





دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

بررسی تأثیر توالی حفاری تونل‌های بزرگ مقطع در زمین‌های سست شهری
بر روی نشست سطح زمین - مطالعه موردی: تونل چیتگر تهران

نگارنده: روح‌الله اصلانی

استاد راهنما

دکتر شکرالله زارع

استاد مشاور

مجتبی محمدنژاد

بهمن ۱۳۹۵

شماره: ۲۹۹۸/۴۱۰۱
تاریخ: ۹۵/۱۲/۱۶
ویرایش:

بسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای روح الله اصلانی به شماره دانشجویی ۹۱۰۰۶۵۴ رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان بررسی تأثیر توالی حفاری تونل های بزرگ مقطع در زمین های سست شهری بر روی نشست سطح زمین - مطالعه موردی تونل چیتگر تهران که در تاریخ ۱۳۹۵/۱۱/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : - خوب - امتیاز ۱۷) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐

- ۱- عالی (۲۰ - ۱۹)
۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)
۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)
۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	شکراله زارع	۱- استاد ارجمند اول
			۲- استاد ارجمند دوم
	کارشناس ارشد	مجتبی محمدنژاد	۳- استاد مشاور
	استاد	محمد عطانی	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	سید محمد اسماعیل جلالی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	احمد رمضان زاده	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



هرچند ناقابل

تقدیم به مدافعان حرم

آنان که هستند، تا ما در امنیت باشیم...

پاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزارش کردن نتوانند. و درود بر محمد و خاندان پاک او،

طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان و مدار وجودشان است.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه او، بازبان قاصد دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که

تجلیل از معلم، پاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می کند و سلامت امانت باری را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از

باب "من لم یسکر المنعم من المخلوقین لم یسکر الله عزوجل":

از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عنو کشیده و کرمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار

و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند؛

از همسر مهربانم... به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است.

از استاد با کالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر شکر اله زارع که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ گلی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمات راهبانی

این رساله را بر عهده گرفتند؛

از استاد ارجمند، جناب آقای مهندس محبتی محمد نژاد، که زحمات مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه نمی رسید؛

و از اساتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و جناب آقای دکتر احمد رمضان زاده که زحمات داور این رساله را متقبل شدند؛ کمال تشکر

و قدردانی را دارم باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را پاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب روح الله اصلانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن-مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تأثیر توالی حفاری تونل‌های بزرگ مقطع در زمین‌های سست شهری بر روی نشست سطح زمین- مطالعه موردی تونل چیتگر تهران تحت راهنمایی دکتر شکرالله زارع 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 یا 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 اخلاقی انسانی رعایت شده است .

تاریخ: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

با پیشرفت بشر در همه زمینه‌ها و رشد روزافزون جمعیت، نیاز به سامانه‌های حمل‌ونقل سریع‌تر و با ظرفیت بیشتر، به‌شدت احساس می‌شود. بی‌شک یکی از بهترین، پاک‌ترین، سریع‌ترین و پرظرفیت‌ترین این سامانه‌ها، شبکه‌های زیرزمینی حمل‌ونقل هستند. این شبکه‌های زیرزمینی شامل مترو، تونل‌های بزرگراهی و زیرگذرهای پیاده‌رو است. امروزه تونل‌زنی در مناطق شهری به دلیل کم بودن فضا و حفظ محیط‌زیست از اهمیت بالایی برخوردار است. شهر تهران نیز از این قاعده مستثنی نیست، به همین خاطر در سال‌های اخیر، انواع مختلفی از تونل‌ها در این شهر احداث گردیده است. تونل حکیم به‌عنوان یکی از تونل‌های دوقلوی بزرگراهی تهران، وظیفه عبور بار ترافیکی تهران به کرج در محدوده پارک جنگلی چیتگر را بر عهده دارد. از لحاظ زیست‌محیطی احداث این تونل را می‌توان شاهکاری برای تهران و حفظ پارک جنگلی چیتگر به‌عنوان یکی از ریه‌های تنفسی این شهر دانست. احداث تونل حکیم در منطقه‌ای که غالباً از توده خاک‌های سست برخوردار است، مخاطراتی از قبیل نشست سطح زمین را در پی خواهد داشت. بررسی، اندازه‌گیری و کنترل این نشست‌ها، می‌تواند این‌گونه مخاطرات را تا حد بالایی کاهش دهد. برای تحقق این امر باید عوامل مختلفی از جمله: روش حفاری مناسب، ترتیب (توالی) حفاری بخش‌های مختلف یک تونل، فاصله جبهه کارهای مختلف داخلی یک تونل و... را بررسی و کنترل نمود. یکی از مهم‌ترین این عوامل، ترتیب (توالی) حفاری است. بدین معنی که در حفاری یک تونل با سطح مقطع بزرگ که در چند بخش (روش NATM) انجام می‌گیرد، تقدم و تأخر حفاری بخش‌های مختلف نسبت به هم، مورد ارزیابی قرار گیرد. در تحقیق پیش رو با استفاده از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار المان محدود PLAXIS3D Tunnel، ابتدا، طراحی و تحلیل سیستم نگهداری این تونل انجام‌شده، سپس تأثیر توالی حفاری بخش‌های مختلف تونل حکیم بر روی نشست سطح زمین بررسی گردیده است. در مرحله بعد فاصله حفاری جبهه کارهای درون یک تونل نسبت به هم و در گام بعد فاصله حفاری دو تونل از یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، استفاده از توالی حفاری نوع a کمترین میزان نشست سطح زمین به مقدار ۲۹

میلی‌متر را در پی خواهد داشت. همچنین فاصله حفاری جبهه‌کارهای داخلی یک تونل از هم باید در تمامی طول پیشروی تونل، ثابت و حداقل بیشتر از ۱d (قطر تونل) باشد. علاوه بر این، فاصله حفاری جبهه‌کارهای دو تونل از هم نیز باید حداقل ۳d در نظر گرفته شود تا حفاری دو تونل تأثیر چندانی روی یکدیگر نداشته باشند.

واژه‌های کلیدی:

تونل سازی، NATM، نرم‌افزار PLAXIS 3D Tunnel، نشست سطح زمین، توالی حفاری، فاصله جبهه کارها

فهرست عناوین

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- مشخصات عمومی پروژه	۲
۳-۱- دلایل استفاده از تونل در مسیر این پروژه	۵
۴-۱- ضرورت انجام تحقیق	۶
۵-۱- اهداف پایان نامه	۷
۶-۱- روش انجام تحقیق	۸
۷-۱- جمع بندی	۹
فصل دوم: مروری بر تونل سازی بزرگ مقطع در مناطق شهری.....	۱۱
۱-۲- مقدمه	۱۲
۲-۲- حفر تونل های بزرگ مقطع در زمین های سست شهری	۱۳
۳-۲- بررسی روش نوین تونل سازی اتریشی (NATM)	۱۶
۱-۳-۲- مفاهیم و اصول کلی NATM	۱۶
۲-۳-۲- اجرای تونل های بزرگ مقطع NATM در نواحی شهری	۱۸
۳-۳-۲- نگهداری و پیش نگهداری در تونل های بزرگ مقطع NATM	۱۹
۴-۳-۲- رفتارسنجی تونل های NATM در نواحی کم عمق شهری	۲۰
۵-۲- برآورد نشست	۲۱
۱-۵-۲- روش های تجربی برآورد نشست سطح زمین	۲۲
۱-۱-۵-۲- روش تجربی پک (۱۹۶۹)	۲۳
۲-۵-۲- روش های تحلیلی برآورد نشست سطح زمین	۲۴
۱-۲-۵-۲- روش لوگاناتان و پولوس (۱۹۸۸)	۲۵
۲-۲-۵-۲- روش بابت (۲۰۰۱)	۲۵
۳-۲-۵-۲- روش ساگاستا (۱۹۸۷)	۲۶
۳-۵-۲- مدل سازی فیزیکی جهت برآورد نشست سطح زمین	۲۶

۲۷	۶-۲- سوابق مطالعات انجام شده.....
۳۴	۷-۲- جمع بندی
۳۷	فصل سوم: مطالعات زمین شناسی و ژئوتکنیکی پروژه.....
۳۸	۱-۳- مقدمه
۳۸	۲-۳- زمین شناسی عمومی منطقه
۴۰	۳-۳- زمین شناسی مسیر تونل
۴۳	۴-۳- شرایط آب های زیرزمینی
۴۳	۳-۴-۱- تراز و عمق آب های زیرزمینی
۴۴	۳-۵-۵- کاوش های صحرایی و آزمون های آزمایشگاهی
۴۵	۳-۵-۱- سطح آب
۴۶	۳-۵-۲- تفکیک واحدهای زمین شناسی مهندسی
۴۷	۳-۶- پارامترهای ژئوتکنیکی پروژه تونل حکیم
۴۸	۳-۷- جمع بندی
۵۱	فصل چهارم: مدل سازی عددی و تحلیل پایداری تونل حکیم.....
۵۲	۴-۱- مقدمه
۵۲	۴-۲- روش های طراحی و تحلیل فضاها های زیرزمینی
۵۴	۴-۳- انتخاب و معرفی نرم افزار
۵۷	۴-۴- طراحی سیستم نگهداری مرکب با استفاده از مقطع معادل
۶۵	۴-۵-۵- مدل سازی و تحلیل پایداری تونل
۶۶	۴-۵-۱- تعریف هندسه، اعمال شرایط مرزی و مش بندی مدل
۶۹	۴-۵-۲- انتخاب روش حفاری
۷۲	۴-۵-۳- تعریف فازهای محاسباتی و حل مسأله
۷۵	۴-۵-۴- تعیین گام بهینه حفاری
۷۸	۴-۵-۵- تحلیل پایداری با استفاده از مفهوم کرنش برشی بحرانی
۸۱	۴-۵-۶- تحلیل سیستم نگهداری پیشنهادی به کمک نرم افزار PCACOL

۸۵	۶-۴- تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر نشست سطح زمین
۸۵	۶-۴-۱- بررسی تأثیر مدول الاستیسک خاک (E)
۸۶	۶-۴-۲- بررسی تأثیر چسبندگی خاک (C)
۸۷	۶-۴-۳- بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک (Φ)
۸۸	۶-۷- جمع‌بندی

فصل پنجم: بررسی تأثیر توالی و فاصله حفاری جبهه‌کارهای تونل بر نشست سطح زمین ۹۲

۹۴	۵-۱- مقدمه
۹۵	۵-۲- انتخاب توالی حفاری مناسب
۱۰۱	۵-۳- انتخاب فاصله حفاری بهینه بین جبهه‌کارهای داخلی یک تونل
۱۰۷	۵-۴- انتخاب فاصله حفاری تونل‌های دوقلو از هم
۱۰۹	۵-۵- رفتارنگاری و اعتبارسنجی
۱۱۰	۵-۵-۱- ابزار دقیق استفاده شده در تونل حکیم
۱۱۲	۵-۵-۲- اعتبارسنجی مدل عددی
۱۱۴	۵-۶- جمع‌بندی

فصل ششم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۷

۱۱۸	۶-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۲۰	۶-۲- پیشنهادات

منابع و مراجع ۱۲۳

فهرست اشکال

فصل اول

- شکل ۱-۱ - موقعیت جغرافیایی پروژه حکیم ۴
- شکل ۱-۲ - امتداد بزرگراه آیت‌الله حکیم به سمت غرب تهران ۴
- شکل ۱-۳ - موقعیت تونل‌های دوقلوی حکیم ۵
- شکل ۱-۴ - تونل A86 در شهر پاریس ۶
- شکل ۱-۵ - ساختار پایان‌نامه ۹

فصل دوم

- شکل ۲-۱ - نمایی از یک تونل درون‌شهری ۱۳
- شکل ۲-۲ - نمونه‌ای از تجهیزات رفتارسنجی در تونل NATM ۲۱
- شکل ۲-۳ - نمایی از مقطع عرضی تونل جهت برآورد نشست عرضی ناشی از تونل‌سازی ۲۳
- شکل ۲-۴ - روش‌های مختلف پیشنهادی کاراکوس و فاول برای حفر تونل هیتراو لندن ۲۸
- شکل ۲-۵ - مقطع عرضی و طولی و توالی حفاری در روش حلقه-برش ۲۹
- شکل ۲-۶ - مقطع عرضی و طولی و تالی حفاری در روش گالری کناری ۲۹
- شکل ۲-۷ - نمایی از روش گالری کناری و دیافراگم مرکزی ۳۰
- شکل ۲-۸ - شش نوع توالی حفاری پیشنهادشده توسط شریف‌زاده و همکاران ۳۱

فصل سوم

- شکل ۳-۱ - نقشه توزیع واحدهای آبرفتی در شهر تهران ۳۸
- شکل ۳-۲ - مقطع محلی از نهشته‌های آبرفتی ۳۹
- شکل ۳-۳ - نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه ۴۲
- شکل ۳-۴ - درصد تقریبی واحدهای آبرفتی مختلف دربرگیرنده مسیر تونل ۴۲

- شکل ۳-۵- چاهک دستی حفاری شده ۴۵
- شکل ۳-۶- حفاری گمانه توسط ماشین DBH ۴۵
- شکل ۳-۷- مقطع طولی زمین‌شناسی مسیر تونل ۴۷
- شکل ۳-۸- توزیع فراوانی کلاس‌های مختلف خاک طبق واحدهای کلی در مسیر تونل ۴۷

فصل چهارم

- شکل ۴-۱- تصویر نمادین از سیستم نگهداری استفاده‌شده در تونل حکیم ۵۷
- شکل ۴-۲- توزیع نیروی محوری و لنگر خمشی در مجموعه شاتکریت و فولاد ۶۰
- شکل ۴-۳- نمایش شماتیک یک مقطع از لایه نگه‌دارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲ ۶۱
- شکل ۴-۴- مقطع عرضی تونل حکیم ۶۶
- شکل ۴-۵- هندسه تعریف شده برای مدل‌سازی تونل حکیم ۶۸
- شکل ۴-۶- نمودار پیشنهادی یو و چرن (۲۰۰۷) جهت انتخاب روش حفر ۷۰
- شکل ۴-۷- توالی حفاری اجرا شده برای تونل حکیم ۷۱
- شکل ۴-۸- نمای سه‌بعدی از ترتیب حفاری جبهه‌کارهای مختلف تونل حکیم ۷۱
- شکل ۴-۹- تعریف فازهای مختلف در بخش محاسبات نرم‌افزار ۷۳
- شکل ۴-۱۰- مراحل اجرا و نگهداری تونل حکیم ۷۴
- شکل ۴-۱۱- نمودار لی- شوبرت ۷۶
- شکل ۴-۱۲- نمودار تراز هشدار خطر پیشنهادی ساکورائی برای ارزیابی پایداری تونل‌ها ۷۹
- شکل ۴-۱۳- نمودار رابطه پیشنهادی ساکورائی بین مدول یانگ و کرنش بحرانی ۸۰
- شکل ۴-۱۴- مقطع ترسیم شده از سیستم نگهداری تونل با استفاده از نرم‌افزار PCACOL ۸۲
- شکل ۴-۱۵- نتایج نرم‌افزار Plaxis، مربوط به نیروهای محوری، برشی و خمشی سیستم نگهداری ۸۳
- شکل ۴-۱۶- خروجی نرم‌افزار Plaxis، نحوه توزیع بار محوری بر روی سیستم نگهداری ۸۳

- شکل ۴-۱۷- خروجی نرم افزار Plaxis ، نحوه توزیع نیروی برشی بر روی سیستم نگهداری. ۸۴
- شکل ۴-۱۸- خروجی نرم افزار Plaxis ، نحوه توزیع ممان خمشی بر روی سیستم نگهداری. ۸۴
- شکل ۴-۱۹- نمودار P-M سیستم نگهداری تونل با استفاده از نرم افزار PCACOL. ۸۵
- شکل ۴-۲۰- نمودار تأثیر مدول الاستیک بر نشست زمین. ۸۶
- شکل ۴-۲۱- نمودار تأثیر چسبندگی بر نشست زمین. ۸۷
- شکل ۴-۲۲- نمودار تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر نشست زمین. ۸۸

فصل پنجم

- شکل ۵-۱- شش نوع توالی حفاری پیشنهادی جهت حفر مرحله‌ای تونل حکیم. ۹۶
- شکل ۵-۲- پروفیل عرضی نشست سطح زمین برای شش نوع توالی حفاری. ۹۶
- شکل ۵-۳- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع a. ۹۹
- شکل ۵-۴- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع b. ۱۰۰
- شکل ۵-۵- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع c. ۱۰۰
- شکل ۵-۶- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع d. ۱۰۰
- شکل ۵-۷- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع e. ۱۰۱
- شکل ۵-۸- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع f. ۱۰۱
- شکل ۵-۹- نمایی از تأثیر تونل‌زنی در جریان تنش‌های منطقه. ۱۰۲
- شکل ۵-۱۰- تونل‌سازی مرحله‌ای و محدوده تأثیر حفاری جبهه‌کارها. ۱۰۲
- شکل ۵-۱۱- مقاطع عرضی و طولی، جهت محاسبه فاصله گالری کناری با مرکزی. ۱۰۴
- شکل ۵-۱۲- نحوه مدل‌سازی تعیین فاصله بهینه جبهه‌کار گالری مرکزی و کناری از هم. ۱۰۴
- شکل ۵-۱۳- پروفیل عرضی نشست ناشی از حفاری با فاصله مختلف بین گالری کناری و میانی. ۱۰۵
- شکل ۵-۱۴- مقاطع عرضی و طولی حفاری جهت محاسبه فاصله گالری کناری و مرکزی. ۱۰۶

- شکل ۵-۱۵- نحوه مدل سازی تعیین فاصله بهینه جبهه کار گالری ها از هم ۱۰۶
- شکل ۵-۱۶- پروفیل عرضی نشست ناشی از حفاری با فاصله مختلف بین گالری های کناری ۱۰۷
- شکل ۵-۱۷- پروفیل عرضی نشست زمین با فاصله های مختلف جبهه کارهای دو تونل از هم ۱۰۹
- شکل ۵-۱۸- نحوه جانمایی پین های نشست سنج مورد استفاده در پروژه حکیم ۱۱۱
- شکل ۵-۱۹- نحوه جانمایی پین های ژئودتیک در پروژه حکیم ۱۱۲
- شکل ۵-۲۰- شماره گذاری تونل های دوقلوی حکیم از متر اژ ۱۰۰۰ تا ۲۱۰۳ ۱۱۳
- شکل ۵-۲۱- نتایج ابزار دقیق ایستگاه شماره ۱۵۵۰ NS ۱۱۳
- شکل ۵-۲۲- مقایسه نتایج بدست آمده از ابزار دقیق و مدل سازی عددی تونل حکیم ۱۱۴

فهرست جداول

فصل دوم

جدول ۱-۲- مقدار I پیشنهادی محققان مختلف ۲۴

فصل سوم

جدول ۱-۳- پارامترهای ژئوتکنیکی پروژه تونل حکیم ۴۸

فصل چهارم

جدول ۱-۴- مشخصات لتیس مثلثی با ضخامت شاتکریت ۳۵cm برای دیواره اصلی. ۵۸

جدول ۲-۴- مشخصات لتیس مثلثی با ضخامت شاتکریت ۲۵cm برای دیواره موقت گالری ها ۵۸

جدول ۳-۴- خصوصیات شاتکریت با ضخامت ۳۵cm برای دیواره اصلی ۵۸

جدول ۴-۴- خصوصیات شاتکریت با ضخامت ۲۵cm برای دیواره موقت گالری ها ۵۹

جدول ۵-۴- خصوصیات هندسی مقطع معادل ۶۲

جدول ۶-۴- خصوصیات لتیس گریدر مربوط به نگهداری دیواره های موقت میانی. ۶۲

جدول ۷-۴- خصوصیات شاتکریت مربوط به نگهداری دیواره های موقت میانی. ۶۳

جدول ۸-۴- خصوصیات لتیس گریدر مربوط به نگهداری دیواره های اصلی کناری. ۶۳

جدول ۹-۴- خصوصیات شاتکریت مربوط به نگهداری دیواره های اصلی کناری. ۶۳

جدول ۱۰-۴- پارامترهای سیستم نگهداری معادل مربوط به دیواره های موقت میانی. ۶۴

جدول ۱۱-۴- پارامترهای سیستم نگهداری معادل مربوط به دیواره های اصلی کناری. ۶۴

جدول ۱۲-۴- پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های خاکی مسیر تونل ۶۹

جدول ۱۳-۴- مشخصات حفاری انجام شده در تونل حکیم ۷۲

جدول ۱۴-۴- جابجایی های ایجاد شده در نقاط مختلف تونل، در اثر حفاری با گام های مختلف. ۷۵

جدول ۱۵-۴- روش حفاری مناسب مطابق با نتایج حاصل از نمودار لی-شوبرت ۷۸

- جدول ۴-۱۶- مقادیر محاسبه شده با استفاده از روابط ساکورائی و نرم افزار Plaxis ۸۱
- جدول ۴-۱۷- نتایج تأثیر مدول الاستیک بر نشست زمین. ۸۶
- جدول ۴-۱۸- نتایج تأثیر چسبندگی بر نشست زمین. ۸۷
- جدول ۴-۱۹- نتایج تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر نشست زمین. ۸۸

فصل اول:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

گسترش شهرها نیاز به افزایش زیرساخت‌های شهری را اجتناب‌ناپذیر کرده است. با توجه به محدود بودن فضا در محیط‌های شهری، استفاده از فضاهای زیرزمینی به‌منظور ایجاد زیرساخت‌ها گزینه مناسبی است. یکی از بهترین روش‌های دسترسی به فضاهای زیرزمینی و استفاده از آن‌ها، حفر تونل‌هاست. تونل‌های حفاری‌شده در مناطق شهری عمدتاً به چند گروه کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

- تونل‌های ایجادشده برای عبور و مرور قطار شهری
- تونل‌های ایجادشده برای عبور و مرور خودرو
- تونل‌های ایجادشده برای عبور و مرور انسان

حفاری تونل به ناچار با پدیده‌های مختلفی همراه خواهد بود. ازجمله این پدیده‌ها می‌توان به نشست سطح زمین بالادستی تونل حفاری‌شده اشاره نمود. با در نظر گرفتن این موضوع که نشست سطح زمین خصوصاً در مناطق شهری به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های مهندسی تونل است، باید گفت مهار و به تعبیری کنترل این نشست و حصول نشست مجاز را می‌توان از دغدغه‌های اصلی مهندسی تونل در مناطق شهری بیان نمود.

به‌طور کلی عوامل مؤثر در طراحی و ساخت تونل‌های شهری شامل موارد ذیل است: به حداقل رساندن نشست سطح زمین، در نظر گرفتن سازه‌های سطحی و زیرسطحی شامل ساختمان‌ها، پل‌ها، راه‌ها، سامانه‌های انتقال فاضلاب و سازه‌های خطی شامل خطوط انتقال آب، گاز، تلفن و...، پایداری موقت تونل، جلوگیری کامل از ناپایداری جبهه کار تونل و اقتصادی بودن طراحی و اجرا [۱].

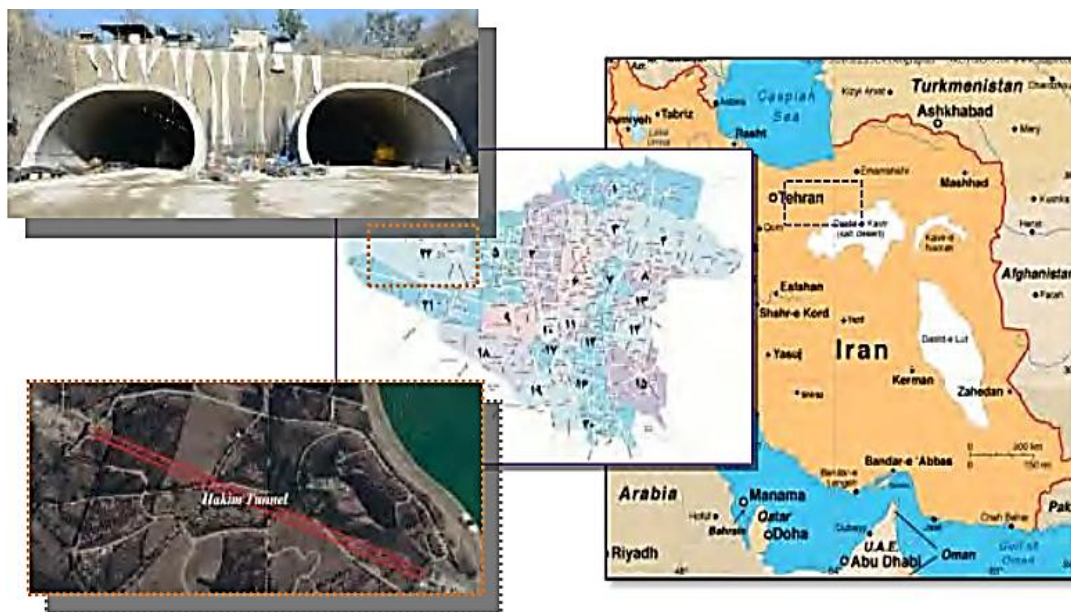
در فصل اول به بیان مشخصات عمومی پروژه، دلایل استفاده از تونل در مسیر پروژه، ضرورت انجام تحقیق، اهداف پایان‌نامه و روش انجام تحقیق اشاره شده است.

۱-۲- مشخصات عمومی پروژه

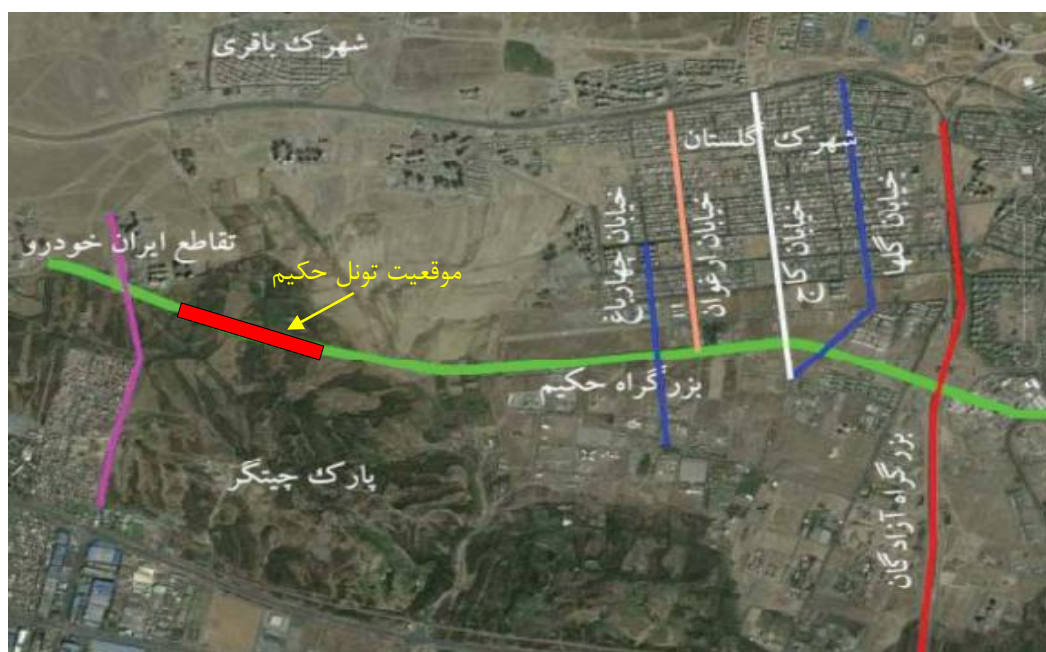
بزرگراه آیت‌الله حکیم یکی از بزرگراه‌های اصلی تهران است که به‌موازات بزرگراه شهید

همت از شرق به غرب امتداد دارد. این بزرگراه به صورت شرقی- غربی در پهنه شهر تهران طراحی شده است و کاربری‌های واقع در حریم بزرگراه را از طریق شبکه بزرگراهی و شریانی کردستان، شیخ بهایی، چمران، شیخ فضل‌اله، یادگار امام، اشرفی اصفهانی، پیامبر، ستاری، کاشانی، آسیا، تعاون و بزرگراه آزادگان متصل می‌کند [۲] (شکل ۱-۱). بزرگراه حکیم به طول تقریبی ۹ کیلومتر از تونل رسالت در شرق، آغاز شده و در غرب، به پل علامه جعفری (میدان نور سابق) ختم می‌شود. طبق برنامه شهرداری تهران پیش‌بینی شده است که در محدوده چیتگر از آزادگان به سمت رسالت، بزرگراهی احداث شود تا با ایجاد راه ارتباطی سریع و مطمئن برای وسایل نقلیه، کاهش ترافیک محورهای غرب تهران و به خصوص بزرگراه تهران - کرج را در پی داشته باشد. به دلیل وجود پارک جنگلی چیتگر که منبع غنی محیط زیستی است و جلوگیری از تخریب این پارک جنگلی که به عنوان یکی از ریه‌های تنفسی تهران شناخته می‌شود، در این مسیر، کارشناسان بر آن شده‌اند تا قسمتی از این بزرگراه درون‌شهری را که از این پارک جنگلی می‌گذرد، با استفاده از تونل بزرگراهی ادامه دهند. بنابراین تونل حکیم تهران^۱ در امتداد غربی بزرگراه آیت الله حکیم در محدوده پارک جنگلی چیتگر به طول تقریبی یک کیلومتر که ۶۰۰ تا ۶۵۰ متر آن زیر پارک جنگلی قرار می‌گیرد، پیش‌بینی شده است (شکل ۱-۲). محدوده کلی پروژه شامل ادامه بزرگراه حکیم است که در محدوده بین بزرگراه آزادگان و تقاطع ایران خودرو واقع شده و طول آن حدود ۵/۵ کیلومتر است [۲] (شکل ۱-۳).

^۱ این تونل با عناوین دیگری مانند تونل چیتگر و از سال ۹۳ به بعد، تونل شهدای غزه نیز نام برده می‌شود.



شکل ۱-۱ - موقعیت جغرافیایی پروژه حکیم [۳]



شکل ۱-۲ - امتداد بزرگراه آیت الله حکیم به سمت غرب تهران [۲]



شکل ۱-۳- موقعیت تونل‌های دوقلوی حکیم [۴]

۱-۳- دلایل استفاده از تونل در مسیر این پروژه

محدوده پروژه حکیم، پارک جنگلی چیتگر تهران است. این پارک به‌نوعی یکی از بزرگ‌ترین فضاهای سبز کلان‌شهر تهران است که نقش حیاتی در حفظ زیست‌محیط این شهر دارد. برای عبور از این پارک در فاز مقدماتی دو گزینه پل و تونل مورد بررسی قرار گرفت. در مطالعات اولیه سعی شده است تا پروژه، هم در زمان ساخت و هم در زمان بهره‌برداری، مورد مطالعه قرار گیرد. از لحاظ زمان اجرا، برآورد اولیه نشان‌دهنده آن است که زمان اجرای روگذر تقریباً ۲۴ ماه و زمان اجرای تونل ۱۸ ماه است. مزیت دیگر تونل نسبت به روگذر، عدم اشغال فضای پارک است. این در حالی است که در زمان ساخت روگذر، محدوده بزرگی از پارک، جهت تجهیز کارگاه، اختصاص داده می‌شود. همچنین، عدم وجود فضای کارگاهی در داخل پارک و عدم آلودگی صوتی در محوطه پارک، از دیگر مزایای تونل‌زنی نسبت به احداث روگذر چیتگر است. مشکل عمده احداث روگذر را می‌توان مشکلات زیست‌محیطی دانست. از آنجاکه برای احداث روگذر، نیاز به بنا نهادن حدوداً ۵۰ عدد پایه روگذر (با پیش‌فرض دهانه‌های ۳۰ تا ۵۰ متری) است و علاوه بر آن منجر به قطع چیزی بالغ بر

۱۰۰۰۰ اصله درخت می‌شود، لذا تخریب محیط‌زیست عمده‌ترین دلیل صرف‌نظر نمودن از احداث روگذر و رو آوردن به حفر تونل است. امروزه عقیده غالب کارشناسان این است که انتقال ترافیک به سازه‌های زیرزمینی از مؤثرترین روش‌های کمک به محیط‌زیست است. به‌عنوان مثال می‌توان به تونل‌های کمربندی پاریس موسوم به A86 اشاره نمود که باوجود طول حفاری بیشتر تونل نسبت به طول روگذر، بازهم جهت حفظ محیط‌زیست، حفر تونل به احداث روگذر ترجیح داده‌شده است (شکل ۱-۴) [۴].



شکل ۱-۴- تونل A86 در شهر پاریس [۴]

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

همان‌گونه که بیان شد تونل چیتگر قرار است در محدوده‌ای از شهر بزرگ تهران حفر گردد. از یک‌سو نشست سطح زمین را می‌توان ازجمله مهم‌ترین عوامل مورد مطالعه در تونل‌های بزرگ مقطع شهری دانست، و از سوی دیگر توالی حفاری و نیز فاصله جبهه‌کارهای تونل‌های دوقلو را از عوامل تأثیرگذار بر میزان نشست سطح زمین. بنابراین انجام مطالعه‌ای در راستای بررسی تأثیر توالی حفاری و نیز فاصله جبهه‌کارهای تونل‌های دوقلو نسبت به هم، جهت طراحی بهینه تونل چیتگر ضروری به نظر می‌رسد. در ادامه بحث در مورد ضرورت انجام این تحقیق باید بیان نمود علاوه بر اینکه از نتایج مطالعه انجام شده می‌توان جهت طراحی تونل چیتگر استفاده نمود، امکان استفاده از

این نتایج برای سایر پروژه‌های تونلی بزرگ‌مقطع که در زمین‌های شهری حفر می‌گردند نیز میسر است. در ادامه باید گفت در یک پروژه تونل بزرگ‌راهی درون‌شهری مانند تونل چیتگر، مدل‌سازی عددی می‌تواند یکی از کارآمدترین روش‌ها جهت طراحی جنبه‌های مختلف این تونل باشد. مدل‌سازی عددی در صورتی که ورودی‌ها به نحو مناسب اندازه‌گیری شده باشند، علاوه بر دقت بالا و نزدیک بودن به واقعیت، صرفه زمانی و مالی نیز خواهند داشت.

۱-۵- اهداف پایان‌نامه

نظر به اینکه غالباً در تونل‌های بزرگ‌مقطع شهری، نشست سطح زمین در صورت حفاری تمام مقطع، بیشتر از حفاری چندمرحله‌ای است، لذا حفاری چندمرحله‌ای (بخشی)، یکی از راهکارهای مناسب حفر این‌گونه تونل‌هاست. البته انتخاب روش اجرای مناسب، تنها بعد از مطالعه نسبی طرح‌های مختلف و مقایسه مالی و فنی این طرح‌ها امکان‌پذیر است، که خود مستلزم حجم بزرگی از تحلیل‌های اولیه است.

پرسشی که مطرح می‌شود این است که در صورت انتخاب حفاری چندمرحله‌ای برای اجرای تونل‌های بزرگ‌مقطع در زمین‌های سست شهری، چه عواملی بر نشست سطح زمین در این‌گونه حفاری‌ها مؤثرند و کدام‌یک را باید مورد آزمون قرارداد. می‌توان گفت عوامل مختلفی از جمله: عمق تونل، فاصله بهینه تونل‌ها، فاصله جبهه‌کارهای دو تونل (در مواردی که تونل‌ها دوقلو باشند)، فاصله جبهه‌کارهای مختلف درون یک تونل، طول گام پیشروی جبهه کارها، زمان خود پایداری منطقه بدون نگهداری و ترتیب و توالی حفر بخش‌های مختلف سطح مقطع، بر روی نشست سطح زمین اثرگذارند. بنابراین توالی حفاری را می‌توان یکی از عوامل دخیل در میزان نشست سطح زمین دانست لذا در این مطالعه، تأکید بر اثر توالی و ترتیب حفاری تونل‌های بزرگ‌مقطع شهری بر روی نشست سطح زمین خواهد بود.

سؤالاتی که باید در این مطالعه به آن‌ها پاسخ داده شوند:

۱. توالی حفاری تونل چه ارتباطی با میزان نشست سطح زمین دارد؟
۲. بهترین ترتیب حفاری برای بهینه شدن میزان نشست سطح زمین چه ترتیبی خواهد بود؟
۳. فاصله جبهه کارها در بخش‌های مختلف حفاری در یک تونل و نیز بین دو تونل چه مقدار باید باشد تا بهینه‌ترین مقدار نشست حاصل شود؟

۱-۶- روش انجام تحقیق

به‌منظور پاسخ به سؤالات مطرح‌شده، اقدامات زیر دنبال شده است:

گردآوری اطلاعات: اطلاعاتی که جهت این مطالعه جمع‌آوری شده است شامل مواردی مثل: موقعیت جغرافیایی پروژه، مشخصات هندسی تونل، اطلاعات زمین‌شناسی عمومی منطقه، اطلاعات زمین‌شناسی مسیر تونل و خصوصیات و پارامترهای ژئومکانیکی مختلف خاک است.

تجزیه و تحلیل اطلاعات و مدل‌سازی عددی: بدیهی است مدل‌سازی عددی در صورت اطمینان از ورودی‌های درست، نتایج حدوداً واقع‌گرایانه‌ای خواهد داشت. روش کار در این مطالعه جهت بررسی نشست سطح زمین و رابطه آن با عوامل بیان‌شده، استفاده از مدل‌سازی عددی است. سپس تحلیل داده‌های گردآوری‌شده با استفاده از مدل‌سازی عددی، انجام شده است. بدین‌صورت که پس از مدل کردن تونل مورد مطالعه، هم تأثیر توالی حفاری در یک تونل و هم تأثیر فاصله بهینه جبهه کارهای دو تونل از هم، بر نشست بررسی و نتایج تجزیه و تحلیل شده‌اند.

تحلیل پایداری تونل و انتخاب سیستم نگهداری: به دلیل اهمیت تحلیل پایداری تونل، قبل از بررسی تأثیر توالی حفاری بر روی نشست سطح زمین، تحلیل پایداری تونل انجام شده و نیز سیستم نگهداری مناسب برای این تونل پیشنهاد شده است.

انتخاب ترتیب حفاری و فاصله‌یابی بهینه جبهه کارهای دو تونل از هم: در نهایت سعی شده است ترتیب حفاری و فاصله بهینه جبهه کارهای دو تونل نسبت به هم، برای رسیدن به کم‌ترین

نشست در سطح زمین، به دست آمده است.

در پایان با مقایسه نتایج ابزار دقیق استفاده شده در پروژه با نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی، میزان اعتبار مدل سازی عددی بررسی شده است.

۷-۱- جمع بندی

با توجه به مطالب ارائه شده در فصل اول می توان ساختار پایان نامه پیشرو را این گونه بیان نمود:



شکل ۱-۵- ساختار پایان نامه

فصل دوم:

مروری بر تونل سازی بزرگ مقطع

در

مناطق شهری

۲-۱- مقدمه

افزایش جمعیت و رشد روزافزون شهرها و تبدیل شدن آن‌ها به کلان‌شهرها، نیاز به حمل‌ونقل را به نیازهای اساسی آن‌ها تبدیل کرده است. پرواضح است که در این شرایط، فضای زندگی تنگ‌تر شده و بروز مشکلات عدیده‌ای را در پی داشته است. مهندسان و صاحب‌نظران شهرسازی، جهت استفاده از حداکثر ظرفیت زمین‌های شهری، رو به حفاری تونل‌های شهری آورده‌اند (شکل ۲-۱).

نظر به اینکه اکثر شهرهای پرجمعیت و بزرگ، روی مناطق آبرفتی و حاصلخیز و یا در کنار رودخانه‌های بزرگ بنانهاده شده‌اند، همچنین عمق کم تونل‌های شهری به دلیل دسترسی راحت به آن‌ها، محیط‌های خاکی را می‌توان خاستگاه اکثر تونل‌های شهری دانست. به همین خاطر باید برای حفاری تونل‌های قطار شهری و بزرگراهی درون‌شهری، از این محیط‌های غالباً خاکی عبور نمود. مدت زیادی است حفاری تونل‌های قطار شهری به روش حفاری تمام‌مقطع با استفاده از ماشین‌های حفاری تونل^۱ (TBM) اجرا می‌گردد. این تجهیزات، کمک شایانی به حفاری سریع، ایمن، مستحکم و مطمئن این نوع از تونل‌ها کرده است. اما مطالعات و تجارب نشان داده است که اکثر تونل‌های بزرگراهی درون‌شهری که به‌طور طبیعی، بزرگ‌مقطع نیز هستند را نمی‌توان در یک مرحله حفر نمود. از این رو حفاری تونل به روش مرحله‌ای^۲ اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

در این فصل به مرور تونل‌سازی بزرگ مقطع در زمین‌های سست شهری پرداخته شده است. همچنین مفاهیم و اصول کلی روش نوین تونل‌سازی اتریشی بیان گردیده است. در ادامه، چند مورد از روش‌های برآورد نشست سطح زمین تشریح شده و در پایان، به سوابق مطالعات انجام شده در مورد تونل‌سازی چندمرحله‌ای در مناطق شهری و تأثیر بر نشست زمین پرداخته شده است.

¹ Tunnel Boring Machine

² Sequential excavation method



شکل ۲-۱- نمایی از یک تونل درون شهری [۵]

۲-۲- حفر تونل‌های بزرگ مقطع در زمین‌های سست شهری

به‌طور کلی روش‌های تونل‌سازی مرحله‌ای در زمین‌های خاکی به دودسته روش‌های سنتی و جدید تقسیم‌بندی می‌شود. روش‌های سنتی، روش‌هایی هستند که در زمین‌های نرم و خاکی بر اساس تفکیک مقطع تونل به چند بخش و حفر هر بخش به روش گالری‌های چوب‌بست شده، پایه‌ریزی شده است. اصول حفاری‌های سنتی به‌صورت زیر است: تقسیم سطح مقطع تونل به گالری‌های کوچک، نگهداری موقت با چوب‌بست و گاهی پر کردن با مصالح حفاری، تعریض تونل با حفظ چوب‌بست‌ها، جمع‌آوری چوب‌بست‌ها و نصب نگهداری دائم، پیشروی در چندین مرحله و نصب پوشش نهایی تونل به‌وسیله بنایی با سنگ و آجر. این دسته از روش‌ها شامل روش‌های سنتی، بلژیکی، آلمانی، اتریشی، ایتالیایی، انگلیسی و آمریکایی می‌باشند [۶].

اما روش‌های جدید تونل‌سازی مرحله‌ای در خاک، شامل روش‌های: نیمه بالایی با پله کوتاه^۱، روش تاج و پله^۲، روش دیافراگم میانی^۳، روش گالری‌های کناری^۴، روش جدید آلمانی، روش برش حلقه‌ای^۵، روش پوشش بتنی و روش جدید تونل‌سازی اتریشی^۶ (NATM) می‌باشند [۶]. در ادامه، این روش‌ها به صورت خلاصه توضیح داده می‌شوند:

• روش نیمه بالایی با پله کوتاه:

در روش نیمه بالایی با پله کوتاه، عملیات حفاری به صورت پله‌ای است و از تاج تونل شروع شده و به سمت پایین ادامه می‌یابد. به دلیل رعایت نکات ایمنی، فاصله‌ای حدود ۵۰-۱۵۰ متر بین جبهه کارهای بالایی در نظر گرفته می‌شود تا تداخل پیش نیاید. همچنین ارتفاع بخش بالایی تقریباً ۴/۵ متر در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است 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. همچنین این شیوه در زمین‌هایی که قابلیت جابجایی بسیار بالایی دارند، کاربرد ندارد [۱].

• روش تاج و پله:

در روش تاج و پله، فاصله تاج با پله، بستگی به جنس زمین دارد و با فاصله‌ای مناسب از یکدیگر حفر می‌شوند. در مواردی که قسمت تاج تونل دارای ارتفاع بیش از ۵ متر بوده و مشکلات ناپایداری زیاد نباشد، از این روش استفاده می‌گردد. جهت جلوگیری از بالازدگی و کنترل همگرایی‌ها از کفبند موقت در کف پله بالایی استفاده می‌شود. اتصال پله بالایی و پایینی توسط مسیری به نام رمپ برقرار

¹ Top heading short bench

² Top heading and benching

³ Center Drift

⁴ Side Drift

⁵ ring-cut

⁶ New Austrian Tunneling Method

می‌گردد. به دلیل تمرکز تنش‌ها و ایجاد ناپایداری در صورت جانمایی رمپ در قسمت میانی، معمولاً آن را در دیواره‌ها ایجاد می‌کنند [۱].

- روش دیافراگم میانی:

در روش دیواره میانی، مقطع تونل توسط یک حائل مرکزی به دو قسمت تقسیم می‌شود و با توجه به ابعاد تونل، هر قسمت ممکن است در چند مرحله حفاری گردد. برای ایجاد دیافراگم، از شاتکریت مسلح و در صورت لزوم از راک بولت استفاده می‌شود [۱].

- روش گالری‌های کناری:

در این روش ابتدا دو گالری در کناره‌های تونل و سپس قسمت مرکزی، حفاری و نگهداری می‌شوند. در پایان نیز نگهداری‌های به‌جای مانده داخل تونل، برچیده می‌شوند. از ویژگی‌های این روش می‌توان به مواردی مثل: مناسب بودن در تونل‌های با سطح مقطع عرضی زیاد، حفاری در گالری‌ها از بالا به پایین، کنترل خوب نشست زمین، توزیع مناسب تنش در زمین و محدوده پلاستیک ایجادشده کوچک‌تر نسبت به سایر روش‌ها، اشاره نمود [۱].

- روش آلمانی:

مراحل اجرایی در این روش به این صورت انجام می‌گیرد: ابتدا گالری‌هایی در گوشه‌های پایینی تونل حفر و نگهداری می‌شوند. سپس کف گالری حفاری شده و بتن‌ریزی می‌گردد. بعد از این مرحله، دیواره‌های کناری بتن‌ریزی می‌شوند. به دلیل بزرگی و عرض زیاد سقف در این روش، باید آن را پیش از حفر، نگهداری نمود. در ادامه، حفاری بخش بالایی و مرکزی تونل و قسمت بعدی تونل در پایین، تخریب دیواره‌های برجای‌مانده در داخل گالری‌ها، بستن حلقه نگهداری و در نهایت بتن‌ریزی نهایی سقف انجام می‌گیرد [۱].

• روش برش حلقه‌ای:

مراحل اجرای این روش بدین‌صورت است: حفاری قسمت‌های سه‌گانه بالایی با گام نیم تا یک متری، استفاده از شاتکریت در سطوح حفاری‌شده، تکرار مراحل فوق برای گام بعدی، حفاری سکوی میانی، نصب کف‌بند موقت، حفاری بخش پایینی مقطع با گام یک متری و استفاده از شاتکریت در بخش کف تونل. درنهایت این مراحل تا حفاری کامل سطح مقطع تونل ادامه می‌یابد [۱].

• روش پوشش بتنی:

از روش پوشش بتنی در محدوده‌های شهری و با روباره کم و باهدف محدود کردن تغییرها استفاده می‌شود. اساس این روش، استفاده از شاتکریت مسلح با مقاطع فولادی و توری‌های سیمی است. ابتدا، گالری‌های جانبی و سپس پایه وسط، حفاری می‌شود. در این روش، کیفیت و پیوستگی مراحل بتن ریزی و نیز همپوشانی مناسب آرماتورها، بسیار با اهمیت است [۱].

۲-۳- بررسی روش نوین تونل‌سازی اتریشی (NATM)

۲-۳-۱- مفاهیم و اصول کلی NATM

مهم‌ترین و معروف‌ترین روشی که اساس آن حفر چندمرحله‌ای برای اجرای فضاهای بزرگ زیرزمینی است، روش جدید تونل‌سازی اتریشی (NATM) است. این روش در اواخر دهه ۵۰ و اوایل دهه ۶۰ میلادی توسط رابسویچ، مولر و پانچر ارائه‌شده است [۷]. اصطلاح روش جدید تونل‌سازی اتریشی که عموماً به‌عنوان NATM شناخته می‌شود، از سالزبورگ اتریش آمده و اولین بار توسط رابسویچ^۱ (۱۹۶۲) استفاده و در سال ۱۹۶۴ به جهان شناسانده شد [۸].

روش NATM را می‌توان مرهون پیشرفت در زمینه‌های حفاری، نگهداری، ابزاربندی و رفتارنگاری

^۱ Rabcewicz

دانست. با ارائه الزاماتی در این سه فاز اصلی تونل‌زنی، روش NATM، روشی انعطاف‌پذیر و قابل‌اعمال در هر شرایط زمین، شده است. تا قبل از استفاده از این روش، تنها راه شناخته‌شده برای حفر تونل‌ها در زمین‌های نرم و ناپایدار، استفاده از تونل‌زنی سپری بود. به همین دلیل روش NATM را می‌توان به‌عنوان روش تونل‌سازی در زمین‌های نرم دانست که به همراه روش‌های مرسوم کاربرد سپر، استفاده می‌شود [۹]. این روش، بعدها با توجه به ترتیب حفاری و نگهداری، توسعه پیدا کرد. پیشرفت دستگاه‌های نگهداری، ابزاربندی‌ها و مهارت‌های تفسیر داده‌ها، کاربرد NATM را در زمین‌های مچاله‌شونده با تغییرهای بزرگ و در زمین‌های سست و در تونل‌های بزرگ‌مقطع با شرایط هندسی پیچیده، گسترش داد. لذا NATM می‌تواند هم به یک فلسفه طراحی تعبیر شود و هم به یک روش ساخت. بنابراین عناصر کلیدی فلسفه طراحی و روش ساخت NATM به‌صورت زیر خلاصه می‌شود [۶]:

✓ تقویت و افزایش مقاومت توده سنگ یا خاک

✓ نگهداری به‌وسیله لایه‌های شاتکریت

✓ رفتارسنجی و اندازه‌گیری دقیق تغییر شکل و تنش

✓ نصب پوشش اولیه انعطاف‌پذیر

✓ بستن فوری کف‌بند

✓ طبقه‌بندی توده سنگ یا خاک

✓ طراحی فعال و پویا منطبق بر رفتارسنجی

اصول طراحی مناسب برای NATM به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: دسته اول به‌عنوان تابعی از الزامات فنی NATM با کاربرد در زمین خاکی و محیط شهری و نگهداری‌های مربوطه می‌تواند تلقی شود و دسته دوم وابسته به محدودیت‌های بیرونی مانند مشکلات نشست، تأثیرات زیست‌محیطی،

ایمنی، فناوری مهندسی و محدودیت‌های قراردادی و مالی است. طراحی مجزای هر کدام از این ویژگی‌ها بدون در نظر گرفتن بقیه، منجر به شکست NATM می‌شود [۶].

۲-۳-۲- اجرای تونل‌های بزرگ مقطع NATM در نواحی شهری

زمین‌های خاکی از نظر حفاری، آسان ولی از نظر نگهداری، سختی‌ها و مشکلات زیادی از جمله مسئله نشست سطح زمین، عدم یکپارچگی مواد اطراف تونل، مشکل تخلخل و نفوذپذیری زمین و ورود آب به داخل تونل را به پیمانکار تحمیل می‌کنند. عناصر اصلی موجود در تونل‌های NATM شامل موارد زیر است: پایدارسازی جبهه کار با استفاده از گوه‌های جبهه کار، پوشش شاتکریتی، اسپایلینگ با میلگردهای عاج‌دار یا لوله‌های دوغاب‌ریزی، افزایش عرض با پی شاتکریتی، تقویت ظرفیت باربری با میل‌مهار و دوغاب‌ریزی، استفاده از کف‌بند موقت شاتکریتی، آبکشی ناحیه حفاری، پایدارسازی جبهه کار با شاتکریت و میخ‌کوبی و اجرای روش حفاری مرحله‌ای و نیز تعیین گام حفاری مناسب. در روش حفاری مرحله‌ای، اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار در میزان نشست سطح، طول گام حفاری در جبهه کار و ترتیب مراحل حفاری تونل است. به‌طور کلی طول گام به‌عنوان فاصله طولی از دهانه نگهداری نشده است که در یک مرحله اجرا می‌شود. محققین معتقدند که طول گام حفاری تأثیر عمده‌ای بر روی پتانسیل ریزش جبهه کار و دهانه خودپایدار و در کل پایداری تونل دارد و نیز هزینه و زمان اجرای تونل، وابسته به این عامل است. در نواحی شهری می‌توان در زیر خیابان‌ها، مقدار طول گام را در هر قسمت افزایش داد، ولی در زیر ساختمان‌ها به دلیل روباره 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 بیش‌ازحد بر پوشش تونل و کاهش ریزش‌های احتمالی است. به‌طور کلی حفاری مرحله‌ای در تونل باعث ایجاد آشفستگی در حالت اولیه تنش در زمین شده و یک رژیم سه‌بعدی تنش به شکل حبابی، اطراف جبهه کار در حال پیشروی، ایجاد می‌کند. باید

یک فاصله مکانی و یک فاصله زمانی بین دو زون بحرانی، باهدف 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 است. این آشفتگی از دو برابر قطر حفاری در جلوی جبهه کار فعال شروع می‌شود [۶].

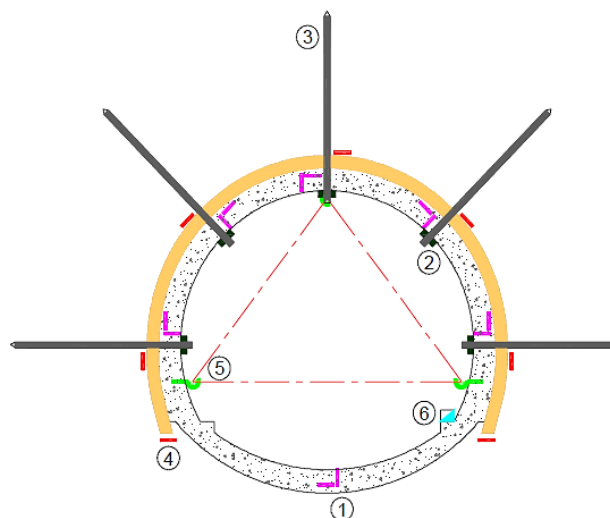
۲-۳-۳- نگهداری و پیش نگهداری در تونل‌های بزرگ مقطع NATM

به‌طور کلی در روش NATM و بخصوص در تونل‌های بزرگ مقطع و کم‌عمق شهری که عمدتاً در لایه‌های خاکی اجرا می‌شوند، عناصر نگهداری شامل: ترکیبی از شاتکریت (لایه مهاری اولیه و چندلایه متفاوت)، شبکه تور سیمی، قاب فولادی (به‌منظور نگهداری فوری محیط تونل در طول گام حفاری، حفظ قالب سطح مقطع تونل برای شاتکریت پاشی و حفاری و نیز پشتیبانی از اسپایل‌های نصب‌شده به‌عنوان نگهداری پیشرو برای گام بعد)، میل مهار یا راک بولت و یا به همراه تزریق است. در بسیاری موارد، به‌ویژه در روباره کم و باوجود آب زیرزمینی در زیر تراز کف تونل، به روش‌های مکانیکی پیش‌نگهداری با کمک دوغاب برای چسبیدن به زمین و محکم شدن نیاز است. در زمین‌های شل و غیر چسبنده نیاز به تقویت زمین برای سیمانی شدن و کاهش نفوذپذیری خاک است. عناصر پیش‌نگهداری در تونل‌های بزرگ مقطع در نواحی شهری، شامل موارد زیر می‌باشند: (۱) اسپایلینگ که یکی از عناصر مکانیکی رایج بوده، در محیط سقف و شانه‌های تونل و در صورت نیاز در دیواره‌ها و کف تونل نصب می‌شود. دوغاب‌ریزی این اسپایل‌ها، باعث تماس مستحکم بین میله‌ها و زمین می‌شود. (۲) چتر لوله‌های فولادی که 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. نصب لوله‌های فولادی به‌عنوان سازه‌ای حائل در خاک، به‌طور زیادی باعث کاهش نشست سطح زمین و افزایش چسبندگی مؤثر در توده خاکی اطراف تونل می‌شود. این سامانه‌های قوس فولادی، باعث پیشرفت حفاری مرحله‌ای، به‌ویژه در محیط‌های

شهری تحت روباره‌های کم و نیز در شرایط دشوار زمین می‌شود. (۳) نصب میخ در جبهه کار. (۴) میخ‌کوبی جبهه کار با استفاده از نیل‌ها یا میله‌های فولادی. (۵) نصب میکروپایل‌ها. (۶) روش‌های تقویت و بهسازی خاک که خود شامل فرونشاندن سطح ایستابی آب، دوغاب‌ریزی، دوغاب‌ریزی با فشار، مخلوط کردن خاک، انجماد خاک و غیره است [۶].

۲-۳-۴- رفتارسنجی تونل‌های NATM در نواحی کم‌عمق شهری

به‌طور کلی هدف از رفتارنگاری با استفاده از ابزاربندی ژئوتکنیکی در نواحی شهری، ایمنی ساختمان‌ها و تأسیسات سطحی، ارزیابی طراحی و اجرا، کنترل احداث و ساخت تونل و در صورت نیاز رفتارسنجی بلندمدت به‌منظور ایمنی سازه است. رفتارسنجی ژئوتکنیکی یک فرآیند استاندارد در روش طراحی مشاهده‌ای تونل، با هدف حداقل سازی ریسک و کاهش هزینه‌ها است. رفتارسنجی، کلاً شامل قبل از اجرا، حین و پس از اجرا است. مقاطع مهم در رفتارسنجی در مناطق شهری شامل موارد زیر است: مقطعی که انتظار می‌رود از نظر شرایط ژئوتکنیکی ضعیف باشند، مقطعی که ارتفاع روباره کم است، مقطعی که تونل‌های زیرزمینی از زیر جاده‌های موجود و یا کانال آب عبور می‌کند، مقطعی که ساختمان‌ها در محدوده نشست قرار گرفته‌اند و مقطعی که تونل‌ها و سایر سازه‌ها در معرض جابجایی و تنش‌های زیاد هستند. رفتارسنجی ژئوتکنیکی شامل موارد زیر است: برداشت موقعیت و تراز یابی سطح زمین و کنتور تونل، همگرایی سنجی (به‌صورت سه‌نقطه‌ای و پنج‌نقطه‌ای در تاج، گالری‌ها و کل تونل)، کشیدگی سنجی، انحراف سنجی، اندازه‌گیری تنش (با سلول فشار شاتکریت یا بتن)، اندازه‌گیری نیروی انکر و اندازه‌گیری فشار و سطح آب زیرزمینی که در شکل یک مقطع استاندارد تونل NATM در خاک دیده می‌شود [۶].



شکل ۲-۲- نمونه‌ای از تجهیزات رفتارسنجی در تونل NATM [۱]

۲-۵- برآورد نشست

یکی از آثار مهم و البته غیرقابل‌اجتناب حفاری تونل‌ها، جابجایی و حرکات زمین است. حفاری تونل، باعث آزادسازی تنش‌های منطقه می‌شود که فقط با استفاده از سیستم نگهداری مناسب می‌توان با آن مقابله نمود. البته از آنجایی که نمی‌توان با یک سیستم نگهداری خیلی صلب به‌طور کامل از جابجایی‌ها جلوگیری کرد، لذا در هر صورت میزان مشخصی جابجایی خواهیم داشت. در نتیجه زنجیره‌ای از جابجایی‌ها از تونل تا سطح زمین به وجود می‌آید که البته با کمتر شدن عمق تونل، اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد. از دلایل نشست سطح زمین می‌توان به سه دلیل عمده اشاره نمود [۱۰]:

۱- نشست کوتاه‌مدت زمین ناشی از حفاری تونل:

این نشست تابعی از پایداری سینه کار تونل، نرخ پیشروی، زمان موردنیاز جهت نصب سیستم نگهداری و زمان لازم برای پرکردن فضای خالی انتهای ماشین تونل‌زنی (در تونل‌سازی مکانیزه) است. نشست کوتاه‌مدت، در یک فاصله معینی از جلو سینه کار شروع شده و با نصب نگهداری مناسب، متوقف می‌شود.

۲- نشست ناشی از تغییر شکل سیستم نگهداری:

این نوع از نشست، مربوط به تونل‌های با قطر زیاد و حفرشده در نواحی کم‌عمق است.

۳- نشست بلندمدت زمین:

این نوع نشست در اثر دو عامل به وجود می‌آید. تحکیم اولیه که به‌طور معمول در خاک‌های چسبنده و متراکم در اثر کاهش فشار آب منفذی رخ می‌دهد و تحکیم ثانویه که نوعی خزش در خاک است. در این بخش، منظور از نشست، نشست کوتاه‌مدت زمین، ناشی از حفر تونل است. جهت برآورد میزان نشست سطح زمین، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده‌اند. به‌طور کلی این روش‌ها به چهار دسته: روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی و مدل‌سازی فیزیکی تقسیم‌بندی می‌شوند.

۲-۵-۱- روش‌های تجربی برآورد نشست سطح زمین

با مطالعات و تجربیات مختلفی که از حفاری تونل‌های مختلف در سرتاسر جهان به دست آمد، روش‌های تجربی زیادی برای تخمین نشست سطح زمین در اثر تونل‌سازی، ابداع و پیشنهاد گردید. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های ارائه‌شده توسط پک^۱ (۱۹۶۹)، اتول^۲ (۱۹۸۶)، نیو و اریلی^۳ (۱۹۹۱)، لئو^۴ (۱۹۸۴) و وودمن^۵ (۱۹۸۲) اشاره نمود. همچنین محققانی همچون لیتوینیزین^۶ (۱۹۵۶) و پک روش احتمالاتی را برای فهم رفتار خاک اطراف تونل پیشنهاد کرده‌اند. مهم‌ترین نتیجه این روش، انتخاب یک تابع احتمالی نرمال شده بود که به‌صورت تجربی، نشست قائم در سطح زمین را نشان می‌داد [۱۱].

¹ Peck

² Attewell

³ New and O'Reilly

⁴ Leo

⁵ Woodman

⁶ Litwiniszyn

۲-۵-۱-۱- روش تجربی پک (۱۹۶۹)

پک نشان داد که نشست عرضی سطح زمین، ناشی از حفاری تونل، به‌صورت منحنی توزیع گاوس خواهد بود (شکل ۲-۳). این نشست عرضی از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$S = S_{max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) \quad (۱-۲)$$

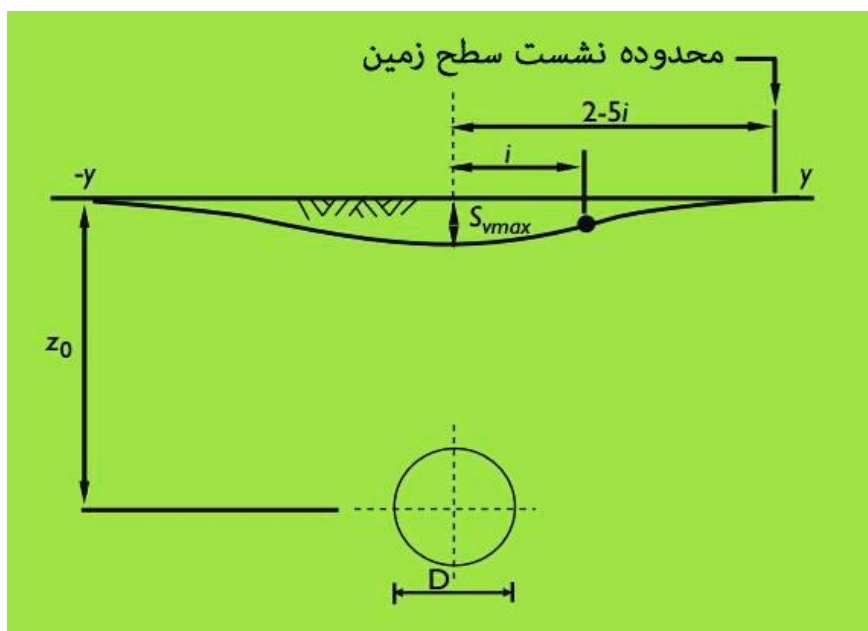
که در آن:

S : نشست سطح زمین در نقطه‌ای با فاصله y از محور تونل

S_{max} : حداکثر نشست سطح زمین

y : فاصله افقی نقطه موردنظر از محور تونل

i : فاصله افقی نقطه عطف منحنی از محور تونل



شکل ۲-۳- نمایی از مقطع عرضی تونل جهت برآورد نشست عرضی تونل سازی- برگرفته از [۱۰] با اصلاح.

حجم گودی نشست بر اساس نشست حداکثر طبق رابطه (۲-۲) محاسبه می‌گردد [۱۰]:

$$V_s = \int_{-\infty}^{\infty} S_v dx = \sqrt{2\pi} i_x S_{v \max} \quad (2-2)$$

در این رابطه، V_s حجم گودی نشست در واحد طول تونل برحسب درصد است که تعاریف متعددی برای آن در نظر گرفته شده است. درواقع حجم گودی نشست سطح، برابر با حجم خاک اضافه حفر شده نسبت به حجم تئوریک تونل است. معمولاً این حجم اضافی به صورت کسری از حجم تئوریک تونل تعریف می‌شود. در نهایت رابطه نشست به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد [۱۰]:

$$S_v = \sqrt{\frac{\pi V_L D^2}{8 i}} e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \quad (2-3)$$

محققان مختلف مطابق با جدول ۱-۲ مقدار پارامتر i را پیشنهاد داده‌اند:

جدول ۱-۲- مقدار i پیشنهادی محققان مختلف [۱۲]

اساس رابطه تجربی	مقدار (i)	ماخذ
مشاهدات محلی	$i/R = (z_0/2R)^n \quad n=0.8-1$	Peck (1969)
مشاهدات محلی در تونل‌های انگلستان	$i/R = (z_0/2R)$	Attewell et al (1977)
مشاهدات محلی در تونل‌های انگلستان	$i/R = (z_0/2R)^{0.8}$	Schmidt & Clough
مشاهدات محلی در تونل‌های انگلستان	$i=0.43z_0 + 1.1$ خاک‌های چسبنده ($3 \leq z_0 \leq 34$) $i=0.28z_0 - 0.1$ خاک‌های غیر چسبنده ($6 \leq z_0 \leq 10$)	O'Reilly & new (1982)
مشاهدات محلی و تست‌های آزمایشگاهی	$i=0.25(Z_0 + R)$ ماسه‌های سست $i=0.25(1.5Z_0 + 0.5R)$ رس	Atkinson & potts (1979)
جاهایی که اثر تحکیم قابل توجه نیستند	$i = (0.45z_0 + 0.57) \pm 1.01$	Leach

۲-۵-۲- روش‌های تحلیلی برآورد نشست سطح زمین

محققینی از قبیل ساگاستا^۱ (۱۹۸۷)، ورویجت و بوکر^۲ (۱۹۹۶)، لوگاناتان و پولوس^۳ (۱۹۹۸)، بابت^۴

^۱ Sagaseta

^۲ Verruijt and Booker

^۳ Loganathan and poulous

^۴ bobet

(۲۰۰۱) و پینتو^۱ (۱۹۹۷) روش‌های حل بسته‌ای برای تخمین نشست ارائه کرده‌اند. مهم‌ترین آن‌ها را می‌توان روشی نام برد که ساگاستا (۱۹۸۷) ارائه نموده است. این روش، یک روش حل بسته الاستیکی است که برای به دست آوردن کرنش‌ها در خاک غیرقابل تراکم ارائه کرد. ولی این روش به دلیل مشکلات زیادی از قبیل این‌که از حل الاستیک استفاده کرده بود، برای خاک‌های نرم قابل استفاده نبود [۱۱].

۲-۵-۲-۱- روش لوگاناتان و پولوس (۱۹۸۸)

این محققین برای پیش‌بینی نشست سطح زمین رابطه ۲-۴ را ارائه نموده‌اند [۱۲]:

$$S = 4\epsilon_0 (1-\nu) R^2 \frac{H}{H^2+y^2} \exp \left[-\frac{1.38 y^2}{(H+R)^2} \right] \quad (۲-۴)$$

در این رابطه S مقدار نشست زمین، ϵ_0 برابر حجم ازدست‌رفته، ν ضریب پواسون خاک، R شعاع تونل، H عمق قرارگیری تونل و y فاصله جانبی از خط مرکزی تونل است.

۲-۵-۲-۲- روش بابت (۲۰۰۱)

روش تحلیلی بابت (۲۰۰۱) برای محاسبه نشست بیشینه در اثر ساخت تونل‌ها ارائه گردیده است. این روش برای تونل‌هایی صادق است که نسبت عمق به شعاع تونل بیش از ۱/۵ باشد، زیرا در غیر این‌صورت تأثیر سطح زمین وجود خواهد داشت. در تمام مراحل تحلیل، لاینینگ، بی‌نهایت انعطاف‌پذیر و غیرقابل تراکم فرض شده است. روابط تحلیل بابت برای حالات کوتاه‌مدت و بلندمدت، جهت محاسبه نشست بیشینه در زمین‌های خشک و زمین‌های اشباع ارائه شده است [۱۳]. نشست بیشینه زمانی رخ می‌دهد که شعاع تونل با عمق برابر باشد. نشست بیشینه در راستای تاج تونل به وقوع خواهد پیوست. همچنین برای حالتی که زمین خشک است طبق رابطه بابت خواهیم داشت [۱۴]:

¹ Pinto

$$\delta_{\max} = -\frac{wr_0}{h} + \frac{1+v}{E} \left\{ \gamma r_0^2 \left[\frac{1}{8} \left(k - \frac{v}{1-v} \right) \left(\frac{r_0}{h} \right)^2 - \frac{1}{4} \frac{3-4v}{1-v} \ln h \right] + \gamma h (1-k) r_0 \left[-2(1-v) \frac{r_0}{h} + \frac{1}{8} (9-4v) \left(\frac{r_0}{h} \right)^5 \right] \right\} \quad (5-2)$$

در این رابطه، $\delta_{\max}$ نشست بیشینه سطح زمین، w میزان گپ بین زمین و پوشش بتنی، r_0 شعاع تونل، E مدول الاستیسیته خاک، γ وزن مخصوص کل خاک، h عمق تونل و k ضریب فشار زمین در حالت سکون (نسبت تنش افقی به قائم) است.

۲-۵-۳- روش ساگاستا (۱۹۸۷)

در این شیوه، راه‌حل‌های فرم بسته‌ای برای به دست آوردن میدان کرنش در خاک ذاتاً ایزوتروپیک و هموزن تراکم ناپذیر، به دلیل افت در نزدیکی سطح زمین، ارائه شده است که ضمن در نظر گرفتن معادلات کرنش، از معادلات تنش‌ها صرف نظر می‌کند. این تحلیل شامل در نظر گرفتن افت حجمی در محل تونل و توزیع آن در توده خاک در حالت مصالح تراکم ناپذیر است. بر این اساس مقدار جابجایی‌های سطحی به صورت زیر است [۱۵]:

$$\delta_z(x) = \frac{v_s}{\pi} \frac{H}{x^2 + H^2} \quad (6-2)$$

$$\delta_z(y) = \frac{v_s}{2\pi H} \left\{ 1 + \frac{y}{\sqrt{y^2 + H^2}} \right\} \quad (7-2)$$

در این روابط، v_s میزان افت حجمی زمین، $\delta_z(x)$ نشست قائم عرضی در فاصله x از محور تونل، $\delta_z(y)$ نشست قائم طولی، y فاصله از سینه کار تونل و H فاصله از سینه کار است.

۲-۵-۳- مدل سازی فیزیکی جهت برآورد نشست سطح زمین

مدل‌های فیزیکی، مدل‌های ساده‌ای از ساختارهای پیچیده نمونه اصلی‌اند که از مواد مناسبی ساخته می‌شوند تا بتوانند جایگزینی برای شبیه سازی ویژگی‌های مکانیکی نمونه اصلی باشند. استفاده از مدل‌های فیزیکی برای مشخص کردن رفتار احتمالی زمین، هنگامی که تحت تأثیر حفاری تونل قرار

می‌گیرد، یکی از ابزارهای موجود است.

۲-۶- سوابق مطالعات انجام‌شده

در مورد بررسی تأثیر روش‌های حفاری چندمرحله‌ای تونل‌ها و توالی حفاری بر نشست سطح زمین در اطراف یک تونل، مطالعاتی انجام‌شده است که در زیر به چند مورد از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌گردد:

کارکوس و فاوول^۱ (۲۰۰۳) در مطالعه‌ای با استفاده از روش عددی اجزای محدود به بررسی تأثیر حفاری چندمرحله‌ای بر روی نشست سطح زمین در مورد تونل آزمایشی هیتراو لندن پرداخته‌اند [۱۶]. وی بیان کرده است هنگامی که یک تونل حفر می‌شود، نشست در سطح زمین به وجود می‌آید که ممکن است به ساختمان‌های سطح زمین آسیب بزند. برای کنترل و محدود کردن این نشست ناشی از عملیات تونل‌زنی، تکنیک‌های تونل‌زنی پیشنهادی وجود دارد. در مطالعات وی، تعدادی از روش‌های اجزاء محدود به منظور بررسی اثرات الگوهای مختلف برای حفاری یک تونل در رابطه با نشست سطح زمین انجام‌شده است. تونل هیتراو اکسپرس^۲ مطابق با اصول روش تونل‌زنی جدید اتریشی (NATM) ساخته‌شده است. اندازه‌گیری نشست سطح زمین در طول ساخت‌وساز آن به اعتبار نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل انجام‌شده منجر می‌شود. سه نوع فن پیشرفته مختلف برای حفر این تونل یعنی هیتراو اکسپرس، استفاده شده است. این روش‌ها شامل: گالری کناری دوقلو^۳ (TS₁)، گالری کناری تکی^۴ (TS₂)، و روش تاج، پله و کف^۵ (TS₃) [۱۶].

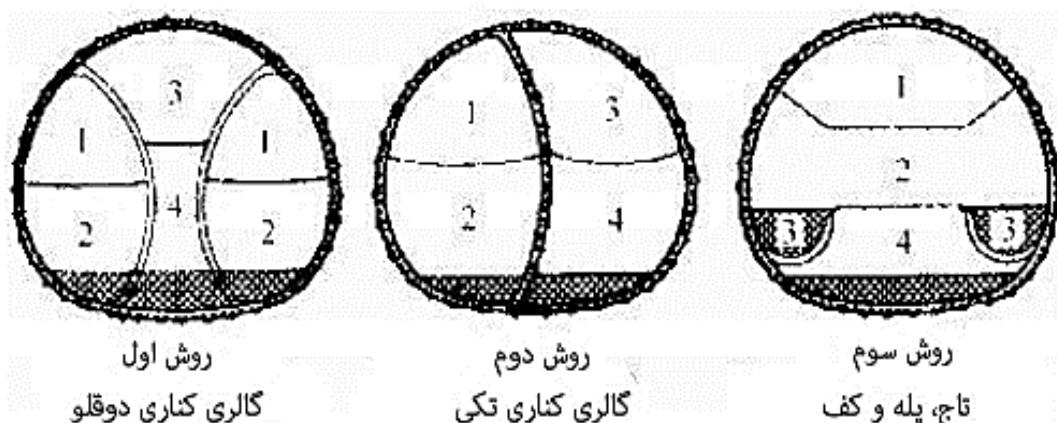
¹ M. Karakus R & J. Fowell

² Heathrow Express tunnel

³ Twin sidewall excavation

⁴ single sidewall excavation

⁵ Crown, Bench and Invert excavation

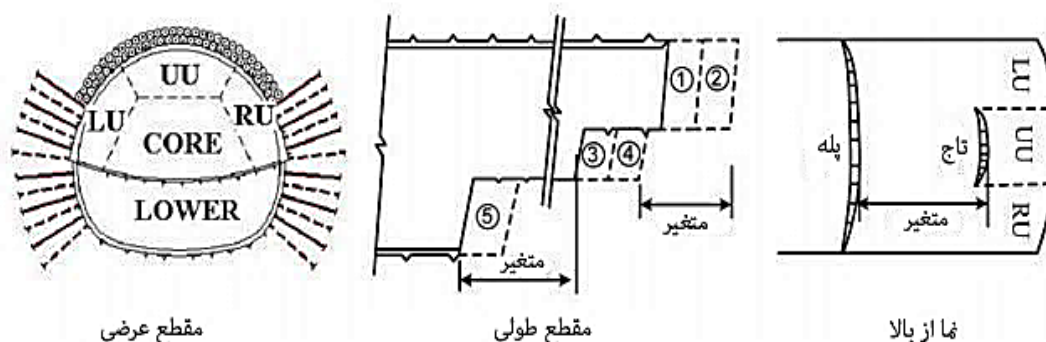


شکل ۲-۴- روش‌های مختلف پیشنهادی کاراکوس و فاوول برای حفر تونل هیتراو لندن- برگرفته از [۱۶] با اصلاح. کاراکوس و فاوول نشان داده‌اند که روش دیواره کناری تکی، کم‌ترین میزان نشست سطح زمین در بالای خط مرکزی تونل را خواهد داشت. در مطالعه آن‌ها پس از اتمام سه نوع مختلف از توالی حفاری، داده‌های اندازه‌گیری، ثابت کرد که حداکثر نشست سطح، بالای مرکز تونل رخ داده است و برای سه روش TS_1 ، TS_2 و TS_3 به ترتیب برابر $27/9$ میلی‌متر، $26/8$ میلی‌متر و $40/3$ میلی‌متر است. با توجه به این نتایج، توالی نوع TS_2 مقدار نشست کمتری را منجر خواهد شد [۱۶].

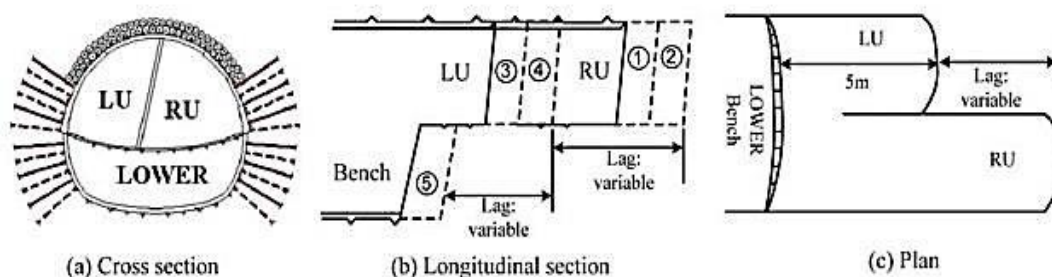
چانسیک یو^۱ (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای به بررسی تونل‌زنی چندمرحله‌ای با استفاده از مدل‌سازی عددی در زمین‌های نرم پرداخته است. وی مطالعات خود را برای روش NATM و با تأکید بر روش‌های حفاری گالری کناری انجام داده است. مورد مطالعاتی وی فاز دوم تونل متروی سئول بوده است. براساس نتایج وی، عوامل مؤثر بر عملکرد تونل‌زنی با روش حفاری پیش‌بینی‌شده، مشخص شده و یک مقایسه مستقیم بین روش‌های مختلف حفاری در مدت عملیات تونل‌زنی، انجام گردیده است. وی مجموعه‌ای از تجزیه و تحلیل‌های سه‌بعدی بر روی تعدادی از تونل‌ها با توالی‌های حفاری مختلف

^۱ Yoo

مانند روش‌های حلقه-برش^۱ (RC) و گالری کناری^۲ (SD) انجام داده است. پارامترهای در نظر گرفته‌شده در این تجزیه و تحلیل شامل طول پله، حجم هسته و فاصله گام حفاری است [۱۷].



شکل ۲-۵- مقطع عرضی و طولی و توالی حفاری در روش حلقه- برش برگرفته از [۱۷] با اصلاح.



شکل ۲-۶- مقطع عرضی و طولی و تالی حفاری در روش گالری کناری-برگرفته از [۱۷] با اصلاح.

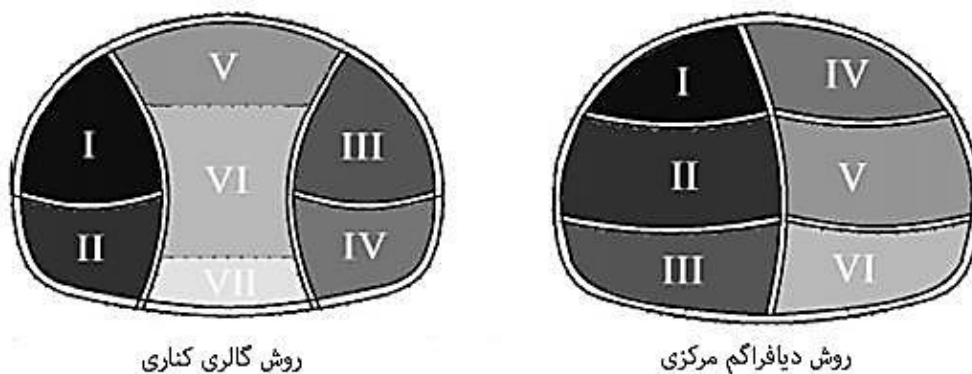
نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که روش گالری کناری، روش مؤثرتری برای محدود کردن مقدار نشست سطح زمین و همچنین تغییر شکل تونل خواهد بود. همچنین مطالعات یو نشان می‌دهد که کم کردن فاصله حفاری بین گالری‌های راست و چپ حفاری، منجر به افزایش تغییر شکل اطراف تونل و نشست سطح زمین خواهد شد. بدین معنی که بهترین عملکرد تونل زنی می‌تواند در هنگام نگه‌داشتن این فاصله، بیش‌تر از یک برابر قطر تونل به دست آید. وی همچنین بیان کرده است که در روش حلقه- برش، طول پله، و یا زمان بسته شدن حلقه سیستم نگهداری، نسبت به حجم

¹ Ring-cut

² Side wall drift

هسته، اثر بیشتری در جابجایی تاج تونل و نیز نشست سطح زمین خواهد گذاشت [۱۷].

شریف‌زاده و همکاران (۲۰۱۳)، روش حفاری متوالی (SEM) برای تونل‌های بزرگ‌مقطع شهری در زمین‌های سست را بررسی نموده‌اند. آن‌ها با مطالعه روش‌های مختلف و ترتیب حفاری تونل بزرگراهی نیایش تهران، بهینه‌ترین حالت توالی حفاری مقطع تونل را طراحی کرده و پیشنهاد داده‌اند [۱۸]. روش کار بدین‌صورت بوده است که پس از مدل‌سازی تونل نیایش با توجه به خصوصیات خاک و سیستم نگه‌دارنده تونل، با استفاده از نمودار پیش‌بینی انتخاب روش حفاری یو و چرن (۲۰۰۷) و اینکه نقطه به‌دست‌آمده تقریباً روی فصل مشترک دو ناحیه قرار می‌گیرد، به این نتیجه رسیده‌اند که نمی‌توان فقط از نتایج حاصل از این نمودار استفاده نمود. لذا تونل با استفاده از دو روش گالری کناری^۱ (SD) و دیافراگم مرکزی^۲ (CD) مدل‌سازی و حفر می‌گردد [۱۸].



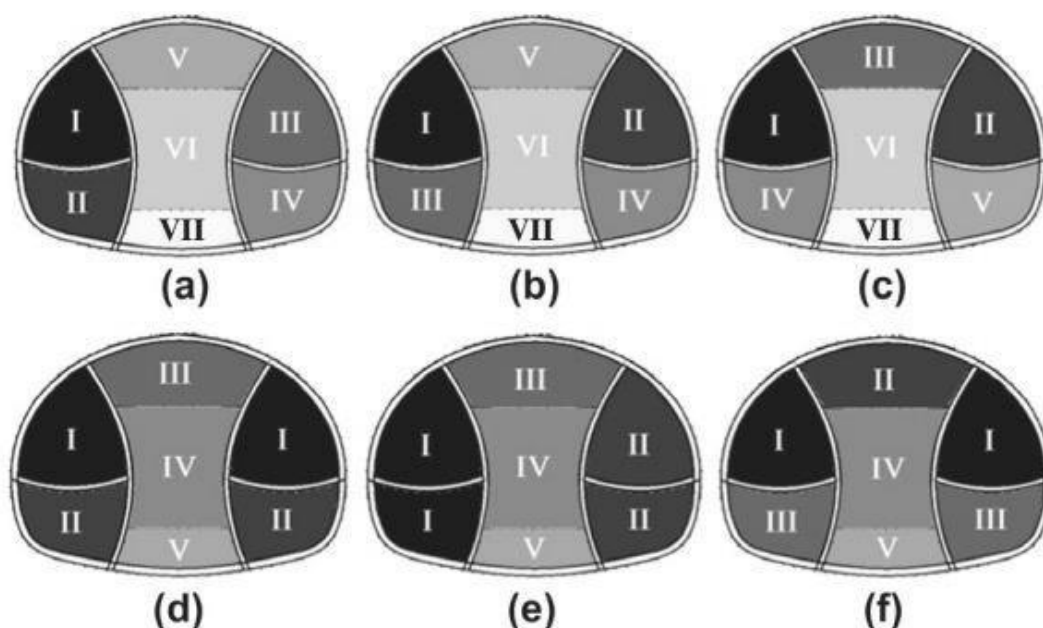
شکل ۲-۷- نمایی از روش گالری کناری و دیافراگم مرکزی-برگرفته از [۱۸] با اصلاح.

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از حفاری تونل نیایش به دو روش بیان‌شده، مشخص گردید که میزان حداکثر نشست ناشی از تونل‌زنی با استفاده از روش گالری کناری برابر با ۲۹ میلی‌متر و روش دیافراگم مرکزی برابر با ۳۷ میلی‌متر است. لذا روش گالری کناری مناسب‌تر تشخیص داده‌شده است. در ادامه مطالعه شریف‌زاده و همکاران، ایشان شش نوع توالی حفاری را جهت حفر تونل نیایش

¹ Side Drift

² Central Diaphragm

تهران با استفاده از روش گالری کناری پیشنهاد کرده‌اند. در نهایت پس از مدل‌سازی، بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیقات آن‌ها، توالی حفاری نوع a به عنوان بهترین توالی که کم‌ترین میزان نشست سطح زمین را منجر می‌شود، انتخاب گردیده است.



شکل ۲-۸- شش نوع توالی حفاری پیشنهاد شده توسط شریف‌زاده و همکاران - برگرفته از [۱۸] با اصلاح.

شریف‌زاده و همکارانش فاصله بهینه جبهه کارهای تونل نیایش از هم را نیز مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها ابتدا با متغیر قرار دادن فاصله گالری‌های کناری و مرکزی از هم، این فاصله را محاسبه کرده که حداقل برابر ۱۵ متر (یک قطر تونل) است. همچنین آن‌ها با متغیر قرار دادن فاصله گالری‌های چپ و راست از هم، این فاصله را نیز برابر با حداقل ۱۵ متر (یک برابر قطر تونل) پیشنهاد داده‌اند. این بدین معنی است که آن‌ها معتقدند جبهه کارهای داخلی یک تونل بزرگ مقطع شهری مثل تونل نیایش باید حداقل برابر ۱D (یک برابر قطر تونل) از هم فاصله داشته باشند [۱۸].

در مطالعه دیگری همانند مطالعه شریف‌زاده و همکاران، کولیوند و همکاران (۱۳۹۰) همین تحقیقات را به همین شکل ولی در مورد تونل ملت تهران انجام داده‌اند. نتایج مطالعه آن‌ها نیز تطابق زیادی با نتایج مطالعه شریف‌زاده و همکارانش دارند [۱۹].

سروش و بری (۱۳۸۱) با مطالعه تونل‌های دوگانه رسالت تهران با استفاده از مدل‌سازی عددی، حفاری چندمرحله‌ای در این تونل‌ها را مورد آزمون قرار داده‌اند. تونل رسالت با استفاده از روش NATM و به‌صورت مرحله‌ای در زمینی آبرفتی و در عمق کمی از سطح زمین اجرا می‌گردد. این مطالعه از جمله نخستین تجربیات داخلی در حفر این‌گونه از تونل‌ها و استانداردهای موجود در اجرای تونل‌های شهری بود. در تحقیق سروش و بری، کلیه مراحل حفر و احداث دو تونل شمالی و جنوبی در چندین مرحله متوالی با استفاده از نرم‌افزارهای موجود و نیز نقشه اجرایی، مدل‌سازی دو و سه‌بعدی شده و نتایج جابجایی و تنش حاصل از حفاری به‌دست‌آمده است. ایشان با استفاده از تحلیل‌های خود پیشنهاد کرده‌اند که به‌منظور بررسی روند و مطالعه جابجایی قائم و افقی در سطح زمین و اطراف تونل‌ها، کنترل‌های لازم باید در محل صورت گیرد و نتایج ابزاربندی موردنظر واقع شود. آن‌ها افزوده‌اند که در اجرای نگهداری اولیه باید سعی شود که تمام منطقه حفرشده همانند لوله‌ای بدون درز و شکاف، بتن پاشی و محافظت شود. از آنجاکه در طی مراحل حفر، گسترش منطقه پلاستیک با حفر تونل دوم به سمت پایه بین دو تونل متمایل می‌شود، باید با استفاده از تجهیزات و روش‌های مناسب، نسبت به تحکیم آن اقدام کرد. در پایان تحقیقات سروش و بری، آن‌ها پیشنهاد کرده‌اند که به دلیل تأثیر هر مرحله از حفاری بر سایر مراحل، حفظ فاصله زمانی و مکانی بین سینه‌کارهای فرعی هر تونل در فواصل بین ۲۵ و ۵۰ متر باید به‌دقت رعایت شود [۲۰].

پلاسی و قریشی (۱۳۸۴) با مدل‌سازی دوبعدی حفاری چندمرحله‌ای برای فضاهای زیرزمینی، توسط یک برنامه تفاضل محدود به بررسی کاربرد و نحوه مدل‌سازی عددی حفاری چندمرحله‌ای پرداخته‌اند. در مطالعه انجام‌شده توسط ایشان، با استفاده از مفاهیم اصلی روش همگرایی-هم‌جواری و فشارهای درونی، شرایط حقیقی مسئله مدل شده است. همچنین با استفاده از رابطه تعادل در المان‌های خاکی و سازه‌ای و نقاط گره‌ای، شرایط واقعی برای هریک از گام‌های حفاری و پوشش‌های نصب‌شده در آن‌ها فراهم گردیده است. پلاسی و قریشی، همچنین با بررسی رفتار یک تونل آزمایشی

به مقایسه روش فوق با روش حفاری ناگهانی و بدون آزادسازی تنش پرداخته و به نتایجی دست‌یافته‌اند [۲۱].

بصیری تهرانی و باقری حریری (۱۳۸۵) امکان‌پذیری استفاده از روش‌های حفاری مختلف (یک و چندمرحله‌ای) را موردبررسی قرار داده‌اند. آن‌ها با ارائه مقادیر شاخص‌های بی‌بعد حاکم بر رفتار تونل‌های کم‌عمق در قالب نمودارهای کاربردی و نیز ساخت الگوریتم پیش‌بینی مشخصات حفاری، امکان پیش‌بینی مشخصات مناسب حفاری در مراحل مقدماتی را برای طراحان فراهم آورده‌اند. ایشان به‌منظور انجام پیش‌بینی اولیه از مشخصات حفاری تونل‌های کم‌عمق با استفاده از مشخصات معلوم هندسی تونل و پارامترهای ژئومکانیکی توده خاک، الگوریتمی ارائه کرده‌اند. به‌این‌ترتیب با در اختیار داشتن مشخصات هندسی تونل و پارامترهای توده خاک میزبان، با تعیین شاخص‌های بی‌بعد، می‌توان به یک برآورد اولیه از مقادیر تغییر شکل‌های جداره تونل و گام حفاری بدون پوشش تونل دست‌یافت. آن‌ها همچنین پیشنهاد کرده‌اند در صورتی که مقدار گام حفاری محاسباتی از نظر اجرایی امکان‌پذیر نبوده و یا با برنامه زمان‌بندی اجرا، هماهنگی نداشته باشد، می‌توان با مرحله‌بندی عملیات حفاری و کاهش دهانه حفاری، با انجام حفاری چندمرحله‌ای، الگوریتم را برای هر یک از مراحل حفاری تکرار کرده و دهانه حفاری مناسب و گام پیشروی بهینه را تعیین کرد [۲۲].

یاری وند و الماسی (۱۳۸۶) به بررسی اثر مراحل اجرای حفاری چندمرحله‌ای بر روی رفتار الاستوپلاستیک در تونل سد بزهل بروجرد پرداخته‌اند. به‌منظور سهولت در اجرای عملیات و امکان انجام نگهداری تونل بزهل در زمان مناسب، حفر این تونل طی دو مرحله فوقانی و تحتانی در نظر گرفته شده است. آنالیز تونل با استفاده از روش همگرایی-هم‌جواری برای در نظر گرفتن اندرکنش الاستوپلاستیک تونل و اجزای سازه‌ای صورت گرفته است. در مطالعه یاری‌وند و الماسی با توجه به تغییرات مراحل حفاری در حین اجرا، نسبت به طراحی اولیه، اثر حفاری چندمرحله‌ای تونل بر روی

تنش‌های اطراف تونل با استفاده از روش تفاضل محدود، موردبررسی قرار گرفته است و نتایج حاصله با تنش‌ها و تغییرشکل‌های به‌دست‌آمده در طراحی اولیه، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مراحل حفاری بر روی توزیع تنش‌های الاستوپلاستیک اطراف تونل و تغییرشکل‌های آن تأثیر بسزایی دارد [۲۳].

پیروی نسب و همکاران (۱۳۹۰) با مطالعه تونل‌های انحرافی سد سردشت آذربایجان غربی، به‌وسیله مدل‌سازی تفاضل محدود، به تأثیر حفاری چندمرحله‌ای تونل‌ها در توده سنگ ضعیف بر روی مباحث فنی و اقتصادی و نمود آن در مقوله مهندسی ارزش پرداخته‌اند. آن‌ها بیان داشته‌اند که همواره در پروژه‌های تونل‌سازی، برنامه‌ریزی جهت طراحی، بهینه‌سازی طرح و اجرا، با این نگاه صورت می‌گیرد که هزینه هر متر حفاری آن در ضمن تأمین ضریب ایمنی موردنیاز، حداقل باشد. بر همین اساس، روش‌های مختلف و متنوعی از مکانیزه تا سنتی، جهت اجرای عملیات حفاری تونل وجود دارد که متناسب با شرایط تونل و محیط اطراف آن انتخاب می‌گردند [۲۴].

۲-۷- جمع‌بندی

اکثر شهرهای بزرگ، روی مناطق آبرفتی بنانه‌داده شده‌اند. همچنین تونل‌های شهری به دلیل دسترسی راحت به آن‌ها، اغلب در عمق کم و در نتیجه در محیط‌های خاکی حفر می‌شوند. مطالعات و تجارب نشان داده است که اکثر تونل‌های بزرگراهی درون‌شهری که به‌طور طبیعی، بزرگ‌مقطع نیز هستند را نمی‌توان در یک مرحله حفر نمود. از این‌رو حفاری تونل به روش مرحله‌ای اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

به‌طور کلی روش‌های تونل‌سازی مرحله‌ای در زمین‌های خاکی به دو دسته روش‌های سنتی و جدید تقسیم‌بندی می‌شود. این دسته از روش‌ها شامل روش‌های سنتی، بلژیکی، آلمانی، اتریشی، ایتالیایی، انگلیسی و آمریکایی می‌باشند. روش‌های جدید تونل‌سازی مرحله‌ای در خاک، شامل

روش‌های: نیمه بالایی با پله کوتاه، روش تاج و پله، روش دیافراگم میانی، روش گالری‌های کناری، روش جدید آلمانی، روش برش حلقه‌ای، روش پوشش بتنی و روش جدید تونل‌سازی اتریشی (NATM) می‌باشند. مهم‌ترین و معروف‌ترین روشی که اساس آن حفر چندمرحله‌ای برای اجرای فضاهای بزرگ زیرزمینی است، روش جدید تونل‌سازی اتریشی (NATM) است.

عناصر کلیدی فلسفه طراحی و روش ساخت NATM شامل: تقویت و افزایش مقاومت توده سنگ یا خاک، نگهداری به‌وسیله لایه‌های شاتکریت، رفتارسنجی و اندازه‌گیری دقیق تغییر شکل و تنش، نصب پوشش اولیه انعطاف‌پذیر، بستن فوری کف‌بند، طبقه‌بندی توده سنگ یا خاک، طراحی فعال و پویا منطبق بر رفتارسنجی است.

حفاری تونل‌ها، منجر به ایجاد جابجایی و حرکات زمین می‌گردد. دلایل نشست سطح زمین را می‌توان به سه دلیل عمده: نشست کوتاه‌مدت زمین ناشی از حفاری تونل، نشست ناشی از تغییر شکل سیستم نگهداری و نشست بلندمدت زمین در اثر تحکیم اولیه و ثانویه تقسیم نمود. جهت برآورد میزان نشست سطح زمین ناشی از حفاری، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده‌اند. به‌طور کلی این روش‌ها به چهار دسته: روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی و مدل‌سازی فیزیکی تقسیم‌بندی می‌شوند.

فصل سوم:

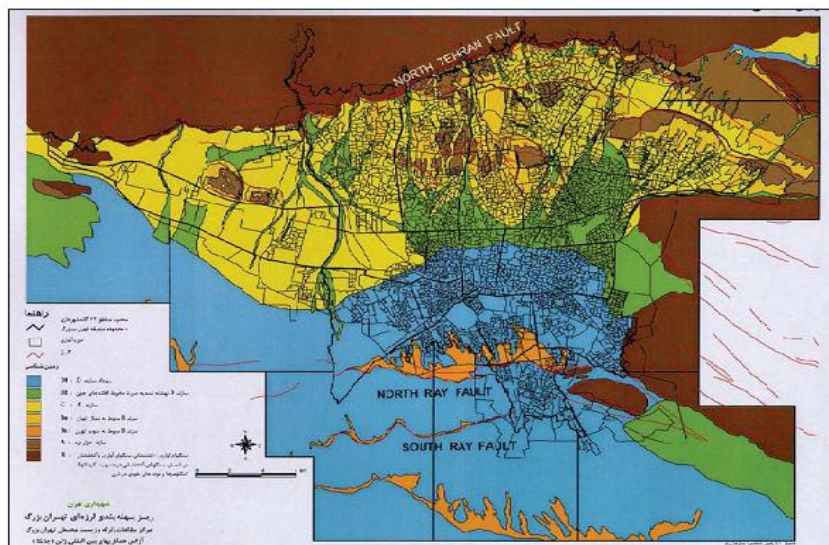
مطالعات زمین شناسی و ژئوتکنیک کے پروژہ

۳-۱- مقدمه

هدف اصلی این فصل، شناسایی و تشریح وضعیت زمین، تفکیک واحدهای زمین‌شناسی، شامل زمین‌شناسی عمومی منطقه و تونل، آب‌های زیرزمینی و درنهایت ارائه پارامترهای ژئوتکنیکی پروژه با استفاده از گزارش زمین‌شناسی تونل بزرگراه حکیم در محدوده عبوری از پارک چیتگر که توسط سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران و موسسه مهندسين مشاور ساحل تهیه شده است [۲].

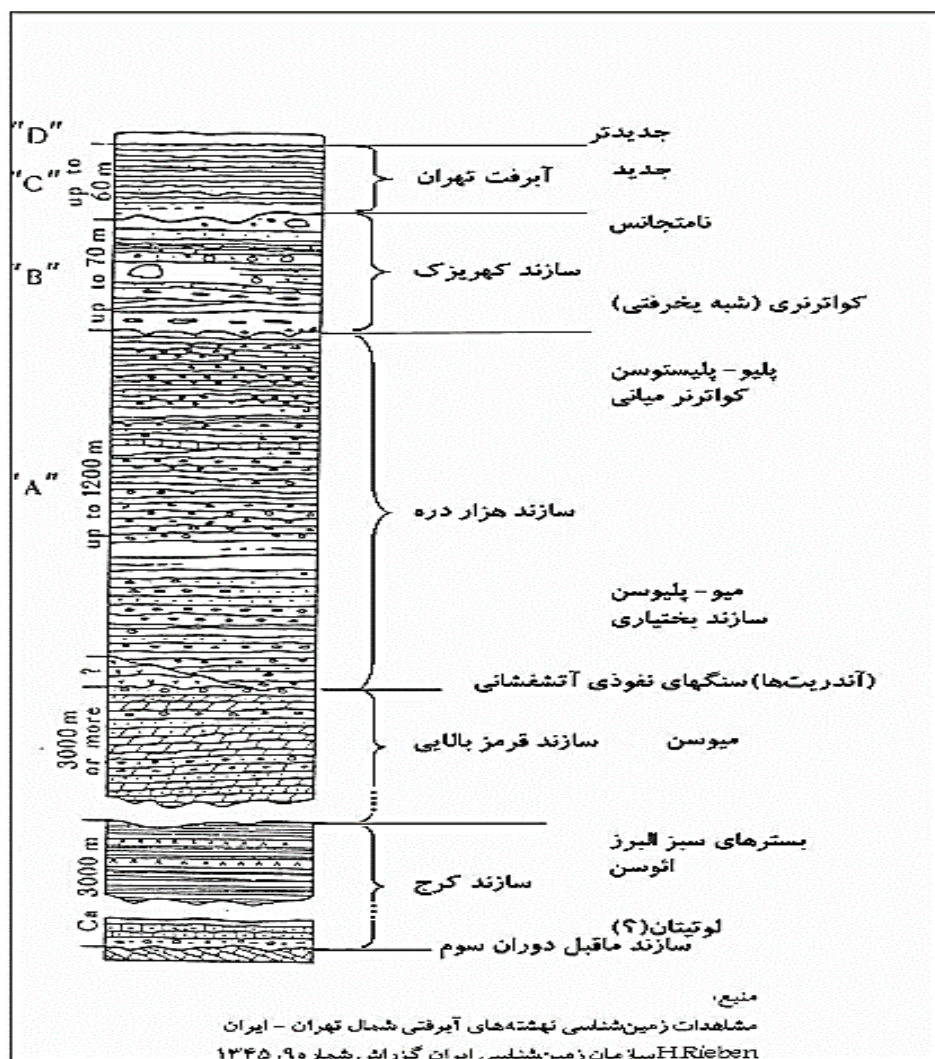
۳-۲- زمین‌شناسی عمومی منطقه

نقشه زمین‌شناسی تهران که بر اساس مطالعات آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن (جایکا)^۱ تهیه شده است، در شکل (۲-۱) و برش کلی نهشته‌های آبرفتی تهران در شکل (۲-۲) نشان داده شده است [۲].



شکل ۳-۱- نقشه توزیع واحدهای آبرفتی در شهر تهران [۲].

¹ jica



شکل ۳-۲- مقطع محلی از نهشته‌های آبرفتی [۲].

بر پایه توضیحات این نقشه، شرایط زمین‌شناختی شهر تهران به شرح زیر خلاصه می‌شود:

• سنگ بستر

واحدهای سنگی قدیمی‌تر از سازند A بر روی نقشه به‌عنوان سنگ بستر مشخص شده‌اند. در بخش شمال و شمال غربی تهران، یعنی درجایی که رشته‌کوه البرز قرار گرفته (بالای پهنه گسل شمال تهران) و از جمله در محدوده پارک جنگلی چیتگر، سنگ بستر، اساساً ترکیبی است از گدازه‌های آتشفشانی ائوسن (توف سبز) و سنگ‌های آتشفشانی که رخنمون‌های بلند شمال دشت تهران را تشکیل

می‌دهد [۲].

• سازند A (سازند هزاردره)

نام این سازند با توجه به ماهیت ریخت‌شناسی رخنمون‌های سازند است. برخی از رخنمون‌های این واحد در تپه‌های جنوبی دشت تهران (در جنوب گسل کهریزک) قرار دارند. نهشته‌های آبرفتی کهن در سازند A اساساً شامل کنگلومراهایی با چند عدسی سنگ ماسه، سنگ سیلت و گِل‌سنگ‌اند و به لحاظ چینه‌بندی‌های منظم، لایه‌های نسبتاً نازک، آوارهای کوچک و مراحل پیشرفته تجزیه مواد تشکیل‌دهنده، قابل تشخیص است [۲].

• سازند B

این سازند نخستین بار توسط ربین (۱۹۶۶) به‌عنوان سازند کهریزک نام‌گذاری و توصیف گردید. این سازند به دو رخساره شمالی (B_n) و رخساره جنوبی (B_s) تقسیم می‌شود [۲].

• سازند c (سازند آبرفتی تهران)

سازند c شامل نهشته‌های مخروط افکنه‌ای آبرفتی جوان کنگلومرای است. سنگ‌شناسی این سازند شامل کنگلومراهای همگن، متشکل از شن و آواری‌هایی به‌اندازه ریگ به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای است که ماتریسی با اندازه لای و ماسه دارد. بخش عمده‌ای از شهر تهران از جمله محدوده پارک جنگلی چیتگر، بر روی سازند c واقع شده است [۲].

• سازند D (آبرفت‌های اخیر)

سازند D جوان‌ترین واحد چینه‌شناسی در منطقه تهران است که به شکل آبرفت‌های رسوبی و رودخانه‌ای در منطقه وجود دارد [۲].

۳-۳- زمین‌شناسی مسیر تونل

تحقیقات متعددی در ارتباط با زمین‌شناسی گستره تهران صورت گرفته است که می‌توان

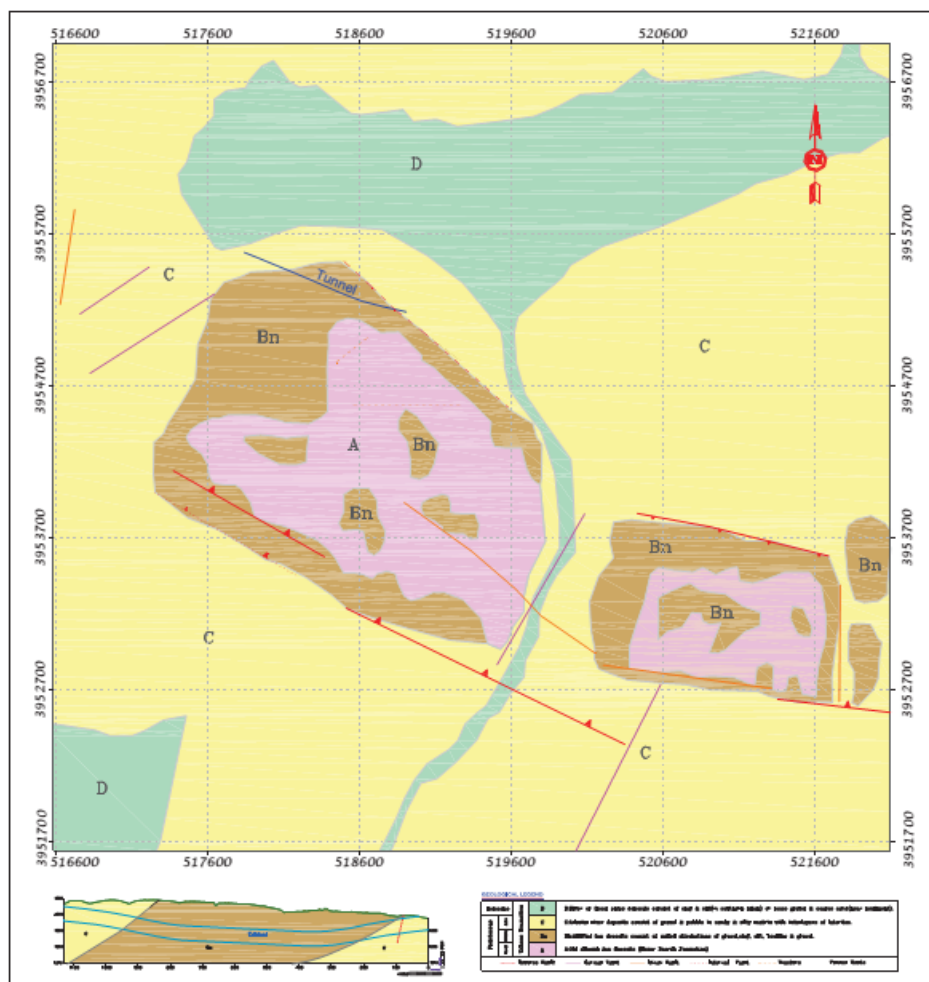
محققینی چون ریبین^۱ (۱۹۵۵-۱۹۶۶)، انگالسن^۲ (۱۹۶۸)، ویتافنزی^۳ (۱۹۶۹) و عباسی و فرید (۲۰۰۹) را به عنوان مهم ترین آن ها یادآور شد.

تونل حکیم از قسمت های شمالی پارک جنگلی چیتگر در منتهی الیه غرب تهران و با روند شرقی- غربی و به طول تقریبی یک کیلومتر عبور می کند. تپه های چیتگر از جمله ارتفاعات غربی تهران هستند که متشکل از رسوبات آبرفتی A و B بوده که به واسطه گسل چیتگر از دشت مجاور (آبرفت های C) جدا گشته اند. لذا علیرغم احاطه شدن تپه های چیتگر با سازند آبرفتی تهران (آبرفت های C) و با توجه به بررسی های انجام شده، این مسیر از واحد سازند آبرفتی ناهمگن شمال تهران (Bn) گذر می کند. بر اساس مطالعات انجام شده، ساختگاه تونل در نهشته های آبرفتی کواترنری تهران و در رسوبات درشت دانه شن، ماسه و قلوه سنگ تپه های چیتگر قرار گرفته است. رسوبات آبرفتی B این تپه ها، توسط گسل چیتگر از آبرفت های C دشت مجاور، جدا می شوند (شکل ۲-۳). همچنین شکل (۲-۴) میزان درصد واحدهای دربرگیرنده مسیر پروژه شامل سری آبرفتی سازند شمال تهران (Bn) و واحد آبرفتی C در مسیر پروژه را نشان می دهد [۲].

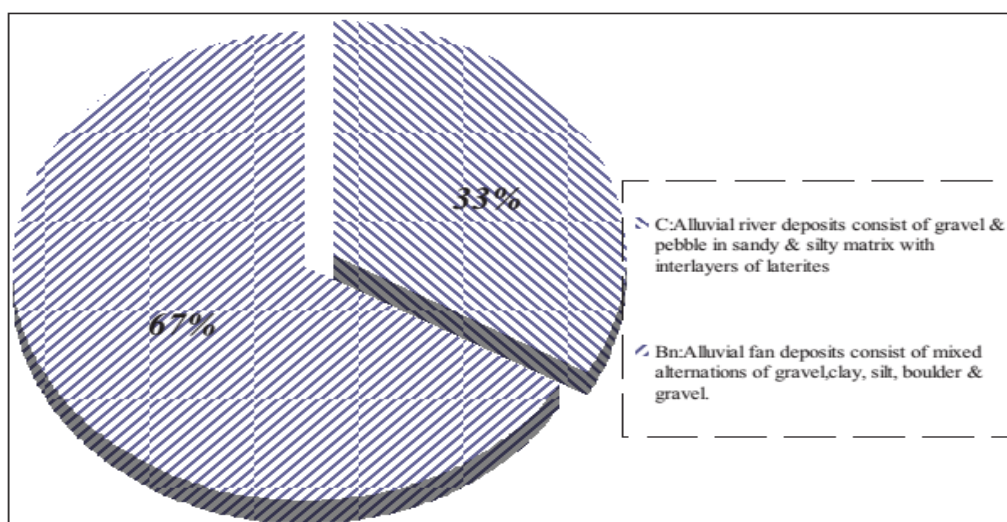
¹ Ribben

² Engelines

³ Vita Fancy



شکل ۳-۳- نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه [۲].



شکل ۳-۴- درصد تقریبی واحدهای آبرفتی مختلف دربرگیرنده مسیر تونل [۲].

۳-۴- شرایط آب‌های زیرزمینی

محل اجرای تونل چیتگر در گستره غربی آبخوان شهر تهران است. طبق آمار به‌دست‌آمده، چاه‌های نسبتاً زیادی در محدوده مطالعات هیدروژئولوژی پروژه قرار دارد. موقعیت چاه‌ها در محدوده پروژه پراکنده است. در منطقه جنوبی مسیر تونل، تعداد چاه‌های بهره‌برداری کم است. علت این مسئله به دلیل ضخامت کمتر آبرفت به علت بالاآمدگی سنگ کف است. دبی چاه‌های محدوده پارک چیتگر به دلیل ضخامت کم آبرفت‌های منطقه، کم است. موقعیت قنوات احتمالی در منطقه مشخص نیست و نیازمند عملیات ژئوفیزیکی مناسب است [۲].

۳-۴-۱- تراز و عمق آب‌های زیرزمینی

بررسی داده‌های پیزومترهای آب منطقه‌ای تهران در بازه سال‌های آبی ۸۱-۸۲ الی ۸۸-۸۹ صورت گرفته است. برای قضاوت در مورد روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در محدوده مطالعات از هیدروگراف معرف محدوده که رفتار سطح آب زیرزمینی را در کل منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد، استفاده شده است. با توجه به هیدروگراف معرف منطقه، به‌طور کلی در هر سال، حداکثر تراز در انتهای زمستان و ابتدای بهار بوده و حداقل آن در انتهای تابستان و ابتدای پاییز رخ می‌دهد. در طی سال‌های آبی ۸۱-۸۲ الی ۸۴-۸۵ سطح آب زیرزمینی روند صعودی داشته است. از سال آبی ۸۴-۸۵ تا سال آبی ۸۸-۸۹ سطح آب زیرزمینی همواره روند نزولی داشته است. این افت می‌تواند به علت افزایش برداشت از آب زیرزمینی در سال‌های اخیر و کاهش بارندگی باشد. به‌طور کلی تراز محور تونل در محدوده پروژه، بالاتر از تراز آب‌های زیرزمینی منطقه است [۲].

بر اساس نتایج مطالعات هیدروژئولوژی و بررسی وضعیت پیزومترها، مسیر حفاری تونل چیتگر بالاتر از سطح ایستابی قرار گرفته و در نتیجه حفاری در محیطی غیراشباع صورت خواهد گرفت. هرچند ممکن است ورود آب‌های منطقه غیراشباع و فاضلاب و پساب آبیاری فضای سبز و یا قنوات،

مشکلاتی را برای مبحث آب‌های زیرزمینی ایجاد نماید. درواقع با توجه به آنکه منطقه در محدوده فضای سبز قرار دارد، عواملی همچون بارندگی، آبیاری، تغییرات دبی چاه‌ها و... می‌تواند منجر به تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی و همچنین افزایش رطوبت و جریان آب، در منطقه غیراشباع گردد[۲].

۳-۵- کاوش‌های صحرایی و آزمون‌های آزمایشگاهی

در این بخش برای تکمیل اطلاعات ژئوتکنیکی موردنیاز، شش حلقه چاهک دستی به عمق ۱۵ الی ۳۰ متر و یک حلقه گمانه ماشینی به عمق ۳۰ متر، حفر شده است. به‌منظور تعیین پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک در حین حفر چاهک‌های دستی، علاوه بر اخذ نمونه دست‌خورده، آزمایش‌های دانسیته صحرایی، بارگذاری صفحه‌ای و برش برجا در اعماق مختلف و در هنگام حفاری گمانه ماشینی علاوه بر نمونه‌برداری، آزمایش‌های نفوذ استاندارد (SPT)، دان هول، پرسیومتر و لوفران نیز انجام گردیده است[۲].

همچنین آزمایش‌هایی شامل: آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری، آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک و حدود اتربرگ، آزمایش برش مستقیم، آزمایش شیمیایی تعیین درصد سولفات، میزان کلراید و PH، آزمایش تراکم و CBR، به‌منظور به دست آوردن پارامترهای مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی لایه‌های مختلف خاک در ساختگاه موردنظر، انجام گرفته است[۲].



شکل ۳-۵- چاهک دستی حفاری شده [۲].



شکل ۳-۶- حفاری گمانه توسط ماشین DBH [۲].

۳-۵-۱- سطح آب

در هیچ یک از چاهک های دستی و گمانه های ماشینی در طول مدت عملیات حفاری به سطح آب زیرزمینی برخورد نشده است. به طور کلی تراز عمق آب زیرزمینی در عمق بالای ۸۰ متری تخمین زده می شود. بدین ترتیب سطح آب زیرزمینی قطعاً پایین تر از تراز کف پروژه قرار دارد. عدم برخورد به آب

زیرزمینی و درصد رطوبت نسبتاً پایین واحدهای خاکی در این پروژه، سبب شده است که لایه‌های خاکی موردنظر، ویژگی‌های ژئوتکنیکی مطلوب‌تری داشته باشند [۲].

۳-۵-۲- تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

با توجه به نتایج حاصل از بررسی لاگ گمانه‌ها و چاهک‌ها در دو مرحله فعلی و قبلی مطالعات و همچنین با توجه به نتایج آزمایشگاهی انجام‌شده و مشاهدات صحرایی می‌توان دو واحد خاکی^۱ را در مسیر تونل شناسایی و تفکیک نمود. این دو واحد خاکی عبارت‌اند از [۲]:

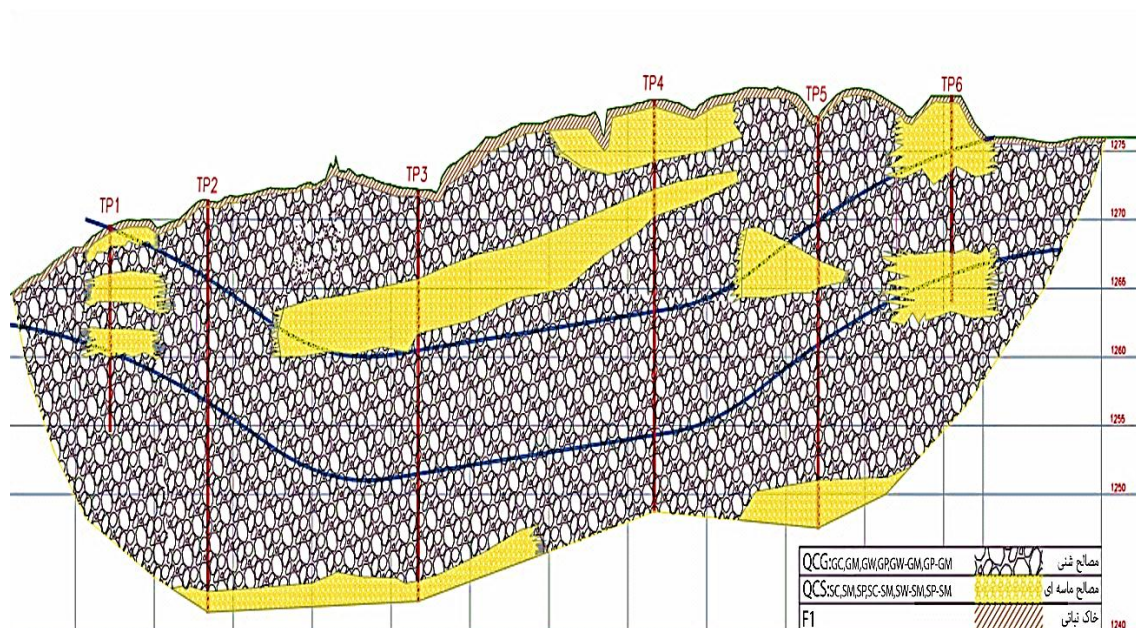
(۱) **واحد QCG**: این واحد عمدتاً از ذرات در حد شن تشکیل‌شده و مطابق با طبقه‌بندی متحد^۲ (USCS) در گروه خاک‌های GC, GM, GW, GP, GW-GM, GP-GM قرار می‌گیرد. بخش ریزدانه این واحد خاکی معمولاً کمتر از ۳۲ درصد است.

(۲) **واحد QCS**: این واحد عمدتاً از ذرات در حد ماسه تشکیل‌شده و مطابق با طبقه‌بندی متحد (USCS) در گروه خاک‌های SC, SM, SP, SC-SM, SW-SM, SP-SM قرار می‌گیرد. بخش ریزدانه این واحد خاکی معمولاً بین ۵ تا ۴۶ درصد متغیر است.

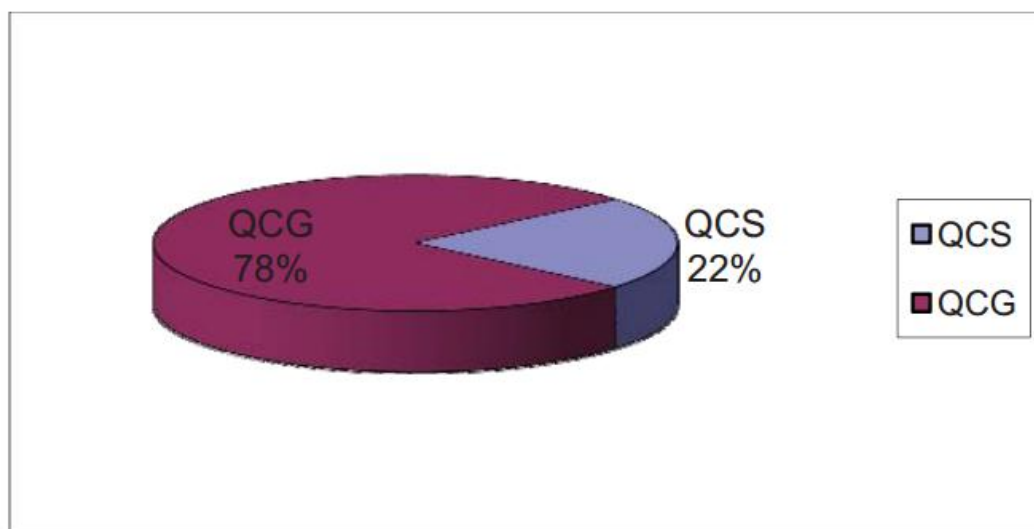
در شکل (۷-۳) برش زمین‌شناسی مسیر تونل ارائه شده است. همچنین در شکل‌های (۸-۳) وضعیت لایه‌های زیرسطحی بر اساس توزیع فراوانی واحدهای زمین‌شناسی ارائه شده است [۲].

¹ Engineering soil unit

² Unified Soil Classification System



شکل ۳-۷- مقطع طولی زمین شناسی مسیر تونل [۲].



شکل ۳-۸- توزیع فراوانی کلاس های مختلف خاک طبق واحدهای کلی در مسیر تونل [۲].

۳-۶- پارامترهای ژئوتکنیکی پروژه تونل حکیم

بر اساس مطالعات انجام شده، شناسایی لایه های مختلف از طریق آزمایش های صحرایی و آزمایشگاهی، تشریح لایه بندی خاک و با توجه به لاگ چاهک های دستی و گمانه حفر شده، خاک محل مورد مطالعه به جز خاک نباتی فوقانی به ضخامت حدود ۰/۵ متر،

عمدتاً شامل لایه‌هایی از جنس شن خوب و بد دانه‌بندی شده لای و رس دار، همراه با ماسه و در برخی از اعماق به صورت عدسی‌های میان لایه‌ای ماسه‌ای خوب و بد دانه‌بندی شده لای و رس دار، نیز مشاهده گردیده است. میزان تراکم لایه‌های درشت دانه خاک در محدوده گمانه‌ها و چاهک‌های دستی در مسیر، به صورت متراکم تا بسیار متراکم^۱ ارزیابی گردیده است. در نهایت با توجه به مطالعات انجام شده و اطلاعات کلی ارائه شده در بخش‌های قبلی، پارامترهای ژئوتکنیکی این پروژه در جدول ۳-۱ ارائه شده است [۲].

جدول ۳-۱- پارامترهای ژئوتکنیکی پروژه تونل حکیم [۲].

پارامتر	واحد	خاک QCG	خاک QCS
وزن مخصوص خشک	kN/m^3	۱۸/۴	۱۸/۳
وزن مخصوص اشباع	kN/m^3	۱۹/۶	۱۹/۷
نسبت پواسون	-	۰/۳۸	۰/۳۸
مدول الاستیسیته	kg/cm^2	۹۰۰	۸۰۰
چسبندگی	kg/cm^2	۰/۳۵	۰/۴
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۳۵	۳۰
ضریب فشار جانبی (k_0)	-	۰/۴۳	۰/۵

۳-۷- جمع‌بندی

بر اساس اطلاعات و نقشه‌های زمین‌شناسی شهر تهران، شرایط زمین‌شناختی این شهر شامل: سنگ‌بستر، سازند A (سازند هزار دره)، سازند B، سازند C (سازند آبرفتی تهران) و سازند D (آبرفت‌های اخیر) است. تونل حکیم از قسمت‌های شمالی پارک جنگلی در منتهی‌الیه غرب تهران و با روند شرقی-غربی و به طول تقریبی یک کیلومتر عبور می‌کند. تپه‌های چیتگر، از جمله ارتفاعات غربی تهران هستند که متشکل از رسوبات آبرفتی A و B بوده که به واسطه گسل چیتگر از دشت مجاور (آبرفت‌های C)

^۱ Dense to Very Dense

جدا گشته‌اند. لذا علیرغم احاطه شدن تپه‌های چیتگر با سازند آبرفتی تهران (آبرفت‌های C) و با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، این مسیر از واحد سازند آبرفتی ناهمگن شمال تهران (سازند B_n) گذر می‌کند. محل اجرای تونل چیتگر در گستره غربی آبخوان شهر تهران است و چاه‌های نسبتاً زیادی در محدوده مطالعات هیدروژئولوژی پروژه قرار دارد. دبی چاه‌های محدوده پارک چیتگر به دلیل ضخامت کم آبرفت‌های منطقه کم است. بر اساس نتایج مطالعات هیدروژئولوژی و بررسی وضعیت پی‌زومترهای آب منطقه‌ای تهران، تراز محور تونل در محدوده پروژه، بالاتر از تراز آب‌های زیرزمینی منطقه است. در نتیجه مسیر حفاری تونل چیتگر بالاتر از سطح ایستابی قرار گرفته است.

برای تکمیل اطلاعات ژئوتکنیکی مورد نیاز پروژه، حفر شش حلقه چاهک دستی انجام‌شده است. به منظور تعیین پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک در حین حفر چاهک‌های دستی، علاوه بر اخذ نمونه دست‌خورده، آزمایش‌های دانسیته صحرایی، بارگذاری صفحه‌ای و برش برجا در اعماق مختلف و در هنگام حفاری گمانه ماشینی علاوه بر نمونه‌برداری، آزمایش‌های نفوذ استاندارد (SPT)، دان هول، پرس‌یومتر و لوفران نیز انجام گردید. همچنین آزمایش‌هایی شامل: آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری، آزمایش تعیین درصد رطوبت خاک و حدود ات‌برگ، آزمایش برش مستقیم، آزمایش شیمیایی تعیین درصد سولفات، میزان کلراید و PH، آزمایش تراکم و CBR، به منظور به دست آوردن پارامترهای مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی لایه‌های مختلف خاک در ساختگاه مورد نظر انجام گرفته است.

با توجه به نتایج حاصل از بررسی لاگ گمانه‌ها و چاهک‌ها، همچنین با توجه به نتایج آزمایشگاهی انجام‌شده و مشاهدات صحرایی می‌توان دو واحد خاکی QCS و QCG را در مسیر تونل شناسایی و تفکیک نمود. همچنین بر اساس مطالعات انجام‌شده، شناسایی لایه‌های مختلف از طریق آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی، تشریح لایه‌بندی خاک و با توجه به لاگ چاهک‌های دستی و گمانه حفرشده،

پارامترهای ژئوتکنیکی پروژه حکیم به دست می‌آید که در جدول ۳-۱۱ ارائه شده است.

فصل چهارم:

مدل سازی عددی

و

تحلیل پایداری تونل حکیم

۴-۱- مقدمه

همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد، بزرگراه رسالت یکی از مهم ترین مسیرهای شبکه بزرگراهی شهر تهران، با امتداد شرقی- غربی محسوب می شود که در محدوده منطقه ۲۲، حدفاصل بزرگراه آزادگان تا تقاطع ایران خودرو، از جنوب دریاچه چیتگر عبور نموده و با گذر از اراضی پارک جنگلی چیتگر، به تقاطع ایران خودرو متصل می شود. در ادامه این فصل، به مدل سازی، بررسی سیستم نگهداری و تحلیل پایداری این تونل، پرداخته خواهد شد. با توجه به آنچه تاکنون بیان شده است، روش حفاری تونل حکیم با استفاده از روش تونل سازی NATM است. در این فصل با در نظر گرفتن این مطلب و استفاده از داده های مختلف اخذ شده از مجریان تونل، به طراحی و بررسی سیستم نگهداری و سپس تحلیل پایداری تونل پرداخته شده است.

۴-۲- روش های طراحی و تحلیل فضاهای زیرزمینی

تا دهه ۶۰ میلادی، فرآیند تحلیل پایداری و طراحی فضاهای زیرزمینی بر یک سری اصول تجربی استوار بود که حاصل کار، به صورت آیین نامه هایی تنظیم گردید. به تدریج با پیشرفت روزافزون فناوری رایانه ای و علوم مهندسی، همچون مکانیک محیط های پیوسته و ناپیوسته، روش های تحلیلی و تئوریک به سرعت رونق یافتند. مهم ترین بخش طراحی سازه های زیرزمینی آن است که با توجه به ویژگی های فضای زیرزمینی مورد نظر، روش مناسب تحلیل پایداری به کار گرفته شود. در چند دهه اخیر، محققین بسیاری بر روی گسترش روش های مختلف تحلیل پایداری مطالعه نموده اند و امروزه روش های تحلیلی مختلفی ارائه شده است. روش های موجود برای تحلیل پایداری و طراحی فضاهای زیرزمینی را می توان به سه گروه عمده تقسیم کرد [۷]:

۱. روش های تجربی

در روش های تجربی که بر اساس تجزیه و تحلیل آماری پایداری فضاهای زیرزمینی، در نقاط

مختلف دنیا بنا نهاده شده‌اند، طراحی تونل بر این مبناست که فضای زیرزمینی بایستی این قابلیت را دارا باشد تا وزن سربار خود را تحمل کند. از آنجاکه این روش‌ها نقش بسیاری از پارامترهای مؤثر در رفتار فضای زیرزمینی را در نظر نمی‌گیرند، در نتیجه دارای دقت کافی نبوده و امروزه کمتر به کار می‌روند. هرچند برای طراحی اولیه بسیاری از سازه‌های زیرزمینی و به‌عنوان اخذ دید کلی و سرانگشتی طراحی، می‌توان از آن‌ها بهره برد. از بین این روش‌ها می‌توان به روش ترزاقی، روش RMR، روش Q (برای محیط‌های سنگی) و سایر روش‌ها اشاره نمود [7].

۲. روش‌های مشاهده‌ای

در این گروه از روش‌ها، طراحی سیستم نگهداری بر اساس ثبت و تفسیر اطلاعات حاصل از رفتارنگاری و ابزار دقیق در حین اجرای فضای زیرزمینی صورت می‌گیرد. بدین معنی که با کمک رفتارسنجی هم‌زمان با پیشروی و حفر تونل، واکنش زمین در برابر حفاری، اندازه‌گیری شده و پس از تحلیل برگشتی و بررسی نتایج آن، سیستم نگه‌دارنده مناسب جهت وضعیت جدید ارائه می‌شود. از معروف‌ترین روش‌های مشاهده‌ای، می‌توان به روش NATM اشاره نمود [7].

۳. روش‌های تحلیلی

در روش‌های تحلیلی، طراحی سیستم نگهداری بر اساس فرمول‌بندی و کاربرد بعضی از مدل‌های تئوریک انجام می‌گیرد. این روش‌ها شامل مدل‌های نظری، فیزیکی و ریاضی نظیر راه‌حل فرم بسته^۱ و روش‌های عددی^۲ می‌باشند. در این روش‌ها بار وارد بر پوشش تونل با روش تعادل حدی محاسبه می‌شود. درواقع اساس روش تعادل حدی این است که ابتدا یک مکانیسم گسیختگی برای خاک اطراف فضای زیرزمینی فرض می‌شود، سپس با نوشتن معادلات تعادل، بار وارد بر پوشش تونل محاسبه می‌گردد. با ورود رایانه به عرصه محاسبات مهندسی، دامنه‌ای جدید از روش‌های تحلیلی عددی برای

^۱ Closed Form

^۲ Numerical Modelling

تحلیل پایداری تونل ها توسعه پیدا کرد. در روش های عددی به تحلیل وضعیت به وجود آمده ناشی از حفاری پرداخته می شود، به صورتی که پوشش تونل به همراه محیط اطراف آن، مدل شده و اثرات نحوه اجرا و اندرکنش خاک و پوشش، لحاظ و بررسی می گردد. انواع روش های عددی را می توان به طور کلی به روش های مخصوص محیط های پیوسته، شامل روش تفاضل محدود (FDM)، روش المان محدود (FEM) و روش المان مرزی (BEM) و روش های مخصوص محیط های درزه دار و ناپیوسته، نظیر روش اجزاء مجزا (DEM) و روش تغییر شکل ناپیوسته (DDA) تقسیم بندی کرد [۷].

۴-۳- انتخاب و معرفی نرم افزار

با استفاده از آنالیزهای انجام شده به وسیله یک نرم افزار می توان مقادیر نیروی محوری و لنگر خمشی پوشش تونل را محاسبه و از این مقادیر برای طراحی آن تونل استفاده نمود. اما نکته حائز اهمیتی که باید مورد توجه قرار گیرد آن است که با وجود این تفاوت ها و نقاط ضعف و قوت هر یک از این نرم افزارها، تغییرات این نیروها و تغییر مکان ها با تغییر نوع نرم افزار موجود چگونه است؟ آیا استفاده از یک نرم افزار خاص می تواند پاسخگوی حل یک مسئله باشد یا لازم است تحلیل ها با استفاده از نرم افزارهای مختلف انجام گیرد؟

نظر به مطالب بیان شده، از بین نرم افزارهای زیرشاخه روش های عددی مورد استفاده برای محیط های پیوسته (خاکی)، دو نرم افزار FLAC و PLAXIS را می توان از معروف ترین آن ها دانست. شایان ذکر است که تحلیل های نرم افزار FLAC با استفاده از روش تفاضل محدود (FDM) انجام می شود، در حالی که نرم افزار PLAXIS از روش المان محدود (FEM) بهره می برد. همچنین مش بندی در برنامه PLAXIS به صورت المان های مثلثی ۱۵ گره ای در نظر گرفته می شود ولی در نرم افزار FLAC مش بندی از نوع مربعی شکل است. لذا اختلاف در نتایج حاصل از دو برنامه اجتناب ناپذیر است و سبب می شود که نیروها و تغییر شکل های پوشش تونل تا حدی تغییر نمایند.

بدون تردید هر نرم افزار، مزایا و معایب خاص خود را دارد. به عنوان مثال نرم افزار PLAXIS دارای محیط گرافیکی بهتری نسبت به نرم افزار FLAC است، به عبارت دیگر، کاربر پسند تر^۱ است. این در حالی که است که در FLAC غالباً باید کد نویسی انجام گیرد. در مقابل، در FLAC جزئیات مورد نظر را می توان به شکل دلخواه تری وارد نمود. جهت حفاری چند مرحله ای به عنوان مثال در روش NATM، با نرم افزار PLAXIS 3D Tunnel، طراحی جبهه کارها و نگهداری پس از اجرا را می توان به شکل بهتر و ساده تری انجام داد. به طور خلاصه می توان گفت، مزیت اصلی نرم افزار PLAXIS، یادگیری سریع تر و کاربری ساده تر در مقایسه با نرم افزار FLAC است. این در حالی است که نتایج خروجی دو نرم افزار تقریباً باهم مطابقت دارند. نتایج حاصل از مدل سازی هایی که با استفاده از نرم افزارهای FLAC و PLAXIS انجام شده است، نشان می دهد نیروها و لنگرها در تحلیل های حاصل از نرم افزار FLAC مقادیر بیشتری نسبت به تحلیل های حاصل از نرم افزار PLAXIS داشته ولی تغییر مکان های حاصل از این نرم افزار کمتر از تحلیل های PLAXIS است. اما در هر صورت روند تغییرات نیروها و تغییر مکان های پوشش تونل و محیط، نسبتاً بر هم منطبق است [۲۵].

از نکات دیگر (خارج از مباحث فنی) در انتخاب هر نرم افزار، می توان به: در دسترس بودن نسخه اصلی آن نرم افزار، یا خطای کمتر نسخه کپی شده، در دسترس بودن منابع و مراجع یادگیری، توانایی یادگیری آن در زمان مشخص و قابلیت سیستم رایانه ای که نرم افزار بر روی آن نصب می شود نیز اشاره نمود. در نهایت نمی توان کفه ترازو را به نفع نرم افزاری سنگین تر دانست. در نتیجه بهترین روش، استفاده از هر دو نرم افزار برای یک پروژه و مقایسه موردی نتایج آن پروژه است که البته زمان بر و پرهزینه خواهد بود. با جمع بندی شرایط ذکر شده، در مطالعه پیش رو، نویسنده بر آن شده است تا از نرم افزار

¹ User Friendly

PLAXIS 3D Tunnel v1.2 استفاده نماید.

نرم افزار PLAXIS ، نرم افزاری المان محدود پیشرفته است که به منظور تحلیل پایداری در کارهای عمرانی و خصوصاً در زمینه ژئوتکنیک استفاده می گردد. معمولاً در مسائل مهم ژئوتکنیک، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان خاکها، بسته به هدف موردنظر لازم است. با این نرم افزار می توان خاکبرداری و خاکریزی مرحله ای با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المان های مثلثی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی مدل سازی نمود. اولین ویرایش این نرم افزار به منظور آنالیز سدهای خاکی احداث شده بر روی خاک های نرم در قسمت های کم ارتفاع و پست کشور هلند و به سفارش مدیریت منابع آب آن کشور در دانشگاه صنعتی Delft در سال ۱۹۸۷ تهیه و سپس در سال ۱۹۹۳ قابلیت های آن گسترش داده شده که توسط اتحادیه CUR^۱ نیز مورد تأیید و پشتیبانی قرار گرفته است [۲۶].

در این نرم افزار، مدل های رفتاری موهر-کلمب، مدل سخت شونده گی هذلولی، مدل نرم شونده گی (مدل Cam-Clay) و مدل نرم شونده گی خزشی قابل به کارگیری است. همچنین با این نرم افزار می توان فرایند ساخت و حفاری را توسط فعال کردن یا غیرفعال کردن المان ها در مرحله محاسبات، مدل سازی کرد. نمونه ای از کاربرد این قابلیت، انجام آنالیز لایه به لایه در پایداری شیب ها ، سدها و تونل ها است [۲۷].

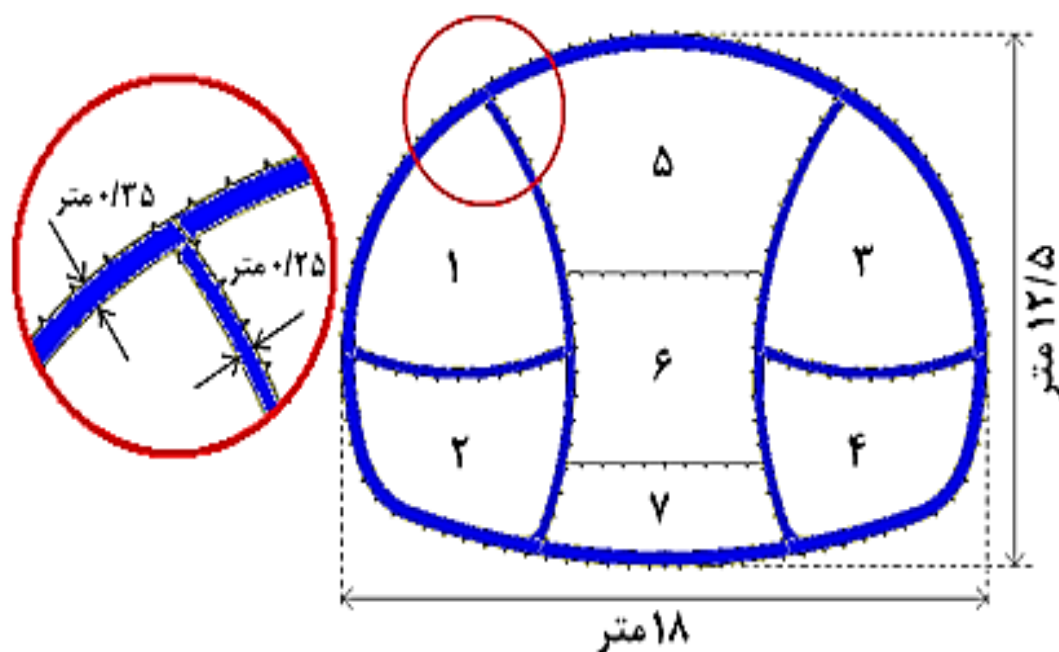
در سال های اخیر به دلیل گسترش گرایش های مختلف مهندسی عمران و همچنین کاربرد نرم افزار PLAXIS در شرایط و عرصه های مختلف، شرکت سازنده بر آن شد تا برای هرکدام از این شرایط مختلف (سدسازی، پی سازی سازه ها، تونل های زیرزمینی و...) نرم افزار مخصوص به آن ها را

¹ Center for Civil Engineering Research and Codes

طراحی کرده و امکان استفاده بهتر و ساده تر را در اختیار کاربران (مهندسان) قرار دهد. از این رو نرم افزار PLAXIS 3D Tunnel به عنوان یکی نرم افزارهای خانواده PLAXIS به بازار عرضه شده است. این نرم افزار را می توان به طور اختصاصی جهت شبیه سازی، طراحی، بررسی و تحلیل فضاهای زیرزمینی بالأخص تونل ها، به کاربرد.

۴-۴- طراحی سیستم نگهداری مرکب با استفاده از مقطع معادل

سیستم مورد استفاده برای نگهداری تونل در پروژه حکیم شامل لیس گریدر و شاتکریت مسلح به مش است. همچنین، پوشش تونل (سیستم نگهداری) در این مدل سازی از دو قسمت تشکیل شده است: نگهداری دیواره های اصلی کناری و نگهداری دیواره های موقت میانی.



شکل ۴-۱- تصویر نمادین از سیستم نگهداری استفاده شده در تونل حکیم [۱۹].

مشخصات لتیس گریدر و شاتکریت مورد استفاده در پروژه تونل حکیم به شرح جداول ذیل است:

جدول ۴-۱- مشخصات لتیس مثلثی با ضخامت شاتکریت ۳۵cm برای دیواره اصلی [۲۸].

پارامتر	واحد	مقدار
ارتفاع	mm	۲۵۰
فاصله قرارگیری	m	۱
تنش تسلیم	kg/cm ²	۴۰۰۰
نوع میلگرد	۲φ۳۲+۱φ۳۲	
مدول الاستیسیته	GPa	۲۰۰
ضریب پواسون	-	۰/۲
وزن مخصوص	kg/cm ³	۷۸۵۰

جدول ۴-۲- مشخصات لتیس مثلثی با ضخامت شاتکریت ۲۵cm برای دیواره موقت گالری ها [۲۸].

پارامتر	واحد	مقدار
ارتفاع	mm	۱۵۰
فاصله قرارگیری	m	۱
تنش تسلیم	kg/cm ²	۴۰۰۰
نوع میلگرد	۲φ۲۵+۱φ۳۲	
مدول الاستیسیته	GPa	۲۰۰
ضریب پواسون	-	۰/۲
وزن مخصوص	kg/cm ³	۷۸۵۰

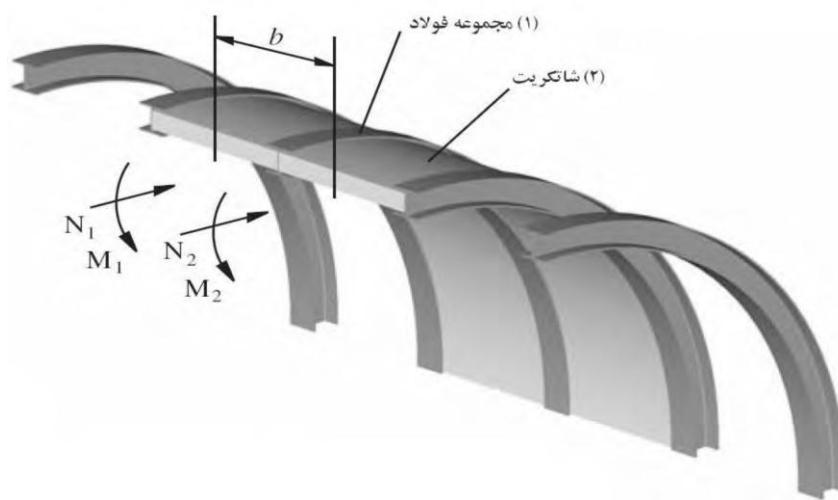
جدول ۴-۳- خصوصیات شاتکریت با ضخامت ۳۵cm برای دیواره اصلی [۲۸].

پارامتر	واحد	مقدار
مدول الاستیک	kg/cm ²	۲۳۸۷۵۱/۹۶
وزن حجمی	kN/m	۸/۴
سختی محوری	kN/m	۸ /۳۵ e ^۶
سختی خمشی	kN-m ² /m	۴ /۲ e ^۴
وزن مخصوص بتن مسلح	Kg/cm ³	۲۵۰۰
ممان اینرسی	m ⁴	۳ /۵ e ^{-۳}
ضریب پواسون	-	۰/۱۵

جدول ۴-۴- خصوصیات شاتکریت با ضخامت ۲۵cm برای دیواره موقت گالری ها [۲۸].

پارامتر	واحد	مقدار
مدول الاستیک	kg/cm ²	۲۳۸۷۵۱/۹۶
وزن حجمی	kN/m	۶
سختی محوری	kN/m	۵ / ۹۶ e ^۶
سختی خمشی	kN-m ² /m	۱۵ / ۵ e ^۳
وزن مخصوص بتن مسلح	kg/cm ³	۲۵۰۰
ممان اینرسی	m ⁴	۱ / ۳ e ^{-۳}
ضریب پواسون		۰/۱۵

شاتکریت به عنوان نگهداری موقت استاندارد در طراحی و ساخت تونل استفاده می شود. اگر شدت بارهایی که از زمین به نگهداری موقت منتقل می شود، به اندازه ای بزرگ باشد که مانع از استفاده شاتکریت به تنهایی شود، مجموعه پروفیل های فولادی به طور معمول همراه با شاتکریت استفاده می گردند [۲۹]. با توجه به اینکه در نرم افزار Plaxis 3D Tunnel از گزینه plate و با استفاده از مقادیر سختی محوری، سختی خمشی و ضخامت و مدول الاستیک معادل، سیستم نگهداری اعمال می شود، لذا ابتدا باید این مقادیر با استفاده از روابط معادل سازی محاسبه گردند. درواقع باید به این سؤال پاسخ داده شود که: باری که از زمین به لایه نگه دارنده موقت مرکب منتقل شده و باعث ایجاد لنگر خمشی و نیروی محوری در هر واحد طول از لایه نگه دارنده می شود، به چه میزان توسط شاتکریت تحمل شده و به چه میزان توسط مجموعه پروفیل های فولادی تحمل می شود؟ به عبارت دیگر این سؤال را این طور هم می توان بیان نمود: مجموع بارهای تحمل شده توسط شاتکریت و پروفیل های فولادی چقدر است؟



شکل ۴-۲- توزیع نیروی محوری و لنگر خمشی در مجموعه شاتکریت و فولاد- برگرفته از [۲۹] با اصلاح.

پاسخ به این سؤال توسط معادلات ارائه شده توسط تورس و دایدریچ^۱ برای حل مقاطع مرکب (کامپوزیتی)^۲ مبتنی بر روشی است که معمولاً به عنوان رویکرد مقطع معادل^۳ نامیده می شود. این فن به خوبی در آنالیزهای مهندسی سازه شناخته شده است، که در آن به طور معمول از رفتار تیرهای الاستیک مستقیم استفاده شده است. معادلات برای استفاده در رویکرد مقطع معادل بر اساس تئوری پوسته ها و مطابقت با رفتار تیرهای منحنی به دست آمده که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

رفتار لایه نگه دارنده تونل که مقطع متشکل از دو ماده مختلف است (شاتکریت و مجموعه پروفیل های فولادی)، بر اساس تئوری ارتجاعی پوسته ها و رفتار تیرهای منحنی در ادامه بررسی خواهد شد. شکل ۴-۲ نشان دهنده ترکیب دو ماده مختلف برای استفاده از این روش است. این مقطع نشان دهنده لایه نگه دارنده به عرض b ، شامل n واحد از ماده ۱ (مجموعه پروفیل های فولادی) و n واحد از ماده ۲ (شاتکریت) است. لازم به ذکر است که n واحد از هر یک از مواد در امتداد عرض b وجود دارد. این بیان هم ارز این است که هر

¹ Diederichs & Torres

² Composite supports

³ equivalent section

یک از واحدها با فاصله s از یکدیگر قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر رابطه زیر برقرار است [۲۹]:

$$s = b/n \quad (۱-۴)$$

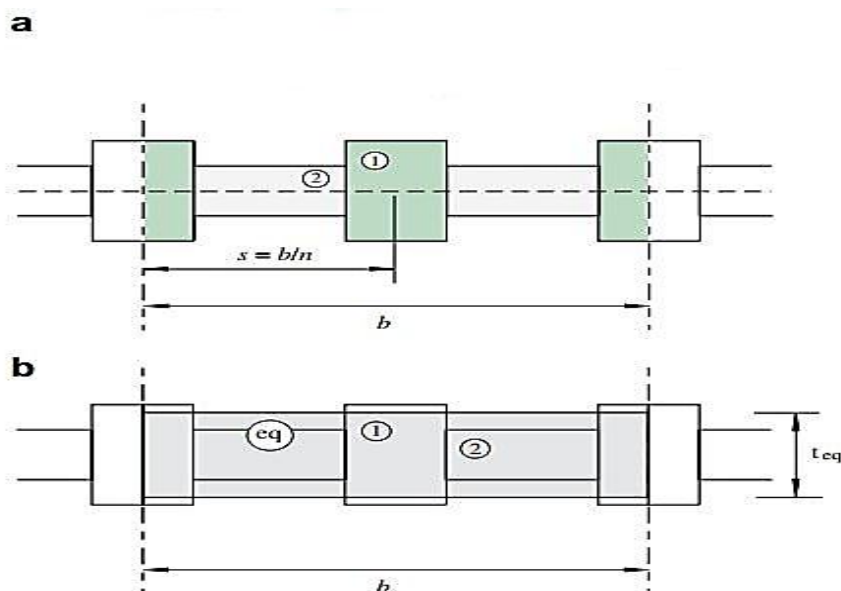
هر یک از واحدهای ۱ و ۲ با تعاریفی برای ضرایب فشار به ترتیب D_1 و D_2 و ضرایب انعطاف پذیری به ترتیب K_1 و K_2 نشان داده شده‌اند. در به دست آوردن این روابط از فرض تقارن نسبت به محور افقی مشترک (محور خنثی مقطع) استفاده گردیده است [۲۹]. (شکل ۳-۴)

$$D = \frac{E.A}{1-\nu^2} \quad (۲-۴)$$

$$K = \frac{E.I}{1-\nu^2} \quad (۳-۴)$$

که داریم:

MN	D : ضریب تراکم پذیری
MNm ²	K : ضریب انعطاف پذیری
MPa	E : مدول الاستیسیته
m ²	A : سطح مقطع
-	ν : ضریب پواسون
m ⁴	I : ممان اینرسی



شکل ۳-۴- (a) نمایش شماتیک یک مقطع از لایه نگه دارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲

(b) مقطع معادل برای لایه مرکب (کامپوزیتی) [۲۹].

همچنین برای محاسبه سطح مقطع و ممان اینرسی شاتکریت داریم:

$$A_C = \frac{1}{n} \cdot b \cdot T_C - A_s \quad (4-4)$$

$$I_C = \frac{1}{n} \cdot \frac{b \cdot T_C^3}{12} - I_s \quad (5-4)$$

که داریم:

n: تعداد لتیس در واحد عرض

b: عرض مقطع معادل m

A_C : سطح مقطع شاتکریت m²

T_C : ضخامت شاتکریت m

در ادامه با استفاده از داده های مصالح مورد استفاده، جداول طراحی استاندارد لتیس گریدر^۱ و روابط بیان شده قبلی، پارامترهای مقطع معادل به شرح زیر انتخاب و محاسبه شده اند [۳۰]، [۳۱]:

جدول ۴-۵- خصوصیات هندسی مقطع معادل.

خصوصیات هندسی	عرض مقطع معادل	فاصله بین لتیس گریدرها	تعداد لتیس در واحد عرض
نماد	b	s	n
واحد	متر	متر	-
مقدار	۱	۱	۱

جدول ۴-۶- خصوصیات لتیس گریدر مربوط به نگهداری دیواره های موقت میانی.

ارتفاع لتیس	سطح مقطع لتیس	ممان اینرسی	مدول یانگ	ضریب پواسون	
t _s	A _s	I _s	E _s	ν	نماد
m	m ²	m ⁴	MPa	–	واحد
۰/۱۴۹	۰/۰۰۱۵۶۴	۵ /۸۹ e ^{-۸}	۲۰۰۰۰۰	۰/۲	مقدار

^۱ Pantex , Lattice Girders

جدول ۴-۷- خصوصیات شاتکریت مربوط به نگهداری دیواره های موقت میانی.

ضخامت	مدول یانگ	ضریب پواسون	سطح مقطع شاتکریت	ممان اینرسی	
نماد	E_c	ν	A_c	I_c	
واحد	MPa	-	m^2	m^4	
مقدار	۲۳۴۱۳/۹۴	۰/۱۵	۰/۲۴۸۴۳۶	۰/۰۰۱۳۰۲۰۲۴	۰/۲۵

جدول ۴-۸- خصوصیات لتیس گریدر مربوط به نگهداری دیواره های اصلی کناری.

ارتفاع لتیس	سطح مقطع لتیس	ممان اینرسی	مدول یانگ	ضریب پواسون	
نماد	t_s	A_s	I_s	E_s	ν
واحد	m	m^2	m^4	MPa	-
مقدار	۰/۱۶۱	۰/۰۰۲۴۳۲	$9/86 e^{-8}$	۲۰۰۰۰۰	۰/۲

جدول ۴-۹- خصوصیات شاتکریت مربوط به نگهداری دیواره های اصلی کناری.

ضخامت	مدول یانگ	ضریب پواسون	سطح مقطع شاتکریت	ممان اینرسی	
نماد	E_c	ν	A_c	I_c	
واحد	MPa	-	m^2	m^4	
مقدار	۲۳۴۱۳/۹۴	۰/۱۵	۰/۳۴۷۵۶۸	۰/۰۰۳۵۷۲۸	۰/۳۵

همچنین جهت محاسبه ضرایب مرتبط با مقطع معادل موردنظر، از روابط زیر استفاده می شود [۲۹]:

$$D_{eq} = n. (D_1 + D_2) \quad (۴-۶)$$

$$K_{eq} = n. (K_1 + K_2) \quad (۴-۷)$$

$$t_{eq} = \sqrt{12 \frac{(K_1 + K_2)}{(D_1 + D_2)}} \quad (۴-۸)$$

$$E_{eq} = \frac{n.(D_1 + D_2)}{b.t_{eq}} \quad (۴-۹)$$

که داریم:

MN	D_{eq} : ضریب تراکم پذیری معادل
MNm ²	K_{eq} : ضریب انعطاف پذیری معادل
m	t_{eq} : ضخامت نگهداری معادل (مرکب)
MPa	E_{eq} : مدول الاستیسیته نگهداری معادل (مرکب)
-	n: تعداد لتیس در واحد عرض
m	b: عرض مقطع معادل

درنهایت با استفاده از روابط ارائه شده توسط تورس، ضخامت و مدول الاستیک، ضرایب تراکم پذیری، انعطاف پذیری و نیز سختی محوری و سختی خمشی سیستم نگهداری معادل (مرکب)، مطابق جداول ۴-۱۰ و ۴-۱۱ به دست آمده است [۲۹].

جدول ۴-۱۰ پارامترهای سیستم نگهداری معادل مربوط به دیواره های موقت میانی.

ضخامت	مدول	ضریب	ضریب	سختی	سختی	
تیر	یانگ	تراکم پذیری	انعطاف پذیری	محوری	خمشی	
t_{eq}	E_{eq}	D_{eq}	K_{eq}	EA	EI	نماد
m	MPa	MN	MNm ²	MN/m	MNm ² /m	واحد
۰/۲۴	۲۵۶۹۹	۶۲۷۷	۳۱/۲	۶۲۷۷	۳۱/۲	مقدار

جدول ۴-۱۱ پارامترهای سیستم نگهداری معادل مربوط به دیواره های اصلی کناری.

ضخامت	مدول	ضریب	ضریب	سختی	سختی	
تیر	یانگ	تراکم پذیری	انعطاف پذیری	محوری	خمشی	
t_{eq}	E_{eq}	D_{eq}	K_{eq}	EA	EI	نماد
m	MPa	MN	MNm ²	MN/m	MN m ² /m	واحد
۰/۳۴	۲۵۸۹۸	۸۸۳۲	۸۵/۶	۸۸۳۲	۸۵/۶	مقدار

۴-۵- مدل‌سازی و تحلیل پایداری تونل

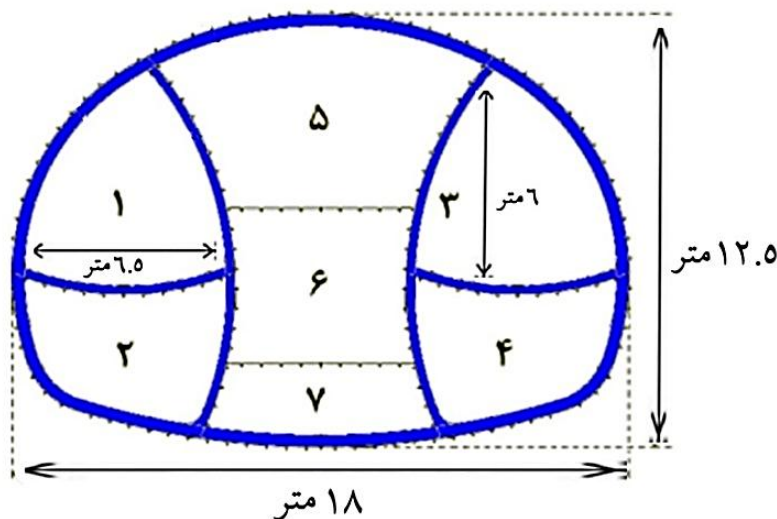
از آنجایی که در فضاهاى زیرزمینی، هرگونه ناپایداری، غیرقابل قبول بوده و همراه با هزینه‌های فراوان جانی، مالی، زیست‌محیطی و اتلاف زمان است، راه‌کارهای تخصیص داده شده برای مدل‌سازی، طراحی و نصب سیستم نگهدارنده تونل، باید کافی و گاهی حتی محافظه‌کارانه باشند. به طور کلی می‌توان گفت منظور از تحلیل پایداری یک فضای زیرزمینی، بکارگیری مجموعه تمهیدات و راه‌کارهایی است که بتوان بر اساس آن‌ها، فضای زیرزمینی مورد نظر را به‌صورت پایدار، اولاً احداث نمود و ثانیاً در زمان بهره‌برداری به شکل مناسب و پایدار استفاده کرد [۷].

در تحلیل عددی برای هر مسأله ژئوتکنیکی مراحل مشخصی وجود دارد که رعایت آن‌ها در تحلیل ضروری است. این مراحل در تمامی نرم‌افزارهایی که با روش‌های عددی در حل مسائل ژئوتکنیکی به کار گرفته می‌شوند، اصول مشترک و مشابهی دارند که عبارت‌اند از [۳۲]:

- تعریف هندسه پروژه
 - اعمال شرایط مرزی به مدل هندسی
 - مش بندی
 - ایجاد (حفر) سازه مورد نظر در مدل تعریف شده
 - حل مسأله
 - گرفتن داده‌های خروجی از نرم‌افزار
 - تجزیه و تحلیل نتایج
- نرم‌افزار PLAXIS 3D Tunnel نیز از این قاعده مستثنی نیست و باید جهت مدل‌سازی، روند کلی بیان شده را دنبال نمود.

۴-۵-۱- تعریف هندسه، اعمال شرایط مرزی و مش بندی مدل

پروژه حکیم به صورت دو تونل دوقلوی مجزای رفت و برگشت با سه خط عبور برای هر تونل، پیش بینی شده است. هر کدام از تونل ها طولی تقریباً برابر ۱ کیلومتر دارند. فاصله دو تونل از هم متغیر بوده و از فاصله ۱۰ متر تا ۱۸ متر با توجه به شرایط منطقه و طراحی انجام شده توسط طراحان تغییر می نماید. مقدار روباره تونل نیز از ۴ تا ۱۳ متر متغیر می باشد. در مدل ساخته شده در این تحقیق دو تونل با فاصله ۱۰ متر از هم، در عمق ۱۳ متری در نظر گرفته شده اند. مقطع تونل، به صورت نعل اسبی با عرض دهانه ۱۸ و ارتفاع ۱۲/۵ متر است. دهانه های کناری نیز عرض و ارتفاعی به ترتیب برابر ۶/۵ و ۶ متر دارند. سطح مقطع هر کدام از تونل ها برابر ۱۸۶ مترمربع می باشد.



شکل ۴-۴- مقطع عرضی تونل حکیم- برگرفته از [۴] با اصلاح.

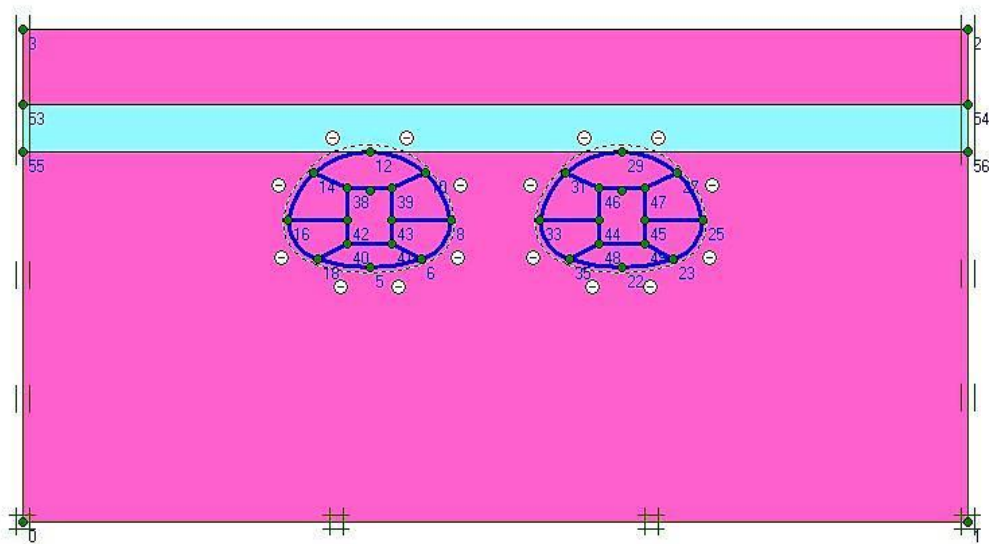
به منظور مدل سازی تونل حکیم در نرم افزار Plaxis 3D Tunnel، از یک شبکه اجزاء محدود سه بعدی و با استفاده از المان های ۱۵ گره ای، مدلی به عرض ۱۰.۵، ارتفاع ۸۰ و طول (بعد سوم) ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. به منظور اعمال شرایط مرزی، از مرزهای استاندارد استفاده شده است. بدین صورت که حرکت مرزهای کناری در جهت افقی محدود شده و فقط اجازه جابه جایی در جهت عمودی را دارند. همچنین مرز بالایی آزاد در نظر گرفته شده و مرز پایینی در همه جهات محدود

شده است [۳۳].

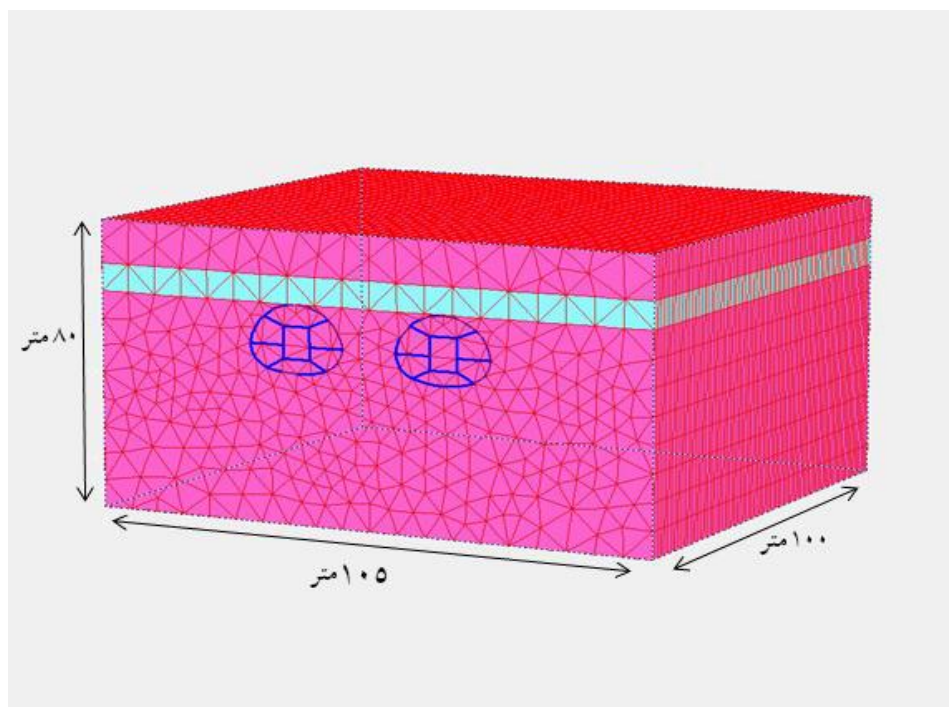
استفاده از مدل های دو و سه بعدی در نرم افزارهای مدل سازی، با توجه به ماهیت تنش ها و توزیع جابجایی ها در چند بعد، امری اجتناب ناپذیر است. امروزه به منظور تجزیه و تحلیل مناسب فرایند حفر تونل، استفاده از مدل سازی سه بعدی الزامی است. نرم افزارهای مدل سازی سه بعدی جهت حل مسائل پیچیده مهندسی و مدل سازی، به طور مداوم در حال توسعه و پیشرفت هستند. استفاده از مدل های سه بعدی مزیت های زیادی از جمله: بررسی و تحلیل توالی حفاری در تونل زنی، بررسی پایداری و نگهداری سینه کار تونل و طراحی سیستم نگهداری تونل دارند. هندسه دو و سه بعدی مدل مورد نظر در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.

در مدل سازی عددی انجام گرفته، مدل رفتاری انتخاب شده، مدل پلاستیک موهر-کولمب می باشد. این مدل رفتاری در مکانیک خاک و سنگ، برای حالت پلاستیک، مدل مرسومی می باشد و نمایان گر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می رسند. مدل موهر-کولمب در کل برای رفتارهای اولیه خاک به کار برده می شود. این مدل شامل پنج پارامتر مدول یانگ، نسبت پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک و زاویه اتساع می باشد [۳۴].

(الف)



(ب)



شکل ۴-۵- هندسه تعریف شده برای مدل سازی تونل حکیم. الف) دوی بعدی. ب) سه بعدی

در این نرم افزار تنش اولیه یا به صورت روش K_0 و یا به صورت روش بارگذاری ثقلی محاسبه می شود. روش K_0 زمانی استفاده می گردد که لایه بندی و نیز سطح تراز آب زیرزمینی تقریباً در راستای

افقی قرار داشته باشند [۳۵]. در مطالعه پیش رو به دلیل اینکه لایه بندی، تقریباً در راستای افقی است و نیز پایین بودن سطح آب زیرزمینی و در نتیجه لحاظ نکردن تأثیر آن، از روش K_0 استفاده شده است. مقدار K_0 (نسبت تنش افقی به عمودی) برای خاک، بر پایه زاویه اصطکاک داخلی و با استفاده از رابطه زیر بدست می آید [۳۶]:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (۱۰-۴)$$

همان گونه که در فصول قبل بیان شد، مشخصات و ویژگی های ژئوتکنیکی لایه های خاکی مسیر پروژه به شرح جدول ۴-۱۲ می باشد.

جدول ۴-۱۲- پارمترهای ژئوتکنیکی لایه های خاکی مسیر تونل [۲].

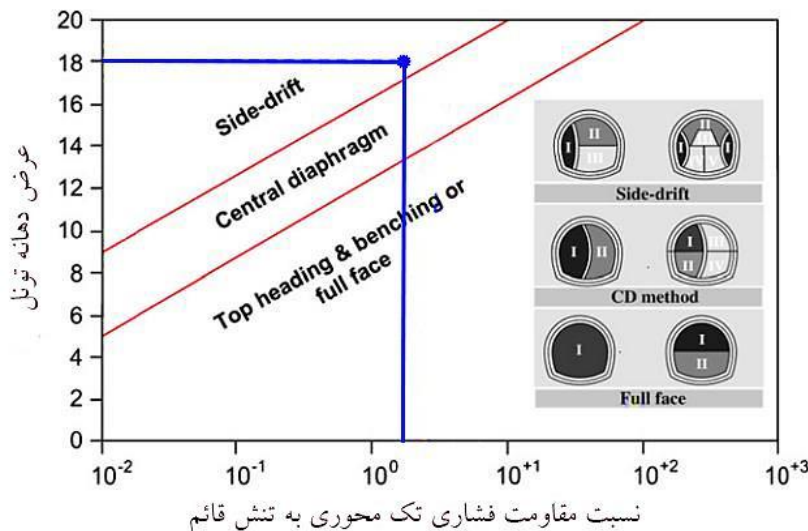
پارامتر	واحد	خاک QCG	خاک QCS
وزن مخصوص خشک	kN/m^3	۱۸/۴	۱۸/۳
وزن مخصوص اشباع	kN/m^3	۱۹/۶	۱۹/۷
نسبت پواسون	-	۰/۳۸	۰/۳۸
مدول الاستیسیته	kg/cm^2	۹۰۰	۸۰۰
چسبندگی	kg/cm^2	۰/۳۵	۰/۴
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۳۵	۳۰
ضریب فشار جانبی		۰/۴۳	۰/۵

۴-۵-۲- انتخاب روش حفاری

طراحی و ساخت یک تونل، نیازمند فناوری مناسب و انتخاب روش حفر می باشد. البته هیچ قاعده مشخص و کاملی برای انتخاب روش حفاری مناسب وجود ندارد. اینجاست که تجربه مهندسين مجرب به همراه استفاده از کلیه لوازم مورد نیاز، بر انتخاب روش حفر مناسب اثر می گذارد. در انتخاب روش حفاری برای تونل های شهری، باید عوامل مهمی مثل: ایمنی، هزینه اجرا و زمان بندی اجرای طرح را در نظر گرفت [۳۷]. همچنین از عوامل مؤثر دیگر در انتخاب روش حفاری می توان به: خصوصیات زمین شناسی و ژئوتکنیکی منطقه، اندازه و شکل تونل، شرایط آب شناسی منطقه، تنش های برجا و

به وجود آمده در منطقه و ویژگی مناطق ضعیف در منطقه اجرای تونل اشاره نمود [۳۸].

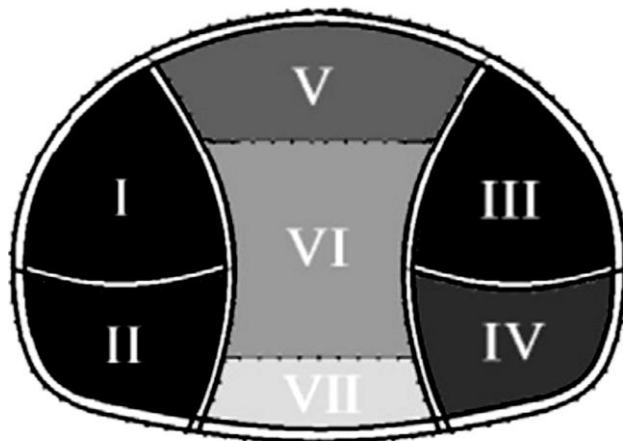
با توجه به این که نشست سطح زمین در تونل سازی شهری از مهم ترین دغدغه های سازندگان تونل است، لذا جهت حفر تونل های بزرگ مقطع، تقسیم تونل به چندین بخش و حفاری مرحله ای امری ضروری خواهد بود. لذا روش NATM را پرکاربردترین روش حفر تونل های بزرگ مقطع می دانند. همان گونه که قبلا بیان شد، این روش به دو شکل کلی دیواره کناری (SD) و یا دیافراگم مرکزی (CD) اجرا می گردد. یو و چرن (۲۰۰۷) جهت انتخاب اولیه روش حفر مناسب از بین سه روش حفاری تمام مقطع، دیواره کناری و دیافراگم مرکزی، نموداری را پیشنهاد داده اند (شکل ۴-۶). در این نمودار با استفاده از نسبت مقاومت فشاری تک محوری به تنش قائم و عرض دهانه تونل، می توان به روش مناسب حفر دست یافت [۳۸]. با توجه به اطلاعات موجود از پروژه تونل حکیم و استفاده از نمودار ۴-۶، روش حفر مناسب برای این تونل، روش دیواره کناری انتخاب شده است. در عمل نیز، تونل حکیم با روش NATM و دیواره کناری حفر می شود.



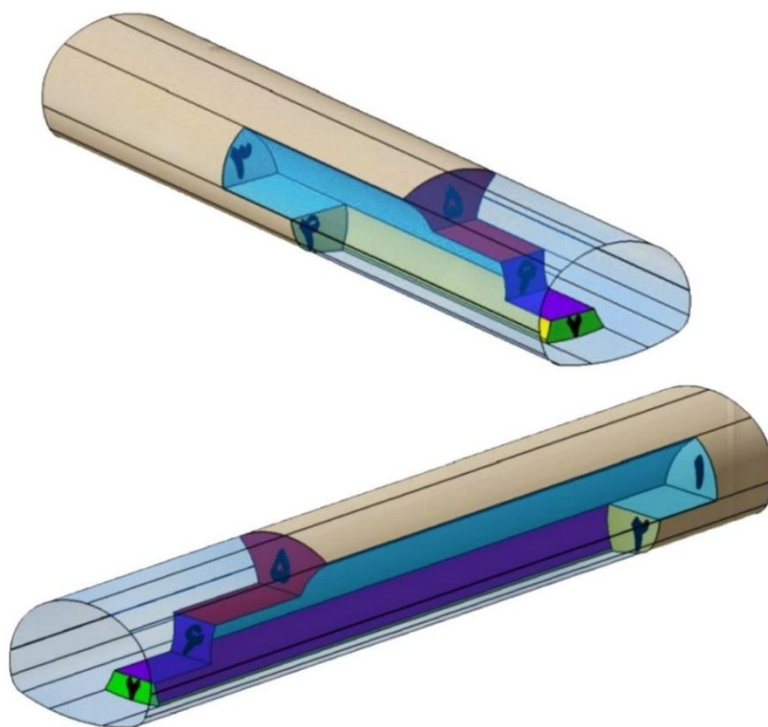
شکل ۴-۶- نمودار پیشنهادی یو و چرن (۲۰۰۷) جهت انتخاب روش حفر- برگرفته از [۳۸] با اصلاح.

پس از انتخاب نوع روش، انتخاب ترتیب یا همان توالی حفاری از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. در این باره در فصل پنجم به شکل کامل، بحث و بررسی صورت خواهد پذیرفت. طبق آنچه

در عمل توسط پیمانکار پروژه انجام می پذیرد، توالی حفاری همانند شکل های ۷-۴ و ۸-۴ می باشد. همچنین سایر مشخصات حفاری تونل حکیم در جدول ۴-۱۳ آمده است.



شکل ۴-۷- توالی حفاری اجرا شده برای تونل حکیم - برگرفته از [۱۸] با اصلاح.



شکل ۴-۸- نمای سه بعدی از ترتیب حفاری جبهه کارهای مختلف تونل حکیم [۴].

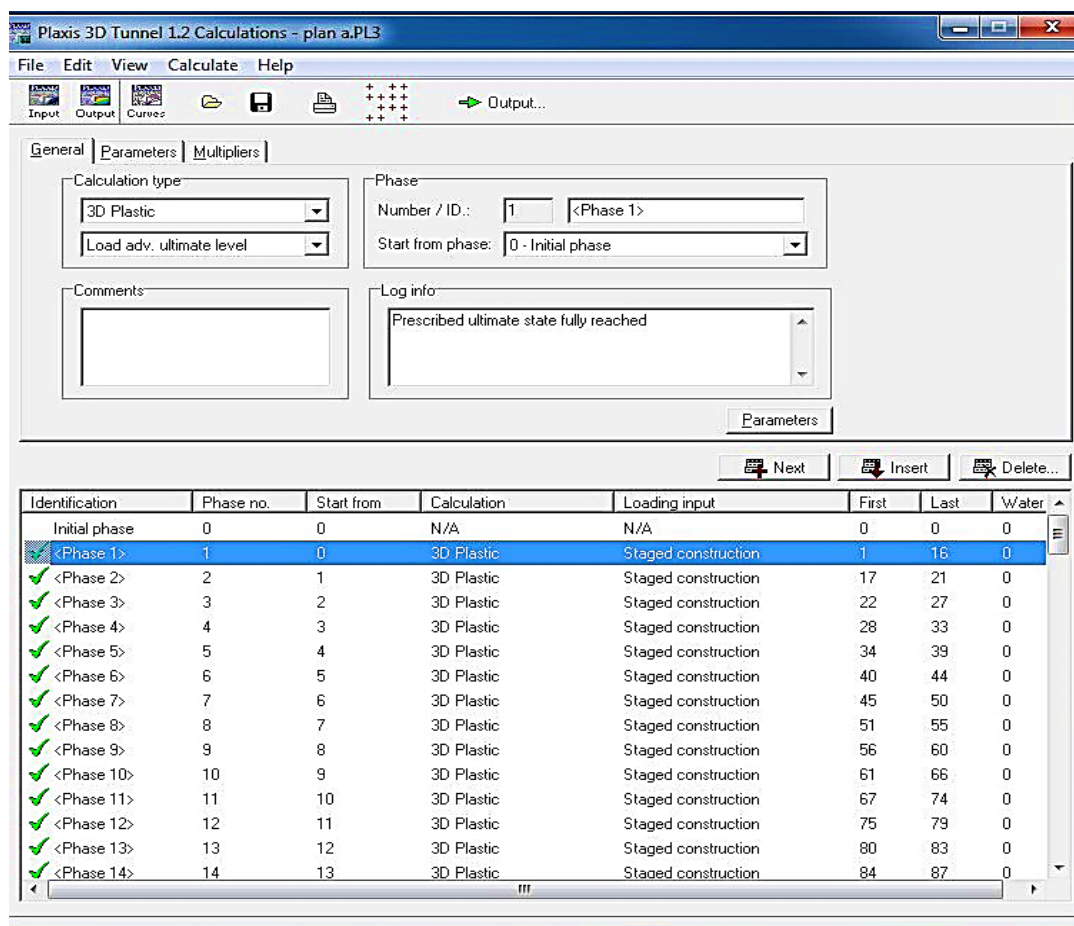
جدول ۴-۱۳- مشخصات حفاری انجام شده در تونل حکیم [۴].

شرح	واحد	مقدار
سطح مقطع تونل ها	متر مربع	۱۸۶
کل طول تونل ها	متر طول	۲۰۴۸
حجم حفاری تونل ها	متر مکعب	۳۸۰/۰۰۰
حجم کل حفاری رمپ ها	متر مکعب	۲۵۰/۰۰۰
حجم اجرای شاتکریت	متر مکعب	۵۰/۰۰۰
حجم اجرای بتن سازه ای و پرکننده تونل	متر مکعب	۱۴۰/۰۰۰
بیشینه حفاری روزانه	متر طول (مقطع معادل)	۵۰/۱۸
متوسط کل حفاری روزانه	متر طول (مقطع معادل)	۷/۶۰
بیشینه حفاری ماهیانه	متر طول (مقطع معادل)	۲۹۲/۲۲
متوسط کل حفاری ماهیانه	متر طول (مقطع معادل)	۲۲۷/۵۲
بیشینه اجرای بتن هفتگی	بلوک ۱۰ متری	۵

۴-۵-۳- تعریف فازهای محاسباتی و حل مسأله

پس از مدل سازی هندسی، اعمال شرایط مرزی، مش بندی و به تعادل رساندن مدل، نوبت به بخش محاسبات^۱ نرم افزار PLAXIS 3D Tunnel می رسد. در این بخش، برای مدل کردن حفاری مرحله ای تونل، نیازمندیم تا فازهای محاسباتی مناسب تعریف و سپس اجرا گردند (شکل ۴-۹).

^۱ Plaxis Calculations

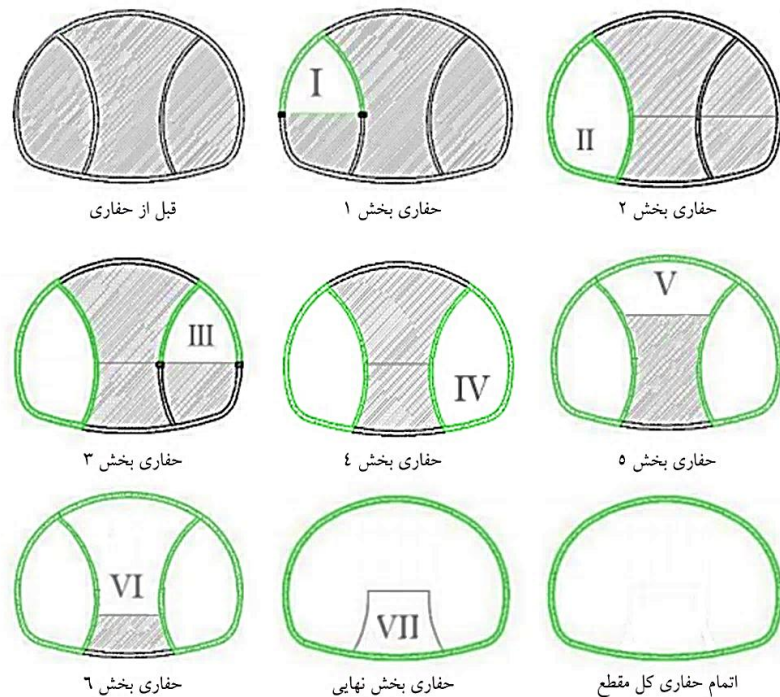


شکل ۴-۹- تعریف فازهای مختلف در بخش محاسبات نرم افزار.

نحوه تعریف فازهای محاسباتی و حفاری اجرا شده برای مدل سازی به شکل زیر می باشد:

مطابق شکل ۴-۱۰ ابتدا بخش شماره ۱ حفاری می شود. در عمل گام حفاری برابر یک متر در نظر گرفته شده است. البته لازم به توضیح است که گام حفاری بهینه در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است که مقدار یک متر به عنوان گام حفاری مناسب پیشنهاد می شود. در فاز بعدی، سیستم نگهداری بخش ۱ که در فاز قبلی حفاری شده است، فعال می شود. به همین منوال حفاری بخش ۱ با گام های حفاری یک متری ادامه پیدا می کند. طبق آنچه در عمل اجرا می شود، فاصله جبهه کارهای تونل حکیم، مابین بخش یک و دو، برابر با ۱۰ متر، بین بخش دو و سه، برابر با ۲۵ متر، بخش سه و چهار، برابر با ۱۰ متر، بخش چهار و پنج برابر با ۱۵ متر و فاصله حفاری مابین بخش های پنج، شش و هفت، هر کدام برابر با ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. (در فصل پنجم به شکل مبسوط، به تعیین فاصله حفاری بین بخش های

مختلف یک تونل و نیز فاصله جبهه کارها، بین دو تونل پرداخته شده است.) بدین معنی که پس از بخش شماره ۱، با گام های یک متری به میزان ۱۰ متر پیش رفت، حفاری بخش شماره ۲ آغاز می شود. سایر بخش ها نیز به همین شکل یعنی با فاصله ذکر شده، نسبت به بخش قبلی حفاری و نگهداری می شوند. نکته قابل ذکر در این قسمت این است که این فاصله اولاً در حدامکان باید در طول اجرای تونل بین همه بخش ها ثابت باقی بماند [۱۸]، ثانیاً همه بخش ها باید همزمان حفاری شده و پیش روی نمایند. به عنوان مثال هنگامی که بخش شماره ۱ وارد گام حفاری ۱۱ می شود، حفاری اولین گام بخش شماره ۲ آغاز می شود. یا وقتی بخش شماره ۱ وارد گام حفاری ۳۶ و بخش شماره ۲ وارد گام حفاری ۲۶ می شود، حفاری اولین گام بخش شماره ۳ آغاز می گردد. این روند تا آخر ادامه دارد.



شکل ۴-۱۰- مراحل اجرا و نگهداری تونل حکیم.

با تکمیل تعریف تمامی فازهای محاسباتی، حل مسأله توسط نرم افزار آغاز می گردد. پس از اتمام این بخش، می توان نتایج محاسبات انجام شده را به شکل داده های عددی، نمودارها و تصاویر دو و سه بعدی، مشاهده و استفاده نمود.

۴-۵-۴- تعیین گام بهینه حفاری

یکی از مهم ترین عوامل دخیل در حفاری چندمرحله ای تونل های بزرگ مقطع، انتخاب گام حفاری پیش روی تونل می باشد. گام حفاری در واقع همان فاصله طولی پشت سینه کار است که بدون نگهداری حفر شده است. میزان این فاصله، تأثیر بسزایی در جابجایی های دیواره های بخش حفاری شده و به طبع، نشست سطح زمین خواهد داشت. این فاصله باید نه آنقدر زیاد باشد که منجر به افزایش جابجایی ها و یا ناپایداری تونل گردد، و نه آنقدر کم باشد که نرخ پیش روی را پایین آورده و هزینه و زمان اجرا را بالا ببرد. در این مطالعه گام های پیش روی ۰/۷، ۱، ۱/۳ و ۲ متر در نظر گرفته و بررسی شده اند. مدل های مختلف با استفاده از این چهار گام، تعریف و برای بخش اول حفاری (بدون نصب سیستم نگهداری)، اجرا شده اند. نتایج حاصل از این مدل سازی ها در نقاط تاج تونل، تاج، دیواره ها و کف بخش شماره ۱ و سطح زمین بررسی و مقایسه و در جدول شماره ۴-۱۴ بیان گردیده اند.

جدول ۴-۱۴- جابجایی های ایجاد شده در نقاط مختلف تونل، در اثر حفاری با گام های مختلف.

گام (m)	قائم تاج تونل (mm)	قائم تاج بخش ۱ (mm)	قائم دیواره بخش ۱ (mm)	افقی دیواره بخش ۱ (mm)	قائم کف بخش ۱ (mm)	قائم سطح زمین (mm)
۰/۷	-۱/۰۶۷	-۳/۶۸۷	-۳۵/۵۸۶	۳۸/۱۳۹	۹/۴۲۸	-۰/۲
۱	-۱/۱	-۴/۴۱۲	-۳۷/۹۶۷	۴۱/۵۰۱	۱۳/۶۲۸	-۰/۲۳۶
۱/۳	-۱/۳۸۲	-۵/۱۵۷	-۴۰/۹۱۴	۴۶/۸۴۵	۱۹/۳۶۴	-۰/۳۰۳
۲	-۱/۹۳۶	-۶/۷۹۹	-۴۵/۶۱۹	۵۵/۱۶۳	۲۹/۳۷۴	-۰/۴۶۷

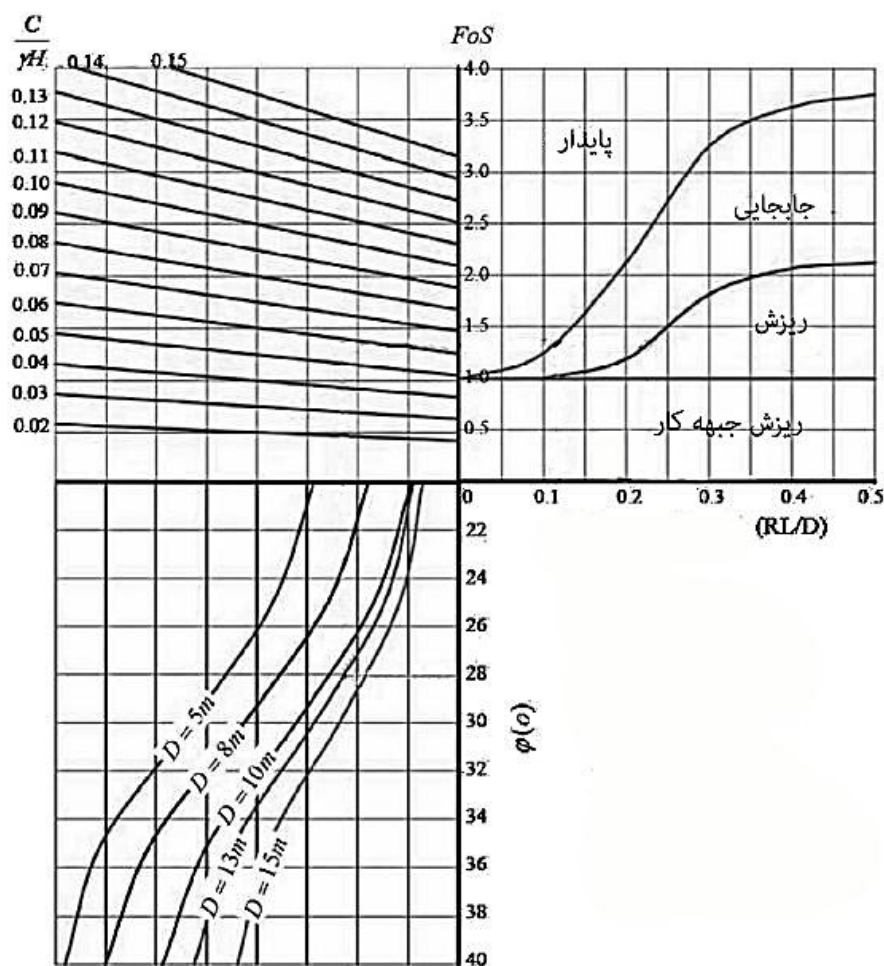
مطابق با آنچه بیان گردیده است، با افزایش گام حفاری، جابجایی ها نیز افزایش خواهند داشت.

یانگ لی^۱ و شوبرت^۲ در مطالعه ای به بررسی گام پیش روی در حفاری تونل ها پرداخته اند. آن ها برای بررسی گام حفاری مناسب، نمودارهایی را پیشنهاد کرده اند که با استفاده از آن ها و با توجه به خصوصیات خاک منطقه و قطر حفاری می توان به گام حفاری بحرانی رسید. منظور از گام حفاری

1 Young-Zoo Lee

2 Wulf Schubert

بحرانی همان گامی است که بیشتر از آن با ریزش تونل مواجه خواهیم شد. نمودار ارائه شده توسط یانگ و شوبرت به شرح ذیل می باشد [۳۹]:



شکل ۴-۱۱- نمودار لی- شوبرت- برگرفته از [۳۹] با اصلاح.

مطابق با شکل ۴-۱۱ با داشتن زاویه اصطکاک داخلی خاک منطقه و قطر بازشدگی مورد ارزیابی و نسبت $\frac{C}{\gamma H}$ ضریب ایمنی محاسبه می گردد. سپس با بهره گیری از نمودار بالا سمت راست می توان فهمید که گام حفاری بحرانی برای یک عملیات حفاری چه مقدار است. لازم به ذکر است که در این نمودارها چهار منطقه موجود است که منطقه اول محدوده پایداری

تونل^۱، منطقه دوم محدوده جابجایی اضافی^۲، منطقه سوم محدوده ریزش سقف تونل^۳ و منطقه چهارم محدوده ریزش جبهه کار پیشروی^۴ خواهد بود.

با توجه به خصوصیات خاک و پارامترهای ژئوتکنیکی پروژه حکیم (جدول ۳-۱)، قطر بخش های هفت گانه حفر مرحله ای تونل حکیم که تقریباً برابر ۶ متر است و عمق قرارگیری تونل که حدوداً ۱۳ متر می باشد، پس از محاسبه و انطباق این داده ها با نمودار لی- شوبرت مشخص می شود که ضریب ایمنی حدوداً برابر ۳/۷ است. همچنین از این نمودار می توان فهمید که گام حفاری بخش های مختلف تونل حکیم را تا ۳ متر نیز می توان در نظر گرفت طوری که آن بخش از تونل به خوبی و با پایداری همراه باشد. اگر گام حفاری بیشتر از ۳ متر در نظر گرفته شود جابجایی ها آغاز خواهند شد. البته با بررسی نتایج بدست آمده از حفاری با گام های مختلف و مطالعات لی و شوبرت و توجه به بحث کاهش جابجایی، در عین حال افزایش نرخ پیش روی و نیز پایداری فضای حفر شده، با توجه به شرایط حاکم بر پروژه حکیم (زمان و هزینه) گام حفاری عملی پروژه حکیم برابر ۱ متر در نظر گرفته شده است. در مدل سازی عددی انجام شده نیز به دلیل شبیه سازی پروژه اصلی و امکان اعتبارسنجی آن، گام حفاری برابر ۱ متر اتخاذ شده است.

لی و شوبرت نتیجه تحقیقات خود را با توجه به نمودار ارائه شده و ضریب ایمنی بدست آمده از آن، در جدول شماره ۴-۱۵ ارائه کرده اند [۳۹]. مطابق با این جدول و با در نظر گرفتن ضریب ایمنی ۳/۷، طرز رفتار تونل حکیم بدون جابجایی اضافی خاک با گام حفاری ۳ متر خواهد بود.

¹ stable

² overbreak

³ collapse

⁴ Face collapse

جدول ۴-۱۵- روش حفاری مناسب مطابق با نتایج حاصل از نمودار لی-شوبرت

ضریب ایمنی	طرز رفتار	روش حفر
$3/3 <$	- بدون جابجایی اضافی خاک با گام حفاری ۰/۵d	- اضافه تنش لاینینگ با گام حفاری بزرگ باید چک شود.
$2/2 - 3/3$	- بدون ریزش با گام حفاری ۰/۵d - جابجایی اضافی خاک با گام حفاری بزرگتر از ۰/۲d	- اضافه تنش لاینینگ با گام حفاری بزرگ باید چک شود. - نیاز به فورپولینگ برای گام حفاری بزرگتر از ۰/۲d
$1/5 - 2/2$	- ریزش با گام حفاری ۰/۲۵d - جابجایی اضافی خاک با گام حفاری ۰/۱۵d تا ۰/۲d	- اضافه تنش لاینینگ با گام حفاری بزرگ باید چک شود. - نیاز به فورپولینگ برای گام حفاری بزرگتر از ۰/۱۵d
$1/25 - 1/5$	- ریزش با گام حفاری بزرگتر از ۰/۲۲d - جابجایی اضافی خاک با گام حفاری ۰/۱d تا ۰/۱۵d	- نیاز به فورپولینگ برای گام حفاری ۰/۱d تا ۰/۱۵d - نیاز ضروری به پایپ روف برای گام حفاری بزرگتر از ۰/۱۵d
$1 - 1/25$	- ریزش با گام حفاری بزرگتر از ۰/۱d - جابجایی اضافی خاک با شروع حفاری هر لحظه امکان وقوع دارد.	- بدون پیش نگهداری مانند فورپولینگ یا پایپ روف حفاری خطرناک است. - نیاز ضروری به پایپ روف برای گام حفاری بزرگتر از ۰/۱d
$1 >$	ریزش جبهه کار	- نگهداری جبهه کار مانند بولت یا پایپ روف و روش های بهبود وضعیت زمین مانند تزریق بتن یا فریز برای شروع حفاری ضروریست. همچنین احتمالاً روش های دیگری مثل شیلد هوای فشرده یا EPB می تواند در نظر گرفته شود.

۴-۵-۵- تحلیل پایداری با استفاده از مفهوم کرنش برشی بحرانی

ساکورائی در سال ۱۹۸۶ روشی را برای ارزیابی پایداری سازه های زیرزمینی با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرده است که بر اساس نتایج آزمایش های فشاری تک محوره بر روی سنگ های مختلف تعریف می شود. این روش اغلب به عنوان روشی متداول برای محاسبه همگرایی (جابجایی نسبی دیواره های تونل) استفاده می شود که در طی بررسی تونل های مختلف به دست آمده است. ساکورائی و همکارانش علاوه بر روابطی که بین مقاومت فشاری تک محوره و کرنش بحرانی برای توده

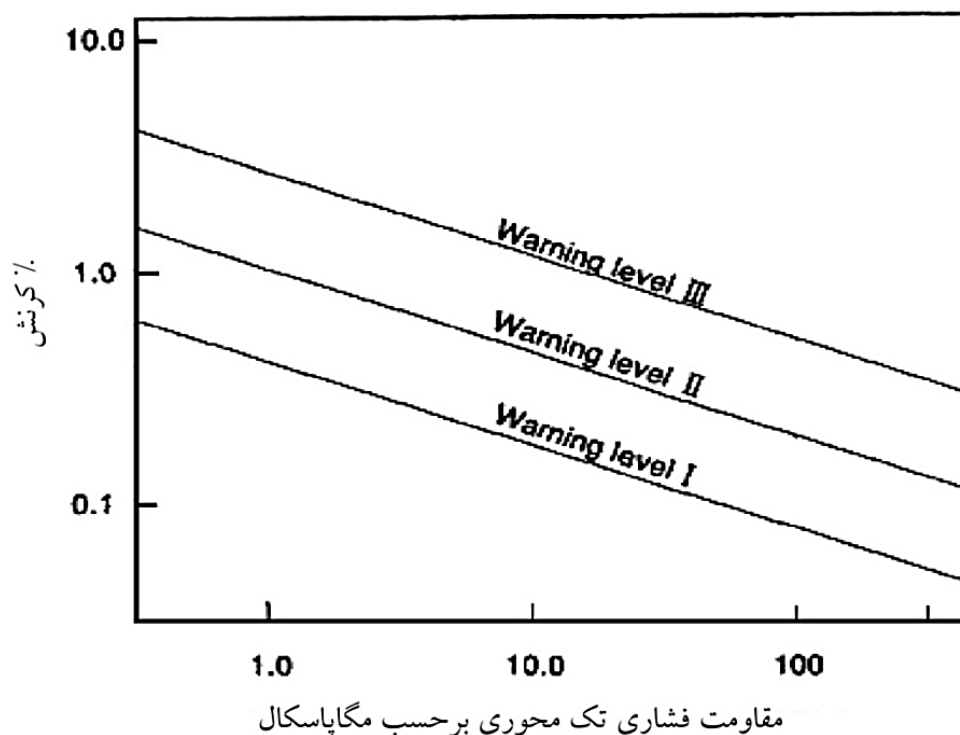
سنگ‌های مختلف بیان کرده‌اند، روابط (۱۱-۴)، (۱۲-۴)، و (۱۳-۴) را نیز بین مدول الاستیسیته و کرنش بحرانی ارائه کرده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، معادله ۱ و ۳ نشان دهنده حد بالا و پایین مقدار کرنش بحرانی است. معادله (۱۲-۴) نیز مقدار لگاریتمی متوسط معادله‌های (۱۱-۴) و (۱۳-۴) است [۴۰]:

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad \text{تراز هشدار خطر III} \quad (11-4)$$

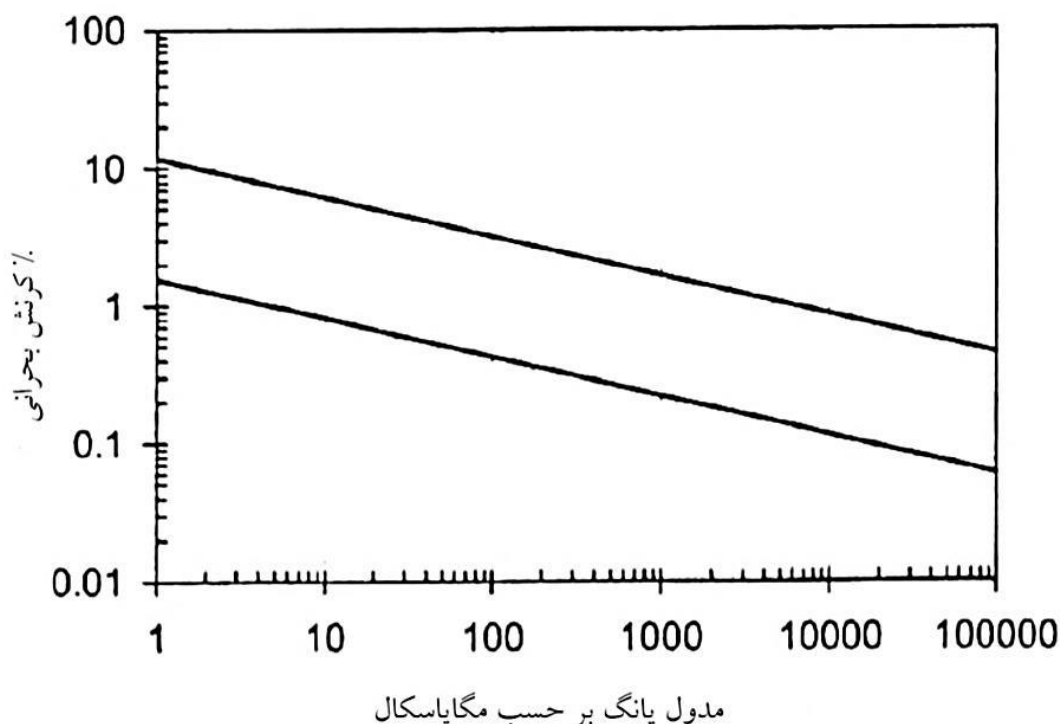
$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad \text{تراز هشدار خطر II} \quad (12-4)$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad \text{تراز هشدار خطر I} \quad (13-4)$$

در این روابط، E مدول الاستیسیته بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع و ε_c کرنش بحرانی بر اساس درصد می‌باشد.



شکل ۴-۱۲- نمودار تراز هشدار خطر پیشنهادی ساکورائی برای ارزیابی پایداری تونل‌ها- برگرفته از [۴۱] با اصلاح.



شکل ۴-۱۳- نمودار رابطه پیشنهادی ساکورائی بین مدول یانگ و کرنش بحرانی- برگرفته از [۶] با اصلاح.

ساکورایی معتقد است زمانی که کرنش های ایجاد شده در سازه به سمت تراز هشدار خطر I باشد، تونل هیچ گونه مشکلی از لحاظ پایداری ندارند و تونل سازی از هر لحاظ ایمن است. در صورتی تونل سازی با مشکل جدی مواجه می گردد که کرنش های ایجاد شده در سازه به سمت تراز هشدار III میل نماید، در چنین شرایطی تونل سازی با مشکلات عدیده مواجه گردیده است که می توان آثار آن را بر روی سیستم نگهداری استفاده شده در تونل ها مشاهده نمود [۴۲]. همچنین او و همکارانش تراز هشدار II را به عنوان مبنای طراحی سیستم های نگهداری تونل ها پیشنهاد نموده اند. با محاسبه کرنش بحرانی از رابطه ۴-۱۲، جابجایی مجاز از رابطه ۴-۱۴ بدست خواهد آمد [۴۰]:

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \quad (۴-۱۴)$$

که در این رابطه، u_c مقدار جابجایی مجاز در سقف و a شعاع تونل بر حسب متر است. همان گونه که بیان گردید، گام حفاری بخش های مختلف تونل حکیم، ۱ متر در نظر گرفته شده است. جهت

تحلیل پایداری هر بخش از حفاری تونل، که با گام یک متر پیش روی می شود، البته قبل از نصب سیستم نگهداری، می توان از روابط پیشنهادی ساکورائی و همکاران استفاده نمود. با استفاده از روابط (۱۲-۴) و (۱۴-۴) مقادیر جابجایی های مجاز برای بخش های مختلف تونل مورد مطالعه، محاسبه شده است. همچنین مقادیر متناظر این جابجایی ها توسط نرم افزار مدل سازی، محاسبه و اندازه گیری گردیده که نتایج در جدول (۱۶-۴) نمایش داده می شود:

جدول ۱۶-۴- مقادیر محاسبه شده با استفاده از روابط ساکورائی و نرم افزار Plaxis.

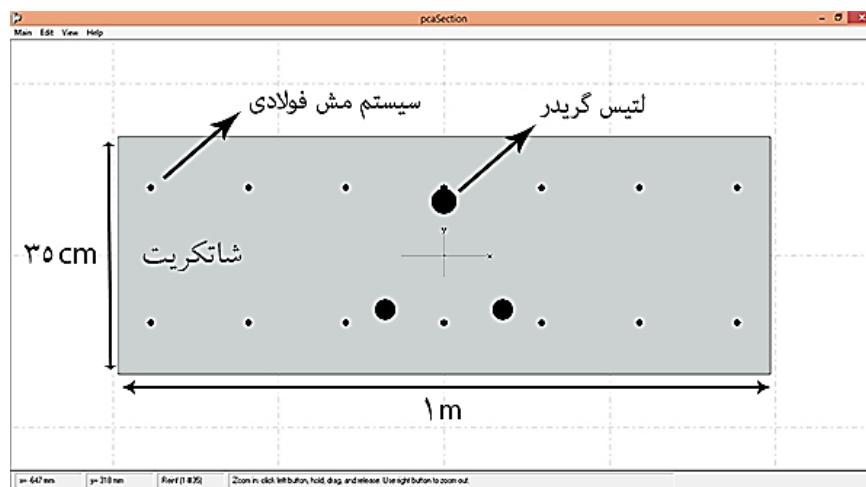
بخش	کرنش بحرانی مجاز			جابجایی مجاز (mm)			جابجایی حاصل از نرم افزار (mm)
	تراز I	تراز II	تراز III	تراز I	تراز II	تراز III	
بخش ۱	۰/۰۲۵	۰/۰۱۱	۰/۰۰۴	-۸۳	-۳۵	-۱۵	-۴/۴۱۲
بخش ۳	۰/۰۲۵	۰/۰۱۱	۰/۰۰۴	-۸۳	-۳۵	-۱۵	-۹/۱۴۰
بخش ۵	۰/۰۲۵	۰/۰۱۱	۰/۰۰۴	-۱۵۴	-۶۶	-۲۸	-۱۴/۷۱۳

با مقایسه داده های بدست آمده از روابط ساکورائی و نتایج حاصل از نرم افزار، مشخص می شود که تونل در مرحله حفاری اولیه، هیچ گونه مشکل ناپایداری نخواهد داشت.

۴-۵-۶- تحلیل سیستم نگهداری پیشنهادی به کمک نرم افزار PCACOL

در این بخش به منظور تحلیل سیستم نگهداری انتخابی، از نرم افزار PCACOL که یک نرم افزار تحلیل سازه ای می باشد استفاده می شود. روش کار بدین صورت است که با استفاده از مشخصات سیستم نگهداری پیشنهادی که در بخش ۴-۴ محاسبه گردید، ابتدا این سیستم در نرم افزار PCACOL مدل سازی می شود (شکل ۴-۱۴). در این شکل، برشی عرضی از سیستم نگهداری با ابعاد درج شده نشان داده شده است که مجموعه ای از مش های فولادی به همراه سیستم لیس گریدر در بتن وجود دارند. با استفاده از این نرم افزار خصوصیات مقاومتی این سیستم نگهداری محاسبه گشته و سپس نمودار p-m (گشتاور خمشی - نیروی محوری) سازه به عنوان خروجی نرم افزار PCACOL ترسیم می شود (شکل ۴-۱۹). از سویی دیگر و در نرم افزار Plaxis پس از اجرای مدل های ساخته شده از تونل

حکیم، مقادیر مختلفی به عنوان خروجی های این نرم افزار بدست می آید. از آنجایی که یکی از خروجی های نرم افزار Plaxis، نیروی محوری، نیروی برشی و گشتاور خمشی وارد بر سیستم نگهداری در بخش های مختلف تونل است، لذا با استفاده از داده های خروجی بدست آمده از نرم افزار Plaxis (شکل های ۴-۱۵ تا ۴-۱۸)، می توان با استفاده از نرم افزار PCACOL برآورد نمود که آیا سیستم نگهداری به کار رفته، قابلیت پایداری و تحمل بارهای وارده را خواهد داشت یا خیر؟ بنابراین با وارد نمودن داده های خروجی نرم افزار Plaxis در نمودار ترسیم شده در نرم افزار PCACOL (نقطه گذاری)، در صورت قرار گرفتن اکثر نقاط درون محدوده مجاز، سیستم نگهداری، پایدار بوده و در غیر این صورت ناپایدار می باشد. (شکل ۴-۱۹). مطابق این شکل مشاهده می شود که سیستم نگهداری طراحی شده در بخش های قبل برای این تونل، پایدار بوده و اطمینان بخش است.



شکل ۴-۱۹- مقطع ترسیم شده از سیستم نگهداری تونل با استفاده از نرم افزار PCACOL

Plaxis 3D Tunnel 1.2 Output - [plan a.704 - Plate forces]

File Edit Geometry Deformations Forces Window Help

Input Calc Curves

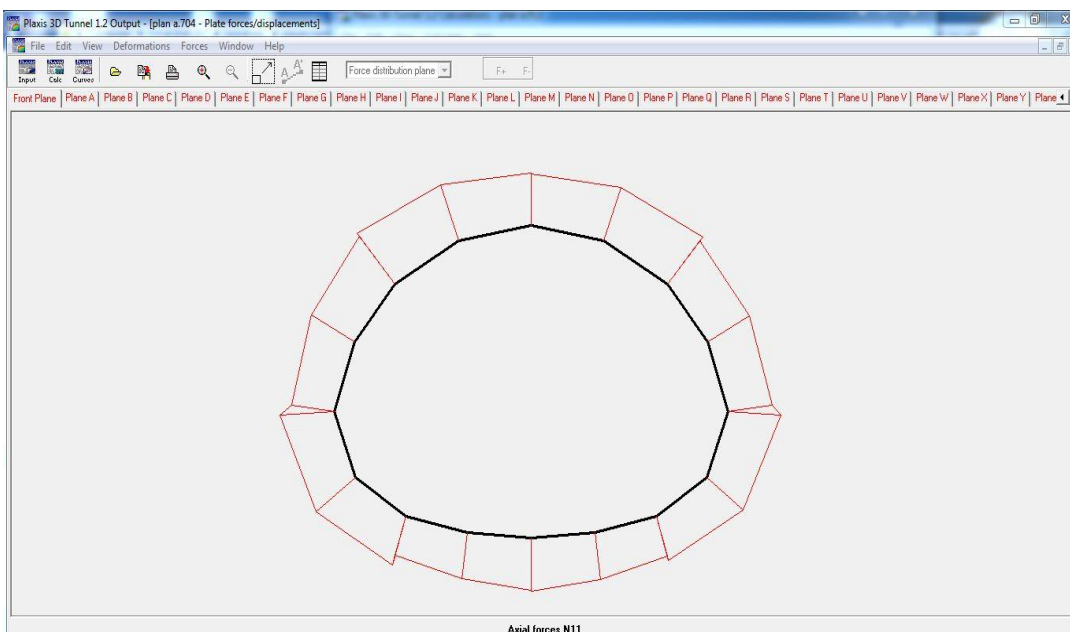
Force distribution plane

F+ F-

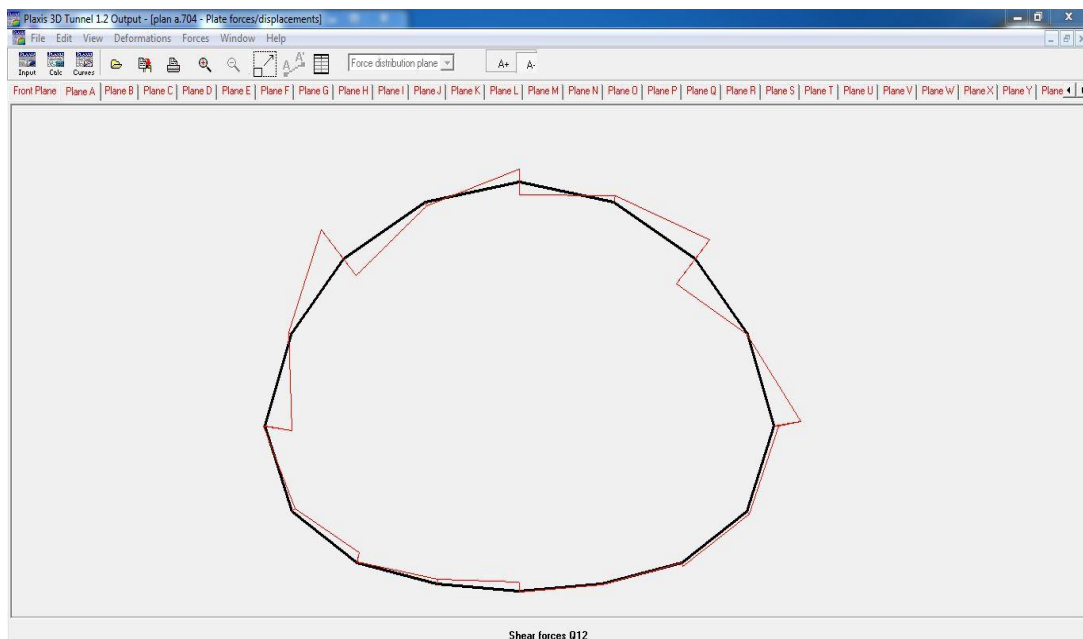
Slice	Plate	Plate Element	Stress Point	X [m]	Y [m]	Z [m]	N ₁₁ [kn/m]	N ₂₂ [kn/m]	O ₁₂ [kn/m]	O ₂₃ [kn/m]	O ₁₃ [kn/m]	M ₁₁ [knm/m]	M ₂₂ [knm/m]	M ₁₂ [knm/m]	
		composit	2	92.721	61.218	-42.211	-586.657	-183.002	-671.045	-26.647	4.123	-82.122	-45.387	9.126	
			3	94.609	58.802	-42.789	-679.015	-11.889	-847.329	-47.854	16.079	-72.873	-36.312	8.132	
			4	94.609	58.802	-42.211	-376.392	-56.232	-671.771	61.715	-40.895	-54.551	-35.553	6.147	
			1	94.357	66.658	-42.789	-1414.354	1517.243	-168.066	-78.733	70.382	21.570	-40.952	-2.231	
	14	composit	2	94.357	66.658	-42.211	-869.643	1475.508	-576.737	83.163	85.066	55.213	-32.150	-6.040	
			3	92.750	63.698	-42.789	-1271.350	-370.414	-705.201	-17.291	14.400	-47.321	-52.666	-1.760	
			4	92.750	63.698	-42.211	-836.326	-439.461	-531.941	25.966	-2.004	-81.440	-51.180	-1.918	
			1	100.039	69.792	-43.789	-1785.998	2245.600	295.144	-12.755	-228.018	17.332	-58.669	23.326	
	44	13	composit	2	100.039	69.792	-43.211	-1133.278	270.231	57.363	10.000	-83.454	12.349	-51.928	23.597
				3	96.433	68.444	-43.789	-1902.29	-149.664	147.509	84.946	319.057	-49.905	-33.929	21.044
4				96.433	68.444	-43.211	-1241.191	-70.224	173.483	-56.517	69.762	-40.581	-34.393	26.313	
1				106.567	68.444	-43.789	-1854.742	-55.142	-192.961	97.875	-331.450	-44.850	-35.838	-23.886	
12		composit	2	106.567	68.444	-43.211	-1160.390	29.900	-227.909	-77.396	-75.917	-36.835	-35.969	-29.244	
			3	102.961	69.792	-43.789	-1776.017	305.806	-243.352	19.710	237.850	29.378	-60.028	-19.827	
			4	102.961	69.792	-43.211	-1095.674	356.721	-18.890	-17.443	85.571	22.708	-52.622	-19.521	
			1	110.250	63.698	-43.789	-905.444	-41.889	374.556	-23.522	-54.253	-45.310	-61.950	13.309	
11		composit	2	110.250	63.698	-43.211	-632.937	-105.040	218.360	5.150	5.011	-96.114	-63.400	12.928	
			3	108.643	66.658	-43.789	-1423.241	2203.600	-55.592	-46.004	70.440	-16.604	-49.777	6.155	
	4		108.643	66.658	-43.211	-868.349	2147.882	187.326	93.922	-45.318	32.037	-40.569	3.199		
	1		108.391	58.802	-43.789	-477.041	-0.492	436.894	-52.636	-47.889	-29.663	-24.027	-4.234		
10	composit	2	108.391	58.802	-43.211	-198.675	-25.957	281.440	58.797	26.310	-20.040	-24.372	-5.167		
		3	110.279	61.218	-43.789	-762.822	60.533	267.834	14.964	51.128	-58.487	-31.457	-5.839		
		4	110.279	61.218	-43.211	-364.780	124.496	335.510	-17.851	-4.452	-57.607	-30.115	-5.491		

220 page(s)

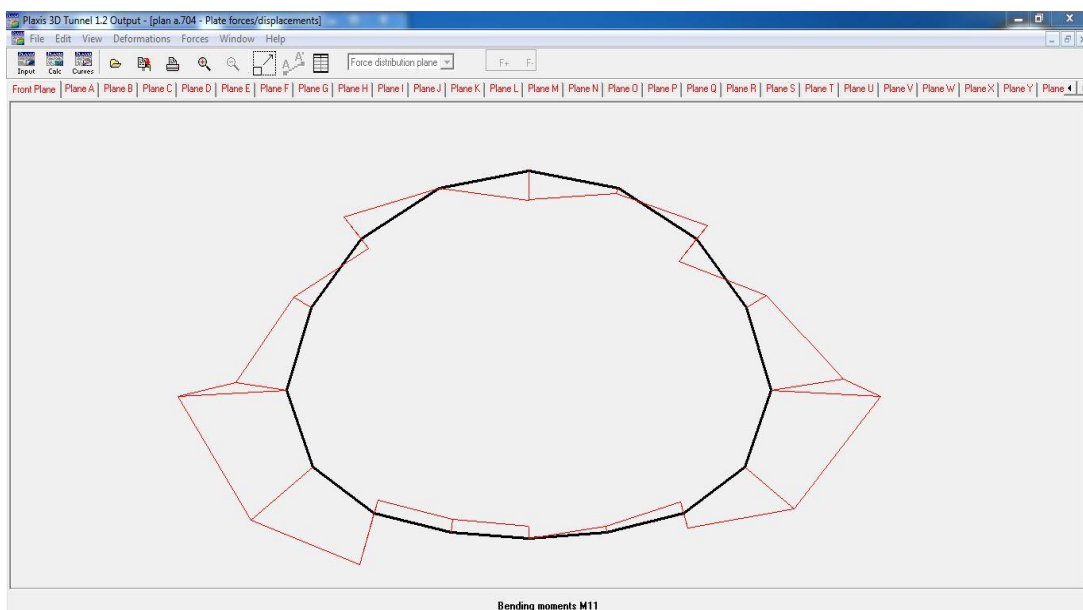
شکل ۴-۱۵- نتایج خروجی نرم افزار Plaxis، مربوط به نیروهای محوری، برشی و گشتاور خمشی سیستم نگهداری.



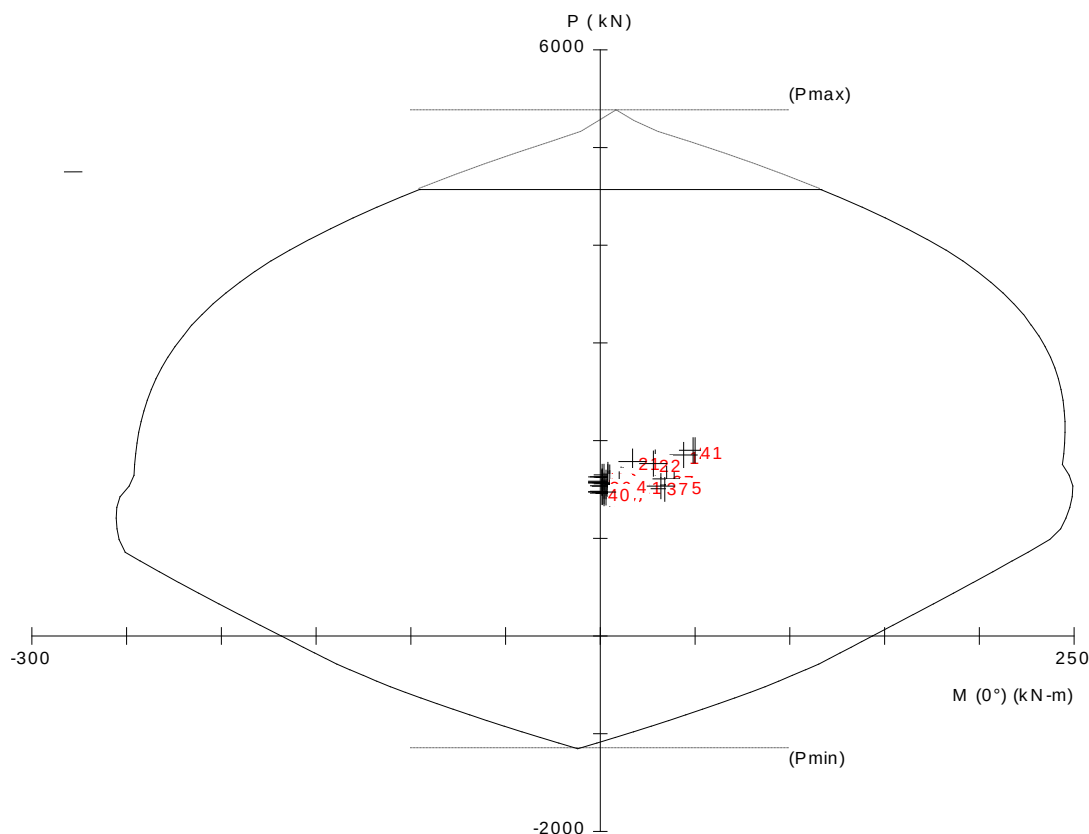
شکل ۴-۱۶- خروجی نرم افزار Plaxis، نحوه توزیع بار محوری بر روی سیستم نگهداری.



شکل ۴-۱۷- خروجی نرم افزار **Plaxis**، نحوه توزیع نیروی برشی بر روی سیستم نگهداری.



شکل ۴-۱۸- خروجی نرم افزار **Plaxis**، نحوه توزیع ممان خمشی بر روی سیستم نگهداری



شکل ۴-۱۹- نمودار $P-M$ سیستم نگهداری تونل با استفاده از نرم‌افزار PCACOL

۴-۶- تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر نشست سطح زمین

مهم‌ترین بخش طراحی

در این قسمت تغییر شکل قائم نشست سطح زمین تحت تأثیر پارامترهای خاک از جمله مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مورد بررسی قرار گرفته است. تمامی پارامترها با ثابت نگه داشتن دیگر پارامترها یک به یک آنالیز شده و رابطه هریک از آنها با نشست سطح زمین به عنوان معیاری برای بررسی حساسیت بررسی شده است.

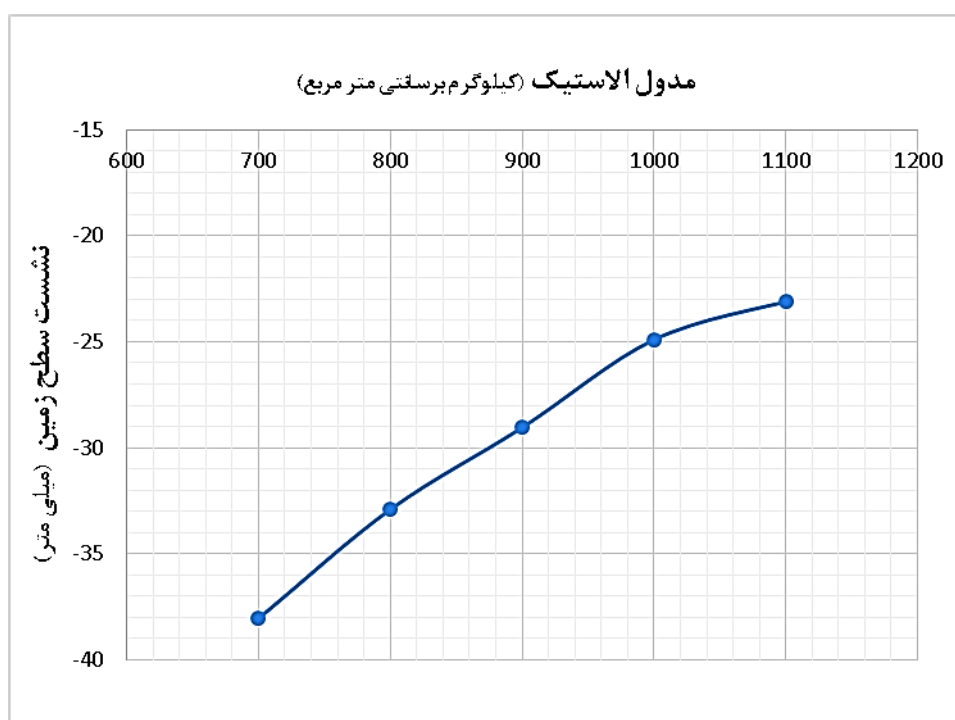
۴-۶-۱- بررسی تأثیر مدول الاستیک خاک (E)

در این قسمت به تأثیر تغییرات مدول الاستیک خاک پرداخته شده است. آن گونه که در بخش‌های قبل بیان گردید، مسیر پروژه حکیم از دو واحد زمین‌شناسی QCG و QSG تشکیل شده است که مدول الاستیک هر کدام به ترتیب ۹۰۰ و ۸۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. در این مطالعه برای تحلیل حساسیت، مدول الاستیک برای هر دو واحد خاکی به طور همزمان و به یک مقدار کاهش و یا

افزایش داده شده است. نتایج این تغییرات در جدول ۴-۱۷ و شکل ۴-۲۰ بیان شده است. مطابق با نتایج بدست آمده با افزایش مدول الاستیک خاک، نشست سطح زمین کاهش پیدا می کند.

جدول ۴-۱۷- نتایج تأثیر مدول الاستیک بر نشست زمین.

نشست زمین در بالای محور تونل (میلی متر)	مدول الاستیک واحد QSG (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	مدول الاستیک واحد QCG (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
-۳۸/۰۵۹۷	۶۰۰	۷۰۰
-۳۲/۹۰۸۶	۷۰۰	۸۰۰
-۲۹/۰۴۴۷	۸۰۰	۹۰۰
-۲۴/۸۹۷۳	۹۰۰	۱۰۰۰
-۲۳/۰۹۷۷	۱۰۰۰	۱۱۰۰



شکل ۴-۲۰- نمودار تأثیر مدول الاستیک بر نشست زمین.

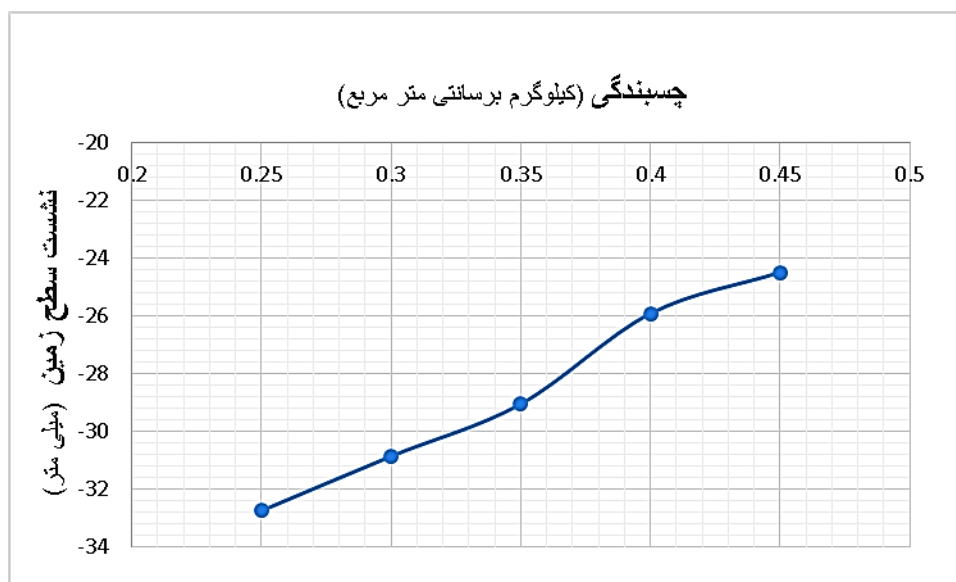
۴-۶-۲- بررسی تأثیر چسبندگی خاک (C)

در این مرحله به تأثیر تغییرات چسبندگی خاک پرداخته شده است. در مسیر پروژه حکیم که از دو واحد زمین شناسی QSG و QCG تشکیل شده است، چسبندگی هر واحد به ترتیب ۳۵ و ۴۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع است. در این مطالعه برای تحلیل حساسیت، چسبندگی برای هر دو واحد خاکی به

طور همزمان و به یک مقدار کاهش و یا افزایش داده شده است. نتایج این تغییرات در جدول ۴-۱۸ و شکل ۴-۲۱ بیان شده است. مطابق با نتایج بدست آمده با افزایش چسبندگی خاک، نشست سطح زمین کاهش پیدا می کند.

جدول ۴-۱۸- نتایج تأثیر چسبندگی بر نشست زمین.

چسبندگی واحد QCG (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	چسبندگی واحد QSG (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	نشست زمین در بالای محور تونل (میلی متر)
۰/۲۵	۰/۳۰	-۳۲/۷۴۷۳
۰/۳۰	۰/۳۵	-۳۰/۸۵۶۸
۰/۳۵	۰/۴۰	-۲۹/۰۴۴۷
۰/۴۰	۰/۴۵	-۲۵/۹۰۵۷
۰/۴۵	۰/۵۰	-۲۴/۴۷۸۲



شکل ۴-۲۱- نمودار تأثیر چسبندگی بر نشست زمین.

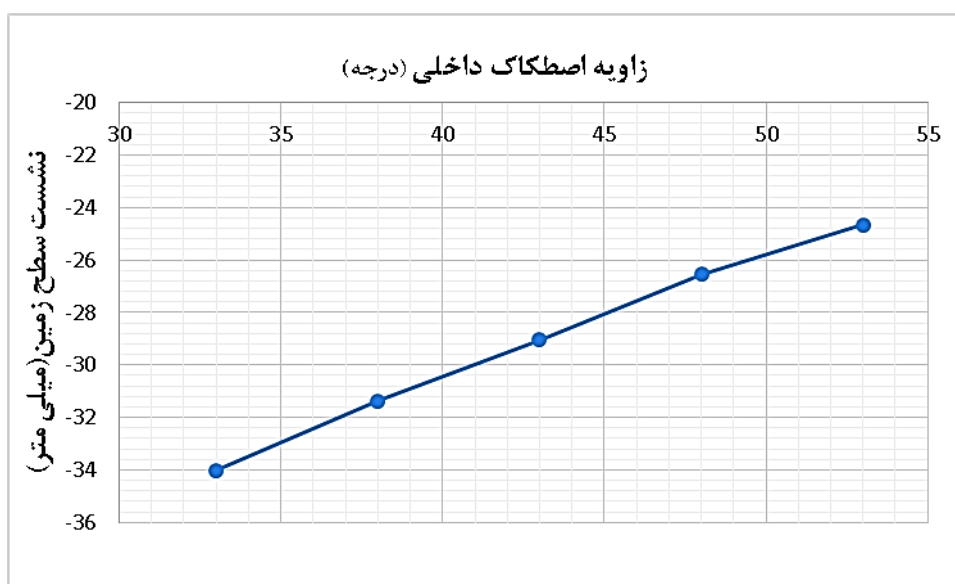
۴-۶-۳- بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ)

در این مرحله به تأثیر تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک پرداخته شده است. در مسیر پروژه حکیم که از دو واحد زمین شناسی QCG و QSG تشکیل شده است، زاویه اصطکاک داخلی هر واحد به ترتیب ۴۳ و ۵۰ درجه است. در این مطالعه برای تحلیل حساسیت، زاویه اصطکاک داخلی برای هر دو واحد خاکی به طور همزمان و به یک مقدار کاهش و یا افزایش داده شده است. نتایج این تغییرات در

جدول ۴-۱۹ و شکل ۴-۲۲ بیان شده است. مطابق با نتایج بدست آمده با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، نشست سطح زمین کاهش پیدا می کند.

جدول ۴-۱۹- نتایج تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر نشست زمین.

زاویه اصطکاک داخلی واحد QCG (درجه)	زاویه اصطکاک داخلی واحد QSG (درجه)	نشست زمین در بالای محور تونل (میلی متر)
۳۳	۴۰	-۳۴/۰۱۲۷
۳۸	۴۵	-۳۱/۳۶۴۹
۴۳	۵۰	-۲۹/۰۴۴۷
۴۸	۵۵	-۲۶/۵۴۰۱
۵۳	۶۰	-۲۴/۶۵۴۸



شکل ۴-۲۲- نمودار تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر نشست زمین.

۴-۷- جمع بندی

مهم ترین بخش طراحی سازه های زیرزمینی با توجه به ویژگی های فضای زیرزمینی موردنظر، روش مناسب تحلیل پایداری آن است. محققین بسیاری بر روی روش های مختلف تحلیل پایداری مطالعه نموده اند. روش های موجود برای تحلیل پایداری و طراحی فضاهای زیرزمینی را می توان به سه گروه عمده: روش های تجربی، روش های مشاهده ای و روش های تحلیلی تقسیم نمود. روش های تحلیلی

شامل مدل های نظری، فیزیکی و ریاضی نظیر راه حل فرم بسته و روش های عددی می باشند. انواع روش های عددی را می توان به طور کلی به روش های مخصوص محیط های پیوسته و روش های مخصوص محیط های درزه دار و ناپیوسته تقسیم بندی کرد. نظر به مطالب بیان شده، از بین نرم افزارهای زیرشاخه روش های عددی مورد استفاده برای محیط های پیوسته (خاکی)، دو نرم افزار FLAC و PLAXIS را می توان از معروف ترین آن ها دانست.

بدون تردید هر نرم افزاری مزایا و معایب خاص خود را دارد. در واقع نمی توان کفه ترازو را به نفع نرم افزاری سنگین تر دانست. در نتیجه با جمع بندی شرایط ذکر شده، در مطالعه پیش رو، نویسنده بر آن شد تا از نرم افزار PLAXIS 3D Tunnel v1.2 استفاده نماید. نرم افزار Plaxis، نرم افزاری المان محدود پیشرفته است که به منظور تحلیل پایداری در کارهای عمرانی و خصوصاً در زمینه ی ژئوتکنیک استفاده می گردد. در این نرم افزار، مدل های رفتاری موهر-کلمب، مدل سخت شونده گی هذلولی، مدل نرم شونده گی و مدل نرم شونده گی خزشی قابل بکارگیری است.

سیستم مورد استفاده جهت نگهداری تونل در این پروژه شامل لتیس گریدر و شاتکریت مسلح به مش می باشد. همچنین، پوشش تونل (سیستم نگهداری) در این مدل سازی از دو قسمت تشکیل شده است: نگهداری دیواره های اصلی کناری و نگهداری دیواره های موقت میانی. اگر شدت بارهایی که از زمین به نگهداری موقت منتقل می شود، به اندازه ای بزرگ باشد که مانع از استفاده شاتکریت به تنهایی شود، مجموعه پروفیل های فولادی به طور معمول همراه با شاتکریت استفاده می گردند. برای بدست آوردن مقادیر سختی محوری، سختی خمشی و ضخامت و مدول الاستیک معادل، ابتدا باید این مقادیر با استفاده از روابط معادل سازی محاسبه گردند. به عبارت دیگر این سؤال مطرح است که مجموع بارهای تحمل شده توسط شاتکریت و پروفیل های فولادی چقدر می باشد؟

به کمک معادلات ارائه شده توسط تورس و دادریچ برای حل مقاطع مرکب (کامپوزیتی) که مبتنی بر روشی است که معمولاً به عنوان رویکرد مقطع معادل نامیده می شود، می توان به این سؤال پاسخ

داد. در نهایت با استفاده از روابط ارائه شده توسط تورس، ضخامت و مدول الاستیک، ضرایب تراکم پذیری، انعطاف پذیری و نیز سختی محوری و سختی خمشی سیستم نگهداری معادل (مرکب)، مطابق جداول ۴-۱۰ و ۴-۱۱ بدست آمده است.

پروژه حکیم به صورت دو تونل دوقلوی مجزای رفت و برگشت با سه خط عبور برای هر تونل، می باشد که تونل ها طولی تقریباً برابر ۱ کیلومتر دارند. فاصله دو تونل از هم متغیر بوده و از فاصله ۱۰ متر تا ۱۸ متر با توجه به شرایط منطقه و طراحی انجام شده توسط طراحان تغییر می نماید. مقدار روباره تونل نیز از ۴ تا ۱۳ متر متغیر می باشد. در مدل ساخته شده در این تحقیق دو تونل با فاصله ۱۰ متر از هم، در عمق ۱۳ متری در نظر گرفته شده اند. مقطع تونل، به صورت نعل اسبی با عرض دهانه ۱۸ و ارتفاع ۵/۱۲ متر است. به منظور مدل سازی تونل حکیم در نرم افزار Plaxis 3D Tunnel، با استفاده از یک شبکه اجزاء محدود سه بعدی، مدلی به عرض ۱۰۵، ارتفاع ۸۰ و طول (بعد سوم) ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است.

روش NATM به دو شکل کلی دیواره کناری (SD) و یا دیافراگم مرکزی (CD) اجرا می گردد. با توجه به اطلاعات موجود از پروژه تونل حکیم و استفاده از نمودار یو و چرن (۲۰۰۷) جهت انتخاب اولیه روش حفر مناسب از بین سه روش حفاری تمام مقطع، دیواره کناری و دیافراگم مرکزی، روش حفر مناسب برای تونل حکیم، روش دیواره کناری انتخاب شده است.

با افزایش گام حفاری، جابجایی ها نیز افزایش خواهند داشت. با بررسی نتایج بدست آمده از حفاری با گام های مختلف و توجه به بحث کاهش جابجایی، در عین حال افزایش نرخ پیش روی و نیز پایداری فضای حفر شده، گام حفاری حداکثر ۳ متری مناسب تشخیص داده شده است. البته در عمل تونل حکیم با گام یک متری حفاری شده است.

به منظور ارزیابی پایداری تونل حکیم، از دو روش تحلیل پایداری با استفاده از مفهوم کرنش برشی بحرانی ساکورائی و روش تحلیل سیستم نگهداری به کمک نرم افزار PCACOL استفاده گردید.

نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که تونل حکیم پایدار است. در واقع سیستم نگهداری طراحی شده جهت نگهداری آن، قابل قبول بوده و پایداری تونل را فراهم می‌نماید.

فصل پنجم:

بررسی تاثیر

توالی و فاصله حفاری جبهه کارهای تونل

برنشت سطح زمین

۵-۱- مقدمه

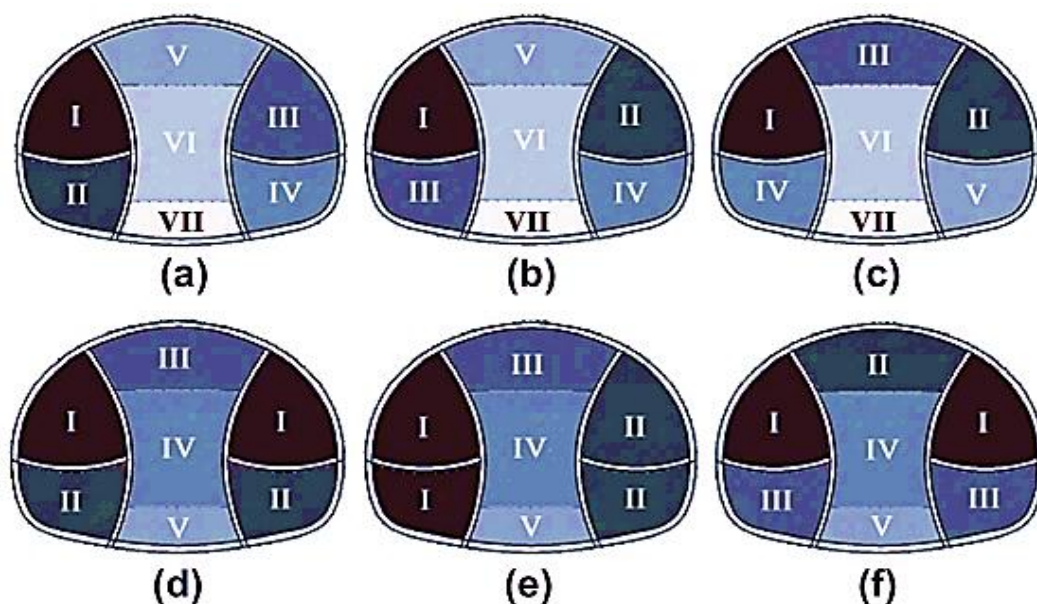
مطابق با آنچه در فصول قبل بیان گردید، تونل دوقلوی حکیم به روش حفاری چندمرحله‌ای و تونل‌زنی NATM اجرا می‌گردد. در فصل پنجم مشاهده شد که حفاری چندمرحله‌ای تونل به شکل دیواره‌های کناری اجرا شده و تونل با شرایط یاد شده، پایدار می‌باشد. در این فصل، تأثیر توالی (ترتیب) حفاری بخش‌های مختلف یک تونل، بر روی نشست سطح زمین بیان می‌شود. بدین معنی که روشی انتخاب و پیشنهاد خواهد شد که در اثر استفاده از آن، کم‌ترین مقدار نشست در سطح زمین بالادست تونل، رخ دهد. مسلماً میزان فاصله حفاری جبهه‌کارهای یک تونل نیز، بر روی نشست سطح زمین تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین یکی دیگر از اهداف این فصل، انتخاب فاصله بهینه بین جبهه‌کارهای یک تونل خواهد بود.

نکته‌ای که باید در این قسمت بیان شود اینست که تونل‌های دوقلوی حکیم در عمل به صورت همزمان حفر می‌گردند. بدین معنی که همزمان با پیشروی جبهه‌کار تونل شمالی، جبهه‌کار تونل جنوبی نیز پیش می‌رود. لذا در بخش‌های ۵-۲ و ۵-۳ این فصل، فرض بر آن است که دو تونل همزمان حفاری می‌شوند و در مدل‌سازی‌های انجام گرفته توسط نرم‌افزار نیز، این نکته لحاظ گردیده است. بدین معنی که هر دو تونل به طور همزمان و به یک شکل مدل شده و کار ادامه پیدا کرده است.

همچنین می‌دانیم، علاوه بر فاصله جبهه‌کارهای درون یک تونل، فاصله حفاری بین جبهه‌کار دو تونل نیز می‌تواند بر روی شرایط مختلف منطقه تأثیرگذار بوده و به طبع مقدار نشست را کم یا زیاد نماید. لذا در بخش ۵-۴ این فصل، فاصله جبهه‌کارهای دو تونل شمالی و جنوبی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در پایان فصل نیز با مقایسه نتایج حاصل شده از مدل‌سازی و داده‌های قرائت شده توسط ابزار دقیق مورد استفاده در پروژه حکیم، اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده انجام می‌گردد.

۵-۲- انتخاب توالی حفاری مناسب

به منظور اجرای حفاری چندمرحله‌ای (SEM) با مناسب‌ترین روش، درک کامل تأثیر آن بر تونل‌زنی امری ضروری می‌باشد. بدون شک یکی از مهم‌ترین علل انتخاب بهترین توالی حفاری، کنترل مقدار نشست سطح زمین ناشی از آن است. انتخاب توالی حفاری مناسب به عواملی همچون هندسه تونل، خصوصیات خاک منطقه، آب‌های زیرزمینی و... بستگی دارد [۱۸]. تاکنون مطالعاتی نیز در این رابطه انجام شده‌است. از جمله تحقیقات باورس^۱ (۱۹۹۷)، کاراکوس و فاوول^۲ (۲۰۰۳) و فاریاس و همکاران^۳ (۲۰۰۴). در مطالعه پیش‌رو، جهت انتخاب توالی حفاری بهینه، شش نوع توالی حفاری پیشنهاد شده و پس از مدل‌سازی، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. لازم به ذکر است در مدلسازی انجام شده در این مطالعه، تونل‌های دوقلو به طور همزمان حفر می‌گردند. این شش نوع توالی در شکل ۵-۱ به نمایش گذاشته شده است.



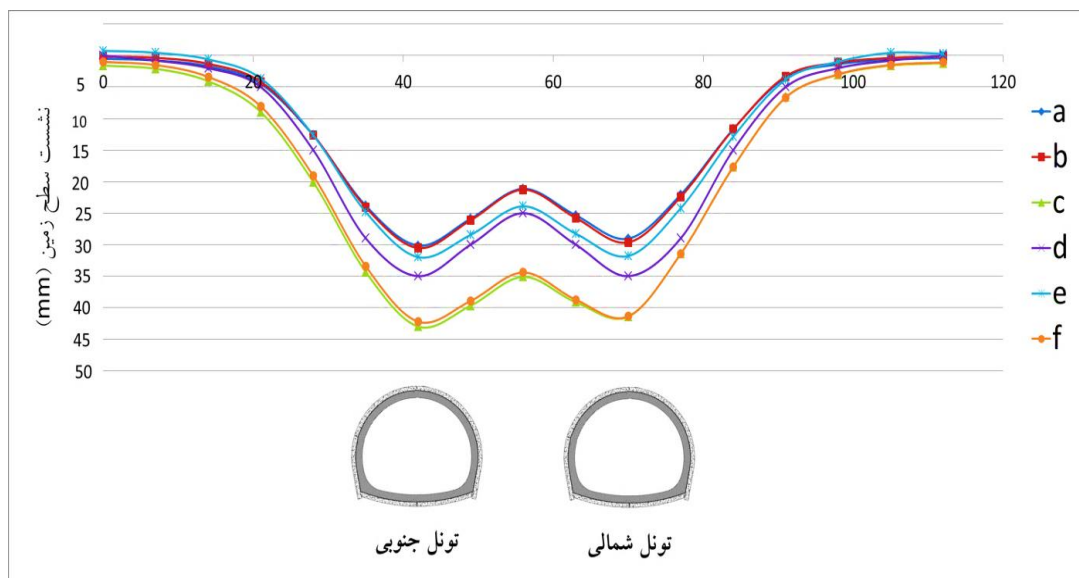
¹ Bowers

² Karakus and Fowell

³ Farias et al.

شکل ۵-۱- شش نوع توالی حفاری پیشنهادی جهت حفر مرحله‌ای تونل حکیم [۱۸].

در ادامه، اطلاعات حاصل از مدل‌سازی، استخراج و پروفیل عرضی حداکثر نشست سطح زمین در هر کدام از این مدل‌ها مطابق شکل ۵-۲ بدست آمده است. با بررسی این نمودار، به این نتیجه می‌رسیم که توالی حفاری نوع (a) کم‌ترین میزان نشست و نوع (f) بیشترین میزان را دارند. البته نشست سطح زمین مربوط به توالی حفاری نوع (b) نیز، فاصله کمی با مقدار نشست مربوط به توالی (a) دارد. از این‌رو می‌توان این نوع توالی را نیز به دلیل ایجاد میزان کم نشست سطح زمین، مناسب ارزیابی نمود. مقدار حداکثر نشست ایجاد شده (بدون تغییر) در بالای محور هر کدام از تونل‌ها با استفاده از توالی نوع (a)، برابر با ۲۹ میلی‌متر است. این میزان برای توالی نوع (b) برابر ۳۰ میلی‌متر است. سایر روش‌ها شامل توالی (e)، توالی (d)، توالی (f) و توالی (c) به ترتیب نشست‌هایی برابر با ۳۳، ۳۵، ۴۳ و ۴۴ میلی‌متر را نشان می‌دهند. این بدین معنی است که حفاری بخش بالایی و مرکزی تونل (تاج تونل) و نیز بسته شدن سریع‌تر حلقه نگهداری، بیشترین تأثیر را بر روی نشست سطح زمین خواهد داشت. لذا حفاری بخش تاج تونل در مراحل آخر حفاری، موجب کاهش نشست سطح زمین خواهد شد.



شکل ۵-۲- پروفیل عرضی نشست سطح زمین برای شش نوع توالی حفاری

لازم به ذکر است، میزان حجم حفاری می‌تواند اثر دوگانه‌ای بر روی نشست سطح زمین داشته

باشد. از یک سو با کوچک تر شدن بخش ها و کم شدن حجم حفاری، جابجایی و مقدار نشست سطح زمین کمتر می شود. ولی از سوی دیگر با این کار (کوچک تر شدن بخش های حفاری)، تعداد بخش ها تا رسیدن به حفاری کامل یک مقطع، بیشتر می شوند. این یعنی کامل شدن حلقه نگهداری یک مقطع، دیرتر انجام می شود. با این کار، در واقع از اصول روش NATM فاصله گرفته ایم، بنابراین نشست سطح زمین افزایش پیدا خواهد کرد. کامل کردن حلقه سیستم نگهداری در زمین های نرم و سست، باید هرچه سریع تر انجام گردد و تأخیر در این امر، منجر به افزایش نشست و جابجایی های بزرگ خواهد شد. می توان گفت کامل کردن هرچه سریع تر حلقه نگهداری، همراه با اتخاذ حجم حفاری بزرگتر، تأثیر مناسب تری (نشست کمتر) نسبت به اتخاذ حجم حفاری های کوچک تر به منظور محدود کردن جابجایی تاج تونل، خواهد داشت، البته به شرطی که بحث پایداری سینه کار حفاری، لحاظ شده و حاصل گردد [۱۸].

در ادامه، شکل های ۳-۵ تا ۸-۵ پروفایل های طولی نشست سطح زمین، ناشی از حفاری تونل برای شش نوع توالی حفاری را نشان می دهد که توضیح داده می شوند.

همان گونه که در شکل (۳-۵) نمایان است، حداکثر نشست سطح زمین برای توالی نوع a برابر ۲۹ میلی متر و مقدار نشست بالای سینه کار، تقریباً ۵۰٪ نشست حداکثر و برابر ۱۷ میلی متر است. با بررسی این نمودار می توان فهمید که نشست زمین در طولی برابر ۲d (دو برابر قطر معادل^۱ تونل) جلوتر از سینه کار حفاری آغاز شده و در طولی برابر با ۴d در پشت سینه کار، به حداکثر مقدار خود می رسد.

در شکل (۴-۵) مشاهده می گردد که حداکثر مقدار نشست سطح زمین برای توالی نوع b برابر ۳۰ میلی متر و مقدار نشست بالای سینه کار تقریباً برابر ۲۶ میلی متر است که معادل ۸۵٪ نشست حداکثر

^۱ با توجه به سطح مقطع تونل حکیم که برابر ۱۸۶ مترمربع است، با استفاده از رابطه مساحت دایره، جهت انتخاب معیاری برای سنجش فواصل، قطر معادل برابر ۱۵ متر در نظر گرفته شده است.

است. در این شکل مشخص است که نشست سطح زمین در طولی برابر $4d$ جلوتر از سینه کار حفاری آغاز شده و در طولی برابر با $2d$ در پشت سینه کار حفاری، به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

از شکل (۵-۵) مشخص می‌گردد که برای توالی نوع c حداکثر مقدار نشست سطح زمین برابر 44 میلی‌متر و مقدار نشست بالای سینه کار تقریباً برابر 28 میلی‌متر است که تقریباً 60% نشست حداکثر است. در این شکل، نشست سطح زمین تقریباً در $2d$ جلوتر از سینه کار حفاری آغاز گشته و در $4d$ در پشت سینه کار حفاری، به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

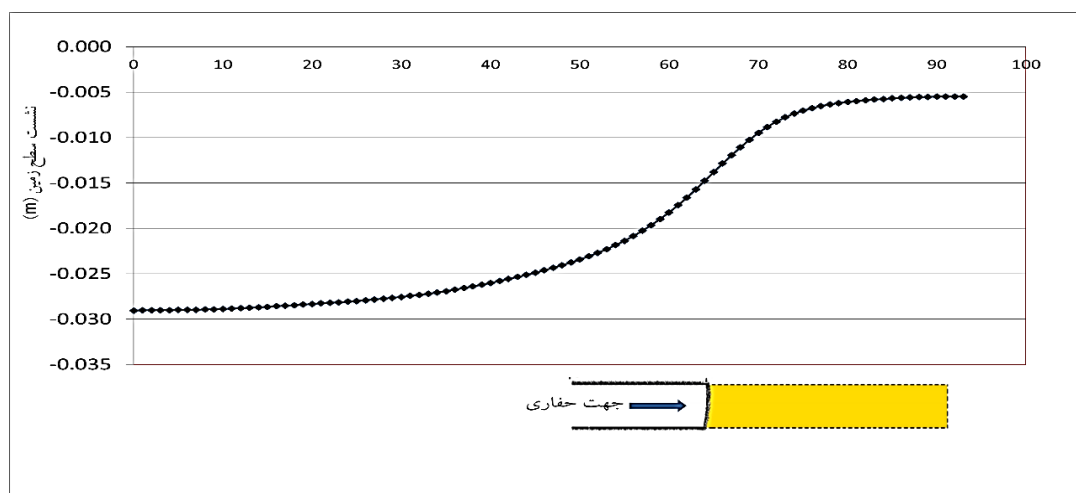
شکل (۶-۵) نمایان می‌کند که برای توالی نوع d حداکثر مقدار نشست سطح زمین برابر 35 میلی‌متر و مقدار نشست بالای سینه کار تقریباً برابر 17 میلی‌متر است که تقریباً 50% نشست حداکثر است. نشست سطح زمین در این توالی، حدوداً در طولی برابر $3d$ جلوتر از سینه کار حفاری آغاز شده و در طولی برابر با $2d$ در پشت سینه کار حفاری، به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

همان‌گونه که در شکل (۷-۵) نمایان است، حداکثر مقدار نشست سطح زمین برای توالی نوع e برابر 33 میلی‌متر و مقدار نشست بالای سینه کار برای این توالی، تقریباً 80% نشست حداکثر و برابر 27 میلی‌متر است. در این شکل مشخص است که نشست سطح زمین در طولی برابر $4d$ جلوتر از سینه کار حفاری آغاز شده و در طولی برابر با $1d$ در پشت سینه کار حفاری، به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

در شکل (۸-۵) مشاهده می‌گردد که حداکثر مقدار نشست سطح زمین برای توالی نوع f برابر 43 میلی‌متر و مقدار نشست بالای سینه کار تقریباً برابر 24 میلی‌متر است که حدوداً معادل 50% نشست حداکثر است. در این شکل، نشست سطح زمین تقریباً در $4d$ جلوتر از سینه کار حفاری آغاز گشته و در $3d$ در پشت سینه کار حفاری، به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

بر اساس این اشکال نیز، روش‌های حفاری (a) و (b) را می‌توان مناسب‌ترین نوع توالی حفاری جهت کم‌ترین مقدار حداکثر نشست سطح زمین دانست. لازم به ذکر است مقادیر مختلفی برای فاصله

طولی ایجاد نشست زمین در جلو و پشت جبهه کار توسط محققین در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است. به عنوان مثال داساری و همکارانش^۱ (۱۹۹۶) اظهار کرده‌اند که نشست سطح زمین در فاصله ۲d پشت سینه کار ثابت شده و درواقع به حداکثر خود می‌رسد [۴۳]. این در حالی است که ورمیر و همکارانش^۲ (۲۰۰۲) این مقدار را ۵d گزارش کرده‌اند [۴۴]. نتیجه دیگری که از شکل‌های ۵-۳ تا ۵-۸ می‌توان برداشت کرد این است که نسبت مقدار نشست سطح زمین در بالای سینه کار به مقدار حداکثر نشست سطح زمین، در اکثر موارد حدوداً برابر ۵۰٪ می‌باشد. این نتیجه تطابق خوبی با روابط تجربی ارائه شده توسط آتول و وودمن^۳ (۱۹۸۲) دارد [۴۵]. مطابق با آنچه بیان شد، نتایج حاصل از مدل‌سازی در این تحقیق، با نظر داساری و همکارانش نیز تطابق نسبی دارد.

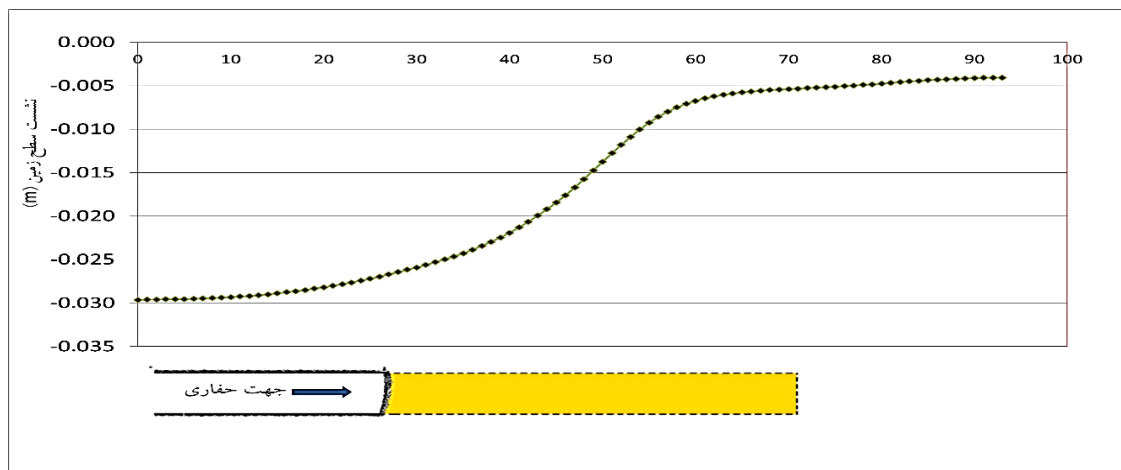


شکل ۵-۳- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع a

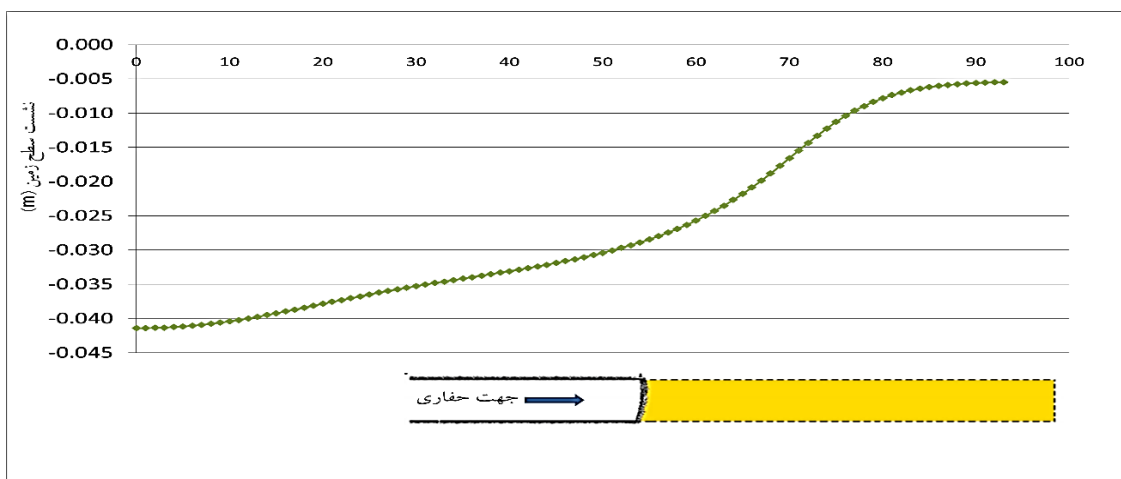
¹ Desari et al.

² Vermeer et al.

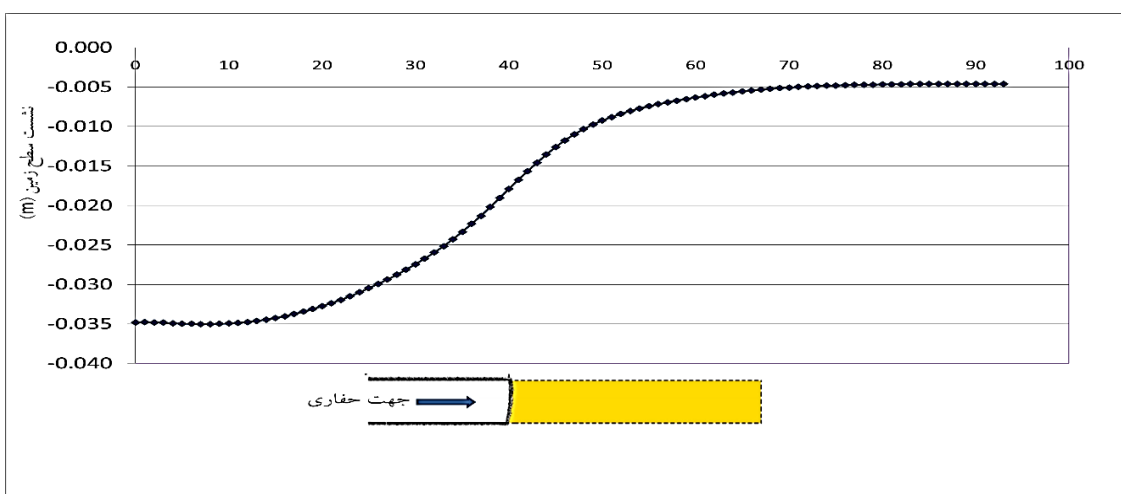
³ Attewell and Woodman



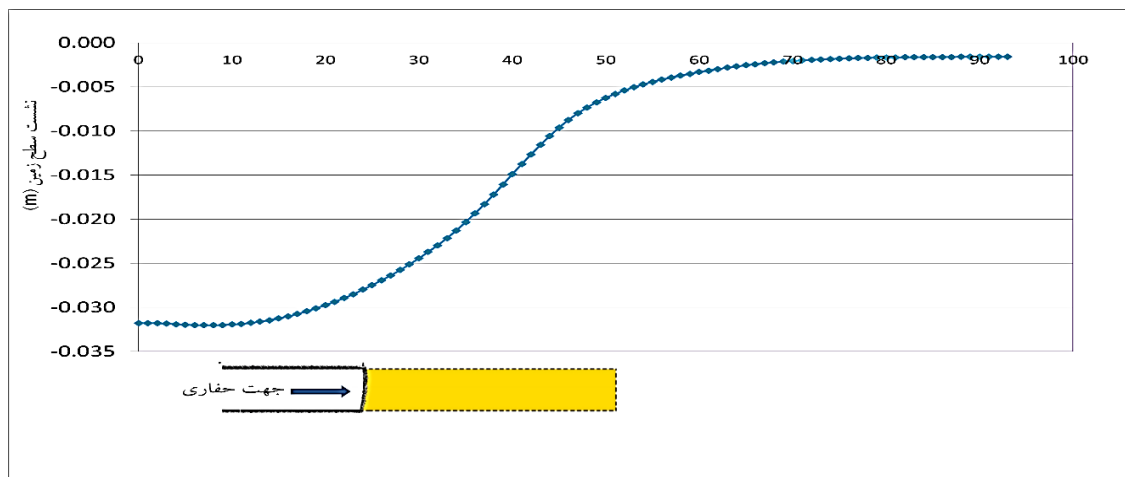
شکل ۴-۵- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع b



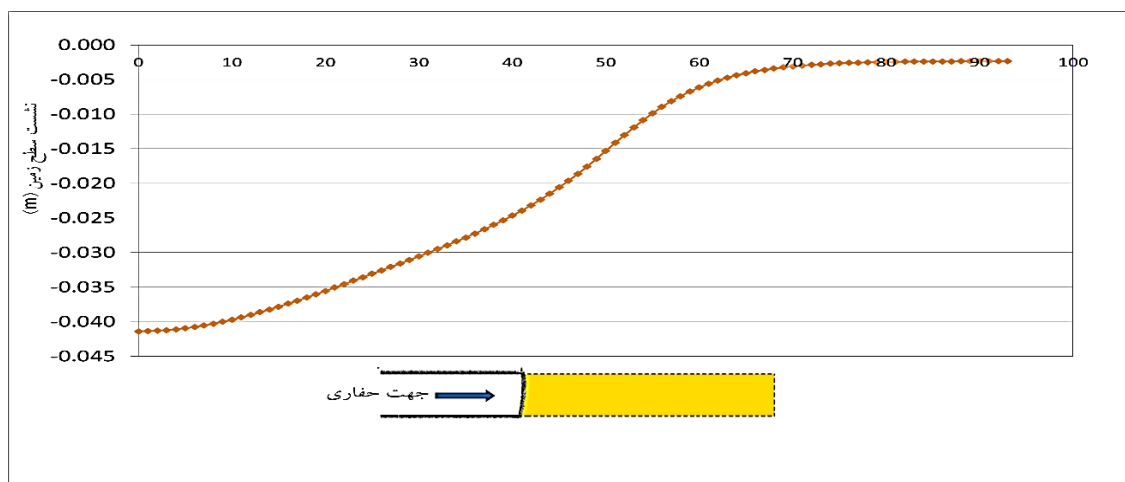
شکل ۵-۵- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع c



شکل ۶-۵- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع d



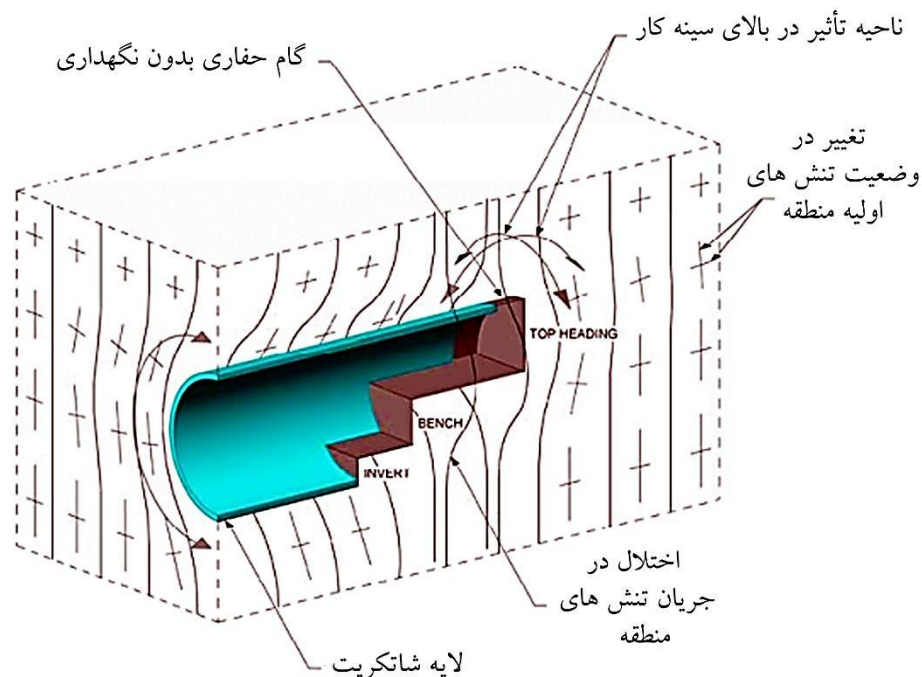
شکل ۵-۷- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع e



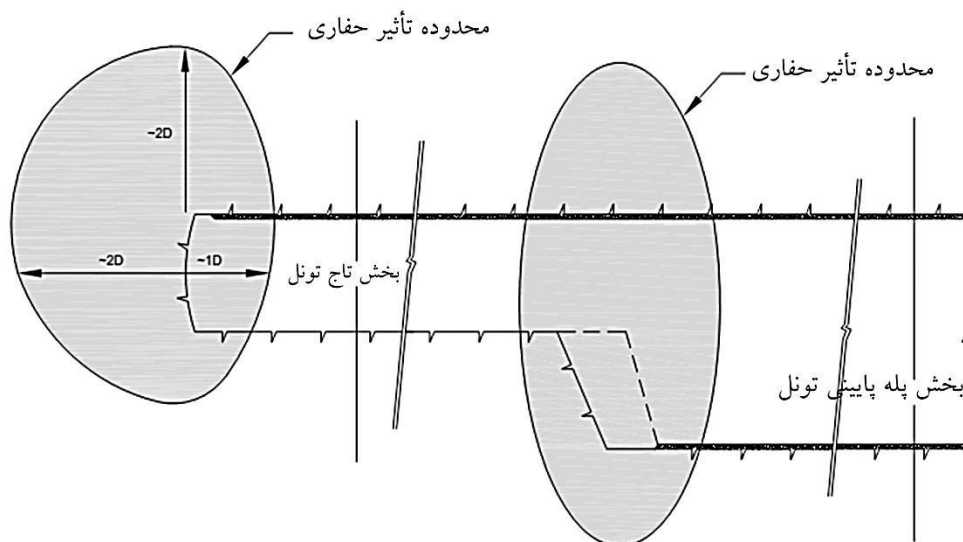
شکل ۵-۸- پروفایل طولی نشست سطح زمین برای توالی حفاری نوع f

۵-۳- انتخاب فاصله حفاری بهینه بین جبهه کارهای داخلی یک تونل

با حفر یک تونل، تنش‌های اولیه موجود در یک منطقه دچار اختلال می‌شوند. محدوده این اختلال همانند یک بیضی در اطراف سینه کار تونل شکل می‌گیرد (شکل ۵-۹). گستردگی این محدوده به عواملی همچون خصوصیات زمین، فاصله مراحل مختلف حفاری و... بستگی دارد. مطابق شکل ۵-۱۰، این محدوده اختلال (محدوده تأثیر) در فاصله تقریباً ۲d در جلو و بالای سینه کار شروع می‌شود [۵].



شکل ۵-۹- نمایی از تأثیر تونل زنی در جریان تنش های منطقه- برگرفته از [۵] با اصلاح.

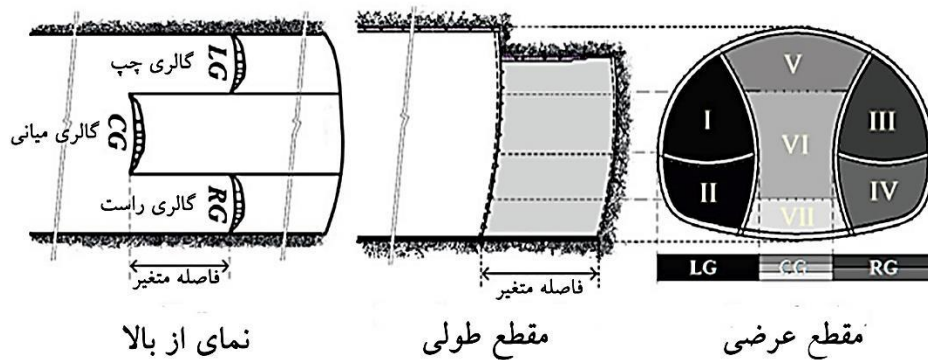


شکل ۵-۱۰- تونل سازی مرحله ای و محدوده تأثیر حفاری جبهه کارها- برگرفته از [۵] با اصلاح.

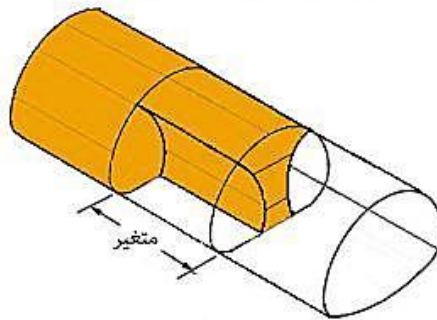
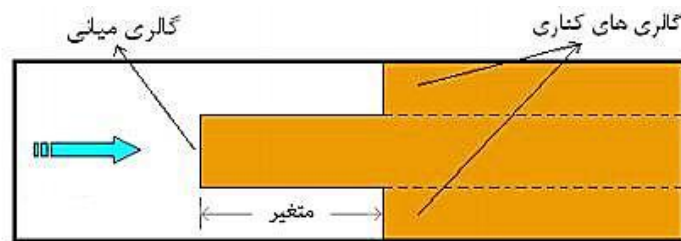
در صورتی که حفاری تونل به شکل تمام مقطع انجام شود، محدوده تأثیر آن و در نتیجه نشست سطح زمین، بسیار بیشتر از حالتی است که مقطع تونل به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم و با فاصله بهینه، حفاری و اجرا گردند (روش حفاری مرحله‌ای). به منظور کاهش محدوده تأثیر حفاری، تا حد امکان باید، بخش‌های حفاری تونل را کوچک‌تر در نظر گرفت. این امر با توجه به اندازه تونل و کیفیت زمین می‌تواند محقق شود. اگر فاصله جبهه‌کارهای حفاری تونل که به ترتیب و بعد از یکدیگر حفر می‌شوند با هم تفاوت داشته باشند، باعث تداخل محدوده‌های تأثیر این جبهه‌کارها باهم شده و منجر به افزایش جابجایی‌ها و نشست سطح زمین خواهد شد. بنابراین این فاصله باید بین جبهه‌کارهای مختلف حفاری باقی بماند تا مانع تداخل محدوده‌های تأثیر باهم گردد.

از سویی دیگر، در روش حفاری مرحله‌ای باید هرچه سریع‌تر حلقه سیستم نگهداری تمام مقطع تونل، تکمیل شود تا از بروز جابجایی‌ها و در پی آن، افزایش نشست سطح زمین جلوگیری گردد. می‌توان نتیجه گرفت که فاصله بهینه جبهه‌کارهای داخلی یک تونل، فاصله‌ایست که نه آنقدر کم باشد که تداخل محدوده‌ها ایجاد شود و نه آنقدر زیاد که تکمیل حلقه نگهداری تونل بیش از حد به تأخیر بیفتد [۱۸].

در این مطالعه به منظور انتخاب فاصله بهینه جبهه‌کارهای داخلی یک تونل، بدین شکل عمل شده‌است که در فرآیند اول، مطابق شکل ۵-۱۱، بخش‌های کناری سمت راست و چپ تونل با گام حفاری یک متر و به شکل همزمان پیش‌روی می‌کنند. این میزان پیش‌روی در فواصل $5 m = \frac{1}{3}d$ ، $10 m = \frac{2}{3}d$ ، $15 m = 1d$ ، $20 m = \frac{4}{3}d$ ، $25 m = \frac{5}{3}d$ و $30 m = 2d$ از گالری وسط انجام می‌شود. در واقع فاصله حفاری گالری‌های کناری با گالری وسط از ۵ متر تا ۳۰ متر متغیر در نظر گرفته شده و تأثیر این تغییر فاصله بر روی نشست سطح زمین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (شکل ۵-۱۱ و ۵-۱۲).



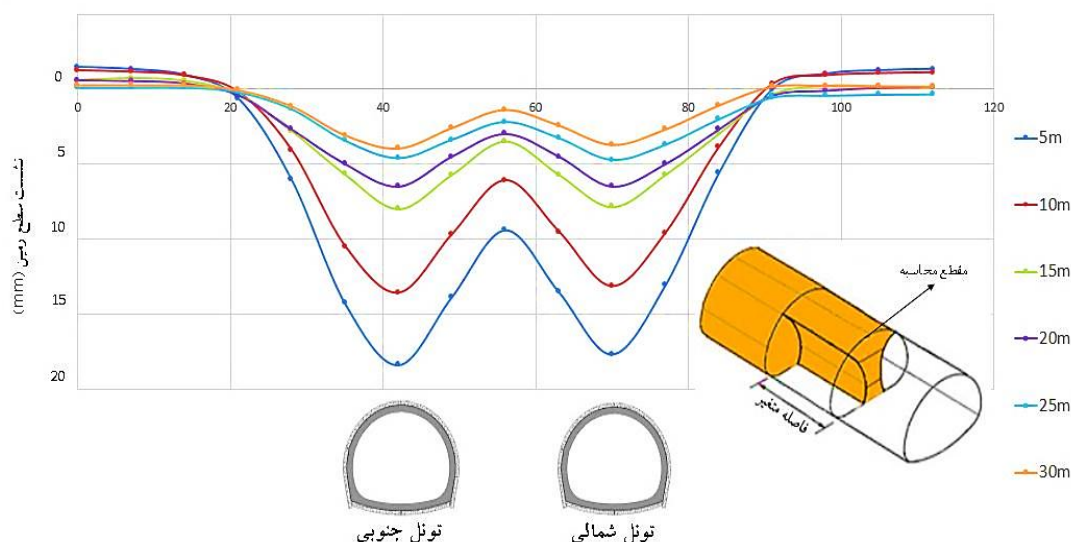
شکل ۵-۱۱- مقاطع عرضی و طولی، جهت محاسبه فاصله گالری کناری با مرکزی- برگرفته از [۱۸] با اصلاح.



شکل ۵-۱۲- نحوه مدل سازی تعیین فاصله بهینه جبهه کار گالری مرکزی و کناری از هم- برگرفته از [۱۹] با اصلاح.

نتایج این فرآیند در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. از این شکل که نمایانگر پروفیل عرضی نشست سطح زمین است، می توان فهمید هرچقدر فاصله گالری های کناری از گالری میانی بیشتر شود، تداخل محدوده های تأثیر کمتر شده، لذا مقدار نشست کمتر خواهد شد. می توان گفت فاصله

حفاری گالری کناری با گالری مرکزی باید حداقل برابر یک قطر تونل (در این پروژه برابر قطر معادل و ۱۵ متر) در نظر گرفته شود. این نتیجه با اظهار نظر یو^۱ (۲۰۰۹) در این باره سازگاری دارد. وی در گزارش خود گفته است: بهترین عملکرد تونل زنی را می توان در هنگام حفظ فاصله حفاری بیشتر از یک قطر تونل به دست آورد [۱۷]. با جمع بندی این مطلب و اینکه حلقه سیستم نگهداری تونل باید هرچه سریع تر تکمیل گردد، به منظور حصول کم ترین نشست، فاصله بهینه بین گالری های کناری و میانی حداقل ۱۵ متر پیشنهاد می شود. در روند اجرا و حفاری پروژه حکیم نیز، این فاصله برابر ۱۵ متر در نظر گرفته شده است.

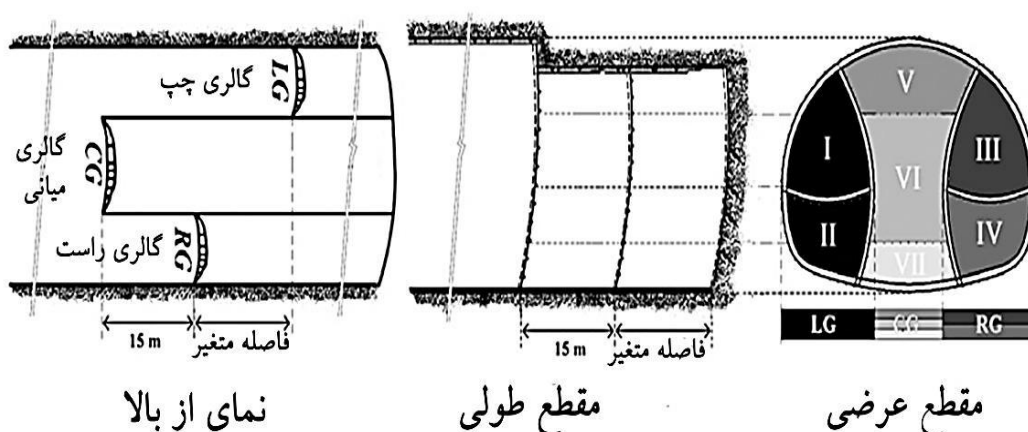


شکل ۵-۱۳- پروفیل عرضی نشست ناشی از حفاری با فاصله مختلف بین گالری کناری و میانی

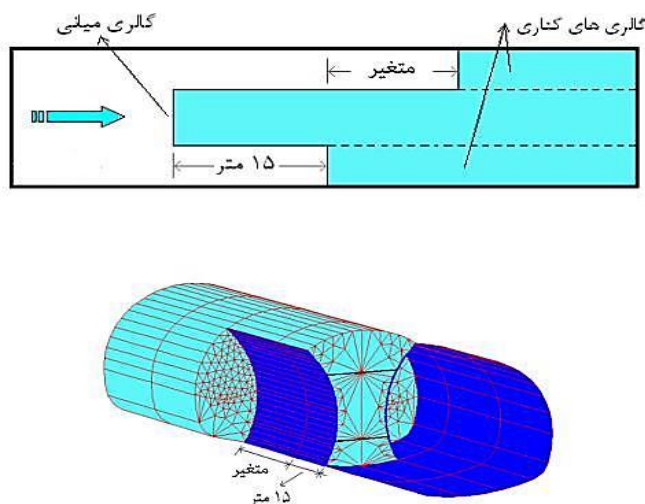
به منظور جلوگیری از تداخل محدوده تأثیر حفاری بخش های مختلف با هم، بهتر است گالری های کناری سمت چپ و راست جداگانه و با فاصله از هم حفاری گردند. برای پیدا کردن این فاصله (فاصله حفاری گالری چپ و راست) فرآیند جدیدی در نظر گرفته شده است. در این فرآیند، عملیات حفاری گالری های چپ، راست و میانی مدل سازی می گردد. فاصله حفاری گالری های چپ و راست با مقادیر

^۱ Yoo

گرفته می‌شوند. فاصله گالری‌های کناری و میانی نیز در فرآیند قبلی و به اندازه ۱۵ متر تعیین گردید که در این فرآیند نیز اعمال می‌شود (شکل ۵-۱۴ و ۵-۱۵).



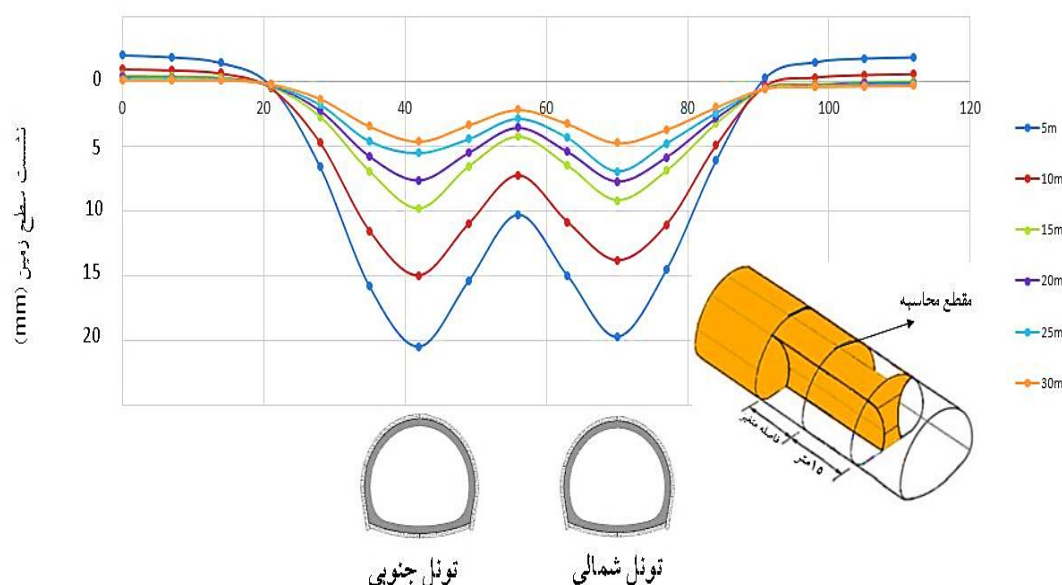
شکل ۵-۱۴- مقاطع عرضی و طولی حفاری جهت محاسبه فاصله گالری کناری و مرکزی- برگرفته از [۱۸] با اصلاح.



شکل ۵-۱۵- نحوه مدل‌سازی تعیین فاصله بهینه جبهه کار گالری‌ها از هم- برگرفته از [۱۹] با اصلاح.

نتایج این فرآیند در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده‌است. از این شکل که نمایان‌گر پروفیل عرضی نشست سطح زمین است، می‌توان فهمید هرچقدر فاصله گالری‌های کناری از هم بیشتر شود، تداخل

محدوده‌های تأثیر کم‌تر شده، لذا مقدار نشست کمتر خواهد شد.



شکل ۵-۱۶- پروفیل عرضی نشست ناشی از حفاری با فاصله مختلف بین گالری‌های کناری

با توجه به مطالب پیشین و جمع‌بندی آن‌ها و رعایت این نکته که حلقه سیستم نگهداری تونل باید هرچه سریع‌تر تکمیل گردد، به منظور حصول کم‌ترین نشست، فاصله بهینه بین گالری‌های کناری حداقل ۱۵ متر پیشنهاد می‌شود. این فاصله می‌تواند بیشتر از این مقدار هم در نظر گرفته شود البته به شرطی که مباحث مربوط به نگهداری لحاظ گردد. در روند اجرا و حفاری پروژه حکیم، این فاصله برابر ۲۵ متر در نظر گرفته شده است.

۵-۴- انتخاب فاصله حفاری تونل‌های دوقلو از هم

پروژه بزرگراهی حکیم شامل دو تونل رفت و برگشت می‌باشد. بدون شک حفاری یک تونل و نتایج بدست آمده از آن، با شرایطی که دو تونل در مجاورت یکدیگر حفر می‌شوند، متفاوت خواهد بود. از این رو مبحث دیگری تحت عنوان اثر متقابل حفاری دو تونل در مجاورت یکدیگر مطرح می‌شود. در خصوص بررسی میزان تأثیر فواصل مختلف تأخیر بین دو جبهه کار در تونل‌های دوقلو بر

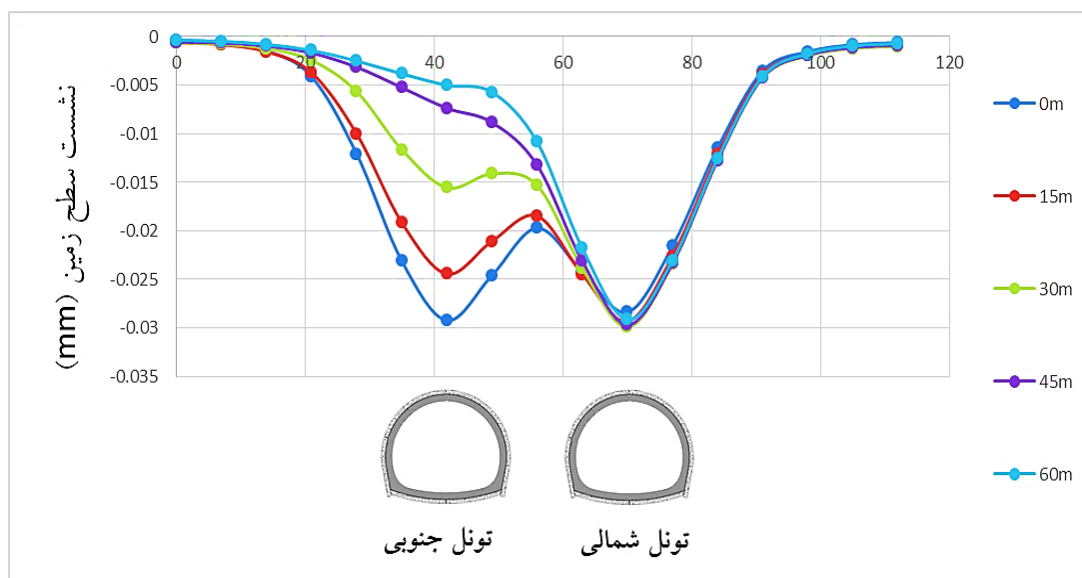
نشست سطح زمین در گذشته تحقیقاتی صورت گرفته است. از جمله مروئه و شهرور^۱ (۲۰۰۴) با استفاده از یک مدل اجزای محدود سه بعدی، اثر اندرکنش بین تونل‌های دوقلو در زمین‌های نرم را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۴۶]. پاچین و براسینگ^۲ (۲۰۰۵) نیز در مطالعه‌ای، به اثرات متقابل حفاری دو تونل به قطر ۶/۵ متر در رتردام هلند پرداخته‌اند. همچنین کارتر و اسمال^۳ (۲۰۰۸) نیز با استفاده از روش اجزای محدود سه بعدی به اثرات حفاری یک تونل جدید بر سیستم نگهدارنده موجود در یک تونل مجاور را با توجه به فاصله جبهه کارهای دو تونل مورد بررسی قرار داده‌اند [۴۷][۴۸]. با توجه به مطالبی که در بخش‌های قبل در مورد هندسه مدل‌سازی تونل حکیم بیان شد، در این بخش به تأثیر فاصله جبهه کار دو تونل از یکدیگر بر روی نشست سطح زمین خواهیم پرداخت.

برای بررسی تأثیر فاصله جبهه کارهای دو تونل دوقلو بر روی نشست سطح زمین، لازم است تحلیل‌هایی با فواصل مختلف صورت پذیرد. مطابق با مطالعات انجام شده قبلی، محدوده تأثیر جبهه کار در جلو و پشت آن برای دو تونلی که همزمان حفر می‌شوند به ترتیب حدوداً برابر $2d$ و $4d$ می‌باشد [۴۹]. در این مطالعه تونل‌های دوقلوی حکیم در فواصل جبهه کاری صفر (حفر همزمان دو تونل شمالی و جنوبی)، $1d = 15\text{ m}$ (حفر تونل شمالی آغاز شده، بعد از ۱۵ متر، حفر تونل جنوبی شروع می‌شود)، $2d = 30\text{ m}$ ، $3d = 45\text{ m}$ و $4d = 60\text{ m}$ در مدل‌های جداگانه حفاری شده‌اند.

¹ Mroueh & Shahrour

² Pachin & Brasinga

³ J.C. Small & J.P. Carter



شکل ۵-۱۷- پروفیل عرضی نشست زمین با فاصله‌های مختلف جبهه کارهای دو تونل از هم

با توجه به شکل ۵-۱۷ می‌توان نتایج زیر را بیان نمود:

- با افزایش فاصله حفاری دو تونل از هم، تأثیر دو تونل روی یکدیگر کم‌تر می‌شود.
- در فاصله‌های بیشتر از $3d$ تأثیر حفاری تونل اول بر تونل دوم را می‌توان نادیده گرفت. به عبارت دیگر می‌توان گفت اگر دو تونل با فاصله بیش‌تر از $3d$ حفر گردند، تقریباً مانند زمانی است که به تنهایی حفاری می‌شوند.
- افزایش فاصله حفاری دو تونل با یکدیگر تأثیر چندانی بر روی حداکثر نشست ایجاد شده در سطح زمین نخواهد داشت. نشست سطح زمین در فاصله $\pm 4d$ از خط مرکزی بین دو تونل ادامه پیدا کرده و تقریباً به صفر نزدیک می‌گردد. محل قرارگیری نقطه عطف نمودارها تقریباً برابر با $\pm 2/5d$ از خط مرکزی بین دو تونل می‌باشد.

۵-۵- رفتارنگاری و اعتبارسنجی

با استفاده از اطلاعات حاصل از ابزاربندی و رفتارنگاری، می‌توان به رفتار زمین و سازه‌های سطحی و زیرسطحی موجود در حین عملیات اجرایی پروژه‌های عمرانی پی برد. این امر در مورد پروژه‌های شهری اهمیت خاصی دارد. به کمک ابزار دقیق، کلیه عوامل مؤثر در طراحی، احداث و

ایمینی فضاهاى زیرزمینی، تحت کنترل قرار می گیرد تا ضمن پیشگیری از بروز خطرات احتمالی، تغییراتی نیز در طرح اولیه ایجاد شود؛ به عبارت دیگر، رفتار زمین در منطقه، مکمل و تصحیح کننده طراحی نظری است (یکی از اصول روش NATM)، به طوری که درصدی از هزینه های پروژه به این امر اختصاص می یابد. یک برنامه رفتارنگاری، شامل انتخاب ابزار مناسب، آرایش ایستگاه های ابزار دقیق، نصب و به کارگیری ابزار دقیق، قرائت، پردازش و تفسیر داده است.

۵-۵-۱- ابزار دقیق استفاده شده در تونل حکیم

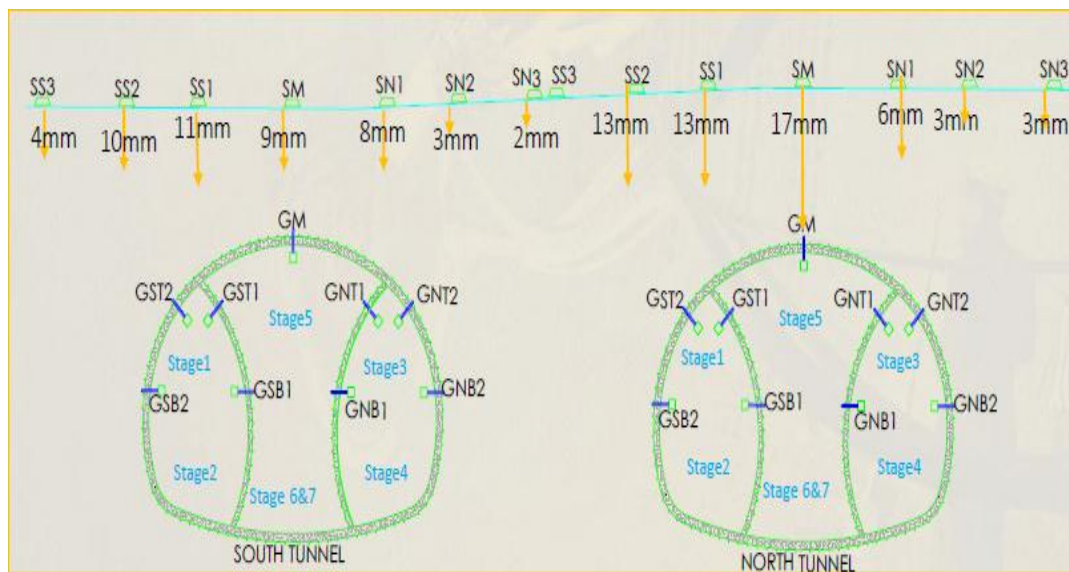
• ابزارهای سطحی

۱. پین نشست سنجی: در هر مقطع رفتارنگاری ۷ عدد از این نوع پین به ترتیب یک عدد در آکس تونل، سه عدد در قسمت شمال و سه عدد در جنوب مقطع بکار رفته است. فواصل بین این مقاطع ۲۰ متر است. پین شماره یک در محور تونل با نام SM، و سه پین در سمت راست و در بخش شمالی به نام های SN1 تا SN3 و در بخش جنوبی با نام های SS1 تا SS3 به فواصل ۵ متر از هم نصب شده اند (شکل ۵-۱۸).

۲. کشیدگی سنج: از این نوع پین در فواصل ۲۰ متری از هم و در آکس تونل استفاده شده است. رادهای این ابزار تا عمق ۱ متری از تاج تونل، ۲ متری از سطح زمین و مابین این دو تراز قرار گرفته است.

• ابزارهای زیرسطحی

پین ژئودتیک: از این نوع پین در هر مقطع رفتارنگاری ۹ عدد بکاررفته است (شکل ۵-۱۹). نحوه جانمایی ابزارهای فوق الذکر در ادامه نشان داده شده است.



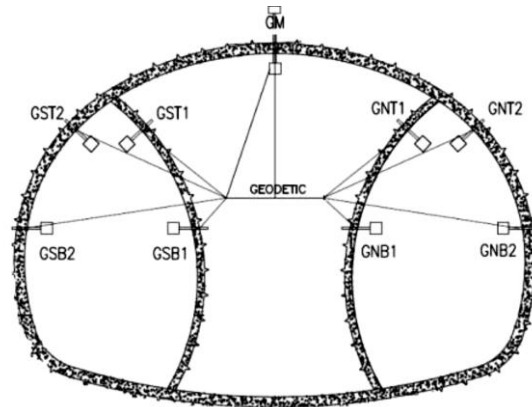
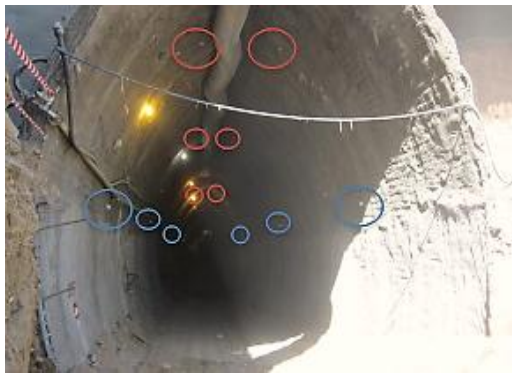
(الف)



(ب)

شکل ۵-۱۸ - نحوه جانمایی پین‌های نشست‌سنج مورد استفاده در پروژه حکیم [۴].

(الف) مقطع عرضی، (ب) مقطع طولی (نما از بالا)



شکل ۵-۱۹- نحوه جانمایی پین‌های ژئودتیک در پروژه حکیم [۴][۵۰].

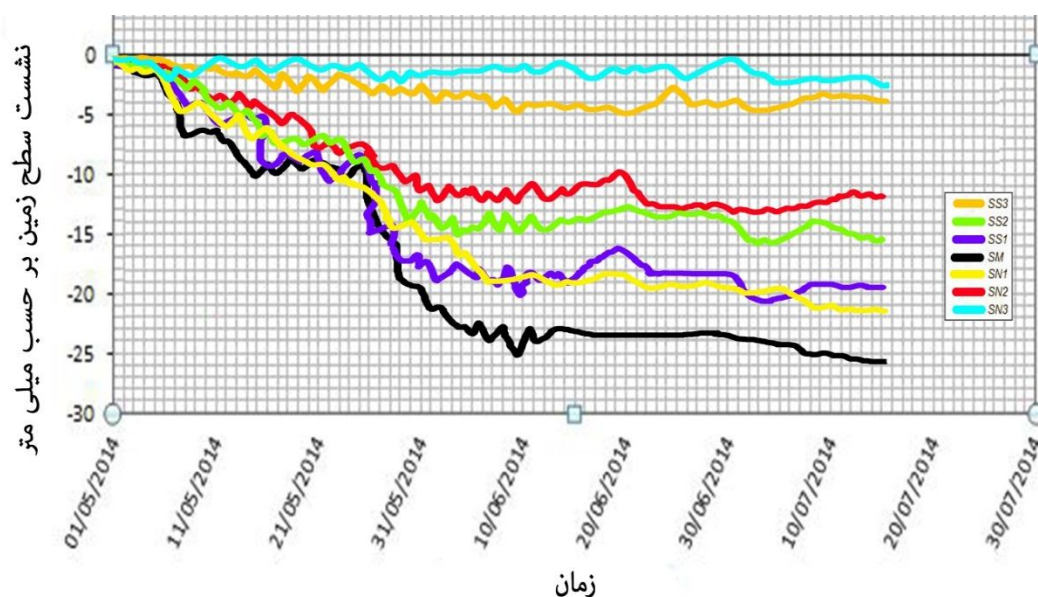
۵-۵-۲- اعتبارسنجی مدل عددی

با توجه به آنچه تاکنون مورد بررسی قرار گرفته است، تونل‌های دوقلوی حکیم به طول تقریبی هرکدام یک کیلومتر به روش حفاری مرحله‌ای با استفاده از تونل‌زنی NATM حفاری شده‌اند. مطابق شکل ۵-۲۰، این تونل‌ها از متر ۱۰۰۰ تا متر ۲۱۰۳ شمالی و جنوبی شماره‌گذاری شده‌اند. محدوده در نظر گرفته شده جهت مدل‌سازی، محدوده تقریبی از متر ۱۴۵۰ تا ۱۵۵۰ می‌باشد. ارتفاع روباره در این محدوده ۱۳ متر و فاصله دو تونل تقریباً ثابت و برابر با ۱۰ متر می‌باشد. طبق اطلاعات ارائه شده در بخش فرآیند مدل‌سازی (۴-۵-۱)، سعی شده است تا حد امکان، مدل عددی ساخته شده با این مقادیر همخوانی کامل داشته باشد.



شکل ۵-۲۰- شماره گذاری تونل‌های دوقلوی حکیم از متر ۱۰۰۰ تا ۲۱۰۳ [۴].

نتایج قرائت ابزار دقیق نصب شده در ایستگاه شماره NS1550 در شکل ۵-۲۱ ارائه شده است.

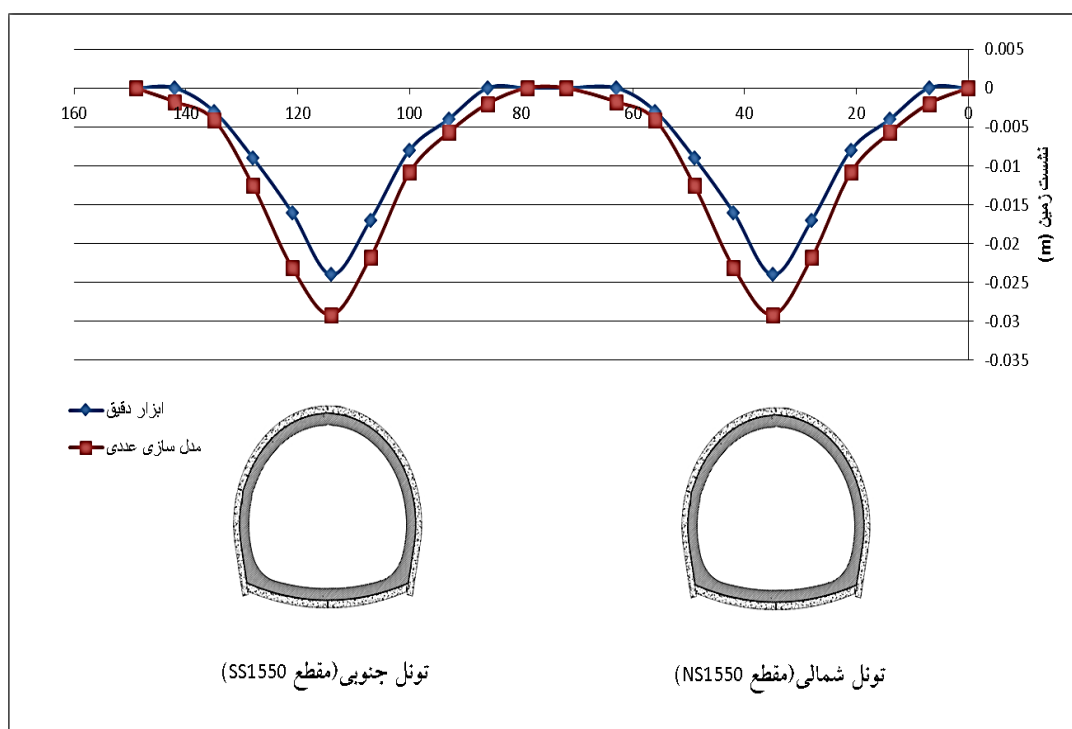


شکل ۵-۲۱- نتایج ابزار دقیق ایستگاه شماره NS ۱۵۵۰

نمودار نتایج ابزار دقیق در این ایستگاه و نتایج مدل‌سازی عددی، در شکل ۵-۲۲ آمده است.

همان‌گونه که در این نمودار مشخص است، بیشترین مقدار نشست سطح زمین برابر ۲۴ میلی‌متر و

مربوط به پین SM که دقیقاً در بالای محور تونل قرار دارد، می باشد. مقدار نشست در این مقطع با مقدار نشست محاسبه شده توسط مدل سازی عددی با نرم افزار Plaxis که برابر با ۲۹ میلی متر است تقریباً همخوانی دارد. این بدین معنی است که می توان مدل سازی عددی انجام شده را معتبر دانست.



شکل ۵-۲۲- مقایسه نتایج بدست آمده از ابزار دقیق و مدل سازی عددی تونل حکیم.

۵-۶- جمع بندی

در این فصل، به بیان تأثیر توالی (ترتیب) حفاری بخش های مختلف یک تونل، بر روی نشست سطح زمین پرداخته شد. بدین معنی که روشی انتخاب و پیشنهاد گردید که در اثر استفاده از آن، کمترین مقدار نشست در سطح زمین بالادست تونل، رخ دهد. طبق نتایج به دست آمده، توالی حفاری نوع a با میزان ۲۹ میلی متر، کمترین مقدار نشست سطح زمین را ایجاد می نمود.

مسلماً میزان فاصله حفاری جبهه کارهای یک تونل نیز، بر روی نشست سطح زمین تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین یکی دیگر از نتایج این فصل، انتخاب فاصله مناسب بین جبهه کارهای یک تونل بود. بر اساس اطلاعات بدست آمده، فاصله مناسب جبهه کارهای داخلی تونل حکیم باید حداقل ۱۵ متر در

نظر گرفته شود.

همچنین مشخص شد علاوه بر فاصله جبهه کارهای درون یک تونل، فاصله حفاری بین جبهه کار دو تونل نیز می تواند بر روی شرایط مختلف منطقه تأثیرگذار باشد. لذا در این فصل به این مهم نیز اشاره شد و پیشنهاد گردید که دو تونل، حداقل با فاصله ای برابر با ۳d از هم حفاری گردند. در پایان فصل نیز با مقایسه نتایج حاصل شده از مدل سازی و داده های قرائت شده توسط ابزار دقیق مورد استفاده در پروژه حکیم، اعتبارسنجی مدل سازی انجام شده و مشاهده گردید که نتایج حاصله انطباق خوبی با هم دارند.

فصل ششم:

جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- جمع بندی و نتیجه گیری

در فصل اول این پایان‌نامه، ابتدا به بیان کلیات مطالعه پیش رو پرداخته شد. بیان مشخصات عمومی پروژه حکیم، دلایل استفاده از تونل در عبور از پارک جنگلی چیتگر و ارجحیت آن نسبت به احداث روگذر، ضرورت انجام تحقیق، سوابق مطالعات انجام شده، اهداف پایان‌نامه و روش انجام آن، در این فصل مورد اشاره و بررسی قرار گرفت. در نهایت، ساختار کلی مطالعه انجام شده ترسیم گردید.

فصل دوم پایان‌نامه پیش رو را می‌توان بیان ادبیات فنی و مروری بر تونل‌سازی بزرگ‌مقطع در مناطق شهری دانست. در این فصل ابتدا به حفاری تونل‌های بزرگ‌مقطع در زمین‌های سست شهری و روش‌های مختلف سنتی و جدید آن پرداخته شد. همانطور که بیان گردید، روش جدید تونل‌سازی اتریشی (NATM)، یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین روش‌های حفاری در مناطق شهری جهت اجرای تونل‌های بزرگ‌مقطع است. در ادامه فصل دوم، بررسی این روش تونل‌سازی با اشاره به مفاهیم و اصول کلی NATM، اجرای تونل با این روش، نگهداری و پیش‌نگهداری در این روش و رفتارسنجی تونل در حفاری با این روش انجام گردید. در پایان این فصل نیز، نشست سطح زمین و تعدادی از روش‌های مختلف تجربی و تحلیلی برآورد نشست، بیان شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پروژه حکیم، در فصل سوم بیان شد. زمین‌شناسی عمومی منطقه، زمین‌شناسی مسیر تونل حکیم، شرایط و تراز آب‌های زیرزمینی محدوده پروژه، کاوش‌های صحرایی و آزمون‌های آزمایشگاهی در این فصل بیان گردید. در پایان فصل سوم واحدهای زمین‌شناسی مهندسی محدوده پروژه و سپس پارامترهای ژئوتکنیکی پروژه با استفاده از اطلاعات موجود از پروژه بیان گردید.

فصل چهارم، فصل مدل‌سازی عددی و تحلیل پایداری تونل حکیم است. در این فصل ابتدا روش‌های مختلف تحلیل و طراحی فضاهای زیرزمینی بیان شد. انتخاب و معرفی نرم‌افزار PLAXIS 3D Tunnel، طراحی سیستم نگهداری مرکب با استفاده از روش مقطع معادل، مدل‌سازی تونل حکیم و فرآیند انجام آن در این فصل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اطلاعات موجود از پروژه تونل حکیم و استفاده از نمودار یو و چرن (۲۰۰۷) جهت انتخاب روش حفر مناسب از بین سه روش حفاری تمام مقطع، دیواره کناری و دیافراگم مرکزی، روش حفر مناسب برای تونل حکیم، روش دیواره کناری انتخاب گردید. در ادامه با بررسی نتایج بدست آمده از حفاری با گام‌های مختلف و توجه به بحث کاهش جابجایی، در عین حال افزایش نرخ پیش‌روی و نیز پایداری فضای حفر شده، گام حفاری حداکثر ۳ متری مناسب تشخیص داده شد. در حالی که در عمل این گام برابر یک متر در نظر گرفته شده است. در پایان فصل چهارم، به منظور ارزیابی پایداری تونل حکیم، از دو روش تحلیل پایداری با استفاده از مفهوم کرنش برشی بحرانی ساکورائی و روش تحلیل سیستم نگهداری به کمک نرم‌افزار PCACOL استفاده گردید. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که تونل حکیم پایدار است. در واقع سیستم نگهداری طراحی شده جهت نگهداری آن، قابل قبول بوده و پایداری تونل را فراهم می‌نماید.

در فصل پنجم این مطالعه، به سؤالات زیر پاسخ داده شد: توالی حفاری تونل چه ارتباطی با میزان نشست سطح زمین دارد؟ بهترین ترتیب حفاری برای بهینه شدن میزان نشست سطح زمین چه ترتیبی خواهد بود؟ فاصله جبهه‌کارها در بخش‌های مختلف حفاری در یک تونل و نیز بین دو تونل چه مقدار باید باشد تا بهینه‌ترین مقدار نشست حاصل شود؟

طبق نتایج به دست آمده، توالی حفاری نوع a کم‌ترین مقدار نشست سطح زمین را ایجاد می‌نمود. یکی دیگر از نتایج این فصل، انتخاب فاصله بهینه بین جبهه‌کارهای یک تونل بود. بر اساس اطلاعات بدست آمده، فاصله بهینه جبهه‌کارهای داخلی تونل حکیم باید حداقل ۱۵ متر معادل ۱d در نظر گرفته شود. همچنین بیان شد که علاوه بر فاصله جبهه‌کارهای درون یک تونل، فاصله حفاری بین

جبهه‌کار دو تونل نیز می‌تواند بر روی شرایط مختلف منطقه تأثیرگذار باشد و لذا در این فصل به این مهم نیز اشاره شد و پیشنهاد گردید که دو تونل، حداقل با فاصله‌ای برابر با $3d$ از هم حفاری گردند. در پایان فصل نیز با مقایسه نتایج حاصل شده از مدل‌سازی و داده‌های قرائت شده توسط ابزار دقیق مورد استفاده در پروژه حکیم، اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده و مشخص گردید که نتایج حاصله انطباق خوبی با هم دارند.

۶-۲- پیشنهادات

طبق اطلاعات بدست آمده این نتیجه حاصل شد که توالی حفاری نوع (a) کم‌ترین میزان نشست را دارد. در عمل نیز تونل حکیم با استفاده از همین توالی حفاری گردیده است. البته نشست سطح زمین مربوط به توالی حفاری نوع (b) نیز، فاصله کمی با مقدار نشست مربوط به توالی (a) دارد. لذا از این‌رو می‌توان این نوع توالی را نیز به دلیل ایجاد میزان کم نشست سطح زمین، مناسب ارزیابی نمود. از آنجا که این پروژه در محیط شهری و در خاک نسبتاً سست غرب تهران اجرا می‌شود، پیشنهاد می‌گردد که تحلیل‌های دیگر مانند تحلیل دینامیکی و اثرات بارهای زلزله نیز بر روی این تونل بررسی شود.

پیشنهاد می‌گردد مقاطع دیگر مسیر تونل حکیم نیز توسط نرم‌افزارهای عددی مدل شده و نتایج با اطلاعات ابزار دقیق مقایسه گردند.

فاصله افقی دو تونل از هم، یکی از عوامل دخیل در تغییرشکل‌های به وجود آمده در منطقه می‌باشد. پیشنهاد می‌شود فاصله افقی بهینه توسط مدل‌سازی عددی محاسبه گردد.

طبق آنچه در بخش سوم فصل چهار بیان شد، پیشنهاد می‌شود، به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده در این تحقیق، این پروژه با استفاده از سایر نرم‌افزارهای مدل‌سازی عددی مثل FLAC 3D نیز مدل شده و نتایج آن با نتایج بدست آمده از این تحقیق مقایسه گردد.

تحلیل وابسته به زمان نیز از جمله مواردی است که می‌توان با استفاده از آن، رفتار سازه را نسبت به زمان بهره‌وری مورد بررسی قرار داد. پیشنهاد می‌شود این امر درمورد این پروژه انجام گردد.

از آنجایی که توده خاک، طبیعت ناهمسانگرد دارد، پیشنهاد می‌شود جهت تعیین ثابت‌های ناهمسانگرد برای بررسی مدل‌های رفتاری متداول دیگر مانند مدل خاک سخت شونده، معرفی شده و انجام گردد.

منابع و مراجع

[۱] فرقانی م. (۱۳۹۱). پایان‌نامه ارشد: "ارزیابی فنی روش حفاری NATM در تونل‌ها و مقایسه آن‌ها با روش کند و پوش - مطالعه موردی: تونل راه‌آهن تهران-تبریز." دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲] گزارش ژئوتکنیک و زمین‌شناسی مهندسی تونل بزرگراه حکیم در محدوده عبور از پارک جنگلی چیتگر، (۱۳۹۲)، سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، موسسه مهندسين مشاور ساحل، تهران.

[۳] پوره‌اشمی م، صادقی م، طارمی م، عسکرزاده ع. (۱۳۹۳). بهینه‌سازی کلاس حفاری و نگهداری و صرفه‌جویی در هزینه مطالعه موردی تونل حکیم ایران. کنفرانس بین‌المللی مهندسی، هنر و محیط‌زیست. کشور لهستان.

[۴] مروری بر جنبه‌های برجسته فنی و مدیریتی پروژه تونل شهدای غزه، قرارگاه خاتم‌الانبیاء (ص) قرب نوح موسسه حرا. (۱۳۹۴). تهران.

[5] C. Jeremy Hung, PE, James Monsees, PhD, PE, N. M., & PE, and John Wisniewski, P. (2009). FHWA-NHI-10-034 Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.

[۶] فرقانی م، زارع ش، جهانی ح. (۱۳۹۱). امکان‌پذیری حفر تونل‌های بزرگ‌مقطع به روش NATM در نواحی کم عمق شهری. در چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران (ص ۲۶۲-۲۶۸). دانشگاه تهران.

[۷] طاهری ر. (۱۳۸۶). پایان‌نامه ارشد: "بررسی مراحل اجرایی و حساسیت سنجی پارامترها در روش پیش تثبیت بتنی در فضاهای زیرزمینی بزرگ‌مقطع." دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

[8] Karakuş, M., & Fowell, R. J. (2004). An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). ROCMEC'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, 2004, Sivas, Turkiye, (1994), 14.

[9] دلفروزی م، هادی‌نیا ف، براتی ح ا، چرامی م. (۱۳۹۰). بررسی شیوه های اجرایی روش تونل‌زنی NATM در زمینه حفاری. اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی (ص ۱-۱۱). تهران.

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

[۱۱] پیراسته‌فر ک. (۱۳۹۱). پایان‌نامه ارشد: "تحلیل اندرکنش سه بعدی خاک و تونل‌ها در مراحل حفاری به روش مکانیزه و اثر آن‌ها در نشست سطح زمین. مطالعه موردی: تونل‌های قطار شهری خط ۲ متروی شیراز." دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

[۱۲] میرمحرابی ح، معروف م. (۱۳۹۴). پیش‌بینی نشست زمین با روش‌های تحلیلی در اثر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری مشهد و مقایسه آن با نتایج مانیتورینگ. نشریه صنعت و مقاومت‌سازی و بهسازی، ص ۳۰-۳۹.

[۱۳] رستمی ع، آبادی س ر، حسینی ن، خسرو تاش م. (۱۳۹۰). برآورد تحلیلی و عددی نشست زمین و مقایسه با نتایج ابزار دقیق مطالعه موردی: تونل خط ۲ متروی کرج. فصل‌نامه علمی پژوهشی زمین و منابع واحد لاهیجان، سال چهارم، شماره سوم، ص ۳۳-۴۰.

[14] Bobet, A. (2001). Analytical Solutions for Shallow Tunnels in Saturated Ground. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 400, 1258-1266.

[۱۵] رازی‌فر م، هاشمی س، حسینی م، یزدی‌نژاد ح. (۱۳۹۰). استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی برای تخمین نشست سطح زمین ناشی از حفاری مکانیزه قطعه شرقی غربی تونل خط هفت متروی تهران. نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی "فضاهای زیرزمینی برای توسعه پایدار." تهران، انجمن تونل ایران.

[16] Karakus, M., & Fowell, R. J. (2003). Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(5), 513–523.

[17] Yoo, C. (2009). Performance of multi-faced tunnelling – A 3D numerical investigation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(5), 562–573.

[18] Sharifzadeh, M., Kolivand, F., Ghorbani, M., & Yasrobi, S. (2013). Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in soft ground – Niayesh tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 178–188.

[۱۹] کولیوند ف، یثربی س ش ا، قربانی م، اصطهباناتی م ج. (۱۳۹۰). ارزیابی تأثیر طول گام حفاری و فاصله بهینه جبهه کارهای مختلف حفاری بر میزان نشست سطح زمین ناشی از تونل سازی مرحله ای با استفاده از روش عددی اجزاء محدود (مطالعه موردی تونل ملت). نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی "فضاهای زیرزمینی برای توسعه پایدار." تهران، انجمن تونل ایران.

[۲۰] سروش ع و دیزجی ر ب. (۱۳۸۱). تحلیل عددی حفر بخشی و تعیین فواصل بهینه سینه کارهای فرعی در تونل های دوگانه رسالت. سومین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران. پژوهش گاه نیرو، تهران.

[۲۱] پلاسی م، قریشی م. (۱۳۸۴). مدل سازی دو بعدی حفاری چند مرحله ای فضاهای زیرزمینی توسط یک برنامه تفاضل محدود. دومین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه علم و صنعت تهران.

[۲۲] طهرانی ا ب، حریری ی ب. (۱۳۸۵). حفاری های بزرگ زیرزمینی در مناطق شهری و تدوین الگوریتم پیش بینی روش اجرا. هفتمین کنفرانس تونل ایران. تهران، انجمن تونل ایران، دانشگاه صنعتی شریف.

[۲۳] یاری وند ا، الماسی س ن ا. (۱۳۸۶). بررسی اثر مراحل اجرای حفاری چند مرحله ای بر روی رفتار الاستوپلاستیک در تونل بزهل. سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران. تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

- [۲۴] پیروی نسب پ، رستمی م، وحیدی ح، سعیدی ا. (۱۳۹۰). تاثیر حفاری چند مرحله‌ای تونل‌ها در توده سنگ ضعیف بر مباحث فنی و اقتصادی و نمود آن در مقوله مهندسی ارزش. نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی "فضاهای زیرزمینی برای توسعه پایدار." تهران، انجمن تونل ایران.
- [۲۵] آزادی م، حسینی س م. (۱۳۸۹). مقایسه قابلیت نرم‌افزارهای سه بعدی PLAXIS و FLAC در تحلیل عددی تونل‌های احداث شده نزدیک به سطح زمین. چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران. تهران، انجمن ژئوتکنیک ایران.
- [26] Brinkgreve, R. B. J., Vermeer, P. A., Bonnier, P. G., Burd, H. J., & Weide, J. G. van der. (2001a). Plaxis 3D Tunnel GENERAL INFORMATION. v1. DELFT, Netherlands: Balkema Publishers, a member of Swets & Zeitlinger Publishers.
- [۲۷] سیف‌پور س. (۱۳۹۰). آموزش مدل کردن تونل در برنامه PLAXIS، وبسایت تخصصی مهندسی ژئوتکنیک. برگرفته از: <http://www.irangeotechnic.com/forums/thread-606>
- [۲۸] اطلاعات پروژه تونل حکیم، اطلاعات مصالح مورد استفاده، قرارگاه خاتم الانبیاء (ص) قرب نوح موسسه حرا. (۱۳۹۲). تهران، محدوده پارک جنگلی چیتگر، پروژه تونل حکیم.
- [29] Carranza-Torres, C., & Diederichs, M. (2009). Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(5), 506–532.
- [30] Pantex® Lattice Girders. (2002). Retrieved: https://www.dsicivil.com.au/uploads/media/DSI_ALWAG-Systems_Pantex-Lattice-Girders_en.pdf
- [31] DSI_ALWAG_Systems_Pantex Lattice Girders_en. (2003). Retrieved: www.dsiminigroupproducts.com/au.
- [۳۲] کاتبی ه، سعدین م. (۱۳۸۹). تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونل‌سازی- مطالعه موردی: پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز. مهندسی حمل و نقل، سال اول، شماره چهارم، ص ۶۷-۸۵.
- [۳۳] شریف‌زاده م، کولیوند ف، قربانی م. (۱۳۹۰). ارزیابی تاثیر هندسه و وزن ساختمان بر نشست

سطح زمین ناشی از تونل‌سازی مرحله‌ای با استفاده از روش عددی اجزاء محدود - مطالعه موردی پروژه تونل نیایش. نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی "فضاهای زیرزمینی برای توسعه پایدار." تهران، انجمن تونل ایران.

[۳۴] نیرومند ب، نیرومند ح. (۱۳۸۷). آموزش plaxis 8 (چاپ اول). شرکت ناقوس اندیشه.

[۳۵] دهقان ع ن. (۱۳۹۲). انتخاب طرح مناسب سامانه نگهداری اولیه تونل متروی کرج بر مبنای نتایج ابزار دقیق و الگوریتم تحلیل برگشتی. نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دانشگاه صنعتی شاهرود، دوره دوم، شماره اول، ص ۶۴-۴۹.

[36] Brinkgreve, R. B. J., Vermeer, P. A., Bonnier, P. G., Burd, H. J., & Weide, J. G. van der. (2001b). PLAXIS 3D Tunnel Reference Manual. v2. DELFT, Netherlands. Retrieved [http://www.twoplussoft.com/imgUpload/Ref Man\(UK\)3DT](http://www.twoplussoft.com/imgUpload/Ref Man(UK)3DT).

[37] Hoek, E. (2001). Big Tunnels in Bad Rock. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(9), 726-740.

[38] Chern, J., & C.W.Yu. (2007). Expert system for D&B tunnel construction. Underground Space – The 4th Dimension of Metropolises, 799-804.

[39] Lee, Young Z. Schubert, Wulf (2008). Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(3), 221-231.

[۴۰] اکبری ص، زارع ش، میرزایی نصیرآباد ح. (۱۳۹۳). بررسی تأثیر متقابل تونل‌های دوقلو در محیط‌های شهری با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی (مطالعه موردی: تونل‌های خط یک قطار شهری تبریز). نشریه علمی پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ص ۳۹-۵۳.

[41] Sakurai, S. (1997). Lessons learned from field measurements in tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology, 12(4), 453-460.

[۴۲] قدیری ذ. (۱۳۸۹). پایان نامه ارشد: "تحلیل پایداری مترو خط دو قطار شهری کرج با استفاده از نتایج رفتارسنجی." دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- [43] Dasari, G. R., Rawlings, C. G., & Bolton, M. D. (1996). Numerical modelling of a NATM tunnel construction in London Clay. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, 491–496.
- [44] Vermeer, P. A., Bonnier, P. G., & Moller, S. C. (2002). On a Smart Use of 3D-FEM in Tunnelling. *Proceedings of the 8th International Symposium NUMOG VIII, Rome, Italy*, 361–366.
- [45] Attewell, P. B., & Woodman, J. P. (1982). Predicting the Dynamics of Ground Settlement and Its Derivatives Caused By Tunnelling in Soil. *Ground Engineering*, 15(8), 13–20.
- [46] Mroueh, H., & Shahrour, I. (2003). A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction. *Computers and Geotechnics*, 30(3), 245–253.
- [47] Liu, H. Y., Small, J. C., & Carter, J. P. (2008). Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4), 399–420.
- [48] سلطانی ح, ضمیر م ر, هاشم الحسینی س. (۱۳۸۹). بررسی میزان تأثیر فواصل مختلف تأخیر بین دو جبهه کار در تونل‌های دوقلو مترو بر نشست سطح زمین با استفاده از نرم افزار flac 3d. چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران. تهران.
- [49] هاشمی م, رحمان نژاد ر, سیدطراح ب. (۱۳۸۶). تحلیل سه بعدی پایداری و تأثیر متقابل حفاری تونل‌های دوقلوی مترو اصفهان (قطعه جنوبی) بر میزان نشست سطح زمین و مقایسه با داده‌های ابزار دقیق. سومین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران (ص ۴۲۱–۴۲۶). تهران.
- [50] جنیدی م, گلشنی ع ا. (۱۳۹۳). مقایسه مدل دوبعدی و سه بعدی اجزاء محدود حفاری تونل به روش NATM، مطالعه موردی: تونل حکیم تهران. اولین کنفرانس مهندسی عمران، شهرسازی و توسعه پایدار. تهران.

Abstract

Having human improved and developed his abilities in all of the fields and having population growth per day, the need to faster transport systems containing more capacities is sensed strongly. Sure one of the best, purest, most quick, and containing most capacity of this systems, are underground transport webs. This webs contain Metro, underground highways, and underground pavements. Nowadays tunneling in citizen areas is an important matter because of less space and keeping the environment healthy manner. Tehran is not an exception. For this reason different kinds of tunnels and undergrounds have been operated there especially recent years. Hakim tunnel for example is one of the both side traffic highways which is used to transport traffic bars between Tehran and Karaj passing through Chitger woods. The mechanisms of operating this tunnel, is a masterwork for Tehran, keeping Chitger woods as breathing lungs of this city at a regarding healthy environment point of view. Operating Hakim tunnel in a region which contains masses of soils and layers which are not hard enough, has risks such as surface subside. Investigating, measurement, and controlling of such matters, can reduce this risks in a high and sizable degree. Aiming this achievement, needs to different factors involved such as suitable digging excavation methods, proper sequences of digging the different parts of a tunnel, the appropriate distances between different digging projects excavation faces of two tunnels, and so on should be investigated and controlled. One of the most important one of this factors, is proper sequences of digging. Meaning that in digging a tunnel project having a great segment surface, and being done in several stages (NATM method), sequences of digging the several parts toward each other should be evaluated well.

In the present research, first we have designed and analyzed the conservation systems of this tunnel using Finite element analysis (FEA), PLAXIS 3D Tunnel numeral modeling software. Then the effect of sequential excavation of different parts of Hakim tunnel upon surface subsidence has been investigated. In the next stage the distances between different excavation faces towards each other in one tunnel, and afterwards the distances of excavation faces between two tunnels are evaluated. According to obtained results, using A type excavation sequences will result in least surface subsidence which is 29 mm theoretically. Also the distances between the enteral excavation faces of a tunnel should be fixed and more than 1D (D is the tunnel diameter) along all the rout of tunnel. Furthermore the distances between faces of the two tunnels should be regarded at least 3D until the two excavation faces don't have sensible impact on each other.

Key words:

tunneling, NATM, PLAXIS 3D Tunnel software, surface subsidence, sequential excavation, distances faces



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Rock Mechanics

**Study of sequential excavation effect for
large span urban tunnels in soft ground on
the settlement**

Case study: Tehran Chitgar tunnel

By

Roohollah Aslani

Supervisor

Dr.Shokrollah Zare

Advisor

Mojtaba Mohammadnejad

January 2017