دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد

مطالعه اثرات متقابل تونل های خط ۲ قطار شهری مشهد و تونل سرویس و امداد مشهد در یک تقاطع غیر همسطح، حین حفاری خط ۲ به صورت زیر گذر و بررسی راهکارهای تقویت پایداری تونل خط ۲

نگارنده: افشین عشقی

استاد راهنما:

دکتر سید رحمان ترابی

تیر۱۳۹۵

مدیریت تحصیلات تکمیلی

بسمه تعالی

شماره: ۶۹۵/۱۷۸۱ م ـ ت
تاریخ: ۹۵/۶/۱۰
ویرایش:

فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای **افشین عشقی** به شماره دانشجویی **۹۲۳۲۶۵۴** رشته **مهندسی معدن** گرایش **مکانیک سنگ** تحت عنوان **مطالعه اثرات تونل های خط ۲ قطارشهری مشهد و تونل سرویس و امداد مشهد در یک تقاطع غیرهمسطح، حین حفاری خط ۲ به صورت زیرگذر و بررسی راهکارهای تقویت پایداری تونل خط ۲** که در تاریخ **۱۳۹۵/۴/۳۰** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می-گردد:

قبول (با درجه : خوب امتیاز ۱۷/۲۵) ☑ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

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

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	سید رحمان ترابی		
۲- استادراهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	رامین رفیعی		
۵- استاد ممتحن اول	مجید نیکخواه		
۶ـ استاد ممتحن دوم	مهدی نوروزی		

رئیس دانشکده:

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

تقدیم به

پدرم به استواری کوه

مادرم به زلالی چشمه

همسرم به صمیمیت باران

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم و لطف، خانواده‌ای فداکار نصیبم ساخته که در هر مشکلی همچو کوه پشتیبانم هستند...

تقدیم به فرشتگان زمینی زندگی‌ام که لحظات ناب باور بودن، غرور دانستن و به عظمت رسیدن را مدیون حضور روشنایی‌بخش آنان هستم...

تقدیر و تشکر

همواره در زندگی آدمیان کسانی هستند که وجودشان تکیه‌گاهی محکم و حضورشان قوت قلبی برای ادامه راه است. در مسیر پرپیچ‌وخم زندگی نیاز به این‌گونه آدم‌ها بیش‌ازپیش حس می‌شود. در گام انجام این تحقیق به درست، اگر یاری و حضور این بزرگان نبود چه‌بسا نتیجه‌ای نیز حاصل نمی‌گردید. پس بر خود لازم می‌دانم که از استاد محترم جناب آقای دکتر ترابی که همچون پدری دلسوز یاریگر من بود و از دوست و برادر بزرگ‌تر خودم جناب مهندس حسین رضایی مقدم که در پیشبرد این پروژه کمکشان غیرقابل وصف بود تشکر نمایم.

تعهدنامه

اینجانب افشین عشقی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ دانشکده‌ی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان نامه ی مطالعه اثرات متقابل تونل های خط ۲ قطار شهری مشهد و تونل سرویس و امداد مشهد در یک تقاطع غیر همسطح، حین حفاری خط ۲ بهد صورت زیرگذر و بررسی راهکارهای تقویت پایداری تونل خط ۲ تحت راهنمایی آقای دکتر سید رحمان ترابی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام‌شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۹۵/۴/۳۰

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده:

امروزه توجه به اثرات ناشی از حفاری یک تونل برسازه‌های مجاور بسیار حائز اهمیت است به خصوص، در شرایطی که سازه مجاور از اهمیت بالایی برخوردار باشد. توجه به این اصل موجب می‌شود که در حفاری‌ها شرایط را به‌صورت کاملی تحت نظر قرار داده و با تحلیل‌های مناسب برای آن، اصل اطمینان را تا حدودی برای ایجاد این سازه فراهم سازیم. با توجه به این گفته، در این پژوهش سعی شده که به طور مناسبی تأثیر متقابل حفاری تونل خط ۲ مترو مشهد و تونل سرویس وامداد موردبررسی قرار گیرد.

طراحی مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد به گونه‌ای است که این تونل در قسمتی از مسیر خود با فاصله کمی در حدود ۳/۷ (سه و هفت‌دهم) متر از زیر تونل سرویس و امداد عبور می‌کند. تونل سرویس و امداد مشهد به دلیل ضرورت‌های اورژانسی که گاهی اوقات ثانیه در آن سرنوشت ساز است، مطرح گردیده است. در این پروژه به دلایل اجرایی و محیطی، حفاری بخش‌های مختلف با روش‌های متفاوت انجام‌شده ازجمله این‌که از روش NATM در بخشی از سمت بیمارستان قائم، استفاده شده است. به جهت اینکه احداث تونل سرویس و امداد به اتمام رسیده است و هم اکنون در مرحله بهره‌برداری است بنابراین در این تحقیق اثر حفاری تونل خط ۲ و تونل سرویس وامداد با استفاده از تحلیل سه بعدی و به کمک نرم‌افزار Flac 3D مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان می‌دهد که پس از حفاری کامل تونل خط ۲، میزان ۱۰۰ کیلوپاسکل تنش القایی بر تونل سرویس و امداد وارد می‌گردد که این میزان باعث ایجاد نشست ۰/۳۴ میلی‌متری در تاج تونل و علاوه بر آن به میزان ۵ میلی‌متر بالا زدگی در کف تونل سرویس و امداد را به همراه دارد. علاوه بر آن میزان نشست بیشینه در سطح زمین تقریباً ۴۷ میلی‌متر می‌باشد و با توجه به این‌که ۱۲ گام حفاری در نظر گرفته‌شده و در هر گام حفاری ۱/۵ متر حفاری انجام‌شده است لذا با محاسبه در صد نشست‌ها در هر

متراژ از تونل مشاهده گردید که تقریباً نیمی از نشست در جلوی سپر تا ۹۰ درصد نشست در بالای سپر و ۱۰۰ درصد نشست در پشت سپر رخ می‌دهد.

با افزایش فشار جبهه کار، بیش‌ترین میزان نشست در سطح زمین کاهش می‌یابد ولی این تغییرات قابل توجه نیست، به طوری‌که افزایش تقریباً ۲ برابری فشار جبهه کار باعث می‌شود بیش‌ترین نشست سطح زمین، حداکثر ۹ میلی‌متر کاهش یابد و از سویی تغییر در فاصله دو تونل مورد بررسی قرار گرفت که برای نمونه با افزایش فاصله دو تونل متقاطع غیر هم‌سطح از ۳ متر به ۹ متر، میزان نشست بیشینه در سطح زمین تقریباً ۱۱ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تونل سرویس وامداد مشهد، تونل خط۲مشهد، تقاطع تونل‌های غیر هم‌سطح، مدل‌سازی عددی، نشست سطح زمین

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

عنوان

صفحه

۱- ۱- مقدمه ۲

۱- ۲- بیان مساله تحقیق ۲

۱- ۳- اهداف تحقیق ۳

۱- ۴- ضرورت انجام تحقیق ۳

۱- ۵- شیوه تحقیق ۴

۱- ۶- ساختار تحقیق ۴

فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین

۲- ۱- مقدمه ۸

۲- ۲- تونل سازی سپری ۸

۲- ۲- ۱- روش تونل سازی سپری ۹

۲- ۲- ۱- ۱- سپر متعادل کننده فشار زمین ۱۱

۲- ۲- ۱- ۱- ۱- مزایا سپر EPB ۱۳

۲- ۲- ۱- ۱- ۲- معایب سپر EPB ۱۴

۲- ۲- ۱- ۱- ۳- عملکرد دستگاه EPB ۱۴

۲- ۳- الگوهای طبقه بندی و تحلیل موضوع تحقیق ۱۶

۲- ۳- ۱- روش های تجربی ۱۷

۲- ۳- ۱- ۱- روش ترزاقی ۱۷

۲- ۳- ۱- ۲- روش پیشنهادی انجمن زیرزمینی هلند ۱۸

۲- ۳- ۲- روش های تحلیلی ۱۹

۲- ۳- ۲- ۱- روش های تعادل حدی کلی ۱۹

الف- روش برانز و بنمارک (۱۹۶۷) ۱۹

ب- روش کراس ۱۹

ج- روش جانکسز و استینر ۲۰
د- روش آنگنستو و کواری ۲۱
ه- روش گوه چند لایه ای بروئر (۱۹۹۶) ۲۱
۲- ۳- ۲- ۲- روش های تحلیل حدی تنش ۲۲
الف- روش اتکینسون و پوتس (۱۹۷۷) ۲۲
ب- روش لکا و دورمیکس(۱۹۹۰) ۲۳
۲- ۳- ۳- روش های عددی ۲۳
۲- ۳- ۴- تعیین فشار سینه کار با استفاده از ابزاربندی ۳۰
۲- ۴- نمونه تحلیل های صورت گرفته در رابطه با اندرکنش بین تونل ها ۳۱
۲- ۵- مدل سازی سه بعدی تونل های متقاطع (مطالعه موردی عبور تونل خط ۷ متروی تهران از زیرکانال رباط کریم) ۳۲
۲- ۵- ۱- خصوصیات طرح مورد بررسی ۳۲
۲- ۵- ۲- شبیه سازی سه بعدی و ساخت هندسه مدل ۳۳
۲- ۵- ۳- مقایسه نتایج مدل سازی با شرایط واقعی ۳۳
۲- ۵- ۴- بررسی کانال رباط کریم پس از عبور TBM با استفاده از نتایج مدل ۳۴
۲- ۵- ۴- ۱- بررسی نیروهای داخلی القایی به پوشش بتنی کانال رباط کریم ۳۴
۲- ۶- نتیجه گیری ۳۵

فصل سوم: روش اجرا و مدل‌سازی تونل‌های غیر هم‌سطح سرویس و امداد و خط ۲ مشهد

۳- ۱- مقدمه ۳۸
۳- ۲- دلایل استفاده از مدل‌سازی عددی ۳۸
۳- ۳- معرفی نرم‌افزار Flac 3D ۳۹
۳- ۴- آشنایی با منطقه موردمطالعه (تقاطع غیر هم‌سطح تونل سرویس وامداد و خط ۲ مترو مشهد) ۴۲
۳- ۴- ۱- تونل سرویس و امداد مشهد ۴۲
۳- ۴- ۱- ۱- مشخصه‌های تونل سرویس وامداد ۴۳
۳- ۴- ۱- ۲- ژیوتکنیک مسیر ۴۴
۳- ۴- ۱- ۳- مشخصه‌های پوشش بتنی ۴۵
۳- ۴- ۲- تونل خط ۲ مترو مشهد ۴۵
۳- ۴- ۲- ۱- جزییات قطار شهری خط ۲ مشهد ۴۶

۳- ۴- ۳- تقاطع غیر هم‌سطح تونل سرویس وامداد و خط ۲ مترو مشهد ۴۸
۳- ۴- ۳- ۱- خصوصیات ژیوتکنیکی زمین در محل تقاطع ۴۸
۳- ۵- نحوه مدل سازی ۴۹
۳- ۵ - ۱- ساخت هندسه مدل ۴۹
۳- ۵- ۲- مشخصات مواد و المان های سازه ای ۵۲
۳- ۵- ۳- تعریف شرایط مرزی مدل ۵۳
۳- ۵- ۴- مش بندی مدل ۵۴
۳- ۶- جمع بندی ۵۴

فصل چهارم: بحث در نتایج

۴-۱- مقدمه ۵۸
۴- ۲- تعریف شرایط اولیه مدل ۵۸
۴- ۳- تشریح فرآیند حفاری تونل ها ۶۰
۴- ۴- تعریف مراحل مختلف محاسباتی ۶۲
۴- ۵- نتایج مدل سازی ۶۲
۴- ۵- ۱- اثر حفاری خط ۲ بر میزان تنش ها و جابجایی ها در اطراف تونل سرویس و امداد ۶۳
۴- ۵- ۲- نتایج بعد از حفاری کامل تونل تحتانی ۶۶
۴- ۵- ۳- بررسی اثر فشار سینه کار بر پایداری تونل خط ۲ و نشست سطح زمین و بررسی راهکارهای تقویت تونل خط ۶۸
۴- ۵- ۴- اثر فاصله ی بین تونل های متقاطع بر نشست سطح زمین ۷۱
۴- ۶- جمع بندی ۷۴

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵- ۱- مقدمه ۷۸
۵- ۲- نتیجه گیری ۷۸
۵- ۳- پیشنهاد ها ۸۰
منابع ۸۱

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱- سپر EPB ۱۱

شکل ۲- ۲- طرحی از دستگاه EPB ۱۶

شکل ۲- ۳- خاک قوسی بالای تونل ۱۸

شکل ۲- ۴- مکانیزم های مختلف شکست در روش کراس ۲۰

شکل ۲- ۵- نمایی از چگونگی توزیع بار روی سینه کار تونل در روش جانکسز و استینر ۲۰

شکل ۲- ۶- تعریف نمادها در مدل گوه چند لایه ای ۲۱

شکل۲- ۷- مدل پایداری سینه کار در روش اتکینسون و پوتس ۲۲

شکل۲- ۸- ابعاد تونل ها نسبت به هم با استفاده از نرم افزار Flac 3D ۳۳

شکل ۲- ۹- تصویر مدل ساخته شده از نشست ۵ سانتیمتری در سطح زمین و مرکز مدل ۳۳

شکل ۲- ۱۰- منحنی اندرکنش پوشش بتنی کانال رباط کریم ۳۴

شکل ۳- ۱- مسیر و موقعیت تونل سرویس وامداد ۴۳

شکل ۳- ۲- مسیر خط ۲ متروی مشهد ۴۶

شکل ۳- ۳ - هندسه مدل الف: سه بعدی ب: دید از جلو ج: دید از راست ۵۱

شکل ۳- ۴- نیروی نامتعادل کننده در مرحله تعادل مدل ۵۲

شکل ۴- ۱- تنش قائم szz ۵۹

شکل ۴- ۲- تنش افقی sxx ۵۹

شکل ۴- ۳- تنش افقی syy ۶۰

شکل ۴- ۴- حفاری و پوشش بتنی تونل تحتانی ۶۱

شکل ۴- ۵- حفاری و پوشش بتنی تونل فوقانی ۶۱

شکل ۴- ۶- تنش قایم SZZ ۶۳

شکل ۴- ۷- تنش افقی SXX ۶۳

شکل ۴- ۸- تنش افقی SYY ۶۴

شکل ۴- ۹- جابجایی قایم در محل تونل سرویس و امداد (نشست) Zdis ۶۵

شکل ۴- ۱۰- جابجایی افقی در محل تونل سرویس و امداد (نشست) Xdis ۶۵

شکل ۴- ۱۱- تنش اصلی حداکثر در اطراف تونل سرویس و امداد پس از حفاری خط ۲ ..... ۶۶

شکل ۴- ۱۲- پروفیل نشست ۶۶

شکل ۴- ۱۳- درصد نشست ۶۷
شکل ۴- ۱۴- پروفیل نشست برای فشار جبهه کار برابر با فشار جبهه کار اولیه (۴۰۰ کیلوپاسکال) ۶۸
شکل ۴- ۱۵- پروفیل نشست برای فشار جبهه کار ۱/۲۵ برابر با فشار جبهه کار اولیه (۵۰۰ کیلوپاسکال) ۶۹
شکل ۴- ۱۶- پروفیل نشست برای فشار جبهه کار ۱/۵ برابر با فشار جبهه کار اولیه (۶۰۰ کیلوپاسکال) ۶۹
شکل ۴- ۱۷- پروفیل نشست برای فشار جبهه کار ۱/۷۵ برابر با فشار جبهه کار اولیه (۷۰۰ کیلوپاسکال) ۷۰
شکل ۴- ۱۸ پروفیل نشست سطح زمین برای فشار های مختلف سینه کار ۷۰
شکل ۴- ۱۹- پروفیل نشست سطح زمین (فاصله قائم دو تونل برابر ۳ متر) ۷۲
شکل ۴- ۲۰- پروفیل نشست سطح زمین (فاصله قائم دو تونل برابر ۶ متر) ۷۲
شکل ۴- ۲۱- پروفیل نشست سطح زمین (فاصله قائم دو تونل برابر ۹ متر) ۷۳
شکل ۴- ۲۲- مقایسه پروفیل نشست سطح زمین برای فاصله های قائم متفاوت دو تونل ۷۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۳- ۱- مشخصات ژیوتکنیکی خاک ۴۴
جدول ۳- ۲- مشخصات پوشش بتنی ۴۵
جدول ۳- ۳- خصوصیات ژیوتکنیکی خط ۲ قطار شهری مشهد ۴۷
جدول ۳- ۴- مشخصات ژیوتکنیکی تقاطع ۴۹
جدول ۳- ۵- مشخصات پوشش بتنی ۵۳
جدول ۳- ۶- مشخصات سپر EPB ۵۳

نمادها

چسبندگی	C
زاویه اصطکاک	ϕ
مدول الاستسیته	E
نسبت پواسون	υ
وزن مخصوص خشک	γ_d
ضخامت - عمق	t
وزن مخصوص اشباع	γ_{sat}
ضریب فشار جانبی	K
درصد رطوبت	ω
نسبت تخلخل	e
ضریب یکنواختی	C_u
ضریب انحنا	C_c
صلبیت خمشی	EI
صلبیت محوری	EA
وزن	W

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

توجه به اصل تأثیرگذاری سازه‌ها بر یکدیگر، با توجه به اینکه امروزه ساخت سازه‌های زیرزمینی با گسترش بسیار زیادی مواجه شده، امری ضروری است. ساخت هر سازه زیرزمینی می‌تواند چه به سازه‌های مجاور خود و چه به سازه‌های سطحی تأثیرگذار باشد به همین خاطر تحلیل و بررسی، قبل ساخت هر سازه، موجب می‌گردد که صدمات و خسارات ناشی از ساخت یک سازه زیرزمینی تا حدودی به حداقل میزان خود برسد. دراین بین باید عوامل مختلفی مورد بررسی قرار گیرد که ازجمله آن می‌توان به میزان نشست، تغییرات میدان حوزه تنش، جابجایی اشاره کرد. با بررسی این موارد می‌توان با اعمال شرایط و اقدامات مناسب تأثیر حفاری را به حداقل آن رساند.

۱-۲- بیان مسئله تحقیق

طراحی مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد به گونه ای است که این تونل در قسمتی از مسیر خود با فاصله کمی در حدود ۳/۷ متر از زیر تونل سرویس و امداد مشهد عبورمی‌کند. طول این تونل ۵۷۵ متر، ارتفاع مفید آن ۵/۳ متر و عرض مفید تونل با احتساب پیاده‌رو حدود ۷ متر هست. در این پروژه به دلایل اجرایی و محیطی حفاری، بخش‌های مختلف با روش‌های متفاوت انجام‌شده ازجمله این‌که از روش NATM در بخشی از سمت بیمارستان قائم، استفاده شده است. تلاقی تونل سرویس و امداد با خطوط ۱ و ۲ قطار شهری از ویژگی‌های منحصر به فرد این تونل است، به نحوی که در خیابان احمدآباد ضمن عبور از زیر تونل خط ۱ قطار شهری در عمق ۱۵ متری از سطح زمین، بالای تونل خط ۲ قطار شهری قرارگرفته است. از جمله مشخصات تونل خط ۲ مشهد نیز می‌توان به این موارد اشاره نمود: قطر سر حفار تونل ۹/۴ متر، قطر داخلی پوشش بتنی تونل ۸/۳ متر، قطر خارجی پوشش بتنی ۹/۱ متر البته قطر سر حفار در شرایط استفاده از ابزارهای برشی متفاوت و متناسب با جنس خاک مسیر اندکی متغیر است. همچنین موقعیت تقاطع تونل خط ۲ و تونل سرویس و امداد

بلافاصله پس از تقاطع تونل خط ۲ و تونل خط ۱ است، به همین دلیل با توجه به ملاحظات فنی و اجرایی تقاطع تونل‌های ۱ و ۲، ۷۵ درجه در نظر گرفته و اجرا شده است. به جهت اینکه احداث تونل سرویس و امداد به اتمام رسیده است و هم اکنون در مرحله بهره‌برداری می باشد بنابراین در این تحقیق سعی بر این است که اثر حفاری تونل خط ۲ و تونل سرویس و امداد مورد بررسی قرار گیرد.

۱-۳- اهداف تحقیق

۱- تغییرات میدان تنش در اطراف تونل سرویس و امداد، با توجه به حفاری تونل خط ۲ چگونه است؟

۲- شرایط بارگذاری و میزان بار وارده بر پوشش بتنی تونل سرویس و امداد، ناشی از حفاری تونل خط ۲، چگونه است؟

۳- میزان جابجایی محیط اطراف تونل سرویس و امداد در اثر حفاری تونل خط ۲ مناسب است؟

۴- میزان نشست ناشی از حفاری تونل خط ۲ چه اندازه می‌باشد؟

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

امروزه با توجه به سازه‌های متعدد زیرزمینی و گسترش کاربرد آن‌ها توجه به ایمنی و امنیت آن‌ها از مهم‌ترین اصول به شمار می‌آید. از سویی انجام یک تحلیل عددی مناسب، می‌تواند مطمئن‌ترین جواب را در قالبی که موردپذیرش اقتصادی است ارائه کند. توجه به این اصل موجب می‌گردد که بررسی مفصلی در رابطه با تأثیر سازه‌های زیرزمینی با سازه‌های مجاور صورت گیرد.

در این تحقیق نیز با توجه به اینکه تونل سرویس وامداد از ضرورت بالایی برای جابجایی بیماران برخوردار است، هرگونه لطمه ناشی از ساخت سازه زیرزمینی در مجاورت آن می‌تواند خسارات جبران نشدنی را فراهم سازد. پس باید با بررسی دقیق شرایط حفاری سازه جدید در مجاورت این سازه، خسارات احتمالی را به حداقل رساند. دراین بین ازآنجایی‌که تونل خط ۲ قطار شهری مشهد در عمق

کم حفرشده است و فاصله‌ی آن با تونل سرویس وامداد مشهد در تقاطع موردنظر کم است، بنابراین بررسی تأثیر حفر تونل خط ۲ و تونل سرویس وامداد مشهد ضروری به نظر می‌رسد.

۱-۵- شیوه تحقیق

در این تحقیق سعی شده که به گردآوری اطلاعات ناشی از اقدامات مشابه ای که درگذشته، در سازه‌هایی با شرایط مختلف صورت گرفته، پرداخته شود و سپس با توجه به نتایج آن‌ها پیش برداشت‌هایی نسبت به تحقیق موردنظر به دست آید که البته باید دانست که هرگونه تغییر با شرایط موجود در تحقیق می‌تواند نتایجی مختلف را به وجود آورد؛ اما این‌گونه مطالعات کمک شایانی در به دست آمدن یک تحلیل فکری مناسب درزمینه نتیجه ناشی از تحقیق، ارائه می‌نماید.

علاوه بر گردآوری سوابق درزمینه تحقیق، از تحلیل سه بعدی به‌خصوص با استفاده از نرم‌افزار Flac 3D استفاده می‌شود که می‌تواند با ساخت مدل مناسب و تحلیل و پردازش داده‌های ورودی نتیجه ناشی از حفاری را به صورت آشکارا بیان سازد.

۱-۶- ساختار تحقیق

در فصل اول در مورد فرضیه‌های مرتبط با تحقیق، اهداف و ضرورت‌های انجام تحقیق و صورت‌های کلی از تحقیق، سخن به میان می‌آید. در ادامه در فصل دوم به بررسی و مرور بر تحقیقات پیشین پرداخته و الگوهای طبقه‌بندی موضوع تحقیق و همچنین الگوهای تحلیلی و فرضیه‌های متداول در آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل سوم که به نام روش تحقیق بیان‌شده است، از دلایل به‌کارگیری روش تحقیق، مراحل کار که همراه با جزییات کاری است و همچنین مزایای تحقیق با استفاده از این روش تحقیق به طور مفصل بیان می‌گردد. البته باید این نکته را نیز مدنظر قرارداد که در این فصل روش تحقیق می‌تواند شامل حالات مختلفی باشد.

در فصل چهارم به تحلیل نتایج و بحث در مورد موضوع تحقیق، با توجه به پژوهش صورت گرفته با نرم‌افزار Flac 3D، پرداخته می‌شود که در آن گزارش‌های اطلاعات به‌دست‌آمده درزمینه تحقیق به همراه الگویی برای پاسخ به سؤال‌های تحقیق بیان می‌گردد. به طورکلی این فصل از اهمیت بالایی برای رسیدن به پاسخ به فرضیه‌ها برخوردار است.

در فصل پنجم و انتهایی تحقیق نتیجه‌گیری، کاربردها و پیشنهاد های ناشی از انجام تحقیق بیان می‌گردد. در این فصل نتیجه ناشی از هریک از فرضیه های بیان شده و در مورد موضوع تحقیق نتیجه‌گیری کلی گرفته می‌شود و کاربردهای نظری و عملی این تحقیق در این فصل آشکار می‌شوند.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱- مقدمه

با توجه به گسترش روزافزون جمعیت و نیاز به ساماندهی حمل و نقل و یا امور شهری، نیاز به افزایش سازه‌های زیرزمینی به‌خصوص تونل‌ها بیشتر حس می‌شود. دراین بین باید توجه داشت که با گذشت سال‌ها این نیاز بیشتر قابل لمس شده و تعداد این سازه‌ها هم گسترش می‌یابد.

گسترش سازه‌های زیرزمینی احتمال وجود آن‌ها در کنار یکدیگر و یا عبورشان از مجاورت یکدیگر را افزایش می‌دهد. توجه به این امر موجب می‌گردد که آسیب‌هایی که به موجب حفر یک سازه زیرزمینی به سازه‌های مجاور وارد می‌شود، بیشتر مورد بررسی قرار گیرد چرا که می‌تواند خسارات جبران ناپذیری را به ارمغان آورد.

با توجه به این نگرش باید تجربیات و الگوهای طبقه‌بندی در زمینه تأثیرات حفر تونل در مجاورت با سازه زیرزمینی دیگری ازجمله تونل‌ها را مورد بررسی و تحلیل قرارداد که در این فصل تا حد امکان بیان می‌گردد.

۲-۲- تونل سازی سپری

به‌طورکلی روش‌های حفاری در زمین‌های نرم به سه دسته کلی روش حفاری مکـانیزه یـا همـان روش تونل سازی سپری[۱]، روش کند و پوش[۲] و روش تونل سازی جدید اتریشی[۳] یا همان ناتم[۴] تقسیم بندی می‌شود. در ادامه روش تونل سازی سپری که مرتبط با موضوع این پایان نامه هست بـه اجمـال شرح داده خواهد شد[۲].

[1] Shield Tunneling
[2] Cut & Cover
[3] New Austrian Tunneling Method
[4] NATM

۲-۲-۱- روش تونل سازی سپری

تونل سازی سپری عبارت است به‌کارگیری دستگاهی که حفاظت کارگاه را در برابر ریـزش‌هـای مختلف تأمین کند و سرعت بیشتری در پیشروی حاصل نماید.

یک سپر استوانه‌ای اساساً از یک استوانه بزرگ که بدنه آن از فولاد ضخیم است، تشکیل می‌شود. از داخل این استوانه می‌توان حفاری تونل را انجام داد. سپرهای استوانه‌ای انواع گوناگونی دارند، بعضی تنها ایمنی کارگران را تأمین می‌نماید و برخی دیگر در خود، ماشین چال زنی و بازوی حفاری دارند. اساس کار این دستگاه، حفاری تونل در تمام مقطع و غالباً به شکل دایره است. در این شرایط سپر حفاظتی استوانه‌ای و فلزی به مقطع دایره است.

روش حفاری با دستگاه‌های TBM[1] امکان ایجاد فضاهای زیرزمینی با پوشش کم در زمین‌های ناپایدار و شرایط آب‌های زیرزمینی بدون ایجاد نشست قابل‌ملاحظه و اغتشاش در سطح فراهم می‌گردد.

امروزه تونل سازی با دستگاه‌های TBM در زمین‌های نامناسب و دارای ترافیک عبوری زیاد، یک روش مناسب و اقتصادی و با نرخ پیشروی مناسب می‌باشد. از عمده مزایای حفاری با TBM می‌توان موارد زیر را نام برد:

۱. تأثیرگذاری کمتر عملیات حفاری بر ترافیک محدوده اجرای پروژه نسبت به سایر روش‌ها
۲. نرخ پیشروی بالاتر
۳. ایمنی بالا با توجه به نصب سریع پوشش
۴. کنترل نشست زمین با توجه به وجود ساختمان‌ها و محدوده مسکونی- اداری در طول مسیر

[1] Tunnel boring machine

۵. عمر طولانی و کیفیت مطلوب تونل‌های ساخته‌شده با TBM

۶. سازگاری با محیط‌زیست و آلودگی کمتر صوتی

۷. زیبایی و یکنواختی بدنه تونل

۸. وابستگی کمتر به نیروی انسانی تونل سازی

همراه با کنترل حجم خاک حفاری شده، مدیریت فشار مورد نیاز برای نگهداری جبهه تونل از مهم‌ترین عوامل تضمین‌کننده بهره برداری و عملکرد موفقیت آمیز دستگاه TBM است. تغییر شکل‌های زمین که احتمالاً تأثیرات نامطلوبی برسازه‌های بالای تونل دارد با استفاده از سیستم پوشش نهایی اجرا شده در تونل سازی مکانیزه در شرایط کاملاً آب بندی شده به حداقل می‌رسد.

سپرهای خاص شامل انواع زیر است:

الف) سپر گِل[1]

ب) سپر متعادل‌کننده فشار زمین[2] (EPB)

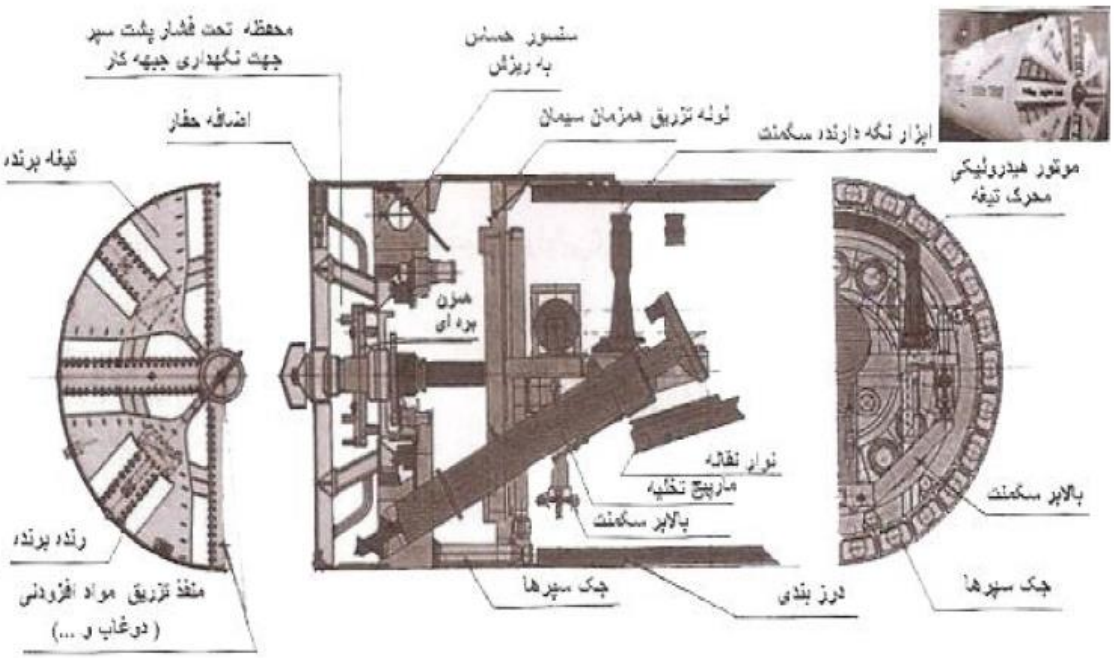
ج) سپر هوای فشرده

البته سپرهایی نیز وجود دارند که ترکیبی از حالت‌های فوق را شامل می‌شوند و به آن‌ها سپر ترکیبی[3] می‌گویند. در ادامه در ارتباط با سپر متعادل کننده فشار زمین که مرتبط با موضوع این پایان نامه می‌باشد توضیح داده خواهد شد.

[1] Slurry shield
[2] Earth Pressure Balance
[3] Mixed shield

۲-۲-۱-۱- سپر متعادل‌کننده فشار زمین

در زمین های رسی می‌توان از خود زمین به عنوان ابزار پوششی استفاده کرد. در این روش مواد کنده شده در حین تونل سازی در اتاقک حفاری نگهداری و فشرده می‌شوند و پوششی را تشکیل می‌دهند که نگهداری جبهه کار را تأمین می‌کند. این لایه در اثر فشار لایه‌های آب و خاک متراکم می‌گردد تا زمانی که فشار لایه‌های آب دیگر قادر به متراکم سازی خاک موجود در این محفظه نباشد. در این حالات تعادل فشار در سینه کار ماشین فراهم گردیده است. این سپر در زمین‌های سست زیر سطح ایستابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع از سپرها دارای یک صفحه حفار پنجره‌ای شکل هستند که مجهز به دندانه های حفار می‌باشد. مواد حفرشده موجود در جبهه کار از طریق منافذ پنجره‌ای شکل در محفظه ویژه‌ای که بلافاصله در پشت صفحه حفار قرار دارد؛ جمع و متراکم می‌شوند. این مواد در واقع به‌عنوان یک نگهدارنده جبهه کار عمل کرده و علاوه بر آن از ورود آب به داخل سپر جلوگیری می‌کنند.



شکل ۲-۱- سپر EPB [۲].

در این نوع سپرها پایدارسازی جبهه کار بدون وجود واسطه ثانویه (هوای فشرده؛ دوغاب و صفحات مکانیکی) انجام می‌گیرد.

مواد حفرشده توسط ماشین از دریچه هایی که بر روی صفحه حفار ماشین قرار دارد؛ وارد محفظه حفاری شده و فشرده می‌گردند. در اینجا این مواد با دوغاب کاملاً مخلوط می‌شوند.

در این وضعیت نیروی جک های پشت اتاقک فشار به این مواد منتقل شده و بدین ترتیب از ورود کنترل نشده مواد حفاری شده به داخل محفظه خاک جلوگیری می‌شود. تعادل هنگامی حاصل می‌شود که دوغاب مواد حاصل از حفاری دیگر قابل فشرده شدن به وسیله فشار زمین و آب نباشد. در صورت افزایش فشار نگهداری مواد زمین در داخل اتاقک حفاری، بیش از حد تعادل؛ این مواد توسط تسمه نقاله حلزونی به خارج تخلیه می‌گردند. انتقال مواد از جبهه کار به خارج با توجه به برنامه تسمه نقاله حلزونی در شرایط کنترل شده‌ای انجام می‌پذیرد که عملاً باعث جلوگیری از نشست سطح زمین می‌گردد. همچنین به منظور امکان تعادل فشار در محفظه خاک ماشین؛ بر روی تسمه نقاله حلزونی سنسورهایی جهت قرائت فشار خاک در نظر گرفته می‌شود. مواد حفرشده به منظور انجام عملیات نگهداری سینه کار بایستی خواصی مانند، دگرشکلی خمیری خوب، درجه روانی پالپی تا نرم؛ اصطکاک داخلی کم و نفوذپذیری کم را دارا باشند، در حالت عادی هیچ زمین یافت نمی‌شود که همه خواص فوق را یکجا چه قبل و چه بعد از حفاری داشته باشد. از این رو با توجه به نیاز شکل دهی و مطلوب سازی خاک به لحاظ دستیابی به نفوذپذیری کم؛ کاهش اصطکاک؛ روان گرایی و شکل پذیری مناسب عموماً نسبت به اضافه نمودن آب، دوغاب و مواد پلیمری به خاک اقدام می‌گردد. این مواد در خلال عملیات حفاری در سینه کار، محفظه خاک و یا در تسمه نقاله حلزونی به خاک اضافه می‌گردند. آماده سازی زمین به نوع زمین و پارامترهای آن ازجمله، ابعاد و ذرات، آب محتوی، حد روانی، شاخص خمیری و شاخص روانی بستگی دارد. این پارامترها ممکن است تحت تأثیر عوامل زیر قرار گیرند:

الف) اضافه کردن آب

ب) اضافه کردن سوسپانسیون بنتونیت، رس و یا پلیمر

ج) اضافه کردن گِل

به هنگام طراحی و انتخاب روش، درصد مورد انتظار افزودنی‌ها بایستی تعیین شود.

زمین‌های رسی؛ سیلتی و ماسه‌ای برای بکار گیری سپرهای تعادلی بسیار مناسب می‌باشند. بسته به میزان روانی زمین، آب اصلاً بکار برده نمی شود و یا از مقادیر کم آب استفاده می‌گردد. با استفاده از مخلوط کننده‌ها زمین بسیار چسبنده نیز قابل تبدیل به یک دوغاب خمیری در محفظه خاک می‌باشند. در زمین هایی با درصد ماسه بالا، افزودن آب به منظور کاهش اصطکاک داخلی خاک کافی نبوده و در این موارد می‌بایست از رس و دوغاب نیز استفاده گردد. تزریق مواد پلیمری جاذب آب در لایه‌های خاک با نفوذ پذیری بسیار بالا به منظور جذب آب امروزه در ماشین‌های سپر تعادلی با فشار زمین مورد توجه قرارگرفته است.

سپرهای گِل و EPB امروزه به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته در مواردی نیز از سپرهای ترکیبی استفاده می‌شود.

۲- ۲- ۱- ۱- ۱- مزایا سپر EPB

- عدم وقوع افت ناگهانی سیال نگهداری در هنگام مواجه با فضای خالی در زمین
- عدم نیاز به تأسیسات جداسازی
- آسان تر بودن حفر و انتقال مواد جامد سنگی (نداشتن سنگ‌شکن)
- نداشتن مشکل تجمع مواد زائد

- امکان استفاده از ریل و واگن به منظور انتقال مواد
- هزینه سرمایه‌ای کمتر نسبت به سپر دوغابی
- سادگی سیستم از نظر کاربری و نگهداری
- میزان نشست محدود در صورت ریزش ناگهانی جبهه کار
- قابل استفاده در شرایط مختلف زمین
- فضای مورد نیاز کمتر برای نوبت مونتاژ و تجهیز کارگاه

۲- ۲- ۱-۱-۲- معایب سپر EPB

- نیاز به نیروی زیاد در تونل‌های با قطر بالا جهت نگهداری سینه کار
- نا مناسب در مواردی که نشست بسیار اندک مد نظر می‌باشد؛ بدلیل نا متقارن بودن فشار در سینه کار
- فشار مورد نیاز جبهه کار باید در حین پیشروی محاسبه شود.
- توان و گشتاور زیاد سرحفار
- آلودگی زیاد تونل با مصالح حفاری

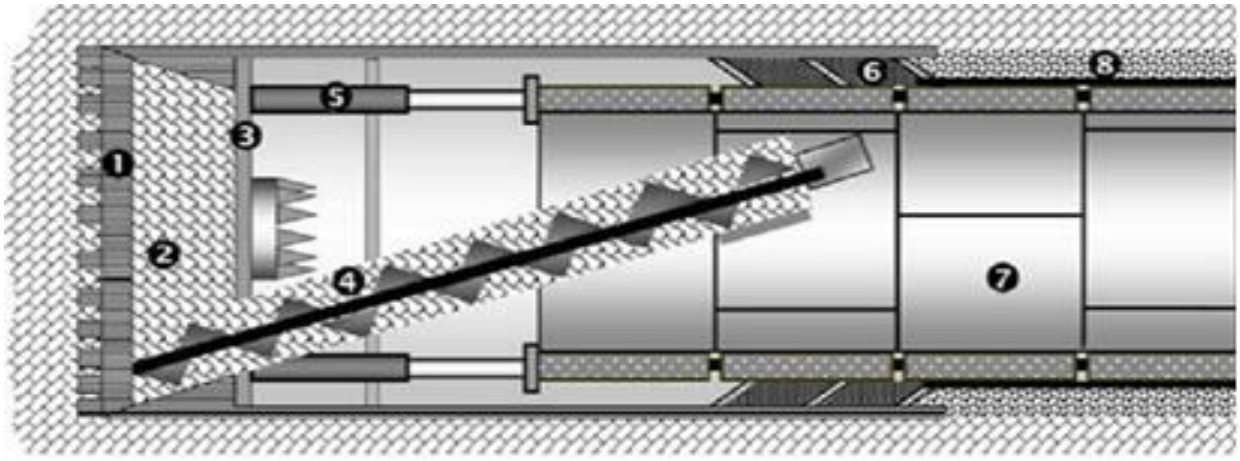
۲-۲-۱-۱-۳- عملکرد دستگاه EPB

در شکل ۲-۲ طرحی از قسمت‌های اصلی دستگاه EPB مشاهده می‌شود.

همان‌طور که گفته شد در این دستگاه، جهت محافظت از جبهه کار، از مخلوط خاک حفاری‌شده، آب، دوغاب و در صورت نیاز مواد افزودنی دیگر استفاده می‌شود. حفاظت از جبهه کار به دلیل متعادل کردن فشار لایه‌های فوقانی خاک و همچنین فشار آب زیرزمینی الزامی است. اگر در خاک‌های سست فشار متعادل‌کننده به جبهه حفاری وارد نشود، فرو ریزش زمین بالای تونل و وقوع نشست‌های بزرگ، اجتناب ناپذیر است.

با افزایش نیروی فشار جک‌های پیش راننده، خاک موجود در محفظه فشرده سازی متراکم شده و فشار معینی را جهت جلوگیری از فرو ریزش سینه کار به قسمت جلویی تونل وارد می‌کند. این فشار (که توسط حسگرهای EPB که در ترازهای متفاوت در داخل محفظه فشرده سازی نصب شده‌اند؛ اندازه می‌شود)؛ توسط اپراتور دستگاه و در مانیتور داخل اتاقک اپراتوری، قابل مشاهده است. همچنین فشار یاد شده، با افزایش یا کاهش سرعت چرخش نقاله حلزونی (که سرعت تخلیه مواد حفاری‌شده را از محفظه فشرده سازی کنترل می‌کند) قابل تنظیم است. میزان مناسب این فشار، بسته به وضعیت لایه‌های خاک یا سنگ واقع در بالای تاج تونل و همچنین تراز آب زیرزمینی متفاوت است. درصورتی‌که فشار خاک اعمالی به جبهه کار کمتر از میزان لازم باشد، باعث نشست در سطح زمین شده و در برخی موارد با توجه به جنس خاک، براثر فرو ریزش ناحیه گوه‌ای شکل در بالای تونل، امکان انسداد سر حفار در حین حفاری وجود دارد. از طرفی فشار بیش از حد خاک متراکم داخل محفظه فشرده‌سازی، می‌تواند باعث تورم سطح زمین شود. لنگر پیچشی واردشده به سر حفار نیز نباید از مقدار معینی (با توجه به مشخصات دستگاه و سرعت چرخش سر حفار)، بیشتر شود. این سرعت معمولاً در خاک‌های نرم بین یک تا دو دور در دقیقه و در خاک های مقاوم، مقادیر بالاتر (تا ۱۰ دور در دقیقه) است که با افزایش آن از ظرفیت لنگر پیچشی دستگاه کاسته می‌شود.

شایان ذکر است نکته مهم و کلیدی در کاربری دستگاه EPB، تنظیم نسبت نیروی جک‌های پیش راننده با سرعت گردش نقاله حلزونی است؛ طوری که فشار خاک داخل محفظه فشرده سازی در حیطه مورد نیاز تأمین شده و درعین‌حال مقدار لنگر پیچشی اعمال‌شده به سر حفار از حد مجاز، بیشتر نشود. کلیه این ملاحظات بایستی توسط اپراتور دستگاه انجام شود و برای دست یابی به چنین هدفی وجود نیروی اپراتور مجرب، بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۲-۲- طرحی از دستگاه EPB [۲].

۱. سر حفار ۲. محفظه‌ی فشرده‌سازی خاک ۳. صفحه آب‌بند ۴. نقاله‌ی حلزونی
۵. جک‌های پیش راننده ۶. قسمت تزریق گریس برای آب‌بندی بیشتر ۷. پوشش تونل
۸. دوغاب تزریق‌شده

در زمین هایی با درصد ماسه بالا، افزودن آب به منظور کاهش اصطکاک داخلی کافی نبوده، در این موارد می‌بایست از رس و بنتونیت به منظور تهیه محلول نگهداری مناسب استفاده شود. تزریق محلول پلیمری جاذب آب در این شرایط بسیار مفید می‌باشد.

از دوغاب برای بهسازی خاک در TBM های نوع EPB استفاده می‌کنند با تبدیل خاک به خمیر مایع با اصطکاک داخلی کم و نفوذپذیری کم می‌توان راندمان حفاری را بالا بُرد. بهسازی خاک با دوغاب عموماً باعث بهبود کنترل خاک ـ کاهش سایش ابزارهای بُرشی، کاهش چسبندگی در مسیر انتقال خاک و کاهش نفوذپذیری می‌شود.

۲-۳- الگوهای طبقه‌بندی و تحلیل موضوع تحقیق

به‌طورکلی روش‌های تعیین پایداری جبهه کار حفاری را می‌توان به موارد زیر تقسیم کرد:

الف) روش‌های تجربی

ب) روش‌های تحلیلی و روش‌های تحلیل حدی تنش

ج) روش‌های عددی

د) ابزاربندی

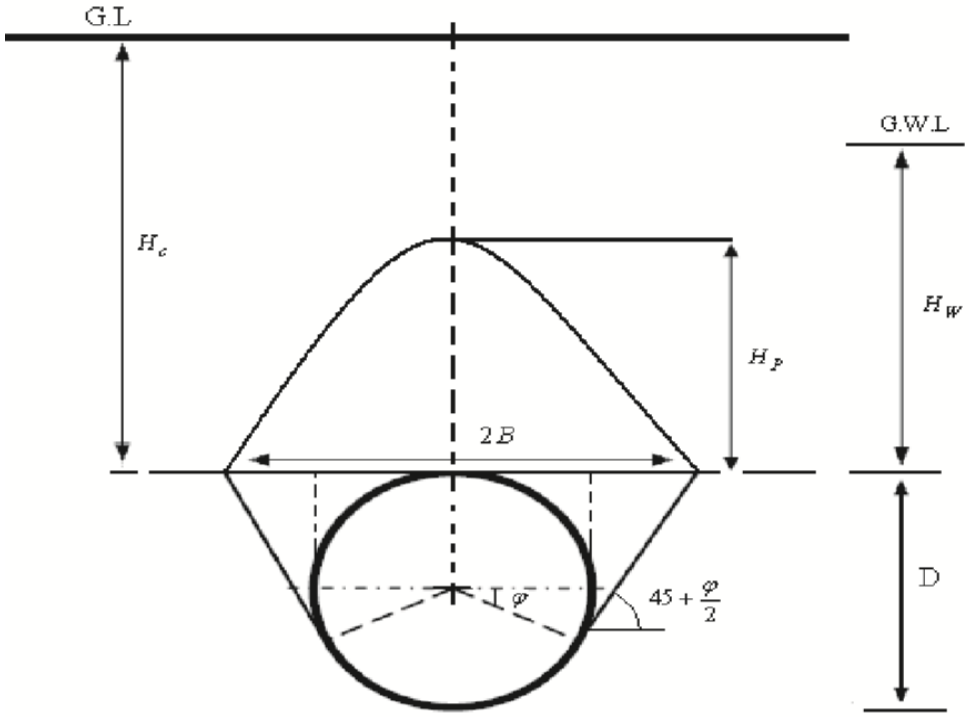
در روش های تجربی بر اساس مشاهدات انجام شده در حین حفاری تونل، رابطه ای تجربی بین یک یا چند پارامتر و مقدار فشار سینه کار برقرار می‌شود. روش های تجربی فشار نگهداری حداقل و حداکثر را ارائه نمی‌کنند بلکه فشار را برای حفاری در شرایط مناسب توصیه می‌کنند. درروش های تحلیلی در عین سادگی پارامترهای متعددی در تعیین فشار سینه کار لحاظ می‌شوند. روش‌های تحلیلی به دودسته «روش‌های تعادل حدی کلی» و «روش‌های آنالیز حدی تنش» تقسیم می‌شوند. در بحث‌های آتی چند روش معمول از روش‌های تجربی و تحلیلی ذکر می‌شود [۳].

۲-۳-۱- روش‌های تجربی

از جمله روش های تجربی در تعیین پایداری جبهه کار حفاری می توان گزینه های زیر را نام برد:

۲-۳-۱- ۱- روش ترزاقی

نظریه ترزاقی برای محاسبه بار روی تونل در خاک های چسبنده و غیر چسبنده ارائه شده است. طبق این نظریه اگر قسمتی از توده خاک در بالای فضای تونل در حین حفاری به حد تسلیم برسد؛ خاک در آن ناحیه دچار ریزش شده و در نتیجه توده های خاک مجاور نیز تحت تأثیر ناحیه سست شدگی از وضعیت ساکن خود خارج می‌شوند[۱].



شکل ۲-۳- خاک قوسی بالای تونل [۱].

طبق پیشنهاد ترزاقی در محاسبه بار روی تونل اگر عرض بارگذاری از نسبت چسبندگی به وزن مخصوص خاک کوچک‌تر باشد ($B \leq \frac{c}{\gamma}$)؛ در هر عمقی فشار سقف تونل، صفر منظور می‌شود.

۲-۳-۱-۲- روش پیشنهادی انجمن زیرزمینی هلند

برای تونل زنی استفاده از یک فشار نگهداری سینه کار که بتواند کمترین تغییر شکل را در سینه کار تخمین زده و پایداری آن را تأمین نماید؛ مطلوب است. فشار استاتیکی باید بین فشار فعال و غیرفعال زمین باشد. همچنین یک نظر عمومی است که اگر فشار نگهداری سینه کار؛ بین فشار فعال و درجای زمین باشد پایداری حفاری کنترل می‌گردد؛ یعنی $\sigma_k < \sigma_t < \sigma_{k_0}$ که در این رابطه σ_t فشار نگهداری سینه کار؛ σ_k فشار فعال زمین و σ_{k_0} فشار درجای زمین است.[۱]

۲-۳- ۲- روش‌های تحلیلی

از جمله روش دیگری که در تعیین پایداری جبهه کار حفاری مورد استفاده قرار می گیرند، روش های تحلیلی می باشند.

۲-۳-۲-۱- روش‌های تعادل حدی کلی

این روش‌ها عموماً در سه مرحله زیر انجام می‌شوند:

۱. تعریف سطح شکست بحرانی

۲. فرض توزیع تنش در طول سطح شکست

۳. حل مسئله توسط معادلات تعادل کلی خاک (که به‌صورت جسم صلب در نظر گرفته‌شده است)

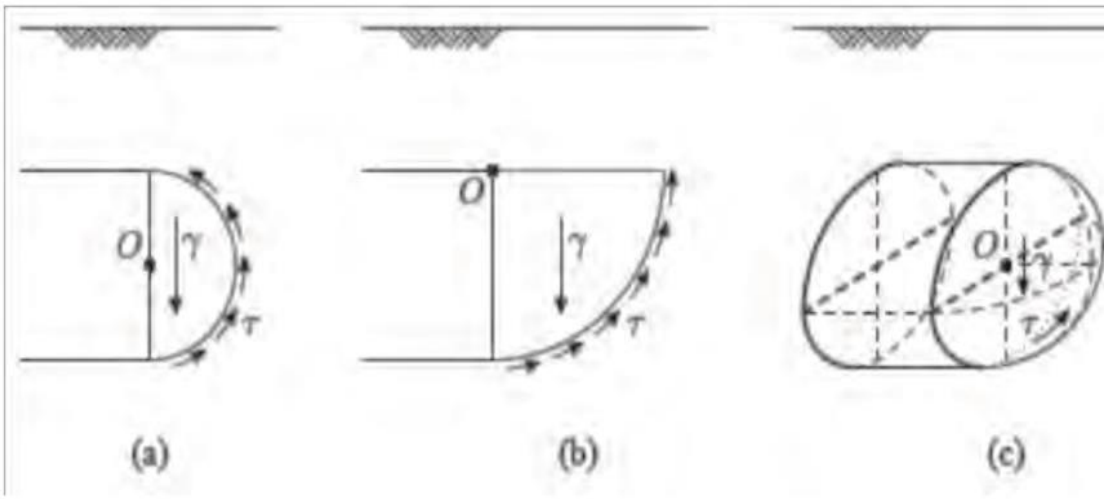
الف- روش برانز و بن مارک[1] (۱۹۶۷)

این دو محقق رابطه‌ای را نتیجه گرفتند که پایداری سینه کار در مواد چسبنده زهکشی نشده را توصیف می‌کند. طبق رابطه آن‌ها بیان می شود که نسبت پایداری (N) برابر اختلاف بین تنش کل روباره و فشار نگهداری تقسیم بر مقاومت زهکشی نشده می‌باشد.

ب- روش کراس[2]

کراس برای محاسبه فشار نگهداری حداقل موردنیاز سه مدل لغزش را مطابق با شکل ۲-۴ در یک تحلیل تعادل حدی و با استفاده از تنش‌های برشی روی صفحات لغزشی ارائه کرد. این مدل برای خاک‌های چسبنده کاربرد دارد.

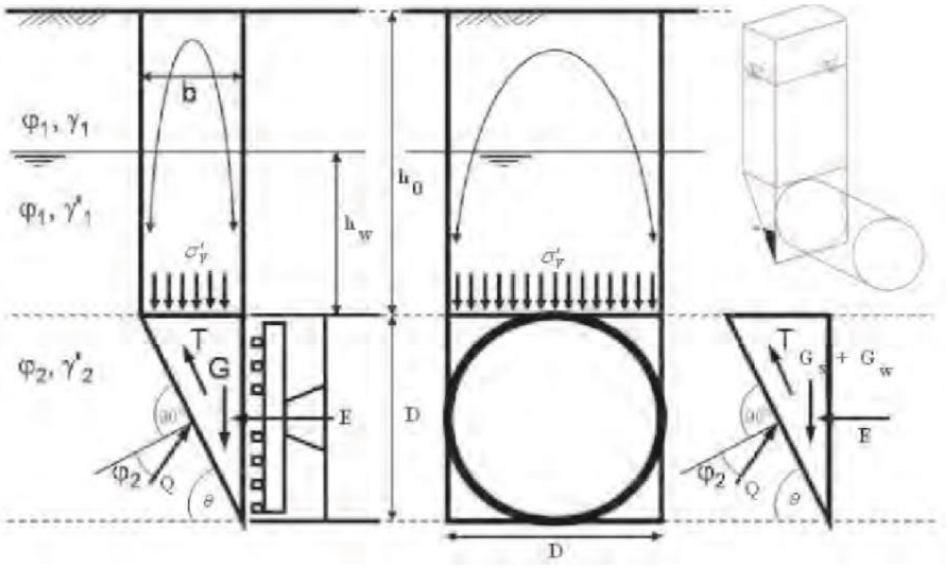
[1] Branz & Benmark
[2] Keras



شکل ۲-۴- مکانیزم های مختلف شکست درروش کراس [۱].

ج- روش جانکسز و استینر[1]

این روش بر طبق مدل Horn (۱۹۶۱) به‌صورت یک شکست سه‌بعدی که شامل گوه گسیختگی در قسمت پایین و سیلوی خاک در قسمت بالا است، برای خاک غیر چسبنده مطابق شکل ۲- ۵ است.



شکل ۲- ۵- نمایی از چگونگی توزیع بار روی سینه کار تونل درروش جانکسز و استینر [۱].

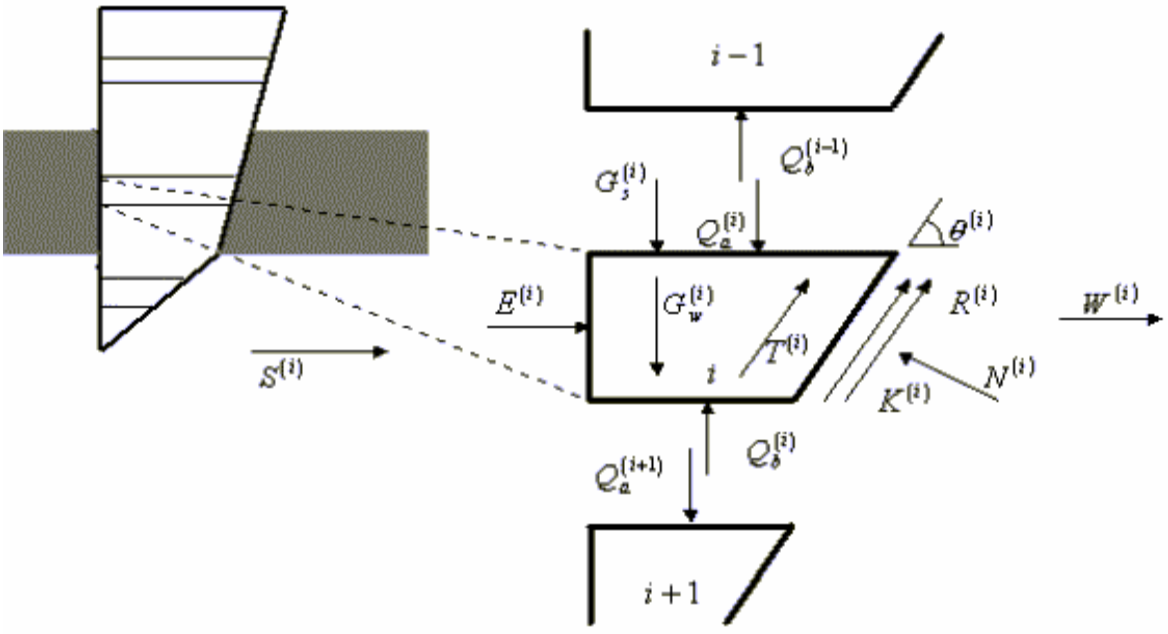
[1] Janksez & Steener

د- روش آنگنستو و کواری[1]

این روش مبتنی بر نظریه سیلوی جانسن (۱۹۸۵) می‌باشد. این دو محقق بـرای پایـداری سـینه کار با فرض تئوری لغزش هورن و قوس فشار ترزاقی در شرایط زهکشی شده؛ رابطه‌ای ارائه نمودند که ضرایب آن با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی در قالب گراف‌هایی به دست می‌آیند.[۴]

ه- روش گوه چندلایه‌ای بروئر[2] (۱۹۹۶)

مدل پایداری گوه یک روش تعادل حدی است که اساس آن از روش سیلو و گوه گرفته شده است. اولین مسئله درروش سیلو و گوه این است که خاک در آن همگن فرض می‌شود. این مسئله با در نظر گرفتن لایه‌های غیر همگن خاک درروش بروئر برطرف شده است.



شکل ۲- ۶- تعریف نمادها در مدل گوه چندلایه‌ای [۱].

[1] Angeneto & koarry
[2] Broer

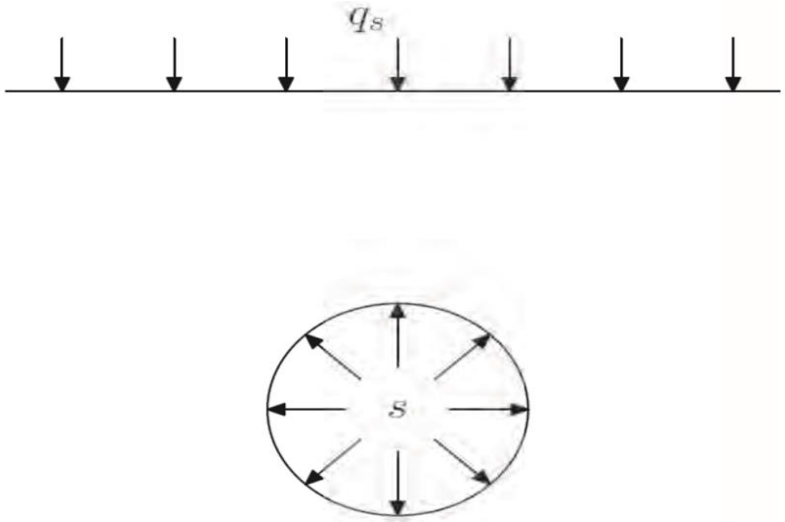
هر تکه i توسط نیروهای حاصل از تکه بالایی (i -۱) و پایینی (i +۱) که به ترتیب عبارت‌اند از Qa^i و Qb^i؛ وزن مؤثر خود گوه Qw^i و نیروی روباره Gs^i بارگذاری شده است. در صفحات شکست شیب‌دار؛ نیروی چسبندگی K^i و نیروی اصطکاک R^i (که ناشی از نیروی نرمال N^i عمود بر سطح شکست هست)؛ موازی با سطح عمل می‌کنند.

۲-۳-۲-۲- روش‌های تحلیل حدی تنش

روش های تحلیل حدی تنش به دو گروه تقسیم می شوند:

الف) روش اتکینسون و پوتس[1] (۱۹۷۷)

این دو محقق برای تونل بدون پوشش در خاک غیر چسبنده خشک کمترین فشار نگهداری را به دست آوردند. آن‌ها دو حالت حدی متفاوت ۱) $\gamma = 0,\ qs > 0$ ۲) $\gamma > 0, qs = 0$ را در نظر گرفته که در شکل ۲- ۷ قابل مشاهده می‌باشد.[۱۱]



شکل ۲-۷- مدل پایداری سینه کار درروش اتکینسون و پوتس [۱۱].

[1] Atkinson & Potts

ب) روش لکا و دور میکس[1] (۱۹۹۰)

این بررسی جهت پیش‌بینی فشار مورد نیاز برای نگهداری جبهه کار تونل در مقابل ریزش و همین طور حداکثر فشار قابل اعمال بدون رخ دادن شکست در جبهه کار تونل و حرکت رو به بالای زمین صورت می‌گیرد. درروش لکا و دور میکس راه حل‌های کران بالا و کران پایین برای پایداری سینه کار تونل‌های کم عمق حفرشده در محیط اصطکاکی (مانند ماسه)، ارائه‌شده است.

۲-۳- ۳- روش‌های عددی

در این راستا لی[2] و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از روش عددی ثابت کردند که در خاک های ماسه سیلتی فشار منفذی در سینه کار برابر ۲۲ درصد هد آب هست. برای این منظور آن ها از نرم‌افزار PENTAGON-3D استفاده کردند. به کمک همین نرم‌افزار لی و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی کاهش فشار منفذی در اثر تزریق لوله‌ای چندمرحله‌ای پرداخته و نشان دادند که فشار منفذی به عنوان یکی از عوامل مهم، در کاهش ناپایداری سینه کار نقش قابل توجهی دارد [۲۱].

اووتا[3] و کیا[4] (۲۰۰۶) با استفاده از FLAC 3D و بر اساس ماکزیمم بردار جابجایی و جریان نشان دادند که مدل‌سازی عددی با این نرم‌افزار باید در مواردی که ناپایداری سینه کار ناشی از رخنه سیال است مورد استفاده قرار نگیرند. از میان روش‌های عددی در زمینه تعیین فشار سینه کار، یکی از بهترین مدل‌سازی توسط ورمر[5] و همکاران (۲۰۰۲) انجام شده است [۱۴ و ۱۳ و ۲۵].

[1] Leca & Dormix
[2] Lee
[3] Otta
[4] Kia
[5] Vermer

بر اساس روش‌های ارائه‌شده توسط اتکینسون[1] و میئر[2] (۲۰۰۸) برای ماسه غیر چسبنده‌ی خشک، آنگستو[3] و کواری[4] (۲۰۱۱) برای خاک‌های چسبنده با زاویه اصطکاک داخلی که هر دو بر پایه معادلات توسعه داده‌شده برای ظرفیت باربری پی می‌باشند، ورمر[5] و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از نرم‌افزارPLAXIS 3D و در حالت زهکشی شده مقادیر ضرایب پایداری را در حالت‌های مختلف تحلیل به دست آوردند. یکی از نتایج مهم تحقیقات ایشان عدم تأثیر روباره بر پایداری در زوایای اصطکاک بیش از ۲۰ درجه است. با کمک همین نرم‌افزار، هوفل[6] و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اثر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و نفوذپذیری بر پایداری سینه کار پرداخته و نشان داد که با افزایش نفوذپذیری میزان پایداری کاهش می‌یابد و این وابستگی پایداری به نفوذپذیری در چسبندگی‌های بالا بیشتر است. همچنین زاویه اصطکاک اثر کمی بر پایداری دارد که علت آن میزان تنش کم در محدوده مورد بررسی است. سان[7] و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS به مدل‌سازی فشار سینه کار پرداخته و نشان داده که عدد پایداری N ارائه شده توسط دیویس[8] و همکاران (۱۹۸۰) با نتایج عددی همخوانی دارد. ایشان نشان دادند که نقاط نزدیک به کف تونل بیشتر در معرض ناپایداری می‌باشند. موضوعی که بعدها توسط لی[9] و همکاران (۲۰۰۹) نیز تائید شد. مولان[10] و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D فشار سینه کار را مدل‌سازی کردند. با استفاده از این نرم‌افزار، لی و همکاران (۲۰۰۹) به مقایسه نحوه ناپایداری سینه کار و بالازدگی زمین پرداخته و نشان دادند که شباهت زیادی بین مدل‌های تحلیلی و عددی در مدل تخریب وجود دارد اما

[1] Atkinson
[2] Mier
[3] Angesto
[4] Quaery
[5] Vermer
[6] Hofel
[7] San
[8] Daivise
[9] Lee
[10] Mollan

در مدل بالازدگی شکل ناپایداری متفاوت است. ایشان ثابت کردند که در بالازدگی تنها نیمه بالایی سینه کار دچار ناپایداری می‌شود [۲ و ۲۴ و ۲۵ و ۲۳ و ۲۰ و ۱۹ و ۱۸ و ۱۵].

قره داش و مرتضوی (۱۳۹۳) برای بررسی میزان تأثیر فشار سینه کار، بازه ای برای نسبت های مختلف فشار نگهداری به فشار جانبی زمین $(\frac{\sigma t}{\sigma y})$ در نظر گرفته شد. محدوده این بازه از ۱۰٪ تا ۲۰۰٪ است. برای هر حالت تحلیل عددی به صورت جداگانه انجام و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه در تونل سازی سپری تأثیر فشار سینه کار نقش مهمی در عملیات حفاری دارد، ارزیابی فشار سینه کار محور اصلی تحقیق قرارگرفته و نقش آن در مکانیسم تغییر شکل سینه کار به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. فشار سینه کار با استفاده از روش‌های تحلیلی تخمین و به روش عددی با استفاده از نرم‌افزارFLAC 3D مورد بررسی جامع قرار گرفته است. در این راستا سعی شده تا نکات اجرایی با تکیه بر توانایی های نرم‌افزار مدل‌سازی شوند [۳].

تحلیل های عددی از روش های پرکاربرد هستند که امکان بررسی مراحل ساخت، رفتار سه بعدی جبهه کار و همچنین برهم کنش بین تونل و پوشش بتنی را فراهم می‌سازد. با این وجود صحت نتایج این روش‌ها کاملاً به داده‌های اولیه مسئله بستگی دارد. در سال ۲۰۰۳ گرین‌وود[1] با استفاده از روش اجزا محدود به بررسی تأثیر فشار جبهه کار و فشار تزریق برنشست سطح زمین پرداخته است. در سال ۲۰۱۲ لامبروگی[2] با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 3D به تحلیل حساسیت مدل‌های رفتاری گوناگون خاک و بررسی تأثیر فشار جبهه کار و فشار تزریق برنشست سطح زمین برای پروژه‌ی متروی مادرید پرداخته است. لامبروگی پروفیل‌های طولی نشست را در حالت‌های مختلف به دست آورده و نتایج مدل‌سازی را با اطلاعات حاصل از ابزاربندی مقایسه کرده است. بر توز[3] در سال ۲۰۱۲

[1] Green vood
[2] Lamborgee
[3] Brotoze

با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی فرآیند تونل سازی با EPB، روابطی برای فشار جبهه کار ارائه داده است [۱۰ و ۱۲ و ۱۳].

در سال ۲۰۰۶، کسپر[1] با استفاده از روش اجـزا محـدود و مـدل‌سـازی سـه بعـدی بـا نـرم افـزار TSIM3D، تأثیر پارامترهای ماشین حفار متعادل کننده‌ی فشار زمین شامل فشار جبهـه کـار، فشـار تزریق، وزن ماشین و مخروطی بودن سپر ماشـین بـر نشسـت سـطح زمـین را مطالعـه کـرده اسـت. برینکگرو و بروئر نشست و اندرکنش ساخت یک تونل در زیر یک سـاختمان بـا پـی‌هـای شـمع را بـا استفاده از روش المان محدود سه بعدی و نرم‌افزار PLAXIS 3D شبیه سازی نمودنـد. آن هـا انجـام عملیات حفاری توسط ماشین تونل‌زنی سپری را به صورت مرحله‌ای مدل و جنبه های اساسـی تونـل زنی سپری مانند فشار جبهه کار، نصب پوشش های بتنی، تزریـق دوغـاب در پشـت پوشـش بتنـی و حالت مخروطی سپر را در ساخت مدل لحاظ نمودند. چنگ همکاران اثرات عبور تونـل‌هـای دو قلـوی مترو از اطراف پایه‌های عمیق یک پل راه‌آهن در سـنگاپور را بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار ABAQUS بـه صورت سه بعدی مدل‌سازی نمودند. زیانگ و همکاران نشست و تأثیرات حفر تونل‌های دوقلو بـر روی شمع‌های پایه یک پل روگذر در پکن را با استفاده از تحلیل‌های تجربی، تئوری و همچنین شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قراردادند [۲۰].

Kim (۱۹۹۶) جمع بندی مناسبی از مطالعات صورت گرفته در مورد اندرکنش بین احداث تونـل های مجاور هم تا قبل از سال ۱۹۹۶ ارائه کرد [۳۱]. Liu (۲۰۰۹) و همکاران اندرکنش بین احـداث تونل‌های متقاطع را با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی اجزاء محدود و با در نظر گـرفتن رفتـار الاسـتو پلاستیک مصالح بررسی کردند که نتایج بررسی نشان داد در منطقه‌ای مانند سـیدنی کـه تـنش‌هـای افقی نسبتاً بالایی دارند حفاری تونل جدید از زیر تونل موجود منجر به ایجاد کشش در پوشش تونـل موجود و ایجاد فشار در تاج و کـف تونـل مـی‌شـود [۳۵]. Hsiao (۲۰۰۸) و همکـاران بـا اسـتفاده از

[1] Kasper

نرم‌افزار Flac 3D عامل زاویه تقاطع یک تونل اصلی را با تونل دسترسی در سنگ بررسی کرده‌اند که نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که کمترین نشست در زاویه تقاطع ۹۰ درجه رخ می‌دهد [۳۷]. هوشنگ کاتبی و محمود سعدین (۱۳۸۸) پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از یک تونل را مورد بررسی قرار داده‌اند که نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش مدول الاستیسیته خاک مقادیر نشست در سطح زمین و در تاج تونل کاهش می یابد و با افزایش ضریب پواسون مقادیر نشست کوتاه مدت در سطح زمین و در تاج تونل افزایش میابد. امین توحیدی و محمدحسین صدقیانی (۱۳۹۰) عوامل مؤثر در اندرکنش احداث تونل‌های متقاطع غیر هم سطح را مورد بررسی قرار داده‌اند که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد بحرانی ترین شرایط ازنظر میزان لنگر خمشی در حین ساخت و هنگام عبور تونل عمیق از زیر تونل کم عمق هست [۲].

قابوسی و همکاران در سال ۱۹۷۷، با استفاده از تحلیل های دو بعدی دریافتند که در تونل‌های نزدیک به سطح با کاهش فاصله دو تونل از میزان نشست اضافی در نتیجه اندرکنش تونل‌ها کاسته می‌شود [۴].

کیم[1] در سال ۲۰۰۵، با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی بر روی تونل‌های موازی و غیر هم سطح نشان داد که ساخت تونل در زیر تونل از پیش حفر شده موجب نشست سطح زمین و جابجایی های نسبتاً زیادی درپوشش بتنی تونل بالایی می‌شوند [۳۱].

لیو[2] و همکاران در سال ۲۰۰۷، با استفاده از مدل سازی اجزا محدود در نرم افزارهای ABAQUS و TUNNEL3D تأثیر حفاری تونل جدید به موازات تونل پیشین را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که بیشترین تأثیر در پوشش تونل موجود زمانی است که جبهه کار تونل جدید از کنار تونل موجود عبور می‌کند [۳۲].

[1] kim
[2] Liu

شاد و شاهارور[1] در سال ۲۰۰۷، با استفاده از مطالعات عددی به این نتیجه رسیدند که بیشترین میزان نشست مربوط به تونل‌های روی هم و کمترین میزان نشست مربوط به تونل های کنار هم است و حفر تونل جدید در زیر تونل موجود نشست بیشتر را نسبت به حالت عکس ایجاد می‌کند [۳].

لیو[2] و همکاران در سال ۲۰۰۹، مدل‌سازی سه بعدی تونل‌های متقاطع را در منطقه سیدنی مورد بررسی قراردادند و دریافتند که نتایج به‌دست‌آمده با تنش‌های افقی بالا در منطقه بسیار مرتبط اند [۱۸].

چن[3] و همکاران در سال ۲۰۱۱، با مطالعاتی در کشور چین برای حفر تونل‌های دوقلو در خاک - های سیلتی مشاهده نمودند که حفر تونل اول موجب نوعی پیش تحکیمی در خاک شده که این عامل باعث کاهش نشست در زمان حفر تونل دوم نسبت به تونل اول می‌شود [۳۶].

حسینی و همکاران در سال ۱۳۹۰، به بررسی نشست در تقاطع خطوط ۳ و ۷ متروی تهران با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی پرداخت و نشان دادند عبور خط ۷ از زیرخط ۳ موجب ایجاد جابه‌جایی های دوباره در تونل و خاک اطراف می‌شود [۶].

توحیدی و همکاران در سال ۱۳۹۰، با مدل‌سازی تونل های متقاطع غیر هم سطح به حساسیت سنجی عوامل مؤثر در احداث تونل ها، مثل توالی ساخت و روش حفاری پرداخته و دریافت که با انتخاب درست عوامل مؤثر می‌توان تأثیر اندرکنش حاصل را به حداقل رساند [۷].

شاه رضایی و همکاران در سال ۱۳۹۲، با انجام مطالعات عددی در نرم‌افزار Flac 3D نشان دادند که حفر تونل دوقلو نسبت به تونل تکی در شرایط مشابه اگر چه باعث افزایش نشست می‌شود اما میزان نشست ۲ برابر نمی‌شود [۸].

---

[1] Cheade and Shahrour
[2] Liu
[3] Chen

چارلس[1] و همکاران در سال ۲۰۱۳، تعامل بین دو تونلی که در راستای عمود بر هم حفر می‌شوند را با استفاده از روش‌های المان محدود سه بعدی مورد بررسی قراردادند و دریافت که حداکثر نشست در تونل موجود ناشی از حفر تونل جدید، حدود ۰/۳ درصد قطر تونل است که میزان مجاز بیشتر است و باعث ناپایداری می‌شود [۳۲].

بونیاراک[2] در سال ۲۰۱۴، عوامل مؤثر بر تعامل تونل‌ها، ناشی از حفر تونل جدید در شهر Toyoura کشور ژاپن را با استفاده از روش‌های اجزا محدود مورد بررسی قرارداد. او تأثیر ابعاد لنگه‌های ما بین تونل‌ها نسبت به قطر تونل را عاملی مهم خواند و دریافت زمانی که این نسبت کمتر از ۰/۵ باشد، حداکثر نشست، کرنش کششی و تنش برشی در تونل از پیش حفرشده از محدوده مجاز خارج شده و زمانی که این نسبت از ۰/۵ به ۲ می‌رسد از میزان نشست به اندازه ۵۰ درصد کاسته می‌شود [۳۹].

ویسواناس[3] و همکاران در سال ۲۰۱۴، اثر حفاری در نزدیکی تونل موجود را در دو حالت – زمانی که حفاری در زیر تونل موجود و در کنار تونل موجود انجام می‌شود را با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود Plaxis2D مورد بررسی قرارداد. آن‌ها برای کاهش جابه‌جایی های مشاهده شده در تونل، عمل تزریق و تحکیم خاک را پیشنهاد و تصویب نمودند [۴۰].

دو[4] و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی تأثیر دو تونل مجاور، زمانی که یکی در نزدیکی دیگری حفر می‌شود با استفاده از نرم‌افزار Flac 3D پرداختند و به تأثیر کم تونل موجود به تونل در حال حفاری و تأثیر بالای تونل در حال حفاری بر تونل موجود و نشست نا متقارن در سطح در نتیجه حفاری تونل جدید، پی بردند [۴۱].

---

[1] Charles
[2] Boonyarak
[3] Viswanath
[4] Do

بونیاراک[1] و همکاران در سال ۲۰۱۵، اثر متوالی حفاری بر تونل موجود را با استفاده از آزمون‌های سانترفیوژ سه بعدی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در دو حالت این اثر را مورد بررسی قراردادند، در یک حالت تونل جدید در بالای تونل موجود حفاری می‌شود و در مورد دیگر عکس این حالت مشخص شد زمانی که تونل جدید در بالای تونل موجود حفر می‌شود، تونل از پیش حفرشده به‌صورت عمود کشیده می‌شود اما در حالت عکس به‌صورت عمودی فشرده می‌شود [۴۲].

۲-۳-۴-تعیین فشار سینه کار با استفاده از ابزاربندی

مطالعات مختلفی با استفاده از نتایج ابزاربندی برای بررسی تأثیر فشار جبهه کار و پارامترهای تأثیرگذار ماشین حفار برنشست ناشی از تونل سازی در زمین نرم صورت گرفته است. ازجمله‌ی این تحقیقات می‌توان به مطالعات کلوث[2] و همکاران در سال ۱۹۸۳ بر روی تونل انتقال آب سانفرانسیسکو، تحقیقات لکا[3] در سال ۱۹۸۹ بر روی تونل شهری واشنگتن، مطالعه‌ی وانگ[4] در سال ۱۹۹۴ سال بر روی تونل قطار سریع‌السیر تایپه، تحقیقات ماتسوشیتا[5] و همکاران در سال ۱۹۹۴ بر روی متروی فوکاکای ژاپن، مطالعات چیوربولی[6] و مارچ سلی[7] در سال ۱۹۹۶ بر روی تونل متروی میلان، مطالعه‌ی سوانسات در سال ۲۰۰۲ بر روی تونل متروی بانکوک، تحقیق کرو[8] در سال ۲۰۰۳ بر روی تونل انتقال آب لوس‌آنجلس و مطالعه‌ی آنلوتپ[9] در سال ۲۰۰۹ بر روی متروی ازمیر اشاره نمود [۱۰،۱۹،۹،۲۷].

---

[1] Boonyarak
[2] Kolus
[3] Leca
[4] Vange
[5] Matsoshita
[6] Chiorboli
[7] Marcheslee
[8] Koro
[9] Unlutepe

۲-۴- نمونه تحلیل‌های صورت گرفته در رابطه با اندرکنش بین تونل‌ها

بررسی اندرکنش تونل های مجاور به هم می‌تواند با استفاده از روش هایی شامل: روش‌های تجربی، مشاهده های میدانی، مدل‌های فیزیکی و به‌خصوص مدل‌سازی‌های عددی صورت گیرد. در این میان اقداماتی در سالیان گذشته انجام‌شده است که می‌تواند کمکی شایان در رابطه با این موضوع باشد.

برای مثال در پروژه جوبیلی[1] لندن، تونل‌هایی به صورت موازی و به صورت متقاطع وجود داشتند که باعث می‌شدند بررسی تأثیرات تونل سازی بر سیستم نگهداری در تونل‌های مجاور، مهم نمایان گردد. در این بین توجه به خطر ساخت تونل بدون انجام بررسی، قابل به بحث نبود[۴۳] .

کیم[2] یک خلاصه وضعیت از مطالعه های صورت گرفته قبل از سال ۱۹۹۶ را ارائه داد. مشاهدات میدانی بر همکنش‌های بین تونل های متقاطع با فاصله خیلی نزدیک به هم روی توسعه خط جوبیلی در لندن توسط کیمانس[3] صورت گرفته است [۴۴]. او تغییر شکل های ایجاد شده در تونل های موجود به طرف نقطه تقاطع که به وسیله‌ی حفاری برش‌های افقی هم جوار ایجاد شده است را اندازه گیری کرد. آن‌ها نتیجه گرفتند که نشستی در تونل حاضر وقتی‌که یک تونل جدید از زیر آن عبور کند به وجود خواهد آمد.

لیو[4] همکارانش (۲۰۰۹) اولین بررسی عددی سه بعدی در این زمینه را با استفاده از یک مدل المان محدود در شرایط تنش های منطقه سیدنی برای تونل‌های نعل اسبی انجام دادند.[۴۵]

در بررسی تأثیرات گذر تونل های قطار شهری شیراز از زیر پل غدیر، نمازی و همکارانش با استفاده از روش عددی المان محدود و نرم‌افزار Plaxis 3D به این نتیجه رسیدند که هرچه میزان

[1] Jubilee
[2] Kim
[3] Kimmance
[4] Liu

بارهای وارد بر شمع ها افزایش یابد میزان نشست و همچنین میزان جابجایی افقی خاک در جبهه کار نیز افزایش می‌یابد.[۴۶]

۲- ۵- مدل‌سازی سه بعدی تونل‌های متقاطع (مطالعه موردی عبور تونل خط ۷ متروی تهران از زیر کانال رباط‌کریم)

به این خاطر که مسئله نشست و تأثیر تونل سازی بر سیستم نگهداری از اهمیت بالایی برخوردار است، همواره توجه به اثرات ناشی از حفاری یک تونل جدید در نزدیکی تونل دیگری مهم جلوه می‌نماید.

مورد مطالعاتی عبور تونل خط ۷ متروی تهران از زیر کانال رباط‌کریم ازجمله مواردی است که تا حدودی با موضوع تحقیق نزدیکی دارد و به کمک نرم‌افزار Flac 3D موردبررسی قرارگرفته است.

خط ۷ متروی تهران، از شهرک امیرالمؤمنین در شرق تهران شروع شده و پس از عبور از بزرگراه بسیج و در نهایت تا میدان کاج ادامه می‌یابد. در طول مسیر حفر تونل قطعه شرقی- غربی خط ۷ مترو تهران، این تونل از کانال انتقال آب رباط‌کریم در محدوده خیابان هلال‌احمر عبورمی کند. [۴۷]

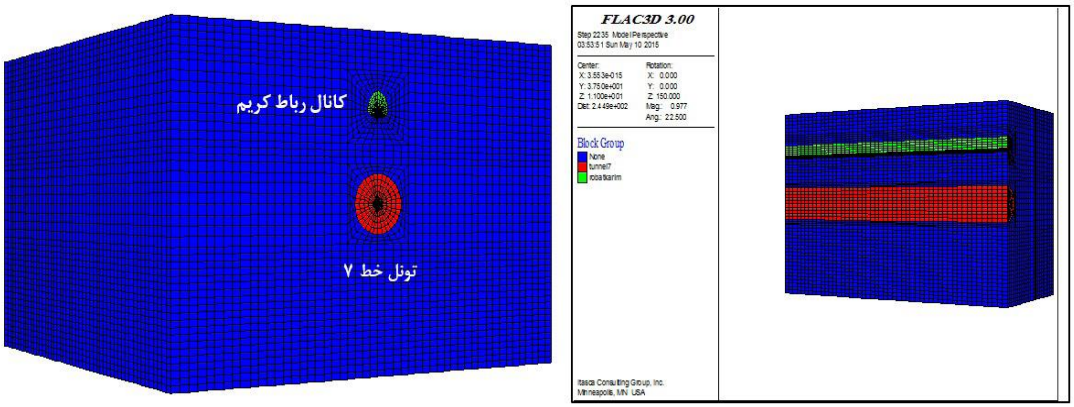
۲-۵-۱- خصوصیات طرح مورد بررسی

تقاطع تونل خط ۷ مترو با کانال رباط‌کریم به طور عمده از دو واحد زمین شناسی ET3 و ET5 عبور می‌کند. ذرات تشکیل دهنده واحد ET5 عمدتاً از سیلت و رس‌ماسه‌ای و رس به همراه ماسه تشکیل شده است و ذرات تشکیل دهنده واحد خاکی ET5 نیز از ماسه رسی به همراه گراول و نیز رس و سیلت ماسه‌ای تشکیل گردیده است.[۴۸]

از این واحدهای زمین شناسی در بررسی و مدل سازی سازه مورد نظر استفاده شده است.

۲-۵-۲- شبیه سازی سه بعدی و ساخت هندسه مدل

موقعیت قرارگیری کانال انتقال آب رباط‌کریم به موازات تونل خط ۷ و در فاصله ۶ متری از تاج تونل می‌باشد که در شکل ۲-۸ مدل سه بعدی ساخته شده نشان داده شده است.

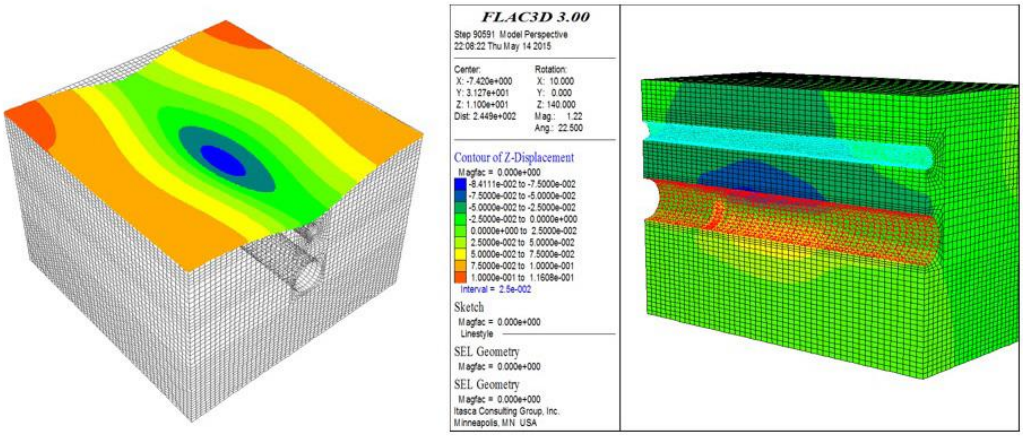


شکل ۲-۸- ابعاد تونل‌ها نسبت به هم با استفاده از نرم‌افزار Flac 3D [۴۷]

بار ناشی از ساختمان‌ها به طور متوسط به ازای هر طبقه ۲۰ کیلو نیوتون در نظر گرفته شد.[۴۹]

۲-۵-۳- مقایسه نتایج مدل‌سازی با شرایط واقعی

با استفاده از قابلیت های نرم‌افزار و مدل‌سازی صورت گرفته میزان نشست در سطح به ۵ سانتیمتر می‌رسد که با مقایسه با نتیجه واقعی هردو مقدار به یک اندازه می‌باشند.



شکل ۲-۹- تصویر مدل ساخته‌شده از نشست ۵ سانتیمتری در سطح زمین و مرکز مدل[۴۷]

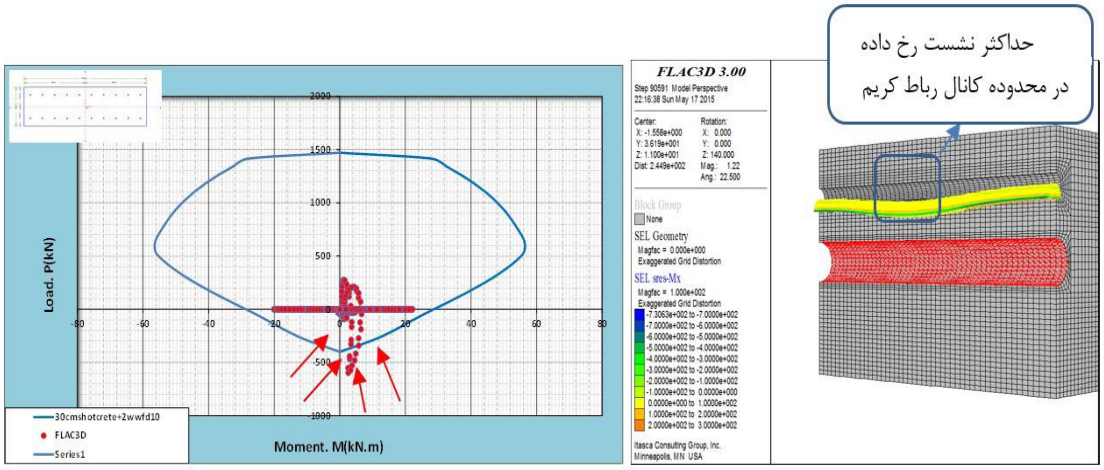
۲-۵-۴- بررسی کانال رباط‌کریم پس از عبور TBM با استفاده از نتایج مدل

پس از عبور TBM، باندی از زون‌های پلاستیک شامل المان‌های Shear-n وShear- past به وجود می‌آید که می‌تواند خساراتی را به کانال وارد سازد.[۵۰,۵۱]

۲-۵-۴-۱- بررسی نیروهای داخلی القایی به پوشش بتنی کانال رباط‌کریم

نمودار اندرکنش مقطع عرضی کانال رباط‌کریم با توجه به ضخامت ۲۰ سانتیمتری پوشش بتنی، در شکل ۲-۱۰ به نمایش گذاشته شده است و در کنار آن میزان ممان خمشی و نیروی محوری ناشی از عبور TBM از زیر کانال رباط‌کریم نشان داده‌شده است.

با توجه به اینکه میزان ممان خمشی و نیروی محوری از حد مجاز خود عبور کرده‌اند و تغییر شکل و جابه‌جایی‌های ایجاد شده بیشتر از حد معمول است، حفر تونل خط ۷ می‌تواند خساراتی را در کانال رباط کریم به وجود آورد و احتمال بالایی در ناپایداری پوشش بتنی کانال رباط‌کریم وجود دارد.[۵۲]



شکل ۲-۱۰- منحنی اندرکنش سیستم نگهداری کانال رباط‌کریم

با استفاده از مطالعه صورت گرفته و نتایج حاصل از مدل سازی، حفاری در صورت عدم رعایت فشار تزریق و فشار سینه کار بر اساس مقادیر طراحی، می‌تواند باعث القای نیروهای فشاری و کششی مخربی در کانال رباط کریم گردد.[۴۷]

۲-۶- نتیجه گیری

استفاده از روش‌های حفاری ایمن برای جلوگیری از نشست‌های سطحی و همچنین جلوگیری از آسیب به سایر سازه های زیرزمینی دارای اهمیت بالایی است، به خصوص در حالتی که سازه ها در مجاورت یکدیگر باشند. این امر موجب می‌شود که برای سرعت بالای حفاری، ایمن بودن و همچنین کاهش هزینه‌ها در تونل سازی مکانیزه استفاده از روش‌هایی مانند EPB در محیط های شهری مناسب باشد. ارزیابی اندرکنش بین فضای زیرزمینی جدید و فضاهای زیرزمینی موجود و به دست آوردن راهکار های مناسب برای کاهش خطرات و خسارات، از مبانی اصلی در موضوعات تونل سازی در نواحی شهری به شمار می‌رود که توجه به آن از اهمیت زیادی برخوردار است. زمانی که تونل جدیدی در نزدیکی سازه زیرزمینی موجود حفر می‌شود، ممکن است موجب تغییرات گسترده در نیروهای وارده بر نگهداری تونل قدیمی گردد که این تغییرات موجب جابه‌جایی و تغییر شکل گسترده می‌شود. پس توجه به این امر کاری ضروری است.

فصل سوم

روش اجرا و مدل‌سازی تونل‌های غیر هم‌سطح

سرویس و امداد و خط ۲ مشهد

۳- ۱- مقدمه

بررسی پایداری سازه های زیرزمینی در برابر احداث سازه ای دیگر، به خصوص در صورتی که در مجاورت یکدیگر باشند، امری ضروری است. ساخت هر سازه زیرزمینی در مجاورت سازه ای که درگذشته احداث شده می‌تواند تأثیرات مختلفی را از جمله نشست، جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل‌ها و همچنین تغییر در نیروهای محوری و ممان خمشی، داشته باشد.

ازجمله روش‌هایی که برای انجام این‌گونه تحلیل ها به کار گرفته می‌شود روش های تجربی، تحلیلی، مدل‌سازی فیزیکی و به‌خصوص مدل‌سازی‌های عددی هستند. امروزه با توجه به گسترش کارایی برنامه‌های کامپیوتری و پیشرفت در این زمینه‌ها استفاده از روش مدل‌سازی عددی گسترش یافته چرا که می‌تواند نتایج دقیق تر و با اطمینان تری را ارائه نماید. با توجه به این توضیح در این تحقیق از روش مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flac 3D برای تحلیل تأثیر حفاری تونل خط ۲ مترو مشهد بر تونل سرویس وامداد مشهد استفاده شده است.

۳- ۲- دلایل استفاده از مدل‌سازی عددی

از چند دهه گذشته روش‌های عددی برای حل مشکل تعیین تنش‌ها و ناپایداری ناشی از تأثیر عوامل و نبود شرایط ایزوتوپ و الاستیک و وجود ناپیوستگی‌ها در توده سنگ، به روی کارآمدند و در سال‌های گذشته با توجه به پیشرفت فن آوری و قابلیت بالای کامپیوترها، گسترش فراوانی یافته‌اند. توجه به این اصل خالی از لطف نیست که روش‌های عددی نسبت به سایر روش‌ها به علت گذراندن مراحل مناسب برنامه‌ریزی و در نظر گرفتن شرایط مختلف اعتماد بالایی را در نتایج حاصل می‌نمایند.

به‌طورکلی مدل‌های عددی با تعیین کردن رفتار توده سنگ در یک نقطه خاص و بررسی میزان بارگذاری در هر یک از این نقاط و تعمیم آن به سایر نقاط، به بررسی جنبه‌های پایداری و تغییر شکل

سنگ‌ها می‌پردازند. تقسیم بندی روش‌های عددی بر مبنای محیط‌های پیوسته و ناپیوسته عبارت است از:

- روش تفاضل محدود
- روش المان مرزی
- روش المان محدود
- روش المان مجزا
- روش ترکیبی

که نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق از روش تفاضل محدود تبعیت می‌نماید.

۳-۳- معرفی نرم‌افزار Flac 3D

در این قسمت شرح مختصری از نرم افزار$\mathbf{FLAC^{3D}}$ و روش تفاضل محدود ارائه می‌گردد. نرم افزار $\mathbf{FLAC^{3D}}$ یک برنامه تفاضل محدود صریح[1] برای محاسبات مکانیکی است همچنین این برنامه توانایی شبیه سازی سه بعدی، رفتار خاک و سنگ را دارا است. اساس این برنامه بر پایه رابطه‌های استفاده شده در نرم‌افزار FLAC است.FLAC 2D توسط شرکت ITASCA در سال ۱۹۸۶ به بازار آمد و در سال ۱۹۹۴ $\mathbf{FLAC^{3D}}$ نیز به آن پیوسته شد. در نرم‌افزار$\mathbf{FLAC^{3D}}$ ساخت مصالح توسط نواحی ایجادشده در شبکه صورت می‌گیرد. هر جزء مطابق قانون تنش- کرنش خطی یا غیرخطی که برای آن تعریف شده است، در مقابل نیروها و قیدهای مرزی عکس‌العمل نشان می‌دهد. درصورتی‌که حالت تنش در یک عضو شرایط حدی را ارضا کند، عضو مورد نظر به حالت تسلیم رسیده و رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد.

ازجمله قابلیت‌های شایان توجه نرم‌افزار FLAC می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

[1] Explicit

۱- قابلیت مدل‌سازی المان‌های سطح مشترک که از طریق آن می‌توان صفحات لغزش را یافته و درزه‌ها، لایه‌های خاک و اندرکنش خاک و سازه را به‌دقت شبیه‌سازی کرد.

۲- توانایی انجام مدل‌های تحلیلی کرنش صفحه‌ای، تنش صفحه‌ای و تقارن محوری

۳- توانایی مدل‌سازی المان‌های سازه‌ای برای شبیه‌سازی حائل‌های تونل، دستگاه‌های میخکوبی، پیچ سنگ، شمع‌ها، ریز شمع‌ها و غیره.

۴- توانایی تحلیل دینامیکی مسائل ژئوتکنیکی جهت مدل‌سازی بارهای هارمونیک، بار زلزله و انفجار

۵- توانایی مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و تحکیم در خاک

۶- با استفاده از زبان برنامه‌نویسی قوی به نام FISH متعلق به نرم افزار، کاربر قادر خواهد بود تا توابع مورد نظر خود را در نرم افزار مدل‌سازی نماید و یا حتی می‌تواند مدل‌های رفتاری دلخواه خود را به محیط‌های پیوسته معرفی کند. همچنین زبان برنامه نویسی مذکور به کاربر این امکان را می‌دهد که مطالعات پارامتری و مطالعات مرحله‌ای را با سهولت بیشتری انجام دهد.

۷- فایل‌های دستور نویسی نرم‌افزار (کد نویسی) می‌تواند به‌راحتی توسط ویرایشگر متنی اصلاح شود. این قابلیت به کاربر اجازه می‌دهد تا بتواند مطالعات پارامتری و عددی مختلفی بر روی برنامه مورد نیاز انجام دهد. برای مثال در این پایان نامه می‌بایست چند پارامتر را ثابت نگه داشته و یک پارامتر مانند چسبندگی خاک را در کدهای نوشته شده تغییر داده و نتایج حاصل از تغییر آن را در توزیع تنش‌ها تحت گروه شمع بررسی کرد.

روش تفاضل محدود یکی از روش‌های حل دسته معادلات دیفرانسیل با مقادیر مرزی است. در این روش، عبارات مشتق در معادلات حاکم به طور مستقیم به صورت یک عبارت جبری برحسب متغیرهای میدانی (تنش و تغییر مکان) جایگزین می‌شود. به‌رغم اینکه در این روش اصولاً محیط را

پیوسته در نظر می‌گیرند، می‌توان وجود چند سطح ناپیوستگی را نیز مدل‌سازی نمود. از مزایای این روش نسبت به روش‌های دیگر می‌توان موارد زیر را بیان نمود:

الف- به دلیل حل غیر ماتریسی، امکان تحلیل مدل‌های بزرگ مقیاس بدون استفاده از کامپیوترهای پیشرفته فراهم است.

ب- بیش‌ترین راندمان را برای حل مسائل و محاسبات دینامیکی دارد.

در روش تفاضل محدود مانند روش المان محدود مجموعه‌ای از معادلات جبری بایستی حل شود. در روش المان محدود ماتریس المان‌ها با هم ترکیب شده و درون یک ماتریس سختی کل قرار داده می‌شود. این در حالی است که در روش تفاضل محدود چنین نیست، چرا که بازسازی معادلات تفاضل محدود در هر گام نسبتاً کار آمدتر است. نرم‌افزار FLAC از روش پیشروی زمان صریح برای حل معادلات جبری استفاده می‌کند. این در حالی است که در بسیاری از نرم‌افزارهای المان محدود استفاده از روش‌های ضمنی مرسوم‌تر است.

بسیاری تصور می‌کنند که روش تفاضل محدود به شبکه بندی مستطیلی محدود است؛ اما واقعیت ندارد چرا که روشی برای استخراج معادلات دیفرانسیل برای هر شکلی از المان‌ها وجود دارد که در نرم‌افزار FLAC نیز از آن استفاده شده است. با استفاده از این روش که به روش ویلکینز[1] معروف است، مرزها و اجزایی با هر شکل و خصوصیت دلخواه را می‌توان مشابه روش المان محدود داشت.

مراحل محاسباتی در این نرم افزار به این صورت است که ابتدا با استفاده از معادلات حرکت، سرعت‌ها و جابجایی‌های ناشی از نیروها و تنش‌ها به دست می‌آید. سپس با استفاده از روابط ساختاری (تنش-کرنش) تعریف شده نرخ‌های کرنش از سرعت‌ها و تنش‌های جدید محاسبه می‌شوند. این گام زمانی به‌صورت سیکلی ادامه می‌یابد و مقادیر جدید از گام قبلی در گام جدید جایگزین می‌شود.

[1] Wilkins

مزیت اساسی روش حل صریح نسبت به روش‌های ضمنی این است که درروش صریح فرآیند تکرار برای محاسبه تنش‌ها از مقادیر کرنش در المان، حتی برای مواد غیرخطی، لازم نیست. درروش ضمنی، هر المان در طول هر گام از حل با المان‌های دیگر در ارتباط است؛ بنابراین در هر گام تعدادی تکرار برای برقراری شرایط تعادل و سازگاری لازم است. عیب عمده‌ی روش ضمنی در کوچک بودن گام‌هاست که سبب افزایش تعداد گام‌ها در یک مسئله می‌گردد. به‌طورکلی روش‌های صریح به مانند روش‌های غیرخطی، کرنش‌های بزرگ و ناپایداری‌های فیزیکی مناسب‌اند و برای مدل‌سازی فرآیندهای خطی و مسائل کرنش کوچک مناسب نیستند.

در این پایان‌نامه با عنایت به توانایی‌های مذکور از FLAC 3D V.3 استفاده‌شده است.

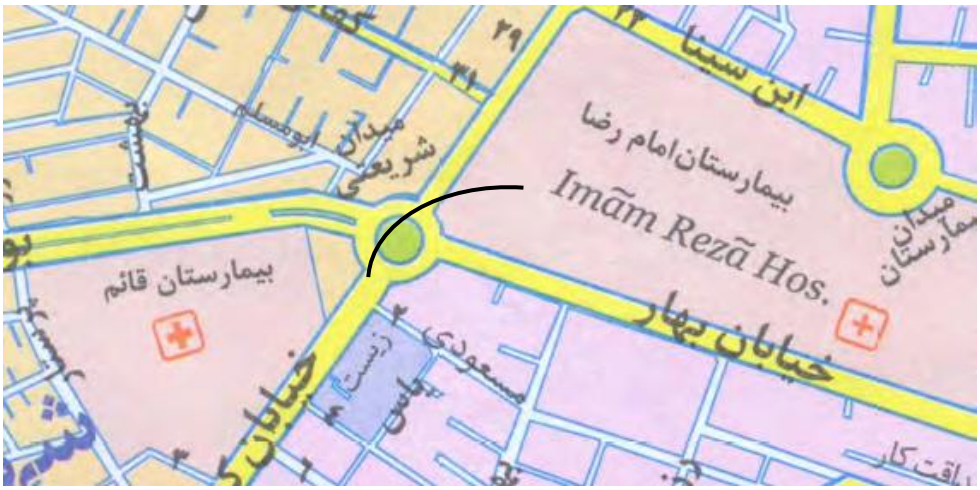
۳-۴- آشنایی با منطقه موردمطالعه (تقاطع غیر هم‌سطح تونل سرویس وامداد و خط ۲ مترو مشهد)

همان‌طور که در فصول قبل به موضوع مورد مطالعه اشاره شد، می‌توان بازگو نمود که منطقه مورد مطالعه، تقاطع غیر هم سطح دو تونل سرویس امداد و خط ۲ مترو شهری، در شهر مشهد است. این تقاطع در شهر مشهد و در موقعیت میدان شریعتی است که به علت بررسی اثرات حفاری تونل خط ۲ بر تونل سرویس و امداد، مطالعه و بررسی آن خالی از فایده نیست.

۳- ۴- ۱- تونل سرویس و امداد مشهد

تونل سرویس و امداد مشهد در بخش زیرین خیابان احمدآباد و میدان شریعتی و با موقعیت جغرافیایی ۳۶ درجه شمالی و ۵۹ درجه شرقی ساخته شده است. این تونل خط مواصلاتی بین بیمارستان امام رضا (ع) و بیمارستان قایم (عج) محسوب می‌گردد که وظیفه آن ایجاد بستری مناسب برای انتقال بیماران و انجام امور اورژانسی و همچنین انجام مشارکت در استفاده از تجهیزات و نیروی متخصص پزشکی است که به علت ترافیک سنگینی که در محدوده بین این دو بیمارستان وجود دارد،

احداث گردیده است. احداث این تونل موجب گشته که مدت زمان جابه‌جایی بین این دو بیمارستان بسیار کاهش یافته و به نزدیک یک دقیقه برسد.[۵۳]



شکل ۳-۱- مسیر و موقعیت تونل سرویس وامداد[۵۳]

۳- ۴- ۱- ۱- مشخصه‌های تونل سرویس وامداد

این تونل دارای ۵۷۵ متر طول، با ارتفاع مفید ۳/۵ متر است که عرض مفید آن با احتساب پیاده‌رو به ۷ متر می‌رسد. علاوه بر آن عمق تاج این تونل حداکثر به ۵/۷ متر از سطح زمین می‌رسد که البته، در بخش‌های مختلف تونل این میزان تغییر می‌کند. در این تونل به دلایل وجود شرایط اجرایی و محیطی، وجود بار ترافیکی بالا در محدوده میدان شریعتی، حفاری در ۵ بخش صورت گرفته است که حفاری در بخش ۴ که عمیق‌ترین بخش این تونل است، دربرگیرنده روش NATM است که در بخش بیمارستان قایم قرارگرفته است.[۵۳]

از ویژگی‌های خاص این تونل، تلاقی با خط‌های ۱ و ۲ مترو مشهد است به‌گونه‌ای که این تونل در خیابان احمدآباد، به غیر این‌که از زیر تونل خط ۱ مترو شهری با عمق ۱۵ متر عبور می‌نماید در ادامه، در بالای تونل خط ۲ مترو مشهد قرار می‌گیرد. از حساسیت‌هایی که در طول این مسیر وجود

دارد می‌توان وجود ساختمان‌های سه طبقه به موازات تونل و همچنین ساختمان‌هایی با قدمت بـالا را نام برد.

۳- ۴- ۱- ۲- ژیوتکنیک مسیر

در موقعیت تونل سرویس و امداد، بافت خاک محلی به‌صورت تقریباً یکنواخـت و جـنس خـاک ازنظر طبقه‌بندی، CL-ML با لایه‌هایی از مخلوط رس و لای ماسه‌ای با خواص خمیری کم است. البته قابل ذکر است که سطح آب زیرزمینی در عمقی بیشتر از ۵۰ متر قرار دارد که تونل را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.[۵۳]

۲ نوع لایه خاکی در این محل قرارگرفته که مشخصات آن‌ها در جدول ۳- ۱ آورده شده است. با توجه به این اطلاعات، مدل رفتاری موهر- کلمب برای این مصالح در نظر گرفته شده که به دلیـل تشـکیل نقاط پلاستیک در خاک، مناسب به نظر می‌رسد.

جدول ۳- ۱- مشخصات ژیوتکنیکی خاک [۵۳]

لایه	D(m)	K_0	ϕ (deg)	C (KPa)	γ_{sat} (KN/m^3)	υ	E (KPa)
شماره ۱	۶/۵	۰/۵	۳۰	۲۵	۱۸	۰/۲۵	۲۵۰۰۰
شماره ۲	۳۰	۰/۵	۳۵	۲۵	۱۸	۰/۲۵	۲۵۰۰۰

۳- ۴- ۱- ۳- مشخصه‌های پوشش بتنی

پس از این که حفاری تونل صورت گرفت، به‌عنوان پوشش بتنی، لایه‌ای از شاتکریت به ضخامت ۳۰ سانتیمتر همراه با پروفیل‌های فلزی که مشخصات آن در جدول ۳- ۲ آورده شده است، نصب گردیده است. [۵۳]

جدول ۳- ۲- مشخصات پوشش بتنی [۵۳]

نوع رفتار	EA (KN)	EI ($KN.m^2$)	υ	t (m)
الاستیک خطی	۷۰۱۸۰۰۰	۵۲۶۰۰	۰/۲	۰/۳

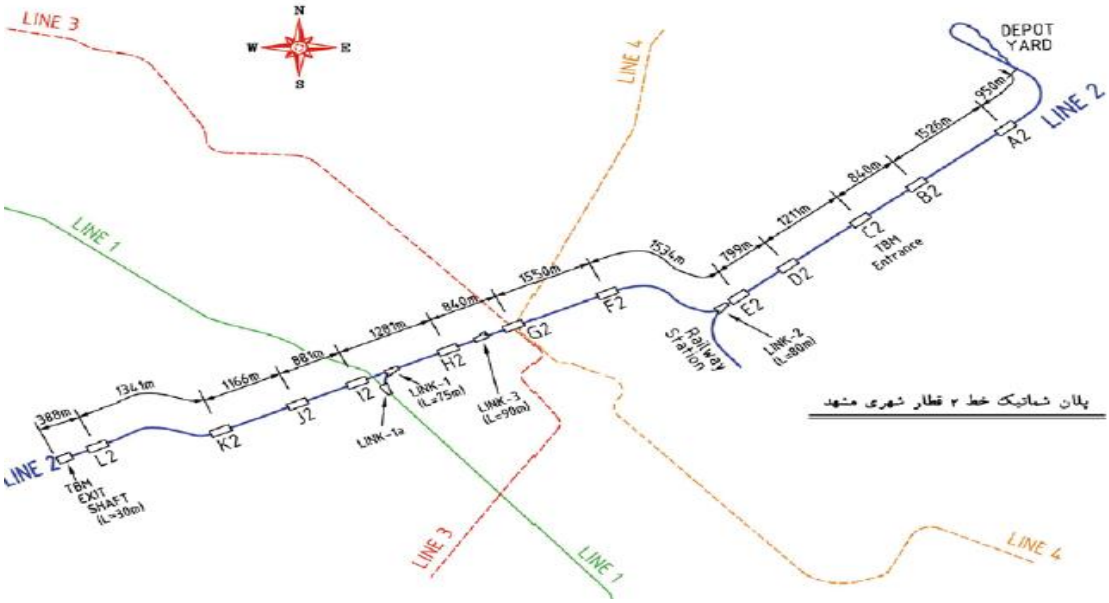
۳- ۴- ۲- تونل خط ۲ مترو مشهد

مسیر خط ۲ قطار شهری مشهد که در شکل ۳- ۲ به نمایش کشیده شده است با طولی بالغ بر ۱۴/۳ کیلومتر و در امتداد شمال شرقی به جنوب غربی، به‌صورت تونلی عمیق با ۱۳ ایستگاه، انتهای خیابان طبرسی شمالی را به بلوار شهید فکوری متصل می‌سازد و در مسیر خود از منطقه مورد مطالعه ما به نام میدان شریعتی گذر می‌نماید.

بخش عمده‌ای از این مسیر به‌صورت زیرزمینی احداث‌شده که حفاری این بخش توسط دو ماشین حفار تونل موسوم به TBM انجام می‌شود که دریکی از پرترددترین راهروهای شهر مشهد اجرایی می‌گردد.

ماهیت چند گونه ای، تغییرات ژئوتکنیکی زمین، معرضین گسترده و متغیر، تفاوت‌های روش اجرا و گستردگی، این پروژه را تبدیل به یک دانشگاه تجربی عظیم کرده است. کارشناسان و

متخصصین پروژه هرروز با مسائل و مشکلاتی روبرو می‌شوند که ضمن استفاده از تخصص و دانش برای حل آن‌ها نحوه مواجهه با آن‌ها نیز تجربیات ارزشمندی را به ثمر می‌نشاند.



شکل ۳-۲- مسیر خط ۲ متروی مشهد[۵۴]

۳- ۴- ۲- ۱- جزییات قطار شهری خط ۲ مشهد

این پروژه شامل مسیری به طول ۱۴/۳ کیلومتر که به صورت دوخطه احداث شده، همراه با ۱۳ ایستگاه و ۲۰ رام قطار متشکل از ۵ واگن که در سرفصل طرح با سرفاصله ۱۸۰ ثانیه قابلیت حمل ۱۶۰۰۰ مسافر در ساعت در هر جهت رادارند ایجاد شده است.

مجموعه دپو به مساحت ۱۶/۴ هکتار با ریل‌گذاری حدود ۱۲/۶ کیلومتر مسیر یک خطه و به ظرفیت پارکینگ ۲۷ قطار به‌صورت مسقف، برای تعمیرات سبک و تعمیرات اساسی ناوگان خط ۲ و تعمیرات اساسی ناوگان خطوط آتی، ساختمان مرکز فرمان و تجهیزات مخابرات و تأسیساتی است. [۵۴]

برای تسریع در احداث تونل، مسیر به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم شده و حفاری به وسیله دو دستگاهTBM-EPB انجام می‌شود؛ عمق ریل نسبت به سطح زمین در تونل از ۱۵ تا ۲۳ متر متغیر است. (حداقل ۱۵ متر و حداکثر در میدان شهدا ۲۳ متر).

با توجه به حجم بالای قطعات بتنی موردنیاز ساخت تونل، کارخانه‌ای در نزدیکی دپوی شمالی مسیر ساخته‌شده که وظیفه تأمین قطعات بتنی تونل و تراورس‌های ریلی مسیر را به عهده دارد. کیفیت قطعات بتنی تولیدشده در این کارخانه در آزمایشگاه مجهزی مورد کنترل و ارزیابی قرار می‌گیرد.

در مورد با مشخصات ژیومکانیکی در خط ۲ قطار شهری می‌توان به جدول ۳-۳ مراجعه کرد.

جدول ۳- ۳- خصوصیات ژیوتکنیکی خط ۲ قطار شهری مشهد [۵۴]

Layer No	Description	γ_d (KN/m^3)	ω (%)	C (Kg/cm^2)	ϕ (Deg)	E (Kg/cm^2)
-	Over- Borden	۱۶/۵	۱۴	۰/۳	۲۰	-
۱	SC-SM	۱۶/۲	۱۴	۰/۰۰	۲۶	۶۰۰
۲	CL-ML	۱۶/۵	۱۴	۰/۵۵	۲۰	۲۰۰
۳	SC-SM	۱۶	۱۲	۰/۰۰	۳۱	۸۰۰
۴	CL-ML	۱۷/۵	۱۸	۰/۴۰	۱۸	۲۰۰
۵	CL-ML	۱۷/۵	۱۸	۰/۴۰	۱۸	۲۰۰

۳- ۴- ۳- تقاطع غیر هم‌سطح تونل سرویس وامداد و خط ۲ مترو مشهد

طراحی مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد به گونه‌ای است که این تونل در قسمتی از مسیر خود با فاصله کمی در حدود ۳/۷ متر از زیر تونل سرویس و امداد مشهد عبورمی‌کند. تونل سرویس و امداد مشهد در بخش مرکزی شهر مشهد واقع هست.

تلاقی تونل سرویس و امداد با خطوط ۱ و ۲ قطار شهری از ویژگی‌های منحصر به فرد این تونل است، به‌نحوی‌که در خیابان احمدآباد ضمن عبور از زیر تونل خط ۱ قطار شهری در عمق ۱۵ متری از سطح زمین، بالای تونل خط ۲ قطار شهری قرارگرفته است. همچنین موقعیت تقاطع تونل خط ۲ و تونل سرویس و امداد بلافاصله پس از تقاطع تونل خط ۲ و تونل خط ۱ است، به همین دلیل با توجه به ملاحظات فنی و اجرایی تقاطع تونل‌های ۱ و ۲، ۷۵ درجه در نظر گرفته و اجرا شده است. ضمناً به این نکته می‌توان اشاره کرد که زاویه بین این دو تونل ۵۰ درجه در نظر گرفته شده است.

۳-۴-۳-۱- خصوصیات ژیوتکنیکی زمین در محل تقاطع

خاک زمین در محل تقاطع تقریباً انواع خاک‌های ریزدانه و درشت دانه را دربرمی گیرد. با این‌حال بخش بالایی از این خاک‌ها، خاک‌های ریزدانه رسی و سیلتی است. خاک با حرکت از سطح زمین به اعماق، به‌صورت تقریباً یکی در میان لایه‌های درشت‌دانه و ریزدانه را شامل می‌شود.

خصوصیات ژیوتکنیکی در محل تقاطع خطوط سرویس وامداد و تونل خط ۲ مطابق جدول ۳-۳ هست. در مدل پایه زمین به صورت لایه‌های مختلف مطابق آنچه در جدول ۳- ۴ آمده است، مدل‌سازی شده است.

علاوه بر این قابل ذکر است که تزار آب ۳۵ متر پایین‌تر از سطح زمین قرار دارد و با توجه به این موضوع از مدل‌سازی این مورد خودداری شده است.

جدول ۳-۴- مشخصات ژیوتکنیکی تقاطع [۵۴]

Layer No	Description	y_d (KN/m^3)	ω (%)	C' (Kg/cm^2)	ϕ' (Deg)	C_U (Kg/cm^2)	e_0	E (Kg/cm^2)
-	Over- Borden	-	-	-	-	-	-	-
۱	SC-SM	۱۸/۰	۸	۰/۰۰	۳۵	–	–	۸۰۰
۲	CL-ML	۱۶/۵	۱۳	۰/۳۰	۲۳	۰/۸۰	۰/۶۷	۱۵۰
۳	SC-SM	۱۹/۰	۱۰	۰/۰۰	۳۶	–	–	۱۰۰۰
۴	CL-ML	۱۷/۰	۱۹	۰/۳۰	۲۵	۰/۹۵	۰/۶۱	۱۸۰
۵	SC-SM	۱۷/۵	۱۲	۰/۰۰	۳۵	–	–	۱۰۰۰

۳- ۵- نحوه مدل‌سازی

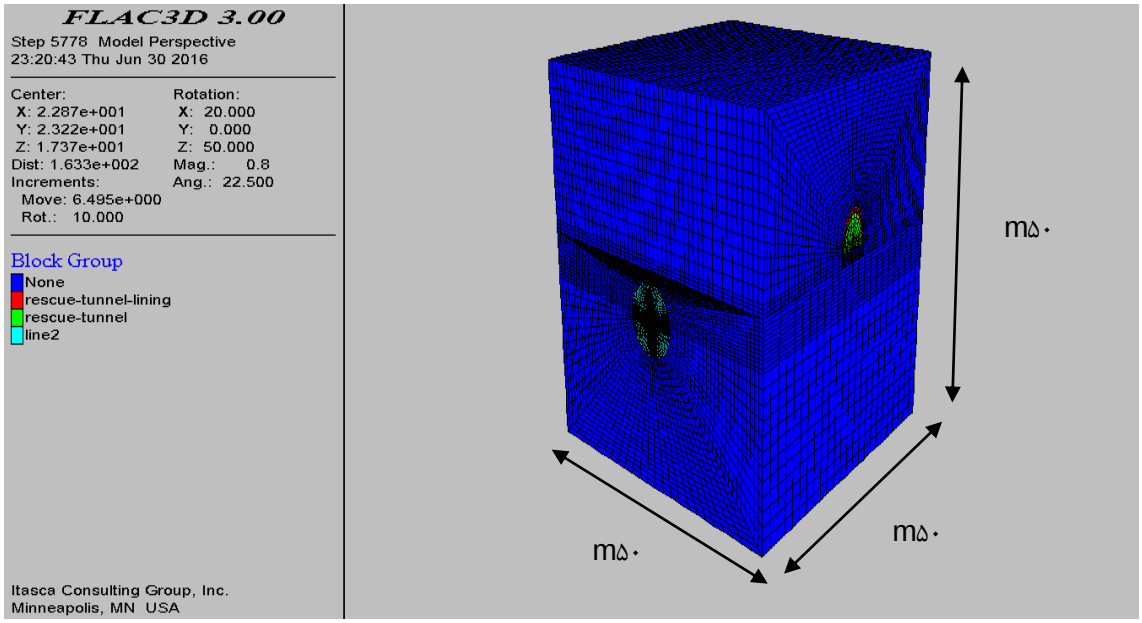
مرز کناری و مرز کف مدل به اندازه کافی دور از تونل‌ها در نظر گرفته شده‌اند تا اثر مرزها روی نتایج قابل‌چشم پوشی باشد. در ادامه، ابتدا نحوه مدل‌سازی به طور کامل گفته می‌شود و در فصل بعد، نتایج مدل‌سازی ارائه می‌گردد.

۳- ۵ - ۱- ساخت هندسه مدل

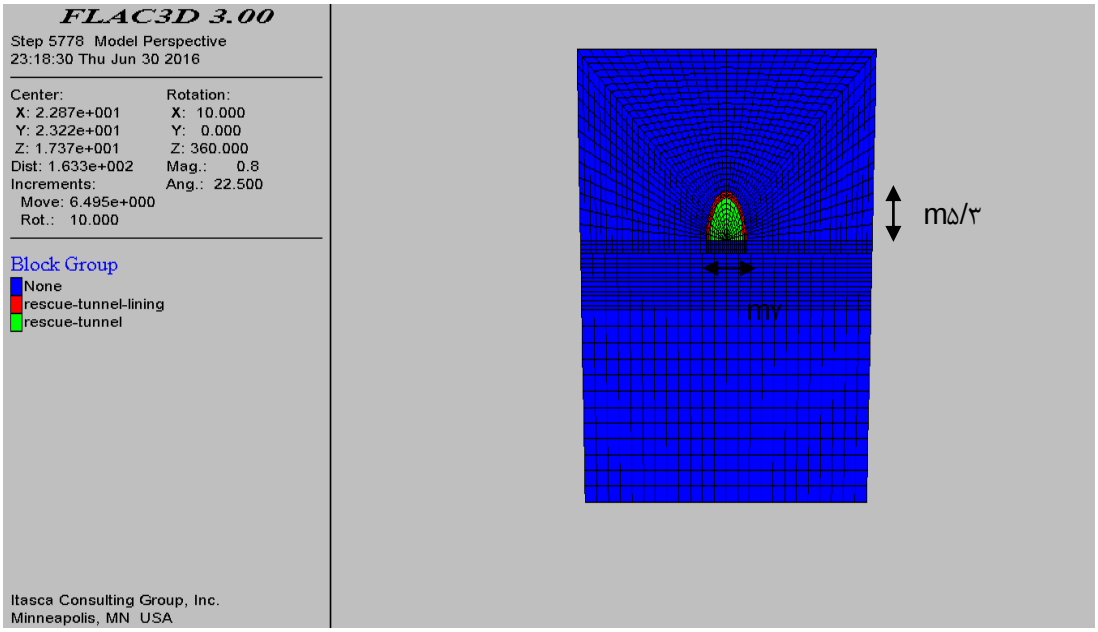
در شکل ۳- ۳ هندسه سه بعدی ساخته شده مربوط به مدل مش بندی شده در محیط نرم افزار و در جهات مختلف آورده شده است. ابعاد بخش‌های مختلف مدل نیز در اشکال آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌کنید در محل تونل‌ها با توجه به تمرکز تنش ناشی از حفاری و بالا بودن جابجایی‌ها، مش بندی ریزتر جهت بالا بردن دقت حل مدل استفاده شده است.

در شکل ۳-۴ نیز نیروی نامتعادل کننده در مرحله اول تحلیل که به تعادل رساندن محیط مدل است را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که قابل ملاحظه می‌باشد نیروی نامتعادل کننده در کل روند نزولی تا رسیدن به صفر را دنبال می‌کند که نشان دهنده صحت تعادل صورت گرفته است.

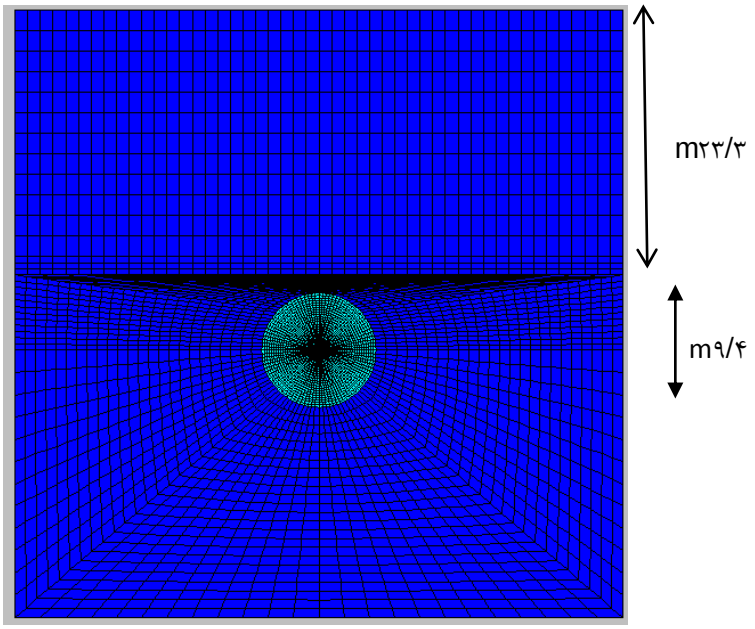
جهت انتخاب ابعاد مناسب برای مدل‌ها، ابعاد مختلف در جهات سه محور بررسی گردیدند. درنهایت ابعاد ۵۰*۵۰*۵۰ متر در نظر گرفته شد. با توجه به جابجایی در خروجی‌ها نیز می‌توان نتیجه گرفت که ابعاد مدل مناسب هست چرا که مرزها مدل اثری بر روی نتایج جابجایی‌ها نخواهند داشت. فاصله قائم کف تونل فوقانی از تاج تونل تحتانی برابر ۳ متر هست. ضخامت پوشش بتن تونل بالایی نیز برابر ۳۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.



(الف)

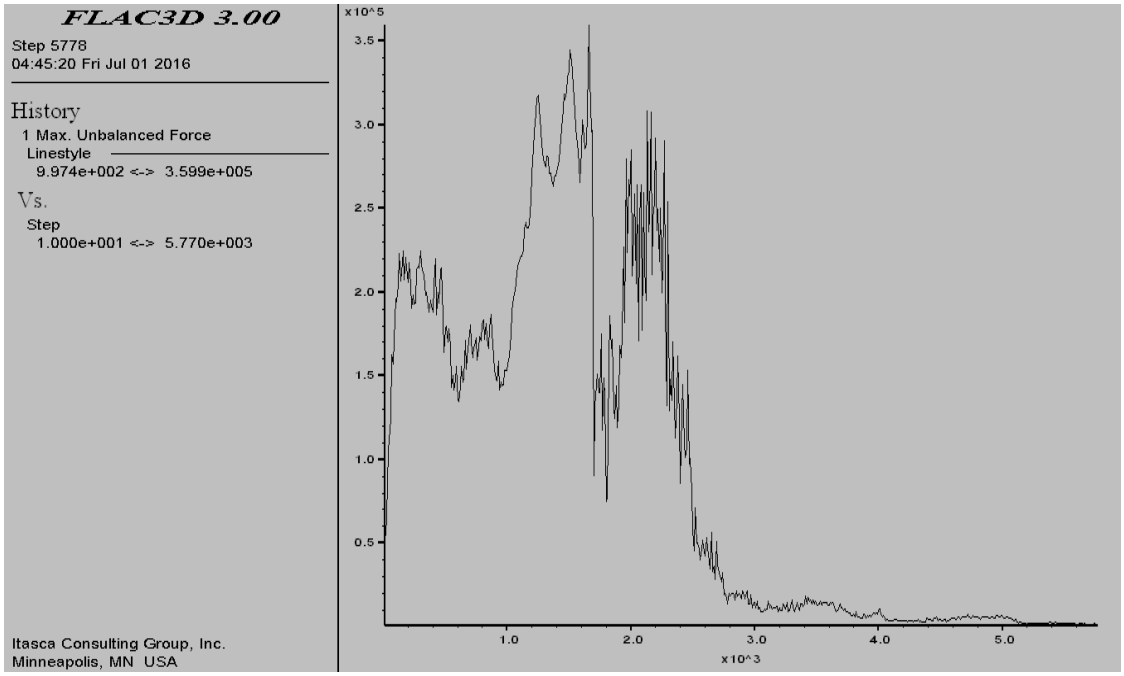


(ب)



(ج)

شکل ۳- ۳ - هندسه مدل الف: سه‌بعدی ب: دید از جلو ج: دید از راست



شکل ۳-۴- نیروی نامتعادل کننده در مرحله تعادل مدل

۳- ۵-۲- مشخصات مواد و المان‌های سازه‌ای

مقطع مورد بررسی دارای لایه‌هایی از خاک هست. مشخصات و پارامترهای ژئوتکنیکی این دولایه خاک در جدول شماره ۳- ۴ آمده است. لازم به ذکر است که برای این خاک مدل رفتاری موهر کلمب در مدل‌سازی استفاده شده است. این مدل رفتاری هم شامل بخش الاستیک و هم شامل بخش پلاستیک است به‌گونه‌ای که اگر خاک وارد فاز پلاستیک شود از بخش پلاستیک آن جهت محاسبات استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در گمانه‌های اکتشافی گزارشی مبنی بر برخورد با آب زیرزمینی در عمق مورد مطالعه داده نشده است، محیط مدل خشک در نظر گرفته شده است.

مشخصات پوشش بتنی مورد استفاده در مدل‌سازی (در هر دو تونل) نیز به شرح جدول ۳- ۵ است. برای پوشش بتنی مدل رفتاری الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. ضخامت پوشش بتنی برای تونل خط ۲ برابر ۳۰ سانتی‌متر است.

جدول ۳- ۵- مشخصات پوشش بتنی [۵۴]

مدل رفتاری	γ (KN/m^3)	E (KPa)	υ
الاستیک خطی	۲۴	۳۱*۱۰^۶	۰/۱

مشخصات سپر EPB استفاده‌شده جهت حفاری تونل خط ۲ نیز مطابق جدول ۳- ۶ می‌باشد.

جدول ۳- ۶- مشخصات سپر EPB [۵۴]

مدل رفتاری	(EA) (MN/m)	(EI) (MN/m)	D (m)	W (KN/m)	**υ**
الاستیک	۱*۱۰^۴	۵۰	۰/۰۲۴۵	۴۸/۸	۰/۲

فشار جک‌های پیشران نیز ۶۳۵/۴ کیلو پاسکال می‌باشد. قطر سپر در جلوی آن ۹/۴۱ متر و در انتهای آن ۹/۳۹ متر می‌باشد. طول کلی سپر نیز ۱۰/۷ متر می‌باشد.

۳- ۵- ۳- تعریف شرایط مرزی مدل

شرایط مرزهای مدل به صورت استاندارد تعریف‌شده است. به این معنی که مرزهای کناری مدل در راستای افقی ثابت (Fix) شده‌اند (وجوح چپ و راست که عمود بر محور x می‌باشند در جهت محور x ثابت می‌شوند و وجوح عقب و جلو که عمود بر محور y هستند در جهت محور y ثابت می‌شوند).

کف مدل در هر سه راستای افقی و قائم (محورهای z,y,x) ثابت گردیده است. مرز فوقانی مدل نیز سطح طبیعی زمین است و نیاز به تعریف شرایط مرزی ندارد.

۳- ۵- ۴- مش بندی مدل

مش بندی مناسب برای مدل یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی است، چرا که مش بندی مناسب نه تنها نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد بلکه باعث کاهش زمان مورد نیاز برای حل مسئله می‌شود. یک مش بندی مناسب زمانی به دست می‌آید که در بخش‌هایی از مدل که انتظار جاجایی های بیشتری داریم ریزتر باشد و در سایر نواحی تا جای ممکن درشتر باشد. بهترین شیوه برای مش بندی در یک مدل به این شکل است که ابتدا از یک مش بندی درشت در کل مدل استفاده نمود و سپس در بخش‌هایی که لازم است مش بندی را ریزتر کرد.

برای مش بندی مدل از المان‌های مکعبی، استوانه‌ای و گوه‌ای استفاده شده است. اندازه کلی این المان‌ها در مدل متوسط در نظر گرفته شده است؛ اما با توجه به حساس بودن جابجایی‌های فضای اطراف تونل‌ها و تمرکز تنش در این نواحی، اندازه مش بندی در این مناطق ریزتر شده است. تعداد کل المان‌های مدل ۱۷۹۸۰۸ عدد و تعداد کل گره‌ها ۱۹۰۷۵۱ عدد است.

۳- ۶- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا در مورد ساختگاه تونل‌های سرویس و امداد و تونل خط ۲ قطار شهری مشهد، سخن به میان آمد و همچنین خصوصیات مربوط به این ساختگاه ها به تفصیل بیان شد. در ادامه مطالب مرتبط به محل تقاطع این دو خط بیان گردید و سعی شد تا حد امکان خواننده با موقعیت این تقاطع آشنا گردد.

در انتهای این فصل به بیان نحوه مدل‌سازی تقاطع خط ۲ و تونل سرویس و امداد مشهد پرداخته شد و هندسه مدل و مش بندی مرتبط به آن ارائه گردید. در این بخش قابل ذکر است که این پروژه نسبت به پروژه خط ۷ متروی تهران و تونل ابوذر، دارای تفاوت‌هایی است که با توجه به مشخصات عمومی تقاطع تونل خط ۷ متروی تهران با تونل ابوذر، همان طور که به صراحت ذکرشده

است تونل متروی خط ۷ در بخشی از مسیر خود با فاصله ۲/۲۵ متر و از بالای تاج تونل ابوذر عبور می‌کند و همان‌طور که طرح بررسی اندرکنش تقاطع تونل خط ۲ قطار شهری با تونل سرویس وامداد مشهد ذکرشده، تونل خط ۲ قطار شهری از زیر تونل امداد و بافاصله حدوداً ۳/۷ متر عبور می‌کند و ضمناً زاویه محل تقاطع نیز در این اندرکنش کاملاً حائز اهمیت هست چراکه درست قبل از تقاطع تونل خط ۲ با تونل امداد، ابتدا با تونل خط ۱ قطار شهری مشهد متقاطع بوده بنابراین به لحاظ ملاحظات نقشه برداری و خطر برخورد دستگاه TBM با شمع‌های مرکزی ایستگاه خط ۱ قطار شهری مسیر عبور دستگاه به گونه‌ای طراحی شده که از بین شمع‌ها عبور و همین مسیر تا محدوده‌ی ۲۵ متر بعد از تونل سرویس و امداد نیز ادامه داده شده است.

فصل چهارم

بحث در نتایج مدل‌سازی

۴-۱- مقدمه

با توجه به این‌که ساختگاه مورد مطالعه در محیط شهری قرارگرفته، اهم موارد مورد بررسی، در مطالعه میزان نشست خلاصه می‌شود چرا که در محیط‌های شهری میزان روباره بسیار کمتر از تونل‌های خارج شهر هست که تأثیر تنش در آن‌ها نقش به سزایی دارد. در این گام سعی شده میزان نشست در تونل ها در محل تقاطع مورد بررسی قرار گیرد تا ریسک ناشی از احداث پروژه بررسی و در جهت بهبود آن اقداماتی انجام گردد. دراین‌بین از نرم‌افزار Flac 3D که توانایی مدل‌سازی جزئیات مرتبط با تونل سازی سپری ازجمله فشار سینه کار، فشار تزریق، فشار جک‌ها، مخروطی بودن سپر، برهمکنش بین سپر و خاک را دارا است، استفاده گردید.

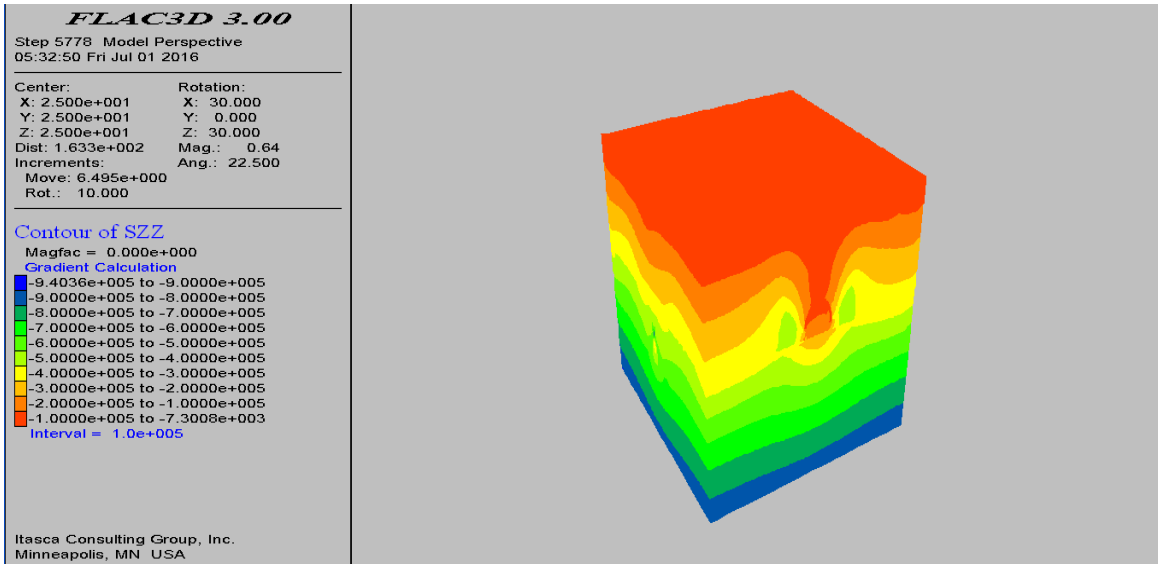
۴-۲- تعریف شرایط اولیه مدل

شرایط اولیه مسئله شامل ایجاد تنش‌های اولیه در مدل و شرایط آب زیرزمینی است. تنش قائم (تنش نرمال در جهت محور y) به‌صورت مجموع وزن لایه‌های فوقانی در نظر گرفته می‌شود که بر اساس عمق هر لایه و وزن مخصوص آن قابل‌محاسبه خواهد بود و تنش‌های افقی (تنش نرمال در جهت محور x و محور z) برابر مجموع حاصل‌ضرب وزن لایه‌ها در ضریب K_0 مربوط به آن لایه هست که برای هر لایه با استفاده از رابطه زیر قابل‌محاسبه خواهد بود.

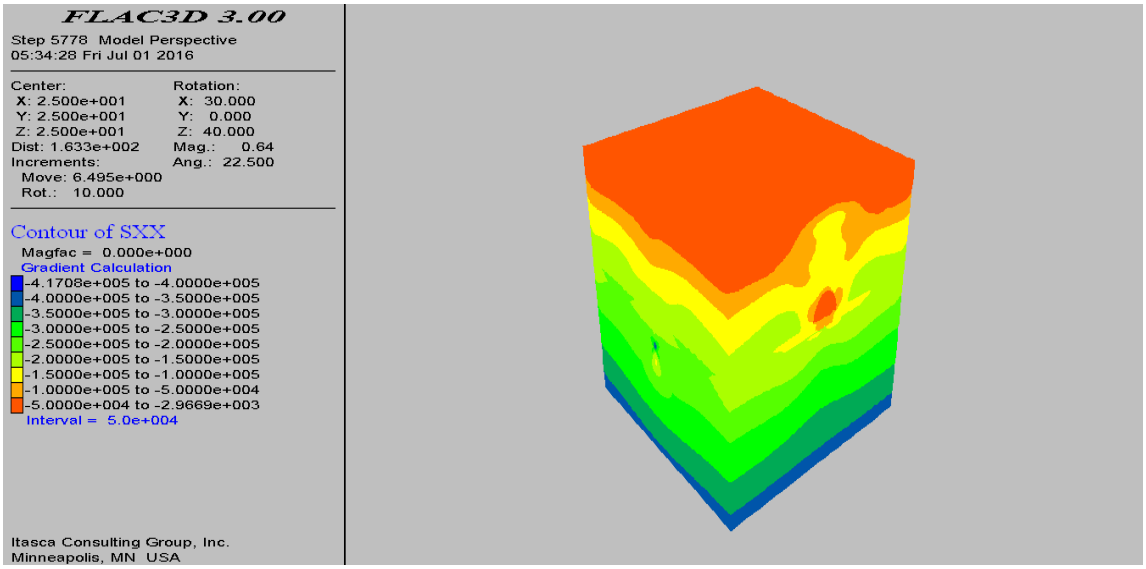
$$K_0 = 1 - \sin\varphi' \qquad (۱-۴)$$

در رابطه ۴-۱ φ'، زاویه اصطکاک مؤثر مربوط به لایه موردنظر هست.

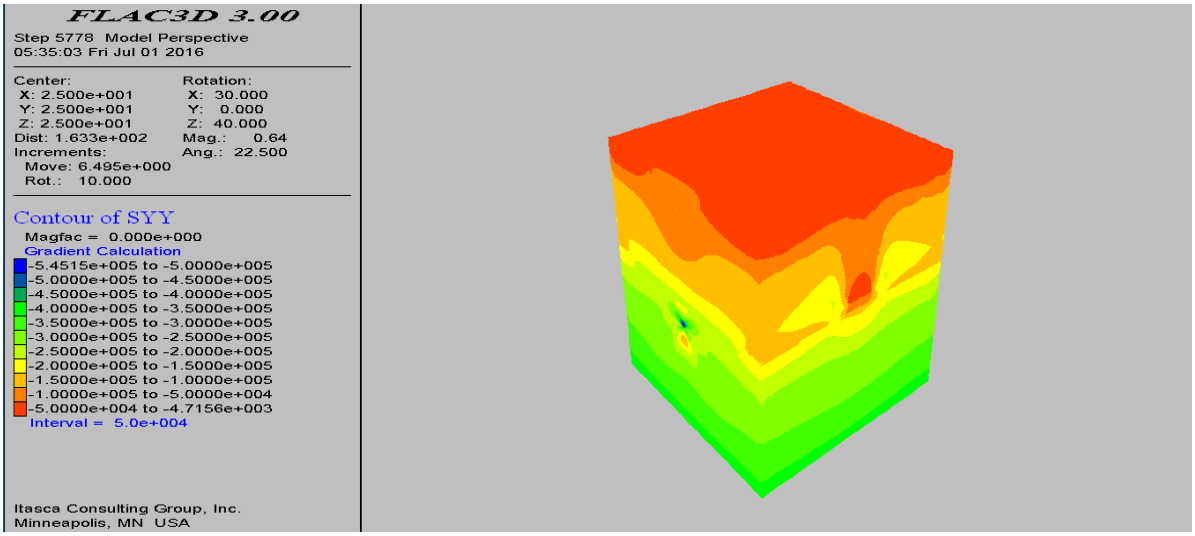
برای ایجاد شرایط آب زیرزمینی با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از کف مدل قرار دارد، مدل خشک در نظر گرفته‌شده است. در شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۳ وضعیت تنش‌های افقی و قائم برجا در مدل قبل از حفاری تونل‌ها آورده شده است.



شکل ۴-۱- تنش قائم szz



شکل ۴-۲- تنش افقی sxx



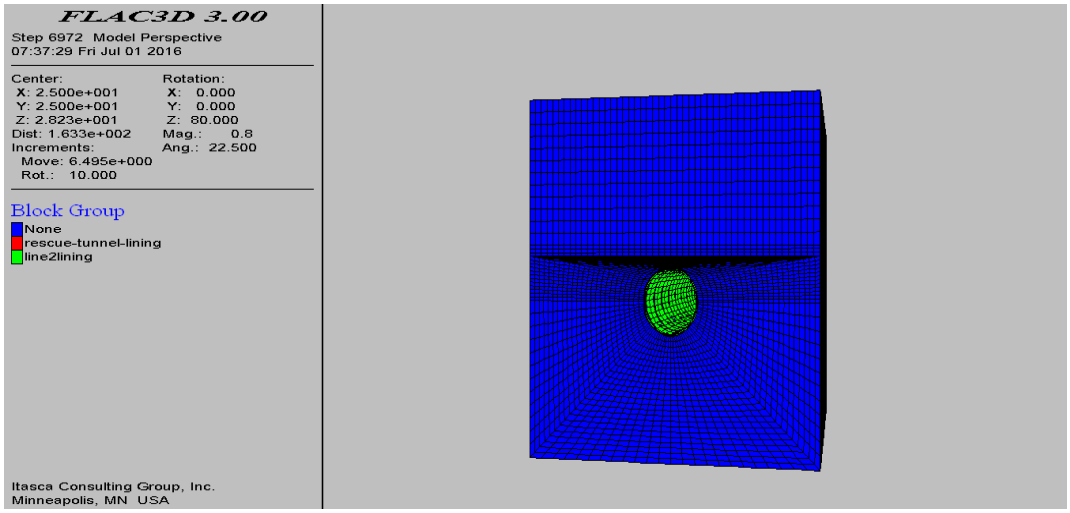
شکل ۴-۳- تنش افقی syy

۴-۳- تشریح فرآیند حفاری تونل‌ها

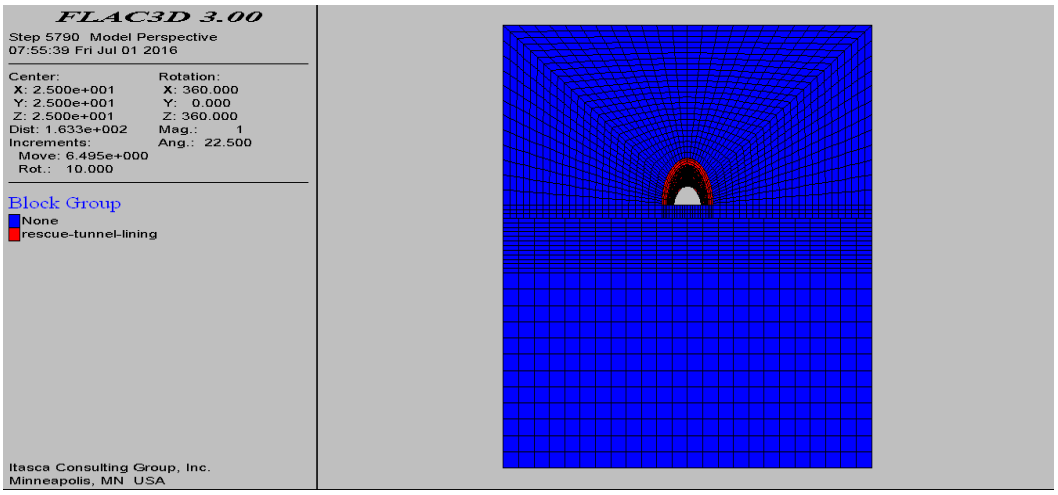
در این تحقیق با توجه به اینکه قصد بررسی اثر حفاری تونل غیر هم‌سطح را داریم و همچنین حفاری این دو تونل به‌صورت هم زمان انجام نمی‌گیرد (درواقع تونل تحتانی پس از گذشت زمان طولانی از حفاری تونل فوقانی و به تعادل رسیدن کامل جابجایی‌ها در تونل فوقانی شروع به حفاری می‌شود)، لذا تونل فوقانی را ابتدا در یک مرحله، کامل حفاری نموده و پوشش بتنی مربوط به آن را نصب می‌کنیم سپس تونل تحتانی در ۱۲ گام با پیشروی ۱/۵ متر در هر گام حفاری، حفاری می‌گردد؛ که ۶ گام حفاری (معادل ۹ متر حفاری) قبل از رسیدن به امتداد تونل فوقانی و ۶ گام حفاری (معادل ۹ متر حفاری) دیگر تا بعد از تونل فوقانی انجام می‌گیرد، در واقع حفاری تونل تحتانی از ۹ متر مانده به تونل فوقانی شروع شده و تا ۹ متر بعد از آن ادامه می‌یابد که با توجه به قطر ۹/۴ متر تونل‌ها، ۱۸ متر حفاری در تونل تحتانی، فاصله مناسبی جهت بررسی کامل اثر حفاری تونل تحتانی است (این فاصله تقریباً دو برابر قطر تونل خط ۲ هست). لازم به ذکر است که فرض بر این است که حفاری تونل تحتانی تا ۹ متر مانده به تونل فوقانی بعد از حفاری کامل تونل فوقانی، قبلاً انجام و پوشش بتنی آن نصب شده است. درواقع متراژ ۰ تا ۱۶ متر تونل تحتانی با توجه به فاصله‌ی زیادی که تا محل تقاطع

با تونل فوقانی دارد و در این فاصله‌ی زیاد دو تونل اثری روی هم ندارند، بدون در نظر گرفتن گام حفاری، در یک مرحله حفاری و پوشش بتنی آن نصب می‌شود. با توجه به اینکه هر گام حفاری در یک مرحله جداگانه تعریف شده است لذا بعد هر گام حفاری اجازه آزاد سازی تنش‌ها قبل از نصب پوشش بتنی داده می‌شود.

در شکل ۴- ۴ و ۴- ۵ نمای کاملی از تونل‌ها پس از حفاری کامل و نصب پوشش بتنی شان را به تفکیک مشاهده می‌کنید.



شکل ۴-۴- حفاری و پوشش بتنی تونل تحتانی



شکل ۴-۵- حفاری و پوشش بتنی تونل فوقانی

۴-۴- تعریف مراحل مختلف محاسباتی

در این مدل‌سازی حفاری تونل تحتانی و ساخت پوشش بتنی آن را به همراه سایر جزئیات از قبیل فشار تزریق، فشار سینه کار، مخروطی بودن سپر حفاری، برهمکنش بین سپر و خاک هنگام حرکت سپر، فشار جک‌های پیشران سپر و خود سپر را مدل شده است. برای اینکه اثر حفاری را بررسی نماییم ۱۲ مرحله گام پیشروی کافی خواهد بود، لذا ۱۴ مرحله محاسباتی در نظر گرفته می‌شود که در مرحله اول تونل بالایی حفاری و پوشش بتنی آن نصب می‌شود. در مرحله دوم تونل تحتانی تا فاصله ۹ متر مانده به تونل فوقانی حفاری و پوشش بتنی آن نصب می‌شود. در ۱۲ مرحله محاسباتی دیگر که کلیت آن‌ها با هم یکسان خواهد بود در هر فاز ۱/۵ متر از تونل تحتانی حفاری می‌گردد به طوری‌که خاک جلوی TBM حفاری‌شده، فشار روی سینه کار اعمال می‌شود، پلیت مربوط به بدنه سپر فعال می‌شود، فشار تزریق در پشت پوشش بتنی اعمال می‌گردد و فشار جک‌های پیشران روی آخرین حلقه نصب شده پوشش بتنی اعمال می‌گردد. مرحله سوم نسبت به فازهای بعدی کمی متفاوت است چراکه در این مرحله، تونل برای بار اول فعال می‌شود و درواقع تونلی که ۱۶ متر در مدل پیشروی داشته را مدل می‌کند. مراحل بعدی هرکدام به اندازه یک گام پیشروی که معادل ۱/۵ متر است تونل را به پیش خواهند برد.

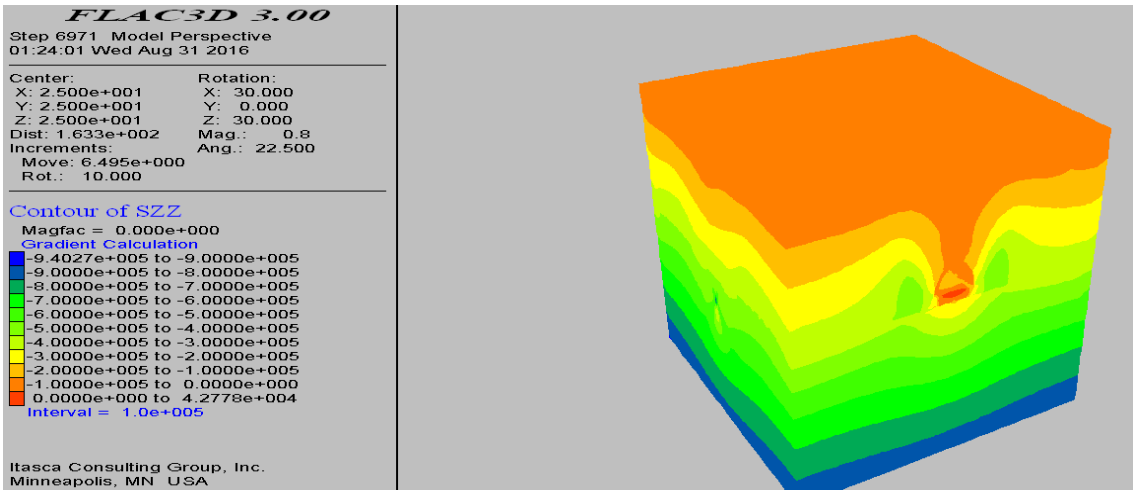
۴- ۵- نتایج مدل‌سازی

در این بخش نتایج مدل‌سازی که شامل ارائه نمودارهای پروفیل نشست و درصد نشست است ارائه می‌گردد. در این مدل‌سازی فشار سینه کار حفاری در تاج تونل تحتانی برابر تنش نرمال قائم در این نقطه (معادل ۴۰۰ کیلو پاسکال) در نظر گرفته شده است و گرادیان آن نیز برابر ۱۴ کیلو پاسکال (معادل وزن مخصوص مخلوط بنتونیت استفاده‌شده در سرحفار) می‌باشد. فشار تزریق معادل فشار سینه کار و با گرادیان ۲۰ کیلو پاسکال می‌باشد، همچنین فشار جک‌ها نیز معادل ۶۵۴/۳ کیلو پاسکال می‌باشد.

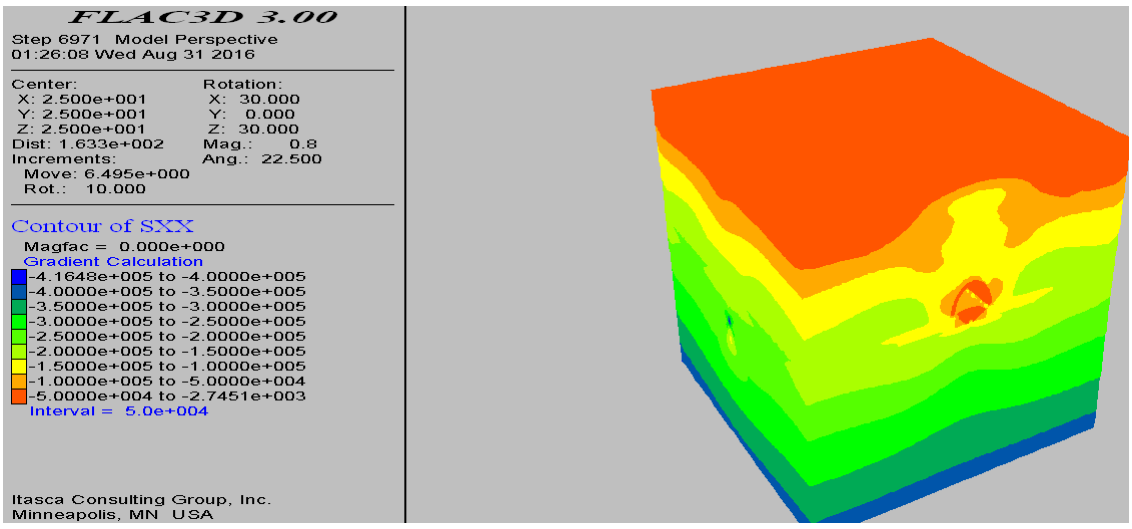
۴- ۵- ۱- اثر حفاری خط ۲ بر میزان تنش‌ها و جابجایی‌ها در اطراف تونل سرویس و امداد

در شکل‌های ۴- ۶ تا ۴- ۸ وضعیت تنش‌های القایی افقی و قائم در مدل (و به‌خصوص در محل تونل سرویس و امداد) بعد از حفاری تونل خط ۲ آورده شده است.

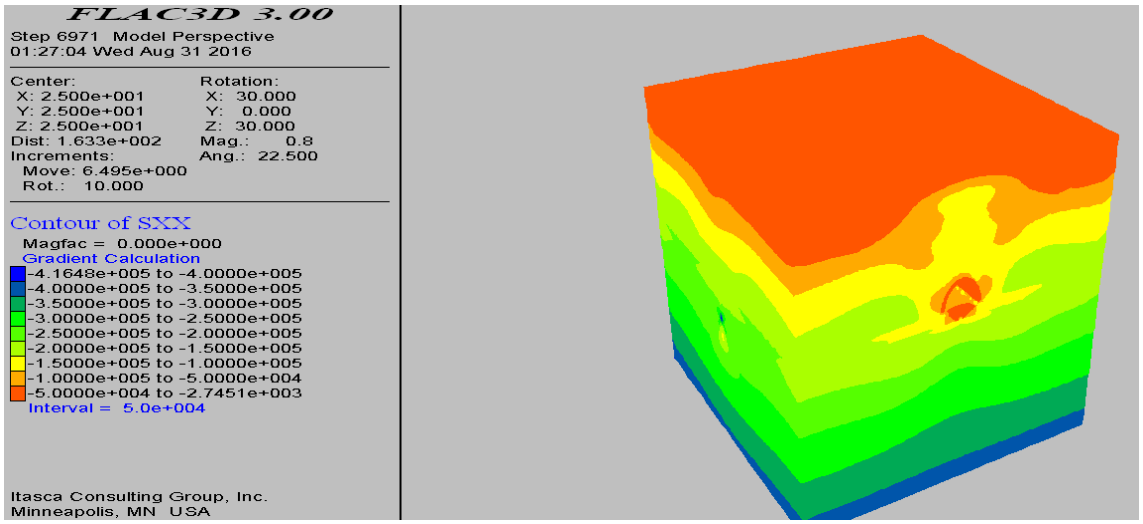
از مقایسه اشکال ۴- ۱ تا ۴- ۳ با اشکال ۴- ۵ تا ۴- ۷ مشاهده می‌شود که در اثر حفاری خط در حدود ۱۰۰ کیلو پاسکال تنش القایی حداکثر در مدل ایجاد می‌گردد.



شکل ۴- ۶- تنش قائم szz



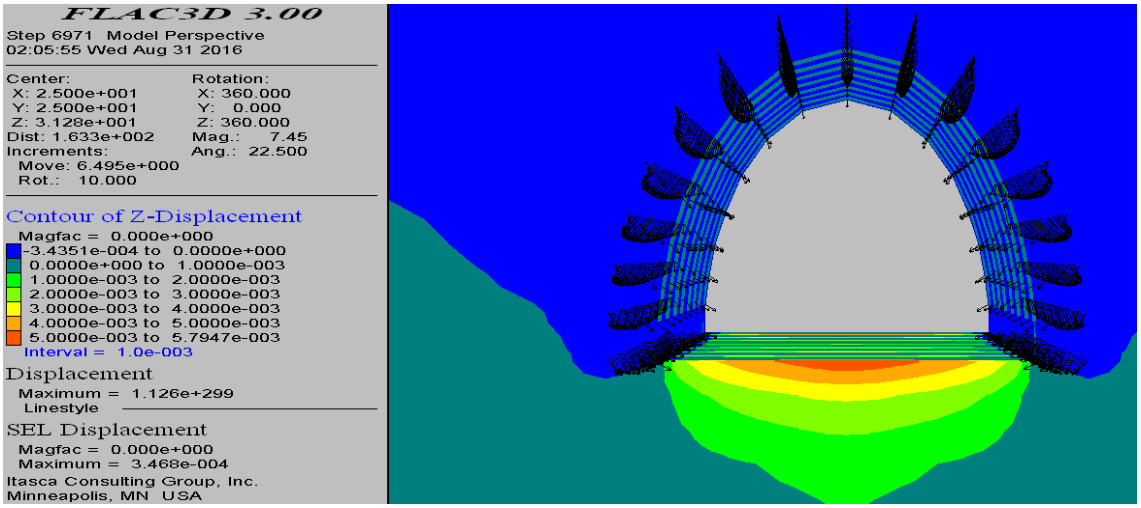
شکل ۴- ۷- تنش افقی sxx



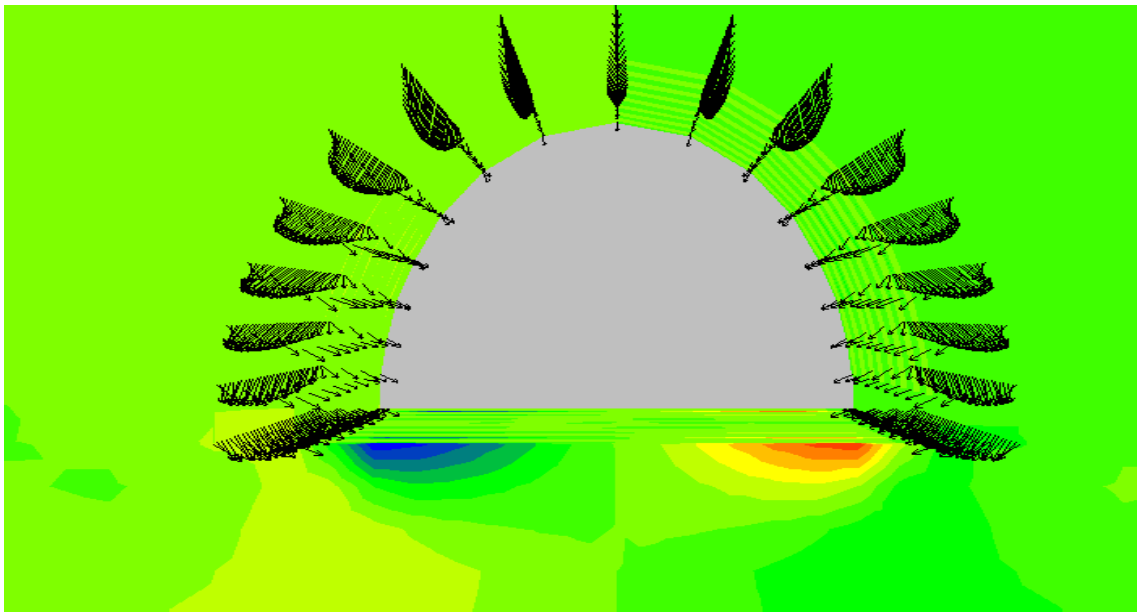
شکل ۴- ۸- تنش افقی syy

در شکل‌های ۴- ۹ تا ۴- ۱۰ جابجایی‌های افقی و قائم در محل تونل سرویس و امداد بعد از حفاری تونل خط ۲ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۴- ۹ قابل مشاهده می‌باشد نشست حداکثر در تاج تونل معادل ۰/۳۴ میلی‌متر می‌باشد اما در کف مدل به اندازه ۵ میلی‌متر بالازدگی وجود دارد، همچنین بردارهای موجود نشان‌دهنده جهت جابجایی‌ها در اطراف تونل خط ۲ می‌باشد که همگرایی در تونل سرویس و امداد را به خوبی نمایش می‌دهد.

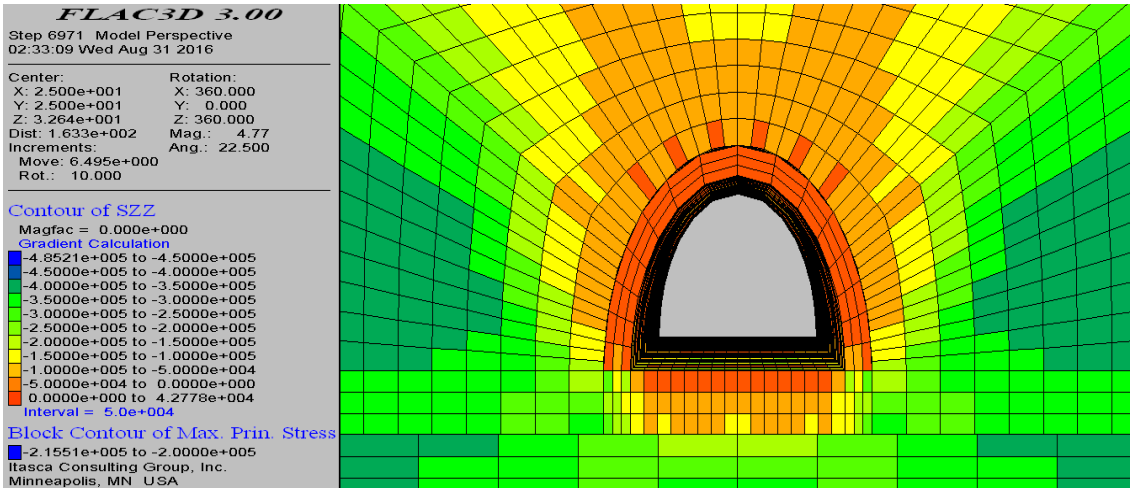


شکل ۴- ۹- جابجایی قائم در محل تونل سرویس و امداد (نشست) zdis



شکل ۴- ۱۰- جابجایی افقی در محل تونل سرویس و امداد xdis

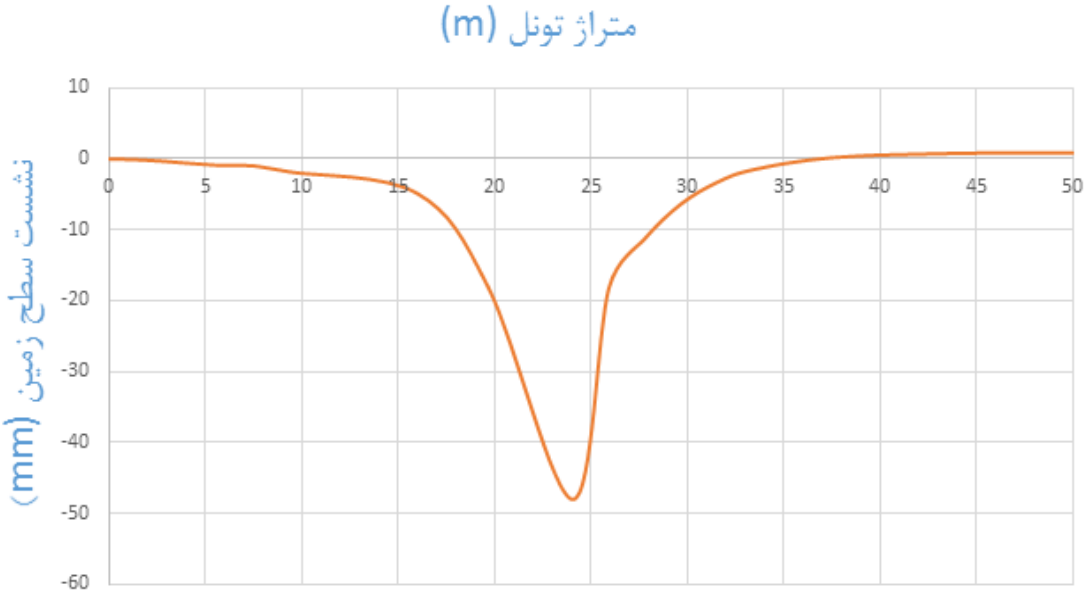
در شکل ۴- ۱۱ مقادیر حداکثر تنش‌های اصلی در اطراف تونل امداد پس از حفاری خط ۲ نمایش داده شده است. تمرکز تنش بر روی پوشش بتنی تونل سرویس و امداد در این شکل به‌خوبی نمایش داده شده است.



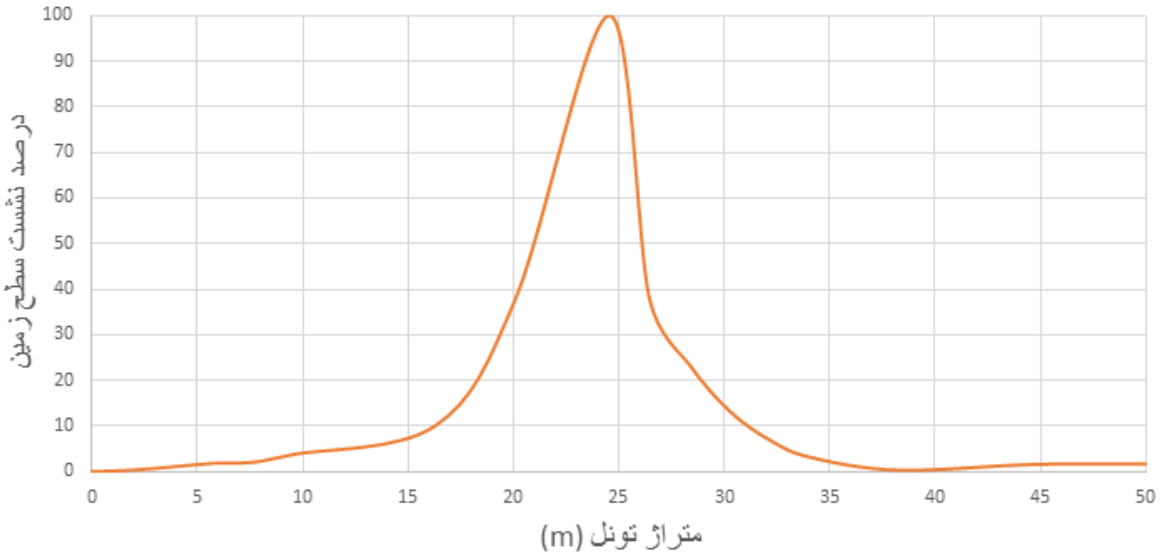
شکل ۴- ۱۱- تنش اصلی حداکثر در اطراف تونل سرویس و امداد پس از حفاری خط ۲

۴- ۵- ۲- نتایج بعد از حفاری کامل تونل تحتانی

در شکل‌های ۴- ۱۲ و ۴- ۱۳ پروفیل و درصد نشست سطح زمین پس از حفاری کامل تونل تحتانی آورده شده است.



شکل ۴- ۱۲- پروفیل نشست



شکل ۴- ۱۳- درصد نشست

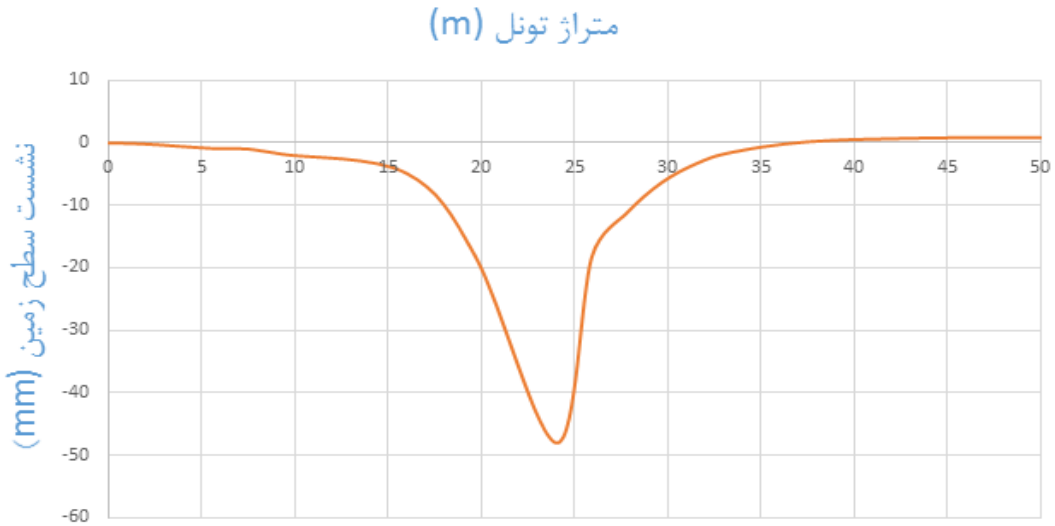
در شکل ۴- ۱۲ مشاهده می‌شود میزان نشست بیشینه در سطح زمین تقریباً ۴۷ میلی‌متر هست، همچنین حداکثر نشست در محل تقاطع (محل تقاطع محورهای دو تونل)، رخ می‌دهد.

گفته شد که در ۱۲ مرحله گام حفاری و پیشروی سپر در تونل تحتانی، حفاری از متراژ ۱۶ تونل شروع می‌شود و در هر گام حفاری به اندازه ۱/۵ متر حفاری صورت می‌گیرد. لذا اگر درصد نشست سطح زمین در متراژهای مختلف تونل محاسبه گردد با توجه به شروع حفاری از متراژ ۱۶ متر و طول کلی سپر معادل ۱۰/۷ متر، مشاهده می‌شود که تقریباً نیمی از نشست در جلوی سپر تا ۹۰ درصد نشست در بالای سپر و ۱۰۰ درصد نشست در پشت سپر (در متراژ ۲۴ متر که درواقع از طول کل حفاری که معادل ۱۶+۱۸=۳۴ متر هست، طول سپر که معادل تقریباً ۱۰ متر می‌باشد کم شده است) رخ می‌دهد که در شکل ۴- ۱۳ نشان داده شده است.

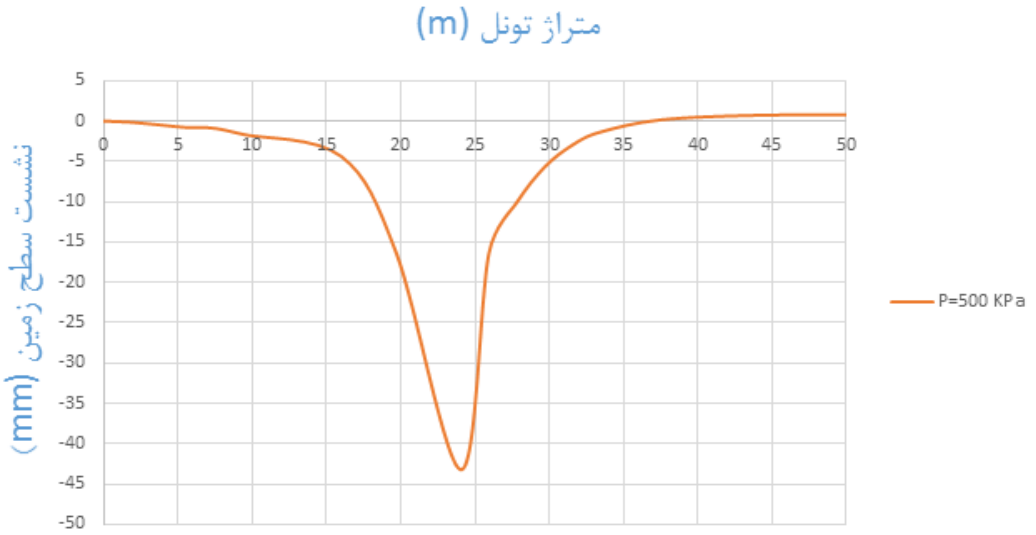
جهت محاسبه درصد نشست سطح زمین در هر نقطه، نشست در نقطه مورد نظر بر حداکثر نشست مربوطه در هر حالت تقسیم‌شده و نتیجه درصد ضرب شده است.

۴- ۵-۳- بررسی اثر فشار سینه کاربر پایداری تونل خط ۲ و نشست سطح زمین

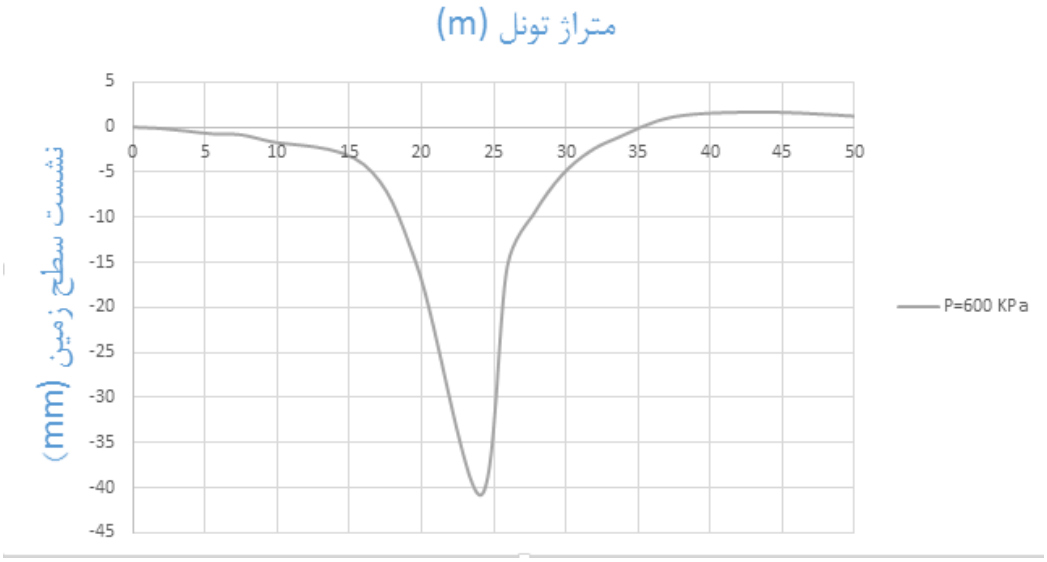
با توجه به این‌که از پوشش بتنی در نگهداری خط ۲ استفاده شده و از سویی روش حفاری این تونل با استفاده از TBM هست امکان تغییر در پوشش بتنی وجود ندارد ولی می‌توان عواملی مانند تغییر در فشار سینه کار را برای بررسی و کاهش نیروهای وارده بر پوشش بتنی بررسی نمود. برای بررسی اثر فشار سینه کاربر حداکثر نشست ایجاد شده در سطح زمین، چهار فشار ۴۰۰ کیلو پاسکال، ۵۰۰ کیلو پاسکال،۶۰۰ کیلو پاسکال و ۷۰۰ کیلو پاسکال به ترتیب معادل فشار جبهه کار اولیه، ۱/۲۵ برابر فشار جبهه کار اولیه، ۱/۵ برابر فشار جبهه کار اولیه و ۱/۷۵ برابر فشار جبهه کار اولیه در نظر گرفته شد (در هر سه حالت گرادیان فشار برابر ۱۴ کیلو پاسکال بر متر لحاظ شده است) و برای هر چهار حالت حداکثر نشست محاسبه گردید که در شکل‌های ۴- ۱۴ تا ۴- ۱۸ نتایج مربوط به آن آورده شده است.



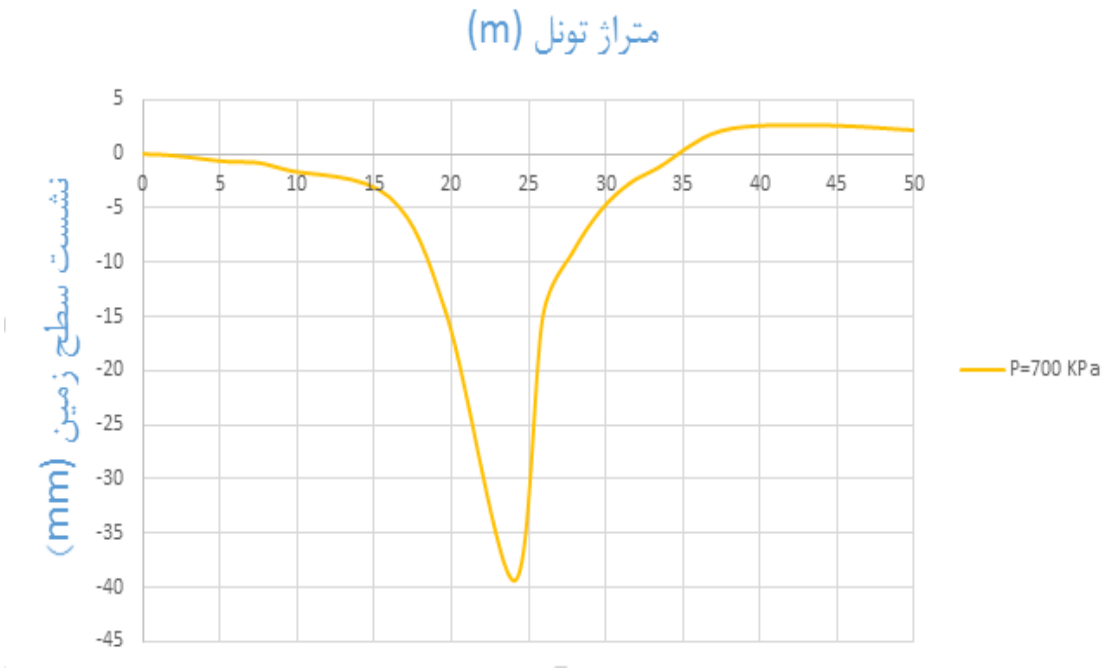
شکل ۴- ۱۴- پروفیل نشست برای فشار جبهه کار برابر با فشار جبهه کار اولیه (۴۰۰ کیلو پاسکال)



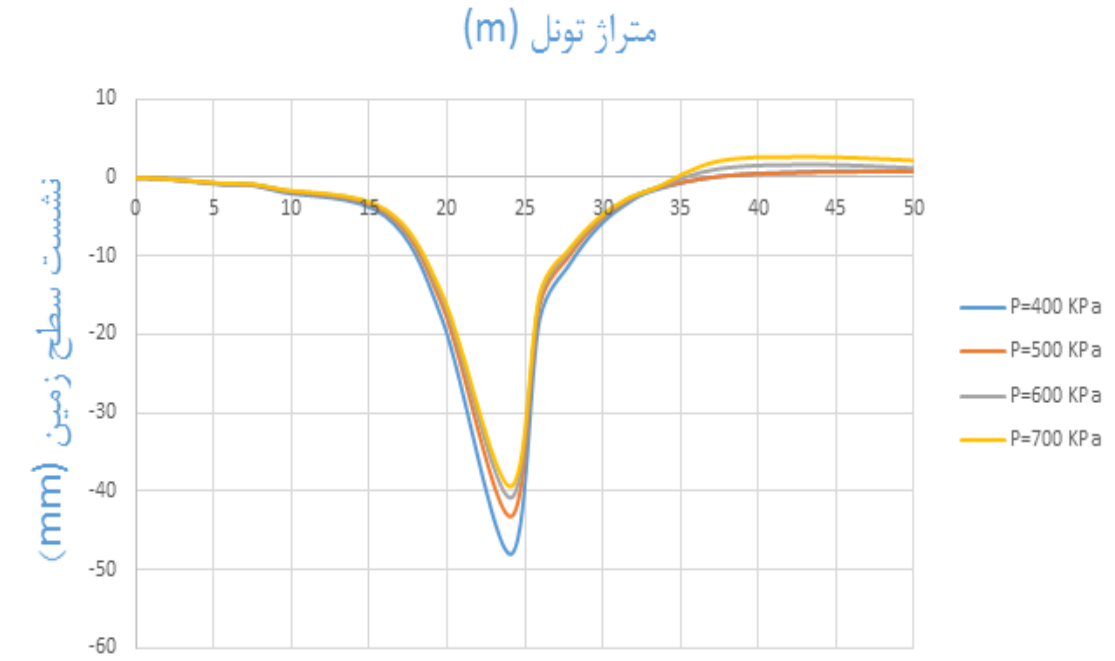
شکل ۴- ۱۵- پروفیل نشست برای فشار جبهه کار ۱/۲۵ برابر با فشار جبهه کار اولیه (۵۰۰ کیلو پاسکال)



شکل ۴- ۱۶- پروفیل نشست برای فشار جبهه کار ۱/۵ برابر با فشار جبهه کار اولیه (۶۰۰ کیلو پاسکال)



شکل ۴- ۱۷- پروفیل نشست برای فشار جبهه کار ۱/۷۵ برابر با فشار جبهه کار اولیه (۷۰۰ کیلو پاسکال)



شکل ۴- ۱۸- پروفیل نشست سطح زمین برای فشارهای مختلف سینه کار

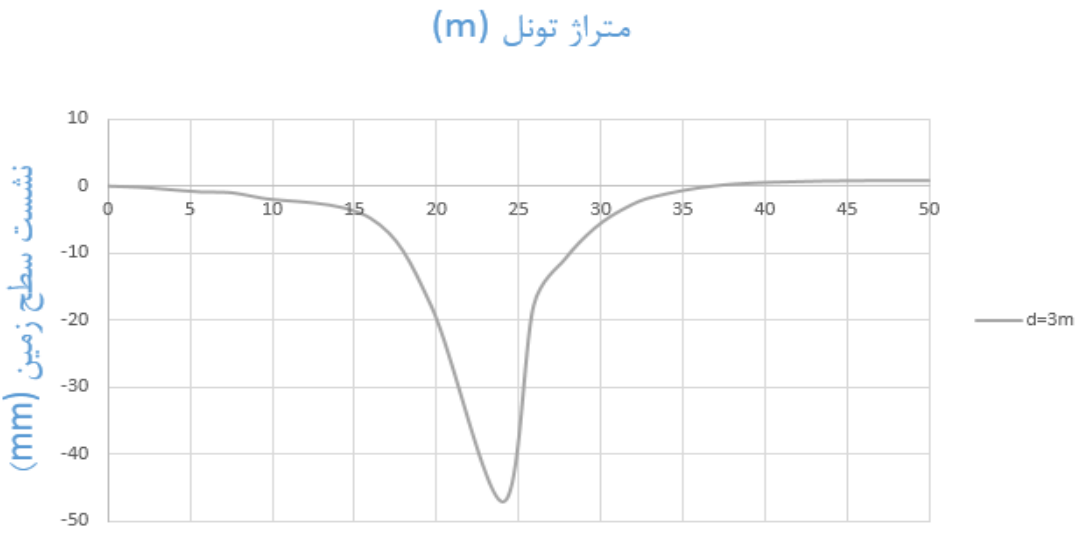
مشاهده می‌شود که با افزایش فشار سینه کار از ۴۰۰ به ۷۰۰ کیلو پاسکال، میزان نشست بیشینه در سطح زمین تقریباً ۹ میلی‌متر کاهش می‌یابد اما با افزایش بیشتر فشار سینه کار تقریباً دیگر کاهشی

در نشست سطح زمین رخ نمی‌دهد بلکه همان‌طور که در شکل ۴- ۱۶ و ۴- ۱۷ نیز دیده می‌شود باعث شکست غیرفعال یا همان بالا زدگی درروی سطح زمین خواهد شد. همچنین همان‌طور که در شکل‌های ۴- ۱۴ تا ۴- ۱۷ قابل مشاهده است حداکثر نشست در پشت سپر یعنی محلی که بین آخرین پوشش بتنی نصب شده و سپر حفاری تا تزریق دوغاب هنوز خالی است، رخ می‌دهد و چون فشار تزریق به ازای فشارهای مختلف سینه کار یکسان در نظر گرفته شده است به همین خاطر افزایش بیشتر فشار سینه کار تأثیر چندانی برنشست سطح زمین نخواهد داشت و این خود تائیدی بر غالب بودن نقش فشار تزریق نسبت به فشار سینه کار حفاری در نشست ایجادشده در سطح زمین هست.

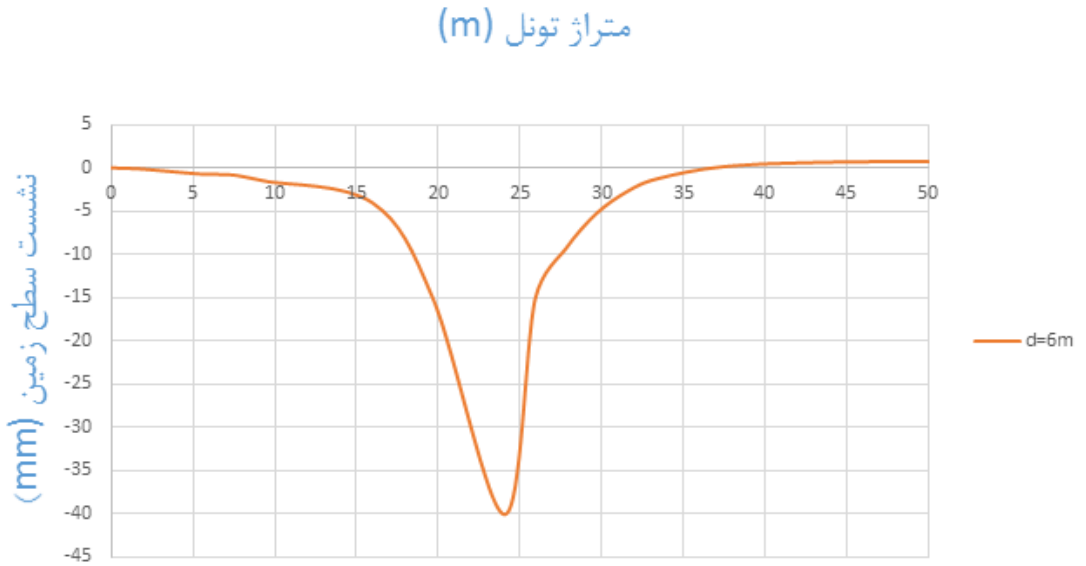
در شکل ۴- ۱۸پروفیل نشست سطح زمین برای فشارهای مختلف سینه کار در کنار هم رسم شده است که نتایج فوق را بهتر می‌تواند نشان دهد.

۴- ۵- ۴- اثر فاصله‌ی بین تونل‌های متقاطع برنشست سطح زمین

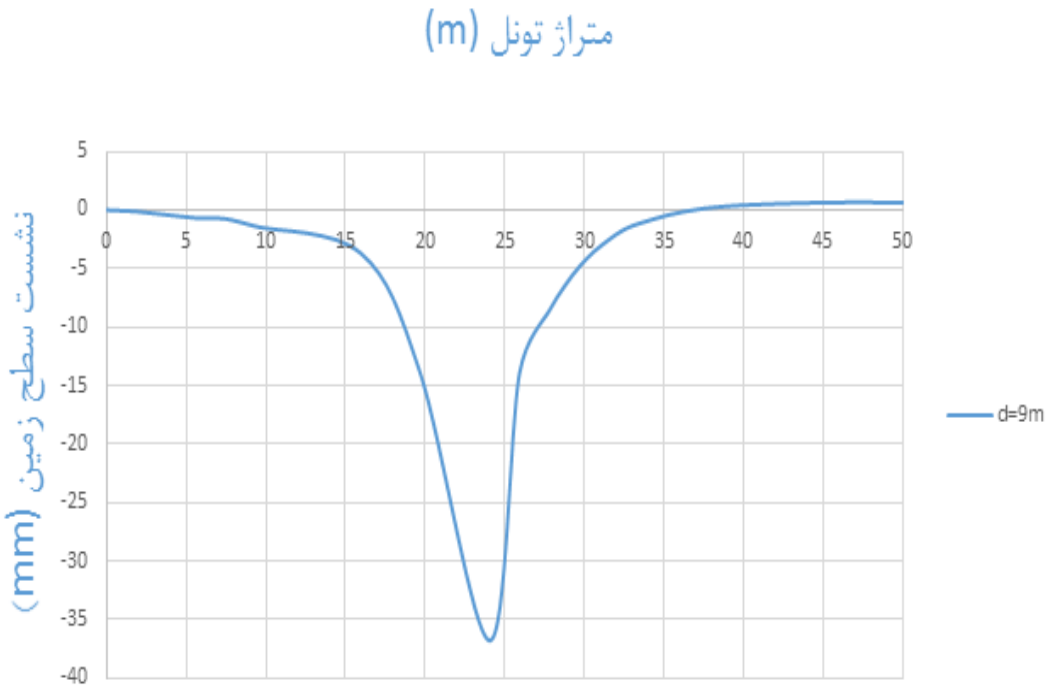
در بخش‌های قبلی بیان شد که فاصله قائم خط ۲ از تونل امداد برابر ۳/۷ متر هست. در این حالت قصد داریم اثر دو برابر (فاصله ۶ متر) و سه برابر کردن این فاصله (فاصله ۹ متر) بر روی نشست ایجادشده روی سطح زمین بررسی کنیم.



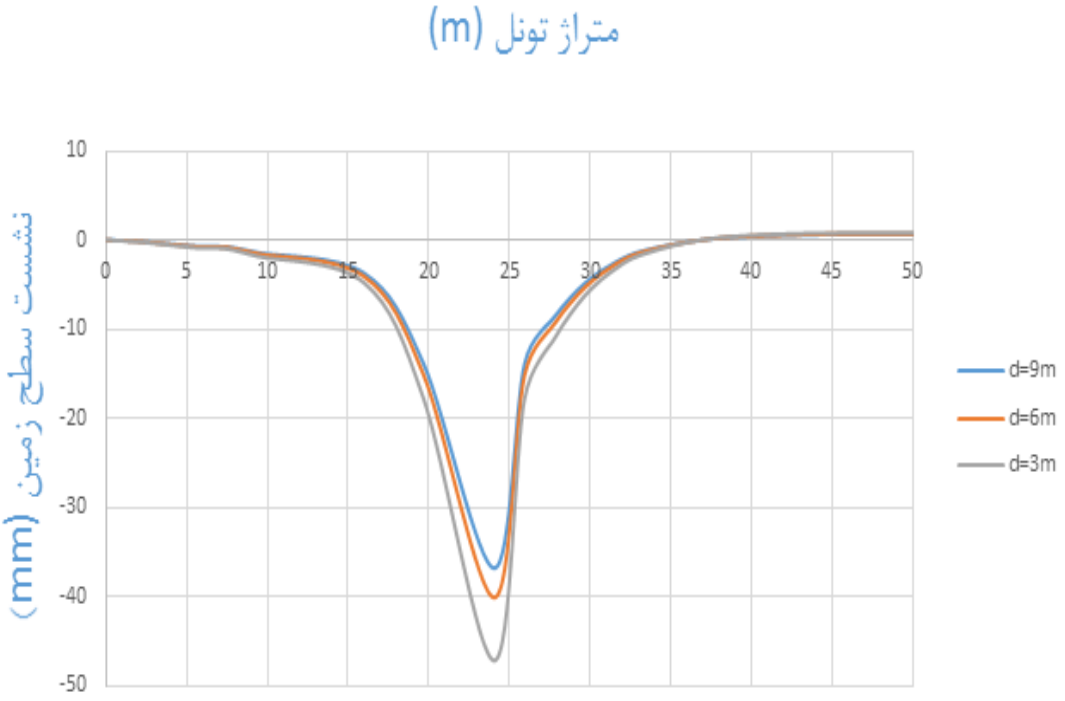
شکل ۴- ۱۹- پروفیل نشست سطح زمین (فاصله قائم دو تونل برابر ۳ متر)



شکل ۴- ۲۰- پروفیل نشست سطح زمین (فاصله قائم دو تونل برابر ۶ متر)



شکل ۴- ۲۱- پروفیل نشست سطح زمین (فاصله قائم دو تونل برابر ۹ متر)



شکل ۴- ۲۲- مقایسه پروفیل نشست سطح زمین برای فاصله‌های قائم متفاوت دو تونل

در شکل ۴- ۲۲ مقایسه پروفیل نشست سطح زمین برای فاصله‌های قائم متفـاوت دو تونـل آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله از ۳/۷ متر به ۹ متر، میزان نشست بیشینه در سـطح زمین تقریباً ۱۱ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

۴- ۶- جمع‌بندی

در این فصل سعی شد با تشریح شرایط اولیه مدل و توجه به این موضوع که در این تحقیق هدف بررسی اثر حفاری تونل غیر هم‌سطح تحتانی است و توجه به این مورد که حفاری این دو تونل به‌صورت هم‌زمان انجام نگردیده، بلکه تونل تحتانی پس از گذشت زمان بسیار از ساخت تونل بالایی و به تعادل رسیدن آن ایجاد گشته است، لذا تونل فوقانی را ابتدا در یک مرحله، کامل حفاری نموده و پوشش بتنی مربوط به آن را نصب کردیم و سپس تونل تحتانی در ۱۲ گام با پیشروی ۱/۵ متر در هر گام حفاری، حفاری گردید.

همچنین در این مدل‌سازی فشار سینه کار حفاری در تاج تونل تحتانی برابر تنش نرمال قائم در این نقطه (معادل ۴۰۰ کیلو پاسکال) در نظر گرفته‌شده است و گرادیان آن نیز برابر ۱۴ کیلو پاسکال (معادل وزن مخصوص مخلوط بنتونیت استفاده‌شده در سرحفار) است. فشار تزریق معادل فشار سینه کار و با گرادیان ۲۰ کیلو پاسکال است و فشار جک‌ها نیز معادل ۶۵۴/۳ کیلو پاسکال در نظر گرفته‌شده است.

در این پروژه با احداث تونل خط ۲ متروی مشهد، میزان ۱۰۰ کیلو پاسکال تنش القایی بر تونل سرویس و امداد وارد می‌شود که به دنبال آن میزان حداکثر نشست تاج تونل سرویس و امداد برابر با ۰/۳۴ میلی‌متر است که علاوه بر آن ۵ میلی‌متر بالازدگی در کف این تونل نیز مشاهده می‌گردد. میزان نشست بیشینه در سطح زمین تقریباً ۴۷ میلی‌متر می‌باشد، همچنین حداکثر نشست در محل

تقاطع (محل تقاطع محورهای دو تونل)، رخ می‌دهد و مشاهده گردید که تقریباً نیمی از نشست در جلوی سپر تا ۹۰ درصد نشست در بالای سپر و ۱۰۰ درصد نشست در پشت سپر رخ داده است.

در ادامه به بررسی فشار سینه کار در تونل خط ۲ متروی مشهد پرداخته شد و مشاهده گردید که با افزایش فشار سینه کار از ۴۰۰ به ۷۰۰ کیلو پاسکال، میزان نشست بیشینه در سطح زمین تقریباً ۹ میلی‌متر کاهش می‌یابد اما با افزایش بیشتر فشار سینه کار تقریباً دیگر کاهشی در نشست سطح زمین رخ نمی‌دهد. همچنین اثر فاصله دو تونل موردبررسی قرار گرفت و مشاهده شد که اگر افزایش فاصله از ۳/۷ متر به ۹ متر صورت گیرد، میزان نشست بیشینه در سطح زمین تقریباً ۱۱ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

در این تحقیق تأثیر حفاری تونل‌های متقاطع غیر هم‌سطح با مدل‌سازی سه بعدی تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D مطالعه شد. برای این منظور تقاطع تونل خط دو متروی مشهد با تونل امداد که توضیحات کامل آن‌ها در فصل سوم ارائه گردید، انتخاب و به طور کامل با تمام جزئیات در نرم‌افزار FLAC 3D مدل گردید. در مدل‌سازی‌های حاضر، میزان تنش و جابجایی ها در اطراف تونل سرویس و امداد و همچنین نشست سطح زمین و پروفیل طولی این نشست در سطح زمین محاسبه گردید. همچنین درصد نشست سطح زمین برای کیلو متراژهای مختلف تونل به دست آمد. فشار جبهه کار معادل تنش قائم در محل تونل‌ها و گرادیان فشار برابر ۱۴ کیلو پاسکال بر متر لحاظ شده است. فشار تزریق پشت سگمنت ها نیز برابر فشار سینه کار و با گرادیان فشار ۲۰ کیلو پاسکال بر متر در نظر گرفته‌شده است. فشار جک‌های پیشران نیز در مدل‌سازی ۶۳۵/۴ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد.

۵-۲- نتیجه‌گیری

نتایج کلی حاصل از تحلیل‌های انجام شده در این پایان نامه به شرح ذیل می‌باشد:

- با بررسی میزان تنش‌ها قبل و بعد از احداث تونل خط ۲ متروی مشهد، مشاهده گردید که با احداث این تونل، میزان ۱۰۰ کیلو پاسکال تنش القایی به تونل سرویس و امداد وارد می‌گردد.
- تنش القایی وارد بر تونل سرویس و امداد باعث می‌گردد که در تاج این تونل به میزان ۰/۳۴ میلی‌متر نشست و در کف این تونل ۵ میلی‌متر بالا زدگی مشاهده گردد.
- با توجه به این‌که تونل سرویس وامداد پیش از تونل خط ۲ حفاری گردیده و از زمان احداث آن مدت زمان زیادی می‌گذرد میزان جابه‌جایی و نشست ناشی از این تونل به تعادل رسیده و

در این بین این پس از حفاری کامل تونل خط ۲، میزان نشست بیشینه در سطح زمین تقریباً ۴۷ میلی‌متر هست.

- تغییرات تنش نرمال در جهت Z پایش گردید و با توجه به نتایج آن میزان تنش با عبور تونل خط ۲ افزایش‌یافته و این میزان پس از عبور از تونل سرویس و امداد کاهش می‌یابد.
- با توجه به این‌که ۱۲ گام حفاری در نظر گرفته‌شده و در هر گام حفاری ۱/۵ متر حفاری انجام‌شده است لذا با محاسبه در صد نشست‌ها در هر متراژ از تونل مشاهده گردید که تقریباً نیمی از نشست در جلوی سپر تا ۹۰ درصد نشست در بالای سپر و ۱۰۰ درصد نشست در پشت سپر رخ می‌دهد.
- با افزایش فشار جبهه کار، بیش‌ترین نشست سطح زمین کاهش می یابد ولی این تغییرات قابل‌توجه نیست، به‌طوری‌که افزایش تقریباً ۲ برابری فشار جبهه کار باعث می‌شود بیش‌ترین نشست سطح زمین، حداکثر ۹ میلی‌متر کاهش یابد.
- افزایش بیش‌ازاندازه فشار سینه کار نه‌تنها حداکثر نشست سطح زمین را دیر کاهش نمی‌دهد بلکه باعث شکست غیرفعال (Passive failure) یا همان بالا زدگی درروی سطح زمین خواهد شد.
- با افزایش فاصله دو تونل متقاطع غیر هم‌سطح از ۳ متر به ۹ متر، میزان نشست بیشینه در سطح زمین تقریباً ۱۱ میلی‌متر کاهش می‌یابد.
- با توجه به مدل‌سازی و همچنین مشاهده بردارهای جابجایی در اطراف تونل سرویس و امداد بعد از احداث تونل خط ۲ مشهد، همگرایی مناسبی در تونل سرویس و امداد مشاهده گردید.

۵-۳- پیشنهادها

برای کامل‌تر شدن بررسی تأثیر تونل‌های غیر هم‌سطح به‌صورت سه‌بعدی پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

- بررسی شرایطی که تحت آن تونل دارای جبهه کار مختلط است یعنی بخش از تونل در یک‌لایه و بخش دیگری از آن در لایه‌ای دیگر حفاری می‌شود.
- در این تحقیق با توجه به اینکه بار ترافیکی خاصی روی مقاطع موردبررسی وجود نداشت و ساختمان با طبقات بالا که سربار بالایی را ایجاد کند وجود نداشت، از سربار در مدل‌سازی استفاده نشده است لذا پیشنهاد می‌شود مدل‌سازی با در نظر گرفتن سربار هم انجام گیرد.
- در این تحقیق از مدل رفتاری موهر کلمب جهت مدل‌سازی استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود از معیار غیرخطی خاک سخت شونده[1] نیز جهت مدل‌سازی و مقایسه نتایج با مدل موهر کلمب استفاده گردد.
- با توجه به این‌که در محیط مورد بررسی سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز احداث سازه‌ها هست، اثر آب زیرزمینی نادیده گرفته شد. پس با توجه به احداث برخی سازه‌ها در ترازهایی پایین‌تر از سطح آب زیرزمین، نیاز به بررسی در این شرایط قابل لمس است.
- اهمیت بالای طراحی لرزه‌ای سازه‌ها به‌خصوص در مناطق لرزه خیز موجب می‌گردید که بررسی عملکرد سازه‌ها در برابر زلزله نیز انجام گیرد.

[1] Hardening Soil

منابع

[۱] زارعی، ح؛ معارف وند؛ پرویز؛ (۱۳۹۲)"برآورد فشار سینه کار به روش تجربی و تحلیلی در بخش ابتدایی تول سبز کوه" اولین کنگره آسیایی و نهمین کنگره نگهداری تونل ایران، نوامبر ۲۰۱۱.

[۲] رنا رد میدل، مارتین هرنکنشت، لوتر آنوسر؛ مترجمین شریف زاده. مصطفی، خادمی حمیدی. جعفر، ترکمنی قطب. احمد، (۱۳۸۶) "تونل سازی مکانیزه سپری"، تهران جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر.

[۳] قره داش، ص؛ مرتضوی، علی؛ (۱۳۹۳) " برهمکنش سینه کار و خاک در زمین‌های سست شهری" . نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره شش پائیز و زمستان ۱۳۹۳.

[۴] کلانتری، س؛ شهریار، کوروش؛ خوش روان آذر، علی؛ (۱۳۸۳)" تعیین فشار نگهداری حداقل برای سینه کار تونل درروش EPB (مطالعه موردی: متروی تبریز)". ششمین کنفرانس تونل ۹- ۷ بهمن ۱۳۸۳ دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

[۵] مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۹۰)"مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی خط A قطار شهری قم".

[۶] حسینی، س. شهریار، ک. منجزی، م؛ و جان‌نثاری، ع. (۱۳۹۰) "مدل‌سازی سه‌بعدی تونل‌های متقاطع و بزرگ مقطع (مطالعه موردی: تقاطع خط ۷ و ۳ متروی تهران)" نخستین همایش آسیایی فضای زیرزمینی برای توسعه پایدار.

[۷] توحیدی، ا؛ و صدیقیانی، م.ه. (۱۳۹۰) "بررسی عوامل مؤثر در اندرکنش احداث تونل‌های متقاطع غیر هم‌سطح". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران.

[۸] شاه رضایی، م. جولایی، ا؛ و بیلگر، م. (۱۳۹۲). "مقایسه تأثیر حفر تونل‌های تکی و دوقلو برنشست زمین در شرایط مشابه" اولین کنفرانس مهندسی ژئوتکنیک ایران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه محقق اردبیلی.

[۹] Chiorboli, M. A. & Marchesili, P. P. (1996). Analysis and Control of Subsidence due to Earth Pressure Shield Tunneling in Pass ante Ferroviario of Milano. In L. Ozdemr (Ed.), Proceedings of the International Conference on North American Tunneling'96 (pp. 97-106). Rotterdam: A. A. Balkema. ISBN: 9054108037.

[۱۰] Leca, E. (1989). Analysis of NATM and Shield Tunneling in Soft Ground. Blacksburg: Doctoral Thesis, Virginia Institute and State University.

[۱۱] Atkinson, J.H. and Potts, D.M. (1977). "Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil". Geotechnique, 27(2), pp. 203–215.

[۱۲] Brinkgreve, R. B. J. & Broere, W. (2003). The Influence of Tunnel Boring on Foundations and Buildings in Urban Areas - A Numerical Study. Workshop on Geotechnics of Soft Soils (pp. 257-263). Delft University of Technology & Plaxis B.V. http://www.geo.citg.tudelft.nl/broere/pdf/brinkgreve_FEMtunnel_scmep2003.pdf.

[۱۳] Domon, T. Konda, T. Nishimura, K. and Matsui, M. (1998). "Model tests on face stability of tunnels in granular material.", Tunnels and Metropolises, Rotterdam, Balkema, pp. 229–234.

[۱۴] Eisenstein, Z. and Ezzeldine, O. (1994) "The role of face pressure for shield with Positive ground control". Proc. of Int. Conference on Tunneling and Ground Conditions, Cairo, ITA. Published by Balkema, Netherlands, pp. 557-571.

[۱۵] Hisatake, M. Eto,T. and Murakami, T. (1995). "Stability and failure mechanisms of a tunnel face with a shallow depth. In T. Fujii, editor, Proceedings of the 8th Congress of the International Society for Rock Mechanics, pp. 587–591.

[۱۶] Hwang, R. N. & Moh, Z. C. (1996). Pore Pressures Induced in Soft Ground due to Tunneling. In R. J. Mair, & R. N. Taylor (Ed.), Proceedings of the International

Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (pp. 695-700). Rotterdam: A. A. Balkema. ISBN: 9789054108566.

[۱۷] Kasper, T. & Meschke, G. (2006). On the Influence of Face Pressure, Grouting Pressure and TBM Design in soft Ground Tunneling. Tunnelling and Underground Space Technology, 21(2), 160-171. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.06.006.

[۱۸] Loganathan, N. & Poulos, H. G. (1998). Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,124(9),846-856.http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)10900241(1998)124:9(846).

[۱۹] M.Abasi,A.Bayat (2012),"Determine of tunnel face stability pressure in EPB machine with use analytical methods(Case study:Mashhad metro line 2).

[۲۰] Alizadeh.M,Ebrahimi.M.Rahmanenejad.R.(2007),"Radial Basis Function to Predict the Maximum Surface Setlement Cased by EPB Shield Tunneling".

[۲۱] Mair, R. Taylor, R. & Burland, J. (1996). Prediction of ground movements andassessment of risk of building damage due to bored tunneling. GeotechnicalAspects of Underground Construction in Soft Ground, Mair & Taylor (eds),713-718.

[۲۲] Matsushita, Y. Iwasakl, Y. Hashimoto, T. & Imanishi, H. (1994). Behavior of Subway Tunnel Driven by Large Slurry Shield. Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (pp. 253-256). Rotterdam: A. A. Balkema.

[۲۳] O'Reilly, M. & New, B. (1982). Settlements above tunnels in the United Kingdom:their magnitude and prediction. Tunneling'82, 173-181.

[۲۴] Park, K. H. (2005). Analytical Solution for Tunnelling-Induced Ground Movement in Clays. Tunnelling and Underground Space Technology, 20(3), 249-261. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2004.08.009.

[۲۵] Peck, R. (1969). Deep Excavations and tunneling in soft ground. Proceedings 7thInternational Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stateof the Art Volume, SOA report, Mexico City, 225-290.

[۲۶] Toan, N. D. (2006). TBM and Lining Essential Interfaces. Msc Thesis, Italy: Politecnico Di Torino. http://itaaites-srv1.epfl.ch/index.php?id=90&L=1.

[۲۷] Unlutepe, A. Tellioglu, V. & Arioglu, B. (2009). Redicted and Observed Ground Deformations due to TBM Tunnel Excavations on the IZMIR Metro Project (Stage 1). In P. Kocsonya (Ed.), ITAAITES World Tunnel Congress: Safe Tunnelling for the City and Environment Conference Proceedings (pp. 234-240). Budapest, Hungary: Hungarian Tunnelling Association. ISBN: 9789630672399.

[۲۸] Xiang, Y. Jiang, Z. & He, H. (2008). Assessment and Control of Metro-Construction Induced Settlement of A Pile-Supported Urban Overpass. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(3), 300-307, http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.06.008

[۲۹] Franzius, J. N. (2003) “Behavior of building due to tunnel induced settlement”. Ph.D. dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine.

[۳۰] Ghaboussi, J. and Ranken, R. E. (1977), “Interaction between two parallel tunnels,” Internation Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,Volume 1, pp 75-103.

[۳۱] Kim, S. H. (2005). ”Model testing of perpendicularly spaced tunnels”. Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future”. Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1537 452.

[۳۲] Liu, H.Y. Small, J. C. and Carter JP.(2007). “Full 3D modelling for effects of tunnelling onexisting support systems in the Sydney region”. Tunnel Undergr Space Technolgy 399-420.

[۳۳] Cheade, H. and Shahrour, F. (2007). “Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure.” Tunnelling and Underground Space Technology., Vol. 23, pp. 210-214.

[۳۴] Hsiao, F.Y. Yu, C.W. and Chern, J.C. (2008). “Feedback analysis on stability of intersection area of seven tunnels based on monitoring andconstruction data”. Chin. J. Rock Mech. Eng.

[۳۵] Liu HY, Small JC, Carter JP, and Williarns DJ.(2009) “Effects of tunnelling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels”. Computers and Geotechnics.

[۳۶] R.P.Chen, J. Zhu,W.Liu, X.W. and Tang. (2011). ”Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils”. Tunnelling and Underground Space Technology.

[۳۷] Chakeri, H. Hasanpour, R.Hindistan, and Bakhtiyar Unver. (2011).”Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling ”. Springer jurnal. Verlag- Bull Eng Geol Environ 70:439–447.

[۳۸] Ng, Ch. W.W. Boonyarak Th. and Mašín, D. (2013). “Three-dimensional centrifuge and numerical modeling of the interaction between perpendicularly crossing tunnels”. Canadian Geotechnical Journal. Sept, p. 935-946.

[۳۹] Boonyarak, Th. (2014). “Three-dimensional interaction of multiple crossing tunnels: centrifuge and numerical modeling”. Thesis (Ph.D.)-Hong Kong University of Science and Technology.

[۴۰] Viswanath,B. Krishna, A. and Kallimani, P. M. (2014). “NUMERICAL ANALYSIS OF INFLUENCE OF DEEP EXCAVATION ON NEARBY EXISTING TUNNEL”. International Journal of Research in Engineering and Technology.

[۴۱] Do, Ng.An. Dias, D. and Oreste, P. (2015) “3D numerical investigation on the interaction between twin tunnels in soft ground”. Environ Earth Sci, 73:2101–2113.

[۴۲] Boonyarak, Th. Charles W.W. and Ng. (2015) “Effects of construction sequence and cover depth on crossing-tunnel interaction”. Canadian Geotechnical Journal, 851-867

[۴۳] Adden brooke, T. I., & Potts, D.M. (2001).Twin tunnel interaction: surface and subsurface effects. International Journal of Geomechanics, 1(2), 249-271.

[۴۴] Kimmance, J. P. Lawrence, S. Hassan, O. Purchase, N. J. & Tollinger, G. (1996). Observations of deformations created in existing tunnels by adjacent and cross cutting excavations. Proceeding for geotechnical aspects of underground construction in soft ground, 707-712.

[۴۵] Liu, H. Y. Small, J. C. Carter, J. P. & Williams, D. J. (2009). Effects of tunneling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels. Computers and Geotechnics, 35(5), 880- 894.

[۴۶] نمازی، ا. (۱۳۸۵). "بررسی تأثیرات گذر تونل‌های مترو شیراز از زیر پل غدیر"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی معدن، گروه مکانیک سنگ.

[۴۷] امیرمحمد رضی، مدل‌سازی عددی شرایط عبور تونل خط ۷ متروی تهران از زیر کانال رباط‌کریم با نرم‌افزار Flac 3D و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج عملیات ابزاربندی و رفتار نگاری، نشریه انجمن تونل، شماره ۲۴، تابستان ۹۴ صفحات ۱۶- ۲۲.

[۴۸]گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران، تهیه‌شده توسط مهند سین مشاور ساحل

[۴۹] گزارش تعیین فشار سینه کار تونل خط ۷ مترو تهران، تهیه‌شده توسط مهندسین مشاو ساحل

[۵۰] Kirsch, A. 2010, "Experimental and numerical investigation of the stability of shallow tunnels in sand". Acta Geotechnical. Vol. 5, pp. 43-62.

[۵۱] O.Y. Ezzeldine, A.A. Darrag, "Instrumentation at the CWO Crossing – El Azhar Road Tunnels and its use in the Design of Future Projects", Utilitization of underground space in urban areas International Symposium, Egept, 2006.

[۵۲] SELI Co. 2008, "Tehran metro line 7 north-south section".

[۵۳] مهندسین مشاور هگزا، (۱۳۸۶)، گزارش‌ها ژئوتکنیکی و مطالعاتی تونل امداد مشهد.

[۵۴] مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۸)، گزارش‌ها ژیوتکنیکی خط ۲ متروی مشهد.

[۵۵] FLAC3D. (2015). User Manual. Minneapolis, MN, USA: Itasca Consulting Group.

[۵۶] Rongzhu Lianga, b. Tangdai Xiaa, b. Yi Honga, b. Feng Yuc., (2016), "Tunnelling and Underground Space Technology", Volume 58, Pages 159–176

[۵۷] حسینی، س؛ کورش شهریار؛ مسعود منجزی و علیرضا جان نثاری، (۱۳۹۰)، مدلسازی سه بعدی تونلهای متقاطع و بزرگ مقطع مطالعه موردی: تقاطع خط ۷ و ۳ متروی تهران، نهمین همایش ملی تونل، تهران، انجمن تونل ایران

Abstract:

Nowdays, paying close attention to the effects of tunnel excavation on adjacent structures is of paramount importance, especially when surrounding structures are of great significance. In this research, effort has been made to investigate the effects of excavation of Mashhad Metro line 2 tunnel on the service and emergency tunnel.

Mashhad Metro line 2 tunnel is planned to pass just under the service tunnel by a mere distance of 3.7 meters. It goes without saying that service tunnel has been proposed due to the possibility of emergency situation in which even seconds matters. In this project due to technical and environmental reasons, excavation of different parts of the tunnel has been planned by various methods. For example in the proximity of Qa'em Hospital, NATM (New Australian Tunneling Method) has been utilized. According to the fact that the service tunnel is already constructed and it has actually been used for some time, in this study we investigated the effect of the excavation of Line 2 main tunnel on the service tunnel by means of Flac 3D code in 3-dimension mode.

The results demonstrate that after complete excavation of line 2 tunnel, induced stress on service and aid tunnel reaches 100 KPa that it is a reason for 0.34 mm subsidence on crown and 5 mm tuck on floor of service and aid tunnel and the maximum subsidence on the ground reaches approx. 47 mm. Since there are 12 steps planned for the excavation, and in each step 1.5 meter of tunnel is excavated. By calculating the percentage of subsidence in each meter of tunnel, it can be said that about half the maximum subsidence is predictable ahead of the tunnel excavation face, about 90% right above the shield and 100% behind the shield.

By increasing the pressure of the shield excavation face, For example, if the pressure is doubled, only 9 millimeter of maximum subsidence can be decreased. On the other hand, the effect of increasing the distance between two tunnels was also investigated. If the spacing between two tunnels increased from 3 meters to 9 meters, the maximum subsidence on the ground would be decreased by 11 millimeters.

Keywords:

Service and emergency tunnel of Mashhad, Line 2 tunnel of Mashhad, Intersection, Numerical modeling, subsidence on the ground

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

MSc Thesis in Rock Mechanic

Study of the interactive effects of Mashhad line2 metro tunnel and Mashhad service and aid tunnel during the excavation of metro tunnel beneath the service tunnel and investigation of the stability improvement of metro tunnel

By: Afshin Eshghi

Supervisor:

Dr Seyed Rahman Torabi

July 2016