





دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

(گروه استخراج معدن)

بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین در تونلسازی
مکانیزه شهری - مطالعه موردی تونل مترو قطعه شرقی غربی خط ۷ تهران

رضا حیدری شیبانی

اساتید راهنما:

دکتر شکرا... زارع

دکتر حسین میرزائی

مشاورین:

دکتر رضا میکائیل

مهندس محسن رضائی

شهریورماه ۱۳۹۱



مدیریت تحصیلات تکمیلی

بسمه تعالی

شماره :
تاریخ :
ویرایش :

فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد رضا حیدری شیبانی رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه شهری - مطالعه موردی تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران که در تاریخ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

| | | |
|--|------------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> قبول (با درجه : امتیاز) | <input type="checkbox"/> دفاع مجدد | <input type="checkbox"/> مردود |
|--|------------------------------------|--------------------------------|

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

| امضاء | مرتبۀ علمی | نام و نام خانوادگی | a عضو هیأت داوران |
|-------|------------|--------------------|---------------------------------|
| | | | ۱- استادارهنما |
| | | | ۲- استاد مشاور |
| | | | ۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی |
| | | | ۴- استاد ممتحن |
| | | | ۵- استاد ممتحن |

تأیید رئیس دانشکده:

پدرم
با موها پریشتر
پاکی قدو شتر
سینک و جوشتر
سنگینی سکو شتر
نجات و غم شتر

و باز زمره گلد شتر در جذب محراب
کسته و وسیع صفت تو

و مصحف «پدرم» مرخولاندر

تقدیم بہ

دکتر محمدی رضا خورشیدی (عضو ہیئت علمی دانشکده علوم ریاضی دانشگاه صنعتی شاهرود)

اوروج اعتماد بہ نفس را در من دمید

او تنها کسی بود کہ مرا باور داشت

و در یک کلام استاد خواندمش

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود. در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تمامی اساتید بزرگوار به ویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضایل اخلاقی یاری نموده‌اند تقدیر و تشکر نمایم.

شایسته است اکنون که به فضل الهی این تحقیق به پایان رسیده است، از زحمات اساتید گرانقدر آقای دکتر شکرا... زارع و آقای دکتر حسین میرزائی که با رهنمودهای ارزشمندشان مراد را انجام هرچه بهتر این پایان نامه یاری فرمودند تشکر و سپاسگزاری کنم.

از استاد ارجمند و مشاور پایان نامه‌ام جناب جناب آقای مهندس محسن رضائی که همواره با صبر و حوصله به راهنمایی‌ام پرداخته‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از شرکت مهندسی مشاور ساحل که در انجام این تحقیق همکاری لازم را نموده‌اند

نیز کمال تشکر و قدردانی دارم

تعهد نامه

اینجانب رضا حیدری شیبانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه شهری – مطالعه موردی خط ۷ مترو تهران قطعه شرقی غربی تحت راهنمایی دکترشکرا... زارع و دکتر حسین میرزائی متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

ساخت تونل و فضاهای زیرزمینی در مناطق شهری روز به روز در حال گسترش است. اکثر این فضاها به علت نزدیک بودن به سطح زمین در بستر خاکی حفر می‌شوند. در محیط‌های خاکی یکی از موارد مهم جهت کنترل پایداری تونل و جلوگیری از نشست سطح، فشار سینه‌کار و فشار تزریق است. در پروژه مترو تونل خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران، تونل با ماشین حفاری مکانیزه از نوع متعادل کننده فشار زمین (EPB) حفر می‌شود. در این تحقیق با تمرکز بر روی چهار مقطع از این تونل به بررسی تاثیر فشار سینه کار بر نشست سطح زمین پرداخته شد. فشار سینه‌کار در چهار حالت فشار اولیه، $1/5$ برابر فشار اولیه، 2 برابر فشار اولیه، 4 برابر فشار اولیه و فشار تزریق در 5 حالت بدون اعمال تزریق، برابر فشار سینه کار، $0/5$ بار بیشتر از فشار سینه کار، 1 بار بیشتر از فشار سینه کار و 2 بار بیشتر از فشار سینه کار با استفاده از مدل سازی عددی و سه بعدی اجزاء محدود و نرم افزار PLAXIS3D Tunnel v 1.2 مورد تحلیل قرار گرفت. برای حالت $H < 2D$ تاثیرات فشار سینه کار و فشار تزریق بر نشست سطح به مراتب بیشتر از حالت $H > 2D$ است نتایج نشان می‌دهد افزایش 4 برابری فشار سینه‌کار حداکثر باعث کاهش 5 میلی‌متر ماکزیمم نشست می‌شود. بنابراین اگرچه افزایش فشار سینه‌کار باعث کاهش نشست شده است ولی این میزان بسیار ناچیز است. در این پروژه میزان فشار تزریق در کاهش نشست بسیار تاثیر گذار است. فشار بهینه تزریق، $0/5$ بار بیشتر از فشار سینه کار ارزیابی شد. افزایش فشار تزریق بیش از این تاثیر چندانی بر میزان نشست ندارد. اعتبار سنجی نتایج با استفاده از ابزار بندی در سطح زمین و بر روی دو مقطع از تونل انجام گرفته است. با مقایسه مدل سازی و نتایج حاصل از ابزاربندی نشان می‌دهد صحت روند مدل سازی به خوبی انجام گرفته است.

کلمات کلیدی: تونلسازی مکانیزه، EPB، تونل مترو خط ۷ مترو قطعه شرقی غربی تهران، نشست، فشار سینه کار، فشار تزریق، ابزار بندی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- بررسی تاثیر فشار سینه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه شهری (مطالعه موردی تونل مترو قطعه شرقی غربی خط ۷ تهران)، نشریه علمی پژوهشی مهندسی تونل و فضاهاى زیر زمینی، ۱۳۹۱
- بررسی تاثیر فشار تزریق بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه شهری (مطالعه موردی تونل مترو قطعه شرقی غربی خط ۷ تهران)، نشریه علمی پژوهشی مهندسی تونل امیر کبیر (تحت داوری)
- Assessment of face support pressure and backfill grouting pressure on the tunneling induced settlement- case study Tehran Metro line 7 east- west tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, (The arbitration)

| | |
|----|---|
| ۱۳ | فصل اول: کلیات..... |
| ۲ | ۱.۱ مقدمه..... |
| ۴ | ۲.۱ محدوده مورد مطالعه..... |
| ۵ | ۳.۱ ضرورت و هدف تحقیق..... |
| ۷ | ۴.۱ سازماندهی پایان نامه..... |
| ۹ | فصل دوم: بررسی چندین مطالعه موردی تونلسازی با حفاری مکانیزه (EPB) در خاک..... |
| ۱۰ | ۱.۲ مقدمه..... |
| ۱۸ | ۲.۲ بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق در نشست سطح بر مبنای اطلاعات ایزاربندی..... |
| ۲۰ | ۱.۲.۲ پروژه شهری تونل واشنگتون (WMATA)..... |
| ۲۳ | ۲.۲.۲ پروژه تونل سریع السیر تایپه (TRTS)..... |
| ۲۵ | ۳.۲.۲ تونل انتقال آب سانفرانسیسکو..... |
| ۲۷ | ۴.۲.۲ پروژه مترو شهر فوکوکا (Fukuoka City Subway Project)..... |
| ۳۰ | ۵.۲.۲ پروژه مترو شهر میلان (Milan Subway Project)..... |
| ۳۲ | ۶.۲.۲ پروژه مترو شهر بانکوک (MRTA)..... |
| ۳۷ | ۳.۲ بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق در تونلسازی مکانیزه بر مبنای مطالعات عددی..... |
| ۳۸ | ۱.۳.۲ مدل سازی عددی گرین وود..... |
| ۴۰ | ۲.۳.۲ مدل سازی عددی توماس کسپر..... |
| ۴۲ | ۳.۳.۲ مدل سازی عددی لامبروگی..... |
| ۴۶ | ۴.۲ بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق در نشست بر مبنای مدل سازی فیزیکی..... |
| ۴۸ | ۵.۲ جمع بندی..... |
| ۴۹ | فصل سوم: زمین شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر خط هفت متروی تهران..... |
| ۵۰ | ۱.۳ شرح پروژه..... |
| ۵۱ | ۲.۳ زمین شناسی مسیر تونل..... |
| ۵۴ | ۳.۳ تفکیک و توصیف واحدهای زمینشناسی مهندسی..... |
| ۵۷ | ۱.۳.۳ واحد زمین شناسی مهندسی ET-1..... |
| ۵۷ | ۲.۳.۳ واحد زمین شناسی مهندسی ET-2..... |
| ۵۷ | ۳.۳.۳ واحد زمین شناسی مهندسی ET-3..... |
| ۵۸ | ۴.۳.۳ واحد زمین شناسی مهندسی ET-4..... |
| ۵۸ | ۵.۳.۳ واحد زمین شناسی مهندسی ET-5..... |
| ۵۹ | ۶.۳.۳ واحد زمین شناسی مهندسی ET-6..... |
| ۵۹ | ۴.۳ گسترش و موقعیت واحدهای خاکی در مسیر تونل..... |

| | | |
|----------|---|------------|
| ۵.۳ | تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای خاکی..... | ۶۱ |
| ۶.۳ | وضعیت آب زیرزمینی در مسیر تونل..... | ۶۱ |
| ۷.۳ | جمع بندی..... | ۶۴ |
| 4 | فصل چهارم: انتخاب مقاطع حفاری و مدل سازی سه بعدی با نرم افزار Plaxis3D..... | ۶۵ |
| ۱.۴ | مقدمه..... | ۶۶ |
| ۱.۱.۴ | معادلات اساسی تغییر شکل پیوسته در روش اجزاء محدود..... | ۶۶ |
| ۲.۴ | انتخاب مقاطع طراحی..... | ۷۱ |
| ۱.۲.۴ | هندسه تونل..... | ۷۲ |
| ۲.۲.۴ | شرایط مرزی..... | ۷۸ |
| ۳.۲.۴ | خصوصیات مواد..... | ۸۰ |
| ۴.۲.۴ | مش بندی..... | ۸۱ |
| ۵.۲.۴ | شرایط اولیه..... | ۸۱ |
| ۳.۴ | محاسبات..... | ۸۳ |
| ۴.۴ | خروجی..... | ۹۰ |
| ۵.۴ | اعتبار سنجی مدلسازی..... | ۹۱ |
| ۶.۴ | جمع بندی..... | ۹۷ |
| ۵ | فصل پنجم: کلیاتی در رابطه با نحوه محاسبه فشار سینه کار و فشار تزریق..... | ۹۸ |
| ۱.۵ | مقدمه..... | ۹۹ |
| ۲.۵ | روشهای برآورد فشار سینه کار و فشار تزریق..... | ۱۰۱ |
| ۱.۲.۵ | کلیاتی در مورد فشار سینه کار..... | ۱۰۱ |
| ۲.۲.۵ | کلیاتی در مورد فشار تزریق..... | ۱۰۲ |
| ۳.۵ | جمع بندی..... | ۱۰۹ |
| ۶ | فصل ششم: بررسی فشار سینه کار بر نشست سطح زمین..... | ۱۱۰ |
| ۱.۶ | مقدمه..... | ۱۱۱ |
| ۲.۶ | بررسی تاثیر فشار سینه کار بر نشست سطح زمین تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... | ۱۱۵ |
| ۱.۲.۶ | کیلومتر ۵+۲۰۰ تونل خط ۷ مترو تهران..... | ۱۱۵ |
| ۲.۲.۶ | کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل خط ۷ مترو تهران..... | ۱۲۷ |
| ۳.۶ | جمع بندی..... | ۱۳۹ |
| ۷ | فصل هفتم: بررسی فشار تزریق بر نشست سطح زمین..... | ۱۴۰ |
| ۱.۷ | مقدمه..... | ۱۴۱ |

| | | |
|-----|-------|---|
| ۱۴۲ | ۱.۷ | بررسی تاثیر فشار تزریق در تونلسازی مکانیزه قطعه شرقی غربی مترو خط ۷ تهران |
| ۱۴۳ | ۱.۱.۷ | تاثیر فشار تزریق بر نشست سطح زمین در کیلومتراژ ۸+۲۰۰ |
| ۱۵۴ | ۲.۱.۷ | تاثیر فشار تزریق بر نشست سطح زمین در کیلومتراژ ۵+۲۰۰ |
| ۱۶۴ | ۲.۷ | مقایسه تاثیر فشار تزریق بر نشست در دو مقطع کیلومتراژ ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰ |
| ۱۶۶ | ۳.۷ | جمع بندی |
| ۱۶۷ | ۸ | فصل هشتم: جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات |
| ۱۶۸ | ۱.۸ | جمع بندی |
| ۱۷۰ | ۲.۸ | نتایج و پیشنهادات |
| ۱۷۴ | ۹ | پیوست |
| ۱۸۸ | ۱۰ | منابع و مآخذ |

| | |
|---|----|
| شکل ۱-۱: محدوده خط هفت متروی تهران..... | ۵ |
| شکل ۱-۲: طبقه بندی TBM بر اساس محل کاربرد..... | ۱۱ |
| شکل ۲-۲: سپر ترکیبی با دو اتاقک..... | ۱۳ |
| شکل ۳-۲: سپر متعادل کننده فشار زمین..... | ۱۴ |
| شکل ۴-۲: نمودار حوزهای دانه بندی مسیر تونل برای کار با ماشین..... | ۱۷ |
| شکل ۵-۲: سپر متعادل کننده فشار زمین پروژه خط ۷ مترو تهران..... | ۱۸ |
| شکل ۶-۲: نقشه پروژه WMATA..... | ۲۰ |
| شکل ۷-۲: پروفیل خاک پروژه F4..... | ۲۱ |
| شکل ۸-۲: نشست سطح در برابر موقعیت شیلد در مقطع SSI-4 پروژه تونل واشنگتن..... | ۲۲ |
| شکل ۹-۲: نشست سطح در برابر موقعیت شیلد در مقطع SSI-3 پروژه تونل واشنگتن..... | ۲۲ |
| شکل ۱۰-۲: عمق و شرایط پروژه تونل تایپه..... | ۲۳ |
| شکل ۱۱-۲: فروریزش زمین در طی فاصله از شیلد..... | ۲۳ |
| شکل ۱۲-۲: تغییر شکل زمین در بالای تونل تایپه..... | ۲۴ |
| شکل ۱۳-۲: شرایط سطحی پروژه N-2 تونل سانفرانسیسکو..... | ۲۵ |
| شکل ۱۴-۲: نشست اندازه گیری شده و نشست اندازه گیری شده در برابر فشار سینه کار در پروژه N-2 تونل سانفرانسیسکو..... | ۲۷ |
| شکل ۱۵-۲: مسیر تونل و پروفیل خاک در مترو فوکوکا..... | ۲۷ |
| شکل ۱۶-۲: فشار اسلاری در برابر نشست..... | ۲۸ |
| شکل ۱۷-۲: نشست مشاهده شده و ثبت پارامترهای عملیاتی..... | ۲۹ |
| شکل ۱۸-۲: نرخ فشار سینه کار در برابر نشست سطح..... | ۳۰ |
| شکل ۱۹-۲: پارامترهای طراحی و نشست سطح اندازه گیری شده در پروژه مترو میلان..... | ۳۱ |
| شکل ۲۰-۲: فشار سینه کار در برابر ماکزیمم نشست سطح زمین بعد از گذر شیلد..... | ۳۴ |
| شکل ۲۱-۲: نرخ فشار سینه کار در برابر ماکزیمم نشست سطح زمین بعد از گذر شیلد..... | ۳۴ |
| شکل ۲۲-۲: دسته بندی فشار سینه کار در وضعیت های مختلف زمین شناسی در برابر ماکزیمم نشست سطح زمین بعد از گذر شیلد..... | ۳۵ |
| شکل ۲۳-۲: شکل شماتیک فضای خالی بین لاینینگ تونل..... | ۳۶ |
| شکل ۲۴-۲: فشار تزریق و پر کردن دوغاب..... | ۳۶ |
| شکل ۲۵-۲: فشار تزریق مختلف در برابر ماکزیمم نشست سطح بعد از گذر سپر..... | ۳۷ |
| شکل ۲۶-۲: فشار سینه کار در برابر نشست با موقعیت شیلد..... | ۳۹ |
| شکل ۲۷-۲: تزریق در برابر نشست با موقعیت شیلد..... | ۳۹ |
| شکل ۲۸-۲: مقدار نشست سطح زمین محاسبه شده در محل پایش نقطه A به ازای فشار ختلف سینه کار..... | ۴۱ |

- شکل ۲-۲۹: مقدار نشست سطح زمین محاسبه شده در محل پایش نقطه A به ازای فشار مختلف تزریق..... ۴۱
- شکل ۲-۳۰: مراحل مدل سازی عددی لامبروگی با استفاده از نرم افزار FLAC3D..... ۴۳
- شکل ۲-۳۱: پروفیل نشست طولی مدل سازی عددی لامبروگی در فشار تزریق مختلف..... ۴۵
- شکل ۲-۳۲: میزان نشست عمودی سطح در برابر فاصله از سینه کار مدل عددی لامبروگی..... ۴۵
- شکل ۲-۳۳: مقایسه مکانیزم شکست آزمایشگاهی با تئوری..... ۴۷
- شکل ۲-۳۴: رشد جابجایی جبهه‌کار: رابطه بین جابجایی افقی با فشار محدود کننده داخلی..... ۴۷
- شکل ۳-۱: موقعیت مسیر تونل بر روی تصویر ماهواره‌های تهران..... ۵۰
- شکل ۳-۲: موقعیت مسیر تونل بر روی نقشه تهران..... ۵۱
- شکل ۳-۳: موقعیت مسیر تونل بر روی نقشه زمین شناسی آژانس همکاری‌های بین‌المللی ژاپن..... ۵۳
- شکل ۳-۴: موقعیت مسیر تونل بر روی نقشه زمین شناسی پژوهشگاه زلزله..... ۵۴
- شکل ۳-۵: گسل‌های فعال مهم گستره اطراف بخش شرقی-غربی مسیر تونل (خط ۷ مترو)..... ۵۶
- شکل ۳-۶: پروفیل طولی به همراه ویژگی زمین شناسی مهندسی پروژه تونل خط ۷ تهران..... ۶۳
- شکل ۴-۱: ماشین حفاری فشار تعادلی زمین قطعه شرقی غربی تونل خط هفت متروی تهران..... ۷۳
- شکل ۴-۲: لایه بندی و شرایط زمین شناسی کیلومتر ۲۰۰+۵ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... ۷۳
- شکل ۴-۳: هندسه مدل سازی شده کیلومتر ۲۰۰+۵ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... ۷۴
- شکل ۴-۴: لایه بندی و شرایط زمین شناسی کیلومتر ۲۰۰+۸ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... ۷۵
- شکل ۴-۵: هندسه مدل سازی شده کیلومتر ۲۰۰+۸ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... ۷۵
- شکل ۴-۶: لایه بندی و شرایط زمین شناسی کیلومتر ۲۰۰+۱۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... ۷۶
- شکل ۴-۷: لایه بندی و شرایط زمین شناسی کیلومتر ۲۰۰+۱۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... ۷۷
- شکل ۴-۸: هندسه مدل سازی شده کیلومتر ۲۰۰+۱۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... ۷۷
- شکل ۴-۹: هندسه مدل سازی شده کیلومتر ۲۰۰+۱۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... ۷۸
- شکل ۴-۱۰: شرایط مرزی برای الف) محور عمودی هندسه ب) محور افقی هندسه ج) صفحات ساختاری..... ۷۹
- شکل ۴-۱۱: نحوه اعمال شرایط مرزی در نرم افزار PLAXIS3D tunnel..... ۷۹
- شکل ۴-۱۲: فشار منفذی آب محاسبه شده توسط نرم افزار برای کیلومتر ۲۰۰+۵..... ۸۲
- شکل ۴-۱۳: تنش موثر خاک محاسبه شده توسط نرم افزار برای کیلومتر ۲۰۰+۵..... ۸۳
- شکل ۴-۱۴: نحوه مدل سازی ماشین حفار مکانیزه، فشار سینه کار، فشار تزریق بعد از ۱۶/۵ متر حفاری..... ۸۴
- شکل ۴-۱۵: نحوه مدل سازی تونل سازی مکانیزه کیلومتر ۲۰۰+۱۰ بعد از ۳۴/۵ متر حفاری..... ۸۹
- شکل ۴-۱۶: پایان فاز محاسباتی..... ۸۹
- شکل ۴-۱۷: کنتورهای جابجایی زمین در اثر حفر با ماشین مکانیزه کیلومتر ۲۰۰+۸ تونل بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال و فشار تزریق ۱۶۲/۵ کیلو پاسکال..... ۹۰

- شکل ۴-۱۸: پروفیل طولی و عرضی نشست سطح زمین کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال و فشار تزریق ۱۶۲/۵ کیلو پاسکال با ماکزیمم نشست ۱۸ میلی متر..... ۹۱
- شکل ۴-۱۹: مقطع زمین شناسی تراز یابی کیلومتر ۱۰+۵۰۰ تونل مترو خط ۷ تهران..... ۹۲
- شکل ۴-۲۰: مقطع زمین شناسی تراز یابی کیلومتر ۱۰+۵۵۰ تونل مترو خط ۷ تهران..... ۹۳
- شکل ۴-۲۱: نحوه مونیورینگ نقطه A بعد از ۳۰ متر گذر شیلد کیلومتر ۱۰+۵۰۰..... ۹۴
- شکل ۴-۲۲: نحوه مونیورینگ نقطه A بعد از ۳۰ متر گذر شیلد کیلومتر ۱۰+۵۵۰..... ۹۴
- شکل ۴-۲۳: منحنی جابجایی قائم نقطه A کیلومتر ۱۰+۵۰۰..... ۹۵
- شکل ۴-۲۴: منحنی جابجایی قائم نقطه A کیلومتر ۱۰+۵۵۰..... ۹۶
- شکل ۴-۲۵: منحنی جابجایی نقطه A برای هر دو مقطع کیلومتر ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰..... ۹۶
- شکل ۵-۱: محل سنسورهای فشار روی دیوار فشار..... ۱۰۰
- شکل ۵-۲: پرشدن فضای خالی پشت سگمنت..... ۱۰۳
- شکل ۵-۳: چهار مدل تزریق گروت به صورت شماتیک..... ۱۰۸
- شکل ۵-۴: نمایی از اعمال فشار سینه کار و فشار تزریق به صورت شماتیک در پروژه خط ۷ مترو تهران..... ۱۰۸
- شکل ۶-۱: نشست حاصل از حفار مکانیزه شهری..... ۱۱۲
- شکل ۶-۲: بالا زدگی حاصل از حفار مکانیزه شهری..... ۱۱۲
- شکل ۶-۳: مراحل وقوع نشست (۵ مرحله نشست)..... ۱۱۴
- شکل ۶-۴: مقطع زمین شناسی کیلومتر ۵+۲۰۰ تونل..... ۱۱۵
- شکل ۶-۵: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق صفر کیلومتر ۵+۲۰۰..... ۱۱۶
- شکل ۶-۶: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق صفر..... ۱۱۷
- شکل ۶-۷: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار کیلومتر ۵+۲۰۰..... ۱۱۸
- شکل ۶-۸: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق برابر فشار سینه کار..... ۱۱۹
- شکل ۶-۹: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار فشار سینه کار کیلومتر ۵+۲۰۰..... ۱۲۰
- شکل ۶-۱۰: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار..... ۱۲۱
- شکل ۶-۱۱: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار فشار سینه کار کیلومتر ۵+۲۰۰..... ۱۲۱

- شکل ۶-۱۲: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه‌کار مختلف و فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار..... ۱۲۲
- شکل ۶-۱۳: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار فشار سینه کار کیلومتر از ۵+۲۰۰..... ۱۲۳
- شکل ۶-۱۴: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار..... ۱۲۴
- شکل ۶-۱۵: پروفیل طولی و عرضی نشست فشار سینه کار ۷۵ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۲۵ کیلوپاسکال مقطع ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران با بیشترین جابجایی ۳۴/۳۱ میلی متر..... ۱۲۶
- شکل ۶-۱۶: کنتور جابجایی قائم مقطع ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... ۱۲۶
- شکل ۶-۱۷: مقطع زمین شناسی کیلومتر از ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران..... ۱۲۷
- شکل ۶-۱۸: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق صفر کیلومتر از ۸+۲۰۰..... ۱۲۸
- شکل ۶-۱۹: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق صفر..... ۱۲۹
- شکل ۶-۲۰: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار کیلومتر از ۸+۲۰۰..... ۱۳۰
- شکل ۶-۲۱: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق برابر فشار سینه کار..... ۱۳۰
- شکل ۶-۲۲: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار کیلومتر از ۸+۲۰۰..... ۱۳۲
- شکل ۶-۲۳: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار..... ۱۳۲
- شکل ۶-۲۴: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار کیلومتر از ۸+۲۰۰..... ۱۳۳
- شکل ۶-۲۵: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار..... ۱۳۳
- شکل ۶-۲۶: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار کیلومتر از ۸+۲۰۰..... ۱۳۴
- شکل ۶-۲۷: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار..... ۱۳۵
- شکل ۶-۲۸: فشار سینه کار در برابر نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ تهران..... ۱۳۷
- شکل ۶-۲۹: فشار سینه کار در برابر نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ تهران..... ۱۳۷

| | |
|---|-----|
| شکل ۶-۳۰: مقایسه تاثیر فشار سینه کار بر دو مقطع ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ بر پروفیل طولی نشست سطح(فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار)..... | ۱۳۸ |
| شکل ۷-۱: نمایی از ابعاد ماشین حفار مکانیزه و پوشش بتنی پروژه تونل مترو خط ۷ تهران..... | ۱۴۲ |
| شکل ۷-۲: نحوه اعمال فشار تزریق پشت دستگاه به دیواره تونل..... | ۱۴۳ |
| شکل ۷-۳: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۷۵ کیلوپاسکال کیلومتر از ۸+۲۰۰..... | ۱۴۴ |
| شکل ۷-۴: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال کیلومتر از ۸+۲۰۰..... | ۱۴۴ |
| شکل ۷-۵: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۱۱۲/۵ کیلوپاسکال کیلومتر از ۸+۲۰۰..... | ۱۴۴ |
| شکل ۷-۶: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال کیلومتر از ۸+۲۰۰..... | ۱۴۵ |
| شکل ۷-۷: تغییرات فشار تزریق در برابر نشست با فشار سینه کار متغیر کیلومتر از ۸+۲۰۰..... | ۱۴۵ |
| شکل ۷-۸: پروفیل طولی نشست سطح کیلومتر از ۸+۲۰۰ با فشار سینه کار ۷۵ کیلوپاسکال و فشار تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری..... | ۱۴۶ |
| شکل ۷-۹: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال..... | ۱۴۷ |
| شکل ۷-۱۰: پروفیل طولی نشست سطح کیلومتر از ۸+۲۰۰ با فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلوپاسکال و فشار تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری..... | ۱۴۸ |
| شکل ۷-۱۱: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال..... | ۱۴۹ |
| شکل ۷-۱۲: پروفیل طولی نشست سطح کیلومتر از ۸+۲۰۰ با فشار سینه کار ۱۵۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری..... | ۱۴۹ |
| شکل ۷-۱۳: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال..... | ۱۵۱ |
| شکل ۷-۱۴: پروفیل طولی نشست سطح کیلومتر از ۸+۲۰۰ با فشار سینه کار ۳۰۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری..... | ۱۵۲ |
| شکل ۷-۱۵: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و فشار سینه کار ۳۰۰ کیلو پاسکال..... | ۱۵۲ |
| شکل ۷-۱۶: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۷۵ کیلوپاسکال کیلومتر از ۵+۲۰۰..... | ۱۵۴ |

| | |
|--|------------|
| شکل ۷-۱۷: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۱۱۲/۵ کیلوپاسکال کیلومتر از | ۵+۲۰۰..... |
| ۱۵۴..... | |
| شکل ۷-۱۸: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال کیلومتر از | ۵+۲۰۰..... |
| ۱۵۵..... | |
| شکل ۷-۱۹: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال کیلومتر از | ۵+۲۰۰..... |
| ۱۵۵..... | |
| شکل ۷-۲۰: تغییرات فشار تزریق در برابر نشست با فشار سینه کار متغیر کیلومتر از ۵+۲۰۰..... | ۱۵۶..... |
| شکل ۷-۲۱: پروفیل طولی نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ با فشار سینه کار ۷۵ کیلوپاسکال و فشار | |
| تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری..... | ۱۵۶..... |
| شکل ۷-۲۲: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و فشار | |
| سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال..... | ۱۵۸..... |
| شکل ۷-۲۳: پروفیل طولی نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ تونل با فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلوپاسکال و | |
| فشار تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری..... | ۱۵۹..... |
| شکل ۷-۲۴: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و فشار | |
| سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال..... | ۱۶۰..... |
| شکل ۷-۲۵: پروفیل طولی نشست سطح کیلومتر از ۵+۲۰۰ با فشار سینه کار ۱۵۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق | |
| متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری..... | ۱۶۱..... |
| شکل ۷-۲۶: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و فشار | |
| سینه کار ۱۵۰ کیلو پاسکال..... | ۱۶۱..... |
| شکل ۷-۲۷: متر از تونل در برابر تغییرات نشست سطح کیلومتر از ۵+۲۰۰ با فشار سینه کار ۳۰۰ کیلوپاسکال و | |
| فشار تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری..... | ۱۶۲..... |
| شکل ۷-۲۸: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و فشار | |
| سینه کار ۳۰۰ کیلو پاسکال..... | ۱۶۳..... |
| شکل ۷-۲۹: پروفیل طولی نشست دو مقطع ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ تهران..... | ۱۶۵..... |
| شکل ۷-۳۰: مقایسه درصد نشست سطح زمین دو مقطع ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰ (فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار | |
| سینه کار)..... | ۱۶۵..... |

- جدول ۱-۲: تفاوت های دو ماشین EPB و SPB ۱۷
- جدول ۲-۲: مطالعات انجام شده پروژه های سراسر جهان حاصل از ابزار بندی مرتبط با فشار سینه کار و فشار تزریق در حفار مکانیزه شهری ۱۹
- جدول ۳-۲: مقایسه بین فشار سینه کار و جابجایی عرضی پروژه انتقال آب سانفرانسیسکو ۲۶
- جدول ۴-۲: مطالعات عددی مرتبط با فشار سینه کار و فشار تزریق در حفار مکانیزه شهری ۳۸
- جدول ۱-۳: مشخصات واحدهای زمینشناسی مهندسی تفکیک شده در مسیر تونل ۵۵
- جدول ۲-۳: زونهای زمینشناسی-ژئوتکنیکی مسیر تونل (بر اساس گسترش واحدهای دربرگیرنده سینه کار ۶۰
- جدول ۳-۳: مقادیر پارمترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل ۶۱
- جدول ۱-۴: مشخصات مسیر تونل پروژه خط ۷ قطعه شرقی غربی مترو تهران ۷۱
- جدول ۲-۴: خصوصیات ماشین EPB خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران ۸۰
- جدول ۳-۴: خصوصیات سگمنت خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران ۸۱
- جدول ۴-۴: شرایط اولیه مقاطع مدل سازی شده تونل خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران ۸۲
- جدول ۱-۵: روشهای محاسبه فشار نگهداری با توجه به شرایط ژئوتکنیکی ۱۰۲
- جدول ۱-۶: درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار سینه کار کیلومتر از ۵+۲۰۰ ۱۲۵
- جدول ۲-۶: درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار سینه کار کیلومتر از ۸+۲۰۰ ۱۳۶
- جدول ۱-۷: درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار تزریق کیلومتر از ۸+۲۰۰ ۱۵۳
- جدول ۲-۷: درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار تزریق کیلومتر از ۵+۲۰۰ ۱۶۴

فصل اول: کلیات

۱.۱ مقدمه

امروزه تونل‌ها در جاهای مختلفی مانند راه، راه آهن، مترو، خطوط انتقال آب و... کاربردهای زیادی دارند. برای احداث و راه اندازی فضاهای زیرزمینی سرعت و دقت اجرا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های اجرای فضاهای زیرزمینی به سه بخش عمده حفاری سنتی، نیمه مکانیزه و تمام مکانیزه تقسیم می‌شوند.

در روش تونلسازی مکانیزه ماشین‌های نسبتاً پیشرفته‌ای برای حفاری و ساخت سازه استفاده می‌گردد که دستگاه TBM از جمله آنهاست. بکارگیری افزودنی‌های مناسب از مواد در حین حفاری و اجرای سازه تونل امکان‌پذیر است. از سوی دیگر بکارگیری این روش‌ها مزایایی از جمله کاهش زمان ساخت در نتیجه کاهش در هزینه‌های اجرا را به دنبال خواهد داشت. بنابراین کاربرد این نوع دستگاه‌ها روز به روز در حال گسترش است. کاربری دستگاه‌های TBM مجهز به سیستم فشار تعادلی زمین دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. مثلاً در خاک‌های نامناسب این سیستم‌ها با مشکلات زیادی روبرو شده و گاهی ادامه کار را غیرممکن می‌سازد. اما آنچه کاربری این سیستم‌ها را برای حفاری‌های شهری بسیار ضروری می‌سازد توانایی آنها در کنترل تغییر شکل محیط اطراف تونل می‌باشد. مثلاً در محیط‌های شهری محدودیت‌های زیادی برای میزان نشست بعد از ساخت تونل به دلیل وجود سازه‌های گوناگون از جمله جاده‌ها، ساختمان‌ها و... وجود دارد. لذا برای کنترل تغییر شکل‌های قائم و افقی ناشی از تونلسازی در یک محدوده معینی می‌بایستی فشار افقی و قائم که با انجام حفاری از روی سینه کار برداشته می‌شود و باعث القای تغییر شکل‌هایی در محیط در برگیرنده تونل است به طریقی مجدداً به جبهه کار برگردانده شوند تا قبل از پایان زمان خود پایداری جبهه کار مجدداً تعادل نیروها را برقرار نماید. این سیستم یک ماشین با مقطع حفاری سرپسته‌ای است که در آن با کنترل سرعت پیشروی و میزان خروجی‌های ماشین

می توان به تعادل سینه کار دست یافت. آنچه که در درون محفظه ماشین قرار گرفته و عامل فشار جبهه کار است می تواند هوای فشرده و یا خود مواد حاصل از حفاری بعلاوه دوغاب بنتونیت باشند. در صورتی که ملاتی از مواد حفاری، آب و بنتونیت بدین منظور بکار رود سیستم را TBM با سپر گل حفاری یا اسلاری شیلد^۱ می نامند و در صورتی که مواد حاصل از حفاری خود عامل فشار بر جبهه کار باشند سیستم را اصطلاحاً EPB^۲ می نامند [۱].

دو عامل مهم که در حفاری مکانیزه در پایداری زمین نقش دارند، یکی وجود سپر استوانه ای است که تا زمان نصب پوشش نهایی به عنوان سیستم نگهدارنده موقت عمل می کند و دیگری اعمال فشار از طریق دستگاه به جبهه کار تونل است. پایداری جبهه کار تونل یکی از فاکتورهای مهم حفاری در زمین های نرم می باشد. در روش حفاری مکانیزه به منظور پایدار ماندن جبهه کار، به طرق مختلف فشار نگهداری جبهه کار اعمال می شود. از آن جمله می توان به اعمال فشار با استفاده از هوای فشرده، دوغاب و مواد حفاری شده اشاره کرد. برخلاف سایر سپرها در سپر تعادلی فشار زمین پایداری زمین بدون واسطه نگهداری ثانویه و توسط مواد حفاری شده صورت می گیرد. در صورتیکه حجم مواد حفر شده در داخل اتاقک حفاری مناسب باشد می توان حالت پایدار را برقرار کرد. بنابراین انتخاب فشار مناسب جبهه کار یکی از مهمترین مراحل حفاری با سپر تعادلی فشار زمین است [۱].

نگهداری دائم فضای حفاری شده در روش سپر تعادل فشار زمین با استفاده از قطعات پیش ساخته بتنی که سگمنت نامیده می شوند صورت می گیرد. از طرفی فضای خالی بین سگمنت و زمین اطراف از طریق تزریق دوغاب پرمی شود. پرکردن با فشار موثر این فضای خالی نقش زیادی در کاهش نشست سطح زمین

^۱ Slury shield

^۲ Earth Pressure Balance

دارد. به عبارت دیگر پس از رینگ گذاری جهت ایجاد یک توده مستحکم، چسبندگی بیشتر مابین پوشش بتنی و خاک و همچنین کاهش نشست عملیات تزریق انجام می‌پذیرد.

در این تحقیق با استفاده از داده‌هایی از قبیل زمین شناسی، اطلاعات ماشین حفار و ... به بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق در تونل مترو قطعه شرقی غربی خط ۷ تهران بر نشست سطح پرداخته شده است.

۲.۱ محدوده مورد مطالعه

تحقیق انجام شده بر روی تونل خط ۷ مترو تهران قطعه شرقی غربی است. خط ۷ متروی تهران از شهرک امیرالمومنین در شرق تهران (جنب استادایوم تختی) شروع شده و پس از عبور از بزرگراه بسیج در طول بزرگراه شهید محلاتی ادامه یافته و پس از اتصال به میدان قیام در امتداد خیابان مولوی و هلال احمر امتداد می‌یابد. مسیر این خط بعد از عبور از بزرگراه شهید نواب صفوی، در امتداد شمالی جنوبی و در طول بزرگراه نواب تغییر و در نهایت تا میدان کاج ادامه می‌یابد. این تونل به دو قطعه شمالی-جنوبی و شرقی-غربی تقسیم شده است. قطعه شرقی- غربی خط هفت مترو تهران (حد فاصل ایستگاه A7 در مجاورت شهرک امیرالمومنین تا ایستگاه N7 واقع در تقاطع خیابان قزوین و بزرگراه نواب) در مجموع دارای طولی حدود بیش از ۱۲ کیلومتر است، این تونل با یک دستگاه ماشین EPB حفاری و سگمنت-گذاری می‌گردد. شروع حفاری تونل از شفت N7 بوده و در طول مسیر از ۱۳ ایستگاه و همچنین از زیر تونل خط ۱ متروی تهران عبور می‌نماید.



شکل ۱-۱: محدوده خط هفت متروی تهران [۲]

۳.۱ ضرورت و هدف تحقیق

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد یکی از مهمترین مسائل در تونلسازی مکانیزه شهری جابجایی زمین و مخصوصاً نشست سطح زمین می‌باشد. بنابراین عمده‌ترین تاثیرات مورد بررسی توسط محققین تاثیرات این دو پارامتر فشار سینه‌کار و فشار تزریق بر جابجایی زمین بوده است. اگرچه این مسئله هنوز به صورت جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. ولی محققین مختلفی این مسئله را مورد بررسی قرار داده‌اند.

ساخت تونل و فضاهای زیرزمینی در مناطق شهری روز به روز در حال گسترش است. اکثر این فضاها به علت نزدیک بودن به سطح زمین در بستر خاکی حفر می‌شوند. در چنین شرایطی پایداری جبهه‌کار تونل به عنوان مهمترین و پر مخاطره‌ترین فاکتور اصلی در حفاری تونل بوده و نیازمند بررسی‌های دقیق و مطمئن می‌باشد. بررسی رفتار زمین نسبت به حفر تونل همواره موضوع مطالعه محققین مختلفی با عناوین و روش‌های مختلف بوده است. عده‌ای روشهای تجربی را سرلوحه خود جهت محاسبه نشست

زمین و تنش‌های روی پوشش بتنی بر مبنای داده‌های صحرایی قرار داده‌اند. این روش‌ها شرایط را کرنش مسطح فرض می‌کنند و اغلب اوقات طبیعت سه بعدی پروسه ساخت تونل را در نظر نمی‌گیرند. روش‌های عددی از جمله روش‌های پر کاربرد و پر طرفدار است که امکان تحلیل واقع‌گرایانه با در نظر گرفتن مراحل ساخت، رفتار سه‌بعدی جبهه کار و همچنین برهمکنش بین تونل و پوشش بتنی، فراهم می‌سازد با این وجود صحت نتایج این روش‌ها کاملاً وابسته به داده‌های اولیه مسئله می‌باشد. اطلاعات مفیدی از طریق انجام آزمایش‌های صحرایی و ابزار دقیق جهت بررسی رفتار زمین نسبت به حفر تونل، حاصل می‌گردد. در حالیکه تفسیر نتایج آنها به سختی صورت می‌گیرد. آزمایش‌های بزرگ مقیاس نیز بسیار گران قیمت هستند و به سختی انجام و تکرار می‌شوند. وجود ابهامات، پیچیدگی و معایب در روش‌های ذکر شده، محققین را به سمت استفاده از روش‌های کوچک مقیاس سوق داده است.

در طی سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی موضوع تغییر شکل زمین در اثر تونلسازی انجام شده است. این موارد به فهم بهتر این مسئله منجر شده است. اصلی‌ترین روش‌های تخمین تغییر شکل زمین در تونلسازی مکانیزه شهری شامل روش‌های تجربی، تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. این در حالی است که از روش‌های موجود تنها روش‌های عددی و آزمایشگاهی (مدل سازی فیزیکی) به بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق بر جابجایی و نشست سطح زمین پرداخته‌اند. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی تاثیرات فشار سینه کار و فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت در تونلسازی حفار مکانیزه شهری می‌باشد.

سوالات اساسی زیر در این تحقیق مورد تامل است:

- چه پارامترهایی بر فشار سینه کار و فشار تزریق تاثیر گذار است؟
- آیا فشار سینه کار و فشار تزریق بر جابجایی زمین و نشست سطح تاثیر گذار است؟
- اگر تاثیر گذار است به چه میزان موثر است و به چه پارامترهایی وابسته است؟

- آیا فشار سینه کار و فشار تزریق بصورت مستقل بر جابجایی زمین تاثیر گذار است و یا باید تمام پارامتر های تاثیر گذار حفار مکانیزه را نیز در نظر گرفت؟

۴.۱ سازمان دهی پایان نامه

این تحقیق در ۸ فصل تهیه شده است. در فصل اول، راجع به کلیات و ضرورت انجام تحقیق بحث می-شود و سرفصل بقیه مطالب به شرح زیر می باشد:

فصل دوم- بررسی چندین مطالعه موردی تونلسازی با حفاری مکانیزه در محیط شهری در این فصل به مطالعات انجام شده در رابطه با تاثیرات فشار سینه کار و تزریق در پروژه های مختلف پرداخته شده است.

فصل سوم- زمین شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر احداث خط هفت متروی تهران در این فصل به موقعیت خط هفت متروی تهران، وضعیت زمین شناسی، وضعیت آب زیرزمینی و طبقه بندی خاک مسیر احداث تونل پرداخته شده است.

فصل چهارم- کلیاتی در رابطه با نحوه محاسبه فشار سینه کار و فشار تزریق در این فصل به کلیاتی در مورد روش های محاسبه فشار سینه کار و فشار تزریق پرداخته شده است.

فصل پنجم- نحوه مدل سازی و معرفی نرم افزار Plaxis3D tunnel در این فصل ضمن معرفی نرم افزار نحوه مدل سازی شیلد، فشار سینه کار و فشار تزریق بر روی مقاطع مدل سازی شده تونل مترو خط ۷ تهران توضیح داده شده است.

فصل ششم- بررسی تاثیر فشار سینه کار بر نشست سطح زمین در این فصل خروجی حاصل از نرم افزار Plaxis3D tunnel با اعمال فشار های سینه کار مختلف نشست سطح زمین مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل نیز با داده‌های نشست حاصل از ابزار بندی مقایسه شده است.

فصل هفتم- بررسی تاثیر فشار تزریق بر نشست سطح زمین در این فصل خروجی حاصل از نرم افزار Plaxis3D tunnel با اعمال فشار های سینه کار مختلف نشست سطح زمین مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل نیز با داده‌های نشست حاصل از ابزار بندی مقایسه شده است.

فصل هشتم- جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات در این فصل پس از جمع بندی مراحل تحقیق و نتایج حاصل پیشنهاداتی نیز ارائه شده است.

فصل دوم: بررسی چندین مطالعه موردی تونلسازی با حفاری

مکانیزه (EPB) در خاک

۱.۲ مقدمه

با توجه به روند رو به افزایش تونل‌های در حال مطالعه و یا در حال اجرا با کاربردهایی همانند انتقال و جمع‌آوری آب، متروی شهری و راه و همچنین اهمیت مدت زمان اجرا و ضریب ایمنی در این پروژه‌ها، استفاده از روش‌های مکانیزه حفاری اهمیت ویژه‌ای یافته است. به کارگیری صحیح این ماشین‌آلات، تنها در سایه انتخاب درست نوع ماشین و مدیریت صحیح آن با توجه به شرایط پروژه میسر می‌باشد. انتخاب روش حفاری مطلوب، مهم است اما به تنهایی کافی نیست، لازمه استفاده خیلی دقیق از روش‌های حفاری، کنترل دقیق پارامترهای مربوط به آن می‌باشد. که این مسئله کلید موفقیت در پروژه تونل، به خصوص در محیط‌های حساس می‌باشد. تونل‌زنی مکانیزه باعث به حداقل رساندن اثرات ناشی از حفاری در سطح زمین می‌شود، اما کنترل دقیق پایداری جبهه کار و نظارت مستمر بر اثرات آن بر روی سطح زمین باید صورت بگیرد.

در سال‌های اخیر همزمان با پیشرفت تکنولوژی، ماشین‌های حفر تونل نیز پیشرفت قابل ملاحظه‌ای یافته اند. بعضاً آنها را در دو دسته کلی ماشین‌های دارای سپر (Shielded Machines) و ماشین‌های باز (Open Machines) نیز دسته‌بندی می‌نمایند. تونل‌های حفر شده در مناطق کم عمق و شهری عمدتاً در محیط‌های آبرفتی و خاکی احداث می‌شوند. که برای حفر تونل در این مناطق از ماشین‌های حفر تونل در زمین‌های نرم استفاده می‌شود که دسته‌بندی آن از دیدگاه ITA در شکل (۲-۱) آمده است [۳].

بر اساس این طبقه بندی ماشین‌های حفاری تمام مقطع به دو گروه TBM های محیط سنگی و محیط های خاکی و نرم تقسیم بندی می شوند. با توجه به اینکه مناطق شهری به ویژه در ایران جزء مناطق سست و نرم می باشند صرفاً به مطالعه ماشین‌های حفر مکانیزه مخصوص این مناطق پرداخته می‌شود. ماشین‌های حفاری مخصوص محیط‌های سست و نرم به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند:

سپر دوغابی (Slurry shield)

سپر متعادل کننده فشار زمین (EPB shield)

سپر ترکیبی (Mix shield)

با توجه به اینکه در محیط های سست و نرم و به خصوص مناطق شهری، کنترل سینه کار تونل جزء مهمترین مسائل می باشد، اساس کار سپرهای دوغابی و متعادل کننده فشار زمین بر مبنای کنترل فشار سینه کار است.



شکل ۱-۲: طبقه بندی TBM بر اساس محل کاربرد [۳]

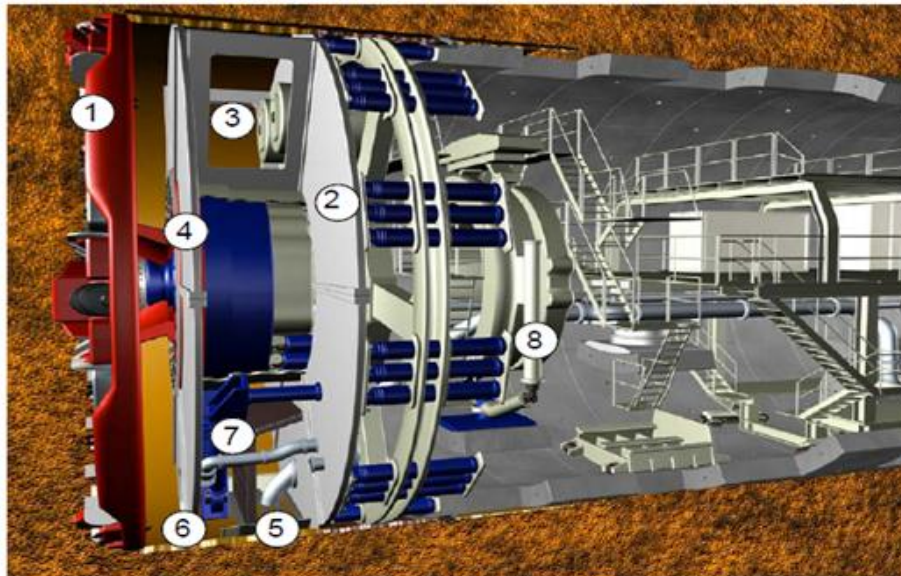
ماشین حفار مکانیزه از نوع دوغابی قادر به نگهداری جبهه کار تونل با استفاده از فشار پمپاژ دوغاب بنتونیت در محفظه پشت کله حفار را دارد. مهم ترین اجزاء طراحی سپر آبی به جدا سازی اتاقک حفاری با استفاده از دیواره غوطه ور (فشار نگهداری در سینه کار نگه داری شده با سیال با استفاده از حباب هوا در اتاقک پشتی تنظیم می شود) و کله حفار ستاره ای شکل باز با پره های آزاد مربوط می شود. مهم ترین

مزیت سیستم سپر آبی این است که با تنظیم فشار نگهداری با استفاده از حباب هوا، فشار نگهداری مستقل از مقدار سوسپانسیون در چرخه دوغاب است. با نوسانات نسبتاً زیاد که اغلب از حجم سوسپانسیون در اتاقک حفاری پشتی ناشی می‌شود، از افت ناگهانی سیال نگهداری مثلاً هنگام حفاری از درون زون های گسلی، بدون بروز افت در فشار نگهداری در سینه کار، جلوگیری می‌شود. همچنین افزایش یا تغییر حجم سوسپانسیون در چرخه دوغاب (اگر به منظور انتقال مواد لازم است) بدون اینکه بر نگهداری سینه کار تاثیر مستقیمی بگذارد، امکان پذیر است.

به منظور خروج موانع سنگی و همچنین برای کارهای تعمیر و نگهداری در کله حفار، سوسپانسیون از اتاقک حفاری خارج و هوای فشرده جای آنرا می‌گیرد. کیک فیلتر با خاصیت آب بندی خود امکان نگهداری سینه کار تونل تنها با هوای فشرده را فراهم می‌سازد.

کله حفار ستاره‌ای باز با پره‌های آزاد امکان انتقال یافتن مواد حفاری از پشت کله حفار به داخل اتاقک حفاری را ممکن می‌سازد. کله حفار باز برای نگه داشتن مواد جامد غیر قابل انتقال به یک مشبک در جلوی خط انتقال دوغاب نیاز دارد. در جلوی مشبک یک سنگ شکن هیدرولیکی قرار داشته که سنگ‌های با ابعاد بزرگ را به اندازه مناسب کاهش می‌دهد. از انباشته شدن مواد در جلوی مشبک توسط جت‌های سیال سوسپانسیونی جلوگیری می‌شود. با توجه به انواع مختلف زمین ابزار برشی مختلفی ممکن است بر روی کله حفار نصب شود [۴].

در شکل (۲-۲) اجزاء مختلف TBM از نوع SPB نشان داده شده است.



۱- کله حفار، ۲- دیواره فشار، ۳- بالشتک هوا، ۴- دیواره غوطه ور کنی^۱، ۵- خط دوغاب، ۶- سنگ شکن، ۷- خط خوراک‌دهی، ۸- نصاب

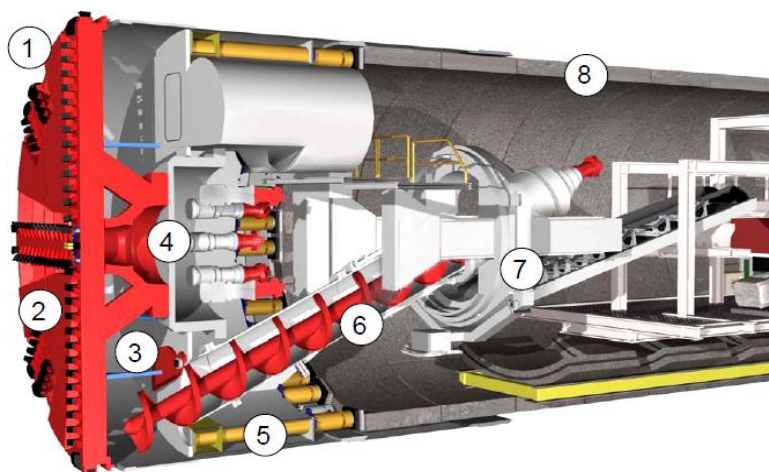
شکل ۲-۲: سپر ترکیبی با دو اتافک [۴]

در حالی که هر دو نوع ماشین Slurry و EPB قابلیت کنترل کامل فشار جبهه کار تونل را دارند، اما در نحوه کنترل و نگهداری آن تفاوت زیر بنایی وجود دارد. در روش متعادل کننده فشار زمین، نگهداری مداوم فشار جبهه کار تونل از طریق ایجاد تعادل فشار خارجی زمین و فشار آب در مقابل نیروی فشاری ماشین و نرخ خروج مصالح حفاری شده از ماشین انجام می‌گیرد در حالی که در TBM نوع دوغابی، دوغاب در خاک جبهه کار نفوذ کرده و یک پوسته در اطراف جبهه کار ایجاد می‌کند که باعث حفظ فشار بر آن خواهد بود [۴].

¹ Submerged wall

توسعه و ساخت سپرهای EPB در اوایل دهه هفتاد در ژاپن آغاز شد. اولین سپر فشار تعادلی در سال ۱۹۷۴ در توکیو بکار گرفته شد. این سپر دارای قطر بیرونی ۳.۷۲ متر و توسط شرکت ژاپنی IHI برای حفر یک تونل جمع آوری فاضلاب به طول ۱۹۰۰ متر طراحی شد.

در دهه‌های اخیر استفاده از EPB - TBM برای حفاری تونل‌ها در مناطق با خاک نرم به دلایل زیاد مانند کاهش نشست‌های ایجاد شده، سرعت حفاری بالا و ایمنی به یک روش متداول تبدیل شده است. در شکل (۳-۲) قسمت‌های مختلف ماشین حفار مکانیزه متعادل کننده زمین دیده می‌شود.



۱- سینه‌کار، ۲- کله حفار، ۳- اتاقک حفاری، ۴- دیواره فشار^۱، ۵- جک فشاری، ۶- نقاله مارپیچی، ۷- نصاب، ۸- سگمنت

شکل ۳-۲: سپر متعادل کننده فشار زمین [۴]

دستگاه حفاری TBM با سیستم EPB یکی از مدرن‌ترین و پیشرفته‌ترین نوع دستگاه TBM است که به علت وجود سیستم تعادل فشار زمین قادر به اجرای کار در زیر تراز آب است. در این ماشین خاک‌های حفاری شده خود برای ایجاد تعادل در سینه کار به کار گرفته می‌شوند. اصول روش تونلسازی با EPB می‌تواند بصورت زیر خلاصه شود:

¹ Bulkhead

سینه کار تونل با چرخش کله حفار دستگاه حفاری می شود.

خاک حفاری شده بصورت مکانیکی به چمبر حفاری منتقل می شود.

با استفاده از نیروی عمودی¹ ماشین سپر، خاک حفاری شده توسط جک‌های هیدرولیکی به منظور

پایدارسازی سینه کار فشرده می شود. (تعادل نیرو)

کنترل فشار خاک در محفظه حفاری با تعدیل مقدار خاک حفاری شده و مقدار خاک تخلیه شده توسط

نوار نقاله انجام می گیرد. (تعادل حجم)

پس از حفاری باید مواد حفاری شده به وسیله نوار نقاله مارپیچی از داخل اتاقک حفاری خارج شوند.

نقاله مارپیچی مواد حفاری شده را برداشته و روی نوار نقاله ریخته و مواد خروجی از نوار نقاله به وسیله

واگن و کامیون‌ها به بیرون برای دمپ منتقل می شود. وقتی نفوذپذیری خاک در اتاقک حفاری بیشتر از

حد لازم و تراز تونل زیر سطح آب زیرمینی باشد، فشار آب می تواند به داخل تونل و در نتیجه در سرتاسر

نقاله مارپیچی جریان یابد. برای کاهش نفوذپذیری خاک در مقابل آب و اجتناب از ورود جریان آب بهتر

است که عامل‌های بهسازی بر روی نقاله مارپیچی نیز تزریق شود. از آنجا که حجم خاک خروجی از نقاله

مارپیچی محدود است، بهسازی یک راه حل سریع و مناسب برای تغییر خصوصیات خاک حفاری است.

همچنین نقاله مارپیچ می بایست با در نظر گرفتن تأثیر نوع خاک بر تیغه‌ها و فاصله بین آنها طراحی

شود. ظرفیت تخلیه نوار نقاله مارپیچ باید به طور قابل قبولی برای کنترل محدوده‌ای از فشارها از فشار

سربار کل در محفظه حفاری، که بصورت کنترل شده ای در طول نقاله مارپیچ تا فشار اتمسفر در محل

تخلیه کاهش می یابد، طراحی شود. نوار نقاله مارپیچ باید قادر به کنترل خاک روان، در صورت برخورد،

بوده و طوری طراحی شود که عملکرد TBM را محدود نسازد. بوسیله نگه داشتن یک درپوش در نقاله

¹ Trust force

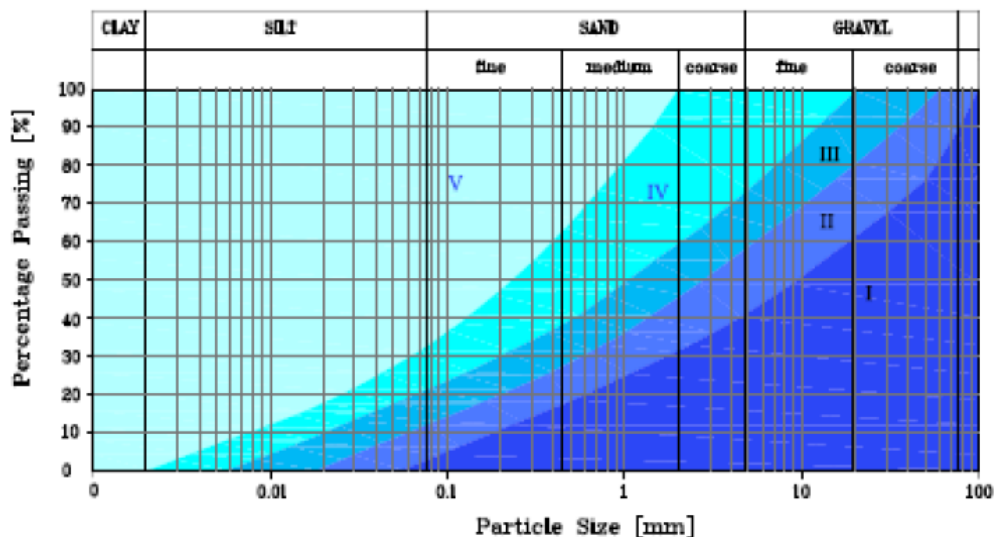
مارپیچ قبل از دریچه تخلیه فشار کنترل می‌شود. مصالح حفاری شده توسط نقاله مارپیچ روی یک نوار نقاله تخلیه می‌شوند. این مواد توسط نوار نقاله به انتهای سکوی کاری در پشت TBM (شامل تمام تجهیزات پشتیبان کمکی مورد نیاز TBM) منتقل و تخلیه می‌شوند. سیستم نوار نقاله باید با در نظر گرفتن طول نوار نقاله و حداقل شعاع تونلی که سکوی کاری انتهای سپر TBM باید از آن عبور کند طراحی شود.

چون بخشی از مخاطرات حاکم بر عملکرد ماشین EPB به دانه بندی محیط حفاری مربوط می‌شود، آزمون های میدانی در این خصوص به انجام رسیده است. توزیع^۱ در سال ۲۰۰۷ مدلی برای بکار گیری ماشین های EPB ارائه داده است که در شکل (۲-۴) نشان داده شده است.

در نمودار شکل (۲-۴) توضیح حوزه‌های دانه بندی مشخص شده به شرح ذیل است:

- ۱: این شرایط برای استفاده از دستگاه حفار مدل EPB مناسب نمی‌باشد.
- ۲: در این شرایط در صورتی که فشار آب موجود نباشد، با استفاده از فوم، پلیمر و ریزدانه، ماشین مدل EPB بکار برده می‌شود.
- ۳: در این شرایط برای حفاری با ماشین EPB، نیازی به فوم یا پلیمر نمی‌باشد و فقط می‌بایست فشار آب کمتر از ۲ بار باشد.
- ۴: در این شرایط، خاک نیاز به بهسازی و عمل آوری دارد.
- ۵: در این شرایط برای بکارگرفتن EPB می‌بایست برای اصلاح روانی خاک، آب اضافه نمود و همچنین برای سفت کردن آن از مواد افزودنی با توجه به جنس زمین استفاده نمود.

^۱ Tewes



شکل ۲-۴: نمودار حوزه‌های دانه بندی مسیر تونل برای کار با ماشین [۳]

در جدول (۱-۲) تفاوت های دو دستگاه حفار مکانیزه فشار متعادل کننده زمین و اسلاری مقایسه شده است. در تونل مترو خط ۷ تهران قطعه شرقی غربی از دستگاه حفار مکانیزه نوع EPB استفاده می شود.

جدول ۱-۲: تفاوت های دو ماشین EPB و SPB [۵]

| معیارها | EPB | SPB |
|--------------------------------|----------------|-----------|
| گشتاور و قدرت کاترهد | بالا | پایین |
| انرژی مورد نیاز در محل کارگاه | متوسط | بالا |
| بکارگیری مواد افزودنی | مورد نیاز | مورد نیاز |
| هزینه | پایین | بالا |
| اندازه کارگاه مورد نیاز | متوسط | بزرگ |
| دفع (Disposal) مصالح حفاری | آسان | پیچیده |
| سرعت حفاری | سریع | متوسط |
| نظافت تونل | ضعیف | خوب |
| محاسبه فشار سینه کار مورد نیاز | قبلا تعیین شده | اتوماتیک |



شکل ۲-۵: سپر متعادل کننده فشار زمین پروژه خط ۷ مترو تهران [۲]

اگرچه در چند دهه اخیر کاربر EPB زیاد شده است، ولی اطلاعات کمی درباره مکانیسم اندرکنش شیلد و زمین وجود دارد. فهم مکانیسم واکنش زمین و تونلسازی EPB مشکل است. به دلیل اینکه مطالعه واکنش زمین نه تنها به اندازه گیری تغییرات زمین دارد، بلکه باید کلیه پارامترهای وابسته به ماشین حفار در نظر گرفته شود.

۲.۲ بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق در نشست سطح بر مبنای اطلاعات

ابزاربندی

بر اساس مطالعات انجام شده بر پروژه‌های مختلف در سراسر جهان، اطلاعات ثبت شده حاصل از ابزاربندی مرتبط به فشار سینه کار و فشار تزریق، از سال ۱۹۸۲ در پروژه تونل انتقال آب سانفرانسیسکو توسط کلوت و همکاران تا سال ۲۰۰۹ در پروژه مترو از میر ترکیه توسط آنلوتپ می‌باشد. در ایران نیز پروژه‌های مختلفی از جمله مترو تهران در حال انجام است. پروژه‌های بسیار زیادی در ارتباط با

فصل دوم: بررسی خدین مطالعات موردی تونلسازی با خاک مکانیزه شهری

تونلسازی موجود است اما در این بخش پروژه‌هایی مورد مطالعه قرار گرفته است که به بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق پرداخته‌اند. جدول (۲-۲) مطالعات انجام شده در پروژه های سراسر جهان را نشان می دهد.

بیشترین تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق پشت سگمنت بر جابجایی و نشست سطح زمین است.

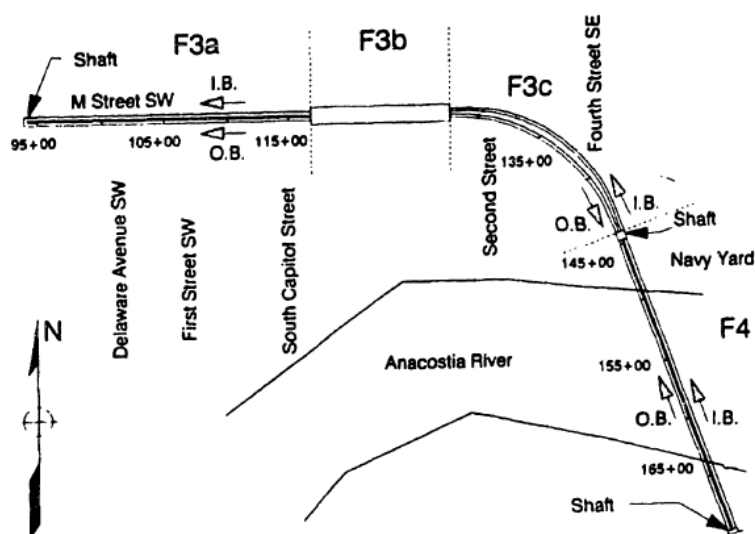
جدول ۲-۲: مطالعات انجام شده پروژه های سراسر جهان حاصل از ابزار بندی مرتبط با فشار سینه کار و فشار تزریق در حفار مکانیزه

شهری [۶-۱۳]

| محققین | سال (میلادی) | عنوان پروژه |
|--|-----------------|------------------------------------|
| کلوث و همکاران (Clough et al) | ۱۹۸۲ | تونل انتقال آب سانفرانسیسکو |
| لکا (Leca) | ۱۹۸۶ | تونل شهری واشنگتن |
| دیتز (Dietz) | ۱۹۹۴ | تونل قطار سریع السیر تایپه |
| ماتسوشیتا و همکاران (Matsushita et al) | ۱۹۹۵ | مترو شهر فوکوکا ژاپن |
| چیوربولی و مارچسلی (Chiorboli & Marcheselli) | ۱۹۹۶ | مترو شهر میلان ایتالیا |
| سوانساوات (Suwansavat) | ۲۰۰۱ | مترو شهر بانکوک تایلند |
| متیو کرو (Matthew Crow) | ۲۰۰۳ | تونل انتقال آب شهر لوسانجلس آمریکا |
| احمت آنلوتپ (Ahmet Unlotepe) | ۲۰۰۹ | مترو شهر ازمیر ترکیه |

۱.۲.۲ پروژه شهری تونل واشنگتون (WMATA)

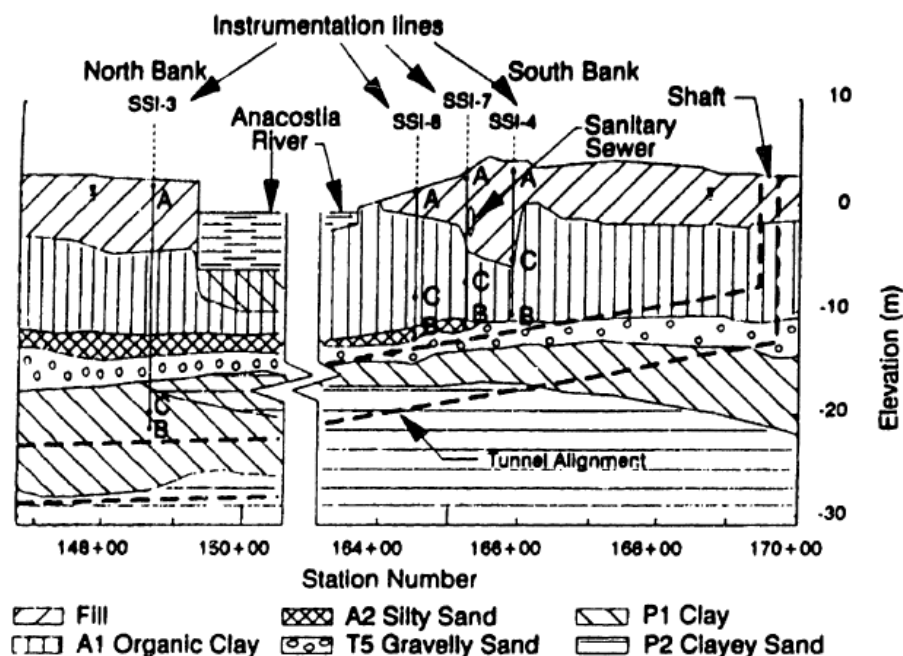
بین سال های ۱۹۸۶ و ۱۹۸۸ در پروژه تونل شهری واشنگتون ماشین حفار مکانیزه EPB بکار برده شد. لکا^۱ (۱۹۸۹) و کلوت و لکا^۲ (۱۹۹۳) قراردادی برای خط F3 و F4 که در جنوب شرق مترو واشنگتون و در امتداد رودخانه آناکوستیا و میدان ناوی قرار گرفته بود، بستند. شکل (۶-۲) مسیر این تونل را نشان می دهد. موقعیت زیر سطحی تونل های F3 و F4 ناپایدار و پیچیده بودند و سطح ایستابی آب بالای تونل را پوشانده بود. موقعیت زمین ساختی خاک لایه ای بوده و شامل خاک رس آلی، رس سخت و ماسه غیرچسبنده می باشد. در بعضی مناطق تونل ها مخصوصا در این لایه ها حفاری صورت گرفته است، اما خیلی اوقات سینه کار با این دو لایه و لایه های بیشتر مواجه می شد. شرایط بد و چالش انگیز موقعی بود که تونل از ماسه و جریان آب در رس سخت عبور می کرد (شکل ۶-۲). [۶].



شکل ۶-۲: نقشه پروژه WMATA [۶]

¹ Leca

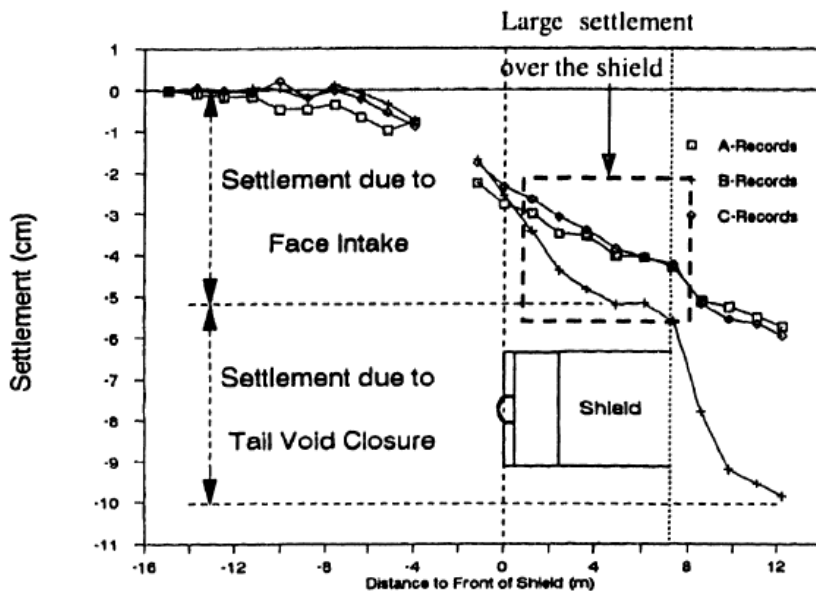
² Clough and Leca



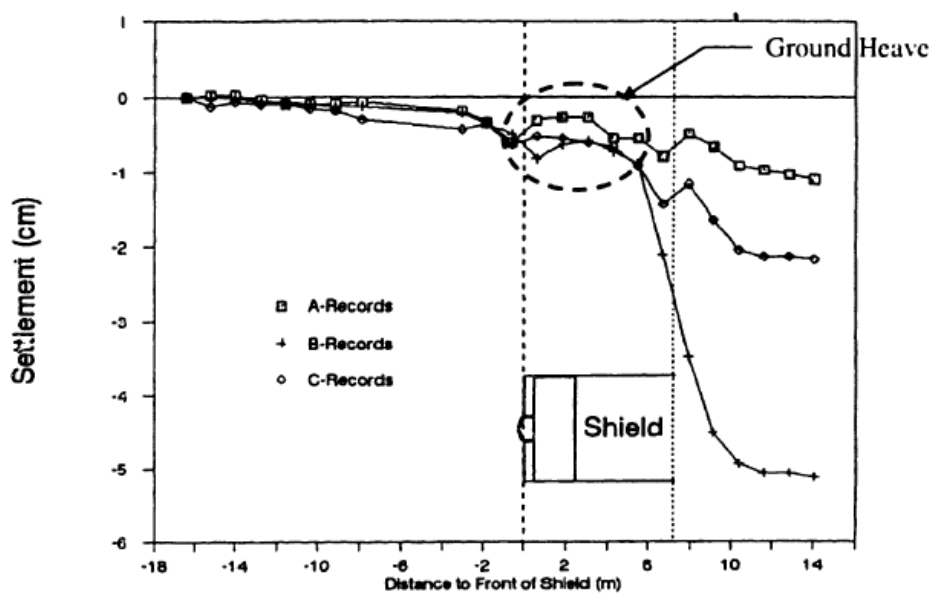
شکل ۲-۷: پروفیل خاک پروژه F4 [۶]

شکل (۲-۸) نشست سطح در برابر موقعیت شیلد در مقطع SSI-4 پروژه تونل واشنگتن را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست منشا نشست در بالای سپر اتفاق افتاده است. شکل (۲-۹) نشست سطح در برابر موقعیت شیلد در مقطع SSI-3 را نشان می‌دهد. با افزایش فشار سینه کار در بالای سپر بالا زدگی خاک رخ داده است.

ظاهرا نشست اتفاق افتاده در هر زون، توسط ترکیبی از تعدادی فاکتور همچون شرایط زمین (به عنوان مثال نوع خاک و تراز سطح ایستابی آب) و پارامتر پارامترهای عملیاتی شیلد (مانند فشار سینه کار، نرخ نفوذ و کیفیت تزریق) بوده است.



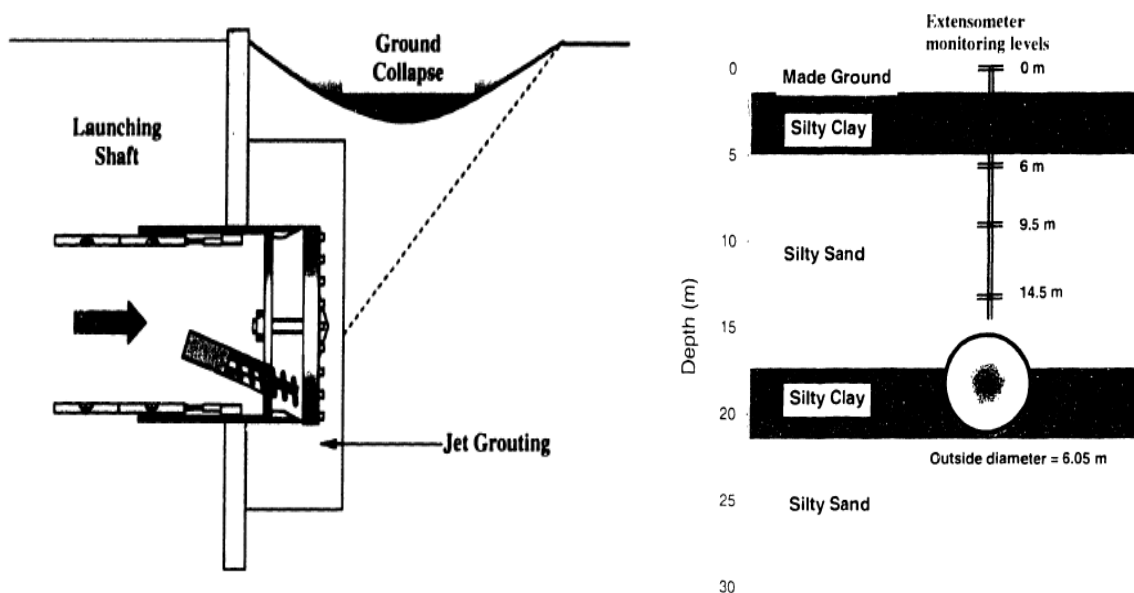
شکل ۲-۸: نشست سطح در برابر موقعیت شیلد در مقطع SSI-4 پروژه تونل واشنگتن [۶]



شکل ۲-۹: نشست سطح در برابر موقعیت شیلد در مقطع SSI-3 پروژه تونل واشنگتن [۶]

۲.۲.۲ پروژه تونل سریع السیر تایپه (TRTS)

در سال ۱۹۹۴ دیتز^۱، در سال ۱۹۹۶ مو و همکاران^۲ و در سال ۱۹۹۹ جو و همکاران^۳ اطلاعات حاصل از حفاری تونل سریع السیر تایپه را گزارش دادند. این تونل دارای ۶ خط که دارای ۷۹ مقطع به طول ۸۶/۸ کیلومتر می‌باشد. ۲۱ کیلومتر این تونل توسط EPB با قطر ۶/۰۵ متر حفاری شده است. در این تونل جنس زمین از لایه های ضخیم آبرفتی که شامل ماسه سیلتی (SM) و رس سیلتی (CL) تشکیل شده است شکل ۲-۱۰ عمق و جنس خاک را نسبت به موقعیت این تونل را نمایش می‌دهد.[۷].



شکل ۲-۱۱: فروریزش زمین در طی فاصله از شیلد [۷]

شکل ۲-۱۰: عمق و شرایط پروژه تونل تایپه [۷]

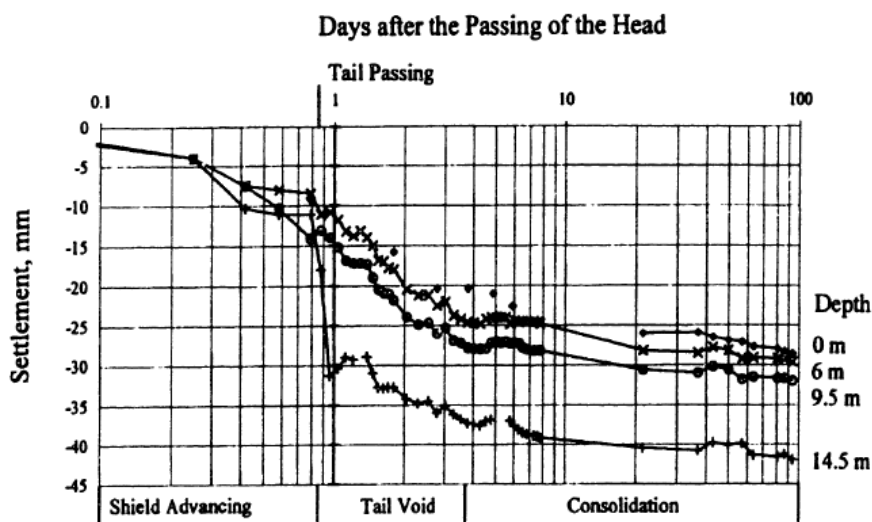
فشار سینه کار در این پروژه بین ۱۸۰ تا ۲۰۰ کیلو پاسکال متغیر است. شکل ۲-۱۱ نحوه نشست سطح در جلو سپر بعد از شروع حفاری تونل از محل ایستگاه را نشان می‌دهد. شکل ۲-۱۲ پروفیل طولی

¹ Dietz

² Moh et al

³ Ju. et al

نشست در اعماق مختلف را که به وسیله اکتونوسومتر^۱ ثبت شده است را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست ماکزیمم نشست سطح ۳۰ میلی‌متر اندازه گیری شده است.



شکل ۲-۱۲: تغییر شکل زمین در بالای تونل تاییه [۷]

در این پروژه اگرچه فشار نگهدارنده سینه کار بالا بوده است، هنوز نشست بزرگ اتفاق افتاده است. اگرچه فشار سینه کار افزایش یافته است ولی افزایش نشست مشاهده شده است. بنابراین علاوه بر فشار سینه کار پارامترهای دیگری همچون فاصله از محل شروع ایستگاه^۲ نیز باید در نظر گرفته شود [۷].

¹ Extensometer

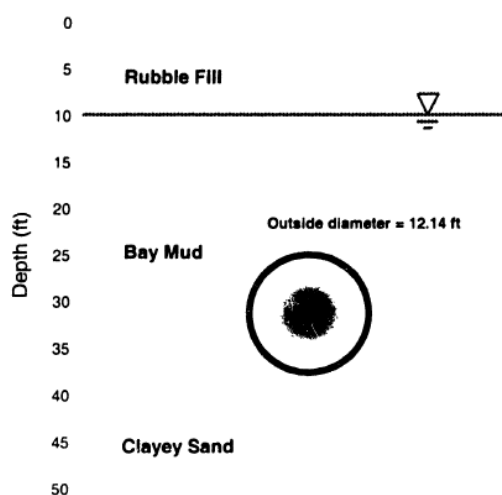
² Launching Shaft

۳.۲.۲ تونل انتقال آب سانفرانسیسکو

در سال ۱۹۸۲ کلوث و همکاران^۱، در سال ۱۹۸۳ فینو^۲ و در سال ۱۹۸۵ فینو و کلوث داده های تونل پروژه انتقال آب سانفرانسیسکو را مورد مطالعه قرار دادند. تونل با استفاده از ماشین EPB با قطر ۳/۷ متر به طول ۹۱۵ متر حفاری شده است. حفاری این تونل با چالش های زیر مواجه بوده است [۸]:

- میانگین روباره در این تونل ۹/۱ متر گزارش شده است.
- وجود لایه های نرم رسوبی که با قلوه سنگ نامعین
- تراز سطح ایستابی
- شمع های چوبی زیاد، تعدادی فاسد و تعدادی هنوز در نگهداری فاضلاب فعال است
- فشار بالای آب که ۱/۵ متر خارج از مرکز تونل و نزدیک سطح قرار گرفته بود

شکل (۲-۱۳) شرایط زمین پروژه N-2 تونل سانفرانسیسکو را نشان می دهد.



شکل ۲-۱۳: شرایط سطحی پروژه N-2 تونل سانفرانسیسکو [۸]

¹ Clough et al

² Finno

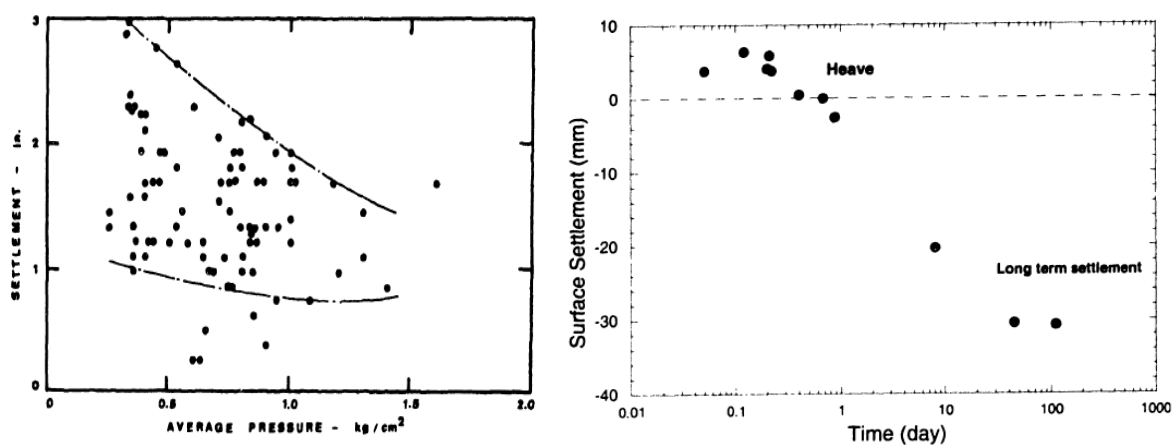
در این پروژه فشار تزریق پشت سگمنت ۲-۳ bar ثبت شده است. در این پروژه فشار تزریق پشت سگمنت ۲-۳ bar ثبت شده است. در این پروژه به علت شکستگی پایه‌های چوبی تونل فاضلاب در اطراف این تونل نشست افزایش یافته است اگرچه فشار سینه کار افزایش یافت. همچنین به علت کج شدگی سپر میزان نشست افزایش یافته است. جدول (۲-۳) اطلاعات ثبت شده توسط ابزار اینکلینومتر^۱ جابجایی‌های عرضی که توسط در ۱۵ الی ۳۰ روز از گذر شیلد ثبت شده است. [۸].

جدول ۲-۳: مقایسه بین فشار سینه کار و جابجایی عرضی پروژه انتقال آب سانفرانسیسکو [۸]

| مقطع | فشار سینه کار (kPa) | ماکزیمم نشست در طی عبور شیلد (mm) | توضیحات |
|------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| ۱ | ۴۰ | ۱۲/۷ | - |
| ۲ | ۴۰ | ۱۵/۲۴ | زاویه کج شدگی زیاد شیلد |
| ۳ | ۱۰۰ | ۸۱/۲۸ | شکستگی پایه چوبی |
| ۴ | ۸۰ | ۷۱/۱۲ | شکستگی پایه چوبی |

شکل ۲-۱۴ نشست اندازه گیری شده و نشست اندازه گیری شده در برابر فشار سینه کار در پروژه N-2 تونل سانفرانسیسکو را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست در مقاطعی بالا زدگی مشاهده شده است.

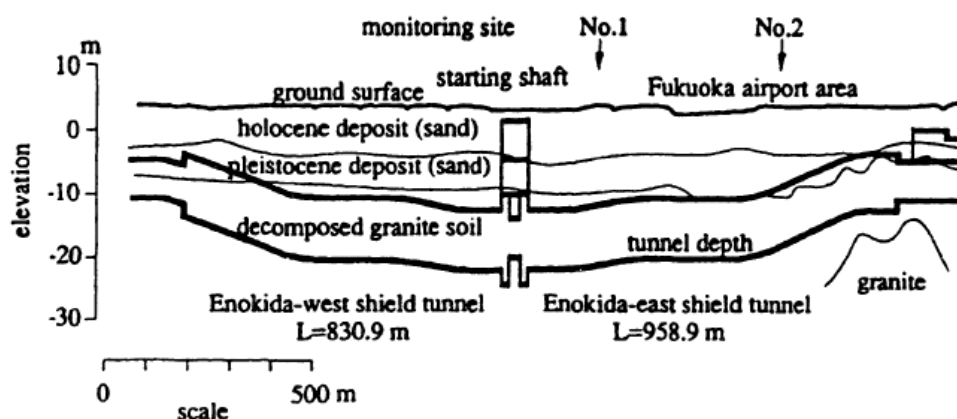
^۱ Inclinator



شکل ۲-۱۴: نشست اندازه گیری شده و نشست اندازه گیری شده در برابر فشار سینه کار در پروژه N-2 تونل سانفرانسیسکو [۸]

۴.۲.۲ پروژه مترو شهر فوکوکا (Fukuoka City Subway Project)

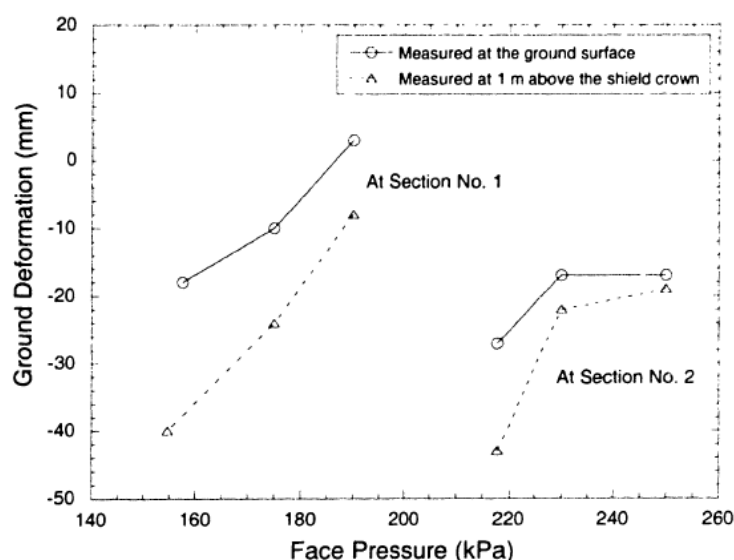
در سال ۱۹۹۵ ماتسوشیتا و همکاران^۱ عملکرد یک ماشین حفار مکانیزه از نوع SPB که در مترو شهر فوکوکا ژاپن بود را مورد ارزیابی قرار دادند. قطر شیلد ۱۰ متر بوده و تونل در عمق ۸ تا ۱۶ متری حفاری شده است. در شکل (۲-۱۵) شرایط زمین در مترو شهر فوکوکا آمده است [۹].



شکل ۲-۱۵: مسیر تونل و پروفیل خاک در مترو فوکوکا [۹]

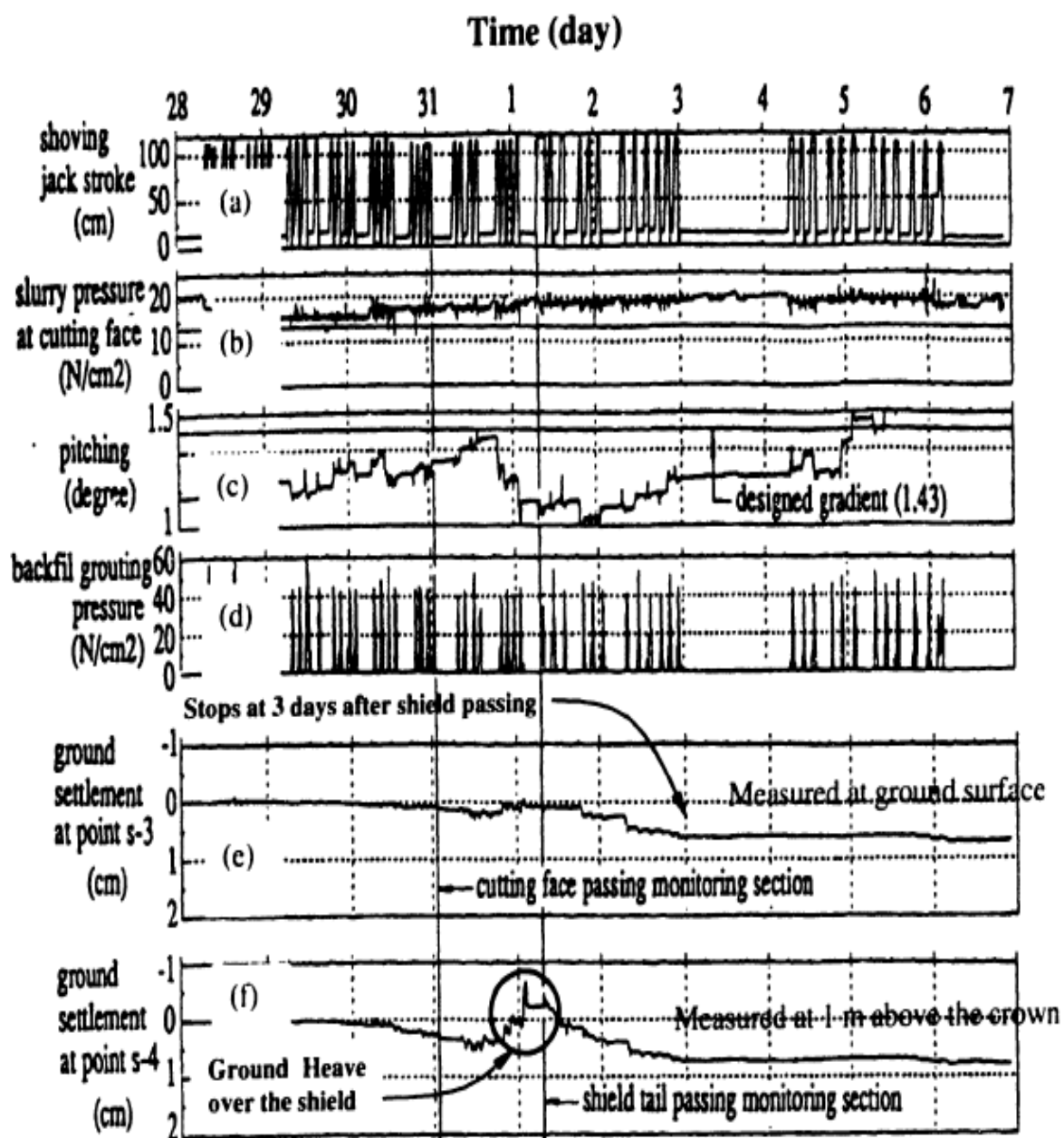
^۱ Matsushita et al

همانطور که از شکل (۲-۱۵) پیداست مسیر تونل در خاک همراه با خرده سنگ گرانیتی با روباره ماسه مواجه است. شکل (۲-۱۶) فشار سینه کار مختلف در دو مقطع در برابر نشست را نشان می‌دهد. فشار سینه کار برای مقطع شماره یک از ۱۶۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال و برای مقطع شماره ۲ از ۲۲۰ تا ۲۶۰ کیلوپاسکال متغیر است. با افزایش فشار سینه کار در هر دو مقطع نشست کاهش یافته است. همچنین شکل (۲-۱۷) نشست زمین مشاهده شده و پارامترهای عملیاتی ثبت شده را نشان می‌دهد. در این پروژه پارامترهای عملیاتی شیلد مانند فشار اسلاری، زاویه کج شدگی شیلد و فشار تزریق در طی گذر شیلد ثبت شده است. [۹].



شکل ۲-۱۶: فشار اسلاری در برابر نشست [۹]

با توجه به شکل ۲-۱۷ اگرچه فشار سینه کار و فشار تزریق ثابت مانده، ولی به علت کج شدگی سپر بالا زدگی کمتر یک سانتی متر ثبت شده است.

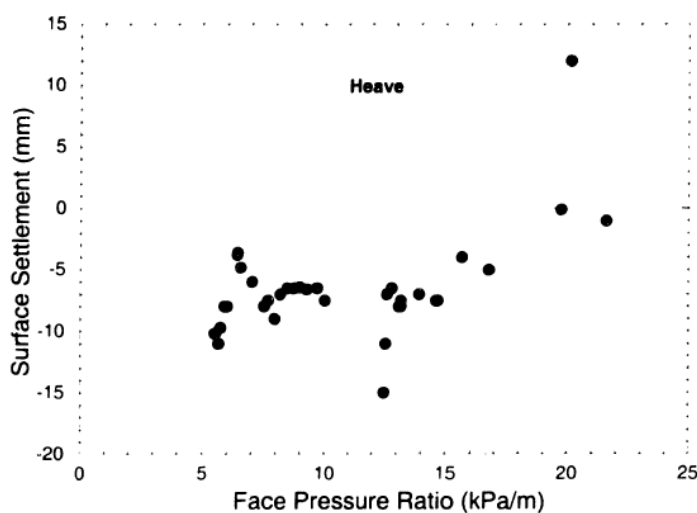


شکل ۲-۱۷: نشست مشاهده شده و ثبت پارامترهای عملیاتی [۹]

۵.۲.۲ پروژه مترو شهر میلان (Milan Subway Project)

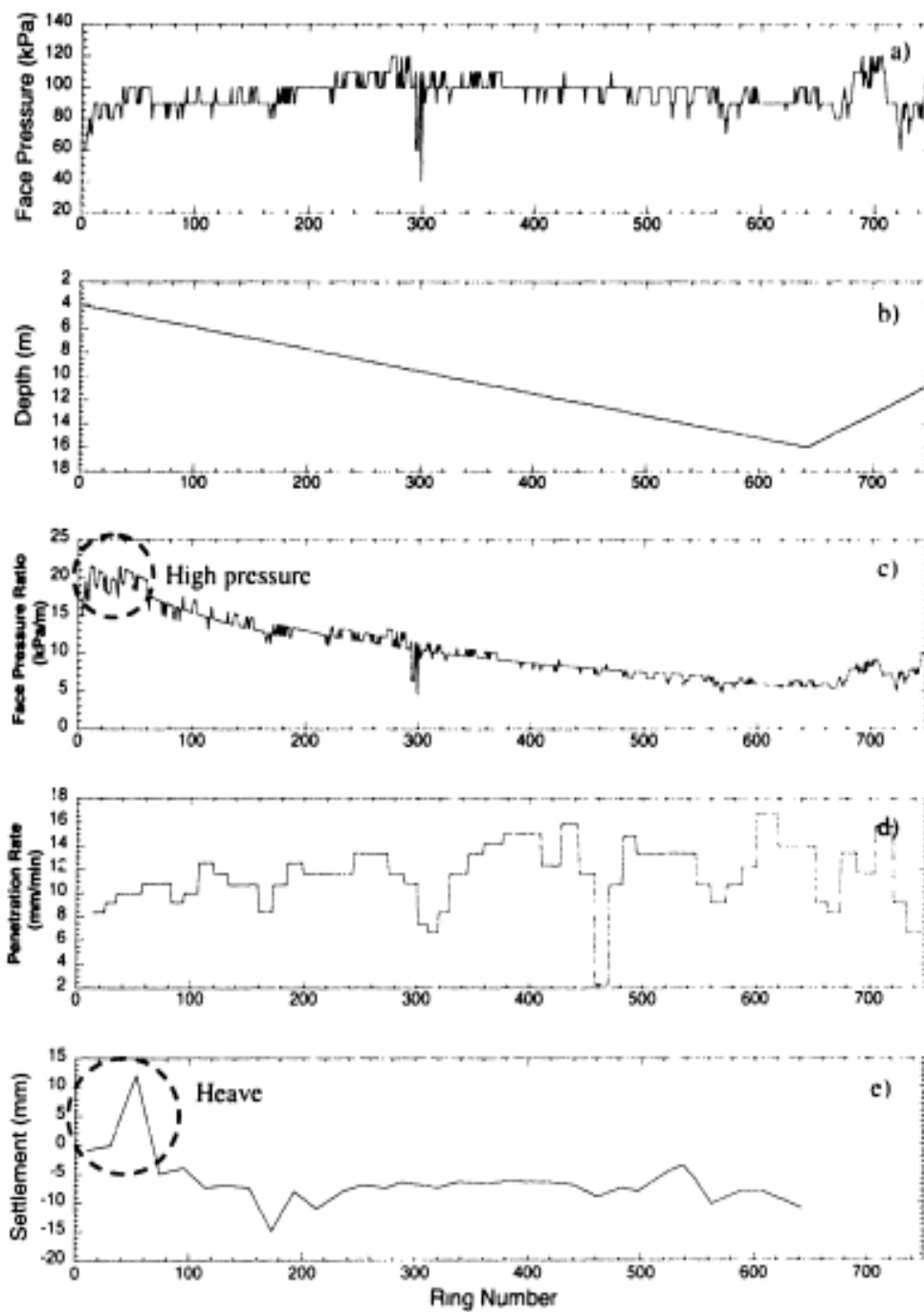
در سال ۱۹۹۶ چئوربولی و مارسلینی^۱ عملکرد یک دستگاه EPB با قطر ۸/۰۳ متر در مترو شهر میلان ایتالیا را مورد بررسی قرار دادند. طول تونل ۴ کیلومتر و عمق روباره از ۴ متر تا ۱۶ متر متغیر است. خاک شهر میلان از ماسه و گراول آبرفتی تشکیل شده است

به منظور مقایسه بهتر است از نسبت فشار سینه کار بر عمق استفاده شود که این نسبت تحت عنوان نرخ فشار سینه کار معرفی می‌شود. نرخ فشار سینه کار عبارت است از نسبت فشار سینه کار به عمق تونل و بر حسب واحد کیلو پاسکال بر متر سنجیده می‌شود. شکل ۲-۱۸ نرخ فشار سینه کار در برابر نشست سطح را نشان می‌دهد. شکل (۲-۱۹) پارامترهای عملیاتی دستگاه شامل فشار سینه کار، نرخ نفوذ و عمق تونل در برابر نشست سطح زمین را نشان می‌دهد. در مقاطعی که فشار سینه کار بالا بوده است، بالازدگی به میزان ۱۰ میلی‌متر در سطح زمین ثبت شده است [۱۰].



شکل ۲-۱۸: نرخ فشار سینه کار در برابر نشست سطح [۱۰]

¹ Chiorboli and Marcheselli



شکل ۲-۱۹: پارامترهای طراحی و نشست سطح اندازه گیری شده در پروژه مترو میلان [۱۰]

نرخ فشار سینه کار پارامتر موثری برای مقایسه فشار سینه کار در برابر نشست است. برای مثال قبل از اینکه نرخ فشار سینه کار بکار برده شود، فشار سینه کار در تمام تونل ثابت است (شکل ۲-۱۹a). اگرچه فشار روباره باید در نظر گرفته شود. بعد از اینکه فشار سینه کار توسط عمق تونل نرمالایز شد، نرخ فشار سینه کار با تغییر موثری از فشار سینه کار در مسیر تونل پدیدار شده است (شکل ۲-۱۹c). در شروع حفاری نرخ فشار سینه کار بالا بوده است (یعنی بالای ۲۱ کیلوپاسکال بر متر در ۵ متری از سطح) که بالا زدگی در سطح مشاهده شده است (شکل ۲-۱۹e).

۶.۲.۲ پروژه مترو شهر بانکوک (MRTA)

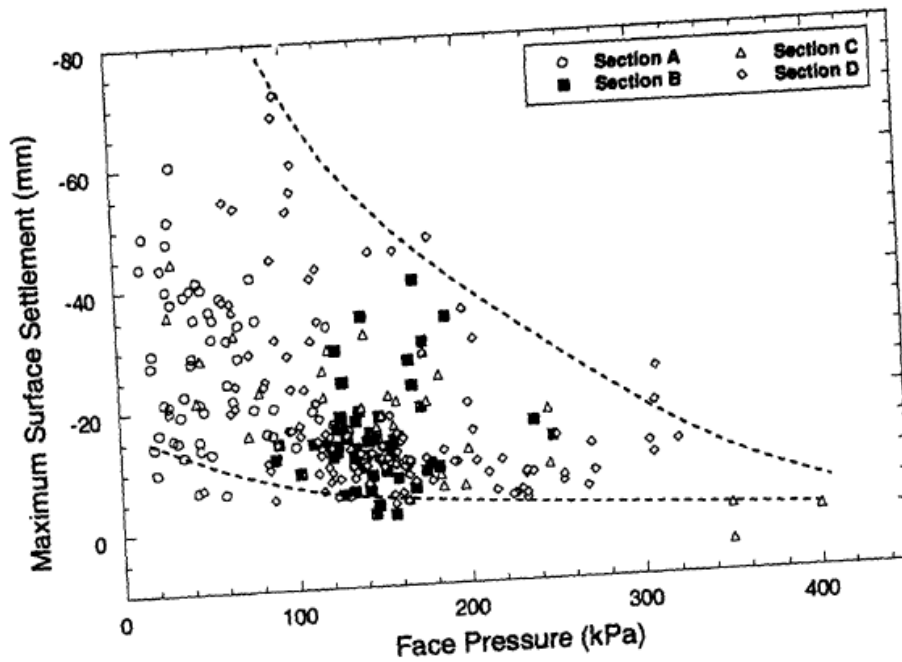
پروژه مترو شهر بانکوک (MRTA) اولین پروژه تونل حمل و نقل در کشور تایلند است. این پروژه شامل ۲۰ کیلومتر تونل دو قلو بوده که مسیر تونل از نواحی بسیار متراکم شهری عبور می کند. قطر خارجی هر تونل ۶/۳ متر و قطر داخلی آن ۵/۷ متر است. این تونل ها توسط ماشین حفار مکانیزه فشار متعادل کننده زمین حفاری شده است. برای رسیدن به حداقل نشست زیر سطح، پارامترهای عملیاتی بسیاری مانند فشار سینه کار، فشار تزریق نرخ نفوذ و زاویه کج شدگی شیلد وجود دارد. تمام این پارامترها تعادل زمین و سپر را یک مسئله پیچیده می کند. بنابراین درک رفتار بین فاکتورها و چگونگی ارتباط با آن با مقدار نشست دشوار است. با مطالعه عملیات تونلسازی و جمع آوری داده های مربوط به EPB حین حفاری تونل، پایگاه داده ای در سال های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵ توسط سوانساوات^۱ در حین حفاری تونل فراهم شد. این پایگاه داده ها شامل نتایج رفتارسنجی پارامترهای عملیاتی سپر و زمین می باشد که نه تنها مطالعه رفتار جابجایی های زمین حین حفاری را ممکن می سازد بلکه منبع مفیدی از مدل های پیشرفته پیش بینی نشست زمین را ایجاد می کند. به علت توانایی برای تعمیم روابط بین متغیرها، روشی بر

^۱ suwansawat

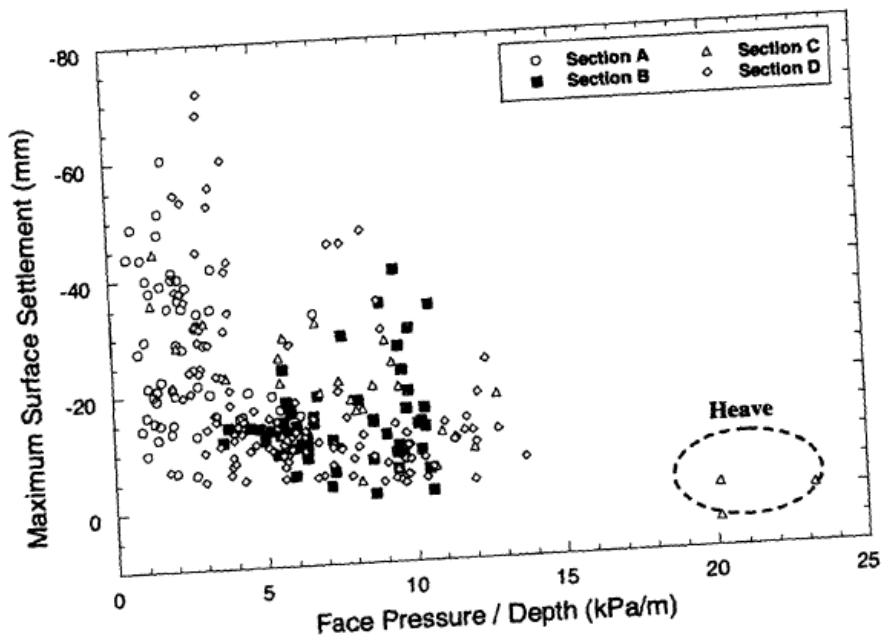
اساس شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) با استفاده از پایگاه داده ها وسیع کامپیوتری شده از پروژه مترو بانکوک توسعه پیدا کرد که قادر به پیش بینی نشست سطح می باشد [۱۱].

فشار سینه کار یکی از مهمترین فاکتور تاثیر گذار بر مقدار نشست سطح زمین محسوب می شود. مشاهدات انجام شده در پروژه MRTA نشان می دهد، کاهش فشار سینه کار باعث افزایش نشست و از سوی دیگر افزایش سینه کار باعث کمتر شدن نشست سطح می شود. در این موارد فشار بیشتر منجر به بالازدگی در سطح می شود. در مقابل اگر شیلد در فشار سینه کار کمتر کار کند (یعنی کمتر از ۶۰ کیلوپاسکال یا فشار سینه کار کمتر از ۴۰۰ کیلوپاسکال که به ترتیب در اشکال (۲-۲۰) و (۲-۲۱) نشان داده شده است)، پیش بینی مشکلی از داده های شدیداً پراکنده نتیجه می دهد. شاید این رفتار به علت اندرکنش زمین و سپر (شیلد) که در آنجا یک ترکیب از تعدادی از فاکتور های تاثیر گذار نشست سطح زمین در همان زمان است. در شکل (۲-۲۰) نمودار فشار سینه کار در برابر ماکزیمم نشست که توسط حالت های زمین شناسی دسته بندی شده است. بیشترین وضعیت زمین شناسی در فشار سینه کار بیشتر باعث کمتر شدن نشست سطح شده است. اگرچه زمانی که تونل در ماسه حفاری شده بود، یک روند بین فشار سینه کار و نشست سطح زمین پیدا نشده است [۱۱].

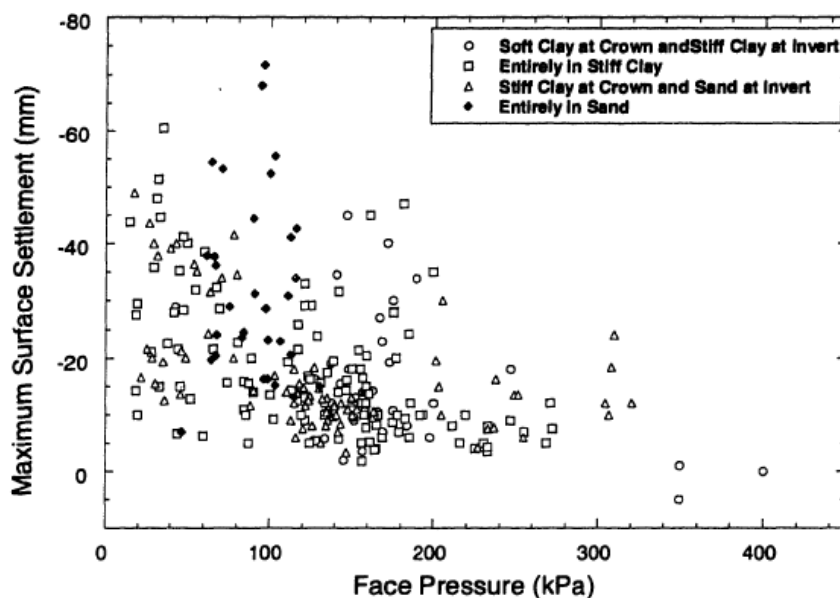
با این حال تاثیر فشار سینه کار بر نشست سطح زمین هنوز به صورت غیر واضح است. در شکل (۲-۲۲) میانگین فشار سینه کار در طی گذر شیلد را نشان می دهد (یعنی ۱۰ متر قبل و بعد از ورود سپر).



شکل ۲-۲: فشار سینه کار در برابر ماکزیمم نشست سطح زمین بعد از گذر شیلد [۱۱]



شکل ۲-۲: نرخ فشار سینه کار در برابر ماکزیمم نشست سطح زمین بعد از گذر شیلد [۱۱]

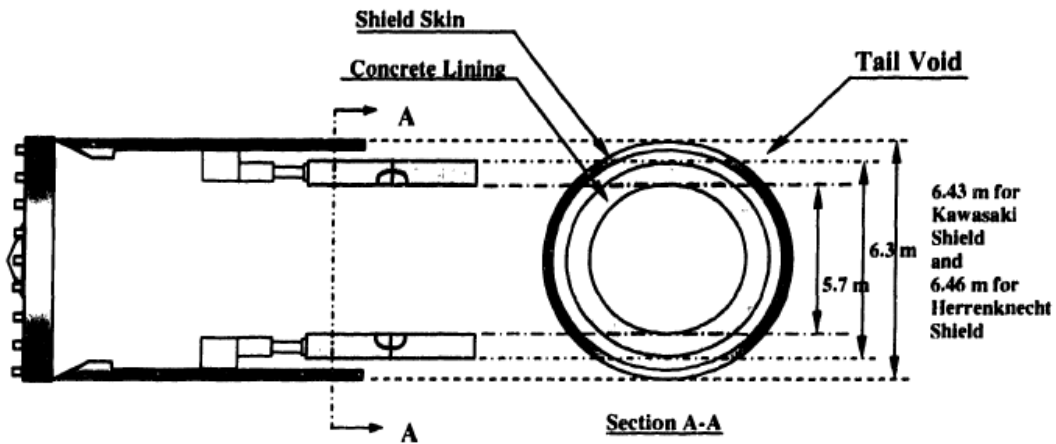


شکل ۲-۲۲: دسته بندی فشار سینه کار در وضعیت های مختلف زمین شناسی در برابر ماکزیمم نشست سطح زمین بعد از گذر شیلد [۱۱]

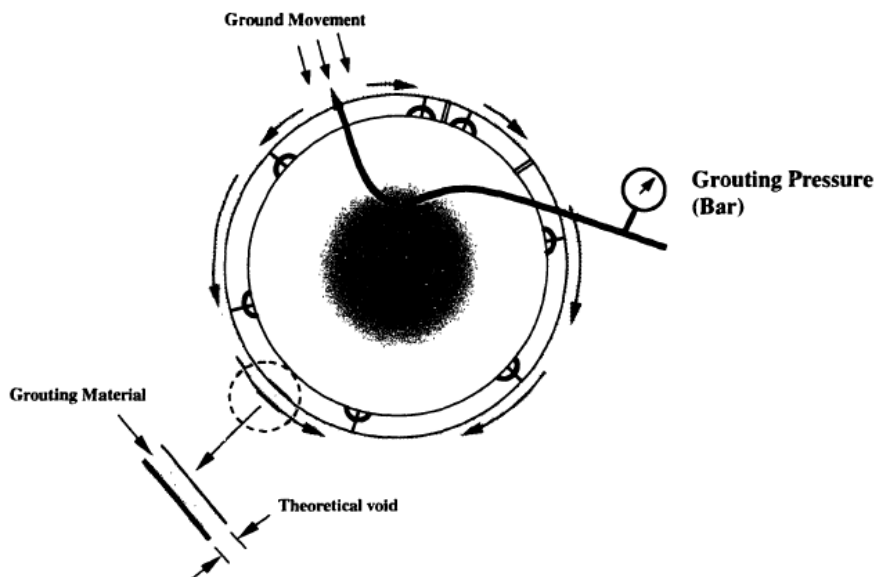
علاوه بر این به عنوان یک تفسیر اگر به هر مقطع تونلسازی (شکل ۲-۲۰ و ۲-۲۱) توجه شود بیشترین داده ها از یک روند پیروی می کنند (یعنی فشار سینه کار بیشتر باعث نشست کمتر می شود)، به جز داده های ثبت شده در مقطع B که نشست سطح زمین بیشتر حتی به ازای فشار سینه کار بیشتر مشاهده شده است.

کیفیت تزریق دوغاب همچنین در مقدار نشست سطح کمک می کند. همانطویکه شیلد توسط جک ها بسمت جلو در حرکت است، یک فضای خالی در اطراف لاینینگ بوجود می آید که در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده است. به منظور جلوگیری از حرکت زمین لازم است تزریق در فضای خالی صورت گیرد. در این روش فشار تزریق باید به اندازه کافی بالا باشد تا جریان مواد دوغاب و پایداری را ضمانت کند، حرکت زمین داخل فضای خالی در شکل (۲-۲۴) نشان داده شده است. عملیات تونلسازی با فشار تزریق

بالا و درصد بالای پر کردن دوغاب، باعث کاهش نسبتاً بالا نشست سطح پس از گذر شیلد می شود (به عنوان مثال: پروژه WMTA، لکا، ۱۹۸۹ و پروژه MRTA) [۱۱].

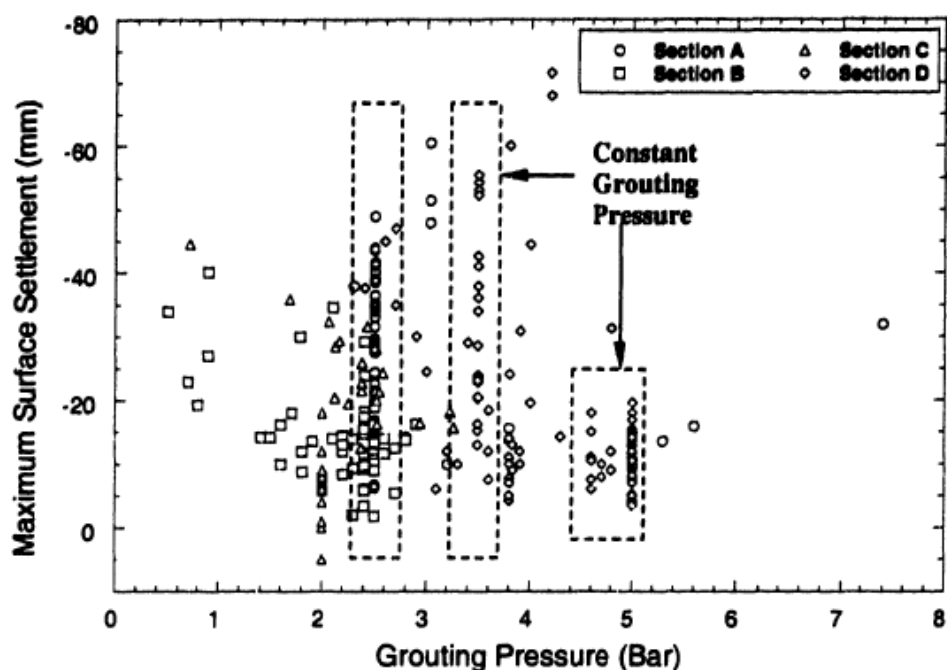


شکل ۲-۲۳: شکل شماتیک فضای خالی بین لاینینگ تونل [۱۱]



شکل ۲-۲۴: فشار تزریق و پر کردن دوغاب

شکل ۲-۲۵ فشار تزریق مختلف در برابر ماکزیمم نشست سطح بعد از گذر سپر را نشان می‌دهد. همانگونه که این شکل نشان می‌دهد در مقطعی که فشار تزریق ثابت بوده است ولی باز هم نشست افزایش یافته است [۱۱].



شکل ۲-۲۵: فشار تزریق مختلف در برابر ماکزیمم نشست سطح بعد از گذر سپر [۱۱]

۳.۲ بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق در تونلسازی مکانیزه بر مبنای مطالعات

عددی

به دلیل وجود سازه‌های سطحی و اهمیت نشست در تونلسازی در محیط شهری، تحقیقات بیشتری برای توسعه روش‌های تخمین نشست سطح زمین فراهم کرده است. نه تنها شدت و بزرگی نشست مورد بررسی قرار گرفته است، بلکه پروفیل نشست نیز بررسی شده است. تعریف خصوصیت سه بعدی و فضایی نشست باعث فهم و درک بهتری از کنترل سازه‌ها و تاسیسات سطحی می‌شود.

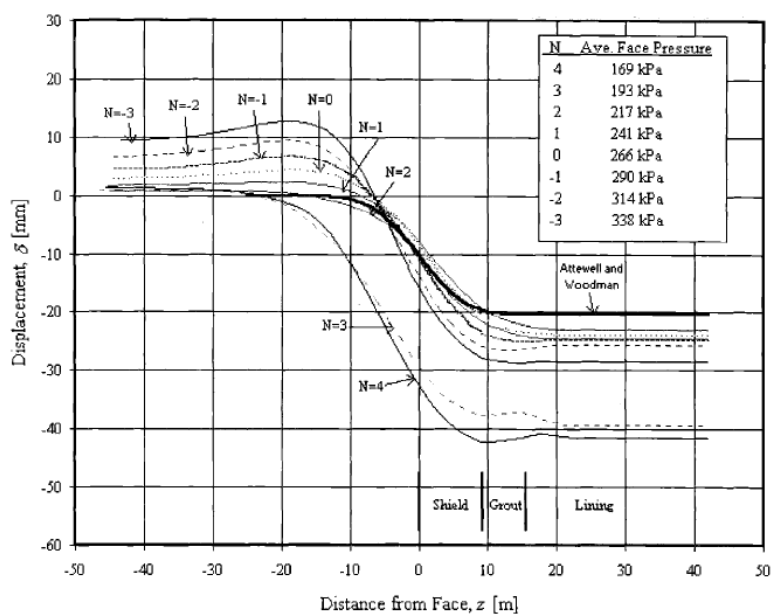
روش‌های عددی یکی از روش‌های پرکاربرد در این زمینه می‌باشد که طبیعت سه بعدی نشست را مدل سازی می‌کند. جدول ۴-۲ محققینی که به بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه پرداخته‌اند را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲: مطالعات عددی مرتبط با فشار سینه کار و فشار تزریق در حفر مکانیزه شهری [۱۶،۱۵،۱۴]

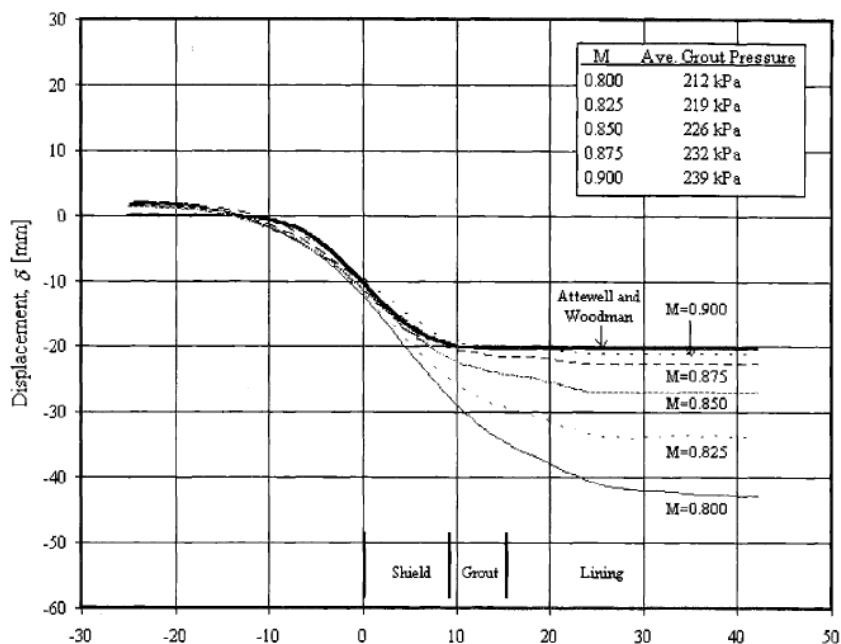
| محققین | سال (میلادی) | روش مورد استفاده |
|--------------------------------|--------------|--------------------------|
| گرین وود (Greenwood) | ۲۰۰۳ | اجزاء محدود |
| توماس کسپر (Thomas Kasper) | ۲۰۰۵ | اجزاء محدود |
| لامبروگی (Lambrugh) | ۲۰۱۲ | تفاضل محدود |
| پروژه‌های در حال ساخت در ایران | ۲۰۰۶ | اجزاء محدود- تفاضل محدود |

۱.۳.۲ مدل سازی عددی گرین وود

در سال ۲۰۰۱ گرین وود با استفاده از روش عددی اجزاء محدود سه بعدی به مدل سازی شرایط EPB در تونلسازی پرداخت. وی با اعمال فشار سینه کار و تزریق مختلف به آنالیز نشست سطحی پرداخت. شکل (۲-۲۶) فشارهای مختلف سینه کار در برابر نشست با موقعیت شیلد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲-۲۶) با افزایش فشار سینه کار نشست کاهش می‌یابد. در فشار سینه کار بین ۲۱۷ تا ۲۴۱ کیلوپاسکال نشست رخ داده است. ولی با افزایش فشار سینه کار از ۲۴۱ کیلوپاسکال بالاتر رخ داده است. بطوریکه فشار معادل ۳۳۸ کیلوپاسکال بالا زدگی به میزان ۱۰ میلی متر ایجاد کرده است. شکل (۲-۲۷) نیز نشست زمین در برابر فشار تزریق مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۶: فشار سینه کار در برابر نشست با موقعیت شیلد [۱۴]



شکل ۲-۲۷: تزریق در برابر نشست با موقعیت شیلد [۱۴]

پیش بینی شد با افزایش فشار سینه کار میزان بالادگی در بالای تونل افزایش یابد.

با افزایش فشار سینه کار نشست تا یک نقطه مشخصی کاهش یافت و بعد از آن به آرامی افزایش یافت. در این شبیه سازی فشار سینه کاری که باعث انتقال شد ۲۴۱ کیلوپاسکال بوده است.

محدوده پایین سینه کار که منجر به فروریزش سینه کار شد در فشار سینه کار ۱۵۷ کیلوپاسکال ارزیابی شد.

ممکن است در بلند مدت پروفیل نشست بزرگتر از مدل سازی عددی باشد. نشست تحکیم در این مورد در فشار سینه کار بالا منجر به افزایش فشار منفذی آب می شود، که این پراکندگی فشار اضافی در بلند مدت باعث نشست می شود.

پیش بینی شد مقدار نشست عمودی در بالای پوشش بتنی با افزایش فشار تزریق کاهش یافت.

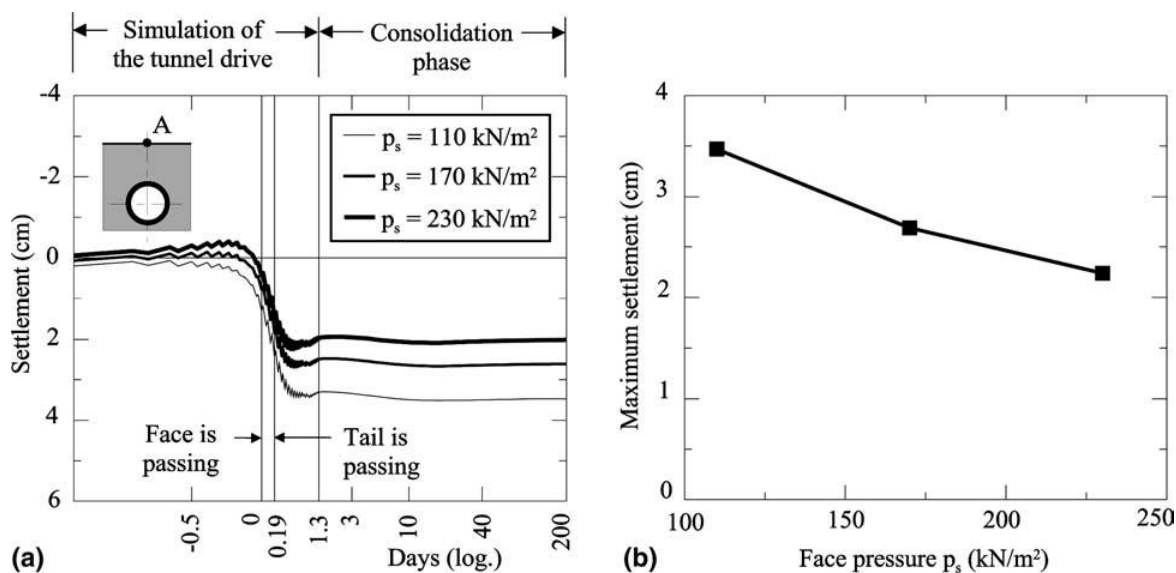
تنها تغییرات کمی از فشار تزریق قبل از فروریزش بدنه خاک صدق می کند. هر دو محدوده بالا و پایین که ارزیابی شد ۲۴۶ کیلو پاسکال و ۲۰۶ کیلو پاسکال بود [۱۴].

۲.۳.۲ مدل سازی عددی توماس کسپر

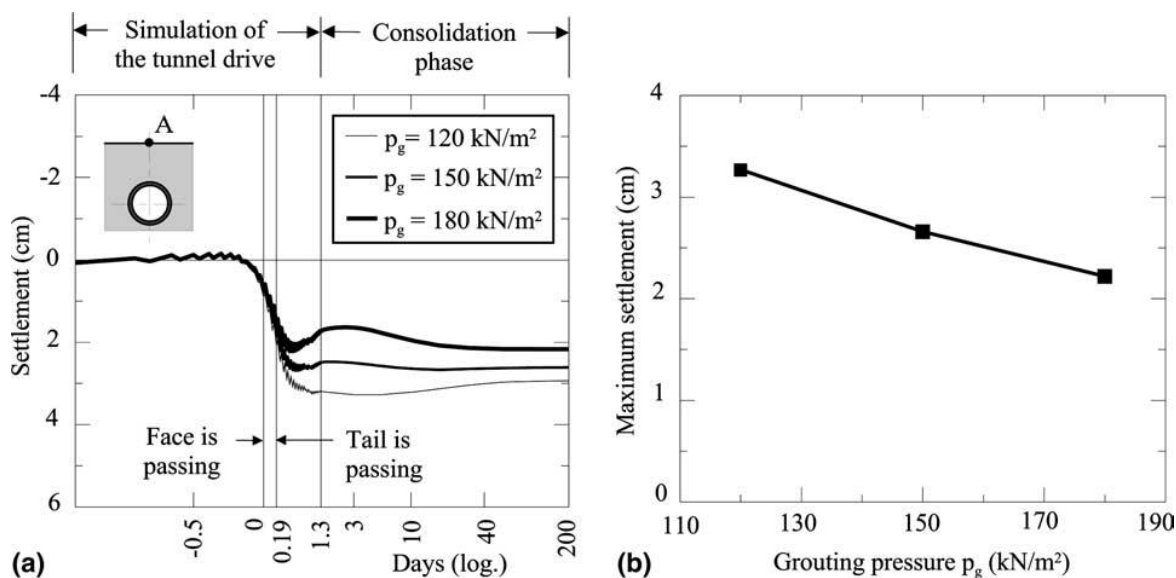
در سال ۲۰۰۶ توماس کسپر^۱ با استفاده از روش عددی اجزا محدود و برنامه TSIM3D به مدل سازی TBM پرداخت. شکل (۲-۲۸) فشار سینه کار مختلف در برابر نشست و شکل (۲-۲۹) فشار تزریق مختلف در برابر نشست را نشان می دهد. شکل ۲-۲۸ پروفیل طولی نشست در برابر فشارهای سینه کار مختلف را نشان می دهد. با توجه به این شکل با افزایش فشار سینه کار در کل منجر به به کمتر شدن نشست سطح زمین می شود. با افزایش فشار تا ۲۳۰ کیلوپاسکال بالازدگی در سطح زمین تقریباً به اندازه

^۱ Thomas Kasper

۴ میلی متر مشاهده می شود [۱۵]. شکل ۲-۲۹ پروفیل طولی نشست در برابر فشارهای تزریق مختلف را نشان می دهد. افزایش فشار تزریق باعث کاهش نشست سطح زمین پشت سپر می شود.



شکل ۲-۲۸: مقدار نشست سطح زمین محاسبه شده در محل پایش نقطه A به ازای فشار ختلف سینه کار [۱۵]



شکل ۲-۲۹: مقدار نشست سطح زمین محاسبه شده در محل پایش نقطه A به ازای فشار مختلف تزریق [۱۵]

۳.۳.۲ مدل سازی عددی لامبروگی

در سال ۲۰۱۲ لامبروگی^۱ با استفاده از مدل سازی عددی تفاضل محدود و نرم افزار FLAC3D، شرایط حفاری با دستگاه متعادل کننده فشار زمین را برای مترو مادرید شبیه سازی کرد. در این مدل قطر حفاری ۹/۳۸ متر، قطر ماشین ۹/۳۲ متر و طول سپر ۱۰/۵ متر است. لامبروگی به آنالیز حساسیت مدل های مختلف پرداخت و نتایج مدل سازی را با نتایج حاصل از ابزار بندی مقایسه کرد و پیشنهاد داد نتایج حاصل از مدل خاک رس اصلاح شده^۲ اصلاح شده به نتایج حاصل از ابزار بندی نزدیک تر است. شکل (۲-۳۰) مراحل مدل سازی ماشین حفار و نحوه حفاری مدل را نشان می دهد.

برای مدل سازی تزریق پشت سگمنت شرایط زیر اعمال شد:

- المان های پیوسته بین مرز حفاری و پوشش تونل تعریف شد (شکل ۲-۳۰-F)،

- رفتار الاستیک برای المان های تزریق در نظر گرفته شده است،

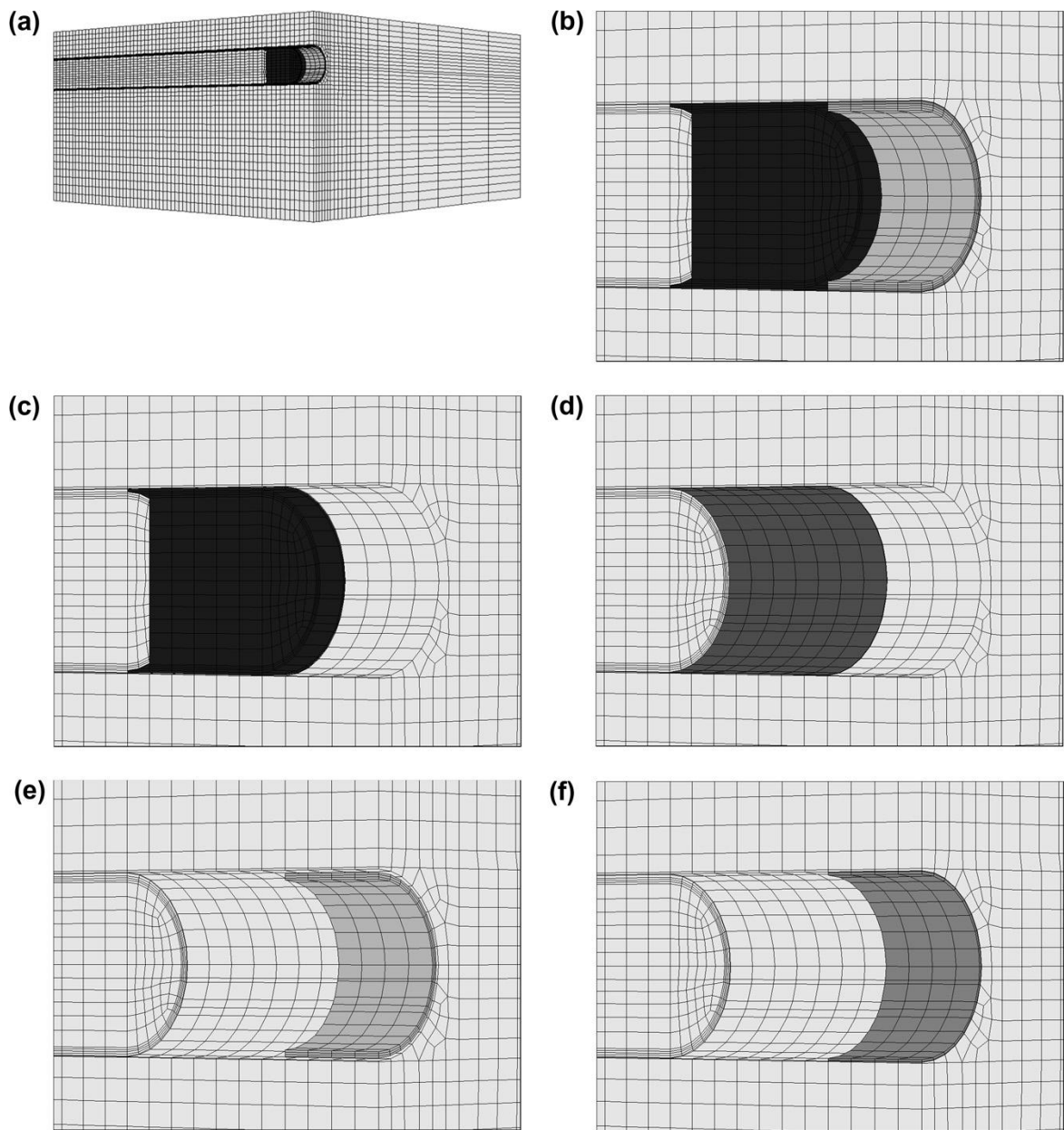
- به منظور شبیه سازی فشار تزریق، حالت تنش مربوط به هر یک از المان های تزریق جدید به صورت مصنوعی اصلاح شده، که مقدار فشار ایزوتروپیک افزایش پیدا می کند. به منظور سادگی، این افزایش مقدار فشار ایزوتروپیک به طور همزمان و یکنواخت در اطراف تونل قرار گرفتند،

- یک سختی پایین برای منطقه دوغاب در کنار سپر، برای بدست آوردن خواص مکانیکی دوغاب تازه، اختصاص داده شده است.

- افزایش مقدار سختی برای المان دوغاب دورتر از سپر اختصاص داده شده است.

¹ Lambrughi

² Cam-Clay



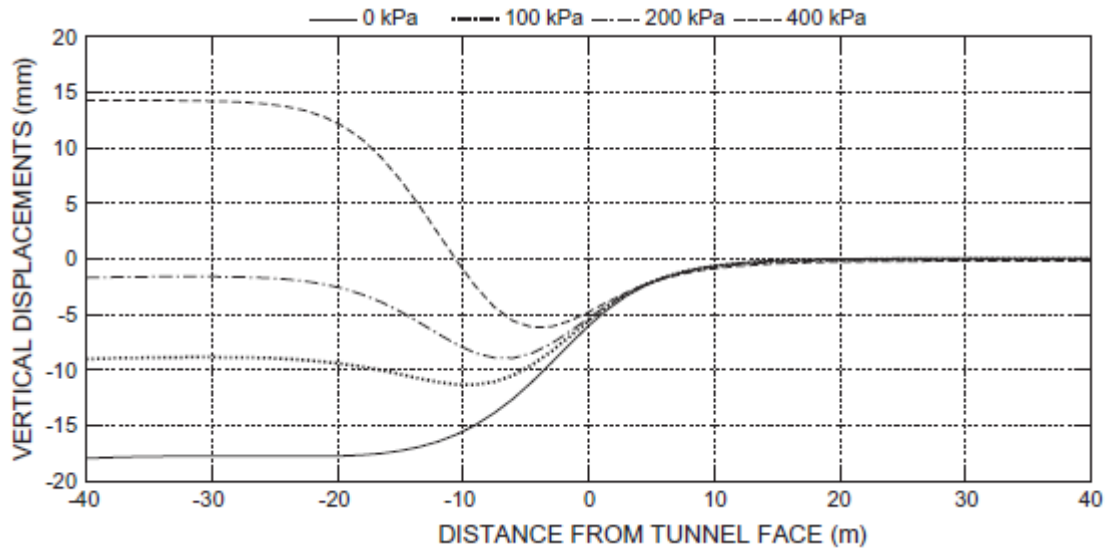
شکل ۲-۳۰: مراحل مدل سازی عددی لامبروگی با استفاده از نرم افزار **FLAC3D** [۱۵]

رابطه (۱-۲) برای توصیف سخت‌شدگی دوغاب بکار برده شده است که افزایش تدریجی مدول یانگ با زمان را تعریف می‌کند [۱۶]

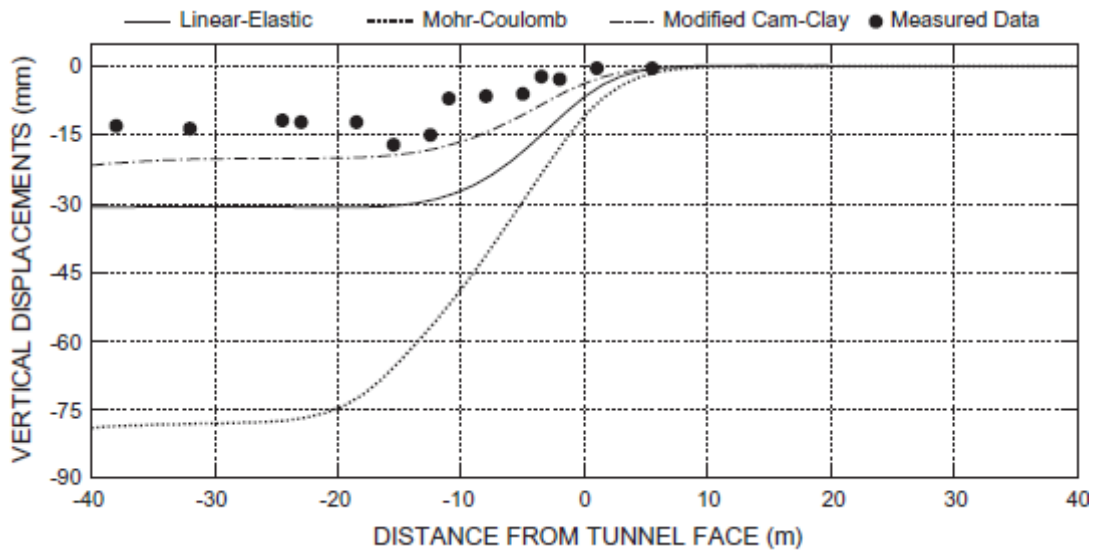
$$E_t = \begin{cases} E_{initial} & t = 0 \\ E_g \left[1 - e^{-0.2 \left(\frac{t}{t_0} \right)} \right] & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1-2)$$

که در آن E_t مدول یانگ دوغاب در زمان t است، E_g مدول یانگ دوغاب پس از سخت‌شدگی کامل رخ داده است و t فاصله زمانی از تزریق دوغاب است. همچنین باید مقدار اولیه‌ای^۱ ($t = 0$) برای مدول یانگ‌ها تخمین زده شود. قانون سخت‌شدگی دوغاب فوق با اشاره به ۱۲ ساعت اول پس از تزریق دوغاب اجرا شده است. فراتر از این زمان، سخت‌شدگی کامل مخلوط ($E_t = E_g$) در نظر گرفته شده است. برخی از اطلاعات در مورد نرخ پیشروی TBM، برای به دست آوردن تغییر سختی دوغاب به عنوان تابعی از فاصله سپر مورد نیاز است. در این نمونه، سرعت پیشروی ثابت، ۱ متر بر ساعت در نظر گرفته شده است. شکل ۲-۳۱ پروفیل نشست طولی مدل سازی عددی لامبروگی در فشار تزریق مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست با افزایش فشار تزریق تا ۲۰۰ کیلوپاسکال میزان نشست کاهش می‌یابد و با افزایش این فشار تا ۴۰۰ کیلوپاسکال بالا زدگی تا ۱۵ میلی‌متر در سطح زمین بوجود می‌آید. شکل (۲-۳۲) میزان نشست عمودی سطح در برابر فاصله از سینه کار مدل عددی لامبروگی را در سه حالت رفتار خاک (الاستیک، موهر کلمب و خاک رس اصلاح شده) در برابر مقادیر ثبت شده از ابزار بندی رانشان می‌دهد. [۱۶]

¹ Einitial



شکل ۲-۳۱: پروفیل نشست طولی مدل سازی عددی لامبروگی در فشار تزریق مختلف [۱۶]



شکل ۲-۳۲: میزان نشست عمودی سطح در برابر فاصله از سینه کار مدل عددی لامبروگی [۱۶]

۴.۲ بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق در نشست بر مبنای مدل سازی فیزیکی

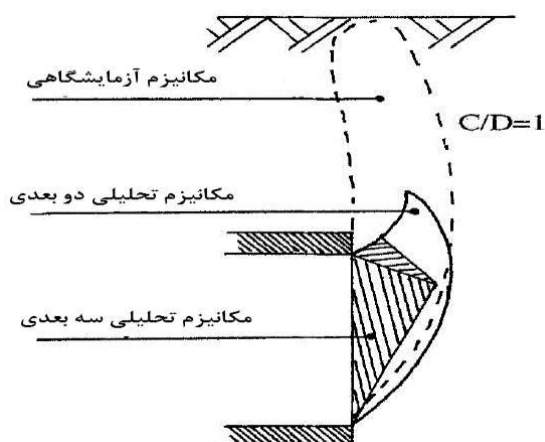
روش‌های آزمایشگاهی مربوط به تغییرات تونل شامل ساخت مدل تونل مقیاس شده از قطر و عمق تونل در خاک‌های مختلف صورت گرفته است. تغییرات خاک طبیعی و کرنش زمین هنگام حفر تونل مشاهده شده است. رفتار تغییر شکل زمین محیط اطراف تونل با تغییرات تنش در حین ساخت تونل شرح داده شود. به هر حال دقیقاً یک مدل به سختی می‌تواند رفتار واقعی تونل را در طول ساخت را با تمام جزئیات حفاری و نگهداری بازسازی کند. توجه اصلی مدل سازی فیزیکی و آزمایشگاهی تهیه داده برای مقایسه برای روش‌های موجود طراحی زمین نرم تونل است. نتایج مدل سازی روش موفقیت آمیزی برای پیش بینی نشست بالای یک تونل واقعی می‌دهد.

چامبون و همکارش در سال ۱۹۹۴ با مروری بر تحقیقات انجام داده از سال ۱۹۸۷ بر روی پایداری جبهه کار تونل پرداختند [۱۷]. در تمامی این حالات مکانیزم شکست از طریق مطالعه خط اثر لایه‌های مقاطع بریده شده بر روی کاغذ بررسی شده است. در پایان نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از روشهای تحلیلی (مکانیزم بلوکی بر اساس منحنیهای لگاریتمی چامبون (۱۹۹۰) و روش ارائه شده توسط دومیکس و لکا^۱ (۱۹۹۰)) مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۲-۳۳).

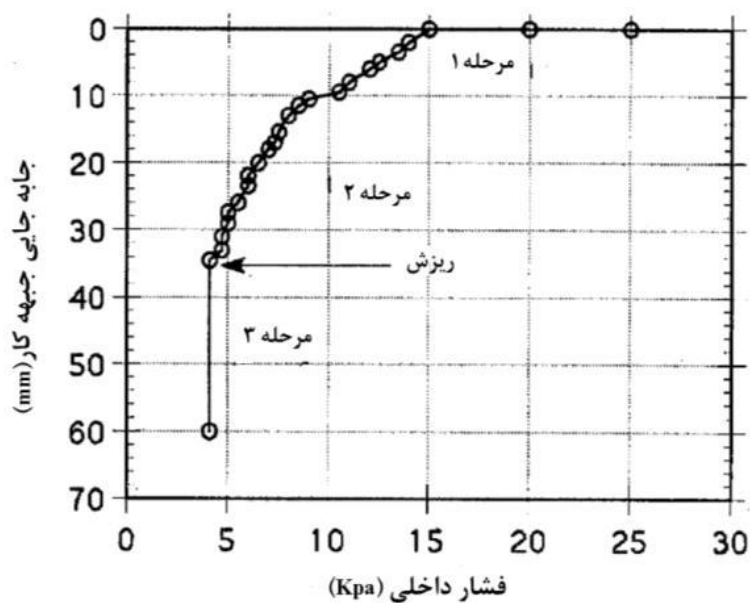
آزمایشات انجام شده توسط چامبون و همکارش نتایج مفید و ارزشمندی را ارائه کرده است، که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

ریزش در شرایط فشار جبهه کار یکنواخت در سه مرحله صورت می‌پذیرد (شکل ۲-۳۴) و طبق این شرایط دو فشار (P_c فشار جبهه کار در لحظه آغازین جابه‌جایی) و (P_f فشار در لحظه ریزش) معرفی شده است [۱۷].

¹ Domieux-Leca



شکل ۲-۳۳: مقایسه مکانیزم شکست آزمایشگاهی با تئوری [۱۷]



شکل ۲-۳۴: رشد جابجایی جبهه کار: رابطه بین جابجایی افقی با فشار محدود کننده

داخلی [۱۵]

چنانچه P فشار اعمال شده به جبهه کار باشد، نتایج زیر در خصوص ارتباط این مقادیر با یکدیگر و تاثیر

آنها بر رفتار خاک حاصل شده است [۱۷].

در $P > P_c$ جابه جایی قابل رویتی در جبهه کار رخ نداده است.

در $P_C > P > P_f$ ، جابه‌جایی کوچک جبهه کار با علائم نزدیکی به خطر ریزش، رخ می‌دهد. این مرحله با نشست سطح بالای جبهه کار همراه می‌باشد.

در $P = P_f$ ، ریزش محلی ناگهانی رخ می‌دهد.

در $P < P_f$ خاک به سمت داخل تونل جریان می‌یابد.

۵.۲ جمع بندی

در این فصل ضمن معرفی تونلسازی به روش حفاری مکانیزه متعادل کننده فشار زمین (EPB) مشخص شد فشار سینه کار و فشار تزریق در این نوع تونلسازی از پارامترهای موثر و کلیدی در میزان نشست سطح و جابجایی زمین است. مطالعات انجام شده در رابطه با تاثیر فشار سینه کار و تزریق بر نشست به سه نوع عددی، مدل سازی فیزیکی و اطلاعات ثبت شده حاصل از ابزار بندی تقسیم می‌شوند. بطور کلی افزایش فشار سینه کار و فشار تزریق باعث کاهش نشست سطح زمین و افزایش بیش از حد آنها نیز باعث بالازدگی سطح زمین می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد برای بررسی نشست سطح زمین علاوه بر فشار سینه کار و فشار تزریق پارامترهایی مانند شرایط زمین شناسی، زاویه کج شدگی شیلد، نرخ نفوذ، عمق تونل، فاصله از محل شروع ایستگاه باید لحاظ شود.

فصل سوم: زمین شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر خط

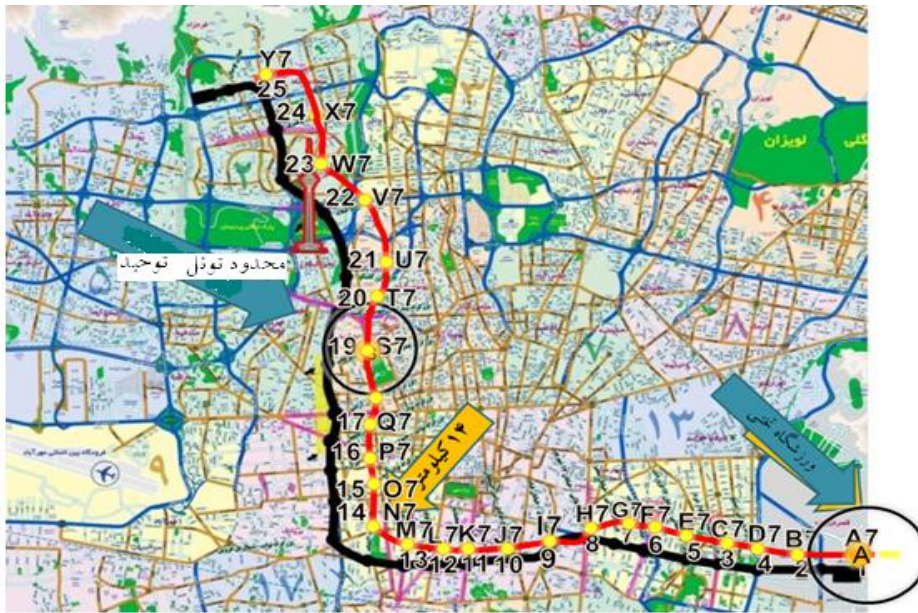
هفت متروی تهران

۱.۳ شرح پروژه

خط ۷ متروی تهران از شهرک امیر المومنین در شرق تهران (جنب استادایوم تختی) شروع شده و پس از عبور از بزرگراه بسیج در طول بزرگراه شهید محلاتی ادامه یافته و پس از اتصال به میدان قیام در امتداد خیابان مولوی و هلال احمر امتداد می‌یابد. مسیر این خط بعد از عبور از بزرگراه شهید نواب صفوی، در امتداد شمالی جنوبی و در طول بزرگراه نواب تغییر و در نهایت تا میدان کاج ادامه می‌یابد. این تونل به دو قطعه شمالی-جنوبی و شرقی-غربی تقسیم شده است. مطالعات انجام شده در این تحقیق مربوط به قسمت شرقی غربی می‌باشد. این تونل دارای طولی ۱۲ کیلومتر است که با یک دستگاه ماشین EPB حفاری و سگمنت‌گذاری می‌گردد. در حال حاضر بیش از ۲ کیلومتر آن حفاری شده است. شروع حفاری تونل از شفت N7 بوده و در طول مسیر از ۱۳ ایستگاه و همچنین از زیر تونل خط ۱ متروی تهران عبور می‌نماید. در شکل ۱-۳ و ۲-۳ به ترتیب موقعیت بخش شرقی-غربی مسیر تونل بر روی تصویر ماهواره‌ای و نقشه تهران نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: موقعیت مسیر تونل بر روی تصویر ماهواره‌ای تهران [۲]



شکل ۲-۳: موقعیت مسیر تونل بر روی نقشه تهران [۲]

در طی مطالعات مقدماتی تعداد ۱۵ گمانه و ۳ چاهک اکتشافی بر روی بخش شرقی - غربی مسیر خط ۷ متروی تهران، توسط پیمانکار ژئوتکنیک حفر گردیده است. سپس در طی مطالعات تکمیلی ۱۳ گمانه و ۵ چاهک بر روی مسیر تونل و همچنین ۳۳ گمانه و ۸ چاهک بر روی ایستگاه‌های مسیر حفر شده است.

۲.۳ زمین‌شناسی مسیر تونل

بخش شرقی - غربی خط ۷ مترو در آبرفت‌های کواترنری تهران قرار گرفته است. بطور کلی از لحاظ چینه‌شناسی رسوبات آبرفتی تهران به چهار بخش بنام سازندهای A، B، C و D تقسیم بندی شده است که در بین آن‌ها رسوبات و نهشته‌های سازند A قدیمی‌ترین و نهشته‌های سازند D جدیدترین سری محسوب می‌شوند [۲]

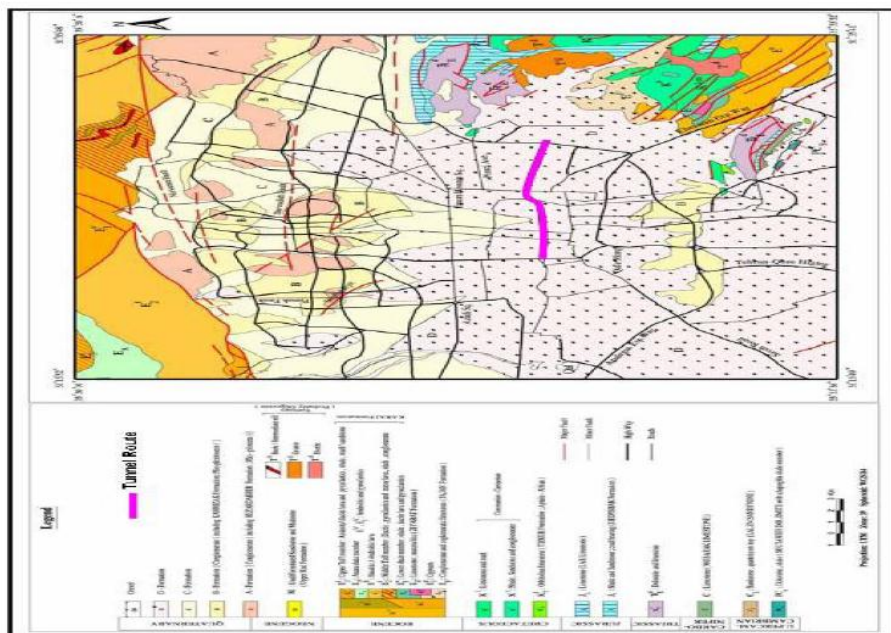
در طی سال‌های اخیر مطالعاتی بر روی زمین‌شناسی تهران انجام شده که آخرین آنها نقشه‌های تهیه شده توسط آژانس همکاری‌های ژاپن (JICA، ۱۳۸۰) و پژوهشگاه زلزله می باشد که به ترتیب

در شکل ۳-۳ و ۴-۳ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل‌های مذکور مشاهده می‌گردد و همچنین طبق بررسی‌های انجام گرفته، مسیر تونل در بخش‌های سطحی سازند D قرار گرفته است ولی به نظر می‌رسد که در عمق، واحدهای خاکی تشکیل دهنده سینه کار تونل عمدتاً از سازند‌های قدیمی‌تر مانند C تشکیل شده باشد [۲].

بطور کلی قسمت اعظم جنوب تهران از رسوبات سیلتی با عدسی‌های کم ضخامت از ماسه و گاه شن تشکیل شده است. در گمانه‌های حفر شده در خطوط ۱ و ۲ متروی تهران، خاک رسی موجود عمدتاً دارای پلاستیسیته کم تا متوسط بوده ولی به ندرت در اعماق مختلف به رس با پلاستیسیته بالا برخورد شده است. به طرف شمال (خیابان شوش) خاک بیشتر از ماسه، سیلت و رس تشکیل شده ولی درصد دانه‌های درشت نیز نسبت به جنوب این محدوده اندکی بیشتر شده است.

رسوبات آبرفتی تهران در مسیر متروی خط ۷، بیشتر شامل ترکیبی از رسوبات ریز دانه، شن، ماسه و قلوله سنگ است و به شکل روکشی بر روی رسوبات قدیمی‌تر را پوشانده است که به طور کلی از شرق به غرب رسوبات دانه ریزتر شده و در قسمت‌های غربی مسیر تونل، لایه ریزدانه رسی توسعه بیشتری برخوردارند.

بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی موجود هیچگونه گسلی مسیر تونل را قطع نمی‌نماید، ولی در نزدیک مسیر تونل چند گسل فعال از قبیل گسل قصر فیروزه و شمال ری وجود دارند که تاثیر امواج لرزه‌ای آنها بر تونل مهم می‌باشد (شکل ۳-۵). در این بین گسل قصر فیروزه با راستای شمال-باختر-جنوب خاور دارای سازوکاری ناشناخته بوده که در فاصله تقریباً ۲/۸ کیلومتری شرق تونل قرار دارد. همچنین گسل شمال ری با راستای شرقی-غربی به طول ۱۶/۵ کیلومتر هم راستا با تونل در فاصله ۷/۵ کیلومتری جنوب تونل قرار دارد.



شکل ۳-۴: موقعیت مسیر تونل بر روی نقشه زمین‌شناسی پژوهشگاه زلزله [۲]

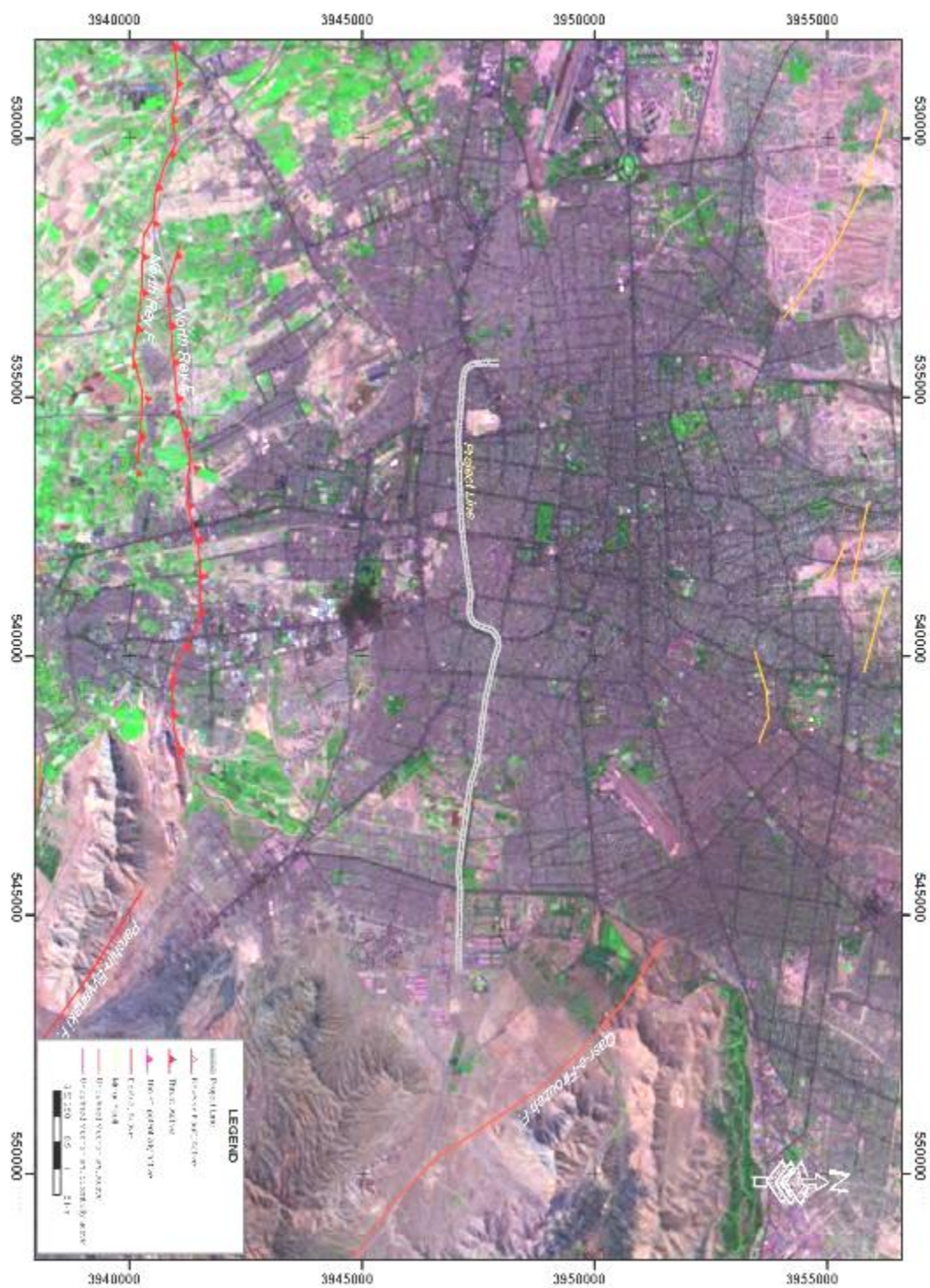
۳.۳ تفکیک و توصیف واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و همچنین با در نظر گرفتن مقیاس نقشه، لایه‌های خاکی دربرگیرنده مسیر تونل به شش واحد (گونه) زمین‌شناسی مهندسی^۱ تفکیک شده‌اند که این واحدها در جدول ۳-۱ معرفی گردیده‌اند. در ادامه خصوصیات هر یک از این واحدها بصورت خلاصه تشریح شده است و همچنین شرح مختصری در باره نحوه تفکیک واحدها ارائه شده است.

¹Geological Engineering Unit

جدول ۱-۳: مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده در مسیر تونل [۲]

| ET-6 | ET-5 | ET-4 | ET-3 | ET-2 | ET-1 | واحد زمین شناسی مهندسی |
|--------------|--------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| سیلت ماسه ای | سیلت و رس ماسه ای و رس به همراه ماسه | ماسه رسی به همراه گراول | ماسه رسی همراه گراول - رس و سیلت ماسه ای | ماسه گراولی همراه سیلت و رس | گراول ماسه ای و ماسه گراولی | توصیف خاک |
| >۶۰ % | >۶۰% | ۲۲-۳۴% | ۳۰-۶۰% | ۱۲-۳۰% | ۳-۱۲% | درصد رد شده از الک ۲۰۰ |
| ML | CL, ML & CL-ML (rarely CH) | SC, SM | SC, SM & CL | SC, SC-SM & GC | GW, GW-GM, GP-GC, SW & SP | نوع خاک |



شکل ۳-۵: گسل‌های فعال مهم گستره اطراف بخش شرقی-غربی مسیر تونل (خط ۷ مترو) [۲]

۱.۳.۳ واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-1

جنس این واحد خاکی از گراول ماسه‌ای و در بعضی از محدوده‌ها از ماسه گراولی تشکیل شده است. این واحد خاکی طبق استاندارد USCS در گروه خاک‌های GW، GW-GM، GP-GC، SW، و SP قرار می‌گیرد. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) برای واحد ET-1 بین ۳ تا ۱۲٪ می‌باشد و همچنین این واحد بر اساس معیار^۱ Thewes عمدتاً در رده خاک‌های گروه II قرار می‌گیرد [۲].

۲.۳.۳ واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-2

این واحد خاکی نیز مانند واحد ET-1 در رده خاک‌های درشت دانه قرار می‌گیرد و جنس آن از عمدتاً از ماسه گراولی به همراه سیلت و رس تشکیل شده است. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) در این واحد بین ۱۲ تا ۳۰٪ می‌باشد. بخش‌های مختلف این واحد طبق استاندارد USCS از نوع خاک‌های GC، SC-SM، و SC می‌باشند. این واحد خاکی بر اساس معیار Thewes عمدتاً در رده خاک‌های گروه III قرار می‌گیرند ولی قسمت‌های ریزدانه آن بین گروه‌های III و IV واقع شده‌اند [۲].

۳.۳.۳ واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-3

ذرات تشکیل دهنده این واحد خاکی از ماسه رسی به همراه گراول و همچنین رس و سیلت ماسه‌ای تشکیل شده و درصد رد شده از الک ۲۰۰ (ذرات ریز دانه) آن بین ۳۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد، این واحد خاکی از لحاظ دانه‌بندی دارای ویژگی‌های خاصی می‌باشد. ویژگی نخست برای واحد خاکی ET-3 این است که منحنی‌های دانه‌بندی این واحد بر روی هیچکدام از گروه‌های خاکی معیار Thewes منطبق نبوده و بطور مشترک بر روی محدوده‌ای از گروه III، IV و V قرار می‌گیرند. ویژگی مهم دیگر این است

^۱ این معیار در فصل دوم توضیح داده شده است

که مطابق با استاندارد USCS بخشی از منحنی‌های دانه‌بندی این واحد درای درصد ذرات ریزدانه‌ای بین ۵۰ تا ۶۰ بوده و در گروه خاک‌های ریز دانه قرار می‌گیرد (CL و ML)، در مقابل درصد ذرات ریزدانه برای بخش دیگری از منحنی‌ها بین ۳۰ تا ۵۰ درصد بوده و در گروه خاک‌های دانه‌ای (SM، GC و SC) تقسیم بندی می‌گردند. با وجود این اختلاف منحنی‌های دانه‌بندی تشکیل دهنده این واحد دارای روند مشابهی می‌باشد [۲].

۴.۳.۳ واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-4

این واحد خاکی نیز در رده خاک‌های درشت دانه محسوب می‌گردد و جنس آن از عمدتا از ماسه رسی به همراه گراول تشکیل شده است و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) در آن بین ۲۲ تا ۳۴٪ می‌باشد. طبق استاندارد USCS از نوع خاک‌های SC و SM می‌باشند. این واحد خاکی بر اساس معیار Thewes عمدتا در رده خاک‌های گروه IV قرار می‌گیرند [۲].

۵.۳.۳ واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-5

ذرات تشکیل دهنده واحد خاکی ET-5 عمدتا از سیلت و رس ماسه‌ای و رس به همراه ماسه تشکیل شده است. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) این واحد همواره بیشتر از ۶۰ درصد می‌باشد. این واحد خاکی طبق استاندارد USCS در گروه خاک‌های CL و ML قرار می‌گیرد و عمدتا در محدوده شرقی مسیر تونل گسترش یافته‌اند لایه‌های خاکی تشکیل دهنده این واحد بر اساس معیار Thewes در رده خاک‌های گروه V قرار می‌گیرند [۲].

۶.۳.۳ واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-6

ذرات تشکیل دهنده این واحد عمدتاً از سیلت ماسه‌ای تشکیل شده است و از لحاظ دانه‌بندی به واحد ET-5 شبیه می‌باشد ولی با توجه به ضعیف بودن پارامترهای مکانیکی به عنوان یک واحد جداگانه معرفی گردیده است. بطور کلی این واحد در مسیر تونل گسترش کمی داشته و به نظر می‌رسد که تنها در کیلومتر ۷+۱۰۰ تا ۷+۶۰۰ در محدوده بالای سقف تونل گسترش داشته باشد [۲].

۴.۳ گسترش و موقعیت واحدهای خاکی در مسیر تونل

بطور کلی بر اساس حضور واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در سینه‌کار تونل و حضور آب زیرزمینی، مسیر تونل به ۴۰ زون زمین‌شناسی-ژئوتکنیکی تقسیم گردید (جدول ۳-۲). همانطور که اشاره شد، مبنای این تقسیم بندی گسترش واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در سینه‌کار تونل می‌باشد. به عنوان مثال، زون شماره ۱۹ از متر ۵۴۴۶ تا ۵۵۹۳ گسترش داشته و سینه کار تونل در این زون از واحدهای ET-2 و ET-3 تشکیل شده است. همچنین در این محدوده جریان آب زیرزمینی سینه کار تونل را دربر گرفته است. بر اساس برش زمین‌شناسی مهندسی تونل و همچنین جدول ۳-۲، واحدهای ET-2، ET-3، ET-5 و ET-1 به ترتیب بیشترین گسترش را در مسیر تونل دارند و واحد ET-4 بیشتر بصورت لنزها و عدسی‌های ماسه‌ای گسترش یافته است. واحد ET-6 نیز در مسیر تونل گسترش کمی داشته و موقعیت آن تنها در کیلومتر ۷+۱۰۰ تا ۷+۶۰۰ در محدوده بالای سقف تونل می‌باشد [۲].

جدول ۳-۲: زون‌های زمین‌شناسی-ژئوتکنیکی مسیر تونل (بر اساس گسترش واحدهای دربرگیرنده سینه کار) [۲]

| شماره ناحیه | موقعیت | طول مقطع متر | واحد خاکی زمین‌شناسی مهندسی | | | | | | حضور آب |
|-------------|---------------|--------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|---------|
| | | | ET-1 | ET-2 | ET-3 | ET-4 | ET-5 | ET-6 | |
| 1 | 0 - 428 | 428 | | | | | | | |
| 2 | 428 - 848 | 420 | | | | | | | |
| 3 | 848 - 1116 | 268 | | | | | | | |
| 4 | 1116 - 1647 | 531 | | | | | | | |
| 5 | 1647 - 1708 | 61 | | | | | | | |
| 6 | 1708 - 1842 | 134 | | L | | | | | |
| 7 | 1842 - 1989 | 147 | | | | | | | |
| 8 | 1989 - 2116 | 127 | | | L | | | | |
| 9 | 2116 - 2228 | 112 | | | | L | | | |
| 10 | 2228 - 2393 | 165 | | | | | | | |
| 11 | 2393 - 3479 | 1086 | | | | | | | |
| 12 | 3479 - 3648 | 169 | L | | | | | | |
| 13 | 3648 - 3997 | 349 | | | | | | | |
| 14 | 3997 - 4333 | 336 | | | | | | | |
| 15 | 4333 - 4477 | 144 | | | | | | | |
| 16 | 4477 - 4821 | 344 | | | | | | | |
| 17 | 4821 - 5142 | 321 | | | L | | L | | |
| 18 | 5142 - 5446 | 304 | L | | | | L | | |
| 19 | 5446 - 5593 | 147 | | | | | | | |
| 20 | 5593 - 5711 | 118 | | L | | L | | | |
| 21 | 5711 - 5776 | 65 | | | | | | | |
| 22 | 5776 - 5977 | 201 | | | | | | | |
| 23 | 5977 - 6296 | 319 | | | L | | | | |
| 24 | 6296 - 6634 | 338 | | | | | | | |
| 25 | 6634 - 6785 | 151 | L | | | | | | |
| 26 | 6785 - 6901 | 116 | L | | | | L | | |
| 27 | 6901 - 7590 | 689 | L | | L | | L | | |
| 28 | 7590 - 7764 | 174 | L | | L | | | | |
| 29 | 7764 - 7991 | 227 | | | | | | | |
| 30 | 7991 - 8506 | 595 | | | | | | | |
| 31 | 8506 - 8888 | 302 | | | | | L | | |
| 32 | 8888 - 9076 | 188 | | | | | | | |
| 33 | 9076 - 9479 | 403 | | | | | | | |
| 34 | 9479 - 9851 | 372 | L | L | | L | | | |
| 35 | 9851 - 11215 | 1364 | | | | | | | |
| 36 | 11215 - 11642 | 427 | | L | L | | | | |
| 37 | 11642 - 11795 | 153 | | | | | | | |
| 38 | 11795 - 11962 | 168 | | | | | | | |
| 39 | 11962 - 12292 | 330 | | | | | L | | |
| 40 | 12292 - 12413 | 121 | | | | | | | |

L: Lense

۵.۳ تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی واحدهای خاکی

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی با بررسی و تحلیل آماری نتایج حاصل از مطالعات صحرایی (لوگ گمانه‌ها و آزمایش‌های صحرایی) و آزمون‌های آزمایشگاهی برآورد و تعیین شده است. مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مختلف در جدول ۳-۳ درج شده است.

جدول ۳-۳: مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل [۲]

| unit weight Dry (g/cm ³) | ν | E (kg/cm ²) | | | Φ cu (degree) | | | Ccu (kg/cm ²) | | | Φ' (degree) | | | C' (kg/cm ²) | | | واحد زمین‌شناسی مهندسی |
|--|-------|-------------------------|---------------|-----|--------------------|---------------|----|---------------------------|---------------|------|------------------|---------------|----|--------------------------|---------------|------|------------------------|
| | | مقدار پیشنهادی | فاصله اطمینان | | مقدار پیشنهادی | فاصله اطمینان | | مقدار پیشنهادی | فاصله اطمینان | | مقدار پیشنهادی | فاصله اطمینان | | مقدار پیشنهادی | فاصله اطمینان | | |
| 1.86 | 0.3 | 800 | 850 | 700 | 29 | 30 | 29 | 0.16 | 0.24 | 0.11 | 34 | 35 | 33 | 0.14 | 0.20 | 0.09 | ET-1 |
| 1.84 | 0.3 | 750 | 850 | 700 | 29 | 30 | 28 | 0.18 | 0.22 | 0.13 | 33 | 34 | 32 | 0.15 | 0.19 | 0.11 | ET-2 |
| 1.90 | 0.32 | 500 | 550 | 450 | 23 | 27 | 22 | 0.40 | 0.48 | 0.32 | 33 | 38 | 28 | 0.30 | 0.36 | 0.24 | ET-3 |
| 1.82 | 0.3 | 500 | 520 | 480 | 26 | 29 | 25 | 0.28 | 0.31 | 0.26 | 32 | 36 | 31 | 0.22 | 0.25 | 0.21 | ET-4 |
| 1.70 | 0.35 | 350 | 400 | 300 | 19 | 20 | 17 | 0.43 | 0.48 | 0.38 | 28 | 31 | 26 | 0.31 | 0.34 | 0.27 | ET-5 |
| 1.70 | 0.35 | 100 | - | - | 25 | 28 | 24 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 27 | 29 | 25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | ET-6 |

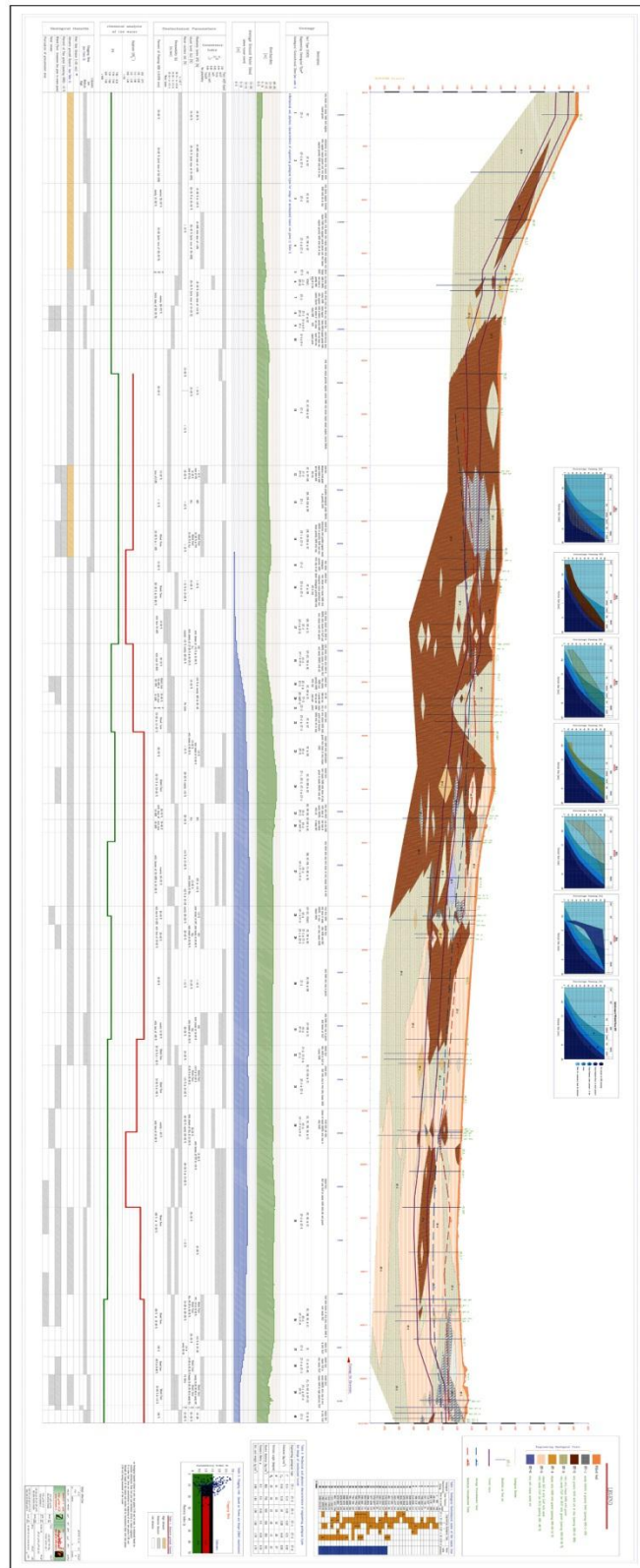
۶.۳ وضعیت آب زیرزمینی در مسیر تونل

محدوده مورد مطالعه از لحاظ هیدروژئولوژیکی در آبخوان تهران-کرج قرار دارد. در این میان آبخوان دشت تهران به سه گستره مختلف شمالی، اصلی و محلی طبقه بندی و تقسیم بندی شده است. مسیر پروژه مترو خط هفت بر روی بخش اصلی از آبخوان تهران واقع شده است.

بر اساس مطالعات هیدروژئولوژی مسیر تونل، جهت جریان آب‌های زیرزمینی در محدوده مسیر پروژه، از شمال-شمال شرق به سمت جنوب جنوب غرب می‌باشد. بر اساس متوسط سطح آب اندازه گیری شده در گمانه‌ها، ۳۵ درصد مسیر تونل بالاتر از سطح ایستابی قرار دارد که در این مناطق، ممکن است ورود آبهای منطقه غیر اشباع و فاضلاب و یا قنوات مشکلاتی را برای آبهای زیرزمینی ایجاد نماید. حدود ۶۵ درصد از مسیر تونل در زیر سطح ایستابی قرار دارد. همچنین ارتفاع بار آبی از کف تونل در حدود ۵۰ درصد مسیر تونل بیش از ۱۰ متر می‌باشد.

به لحاظ کیفیت شیمیایی آبهای زیرزمینی به طور کلی نیمه شرقی مسیر تونل از میزان هدایت الکتریکی کمتری نسبت به نیمه غربی است. روند تغییرات pH عکس تغییرات هدایت الکتریکی در نمونه‌ها می‌باشد. همچنین سولفات نمونه‌ها در نیمه غربی بیشتر از نمونه های نیمه شرقی مسیر تونل می‌باشد [۲].

شکل ۳-۶ پروفیل طولی مسیر به همراه بخش‌های مختلف واحدهای زمین‌شناسی مهندسی معرفی شده پروژه تونل مترو قطعه شرقی غربی خط ۷ تهران را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶: پروفیل طولی به همراه ویژگی زمین‌شناسی مهندسی پروژه تونل خط ۷ تهران [۲]

۷.۳ جمع بندی

در این فصل به مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل خط ۷ (بخش شرقی-غربی) اشاره شد. هدف از این مطالعات، معرفی وضعیت زمین‌شناسی مهندسی-ژئوتکنیکی تحت‌الارضی و پروفیل (برش) زمین‌شناسی مهندسی، تفکیک واحدهای خاکی بر اساس رفتار آن‌ها در حفاری با ماشین EPB، ارائه ویژگیهای ژئوتکنیکی هر یک از واحدها می‌باشد. اطلاعات این فصل در مدل‌سازی عددی به کار برده می‌شود.

فصل چهارم: انتخاب مقاطع حفاری و مدل سازی سه بعدی با

نرم افزار Plaxis3D

۱.۴ مقدمه

روش المان محدود برای تحلیل سازه‌ها در محیط‌های پیوسته قابلیت کاربرد دارند. در این روش محیط پیوسته به صورت مجموعه‌ای مرکب از تقسیمات کوچکتر بنام المان (اجزاء) نمایش داده می‌شود. هر المان توسط گره‌های اطراف خود تعریف می‌شود که ارتباط المان‌های مجاور از طریق گره‌های مشترک می‌باشد. نرم افزار (PLAXIS 3D TUNNEL (v.1.2 یک برنامه المان محدود برای تحلیل سه بعدی تغییر شکل و پایداری تونل می‌باشد. این برنامه شامل چهار قسمت ورودی داده‌ها، محاسبه، خروجی و نمودارها می‌باشد.

۱.۱.۴ معادلات اساسی تغییر شکل پیوسته در روش اجزاء محدود

معادلات استاتیکی یک محیط پیوسته بصورت زیر بیان می‌شود:

$$L^T + P = 0 \quad (1-4)$$

این معادله مشتق‌های فضایی شش مولفه تنش که در بردار σ قرار دارند به سه مولفه نیروهای حجمی که در بردار P قرار دارند مربوط می‌سازد. L^T ترانزپوزیته عملگر دیفرانسیلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

(۲-۴)

$$L^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial X} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial Y} & 0 & \frac{\partial}{\partial Z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial Y} & 0 & \frac{\partial}{\partial X} & \frac{\partial}{\partial Z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial Z} & 0 & \frac{\partial}{\partial Y} & \frac{\partial}{\partial X} \end{bmatrix}$$

به علاوه معادله تعادل، رابطه سینماتیکی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon = Lu \quad (3-4)$$

این معادله با استفاده از عملگر دیفرانسیلی L ، به تشریح ۶ مولفه کرنش ترکیب شده در بردار ε به عنوان مشتقات فضایی سه مولفه جابجایی ترکیب شده در بردار u می پردازد. پیوند بین دو رابطه (۱-۴) و (۴-۴) (۳) بوسیله رابطه مشخصه که رفتار مصالح را نشان می دهد، شکل گرفته است. روابط مشخصه یعنی روابط بین نرخ های تنش و کرنش به صورت زیر بیان می شود [۱۸]:

$$\dot{\sigma} = M\dot{\varepsilon} \quad (4-4)$$

ترکیب معادلات (۱-۴)، (۳-۴) و (۴-۴) منجر به تشکیل معادله دیفرانسیل مرتبه دوم در جابجایی u می شود. معادله تعادل را می توان بر اساس اصل تغییرات گالرکین فرمول بندی کرد.

$$\int \delta u^T (L^T \sigma + p) dV = 0 \quad (5-4)$$

در این رابطه δu تغییرات جابجایی مجاز سینماتیکی را نشان می دهد بکار بردن تئوری گرین برای انتگرال گیری جزئی جمله اول در رابطه (۵-۴) به معادله (۶-۴) منجر می شود:

$$\int \delta \varepsilon^T \sigma dV = \int \delta u^T p dV + \int \delta u^T t dS \quad (6-4)$$

معادله (۶-۴) انتگرال مرزی را هنگامی که نیروی سطحی مرزی ظاهر می شود، معرفی می نماید. سه مولفه نیروی سطحی مرزی در بردار t قرار دارند. معادله (۶-۴) معرف یک معادله کار مجازی می باشد. توسعه حالت تنش σ می تواند در یک فرآیند افزایشی بصورت زیر بیان شوند:

$$\sigma^i = \sigma^{i-1} + \Delta\sigma \quad \Delta\sigma = \int \dot{\sigma} dt \quad (7-4)$$

در این رابطه σ^i معرف حالت واقعی تنش که مجهول است و σ^{i-1} حالت قبلی تنش که معلوم است را نشان می دهد. افزایش تنش $\Delta\sigma$ نرخ تنش انتگرال گیری شده در یک دوره زمانی می باشد.

اگر معادله (۴-۶) برای حالت واقعی i در نظر گرفته شود، تنش های مجهول σ^i را با استفاده از معادله (۴-۷) می توان حذف نمود.

$$\int \delta \varepsilon^T \Delta \sigma dV = \int \delta u^T p^i dV + \int \delta u^T t^i dS - \int \delta \varepsilon^T \sigma^{i-1} dV \quad (۴-۸)$$

باید اشاره نمود که کمیت های ظاهر شده در معادلات (۴-۱) تا (۴-۸) توابعی از موقعیت در فضای سه بعدی می باشند.

مطابق روش المان محدود یک محیط پیوسته به تعدادی المان های (حجمی) تقسیم می شود. هر المان شامل تعدادی گره می باشد. هر گره دارای تعدادی درجه آزادی است که متناظر مقادیر مستقل مجهولات می باشد. با استفاده از تئوری تغییر مکان، درجات آزادی متناظر با مولفه های جابجایی هستند. در یک المان، میدان جابجایی u از مقادیر گرهی مستقل در بردار ϑ با استفاده از توابع درونیابی که در ماتریس N قرار دارند بدست می آید.

$$u = N\vartheta \quad (۴-۹)$$

توابع درونیابی در ماتریس N اغلب به عنوان توابع شکل معنی می شوند. با جایگزین کردن معادله (۴-۹) در رابطه سینیتیکی (۴-۳) رابطه زیر بدست می آید.

$$\varepsilon = LN\vartheta = B\vartheta \quad (۴-۱۰)$$

در این رابطه B ماتریس درونیابی کرنش می باشد که شامل مشتقات فضایی توابع درونیابی می باشد. حال می توان معادله (۴-۸) را دوباره به رابطه مستقل (۴-۱۱) تبدیل نمود.

$$\int (B\delta\vartheta)^T \Delta \sigma dV = \int (N\delta\vartheta)^T p^i dV + \int (N\delta\vartheta)^T t^i dS - \int (B\delta\vartheta)^T \sigma^{i-1} dV \quad (۴-۱۱)$$

با قرار دادن جابجایی های مستقل در خارج انتگرال رابطه (۴-۱۲) بدست می آید:

$$\delta\vartheta^T \int B^T \Delta\sigma dV = \delta\vartheta^T \int N^T p^i dV + \delta\vartheta^T \int N^T t^i dS - \delta\vartheta^T \int B^T \sigma^{i-1} dV \quad (12-4)$$

معادله (۱۲-۴) برای هر تغییر جابجایی مجاز سینماتیکی $\delta\vartheta^T$ بکار می‌رود. معادله را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\int B^T \Delta\sigma dV = \int N^T p^i dV + \int N^T t^i dS - \int B^T \sigma^{i-1} dV \quad (13-4)$$

معادله (۱۳-۴) یک شرط پیچیده تعادل در جمله مستقل می‌باشد. جمله اول در سمت راست به همراه دومین جمله معرف نیروهای خارجی اخیر و آخرین جمله معرف بردار عکس العمل داخلی از مرحله قبل می‌باشد. اختلاف بین بردار نیرو خارجی و بردار عکس العمل داخلی باید به وسیله تغییرات تنش $\Delta\sigma$ به تعادل برسد. رابطه بین افزایش‌های تنش و نمو‌های کرنش معمولاً غیر خطی است، در نتیجه نمو‌های کرنش عموماً به طور مستقیم محاسبه نمی‌شوند و برای ارضا شرط تعادل روش‌های تکراری عمومی برای تمام نقاط مصالح مورد نیاز می‌باشد [۱۸].

روش تکرار عمومی:

با جایگذاری رابطه بین تغییرات تنش و تغییرات کرنش $\Delta\sigma = M\Delta\varepsilon$ درون معادله تعادل (۱۳-۴) رابطه زیر تشکیل می‌شود:

$$K^i \Delta\vartheta^i = f_{ex}^i - f_{in}^{i-1} \quad (14-4)$$

در این رابطه K ماتریس سختی، $\Delta\vartheta$ بردار تغییرات جابجایی، f_{ex} بردار نیروی خارجی و f_{in} بردار عکس العمل خارجی می‌باشد. اندیس‌های بالایی i مربوط به شماره مرحله می‌باشد. با این وجود به خاطر اینکه رابطه بین نمو‌های تنش و نمو‌های کرنش در حالت کلی غیر خطی می‌باشند، ماتریس سختی نمی‌تواند پیشاپیش به طور دقیق فرمول‌بندی شود. از این رو یک روش تکرار عمومی برای ارضاء هر دو شرط تعادل و رابطه مشخصه مورد نیاز می‌باشد. روش تکرار عمومی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$K^j \delta \vartheta^j = f_{ex}^j - f_{in}^{j-1} \quad (15-4)$$

اندیس j مربوط به شماره تکرار می باشد. $\vartheta \delta$ برداری است که شامل تغییرات جزئی جابه جایی ها که در تغییرات جابه جایی مرحله i شرکت می کنند، می باشد.

$$\Delta \vartheta^i = \sum_{j=1}^n \delta \vartheta^j \quad (16-4)$$

بطوریکه n تعداد تکرارها در مرحله i را نشان می دهد. ماتریس سختی k که در معادله (15-4) استفاده شده است، بیانگر رفتار مصالح در یک روش تقریبی است. برای افزایش دقت ماتریس سختی، برای بدست آوردن تعادل در یک بازه خاص، به تعداد تکرار کمتری نیاز می باشد. در ساده ترین حالت k بیانگر پاسخ الاستیک خطی می باشد. در این حالت ماتریس سختی به صورت زیر تعریف می شود:

$$K = \int B^T D^e B dV \quad (17-4)$$

که در آن D^e ماتریس مصالح الاستیک مطابق با قانون هوک و B ماتریس درونیایی کرنش می باشد. استفاده از یک ماتریس سختی الاستیک به شرطی که سختی مصالح افزایش نیابد، حتی وقتی که از مدل های پلاستیکی ناپیوسته استفاده می شود یک روش تکراری قوی را نتیجه می دهد [18].

در مدل سازی با نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL (v.1.2) به ترتیب طرح هندسه مدل رسم می شود، سپس لایه های خاک افزوده می شود، اجزاء ساختاری افزوده می گردد، شرایط مرزی و اولیه و بعد از آن بارگذاری اعمال می شود.

برای مدل کردن لایه های خاکی یکی از اجزاء مثلثی 15 گرهی یا 6 گرهی انتخاب می شود. مثلث 15 گرهی از درون یابی مرتبه چهار تغییر مکان و انتگرال گیری عددی از 12 نقطه گاوس (نقاط تنش) بدست می آید. مثلث 6 گرهی از درون یابی مرتبه دوم و انتگرال گیری عددی از سه نقطه گاوس بدست می آید. برای مدل سازی در این تحقیق از المان 15 گرهی استفاده شده است.

۲.۴ انتخاب مقاطع طراحی

مسیر پروژه خط ۷ قطعه شرقی غربی مترو تهران با طولی بیشتر از ۱۲ کیلومتر، دارای ۱۳ ایستگاه می-باشد. مقطع تونل به صورت دایره‌ای و با قطر تمام شده (داخلی) ۸/۱۵ متر است. مشخصات کلی پروژه در جدول ۱-۴ آورده شده است.

جدول ۱-۴: مشخصات مسیر تونل پروژه خط ۷ قطعه شرقی غربی مترو تهران [۲]

| | | |
|--------------------------|---|------------------------|
| نام تونل | متروی تهران، خط ۷، قطعه شرقی-غربی | مشخصات عمومی تونل |
| کاربری تونل | مترو | |
| طول مسیر | حدود ۱۲۳۰۰ متر | |
| تعداد ایستگاهها | ۱۳ (M7, L7, K7, J7, I7, H7, G7, F7, E7, D7, C7, B7, A7) | |
| بیشترین روباره تونل | حدود ۲۵/۸ متر از تاج (در محدوده ایستگاه L7) | |
| کمترین روباره تونل | حدود ۴/۵ متر از تاج (در محدوده ایستگاه A7) | |
| مقطع تونل | دایره ای | مشخصات هندسی تونل |
| قطر حفاری تونل | ۹/۱۶۴ متر | |
| حد اکثر شیب تونل | ۳/۹ درصد (حد فاصل ایستگاههای A7 تا B7) | |
| حداقل شعاع قوس افقی مسیر | ۳۵۰ متر | |
| نوع پوشش | سگمنت بتنی تتراگونال | مشخصات پوشش نهایی تونل |
| ضخامت سگمنتها | ۳۵ سانتیمتر | |
| عرض سگمنت | ۱/۵ متر | |
| تعداد قطعات سگمنت در هر | ۱+۶ قطعه کلید+۱ قطعه سگمنت کف | |

برای مدل سازی و بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق پشت سگمنت در این پروژه ۴ مقطع انتخاب شد. دو مقطع کیلومتر ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل که به تازگی حفر شده‌اند به منظور بررسی صحت مدل سازی بوسیله ابزاربندی در بالای سطح انتخاب شدند. دو مقطع کیلومتر ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل که آنالیز حساسیت فشار سینه کار و تزریق بر روی این دو مقطع انجام گرفته است به دلایل زیر برای مدل سازی انتخاب شده‌اند:

-به علت اینکه بیشتر سینه کار مسیر تونل در ماسه شنی به همراه سیلت و رس (ET-2) قرار دارد و ماشین حفار بیشتر با این سینه کار مواجه می شود شرایط زمین شناسی در هر دو مقطع مشابه می باشد با این تفاوت که روباره در مقطع کیلومتر ۵+۲۰۰، ۱۱ متر ($H < 2D$) و در کیلومتر ۸+۲۰۰، ۲۱ متر ($H > 2D$) است.

-در نظر گرفتن سطح آب زیر زمینی، در هر دو مقطع تونل در زیر سطح آب زیر زمینی قرار گرفته است.
-در ضمن تونل در این دو مقطع حفر نشده است. بنابراین نتایج و پیش بینی های مدل سازی قابل کاربرد می باشد.

۱.۲.۴ هندسه تونل

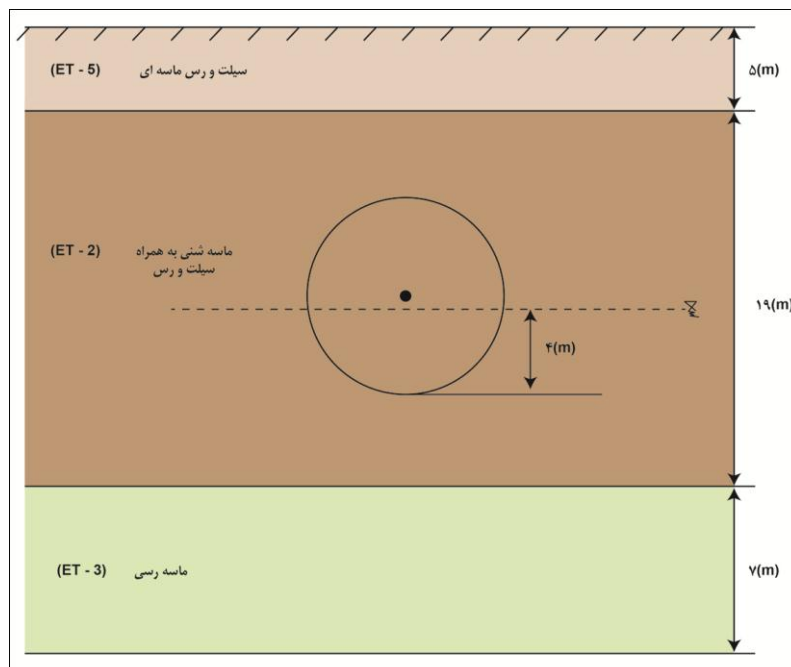
خط هفت متروی تهران (قطعه شرقی - غربی) به وسیله ماشین حفاری EPB به طول ۱۰ متر، قطر ۹/۱۶۵ متر و طول کلی ۹۰ متر مطابق شکل (۴-۱) حفاری می شود. مدل سازی فشار سینه کار و فشار تزریق برای ۴ مقطع در موقعیت های ۱۰+۵۵۰، ۱۰+۵۰۰، ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰ تونل انجام شده است. نحوه انتخاب مقاطع طراحی همانطور که اشاره شد با توجه به میزان روباره، شرایط آب زیر زمینی و شرایط زمین شناسی می باشد. ابعاد مدل در راستای محور X، ۴D (قطر تونل) و در راستای محور Z (راستای تونل) بزرگتر از ۵D و در راستای محور Y با توجه به میزان روباره و لایه ها در نظر گرفته شده اند.

۱.۱.۲.۴ هندسه و مدل سازی کیلومتر ۵+۲۰۰

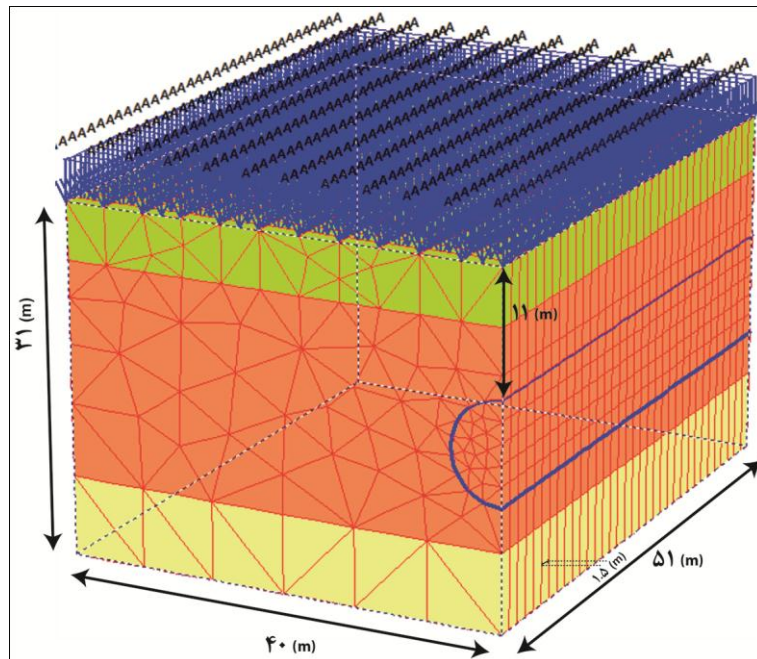
شکل ۴-۲ لایه بندی، شرایط زمین شناسی، سطح آب، موقعیت تونل کیلومتر ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران را نمایش می دهد. در این مقطع میزان روباره (۱۱ متر) از ۲ برابر قطر تونل کوچکتر است ($H < 2D$). شکل ۴-۳ هندسه مدل سازی شده این مقطع را نشان می دهد.



شکل ۴-۱: ماشین حفاری فشار تعادلی زمین قطعه شرقی غربی تونل خط هفت متروی تهران [۲]



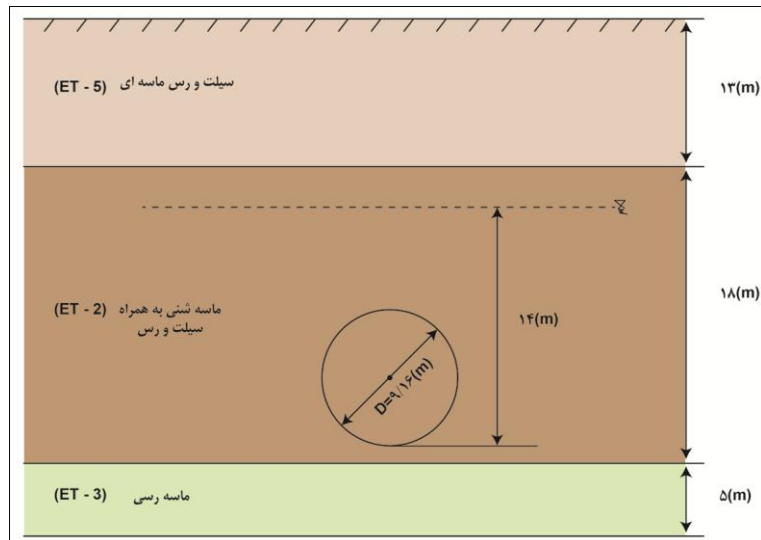
شکل ۴-۲: لایه بندی و شرایط زمین شناسی کیلومتر ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران



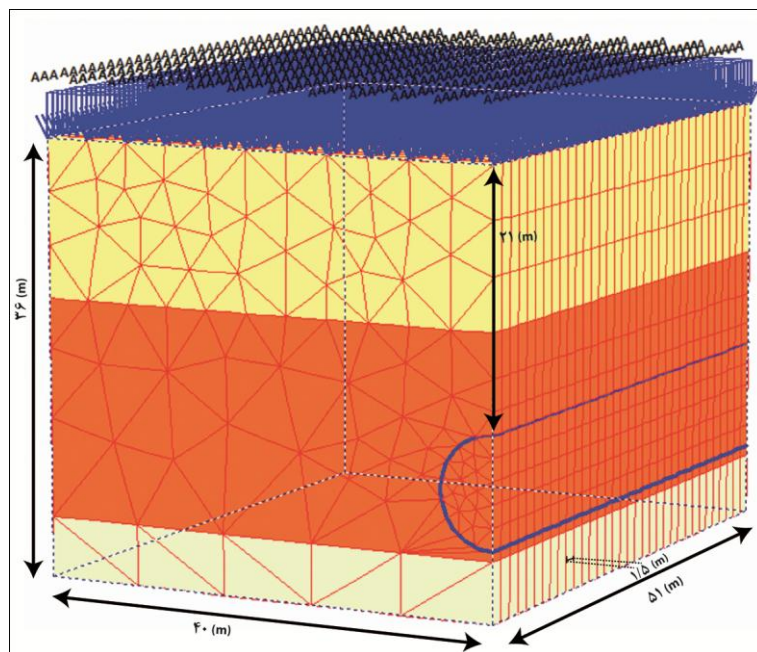
شکل ۴-۳: هندسه مدل سازی شده کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران

۲.۱.۲.۴ هندسه و مدل سازی کیلومتر ۸+۲۰۰

شکل ۴-۴ لایه بندی، شرایط زمین شناسی، سطح آب، موقعیت تونل کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران را نمایش می دهد. در این مقطع میزان روباره (۲۱ متر) از ۲ برابر قطر تونل بزرگتر است ($H > 2D$). شکل ۴-۵ هندسه مدل سازی شده این مقطع را نشان می دهد.



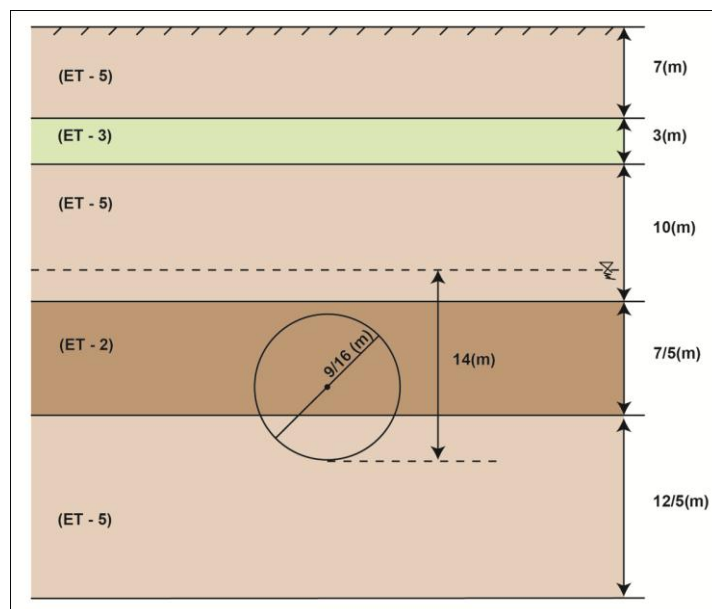
شکل ۴-۴: لایه بندی و شرایط زمین شناسی کیلومتراژ ۲۰۰+۸ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران



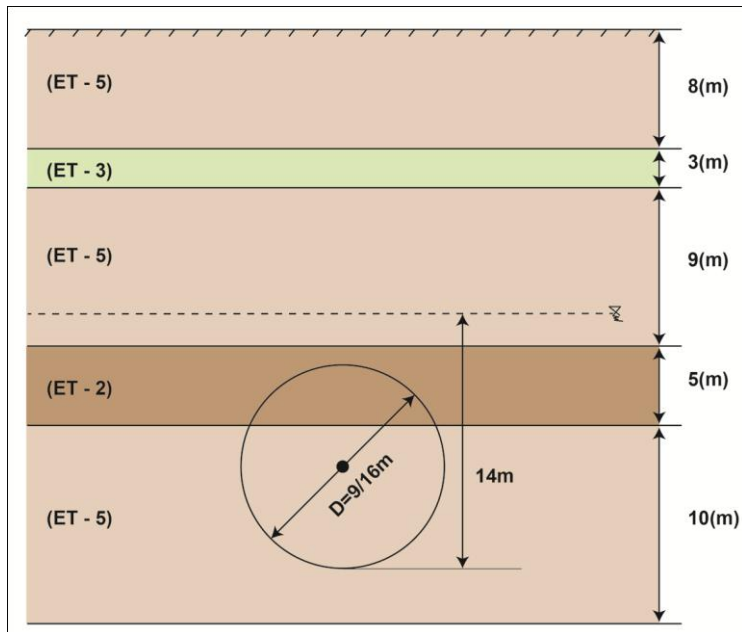
شکل ۴-۵: هندسه مدل سازی شده کیلومتراژ ۲۰۰+۸ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران

۳.۱.۲.۴ هندسه و مدل سازی کیلومتر ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰

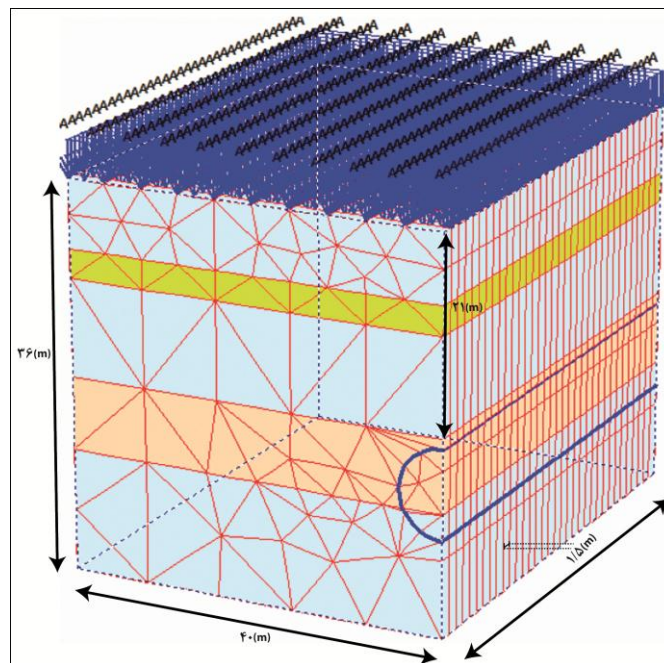
شکل ۶-۴ و ۷-۴ لایه بندی، شرایط زمین شناسی، سطح آب، موقعیت تونل کیلومتر ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران را نمایش می دهد. نحوه مدل سازی سه بعدی این دو مقطع نیز در اشکال ۸-۴ و ۹-۴ نشان داده شده است. در این مقطع روباره از ۲ برابر قطر تونل بزرگتر است (H>2D). به منظور اعتبار سنجی مدل سازی در این دو مقطع در سطح زمین ابزار بندی شده است.



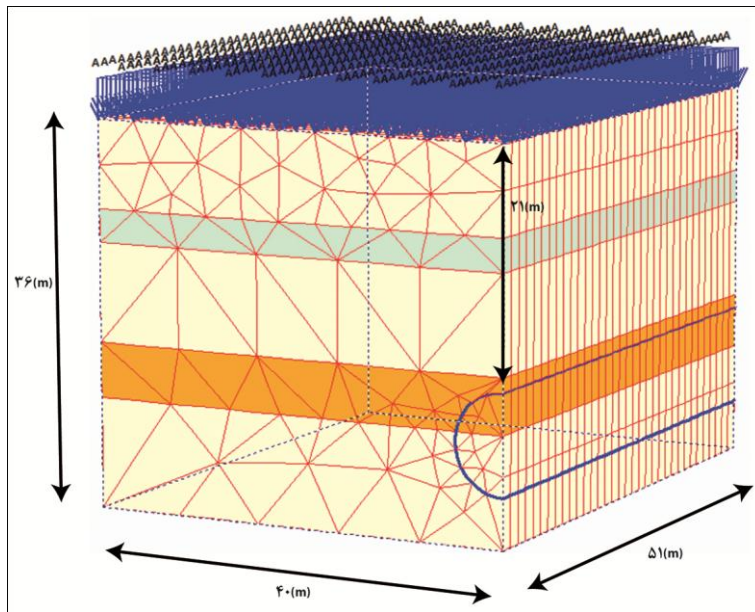
شکل ۶-۴: لایه بندی و شرایط زمین شناسی کیلومتر ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران



شکل ۴-۷: لایه بندی و شرایط زمین شناسی کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران



شکل ۴-۸: هندسه مدل سازی شده کیلومتراژ ۱۰+۵۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران



شکل ۹-۴: هندسه مدل سازی شده کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران

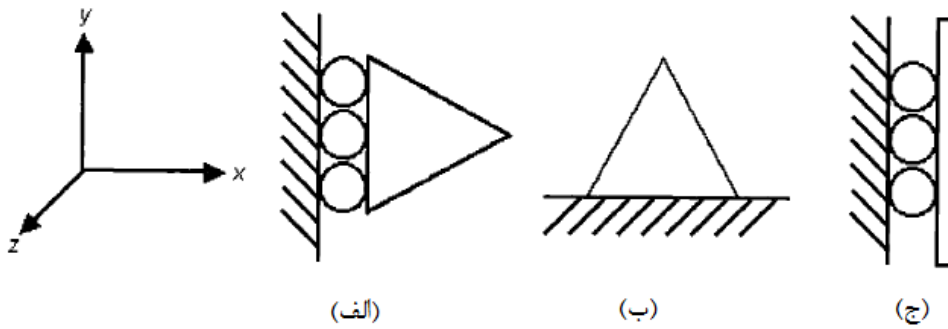
۲.۲.۴ شرایط مرزی

شرایط مرزی یک مدل عددی، شامل متغیرهای میدان نظیر تنش و جابجایی است. برنامه با انتخاب شرایط مرزی، مرزهای پایین و طرفین مدل را ثابت می‌کند.

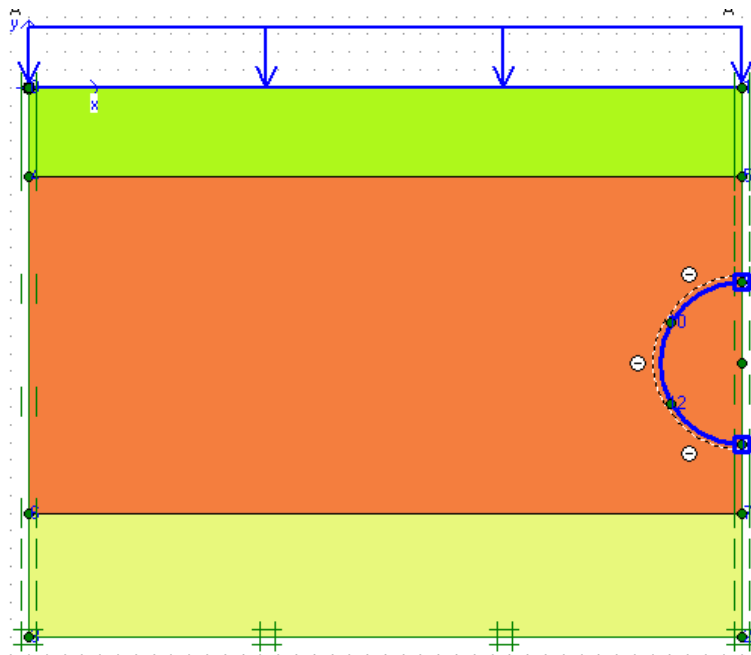
نحوه اعمال شرایط مرزی بدین شکل است که در مرز هندسه و در راستای محور X به شکل تکیه گاه مفصلی عمل می‌کند بنابراین $U_x=0$ است (شکل ۱۰-۴ الف).

در راستای محور Y مرز هندسه همانند تکیه گاه گیر دار عمل می‌کند بنابراین $U_x=U_y=0$ است (شکل ۱۰-۴ ب)

برای صفحات ساختاری (مانند سپر) شرایط مرزی همانند تکیه گاه غلتکی عمل می‌کند (شکل ۱۰-۴ ج).



شکل ۴-۱۰: شرایط مرزی برای (الف) محور عمودی هندسه (ب) محور افقی هندسه (ج) صفحات ساختاری (سپهر) [۱۴]



شکل ۴-۱۱: نحوه اعمال شرایط مرزی در نرم افزار PLAXIS3D tunnel

۳.۲.۴ خصوصیات مواد

خصوصیات مواد شامل گروه‌های خاک، ماشین حفاری است. پارامترهای طراحی خاک در جدول (۳-۳) از فصل قبل با مدل رفتاری موهر-کلمب و خصوصیات ماشین EPB و سگمنت تونل خط ۷ قطعه شرقی غربی به ترتیب در جدول (۲-۴) و (۳-۴) آورده شده است^۱. مدل سازی تزریق پشت سگمنت فشار اعمالی به دیواره تونل و با در نظر گرفتن وزن مخصوص دوغاب ۱۲ کیلونیوتن بر متر مکعب صورت گرفته است.

جدول ۲-۴: خصوصیات ماشین EPB خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران [۷]

| واحد | مقدار | علائم | پارامترهای ماشین EPB |
|----------------------|---------|----------|----------------------|
| - | الاستیک | نوع مواد | خصوصیات |
| MN/m | ۱۰۰۰۰ | EA | صلبیت محوری |
| MN m ² /m | ۵۰ | EI | صلبیت خمشی |
| m | ۰/۲۴۵ | d | ضخامت |
| kN/m/m | ۴۸/۸ | w | وزن |
| - | ۰/۲ | v | نسبت پواسون |

^۱ اطلاعات مورد نیاز نرم افزار از روی مشخصات ماشین EPB در حال حفاری در پروژه خط ۷ تهران ساخت شرکت NFM بدست آمده است.

جدول ۴-۳: خصوصیات سگمنت خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران [۷]

| پارامترهای سگمنت | علائم | مقدار | واحد |
|------------------|----------|---------|----------------------|
| خصوصیات | نوع مواد | الاستیک | - |
| صلبیت محوری | EA | ۱۰۰۰۰ | MN/m |
| صلبیت خمشی | EI | ۱۰۲ | MN m ² /m |
| ضخامت | d | ۰/۳۵۰ | m |
| وزن | w | ۸/۴ | kN/m/m |
| نسبت پواسون | ν | ۰/۲ | - |

۴.۲.۴ مش بندی

وقتی مدل هندسی به طور کامل رسم و مشخصات مصالح به توده‌ها و اجزای سازه‌ای تخصیص داده شد، هندسه مدل به المان‌های محدود به منظور انجام محاسبات المان محدود، تقسیم می‌شود. نرم افزار ابتدا مدل هندسی را به صورت دو بعدی و سپس به صورت سه بعدی مش بندی می‌کند. نوع اصلی المان در مش، المان مثلثی ۱۵ گرهی است. ابعاد هندسه در کیلومترهای ۱۰+۵۵۰، ۱۰+۵۰۰، ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰ تونل به ترتیب ۴۰×۳۵×۵۱، ۴۰×۴۰×۵۱، ۴۰×۳۶×۵۱، ۴۰×۳۱×۵۱ می باشند (محور Z در راستای تونل است).

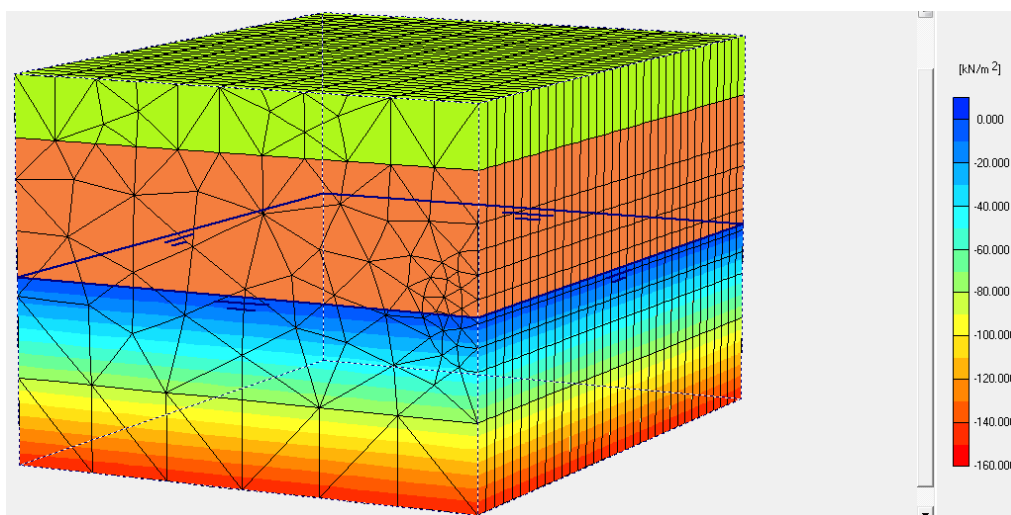
۵.۲.۴ شرایط اولیه

با رسم هندسه مدل و مش بندی، با در نظر گرفتن شتاب ثقل برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه و اعمال تنش برجا و شرایط اولیه شامل فشار آب مبنی بر سطح آب زیرزمینی و تنش مؤثر مبنی بر ضریب فشار جانبی خاک ایجاد می‌گردد. جدول (۴-۴) ارتفاع سطح آب از کف تونل، میزان روباره، فشار منفذی آب و تنش مؤثر خاک در کف مدل را نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۲ فشار منفذی آب و شکل ۴-۱۳ تنش مؤثر را

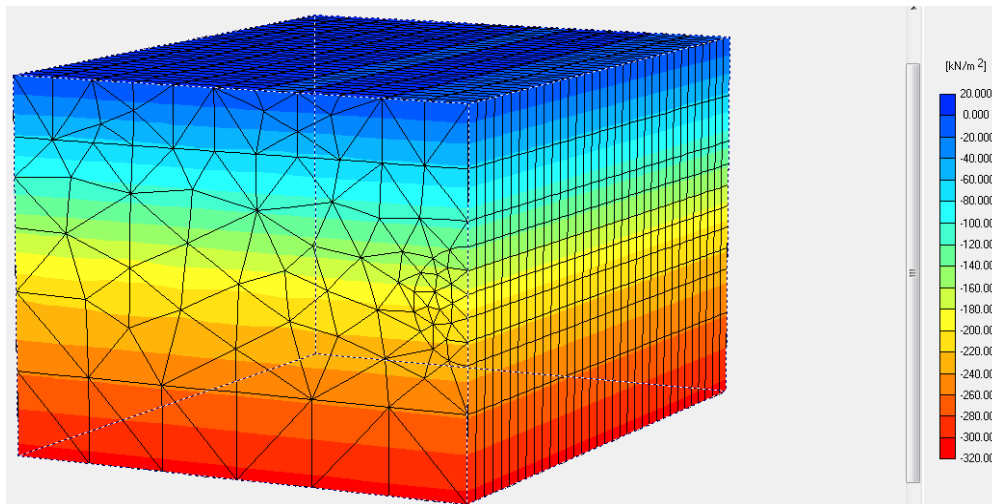
در مدل نشان می دهد. به دلیل اینکه مقاطعی انتخابی در زیر خیابان قرار دارند به تمامی مدل ها بار ترافیکی معادل ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع به سطح زمین اعمال شده است.

جدول ۴-۴: شرایط اولیه مقاطع مدل سازی شده تونل خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران

| کیلومتر از تونل | ارتفاع آب از کف تونل (m) | روباره (m) | فشار منفذی آب در کف مدل (kPa) | تنش موثر خاک در کف مدل (kPa) |
|-----------------|--------------------------|------------|-------------------------------|------------------------------|
| ۱۰+۵۵۰ | ۱۴ | ۲۱/۲۵ | ۱۹۰ | ۳۶۰ |
| ۱۰+۵۰۰ | ۱۴ | ۲۱ | ۲۴۰ | ۴۰۰ |
| ۸+۲۰۰ | ۱۴ | ۲۱ | ۲۰۰ | ۳۴۰ |
| ۵+۲۰۰ | ۴ | ۱۱ | ۱۶۰ | ۳۲۰ |



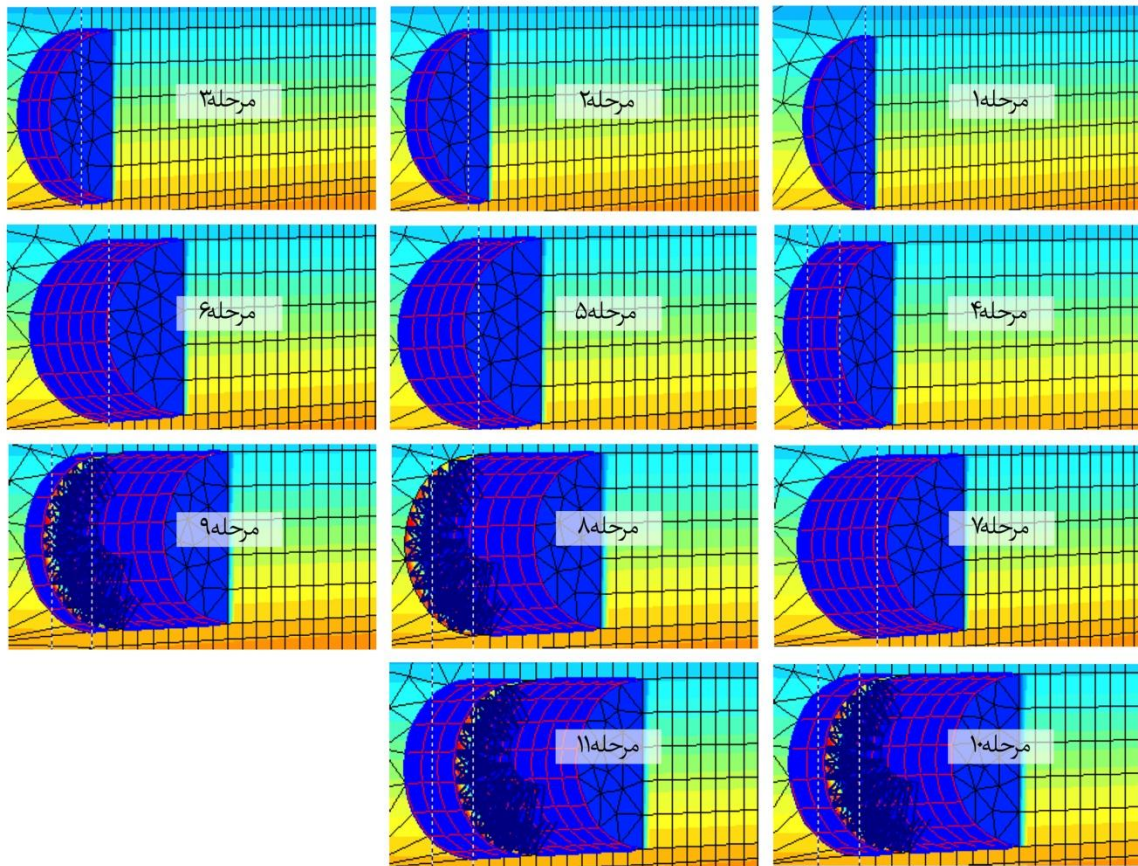
شکل ۴-۱۲: فشار منفذی آب محاسبه شده توسط نرم افزار برای کیلومتر ۵+۲۰۰



شکل ۴-۱۳: تنش موثر خاک محاسبه شده توسط نرم افزار برای کیلومتر ۲۰۰+۵

۳.۴ محاسبات

در عملیات مهندسی یک پروژه به چند فاز تقسیم می شود. به طور مشابه یک عمل محاسبه در PLAXIS نیز به چند فاز تقسیم می شود. در این تحقیق بر روی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق بر روی نشست سطح زمین متمرکز شده است. شکل (۴-۱۴) مراحل مدل سازی و حفاری برای ۱۶/۵ متر حفاری تونل را نشان می دهد. فاز اول محاسبات بعد از اینکه جابجایی ها صفر در نظر گرفته شد مدل به تعادل اولیه می رسد. با توجه به شکل (۴-۱۴) و با در نظر گرفتن گام حفاری ۱/۵ متر محاسبات صورت می گیرد.



شکل ۴-۱۴: نحوه مدل سازی ماشین حفار مکانیزه، فشار سینه کار، فشار تزریق و پوشش بتنی بعد از ۱۶/۵ متر حفاری

این مراحل عبارتند از:

مرحله اول:

- صفر کردن جابجایی‌ها

- غیر فعال کردن مقطع حفاری (با این عمل تونل حفر می‌شود)

- فعال کردن المان سپر ماشین حفاری

- فعال کردن بار سطحی (بار سطحی ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است)

- اعمال فشار سینه کار در جلو مقطع حفر شده

-اعمال درصد فضای خالی در طول مقطع حفاری: به دلیل اینکه در این نوع تونلسازی خاک بیش حفاری می شود (بدین معنی که ناحیه مقطع عرضی که بوسیله پوشش نهایی اشغال می شود همواره کمتر از ناحیه حفاری شده است) با توجه به قطر حفاری و قطر نهایی تونل مقدار درصد اضافه حفاری ۰/۴۲ محاسبه شده است. با توجه به اینکه طول سپر ۱۰/۵ متر است با در نظر گرفتن حالت مخروطی سپر و گام حفاری ۱/۵ متر در ۷ مرحله سپر کاملاً وارد تونل می شود بنابراین مقدار ۰/۴۲ به ۷ قسمت تقسیم شده و به مدل وارد شده است. به عبارتی دیگر در این مرحله مقدار ۰/۰۶ به مدل اعمال شده است.

-اعمال فشار منفذی آب: در حالت مقطع حفاری شده تونل باید خالی از آب باشد که در این مرحله با غیر فعال کردن آب داخل تونل، تونل خشک می شود و فشار منفذی جدیدی به مدل اعمال می شود.

-انجام محاسبات: محاسبات با استفاده از روش مرحله‌ای و در حالت Load advancement ultimate level در نظر گرفته شده است. این روش موقعی به محاسبات خاتمه می دهد که گسیختگی خاک اتفاق بیافتد. به عنوان پیش فرض تعداد Additional steps به ۲۵۰ تنظیم شده است.

مرحله دوم:

- غیر فعال کردن مقطع حفاری دوم: در این مرحله ۳ متر حفاری انجام شده است.

-فعال کردن المان سپر ماشین حفاری در مقطع دوم در این مرحله طول سپر ۳ متر است.

-فعال کردن بار سطحی (بار سطحی ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است)

-اعمال فشار سینه کار در جلو مقطع حفر شده

-اعمال درصد اضافه حفاری ۰/۰۶ در مقطع دوم و ۰/۱۲ به مقطع اول: این حالت باعث می شود حالت

مخروطی بودن سپر به درستی مدل شود.

-اعمال فشار منفذی آب: در این مرحله مقطع اول و دوم که حفر شده اند خالی از آب می شود

-انجام محاسبات

بنابراین تا مرحله ۷ که تونل ۱۰/۵ متر حفر شود مدل سازی به همین شکل صورت می گیرد با این تفاوت که در هر مرحله باید میزان درصد اضافه حفاری و مخروطی بودن سپر به درستی مدل شود به عنوان مثال در مرحله هفتم در مقطع ۷ (یعنی از ۹ متری تا ۱۰/۵ متری تونل) درصد فضای خالی ۰/۰۶، در مقطع ۶ (یعنی از ۷/۵ متر تا ۹ متری) مقدار ۰/۱۲، در مقطع ۵ مقدار ۰/۱۸، در مقطع ۴ مقدار ۰/۲۴۰، در مقطع ۳ مقدار ۰/۳۰، در مقطع ۲ مقدار ۰/۳۶ و در مقطع اول مقدار ۰/۴۲ به مدل اعمال می شود.

مرحله هشتم: در این مرحله سپر ۱/۵ متر به جلو می رود.

-غیر فعال کردن مقطع حفاری هشتم: در این مرحله ۱۲ متر حفاری انجام شده است.

-غیر فعال کردن المان سپر در مقطع اول

-فعال کردن المان سپر ماشین حفاری در مقطع هشتم در این مرحله طول سپر ۱۰/۵ متر است و پشت سپر باید عملیات فشار تزریق صورت گیرد.

-فعال کردن بار سطحی (بار سطحی ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است)

-اعمال فشار سینه کار در جلو مقطع حفر شده

-اعمال درصد اضافه حفاری ۰/۰۶ تا ۰/۴۲ از مقطع هشتم تا دوم: این حالت باعث می شود حالت مخروطی بودن سپر به درستی مدل شود.

-اعمال فشار منفذی آب: در این مرحله مقطع اول تا هشتم که حفر شده اند خالی از آب می شود و فشار تزریق مدل سازی می شود

-انجام محاسبات

مرحله نهم: در این مرحله علاوه بر پیشروی عملیات فشار تزریق و سگمنت گذاری صورت می گیرد.

غیر فعال کردن مقطع حفاری نهم: در این مرحله ۱۳/۵ متر حفاری انجام شده است.

-غیر فعال کردن المان سپر در مقطع دوم و فعال کردن المان سگمنت در مقطع اول

-فعال کردن المان سپر ماشین حفاری در مقطع نهم در این مرحله طول سپر ۱۰/۵ متر است و پشت سپر باید عملیات فشار تزریق صورت گیرد و در مقطع اول سگمنت فعال می شود.

-فعال کردن بار سطحی (بار سطحی ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است)

-اعمال فشار سینه کار در جلو مقطع حفر شده

-اعمال درصد اضافه حفاری ۰/۰۶ تا ۰/۴۲ از مقطع نهم تا سوم: این حالت باعث می شود حالت مخروطی بودن سپر به درستی مدل شود. در این حالت اگر فشار تزریق به مدل اعمال نشود با توجه به فاصله ۱۵/۷ سانتی متری سگمنت و دیواره تونل درصد فضای خالی بین دیواره و سگمنت ۳/۳۷۵ به مدل اعمال می شود و در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار باشد با توجه به مغزه های گرفته شده از دیواره تونل فضای ۶ الی ۷ سانتی متری از ۱۵/۷ سانتی متر فضای خالی باقی می ماند که در این حالت درصد فضای خالی میزان ۰/۶۵ محاسبه و به مدل اعمال شده است. در سایر حالات درصد فضای خالی دیواره و سگمنت صفر در نظر گرفته شده است.

-اعمال فشار منفذی آب: در این مرحله مقطع اول تا نهم که حفر شده اند خالی از آب می شود و در مقطع دوم (یعنی ۱/۵ متر تا ۳ متر تونل فشار تزریق اعمال می شود.

-انجام محاسبات

بدین ترتیب و با در نظر گرفتن نکات گفته شده تا مرحله ۱۱ که در این حالت ۱۶/۵ متر از تونل حفر شده است، مدل سازی صورت گرفته است.

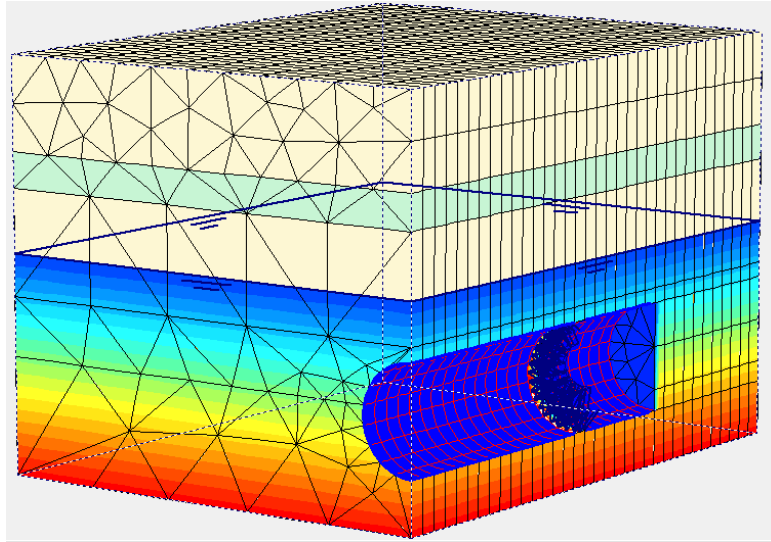
برای مقاطع کیلومتراژ های ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل که حفاری آن صورت نگرفته است ۴ نوع فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق در ۵ حالت صورت گرفته است که در مجموع ۲۰ مدل جداگانه برای هر مقطع ساخته شده است. فشار سینه کار در ۴ حالت: (۱) فشار اولیه (۷۵ کیلو پاسکال که با استفاده از نرم افزار محاسبه شده است) (۲) ۱/۵ برابر فشار اولیه (۱۱۲/۵ کیلو پاسکال) (۳) دو برابر فشار اولیه (۱۵۰ کیلو پاسکال) (۴) چهار برابر فشار اولیه (۳۰۰ کیلو پاسکال) در نظر گرفته شده است. سینه کار به وسیله سیال (بنتونیت یا فوم) با وزن مخصوص ۱۶ کیلو نیوتن بر متر مکعب نگهداری می شود. شیب فشار بین تاج و کف تونل در داخل اتافک حفاری ۱۶ کیلو پاسکال بر متر است.

فشار تزریق در ۵ حالت: (۱) بدون اعمال تزریق (فشار تزریق برابر صفر) (۲) فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۳) فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار (۴) فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار (۵) فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار.

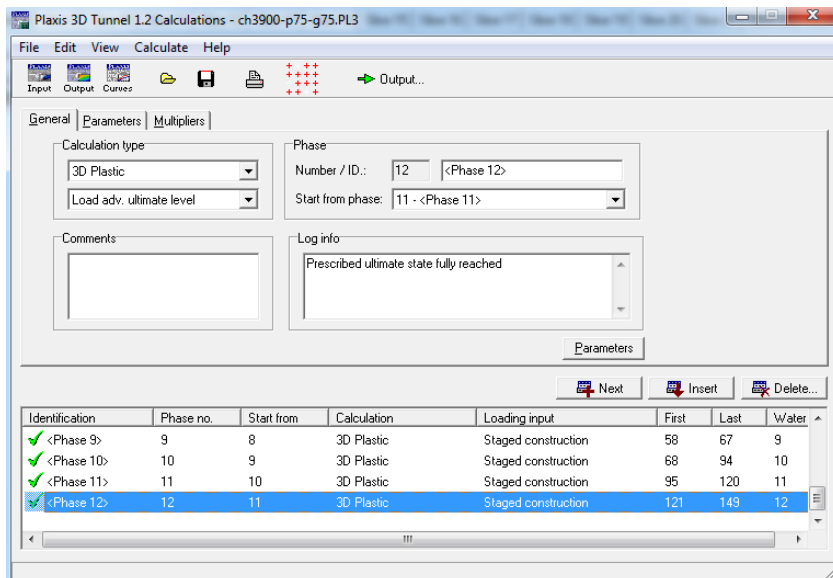
شیب فشار تزریق پشت سگمنت ۱۲ کیلو پاسکال بر متر اعمال شده است.

برای کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ به دلیل اینکه نقطه ای از سطح زمین بعد از ۳۰ متر گذر ماشین ابزار بندی و جابجایی آن برداشت شده است، ۳۰ متر حفاری و کیلومتراژ ۱۰+۵۰۰ نیز به همین علت ۳۴/۵ متر

حفاری شده است. شکل ۴-۱۵ نحوه حفر تونل برای کیلومتر ۱۰+۵۵۰ را نشان می دهد شکل ۴-۱۶ پایان فاز محاسباتی را نشان می دهد.



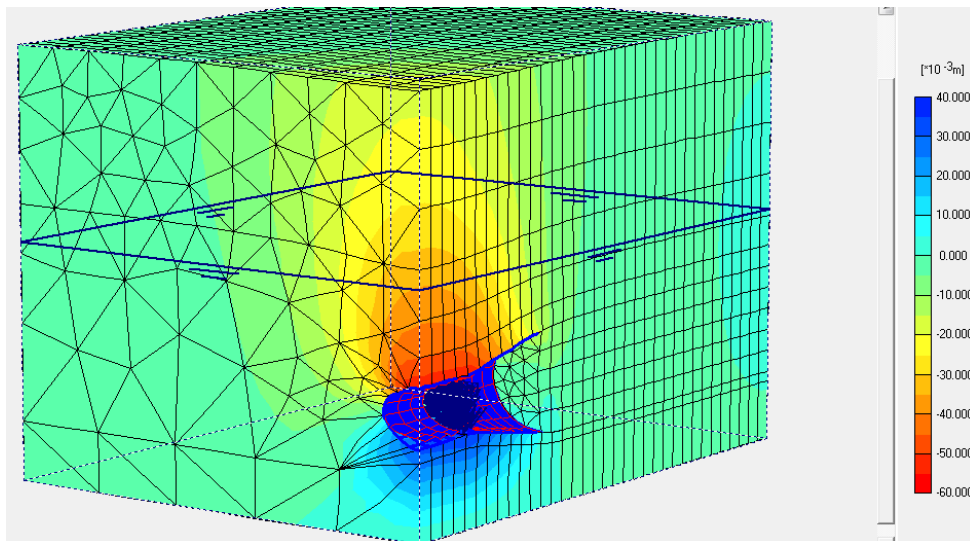
شکل ۴-۱۵: نحوه مدل سازی تونل سازی مکانیزه کیلومتر ۱۰+۵۵۰ خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران بعد از ۳۴/۵ متر حفاری



شکل ۴-۱۶: پایان فاز محاسباتی

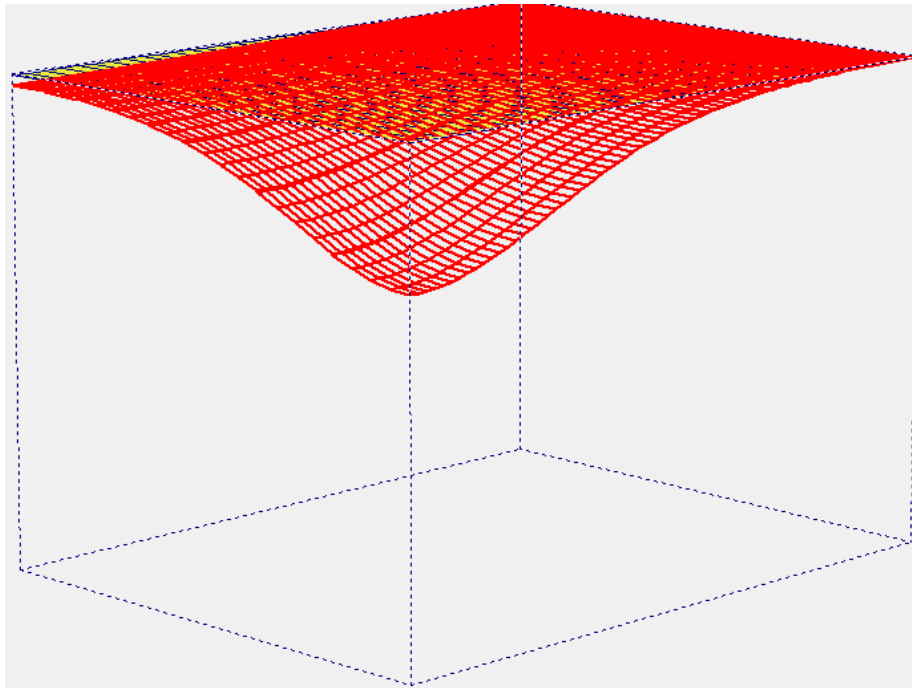
۴.۴ خروجی

کمیت‌های اصلی خروجی محاسبه المان محدود، تغییر مکان در گره‌ها و تنش‌ها در نقاط می‌باشند. وقتی مدل المان محدود شامل المان‌های سازه ای باشد نیروهای سازه ای در این المان محاسبه می‌شوند. در این مطالعه هدف بررسی نشست و جابجایی سطح زمین است بنابراین خروجی‌ها از نوع جابجایی می‌باشد. شکل ۴-۱۷ خروجی مدل سازی کیلومتراژ ۸+۲۰۰ تونل را نشان می‌دهد. در مقطعی که از سطح زمین زده شده است پروفیل طولی و عرضی نشست سطح زمین این مدل در شکل ۴-۱۸ دیده می‌شود.



شکل ۴-۱۷: کنتورهای جابجایی زمین در اثر حفر با ماشین مکانیزه کیلومتراژ ۸+۲۰۰ تونل بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار

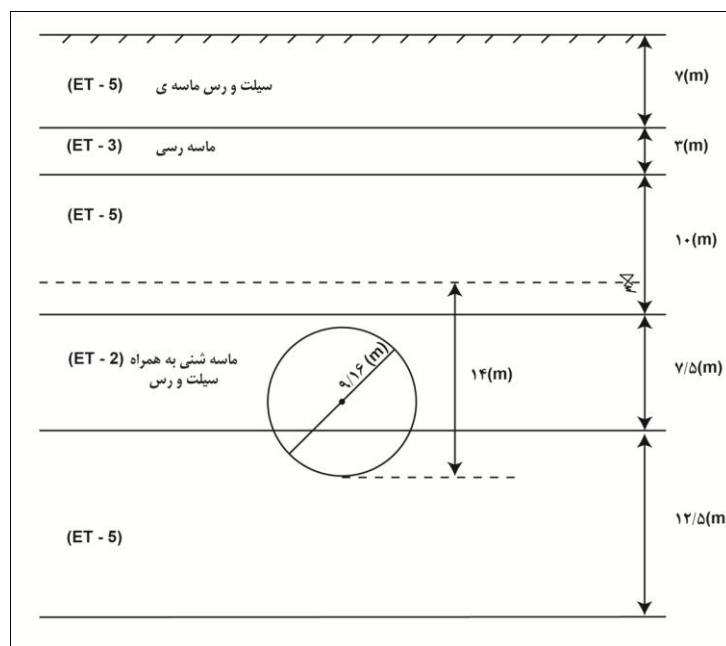
۱۱۲/۵ کیلو پاسکال و فشار تزریق ۱۶۲/۵ کیلو پاسکال



شکل ۴-۱۸: پروفیل طولی و عرضی نشست سطح زمین کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال و فشار تزریق ۱۶۲/۵ کیلو پاسکال با ماکزیمم نشست ۱۸ میلی متر

۵.۴ اعتبار سنجی مدل سازی

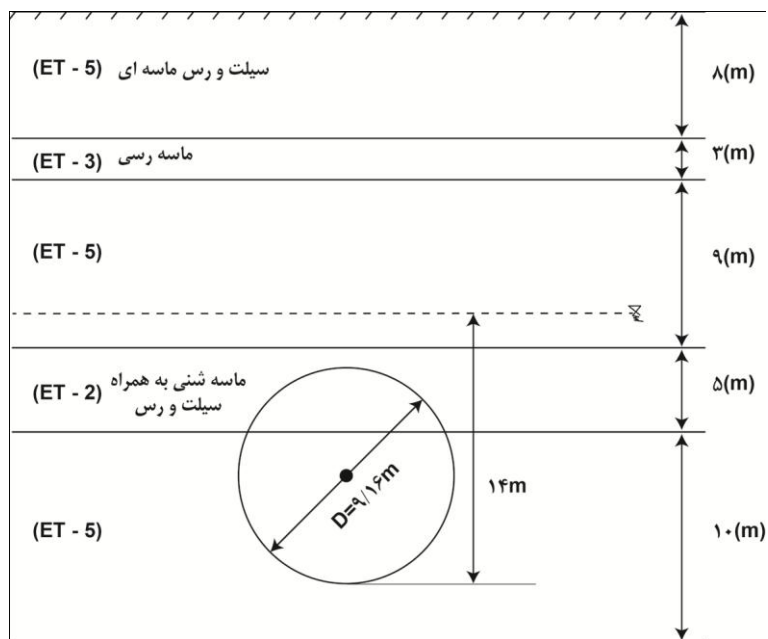
به منظور اعتبار سنجی و بررسی صحت روند مدل سازی عددی سه بعدی اجزاء محدود در دو مقطع تراز یابی ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران بر روی سطح زمین ابزار بندی صورت گرفته است. اشکال ۴-۱۹ و ۴-۲۰ مقطع زمین شناسی این قسمت از تونل را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۹: مقطع زمین شناسی تراز یابی کیلومتراژ ۱۰+۵۰۰ تونل مترو خط ۷ تهران

در این دو مقطع روباره ۲۱ متر و سطح آب از کف تونل ۱۴ متر ثبت شده است. در مقطع کیلومتراژ ۱۰+۵۰۰ تونل با فشار سینه کار ۶۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۱۰ کیلوپاسکال حفر شده است. نشست در این مقطع بعد از ۳۰ متر عبور ماشین حفار مکانیزه ۵/۵ میلی متر توسط ابزار جابجایی سنج ثبت شده است.

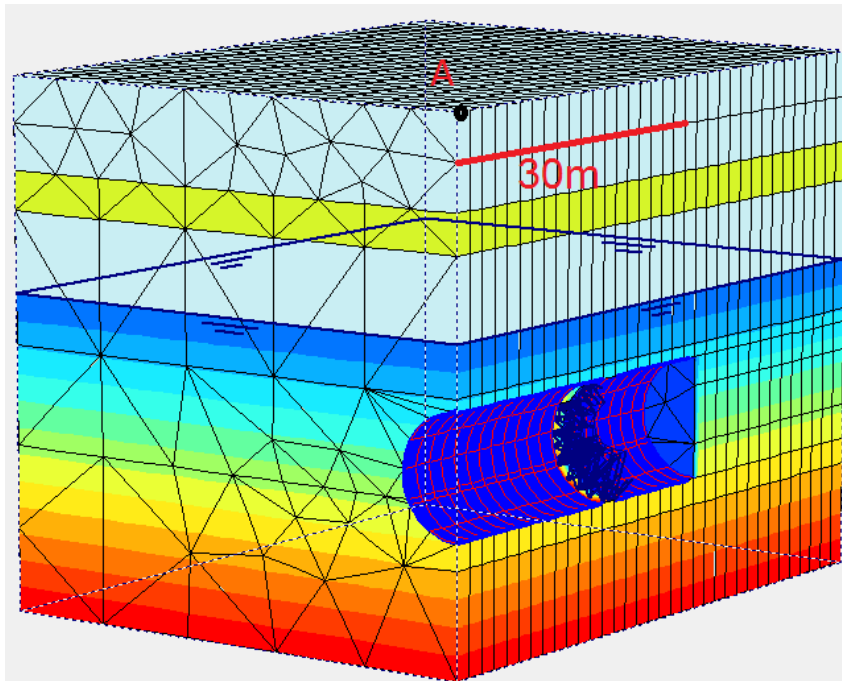
در مقطع کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ تونل با فشار سینه کار ۷۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۲۰ کیلوپاسکال حفر شده است. نشست در این مقطع بعد از ۳۵ متر عبور ماشین حفار مکانیزه ۴/۵ میلی متر توسط ابزار جابجایی سنج ثبت شده است.



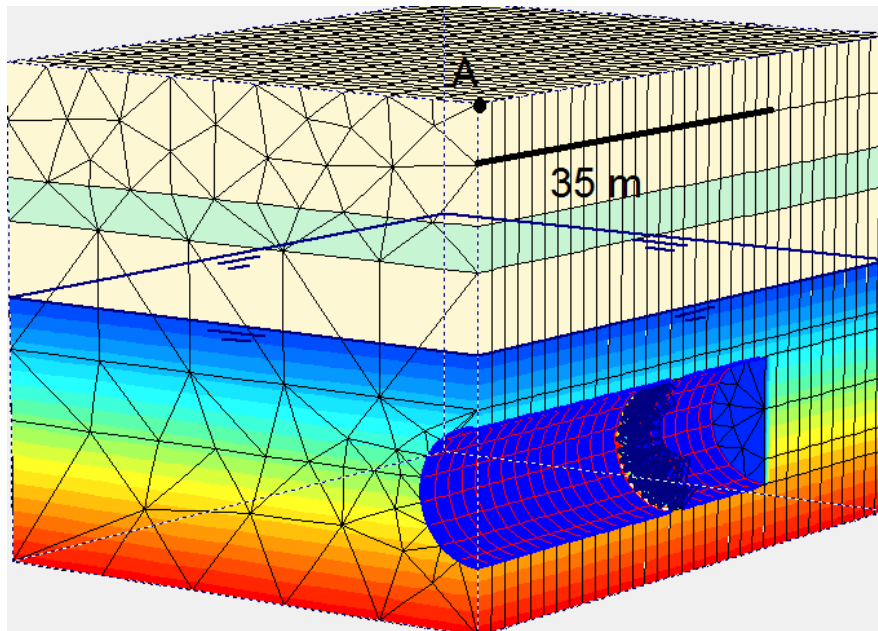
شکل ۴-۲۰: مقطع زمین شناسی تراز یابی کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ تونل مترو خط ۷ تهران

برای مدل سازی عددی این مقاطع نقطه A در سطح زمین و به فاصله ۳۰ متری از سینه کار برای کیلومتراژ ۱۰+۵۰۰ و به فاصله ۳۵ متری سینه کار برای کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ جهت پایش نشست انتخاب شد (شکل ۴-۲۱ و ۴-۲۲).

نحوه مدل سازی ماشین حفار مکانیزه، پوشش بتنی، درصد فضای خالی، فشار سینه کار و فشار تزریق، مش بندی این دو مقطع دقیقاً همانند کیلومتراژ های ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰ می باشد.

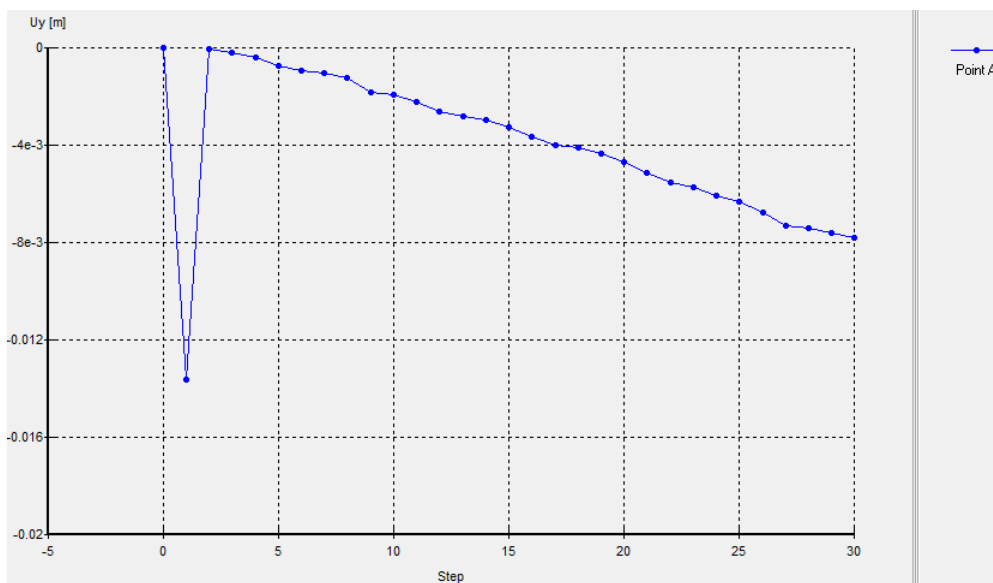


شکل ۴-۲۱: نحوه مونیتورینگ نقطه A بعد از ۳۰ متر گذر شیلد کیلومتراژ ۱۰+۵۰۰



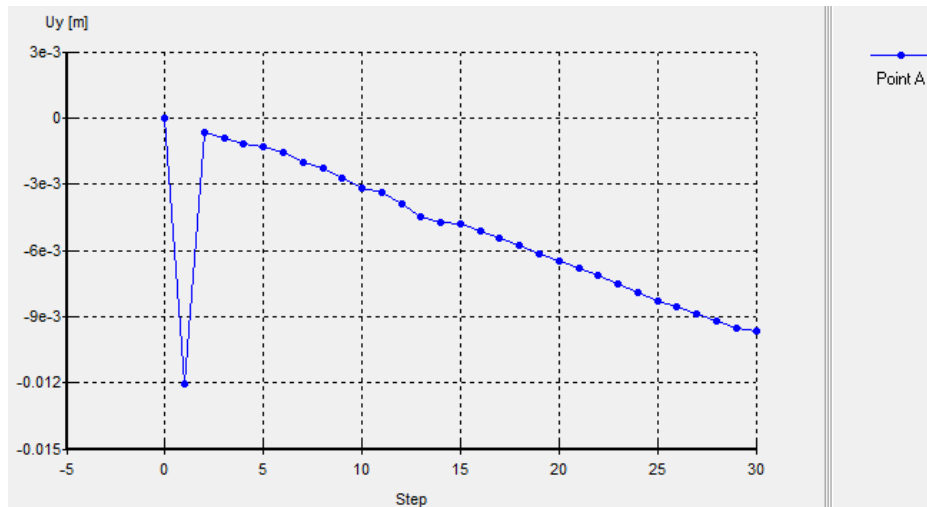
شکل ۴-۲۲: نحوه مونیتورینگ نقطه A بعد از ۳۰ متر گذر شیلد کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰

شکل ۴-۲۳ منحنی جابجایی نقطه A در برابر گام زمانی کیلومتراژ ۵۰۰+۱۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران را نشان می دهد. با توجه به این منحنی جابجایی نقطه A از صفر تا ۸ میلی متر متغیر است. با در نظر گرفتن گام زمانی و نشست ۵/۵ میلی متر ثبت شده توسط جابجایی سنج مشاهده می شود مدل سازی بخوبی صورت گرفته است.

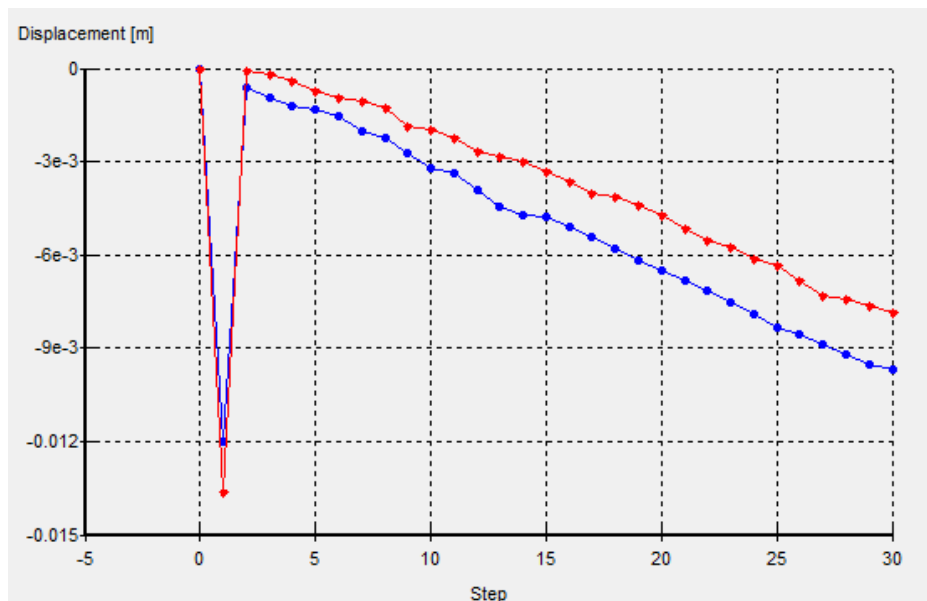


شکل ۴-۲۳: منحنی جابجایی قائم نقطه A کیلومتراژ ۵۰۰+۱۰

همچنین شکل ۴-۲۴ منحنی جابجایی نقطه A در برابر گام زمانی کیلومتراژ ۵۵۰+۱۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران را نشان می دهد. با توجه به این منحنی جابجایی نقطه A از صفر تا ۱۰ میلی متر متغیر است. با در نظر گرفتن گام زمانی و نشست ۴/۵ میلی متر ثبت شده توسط جابجایی سنج مشاهده می شود مدل سازی بخوبی صورت گرفته است. شکل ۴-۲۵ هر دو منحنی جابجایی نقطه A در دو مقطع را نشان می دهد. با توجه به اینکه این دو مقطع دارای شرایط یکسانی هستند مشاهده می شود با افزایش فشار سینه کار و فشار تزریق نشست کاهش یافته است.



شکل ۴-۲۴: منحنی جابجایی قائم نقطه A کیلومتر ۱۰+۵۵۰



شکل ۴-۲۵: منحنی جابجایی قائم نقطه A برای هر دو مقطع کیلومتر ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰

علت پرش ناگهانی نمودار اشکال ۴-۲۳ تا ۴-۲۵ به روش حل در نرم افزار مرتبط است و مدل باید به تعادل برسد.

۶.۴ جمع بندی

در این فصل در ابتدا به معرفی روش اجزاء محدود و نحوه حل معادلات پرداخته شد. بعد از آن به معرفی نرم افزار PLAXIS3D Tunnel و به نحوه مدل سازی اشاره شد. با تمرکز بر روی چهار مقطع ترازیبی کیلومتراژ های ۵+۲۰۰، ۸+۲۰۰، ۱۰+۵۰۰ و ۱۰+۵۵۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران و مدل سازی سه بعدی و روش عددی اجزاء محدود (Plaxis3D Tunnel) به بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق بر روی نشست سطح زمین پرداخته شد. برای مدل سازی و بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق پشت سگمنت در این پروژه ۴ مقطع انتخاب شد. دو مقطع کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل که به تازگی حفر شده اند به منظور بررسی صحت مدل سازی بوسیله ابزاربندی در بالای سطح انتخاب شدند. دو مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل که آنالیز حساسیت فشار سینه کار و تزریق بر روی این دو مقطع انجام گرفته است به دلیل شرایط زمین شناسی، سطح آب زیر زمینی و ... انتخاب شده اند. نتایج حاصل از ابزاربندی و مدل سازی عددی نشان می دهند مدل سازی به خوبی صورت گرفته است.

فصل پنجم: کلیاتی در رابطه با نحوه محاسبه فشار سینه کار و

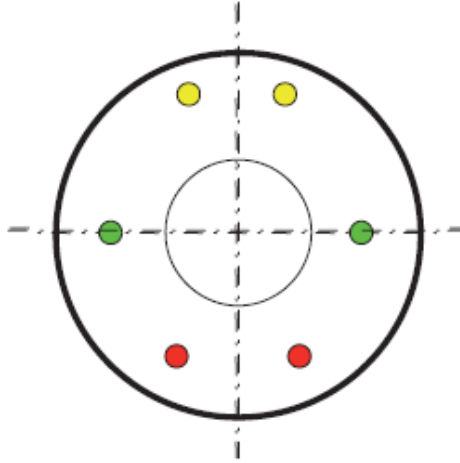
فشار تزریق

۱.۵ مقدمه

در بحث حفاری تونل های شهری در محیط های خاکی یکی از موارد مهم جهت کنترل پایداری زمین در سینه کار تونل و همچنین در سطح زمین و جلوگیری از نشست، بحث فشار سینه کار می باشد. این فشار با کنترل مواد خروجی از محفظه حفاری دستگاه و میزان پیشروی دستگاه تامین می شود. به طور کلی در ماشین های EPB مواد حفاری شده توسط کله حفار در محفظه حفاری جمع شده و در نهایت از قسمت تحتانی آن با استفاده از یک نوار نقاله مارپیچ بیرون برده می شود. در این روش حفاری، با توجه به سست بودن سینه کار تونل ها در محیط های خاکی و احتمال هجوم خاک و آب به درون تونل و در نتیجه نشست سطح زمین و تبعات ناشی از آن، باید به مواد حفاری شده و مواد خارج شده از دستگاه تعادل ایجاد کرد که این کار با ایجاد فشار در سینه کار انجام می شود. در این راستا باید توجه داشت که افزایش بیش از حد فشار سینه کار منجر به بالا زدگی زمین و آسیب رساندن یا تخریب سازه های سطحی می شود.

طراحی های فشار سینه کار باید همواره در طول پروژه مد نظر قرار بگیرد در محفظه حفاری تعدادی فشارسنج وجود دارد که فشار خاک درون محفظه حفاری را در نمایشگر اتاقک کاربر نشان می دهند. اپراتور دستگاه با مشاهده افزایش یا کاهش فشار با تنظیم نرخ پیشروی یا چرخش نقاله مارپیچ فشار را به مقدار تعیین شده نزدیک می کند و بدیهی است که این نوسانات فشار به صورت موج سینوسی می باشد.

شکل (۵-۱) سنسورهای فشار سنج روی دیوار فشار را نشان می دهد.



شکل ۵-۱: محل سنسورهای فشار روی دیوار فشار [۱]

بطور کلی روش های تعیین فشار سینه کار را می توان به موارد زیر تقسیم کرد:

(۱). روش های تجربی

(۲). روش های تحلیلی

(۳). روش های عددی

در روش های تجربی بر اساس مشاهدات انجام شده در حین حفاری تونل، رابطه‌ای تجربی بین یک یا چند پارامتر و مقدار فشار سینه کار برقرار می‌شود. این روش‌ها بسیار ساده بوده و در طراحی های فاز یک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش‌های تحلیلی در عین سادگی، پارامترهای متعددی در تعیین فشار سینه کار لحاظ می‌شود. روش‌های تحلیل به دو دسته تعادل حدی و روش های مبتنی بر تئوری مرز بالای و پایین پلاستیک تقسیم می‌شوند. روش‌های تحلیل اعداد دقیق و مناسبی برای طراحی‌های مرحله تکمیلی در اختیار طراح قرار می‌دهد. در روش سوم از روش های عددی برای تعیین فشار سینه کار استفاده می‌کنند.

تونل‌های حفاری شده به وسیله سپر دوغابی و فشار تعادلی در نواحی شهر از سگمنت‌های پیش ساخته برای پوشش نگهداری استفاده می‌شود. سگمنت‌ها در پایان هر سیکل حفاری درون شیلد پشتی نصب می‌کنند، یعنی در منطقه‌ای که جک‌های هیدرولیکی فشار را برای پیشروی اعمال می‌کند، در پشت رینگ فضای خالی به وجود می‌آید. این فضای خالی باید با فشار مناسبی از دوغاب پر شود. فشار تزریق در هر پروژه معمولاً با روش تجربی بدست می‌آید و میزان آن از فشار سینه کار بیشتر است.

در این تحقیق که آنالیز حساسیت فشار سینه کار و فشار تزریق بر روی دو مقطع کیلومترهای ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ و همچنین کیلومترهای ۱۰+۵۰۰ و ۱۰+۵۵۰ (در این دو مقطع ابزار بندی شده است) تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران صورت گرفته است فشار اولیه سینه کار با استفاده از روش عددی در نرم افزار Plaxis بکار گرفته شده است.

۲.۵ روش‌های برآورد فشار سینه کار و فشار تزریق

۱.۲.۵ کلیاتی در مورد فشار سینه کار

روش‌های محاسبه فشار با توجه به شرایط خاک به روش‌های تجربی و تحلیلی (آنالیز حدی و تعادل حدی) و عددی مطابق جدول (۵-۱) تقسیم‌بندی می‌شوند. اساس روش‌های تعادل حدی از روش ترزاقی گرفته شده است. روش ترزاقی به دو روش روباره (برای عمق‌های کم) و روش سیلو (برای عمق زیاد) تقسیم می‌شود. در بین روش‌های تحلیلی روش‌های اتکینسون و پاتز، کروس و محکم پارامتر عمق را لحاظ نکرده و فشار در این روش‌ها به قطر تونل، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک بستگی دارد [۱].

جدول ۵-۱: روش‌های محاسبه فشار نگهداری با توجه به شرایط ژئوتکنیکی [۱۹]

| توضیحات | روش‌ها | | | | |
|---|------------------------------------|-----------------------------|------------|-----------------|------------------|
| خاک چسبنده و غیر چسبنده | ترزاقی | روش تجربی | | | |
| | COB | | | | |
| | یاماکازی | | | | |
| به فشار هیدرواستاتیکی سطح زمین $30 kpa$ اضافه می کنند | | | | | |
| نرم افزار Plaxis3D, FLAC3D | تفاضل محدود و اجزاء محدود | روش عددی | | | |
| خاک چسبنده و زهکشی نشده | برومز و بنمارک | آنالیز عددی | روش تحلیلی | | |
| | خاک غیر چسبنده برای تونل بدون پوشش | | | اتکینسون و پاتز | |
| | خاک چسبنده | | | دیویس | |
| | خاک غیر چسبنده | | | لکا و دورمبو | |
| | خاک چسبنده و غیر چسبنده | میوریمما | | تبادل عددی | |
| | | خاک چسبنده و غیر چسبنده | | | کروس |
| | | خاک چسبنده و غیر چسبنده | | | محکم |
| | | خاک غیر چسبنده و کمی چسبنده | | | جانسکز و استاینر |
| | | خاک غیر چسبنده | | | کواری و آنگونستا |
| | | خاک غیر چسبنده | | | برویر |

۲.۲.۵ کلیاتی در مورد فشار تزریق

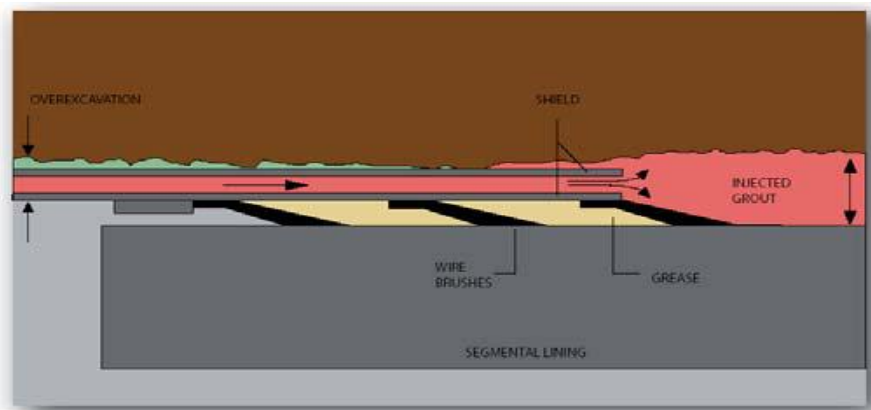
پس از رینگ گذاری جهت ایجاد یک توده مستحکم، چسبندگی بیشتر مابین سگمنت‌ها و خاک و همچنین کاهش نشست عملیات تزریق انجام می‌پذیرد. در پشت رینگ فضای خالی به وجود می‌آید. این فضاهای خالی توسط سه عامل اصلی زیر می‌توان دانست.

- مخروطی شدن شیلد برای پیشروی آسانتر ماشین است (تفاوت بین قطر قسمت جلویی و عقبی)

- تفاوت بین قطر شیلد و سگمنت‌های پیش ساخته نصب شده

- برش اضافی لازم برای حرکت ماشین

نصب صحیح سگمنت‌ها و انتقال یکنواخت بار بر روی سگمنت‌ها و پر شدن فضای خالی بین سگمنت و خاک، نشست سطح زمین را کنترل می‌کند، پرکردن معمولاً با تزریق دوغاب سیمان انجام می‌گیرد. یک واشر (برس سیمی در سه ردیف) از ورود دوغاب سیمان از شکاف بین سگمنت و سپر جلوگیری می‌کند. به علاوه دوغاب سیمان مستقیماً در داخل سگمنت (دومین مرحله تزریق) تزریق می‌شود. دوغاب سیمان مخلوطی از سیمان، دانه‌های ریز، آب و دیگر افزودنی‌ها است. در تونل‌زنی مکانیزه بحث بر این است که چگونه فضای خالی بین مقطع حفاری شده و قسمت بالای سپر در طول سپر پر می‌شوند. واضح است که در ماشین سپر دوغابی به طور طبیعی دوغاب بنتونیت با فشاری که به اتافک حفاری اعمال کرده از آن خارج شده، و فضای خالی را پر می‌کند. در ماشین‌های EPB فقط فوم، هوا و آب فضای خالی را پر می‌کنند، بدون اینکه هیچ گونه نگهداری موثری صورت گیرد. در بعضی از پروژه‌ها، با یک سیستم خاصی فضای خالی را با تزریق دوغاب بنتونیت پر می‌کنند، مقدار این فشار بستگی به فشار نگهداری سینه کار دارد، که هنوز این روش جنبه آزمایشی داشته است. شکل زیر نحوه پر شدن فضای پشت سگمنت را نشان می‌دهد. [۱]



شکل ۵-۲: پر شدن فضای خالی پشت سگمنت [۱]

- در حالت فشار تزریق باید به اندازه کافی بالا باشد تا جریان مواد دوغاب و پایداری را تامین کند.
- آببندی تونل از طریق نصب نوار آببند (gasket) پیرامون سگمنت ها تامین می شود و اتصال میان قطعات سگمنت از طریق بولت ارتباطی که باعث به هم فشردن قطعات سگمنت می شود، برقرار می گردد. رینگ سگمنتی داخل شیلد انتهایی نصب و با پیشروی دستگاه از شیلد خارج می شود که در این زمان برای جلوگیری از نشست آن در اثر وارد شدن وزن گنتری های سیستم پشتیبان، لازم است فضای خالی زیر سگمنت کف و پشت سگمنت دیواره و سقف به طور کامل پر گردد [۲۰].
- مهمترین اهداف تزریق پرکننده پشت پوشش بتنی عبارتند از [۲۰]:
- ایجاد بستری یکنواخت حول پوشش تونل برای انتقال یکنواخت بار سنگ از طرف زمین به پوشش و جلوگیری از فشارهای نقطه ای بر روی پوشش سگمنت
 - تحکیم و تثبیت رینگ پوشش بتنی جهت جلوگیری از خروج آن ها از امتداد واقعی خود در هنگام اعمال تراست و پیشروی TBM و همچنین یکپارچه کردن پوشش سگمنتی (که از قطعات مجزا ساخته شده) جهت افزایش قابلیت باربری پوشش بتنی در برابر بارهای وارده در زمان اجرا و بهره برداری
 - جلوگیری از نشست زمین بخصوص در مناطق با روباره کم و خاک ضعیف
 - کمک به آببندی تونل (البته کار اصلی آببندی تونل را گسکت های نصب شده در پیرامون سگمنت ها انجام می دهند) و در نتیجه کاهش هزینه های آبکشی و هزینه تمیزکاری داخل تونل (به دلیل کاهش حجم آب ورودی به تونل)
 - ایجاد لایه محافظ جهت جلوگیری از فرسایش پوشش نهایی در اثر جریان آب پشت پوشش سگمنتی
- برای رسیدن به این نتایج، تزریق باید تا حد امکان بلافاصله پس از نصب پوشش بتنی و به طور کامل اجرا گردد.

روش‌های مختلفی جهت پر کردن فضای خالی پشت سگمنت‌ها در حفاری بوسیله TBM وجود دارد. به طور کلی تزریق پشت پوشش سگمنتی تونل به دو روش تزریق طولی از انتهای سپر همزمان با پیشروی دستگاه و تزریق بصورت شعاعی از داخل سگمنت تقسیم بندی می‌شود. روش اول که تزریق طولی از انتهای سپر می‌باشد، بیشتر در مورد حفاری زمین‌های سست و توده سنگ‌های ریزشی و یا محیط‌های شهری که مسئله نشست سطح زمین از اهمیت بالایی برخوردار است، کاربرد پیدا می‌کند که بلافاصله پس از خارج شدن رینگ سگمنتی از داخل شیلد انتهایی دستگاه، قبل از ریزش مصالح داخل فضای خالی پشت سگمنت و پر شدن آن و یا نشست زمین این فضا بایستی پر گردد. بدین منظور، لوله‌های داخل شیلد انتهایی (Tail shield) و سایر تجهیزات لازم در دستگاه تعبیه می‌شود. اما در مورد اکثر تونل‌های سنگی و حفاری در زمین‌های سخت تر، روش دوم بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد که مصالح از طریق سوراخ‌های تعبیه شده در سگمنت تزریق می‌گردد [۲۰].

در یک تقسیم بندی دیگر، روش‌های تزریق پرکننده پشت سگمنت را می‌توان بر حسب نوع و ترکیب مصالح مورد استفاده، تقسیم بندی نمود. جهت انجام عملیات تزریق پرکننده پشت سگمنت، ترکیب‌های مختلفی از مصالح می‌توان بکار برد که نسبت و نوع این مواد بسته به اهداف و کاربرد تزریق، در دسترس بودن مصالح و اقتصادی بودن عملیات دارد. تزریق جداگانه شن نخودی و دوغاب و یا تزریق ملات دو روش متداول پر کردن فضای پشت سگمنت‌ها می‌باشند [۲۱].

پر کردن فضای پشت سگمنت با تزریق با مشکلاتی نیز همراه است. در مواردی که تزریق جداگانه شن نخودی و دوغاب استفاده می‌شود. بدین صورت که در مرحله اول شن نخودی فضای پشت سگمنت را پر کرده و در مرحله دوم با تزریق دوغاب، خلل و فرج داخل مصالح شن نخودی پر خواهد شد. تجربیات نشان می‌دهد عملیات تزریق و پر کردن فضای پشت سگمنت‌ها بخصوص زیر سگمنت کف و در سقف با مشکلاتی مواجه است، برخی از این مشکلات عبارتند از:

مانع بودن سگمنت فیدر جهت تزریق زیر سگمنت کف: پس از نصب و خارج شدن رینگ سگمنتی از شیلد انتهایی، با پیشروی ماشین، صفحه تحویل دهنده سگمنت به سگمنت فیدر روی منفذ تعبیه شده داخل سگمنت کف جهت تزریق را پوشانده و عملاً دسترسی به آن غیر ممکن می‌گردد. در این حالت باید از سوراخ‌های سگمنت‌های مجاور جهت تزریق زیر سگمنت کف استفاده نمود، در این صورت نیز با توجه به نحوه حرکت دانه‌های سنگی جهت رسیدن به کف تونل و گرفته شدن انرژی جنبشی آن‌ها در اثر برخورد با دیواره‌ها و اصطکاک داخلی مصالح شن نخودی، پر شدگی کامل زیر سگمنت کف میسر نخواهد شد [۲۱].

نشست سگمنت کف: پس از پیشروی دستگاه و رسیدن گنتری یک به این محل، در اثر وارد شدن وزن این گنتری، به دلیل پایه دار نبودن سگمنت کف، در صورت پر نشدن زیر سگمنت کف، نشست این سگمنت و در نتیجه کل رینگ اتفاق خواهد افتاد و سگمنت کف به زمین خواهد چسبید. در این حالت دیگر زیر سگمنت کف امکان تزریق وجود نخواهد داشت [۲۱].

نا کارآمدی سیستم آببندی پوشش و نشت دوغاب: مهمترین مسئله‌ای که در اثر پر نشدن زیر سگمنت کف بلافاصله پس از خارج شدن از رینگ اتفاق می‌افتد، افتادگی سگمنت و ایجاد پله‌گی بین دو رینگ مجاور است که باعث نا کارآمد شدن گسکت و به هم خوردن سیستم آببندی سگمنت‌ها (در اثر تغییر موقعیت گسکت‌ها نسبت به هم) می‌شود که علاوه بر ورود حجم بالای آب به داخل تونل و مشکلات اجرائی حاصل از آن، باعث می‌شود دوغاب تزریق شده پشت سگمنت به داخل تونل نشت کرده و پرت بالایی داشته باشد.

پر نشدن فضای پشت سگمنت‌های سقف و کف: در مواقعی که فضای پشت سگمنت‌ها کاملاً پر نشده در تاج تونل فضای خالی بین سگمنت و زمین بوجود می‌آید. مشکلات بوجود آمده در اثر پر شدگی ناقص فضای پشت پوشش سگمنتی تونل بسیار زیاد می‌باشد. یکی از این مشکلات انتقال غیر یکنواخت

بار به پوشش تونل می باشد که در اثر همگرایی خاک در بر گیرنده به علت پر نبودن فضای پشت دیواره ها و خالی بودن سقف (و کف)، تنها تنش های افقی زمین به سگمنت منتقل می شود. این امر ممکن است باعث شود رینگ سگمندی از حالت دایره ای خود خارج شده و به سمت بیضی شدن برود. نیروی وارده به رینگ سگمنت و تغییر شکل آن منجر به تنش های کششی در سگمنت ها می شود [۲۱].

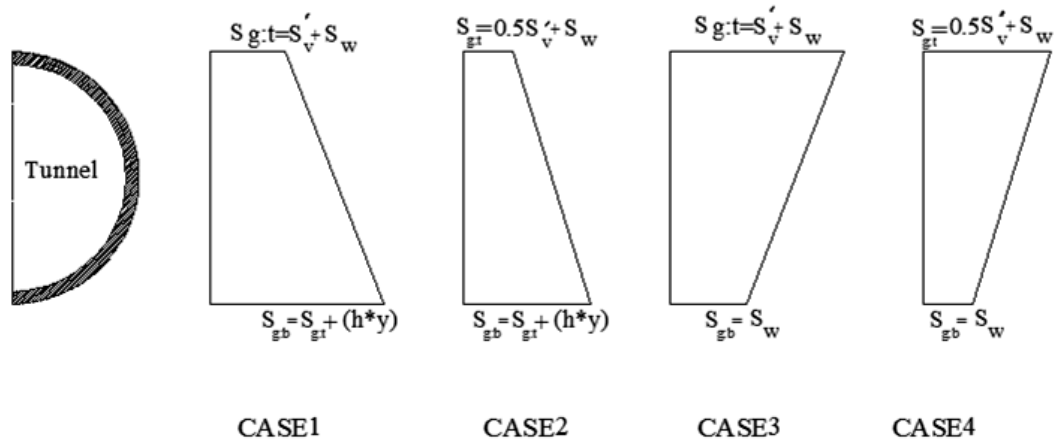
برای تزریق ۴ حالت تجربی در نظر گرفته شده که عبارتند از

حالت ۱: این حالت وضعیتی که ملات از تمام محیط TBM تزریق شود را مدل می کند. به علاوه ملات نسبتاً رقیق می شود. فشار قائم در بالای مدل تقریباً معادل فشار خاک σ_v می باشد.

حالت ۲: این حالت هم وضعیتی که ملات در تمام محیط TBM تزریق شود را مدل می کند. تراز فشار حداقل انتخاب شده برای این مدل همانند حالت ۱ است. با فرض فشار افقی خاک k_0 تقریباً برابر ۰/۵، فشار ملات در بالای مدل تقریباً معادلی فشار افقی خاک σ_h می باشد.

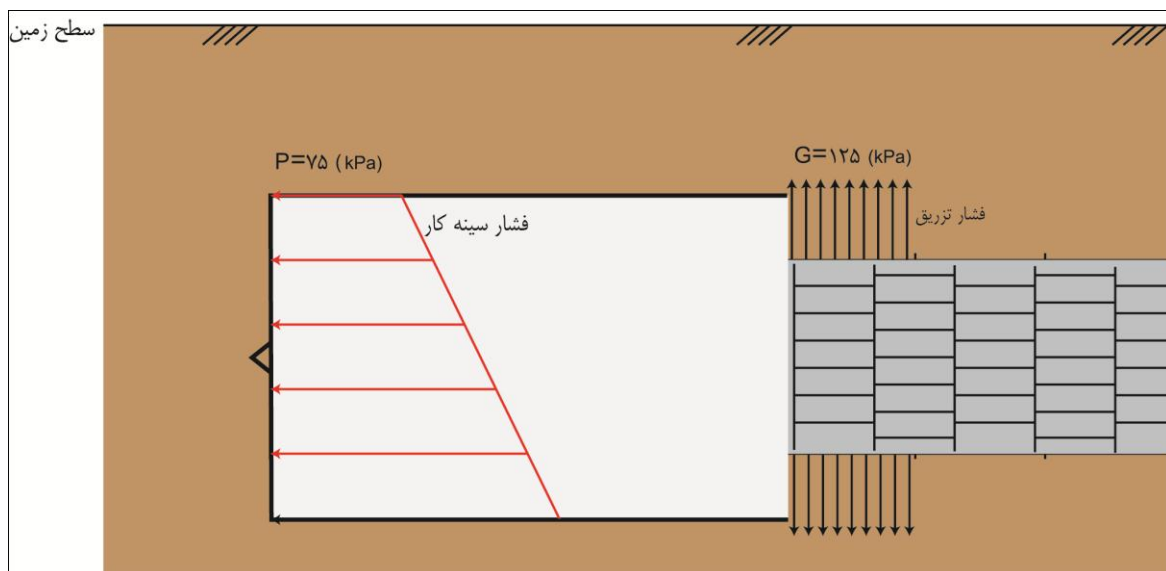
حالت ۳: این حالت وضعیتی را که ملات فقط از بالای TBM تزریق می شود را مدل می کند. ملات تمایل به جریان از بالا به پایین در فضای خالی انتهایی دارد که منجر به کاهش فشار می شود. پروسه تزریق خیلی ضعیف انجام می شود. در پایین مدل فقط فشار آب وجود دارد در حالی که در بالای مدل تعادل قائم برقرار است.

حالت ۴: این حالت وضعیتی را که ملات فقط از بالای TBM تزریق می شود را مدل می کند. تفاوت آن با حالت ۳ فشار بالای مدل می باشد که تعادل افقی برقرار است. این حالت به صورت شماتیک در شکل (۵-۶) نشان داده شده است [۱].



شکل ۳-۵: چهار مدل تزریق گروت به صورت شماتیک [۲۰].

در پروژه خط ۷ قطعه شرقی غربی مترو تهران فشار تزریق عملیاتی به صورت تجربی ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار بدست آمده است. شکل (۷-۵) نحوه اعمال فشار سینه کار و فشار تزریق را به صورت شماتیک در این پروژه نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: نمایی از اعمال فشار سینه کار و فشار تزریق به صورت شماتیک در پروژه خط ۷ مترو تهران

۳.۵ جمع بندی

فشار سینه کار و فشار تزریق در نشست سطح از پارامترهای موثر محسوب می‌شوند. در این فصل به کلیاتی در مورد روش های محاسبه فشار سینه کار و فشار تزریق اشاره شد. روش های مختلفی برای محاسبه فشار سینه کار وجود دارد که این روش ها به سه نوع تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم می‌شود. تاکنون روش معینی برای محاسبه فشار تزریق وجود ندارد و بیشتر پروژه ها بصورت تجربی محاسبه می‌شود. در ضمن مهمترین اهداف تزریق پرکننده پشت پوشش بتنی و مشکلات پر کردن فضای پشت پوشش بتنی با تزریق نیز معرفی گردیدند.

فصل ششم: بررسی فشار سینه کار بر نشست سطح زمین

۱.۶ مقدمه

در حفاری تونل‌های شهری در محیط‌های خاکی یکی از موارد مهم جهت کنترل پایداری زمین در سینه کار تونل و همچنین در سطح زمین و جلوگیری از نشست، بحث فشار سینه کار می‌باشد. این فشار با کنترل مواد خروجی از محفظه حفاری دستگاه و میزان پیشروی دستگاه تامین می‌شود. به طور کلی در ماشین‌های EPB مواد حفاری شده توسط کله حفار در محفظه حفاری جمع شده و در نهایت از قسمت تحتانی آن با استفاده از یک نوار نقاله مارپیچ بیرون برده می‌شود. در این روش حفاری، با توجه به سست بودن سینه کار تونل‌ها در محیط‌های خاکی و احتمال هجوم خاک و آب به درون تونل و در نتیجه نشست سطح زمین (شکل ۶-۱) و تبعات ناشی از آن، باید به مواد حفاری شده و مواد خارج شده از دستگاه تعادل ایجاد کرد که این کار با ایجاد فشار در سینه کار انجام می‌شود. در این راستا باید توجه داشت که افزایش بیش از حد فشار سینه کار منجر به بالا زدگی زمین و آسیب رساندن یا تخریب سازه‌های سطحی می‌شود (شکل ۶-۲). در محفظه حفاری تعدادی سنسور فشار وجود دارد که فشار خاک درون چمبر را در مونیاتور اتاقک اپراتور نشان می‌دهند. اپراتور دستگاه با مشاهده افزایش یا کاهش فشار با تنظیم نرخ پیشروی یا چرخش نقاله مارپیچ فشار را به مقدار تعیین شده نزدیک می‌کند و بدیهی است که این نوسانات فشار به صورت موج سینوسی می‌باشد.



شکل ۶-۲: بالا زدگی حاصل از حفار مکانیزه شهری



شکل ۶-۱: نشست حاصل از حفار مکانیزه شهری

در طی سال های اخیر تحقیقات زیادی بر روی موضوع تغییر شکل زمین توسط تونلسازی انجام شده است. اصلی ترین روش های تخمین تغییر شکل زمین از روش های زیر پیروی می کند:

- روش های تصادفی و تجربی: مدل های ریاضی برای پیش بینی نشست از روش نیمه تجربی از سوی لیتوینسین^۱ در سال ۱۹۵۶ پیشنهاد شد. بعد از آن در سال ۱۹۶۹ پک^۲ با استفاده از توزیع نرمال روابط تجربی برای پیش بینی نشست ارائه کرد. طراحی پارامترهای بکاربرده شده تابع خطا از اندازه گیری های گذشته پروژه های تونل در شرایط مختلف خاک جمع آوری شد (پک ۱۹۶۹، کوردینگ و هانسمیر^۳ ۱۹۷۵). روابط تجربی در سال ۱۹۸۲ توسط اوریلی و نیو^۴ مطالعه شد. به علاوه اتول و وودمن^۵ در سال ۱۹۸۲ روابط تجربی برای پیش بینی نشست طولی سطحی زمین ارائه کردند.

¹ Litwinisyn

² Peck

³ Cording and Hansmire

⁴ O'Reilly and New

⁵ Attewell and Woodman

- روش های تحلیلی: تنش های زمین و جابجایی ها با روش تحلیلی محاسبه شده اند. تعدادی از محققین روش های بنیادین با استفاده از روش حل بسته توصیف کرده اند. در سال ۱۹۸۷ ساگاستا^۱ آنالیز دو بعدی از تغییر شکل زمین برای بهینه سازی کرنش های زمین در محیط ایزوتروپ و همگن تراکم ناپذیر متوسط ارائه داد (به عنوان مثال کرنش توسعه یافته بلیق^۲ ۱۹۸۵ توسط نشان دادن تنش های آزاد سطح زمین). در سال ۱۹۹۶ ورویجت و بوکر^۳ روش ساگاستا را با بکارگیری ضریب پواسون ۰/۵ اصلاح کردند. لاگاناتان و پلوس^۴ در سال ۱۹۹۸ روابط ورویجت و بوکر را اصلاح کردند. در سال ۱۹۹۷ پینتو^۵ با راه حل تحلیلی هردو نشست طولی و عرضی را گسترش دادند.

- روش های عددی: روش های عددی از جمله روش های پر کاربرد و پر طرفدار است که امکان تحلیل واقع گرایانه با در نظر گرفتن مراحل ساخت، رفتار سه بعدی جبهه کار و همچنین برهمکنش بین تونل و پوشش بتنی، فراهم می سازد. با این وجود صحت نتایج این روش ها کاملاً وابسته به داده های اولیه مسئله می باشد

در روش های ارائه شده برای پیش بینی نشست سطح تنها روش های عددی و مدل سازی فیزیکی به بررسی تاثیر فشار سینه کار و تزریق بر نشست پرداخته شده است. بطور کلی نشست حاصل از تونلسازی مکانیزه شهری به چند بخش تقسیم می شود:

نشست اولیه (Proceeding settlement)

¹ Sagaseta

² Baligh.

³ Verruijt and Booker

⁴ Loganathan and Poulos

⁵ Pinto

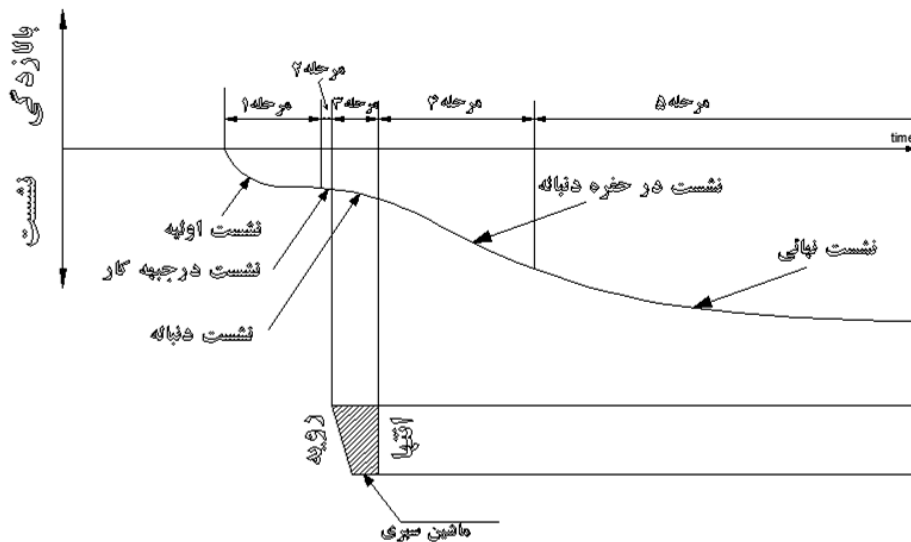
نشست در جبهه کار (Settlement at the front of the face)

نشست دنباله (Tail settlement)

نشست در حفر دنباله (Settlement at the tail void)

نشست نهایی (Succeeding settlement)

در شکل ۳-۶ مراحل وقوع نشست دیده می‌شود.



شکل ۳-۶: مراحل وقوع نشست (۵ مرحله نشست) [۲۲]

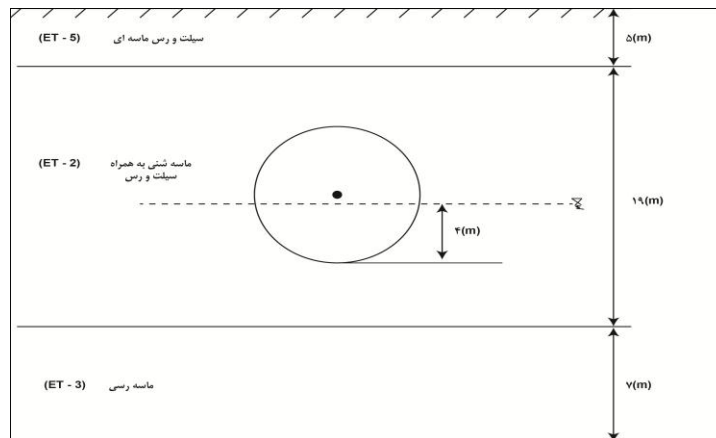
در این فصل با تمرکز بر روی دو مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران، نشست حاصل از فشار سینه کار با استفاده از روش عددی و مدل سازی سه بعدی اجزاء محدود (Plaxis3D Tunnel) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲.۶ بررسی تاثیر فشار سینه کار بر نشست سطح زمین تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی

تهران

۱.۲.۶ کیلومتر از ۲۰۰+۵ تونل خط ۷ مترو تهران

شکل ۴-۶ نمایی از مقطع کیلومتر از ۲۰۰+۵ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران را نشان می‌دهد^۱. در این قسمت تونل روباره (۱۱ متر) کمتر از دو برابر قطر تونل است ($H < 2D$)، طول تونل ۵۱ متر، سطح آب از کف تونل ۴ متر و نتایج بعد از ۱۶/۵ متر حفاری بدست آمده است. نحوه مدل سازی فشار سینه کار عبارتند از: (۱) فشار سینه کار اولیه (۷۵ کلیوپاسکال^۲) (۲) ۱/۵ برابر فشار اولیه (۱۱۲/۵ کلیوپاسکال) (۳) دو برابر فشار اولیه (۱۵۰ کلیوپاسکال) (۴) چهار برابر فشار اولیه (۳۰۰ کلیوپاسکال) و با در نظر گرفتن شیب فشار بین تاج و کف تونل در داخل اتاقک حفاری ۱۶ کیلو پاسکال بر متر و برای هر فشار سینه کار پنج حالت فشار تزریق مدل سازی صورت گرفته است.

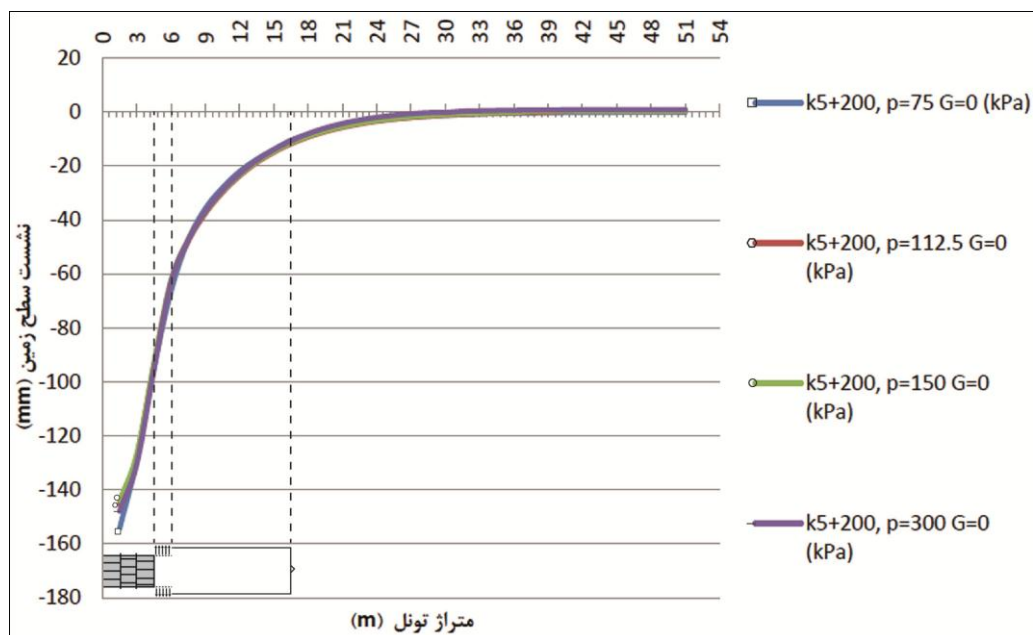


شکل ۴-۶: مقطع زمین شناسی کیلومتر از ۲۰۰+۵ تونل

^۱ مدل مرجع در پیوست موجود می‌باشد.

^۲ فشار ۷۵ کلیوپاسکال بر مبنای روش عددی بدست آمده است در این فشار فوریزش صورت نگرفته است

شکل ۵-۶ تاثیر فشار سینه کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین با فشار تزریق صفر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری تونل را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست افزایش فشار سینه کار در ماکزیمم نشست تاثیر گذار است. هنگامی که فشار سینه کار ۷۵ کیلوپاسکال است ماکزیمم نشست سطح زمین ۱۵۴/۲۶ میلی‌متر است با افزایش فشار سینه کار تا ۳۰۰ کیلوپاسکال این میزان نشست به ۱۴۷ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

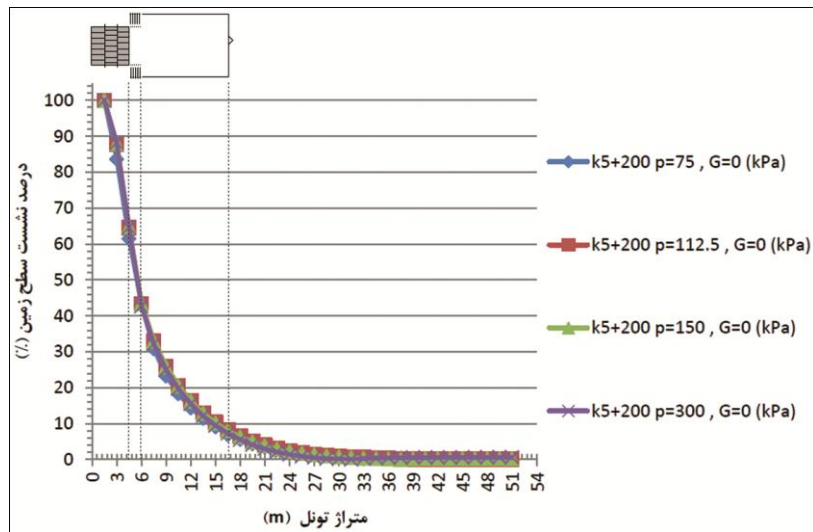


شکل ۵-۶: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق صفر کیلومتر ۵+۲۰۰

درصد نشست به صورت رابطه (۱-۶) تعریف می‌شود.

$$\text{درصد نشست} = \frac{S}{S_{\max}} \times 100 \quad (1-6)$$

در این رابطه S میزان نشست هر مقطع و S_{\max} ماکزیمم نشست است. شکل (۶-۶) درصد نشست سطح زمین با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق صفر را نشان می‌دهد.



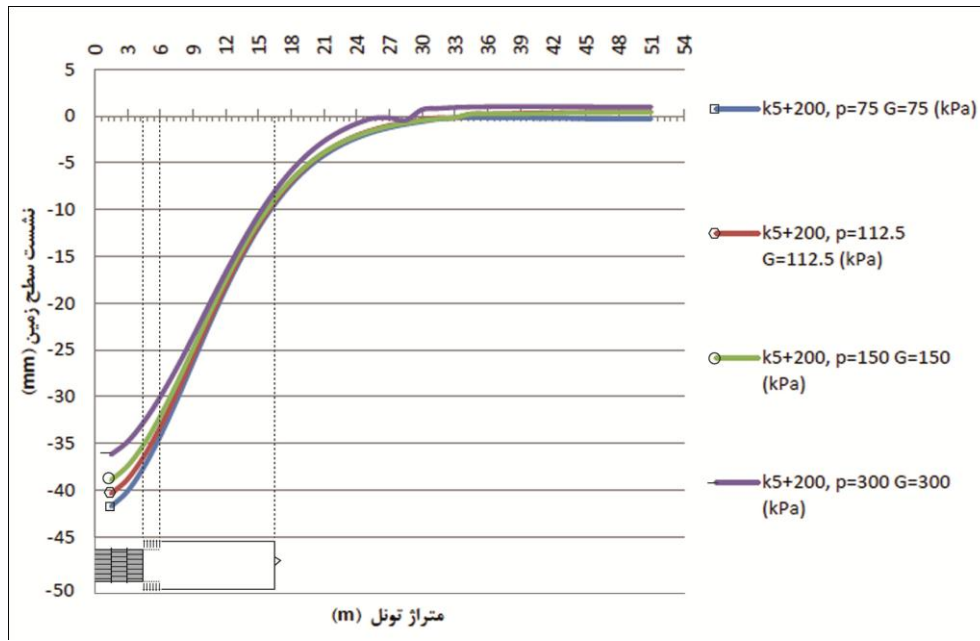
شکل ۶-۶: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۲۰۰+۵ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق صفر

همانگونه که در شکل (۶-۶) دیده می شود با افزایش فشار سینه کار نمودارها یک میزان درصد را نشان می دهند. به عبارتی دیگر اگرچه میزان نشست و نشست ماکزیمم در هر حالت با یکدیگر فرق می کند ولی نسبت آن ها یکسان است. بنابراین در این حالت کمتر از ۱۰٪ نشست در جلوی سپر، ۱۰٪ تا ۴۵٪ نشست در بالای سپر، ۴۵٪ تا ۶۵٪ نشست در مقطعی که عملیات تزریق صورت می گیرد و ۶۵٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می گیرد.

شکل ۶-۷ تاثیر فشار سینه کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین در حالتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار است را بعد از ۱۶/۵ متر حفاری تونل را نشان می دهد.

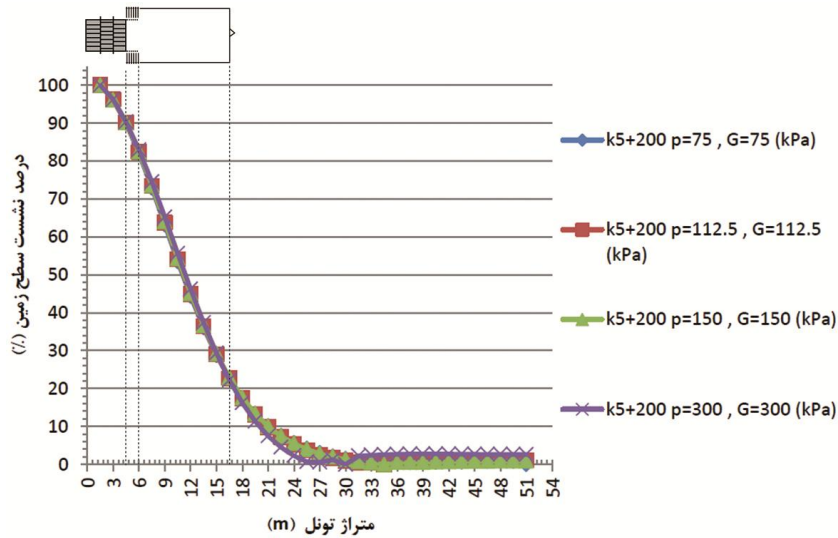
در صورتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال است ماکزیمم نشست سطح ۴۱/۷۴ میلی متر با افزایش ۱/۵ برابری فشار سینه کار (۱۱۲/۵ کیلو پاسکال) ۴۰/۳۷ میل متر، با افزایش ۲ برابری فشار سینه کار (۱۵۰ کیلو پاسکال) ۳۸/۹۳ میلی متر و با افزایش ۴ برابری فشار سینه کار ماکزیمم نشست سطح ۳۶/۲ میلی متر محاسبه شد. این نشان می دهد با افزایش ۱/۵ برای فشار سینه کار ۱/۳۷ میلی متر نشست

کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار ۲/۸۱ میلی متر کاهش نشست زخ داده است و با افزایش ۴ برابری فشار ۵/۵۴ میلی متر نشست کاهش یافته است.



شکل ۶-۷: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار کیلومتر ۵+۲۰۰

شکل ۶-۸ درصد نشست سطح زمین در حالت فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار را نشان می دهد.

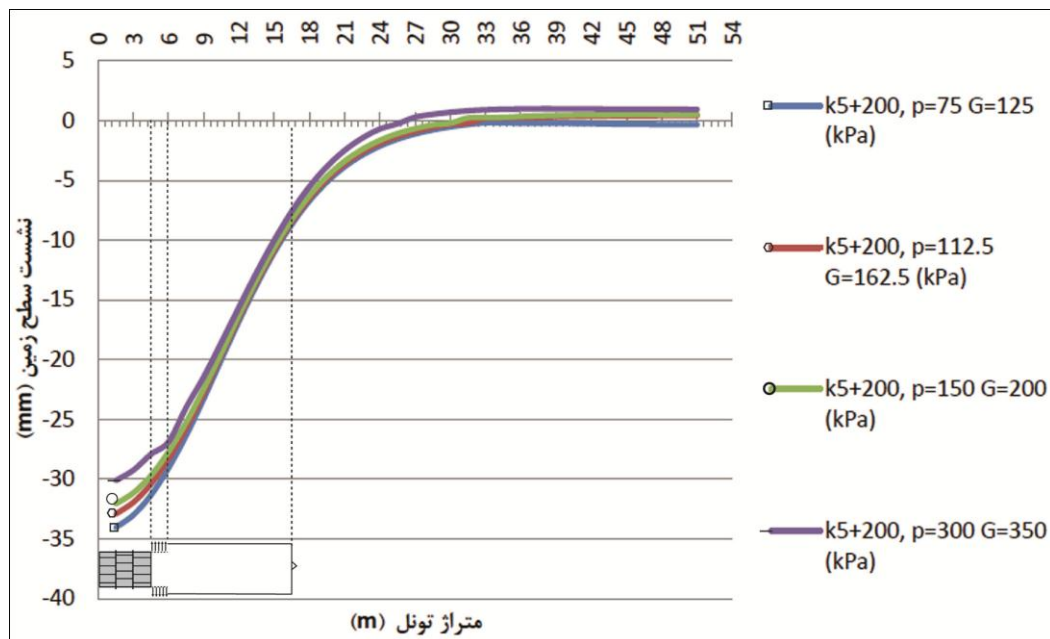


شکل ۶-۸: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار

مختلف و فشار تزریق برابر فشار سینه کار

با توجه به شکل ۶-۷ کمتر از ۲۰٪ نشست در جلوی سپر، ۲۰٪ تا ۸۲٪ نشست در بالای سپر، ۸۲٪ تا ۹۰٪ نشست در مقطعی که عملیات تزریق صورت می‌گیرد و ۹۰٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد.

شکل ۶-۹ تاثیر فشار سینه کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین با فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار بعد از ۱۶/۵ متر حفاری کیلومتر ۵+۲۰۰ را نشان می‌دهد.

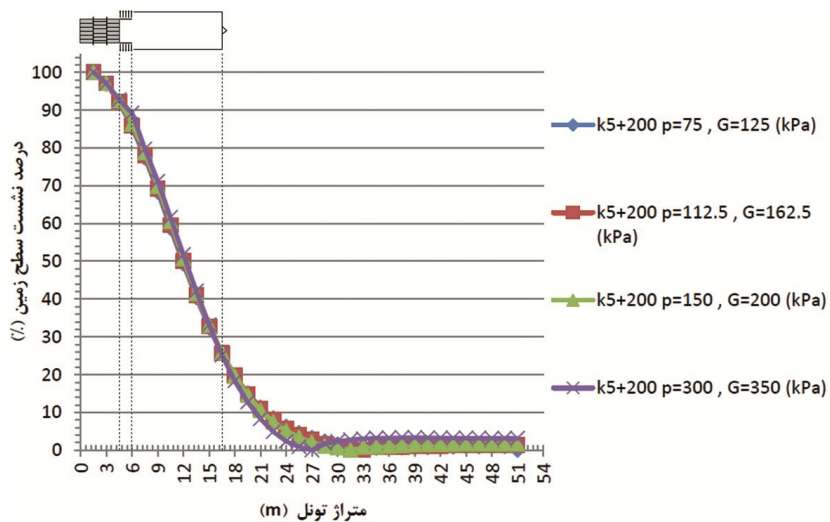


شکل ۶-۹: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار فشار

سینه کار کیلومتر ۲۰۰+۵

با توجه به شکل ۶-۹ میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال باشد، ۳۴ میلی متر است. با افزایش ۱/۵ برای فشار سینه کار ۱/۱ میلی متر نشست کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار ۲ میلی متر کاهش نشست رخ داده است و با افزایش ۴ برابری فشار ۴ میلی متر نشست کاهش یافته است.

شکل ۶-۱۰ درصد نشست سطح زمین در حالت فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار را نشان می دهد. با توجه به شکل ۶-۱۰ کمتر از ۲۵٪ نشست در جلوی سپر، ۲۵٪ تا ۸۸٪ نشست در بالای سپر، ۸۸٪ تا ۹۰٪ نشست در مقطعی که عملیات تزریق صورت می گیرد و ۹۰٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می گیرد.

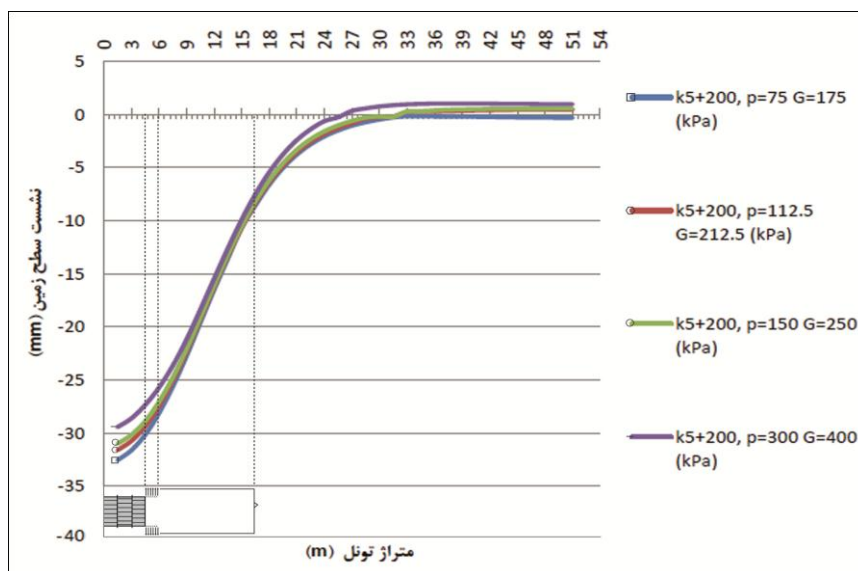


شکل ۶-۱۰: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف

و فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار

شکل ۶-۱۱ تاثیر فشار سینه کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین با فشار تزریق یک بار بیشتر از

فشار سینه کار بعد از ۱۶/۵ متر حفاری کیلومتر ۵+۲۰۰ را نشان می‌دهد.

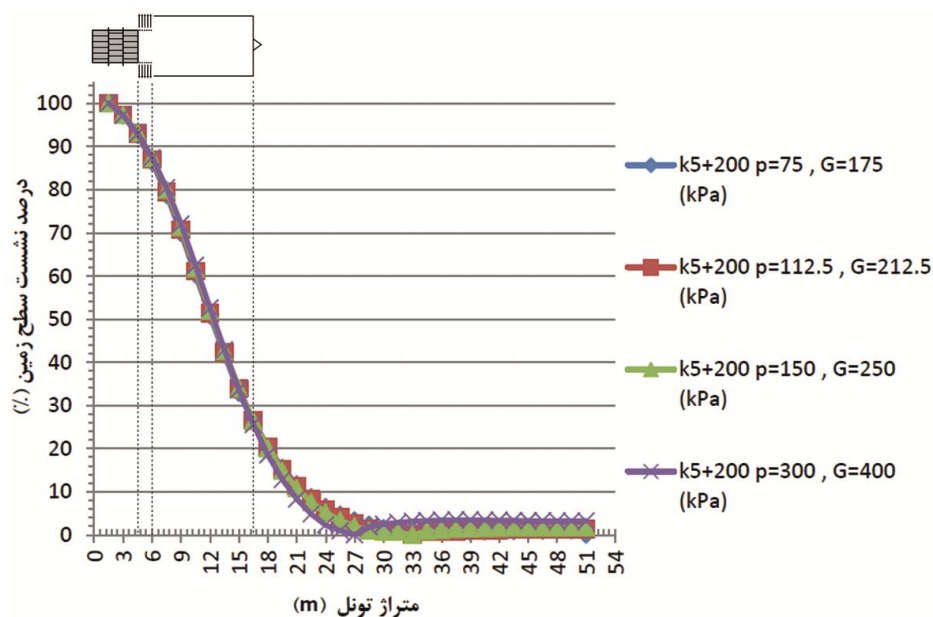


شکل ۶-۱۱: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق یک بار بیشتر از

فشار سینه کار فشار سینه کار کیلومتر ۵+۲۰۰

با توجه به شکل ۶-۱۱ میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال باشد، ۳۲/۵ میلی متر است. با افزایش ۱/۵ برای فشار سینه کار ۱ میلی متر نشست کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار ۱/۵ میلی متر کاهش نشست زخ داده است و با افزایش ۴ برابری فشار ۳ میلی متر نشست کاهش یافته است.

شکل ۶-۱۲ درصد نشست سطح زمین در حالت فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار را نشان می دهد. با توجه به شکل کمتر از ۲۶٪ نشست در جلوی سپر، ۲۶٪ تا ۸۸٪ نشست در بالای سپر، ۸۸٪ تا ۹۲٪ نشست در مقطعی که عملیات تزریق صورت می گیرد و ۹۲٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می گیرد.

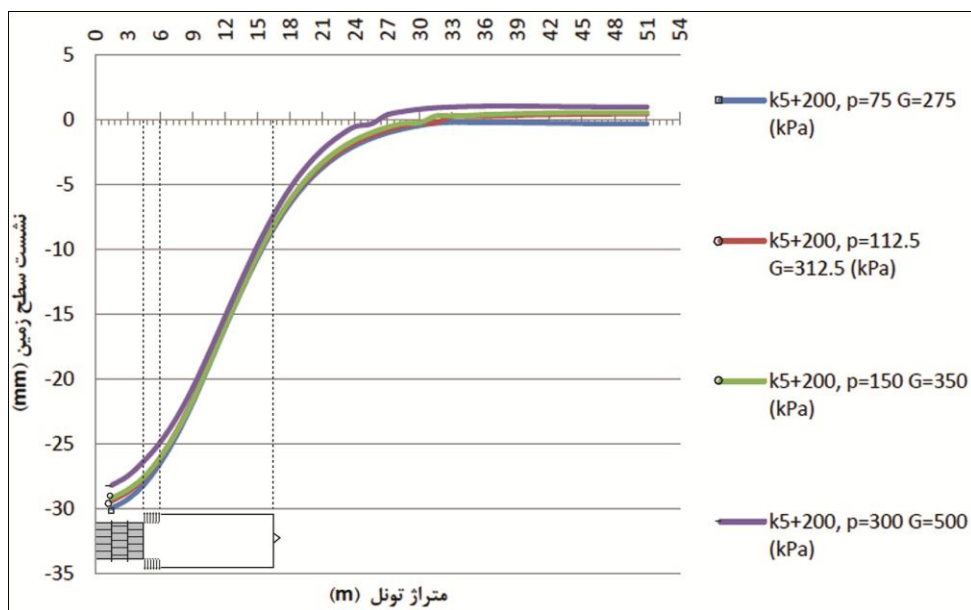


شکل ۶-۱۲: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۲۰+۵ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف

و فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار

شکل ۶-۱۳ تاثیر فشار سینه کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین با فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار بعد از ۱۶/۵ متر حفاری کیلومتر ۲۰+۵ تونل را نشان می دهد.

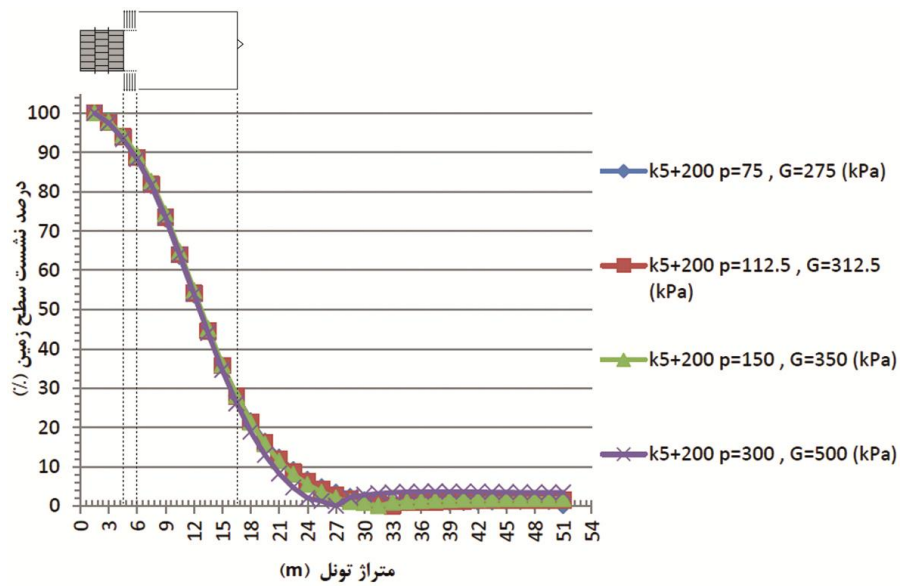
با توجه به شکل ۶-۱۳ میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال باشد، ۳۰ میلی متر است. با افزایش ۱/۵ برای فشار سینه کار ۰/۵ میلی متر نشست کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار ۰/۸ میلی متر کاهش نشست زخ داده است و با افزایش ۴ برابری فشار ۱/۷۵ میلی متر نشست کاهش یافته است. بنابراین مشخص است در این حالت افزایش فشار سینه کار تاثیر چندانی بر میزان نشست سطح زمین ندارد.



شکل ۶-۱۳: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه

کار فشار سینه کار کیلومتر از ۲۰+۵

شکل ۶-۱۴ درصد نشست سطح زمین در حالت فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار را نشان می دهد. با توجه به شکل کمتر از ۲۸٪ نشست در جلوی سپر، ۲۸٪ تا ۸۸٪ نشست در بالای سپر، ۸۸٪ تا ۹۴٪ نشست در مقطعی که عملیات تزریق صورت می گیرد و ۹۴٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می گیرد.



شکل ۶-۱۴: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار

مختلف و فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار

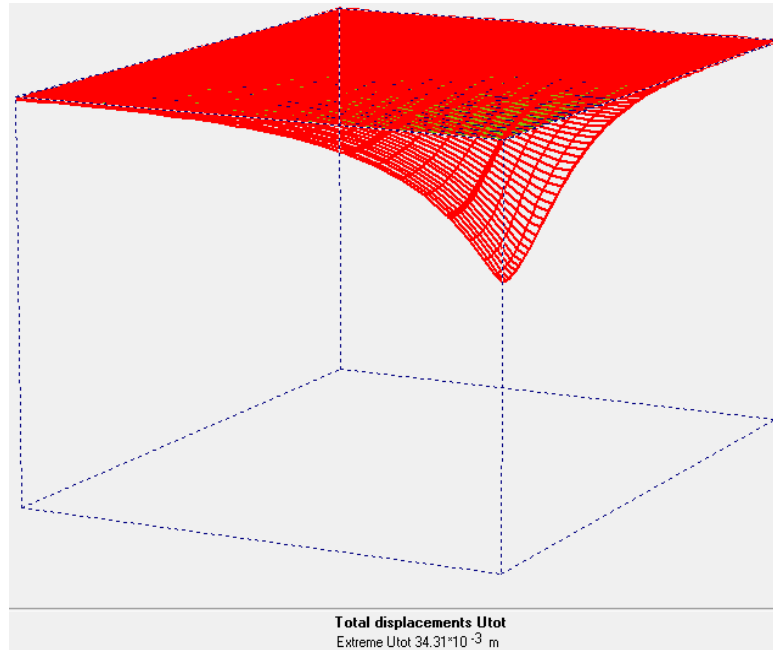
در جدول ۶-۱ درصد نشست سطح زمین این مقطع تونل در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. حرف P در

این جدول نمایانگر هر ۴ حالت فشار سینه کار است.

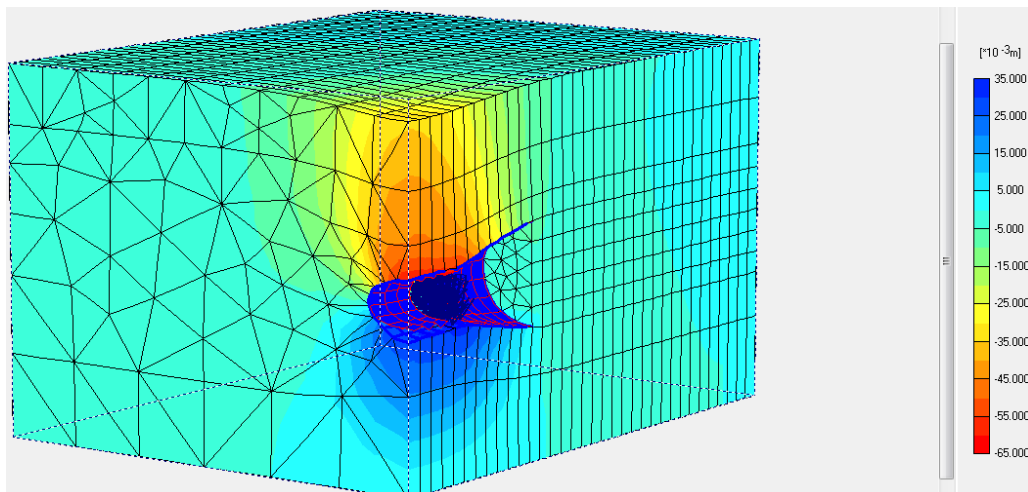
جدول ۱-۶: درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار سینه کار کیلومتر از ۵+۲۰۰

| درصد نشست دنباله (%) | درصد نشست در پشت سپر (%) | درصد نشست در بالای سپر (%) | درصد نشست جلو سپر (%) | شرایط مدل سازی |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------|
| ۱۰۰-۶۵ | ۶۵-۴۵ | ۴۵-۱۰ | <۱۰ | P و G=0 |
| ۱۰۰-۹۰ | ۹۰-۸۲ | ۸۲-۲۰ | <۲۰ | P و G=P (kPa) |
| ۱۰۰-۹۰ | ۹۰-۸۸ | ۸۸-۲۵ | <۲۵ | P و G=P+50 (kPa) |
| ۱۰۰-۹۲ | ۹۲-۸۸ | ۸۸-۲۶ | <۲۶ | P و G=P+100 (kPa) |
| ۱۰۰-۹۴ | ۹۴-۸۸ | ۸۸-۲۸ | <۲۸ | P و G=P+200 (kPa) |

شکل ۱۵-۶ پروفیل طولی و عرضی نشست سطح را حالتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلوپاسکال با فشار تزریق ۱۲۵ کیلوپاسکال و شکل ۱۶-۶ کنتور جابجایی مقطع ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران را نشان می‌دهند.



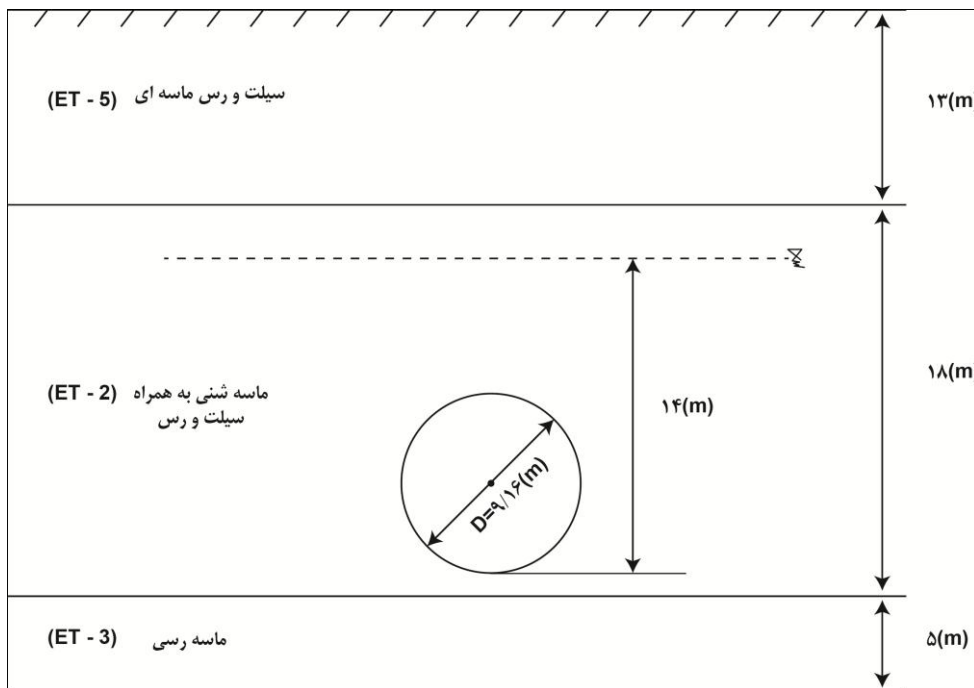
شکل ۶-۱۵: پروفیل طولی و عرضی نشست فشار سینه کار ۷۵ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۲۵ کیلوپاسکال مقطع ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران با بیشترین جابجایی ۳۴/۳۱ میلی متر



شکل ۶-۱۶: کنتور جابجایی قائم مقطع ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران

۲.۲.۶ کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل خط ۷ مترو تهران

شکل ۶-۱۷ نمایی از مقطع کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران را نشان می‌دهد^۱. در این قسمت تونل روباره (۲۱ متر) بیشتر از دو برابر قطر تونل است ($H > 2D$)، طول تونل ۵۱ متر، سطح آب از کف تونل ۱۴ متر و نتایج بعد از ۱۶/۵ متر حفاری بدست آمده است. نحوه مدل سازی فشار سینه کار برای مقایسه بهتر همانند مقطع کیلومتر ۵+۲۰۰ صورت گرفته است.

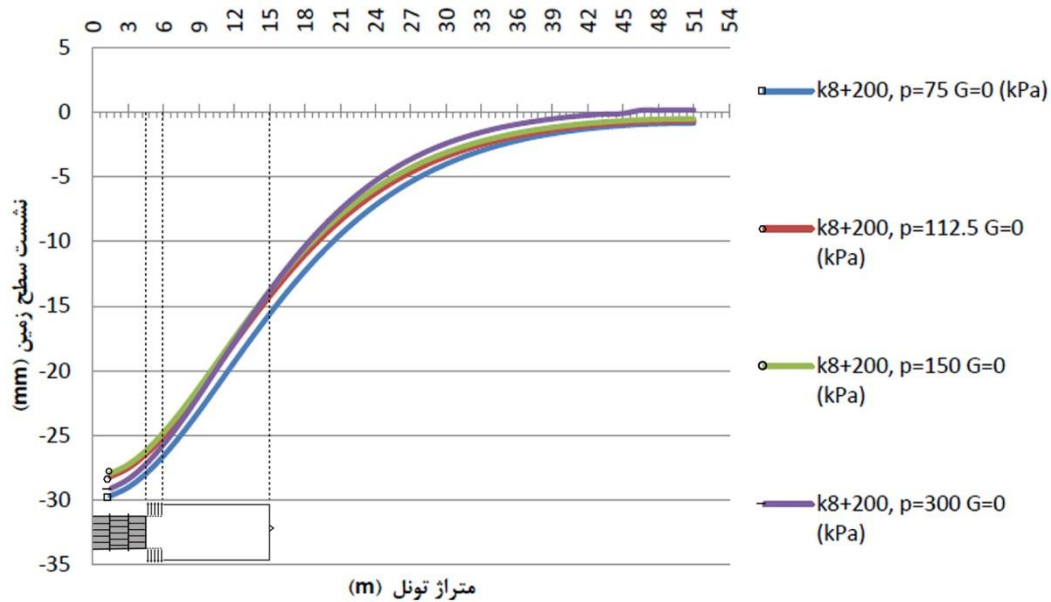


شکل ۶-۱۷: مقطع زمین شناسی کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران

شکل ۶-۱۸ تاثیر فشار سینه کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین با فشار تزریق صفر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶-۱۸ میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال باشد، ۲۸/۳ میلی متر است. با افزایش ۱/۵ برای فشار سینه کار ۰/۱ میلی متر نشست کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار ۰/۴ میلی متر کاهش نشست زخ داده است و

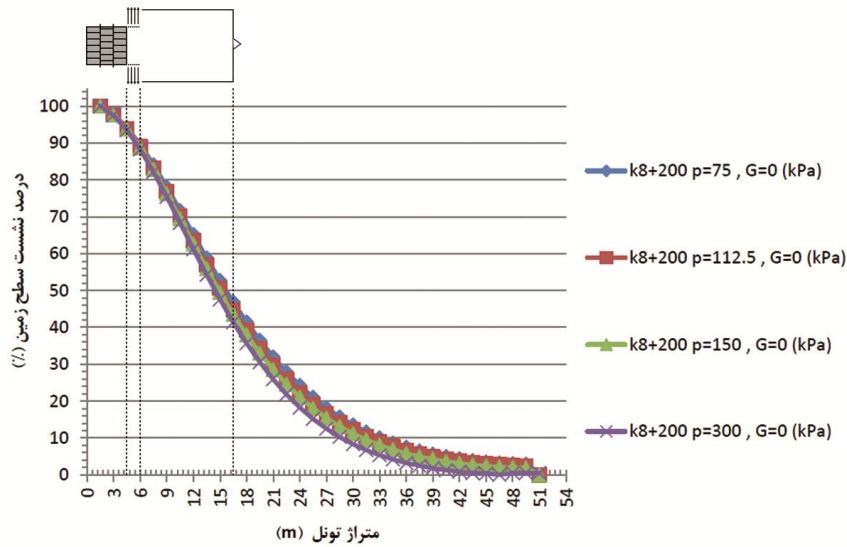
^۱ مدل مرجع در پیوست موجود می‌باشد.

با افزایش ۴ برابری فشار ۰/۲ میلی متر نشست یافته است. بنابراین مشخص است در این حالت افزایش فشار سینه کار تاثیر چندانی بر میزان نشست سطح زمین ندارد.



شکل ۶-۱۸: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق صفر کیلومتر از ۸+۲۰۰

شکل ۶-۱۹ درصد نشست سطح زمین در حالت فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار را برای این نشان می دهد. با توجه به شکل کمتر از ۰/۴۰٪ نشست در جلوی سپر، ۰/۴۰٪ تا ۰/۹۰٪ نشست در بالای سپر، ۰/۹۰٪ تا ۰/۹۴٪ نشست در مقطعی که عملیات تزریق صورت می گیرد و ۰/۹۴٪ تا ۰/۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می گیرد.

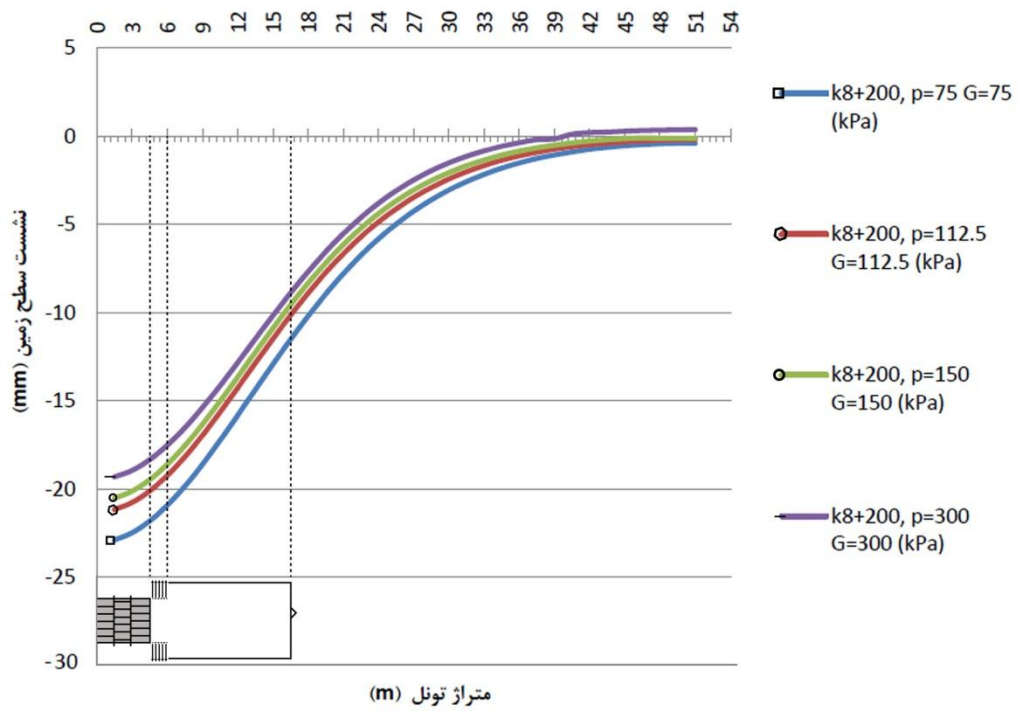


شکل ۶-۱۹: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق صفر

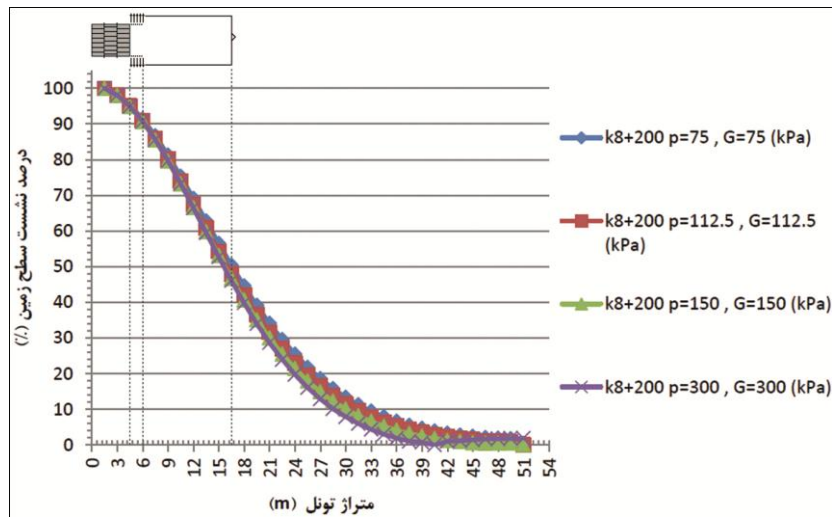
شکل ۶-۲۰ تاثیر فشار سینه کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین در حالتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار است را بعد از ۱۶/۵ متر حفاری تونل را نشان می‌دهد.

در صورتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال است ماکزیمم نشست سطح ۲۲/۹ میلی‌متر با افزایش ۱/۵ برابری فشار سینه کار (۱۱۲/۵ کیلو پاسکال) ۲۱/۱۷ میلی‌متر، با افزایش ۲ برابری فشار سینه کار (۱۵۰ کیلو پاسکال) ۲۰/۵۳ میلی‌متر و با افزایش ۴ برابری فشار سینه کار ماکزیمم نشست سطح ۱۹/۳۲ میلی‌متر محاسبه شد. این نشان می‌دهد با افزایش ۱/۵ برای فشار سینه کار ۱/۷۳ میلی‌متر نشست کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار ۲/۳۷ میلی‌متر کاهش نشست زخ داده است و با افزایش ۴ برابری فشار ۳/۶ میلی‌متر نشست کاهش یافته است که چندان چشمگیر نیست.

شکل ۶-۲۱ درصد نشست سطح زمین در حالت فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار را برای این نشان می‌دهد. با توجه به شکل کمتر از ۴۸٪ نشست در جلوی سپر، ۴۸٪ تا ۹۰٪ نشست در بالای سپر، ۹۰٪ تا ۹۵٪ نشست در مقطعی که عملیات تزریق صورت می‌گیرد و ۹۵٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد.



شکل ۶-۲: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغییر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار کیلومتر ۸+۲۰۰



شکل ۶-۲۱: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه-

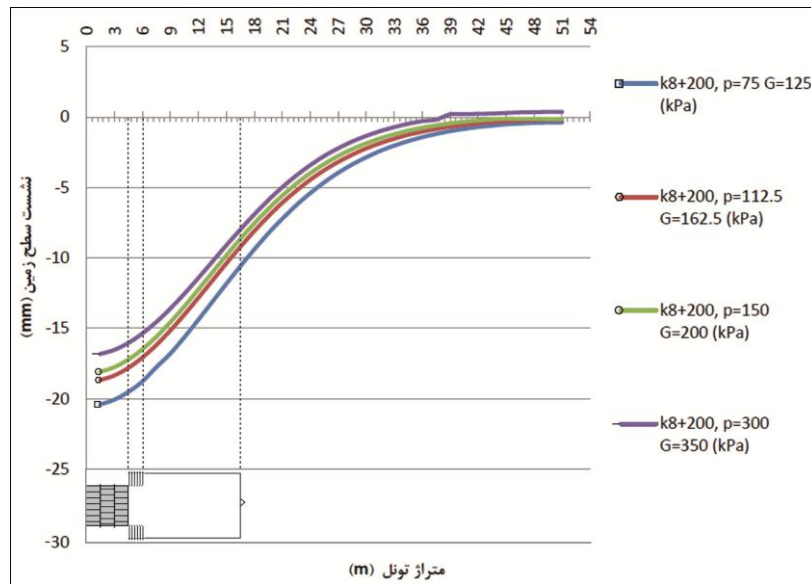
کار مختلف و فشار تزریق برابر فشار سینه کار

شکل ۶-۲۲ تاثیر فشار سینه کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین در حالتی که فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار است را بعد از ۱۶/۵ متر حفاری کیلومتر از ۸+۲۰۰ را تونل را نشان می دهد.

در صورتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال است ماکزیمم نشست سطح ۲۰/۴۱ میلی متر با افزایش ۱/۵ برابری فشار سینه کار (۱۱۲/۵ کیلو پاسکال) ۱۸/۶۸ میلی متر، با افزایش ۲ برابری فشار سینه کار (۱۵۰ کیلو پاسکال) ۱۸/۰۹ میلی متر و با افزایش ۴ برابری فشار سینه کار ماکزیمم نشست سطح ۱۶/۵۲ میلی متر محاسبه شد. این نشان می دهد با افزایش ۱/۵ برای فشار سینه کار ۱/۷۳ میلی متر نشست کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار ۲/۳۲ میلی متر کاهش نشست رخ داده است و با افزایش ۴ برابری فشار ۳/۹ میلی متر نشست کاهش یافته است که چندان چشمگیر نیست.

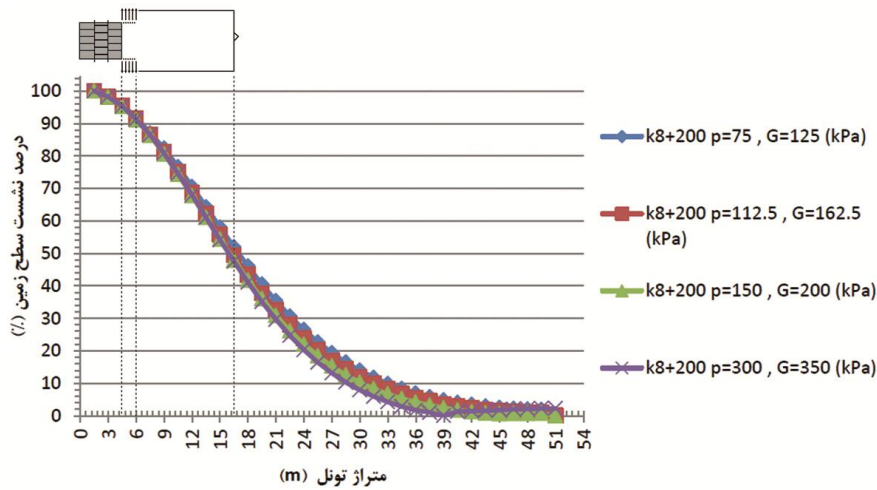
شکل ۶-۲۳ درصد نشست سطح زمین در حالت فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق برابر فشار سینه کار را برای این نشان می دهد. با توجه به شکل کمتر از ۵۰٪ نشست در جلوی سپر، ۵۰٪ تا ۹۰٪ نشست در بالای سپر، ۹۰٪ تا ۹۵٪ نشست در مقطعی که عملیات تزریق صورت می گیرد و ۹۵٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می گیرد.

شکل ۶-۲۴ تاثیر فشار سینه کار بر پروفیل طولی نشست سطح زمین با فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار را نشان می دهد. با توجه به شکل ۶-۲۴ میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال باشد، ۱۹/۸۵ میلی متر است. با افزایش ۱/۵ برای فشار سینه کار ۰/۶۵ میلی متر نشست کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار ۲/۱۸ میلی متر کاهش نشست رخ داده است و با افزایش ۴ برابری فشار ۳/۹۱ میلی متر نشست کاهش یافته است. بنابراین مشخص است در این حالت افزایش فشار سینه کار تاثیر چندانی بر میزان نشست سطح زمین ندارد. درصد نشست سطح نیز همانند حالت قبل است (شکل ۶-۲۵).



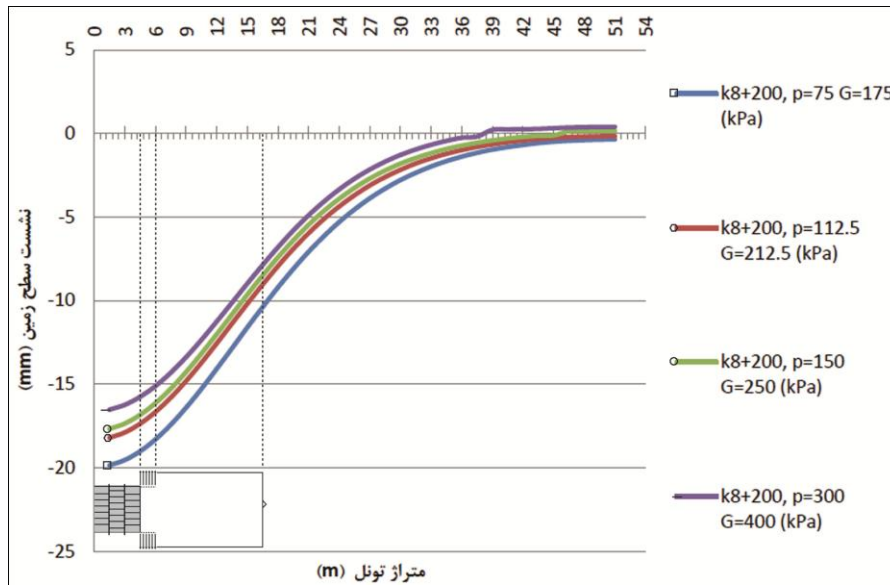
شکل ۶-۲۲: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق ۰/۵ بار

بیشتر از فشار سینه کار کیلومتر از ۸+۲۰۰



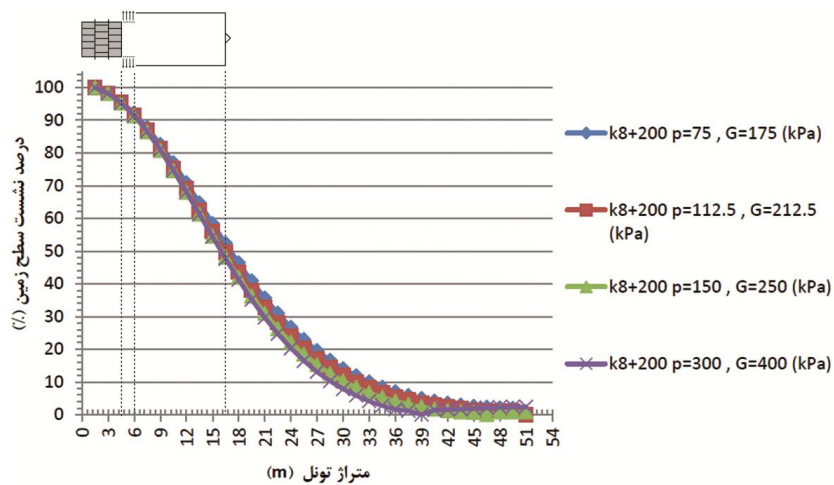
شکل ۶-۲۳: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار

مختلف و فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار



شکل ۶-۲۴: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار

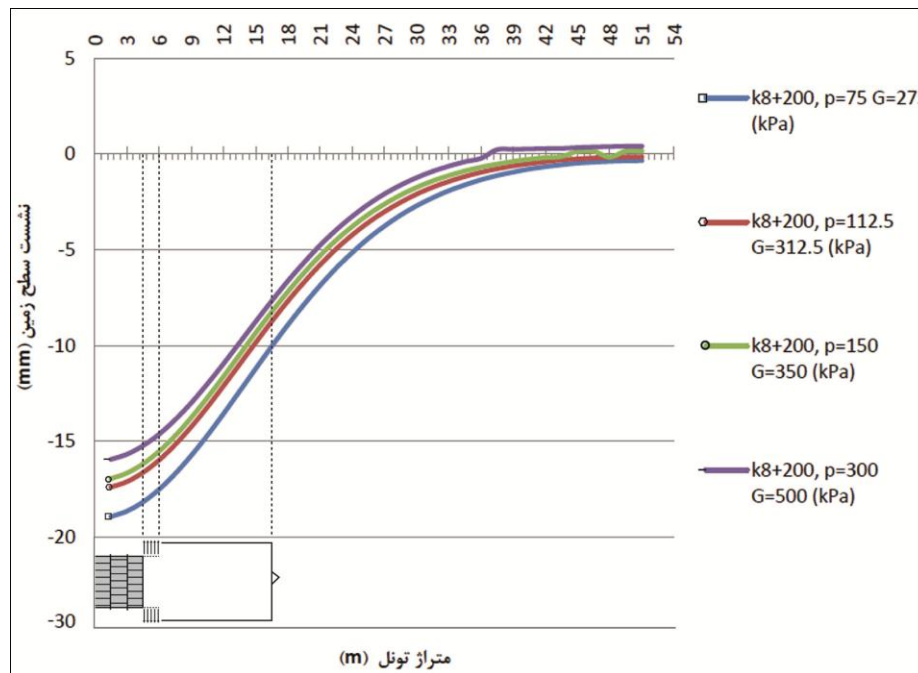
سینه کار کیلومتر ۸+۲۰۰



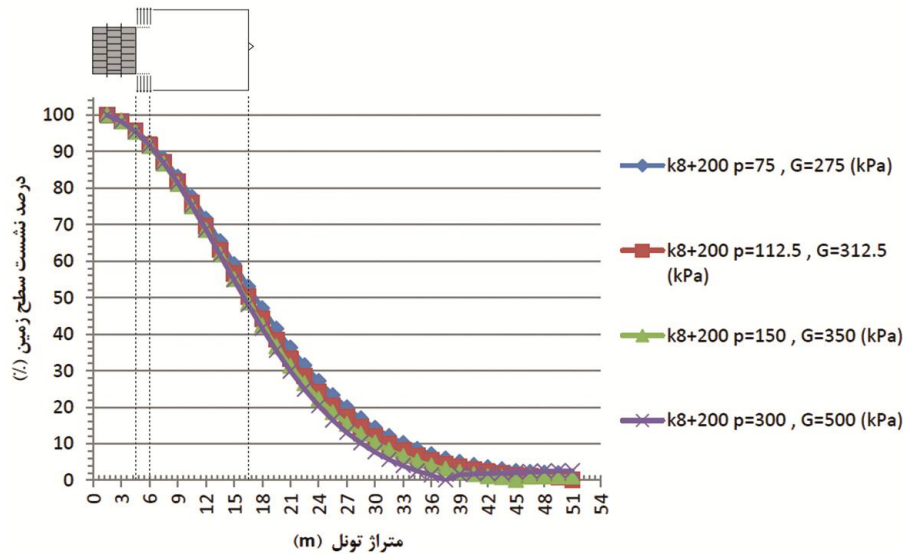
شکل ۶-۲۵: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و

فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار

همچنین شکل ۶-۲۶ پروفیل طولی نشست سطح زمین در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶-۲۶ میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال باشد، $18/93$ میلی‌متر است. با افزایش $1/5$ برای فشار سینه کار $1/54$ میلی‌متر نشست کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار ۲ میلی‌متر کاهش نشست رخ داده است و با افزایش ۴ برابری فشار ۳ میلی‌متر نشست کاهش یافته است. بنابراین مشخص است در این حالت افزایش فشار سینه کار تاثیر چندانی بر میزان نشست سطح زمین ندارد. درصد نشست سطح نیز همانند حالت قبل است (شکل ۶-۲۷) یعنی کمتر از ۵۰٪ نشست در جلوی سپر، ۵۰٪ تا ۹۰٪ نشست در بالای سپر، ۹۰٪ تا ۹۵٪ نشست در مقطعی که عملیات تزریق صورت می‌گیرد و ۹۵٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد.



شکل ۶-۲۶: پروفیل طولی نشست سطح زمین فشار سینه کار متغیر با فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار کیلومتر ۸+۲۰۰



شکل ۶-۲۷: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار سینه کار مختلف و فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار

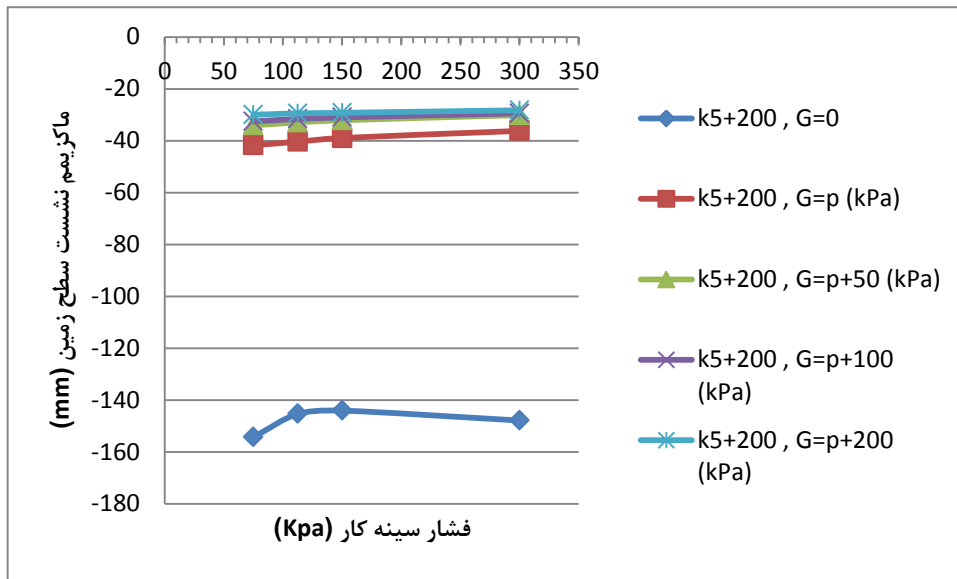
در کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی با افزایش فشار سینه کار ماکزیمم نشست سطح زمین کاهش می‌یابد ولی این تغییرات در میزان نشست زیاد نیست. این شرایط را بوضوح می‌توان در شکل ۵-۲۸ مشاهده نمود در این شکل فشار سینه کار مختلف در برابر ماکزیمم نشست سطح را نشان می‌دهد شیب کم نمودار نشان دهنده تاثیر نه چندان زیاد فشار سینه کار بر میزان نشست است ولی همانطور که دیده می‌شود پرش نمودار به سمت بالا تاثیر غیر مستقیم فشار تزریق بر نشست سطح زمین است.

در جدول ۶-۲ درصد نشست سطح زمین این مقطع تونل در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. حرف P در این جدول نمایانگر هر ۴ حالت فشار سینه کار است.

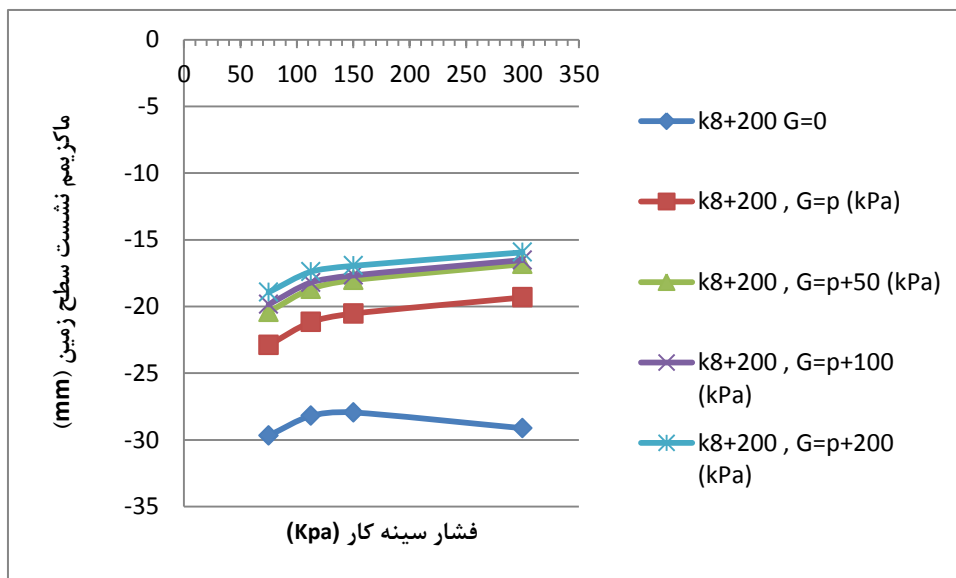
بنابراین بطور خلاصه می توان گفت در کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی با افزایش فشار سینه کار ماکزیمم نشست سطح زمین کاهش می یابد ولی این تغییرات در میزان نشست چشمگیر نیست. این شرایط را بوضوح می توان در شکل ۶-۲۸ و ۶-۲۹ مشاهده نمود در این اشکال فشار سینه کار مختلف در برابر ماکزیمم نشست سطح نشان داده شده است. شیب کم نمودار نشان دهنده تاثیر نه چندان زیاد فشار سینه کار بر میزان نشست است ولی همانطور که دیده می شود پرش نمودار به سمت بالا تاثیر غیر مستقیم فشار تزریق بر نشست سطح زمین است. را نشان می دهد.

جدول ۶-۲: درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار سینه کار کیلومتراژ ۸+۲۰۰

| درصد نشست دنباله (%) | درصد نشست در پشت سپر (%) | درصد نشست در بالای سپر (%) | درصد نشست جلو سپر (%) | شرایط مدل سازی |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------|
| ۱۰۰-۹۴ | ۹۴-۹۰ | ۹۰-۴۰ | <۴۰ | P و G=0 |
| ۱۰۰-۹۵ | ۹۵-۹۰ | ۹۰-۴۸ | <۴۸ | P و G=P (kPa) |
| ۱۰۰-۹۵ | ۹۵-۹۰ | ۹۰-۵۰ | <۵۰ | P و G=P+50 (kPa) |
| ۱۰۰-۹۵ | ۹۵-۹۰ | ۹۰-۵۰ | <۵۰ | P و G=P+100 (kPa) |
| ۱۰۰-۹۵ | ۹۵-۹۰ | ۹۰-۵۰ | <۵۰ | P و G=P+200 (kPa) |

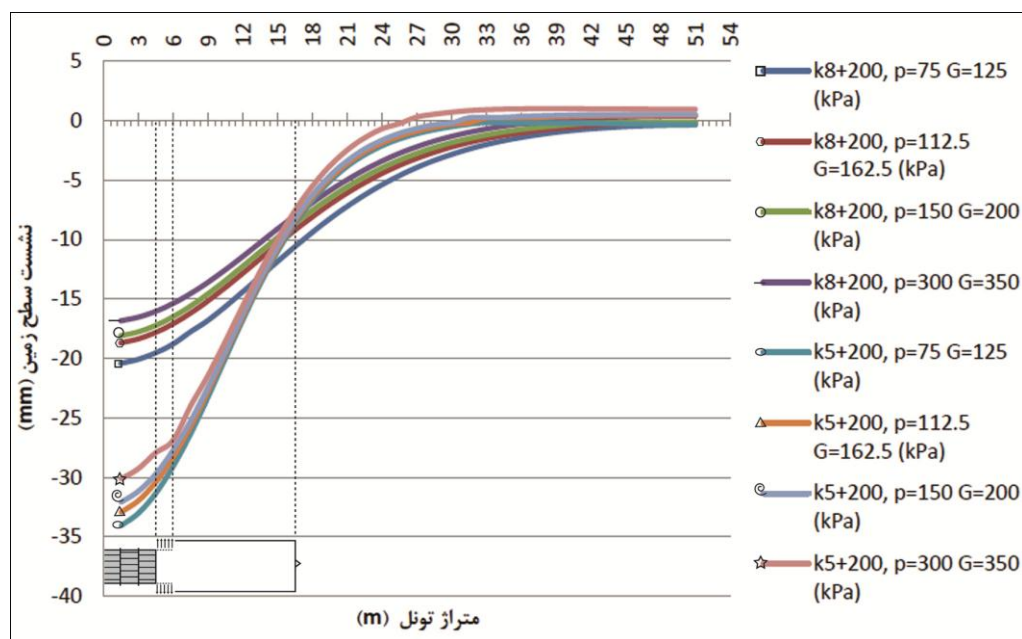


شکل ۶-۲۸: فشار سینه کار در برابر نشست سطح زمین کیلومتراژ ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ تهران



شکل ۶-۲۹: فشار سینه کار در برابر نشست سطح زمین کیلومتراژ ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ تهران

شکل ۶-۳۰ پروفیل طولی نشست برای هر دو مقطع کیلومتر ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ تهران (قطعه شرقی غربی) را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست افزایش ۴ برابری فشار سینه کار حداکثر باعث کاهش ۵ میلی‌متری ماکزیمم نشست شده است. بنابراین می‌توان گفت اگرچه افزایش فشار سینه کار باعث کاهش نشست شده ولی این میزان بسیار ناچیز است پس افزایش فشار سینه کار تاثیر چندانی بر کاهش نشست این دو مقطع ندارد. بنابراین می‌توان گفت خاک این دو مقطع نسبتاً پایدار است. دلیل آن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بالای خاک است (چسبندگی خاک ۱۵ تا ۳۱ کیلو پاسکال و زاویه اصطکاک داخلی ۲۷ تا ۳۴ درجه).



شکل ۶-۳۰: مقایسه تاثیر فشار سینه کار بر دو مقطع ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ بر پروفیل طولی نشست سطح (فشار تزریق ۵/۰ بار بیشتر از فشار سینه کار)

علاوه بر این میزان ماکزیمم نشست در دو مقطع ۵+۲۰۰ بیشتر است که دلیل آن میزان روباره کم آن است.

۳.۶ جمع بندی

در این فصل به آنالیز حساسیت فشار سینه کار در چهار حالت مختلف مدل سازی پرداخته شد و تاثیرات آن بر نشست سطح زمین بر کیلومترهای ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در کلیه حالات درصد نشست سطح زمین مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می دهد افزایش فشار سینه کار باعث کاهش نشست سطح می شود ولی میزان آن چشمگیر نیست. افزایش ۴ برابری فشار سینه کار حد اکثر باعث کاهش ۵ میلی متری ماکزیمم نشست سطح زمین می شود. همچنین نتایج این فصل نشان می دهد که فشار تزریق پشت پوشش بتنی به صورت غیر مستقیم بر نشست سطح تاثیر بیشتری دارد.

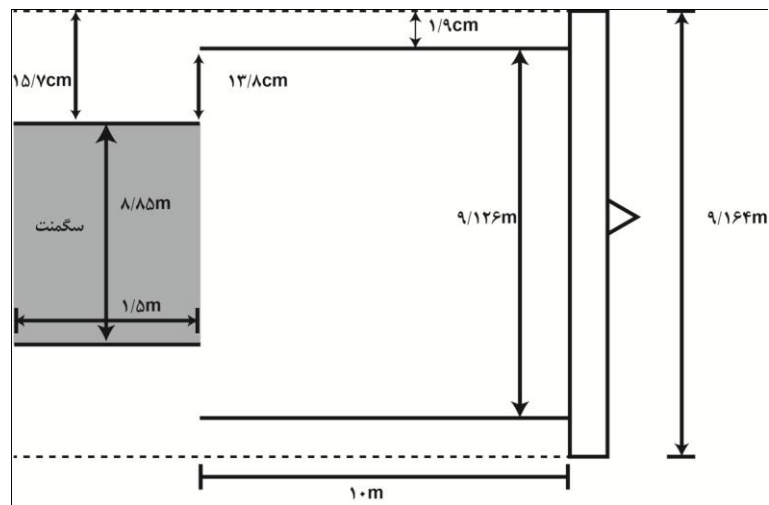
فصل هفتم: بررسی فشار تزریق بر نشست سطح زمین

۱.۷ مقدمه

نگهداری دائم فضای حفاری شده در روش سپر تعادل فشار زمین با استفاده از قطعات پیش ساخته بتنی صورت می‌گیرد. از طرفی فضای خالی بین سگمنت و زمین اطراف از طریق تزریق دوغاب پرمی‌شود. پر کردن با فشار موثر این فضای خالی نقش زیادی در کاهش نشست سطح زمین دارد. به عبارت دیگر پس از رینگ گذاری جهت ایجاد یک توده مستحکم، چسبندگی بیشتر مابین سگمنت‌ها و خاک و همچنین کاهش نشست عملیات تزریق انجام می‌پذیرد. کیفیت تزریق دوغاب همچنین در مقدار نشست سطح کمک می‌کند. همانطوریکه شیلد توسط جک‌ها بسمت جلو در حرکت است، یک فضای خالی در اطراف لاینینگ بوجود می‌آید. به منظور جلوگیری از حرکت زمین لازم است تزریق در فضای خالی صورت گیرد. در این روش فشار تزریق باید به اندازه کافی بالا باشد تا جریان مواد دوغاب و پایداری را تامین کند. عملیات تونلسازی با فشار تزریق بالا و درصد بالای پر کردن دوغاب، باعث کاهش نسبتا بالا نشست سطح پس از گذر شیلد می‌شود. در پروژه تونلسازی مکانیزه مترو خط ۷ تهران قطعه شرقی غربی فضای خالی بین پوشش بتنی و دیواره تونل نزدیک ۱۶ سانتی متر است (شکل ۷-۱) است بنابراین برای کاهش نشست سطح این فضا بخوبی و با فشار مناسب باید پر شود.

در این فصل با تمرکز بر روی دو مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران، نشست حاصل از فشار تزریق با استفاده از روش عددی و مدل سازی سه بعدی اجزاء محدود

(Plaxis3D Tunnel) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

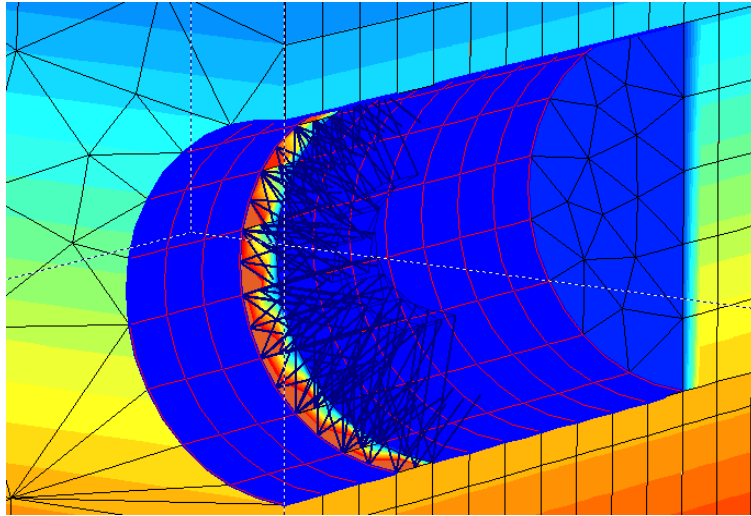


شکل ۷-۱: نمایی از ابعاد ماشین حفار مکانیزه و پوشش بتنی پروژه تونل مترو خط ۷ تهران

۱.۷ بررسی تاثیر فشار تزریق در تونلسازی مکانیزه قطعه شرقی غربی مترو خط ۷ تهران

برای مدل سازی عددی فشار تزریق برای هر فشار سینه کار ۵ حالت فشار تزریق در نظر گرفته شده است؛ این حالات عبارتند از: (۱) مدل سازی بدون اعمال فشار تزریق (۲) فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۳) فشار تزریق برابر با فشار سینه کار به علاوه ۰/۵ بار (۴) فشار تزریق برابر با فشار سینه کار به علاوه یک بار (۵) فشار تزریق برابر با فشار سینه کار به علاوه ۲ بار.

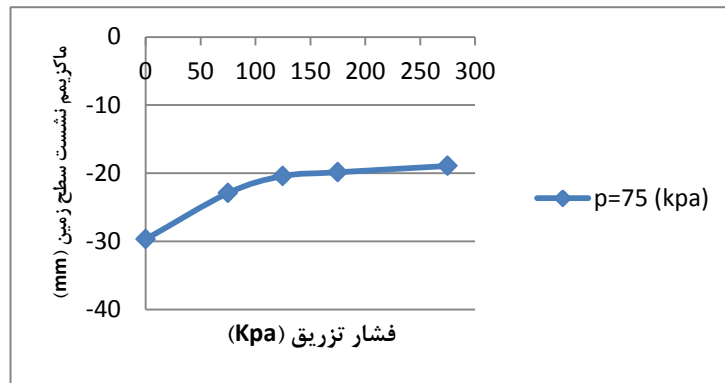
بنابراین با توجه به اینکه ۴ نوع فشار سینه کار مدل شده است با در نظر گرفتن ۵ حالت فشار تزریق، برای هر مقطع ۲۰ مدل ساخته شده است. شکل ۷-۲ نمایی از فشار تزریق مدل سازی شده به دیواره تونل را نشان می دهد.



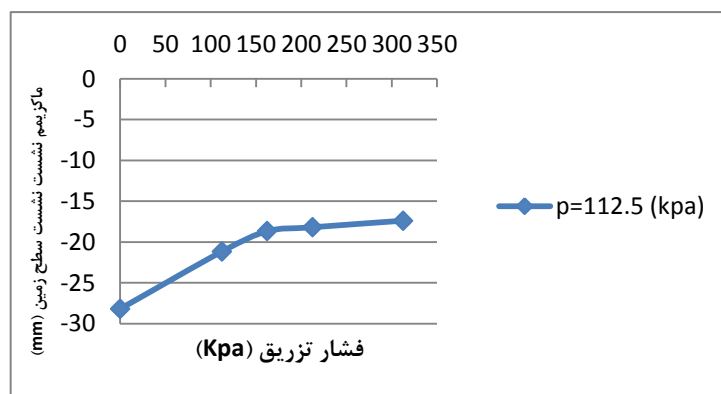
شکل ۷-۲: نحوه اعمال فشار تزریق پشت دستگاه به دیواره تونل

۱.۱.۷ تاثیر فشار تزریق بر نشست سطح زمین در کیلومتراژ ۲۰۰+۸

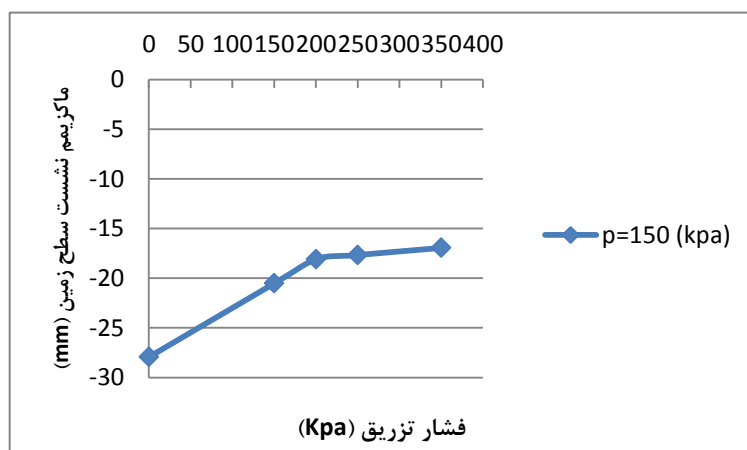
همانطور که در فصل قبل اشاره شد در این مقطع روباره (۲۱ متر) از دو برابر قطر تونل بزرگتر است ($H > 2D$). نتایج بعد از ۱۶/۵ متر حفاری و ۴ مرحله اعمال فشار تزریق و سگمنت گذاری می باشد. اشکال ۷-۳ تا ۷-۶ فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست سطح در مقطع را نشان می دهد.



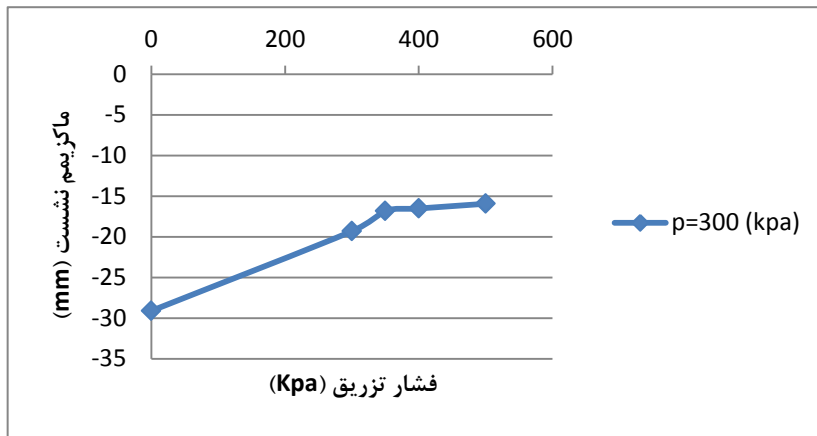
شکل ۳-۷: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۷۵ کیلوپاسکال کیلومتر از ۰ تا ۳۰۰



شکل ۵-۷: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۱۱۲/۵ کیلوپاسکال کیلومتر از ۰ تا ۳۵۰

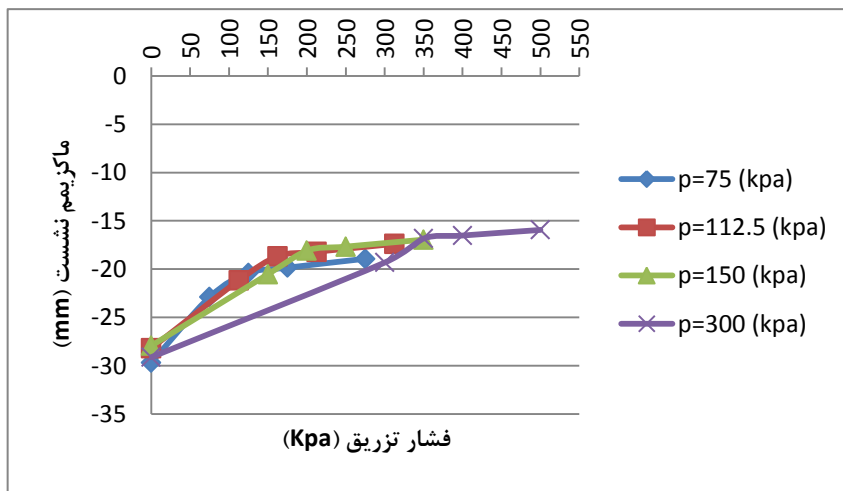


شکل ۴-۷: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال کیلومتر از ۰ تا ۴۰۰



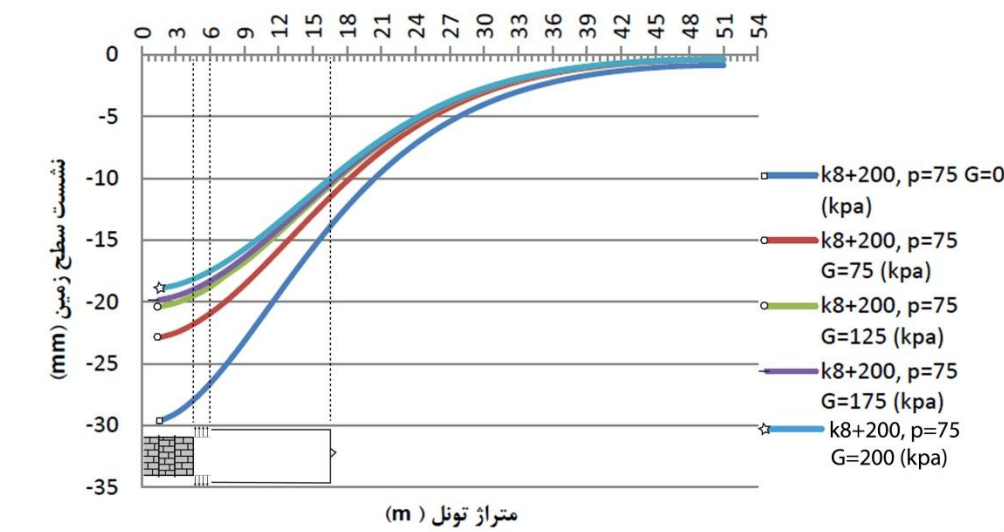
شکل ۶-۷: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۳۰۰ کیلوپاسکال کیلومتر از ۸+۲۰۰

با توجه به نمودار اشکال فوق نشست سطح زمین در این مقطع از ۱۵ تا ۳۰ میلی متر متغیر است. شکل ۷-۷ نمودار تغییرات فشار تزریق در برابر نشست با فشار سینه کار متغیر را نشان می دهد.



شکل ۷-۷: تغییرات فشار تزریق در برابر نشست با فشار سینه کار متغیر کیلومتر از ۸+۲۰۰

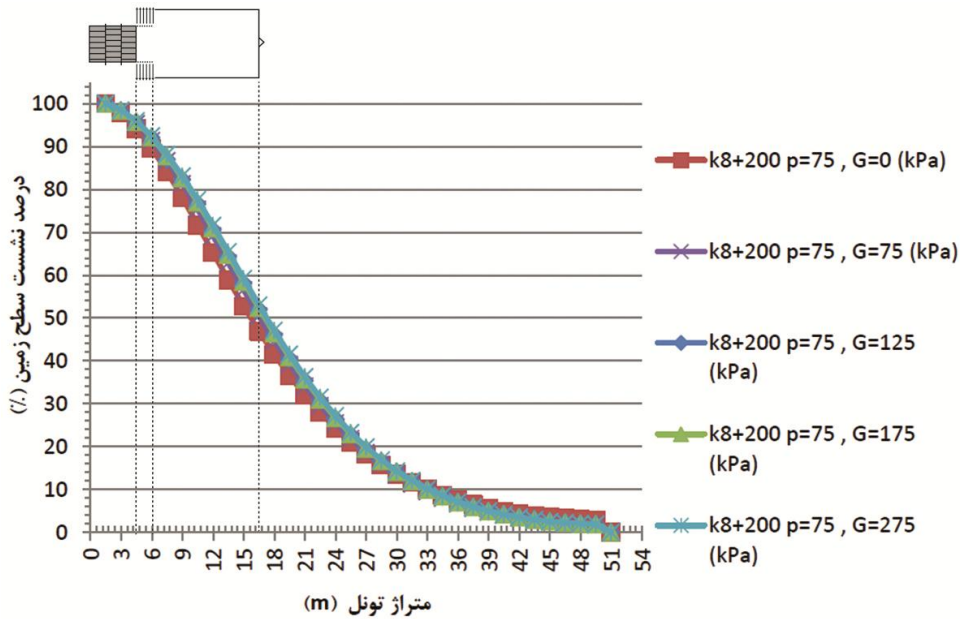
شکل ۸-۷ متر از تونل در برابر نشست سطح در طول مقطع کیلومتر از ۸+۲۰۰ با فشار تزریق متغیر با فشار سینه کار ثابت ۷۵ کیلو پاسکال را نشان می دهد.



شکل ۷-۸: پروفیل طولی نشست سطح کیلومتر ۸+۲۰۰ با فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال و فشار تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری

با توجه به شکل ۷-۸ ماکزیمم نشست سطح زمین هنگامی که تزریق پشت سگمنت صورت نمی‌گیرد، ۲۹/۳ میلی‌متر محاسبه شده است. در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۷۵ کیلو پاسکال) تغییر کند میزان ماکزیمم نشست سطح ۲۲/۹ میلی‌متر، فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ۲۰/۴ میلی‌متر، میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار باشد ۱۹/۸۵ میلی‌متر و در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار شود، میزان ماکزیمم نشست ۱۸/۹۵ است. بنابراین همانطور که از شکل پیداست در حالتی فشار تزریق بیشتر از ۱۲۵ کیلو پاسکال شود منحنی پروفیل طولی نشست بر روی یکدیگر افتاده که نشان دهنده اینست که نشست تغییر جزئی دارد به عبارتی دیگر فشار بهینه تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ارزیابی می‌شود.

شکل ۷-۹ منحنی درصد نشست سطح زمین را در حالتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال است و فشار تزریق متغیر را نشان می‌دهد.

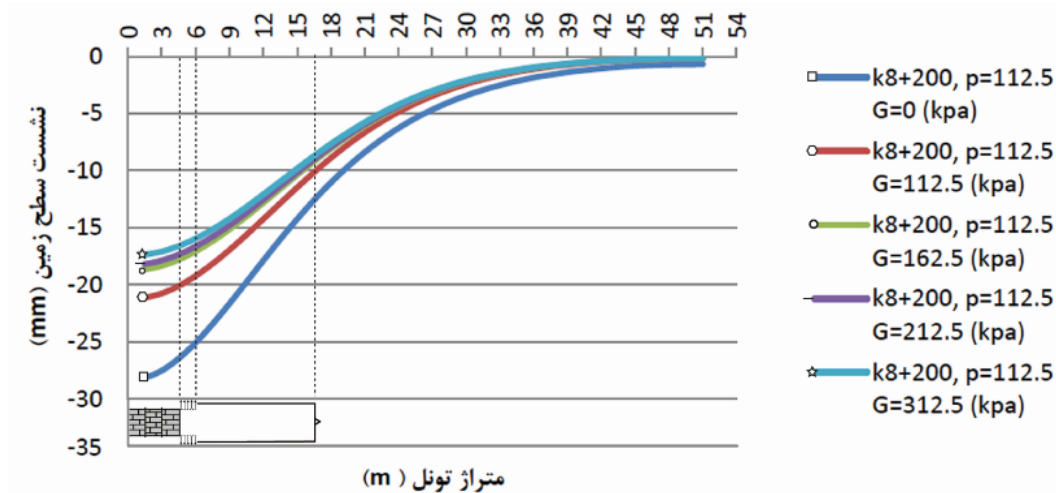


شکل ۷-۹: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و

فشار سینه‌کار ۷۵ کیلو پاسکال

با توجه به شکل ۷-۹ درصد نشست در هر ۵ منحنی که نشان دهنده حالت‌های مختلف تزریق است بر روی یکدیگر افتاده و رفتار تقریباً یکسانی دارند در این حالت کمتر از ۵۰٪ نشست در جلوی سپر، ۵۰٪ تا ۹۰٪ نشست در بالای سپر، ۹۰٪ تا ۹۵٪ نشست در پشت سپر و ۹۵٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد.

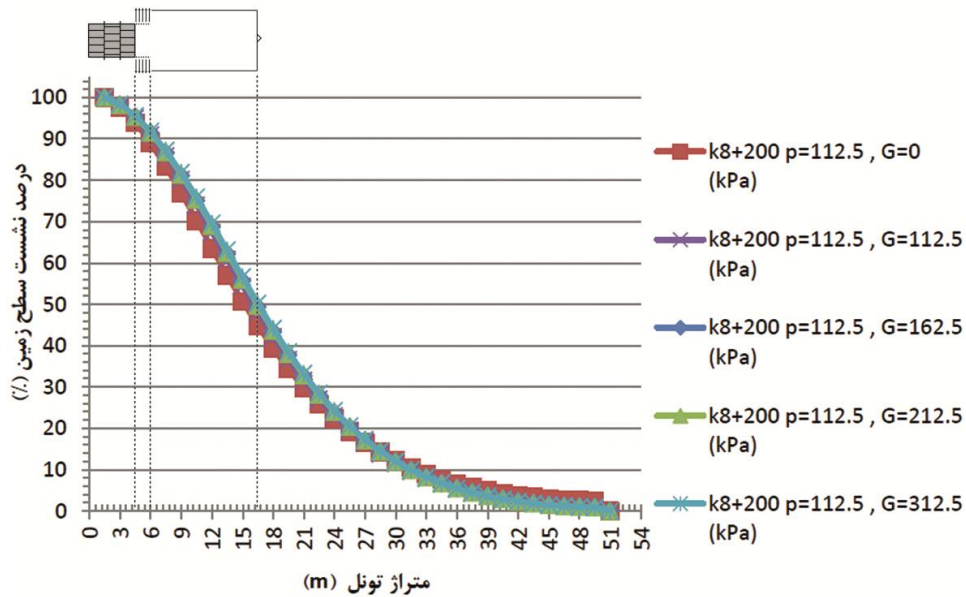
شکل ۷-۱۰: پروفیل طولی نشست سطح مقطع کیلومتر ۸+۲۰۰ با فشار تزریق متغیر و فشار سینه‌کار ثابت ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۱۰: پروفیل طولی نشست سطح کیلومتر ۸+۲۰۰ با فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال و فشار تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری

با توجه به شکل ۷-۱۰ ماکزیمم نشست سطح زمین هنگامی که تزریق پشت سگمنت صورت نمی‌گیرد، ۲۸/۲ میلی‌متر محاسبه شده است. در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۱۱۲/۵ کیلو پاسکال) تغییر کند میزان ماکزیمم نشست سطح ۲۱/۱۷ میلی‌متر، فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ۲۰/۴ میلی‌متر، میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار باشد ۱۹/۸۵ میلی‌متر و در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار شود، میزان ماکزیمم نشست ۱۸/۹۵ است. بنابراین همانطور که از شکل پیداست در حالتی فشار تزریق بیشتر از ۱۶۲/۵ کیلو پاسکال شود منحنی پروفیل طولی نشست بر روی یکدیگر افتاده که نشان دهنده اینست که نشست تغییر جزئی دارد به عبارتی دیگر فشار بهینه تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ارزیابی می‌شود (همانند حالت قبل).

شکل ۷-۱۱ منحنی درصد نشست سطح زمین را در حالتی که فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال است و فشار تزریق متغیر را نشان می‌دهد. درصد نشست این حالت همانند حالت قبل است.

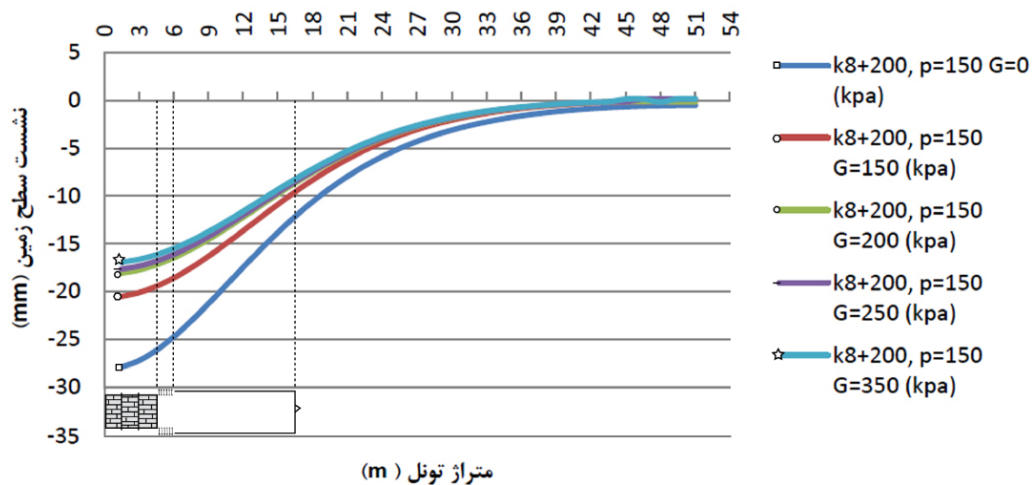


شکل ۷-۱۱: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و فشار

سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال

شکل ۷-۱۲: پروفیل طولی نشست سطح مقطع کیلومتر از ۸+۲۰۰ با فشار تزریق متغیر و فشار سینه کار

ثابت ۱۵۰ کیلو پاسکال را نشان می دهد.



شکل ۷-۱۲: پروفیل طولی نشست سطح کیلومتر از ۸+۲۰۰ با فشار سینه کار ۱۵۰ کیلو پاسکال و فشار تزریق متغیر بعد از

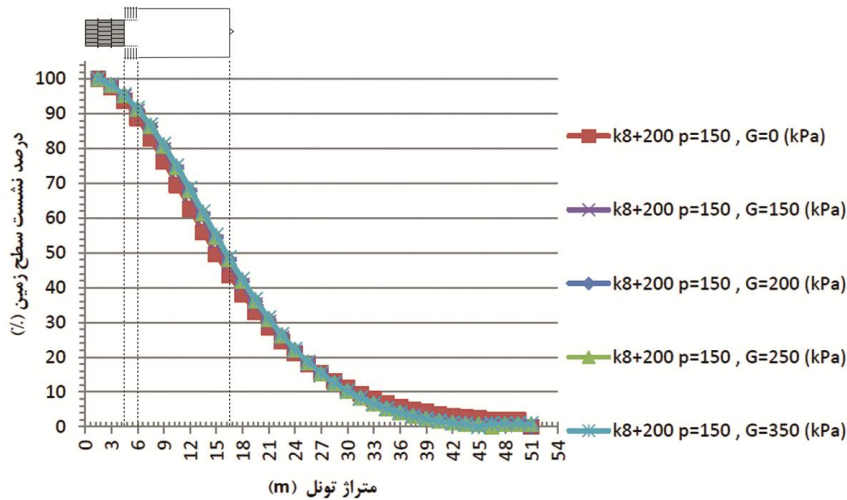
۱۶/۵ متر حفاری

با توجه به شکل ۷-۱۲ ماکزیمم نشست سطح زمین هنگامی که تزریق پشت سگمنت صورت نمی‌گیرد، ۲۷/۹۵ میلی‌متر محاسبه شده است. در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه‌کار (۱۵۰ کیلو پاسکال) تغییر کند میزان ماکزیمم نشست سطح ۲۰/۵۳ میلی‌متر، فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه‌کار ۱۸/۰۹ میلی‌متر، میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه‌کار باشد ۱۷/۶۷ میلی‌متر و در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه‌کار شود، میزان ماکزیمم نشست ۱۶/۹۵ است. بنابراین همانطور که از شکل پیداست در حالتی فشار تزریق بیشتر از ۲۰۰ کیلو پاسکال شود منحنی پروفیل طولی نشست بر روی یکدیگر افتاده که نشان دهنده اینست که نشست تغییر جزئی دارد به عبارتی دیگر فشار بهینه تزریق نیز در این حالت هم ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه‌کار ارزیابی می‌شود.

شکل ۷-۱۳ منحنی درصد نشست سطح زمین را در حالتی که فشار سینه‌کار ۱۵۰ کیلو پاسکال است و فشار تزریق متغیر را نشان می‌دهد.

در این حالت کمتر از ۴۸٪ نشست در جلوی سپر، ۴۸٪ تا ۹۰٪ نشست در بالای سپر، ۹۰٪ تا ۹۵٪ نشست در پشت سپر و ۹۵٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد

شکل ۷-۱۴ پروفیل طولی نشست سطح مقطع کیلومتر ۲۰۰+۸ با فشار تزریق متغیر و فشار سینه‌کار ثابت ۳۰۰ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد.



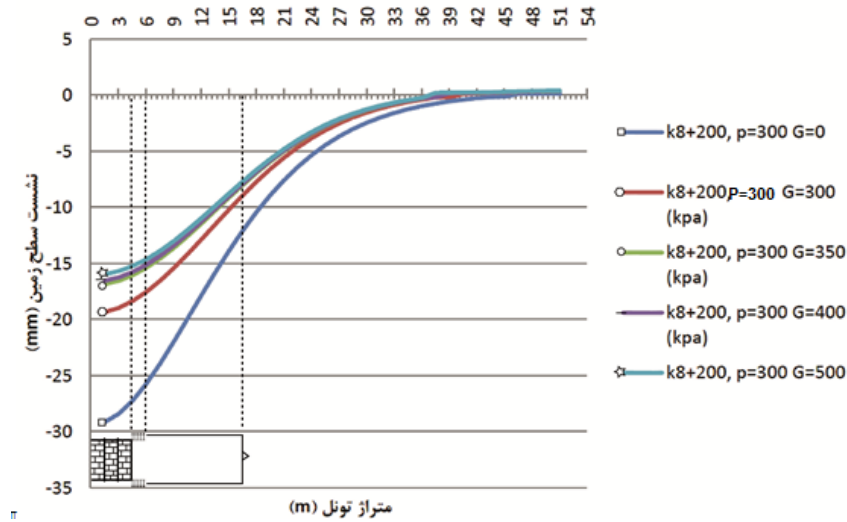
شکل ۷-۱۳: درصد نشست سطح زمین کیلومترزاد ۲۰۰+۸ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق

مختلف و فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال

با توجه به شکل ۷-۱۴ ماکزیمم نشست سطح زمین هنگامی که تزریق پشت سگمنت صورت نمی‌گیرد، ۲۹/۱۲ میلی‌متر محاسبه شده است. در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۳۰۰ کیلو پاسکال) تغییر کند میزان ماکزیمم نشست سطح ۱۹/۳۲ میلی‌متر، فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ۱۶/۸۳ میلی‌متر، میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار باشد ۱۶/۵۲ میلی‌متر و در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار شود، میزان ماکزیمم نشست ۱۵/۹۴ است. بنابراین همانطور که از شکل پیداست در حالتی فشار تزریق بیشتر از ۲۰۰ کیلو پاسکال شود منحنی طولی نشست بر روی یکدیگر افتاده که نشان دهنده اینست که نشست تغییر جزئی دارد به عبارتی دیگر فشار بهینه تزریق نیز در این حالت هم ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ارزیابی می‌شود.

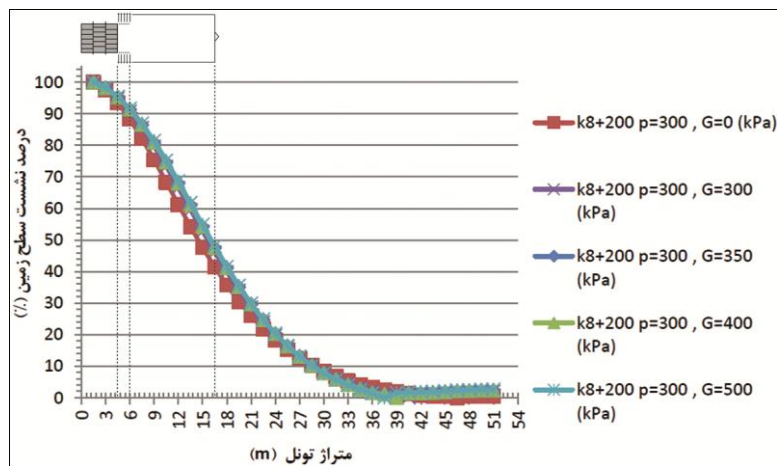
شکل ۷-۱۵ منحنی درصد نشست سطح زمین را در حالتی که فشار سینه کار ۳۰۰ کیلو پاسکال است و فشار تزریق متغیر را نشان می‌دهد.

در این حالت کمتر از ۰.۴۸٪ نشست در جلوی سپر، ۰.۴۸٪ تا ۰.۹۰٪ نشست در بالای سپر، ۰.۹۰٪ تا ۰.۹۵٪ نشست در پشت سپر و ۰.۹۵٪ تا ۱.۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد



شکل ۷-۱۴: پروفیل طولی نشست سطح کیلومتر از ۸+۲۰۰ با فشار سینه کار ۳۰۰ کیلو پاسکال و فشار

تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری



شکل ۷-۱۵: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۸+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با

فشار تزریق مختلف و فشار سینه کار ۳۰۰ کیلو پاسکال

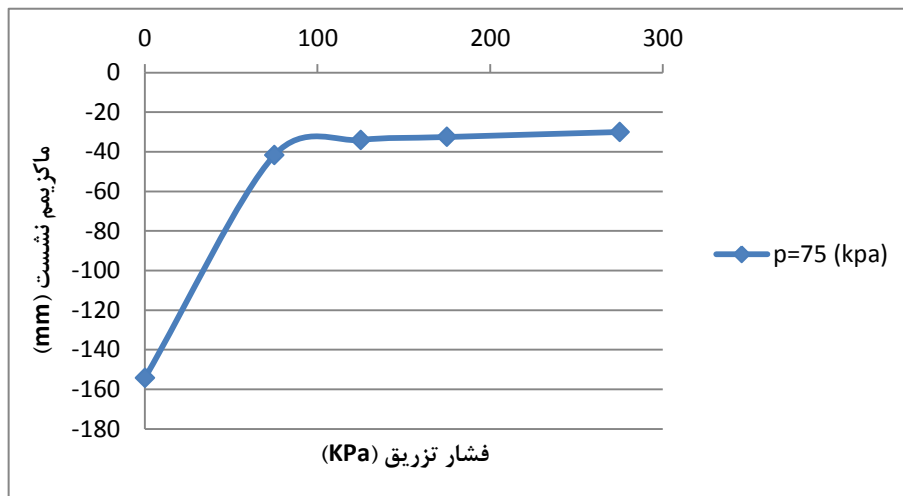
در جدول ۱-۷ درصد نشست سطح زمین این مقطع تونل در شرایط مختلف نشان داده شده است. حرف G در این جدول نمایانگر هر ۵ حالت فشار تزریق است.

جدول ۱-۷: درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار تزریق کیلومتراژ ۸+۲۰۰

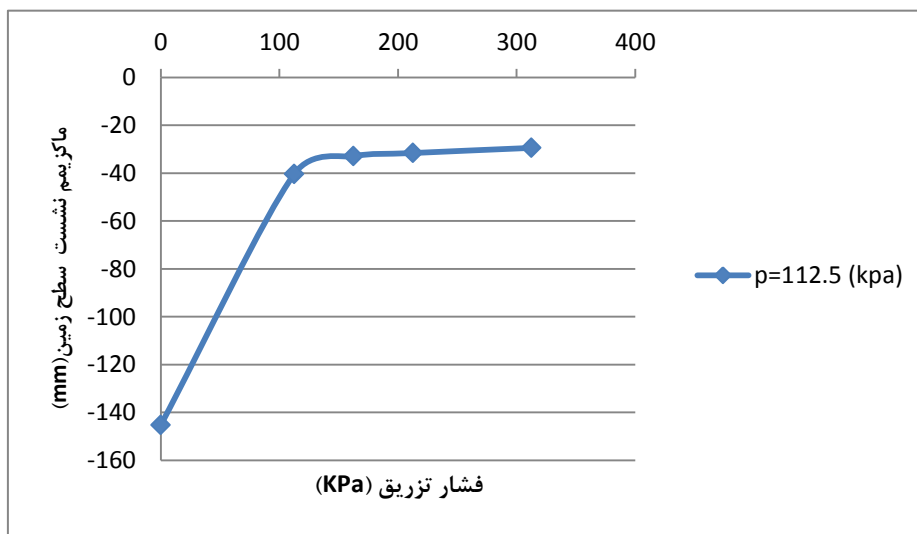
| درصد نشست دنباله (%) | درصد نشست در پشت سپر (%) | درصد نشست در بالای سپر (%) | درصد نشست جلو سپر (%) | شرایط مدل سازی |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------|
| ۱۰۰-۹۵ | ۹۵-۹۰ | ۹۰-۵۰ | <۵۰ | G و P=75 (kPa) |
| ۱۰۰-۹۵ | ۹۵-۹۰ | ۹۰-۵۰ | <۵۰ | G و P=112.5 (kPa) |
| ۱۰۰-۹۵ | ۹۵-۹۰ | ۹۰-۴۸ | <۴۸ | G و P=150 (kPa) |
| ۱۰۰-۹۵ | ۹۵-۹۰ | ۹۰-۴۸ | <۴۸ | G و P=300 (kPa) |

۲.۱.۷ تاثیر فشار تزریق بر نشست سطح زمین در کیلومتراژ ۵+۲۰۰

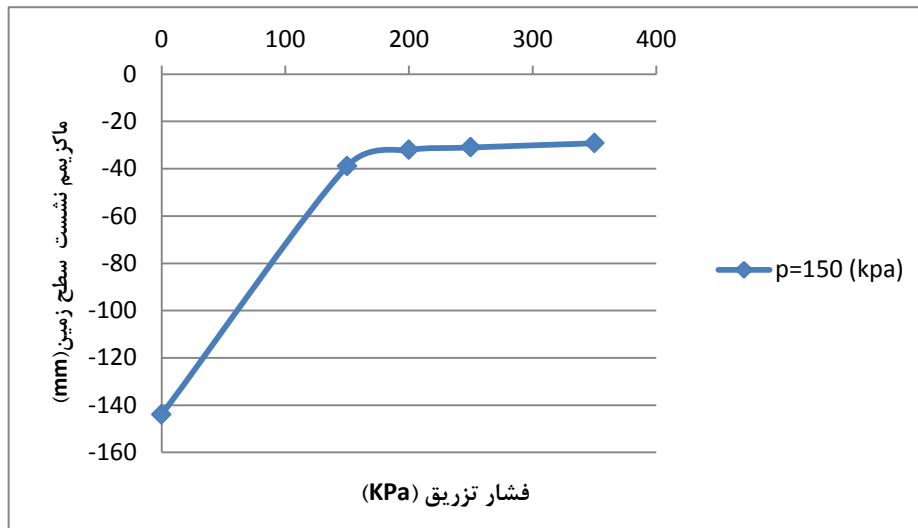
در این مقطع روباره از دو برابر قطر تونل کوچکتر است ($H < 2D$). نتایج بعد از ۱۶/۵ متر حفاری و ۴ مرحله اعمال فشار تزریق می‌باشد. اشکال ۱۶-۷ تا ۱۹-۷ فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست سطح در مقطع را نشان می‌دهد.



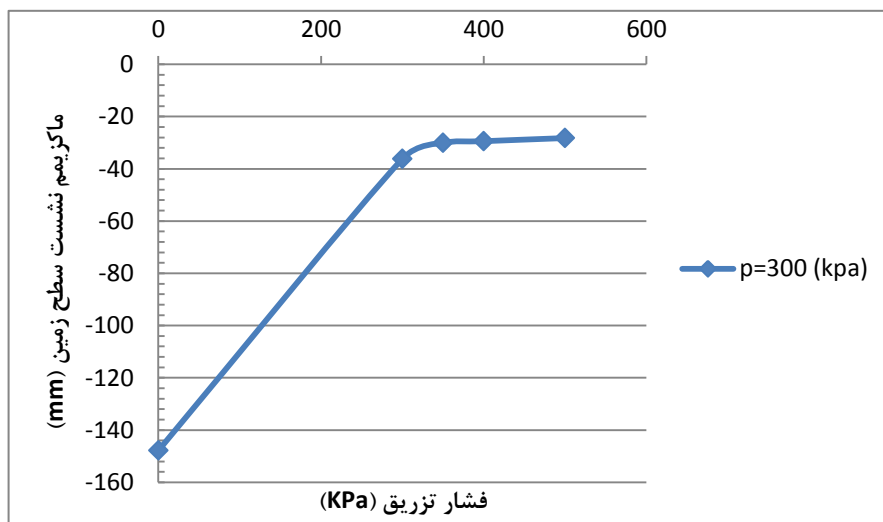
شکل ۱۶-۷: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۷۵ کیلوپاسکال کیلومتراژ ۵+۲۰۰



شکل ۱۷-۷: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۱۱۲/۵ کیلوپاسکال کیلومتراژ ۵+۲۰۰

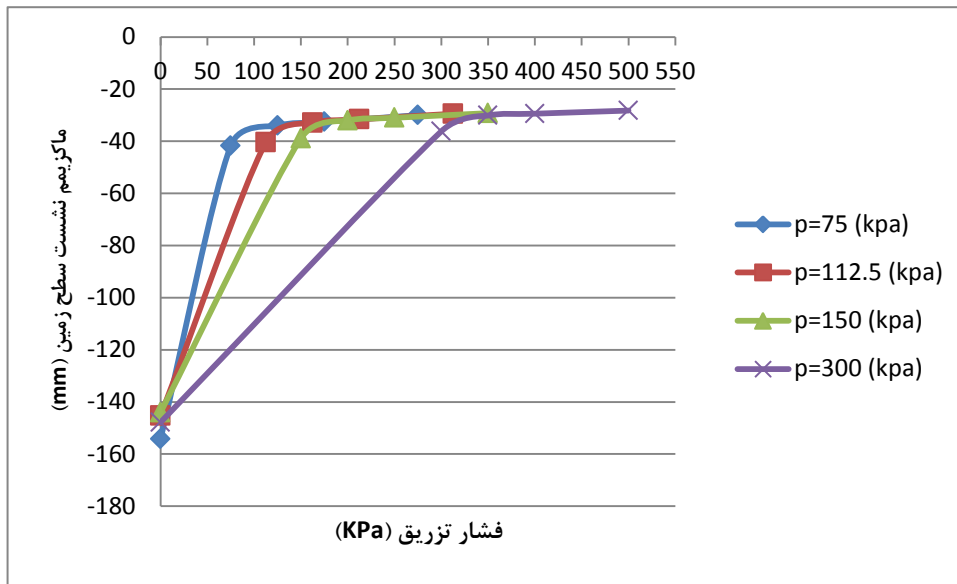


شکل ۷-۱۸: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال کیلومتر از ۵+۲۰۰



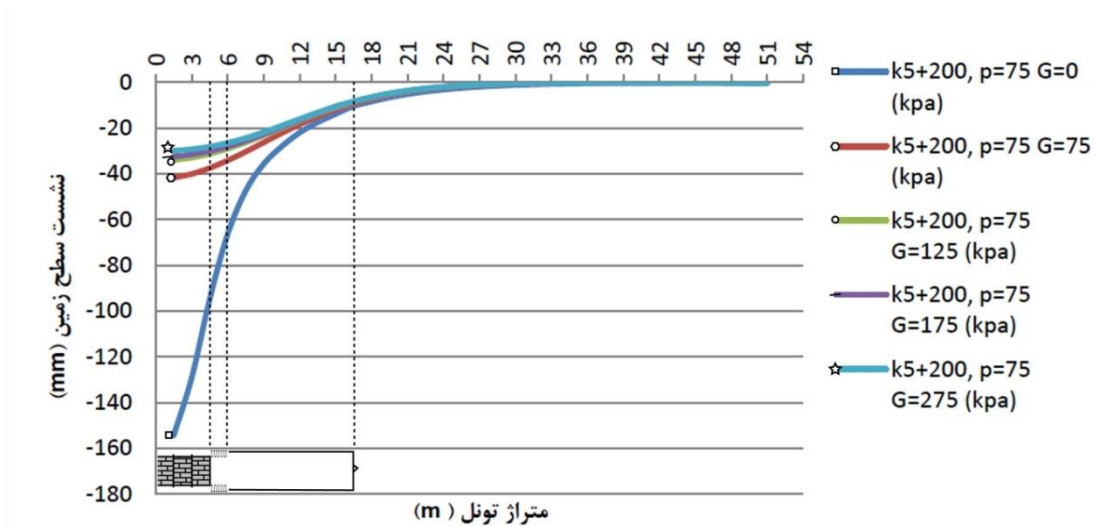
شکل ۷-۱۹: تغییرات فشار تزریق در برابر ماکزیمم نشست با فشار سینه کار ثابت ۱۵۰ کیلوپاسکال کیلومتر از ۵+۲۰۰

شکل ۷-۲۰ نمودار تغییرات فشار تزریق در برابر نشست با فشار سینه کار متغیر را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲۰: تغییرات فشار تزریق در برابر نشست با فشار سینه کار متغیر کیلومتر از ۵+۲۰۰

شکل ۷-۲۱: متر از تونل در برابر نشست سطح در طول مقطع کیلومتر از ۵+۲۰۰ با فشار تزریق متغیر با فشار سینه کار ثابت ۷۵ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد.

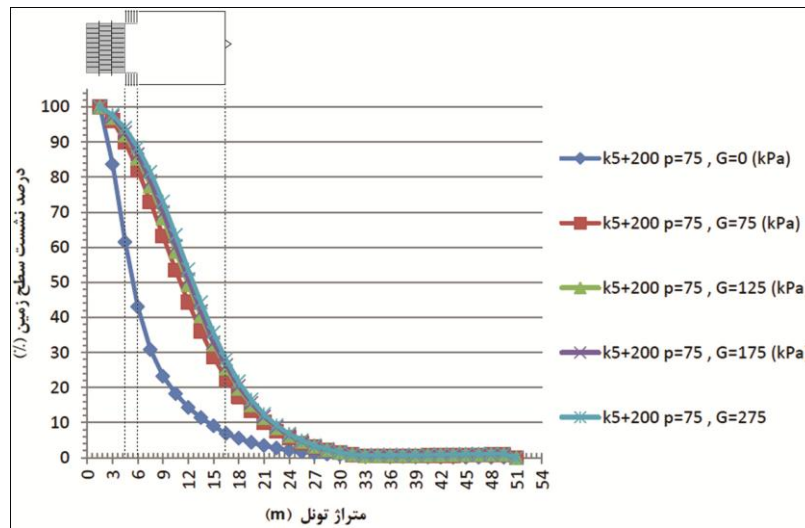


شکل ۷-۲۱: پروفیل طولی نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ با فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال و فشار تزریق متغیر بعد از

۱۶/۵ متر حفاری

با توجه به شکل ۷-۲۱ ماکزیمم نشست سطح زمین هنگامی که تزریق پشت سگمنت صورت نمی‌گیرد، ۱۵۴/۲۶ میلی‌متر محاسبه شده است. در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۷۵ کیلو پاسکال) تغییر کند میزان ماکزیمم نشست سطح ۴۱/۷۴ میلی‌متر، فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ۳۴/۰۶ میلی‌متر، میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار باشد ۳۲/۵۴ میلی‌متر و در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار شود، میزان ماکزیمم نشست ۳۰ میلی‌متر است. بنابراین همانطور که از شکل پیداست در حالتی فشار تزریق بیشتر از ۱۲۵ کیلو پاسکال شود منحنی پروفیل طولی نشست بر روی یکدیگر افتاده که نشان دهنده اینست که نشست تغییر جزئی دارد به عبارتی دیگر فشار بهینه تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ارزیابی می‌شود.

شکل ۷-۲۲ منحنی درصد نشست سطح زمین را در حالتی که فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال است و فشار تزریق متغیر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷-۲۲ درصد نشست در حالتی که فشار تزریق صفر باشد با حالتی که فشار تزریق غیر صفر باشد، متفاوت است. در حالتی که فشار تزریق صفر است. کمتر از ۸٪ نشست در جلوی سپر، ۸٪ تا ۴۲٪ نشست در بالای سپر، ۴۲٪ تا ۶۲٪ نشست در پشت سپر و ۶۲٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد. در صورتی که فشار تزریق غیر صفر است منحنی درصد نشست بر روی یکدیگر افتاده و رفتار تقریباً یکسانی دارند در این حالت کمتر از ۲۵٪ نشست در جلوی سپر، ۲۵٪ تا ۸۵٪ نشست در بالای سپر، ۸۵٪ تا ۹۰٪ نشست در پشت سپر و ۹۰٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد.



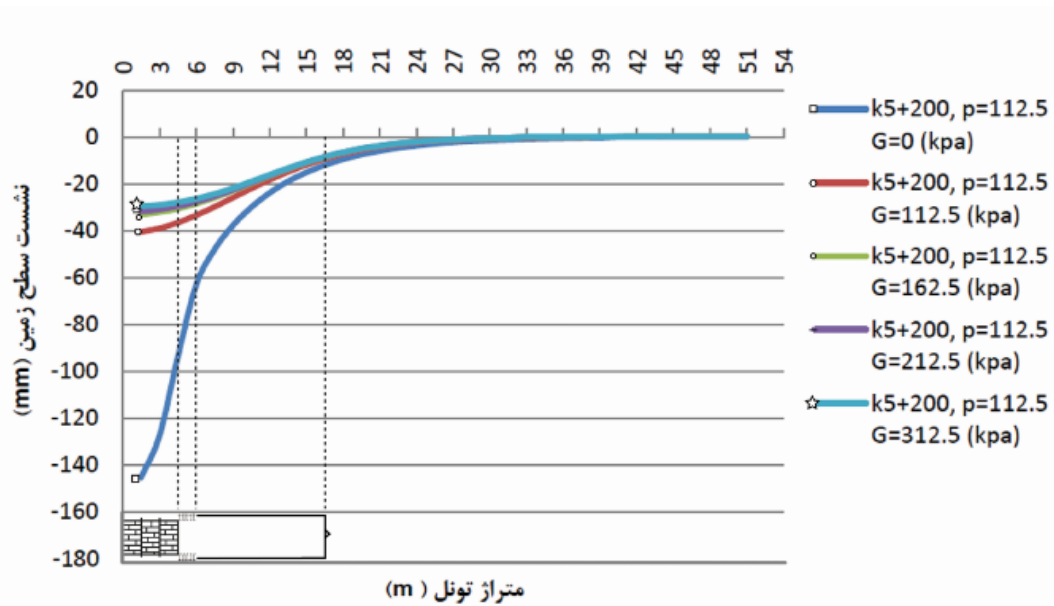
شکل ۷-۲۲: درصد نشست سطح زمین کیلومترهاژ ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار

تزریق مختلف و فشار سینه کار ۷۵ کیلو پاسکال

شکل ۷-۲۳: پروفیل طولی نشست سطح در طول مقطع کیلومترهاژ ۵+۲۰۰ با فشار تزریق متغیر با فشار سینه کار ثابت ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال را نشان می دهد.

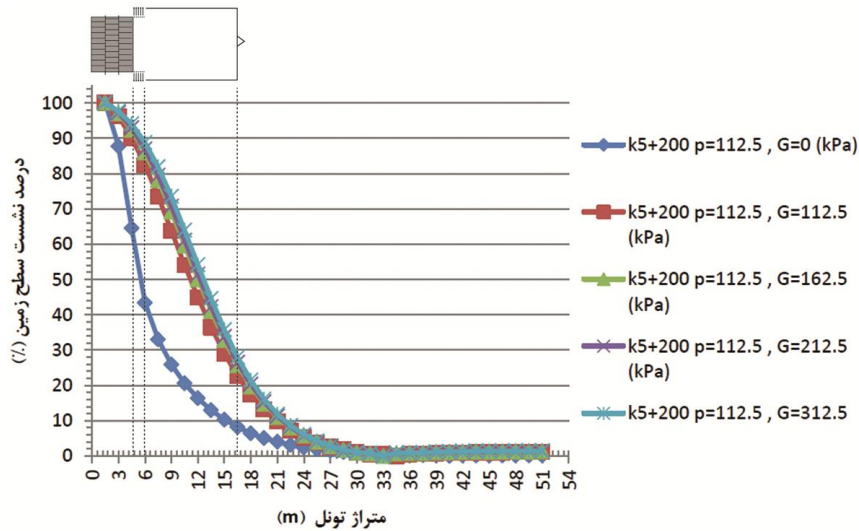
با توجه به شکل ۷-۲۳ ماکزیمم نشست سطح زمین هنگامی که تزریق پشت سگمنت صورت نمی گیرد، ۱۴۵/۲۹ میلی متر محاسبه شده است. در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۱۱۲/۵ کیلو پاسکال) تغییر کند میزان ماکزیمم نشست سطح ۴۰/۳۷ میلی متر، فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ۳۲/۹۳ میلی متر، میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار باشد ۳۱/۶ میلی متر و در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار شود، میزان ماکزیمم نشست ۲۹/۴۴ میلی متر است. بنابراین همانطور که از شکل پیداست در حالتی فشار تزریق بیشتر از ۱۶۲/۵ کیلو پاسکال شود منحنی پروفیل طولی نشست همانند حالت قبل بر روی یکدیگر افتاده که نشان دهنده اینست که نشست تغییر جزئی دارد به عبارتی دیگر فشار بهینه تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ارزیابی می شود.

شکل ۷-۲۴ منحنی درصد نشست سطح زمین را در حالتی که فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال است و فشار تزریق متغیر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷-۲۴ درصد نشست در حالتی که فشار تزریق صفر باشد با حالتی که فشار تزریق غیر صفر باشد، متفاوت است. در حالتی که فشار تزریق صفر است کمتر از ۹٪ نشست در جلوی سپر، ۹٪ تا ۴۴٪ نشست در بالای سپر، ۴۴٪ تا ۶۴٪ نشست در پشت سپر و ۶۴٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد. در صورتی که فشار تزریق غیر صفر است منحنی درصد نشست بر روی یکدیگر افتاده و رفتار تقریباً یکسانی دارند در این حالت کمتر از ۲۵٪ نشست در جلوی سپر، ۲۵٪ تا ۸۵٪ نشست در بالای سپر، ۸۵٪ تا ۹۰٪ نشست در پشت سپر و ۹۰٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد.



شکل ۷-۲۴: پروفیل طولی نشست سطح زمین کیلومتر از ۵+۲۰۰ تونل با فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال و فشار تزریق

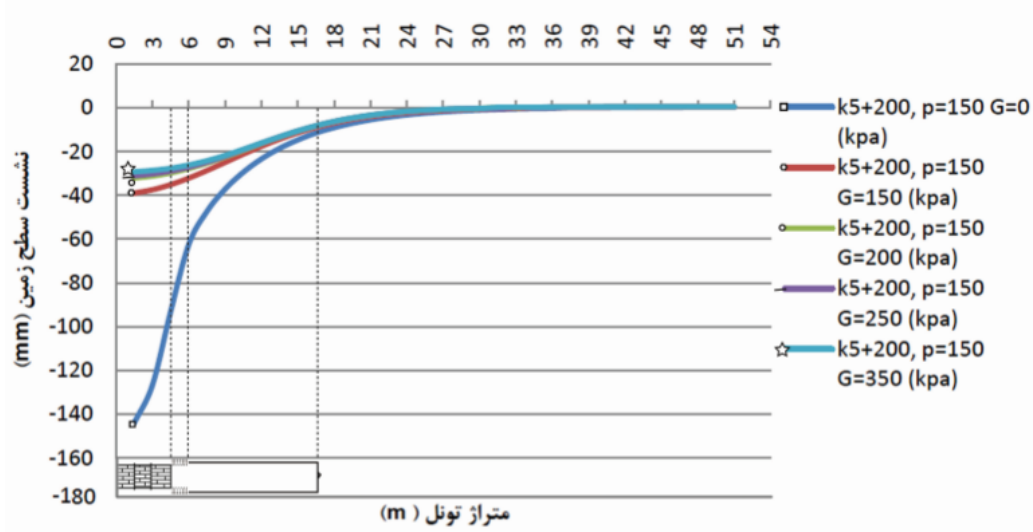
متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری



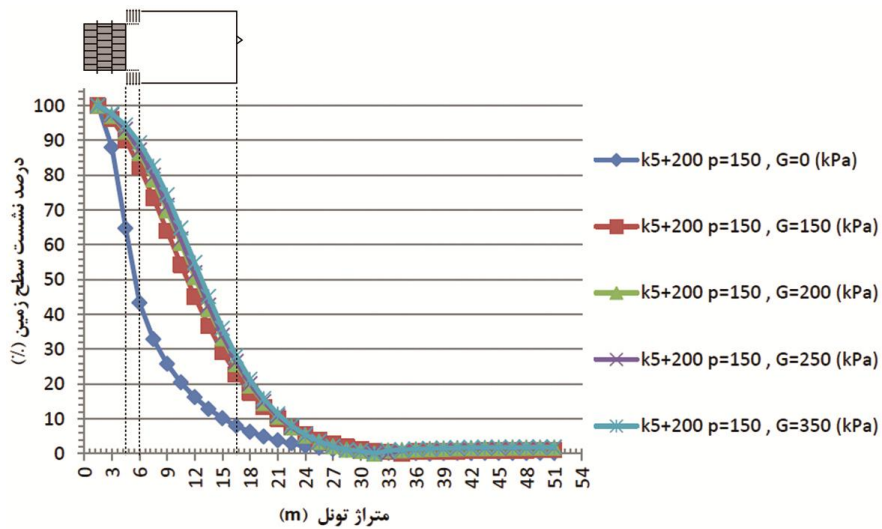
شکل ۷-۲۴: درصد نشست سطح زمین کیلومتر از ۲۰۰+۵ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق

مختلف و فشار سینه کار ۱۱۲/۵ کیلو پاسکال

شکل ۷-۲۵: پروفیل طولی نشست سطح در طول مقطع کیلومتر از ۲۰۰+۵ با فشار تزریق متغیر با فشار سینه کار ثابت ۱۵۰ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷-۲۵ ماکزیمم نشست سطح زمین هنگامی که تزریق پشت سگمنت صورت نمی‌گیرد، ۱۴۴/۰۲ میلی‌متر محاسبه شده است. در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۱۵۰ کیلو پاسکال) تغییر کند میزان ماکزیمم نشست سطح ۳۸/۹۳ میلی‌متر، فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ۳۲/۰۹ میلی‌متر، میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار باشد ۳۱ میلی‌متر و در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار شود، میزان ماکزیمم نشست ۲۹/۲۲ میلی‌متر است. بنابراین همانطور که از شکل پیداست در حالتی فشار تزریق بیشتر از ۲۰۰ کیلو پاسکال شود نشست تغییر جزئی دارد به عبارتی دیگر فشار بهینه تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ارزیابی می‌شود. شکل ۷-۲۶ منحنی درصد نشست سطح زمین را در حالتی که فشار سینه کار ۱۵۰ کیلو پاسکال است و فشار تزریق متغیر را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل درصد نشست همانند حالت قبل است.

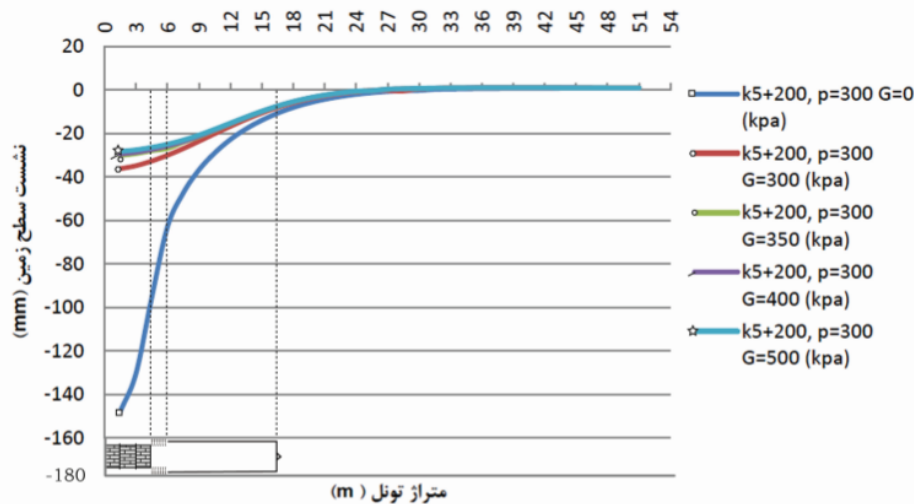


شکل ۷-۲۵: پروفیل طولی نشست سطح کیلومتر ۲۰۰+۵ با فشار سینه کار ۱۵۰ کیلو پاسکال و فشار تزریق متغیر بعد از ۱۶/۵ متر حفاری



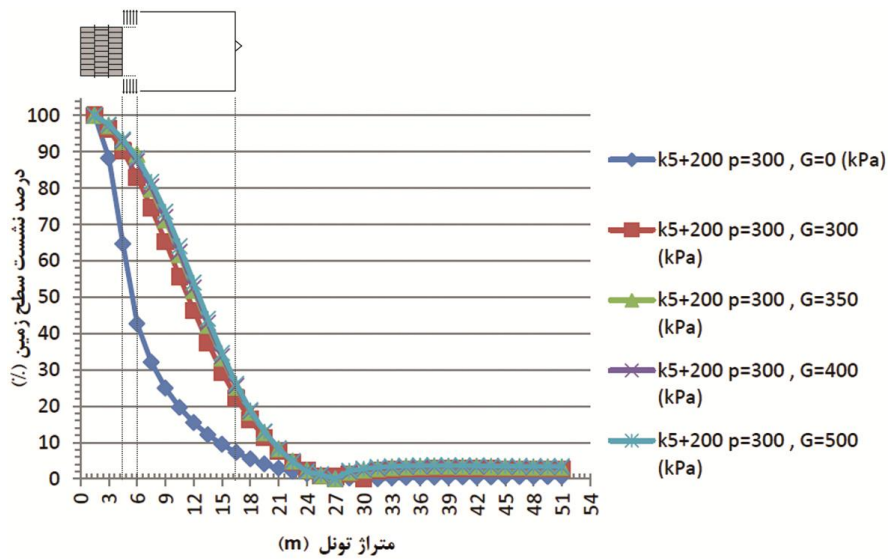
شکل ۷-۲۶: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۲۰۰+۵ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف و فشار سینه کار ۱۵۰ کیلو پاسکال

شکل ۷-۲۷ پروفیل طولی نشست سطح در طول مقطع کیلومتراژ ۲۰۰+۵ با فشار تزریق متغیر با فشار سینه کار ثابت ۳۰۰ کیلو پاسکال را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷-۲۷ ماکزیمم نشست سطح زمین هنگامی که تزریق پشت سگمنت صورت نمی‌گیرد، $147/83$ میلی‌متر محاسبه شده است. در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۳۰۰ کیلو پاسکال) تغییر کند میزان ماکزیمم نشست سطح $36/2$ میلی‌متر، فشار تزریق $0/5$ بار بیشتر از فشار سینه کار $30/13$ میلی‌متر، میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار باشد $29/43$ میلی‌متر و در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار شود، میزان ماکزیمم نشست $28/23$ میلی‌متر است. بنابراین همانطور که از شکل پیداست در حالتی فشار تزریق بیشتر از ۳۵۰ کیلو پاسکال شود نشست تغییر جزئی دارد به عبارتی دیگر فشار بهینه تزریق $0/5$ بار بیشتر از فشار سینه کار ارزیابی می‌شود. شکل ۷-۲۸ منحنی درصد نشست سطح زمین را در حالتی که فشار سینه کار ۳۰۰ کیلو پاسکال است و فشار تزریق متغیر را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل درصد نشست همانند حالت قبل است.



شکل ۷-۲۷: متر از تونل در برابر تغییرات نشست سطح کیلومتراژ ۲۰۰+۵ با فشار سینه کار ۳۰۰ کیلو پاسکال و

فشار تزریق متغیر بعد از $16/5$ متر حفاری



شکل ۷-۲۸: درصد نشست سطح زمین کیلومتر ۵+۲۰۰ بعد از ۱۶/۵ متر حفاری با فشار تزریق مختلف

و فشار سینه‌کار ۳۰۰ کیلو پاسکال

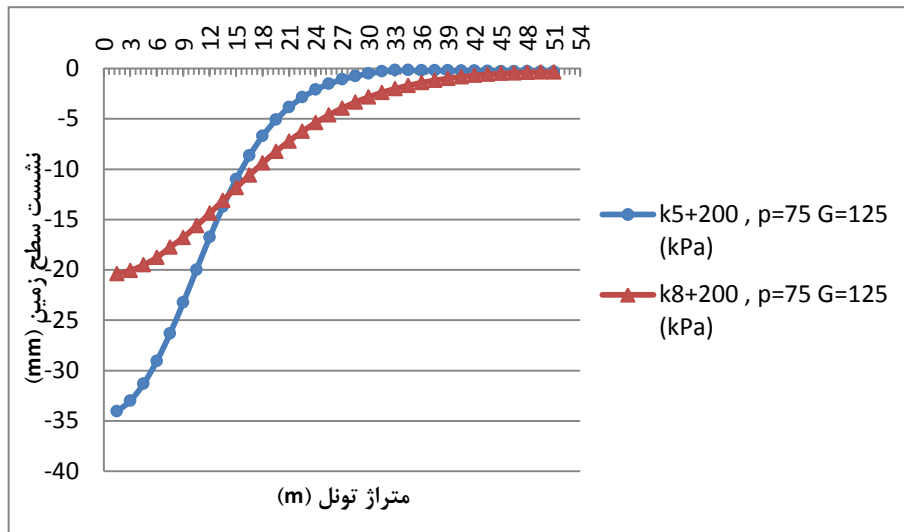
در جدول ۷-۲ درصد نشست سطح زمین مقطع کیلومتر ۵+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ تهران (قطعه شرقی غربی) در شرایط مختلف فشار تزریق نشان داده شده است.

جدول ۲-۷: درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار تزریق کیلومتراژ ۵+۲۰۰

| درصد نشست دنباله (%) | درصد نشست در پشت سپر (%) | درصد نشست در بالای سپر (%) | درصد نشست جلو سپر (%) | شرایط مدل سازی |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------|
| ۱۰۰-۶۲ | ۶۲-۴۲ | ۴۲-۸ | <۸ | G=0 و P=75 (kPa) |
| ۱۰۰-۹۰ | ۹۰-۸۵ | ۸۵-۲۵ | <۲۵ | G≠0 و P=75 (kPa) |
| ۱۰۰-۶۴ | ۶۴-۴۴ | ۴۴-۹ | <۹ | G=0 و P=112.5 (kPa) |
| ۱۰۰-۹۰ | ۹۰-۸۵ | ۸۵-۲۵ | <۲۵ | G≠0 و P=112.5 (kPa) |
| ۱۰۰-۶۴ | ۶۴-۴۴ | ۴۴-۹ | <۹ | G=0 و P=150 (kPa) |
| ۱۰۰-۹۰ | ۹۰-۸۵ | ۸۵-۲۵ | <۲۵ | G≠0 و P=150 (kPa) |
| ۱۰۰-۶۴ | ۶۴-۴۴ | ۴۴-۹ | <۹ | G=0 و P=300(kPa) |
| ۱۰۰-۹۰ | ۹۰-۸۵ | ۸۵-۲۵ | <۲۵ | G≠0 و P=300 (kPa) |

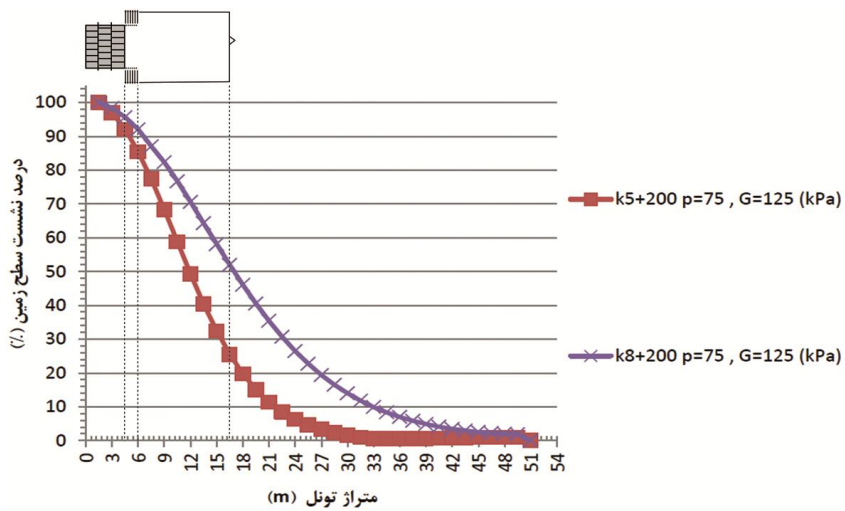
۲.۷ مقایسه تاثیر فشار تزریق بر نشست در دو مقطع کیلومتراژ ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰

برای مقایسه دو مقطع ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰ به منظور بررسی نشست سطح زمین، برای هر دو مقطع فشار سینه کار معادل ۷۵ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۲۵ کیلو پاسکال (یعنی ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار) بکار برده شده است. شکل ۲۹-۷ پروفیل طولی نشست را برای این دو مقطع نشان می دهد. همانطور که در این شکل دیده می شود تاثیر این فشارها در مقطع ۵+۲۰۰ بر میزان نشست بیشتر است. با توجه به اینکه روباره مقطع ۵+۲۰۰، ۱۱ متر ($H < 2D$) و روباره مقطع ۸+۲۰۰، ۲۱ متر ($H > 2D$) است.



شکل ۷-۲۹: پروفیل طولی نشست دو مقطع ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ تهران

شکل ۷-۳۰ درصد نشست سطح زمین برای این دو مقطع را نشان می دهد.



شکل ۷-۳۰: مقایسه درصد نشست سطح زمین دو مقطع ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ (فشار تزریق ۰/۵ بار

بیشتر از فشار سینه کار)

با توجه به شکل ۷-۳۰ درصد نشست برای مقطع ۸+۲۰۰، کمتر از ۵۰٪ نشست در جلوی سپر، ۵۰٪ تا ۹۲٪ نشست در بالای سپر، ۹۲٪ تا ۹۶٪ نشست در پشت سپر و ۹۶٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد. در صورتی که برای مقطع ۵+۲۰۰، کمتر از ۲۵٪ نشست در جلوی سپر، ۲۵٪ تا ۸۵٪ نشست در بالای سپر، ۸۵٪ تا ۹۰٪ نشست در پشت سپر و ۹۰٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد.

۳.۷ جمع بندی

در این فصل به آنالیز حساسیت فشار تزریق و تاثیر آن بر نشست سطح زمین برای دو کیلومتر از ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰ تونل مترو قطعه شرقی غربی تهران پرداخته شد. برای مدل سازی عددی فشار تزریق برای هر فشار سینه کار ۵ حالت فشار تزریق در نظر گرفته شده است؛ این حالات عبارتند از: (۱) مدل سازی بدون اعمال فشار تزریق (۲) فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۳) فشار تزریق برابر با فشار سینه کار به علاوه ۰/۵ بار (۴) فشار تزریق برابر با فشار سینه کار به علاوه یک بار (۵) فشار تزریق برابر با فشار سینه کار به علاوه ۲ بار. بنابراین با توجه به اینکه ۴ نوع فشار سینه کار مدل شده است با در نظر گرفتن ۵ حالت فشار تزریق، برای هر مقطع ۲۰ مدل ساخته شده است. نتایج نشان می‌دهد فشار تزریق در این مقاطع بر میزان نشست بسیار تاثیر گذار است. فشار بهینه تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ارزیابی شد. با بدست آوردن منحنی درصد نشست سطح زمین مشخص شد در مقطع با روباره کم در حالتی که تزریق پیشست پوشش بتنی صورت نگیرد (فشار تزریق صفر) رفتار نشست سطح زمین با سایر حالات متفاوت است.

فصل هشتم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱.۸ جمع بندی

استفاده از تونلسازی به روش حفار مکانیزه متعادل کننده فشار تعادل زمین به علت مزایای آن در حال گسترش است. به دلیل اهمیت نشست سطح زمین به بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق در پروژه خط ۷ مترو تهران (قطعه شرقی غربی) پرداخته شد.

دو عامل مهم که در حفاری مکانیزه شهری متعادل کننده فشار زمین (EPB) در پایداری زمین نقش دارند، یکی وجود سپر استوانه‌ای است که تا زمان نصب پوشش نهایی به عنوان سیستم نگهدارنده موقت عمل می‌کند و دیگری اعمال فشار از طریق دستگاه به جبهه کار تونل است. پایداری جبهه کار تونل یکی از فاکتورهای مهم حفاری در زمین‌های نرم در مناطق شهری می‌باشد. در روش حفاری مکانیزه به منظور پایدار ماندن جبهه کار، به طرق مختلف فشار نگهداری جبهه کار اعمال می‌شود. برخلاف سایر سپرها در سپر تعادلی فشار زمین پایداری بدون واسطه نگهداری ثانویه و توسط مواد حفاری شده صورت می‌گیرد. در صورتیکه حجم مواد حفر شده در داخل اتاقک حفاری مناسب باشد می‌توان حالت پایدار را برقرار کرد. انتخاب فشار مناسب جبهه کار یکی از مهمترین مراحل حفاری با سپر تعادلی فشار زمین است.

نگهداری دائم فضای حفاری شده در روش سپر تعادل فشار زمین با استفاده از قطعات پیش ساخته بتنی صورت می‌گیرد. از طرفی فضای خالی بین سگمنت و زمین اطراف از طریق تزریق دوغاب پرمی‌شود. پرکردن با فشار موثر این فضای خالی نقش زیادی در کاهش نشست سطح زمین دارد. به عبارت دیگر پس از رینگ گذاری جهت ایجاد یک توده مستحکم، چسبندگی بیشتر مابین سگمنت‌ها و خاک و همچنین کاهش نشست عملیات تزریق انجام می‌پذیرد.

روش های بررسی نشست در تونلسازی به روش های تجربی، تحلیلی، عددی و مدل سازی فیزیکی (روش های آزمایشگاهی) تقسیم می شود که از بین روش ها دو روش عددی و آزمایشگاهی به بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین پرداخته اند.

در این تحقیق با تمرکز بر روی چهار مقطع ترازیبی کیلومترهای ۵+۲۰۰، ۸+۲۰۰، ۱۰+۵۰۰ و ۱۰+۵۵۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی تهران و مدل سازی سه بعدی و روش عددی اجزاء محدود (Plaxis3D Tunnel) به بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق بر روی نشست سطح زمین پرداخته شد. برای مدل سازی و بررسی تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق پشت سگمنت در این پروژه ۴ مقطع انتخاب شد. دو مقطع کیلومترهای ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل که به تازگی حفر شده اند به منظور بررسی صحت مدل سازی بوسیله ابزاربندی در بالای سطح انتخاب شدند. دو مقطع کیلومترهای ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل که آنالیز حساسیت فشار سینه کار و تزریق بر روی این دو مقطع انجام گرفته است به دلایل زیر برای مدل سازی انتخاب شده اند:

- بیشتر سینه کار مسیر تونل در ماسه شنی به همراه سیلت و رس (ET-2) قرار دارد و ماشین حفار بیشتر با این سینه کار مواجه می شود، هر دو این دو مقطع از این شرایط زمین شناسی عبور می کنند با این تفاوت که روباره در مقطع کیلومترهای ۵+۲۰۰، ۱۱ متر ($H < 2D$) و در کیلومترهای ۸+۲۰۰، ۲۱ ($H > 2D$) متر است.

- در نظر گرفتن سطح آب زیر زمینی، در هر دو مقطع تونل در زیر سطح آب زیر زمینی قرار گرفته است. در ضمن تونل در این دو مقطع حفر نشده است. بنابراین نتایج و پیش بینی های مدل سازی قابل کاربرد می باشد.

نحوه مدل سازی فشار سینه کار در چهار حالت: (۱) فشار اولیه (۷۵ kPa) (۲) یک و نیم برابر فشار اولیه (۳) دو برابر فشار اولیه (۴) چهار برابر فشار اولیه و فشار تزریق در پنج حالت: (۱) بدون اعمال تزریق (فشار تزریق صفر) (۲) فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۳) فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار (۴) فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار (۵) فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار مدل سازی شده است. به منظور اعتبار سنجی نتایج و بررسی صحت مدل سازی عددی بر روی دو مقطع کیلومتر از ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ ابزاربندی شده است. نتایج حاصل از ابزار بندی مقطع ۱۰+۵۰۰ بعد از ۳۰ متر حفاری با فشار سینه کار ۶۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۱۰ کیلوپاسکال نشست سطح معادل ۵/۵ میلی متر را نشان می دهد که مدل سازی عددی انجام شده در این مقطع نشست ۴ تا ۸ میلی متر را نشان می دهد. نشست برداشت شده در مقطع ۱۰+۵۵۰ بعد از ۳۵ متر حفاری با فشار سینه کار ۷۰ کیلوپاسکال و فشار تزریق ۱۲۰ کیلوپاسکال ۴/۵ میلی متر است که نتایج حاصل از مدل سازی عددی نیز این مقدار را تایید می کند.

۲.۸ نتایج و پیشنهادات

با بررسی پروفیل طولی و عرضی نشست نتایج زیر بدست آمد:

- در کیلومتر از ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل مترو خط ۷ قطعه شرقی غربی با افزایش فشار سینه کار ماکزیمم نشست سطح زمین کاهش می یابد ولی این تغییرات در میزان نشست چشمگیر نیست. نتایج نشان می دهد افزایش ۴ برابری فشار سینه کار حداکثر باعث کاهش ۵ میلی متر ماکزیمم نشست می شود. بنابراین اگرچه افزایش فشار سینه کار باعث کاهش نشست شده است ولی این میزان بسیار ناچیز است. بطور کلی

می توان گفت به علت پایدار بودن خاک این دو مقطع (چسبندگی خاک ۱۵ تا ۳۱ کیلو پاسکال و زاویه اصطکاک داخلی ۲۷ تا ۳۴ درجه)، افزایش فشار سینه کار تاثیر چندانی بر میزان کاهش نشست ندارد.

-نتایج نشان می دهد در مقطعی که روباره از دو برابر قطر تونل کمتر ($H < 2D$) است میزان نشست از مقطعی که روباره از دو برابر قطر تونل بیشتر ($H > 2D$) است، به مراتب بیشتر است.

-در این پروژه میزان فشار تزریق در کاهش نشست بسیار تاثیر گذار است. فشار بهینه تزریق، ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ارزیابی شد. افزایش فشار تزریق بیش از این تاثیر چندانی بر میزان نشست ندارد.

بنابراین برای کاهش استهلاک دستگاه تزریق دوغاب فشار تزریق این مقدار پیشنهاد می گردد.

- برای مقطع ۸+۲۰۰ بیشترین نشست سطح هنگامی است که فشار تزریق صفر است. به عنوان مثال هنگامی که فشار سینه کار معادل ۷۵ کیلو پاسکال است ماکزیمم نشست سطح زمین هنگامی که تزریق پشت سگمنت صورت نمی گیرد، ۲۹/۳ میلی متر محاسبه شده است. در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۷۵ کیلو پاسکال) تغییر کند میزان ماکزیمم نشست سطح ۲۲/۹ میلی متر، فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ۲۰/۴ میلی متر، میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار باشد ۱۹/۸۵ میلی متر و در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار شود، میزان ماکزیمم نشست ۱۸/۹۵ است. در این حالت کمتر از ۵۰٪ نشست در جلوی سپر، ۵۰٪ تا ۹۰٪ نشست در بالای سپر، ۹۰٪ تا ۹۵٪ نشست در پشت سپر و ۹۵٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می گیرد.

- برای مقطع ۵+۲۰۰ نتایج نشان می دهد رفتار نشست سطح زمین در این مقطع هنگامی که فشار تزریق صفر است متفاوت است. در این حالت ماکزیمم نشست سطح بسیار بالا می باشد بطوریکه از فضای خالی ۱۵/۷ سانتی متری بین دیواره تونل و سگمنت بین ۱۴۵ تا ۱۵۵ میلی متر کاهش نشست مشاهده

می‌شود با اعمال تزریق و افزایش آن کاهش بسیار زیادی در میزان نشست رخ می‌دهد به عنوان مثال هنگامی که فشار سینه کار معادل ۷۵ کیلوپاسکال است ماکزیمم نشست سطح زمین هنگامی که تزریق پشت سگمنت صورت نمی‌گیرد، ۱۵۴/۲۶ میلی‌متر محاسبه شده است. در صورتی که فشار تزریق برابر فشار سینه کار (۷۵ کیلو پاسکال) تغییر کند میزان ماکزیمم نشست سطح ۴۱/۷۴ میلی‌متر، فشار تزریق ۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار ۳۴/۰۶ میلی‌متر، میزان ماکزیمم نشست در حالتی که فشار تزریق یک بار بیشتر از فشار سینه کار باشد ۳۲/۵۴ میلی‌متر و در حالتی که فشار تزریق ۲ بار بیشتر از فشار سینه کار شود، میزان ماکزیمم نشست ۳۰ میلی‌متر است. در این حالت درصد نشست در حالتی که فشار تزریق صفر است صفر باشد با حالتی که فشار تزریق غیر صفر باشد، متفاوت است. در حالتی که فشار تزریق صفر است کمتر از ۸٪ نشست در جلوی سپر، ۸٪ تا ۴۲٪ نشست در بالای سپر، ۴۲٪ تا ۶۲٪ نشست در پشت سپر و ۶۲٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد. در صورتی که فشار تزریق غیر صفر است منحنی درصد نشست (برای ۴ حالت دیگر) بر روی یکدیگر افتاده و رفتار تقریباً یکسانی دارند در این حالت کمتر از ۲۵٪ نشست در جلوی سپر، ۲۵٪ تا ۸۵٪ نشست در بالای سپر، ۸۵٪ تا ۹۰٪ نشست در پشت سپر و ۹۰٪ تا ۱۰۰٪ نشست در دنباله صورت می‌گیرد.

- عمیات تزریق در مناطق با روباره کم باید به سرعت و با کیفیت صورت بگیرد. پیشنهاد می‌شود با مغزه گیری در دیواره تونل کیفیت تزریق پشت سگمنت کنترل گردد.

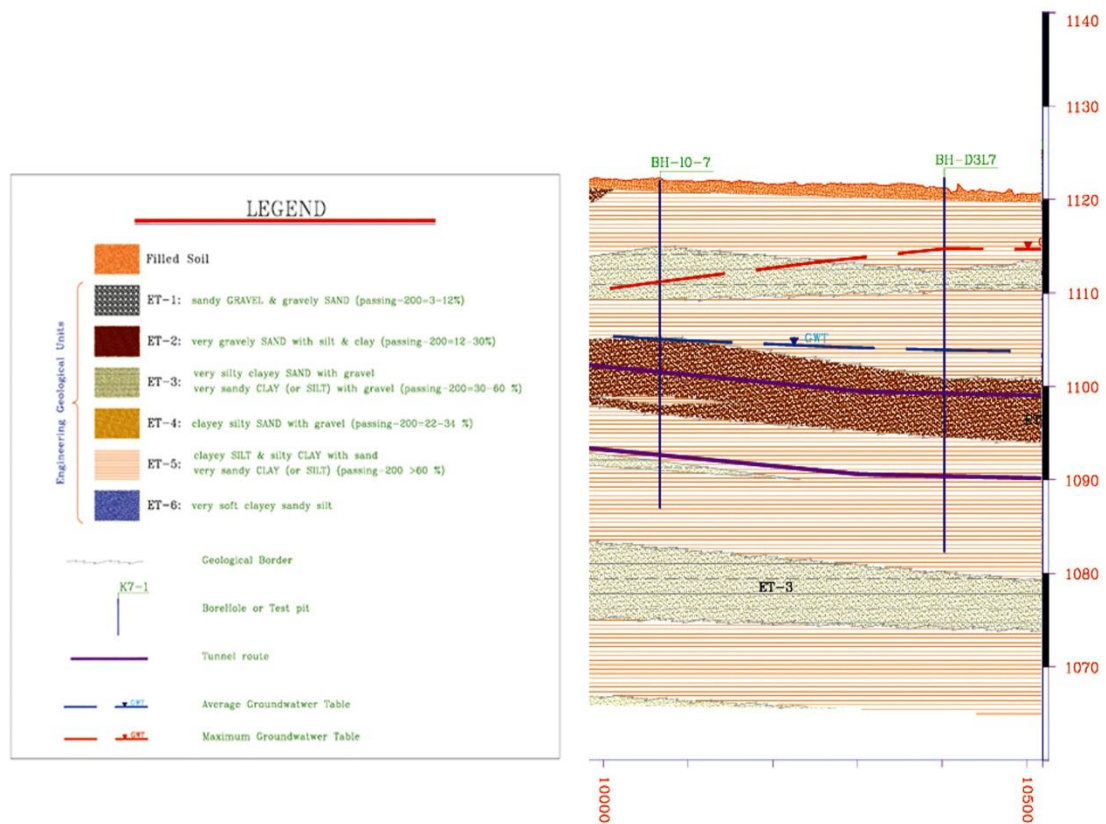
- در مقاطعی از زمین شناسی در این پروژه سینه کار مختلط رس و ماسه احتمال نشست سطح زمین را افزایش می‌دهد. در بخش‌هایی از تونل که دو خاک با خصوصیات متفاوت در کنار یکدیگر قرار داشته باشند می‌تواند سبب ایجاد مشکلاتی در روند حفاری ماشین گردد. در بخش‌هایی که سینه کار تونل از رسوبات دانه ریز رسی و آبرفت دانه درشت تشکیل شده است به دلیل تفاوتی که این دو لایه خاکی در

نرخ نفوذ دارند، مقدار مصالح بیشتری از لایه رسی نسبت به لایه درشت دانه به ماشین کشیده می شود و چنین شرایطی چنانچه لایه رسی در سقف باشد می تواند باعث نشست زمین گردد. موضوع مهم دیگر در چنین شرایطی نوسانات فشار ماشین می باشد.

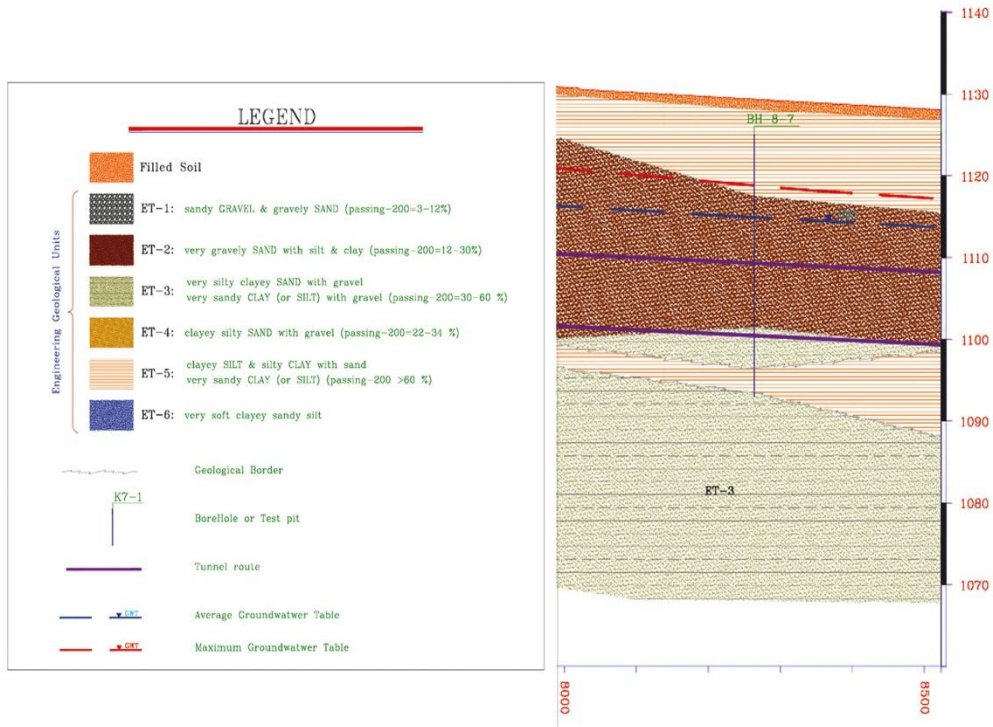
- برای بررسی نشست سطح زمین علاوه بر فشار سینه کار و فشار تزریق پارامترهایی مانند شرایط زمین شناسی، زاویه کج شدگی شیلد، نرخ نفوذ، عمق تونل، فاصله از محل شروع ایستگاه باید لحاظ شود

- به منظور بررسی فشار سینه کار و فشار تزریق مدل سازی فیزیکی کوچک مقیاس با شرایط واقعی EPB و به منظور مقایسه بهتر نتایج استفاده از روش عددی تفاضل محدود (با استفاده از نرم افزار FLAC3D) پیشنهاد می گردد.

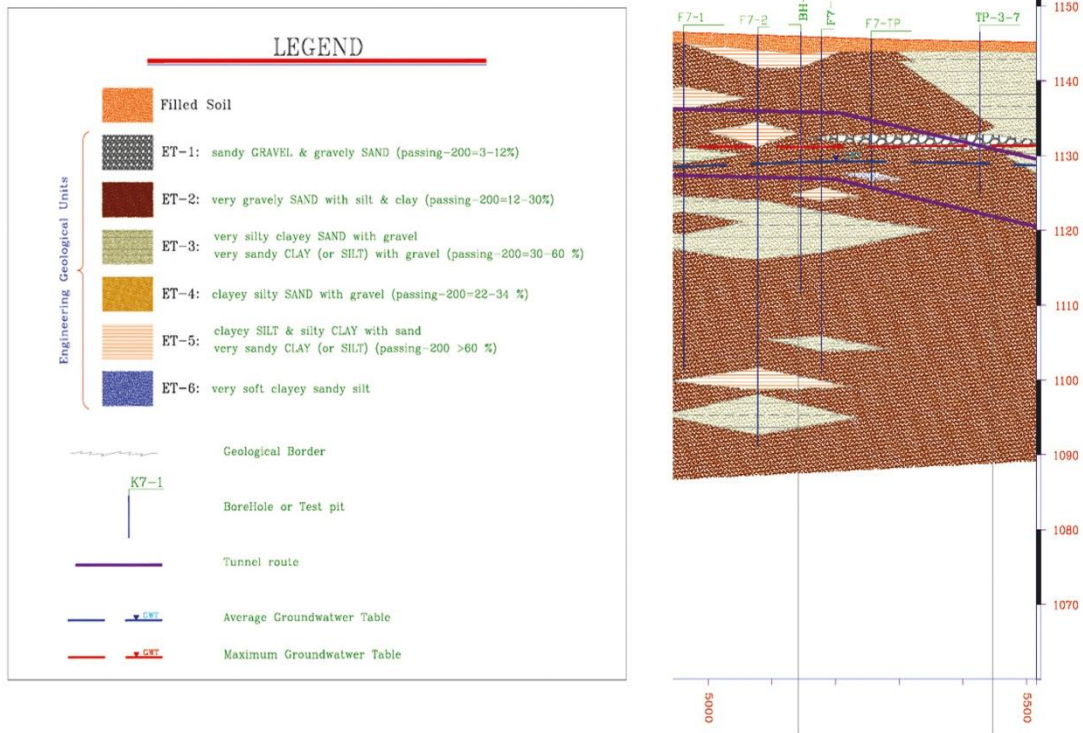
پیوست



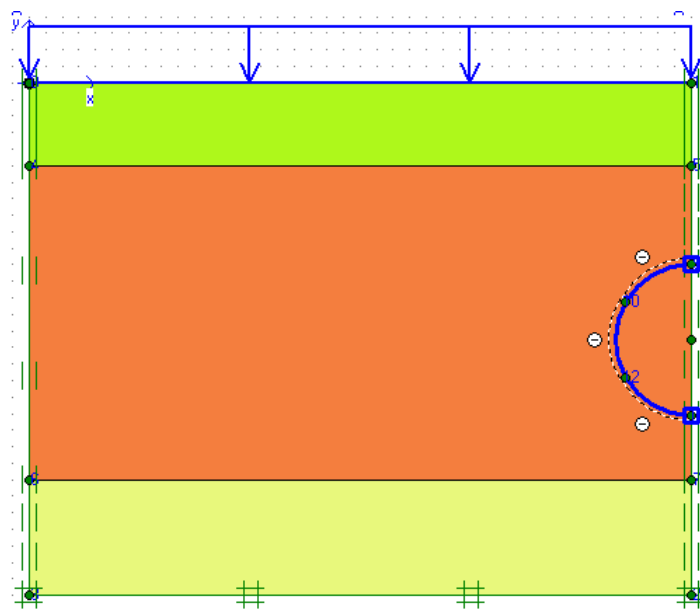
شکل ۱: پروفیل زمین شناسی و مقطع مرجع کیلومتراژ ۱۰+۵۰۰ و ۱۰+۵۵۰ تونل مترو قطعه شرقی غربی خط ۷ تهران [۲]



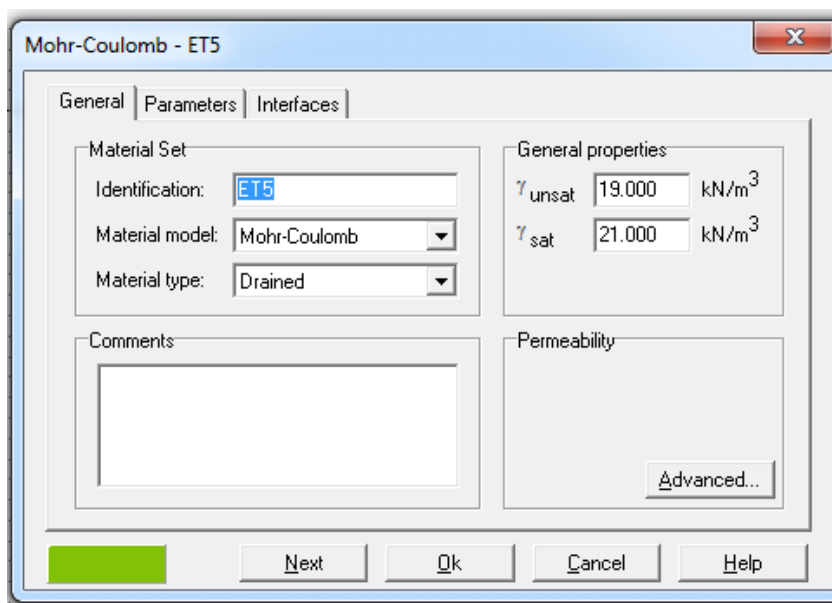
شکل ۲: پروفیل زمین شناسی و مقطع مرجع کیلومتراژ ۸+۲۰۰ تونل مترو قطعه شرقی غربی خط ۷ تهران [۲]



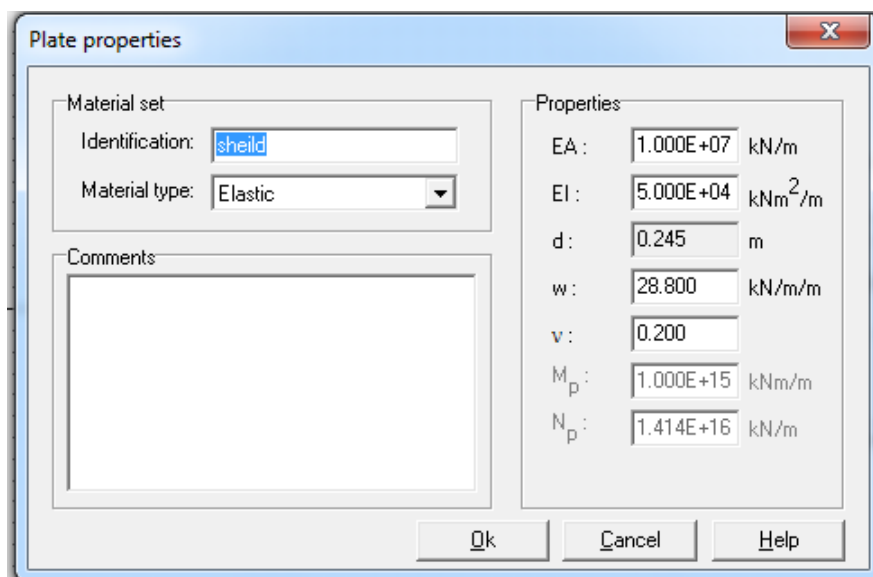
شکل ۳: پروفیل زمین شناسی و مقطع مرجع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ تونل مترو قطعه شرقی غربی خط ۷ تهران [۲]



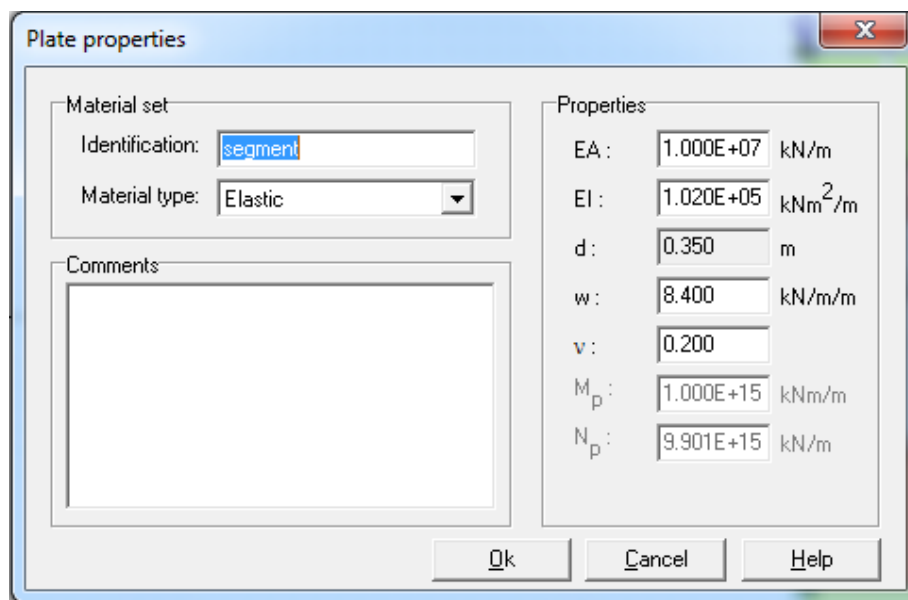
شکل ۴: رسم هندسه مدل و تونل، ایجاد شرایط مرزی و اولیه



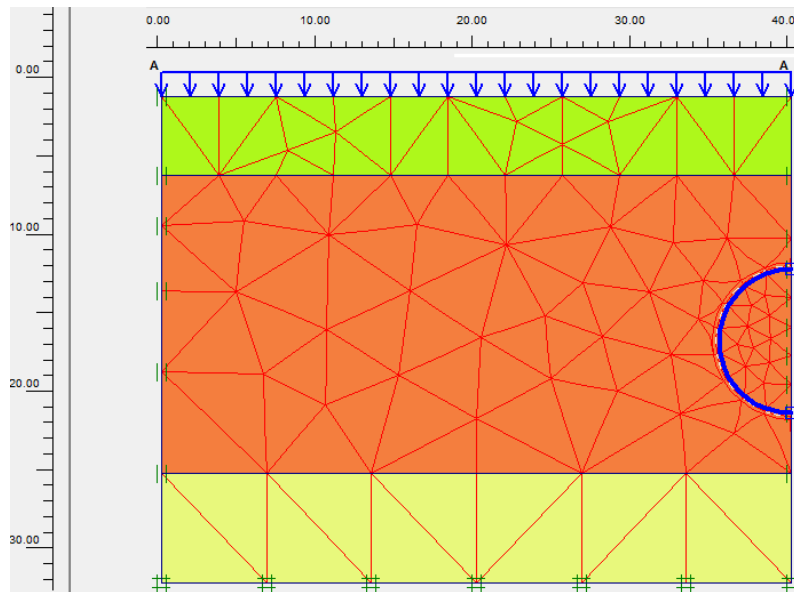
شکل ۵: ورود اطلاعات ورودی و تخصیص خواص مواد به مدل



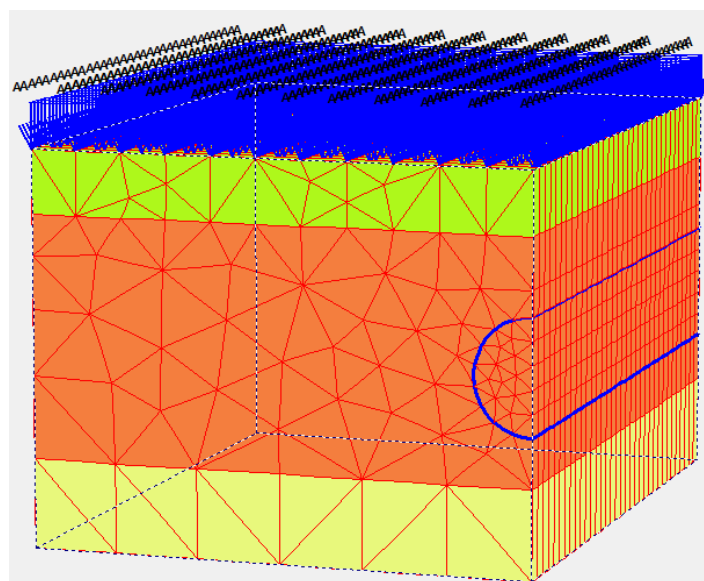
شکل ۶: تخصیص ویژگی سپر و ورود اطلاعات TBM به مدل



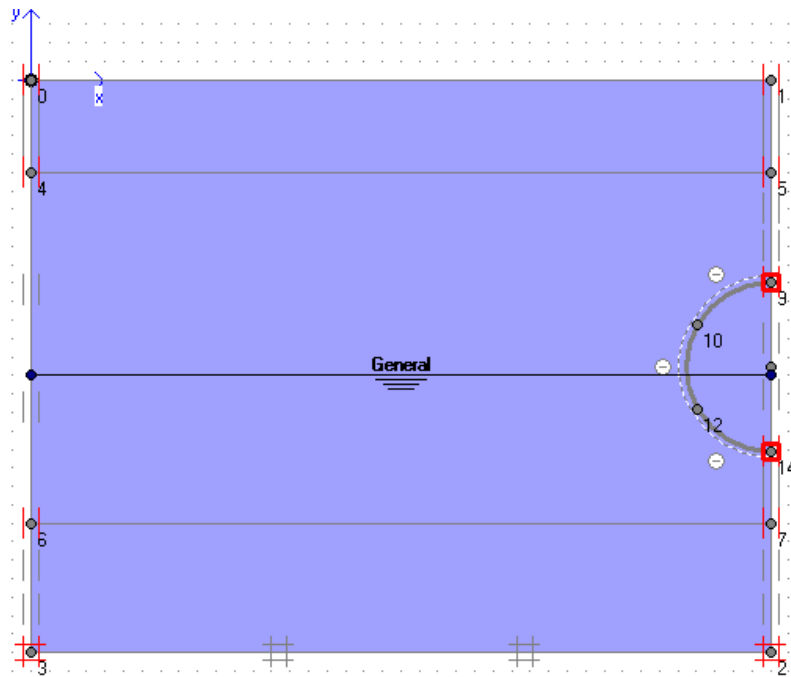
شکل ۷: تخصیص ویژگی پوشش بتنی و ورود اطلاعات به مدل



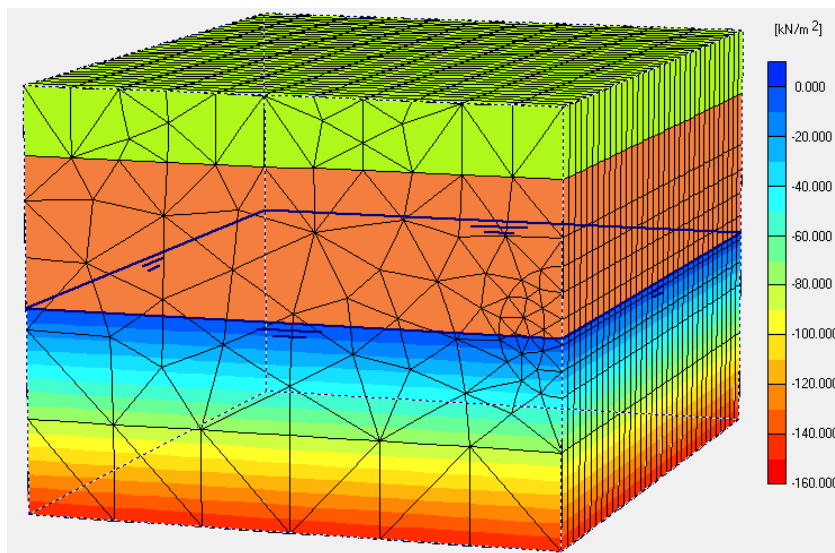
شکل ۸: مش بندی مدل در حالت دوبعدی



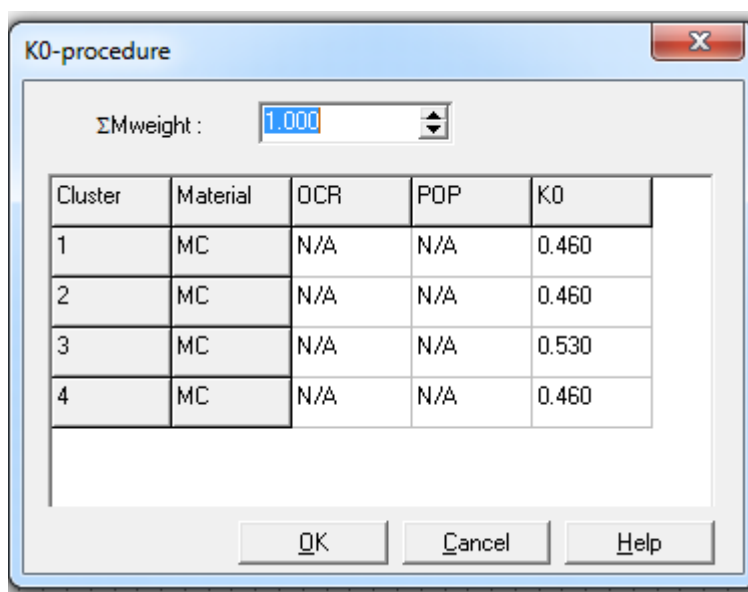
شکل ۹: مش بندی مدل در حالت سه بعدی



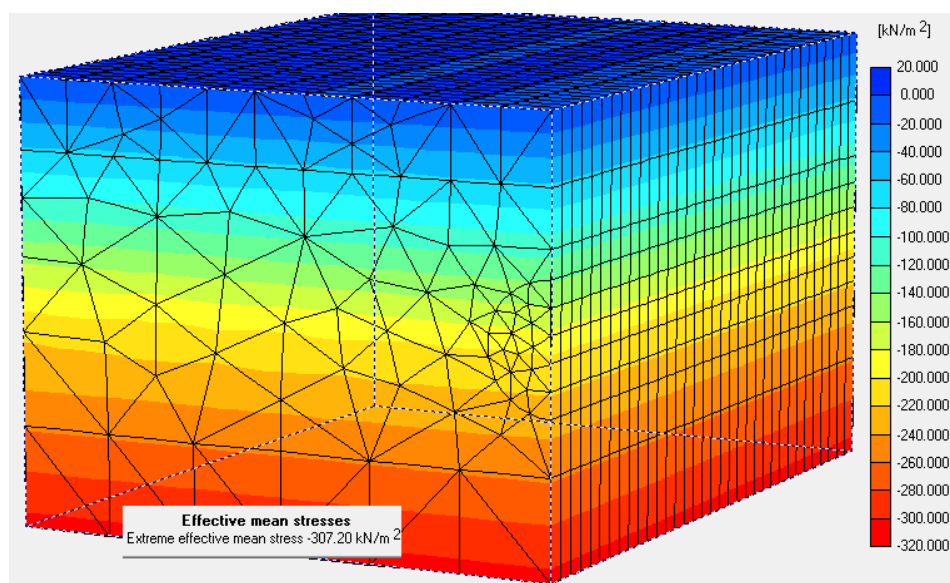
شکل ۱۰: مدل سازی سطح ایستابی (وزرن مخصوص آب ۱۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب)



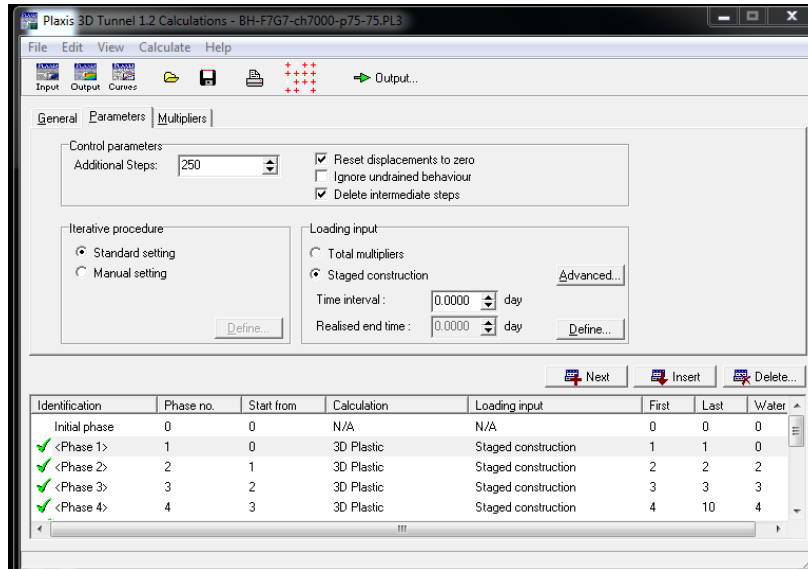
شکل ۱۱: محاسبه فشار منفذی آب توسط نرم افزار Plaxis3D



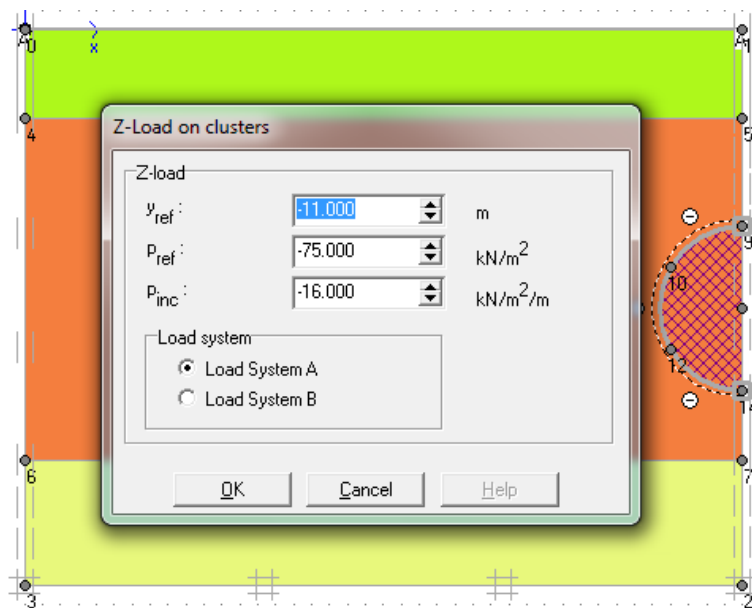
شکل ۱۲: مقدار ضریب نسبت تنش افقی به تنش قائم قبل از محاسبه تنش موثر خاک



شکل ۱۳: محاسبه تنش موثر خاک توسط نرم افزار Plaxis3D



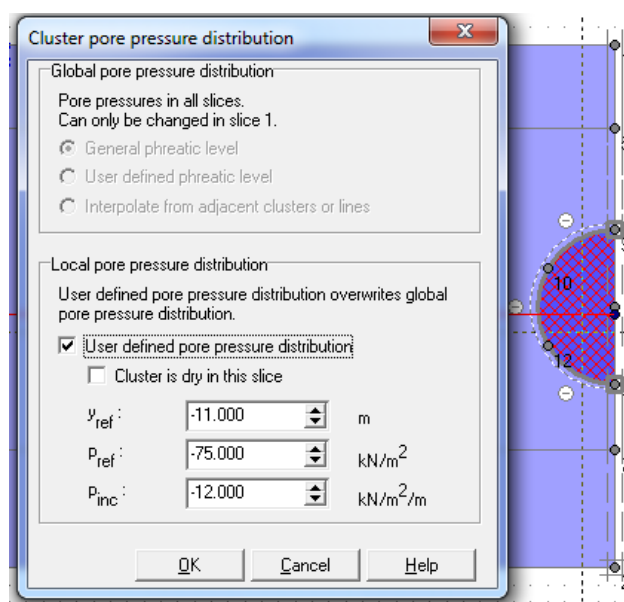
شکل ۱۴: فاز اول محاسبات به تعادل رساندن مدل (جابجایی صفر)



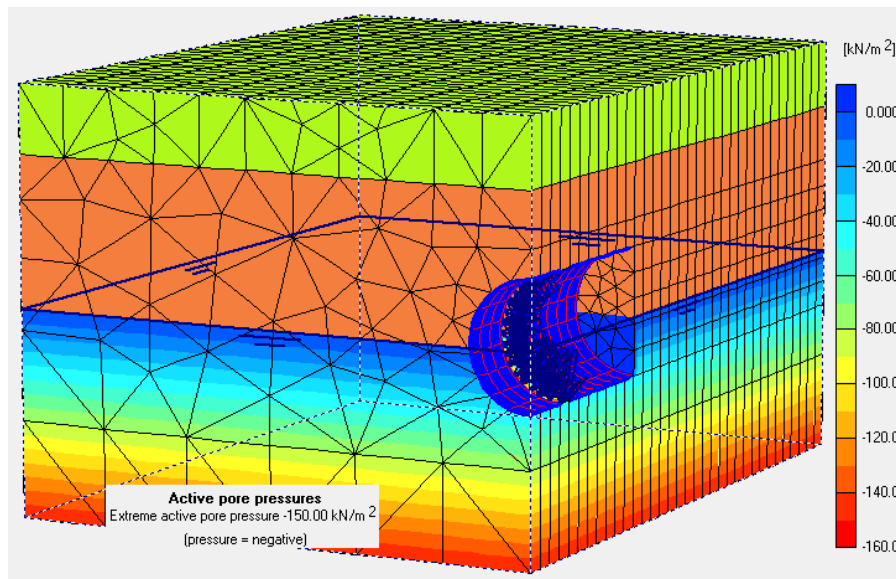
شکل ۱۵: حفر تونل و اعمال فشار سینه کار به مدل

| Plane | Z [m] | Contraction [%] |
|----------------|---------------|-----------------|
| Plane O | -22.50 | 0.000 |
| Plane N | -21.00 | 0.000 |
| Plane M | -19.50 | 0.000 |
| Plane L | -18.00 | 0.000 |
| Plane K | -16.50 | 0.000 |
| Plane J | -15.00 | 0.060 |
| Plane I | -13.50 | 0.120 |

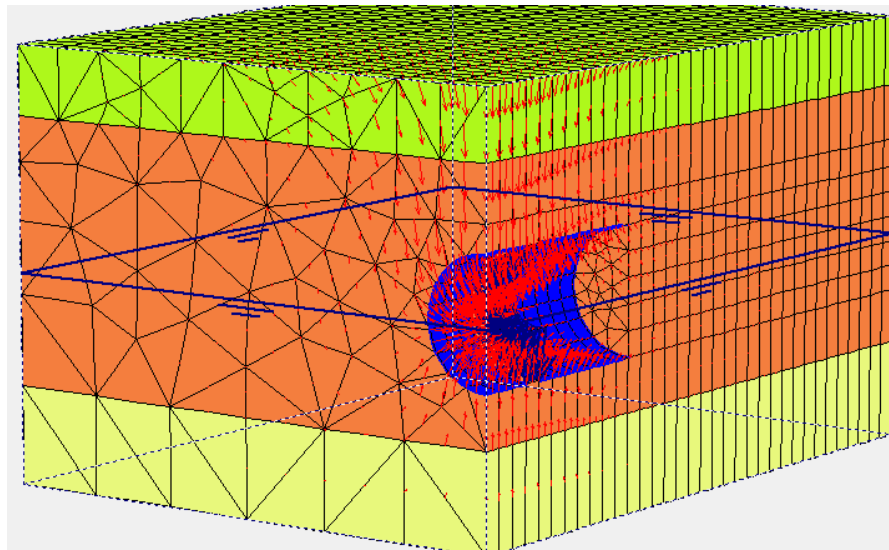
شکل ۱۶: نحوه ورود و مدل سازی درصد اضافه حفاری (V_L) در نرم افزار Plaxis3D



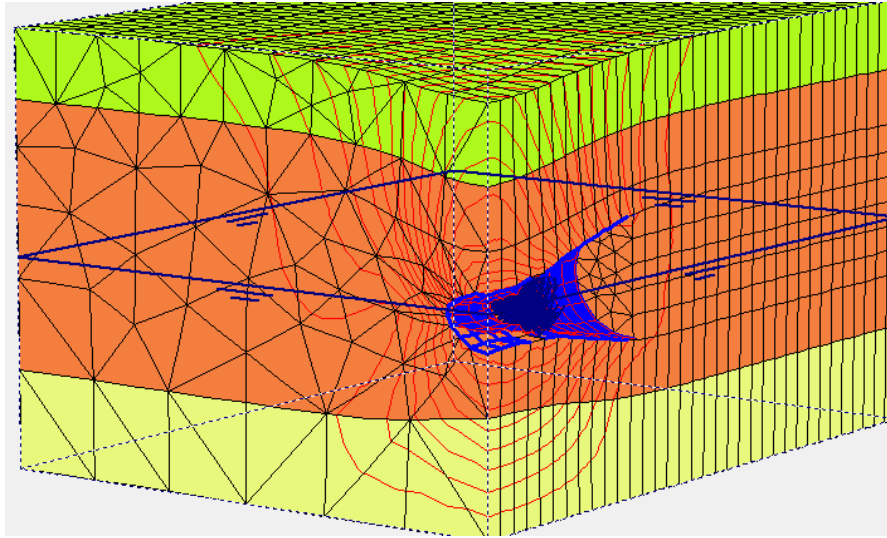
شکل ۱۷: نحوه مدل سازی فشار تزریق با در نظر گرفتن وزن دوغاب (۱۲ کیلونیوتن بر متر مکعب)



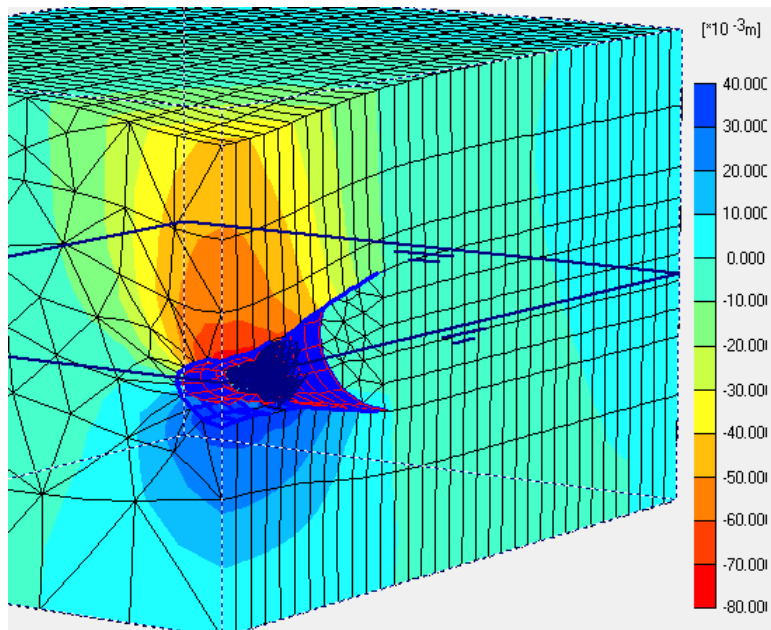
شکل ۱۸: نحوه مدل سازی شرایط تونلسازی EPB با حفر ۱۶/۵ متر تونل قبل از انجام محاسبات



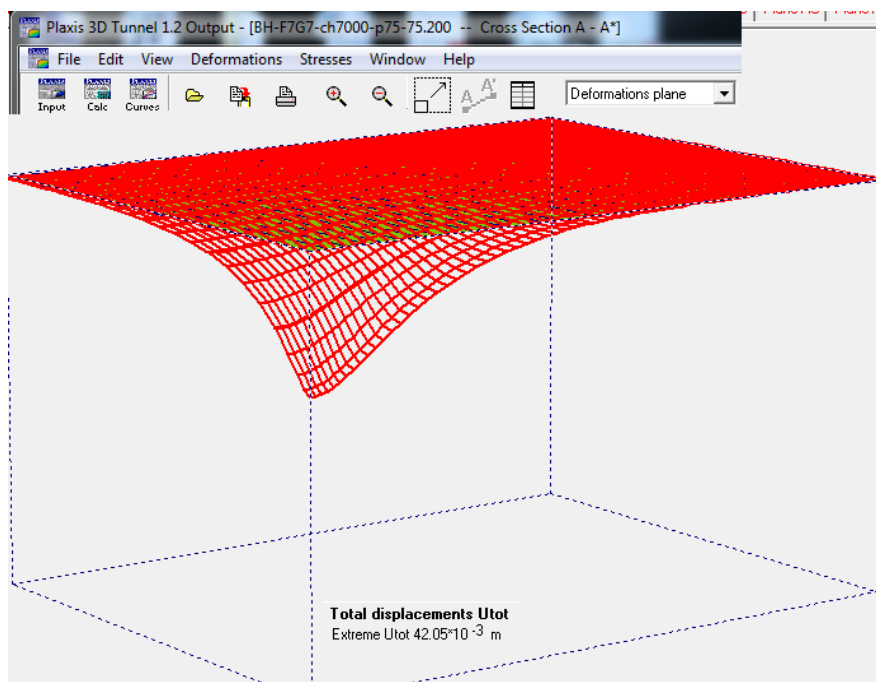
شکل ۱۹: جهت ریزش خاک بعد از انجام محاسبات توسط نرم افزار



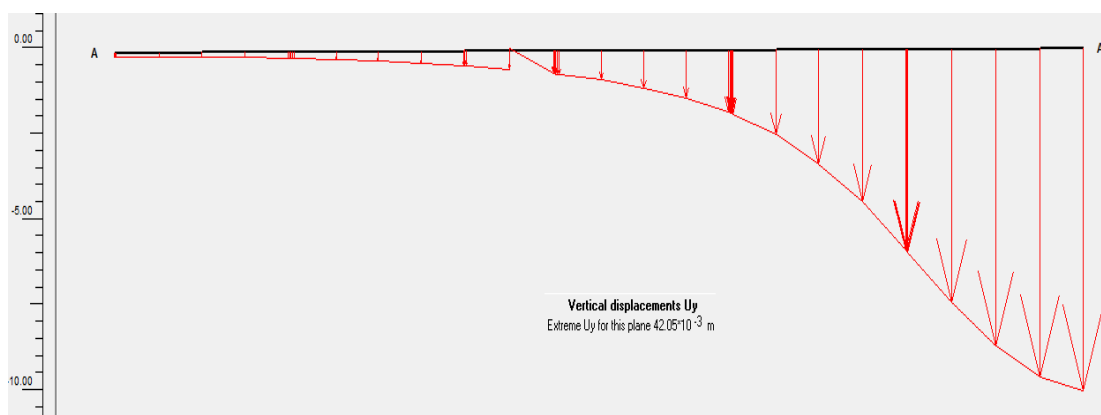
شکل ۲۰: کنتورهای جابجایی بعد از حفر تونل و انجام محاسبات



شکل ۲۱: کنتورهای قائم جابجایی بعد از انجام محاسبات توسط نرم افزار Plaxis3D



شکل ۲۲: پروفیل عرضی و طولی نشست سطح زمین



شکل ۲۳: مقطع عرضی نشست سطح زمین

منابع و مأخذ

منابع

- [1] Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu (2007) "Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control" publishing Taylor & Francis e-Library 89-100
- [۲] مطالعات زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر تونل خط ۷ مترو تهران (قطعه شرقی غربی)،
موسسه حرا، مهندسين مشاور ساحل، ۱۳۸۹
- [3] ITA AITES, WG Mechanized Tunnelling, 2000, Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)
- [4] Toan.D.N, (2006), Master thesis "TBM and Lining Essential Interfaces" Politecnico di Torino
- [5] TBM design considerations for projects, utilization of underground space in urban areas, Sham EI-Shikh, Egypt- November 6-7, 2006
- [6] Leca, E. (1989). "Analysis of NATM and Shield Tunneling in Soft Ground". Ph. Thesis. Virginia Institute and State University, Blacksburg, VA
- [7] Hwang. R. N. and Moh. Z-C. (1996). "Pore Pressures induced in Soft Ground due to Tunneling". 'Pro. of Int. Symp. On; Geotechnical, Aspect of underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam. pp. 695-7(X)
- [8] Clough, G. W., Sweeney. B. P., and Finno, R. J. (1982). "Measured Soil Response to EPB Shield Tunneling". Journal of Geotechnical Engineering' Vol. 109, No. 2, pp. 131-149
- [9] Matsushita, Y., Hashimoto, T. Iwasaki, Y., and Imanishi, H. (1995). "Behavior of Subway Tunnel driven by Large Slurry Shield". Proc. of Int. Conf on Underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam, pp. 253-256.

- [10] Chiorholi, M. A. and Marchesili. P. P. (1996). "Analysis and Control of Subsidence due to Earth Pressure Shield Tunneling in Pass ante Ferroviario of Milano". Proc. Of Int. Conf on North American tunneling, '96, Balkema, Rotterdam, pp. 97-106
- [11] Suwansawat, S., Earth Pressure Balance (EPB) Shield Tunneling in Bangkok: Ground Response and Prediction of Surface Settlements Using Artificial Neural Networks. PHD thesis, MIT university, 2002
- [12]. Matthew Crow, PERFORMANCE OF FOUR EPB-TBMs ABOVE AND BELOW THE GROUNDWATER TABLE ON THE ECIS PROJECT, LOS ANGELES, CA, USA, Proc. of the RETC Conference 2003 in New Orleans, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton (2003), p. 905-926
- [13]. Ahmet Unlutepel, PREDICTED AND OBSERVED GROUND DEFORMATIONS DUE TO TBM TUNNEL EXCAVATIONS ON THE IZMIR METRO PROJECT (STAGE 1), WTC, 2009
- [14]. Greenwood, J, D, "Three dimension analysis of settlement in soft ground tunneling" Bachelor of geological engineering university of Minnesota, 2001
- [15]. Thomas Kasper, "On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunneling" Tunnelling and Underground Space Technology 21 (2006) 160–171
- [16]. Lambrughi. A, Medina. L "Development and validation of a 3D numerical model for TBM–EPB Mechanised excavations", computers and Geotechnics Journal 40 (2012), 97-113
- [17]. Chambon, P., Corte, J.F., (1994), "Shallow tunnels in cohesionless soil : stability of tunnel face" Journal of Geotechnical Engineering, 120 (7), pp1148–1165
- [18]. Bathe Klaus Jurgen (1996), "Finite element procedures" Prentice Hall, Plaxis 3D tunnel, user manual

[۱۹]. کاظمی چوری، م.، برآورد مقدار فشار خاک به روش‌های تحلیلی و عددی در قطعه شمالی- جنوبی خط هفت متروی

تهران. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۹

[20] AUA guideline for backfilling and contact grouting of tunnels and shafts. Edited by Raymond W.Henn; Prepared by the Technical Committee on Backfilling and contact grouting of tunnels and shafts of the American Underground Construction Association.

[21] Wittke W. (2007) "Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling" Geotechnical Engineering Research and Practice. WBI-PRINT 6.

[22] Arthe civil & Structure reports , project of Tabriz Urban Railway Organization,2010.

Abstract

Construction of tunnels and underground spaces in urban areas is growing in recent days. Most of these spaces due to short distance to the ground surface soil will be excavated. In the terrestrial environment, one of the most important for the stability control and prevent the tunnel from the surface settlement is face pressure and backfill grouting. Line 7 subway tunnel projects in west Tehran, the tunnel boring machine of the type of mechanized earth pressure balanced (EPB) will dig. The study focused on four sections of the tunnel to investigate effect of face pressure and grouting pressure on the ground surface. Face pressure in four states of that area follows: The initial pressure, One and a half times the initial pressure, Twice the initial pressure and Four times the initial pressure, grouting pressure or backfill grouting investigated in five states: without pressure, Equal face pressure, Half times the face pressure, 1 and 2 bar times more than the face pressure. The study effect of backfill grouting and face pressure using three-dimensional modeling and numerical analysis is done by Plaxis3D Tunnel software. Results show that in the condition $H < 2D$ face pressure and grouting pressure has more effect level $H > 2D$ condition. In this project the optimal grouting pressure is 0.5 (bar) times more than the face pressure. Validation was performed using the actual data on ground settlement data on two sections of the tunnel. Comparing modeling results and actual data shows the modeling process is valid and accurate.

Keywords: EPB, a subway tunnel Tehran Metro Line 7, Settlement, face pressure, grouting pressure, Numerical methods, Plaxis3D



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

Assessment of face support pressure and backfill grouting pressure on the tunneling induced settlement- case study Tehran Metro line 7 east- west tunnel

Reza Heidaeri Sheibani

Supervisors:

Dr. Shokrollah Zare

Dr. Hossein Mirzaee

Advisors:

Mohsen Rezaee

Reza Mikaeil

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

**In
Mining engineering**

September 2012