	۱.۷	۲	-۰.۳۵	۲۷	-۰.۴۵	۲۳	۲۰۰-۲۵۰	-۰.۷۰	۴.۸۰	-۰.۳۲
C-III	M-SC SC	۹	۲۹	۱۷	۱.۵	۱.۶	-۰.۱۵	۳۰	-۰.۲	۲۵	۲۰۰-۲۵۰	-۰.۶۷	۵.۴۰	-۰.۳۰
C-IV	GC	۹	۲۷	۹	۲	۲.۱	-۰.۰۷	۲۲	-۰.۱	۲۸	۲۵۰-۴۰۰	-۰.۷۰	۶.۰۰	-۰.۲۸
C-V	GP	۴	-	-	۲	۲.۵	-۰.۰۴	۲۵	-۰.۰۵	۲۳	۴۰۰-۴۵۰	-۰.۷۱	۷.۲۰	-۰.۲۵
C-VI	GM, GW	۴	-	-	۲	۲.۵	-۰.۰۵	۲۳	-۰.۰۸	۳۰	۴۰۰-۴۵۰	-۰.۷۳	۶.۴۰	-۰.۲۷

۹-۳- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در این فصل می‌توان مطالب زیر را به عنوان خلاصه‌ای از نتایج به

دست آمده از مطالعات ارائه نمود:

پروژه راه آهن تهران - تبریز در گستره آبخوان تهران در حال اجرا می‌باشد. در محل اجرای پروژه، جهت جریان آب زیرزمینی به طور کلی از شمال شرق به سمت جنوب غرب می‌باشد. به طور کلی می‌توان عنوان نمود که عمق برخورد به آب در محدوده پروژه بیش از ۲۵ متر می‌باشد. بطور کلی تونل بالاتر از تراز آب‌های و در ناحیه غیراشباع (به لحاظ آب‌های زیرزمینی) اجرا می‌گردد. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمون‌های توزیع دانه‌بندی خاک و سایر آزمون‌های آزمایشگاهی، واحدهای خاکی مسیر تونل به شش گروه اصلی زمین‌شناسی مهندسی شامل ۱- گروه C-I: رسوبات رسی ریز دانه با پلاستیسیته پایین (CL)، ۲- گروه C-II: سیلت همراه با ماسه (ML)، ۳- گروه C-III: ماسه سیلت و رس دار (SC-SM)، ۴- گروه C-IV: گراول رس دار (GC)، ۵- گروه C-V: گراول خوب دانه بندی شده و گراول سیلت دار (GW) و ۶- گروه C-VI: گراول بد دانه بندی شده (GP) قابل تفکیک می‌باشند. برای هر یک از گروه‌های مذکور، پارامترهای مهندسی و داده‌های مورد نیاز در طراحی تعیین شده است.

فصل چهارم

معرفی پروژه راه آهن تهران - تیریز و روش اجرای تونل های مسیر

۴-۱- مقدمه

ایستگاه راه آهن تهران، مرکز اصلی فعالیت های ریلی کشور می باشد و هر روز حجم سنگینی از آمد و شدهای ریلی از این پایگاه به دیگر شهرها انجام می پذیرد. تداخل مسیر راه آهن با خیابان های شهر، آلودگی هوای منطقه، خطر ناشی از تصادف قطار با خودروها و رهگذران پیاده و یا از خط خارج شدن قطار از مسیر راه آهن و ... ایجاب نمود تا بخشی از راه آهن تهران - تبریز پس از ساخت تونل، به زیر زمین انتقال یابد. طول قابل توجه تونل و عبور آن از محیط شهری و ساخت تونلی عریض با دو دهانه ۱۱/۶ متری مستلزم اتخاذ طرحی مناسب است. این تونل در طراحی اولیه قرار بود به روش پوش^۱ اجرا شود که روش ساخت آن به روش پوش و کند^۲ تغییر داده شد و اجرا گردید.

معارضین مختلف ترافیکی مدفون به عنوان یکی از مهمترین موانع اجرای تونل در محیط های شهری است که نحوه برخورد با آن و ارائه طرح نگهداری و یا جایگزین مناسب، مستلزم انتخاب طرح و روش اجرای متناسب با هر معارض می باشد. وجود تاسیسات شهری و معارضین مختلف، طراحی پروفیل طولی تونل را به شدت تحت تاثیر قرار داده و در بخشی از مسیر تونل به علت ضخامت زیاد روباره ناشی از این امر، تونل به صورت دو طبقه (با تعریف کاربری مناسب فضای ایجاد شده در طبقه بالا) و اجتناب از

^۱ Cut and Cover

^۲ Cover and Cut

خاکریزی زیاد اجرا گردید.

مسیر ریلی راه آهن تهران- تبریز به صورت شرقی- غربی و با طولی بیش از ۱۰ کیلومتر از ایستگاه راه آهن تهران تا رودخانه کن از محیط شهری که بافتی قدیمی و فرسوده دارد، عبور می کند. جهت رفع مشکلات و ناهنجاری های ناشی از عبور این خط، تصمیم بر زیرزمینی کردن راه آهن تهران- تبریز با هدف کمک به بازسازی بافت فرسوده شهری و ارتقای خدمات شهری به شهروندان، کاهش موانع توسعه شهری در مناطق ۱۷ و ۱۸، کاهش محدودیت های ترافیکی شهری، کاهش سوانح برخورد عابرین و وسایل نقلیه جاده ای با قطار، کاهش آلودگی های زیست محیطی، ایجاد امکان توسعه آتی حمل و نقل ریلی خط تهران- تبریز، کمک به ارتقاء کیفی خطوط راه آهن موجود اتخاذ گردید. ساخت این تونل، مستلزم ساخت گذر فرعی (Bypass) و انحراف تردد قطارها به روی این مسیر تا زمان اجرای کامل تونل می باشد. با ساخت گذر فرعی و با استفاده از خط راه آهن تهران- اهواز که در مجاورت این خط قرار دارد، انحراف تردد قطارها از مسیر موجود فراهم گردید. نمایی از موقعیت تونل در مناطق ۱۷ و ۱۸ تهران و مسیر (Bypass) در شکل (۴-۱) آورده شده است (حاجی میرزا آقا قناد، ۱۳۹۰).



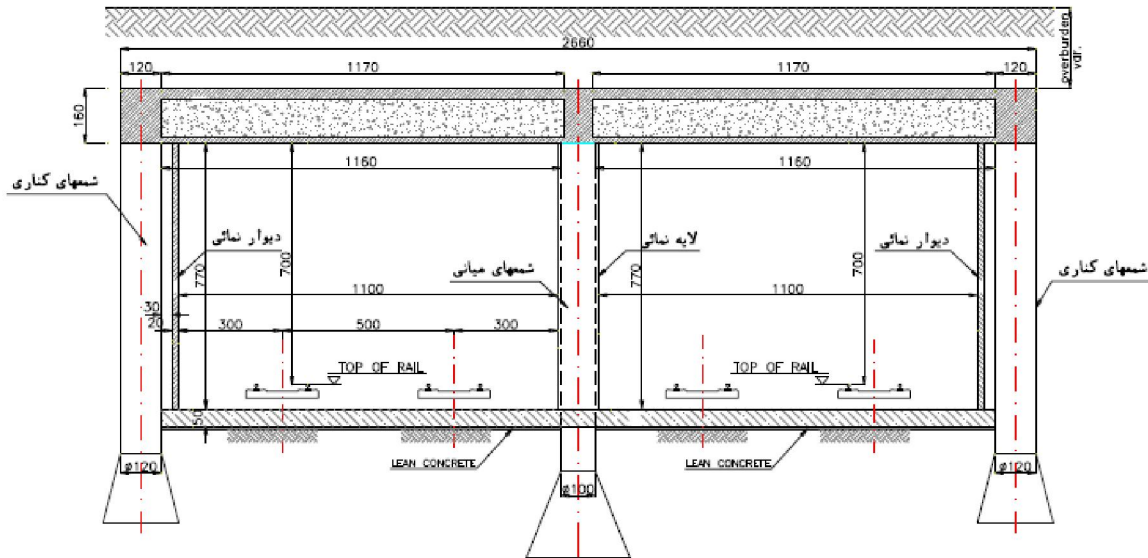
(الف)



شکل ۴-۱- نقشه موقعیت تونل در مناطق ۱۷ و ۱۸ تهران (الف) و مسیر Bypass (ب) (حاجی میرزا آقا قناد، ۱۳۹۰)

تونل راه آهن تهران - تبریز تونلی چهار خطه به طول ۶۴۰۰ متر بوده که بخش تونلی آن بدون در نظر گرفتن رمپ های ورودی و خروجی ۴۱۵۰ متر، با دو دهانه مستطیل شکل به عرض مفید ۱۱ متر و ارتفاع تمام شده ۷/۷ متر می باشد. سطح مقطع هر تونل حدود ۸۵ متر مربع می باشد. شمع های کناری به قطر ۱۲۰ سانتی متر و فاصله محور به محور ۳ متر دارای دو عملکرد حائل خاک اطراف و ستون سازه ای سقف تونل می باشد. قطر شمع های میانی نیز ۱ متر و فاصله محور به محور آن ها از هم به طور معمول و به جز بخش های دو طبقه و بخش کمی از محدوده یک طبقه که در واحد خاکی ضعیفی قرار دارد، ۶ متر می باشد. طول متوسط شمع ها در حدود ۱۳ متر در بخش های یک طبقه و ۱۶ متر در بخش های دو طبقه می باشد. در این پروژه ۸۸۰۰ شمع (که به صورت درجا و در یک مرحله نصب و بتن ریزی می شود) نصب شده است، البته از کل ارتفاع شمع، مقداری از آن داخل زمین است که این کار برای ایجاد پایداری و مقاومت انجام می شود؛ این پروژه طوری طراحی شده است که از لحاظ مشخصات فنی می تواند چهار خط قطار از خود عبور دهد. مسیر از نظر اندازه ابعاد (طول، عرض و ارتفاع) طوری طراحی شده است که هم

برای قطارهای معمولی و هم برای قطارهای برقی قابلیت استفاده را دارد. در شکل (۲-۴) مقطع عرضی تونل نشان داده شده است.



شکل ۲-۴-مقطع عرضی تونل (حاجی میرزا آقا فناد، ۱۳۹۰)

سقف تونل متناسب با روش اجرا و تعریف فضاهایی برای داشتن چندین جبهه کاری به دو صورت سقف شامل تیرهای پیش ساخته و دال درجا و سقف به صورت باکسهای درجای بتنی (دال بتنی توخالی) در نظر گرفته شده است. جدارهای تونل دیوار نمایی است و کف تونل یک دال ۳۰ سانتیمتری اجرا می شود که مقاومت لازم را برای عبور قطارها ایجاد می کند. در شکل (۳-۴) نمایی از مقطع این تونل در محل پروژه دیده می شود.



شکل ۴-۳- نمای از مقطع اجرایی تونل (خبرگزاری فارس)

معارضین مختلف ترافیکی و غیر ترافیکی مدفون از اساسی ترین مشکلات و موانع اجرای تونل در محیط های شهری است که عبور از آن مستلزم مکاتبات با ارگان های مختلف و سونداژ و شناسایی و انتخاب طرح و روش اجرای متناسب با نوع و شرایط قرارگیری هر معارض می باشد. قرارگرفتن تونل در محیط شهری سبب تداخل آن با تقاطع های مختلف ترافیکی از قبیل روگذرهای ماشینرو، زیرگذرهای ماشینرو و پیادهرو، تقاطع های همسطح ماشین رو و پل های عابر پیاده و معارضین غیر ترافیکی یا مدفون از قبیل خطوط گاز فشار قوی، خطوط توزیع و انتقال آب، خطوط برق فشار قوی، کانال های مخابراتی و فیبر نوری، خطوط انتقال سوخت، مسیل ها و قنوات و شبکه جمع آوری آب های سطحی می گردد و علاوه بر اینکه نیازمند طراحی متناسب می باشد، عبور از این معارضین افزایش هزینه و مدت زمان اجرا را نیز دربردارد.

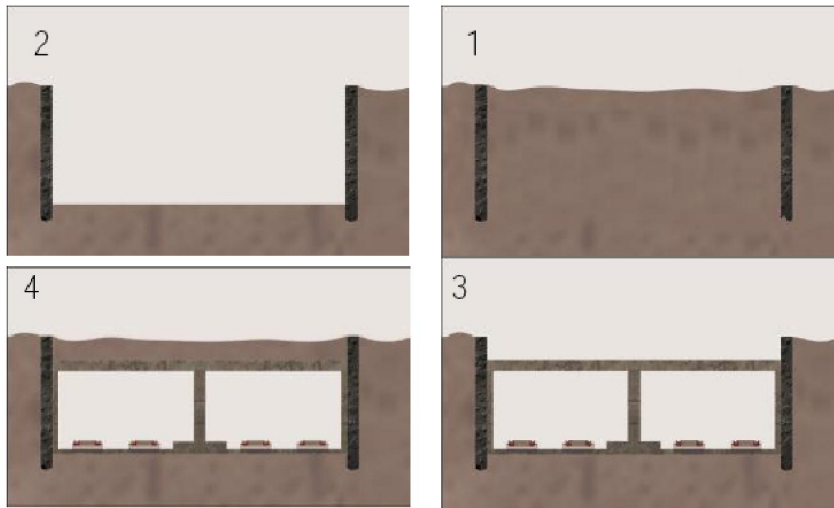
۴-۲- طراحی مقطع تونل و انتخاب روش اجرای مناسب

۴-۲-۱- روش کند و پوش (شمع های کناری به عنوان دیوار حائل خاک)

تونل راه آهن تهران- تبریز بر اساس نیاز کارفرما می بایست دارای دو دهانه مجاور هم باشد که در

هر دهانه دو خط ریلی قرار دارد. با توجه به این نیاز و ابعاد لازم برای حفاری و نیز میزان روباره کم، امکان اجرا به روش زیرزمینی میسر نبوده و در فاز مقدماتی مطالعات طراحی اجرای آن به صورت ترانشه باز و به روش کند و پوش در نظر گرفته شده بود.

اجرای تونل به روش حفاری ترانشه باز با توجه به قرارگیری آن در درون شهر مستلزم تملک و دسترسی به سطح زمین، حفظ ارتباطات شهری حین اجرا و پایدار سازی و تثبیت خاک جداره تونل می باشد، که شماتیکی از این روش نیز در شکل (۴-۴) نشان داده شده است:



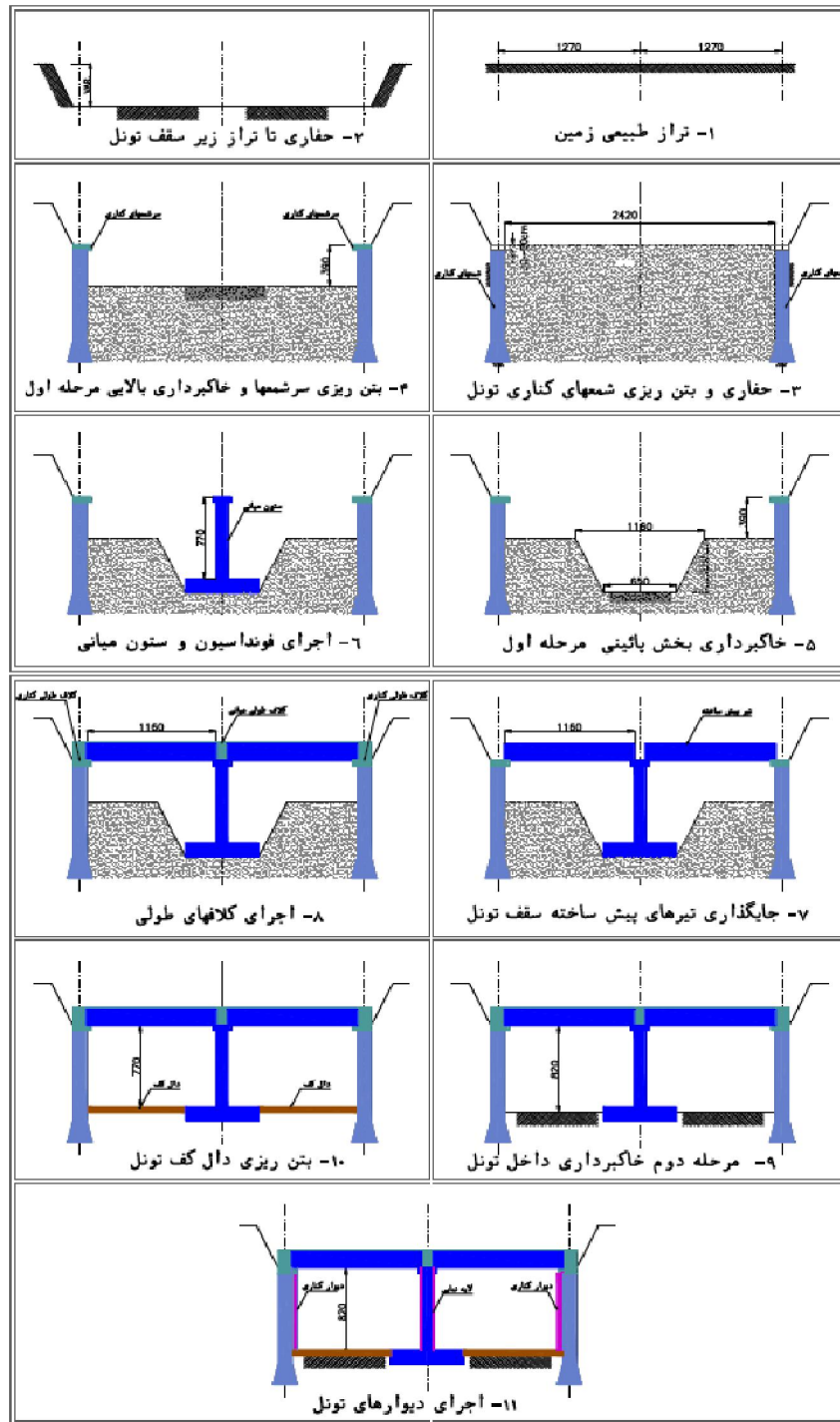
شکل ۴-۴- شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کند و پوش (ترانشه باز)

۱- اجرای شمع های کناری در جاریز دو طرف تونل به عنوان دیوار حائل خاک در مقابل فشار جانبی محرک. ۲- خاکبرداری تا تراز کف تونل. ۳- اجرای باکس تونل متشکل از دال کف، ستون میانی، دیوارهای کناری و سقف تونل. ۴- خاکریزی روی سطح تونل تا رسیدن به تراز خیابان های مجاور.

۴-۲-۲- روش کند و پوش (شمع های کناری به عنوان دیوار حائل خاک و ستون سازه ای - ستون های میانی)

جهت بهینه سازی طرح و اقتصادی کردن آن گزینه های مختلف بررسی شده و در نهایت یکی از

گزینه‌های مبنی بر عملکرد شمع‌های کناری به عنوان حائل خاک و ستون‌های سازه‌ای سقف تونل به عنوان طرح نهایی انتخاب گردید. در این طرح برای تامین باربری مورد نیاز شمع‌ها و نیز کاهش عمق مدفون، مقطع شمع در انتهای آن بزرگتر و به صورت پافیلی طراحی می‌گردد. اجرای پافیلی شمع‌ها با وجود صعوبت در اجرای آن، طول شمع را کاهش داده و دارای توجیه فنی و اقتصادی می باشد. بنابراین مراحل اجرا در این حالت و در شرایط داشتن تیرهای پیش ساخته سقف به شرح زیر می‌باشد. در شکل (۴-۵) مراحل اجرای این روش نشان داده شده است:



شکل ۴-۵- شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش کند و پوش (حاجی میرزا آقا قناد، ۱۳۹۰)

۱- خاکبرداری سطح زمین تا تراز سر شمع؛ ۲- اجرای شمعها و سرشمعهای کناری؛ ۳-

خاکبرداری جلوی شمع های کناری به صورت پله ای تا رسیدن به تراز زیر پی ستون؛ ۴- اجرای پی و ستون میانی؛ ۵- نصب تیرهای پیش ساخته؛ ۶- اجرای دال سقف و کلاف های کناری و میانی؛ ۷- تکمیل خاکبرداری داخل تونل؛ ۸- اجرای دال کف تونل؛ ۹- اجرای دیوار نمایی؛

مزیت این روش در سهولت حفاری و خاکبرداری در فضای باز و امکان استفاده از تهویه و نور طبیعی و دقت در اجرای ستون های میانی است که منجر به نمای نهایی مطلوبتری خواهد شد. این روش معایبی نیز دارد که اجرای آن با توجه به اینکه تونل در محیط شهری قرار دارد، عملاً غیر اقتصادی و امکان ناپذیر است. نکته دیگر اینکه با خاکبرداری جلوی شمع ها قبل از تکمیل قاب های سازه ای تونل، احتمال ایجاد تغییر شکل هایی در بالای گود و در شمع های کناری وجود دارد، ضمن اینکه با حفاری و ایجاد ترانشه باز نصب تیرهای پیش ساخته روی سقف تونل مستلزم اجرا در ارتفاع ۴ متری و قالب بندی و بتن ریزی سقف تونل مستلزم عملیات اجرایی در ارتفاع بیش از ۷ متر می باشد که صعوبت هایی به همراه دارد. علاوه بر این در این حالت لازم است معارضین تونل در ارتفاع به صورت موقت نگهداری و سپس سقف تونل اجرا گردد که حساسیت خاص برخی از معارضین از قبیل خطوط انتقال گاز، آب و لوله های سوخت و ... این اقدام را غیر ممکن می سازد.

۴-۲-۳- روش پوش و کند (شمع های کناری به عنوان دیوار حائل خاک و ستون

سازه ای - شمع های درجاریز میانی)

فرق این طرح با طرح قبل این است که علاوه بر اینکه شمع های کناری به صورت درجاریز اجرا می گردد، شمع های میانی نیز به صورت درجا اجرا شده و بعد از اجرای تیرهای عرضی و تکمیل قاب های سازه ای خاکبرداری داخل تونل انجام می شود. سقف تونل در این روش می تواند به دو صورت تیر و دال درجاریز و تیر پیش ساخته با دال درجا اجرا گردد که در زیر روش اجرای هر دو حالت و مزایا و معایب هر کدام ارائه می گردد.

نکته قابل توجه آنکه در روش های پوش و کند همانگونه که از نام این روش بر می آید به طور اصولی می بایست ابتدا اجرای سقف و پوشاندن آن به طور کامل انجام و پس از برگرداندن زمین به حالت اولیه و برقراری ترافیک اقدام به حفاری زیر سقف گردد. اما در پروژه حاضر به سبب آنکه در عمده طول تونل فضای بالای سقف در اختیار پروژه بود عملاً تعجیلی در پوشاندن سقف وجود نداشت.

۴-۲-۳-۱- روش پوش و کند (شمع - ستون های کناری و میانی و سقف در جاریز)

در این روش بعد از اجرای شمع های کناری و میانی به صورت درجا، سقف تونل اجرا و سپس خاکبرداری داخل تونل انجام می گردد. سازه دال سقف تونل در این طرح، باکس های بتنی مجاور هم است. ارتفاع سقف سازه ای نهایی معادل ۱۶۰ سانتیمتر (برای روباره زیر ۳ متر) و ۱۸۰ سانتیمتر (برای روباره بین ۳ تا ۴ متر) می باشد. فضای بین تیرهای عرضی با ماده پرکننده (یونولیت) که بعنوان قالب بتن ریزی بخش فوقانی است، پرمی گردد و سپس بخش فوقانی و تیرهای عرضی سقف تونل اجرا می گردد. روش اجرای تونل در این حالت به ترتیب شامل مراحل زیر است:

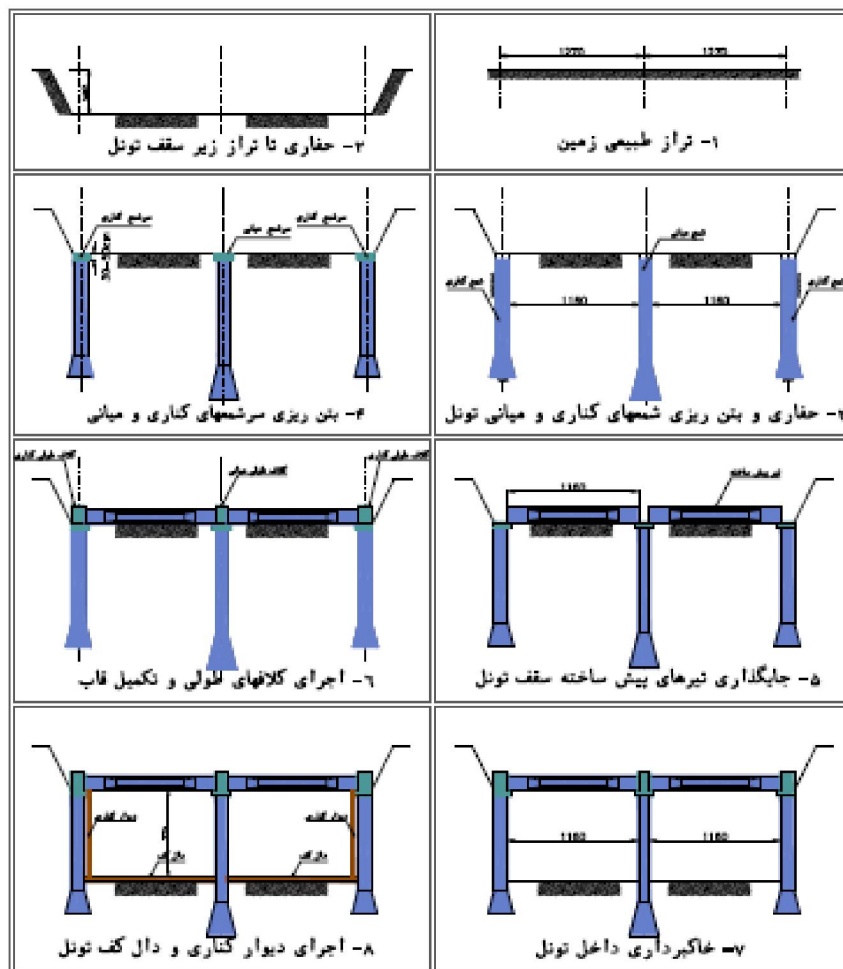
۱- خاکبرداری سطح زمین تا تراز سر شمع؛ ۲- اجرای شمع های کناری و میانی؛ ۳- اجرای دال تحتانی سقف؛ ۴- اجرای پرکننده (یونولیت گذاری) فضای خالی سقف؛ ۵- اجرای دال ۳۰ سانتیمتری بخش فوقانی به همراه کلاف های طولی و عرضی بتنی؛ ۶- خاکبرداری داخلی تونل؛ ۷- اجرای دال کف؛ ۸- اجرای دیوار نمایی کناری؛

ایجاد دسترسی های محلی برای ورود ماشین آلات کارگاهی برای حمل و نصب تیرهای پیش ساخته و عدم انسداد کل مسیر کارگاه در این روش ایجاد چندین جبهه کاری برای کارگاه به موازات اجرای دال درجا روی تیرهای پیش ساخته، عدم نیاز به قالب بندی شمع و ستون های میانی با توجه به درجاریز بودن آنها، تغییر شکل های کمتر در زمین های مجاور حریم و عملکرد بهتر سازه ای با توجه به خاکبرداری بعد از تکمیل قاب های سازه ای از دیگر مزایای این روش می باشد. معایب این طرح نیز شامل

هزینه های بالای اجرا، دقت کمتر در اجرای شمع های میانی، سرعت اجرای کم، خاکبرداری و اجرای دیوار و دال کف تونل در فضای تونلی و بسته می باشد که با توجه به سازگاری مناسب این طرح با عبور تونل از محدوده معارضین و ایجاد جبهه کاری، در نهایت حدود ۲۰٪ از کل سقف با این روش اجرا گردیده است.

۴-۲-۳-۲- روش پوش و کند (شمع-ستون های کناری و میانی و سقف پیش ساخته)

این طرح مطابق روش قبلی بوده و تنها تفاوت در این است که تیرهای عرضی به صورت پیش ساخته و با عرض بال های ۵۵ سانتیمتر و ضخامت جان ۲۰ سانتیمتر طراحی شده است. روش اجرای تونل در این حالت به ترتیب شامل مراحل زیر است (شکل (۴-۶)):



شکل ۴-۶- شماتیکی از مراحل اجرای تونل به روش پوش و کند (حاجی میرزا آقا قناد، ۱۳۹۰)

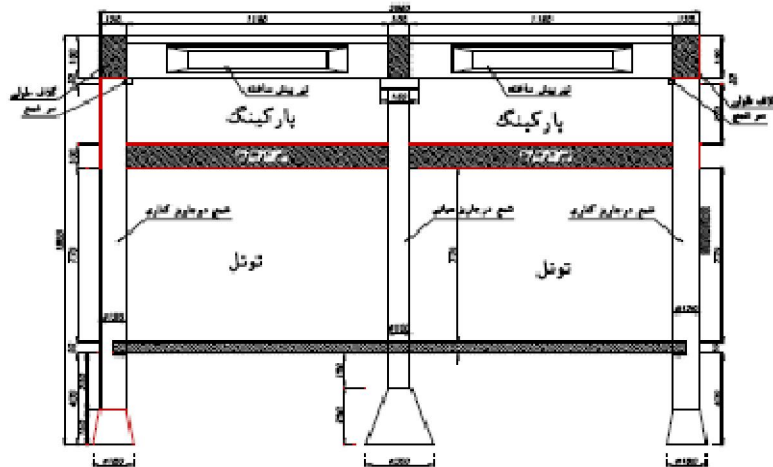
۱- خاکبرداری سطح زمین تا تراز سر شمع؛ ۲- اجرای شمع های کناری و میانی؛ ۳- اجرای سر شمع های کناری و میانی (محل نشیمن تیرهای پیش ساخته)؛ ۴- نصب تیرهای پیش ساخته؛ ۵- اجرای کلاف های طولی کناری و میانی سقف؛ ۶- نصب ورق های فولادی به عنوان قالب دال در جای سقف؛ ۷- بتن ریزی نهایی سقف و دیگر عملیات اجرایی داخل تونل مطابق روند قبل؛

امکان خاکبرداری داخل تونل با فضایی با نور و تهویه طبیعی با در نظر گرفتن بازشوه های سراسری موقت کناری (کامل نپوشاندن سقف) و استفاده از آن جهت عملیات اجرایی داخل تونل، سرعت اجرایی بالا، هزینه پایین، سهولت اجرایی، سازگاری مناسب با معارضین، عملکرد مناسب سازه ای از مزایای این روش می باشد. تنها نکته منفی این روش دقت پایین در اجرای شمع های میانی است که به صورت درجاریز اجرا شده و دقت خاصی را با توجه به نمایان شدن آن می طلبد. با توجه به هزینه پایین و سرعت اجرایی بالای این طرح، حدود ۸۰٪ از سقف تونل با این روش اجرا گردید که تاثیر مثبتی در پیشرفت پروژه داشت.

۳-۴- بخش دو طبقه تونل

بخش تونلی با توجه به تراز نهایی زمین تمام شده روی سقف تونل و داشتن روباره های مختلف، در بخش هایی از مسیر به صورت یک طبقه و در بخش هایی نیز که تونل برای عبور از معارضین متعدد عمیقتر می باشد، به صورت دو طبقه در نظر گرفته شده است. در بخش های یک طبقه، تونل شامل شمع ستون های کناری با فواصل ۳ متر و شمع ستون های میانی در فواصل ۶ متری است، سقف تونل نیز بسته به نوع روش اجرا می تواند به صورت پیش ساخته (تیرهای پیش ساخته با فواصل ۳ متری روی سر شمع ها و دال در جای فوقانی) و یا درجاریز (سقف باکسی شکل) باشد. در بخش هایی از مسیر که روباره روی سقف تونل زیاد است می توان با تعریف فضایی در بالای تونل از خاکریزی با ضخامت زیاد روی سقف و

سنگین شدن طرح سازه ای سقف اجتناب نمود و علاوه بر آن با تعریف کاربری مناسب از فضای ایجاد شده و به عنوان طبقه دوم استفاده نمود (شکل (۷-۴)).



شکل ۷-۴- شماتیکی از مقطع عرضی تونل در بخش دوطبقه (حاجی میرزا آقا قناد، ۱۳۹۰)

در همین راستا با فرض داشتن کاربری پارکینگ و یا انبار برای فضای مذکور ارتفاع کل این طبقه (از بالای سقف اول تا زیر سقف دوم) معادل ۳ متر در نظر گرفته شده است. روش اجرای این بخش از تونل ترکیبی از دو روش کند و پوش و پوش و کند می باشد، بدین ترتیب که بعد از اجرای شمع های کناری خاکبرداری تا تراز کف پارکینگ (طبقه اول) انجام شده، شمع ستون میانی تا تراز کف پارکینگ اجرا و پس از آن به ترتیب کف پارکینگ (سقف اول) ستون میانی تا تراز زیر سقف پارکینگ بتن ریزی شده و سقف پارکینگ تکمیل می گردد و سپس فضای داخل تونل حفاری و خاکبرداری می شود. بنابراین روش اجرا در این بخش شامل مراحل زیر است:

- ۱- حفاری شمع های کناری و انتهای پافیلی آن ها؛ ۲- قرار دادن قفسه آرماتور شمع های کناری به همراه آرماتورهای انتظار خم شده اتصال آن در تراز کف پارکینگ؛ ۳- اجرای شمع های کناری تا زیر سقف؛
- ۴- اجرای سر شمع های کناری؛ ۵- حفاری تا تراز زیر سقف طبقه اول تونل؛ ۶- حفاری و اجرای شمع های

میانی تا تراز زیر سقف طبقه اول تونل؛ ۷- بازکردن آرماتورهای انتظار اتصال شمع های کناری با دال در جای کف پارکینگ و اجرای آرماتوربندی دال درجا و تعبیه آرماتورهای اتصال شمع میانی؛ ۸- اجرای دال درجای سقف تونل؛ ۹- قالب بندی و بتن ریزی ستون های میانی به طول ۳ متر؛ ۱۰- قالب بندی و بتن ریزی سر ستون های میانی به ضخامت ۳۰ سانتیمتر؛ ۱۱- نصب تیرهای پیش ساخته؛ ۱۲- اجرای دال سقف پارکینگ با کلاف های طولی؛ ۱۳- حفاری تا تراز زیر کف طبقه اول تونل و عملیات کف سازی.

لازم به ذکر است که بعد از اجرای دال درجای سقف تونل، مراحل ۹ تا ۱۳ فوق می تواند به موازات هم اجرا شوند و این یکی از مزیت های این روش است که علاوه بر استفاده از فضای حفاری شده به عنوان پارکینگ و یا هر کاربری دیگر و اجتناب از خاکریزی زیاد روی تونل و حجیم شدن سازه تونل و توجیه فنی و اقتصادی مناسب، در صورت اجرا شدن دال درجا، جبهه های کاری متعددی ایجاد می شود.

۴-۴ - ملاحظات سازه ای

در گزینه نهایی اهم بارهای وارد موثر بر تونل عبارتند از بار مرده ناشی از وزن المان ها، بار خاک روی سقف، بار ترافیک ناشی از عبور وسایل نقلیه روی سقف، بار ساختمان های خاصی که در آینده ممکن است روی تونل ساخته شود، بار اختلاف دما، بار زلزله و بار خاک، بار خاک به صورت محرک برای شرایط کوتاه مدت (عدم وجود دال کف) و به صورت سکون برای شرایط بلند مدت در نظر گرفته شده است.

بار موجود روی سقف به سبب اینکه کاربری زمین روی تونل مشخص نبوده، به دو صورت بار ترافیکی (خاکریزی و احداث اتوبان روی سقف) و بار ساختمان (احداث ساختمان های خاص و سبک روی تونل) در نظر گرفته شده است. دال کف علاوه بر کف برابر پیوسته برای روسازی، نقش قید فشاری برای شمع ها را نیز دارا می باشد. مقطع تیرهای سقف چنان انتخاب شده تا تواما سهولت اجرا، معماری شکل و ملاحظات فنی را پوشش دهد. برای طراحی دال کف نیز بر اساس تنش های حاصل از تحلیل سه بعدی

اقدام به تدقیق ضخامت کف و تعبیه آرماتور به میزان و شکل مناسب شده است.

۴-۵- نتیجه گیری

در مورد تونل های مورد بررسی با سطح مقطع ۸۵ متر مربع برای هر کدام، طراحی های متفاوت بر مبنای مراحل اجرای مختلف انجام گردیده است که عبارتند از طراحی به روش ترانشه باز قائم با استفاده از شمع های حائل موقت و باکس سازه ای تونل، حفاری به روش ترانشه باز با استفاده از شمع های حائل که امان اصلی سازه ای تونل نیز هستند و احداث پایه میانی به صورت ستون، حفاری به روش پوش و کند با استفاده از شمع های حائل سازه ای کناری و احداث پایه میانی به صورت شمع. در بین گزینه های مذکور، استفاده از روش آخر به سبب سرعت اجرا، تداخل حداقل با معارضین در مسیر تونل و ایمنی و هزینه اجرا به عنوان گزینه نهایی انتخاب گردید. برای امکان ایجاد چندین جبهه کاری و سرعت بیشتر بخشیدن به اجرا و هماهنگی با برنامه زمان بندی در این گزینه، دو حالت داشتن سقف پیش ساخته در بیشتر طول مسیر (به سبب سرعت بیشتر اجرا) و سقف درجاریز در بخش های محدود، خود سبب پیشرفت اجرای پروژه گردید.

فصل پنجم

ارزیابی و تحلیل عددی اجرای تونل به روش NATM در

پروژه راه آهن تهران - تبریز

۵-۱- مقدمه

همانگونه که در فصل سوم و چهارم اشاره شد تونل راه آهن تهران- تبریز تا کیلومتراژ ۶ به روش پوش و کند طراحی و اجرا شده بود. با توجه به روباره موجود در این ناحیه که حداکثر ۳ متر بوده امکان فنی اجرای تونل به این روش فراهم بوده است. اما پس از این مقطع و حدوداً بطول ۱ کیلومتر بدلیل افزایش روباره تا حدود ۶ متر و بدلیل خاک سست و ضعیف منطقه عملاً اجرای این روش مشکلات و هزینه‌هایی برای طرح دربرداشته است و لذا لزوم بررسی و تحلیل روش تونلسازی سنتی (NATM) در این بخش اجتناب ناپذیر بنظر می‌رسد. در این فصل با در نظر گرفتن موارد فنی طراحی، شرایط خاص منطقه اعم از سطح مقطع بزرگ و روباره اندکی بیشتر نسبت به کیلومتراژ قبل و نیز الزامات و جنبه‌های مختلف موجود از سوی کارفرما، اقدام به مدلسازی تونل‌های مذکور در این ناحیه بحرانی به روش NATM توسط روش عددی تفاضل محدود و نرم افزار $FLAC$ ۳D شده و در نهایت به ارزیابی و بررسی نتایج حاصل از این تحلیل عددی پرداخته شده است.

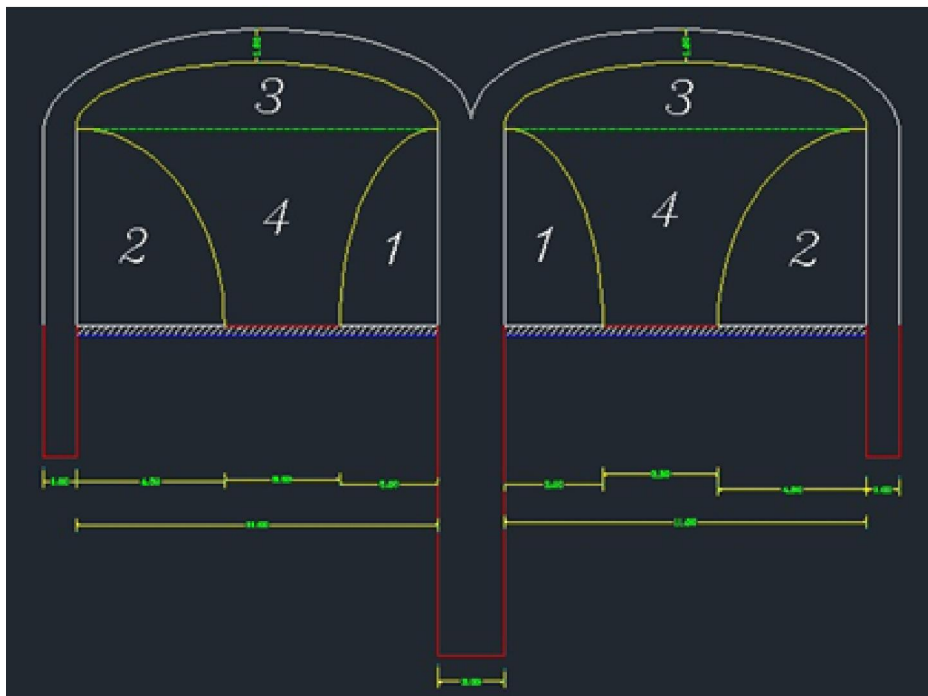
۵-۲- طراحی مقطع پیشنهادی برای تونل NATM

با توجه به الزامات موجود در طرح در رعایت حداقل عرض ۱۱ متر برای هر کدام از تونل‌ها و نیز حداقل ارتفاع ۷/۷ تا ۸ متر برای هر تونل و حداقل عرض ستون خاکی ۱ تا ۲ متر بین دو تونل (همانگونه

که در فصل چهارم اشاره شد)، در ابتدا با توجه به ابعاد بهینه مدل بمنظور صفر شدن میزان جابجایی‌ها در مرزها بر اثر حفاری تونل، مدلی به طول ۳۳ متر، ارتفاع ۳۰ متر و ۲۵ متر در راستای امتداد تونل انتخاب شد. همچنین این ابعاد با توجه به تقارن موجود در محیط، مربوط به نصف کل مدل می‌باشد. لذا عرض حفاری انتخاب شده ۱۳ متر و ارتفاع آن ۹ متر می‌باشد.

همچنین در شکل (۱-۵) هندسه طرح پیشنهادی دو تونل بمنظور مدلسازی با استفاده از نرم‌افزار

۳D FLAC مشاهده می‌شود. در بخش بعد به مدلسازی این هندسه پیشنهادی پرداخته خواهد شد.



شکل ۱-۵- هندسه کلی پیشنهادی برای تونل دوقلوی NATM

۳-۵- مدلسازی با استفاده از نرم افزار ۳D FLAC

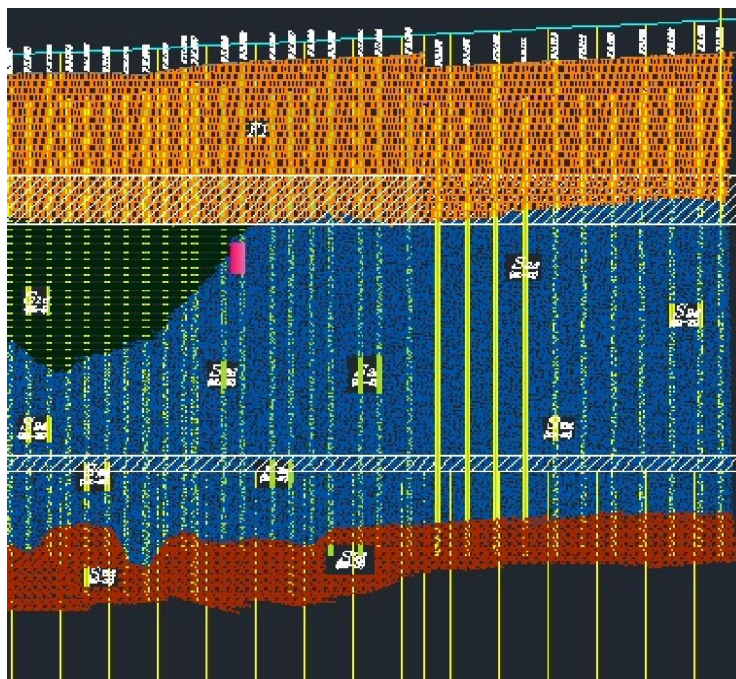
به‌منظور مدلسازی مقطع مورد بررسی در نرم افزار ۳D FLAC لازم است که به اندازه کافی از دهانه ورودی تونل فاصله داشته باشد تا بتوان فرض صفحه‌ای بودن کرنش را در نظر گرفت. برای حذف اثر اندازه ابعاد مدل بر روی نتایج حاصل از مدلسازی عددی، ابعاد آن، تا جاییکه اثر شرایط مرزی بر روی تعادل

اولیه مدل از میان برود، ادامه داشته است. برای در نظر گرفتن رفتار پلاستیک مصالح زمین، از مدل رفتاری موهر- کولمب استفاده شده است. با توجه به اصول مدلسازی عددی و همچنین ترتیب عملیات اجرایی، مراحل مدلسازی به ترتیب زیر صورت گرفته است (میکائیل، ۱۳۸۶):

۱. انتخاب محدوده مناسبی از زمین اطراف تونل
۲. انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن
۳. ترسیم هندسه مقطع تونل و ابعاد مدل
۴. اعمال شرایط مرزی و اولیه
۵. حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از حفاری
۶. حفاری تونل و اعمال ترخیص تنش متناسب
۷. نصب سیستم نگهداری
۸. ترخیص کامل تنش تا رسیدن به حالت پایدار

۵-۳-۱- انتخاب محدوده مناسبی از زمین مورد مطالعه

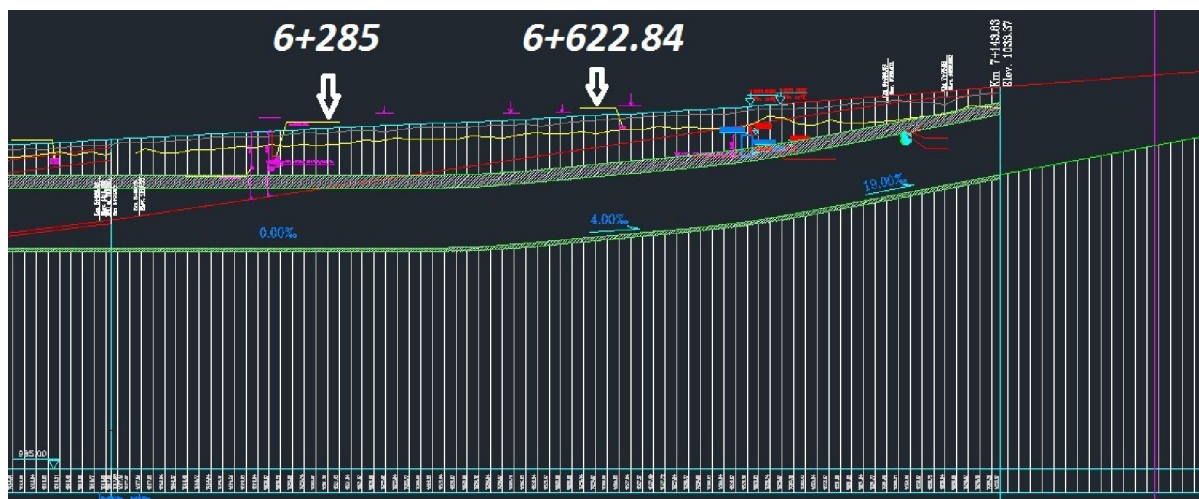
بطور کلی در محدوده کیلومتراژ ۶ تا ۶+۷۰۰ که منطقه مورد مطالعه و بررسی در این تحقیق است، عمده مسیر به ترتیب شامل خاک‌های دستی (روباره)، خاک‌های سیلتی و رسی سیلتی (ML) و خاک‌های ماسه‌ای (SM) می‌باشد که در شکل (۵-۲) تراز این سه لایه، سقف و کف تونل و نیز سطح زمین (با خط سبز) دیده می‌شوند.



شکل ۵-۲- مقطع طولی زمین شناسی مسیر تونل (گزارش مطالعات زمین شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل راه آهن تهران-

تبریز)

در شکل (۳-۵) نمایی از مقطع طولی مورد مطالعه از مسیر راه آهن تهران- تبریز از کیلومتر ۶ به بعد مشاهده می شود. همانطور که در شکل دیده می شود مقطع بحرانی، مقطع بین کیلومتر ۶+۲۸۵ تا ۶+۶۲۲.۸۴ بوده که دارای حداکثر روباره بین ۵ تا ۶ متر می باشد (شیب تونل ها در این مقطع تقریباً صفر در نظر گرفته شده است) و بعلت روباره زیادتر از مقاطع قبلی، لزوم امکان سنجی روش NATM در آن احساس می شود.



شکل ۵-۳- مقطع طولی مسیر تونل حد فاصل کیلومتر ۶ تا ۷ (گزارش مطالعات زمین شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل راه آهن تهران- تبریز)

۵-۳-۲- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

در مدلسازی عددی انجام گرفته با توجه به شرایط زمین که خاکی بوده و محیط پیوسته می باشد لذا از نرم افزار تحلیل عددی ۳D FLAC بهره گرفته شده است که مخصوص محیطهای پیوسته و شبه پیوسته بوده و بر اساس روش عددی تفاضل محدود می باشد. چندین مدل رفتاری در برنامه ۳D FLAC موجود می باشد که بسته به شرایط مساله می توان از یک یا چند نوع آن استفاده کرد. یکی از این مدل های رفتاری، مدل پلاستیک موهر- کولمب می باشد. این مدل نمایانگر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می رسند. این مدل رفتاری در مکانیک خاک و سنگ، برای حالت پلاستیک، مدل مرسوم می باشد (Itasca, ۲۰۰۲). پارامترهای مورد نیاز در مدل پلاستیک موهر- کولمب عبارتند از: جرم حجمی، مدول حجمی، مدول برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک، زاویه اتساع و مقاومت کششی. چنانچه هر یک از این پارامترها تعریف نشوند، برنامه مقدار صفر را برای آن منظور می کند. در این تحلیل با استفاده از مدل موهر- کولمب و پارامترهایی نظیر مدول حجمی، مدول برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و

مقاومت کششی توده خاکی منطقه مورد بررسی مدلسازی شده و با توجه به المان‌های موجود و نیز شرایط خاص منطقه اعم از سطح مقطع زیاد دو تونل و نیز روباره کم در محیط شهری، مدلی تهیه شده که نتایج آن در زیر بررسی می‌شود. در فصل سوم به ویژگی‌های ژئوتکنیکی این سه نوع خاک بطور کامل اشاره شده است. در جدول (۱-۵) نیز ویژگی‌های استفاده شده از این سه لایه خاکی در تحلیل عددی آورده شده است.

جدول ۱-۵ - پارامترهای مهندسی و داده‌های طراحی پیشنهادی مورد استفاده در تحلیل عددی برای واحدهای مقطع مورد مطالعه

σ_T (kg/cm^2)	γ_t (gr/cm)	K_0	φ (deg)	C (kg/cm^2)	ν	E (kg/cm^2)	عمق (m)	پارامتر نوع خاک
۰.۰۱	۱.۸	۰.۵۸	۲۵	۰.۰۵	۰.۲	۵۰	۶	خاک دستی
۰.۵۹۵	۲	۰.۷	۲۳	۰.۴۵	۰.۳۳	۲۲۵	۱۰	خاک سیلتی
۰.۲۵۵	۱.۶	۰.۶۷	۲۵	۰.۲	۰.۴	۲۲۵	۱۴	خاک ماسه‌ای

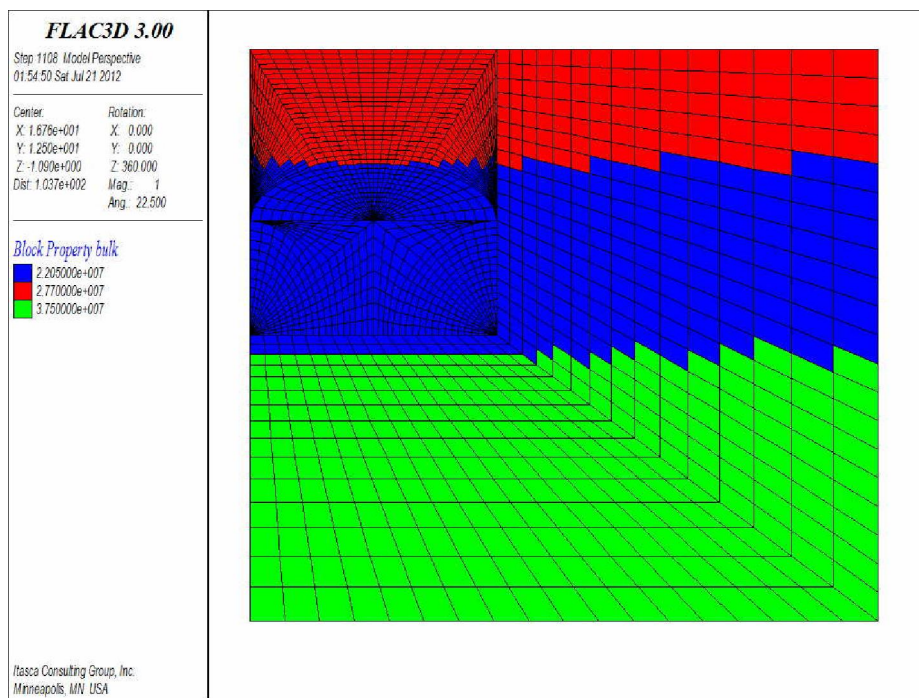
با استفاده از روابط (۱-۵) و (۲-۵) می‌توان مدول حجمی (K) و مدول برشی (G) هر یک از لایه‌ها

را بدست آورد:

$$K = \frac{E}{2(1 - \nu)} \quad (1-5)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2-5)$$

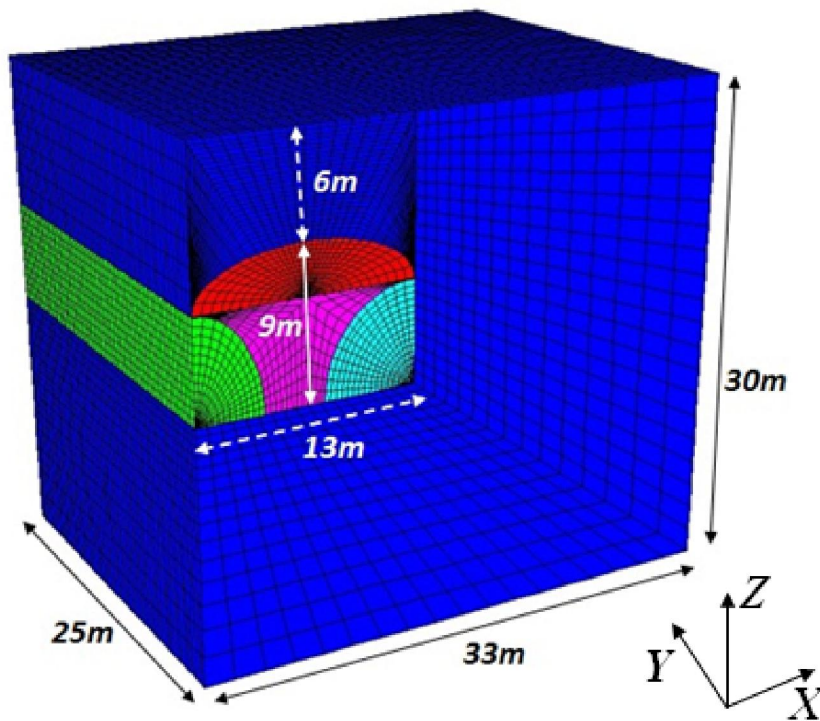
همچنین در شکل (۴-۵) سه لایه مدلسازی شده در نرم افزار آمده است.



شکل ۴-۵- مدل ایجاد شده در نرم افزار به همراه لایه بندی

۵-۳-۳- ترسیم هندسه و ابعاد مدل

در شکل (۵-۵) هندسه و ابعاد مدل با توجه به مطالب گفته شده در بخش ۵-۲ مشاهده می شود که ابعاد بر حسب متر می باشند. همچنین برای اعمال شرایط مرزی در مدل، دیواره سمت چپ و راست مدل در راستای x ، دیواره جلو و عقب مدل در راستای y و کف مدل نیز در راستای z ثابت شده است. محیط خشک و بدون وجود آب بوده و نیرویی نیز بر سطح مدل اعمال نشده است.

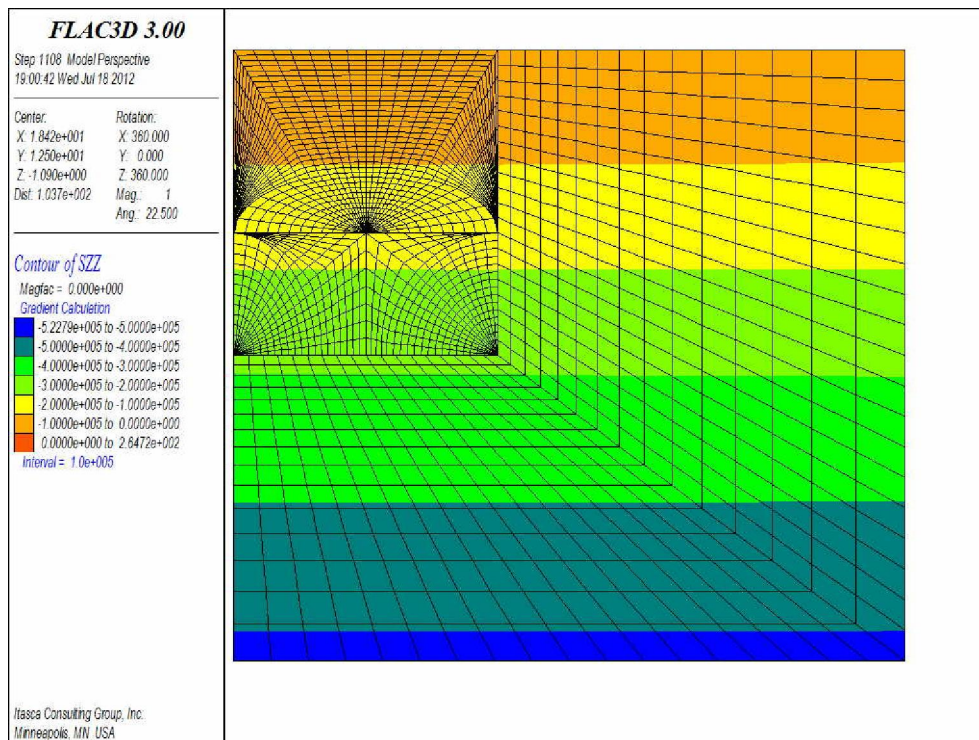


شکل ۵-۵- ابعاد مدل ایجاد شده در نرم افزار

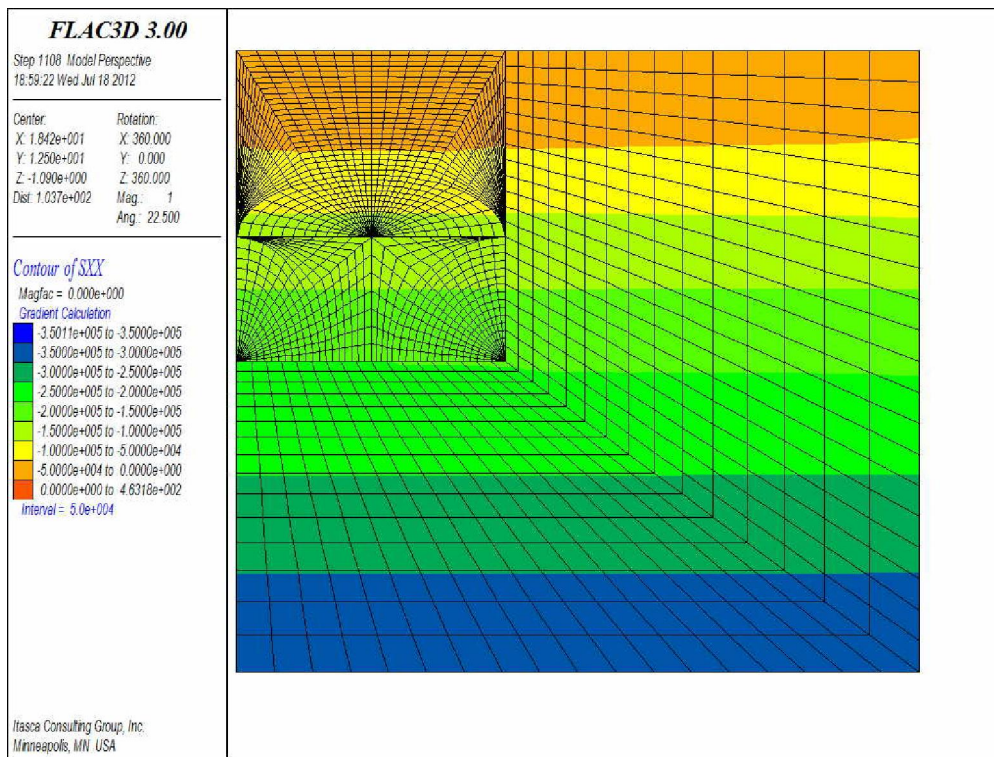
۵-۳-۴- به تعادل رساندن مدل پیش از حفاری

گام اول در حل مدل عددی این بوده است تا فرآیند مطابق با روند موجود در طبیعت روی دهد و شرایط مدل نزدیک به واقعیت شبیه‌سازی شود. این عمل برای نشان دادن شرایط تعادل در مدل قبل از حفر تونل‌ها است. در نتیجه لازم است مدل با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی، شرایط مرزی و تنش‌های برجا، قبل از ایجاد حفره حل شود. در این حالت مدل به تعادل اولیه رسیده و شرایط طبیعی زمین را دارا خواهد بود. لذا باید در مرحله بعد جابجایی‌ها و سرعت‌ها در گره‌ها را صفر کرد تا شرایط موجود در طبیعت روی مدل اعمال گردد. در شکل (۵-۶) و (۵-۷) به ترتیب کنش‌های تنش عمودی و تنش افقی با توجه به شرایط مرزی و اعمال شرایط اولیه مشاهده می‌شود. با توجه به میزان K ، نتیجه تحلیل روش‌های عددی برای نسبت تنش‌ها در حالت برجا برابر $0/6$ است. لازم به ذکر است با توجه به گزارشات

ژئوتکنیکی، نسبت تنش افقی به عمودی بکار برده شده در تحلیل‌ها برابر ۰/۶۷ در نظر گرفته شده است. مطابقت مقادیر تنش‌هایی که توسط وزن بار توده خاک در اعماق مختلف بوجود می‌آید و کنترهای تنش عمودی، نشان دهنده تحلیل درست برای تنش‌های عمودی است.



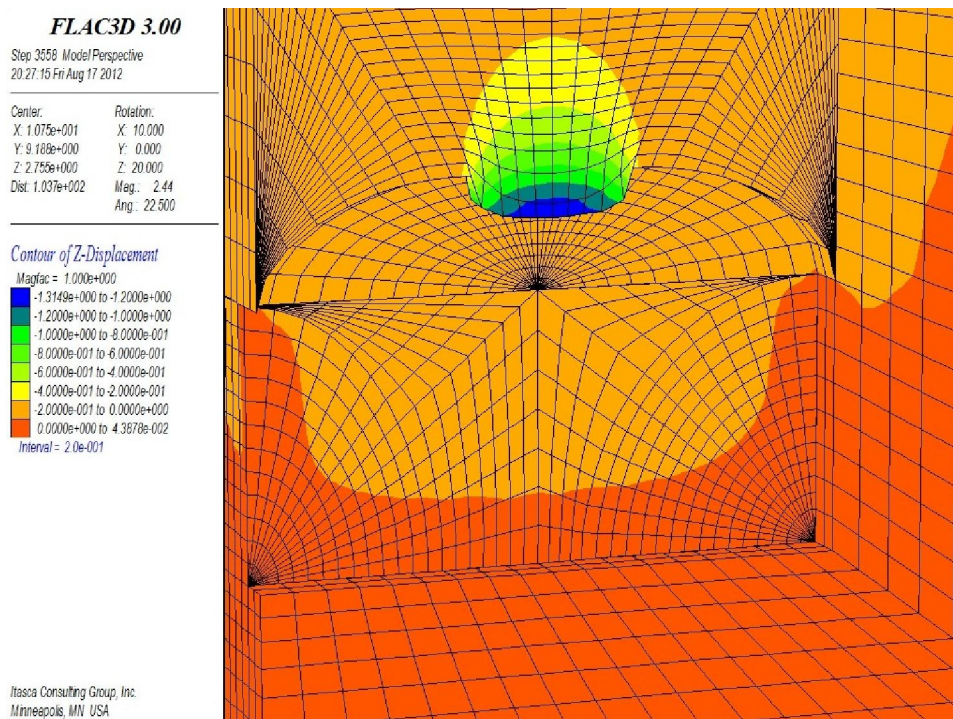
شکل ۵-۶- کنترهای تنش عمودی در مدل



شکل ۵-۷- کنتورهای تنش افقی در مدل

۵-۳-۵- انتخاب روش حفاری مناسب

همانطور که رابسونج طی نظریه خود پیرامون شکست برشی اطراف یک بازکننده زیرزمینی نشان داد که حفاری و اجرای یک گام پیشروی تونل با سطح مقطع بزرگ بصورت تمام مقطع امکان پذیر نمی باشد لذا در ابتدا به مدلسازی اجرای یک گام پیشروی از تونل ارائه شده بصورت تمام مقطع پرداخته خواهد شد. همانطور که مدلسازی در شکل (۵-۸) نشان می دهد امکان اجرای تمام مقطع این تونل وجود نداشته و بعلت شریط زمین و سطح مقطع بزرگ تونل، مدل به تعادل نرسیده و ریزش در سقف تونل ایجاد می شود. از این رو امکان سنجی اجرای این تونل بصورت حفاری مرحله ای بررسی خواهد شد.

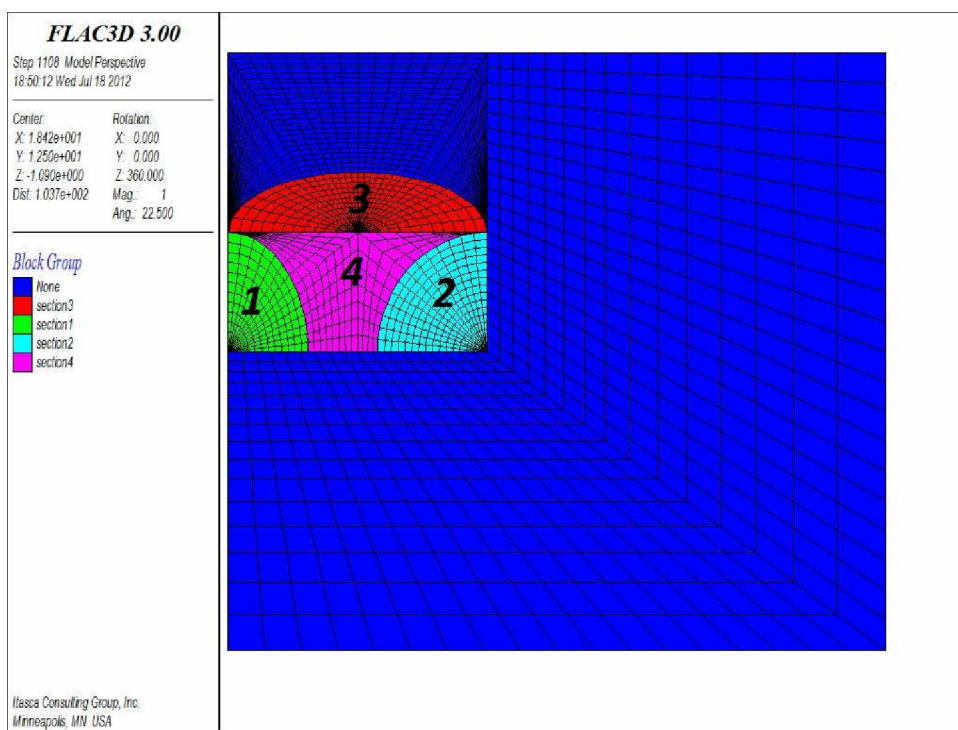


شکل ۵-۸- ریزش بوجود آمده در سقف تونل بواسطه حفاری تمام مقطع

همانگونه که در فصل دوم اشاره شد از بین روش‌های متداول در تونلسازی در محیط‌های شهری کم عمق روشی که تاثیر بسیار کمتری در کاهش نشست‌های سطح زمین ناشی از حفاری دارا بوده روش NATM با استفاده از گالری‌های جانبی می‌باشد. روند کلی عملیات در این روش به این صورت است که ابتدا دو گالری در کناره‌های تونل حفاری و نگهداری شده، سپس قسمت مرکزی طی دو یا سه پله حفاری و نگهداری می‌شود و در نهایت نگهداری‌های داخل مقطع حذف و برداشته می‌شود. در مدلسازی روش حفاری مرحله‌ای (NATM) بدلیل نزدیکی تونل به سطح زمین و حساسیت‌های کارفرما بر روی نشست سطح، لذا بیشتر مقایسه‌ها بر مبنای میزان جابجایی‌های قائم و سپس جابجایی‌های افقی در مدل بوده و از تمرکز بر سایر موارد پرهیز شده است. همچنین میزان جابجایی‌های قائم در مدل، معیار سنجش نبوده و ملاک تعیین ناپایداری در تونل مقایسه میزان کرنش‌های بوجود آمده در اثر حفر تونل با کرنش بحرانی

می باشد.

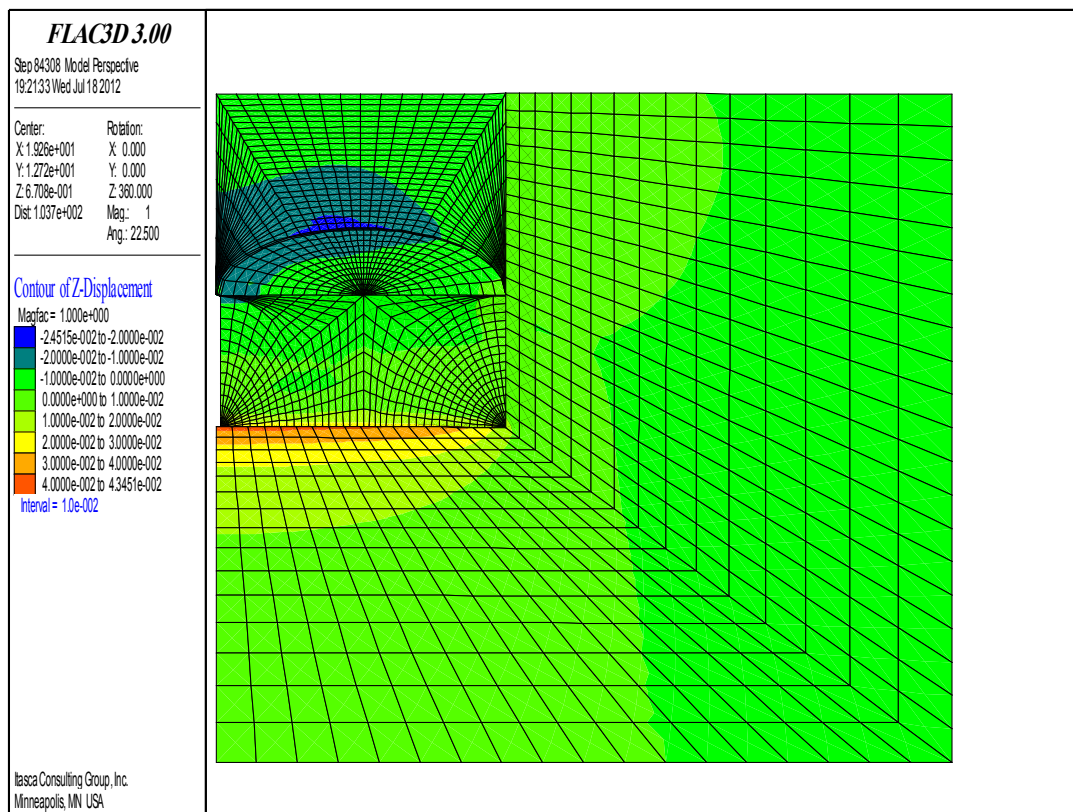
در روش گالری های کناری، با توجه به ابعاد بزرگ آن و سطح مقطع حدودا ۱۰۹ مترمربعی، سطح مقطع تونل به شکل نعل اسبی طراحی و به ۴ بخش تقسیم شده که در شکل (۵-۹) این ۴ بخش در مقطع تونل مشاهده می شود. عرض بخش ۱، ۲ و ۴ به ترتیب برابر ۴، ۵/۵ و ۳/۵ متر و ارتفاعشان ۶ متر بوده و ارتفاع بخش ۳ نیز برابر ۳ متر می باشد. بعلاوه اینکه حفاری گالری ۱ نقش عمده ای در نشست سطح دارد لذا عرض و در نتیجه سطح مقطع گالری ۱ کوچکتر از گالری ۲ خواهد بود.



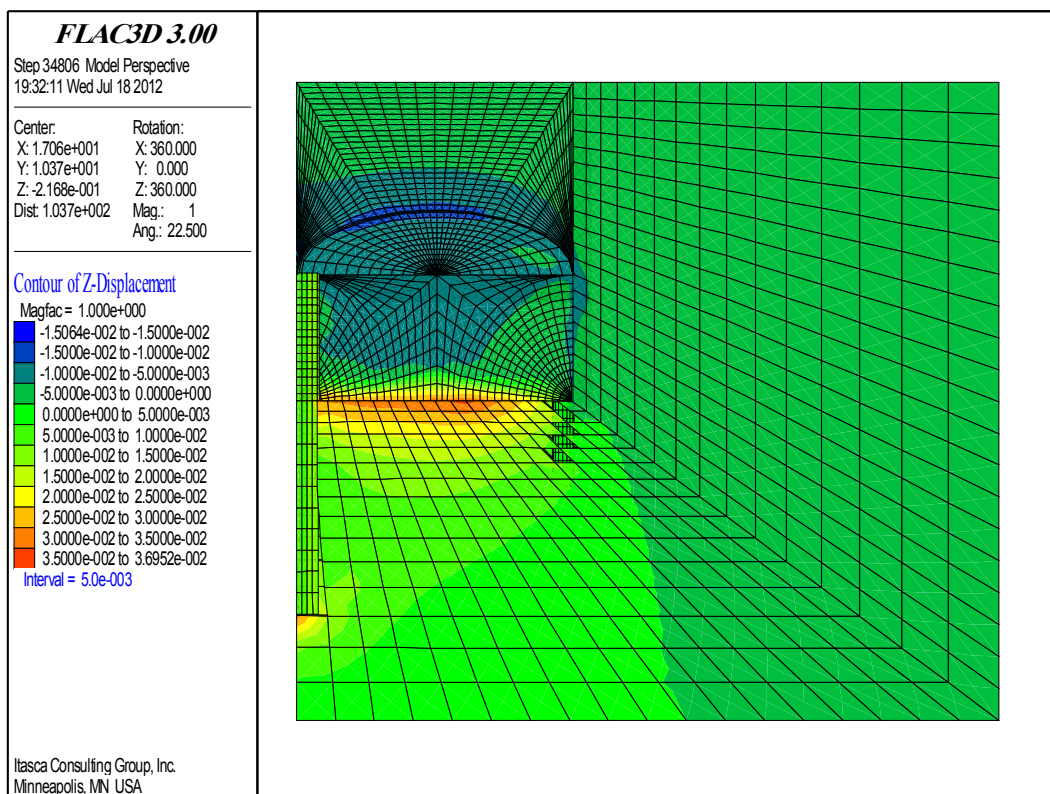
شکل ۵-۹- بخش های تقسیم بندی شده تونل NATM پیشنهادی

دو روش تاج و پله و روش گالری های جانبی با استفاده از مدل سازی عددی مورد تحلیل قرار گرفتند و نشست های سطح حاصله از این دو روش و نیز میزان جابجایی های تاج و همگرایی دیواره های تونل باهم مقایسه شدند. در شکل (۵-۱۰) مدل های ساخته شده بمنظور تحلیل این دو روش حفاری مرحله ای مشاهده می شود. شکل (۵-۱۰ الف) مدل روش تاج و پله و شکل (۵-۱۰ ب) مدل روش گالری های

کناری را نشان می‌دهند. در روش تاج و پله که بصورت یک تاج ۳ متری و دو پله ۳ متری اجرا می‌شود حداکثر جابجایی قائم در ازای اجرای گام اول برابر ۲/۴۵ سانتیمتر و نشست سطح زمین برابر ۰/۴۹ سانتیمتر بوده، در حالیکه در روش گالری‌های جانبی این مقادیر به ترتیب برابر ۱/۵ و ۰/۱۲ سانتیمتر بوده است. در نهایت همانطور که انتظار می‌رفت روش حفاری مرحله‌ای با استفاده از گالری‌های جانبی میزان جابجایی‌های کمتری ایجاد کرد (حدود ۱/۰۵ سانتیمتر در تاج تونل و ۰/۳۷ سانتیمتر در سطح زمین) و لذا روش بهینه‌تری بشمار می‌رود. همچنین باید توجه داشت که با وجود روباره کم حدود ۶ متر استفاده از روش تاج و پله حتی برای ارتفاع تاج ۳ متر نیز پایدار نخواهد بود و با وجود استفاده از شاکریت مسلح به مش، جابجایی‌ها در سقف این تاج، قابل توجه است (شکل (۵-۱۰-الف)).



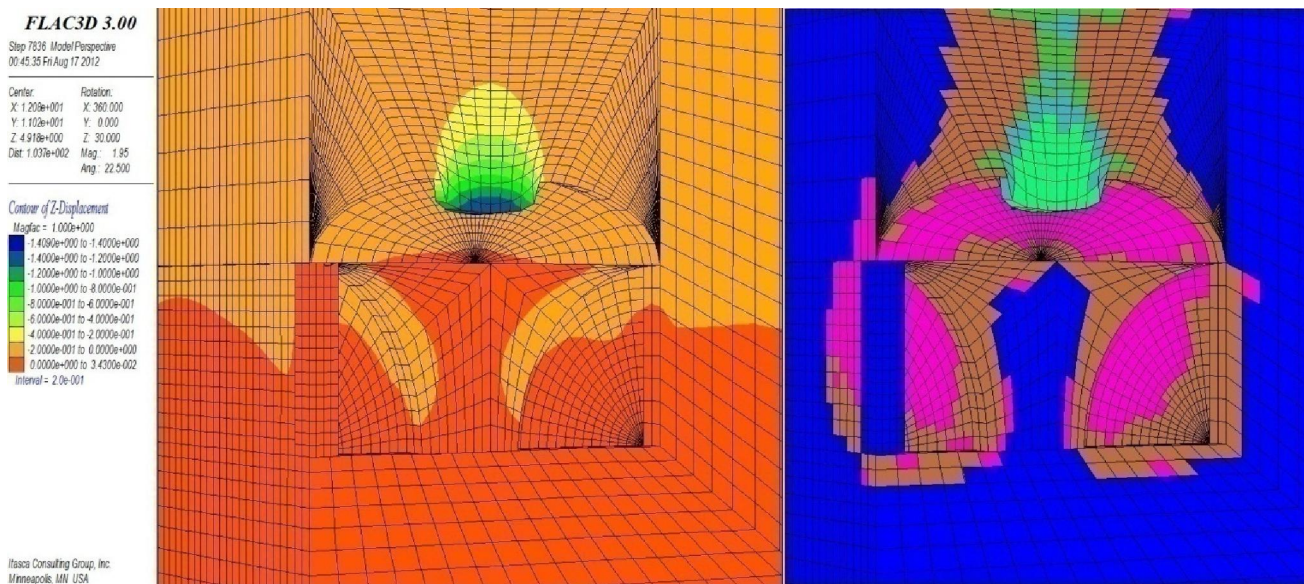
(الف)



(ب)

شکل ۵-۱۰- مقایسه جابجایی‌های دو روش حفاری تاج و پله (الف) و گالری‌های جانبی (ب)

همچنین بمنظور درک لزوم استفاده از سیستم نگهداری مناسب (شاتکریت مسلح به مش)، ابتدا بخش ۱ و ۲ تونل به میزان یک گام پیشروی بدون استفاده از سیستم نگهداری مدلسازی شده و در آنها گسیختگی برشی رخ می‌دهد. سپس بخش ۳ تونل (تاج تونل) بدون سیستم نگهداری حفاری شده و همانطور که در شکل (۵-۱۱) دیده می‌شود جابجایی قائم بیش از حد در نهایت منجر به ریزش سقف تونل می‌شود (شکل سمت چپ). در شکل سمت راست حالت پلاستیک ایجاد شده در سقف تونل مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۱- شکست ایجاد شده در سقف تونل در صورت عدم استفاده از سیستم نگهداری

۵-۳-۶- تحلیل پارامتری بمنظور تعیین گام بهینه حفاری

در روش حفاری مرحله ای اصلی ترین عوامل تاثیر گذار در میزان نشست سطح، طول گام حفاری در جبهه کار و ترتیب مراحل حفاری تونل است. بطور کلی طول گام، فاصله طولی از دهانه نگهداری نشده است که در یک مرحله اجرا می شود. طول گام حفاری تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی پتانسیل ریزش جبهه کار و دهانه خود پایدار و در کل پایداری تونل دارد و نیز هزینه و زمان اجرای تونل وابسته به این عامل می باشد. با توجه به ابعاد تونل و اینکه عمده مقطع تونل در خاک سیلتی همراه با ماسه حفاری می شود لذا نبایست گام حفاری زیاد انتخاب شود تا قسمت تازه حفاری شده پایداری مناسب خود را داشته باشد. در ابتدا سه گام حفاری ۰/۷، ۱ و ۱/۵ متر در نظر گرفته شد. این سه گام حفاری با استفاده از مدل ساخته شده و برای حفاری بخش ۱ مورد آزمایش قرار گرفتند که نتایج جابجایی های حاصل در چند نقطه از تاج تونل، سطح زمین، بالای بخش ۱ و بالای ستون میانی بین دو تونل در جدول (۵-۲) مشاهده می شود (لازم به ذکر است که اعداد در این جدول برای مقایسه بوده و پوشش شاتکریتی در این تحلیل اعمال

نشده است).

جدول ۵-۲- میزان جابجایی‌های قائم در چند نقطه پس از حفاری بخش ۱ (میلیمتر)

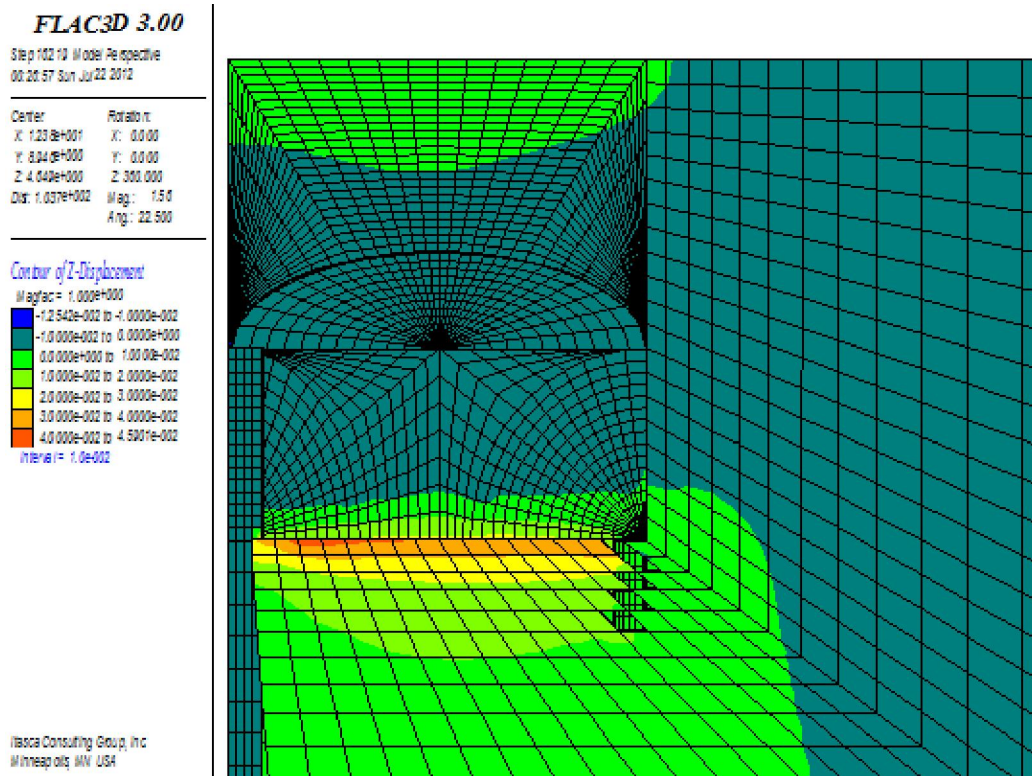
جابجایی قائم گام حفاری	بالای ستون میانی	تاج تونل	سطح زمین	بالای بخش ۱
۰/۷ متر	۰.۳۵	۰.۳۵	۰.۲۵	۲.۲
۱ متر	۹.۵	۱.۴	۰.۸	۷
۱.۵ متر	۱۵.۵	۳.۲	۱.۶۵	۱۲

همانطور که انتظار می‌رود با افزایش گام حفاری میزان جابجایی‌ها نیز افزایش یافته و با توجه به نزدیکی گام ۰/۷ و ۱ متر لذا گام ۱ متر بعنوان گام حفاری بهینه در مدلسازی انتخاب شد.

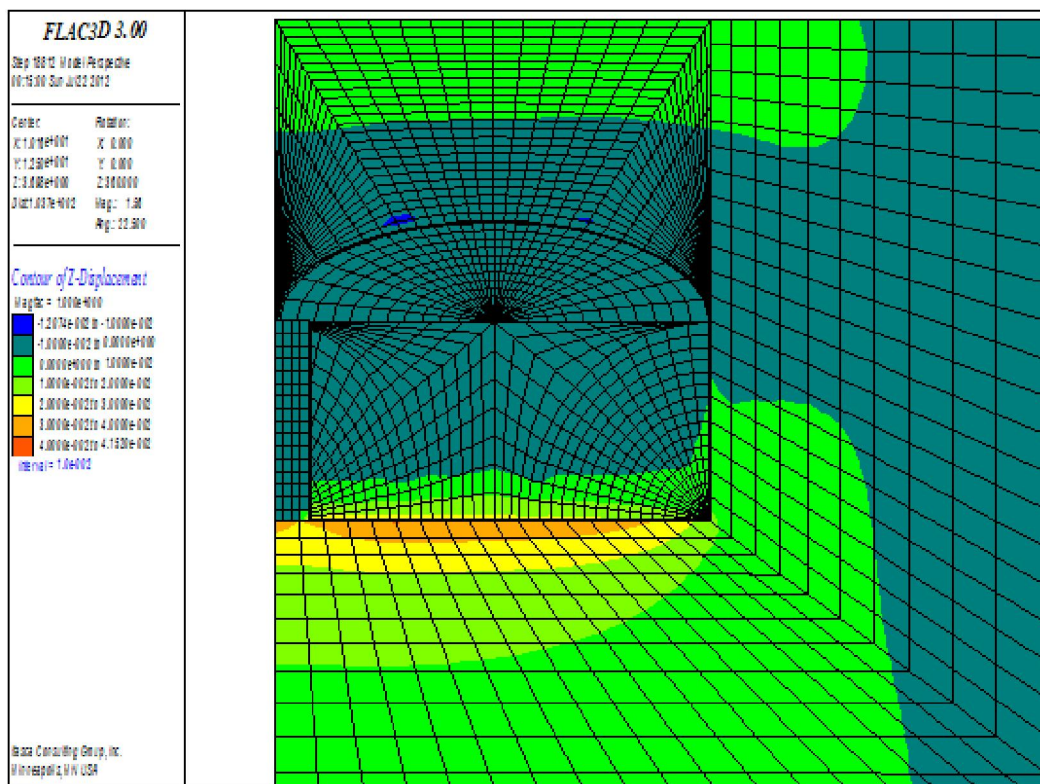
۵-۳-۷- تحلیل پارامتری استفاده و یا عدم استفاده از شمع‌های بتنی

بمنظور تحلیل و بررسی استفاده از شمع‌های بتن مسلح در کناره‌ها و بین دو تونل و نیز تاثیر این پایه‌های بتنی در پایداری تونل‌ها و نیز کاهش جابجایی‌های کلی سطح زمین و اطراف تونل، مدل ساخته شده در دو حالت وجود و یا عدم وجود شمع‌ها مورد آزمایش و تحلیل قرار گرفت. اجرای شمع‌های میانی به عمق ۱۰ متر و قطر ۲ متر با فاصله مرکز تا مرکز ۳ متر و بمنظور ایجاد پایداری لازم تونل‌ها برای حفاری بخش‌های بعدی انجام می‌شود. همچنین شمع‌های کناری در کف بخش ۲ و به عمق حدوداً نصف عمق شمع میانی (۴ متر) و قطر نصف شمع میانی (۱ متر) با فاصله مرکز تا مرکز حدوداً ۴ متر انجام شده تا مقطع آماده حفاری بخش‌های میانی دو تونل شود. اشکال (۵-۱۲) و (۵-۱۳) میزان جابجایی‌های عمودی در مدل بترتیب در دو حالت با وجود و بدون وجود شمع‌های بتنی را نشان می‌دهد. همانطور که در اشکال مشاهده می‌شود بکارگیری شمع‌های بتنی بعنوان حائل نگهدارنده بین دو تونل و نیز در کناره‌های دو تونل، تاثیر قابل قبولی در کاهش نشست سطح زمین و نیز جابجایی‌های افقی و قائم نقاط اطراف تونل داشته است. میزان نشست سطح زمین و نیز جابجایی عمودی تاج تونل در حالت مدلسازی بدون

استفاده از شمع‌ها پس از یک گام پیشروی تونل به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۶۸ سانتیمتر و در حالت مدلسازی با وجود شمع‌های بتنی به ترتیب برابر ۰/۲ و ۰/۵۵ سانتیمتر می‌باشد. میزان حداکثر جابجایی قائم همانطور که در اشکال دیده می‌شود در دو حالت تقریبا برابر می‌باشد. لذا استفاده از شمع‌های مسلح بتنی باعث کاهش نشست سطح و نیز جابجایی‌های کلی قائم در محیط و نیز حفظ پایداری حین اجرای دو تونل می‌شود.



شکل ۵-۱۲- میزان جابجایی‌های قائم در مدل با وجود شمع‌های بتنی کناری و میانی



شکل ۵-۱۳- میزان جابجایی‌های قائم در مدل بدون استفاده از شمع‌ها

۵-۳-۸- تحلیل پارامتری ترتیب بهینه حفاری و نگهداری

از آنجاییکه در روش حفاری مرحله‌ای با گالری‌های کناری ابتدا باید گالری‌ها حفاری و نگهداری شوند و پس از آن‌ها بخش میانی اجرا شود، لذا دو ترتیب حفاری و نگهداری باهم مورد مقایسه و تحلیل واقع شدند. در گزینه اول، ابتدا بخش ۱ حفاری و نگهداری شده، دیواره بتنی و شمع میانی و سپس بخش ۲ اجرا شده و در گزینه دوم ابتدا بخش ۲ و شمع کناری اجرا شده و پس از آن بخش ۱ به اجرا درآمده است. در جدول (۵-۳) نتایج جابجایی‌ها و نشست‌های حاصل از این دو ترتیب حفاری و نگهداری دیده می‌شود. بنابراین همانطور که دیده می‌شود مقادیر جابجایی‌ها و نشست سطح در حالت اجرای گزینه اول کوچکتر و بهینه تر بوده و لذا اجرای گزینه اول توصیه می‌شود که این دلیل عرض نابرابر دو بخش ۱

و ۲ می باشد.

جدول ۵-۳- میزان جابجایی قائم حاصل از دو ترتیب حفاری و نگهداری مختلف

میزان جابجایی قائم (mm)	حداکثر جابجایی قائم	بالای ستون میانی	تاج تونل	سطح زمین	بالای بخش ۱
۱۰.۹	۰.۱	۲.۶	۱.۰۴	۳.۰۱	پس از اجرای گزینه اول
۱۲.۲	۱.۱۲	۳	۱.۴	۵.۲	پس از اجرای گزینه دوم

۵-۴- روند مدلسازی تونل NATM پیشنهادی در نرم افزار ۳D FLAC

روند کلی مدلسازی برای اجرای تونل‌های پیشنهادی دوقلوی راه آهن تهران- تبریز در محدوده کیلومتراژ ۶+۱۰۰ تا ۶+۸۰۰ به روش حفاری مرحله‌ای به این صورت می باشد که ابتدا هندسه پیشنهادی اولیه با توجه به الزامات موجود در ابعاد طرح توسط نرم افزار مذکور تهیه شده و ۴ بخش مربوط به هر تونل از هم مجزا شده‌اند. سپس با تعریف کردن حالت الاستیک برای کل مدل و اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی و نیز بستن مرزها در جهات مختلف، حل استاتیکی مدل انجام شده است. همچنین شرایط تنش ثقلی و نیز گرادیان‌های تنش با توجه به نسبت تنش‌های افقی و عمودی به محیط داده شده است. پیش از حل نیز تاریخچه‌های موردنظر شامل روند نیروهای نامتعادل کننده و جابجایی‌ها و سرعت‌های مورد بررسی در راستاهای مختلف برای مدل تعریف گردیده است.

پس از حل استاتیک مدل و به تعادل رسیدن مدل، جابجایی‌ها و سرعت‌ها در سه جهت صفر شده و از جابجایی‌ها و سرعت‌ها پیش از حفر صرف نظر می شود. مدل به موهر- کولمب تغییر می یابد و حالت کرنش بزرگ نیز در مدل اعمال می شود. اکنون مدل آماده حفاری به اندازه گام بهینه (۱ متر برای این پروژه) در بخش ۱ و اجرای شاتکریت دو لایه مسلح به مش در دیواره آن می باشد. این شاتکریت مسلح به مش در نرم افزار ۳D FLAC بصورت المان پوسته‌ای یکپارچه مدل شده که به سطح توده خاکی چسبیده و از حرکات و جابجایی‌های سطح جلوگیری می کند. پس از به تعادل رسیدن مدل پس از حفر بخش ۱،

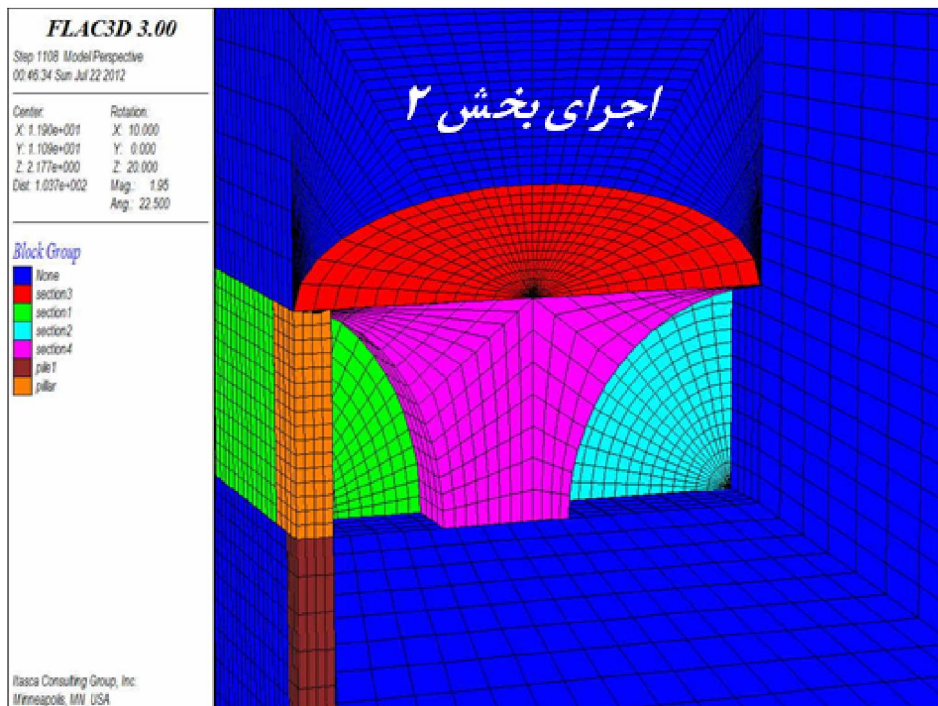
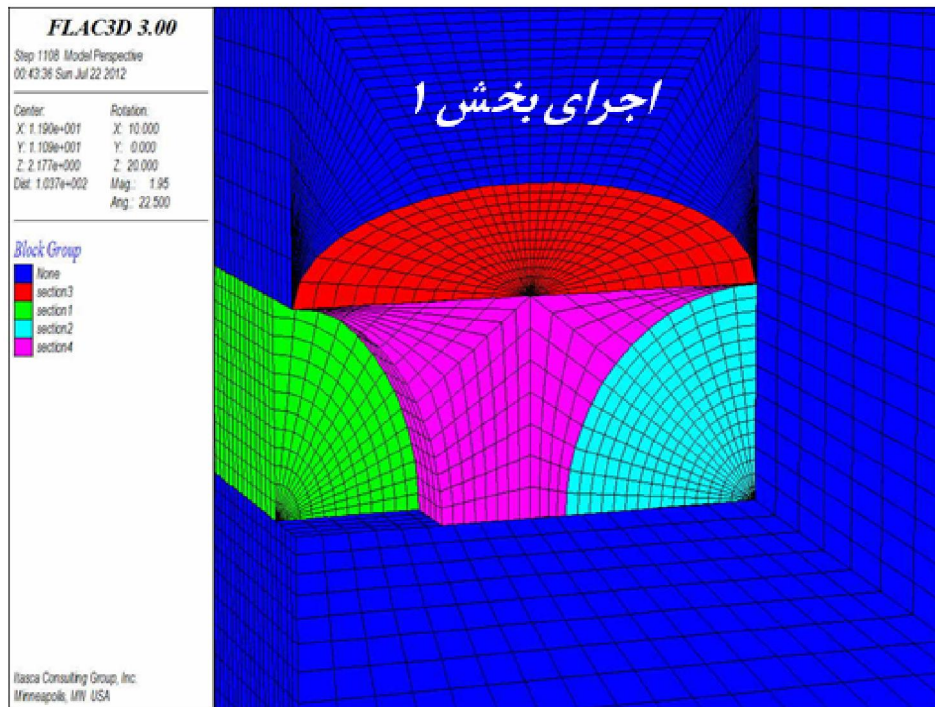
حفاری محل شمع میانی، آرماتوربندی و بتن‌ریزی شمع میانی و نیز دیواره بتنی به ضخامت ۲ متر بین دو تونل مدل شده و پس از آن بخش ۲ به اندازه گام حفاری بهینه، حفاری و دیواره‌های دو تونل در بخش ۲ شاتکریت‌پاشی می‌شود. با حفاری و اجرای شاتکریت دیواره‌های گالری بخش ۲ در گوشه گالری، زمین آماده حفاری و مدلسازی اولین شمع بتنی کناری می‌باشد. شمع‌های کناری در کف بخش ۲ آرماتوربندی و بتن‌ریزی می‌شوند تا مقطع آماده حفاری بخش میانی دو تونل شود. در جدول (۴-۵) ویژگی‌های پیشنهادی شاتکریت مسلح و شمع بتنی (بر اساس آیین‌نامه بتن ایران) بکار رفته در مدلسازی دیده می‌شود. مدلسازی شمع‌ها با استفاده از مدل رفتاری الاستیک و منطبق بر جدول زیر انجام گرفته است.

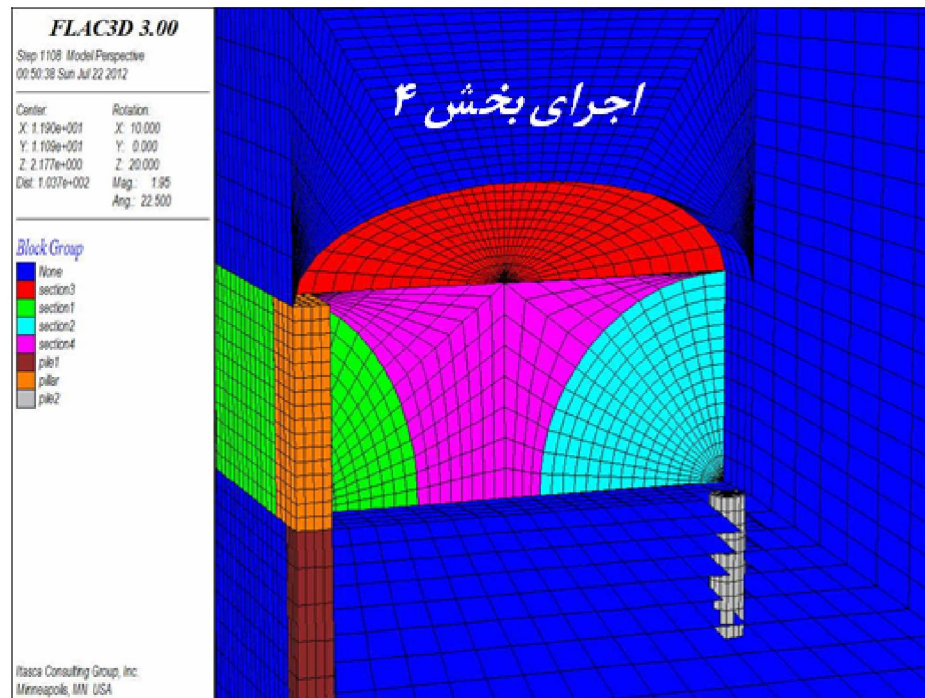
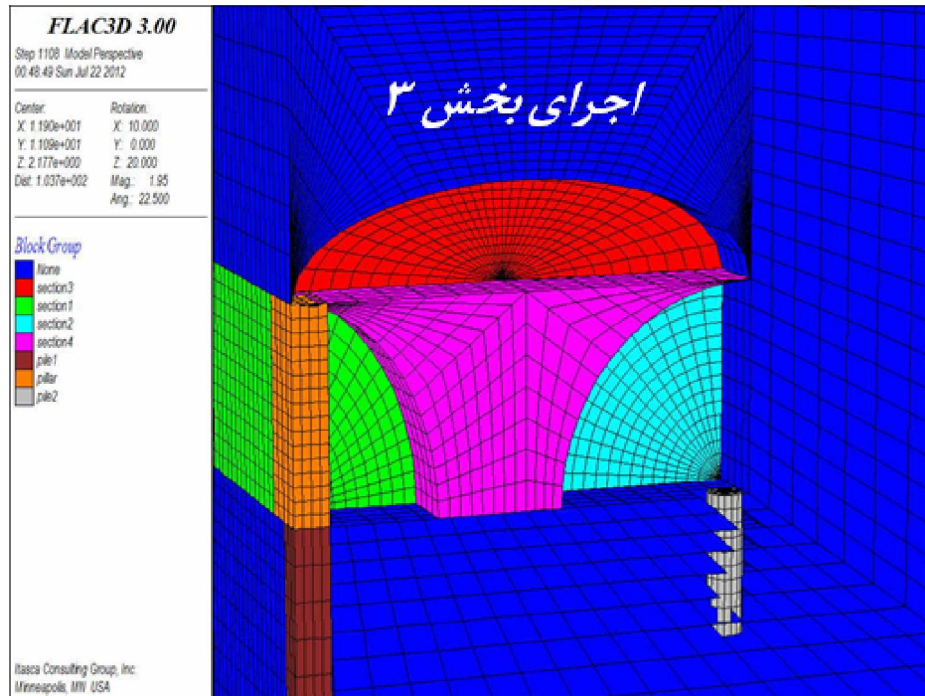
جدول ۴-۵- پارامترهای پیشنهادی مورد استفاده در تحلیل عددی برای طراحی تونل‌های NATM مورد مطالعه

ضخامت (متر)	وزن مخصوص (gr/cm^3)	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (گیگا پاسکال)	پارامتر
۰.۳ - ۰.۳۵	۲.۴	۰.۲۵	۲۱	شاتکریت مسلح به مش
-	۲.۸	۰.۱۵	۲۵	شمع بتنی

سپس بخش ۳ یا همان تاج تونل حفاری و با شاتکریت مسلح به مش نگهداری می‌شود. حفاری این بخش از مدل تاثیر بسیار چشمگیری در پایداری تاج و نیز همگرایی‌ها و جابجایی‌های سقف تونل دارد. از آنجاییکه پایداری دیواره‌ها و سقف تونل در روش حفاری مرحله‌ای بسیار متأثر از زمان اجرای شاتکریت در ناحیه مذکور می‌باشد لذا توصیه می‌شود اجرای شاتکریت در سقف تونل نسبت به اجرای آن در دیواره‌ها سریعتر و با کمک مواد زودگیر انجام گیرد. پس از اجرای بخش تاج بخش ۴ حفاری شده و دیواره‌های شاتکریتی حائل بخش‌های ۱ و ۲ حذف و برداشته می‌شوند تا مقطع تونل بطور کامل اجرا و حلقه تونل بسته شود که این امر یکی از مهمترین اصول کاری در روش NATM می‌باشد. اجرای گام‌های بعدی در نرم افزار نیز به همین منوال خواهد بود. پس از اینکه سینه کار تونل از پورتال ورودی به اندازه چند گام فاصله داشت اقدام به قالب‌بندی و بتن‌ریزی نهایی تونل و نیز اجرای کف می‌شود. در اشکال (۵-۱۴) نحوه

پیشروی یک گام از تونل به روش حفاری مرحله‌ای به ترتیب دیده می‌شود.





شکل ۵-۱۴- طرح پیشنهادی پیشروی یک گام از تونل به روش NATM

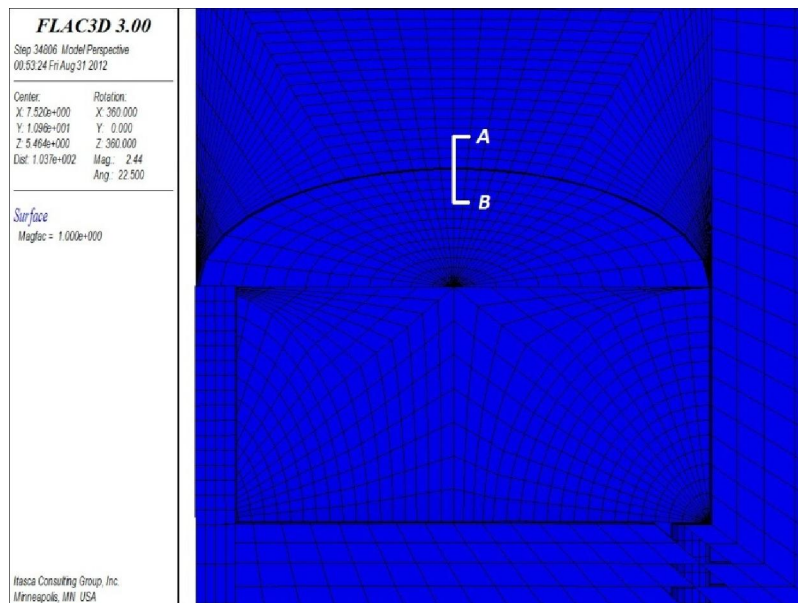
بطور کلی با توجه به ابعاد سطح مقطع تونل و نیز محیط حفاری و نگهداری، میزان سطوح و احجام

خاکبرداری، اجرای شاتکریت مسلح به مش، حفاری و اجرای شمع‌های بتنی میانی و کناری، بتن‌ریزی دیواره میانی و نیز پوشش بتنی نهایی تونل در این طرح NATM پیشنهادی به ازای یک متر پیشروی تونل دو قلو محاسبه و مقادیر در جدول (۵-۵) ثبت شده است.

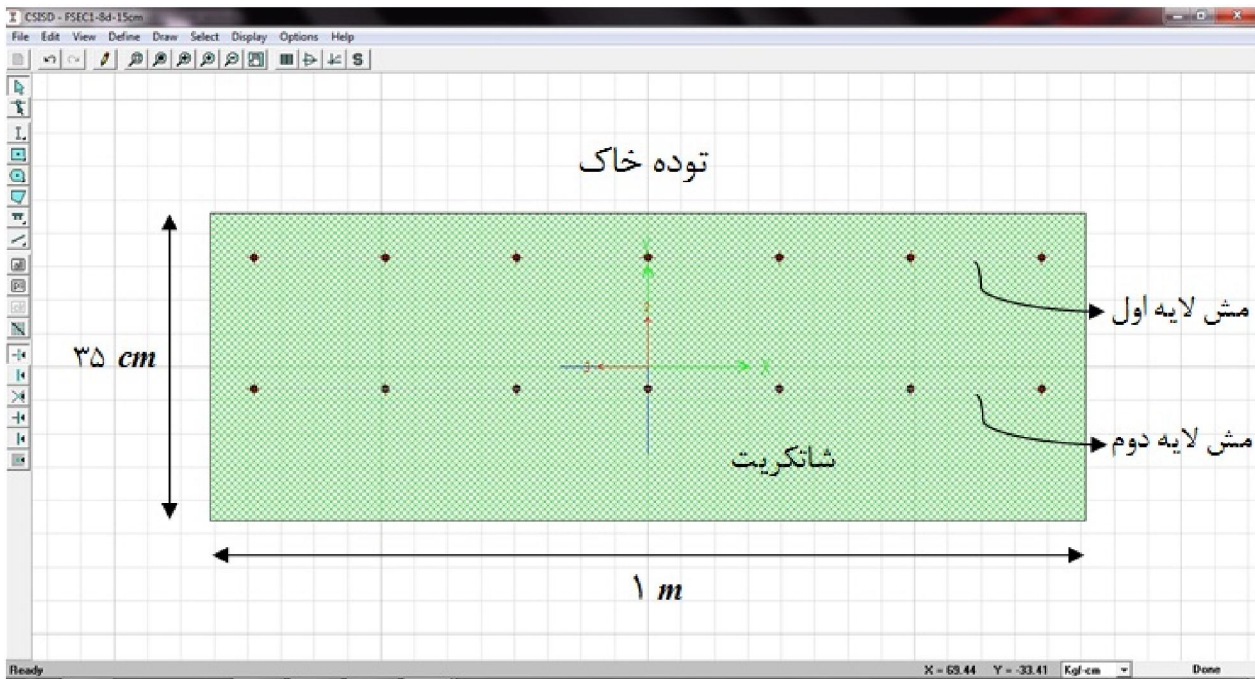
جدول ۵-۵- مقادیر محاسبه شده احجام و سطوح در طرح تونل NATM پیشنهادی

مقدار	خاکبرداری تونل (متر مکعب)	حفاری و بتن‌ریزی شمع کناری (متر مکعب به ازای هر شمع)	حفاری و بتن‌ریزی شمع میانی (متر مکعب به ازای هر شمع)	بتن‌ریزی دیواره بتنی میانی (متر مکعب)	بتن‌ریزی پوشش بتنی نهایی (متر مکعب)	شاتکریت پاشی دیواره‌ها و سقف تونل (متر مربع)
۲۱۷.۲۶	۶.۲۸	۳۱.۱۴	۱۲	۴۵.۳۲	۷۵.۶	

بمنظور اعتبارسنجی و صحت میزان ضخامت شاتکریت پیشنهادی در تونل NATM (۳۰ تا ۳۵ سانتیمتر در جدول (۴-۵)) با استفاده از نرم افزار SAP ۲۰۰۰ نمودار نیروی محوری- گشتاور خمشی برای مقطع بحرانی تونل که همان مقطع A-B در سقف تونل بوده ترسیم شده و این مقطع در اشکال (۵-۱۵) و (۵-۱۶) دیده می‌شود.

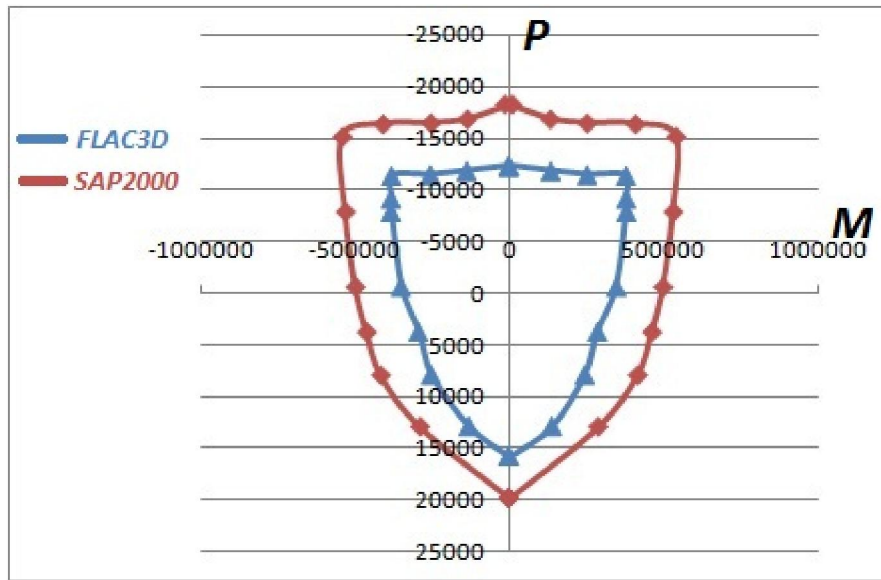


شکل ۵-۱۵- مقطع A-B در تونل NATM پیشنهادی



شکل ۵-۱۶- طراحی شاتکریت برای مقطع A-B واقع در سقف تونل در نرم افزار SAP ۲۰۰۰

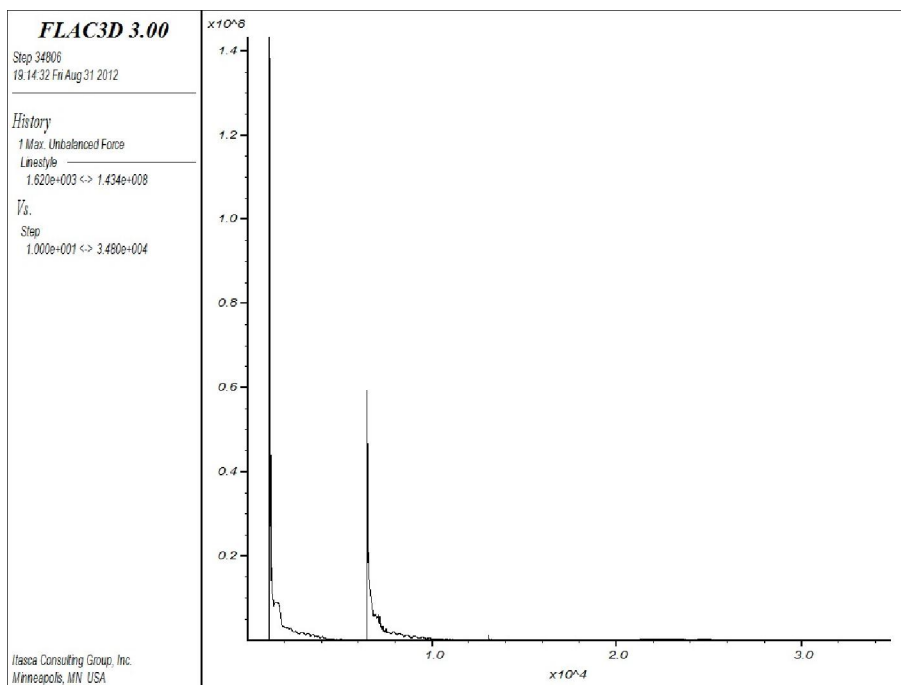
در ادامه این نمودار با نمودار نیروی محوری- گشتاور خمشی حاصل از نرم افزار ۳D FLAC که برای مقطع شاتکریت سقف ارائه شده مقایسه شد و همانگونه که در شکل (۵-۱۷) مشاهده می شود مقادیر حاصل از طراحی ضخامت شاتکریت در نرم افزار ۳D FLAC کمتر از مقادیر حاصل از نرم افزار SAP ۲۰۰۰ بوده و لذا ضخامت نهایی ۳۰ سانتیمتر برای دیواره و ۳۵ سانتیمتر برای سقف تونل مناسب بوده و پیشنهاد می شود.



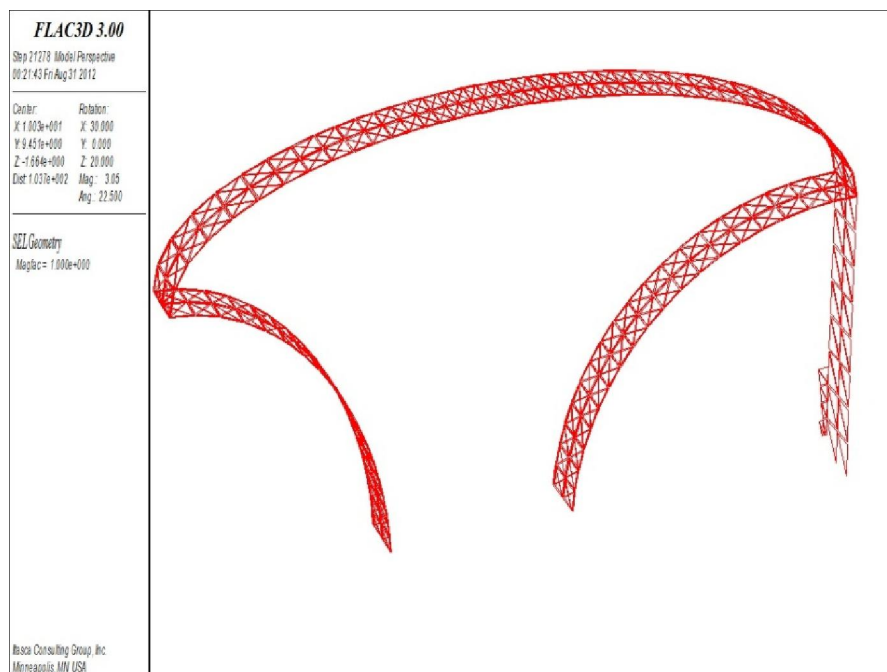
شکل ۵-۱۷- مقایسه نمودارهای نیروی محوری- گشتاور خمشی حاصل از طراحی شاتکریت در نرم افزارهای ۳D FLAC و

SAP ۲۰۰۰

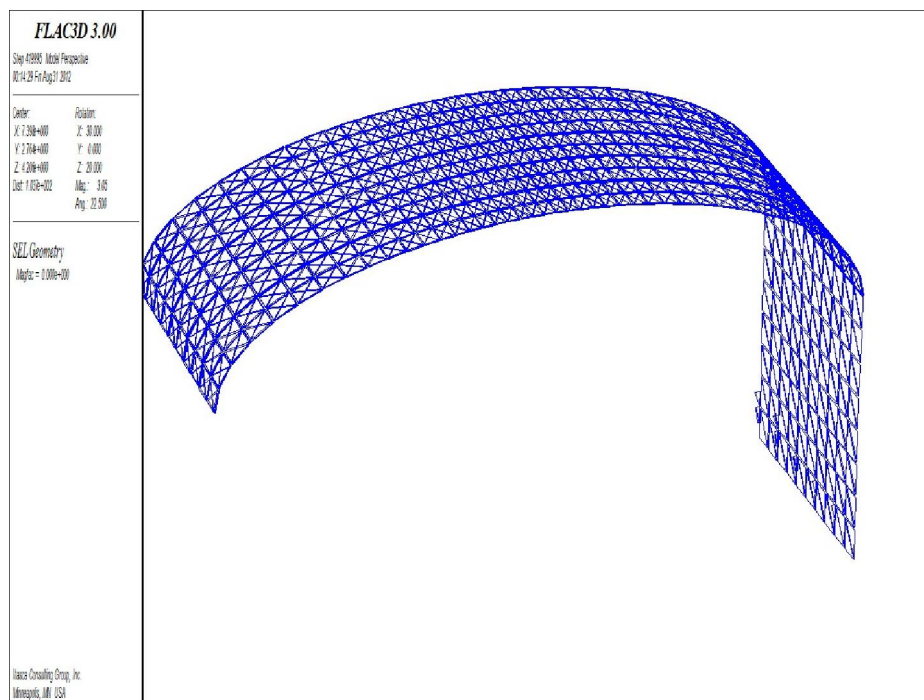
در شکل (۵-۱۸) روند کاهشی نیروهای نامتعادل کننده در مدل پس از اجرای گام اول مشاهده می شود. همانطور که در شکل دیده می شود مقدار نیروهای نامتعادل در اجرای بخش ۱ و ۲ بیشتر از بخش ۳ و ۴ می باشد. همچنین در شکل (۵-۱۹) پوشش پوسته ای شاتکریتی پس از حفاری بخش ۱، ۲ و ۳ از گام پیشروی اول تونل و در شکل (۵-۲۰) پوشش شاتکریتی را پس از اجرای ۵ گام از پیشروی تونل مشاهده می شود.



شکل ۵-۱۸- روند نیروهای نامتعادل کننده پس از اجرای گام اول از مدل



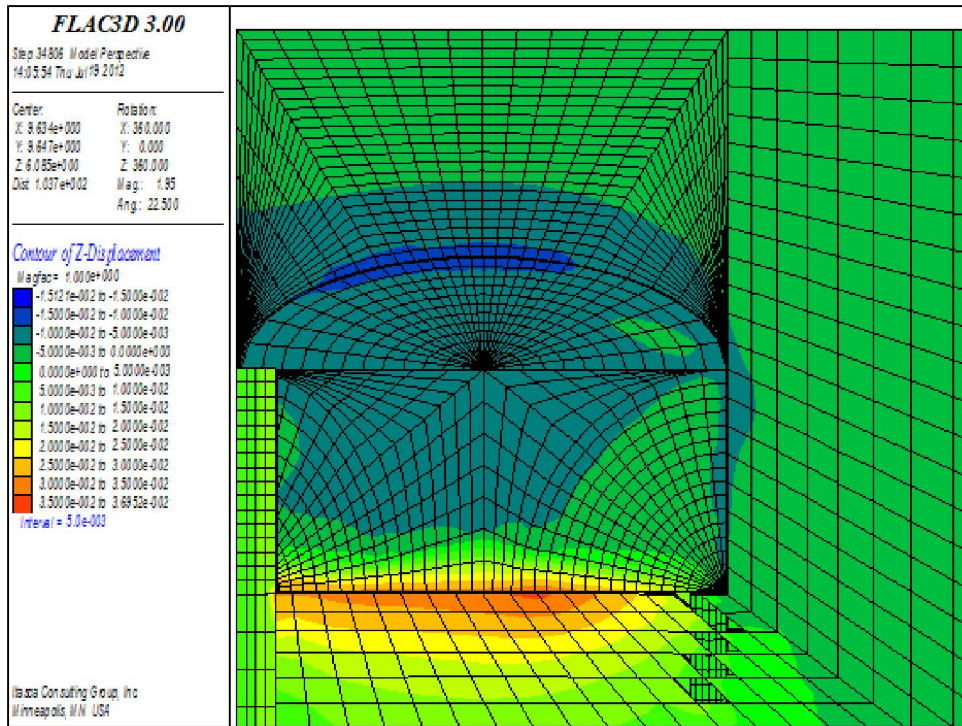
شکل ۵-۱۹- پوشش شاتکریتی سطح حفاری شده تونل پس از حفاری بخش ۱، ۲ و ۳ از گام پیشروی اول



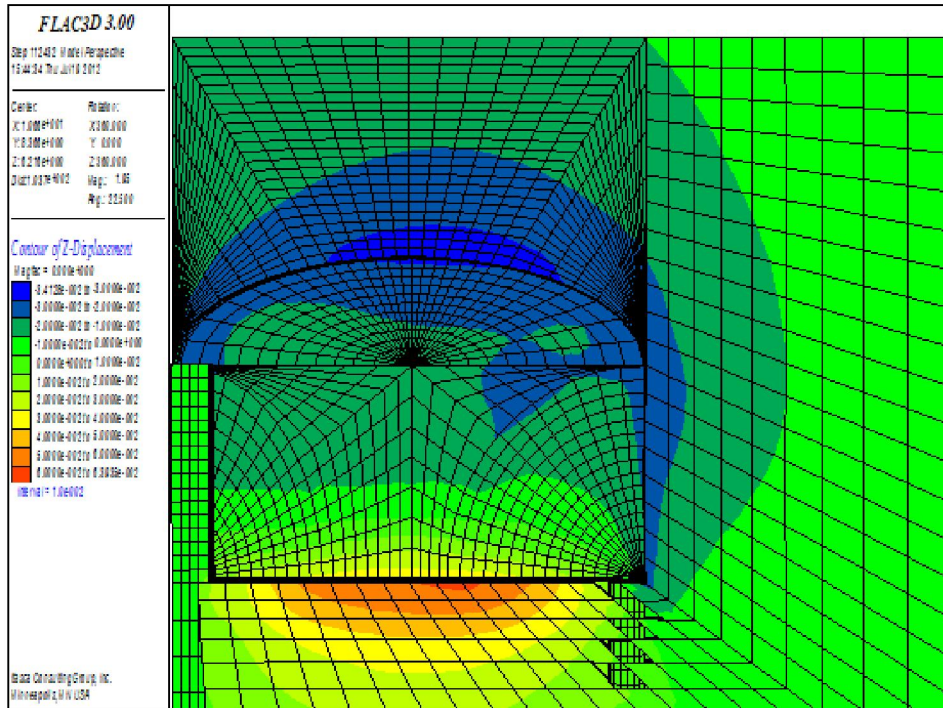
شکل ۵-۲۰- پوشش شاکریتی سطح حفاری شده تونل پس از اجرای ۵ گام از تونل

۵-۵- ارزیابی نتایج حاصل از مدلسازی تونل NATM

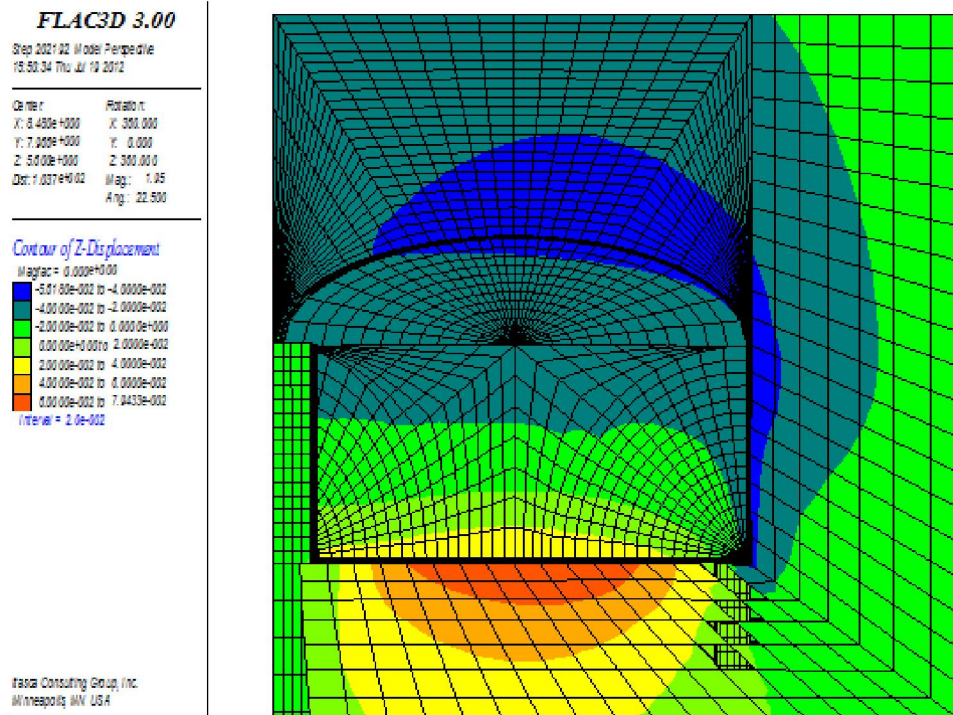
نتایج حاصل از مدلسازی تونل پیشنهادی، روند صعودی افزایش جابجایی‌ها در تاج تونل و نیز سطح زمین را تأیید می‌کنند. اشکال (۵-۲۱) تا (۵-۲۵) کنترهای جابجایی عمودی مدل را پس از اجرای کامل گام پیشروی اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم و شکل (۵-۲۶) کنترهای جابجایی افقی در مدل پس از اجرای گام پیشروی پنجم را نشان می‌دهند. همچنین این نتایج در جدول (۵-۶) نیز برای چند نقطه خاص در سطح زمین، تاج تونل، دیواره تونل و بالای ستون میانی نشان داده شده‌اند. همانطور که در شکل (۵-۲۶) دیده می‌شود میزان جابجایی حداکثر افقی در مدل مربوط به جابجایی خاک در کناره شمع‌ها بوده است.



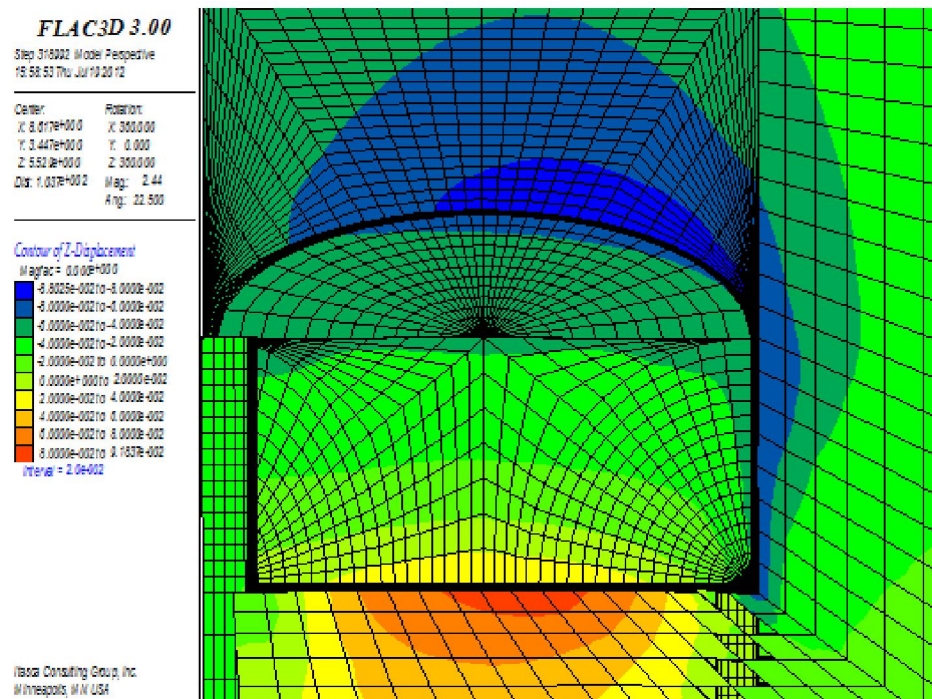
شکل ۵-۲۱- کنتورهای جابجایی عمودی پس از اجرای گام پیشروی اول



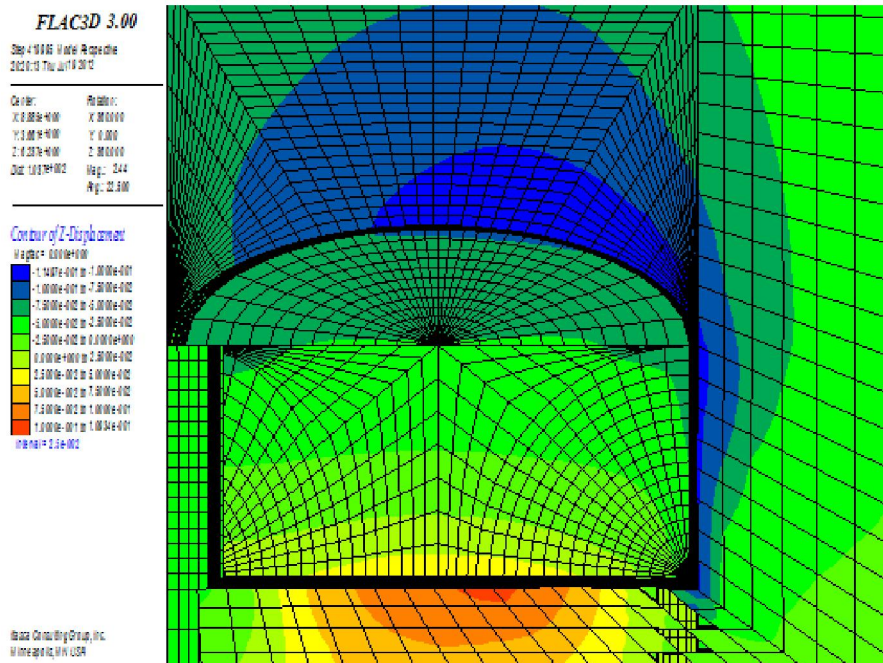
شکل ۵-۲۲- کنتورهای جابجایی عمودی پس از اجرای گام پیشروی دوم



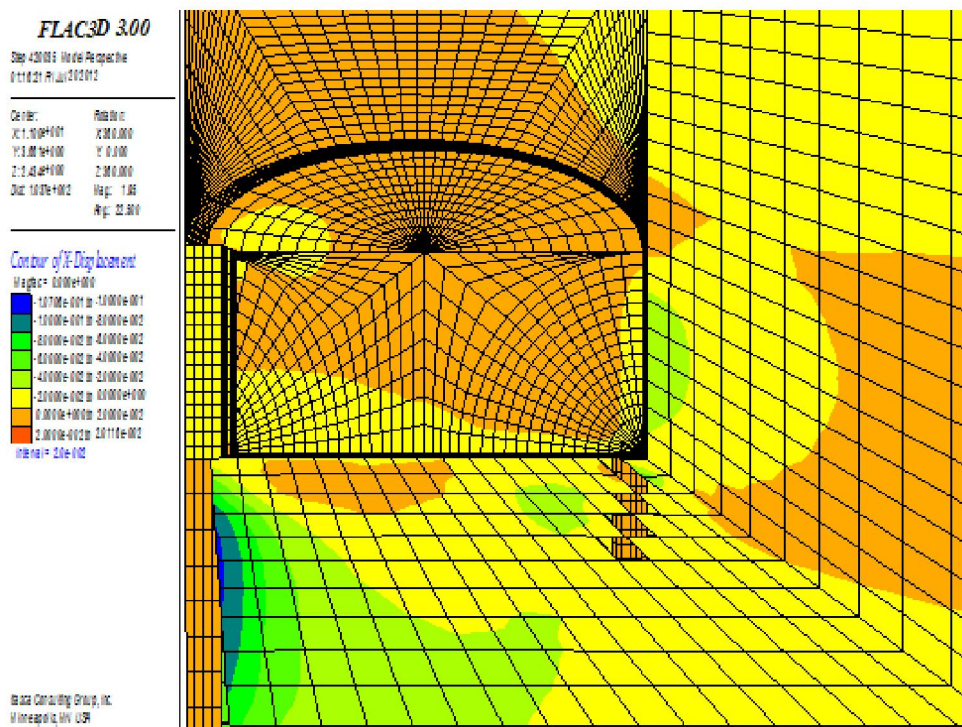
شکل ۵-۲۳- کنتورهای جابجایی عمودی پس از اجرای گام پیشروی سوم



شکل ۵-۲۴- کنتورهای جابجایی عمودی پس از اجرای گام پیشروی چهارم



شکل ۵-۲۵- کنتورهای جابجایی عمودی پس از اجرای گام پیشروی پنجم

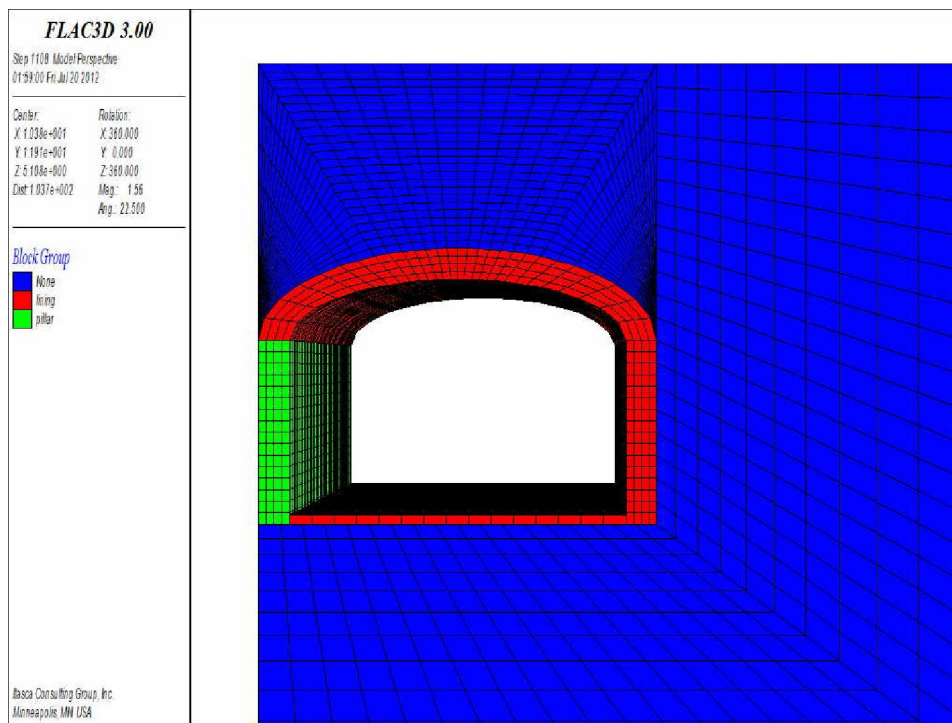


شکل ۵-۲۶- کنتورهای جابجایی افقی پس از اجرای گام پیشروی پنجم

جدول ۵-۶- جابجایی‌های حاصل از پیشروی تونل NATM در چند نقطه از مدل (سانتیمتر)

پنجم	چهارم	سوم	دوم	اول	گام پیشروی
۱۱.۰۵	۸.۶	۵.۵	۳.۲	۱.۵	حداکثر جابجایی عمودی در مدل
۱۰.۷	۸.۹	۵.۶	۵.۲	۴.۸	حداکثر جابجایی افقی در مدل
۳.۹۸	۳.۴۵	۲.۶۴	۱.۷۷	۰.۸	جابجایی افقی دیواره راست
۸.۰۲	۶.۸۹	۴.۶	۲.۹۶	۱.۰۹	جابجایی عمودی تاج تونل
۵.۸۲	۴.۵	۲.۵۹	۱.۳	۰.۱۲	نشست سطح زمین

شکل (۵-۲۷) سطح مقطع تونل سمت راست را پس از اجرای لاینینگ بتنی و دال کف نشان می‌دهد. ضخامت پوشش بتنی ۱ متر، مدول الاستیسیته ۲۵ گیگا پاسکال و نسبت پواسون آن ۰/۱۵ می‌باشد.

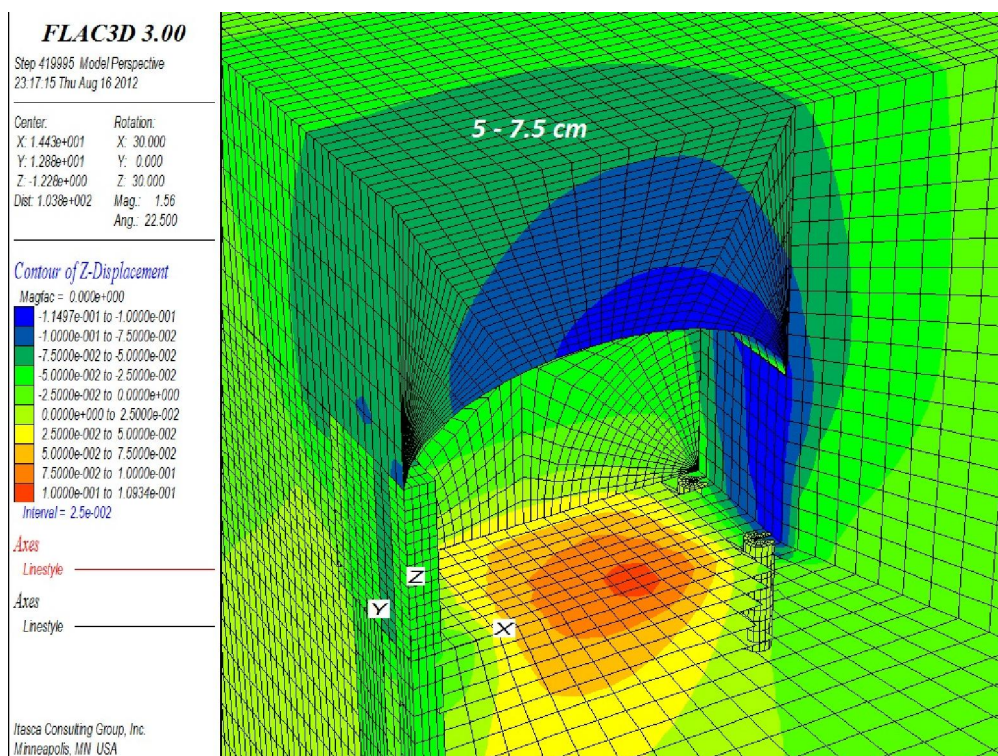


شکل ۵-۲۷- نمایی از مقطع تونل سمت راست پس از اجرای پوشش بتنی و دال کف تونل در مدل

جدول (۵-۷) گستردگی زون جابجایی قائم را در سطح مدل پس اجرای ۵ گام پیشروی از تونل نشان می‌دهد. همچنین بطور نمونه گستردگی زون جابجایی قائم پس از اجرای گام پیشروی پنجم در شکل (۵-۲۸) دیده می‌شود.

جدول ۵-۷- میزان گسترده‌گی جابجایی در سطح زمین پس از اجرای ۵ گام پیشروی تونل

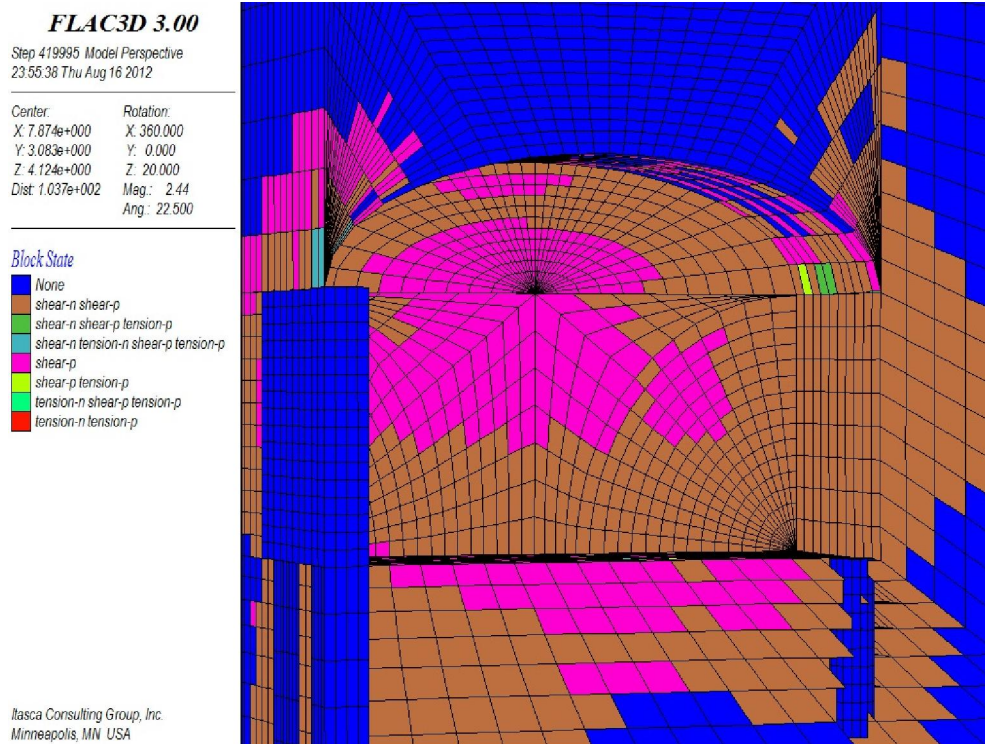
پنجم	چهارم	سوم	دوم	اول	گام
۰ - ۱۳.۲۳	۰ - ۱۲.۴۱	۰ - ۱۳.۴۵	۰ - ۱۲.۸۳	۰ - ۱۰.۸	میزان گسترده‌گی در راستای X (متر)
۰ - ۶.۱	۰ - ۵.۱	۰ - ۷.۱	۰ - ۱۱.۸۱	۵.۳ - ۱۸.۵	میزان گسترده‌گی در راستای Y (متر)
۵ - ۷.۵	۴ - ۶	۲ - ۴	۱ - ۲	۰.۵ - ۱	مقدار جابجایی قائم مربوطه (سانتیمتر)



شکل ۵-۲۸- گسترش زون جابجایی پس از اجرای گام پنجم در مدل

در شکل (۵-۲۹) که شرایط حالت پلاستیک برای مدل ساخته شده در نرم افزار را نشان می‌دهد، بلوک‌های قهوه ای رنگ نواحی دارای تنش برشی را پس از حفر گام پیشروی پنجم نشان داده که اکثرا در

سینه کار و دیواره تونل می‌باشد و همانطور که دیده می‌شود حالت پلاستیک و یا شرایط ناپایداری و ریزش در تونل رخ نداده و تونل پایدار است.



شکل ۵-۲۹- شرایط حالت پلاستیک در مدل سه بعدی

۵-۶- تحلیل پایداری تونل NATM

تخمین نگهداری اولیه مورد نیاز برای پایداری سازی تونل یکی از مسائل مهم در طراحی است. رسم منحنی مشخصه زمین با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، تعیین میزان نرخ همگرایی از روی پروفیل تغییر شکل طولی^۱ با توجه به رابطه کارانزا-تورس^۲ و اعمال ترخیص تنش معادل با همگرایی ایجاد شده تا قبل از استقرار پوشش اولیه در مدل عددی، می‌تواند مسئله بعد سوم که همان تاثیر گام پیشروی

^۱- Longitudinal deformation profile

^۲-Carranza Torres

و فاصله جبهه کار از پوشش اولیه است را در مسائل دو بعدی حل کند (Carranza Torres, ۲۰۰۰).

در حقیقت منحنی مشخصه زمین نشان دهنده مقدار همگرایی ایجاد شده در تونل در اثر تنش‌های القائی بوجود آمده بعد از ایجاد حفاری، با فرض عدم نصب سیستم نگهداری است، مشروط بر اینکه تاثیر نگهداری جبهه کار حفاری در مقطع مورد نظر قابل چشم‌پوشی باشد. این امر با پیشرفت جبهه حفاری نسبت به مقطع مورد مطالعه ایجاد می‌شود.

برای تعیین پوشش اولیه مناسب به منظور حفظ پایداری فضای حفاری شده و کمک به ایجاد تعادل جدید در زمین از روش همگرایی- همجواری و با کمک نرم افزار ۳D FLAC استفاده شده است. مراحل طراحی پوشش اولیه برای بخش نخست حفاری به ترتیب شامل مراحل زیر می‌باشد (میکائیل، ۱۳۸۶).

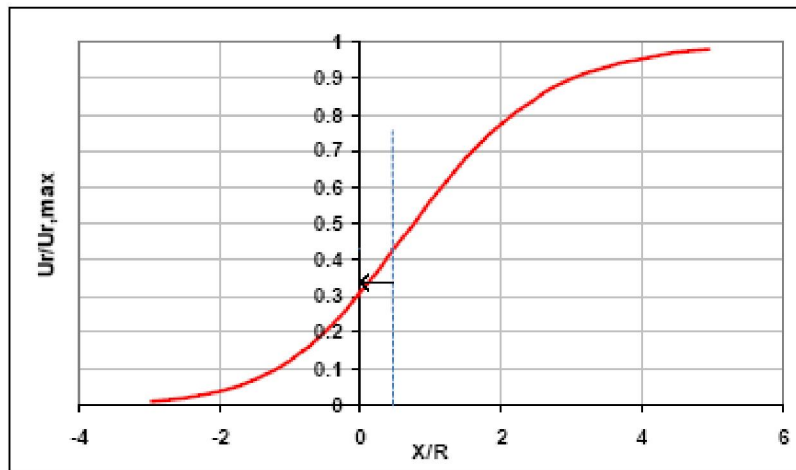
۵-۶-۱- تعیین نرخ همگرایی بر حسب فاصله تا جبهه کار

با تعیین همگرایی بر حسب فاصله پوشش تونل تا جبهه کار، می‌توان وضع نسبی بارها و جابجایی بدست آمده از پیشروی جبهه کار را مشخص کرد. رفتار همگرایی تونل بر حسب فاصله جبهه کار را می‌توان در حالت دو بعدی و با کمک معادله کارانزا- تورس که در رابطه (۳-۵) آمده است، به دست آورد. منحنی شکل (۳-۵) میزان نرخ همگرایی را بر حسب فاصله تا جبهه کار نشان می‌دهد. با توجه به این که گام حفاری در طرح مورد مطالعه حدوداً ۱ متر می‌باشد، با توجه به رابطه (۳-۵) میزان نرخ همگرایی برابر ۰/۳۲۹ به دست می‌آید. نرخ همگرایی، نسبت بین جابجایی بوجود آمده تا لحظه استقرار پوشش به جابجایی ماکزیمم در اثر اعمال ترخیص تنش می‌باشد. در نتیجه لازم است میزان کل ترخیص تنش را محاسبه کرد.

$$\frac{u_r}{u_{\max}} = \left[1 + \exp\left(-\frac{x/R}{1.10}\right) \right]^{-1.7} \quad (3-5)$$

که در این معادله u_r مقدار جابجایی در فاصله x از جبهه کار، u_{max} مقدار جابجایی حداکثر، x فاصله از جبهه کار تونل، $\frac{u_r}{u_{max}}$ نرخ همگرایی و R شعاع تونل را نشان می دهد (Carranza Torres, ۲۰۰۰).

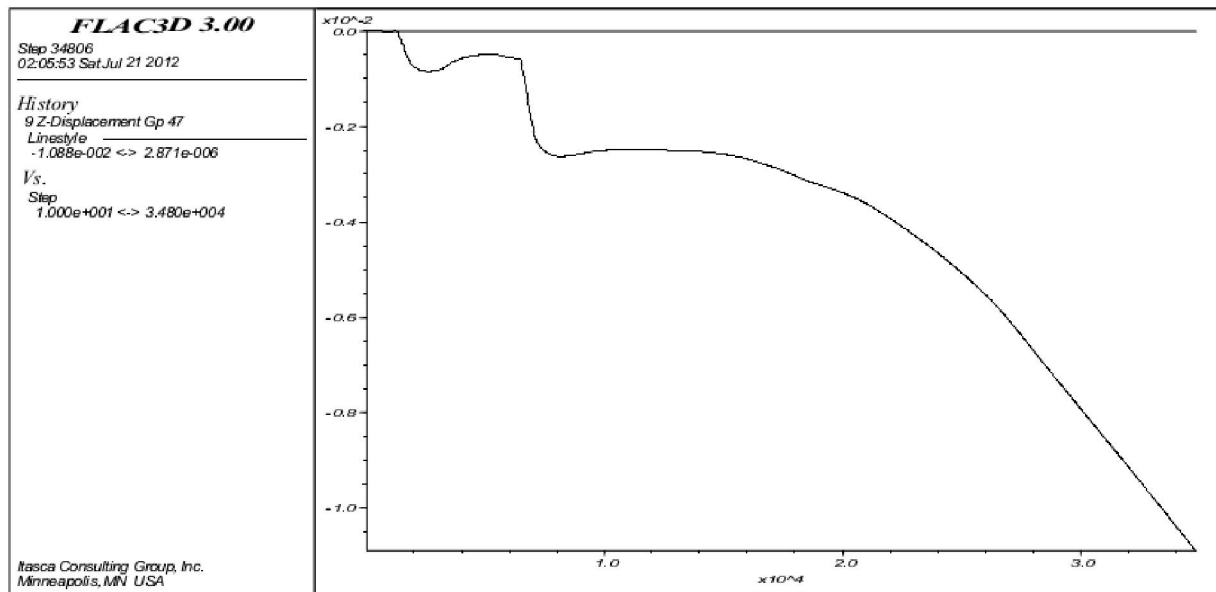
همان طور که در نمودار شکل (۳۰-۵) مشاهده می شود، مقدار همگرایی ایجاد شده در جبهه حفاری برابر ۳۰٪ می باشد و با دور شدن از آن مقادیر همگرایی افزایش می یابد.



شکل ۳۰-۵- تغییرات نرخ همگرایی بر حسب فاصله از جبهه کار (Carranza Torres, ۲۰۰۰)

۵-۶-۲- آزاد سازی تنش

برای مشخص کردن میزان جابجایی تونل با توجه به گام حفاری لازم است میزان کل جابجایی را محاسبه کرد. مقدار کل جابجایی (u_{MAX}) در اثر ترخیص تنش در بخش ۱، مقدار ۱/۶۷ سانتیمتر به دست می آید (با استفاده از مدلسازی اجرای بخش ۱). با در نظر گرفتن رابطه (۳-۵) مقدار جابجایی (u_r) به ازای گام حفاری ۱ متر، حدوداً برابر ۰/۵۵ سانتیمتر می شود. بطور مثال در شکل (۳۱-۵) تاریخچه جابجایی تاج تونل پس از یک گام حفاری مشاهده می شود.



شکل ۵-۳۱- تاریخچه جابجایی تاج تونل پس از اعمال ترخیص تنش

در این مرحله با اعمال ترخیص تنش‌های محاسبه شده در مرحله قبل، به بررسی پایداری فضای حفاری شده پرداخته می‌شود.

۵-۷- تحلیل پایداری تونل بعد از ترخیص تنش

برای بررسی پایداری تونل بعد از حفر و آزادسازی تنش و قبل از نصب سیستم نگهداری از رابطه‌ای که توسط ساکورایی در سال ۱۹۸۶ ارائه شد، استفاده شده است. این رابطه کرنش بحرانی (ϵ_{cr}) در حالت فشاری محصور نشده در اطراف تونل را بر اساس مدول الاستیسیته محیط بیان می‌کند. از آنجا که زمین تحت تنش سه محوره قرار دارد، استفاده از ماکزیمم کرنش برشی برای ارزیابی پایداری تونل منطقی‌تر به نظر می‌رسد. ساکورایی و همکارانش در سال ۱۹۹۷ رابطه‌ی (۴-۵) را برای محاسبه کرنش بحرانی در حالت سه محوری (γ_c) با استفاده از کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور نشده و نسبت پواسون پیشنهاد کردند (Sakurai, ۱۹۹۷).

$$\gamma_c = (1 + \nu) \cdot \varepsilon_c \quad (4-5)$$

در این رابطه لازم است ابتدا مفهوم کرنش بحرانی بیان شود.

۵-۷-۱- کرنش بحرانی

در ابتدا کرنش بحرانی بر اساس نسبت بین مقاومت فشاری تک محوری و مدول تغییرشکل پذیری به صورت رابطه (۵-۵) تعریف شد (Sakurai S. et al, ۱۹۸۳).

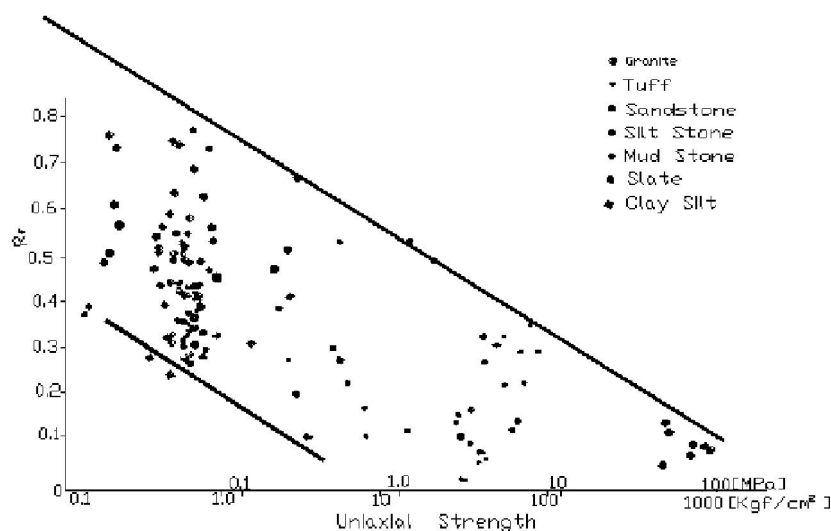
$$\varepsilon_{critical} = \frac{\sigma_c}{E} \quad (5-5)$$

در روش کنترل مستقیم کرنش^۱ (DSCT) ارائه شده در سال ۱۹۸۱ توسط ساکورایی، ابتدا کرنش بحرانی تعیین و سپس پارامتر R_f (پارامتر نشان دهنده مقاومت شکست که از شکل (۵-۳۲) مقدار آن به دست می آید) مشخص می شود. سپس با استفاده از رابطه (۵-۶) کرنش شکست تک محوری^۲ (ε_f) محاسبه می شود. با تعیین فاکتور (M) که از روی آزمایشات سه محوره به دست می آید، کرنش شکست سه محوره قابل محاسبه است. نکته قابل ذکر آن است که ضریب (M) به شکلی عمل می نماید که اثر تنش محصور کننده را در افزایش کرنش شکننده بحرانی لحاظ می نماید (Sakurai S. et al, ۱۹۸۳). بایستی توجه نمود که عموماً کرنش بحرانی با کرنش در ناحیه شکست (ε_f) تفاوت دارد، اما برای مواد شکننده که در آن‌ها رابطه تنش و کرنش تقریباً خطی است کرنش بحرانی تقریباً برابر با همان کرنش در نقطه شکست در نظر گرفته می شود (Sakurai S., ۱۹۹۰). در شکل (۵-۳۳) رابطه بین کرنش بحرانی و شکست نشان داده شده است.

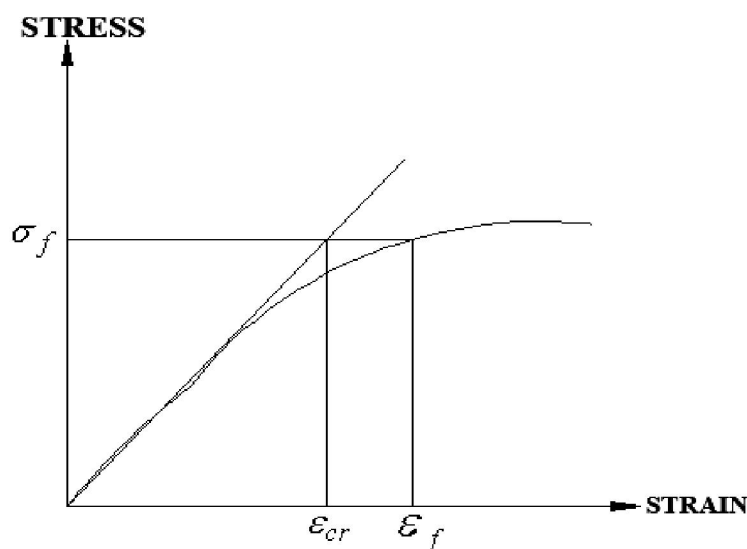
$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{Cr}}{1 - R_f} \quad (6-5)$$

^۱Direct Strain Control Technique

^۲Failure Uniaxial Strain



شکل ۵-۳۲- نمودار تعیین R_f با استفاده از مقاومت فشاری تک محوره (Sakurai, et al, ۱۹۸۳)

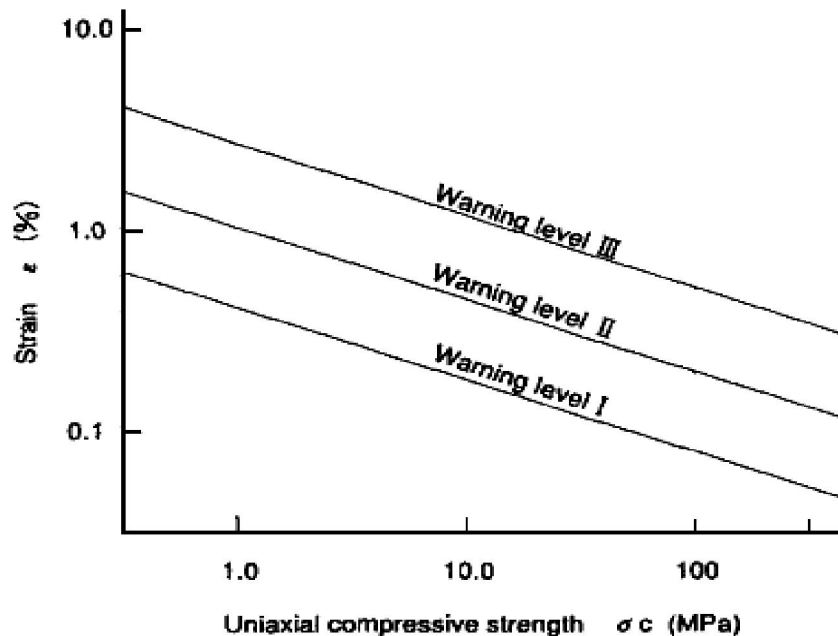


شکل ۵-۳۳- رابطه بین کرنش بحرانی (ϵ_{cr}) و کرنش شکست (ϵ_f) (Sakurai S., ۱۹۹۰)

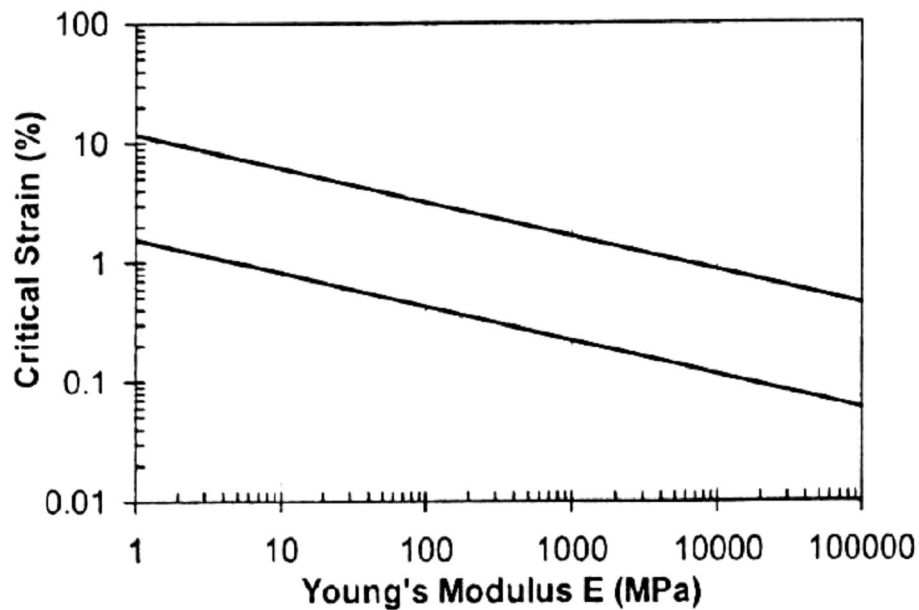
۵-۷-۲- تراز هشدار خطر (Sakurai S., ۱۹۹۷)

ساکورایی نموداری بر اساس کرنش بحرانی نسبت به مقاومت فشاری تک محوره و مدول تغییرشکل پذیری، که شامل سه تراز هشدار خطر و برای بررسی پایداری تونل‌ها است را پیشنهاد داد. این نمودارها

در شکل (۳۴-۵) و (۳۵-۵) نشان داده شده است. بر اساس نمودار ارائه شده، ساکورایی معتقد است زمانی که کرنش‌های ایجاد شده در سازه به سمت تراز هشدار خطر I باشد، تونل هیچ گونه مشکلی از لحاظ پایداری ندارند و تونلسازی از هر لحاظ ایمن است. در صورتی تونلسازی با مشکل جدی مواجه می‌گردد که کرنش‌های ایجاد شده در سازه به سمت تراز هشدار III میل نماید (Sakurai S., ۱۹۹۷). در چنین شرایطی تونلسازی با مشکلات عدیده مواجه گردیده است که می‌توان آثار آن را بر روی سیستم نگهداری استفاده شده در تونل‌ها مشاهده نمود.



شکل ۳۴-۵- تراز هشدار خطر برای ارزیابی پایداری تونل‌ها (Sakurai S., ۱۹۹۷)



شکل ۵-۳۵- رابطه پیشنهادی ساکورایی بین کرنش بحرانی و مدول الاستیسیته (Sakurai S., ۱۹۹۰)

ساکورایی معتقد است که کرنش بحرانی تقریباً مستقل از درزه‌ها، محتوای آب و دما می‌باشد (Singh B. et al, ۲۰۰۶). ساکورایی و آدئوچی^۱ در سال ۱۹۸۸ بر اساس مطالعات تجربی انجام گرفته بر روی تونل‌های مختلف ترازهای هشدار خطر را به صورت روابط (۷-۵) ارائه کرده‌اند (Hoek E. et al, ۲۰۰۲).

$$\begin{aligned} \log \varepsilon_C &= -0.25 \log E - 0.85 && \text{تراز هشدار خطر III} \\ \log \varepsilon_C &= -0.25 \log E - 1.22 && \text{تراز هشدار خطر II} \quad (7-5) \\ \log \varepsilon_C &= -0.25 \log E - 1.59 && \text{تراز هشدار خطر I} \end{aligned}$$

در روابط ارائه شده توسط ساکورایی و آدئوچی، E مدول تغییرشکل پذیری بر حسب کیلوگرم نیرو بر

^۱Adaeochi

سانتیمتر مربع (Kgf/cm^2) و کرنش بحرانی (ϵ_c) بر اساس درصد می‌باشد. در تراز هشدار خطر I تونل مشکل ناپایداری ندارد. در تراز هشدار خطر III تونل پایداری کوتاه مدت نشان می‌دهد. تراز هشدار خطر II به عنوان مبنای طراحی نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد شده است. شکل (۵-۳۵) رابطه بین کرنش بحرانی و مدول تغییر شکل پذیری، پیشنهاد ساکورایی و آدئوچی نشان داده شده است.

هوک در سال ۱۹۹۹ مقدار کرنش بحرانی ۲٪ را به عنوان مرز پایداری تونل‌هایی که نیاز به حداقل نگهداری دارند، و ناپایداری تونل‌هایی که بایستی توجهی ویژه نسبت به طراحی نگهداری آن مبذول داشت، پیشنهاد نموده است (Pan X.D. et al, ۱۹۸۸). در این طرح، مقدار کرنش ایجاد شده در تاج تونل با توجه به قطر متوسط فضای زیرزمینی، برابر ۰/۹۸٪ بدست آمد که با توجه به مقدار کرنش بحرانی، کمتر از مقدار بحرانی می‌باشد.

۵-۷-۳- تحلیل پایداری با استفاده از مفهوم کرنش برشی بحرانی

برای سنجش پایداری تونل و قرار دادن آن در یکی از ترازهای هشدار، مقادیر کرنش برشی را طبق روابط (۵-۷) و (۵-۴) به دست می‌آوریم. در جدول (۵-۸) این مقادیر آمده است.

جدول ۵-۸- مقادیر محاسبه شده کرنش بحرانی توسط روابط ساکورایی

تراز هشدار خطر	ϵ_c	γ_c
III	$3.64e-2$	$4.85e-2$
II	$1.55e-2$	$2.07e-2$
I	$6.63e-3$	$8.82e-3$

$$\gamma_c = (1 + \nu) \cdot \epsilon_c$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار کرنش برشی حداکثر بوجود آمده در تونل برابر ۰/۰۷۹ است

که در رده تراز هشدار I قرار می‌گیرد. به این ترتیب طبق رابطه ساکورایی تونل پایدار می‌باشد.

۵-۸- نتیجه گیری

از مشخصه‌های اصلی روش NATM بکارگیری رفتارسنجی مداوم حین حفاری و کنترل حرکت لایه‌ها است. این روش به مقاومت ذاتی توده اطراف تونل تأکید دارد که نقش اساسی در نگهداری را ایفا می‌کند. به بیان دیگر از آنجا که سیستم NATM براساس رفتارسنجی ضمن اجرا استوار است، لذا تغییر در شیوه اجرا جزء لاینفک این روش می‌باشد و نیز بنا بر اصول اساسی NATM لذا باید حین اجرای این روش ابزاربندی و رفتارسنجی بایستی بطور مداوم صورت گیرد تا صحت نتایج طراحی تایید شود.

پس از انتخاب گام حفاری مناسب، تفکیک سطح مقطع به بخش‌های مختلف، انتخاب مدل رفتاری مناسب و نیز مدلسازی بهینه این روش با روش عددی، با توجه به تراز هشدار ساکورایی، با این گام حفاری و مقادیر ژئومکانیکی داده شده ثابت شد که تونل پایدار می‌ماند. نتیجه‌ای که از این بحث می‌توان گرفت این است که با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی منطقه مدلسازی عددی نشان داد که با انتخاب مناسب گالری‌های جانبی بعنوان بخش‌های کوچکتر حفاری که کاهش‌دهنده نشست سطح زمین نیز می‌باشند، میزان جابجایی‌های حاصل از حفاری منطقی بنظر رسیده و تونل پیشنهادی با کرنش‌های بوجود آمده پایدار می‌باشد. این کار با استفاده از نتایج ابزار دقیق به کار رفته در تونل می‌تواند اعتبارسنجی شود. در فصل ششم نتایج نشست‌های حاصل از این روش با روش پوش و کند اجرایی مقایسه خواهد شد.

فصل هشتم

مقایسه روش اجرایی NATM و پوش و کند در پروژه

راه آهن تهران- تبریز

۶-۱- مقدمه

همانطور که در فصل چهارم درباره روش‌های اجرایی تونل در ۶ کیلومتر اول پروژه راه آهن تهران- تبریز گفته شد حدود ۸۰٪ از کل مسیر به روش پوش و کند (شمع- ستون‌های میانی و سقف پیش ساخته) اجرا گردید که در روند پیشرفت پروژه تاثیر بسزایی داشته است. لذا با توجه به این طرح اجرا شده، در این فصل به مدلسازی این روش اجرایی تونل با استفاده از ترانسه قائم و شیبدار با کمک نرم افزار ۳D FLAC پرداخته شده و در نهایت با توجه به میزان پیشروی تونل مقادیر جابجایی‌ها و نشست‌ها در سطح زمین کنار تونل و جلوتر از سینه کار بدست آمده و با مقادیر بدست آمده از طرح پیشنهادی NATM مقایسه می‌شود. سپس از بین این دو روش با در نظر گرفتن ملاحظات طراحی دو روش، طرح بهینه انتخاب می‌شود.

۶-۲- مقایسه کلی روش کند و پوش (یا پوش و کند) و روش NATM

روش تونلسازی کند و پوش (یا پوش و کند) تکنیکی رایج و اثبات شده در ساخت تونل‌های کم عمق در زمین سست و نرم می‌باشد. تکنیک کند و پوش سال‌های زیادی است که در سازه‌های زیرزمینی به منظور امکانات حمل و نقل استفاده می‌گردد. این روش، نصب دیواره های موقت برای نگهداری کناره های حفاری، دستگاه مهاربندی، کنترل آب‌های زیرزمینی و پی‌بندی سازه‌های مجاور در جاهای لازم، را

شامل می‌شود. اقتصاد ملزم می‌دارد که حمل و نقل و تسهیلات زندگی حتی الامکان در نزدیکی سطح زمین قرار گیرند و توسط تکنیک کند و پوش ساخته شوند تا استفاده از روش تونلسازی. تونل‌های کم عمق کند و پوش مزایای مختلفی از جمله دسترسی آسان از سطح خیابان دارند. از جمله اصلی‌ترین معایب روش تونلسازی کند و پوش، آثار مخرب آن در محیط‌های شهری پرتراфик می‌باشد. هزینه‌های ساخت و قابلیت کاربرد تونل‌های کند و پوش نسبت به عمق مورد نظر به سرعت افزایش می‌یابد. یکی از مهمترین مشکلات در احداث سازه‌های کند و پوش، حفاظت از گودبرداری و ساختمان‌های موجود در مجاورت آن است. بنابراین عدم رعایت روش‌های مناسب به منظور حفاظت گودها و همچنین شیب‌های در حال احداث، منجر به خسارت‌های جبران‌ناپذیری می‌شود و مخاطرات به وجود آمده ناشی از نشست های احتمالی و تقلیل ظرفیت باربری و تغییر مکان‌های جانبی، موجب ایجاد ترک در سازه‌های مجاور گود می‌شود. برای جلوگیری از موارد فوق، لازم است قبل از عملیات گودبرداری از روش‌های نگهداری و مهاربندی جانبی استفاده کرد تا بتوان عملیات را در محیطی پایدار و ایمن ادامه داد. این روش قابلیت سازگاری با تغییرات در عرض تونل و اشکال غیر یکدست تونل را دارا بوده و عموماً برای ساخت ایستگاه های مترو بکار می‌رود. در استفاده از این تکنیک نیاز به اجرای چند عملیات بطور همزمان می‌باشد. حفاری ترانشه، احداث تونل و پوشاندن تونل‌های حفاری شده با خاک، سه عنصر اصلی و یکپارچه این روش تونلسازی است. فعالیت‌ها در روش کند و پوش شبیه عملیات ساخت جاده است با این تفاوت که در عمق بیشتری اجرا می‌شوند (Muratidis A., ۲۰۰۸).

بطور کلی برای مقایسه دو روش تونلسازی در نواحی شهری، مسائل و مواردی که باید مد نظر قرار

گیرند بصورت زیر می‌باشند:

- نشست سطح زمین
- ریسک پذیری روش

- امکان پذیری و اجرایی بودن حفاری و نگهداری
 - هزینه‌های اجرای روش
 - وجود معارضین شهری اعم از ترافیکی و غیر ترافیکی (مدفون)
 - میزان روباره بالای تونل
 - میزان گام پیشروی
- از معایب روش کند و پوش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- این روش تولید سروصدا و گرد و خاک زیادی می‌کند که باید با اجرای روش‌های کنترلی مناسب کاهش یابد.
 - اغلب پیش از حفاری باید سکوه‌های موقت نصب شوند تا اثرات محیطی ساخت تونل حداقل شود.
 - حجم زیادتری از مواد حفاری شده در محیط باقی می‌ماند که مستلزم مکان مناسب تخلیه می‌باشد.

حفاظت از محیط زیست و شرایط ژئوتکنیکی ایمن از جمله مزایای این تکنیک بحساب می‌آید. از مزایای زیست محیطی روش حفاری مرحله‌ای (NATM) می‌توان به ایجاد اثرات محیطی موضعی و از معایب آن به ماندگاری بیشتر اثرات محیطی بواسطه سرعت کندتر این روش، اشاره کرد.

۳-۶- مدلسازی روش پوش و کند (شمع‌های میانی و سقف پیش ساخته)

همانگونه که در فصل چهارم روش اجرایی پوش و کند در تونل‌های شهری بطور کامل شرح داده شد در این بخش به مدلسازی این روش پرداخته می‌شود.

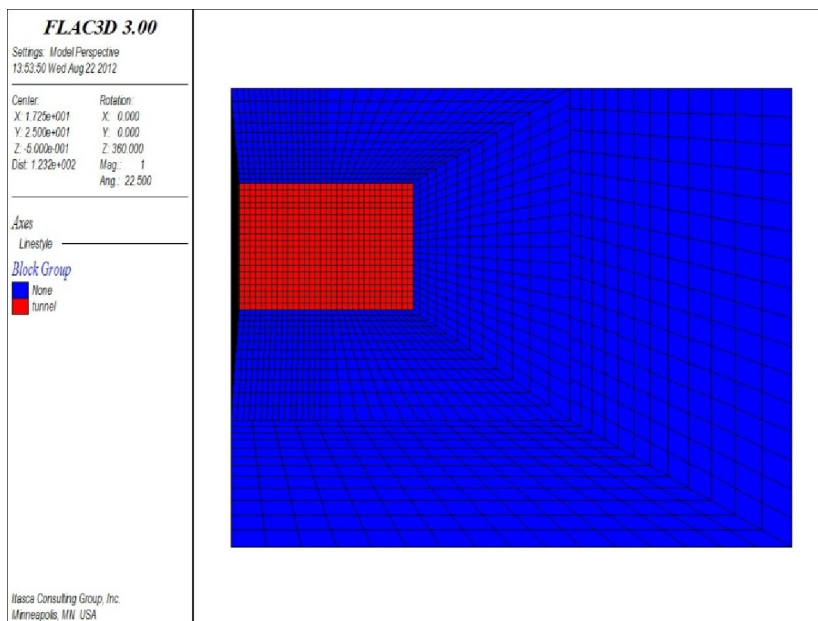
در این طرح در ابتدا باکس مستطیلی به ابعاد ۱۱ متر عرض و ۸ متر ارتفاع (با در نظر گرفتن دال کف به اندازه ۳۰ سانتیمتر) ایجاد می‌شود که نهایتاً مطابق با طرح اجرایی همان باکس ۱۱ متر عرض و

۷/۷ متر ارتفاع می‌باشد. سپس با توجه به پروفیل زمین‌شناسی مسیر تونل بین کیلومتر ۶ و ۷، یک مقطع ۲۵ متری از مسیر انتخاب می‌شود. این مقطع بحرانی همانطور که در فصل پنجم اشاره شد شامل ۳ لایه خاک به ترتیب از بالا به پایین شامل خاک دستی، خاک سیلتی و خاک ماسه‌ای و به ارتفاع ۶، ۱۰ و ۱۳ متر می‌باشند که ویژگی‌های این ۳ لایه خاکی در جدول (۱-۶) مشاهده می‌شود.

جدول ۱-۶- پارامترهای مهندسی و داده‌های طراحی مورد استفاده در تحلیل عددی برای مقطع بحرانی

پارامتر	عمق (m)	E (kg/cm ^۲)	ν	C (kg/cm ^۲)	φ (deg)	K ₀	γ _t (gr/cm ^۳)	σ _T (kg/cm ^۲)	نوع خاک
	۶	۵۰	۰.۲	۰.۰۵	۲۵	۰.۵۸	۱.۸	۰.۰۱	خاک دستی
	۱۰	۲۲۵	۰.۳۳	۰.۴۵	۲۳	۰.۷	۲	۰.۵۹۵	خاک سیلتی
	۱۳	۲۲۵	۰.۴	۰.۲	۲۵	۰.۶۷	۱.۶	۰.۲۵۵	خاک ماسه‌ای

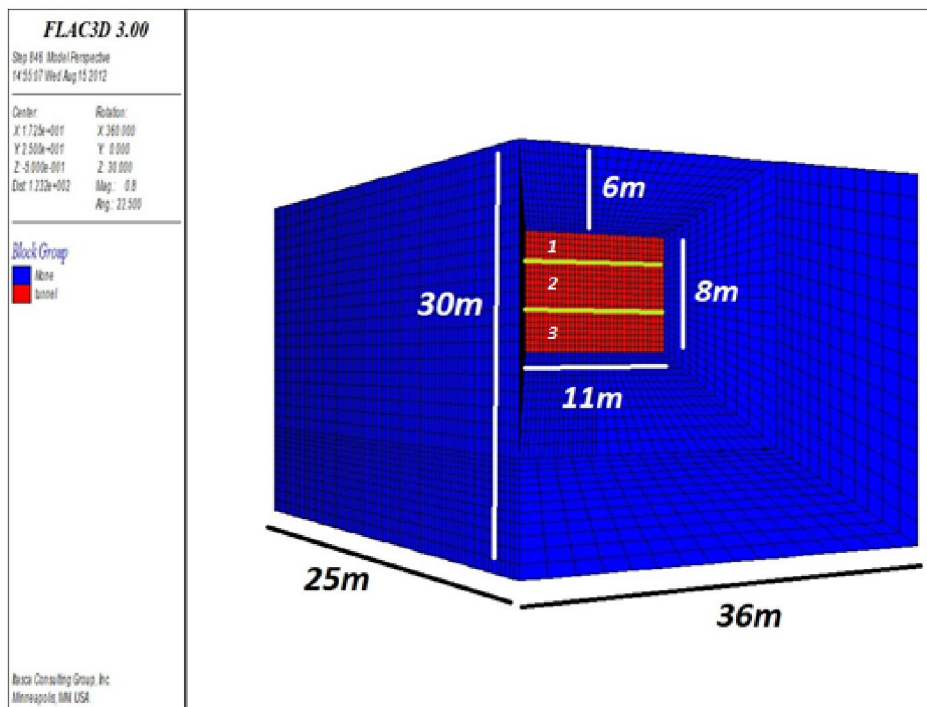
با توجه به تقارن موجود در طرح دو تونل، تونل سمت راست بعنوان تونل اصلی مدلسازی شد که در شکل (۱-۶) مدل ساخته شده دیده می‌شود. همانطور که در طرح اجرایی شکل (۲-۴) فصل چهارم دیده می‌شود بعلت اینکه قطر شمع‌های حائل میانی ۱ متر بوده لذا در مدلسازی نیمی از آن مدل شده است.



شکل ۱-۶- مدل پوش و کند ایجاد شده در نرم افزار ۳D FLAC

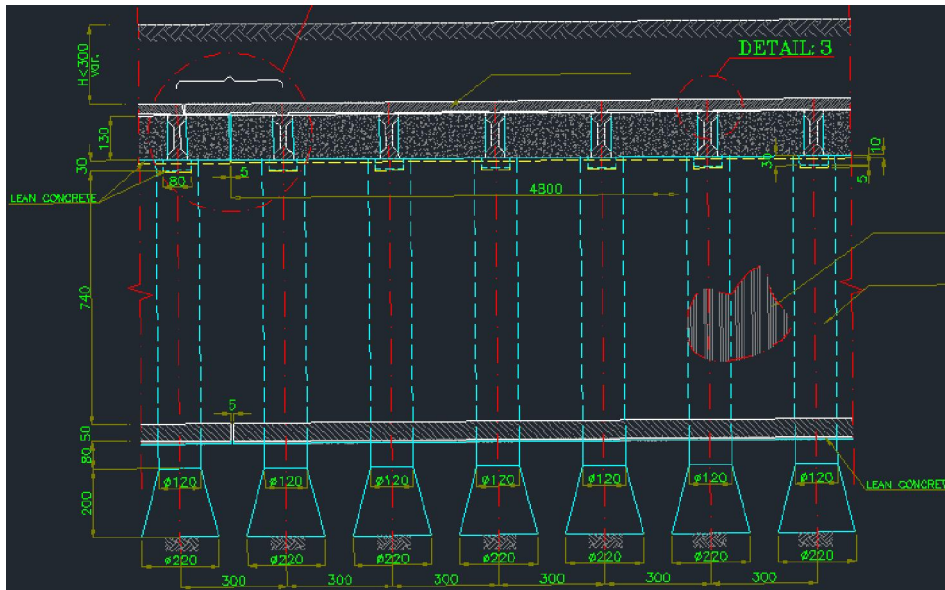
۶-۳-۱- مدلسازی تونل پوش و کند با استفاده از ترانشه قائم

فرآیند مدلسازی روش پوش و کند به این صورت است که ابتدا روباره ۶ متری از سطح زمین تا تراز بالای شمع‌ها و بطول عرض تونل و شمع میانی برداشته می‌شود. برداشتن این روباره یا بصورت ترانشه قائم و یا بصورت ترانشه شیبدار می‌تواند اجرا شود. سپس شمع کناری به قطر ۱/۲ متر و عمق ۱۱ متر و نیمی از شمع میانی به قطر ۱ متر و عمق ۱۲ متر و با همان ویژگی‌های شمع بتنی مسلح اشاره شده در فصل قبل مدل می‌شود. پس از اجرای شمع‌های کناری و میانی سقف پیش ساخته بتنی به عرض تونل و شمع میانی و ارتفاع ۱/۵ متر و عمق ۳ متر در راستای تونل در بالای تونل نصب می‌گردد. پس از تکمیل شدن سقف، حفاری زیر سقف پیش ساخته آغاز می‌شود. عملیات حفاری در مقطع بحرانی با گام پیشروی ۱ متر و بصورت ۳ پله ۲، ۳ و ۳ متری بترتیب از بالا به پایین اجرا می‌شود. در شکل (۶-۲) ابعاد مدل و تونل پوش و کند و نیز سه پله حفاری که به آن اشاره شد دیده می‌شود.

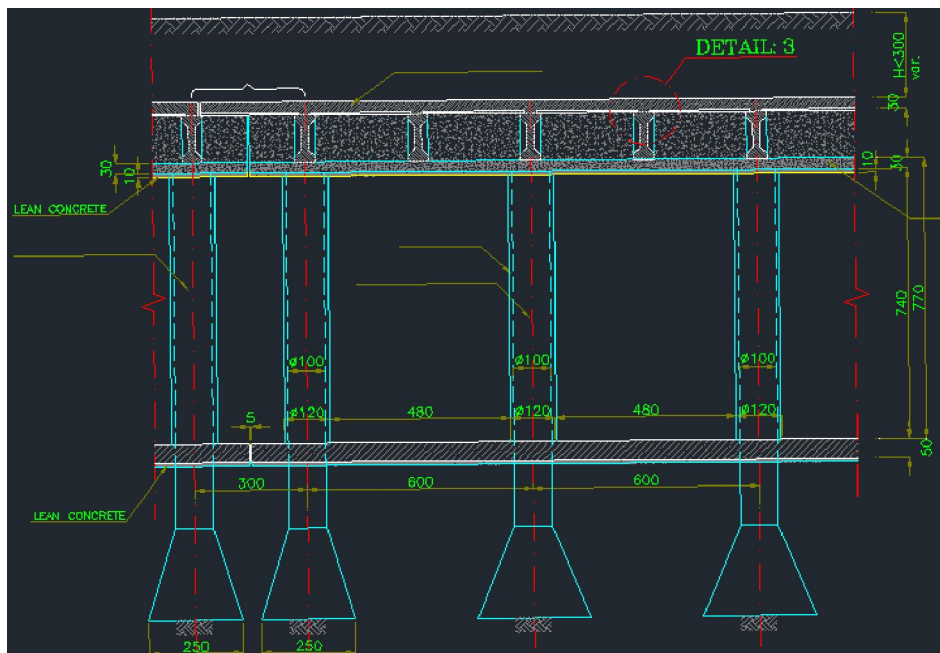


شکل ۶-۲- ابعاد مدل و تونل پوش و کند و سه پله حفاری در جبهه کار تونل

پس از اجرای ۳ متر از تونل، روباره بعدی باز هم به عمق ۳ متر برداشته شده، شمع‌های بعدی در دو طرف تونل مدل شده و سقف پیش ساخته دوم اجرا می‌شود. پس از اجرای سقف دوم مطابق ۳ متر اول مقطع تونل حفاری می‌شود و در نهایت دال کف تونل به ارتفاع ۳۰ سانتیمتر در کف تونل اجرا می‌شود. لازم به ذکر است که فاصله مرکز تا مرکز شمع‌های کناری ۳ متر و فاصله مرکز تا مرکز شمع‌های میانی ۶ متر می‌باشد. در شکل (۳-۶-الف) نمای شمع‌های کناری و در شکل (۳-۶-ب) شمع‌های میانی مشاهده می‌شود.



(الف)

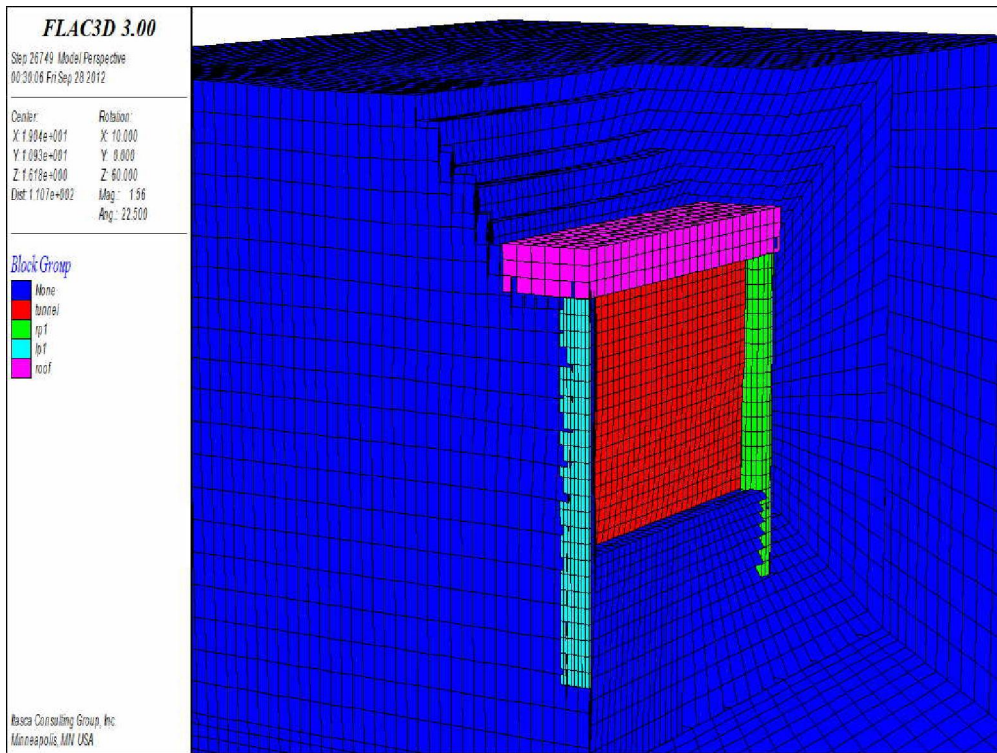


(ب)

شکل ۶-۳- نمای از شمع‌های کناری (الف) و شمع‌های میانی (ب) در روش پوش و کند

۶-۳-۲- مدلسازی تونل پوش و کند با استفاده از ترانسه شیبدار

تفاوتی که در این مدلسازی با مدلسازی تونل پوش و کند با استفاده از ترانسه قائم وجود دارد در این است که در این مدل، برداشتن روباره به ارتفاع ۶ متر می‌تواند تحت شیب صورت گیرد که عمدتاً این زاویه از حالت قائم به ۶۰ تا ۴۵ درجه تغییر می‌کند. ایجاد این ترانسه شیبدار بصورت پله‌ای می‌باشد که طی ۶ پله ۱ متری صورت می‌گیرد. در شکل (۶-۴) مدل پوش و کند با استفاده از ترانسه شیبدار مشاهده می‌شود.



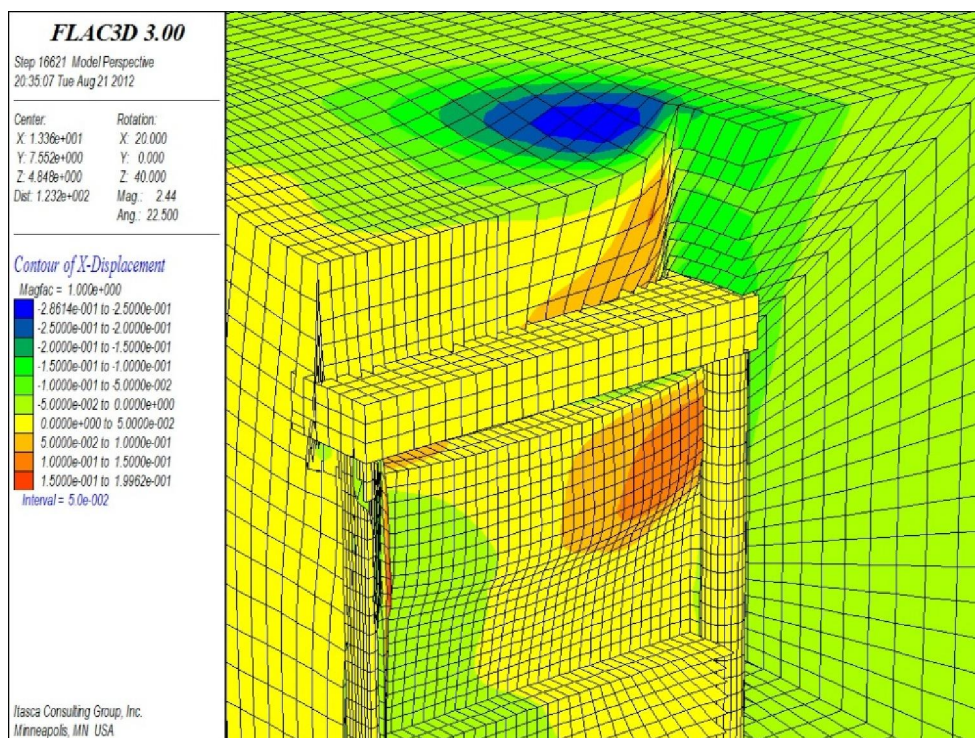
شکل ۴-۶- مدل پوش و کند با استفاده از ترانشه شیبدار

۴-۶- ارزیابی نتایج مدلسازی تونل به روش پوش و کند

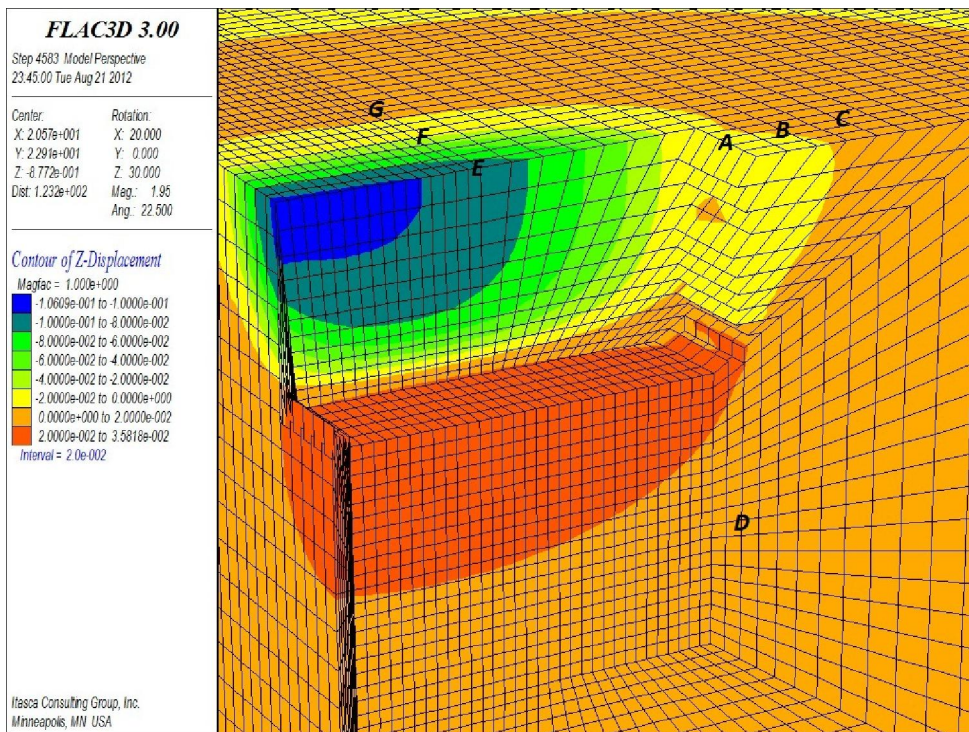
۴-۶-۱- تونل پوش و کند با استفاده از ترانشه قائم

در فرآیند روش پوش و کند بعلاوه روبراه کمتر حدود ۳ متر، در نواحی جلوتر از سینه کار تونل در سطح زمین بواسطه حفاری زیر سقف بتنی احتمال ناپایداری و نشست سطح زمین می‌رود. مدلسازی عددی نیز این نشست سطح را نشان می‌دهند. همچنین به علت اینکه تا مدت زمانی روی سقف بتنی با خاک پوشانده نمی‌شود لذا احتمال جابجایی و یا ریزش در دیواره‌های کناری بالای تراز شمع‌ها و سقف تونل می‌رود. در شکل (۴-۵) کنتور جابجایی افقی در مدل پس از گام پیشروی اول و در اشکال (۴-۶) تا (۴-۹) کنتورهای جابجایی قائم پس از برداشت روبراه ۶ متری، پله اول، پله دوم و پله سوم از گام پیشروی اول تونل مشاهده می‌شود. همانطور که انتظار می‌رفت حداکثر جابجایی قائم در دیواره‌های بالای سقف

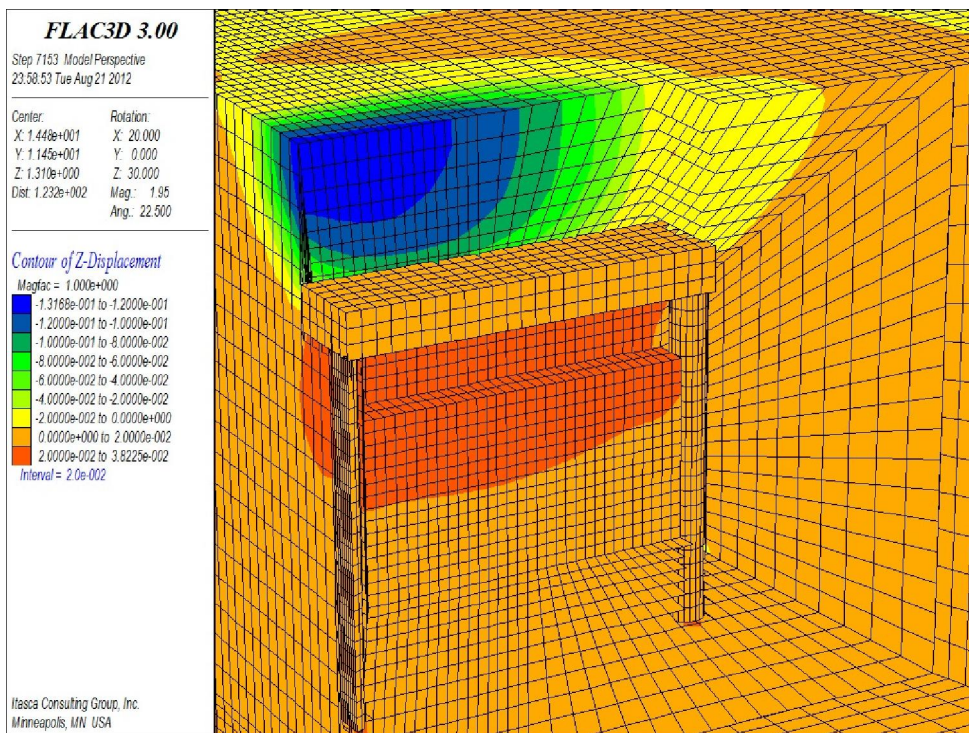
پیش ساخته بتنی در سطح زمین رخ داده است تا جاییکه این افزایش در نهایت پس از حفاری پله سوم در گام پیشروی اول منجر به ریزش دیواره ۶ متری بالای سقف پیش ساخته شده و عملاً نرم افزار امکان ادامه عملیات حفاری در گام دوم پیشروی را نخواهد داد. در شکل (۶-۸) مشاهده می شود که بعلت زیاد بودن عمق این روباره و نوع خاک موجود، دیواره پایدار نبوده و ریزش می کند و لذا اگر قرار باشد این قطعه از مسیر به روش پوش و کند اجرا شود پس از حفاری یک گام، ادامه حفاری غیرممکن خواهد بود.



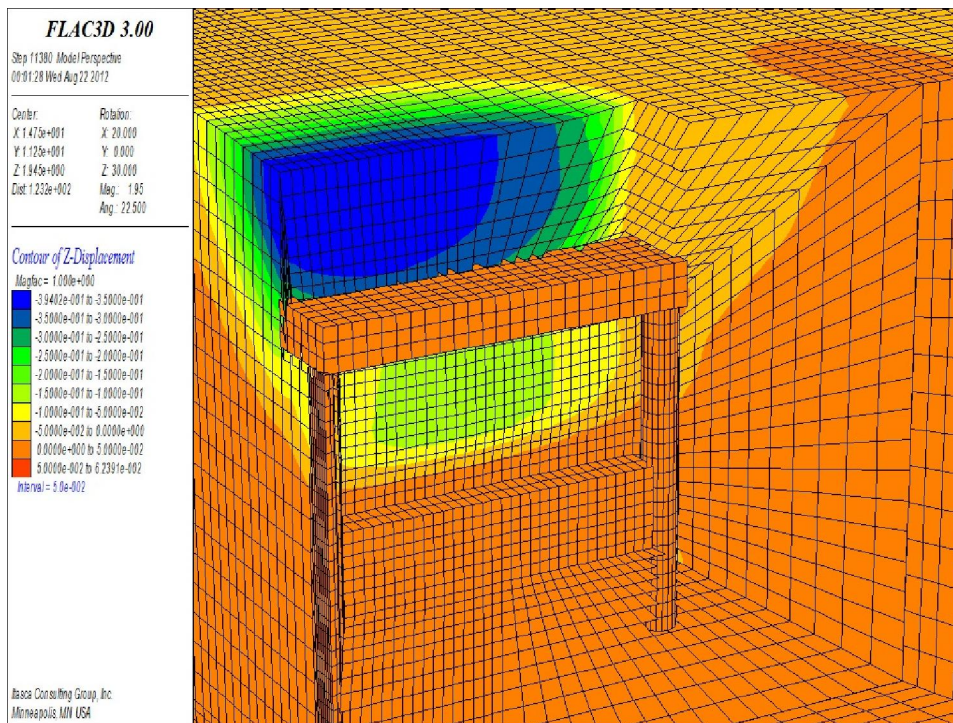
شکل ۶-۵- کنتورهای جابجایی افقی پس از اجرای گام اول از مدل پوش و کند با ترانسه قائم



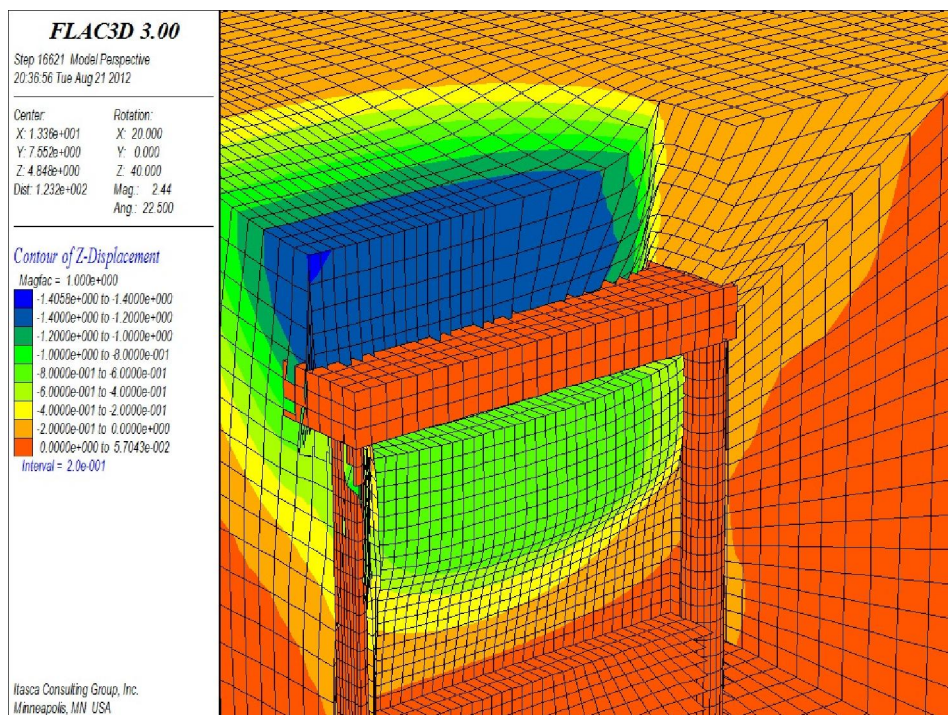
شکل ۶-۶- کنتورهای جابجایی قائم پس از برداشت روباره ۶ متری اول در مدل پوش و کند با ترانشه قائم



شکل ۶-۷- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری پله اول از گام اول پیشروی در مدل پوش و کند با ترانشه قائم

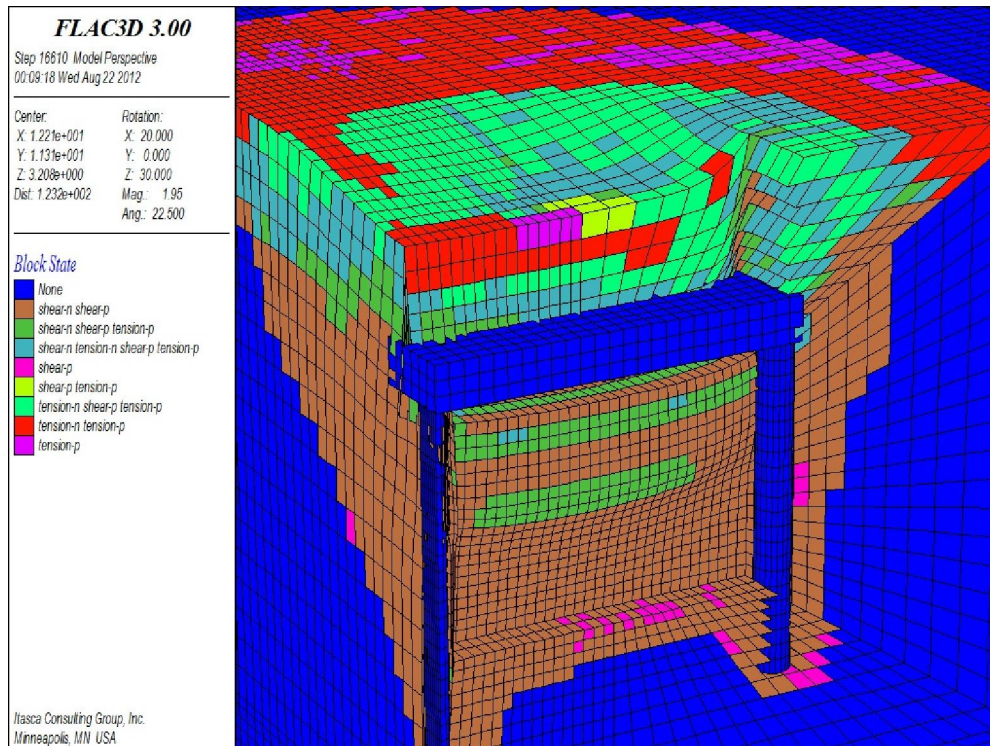


شکل ۶-۸- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری پله دوم از گام اول پیشروی در مدل پوش و کند با ترانشه قائم



شکل ۶-۹- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری پله سوم از گام اول پیشروی در مدل پوش و کند با ترانشه قائم

در شکل (۶-۱۰) شرایط حالت پلاستیک ایجاد شده در مدل را پس از اجرای گام پیشروی اول از تونل پوش و کند مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل دیده می‌شود در کل سینه کار شکست برشی و در بالای سقف پیش ساخته و سطح زمین (به شعاع حدوداً ۲۰ متر) شرایط شکست کششی ایجاد شده است که منجر به ریزش در سینه کار و دیواره بالای سقف بتنی می‌شود.



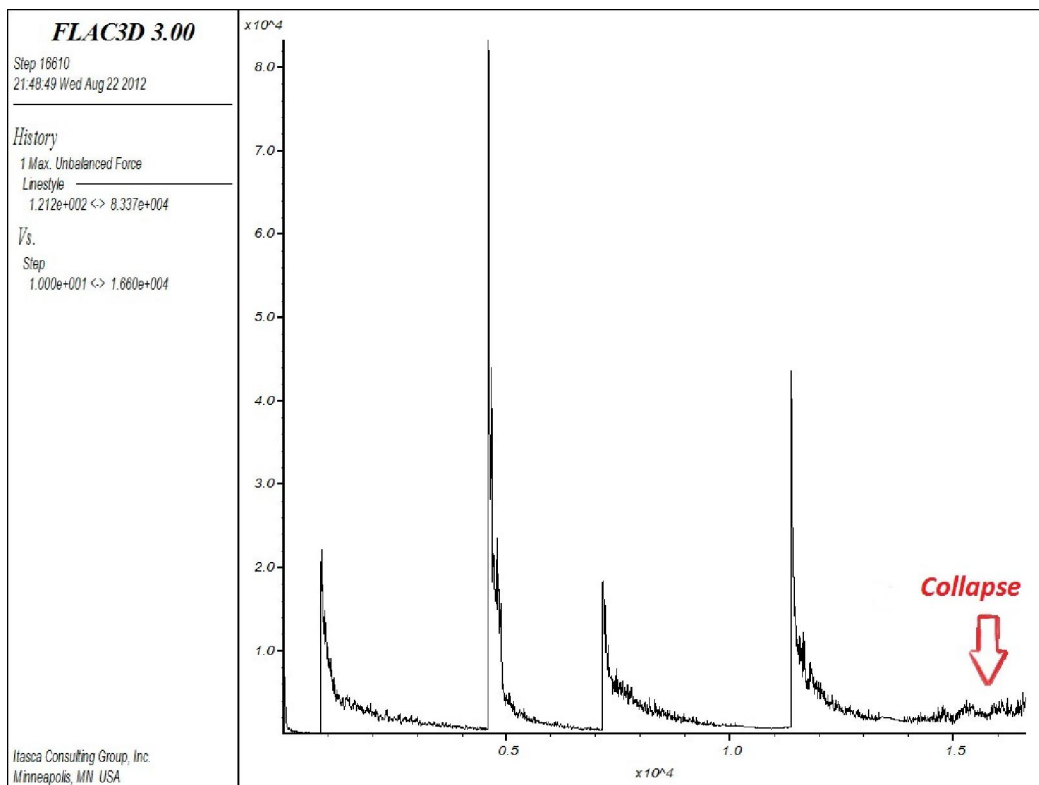
شکل ۶-۱۰- شرایط حالت پلاستیک ایجاد شده در مدل پس از اجرای گام اول از مدل پوش و کند با ترانسه قائم

در جدول (۶-۲) مقادیر جابجایی افقی در چند نقطه از دیواره راست تونل و دیواره قائم بالای تراز شمع‌های کناری و نیز جابجایی قائم در چند نقطه بالای محور تونل در سطح زمین پس از اجرای گام اول مشاهده می‌شود که در نهایت منجر به ریزش روباره شد. نقاط تعیین شده A تا G در جدول (۶-۲)، در شکل (۶-۶) مشخص شده‌اند.

جدول ۶-۲- مقادیر جابجایی افقی و قائم در چند نقطه از مدل با ترانشه قائم (سانتیمتر)

مرحله	پس از برداشت روباره ۶ متری اول	پس از اجرای پله اول	پس از اجرای پله دوم	پس از اجرای پله سوم
جابجایی افقی نقطه A	۱.۵	۱.۷	۳.۹	۱۴
جابجایی افقی نقطه B	۰.۸۵	۱	۲	۷.۷
جابجایی افقی نقطه C	۰.۵۸	۰.۷۸	۱.۳	۲.۹
جابجایی افقی نقطه D	۰.۳۵	۰.۶	۰.۹۲	۱.۶
نشست سطح زمین در نقطه E	۹	۱۱	۳۶	۱۳۵
نشست سطح زمین در نقطه F	۱.۶	۲.۲	۲۱	۹۸
نشست سطح زمین در نقطه G	۰.۰۱	۰.۰۱۵	۳.۲	۲۴

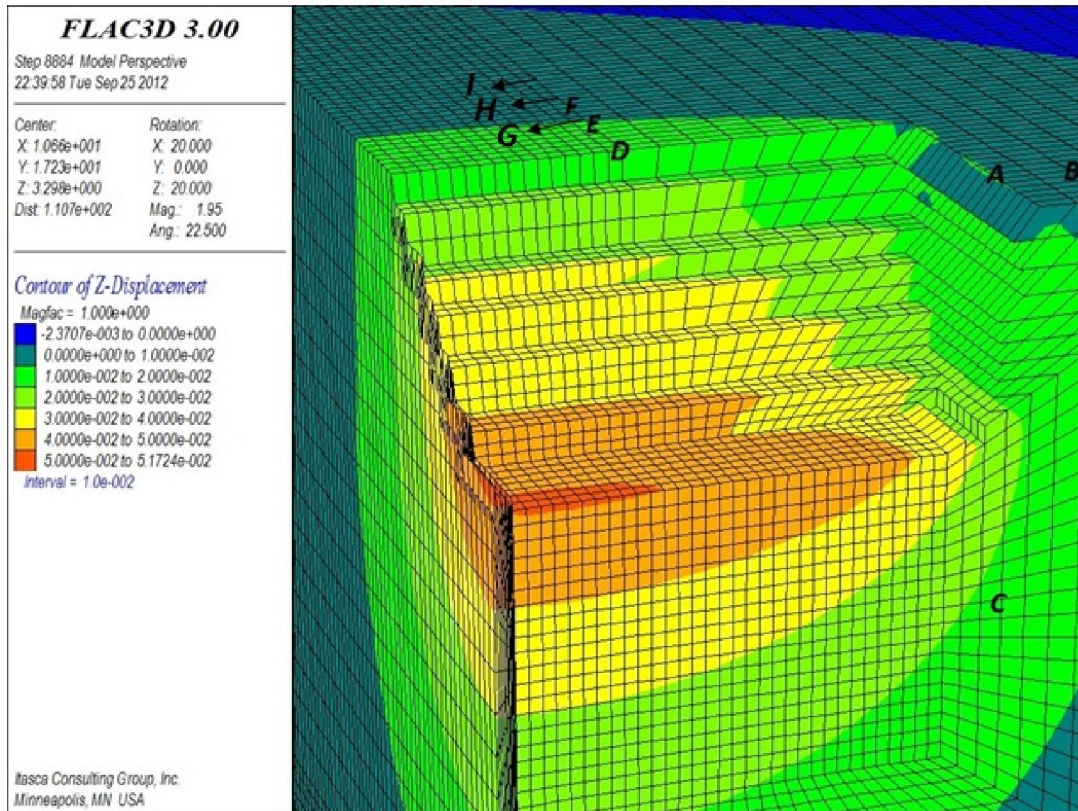
همانطور که روند نیروهای نامتعادل کننده پس از اجرای گام پیشروی اول در شکل (۶-۱۱) نشان می‌دهد پس از حفاری پله سوم این نیروها به صفر میل نکرده و حالت حدودا افزایشی دارد که نشان دهنده ریزش و عدم به تعادل رسیدن مدل پوش و کند در این ناحیه می‌باشد.



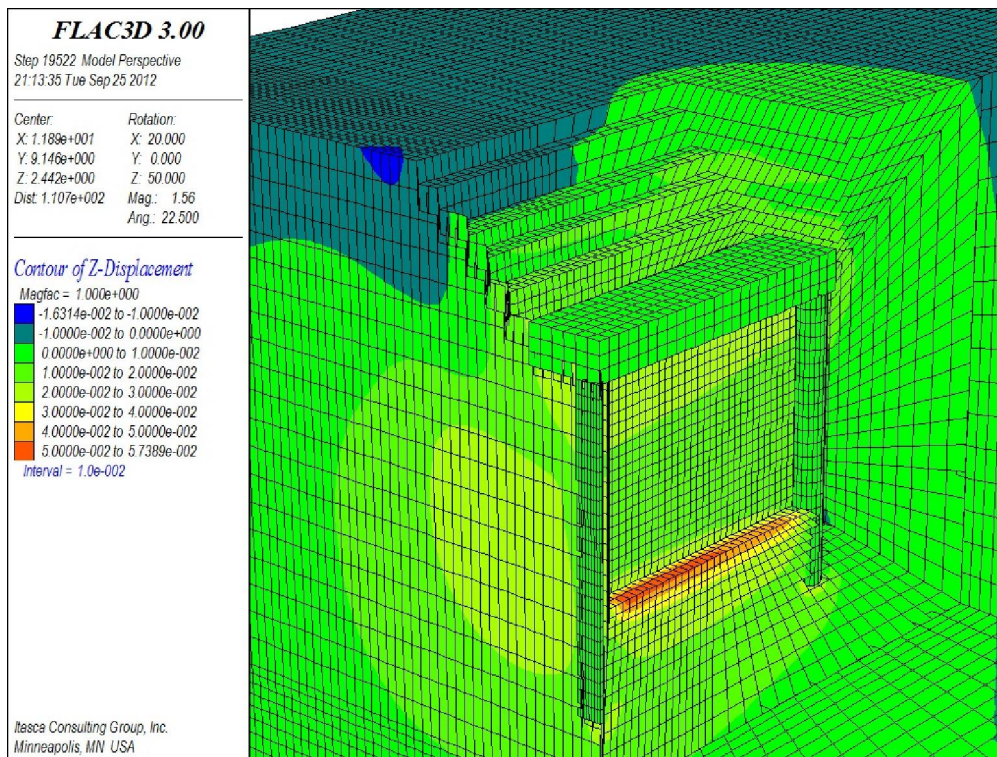
شکل ۶-۱۱- روند نیروهای نامتعادل کننده پس از اجرای گام پیشروی اول در مدل پوش و کند با ترانشه قائم

۶-۴-۲- تونل پوش و کند با استفاده از ترانشه شیبدار

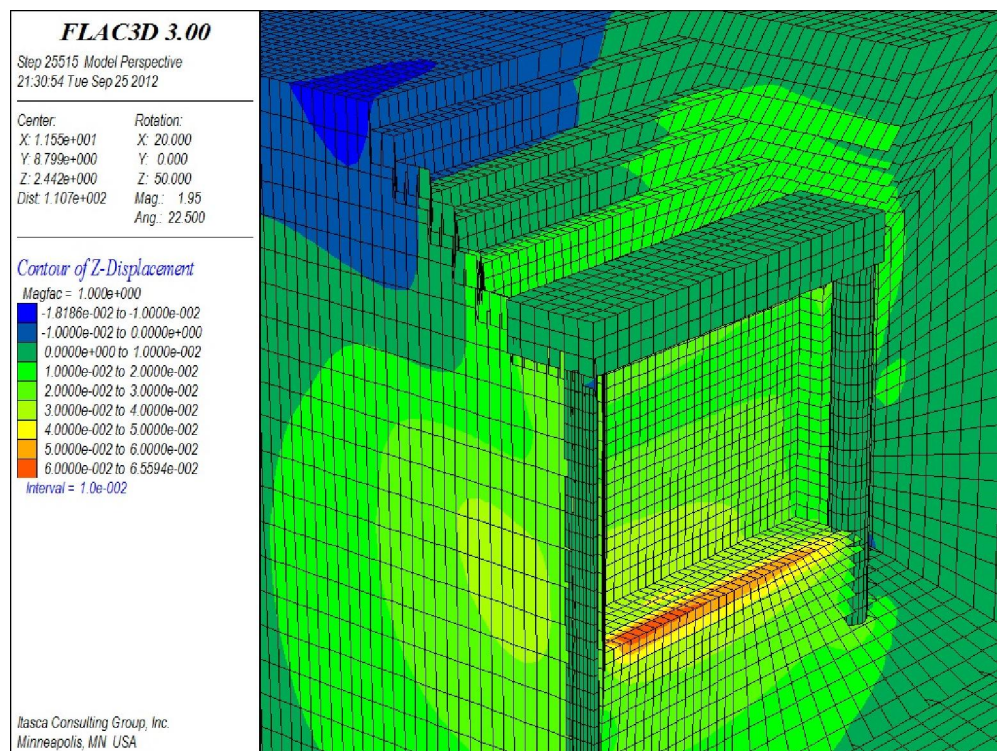
در اشکال زیر کنترهای جابجایی قائم حین پیشروی ۵ گام از تونل به روش پوش و کند با استفاده از ترانشه شیبدار تحت زاویه ۴۵ درجه مشاهده می‌شود. همانطور که در این اشکال دیده می‌شود حداکثر جابجایی قائم بالای ترانشه شیبدار و خود ترانشه می باشد. در شکل (۶-۱۲) نقاط D، E و F مربوط به برداشتن اولین روباره بصورت ترانشه شیبدار و نقاط G، H و I مربوط به برداشتن دومین روباره بمنظور اجرای شمع‌های بعدی، سقف پیش ساخته دوم و حفاری گام‌های پیشروی چهارم و پنجم می‌باشد.



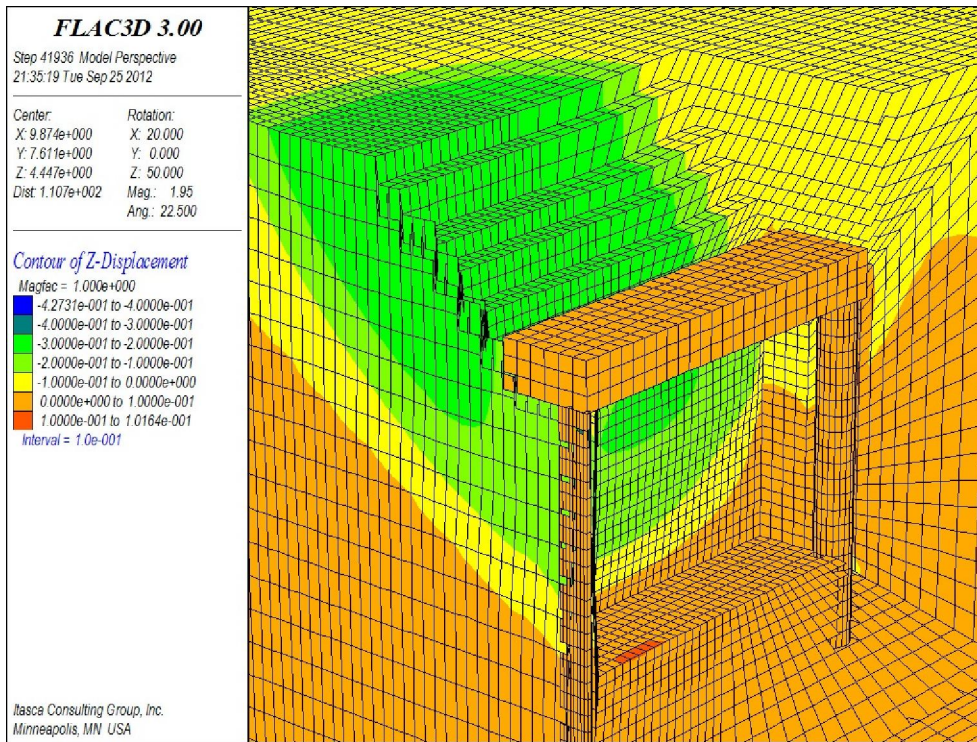
شکل ۶-۱۲- کنترهای جابجایی قائم پس از برداشتن روباره ۶ متری اول بصورت شیبدار تحت زاویه ۴۵ درجه



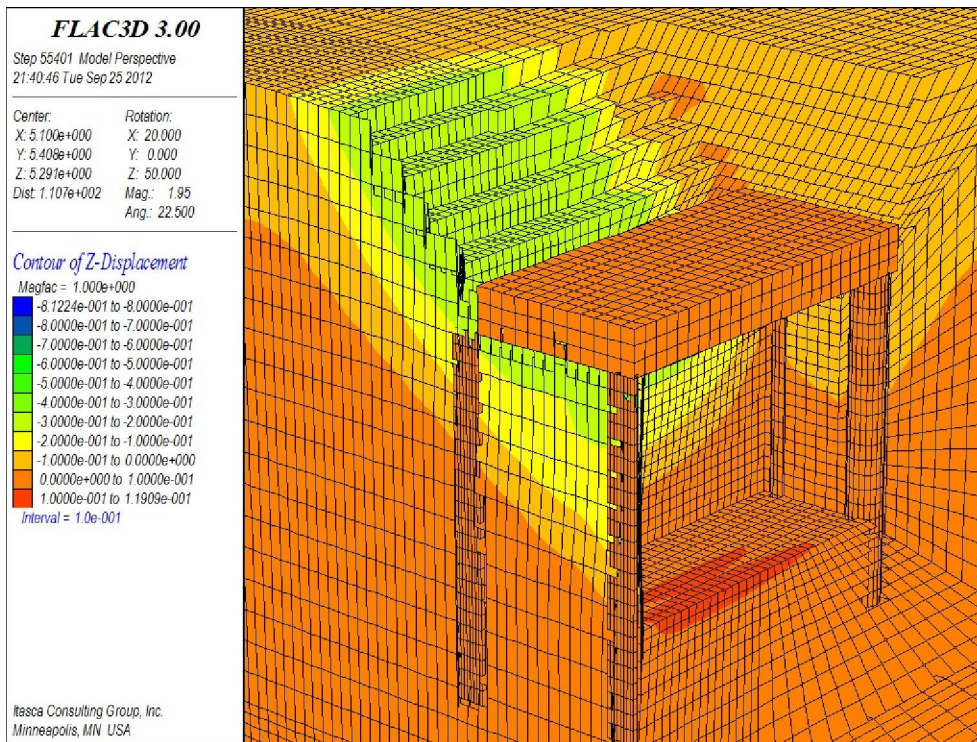
شکل ۶-۱۳ - کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری گام پیشروی اول در حالت ترانشه شیبدار تحت زاویه ۴۵ درجه



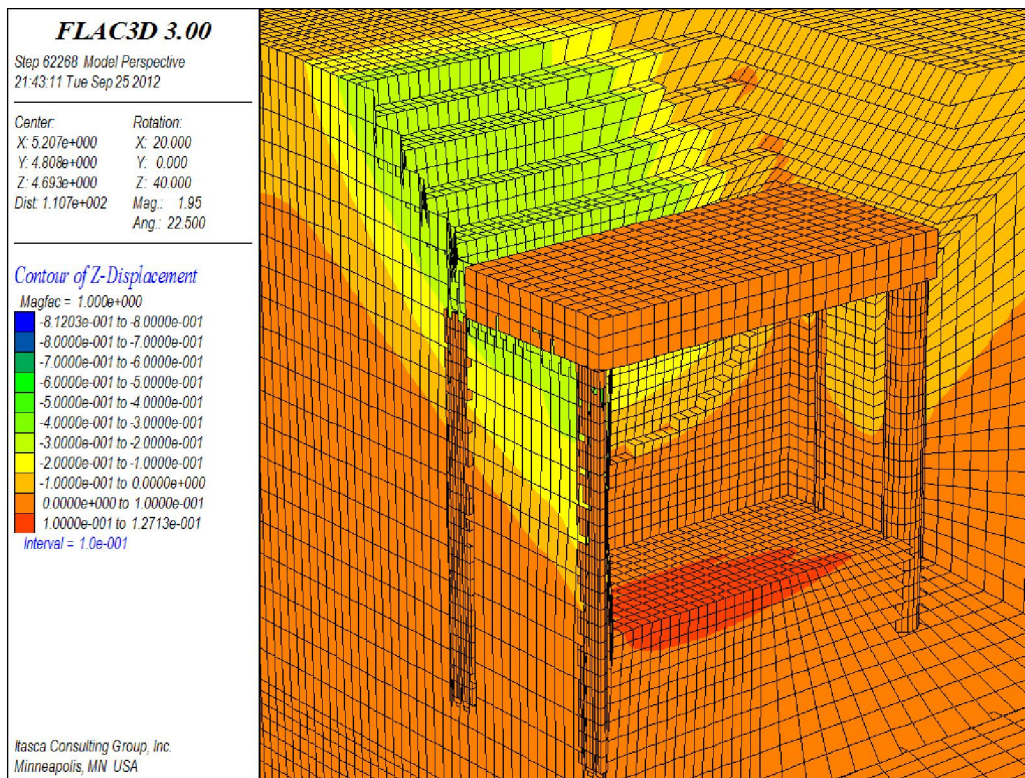
شکل ۶-۱۴ - کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری گام پیشروی دوم در حالت ترانشه شیبدار تحت زاویه ۴۵ درجه



شکل ۶-۱۵ - کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری گام پیشروی سوم در حالت ترانشه شیبدار تحت زاویه ۴۵ درجه



شکل ۶-۱۶ - کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری گام پیشروی چهارم در حالت ترانشه شیبدار تحت زاویه ۴۵ درجه



شکل ۶-۱۷- کنتورهای جابجایی قائم پس از حفاری گام پیشروی پنجم در حالت ترانشه شیبدار تحت زاویه ۴۵ درجه

در جدول (۶-۳) مقادیر جابجایی افقی در چند نقطه از دیواره راست تونل و دیواره قائم بالای تراز شمع‌های کناری و نیز جابجایی قائم در چند نقطه بالای محور تونل در سطح زمین پس از اجرای ۵ گام پیشروی در حالت ترانشه شیبدار با زاویه ۴۵ درجه مشاهده می‌شود. همچنین نتایج بدست آمده از جابجایی‌های قائم و افقی برای حالت ترانشه با زاویه ۶۰ درجه در جدول (۶-۴) آمده است. مدلسازی روش پوش و کند با ترانشه با زاویه ۶۰ درجه نشان می‌دهد که پس از طی ۲ گام پیشروی بعلت ایجاد نشست‌های زیاد در سطح زمین در مدل، امکان ادامه مدلسازی وجود نداشته است و نیز همانطور که نتایج نشست‌های سطح نشان می‌دهد این مقادیر تحت ترانشه با زاویه ۶۰ درجه بیشتر از مقادیر حاصل از مدلسازی ترانشه با زاویه ۴۵ درجه می‌باشد.

جدول ۶-۳- مقادیر جابجایی افقی و قائم در چند نقطه از مدل با ترانشه شیبدار با زاویه ۴۵ درجه (سانتیمتر)

مرحله	پس از برداشت روباره ۶ متری اول	پس از اجرای گام پیشروی اول	پس از اجرای گام پیشروی دوم	پس از اجرای گام پیشروی سوم	پس از اجرای گام پیشروی چهارم	پس از اجرای گام پیشروی پنجم
جابجایی افقی نقطه A	۰.۴۶	۱.۱۱	۱.۱۳	۲.۴	۴.۷۳	۶.۷۱
جابجایی افقی نقطه B	۰.۲۵	۰.۸۲	۰.۸۵	۲.۰۷	۴.۴۲	۶.۳۹
جابجایی افقی نقطه C	۰.۶۱	۱.۱۲	۱.۴۱	۳.۲۳	۵.۹۲	۷.۰۴
نشست سطح زمین در نقطه D	۱.۷۷ (بالازدگی)	۰.۵	۰.۶۱	۲۷.۵	-	-
نشست سطح زمین در نقطه E	۱.۱۵ (بالازدگی)	۰.۷۵	۰.۸	۲۶.۱	-	-
نشست سطح زمین در نقطه F	۰.۷۶ (بالازدگی)	۰.۵۳	۰.۵۵	۱۷.۹	-	-
نشست سطح زمین در نقطه G	-	-	-	-	۲۲.۴	۲۲.۷
نشست سطح زمین در نقطه H	-	-	-	-	۸.۱۵	۸.۵
نشست سطح زمین در نقطه I	-	-	-	-	۱۳.۶	۱.۶۲

جدول ۶-۴- مقادیر جابجایی افقی و قائم در چند نقطه از مدل با ترانشه شیبدار با زاویه ۶۰ درجه (سانتیمتر)

مرحله	پس از برداشت روباره ۶ متری اول	پس از اجرای گام پیشروی اول	پس از اجرای گام پیشروی دوم	پس از اجرای گام پیشروی سوم	پس از اجرای گام پیشروی چهارم	پس از اجرای گام پیشروی پنجم
جابجایی افقی نقطه A	۰.۴۴	۱.۸۹	۲.۲۸	-	-	-
جابجایی افقی نقطه B	۰.۲۳	۱.۵۲	۱.۹	-	-	-
جابجایی افقی نقطه C	۰.۵۲	۱.۷۵	۲.۲۷	-	-	-
نشست سطح زمین در نقطه D	۱.۷۱ (بالازدگی)	۱۴.۹۳	۳۹.۵۳	-	-	-
نشست سطح زمین در نقطه E	۱.۱۱ (بالازدگی)	۱۵.۵۸	۴۰.۶	-	-	-
نشست سطح زمین در نقطه F	۰.۷۴ (بالازدگی)	۱۰.۹۸	۲۸.۸۲	-	-	-

۶-۵- مقایسه دو مدل پوش و کند و NATM پیشنهادی

روش‌های پوش و کند اجرایی و طرح NATM پیشنهادی در مسیر راه آهن تهران- تبریز در نرم‌افزار

۳D FLAC مدل‌سازی شده و مقادیر نشست سطح زمین و نیز جابجایی دیواره‌های دو تونل با هم مقایسه

شدند. همچنین طی مقایسه و بررسی این دو روش از نظر فنی و قابلیت اجرایی بودن در نواحی کم عمق

شهری، روش NATM پیشنهادی با توجه به مزایا و ویژگی‌های فنی و نیز ملاحظات سازه‌ای آن‌ها در این نوع زمین‌ها قابلیت اجرا داشته و دارای کاربرد فراوان در شرایط مشابه می‌باشد. در روش پوش و کند در صورت برداشتن ترانشه با روبراه زیاد ۶ متری بصورت قائم بعلت و ویژگی‌های خاص اجرای این روش امکان اجرا در این نوع شرایط را دارا نمی‌باشد. بدلیل اینکه پیمانکار طرح پروژه راه آهن تهران- تبریز از در اختیار قراردادن هزینه‌های این طرح خودداری نمود لذا عملاً امکان مقایسه هزینه‌ای این روش با طرح NATM پیشنهادی وجود نداشت.

در جدول (۵-۶) به طور مختصر به بررسی و ارزیابی و نیز مقایسه مقادیر جابجایی‌ها در دو مدل NATM و پوش و کند (در حالت ترانشه قائم، ترانشه شیبدار با زاویه ۴۵ و ۶۰) پرداخته شده است. با توجه به اینکه در روش پوش و کند در ابتدا روبراه تا بالای تراز شمع‌ها به عمق ۶ متر و طول ۳ متر برداشته می‌شود لذا منظور از نشست سطح زمین، نشست ایجادشده در جلوتر از این برداشت، بواسطه حفاری در زیر سقف تونل می‌باشد که این نشست در حالت شیبدار با پیشروی تونل بسیار بیشتر از نشست ایجادشده بواسطه تونلسازی به روش NATM می‌باشد. تنها تحت ترانشه با زاویه ۴۵ درجه گام‌های پیشروی اول و دوم، این مقادیر کمتر از نشست‌های ناشی از اجرای تونل NATM بوده است.

جدول ۵-۶- مقادیر جابجایی‌ها و نشست سطح زمین حاصل از مدلسازی دو روش پس از گام‌های مختلف (سانتیمتر)

نشست سطح زمین					مدل NATM
پنجم	چهارم	سوم	دوم	اول	
۵.۸۲	۴.۵	۲.۵۹	۱.۳	۰.۱۲	مدل پوش و کند با ترانشه شیبدار با زاویه ۴۵ درجه
۱۵.۶	۱۴.۷۱	۲۳.۸۳	۰.۶۵	۰.۵۹	مدل پوش و کند با ترانشه شیبدار با زاویه ۶۰ درجه
-	-	-	۳۶.۳۱	۱۳.۸۳	مدل پوش و کند با استفاده از ترانشه قائم
-	-	-	-	ریزش دیواره	

۶-۶- نتیجه گیری

بطور کلی دو روش تونلسازی در نواحی شهری را می توان از نظر نشست ایجادکننده در سطح زمین، نحوه اجرا، ملاحظات فنی و سازه‌ای، ریسک پذیری، هزینه‌های اجرایی، امکان پذیر بودن حفاری و نگهداری و غیره با هم مقایسه نمود. در این فصل از تحقیق که مقایسه‌ای بین دو روش اجرایی پوش و کند و NATM در تونل‌های بزرگ مقطع تحت روباره کم در محیط شهری انجام شده این نتیجه بدست آمده است که نتایج مدلسازی‌های عددی ثابت کرده که در این ناحیه امکان اجرای تونل به روش پوش و کند با استفاده از ترانسه قائم و یا شیبدار با زاویه بیش از ۴۵ درجه وجود نداشته و تنها با ایجاد ترانسه با زاویه ۴۵ درجه یا کمتر می توان این تونل را اجرا کرد. طی مدلسازی عددی، روش جدید تونلسازی اتریشی از نظر میزان نشست ایجاد شده در سطح زمین مقادیر کمتری را نسبت به روش پوش و کند با ترانسه تحت زاویه ۴۵ درجه نشان می دهد. همچنین ساخت تونل به روش پوش و کند مستلزم برخورد با معارضین ترافیکی و یا مدفون شهری بوده که حل این مشکل، خود نیازمند بحث‌ها، مکاتبات با ارگان‌های مربوطه و نیز هزینه‌های سنگین تری بوده که در روش NATM امکان برخورد با این موانع وجود ندارد. لذا در این محدوده بحرانی انتخاب روش NATM بعنوان روش حفر تونل بهتر و کارآمدتر بوده و دارای مزایای بیشتری نسبت به روش در حال اجرا می باشد و اجرای تونل با این روش با استفاده از تکنیک‌های مناسب پیش نگهداری، در این محدوده نسبت به روش پوش و کند توصیه می شود.

فصل، مضم

نتیجہ گیری و پیشہدات

۷-۱- نتیجه‌گیری

• یکی از روش‌هایی که در فرآیند ساخت تونل بر اساس روند مشاهداتی و به اصطلاح روش مشاهده‌ای می‌باشد روش جدید تونلسازی اتریشی (NATM) است. در این روش که در واقع مفهوم وسیعتری از مهندسی ژئوتکنیک است به زمین اجازه اندکی تغییرشکل داده می‌شود تا زمین قادر به نگهداری از خود باشد.

• مهمترین نکته در استفاده از روش NATM در تونلسازی بکاربردن اصول اولیه و اساسی این روش است که شامل تقویت و افزایش مقاومت توده سنگی یا خاکی مورد نظر، نگهداری بوسیله شاتکریت، اندازه‌گیری دقیق و مداوم تغییرشکل‌ها، استفاده از پوشش اولیه انعطاف پذیر، بستن سریع حلقه تونل و طراحی پویا بر اساس تغییرشکل‌های ایجاد شده در تونل می‌باشد.

• مسیر ریلی راه آهن تهران- تبریز به صورت شرقی- غربی در ناحیه ۱۷ و ۱۸ تهران و با طولی بیش از ۱۰ کیلومتر از ایستگاه راه آهن تهران تا رودخانه کن از محیط شهری دارای بافتی قدیمی و فرسوده، عبور می‌کند. جهت رفع مشکلات و ناهنجاری‌های ناشی از عبور این خط، تصمیم بر زیرزمینی کردن راه آهن تهران- تبریز با هدف کمک به بازسازی بافت فرسوده شهری، کاهش موانع توسعه شهری،

کاهش محدودیت‌های ترافیکی، کاهش سوانح برخورد عابرین و وسایل نقلیه جاده‌ای با قطار و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، اتخاذ گردید.

- در تونل راه آهن تهران- تبریز با توجه به حضور توده‌خاک، محیط را به طور پیوسته در نظر گرفته‌ایم. با توجه به ویژگی‌های ژئوتکنیکی مسیر تونل پس از انتخاب محدوده بحرانی با روباره حداکثر ۶ متر، سطح مقطع نعل اسبی با مساحت ۱۰۹ متر مربع برای هر تونل انتخاب گردید و بنابر نتایج تحلیل های عددی با استفاده از نرم افزار ۳D FLAC، طرح حفاری با استفاده از گالری‌های جانبی پیشنهاد شد.

- پس از انتخاب روش حفاری و نگهداری مناسب و سپس تعیین گام حفاری ۱ متر برای تونل مذکور، تحلیل عددی پایداری تونل با توجه به روباره کم در نرم افزار انجام گرفته و میزان جابجایی‌های اطراف تونل در این محدوده بدست آمد که بر طبق جدول (۵-۶) بوده است.

- برای جلوگیری از هر گونه محافظه‌کاری در امر تحلیل پایداری در تونل NATM راه آهن تهران- تبریز از تراز هشدار II طبق توصیه ساکورایی و آدئوچی به عنوان مبنای قضاوت پایداری استفاده شده است. در این تراز هشدار خطر، سقف و دیواره‌های تونل پایدار می‌ماند.

- نتایج تحلیل پایداری نشان داده شده توسط کنترل مستقیم کرنش نشان می‌دهد که مقدار کرنش برشی حداکثر بوجود آمده در تونل برابر ۰/۰۷۹٪ بوده، تونل پیشنهادی در تراز هشدار خطر I قرار گرفته و لذا تونل پایدار است. اما با وجود این گام حفاری، میزان نشست سطح زمین (۵/۸۲ سانتیمتر) بیش از حد مجاز برای حفاری‌های درون شهری که معمولاً تا ۲ سانتیمتر می‌باشد، هستند. در نتیجه برای مرتفع نمودن این مشکل و کاهش نشست سطح، باید تدابیری از جمله استفاده از چتر لوله‌های فولادی یا فورپولینگ در تاج تونل بکار گرفت.

- از آنجاییکه امکان دسترسی به هزینه‌های طرح پوش و کند اجرایی در این پروژه وجود نداشت لذا طراحی پیشنهادی و طرح در حال اجرا، تنها از جهت فنی و اجرایی باهم مقایسه شدند. پس از تحلیل

پایداری تونل مورد نظر، مدلسازی تونل پوش و کند در این محدوده بحرانی در دو حالت با ایجاد ترانشه قائم و شیبدار با همین نرم افزار صورت گرفت و نتایج نشست سطح زمین در دو روش NATM و پوش و کند که تقریباً در یک محدوده کار شده‌اند باهم مقایسه شد. در نهایت نتایج مدلسازی‌های عددی ثابت کرد که با توجه به ناپایداری بوجود آمده در دیواره بالای تونل در مدل پوش و کند با ترانشه قائم و نیز در مدل با ترانشه شیبدار با زاویه ۶۰ درجه، تونل NATM نشست کمتری را نسبت به تونل پوش و کند با ایجاد ترانشه تحت زاویه ۴۵ درجه نشان می‌دهد و اجرای تونل به روش پوش و کند در این ناحیه بحرانی بعلت روباره تقریباً زیاد تنها با وجود ترانشه با زاویه ۴۵ درجه امکان پذیر می‌باشد. لذا گزینه حفاری مرحله‌ای بر اساس اصول NATM در این محدوده، بعنوان گزینه بهتر و بهینه انتخاب و توصیه می‌گردد.

۷-۲- پیشنهادات

- از آنجا که این پروژه در محیط شهری و در خاک نسبتاً سست مناطق جنوب غربی تهران اجرا می‌شود لذا پیشنهاد می‌شود که تحلیل‌های دیگر مانند تحلیل دینامیکی و اثرات بارهای زلزله نیز بر روی تونل NATM بررسی شود.
- به منظور اعتبارسنجی تحلیل بکار رفته در این تحقیق با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، بهتر است که طراحی این تونل با استفاده از روش المان محدود و نرم افزار Plaxis ۳D Tunnel نیز تحلیل شده و نتایج آن با نتایج بدست آمده در این تحقیق مقایسه و بررسی شود.
- همچنین با بکارگیری ابزاربندی مناسب و رفتارنگاری در این طرح می‌توان به بررسی و ارزیابی نتایج حاصل از این تحقیق با کمک نتایج ابزار دقیق پرداخت.
- تحلیل وابسته به زمان نیز از جمله مواردی است که برای این سازه مناسب به نظر می‌رسد، به طوری که با این تحلیل می‌توان رفتار سازه را نسبت به زمان بهره‌وری مورد بررسی قرار داد.

- با توجه به اینکه امروزه استفاده از وسایل و تکنیک‌های پیش‌نگهداری در تونل‌های مخصوصا بزرگ مقطع در نواحی شهری بسیار پرکاربرد شده است پیشنهاد می‌شود که روش چتر لوله‌های فولادی که تاثیر چشمگیری در کاهش نشست سطح زمین داشته نیز برای تونل NATM موردنظر مدلسازی شده و نتایج جابجایی‌ها و نشست سطح ارزیابی شوند.
- از آنجایی که توده‌خاک طبیعت ناهمسانگرد دارد، پیشنهاد می‌گردد آزمایش‌هایی برای تعیین ثابت‌های ناهمسانگرد جهت بررسی سایر مدل‌های رفتاری متداول معرفی شده انجام شود.

منابع فارسی

- آیین نامه بتن ایران (آبا)، (۱۳۷۹)، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
- حاجی میرزا آقا قناد م.، گرنامه‌ی وانقی ر.، زارع ش.، (۱۳۹۰)، "اجرای تونل‌های پوش و کند در محیط‌های شهری (مطالعه موردی تونل راه آهن تهران- تبریز)"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، تهران
- شرکت ساختمانی سپر سنگ، (۱۳۸۵)، "مروری بر روش فورپولینگ برای تثبیت تونل در زمین‌های ریزشی".
- شرکت مهندسين مشاور ساحل، (۱۳۹۰)، گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر تونل راه آهن تهران- تبریز (کیلومتر ۶+۴۰۰ تا ۱۰+۲۰۰).
- شریف زاده م.، ۱۳۸۹ "طراحی حفاری مرحله‌ای در زمین‌های سست و شهری با تاکید بر رفتارنگاری"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- شریف زاده م.، عقیقی پور م.، تسوجی زاده م.، (۱۳۸۹)، "تاثیر طول گام و مراحل حفر در روش حفاری مرحله‌ای بر میزان نشست سطح زمین در خط ۴ متروی تهران"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، شماره دهم، دوره پنجم، صفحه ۳۹
- غدیری م.، (۱۳۸۹)، "تحلیل پایداری مترو خط ۲ قطار شهری کرج با استفاده از نتایج رفتارسنجی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود
- کولیوند ف.، یثربی ش.، قربانی م.، جوادی اصطهباناتی م.، (۱۳۹۰)، "ارزیابی تاثیر طول گام حفاری و فاصله بهینه بین جبهه‌کارهای مختلف حفاری بر میزان نشست سطح زمین ناشی از تونلسازی مرحله ای با استفاده از روش عددی اجزاء محدود (مطالعه موردی تونل ملت)"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل.
- مدنی ح.، ۱۳۷۹، "تونل‌سازی جلد سوم"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر

- مدنی ح.، ۱۳۸۱، "تونل سازی جلد چهارم"، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر
- مطهری م.، وفائیان م.، ۱۳۸۷، "تحلیل اجزای محدود روش چتری در تونلسازی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران
- میکائیل ر.، (۱۳۸۶)، "تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل راه آهن کوهین در محور قزوین-رشت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

منابع لاتین

- Bartak, J., (۲۰۱۰), "Developments of Tunneling Techniques in the Czech Republic During Past Decades", ۱۱th International Conference, Underground Constructions Prague, Keynote Lecture No۱.
- Barton, N., Grimstad, E., Palmstrom, A., (۱۹۹۵), "Sprayed Concrete: Properties, Design and Application", Whittles Publishing, Norwegian Geotechnical Institute, Norway.
- Brady B.H.D., Brown E.T., (۱۹۹۲), "Rock Mechanics for Underground Mining", Second Edition, Chapman & Hall, USA.
- Brandl, J., Friedl, T., Hantschke, D., (۲۰۰۴), "Metro Dehli Airport Link – Large Diameter NATM Tunneling Under Various Ground Conditions".
- Carranza- Torres C. & Fairhurst C., (۲۰۰۰), "Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses that Satisfy the Hoek- Brown Failure Criterion", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. ۱۵, No. ۲.
- Chehade, F.H., Shahrour, I., (۲۰۰۸), "Numerical Analysis of the Interaction between Twin Tunnels: Influence of the Relative Position and Construction Procedure", Tunnelling and Underground Space Technology ۲۳. Pp.۲۱۰-۲۱۴.

- Encardio-Rite Electronics, LTD., (۲۰۰۴), “Instrumentation of Underground Metro Corridors”.

- Gall, V., Zeidler, K., (۲۰۰۹), “Pre-support Measures for Shallow NATM Tunneling in Urban Settings”.

- Haruyama, K., Teramoto, S., Taira, K., (۲۰۰۵), “Construction of Large Cross-section Double-tier Metropolitan Inter-city Highway (Ken-O-Do) Ome Tunnel by NATM”, Tunnelling and Underground Space Technology ۲۰.۱۱۱.

- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., (۲۰۰۲),”Hoek- Brown Failure Criterion- ۲۰۰۲ Edition”, In: Hammah R., Bawden W., Curran J., Telesnicki M., Proceeding of NARMSTAC۲۰۰۲, Mining Innovation and Technology. Toronto, ۱۰ July ۲۰۰۲, University Toronto, pp. ۲۶۷-۲۷۳.

- [http:// www.ce.metu.edu.tr](http://www.ce.metu.edu.tr)

- <http://www.iran-eng.com>

- Hung, C.J., Monsees, J., Munfah, N., Wisniewski, J., (۲۰۰۹), “Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels- Civil Elements”, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-NHI-۱۰-۰۳۴.

- Itasca, (۲۰۰۲), FLAC۳D, “Fast Lagrangian Analysis of Continua”, Version ۳.۰, User’s Manual. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, MN, <http://itascacg.com>.

- Karakus, M., Fowell, R.J., (۲۰۰۷), “An Insight into the New Austrian Tunneling Method (NATM)”, ROCKMEC- ۷th Regional Rock Mechanics Symposium, Sivas, Türkiye.

- Karakus, M., Fowell, R.J., (۲۰۰۸) “FEM Analysis for the Effects of the NATM Construction Technique on Settlement above Shallow Soft Ground Tunnels”.

- Jain, A., (۱۹۹۹), “Pir Pamjal Railway Tunnel by NATM Method”.

- Lueprasert, P., Suwansawat, S., Jongpradist, P., (2006), “3D FEA of NATM Excavation for Bangkok MRT Blue Line South Extension”.
- Muratidis. A., (2008), “The “Cut and Cover” and “Cover and Cut” Techniques in Highway Engineering”, EJGE, Volume 13.
- Pan X.D., Hudson J., (1988), “Plane Strain Analysis in Modeling Three Dimensional Tunnel Excavation”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Geomechanics Abstract, pp. 331-337.
- Powell, D., Field, D., Hulsen, R., (2001), “Design of an NATM Tunnel for Mission Valley Light Rail – East Extension”, RETC.
- Romero, V., (1998), “NATM in Soft Ground: A Contradiction of Terms?”, NATM and Shotcreting Focus, World Tunneling.
- Sabharwal, R., (2004), “Use of NATM (New Austrian Tunneling Method) in Tunneling”, Project Report.
- Sakurai S., Takeuchi K., (1983), “Back Analysis in Measurements in Tunneling”, Rock Mechanics and Eng. 16, 173-180.
- Sakurai S., (1990), “Interpretation of Field Measurement in Tunneling Practice”, 9th ISRM Conference on Rock Mechanics, Paris.
- Sakurai S., (1997), “Lesson Learned from Field Measurements in Tunneling”, Tunneling and underground space technology, Volume 12, Issue 4, page 453-460.
- Sauer, G., Laubbichler, J., Kumpfmüller, S., (2010), “Building Mined Underground Stations in Soft Ground with NATM Construction Practices”.
- Singh, Bhawani, Goel, Rajnish K., (2006), “Tunneling in Weak Rocks”, UK, Elsevier Geo. Engineering Book Series, Vol.5, pp. 230- 235.

- Svoboda, J., Salac, M., (۲۰۰۵), “Highway D۵ Pilsen Highway Bypass– The Valik Tunnel”, Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future – Erdem & Solak (Eds).
- Svoboda, T., Masin, D., (۲۰۰۰), “۳D Simulation of A NATM Tunnel in Stiff Clays with Soil Parameters Optimized Using Monitoring Data from Exploratory Adit”.
- Thomas, A.H., Legge, N.B., Powell, D.B., (۲۰۰۴), “The Development of Sprayed Concrete Lined (SCL) Tunnelling in the UK”, EUROCK & ۵۳rd Geomechanics.
- Tong, M.S.Y., Stadelmann, R., Tiang, K.L., Tang, S.K., Singhal, V., Ow, C.N., (۲۰۰۳), “Interaction between Twin Tunnels at Close Proximity and Under Shallow Overburden in Urbanized Area”.
- Wittke, W., Pierau, B., Erichsen, C., (۲۰۰۲), “New Austrian Tunneling Method (NATM), Stability Analysis and Design”, Geotechnical Engineering in Research and Practice, Consulting Engineers for Foundation Engineering and Construction in Rock Ltd.
- Young-Zoo, Lee and Schubert, V., Chang-Yong, K., (۲۰۰۵), “The Influence of the Round Length on the Stability of Tunnel Face and Unsupported Span”, Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future – Erdem & Solak (Eds).

Abstract

According to the population growth and urban traffic, necessity of use of rail transportation systems is increasingly developing. Today, underground constructions play an important role in urban transportation development. One of the most dominant factors in tunneling industry evolution and improvement, are developments that has been done about excavation methods. There are different methods for excavation and construction of tunnels such as tunnels of subway network, railway, water conduction, industrial tunnels, mine tunnels, etc. These methods are classified in two main groups as traditional and mechanized excavation methods. Traditional excavations in urban areas often include "Cut & Cover" method, "Cover & Cut" method and New Austrian Tunneling Method (NATM). The case study in this research is Tehran- Tabriz Railway Tunnel. This tunnel is under construction in region ۱۷ in Tehran. Each tunnel has ۱۱ meter width and ۷.۷ meter height. Initial studies show that this tunnel can also be continued with NATM method. Large cross section and shallow overburden are special characteristics of this tunnel. In this study, at first, feasibility of tunnel construction by NATM with numerical modeling of finite difference method by FLAC ۳D software has been performed and then parametric sensitivity analysis has been done on influence of excavation and support sequence, round length value and existence or absence of appropriate support on the feasibility. Finally, gained results have been compared with the "Cover and Cut" method designs and the best method of excavation with appropriate support system in this section has been selected. This suggested plan includes a twin NATM tunnel with ۱۳ meter

width, 9 meter height and cross section of 1.9 m² under 6 meter overburden and 3 meter pillar width which there is no construction or building on the ground surface. Also Cover and Cut tunnel was modeled in three cases, with vertical trench, with a steep 40 degrees trench and with a steep 60 degrees trench. The results of modeling showed that in this section, the tunnel with a steep 40 degrees trench or under lower slopes can only be constructed. According to the modeling of NATM tunnel and "Cover and Cut" tunnel by the software, the suggested NATM tunnel is more suitable and optimized in terms of ground surface settlement and also stress regions rather than Cover and Cut tunnel with a steep 40 degrees trench and has been introduced as an alternative to the Cover and Cut operational method.

Keywords: Excavation, Tunneling, NATM, Urban Area, Cover and Cut, Parametric Analysis, Evaluation, Numerical Modeling.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
Master of Science in mining Exploitation Engineering

**Technical assessment of NATM excavation method in
tunnels and comparison with Cut & Cover method -
Case study: Tehran-Tabriz Railway Tunnel**

Mehdi Forqani

Supervisors:

Dr. Shokrollah Zare

Dr. Seyyed Mohammad Esmail Jalali

Advisor:

Farnoosh Basaliqeh

**Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.)
In
Mining Engineering**

September, ۲۰۱۲