





دانشکده: معدن، نفت و ژئوفیزیک

عنوان پایان نامه ارشد

امکان سنجی کاربرد EPB در محیط‌های شهری برای حفاری در حالت باز - مطالعه موردی

پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد

دانشجو: غلامحسن کاخا

اساتید راهنما:

آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

آقای دکتر سید رحمان ترابی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ماه ۱۳۹۱



دانشگاه علمی کاربردی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای غلامحسین کاخا، رشته معدن گرایش استخراج تحت عنوان امکان سنجی حفاری EPB در محیط‌های شهری با حذف فشار سینه کار - مطالعه موردی پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد که در تاریخ ۱۳۹۱/۶/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> قابل قبول (با درجه: <u>بسیار خوب</u> امتیاز: <u>۱۸</u>)
--------------------------------	------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	۱- استاد راهنما
	دانشیار	دکتر سید رحمان ترابی	
			۲- استاد مشاور
	استاد	پروفسور محمد عطایی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر حسین میرزایی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر احمد رمضانزاده	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده:



تقدیم به پدرم

که با موهای سپیدش، پکی قدومش، صفای وجودش، سنگینی سکوتش،
نجابت و غرورش و باز مزه کلامش در جذبہ محراب، کستره وسیع خبت بود

ومن فقط "پدر" میخواندمش
❖

تقدیم به مادرم

او که شمع وجودش، همیشه ایام روشنایی بخش مسیر پرفراز و نشیب زندگی است و دعایش توشه و بدرقه این راه

1

و تقدیم به "همسر همربانم" که در این مسیر بسیار مریاری رساند

قدردانی و تشکر

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش را به ما عطا فرمود

شایسته است اکنون که به فضل الهی این تحقیق به پایان رسیده است. از زحمات اساتید گرانقدر آقای دکتر سید محمد اسماعیل

جلالی و آقای دکتر سید رحمان ترابی که بار، نمودهای ارزشمندشان مراد انجام هر چه بهترین پایان نامه یاری فرمودند تشکر و

سپاسگزاری کنم.

از دوستان ارزشمند جناب مهندس فرین خاکپور، مهندس ایمان عطار و همچنین مهندس رضا ظریف پور که همواره با صبر و

حوصله به راهنمایی ام پرداخته اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعهد نامه

اینجانب غلامحسین کاخا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه امکان سنجی کاربرد EPB در محیط‌های شهری برای حالت باز- مطالعه موردی پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر سید رحمان ترابی متعهد می‌شوم.

تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .

در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .

مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود 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 ۱۳۹۱/۷/۲۳

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

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. یکی از موارد مهم و تأثیر گذار در ساخت فضاهای زیرزمینی بحث هزینه و سرعت انجام کار می‌باشد از اینرو در این پایان نامه با تمرکز بر دو مقطع از تونل خط ۲ قطار شهری مشهد به بررسی حفاری در حالت باز در راستای کاهش هزینه و همچنین کاهش زمان حفاری پرداخته شده است. پس از تحلیل دو مقطع مذکور با نرم افزار FLAC3D مشخص شد که در مقطع اولی با وجود شرایط زمین شناسی مناسب این مقطع، باز هم نشست از حد مجاز تجاوز کرده و به مقدار ۴/۴ سانتی‌متر در تاج تونل و ۳/۳ سانتی‌متر در سینه‌کار می‌رسد در مقطع دومی نیز مقدار نشست در تاج تونل و سینه‌کار به ترتیب ۴/۹ و ۶/۹ سانتی‌متر بدست آمد. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که ریسک حفاری در حالت باز در این مقاطع به دلیل تجاوز مقادیر نشست از حد مجاز خود بالا بوده و احتمال حفاری در حالت باز کاهش می‌یابد و نمی‌توان در این حالت حفاری نمود. پس از مدلسازی با اعمال ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد فشار محاسبه شده به سینه‌کار در مقطع اولی مقدار نشست در سینه‌کار به ترتیب به ۵/۷ میلی‌متر و ۲/۶ میلی‌متر کاهش می‌یابد. همچنین با اعمال ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد فشار محاسبه شده به سینه‌کار در مقطع دومی نیز مقادیر نشست در سینه‌کار به ترتیب به ۹/۶ میلی‌متر و ۱/۵ میلی‌متر می‌رسد. با توجه به مقادیر مجاز نشست با اعمال ۵۰ درصد فشار محاسبه شده در دو مقطع مشاهده می‌شود مقادیر نشست در این شرایط نسبت به حفاری در حالت باز بسیار کاهش یافته که این خود بر احتمال حفاری با اعمال فشار ۵۰ درصد می‌افزاید و بدین وسیله علاوه بر کاهش حجم مصالح انباشته شده داخل محفظه فشار از حجم فوم تزریقی نیز کم می‌شود که نتیجه آن کاهش هزینه‌های پروژه را به همراه دارد.

کلمات کلیدی: فضاهای زیرزمینی، فشار سینه‌کار، حفاری باز ، نشست، پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد، نرم افزار FLAC3

فهرست

فهرست مطالب

۱	طرح مسأله و مروری بر مطالعات انجام شده	۱
۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	هدف و ضرورت انجام تحقیق	۲
۳-۱	مروری بر مطالعات پیشین	۳
۴-۱	ساختار پایان نامه	۳
۲	انتخاب ماشین و بررسی حالت‌های حفاری با آن	۵
۱-۲	مقدمه	۶
۲-۲	معرفی پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد	۷
۱-۲-۲	ژئوتکنیک مسیر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری مشهد	۷
۳-۲	انتخاب دستگاه TBM پروژه خط ۲ مترو مشهد	۹
۱-۳-۲	سپرهای دوغابی	۹
۲-۳-۲	ماشین سپر فشار تعادلی زمین	۱۰
۳-۳-۲	مقایسه بین سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین	۱۲
۴-۳-۲	محدوده کاربری TBM نوع دوغابی و EPB	۱۴
۴-۲	حالت‌های حفاری با دستگاه TBM نوع EPB	۱۶
۱-۴-۲	حفاری در حالت EPB	۱۶

-
- ۱۷..... ۲-۴-۲ حفاری در حالت باز
- ۱۸..... ۵-۲ مقایسه دو حالت حفاری با دستگاه TBM نوع EPB
- ۱۸..... ۱-۵-۲ نیروی پیشران دستگاه
- ۱۹..... ۲-۵-۲ نوار نقاله مارپیچ
- ۲۰..... ۳-۵-۲ فوم
- ۲۴..... ۶-۲ پارامترهای مؤثر برای حفاری و بررسی آنها در حالت باز
- ۲۴..... ۱-۶-۲ مقاومت برشی
- ۲۵..... ۲-۶-۲ چسبندگی
- ۲۶..... ۳-۶-۲ زاویه اصطکاک داخلی
- ۲۷..... ۴-۶-۲ روباره
- ۲۸..... ۷-۲ مونتاژ دستگاه برای حفاری در باز
- ۲۸..... ۸-۲ جمع بندی
- ۳۰..... ۳ روش‌های تحلیلی و تجربی محاسبه فشار سینه‌کار حفاری
- ۳۱..... ۱-۳-۱ مقدمه
- ۳۱..... ۲-۳-۲ روش‌های محاسبه فشار سینه‌کار
- ۳۱..... ۱-۲-۳ روش‌های تجربی محاسبه فشار سینه‌کار
- ۳۷..... ۲-۲-۳ روش‌های تحلیلی محاسبه فشار جبهه‌کار

۵۸	۳-۳ جمع بندی
۶۰	۴ انتخاب مناطق مناسب برای حفاری در حالت باز با توجه به مخاطرات زمین‌شناسی مسیر حفاری
۶۱	۱-۴ مقدمه
۶۱	۲-۴ مخاطرات زمین‌شناسی مهندسی در حفاری مکانیزه
۶۱	۱-۲-۴ قنات‌ها
۶۴	۲-۲-۴ برخورد با لایه‌های سست و زون‌های برشی گسل‌ها
۶۴	۳-۲-۴ خطر نشست تحکیمی زمین
۶۵	۴-۲-۴ وضعیت آب‌های زیرزمینی و برخورد با آب‌های موضعی
۶۶	۵-۲-۴ حفاری در شرایط وجود بولدر سنگی
۶۸	۶-۲-۴ رفتار چسبناکی خاک و خطر گل‌گرفتگی
۷۰	۷-۲-۴ نشست
۷۲	۸-۲-۴ روانگرایی
۷۲	۳-۴ بررسی مسیر حفاری تونل برای حفاری در حالت باز
۷۳	۱-۳-۴ مسیر حفاری دستگاه اول از ایستگاه A2 تا F2
۷۶	۲-۳-۴ مسیر حفاری دستگاه دوم از ایستگاه M2 تا F2
۱۰۰	۴-۴ جمع بندی
۱۰۱	۵ تحلیل عددی پایداری تونل در حالت

۱-۵	مقدمه	۱۰۲
۲-۵	معرفی نرم افزار FLAC3D	۱۰۲
۱-۲-۵	مدلسازی	۱۰۳
۳-۵	تغییرات و جابجایی های مجاز	۱۰۹
۴-۵	تحلیل عددی	۱۱۰
۱-۴-۵	مقطع ۱۳+۵۵۰ (SECTION A)	۱۱۱
۲-۴-۵	مقطع ۱۳+۱۵۰ (SECTION B)	۱۲۵
۵-۵	جمع بندی	۱۳۶
۶	نتیجه گیری و پیشنهادات	۱۳۷
۱-۶	مقدمه	۱۳۸
۲-۶	نتیجه گیری	۱۳۸
۳-۶	پیشنهادات	۱۳۹
۷	منابع	۱۴۰
۸	پیوست	۱۴۵
پ-۱	مراحل مونتاژ دستگاه در حالت Open	۱۴۶

فهرست

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد..... ۷
- شکل ۲-۲: پروفیل قسمتی از مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد ۸
- شکل ۳-۲: ماشین حفار نوع دوغابی ۱۰
- شکل ۴-۲: سپر فشار تعادلی زمین ۱۲
- شکل ۵-۲: محدوده کاربرد دستگاه‌های TBM مختلف با توجه به دانه‌بندی خاک..... ۱۴
- شکل ۶-۲: نمودار انتخاب دستگاه حفار با توجه به دامنه تغییرات دانه‌بندی خاک..... ۱۵
- شکل ۷-۲: موقعیت نوارهای نقاله ۱۸
- شکل ۸-۲: تصویری از نمای بیرونی نوار نقاله مارپیچ..... ۲۰
- شکل ۹-۲: تصویری از نمای داخلی نوار نقاله مارپیچ ۲۰
- شکل ۱۰-۲: نمایی از عملیات تزریق فوم در نقاط مختلف..... ۲۳
- شکل ۱۱-۲: نمودار تاثیر زاویه اصطکاک داخلی روی نشست ۲۷
- شکل ۱-۳: ناحیه سست‌شدگی در تونل‌های کم عمق..... ۳۲
- شکل ۲-۳: تشکیل قوس در تونل‌های عمیق ۳۳
- شکل ۳-۳: مدل بار روی تونل ۳۵
- شکل ۴-۳: رابطه بین ارتفاع سست‌شدگی با ارتفاع روباره روی یک تونل در ماسه یا سنگ خرد شده..... ۳۵
- شکل ۵-۳: خاک قوسی بالای تونل ۳۶
- شکل ۶-۳: مدل پایداری سینه‌کار ۳۸
- شکل ۷-۳: مدل آنالیز پایداری سینه‌کار تونل..... ۳۹
- شکل ۸-۳: روش‌های مختلف شکست در جبهه‌کار تونل به روش کروس ۴۱

- شکل ۳-۹: مکانیزم شکست در روش محکم ۴۲
- شکل ۳-۱۰: مقطع تونل و پارامترهای موثر در روش لکا و دورميو ۴۳
- شکل ۳-۱۱: مکانیزم‌های شکست مخروطی ۴۵
- شکل ۳-۱۲: مقادیر N_s^{c+} و N_γ^{c+} برای مکانیزم نشست ۴۵
- شکل ۳-۱۳: روش جانسکز و استاینر ۴۷
- شکل ۳-۱۴: شکل ضریب فشار جانبی خاک ۴۹
- شکل ۳-۱۵: نمودار زاویه شکست گوه ۴۹
- شکل ۳-۱۶: مدل سیلو و گوهی در روش کواری و آنگونستا ۵۱
- شکل ۳-۱۷: فشار نگهداری موثر ۵۲
- شکل ۳-۱۸: فشار نگهداری موثر به عنوان تابعی از چسبندگی و اختلاف هد هیدرواستاتیک ۵۲
- شکل ۳-۱۹: نمودارهای محاسبه برای ضرایب بدون بعد F_0, F_1, F_2 و F_3 ۵۳
- شکل ۳-۲۰: مدل چند گوه‌های ۵۶
- شکل ۳-۲۱: نوموگرام محاسبه زاویه شکست برای خاکهای غیرهمگن ۵۶
- شکل ۳-۲۲: طرح اصلی کاکو - کرزل برای محاسبه فشار وارد بر تونل ۵۸
- شکل ۴-۱: موقعیت قناتهای شهر مشهد نسبت به مسیر خط ۲ قطار شهری ۶۲
- شکل ۴-۲: تصویر شماتیکی از بروز آب شستگی (ب)، گسترش حفره قنات (الف) و نشست سطح زمین ۶۳
- شکل ۴-۳: نمونه‌هایی از بولدرها در حفاری چاهک L2TP1 ۶۷
- شکل ۴-۴: وضعیت تیغه‌های برشی در حالت گل‌گرفتگی و بدون گل‌گرفتگی ۷۰
- شکل ۴-۵: نمونه‌هایی از ساییدگی نامتقارن تیغه‌های برشی ۷۰
- شکل ۴-۶: نمایی کلی از بالازدگی (الف) زمین و نشست (ب) ۷۱

- شکل ۴-۷: مسیر حفاری دستگاه اول ۷۳
- شکل ۴-۸: مقطعی از مسیر حفاری دستگاه اول ۷۴
- شکل ۴-۹: مسیر حفاری دستگاه دوم ۷۶
- شکل ۴-۱۰: پروفیل زمین شناسی بین ایستگاههای M2 تا L2 ۷۸
- شکل ۴-۱۱: نقشه زمین شناسی شهر مشهد و قنات‌های موجود در آن ۸۰
- شکل ۴-۱۲: نمونه‌هایی از بولدرهای موجود در چاهک M2TP1 ۸۲
- شکل ۴-۱۳: پروفیل زمین شناسی بین ایستگاههای L2 تا K2 ۸۵
- شکل ۴-۱۴: نقشه زمین‌شناسی شهر مشهد و قنات‌های موجود در آن ۸۸
- شکل ۴-۱۵: تاسیسات شهری بعد از ایستگاه L2 تا پل جمهوری ۸۹
- شکل ۴-۱۶: تاسیسات شهری بعد از پل جمهوری تا ایستگاه K2 ۸۹
- شکل ۴-۱۷: مقاطع مختلف تحت تاثیر خطر نشست بین ایستگاه L2 تا K2 ۹۳
- شکل ۴-۱۸: پلان ساختمان‌های مورد نظر جهت نصب ابزار دقیق حدفاصل ایستگاه L2 تا K2 ۹۵
- شکل ۵-۱: رفتار ماسه خشک در حالت متراکم و سست ۱۰۵
- شکل ۵-۲: مقطع تحلیل شده در فواصل ۱۳+۵۵۰ SECA- ۱۱۰
- شکل ۵-۳: مقطع تحلیل شده در فواصل ۱۳+۱۵۰ SECB- ۱۱۱
- شکل ۵-۴: شبکه تفاضل محدود ایجاد شده در نرم افزار FLAC3D ۱۱۲
- شکل ۵-۵: لایه‌های مختلف خاک در مدل تفاضل محدود ۱۱۳
- شکل ۵-۶: تاریخچه بیشینه نیروهای نامتعادل ۱۱۵
- شکل ۵-۷: کانتور تنشهای قائم در مدل عددی ۱۱۵
- شکل ۵-۸: نمای تونل، شیلد، مورتار و سگمنت مدل شده در مقطع A ۱۱۷

- شکل ۹-۵: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار در مقطع *A* ۱۱۸
- شکل ۱۰-۵: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل در مقطع *A* ۱۱۸
- شکل ۱۱-۵: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی-*SECA* ۱۱۹
- شکل ۱۲-۵: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی- *SECA* ۱۱۹
- شکل ۱۳-۵: محدوده پلاستیک اطراف تونل-*SECA* ۱۲۰
- شکل ۱۴-۵: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار در مقطع *A* با اعمال فشار ۵۰ درصد ۱۲۱
- شکل ۱۵-۵: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل در مقطع *A* با اعمال فشار ۵۰ درصد ۱۲۱
- شکل ۱۶-۵: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی با اعمال فشار ۵۰ درصد-*SECA* ۱۲۲
- شکل ۱۷-۵: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی با اعمال فشار ۵۰ درصد- *SECA* ۱۲۲
- شکل ۱۸-۵: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار در مقطع *A* با اعمال فشار ۱۰۰ درصد ۱۲۳
- شکل ۱۹-۵: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل در مقطع *A* با اعمال فشار ۱۰۰ درصد ۱۲۴
- شکل ۲۰-۵: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی با اعمال فشار ۱۰۰ درصد-*SECA* ۱۲۴
- شکل ۲۱-۵: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی با اعمال فشار ۱۰۰ درصد-*SECA* ۱۲۴
- شکل ۲۲-۵: شبکه تفاضل محدود ایجاد شده در نرم افزار *FLAC3D* ۱۲۵
- شکل ۲۳-۵: لایه های مختلف خاک در مدل تفاضل محدود در *SECB* ۱۲۷
- شکل ۲۴-۵: تاریخچه بیشینه نیروهای نامتعادل ۱۲۸
- شکل ۲۵-۵: کانتور تنش های قائم در مدل عددی ۱۲۸
- شکل ۲۶-۵: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار در مقطع *B* ۱۲۹
- شکل ۲۷-۵: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل در مقطع *B* ۱۳۰
- شکل ۲۸-۵: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی-*SECB* ۱۳۰

- شکل ۵-۲۹: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی-*SECB* ۱۳۱
- شکل ۵-۳۰: محدوده پلاستیک اطراف تونل-*SECB* ۱۳۱
- شکل ۵-۳۱: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار با اعمال فشار ۵۰ درصدی در مقطع *B* ۱۳۲
- شکل ۵-۳۲: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل با اعمال ۵۰ درصدی فشار در مقطع *B* ۱۳۳
- شکل ۵-۳۳: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی با اعمال ۵۰ درصد فشار-*SECB* ۱۳۳
- شکل ۵-۳۴: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی با اعمال ۵۰ درصد فشار-*SECB* ۱۳۳
- شکل ۵-۳۵: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار با اعمال فشار ۱۰۰ درصدی در مقطع *B* ۱۳۴
- شکل ۵-۳۶: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل با اعمال ۱۰۰ درصدی فشار در مقطع *B* ۱۳۵
- شکل ۵-۳۷: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی با اعمال ۱۰۰ درصد فشار-*SECB* ۱۳۵
- شکل ۵-۳۸: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی با اعمال ۱۰۰ درصد فشار-*SECB* ۱۳۵

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: مزایای TBM نوع EPB و دوغابی ۱۳
- جدول ۲-۲: مقادیر فشار و نیروی پیشران در بخشی از مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد ۱۹
- جدول ۳-۲: مقادیر فشار و چسبندگی در بخش‌هایی از مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد ۲۶
- جدول ۴-۲: مقادیر فشار و زاویه اصطکاک داخلی بخش‌هایی از مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد ۲۶
- جدول ۵-۲: مقادیر فشار و روباره با ثابت بودن پارامترهای دیگر ۲۷
- جدول ۱-۳: ارتفاع سست‌شدگی در روش ترزاقی ۳۶
- جدول ۲-۳: مقادیر ضریب فشار جانبی خاک ۴۸
- جدول ۳-۳: مقادیر زاویه شکست گوه ۴۸
- جدول ۴-۳: مقادیر مختلف ضرایب فشار جانبی ۴۹
- جدول ۵-۳: ضرایب ایمنی پیشنهادی برای فشارهای خاک و آب ۵۰
- جدول ۶-۳: فرمولهای تحلیلی و تجربی برآورد فشار کل جبهه کار ۵۹
- جدول ۱-۴: پارامترهای مهندسی در مسیر حفاری دستگاه اول ۷۴
- جدول ۲-۴: فشارهای اعمالی ۳۰ رینگ حفاری ۷۵
- جدول ۳-۴: مشخصات گمانه‌ها و چاهک‌های حفر شده در محدوده مورد مطالعه ۷۷
- جدول ۴-۴: پارامترهای مهندسی لایه‌های خاک در حدفاصل دو ایستگاه ۷۸
- جدول ۵-۴: پارامترهای مهندسی لایه‌های خاک در محدوده گمانه‌های DH-40 تا DH-41 [۴۴] ۷۹
- جدول ۶-۴: مقادیر EPB محاسبه شده حدفاصل ایستگاه M2 تا L2 ۸۳
- جدول ۷-۴: مشخصات گمانه‌ها و چاهک‌های حفر شده در این مسیر ۸۵
- جدول ۸-۴: مشخصات لایه‌های زمینشناسی ناحیه دوم حدفاصل کیلومتر ۱۲ تا ایستگاه K2 ۸۵

فهرست

- جدول ۴-۹: مشخصات لایه‌های زمین‌شناسی ناحیه اول حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ مسیر... ۸۶
- جدول ۴-۱۰: موقعیت چاه‌های قرار گرفته در حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ ۹۲
- جدول ۴-۱۱: موقعیت و ریسک سازه و ساختمان‌های مهم بین ایستگاه L2 تا K2 (خطر نشست) ۹۴
- جدول ۴-۱۲: مقادیر EPB محاسبه شده در حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ ۹۸
- جدول ۴-۱۳: مشخصات لایه‌های زمین‌شناسی حدفاصل ایستگاه K2 تا F2 ۹۹
- جدول ۵-۱: هشدار دهنده تغییرات و طبقه بندی آلامر ها ۱۰۹
- جدول ۵-۲: مقطع A ، پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های خاک در مقطع ۱۳+۵۵۰ ۱۱۳
- جدول ۵-۳: مشخصات تونل، شیلد، لاینینگ و مورتار مورد نیاز برای مدلسازی ۱۱۷
- جدول ۵-۴: مقطع B - پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های خاک کیلومتراژ ۱۳+۱۵۰ ۱۲۶

فصل اول

طرح مسأله و مروری بر مطالعات انجام شده

۱-۱ مقدمه

امروزه سازه‌های زیرزمینی نقش بسیار مهمی را در برنامه‌های توسعه یک کشور ایفا می‌کنند و به جرأت می‌توان آن‌ها را از جمله شریان‌های حیاتی جوامع به حساب آورد. حفاریات زیرزمینی در بسیاری از فعالیت‌های عمرانی و معدنی از جمله راه و راه آهن، خطوط انتقال آب، گاز و فاضلاب، نیروگاه‌های زیرزمینی، ذخیره سازی مواد مختلف و تأسیسات نظامی به کار برده می‌شوند. در سال‌های اخیر در کشور توجه به بحث احداث مترو در محیط‌های شهری در راستای کاهش ترافیک افزایش یافته است. با توجه به اینکه حفر و احداث این نوع سازه‌های زیرزمینی بسیار زمان‌بر و پرهزینه است و ممکن است تجهیزات و تأسیسات مهمی در آن‌ها نصب شوند توجه به بحث کاهش هزینه پروژه در این سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. در این راستا سعی می‌شود تا با ارائه راه حل‌ها و روش‌های مناسب به کاهش هزینه و زمان پرداخته شود. امروزه حفاری تونل برای احداث مترو با استفاده از انواع ماشین‌های حفاری TBM انجام می‌شود. در زمین‌های سست و ناپایدار اغلب در ایران از ماشین‌های حفاری نوع EPB استفاده می‌شود. بعضی از دستگاه EPB بکار رفته برای احداث تونل به دلیل شرایط زمین‌شناسی مختلف قابلیت حفاری در ۲ حالت EPB و باز را دارد که از حالت EPB در شرایط سست زمین و از حالت باز در شرایط پایدار زمین استفاده می‌شود.

۱-۲ هدف و ضرورت انجام تحقیق

از آنجا که دستگاه TBM به کار رفته در پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد قابلیت حفاری در دو حالت EPB و باز را دارد و با توجه به جنس زمین حفاری در بخش‌هایی از مسیر که حالت نسبتاً پایداری دارند می‌توان حفاری در حالت باز را برای بخش‌های پایدار مورد بررسی قرار داد تا کمکی در جهت کاهش هزینه‌های پروژه شود. با توجه به این که یکی از مشکلات حفاری در پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد تهیه

ماده پر مصرف فوم برای بهسازی خاک و کاهش سایش ابزار برش می‌باشد و با توجه به تحریم‌های تحمیلی به ایران تهیه این ماده بسیار مشکل شده است و مواد بهسازی خاک داخلی نیز از کیفیت مناسبی برخوردار نمی‌باشد و از آنجا که در حفاری باز از فوم استفاده نمی‌شود در نتیجه استفاده از این روش می‌تواند کمکی در راستای کاهش هزینه‌های پروژه شود در این پایان‌نامه تلاش می‌شود تا حفاری در حالت باز مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد.

۳-۱ مروری بر مطالعات پیشین

در سال ۲۰۰۳ روبرتو بونو^۱ با مطالعات زمین‌شناسی و مخاطرات مسیر تونل مترو خط ۹ شهر بارسلونا شرایط حفاری تونل را در حالت باز پیشنهاد کرد و بخشی از تونل نیز به همین روش حفاری شد [۱]. حال در این تحقیق سعی شده است تا شرایط استفاده از این حالت حفاری در پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد بررسی شده و پس از انتخاب مناطق مستعد از لحاظ شرایط مخاطرات زمین‌شناسی مسیر به تحلیل عددی آن‌ها پرداخته شود.

۴-۱ ساختار پایان‌نامه

با توجه به حالت‌های مختلف حفاری با ماشین TBM نوع EPB در فصل دوم این تحقیق پس از انتخاب ماشین حفار پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد به مقایسه حالت‌های حفاری با آن پرداخته خواهد شد.

یکی از عوامل مهم در حین حفاری و پس از اتمام پروژه که باید لحظه به لحظه کنترل شود بحث نشست در سطح زمین می‌باشد که این نشست‌ها بوسیله فشارهای اعمالی بوسیله دستگاه قابل کنترل

¹ Roberto Bono

است. در فصل سوم به بررسی روش‌های محاسبه فشارهای تعادلی زمین پرداخته خواهد شد و در انتها روش مناسب با توجه به بررسی روش‌ها انتخاب می‌شود.

مخاطرات زمین‌شناسی سطحی به عنوان یکی از عوامل مهم در احداث تونل به حساب می‌آید که قبل از هر کاری در راستای حفاری باید به مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک مسیر پرداخته شود تا از شرایط لایه‌های مسیر حفاری اطلاع حاصل گردد، بررسی این شرایط کمک زیادی در راستای حفاری در حالت باز نیز می‌کند که در فصل چهارم این تحقیق به بررسی شرایط مخاطرات زمین‌شناسی و سطحی مسیر پرداخته می‌شود و در انتهای این فصل مناطق مستعد برای حفاری در شرایط بدون فشار انتخاب خواهد شد.

در فصل پنجم با استفاده از تحلیل عددی بوسیله نرم افزار FLAC3D به مدلسازی حفاری در حالت باز پرداخته می‌شود. در نهایت در فصل پایانی این تحقیق نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی در این زمینه ارائه خواهد شد.

فصل دوم

انتخاب ماشین و بررسی حالت های

حزری با آن

۲-۱ مقدمه

دستگاه های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل به طور کلی به دستگاه هایی اطلاق می شوند که بر خلاف شیوه سنتی انفجاری، حفر تونل را به صورت پیوسته و مستمر به وسیله دیسک یا سایر ابزارهای برشی انجام می دهند. این ماشین ها با مقطع دایره در حالیکه تمام تجهیزات پشتیبانی را همراه خود به داخل تونل می کشند، می تواند با سرعت های پیشرفت بسیار قابل توجه تونل را حفر کند.

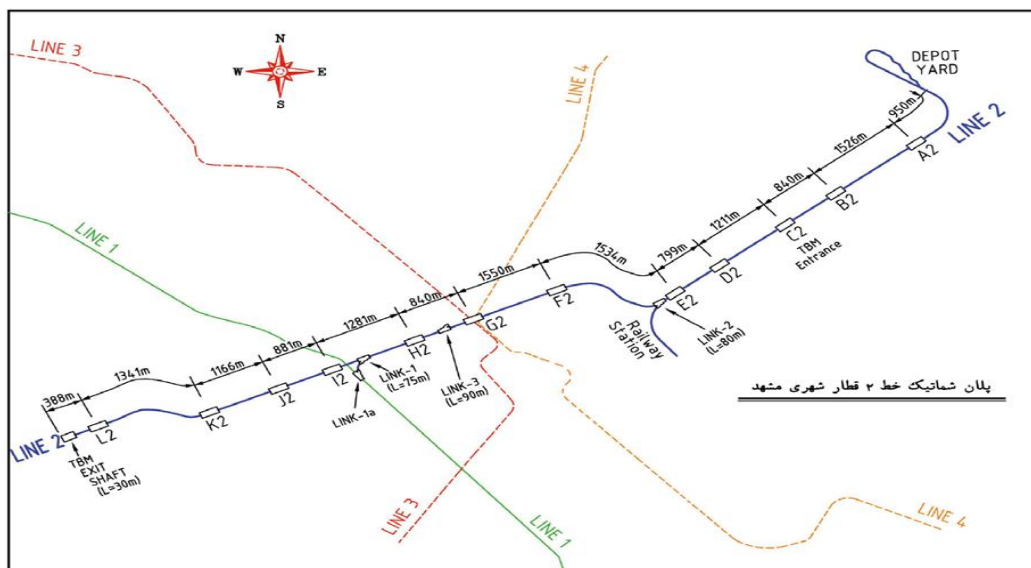
تاریخچه کاربرد این دستگاه ها به سال ۱۸۸۱ میلادی، زمانی که ماشین های حفاری تمام مقطع با سیستم هوای فشرده، در ساخت تونلی در کانال مانس به کار برده شد، بر می گردد [۲]. اما دوران ماشین های حفاری تمام مقطع مدرن از دهه ۵۰ میلادی وقتی که یکی از این دستگاه ها برای حفر تونل انحراف آب در پروژه سدی در داکوتای جنوبی بکار رفت، آغاز شد. از آنجا که ماشین های حفاری تمام مقطع اولیه، فقط برای کار در ساختارهای بسیار نرم مناسب بودند، کوشش های بسیاری برای تکامل آنها صورت گرفت که نتیجه این تلاش ها منجر به ساخت ماشین های حفاری تمام مقطعی شد که قادر به حفاری در زمین های سنگی پایدار و همچنین در سازندهای ناپایداری که باید سطح تونل، همزمان با حفاری، با جدار پایدار کننده پوشانده شود، است.

از آنجا که در یک پروژه تونل سازی ممکن است خصوصیات ساختاری زمین تغییر کند، بعضی اوقات لازم است که TBM، توانایی کار در ساختارهای سنگی سخت و سست را به طور همزمان داشته باشد. در این گونه موارد، یک سیستم سپر محافظتی برای حفاری تونل در قسمت پشت صفحه حفر دستگاه تعبیه می شود که وظیفه نگهداری موقت زمین قبل از نصب سیستم نگهداری را دارد. امروزه TBM برای حفر انواع تونل ها با کاربردهای مختلف اعم از تونل های انتقال آب، راه سازی، مترو و سایر مقاصد در انواع سازندها با قطرهای مختلف بکار برده می شوند. در ادامه به معرفی پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد،

انتخاب دستگاه مناسب برای حفر تونل آن و بررسی حالت های حفاری دستگاه انتخاب شده پرداخته می شود.

۲-۲ معرفی پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد

تونل خط ۲ قطار شهری مشهد با طول تقریبی ۱۴ کیلومتر و قطر تمام شده ۸/۴ متر در راستای شمال شرق به جنوب غرب امتداد می یابد. همانطور که در شکل (۱-۲) مشاهده می شود این مسیر دارای ایستگاه هایی به نام A2 الی M2 است که با احتساب ترانشه ی جنوبی نیز به عنوان ایستگاه M2، این خط دارای ۱۳ ایستگاه است.

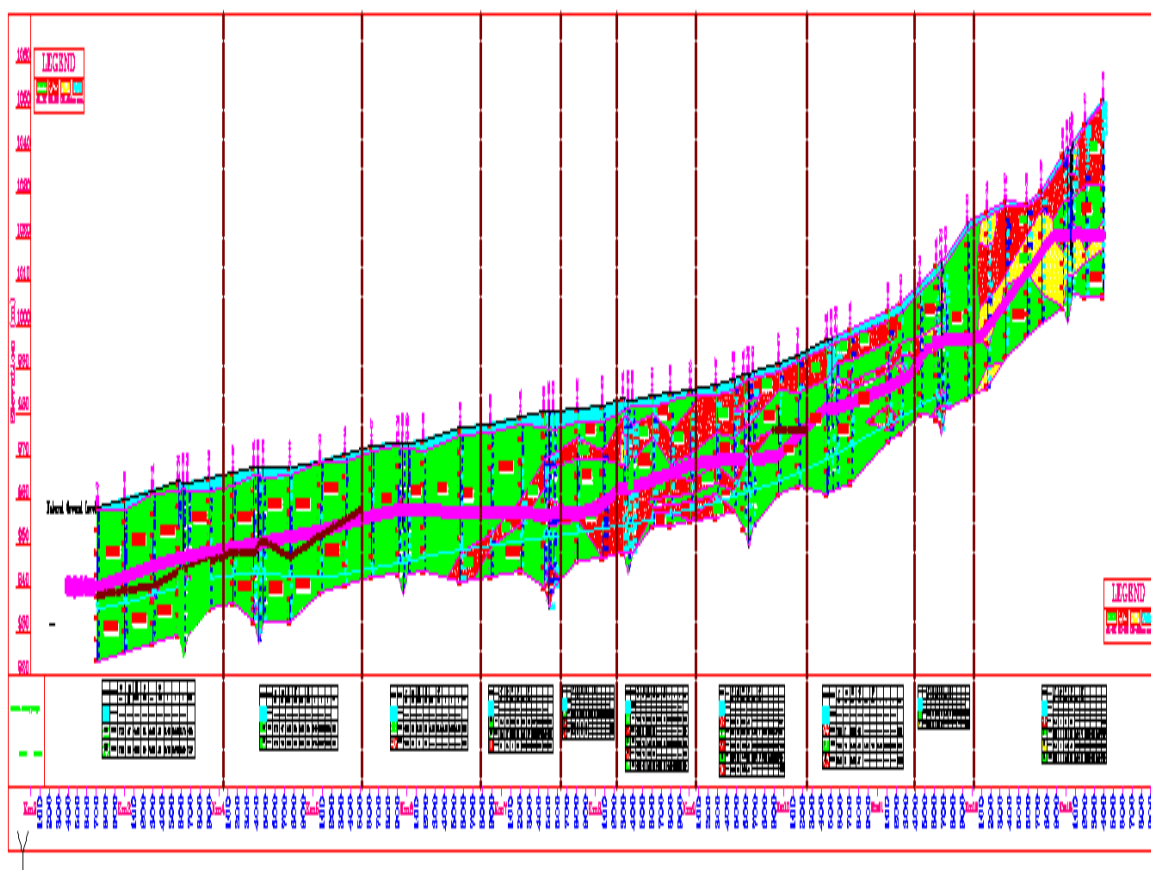


شکل ۱-۲: مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد [۳]

۲-۲-۱ ژئوتکنیک مسیر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری مشهد

برای تعیین خصوصیات فیزیکی خاک و مشخص کردن پارامترهای ژئوتکنیکی مفید و مؤثر در محاسبات تونل مورد مطالعه، ۷۴ نقطه از طول مسیر مورد آزمون های صحرایی و آزمایشگاهی قرار گرفته است و بر اساس نتایج حاصل، شباهت های موجود، انطباق مقاطع زمین شناسی و همچنین از منظر ژئوتکنیکی خاک های مسیر، طول مسیر حفاری به سه واحد مجزا تقسیم می گردد. که به شرح زیر است:

- رس سیلتی و سیلت رسی با درون لایه هایی از شن (ML-CL)
 - ماسه رسی یا ماسه سیلتی (SM-SC)
 - شن رسی یا شن سیلتی (GM-GC)
- با توجه به اطلاعات ژئوتکنیک مسیر و بخشی از پروفیل مسیر که در شکل (۲-۲) آورده شده می توان گفت مسیر تونل از شمال به جنوب از خاک های دانه ریز به دانه درشت تغییر می کند.



شکل ۲-۲: پروفیل قسمتی از مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد [۴]

۳-۲ انتخاب دستگاه TBM پروژه خط ۲ مترو مشهد

بطور کلی می توان گفت سه نوع TBM برای حفاری در زمین های سست و رسی قابل استفاده

هستند که عبارت اند از:

- ماشین های حفاری تمام مقطع از نوع متعادل کننده فشار زمین یا EPB TBM
- ماشین های حفاری تمام مقطع تونل از نوع سپر دوغابی^۱
- ماشین های حفاری تمام مقطع تونل از نوع ترکیبی^۲ که قابلیت تغییر به دو حالت EPB و دوغابی را دارد.

در حالیکه هر دو ماشین TBM نوع دوغابی و EPB قابلیت کنترل کامل جبهه کار تونل را دارند اما در نحوه کنترل و نگهداری، تفاوت زیربنایی با یکدیگر دارند که در زیر به شرح هر کدام پرداخته می شود [۵].

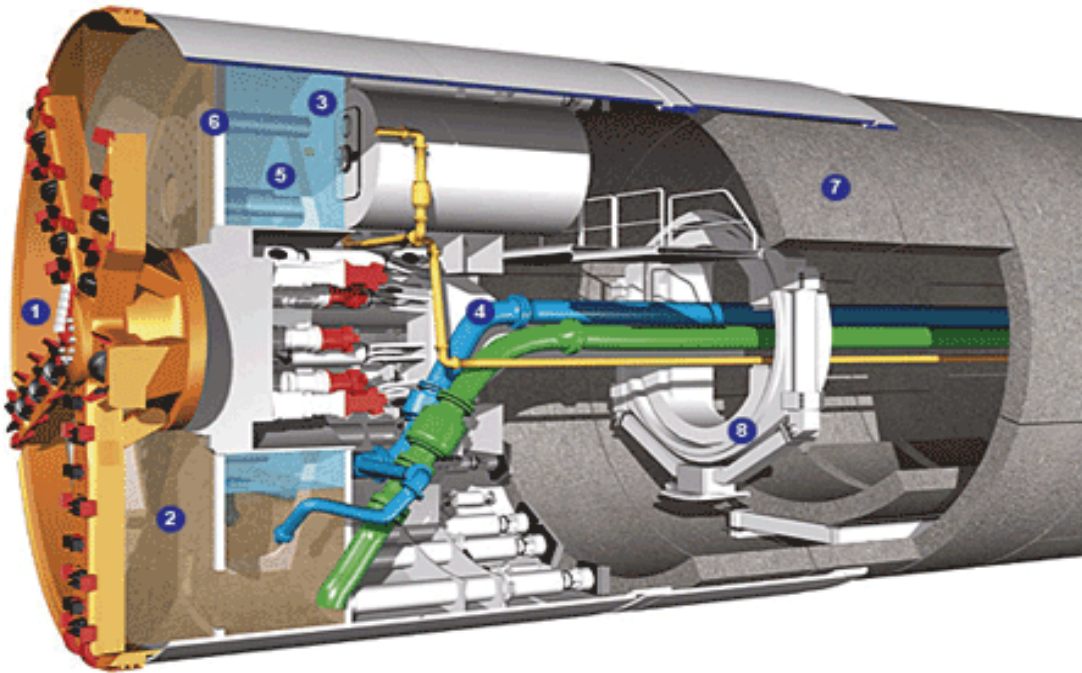
۲-۳-۱ سپرهای دوغابی

ماشین سپر دوغابی که در شکل (۲-۳) نیز مشاهده می شود سینه کار حفاری را با تزریق سیال نگهداری (دوغاب بنتونایت)، نگهداری می کند. دوغاب اساساً از یک محلول بنتونایت در آب با بعضی از مواد افزودنی در صورت نیاز ساخته می شود. خاک حفاری با سیال تزریقی مخلوط شده و در داخل اتاقک حفاری به صورت سیال، برای ایجاد تعادل فشار باقی می ماند. اتاقک حفاری را محفظه انباشت خاک حفاری نیز می گویند، که در واقع فاصله بین سینه کار حفاری و دیواره فلزی جداکننده بین اتاقک حفاری از بقیه قسمت ها است. یک سیستم تزریق سیال، دوغاب تازه را وارد اتاقک حفاری کرده و مواد حفاری شده به کمک لوله خروجی از اتاقک حفاری خارج می شود از آنجا که به همراه مواد خروجی، سیال نگهدارنده نیز وجود دارد در این مرحله مواد خروجی به سمت تاسیساتی که در سطح زمین قرار داده شده هدایت می شوند و در آنجا عملیات جدایش مصالح حفاری از سیال نگهدارنده انجام می شود. برای ایجاد

¹ Slurry Shield

² Mix Shield

تعداد بین جریان ورودی و خروجی، دوغاب را تحت فشار در اتاقک حفاری نگه می‌دارند، با تغییر در جریان ورودی و خروجی دوغاب امکان کنترل مقدار فشار سینه کار فراهم می‌شود [۵].

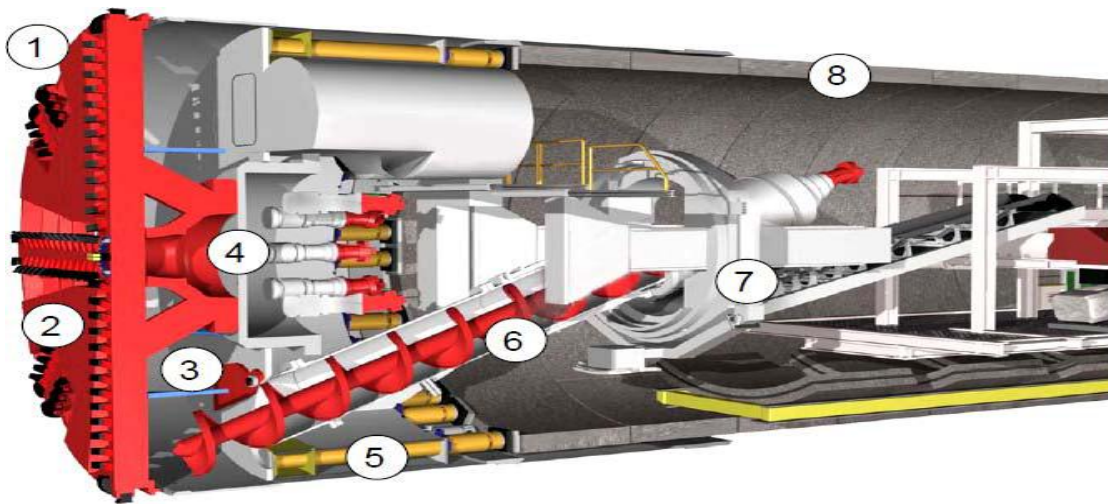


شکل ۲-۳: ماشین حفار نوع دوغابی ۱- صفحه حفار، ۲- اتاقک حفاری، ۳- جدار داخلی، ۴- خط خوراک دستگاه، ۵- بالشتک هوا، ۶- دیواره فشار، ۷- سگمنت، ۸- نصاب [۶]

۲-۳-۲ ماشین سپر فشار تعادلی زمین

ماشین فشار تعادلی در ۱۵ سال اخیر برای فضاهای زیرزمینی در نواحی شهری توسعه داده شده است (شکل ۲-۴). دامنه کاربرد سپر فشار تعادلی با افزایش مواد افزودنی در خاک چسبنده تا خاک‌های دانه‌ای با چسبندگی کم و در زمین‌های غیر همگن دارای سنگ و خاک به کار می‌رود. این تکنولوژی اساساً مبنی بر استفاده از خاک حفاری شده موجود در اتاقک حفاری برای نگهداری سینه کار است. فشار نگهداری سینه کار به کمک فشار اعمالی بر خاک حفاری موجود در اتاقک حفاری فراهم می‌شود، حفر در صفحه حفار به وسیله ابزارهای برش مانند دیسک‌ها انجام می‌گیرد. خاک حفاری شده در

اتاقک حفاری (شبیه اتاقک حفاری سپر دوغابی) انباشته می شود و سپس به کمک نقاله مارپیچی به بیرون منتقل می شود. مقدار خاک خارج شده از اتاقک حفاری متناسب با سرعت گردش نقاله مارپیچ است، در حالی که مقدار خاک حفاری شده متناسب با نرخ نفوذ^۱ است. بنابراین تعادل دینامیکی مبنی بر تعادل حجم خاک حفاری شده و حجم خاک خارج شده در اتاقک حفاری ایجاد شده، تنظیم این تعادل به واسطه تغییر سرعت گردش نقاله مارپیچ صورت می گیرد و مواد انباشته شده در اتاقک حفاری برای ایجاد فشار نگهداری، برای پایداری فشار سینه کار استفاده می شود. فشار سینه کار با تغییر سرعت گردش نقاله مارپیچ که خود تابعی از نرخ نفوذ است، کنترل می شود. روی هم رفته توابع اساسی در حفاری با ماشین خروج خاک حفاری و کنترل فشار سینه کار تونل است. نقاله مارپیچی امکان پراکندگی فشار در اتاقک حفاری را از مقدار ماکزیمم (در روی تراز کف اتاقک حفاری) تا تراز جو (دریچه خروجی) فراهم می کند. جک های هیدرولیکی فشار طولی را روی سپر و دیواره تنظیم کننده اعمال می کنند، یعنی با باز و جمع شدن جک ها عمل سگمنت گذاری در داخل سپر پشت اتاقک فشار و حرکت رو به جلوی ماشین فراهم می شود. فشار اعمالی ماشین باید به اندازه ای باشد که ضمن نگهداری سینه کار تونل، سبب کاهش نیرو- های اصطکاکی روی سپر شود [۵].



شکل ۲-۴: سپر فشار تعادلی زمین ۱- سینه کار، ۲- صفحه حفر، ۳- اتاقک حفاری، ۴- دیواره فشار، ۵- جک فشاری، ۶- نقاله ماریپیچی، ۷- نصاب، ۸- سگمنت [۷]

۳-۳-۲ مقایسه بین سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین

معیارهایی برای انتخاب سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین در نواحی شهری حائز اهمیت است.

که به شرح زیر می باشد [۸]:

- روش سپر دوغابی نیاز به تأسیسات بزرگی دارد، و برای محیط شهری به دلیل کمبود فضا از EPB

استفاده می شود.

- با هر دو ماشین می توان با توجه به شرایط ژئوتکنیکی بدون مواد افزودنی نیز حفاری نمود.

- آلودگی محیط زیست در هر دو روش وجود دارد.

- نیاز به جدایش بنتونایت از خرده حفاری در سپر دوغابی امر ضروری است.

- در روش سپر دوغابی امکان انسداد لوله به وسیله ذرات درشت وجود دارد، و در روش EPB امکان کلوخه شوندگی خاک در اتاقک حفاری و نقاله مارپیچی وجود دارد، بنابراین بهسازی مناسب در هر دو روش عامل مهمی خواهد بود.

- در هر دو ماشین امکان بالازدگی در اعماق کم وجود دارد.

- از لحاظ تمیزی محیط تونل در ماشین دوغابی خوب و ماشین فشار تعادلی ضعیف است.

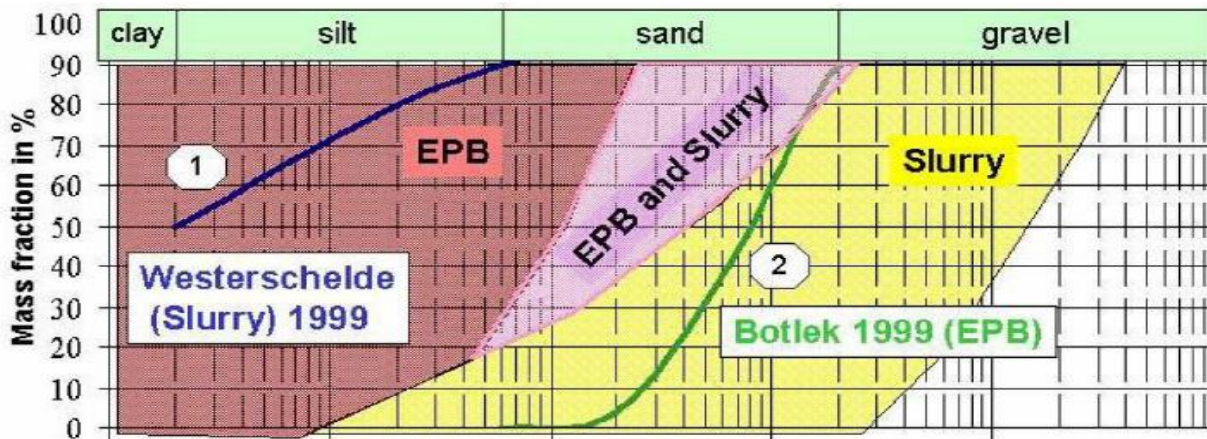
مزایای TBM نوع EPB و دوغابی به طور کلی تر در جدول (۱-۲) آمده است.

جدول ۱-۲: مزایای TBM نوع EPB و دوغابی [۸]

مزایای دستگاه EPB	مزایای دستگاه SPB
سرمايه گذاري کمتر	محاسبه خودکار فشار مطلوب جبهه کار
سرعت بالاتر ساخت و مونتاژ دستگاه	لنگر پیچشی وارد شده به سر حفاری کمتر است
کارگاه و شفت قرارگیری کوچکتر	سرحفار نیاز به توان کمتری دارد
سرعت بیشتر حفاری	انتقال خاک حفاری شده به صورت سربسته تا سطح زمین
استفاده مؤثر از قابلیت خودایستایی زمین	نظافت بیشتر در محیط تونل
مصرف مواد افزودنی کمتر	
در مواقع ریزش جبهه کار، نشست زمین محدودتر است	
سادگی بیشتر سیستم راهبری برای اپراتور دستگاه	
سیستم نگهداری ساده تر دستگاه	
عدم نیاز به جداسازی خاک از بنتونیت	

۲-۳-۴ محدوده کاربری TBM نوع دوغابی و EPB

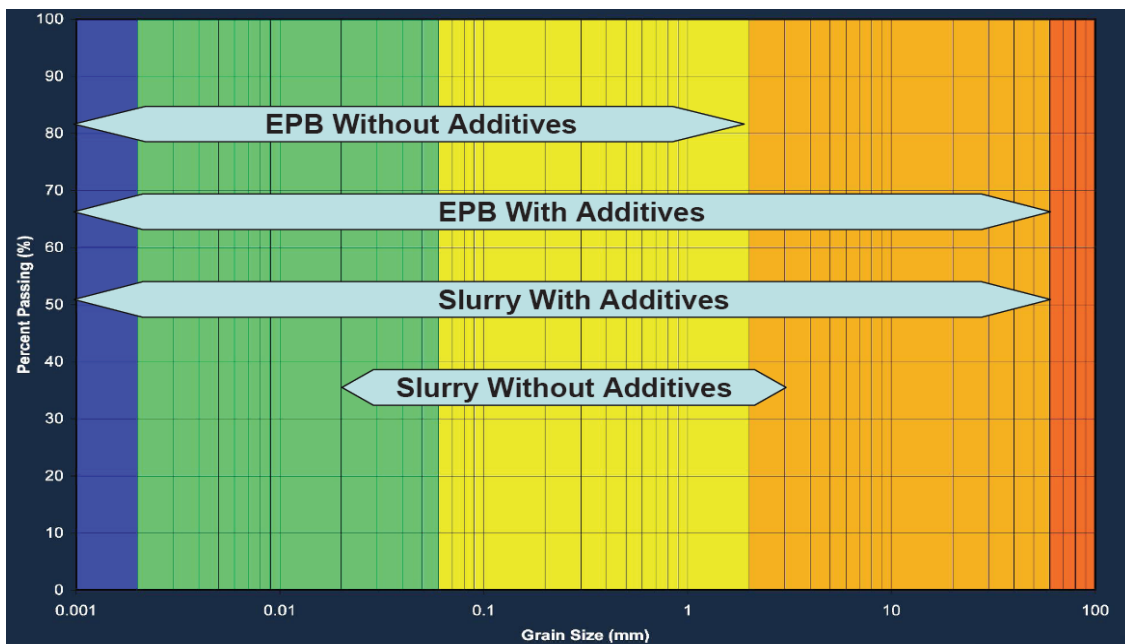
در شکل (۲-۵) محدوده کاربرد دستگاه های TBM نوع دوغابی و EPB با توجه به دانه بندی خاک مشخص شده است.



شکل ۲-۵: محدوده کاربرد دستگاه های TBM مختلف با توجه به دانه بندی خاک [۹]

هر کدام از این دو نوع ماشین چنانچه به درستی انتخاب شده و در شرایط ژئوتکنیکی مناسب مورد استفاده قرار گیرند، می توانند بهترین روش برای کنترل خاک جبهه کار تونل را در آن شرایط ارائه دهند.

شکل (۲-۶) نیز محدوده کاربرد دستگاه TBM نوع دوغابی و EPB را در ۲ حالت مختلف حفاری بدون استفاده از مواد افزودنی و با استفاده از این مواد را نشان می دهد. دستگاه EPB جهت حفاری در خاک های دانه ریزتر و دستگاه نوع دوغابی جهت حفاری در خاک های دانه درشت تر بکار برده می شود. همانطور که از شکل پیداست، در سال های اخیر پیشرفت های زیادی در استفاده از مواد افزودنی و سیستم های تزریق آن ایجاد شده است بطوریکه نوع دستگاه ۲ توان بهسازی دامنه وسیعی از دانه بندی خاک را دارند و سبب شده است که نوع خاک پارامتری نه چندان بحرانی و مهم در انتخاب و سفارش نوع TBM باشد. همانطور که مشاهده می شود هر یک از دو نوع دستگاه در حالت استفاده از مواد افزودنی قابلیت حفاری در طیف وسیعی از دانه بندی مصالح زمین را دارند.



شکل ۲-۶: نمودار انتخاب دستگاه حفار با توجه به دامنه تغییرات دانه بندی خاک [۱۰]

بطور کلی می توان گفت که در انتخاب دستگاه TBM نوع خاک و زمینی که حفاری در آن باید صورت گیرد مهمترین نقش را دارد، علاوه بر این نیز جنبه های دیگری از قبیل فضای کارگاه و در دسترس بودن موادی همچون بنتونیت و مواد افزودنی پلیمری در انتخاب دستگاه نیز تاثیر دارند.

حال با توجه به مطالب ذکر شده به انتخاب دستگاه برای پروژه خط ۲ قطار شهری پرداخته می شود. در انتخاب دستگاه TBM در پروژه مذکور مشخصات فیزیکی لایه های زمین نقش اساسی را داشته است. مهمترین خصوصیت مسیر حفاری تونل در پروژه خط ۲ قطار شهری مشهود این است که حاوی خاک های نرم می باشد. تراز آب زیرزمینی نیز در سراسر مسیر پایین تر از تراز تونل است. با توجه به وجود لایه های خاک رس چسبنده و سیلت در مسیر حفاری دستگاه اول (مسیر شمالی) خط ۲ و توضیحات ذکر شده در مطالب فوق، به نظر می رسد که دستگاه EPB جهت حفاری تونل مناسب تر است، چرا که حفاری در خاک های چسبنده و نفوذناپذیر با دستگاه نوع دوغابی با صعوبت همراه است. همچنین در لایه های ماسه ی رسی- سیلتی امکان حفاری با دستگاه EPB (با استفاده از مواد افزودنی) وجود دارد. در مسیر حفاری

دستگاه دوم (مسیر جنوبی) خط ۲ نوع خاک دانه درشت تری وجود دارد، که شامل گراول رسی به همراه شن و بولدر می باشد. رطوبت لایه ها نسبتاً کم و حفاری آن نیاز به مواد افزودنی و فوم های پلیمری نیز دارد. ممکن است که حفاری با دستگاه EPB در زون های بولدر دار مسیر جنوبی کمی نگران کننده باشد، اما با توجه به پیشرفت ها در سال های اخیر در خصوص استفاده از مواد افزودنی برای بهسازی خاک حفاری و همچنین با در نظر گرفتن این موضوع که بخش محدودی از مسیر جنوبی دارای زون های بولدر دار و مصالح درشت دانه می باشد و از ایستگاه K2 به بعد لایه های رسی - سیلتی افزایش می یابد و همچنین قابلیت حفاری ماشین در حالت باز در برخی از قسمت های مسیر جنوبی، امکان استفاده از ماشین EPB در این قسمت را فراهم می سازد. با در نظر گرفتن مطالب فوق دستگاه به کار گرفته شده در راستای احداث تونل خط ۲ قطار شهری مشهد، TBM نوع EPB مورد انتخاب واقع شده است.

۲-۴ حالت های حفاری با دستگاه TBM نوع EPB

دستگاه به کار گرفته شده در پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد قابلیت حفاری در دو حالت EPB و باز را دارد، که در زیر به شرح حالت های مختلف حفاری با این دستگاه و مقایسه آنها با هم می پردازیم.

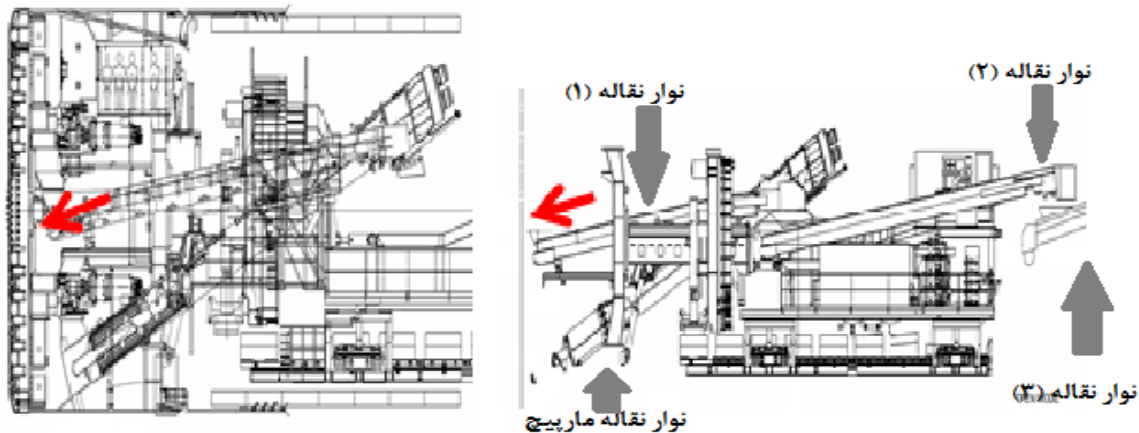
۲-۴-۱ حفاری در حالت EPB

در این نوع حفاری، عملیات حفاری توام با اعمال فشار سینه کار انجام می شود. این نوع حفاری در شرایط زمین شناسی سست و ناپایدار انجام می گیرد. عملیات حفاری در این حالت به این صورت می باشد که خاک جلوی سینه کار پس از حفاری به وسیله ابزار برش به داخل اتاقک فشار منتقل شده و در آنجا انباشته می گردد. انباشته شدن مصالح در اتاقک فشار باعث اعمال فشار به سینه کار می شود می توان نتیجه گرفت که هر چه مصالح بیشتری در داخل اتاقک فشار انباشته شود فشار بیشتری به سینه کار اعمال می شود. مصالح انباشته شده در داخل اتاقک فشار به وسیله یک نوار نقاله ماریپیچ که در پایین اتاقک قرار دارد

به بیرون منتقل می شود. نوار نقاله مارپیچ دارای یک دریچه می باشد که مقدار بازشدگی این دریچه به فشار محاسبه شده برای اعمال به سینه کار بستگی دارد و این دو باید متناسب با هم باشند یعنی دریچه باید به مقداری باز شود که فشار مورد نظر، در حد مشخص شده اعمال شود. دلیل اصلی اهمیت این موضوع این است که اگر مقدار باز شدگی دریچه نوار نقاله مارپیچ مناسب نباشد موجب تغییر در فشار اعمالی درست شده و در نتیجه باعث به وجود آمدن مشکلاتی خواهد شد که اگر مقدار فشار کمتر از مقدار محاسبه شده باشد باعث ایجاد نشست در سطح زمین شده و اگر بیشتر از این مقدار باشد باعث ایجاد بالا آمدگی در سطح زمین می شود [۵].

۲-۴-۲ حفاری در حالت باز

به حفاری در حالتی که هیچگونه فشاری به سینه کار اعمال نشود وضعیت حفاری در حالت باز گفته می شود. این حالت از حفاری تنها در وضعیت پایدار زمین و در شرایطی که تونل با آب های زیرزمینی تداخلی نداشته باشد و یا فشار آب بسیار پایین باشد به کار گرفته می شود. حفاری در این حالت به این صورت است که پس از حفاری به وسیله صفحه حفار مصالح حفاری شده دیگر در داخل اتاقک فشار انباشته نمی شود و همانطور که در شکل (۲-۷) نیز مشاهده می شود مصالح مستقیماً بر روی نوار نقاله (۱) ریخته و از آنجا به بیرون منتقل می شود در این حالت از حفاری، نوار نقاله مارپیچ حذف می شود. نوار نقاله (۱) دقیقاً در پشت اتاقک فشار و در مرکز دایره ی حفاری قرار می گیرد. در این راستا و برای حفاری در حالت باز شرایطی لازم است که در زیر به شرح آن ها پرداخته می شود [۵].



شکل ۷-۲: موقعیت نورهای نقاله [۱۱]

۵-۲ مقایسه دو حالت حفاری با دستگاه TBM نوع EPB

در هنگام حفاری در دو حالت EPB و باز عوامل زیادی تحت تاثیر قرار می گیرند که در زیر به شرح آنها پرداخته می شود.

۲-۵-۱ نیروی پیشران^۱ دستگاه

این نیرو از طرف جک های پشت اتاقک فشار به سگمنت های نصب شده وارد شده و باعث حرکت رو به جلوی دستگاه می شود. با توجه به جدول (۲-۲) مشاهده می شود بین فشار دستگاه و نیروی پیشران رابطه مستقیم وجود دارد یعنی با افزایش فشار، نیروی پیشران برای رسیدن به نرخ نفوذ تعیین شده افزایش یافته و این افزایش باعث فشار آمدن بر روی سگمنت های نصب شده خواهد شد این فشار هنگامی که جک ها در فاصله نزدیک به گوشه سگمنت ها هستند باعث شکستن سگمنت ها از قسمت لبه ها خواهد شد. در صورتی که اگر فشار حذف شود می توان با یک نیروی پیشران پایین به سرعت پیشروی مناسب رسید در نتیجه از صدمه دیدن سگمنت ها نیز جلوگیری نمود.

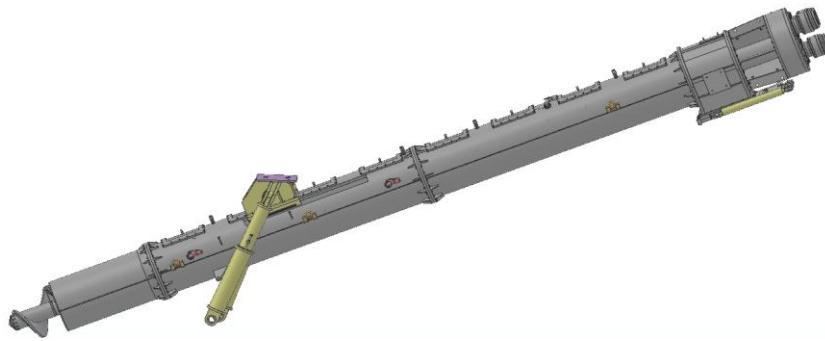
¹ Thrust Force

جدول ۲-۲: مقادیر فشار و نیروی پیشران در بخشی از مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد [۱۲]

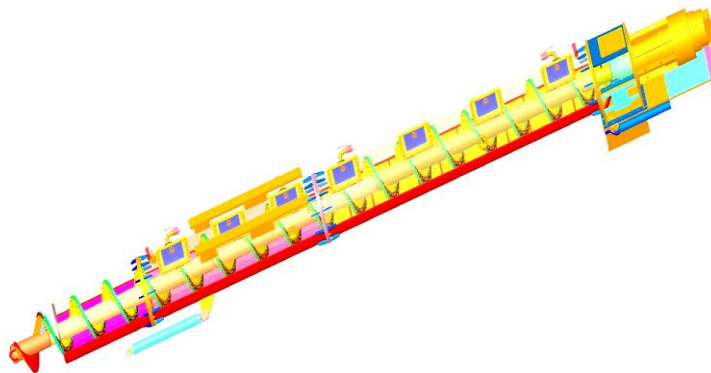
ردیف	فشار اعمالی (bar)	نیروی پیشران (KN)
۱	۰/۲	۱۶۹۰۰
۲	۰/۳	۱۷۴۰۰
۳	۱/۲	۲۶۷۰۰
۴	۱/۳	۳۲۴۰۰
۵	۱/۵	۳۳۰۰۰
۶	۲	۳۶۶۰۰

۲-۵-۲ نوار نقاله مارپیچ

نوار نقاله مارپیچ یکی از ابزارهایی است که در هنگام حفاری با فشار از آن استفاده می شود. همانطور که در شکل (۲-۸) مشاهده می شود این قسمت به شکل یک استوانه ی فلزی است که در داخل آن مطابق شکل (۲-۹)، ابزار حلزونی شکلی تعبیه شده است و در هنگام حفاری با فشار سینه کار مصالح داخل اتاقک فشار به وسیله آن به خارج منتقل می شود. استفاده از شکل حلزونی داخل آن برای انتقال مواد از پایین اتاقک فشار به بالا و انتقال به بیرون می باشد. در این حالت احتمال گیر کردن مصالح درشت داخل نوار نقاله مارپیچ و احتمال استهلاک آن وجود دارد. ولی در حالت باز به دلیل اینکه نوار نقاله مارپیچ حذف می شود و به جای آن از نوار نقاله (۱) استفاده می شود (شکل (۲-۷)) در این حالت دیگر استهلاک ابزار و گیر کردن مواد داخل نوار نقاله مارپیچ از بین می رود.



شکل ۲-۸: تصویری از نمای بیرونی نوار نقاله مارپیچ [۱۱]



شکل ۲-۹: تصویری از نمای داخلی نوار نقاله مارپیچ [۱۱]

۲-۵-۳ فوم

فوم در هنگام حفاری با دستگاه های TBM به منظور تسهیل در امر حفاری، کم کردن اصطکاک ما بین صفحه حفار و خاک زمین در حال حفاری در نتیجه کاهش سایش ابزار برشی و تقلیل در نفوذ پذیری خاک حفاری شده استفاده می شود. فوم به عنوان مؤثرترین و پرکاربردترین مواد در عملیات بهسازی خاک جبهه کار در حفاری مکانیزه است. فوم مورد استفاده در دستگاه حفار TBM متشکل از ترکیب دو ماده خاص بنام تنسیو اکتیو^۱ و پلیمر^۲ به همراه آب و هوا می باشد [۱۳].

^۱ Tensio Active

^۲ Polymer

این ترکیبات به عنوان ترکیبات اصلی در مراحل ساخت و تزریق فوم در جبهه کار به شمار می رود. عوامل اساسی که ویژگی های کنترلی و پایداری فوم را توصیف می کند عبارتند از:

- غلظت ماده کف ساز در محلول فوم (C_f)

غلظت مواد کف ساز (C_f) نشان دهنده مقدار مواد کف ساز در محلول فوم است. مقدار معمول آن بین ۰/۵ تا ۵ درصد متغیر است که شدیداً تابع مقدار آب کلی در زمین می باشد، که بر اساس میزان آب تزریق شده در حین حفاری و همچنین آب موجود در لایه های زمین در نظر گرفته می شود. نحوه محاسبه مقدار این پارامتر از رابطه (۱-۲) حاصل می شود [۱۳]:

$$C_f = 100 \times m_{\text{surfactant}} / m_{\text{foamsolution}} \quad (1-2)$$

$m_{\text{surfactant}}$: وزن ماده کف ساز در محلول فوم (kg)

$m_{\text{foamsolution}}$: وزن محلول فوم (kg)

- نسبت انبساط فوم^۱ (FER)

مقدار هوا و محلول فوم توسط عاملی به نام FER بیان می شود که بر اساس نسبت حجم فوم به حجم مایع تعیین می گردد. مقدار آن بطور معمول بین ۵ تا ۳۰ می باشد که بصورت رابطه (۲-۲) محاسبه می شود [۱۳]:

$$FER = V_{\text{Foam}} / V_{\text{foamsolution}} \quad (2-2)$$

V_{Foam} : حجم فوم (لیتر)

^۱ Foam Expansion Ratio

$V_{foamsolution}$: حجم محلول فوم (لیتر)

- نسبت تزریق فوم^{۱۱} (FIR)

مقدار فوم تزریق شده در خاک به صورت FIR بیان می شود که نشان دهنده حجم فوم استفاده شده در یک متر مکعب خاک می باشد. مقدار FIR بطور معمول بین ۱۰ تا ۸۰ درصد متغیر می باشد. برای مثال مقدار FIR برابر ۴۰٪ نشان دهنده ۴۰۰ لیتر فوم اضافه شده به ۱ متر مکعب خاک است. مقدار این نسبت شدیداً به فشار آب زیرزمینی وابسته است و با استفاده از رابطه (۴-۲) محاسبه می شود [۱۳]:

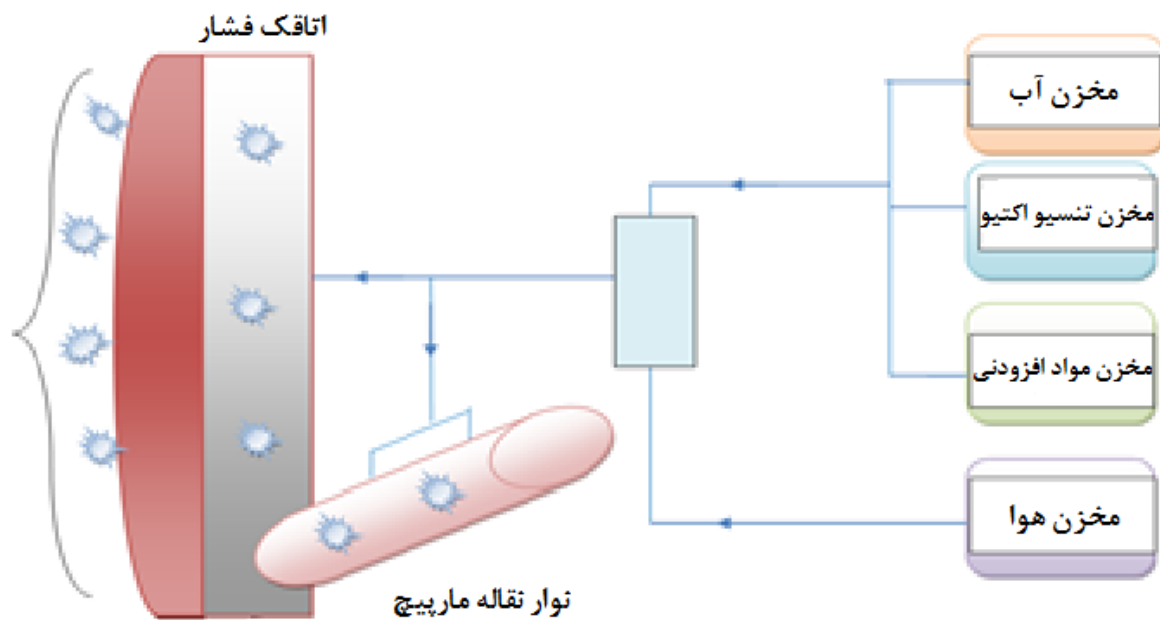
$$FIR = 100 \times V_{Foam} / V_{soil} \quad (4-2)$$

V_{Foam} : حجم فوم (مترمکعب)

V_{soil} : حجم برجای خاک (مترمکعب)

در راستای حفاری مناسب در مکان های مختلفی باید عملیات تزریق فوم صورت بگیرد. در شکل (۱۰-۲) مکان های تزریق فوم مشخص شده است. بطور کلی مواد افزودنی در جبهه کار تونل، اتاقک فشار و نوار نقاله مارپیچ تزریق می گردد.

¹¹ Foam Injection Ratio



شکل ۲-۱۰: نمایی از عملیات تزریق فوم در نقاط مختلف

فوم در جلوی سینه کار به دلیل بهسازی خاک و اینکه عملیات حفاری راحت تر صورت گیرد تزریق می شود. از آنجا که احتمال گیر کردن ابزار برش به دلیل جمع شدن گل در اطراف آن وجود دارد در این حالت فوم تزریق می شود تا مانع از گیر کردن دیسک ها شود و مصالح به راحتی به داخل اتاقک فشار منتقل شوند.

یکی دیگر از مکان های تزریق فوم، داخل اتاقک فشار می باشد. به مصالح انباشته شده داخل اتاقک فشار فوم تزریق می شود تا مصالح همگن شده و راحت تر به خارج منتقل شوند.

مکان دیگری که فوم تزریق می شود داخل نوار نقاله مارپیچ است در این مکان نیز در راستای همگن شدن مصالح، بسته نشدن مسیر خروجی و همچنین برای جلوگیری از سایش قطعات از تزریق فوم استفاده می شود.

حال با توجه به اینکه فوم یکی از مواد پر مصرف و گران قیمت برای حفاری است تا حد امکان باید کوشید تا مصرف فوم را کاهش داد. که یکی از راه های کاهش مصرف فوم استفاده از حفاری در حالت باز است. به دلیل اینکه دیگر در اتاقک فشار مصالحی جمع نمی شود تا اینکه احتیاج به تزریق فوم برای همگن کردن مصالح باشد و همچنین با توجه به اینکه نوار نقاله ماریچ نیز در این روش حذف خواهد شد در نتیجه تزریق فوم به داخل آن نیز خود به خود حذف شده در نتیجه از این لحاظ استفاده از روش حفاری در حالت باز به اقتصاد پروژه کمک زیادی می کند.

۲-۶ پارامترهای مؤثر برای حفاری و بررسی آن ها در حالت باز

برای حفاری با ضریب اطمینان بیشتر و کنترل بر نشست های احتمالی قبل از شروع حفاری باید عواملی مورد توجه قرار گیرد که در هر حفاری مهم است بخصوص برای حفاری در حالت باز، از آنجا که در حالت حفاری باز هیچ فشار متعادل کننده ای از طرف دستگاه اعمال نمی شود در نتیجه حفاری در این شرایط، عوامل زمین شناسی و ژئوتکنیکی خاص خود را می طلبد. در زیر به شرح بعضی از پارامترهای کلیدی پرداخته می شود:

۲-۶-۱ مقاومت برشی

در حفاری تونل ها، پایداری موقت قبل از نصب سیستم نگهداری از اهمیت ویژه ای برخوردار است یکی از پارامترهای مؤثر برای پایداری، مقاومت برشی است که با افزایش مقاومت برشی بر پایداری سینه کار افزوده می شود. با توجه به اینکه در حفاری باز هیچگونه فشاری به سینه کار اعمال نمی شود احتمال خطر جابجایی در سینه کار بیشتر می شود در نتیجه با افزایش مقاومت برشی احتمال حفاری در حالت باز نیز افزایش خواهد یافت. با توجه به رابطه (۲-۵)، دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از اهمیت ویژه ای در این راستا برخوردارند که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می شود [۱۴].

$$\tau = c + \sigma_n tg\varphi \quad (5-2)$$

τ : مقاومت برشی

c : چسبندگی

σ_n : تنش قائم

φ : زاویه اصطکاک داخلی

۲-۶-۲ چسبندگی

با توجه به رابطه مقاومت برشی و ارتباط مستقیم آن با مقدار چسبندگی می توان گفت هر چه مقدار چسبندگی لایه های خاک بیشتر باشد مقاومت برشی بیشتر بوده و در نتیجه زمین مورد نظر پایدارتر خواهد بود. اما همانطور که از جدول (۲-۳) پیدا است هنگام حفاری در رس با اینکه از چسبندگی بالایی برخوردار است فشارهای محاسبه شده مقادیر بالایی را به خود اختصاص داده اند چرا که در رس به دلیل دانه ریزتر بودن احتمال خطر نشست بیشتر است در نتیجه فشار اعمالی به سینه کار باید جوابگوی نشست های احتمالی باشد. یکی دیگر از مشکلات حفاری در زمین های رسی خطر گل گرفتگی حول ابزار برش است به همین دلیل هنگام حفاری در این نوع زمین ها از تزریق فوم استفاده می شود تا مصالح حالت روان به خود گرفته و به راحتی به محفظه پشت صفحه حفار منتقل شوند. با توجه به اینکه در حفاری باز هیچ فشاری به سینه کار اعمال نمی شود و همچنین تزریق فوم نیز متوقف می شود پس در این شرایط علاوه بر احتمال خطر نشست زمین احتمال خطر گل گرفتگی نیز افزایش خواهد یافت که نتیجه این مخاطرات تحمیل خسارت مالی به پروژه را به همراه دارد.

جدول ۲-۳: مقادیر فشار و چسبندگی در بخش هایی از مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد [۱۲]

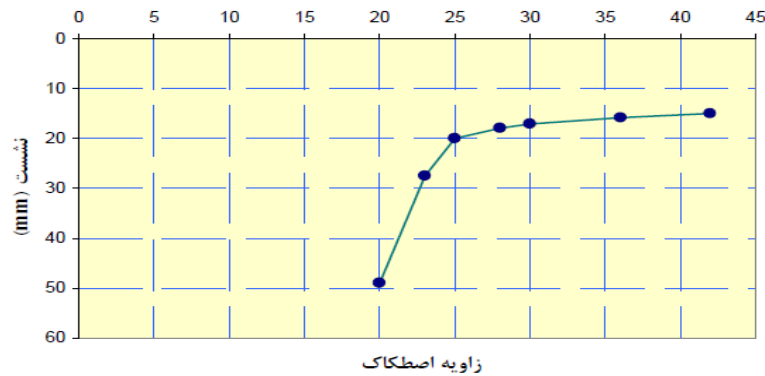
مسیر	جنس خاک	وزن مخصوص (kN/m^3)	چسبندگی (kg/cm^2)	فشار اعمالی (bar)
شمالی	رس	۱۶	۰/۲-۰/۵	۱/۲-۲/۲
جنوبی	گراول	۱۹	۰-۰/۲	۰/۲-۱

۲-۶-۳ زاویه اصطکاک داخلی

همانطور که در رابطه (۲-۵) ملاحظه شد زاویه اصطکاک داخلی با مقاومت برشی رابطه مستقیم داشته و با افزایش آن نیز مانند چسبندگی بر پایداری زمین افزوده می شود. برای حفاری در حالت Open نیز هر چه زاویه اصطکاک داخلی بیشتر باشد پایداری بیشتر و در نتیجه فشار وارده از سمت سینه کار به دستگاه نیز با توجه به جدول (۲-۴) کاهش خواهد یافت. البته لازم به ذکر است که افزایش زاویه اصطکاک داخلی از یک حدی به بالا دیگر تأثیر چندانی روی نشست احتمالی نخواهد داشت در شکل (۲-۱۱) به یک مثال موردی در این زمینه اشاره شده است. در تحلیل نشست یک سازه با ثابت نگه داشتن همه پارامترهای خاک و افزایش زاویه اصطکاک داخلی نمودار زیر بدست آمده، همانطور که در بالا نیز اشاره شد تأثیر افزایش زاویه اصطکاک داخلی را تا یک حد مشخص نشان می دهد.

جدول ۲-۴: مقادیر فشار و زاویه اصطکاک داخلی در بخش هایی از مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد [۱۲]

مسیر	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	فشار اعمالی (bar)
شمالی	۲۰-۲۵	۱/۲-۲/۲
جنوبی	۳۵-۴۰	۰/۲-۱



شکل ۲-۱۱: نمودار تاثیر زاویه اصطکاک داخلی روی نشست [۱۵]

۲-۶-۴ روباره

در حفاری تونل، روباره تونل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است همانطور که در جدول (۲-۵) مشاهده می‌شود با افزایش روباره و ثابت بودن پارامترهای دیگر بر فشار اعمالی افزوده می‌شود. حال از آنجا که در حالت باز فشار اعمالی به سینه کار صفر می‌باشد افزایش روباره از احتمال حفاری در حالت باز می‌کاهد. در نتیجه با افزایش روباره و اعمال نکردن فشار مناسب به سینه کار حفاری، احتمال خطر نشست افزایش خواهد یافت که باعث تحمیل خسارت‌های مالی به پروژه می‌شود.

جدول ۲-۵: مقادیر فشار و روباره با ثابت بودن پارامترهای دیگر [۱۲]

روباره (m)	قطر تونل (m)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	وزن مخصوص (kN/m ³)	فشار اعمالی (bar)
۱۰	۹/۴۳	۳۵	۱۹	۱/۷
۱۵	۹/۴۳	۳۵	۱۹	۲/۶
۲۰	۹/۴۳	۳۵	۱۹	۳/۵
۲۵	۹/۴۳	۳۵	۱۹	۴/۵
۳۰	۹/۴۳	۳۵	۱۹	۵/۵

با توجه به پارامترهای مؤثر برای حفاری و بررسی آن‌ها در حالت باز می‌توان راحت‌تر برای انتخاب مناطق مستعد به منظور حفاری بدون اعمال فشار تصمیم‌گیری کرد.

۷-۲ مونتاژ دستگاه برای حفاری در حالت بدون فشار سینه‌کار

همانطور که قبلاً اشاره شد و در شکل (۷-۲) نیز مشاهده شد در حفاری EPB مصالح حفاری شده در اتاقک فشار جمع شده و از آنجا بوسیله نوار نقاله مارپیچ به بر روی نوار نقاله (۲) منتقل می‌شود. در روش حفاری باز شیوه کار به این صورت نیست در این حالت مصالح حفاری شده مستقیم روی نوار نقاله (۱) منتقل و از آنجا به بیرون هدایت می‌شود. با توجه به تفاوت‌های موجود در دو حالت ذکر شده در بالا برای هر کدام از حالت‌های حفاری باید تغییراتی در چیدمان بخش‌هایی از دستگاه لحاظ شود که در پیوست به شرح مونتاژ دستگاه برای حالت باز پرداخته می‌شود.

۸-۲ جمع بندی

در این فصل پس از معرفی پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد، انتخاب ماشین حفاری برای پروژه مذکور مورد بررسی قرار گرفت و پس از آن حالت‌های حفاری در ماشین انتخاب شده با هم مقایسه شد. با توجه به مطالب گفته شده در این فصل و هدف از تحقیق پیش‌رو برای حفاری در حالت باز و مقایسه صورت گرفته با حفاری در حالت EPB می‌توان نتیجه گرفت که حفاری در حالت اول دارای مزایای اساسی نسبت به حفاری در حالت دوم است که این مزایا عبارت‌اند از:

- کاهش نیروی پیش‌ران اعمالی از جانب جک‌ها
- کاهش صدمات وارده به سگمنت‌های نصب شده از طرف جک‌ها
- حذف نوار نقاله مارپیچ در نتیجه حذف سایش قطعات داخل آن

- حذف ماده گران قیمت فوم

- حذف تمیز کاری داخل اتاقک فشار

با توجه به مزایای ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت تحقیق مورد مطالعه می‌تواند کمک زیادی در راستای اقتصاد پروژه در اختیار پیمانکار مربوطه قرار دهد. همچنین در صورت عملی شدن این روش می‌توان دستگاه مورد نظر را با حداقل استهلاک ممکن در پروژه‌های دیگر بکار برد.

فصل سوم

روش‌های تحلیلی و تجربی محاسبه فشار سینه کار حفاری

۳-۱- مقدمه

یکی از مؤلفه‌های بحرانی در هنگام استفاده از ماشین سپر فشار تعادلی زمین، هم در فاز طراحی و هم در فاز ساخت، تخمین فشار نگهداری جبهه کار تونل می‌باشد. برآورد فشار نگهداری لازم برای پایداری جبهه کار حفاری یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر راندمان حفاری ماشین در نواحی شهری می‌باشد. اگر فشار اعمالی به سینه کار کمتر از حد تعادلی باشد، نشست رخ می‌دهد، و اگر فشار اعمالی به سینه کار بیشتر از حد تعادلی باشد، بالازدگی رخ می‌دهد. روش‌های تحلیلی و تجربی روش مناسبی برای برآورد فشار نگهداری سینه کار تونل می‌باشند. در ادامه به بررسی برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۲ روش‌های محاسبه فشار سینه کار

روش‌های محاسبه فشار سینه کار به دو روش تجربی و تحلیلی تقسیم می‌شوند که در ادامه به بررسی این دو روش پرداخته می‌شود.

۳-۲-۱ روش‌های تجربی محاسبه فشار سینه کار

روش‌های تجربی بر پایه مشاهدات انجام شده هنگام حفاری تونل می‌باشند که بوسیله یک یا چند پارامتر رابطه تجربی برای محاسبه فشار سینه کار بدست می‌آید. در ادامه به بررسی تعدادی از این روش‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۲-۱-۱ روش COB

در این روش از روابط زیر برای محاسبه فشار جبهه کار حفاری استفاده می‌شود که مقدار آن کمی بزرگتر از فشار فعال زمین است [۱۶].

$$\sigma_T = K_a \cdot \sigma'_v + \sigma_w + 20\text{kPa} \quad (1-3)$$

$$K_a = 1 - \sin \varphi / 1 + \sin \varphi \quad (2-3)$$

در این رابطه، σ'_v تنش مؤثر، σ_w فشار آب، σ_T فشار نگهداری و K_a ضریب فشار جانبی خاک است.

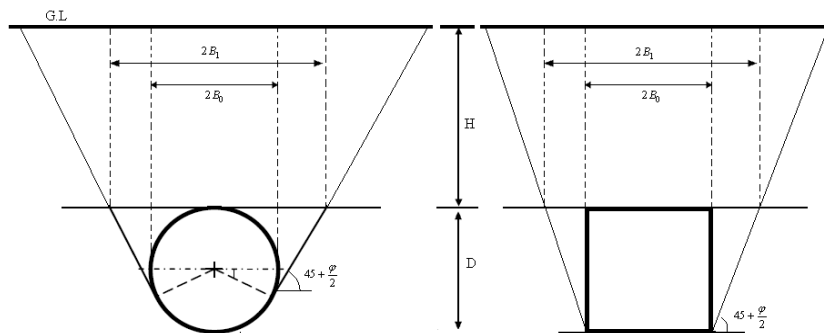
در صورت وجود بار سطحی از رابطه زیر نیز می توان استفاده کرد [۲۰].

$$\sigma_t = k_a \cdot \sigma'_v - 2c \sqrt{k_a} + k_a q + \sigma_w + 20kpa \quad (3-3)$$

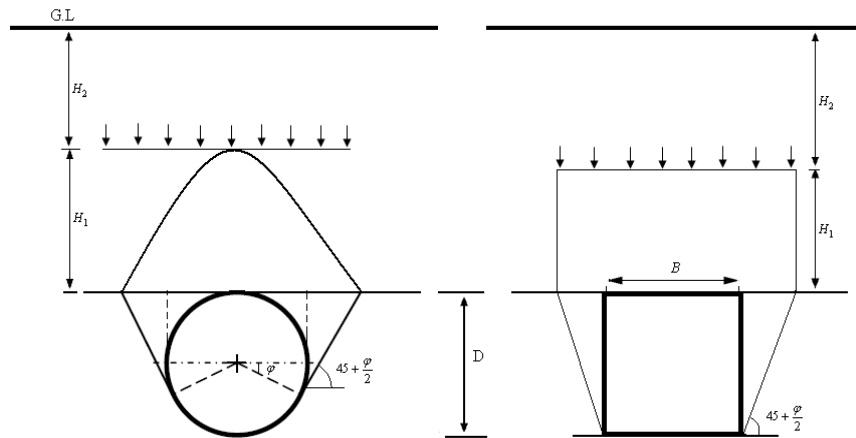
q بار سطحی و c چسبندگی خاک می باشد.

۲-۱-۲-۳ تئوری ترزاقی

تئوری ترزاقی برای محاسبه بار روی تونل در خاک های چسبنده و غیرچسبنده ارائه شده است. اگر قسمتی از توده خاک در بالای فضای تونل در حین حفاری به حد تسلیم برسد، خاک ناحیه بالای تونل دچار ریزش شده و در نتیجه توده های خاک مجاور نیز تحت تأثیر ناحیه سست شدگی از وضعیت ساکن خود خارج می شوند. در نواحی کم عمق مطابق شکل (۱-۳) این سست شدگی به سطح زمین می رسد که اصطلاحاً حالت بدون قوس را تشکیل می دهد. فشار عمودی روی تونل در این حالت از رابطه (۳-۴) بدست می آید. در نواحی عمیق، قوسی مطابق شکل (۲-۳) در بالای تونل تشکیل می شود. در این حالت توده خاک، بالای قسمت قوسی و بار ثابت روی سطح زمین به عنوان یک بار ثابت روی قسمت قوسی اعمال می شود. فشار عمودی روی تونل در حالت با قوس از رابطه (۳-۵) بدست می آید [۲۳].



شکل ۱-۳: ناحیه سست شدگی در تونل های کم عمق [۲۴]



شکل ۳-۲: تشکیل قوس در تونل های عمیق [۲۳]

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H}{B_1}} \right) + q_0 \left(e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H}{B_1}} \right) \quad (۴-۳)$$

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_1}{B_1}} \right) + (\gamma \cdot H_2 + q_0) \left(e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_1}{B_1}} \right) \quad (۵-۳)$$

در این رابطه c چسبندگی خاک، K_0 ضریب فشار جانبی خاک که از رابطه $(K_0 = 1 - \sin \varphi)$ بدست

آمده، H ارتفاع روباره، D ارتفاع تونل، B_0 نصف عرض یا قطر تونل، B_1 نصف عرض سست شدگی H_1

ارتفاع قوسی و H_2 فاصله سطح زمین تا تاج قوسی، q_0 بار سطحی γ وزن مخصوص خاک و φ زاویه

اصطکاک داخلی و σ_v فشار عمودی متوسط روی تاج تونل می باشد [۲۳].

طول سست شدگی در حالتی که ناحیه سست شدگی به سطح زمین رسیده، بی نهایت است. اما در

محاسبات کارگاه می توان آن را با توجه به شرایط منطقه، نصف عرض ستون خاکی روی تونل در نظر

گرفت. برای حالتی که قوسی از خاک روی تونل تشکیل شده طول سست شدگی برای مقاطع مربع یا

مستطیل و دایره به ترتیب از روابط (۶-۳) و (۷-۳) بدست می آید، در رابطه (۷-۳) شعاع تونل است.

$$B_1 = B_0 + D \cdot \tan(45 - \varphi/2) \quad (۶-۳)$$

$$B_1 = R \left[\tan(45 - \varphi/2) + (\cos(45 - \varphi/2))^{-1} \right] \quad (۷-۳)$$

در عمق های خیلی زیاد از ارتفاع روباره صرف نظر شده و فشار عمودی از رابطه (۸-۳) بدست می آید.

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \quad (8-3)$$

در مواردی که تونل در مناطق ماسه ای حفاری می شود، جنبه های ایمنی لحاظ شده و ($c=0$) در

نظر گرفته و فشار عمودی از رابطه (۹-۳) بدست می آید [۲۳].

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma}{K_0 \cdot \tan \varphi} \quad (9-3)$$

تشکیل قوس علاوه بر عمق حفاری تابع عواملی چون نوع خاک، سطح آب زیرزمینی، هندسه تونل،

زمان نصب سیستم نگهداری، سرعت حفاری و تجهیزات حفاری می باشد. یک نکته مهم در روش ترزاقی

ارتفاع سست شدگی است. یکی از پیشنهادات ترزاقی برای ارتفاع سست شدگی مطابق شکل (۳-۳) رابطه

(۱۰-۳) می باشد.

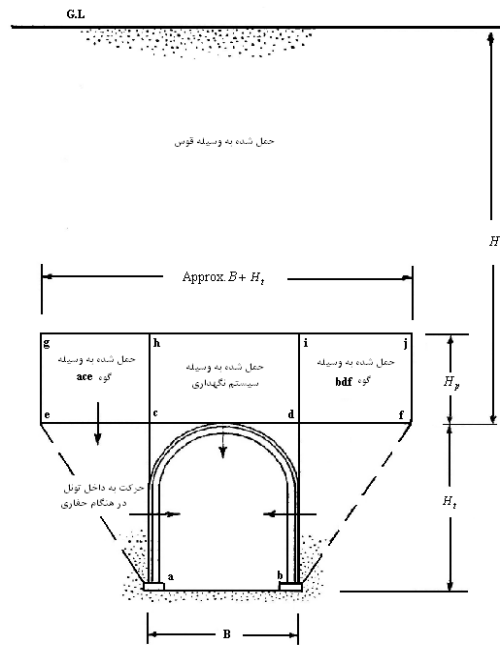
$$H_p = C \cdot (B + H_t) \quad (10-3)$$

مقدار ضریب ثابت (C) در حالتی که تونل بالا یا زیر سطح آب زیرزمینی حفاری شده، در جدول (۱-۳)

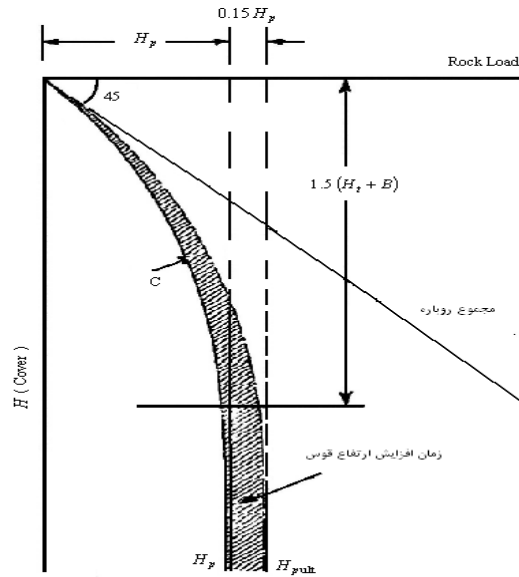
آمده است. طبق پیشنهاد ترزاقی برای جلوگیری از افزایش ارتفاع سست شدگی، سیستم نگهداری بلافاصله

بعد از حفر فضا نصب می شود. همچنین مطابق شکل (۴-۳) بعد از نصب سیستم نگهداری حدوداً ۱۵

درصد به ارتفاع سست شدگی اولیه اضافه می شود [۲۳].



شکل ۳-۳: مدل بار روی تونل [۲۴]



شکل ۳-۴: رابطه بین ارتفاع سست شدگی با ارتفاع روبراه روی یک تونلدر ماسه یا سنگ خرد شده [۲۴]

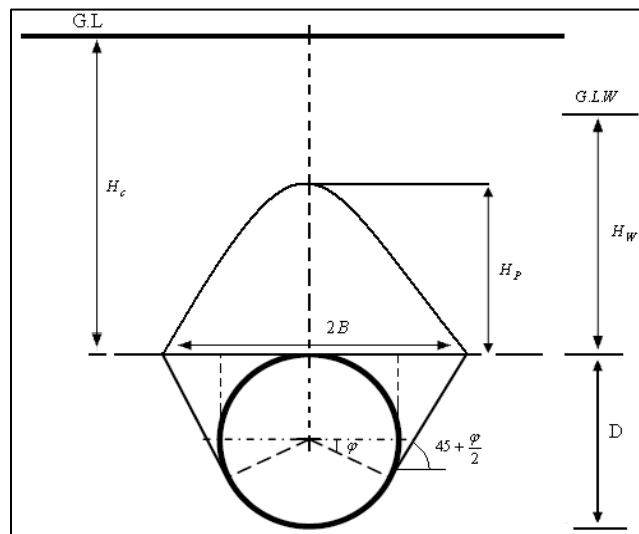
در جدول (۱-۳) مقادیر مختلف ارتفاع سست شدگی با توجه به عرض و ارتفاع تونل در حالتی که

تونل بالا و پایین سطح ایستابی حفاری شود، آورده شده است.

جدول ۱-۳: ارتفاع سست شدگی در روش ترزاقی [۲۴]

نوع خاک	مقدار	تونل بالای سطح آب زیرزمینی		تونل زیر سطح آب زیرزمینی	
		$H_{P \min}$	$H_{P \max}$	$H_{P \min}$	$H_{P \max}$
ماسه	اولیه	$0.27(B + H_t)$	$0.60(B + H_t)$	$0.54(B + H_t)$	$1.02(B + H_t)$
	متراکم	$0.31(B + H_t)$	$0.69(B + H_t)$	$0.62(B + H_t)$	$1.38(B + H_t)$
ماسه سست	اولیه	$0.47(B + H_t)$	$0.60(B + H_t)$	$0.94(B + H_t)$	$1.02(B + H_t)$
	نهایی	$0.54(B + H_t)$	$0.69(B + H_t)$	$1.08(B + H_t)$	$1.38(B + H_t)$

در روش محاسباتی دیگر، ارتفاع سست شدگی از تقسیم تنش قائم روی تونل بر وزن مخصوص خاک بدست می آید که در ادامه روابط با توجه به شکل (۵-۳) آورده شده است.



شکل ۵-۳: خاک قوسی بالای تونل [۲۲]

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_c}{B_1}} \right) + q_0 \left(e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_c}{B_1}} \right) \quad (11-3)$$

$$H_p = \sigma_v / \gamma_d \quad (12-3)$$

فشار جانبی خاک جلوی ماشین حفاری در مرکز تونل در حالتی که تونل بالای سطح آب زیرزمینی حفاری شده از رابطه (۳-۱۳) بدست می آید. در این رابطه K_a ضریب فشار جانبی خاک در حالت فعال است.

$$\sigma_T = K_a * \gamma_d * (H_p + R) \quad (۳-۱۳)$$

$$K_a = (1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi) \quad (۳-۱۴)$$

در حالتی که تونل زیر سطح آب زیرزمینی حفاری شود، ناحیه بالای تونل را به دو بخش تقسیم کرده و فشار ناحیه خشک از رابطه (۳-۴) بدست می آید و به عنوان یک بار ثابت روی قسمت آبدار اعمال می شود. در این حالت از تقسیم فشار قائم بر وزن مخصوص غوطه ور خاک، ارتفاع سست شدگی بدست می آید. از مجموع فشار آب و فشار خاک، فشار کل بدست می آید. در خاک های چسبنده نیز روابط فوق برقرار است. طبق پیشنهاد ترزاقی در محاسبه بار روی تونل اگر عرض سست شدگی از چهار برابر نسبت چسبندگی به وزن مخصوص خاک ($B_1 \leq 4c/\gamma$) کوچکتر باشد، در هر عمقی فشار روی سقف تونل صفر است [۲۴].

۳-۲-۱-۲-۳ روش ابداع شده توسط یامازاکی^۱

در این روش ساده، به فشار هیدرواستاتیکی سطح زمین (h_w)، 30 kpa اضافه می کنند. این روش بیشتر توسط ژاپنی ها استفاده شده و خواص مکانیکی یا فیزیکی زمین و هندسه تونل تأثیری ندارد [۲۱].

$$p = h_w + 30 \text{ kpa} \quad (۳-۱۵)$$

۲-۲-۲-۳ روش های تحلیلی محاسبه فشار جبهه کار

در ادامه به بررسی تعدادی از روش های تحلیلی محاسبه فشار جبهه کار حفاری پرداخته می شود.

^۱ yamazaki

۳-۲-۱ روش میوریمما^۱

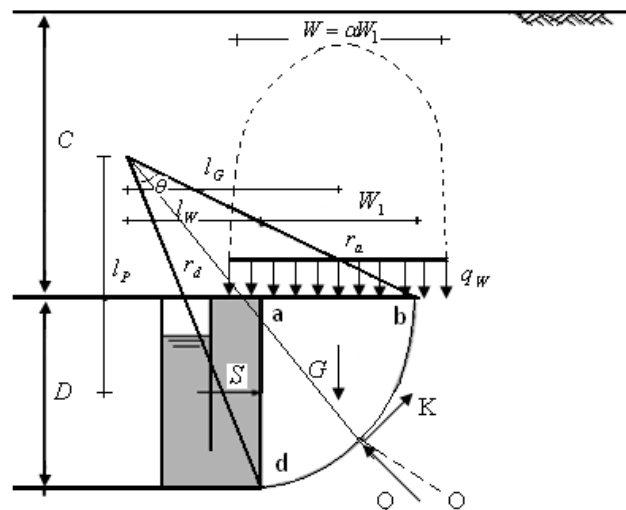
در این مدل سطح گسیختگی به صورت اسپیرال لگاریتمی در نظر گرفته شده و بار ناشی از وزن خاک q_w روی گوه (abd) بر طبق تئوری ترزاقی (۱۹۴۳) محاسبه می شود. برای پایداری سینه کار لازم است، که تعادلی بین ممان حاصل از نیروهای وزن $(q_w + G)$ و نیروهای باقیمانده (نیروی اعمال شده روی سینه کار تونل (S) و مقاومت برشی در طول سطوح گسیختگی به وجود می آید [۱۶].

در این روش شرایط پایداری سینه کار بسیار نامساعد در نظر گرفته می شود، بنابراین ماکزیمم فشار نگهداری از رابطه ای (۳-۱۲) به دست می آید.

$$S = (G.l_G + q_w.W_1(l_w + W_1/2) - c(r_d^2 - r_a^2)/2 \tan \varphi) / 2R.l_p \quad (۳-۱۶)$$

$$P = S * D \quad (۳-۱۷)$$

همانطور که در شکل (۳-۶) مشاهده می شود در این رابطه r_a شعاع شروع r_d شعاع پایان گسیختگی W عرض بارگذاری، G وزن گوه، L_p فاصله عمودی مرکز دایره لغزش از محور تونل، L_G فاصله افقی مرکز دایره لغزش از مرکز جرم گوه و L_w فاصله افقی مرکز دایره لغزش از جبهه کار می باشد.



شکل ۳-۶: مدل پایداری سینه کار [۲۹]

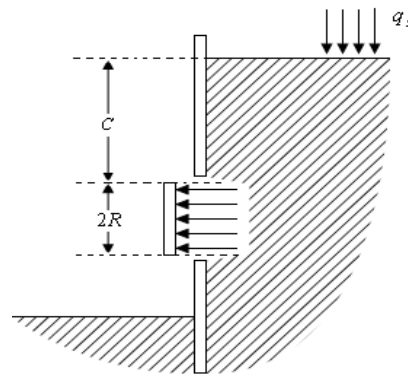
¹ Murayama

۳-۲-۲-۲ روش برامز و بننمارک^۱

این روش برای بررسی آنالیز پایداری فضای نگهداری نشده در یک خاک چسبنده و بدون زهکشی شده بکار می‌رود. رابطه کمترین فشار لازم برای پایداری سینه کار در رابطه (۳-۱۸) آمده است.

$$\sigma_T = \gamma \cdot (C + R) + q_s - N \cdot c_u \quad (۳-۱۸)$$

در این رابطه γ وزن مخصوص خاک، c_u چسبندگی زهکشی نشده، c روباره تونل، R شعاع تونل، q_s بار ترافیکی، N ضریب پایداری و σ_T حداقل فشار پایداری است [۲۵].



شکل ۳-۷: مدل آنالیز پایداری سینه کار تونل [۲۶]

با توجه به رابطه (۳-۱۸) ضریب پایداری از رابطه (۳-۱۹) قابل محاسبه می‌باشد.

$$N = \frac{q_s + \gamma(C + R) - \sigma_T}{c_u} \quad (۳-۱۹)$$

ضریب پایداری (N) نباید از ۶ بیشتر شود و در صورتی که ضریب پایداری زیر ۵ باشد، تونل در حالت پایدار می‌باشد. اگر (N) از ۵ بیشتر شود، فضای خالی اطراف سگمنت به خوبی پر نمی‌شود، اگر (N) بیشتر از ۷ باشد، سپر تمایل به انحراف پیدا کرده و پیشرفت تونل سخت و دشوار می‌شود [۲۵].

¹ Broms & Bennemark

۳-۲-۲-۳ روش اتکینسون و پاتز^۱

این روش برای تعیین حداقل فشار نگهداری سینه کار حفاری در شرایط خاک خشک غیر چسبنده، با دو شرط حدی متفاوت (۱) $\gamma = 0, q_s > 6$ و (۲) $\gamma > 0, q_s = 0$ تعیین می شود. برای مورد دوم دو روش کران پایین در نظر گرفته شده، که مستقل از عمق روباره است. روش کلی نتایج در رابطه (۳-۲۰) آمده است.

$$S_{\min} = [2K_p / (K_p^2 - 1)] \gamma \cdot R \quad (۳-۲۰)$$

$$K_p = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) \quad (۳-۲۱)$$

در این رابطه φ زاویه اصطکاک داخلی، R شعاع تونل، K_p ضریب فشار غیر فعال خاک است.

۳-۲-۲-۴ روش کروس^۲

در این روش کمترین فشار نگهداری برای حالات مختلف شکستگی، مطابق شکل (۳-۸)، در نظر گرفته می شود. شکل (ب) یک مدل با سطح گسیختگی یک ربع دایره را نشان می دهد که متناظر با بیشترین مقدار برای حداقل فشار نگهداری جبهه کار می باشد و در رابطه (۳-۲۲) آورده شده است. البته کروس بیان کرد که این مکانیزم شکست همواره ایده آل و واقع گرایانه نیست. در بسیاری از موارد مدل نیم بیضوی (شکل ج) نتیجه نزدیک تری به واقعیت دارد. در این مورد حداقل فشار سینه کار از رابطه (۳-۲۳) بدست می آید.

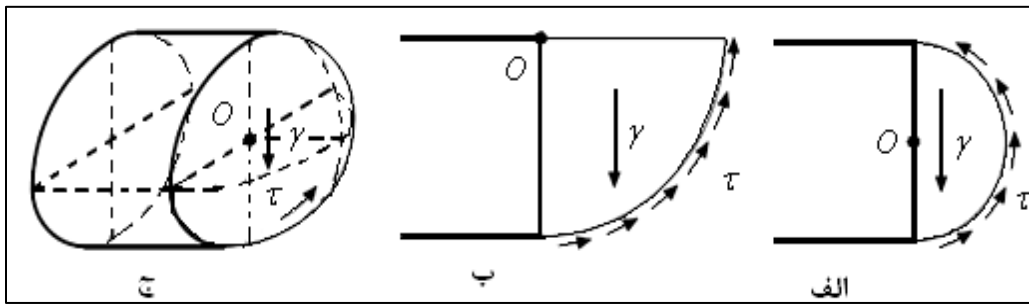
$$S_{\min} = \cot \varphi \cdot (D \cdot \gamma' / 9 - \pi \cdot c / 2) \quad (۳-۲۲)$$

$$S_{\min} = \cot \varphi \cdot (D \cdot \gamma' / 3 - \pi \cdot c / 2) \quad (۳-۲۳)$$

در این روابط c چسبندگی، S_{\min} حداقل فشار نگهداری و D قطر تونل است [۲۹].

¹ Atkinson & Potts

² Krause



شکل ۳-۸: روش های مختلف شکست در جبهه کار تونل به روش کروس [۲۹]

۳-۲-۲-۵ روش محکم و همکاران^۱

این روش به عنوان یک مدل سه بعدی بر مبنای نظریه تعادل حدی، برای تحلیل پایداری تونل قبل از نصب سیستم نگهداری صلب، به کار رفته است. که در آن شکست به دو صورت پیچ لگاریتمی و سیلندری بروز می نماید. بار عمودی به کمک روابط ترزاقی محاسبه می شود [۱۶]. بر طبق توضیحات محکم و لسچینسکی^۲ معادله تعادل بین نیروها و ممان های قائم را به صورت زیر می باشد:

برآیند نیروها:

$$f = \iint_D [\sigma_n + F \cdot \tau_m |n|(t/|t|) - \gamma(R-r) + P|N|] dx dy = 0 \quad (3-24)$$

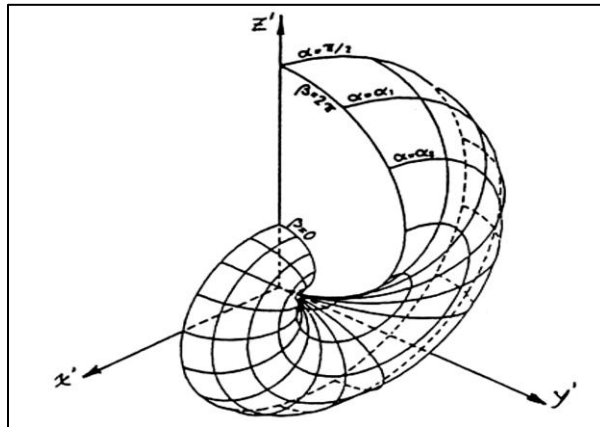
برآیند ممان ها:

$$f = \iint_D \{rx [\sigma_n + F \cdot \tau_m |n|(t/|t|) - \gamma(R-r)] + [R \times p]|N|\} dx dy = 0 \quad (3-25)$$

R و r به ترتیب بردارهای شعاع روی سطح جبهه کار تونل و صفحه لغزش می باشد. N و n به ترتیب نماینده بردارهای نرمال روی سطح جبهه کار و سطح لغزش می باشند. t خط مماس بر سطح لغزش و p نیروی خارجی عمل کننده روی سطح جبهه کار می باشد. τ_m مقاومت برشی و F ضریب ایمنی می باشد. از حل این معادله، سطح لغزش به شکل زیر بدست می آید [۲۱].

¹ Mohkam et al

² Mohkam & Lechinsky



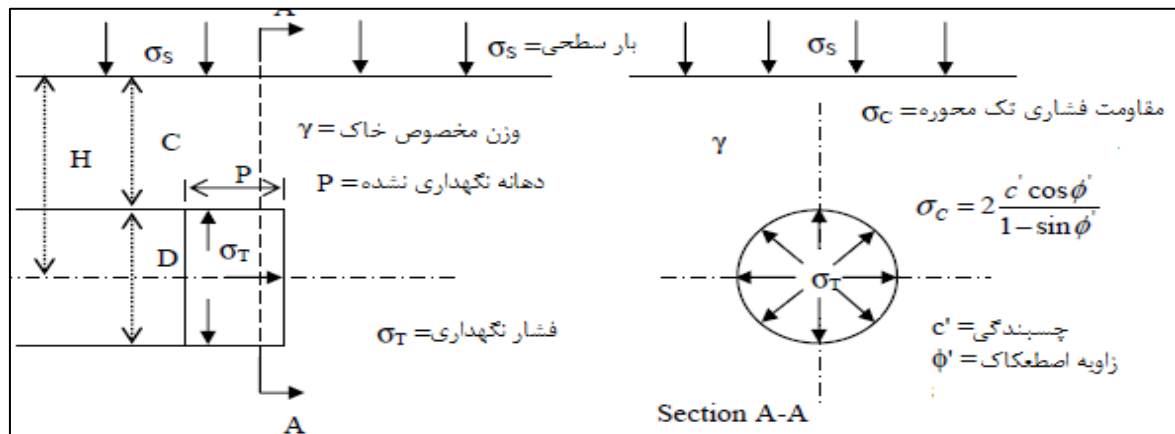
شکل ۳-۹: مکانیزم شکست در روش محکم [۲۱]

۳-۲-۲-۶ روش لکا و دورميو

روش های کران بالا^۱ و کران پایین^۲ لکا و دورميو برای پایداری سینه کار تونل های دایره ای کم عمق در موادی نظیر خاک های ماسه ای ارائه شده است. در روش کران پایین میدان تنش را برای یک جسم تحت اثر تنش، تا حدی در نظر می گیرد که جسم تحت تاثیر این میدان تنش گسیخته نشده و یا در لحظه شروع گسیختگی باشد. در این حالت تنش تعیین شده از بار واقعی گسیختگی کوچک تر است. در مقابل در روش کران بالا میدان تنش را برای یک جسم تحت اثر میدان تنش تا حدی در نظر می گیرد که جسم تحت تاثیر این میدان تنش گسیخته شده و یا قبلاً گسیخته شده باشد. در چنین شرایطی، تنش تعیین شده از بار واقعی گسیختگی بزرگ تر است. موضوع تعیین فشار سیال نگهدارنده جلوی جبهه کار تونل یک مسأله سه بعدی است که با استفاده از روش طراحی حالت حدی مطالعه شده است. چنین فشار نگهدارنده ای به وسیله هوا، دوغاب بنتونیت یا فشار خاک (در سپر فشار تعادلی زمین) تأمین می شود [۱۸].

^۱ Upper Bound

^۲ Lower Bound



شکل ۳-۱۰: مقطع تونل و پارامترهای موثر در روش لکا و دورمیو [۱۸]

ایمینی در مقابل نشست^۱ و بالازدگی^۲ جبهه کار مبتنی بر ساز و کارهای حرکت بلوک های مخروطی در جلوی جبهه کار تونل می باشد. روش کران بالا با فرض اینکه فاصله جبهه کار از دهانه نگهداری نشده صفر می باشد، مطابق شکل (۳-۱۷) شامل سه مکانیزم شکست MI، MII و MIII است. مکانیزم های گسیختگی MI و MII مربوط به نشست تک بلوک مخروطی و دو بلوک مخروطی است و تک بلوک معکوس حالت MIII، معمولاً در مواردی که تونل در مناطق خیلی کم عمق در خاک های ضعیف حفر شده باشد، روی می دهد. در این حالت فشار دوغاب باعث پرتاب حجم زیادی از خاک در جلوی سپر می شود. روش تک بلوک و دو بلوک به وسیله زاویه بین محور مخروط با محور تونل با (α) که در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است توصیف می شوند. در روش MIII نیز شبیه روش MI زاویه بین محور مخروط با محور تونل با (α) تعریف شده، با این تفاوت که مخروط وارونه بوده و سرعت ناپیوستگی در طول سطح شکست به طرف بیرون است. در روش کران بالا زمانی نشست و بالازدگی را می توان کنترل کرد که به ترتیب روابط (۳-۲۶) و (۳-۲۷) برقرار باشد.

^۱Collapse

^۲Blow Out

$$N_s \cdot Q_s + N_\gamma \cdot Q_\gamma \leq Q_T \quad (26-3)$$

$$N_s \cdot Q_s + N_\gamma \cdot Q_\gamma \geq Q_T \quad (27-3)$$

در روابط (26-3) و (27-3) Q_T ، Q_γ و Q_s پارامترهای بارگذاری هستند، که از روابط (28-3)، (29-3) و (30-3) به دست می آید.

$$Q_s = (K_p - 1) \sigma_s / \sigma_c + 1 \quad (28-3)$$

$$Q_T = (K_p - 1) \sigma_T / \sigma_c + 1 \quad (29-3)$$

$$Q_\gamma = (K_p - 1) \gamma \cdot D / \sigma_c \quad (30-3)$$

$$K_A = \frac{1 - \sin \theta'}{1 + \sin \theta'} \quad (31-3)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \theta'}{1 - \sin \theta'} \quad (32-3)$$

ضرایب وزنی N_s و N_γ با توجه به شکل (3-12) تابعی از نسبت C/D و φ' هستند [23]. حالت

ایده‌ال مکانیزم شکست دو بلوک در حالت کران بالا در تونل‌های کم عمق $C/D \leq 0.25$ برای زاویه

اصطکاک داخلی 30 درجه است. نتایج شکست یک بلوک و دو بلوک در حالت $C/D > 1$ مشابه هم است.

N_s^{c+} تقریباً همیشه کوچکتر از N_γ^{c+} و برای $C/D \geq 0.6$ به ازای هر مقدار از φ' صفر می‌باشد. در

بیشتر مواقع امتداد شکست تک بلوک و دو بلوک به سطح زمین نرسیده و می‌توان به مانند یک شکست

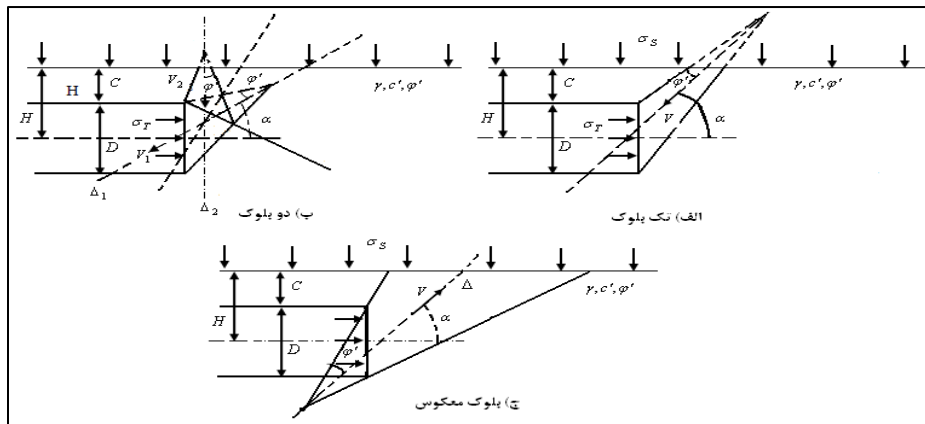
موضعی در نظر گرفت.

$$\sigma_T = \gamma \cdot D \cdot N_\gamma + c \cdot N_c + \sigma_s \cdot N_s \quad (33-3)$$

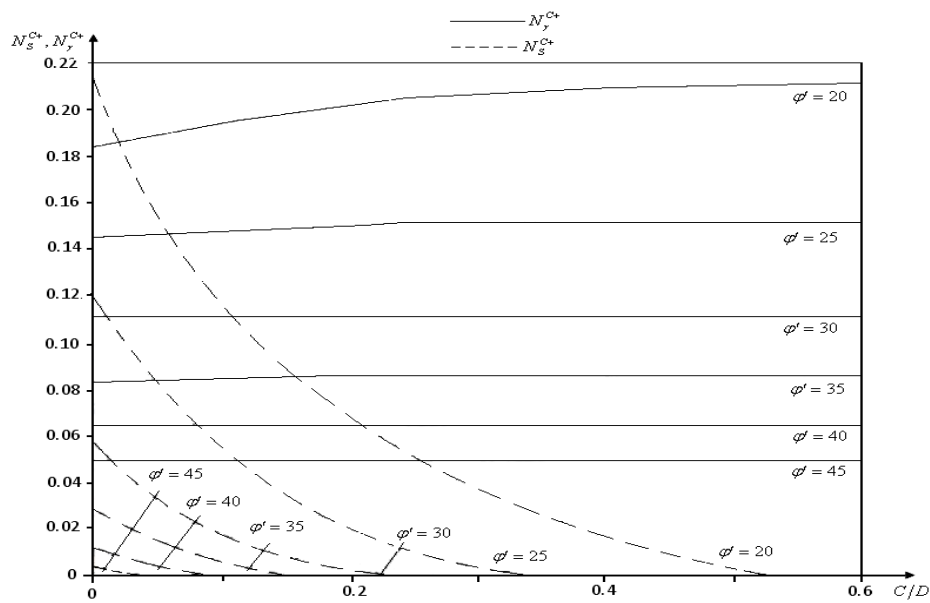
$$N_c = (N_s - 1) / \tan \varphi \quad (34-3)$$

$$\sigma_T = N_s \sigma_s + N_\gamma \gamma D \quad (35-3)$$

از رابطه (۳-۳۳) فشار مؤثر خاک در حالت زهکشی شده برای روش کران بالا به دست می آید که برای محاسبه فشار کل بایستی فشار آب زیرزمینی را در صورت وجود به آن اضافه کرد. از رابطه (۳-۳۵) برای محاسبه فشار خاک در شرایطی که چسبندگی صفر است، استفاده می شود [۱۷].



شکل ۳-۱۱: مکانیزم های شکست مخروطی [۱۸]



شکل ۳-۱۲: مقادیر N_s^{c+} و N_γ^{c+} برای مکانیزم نشست [۱۷]

۷-۲-۲-۳ روش جانسکز و استاینر^۱

این روش بر طبق مدل هورن (۱۹۶۱) به صورت یک شکست سه بعدی که شامل گوه گسیختگی در قسمت پایین و سیلوی خاک در قسمت بالا مطابق شکل (۳-۱۳) است. فشار عمودی وارده از سیلو بر روی گوه بر طبق رابطه ترزاقی در دو حالت بدون آب از رابطه کلی (۳-۳۶) و در حالتی که دارای آب زیرزمینی است، از رابطه کلی (۳-۳۷) بدست می‌آید. در این روابط γ_d وزن مخصوص خشک، γ' وزن مخصوص غوطه ور، K_0 ضریب فشار جانبی خاک که از رابطه جکی ($K_0 = 1 - \sin \phi$) بدست می‌آید، c چسبندگی خاک، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک، h_0 روباره خاک، h_w ارتفاع آب زیرزمینی، a طول سست شدگی، q_0 بار سطحی، σ'_V فشار قائم موثر در قسمت خشک و آبدار وارده بر گوه است [۲۹].

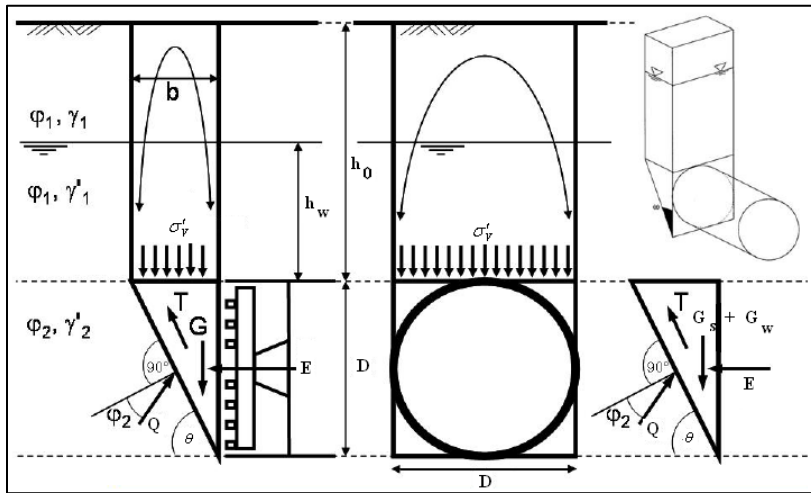
$$\sigma'_V = \frac{a \cdot \gamma_d - c}{K_0 \cdot \tan \phi} \left[1 - e^{-\frac{h_0 \cdot K_0 \cdot \tan \phi}{a}} \right] + q_0 \cdot e^{-\frac{h_0 \cdot K_0 \cdot \tan \phi}{a}} \quad (۳-۳۶)$$

$$\sigma'_V = \frac{a \gamma' - c}{K_0 \cdot \tan \phi} \left[1 - e^{-\frac{h_w}{a} \cdot K_0 \cdot \tan \phi} \right] + \left[\frac{a \gamma_d - c}{K_0 \cdot \tan \phi} \left(1 - e^{-\frac{h_0 - h_w}{a} \cdot K_0 \cdot \tan \phi} \right) + q_0 e^{-\frac{h_0 - h_w}{a} \cdot K_0 \cdot \tan \phi} \right] \cdot e^{-\frac{h_w}{a} \cdot K_0 \cdot \tan \phi} \quad (۳-۳۷)$$

برای محاسبه فشار جانبی موثر خاک لازم است که وزن سیلو، وزن گوه، نیروی چسبندگی و نیروی برشی را از روابط (۳-۳۸) تا (۳-۴۱) بدست آورده، و مقدار حاصله را در رابطه (۳-۴۳) جاگذاری کرده تا نیروی موثر جانبی خاک بدست آید. مقدار فشار موثر جانبی خاک را از نیروی موثر جانبی خاک بدست آورده و با جمع آن با فشار آب، فشار کل وارده بر سینه کار بدست می‌آید. در این روابط، G_S وزن سیلو، B عرض گوه برابر ($B = \pi \cdot D / 4$) که در محاسبات برابر قطر تونل در نظر می‌گیرند، D قطر تونل، θ زاویه شکست، G_W وزن گوه، K نیروی چسبندگی، K_{A3} ضریب فشار جانبی سه بعدی خاک، T نیروی برشی خاک، E نیروی موثر جانبی خاک، W نیروی آب، S نیروی کل وارد روی سینه کار تونل و σ_T تنش کل

¹ Jancsecz & Steiner

است. مقدار ضریب فشار جانبی سه بعدی خاک را می توان از روابط (۳-۴۶) یا شکل (۳-۱۴) و جدول (۳-۳) بدست آورد، همچنین زاویه شکست بایستی به گونه ای تعیین می شود، که فشار خاک ماکزیمم گردد. زاویه شکست را از شکل (۳-۱۵) و جدول (۳-۳) بدست می آید. در جدول (۳-۴) مقادیر دیگری برای ضریب فشار جانبی خاک در سیلو و گوه تعریف شده است. برای $(h_0/D \geq 2)$ اثر روباره روی زاویه شکست کم می شود [۲۷].



شکل ۳-۱۳: روش جانسکز و استاینر [۲۹]

$$G_S = B.D. \cot \theta. \sigma'_v \quad (3-38)$$

$$G_W = \frac{B.D^2. \gamma'. \cot \theta}{2} \quad (3-39)$$

$$K = \frac{B.D.c}{\sin \theta} \quad (3-40)$$

$$T = \frac{D^2. \cot \theta}{2} (c + K_{A3}. \bar{\sigma}'_v. \tan \varphi) \quad (3-41)$$

$$\bar{\sigma}'_v = \sigma'_v + \frac{1}{3} D. \gamma' \quad (3-42)$$

$$E = - \frac{(\cos \theta. \tan \varphi - \sin \theta). \Sigma(G_S + G_W) + \Sigma(2T + K)}{\sin \theta. \tan \varphi + \cos \theta} \quad (3-43)$$

$$S = E + W \quad (3-44)$$

$$\sigma_T = \frac{4.S}{\pi.D^2} \quad (45-3)$$

$$K_{a3} = \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta - \cos^2 \theta \cdot \tan \varphi - \frac{K \cdot \alpha}{1.5} \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi}{\cos \theta \cdot \sin \theta + \tan \varphi \cdot \sin^2 \theta} \quad (46-3)$$

$$K \approx 1 - \sin \varphi + \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (47-3)$$

$$\alpha = (1 + 3C/D) / (1 + 2C/D) \quad (48-3)$$

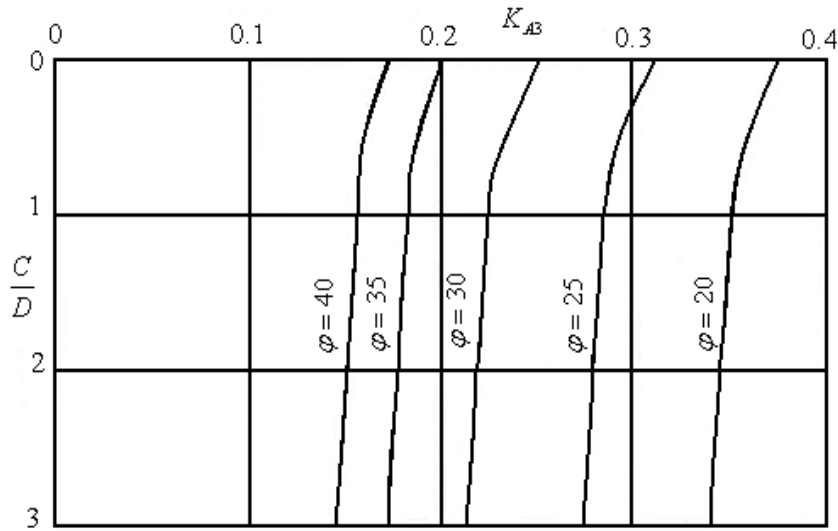
$$a = (B \cdot D \cdot \cot \theta) / 2 (B + D \cdot \cot \theta) \quad (49-3)$$

جدول ۲-۳: مقادیر ضریب فشار جانبی خاک [۲۷]

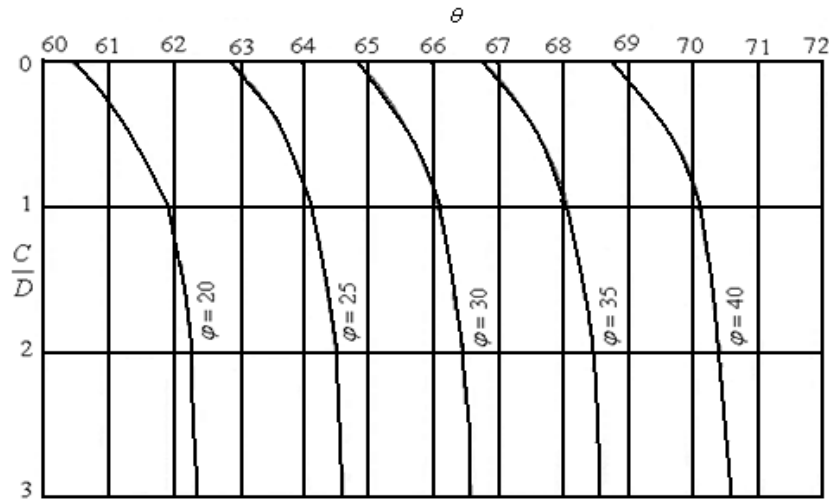
$\frac{C}{D}$	θ				
	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$
۰	۰/۳۴۰	۰/۴۱۱	۰/۴۸۰	۰/۵۵۰	۰/۶۱۸
۱	۰/۳۸۹	۰/۴۶۱	۰/۵۲۸	۰/۶۰۳	۰/۶۷۷
۲	۰/۴۳۷	۰/۵۱۴	۰/۵۸۰	۰/۶۶۶	۰/۷۴۳
۳	۰/۴۸۲	۰/۵۶۲	۰/۶۳۰	۰/۷۱۳	۰/۷۹۷
$45 + \varphi/2$	۵۵/۰	۵۷/۵	۶۰/۰	۶۲/۵	۶۵/۰
$K = (K_0 + K_{A2})/2$	۰/۵۷۴	۰/۴۹۱	۰/۴۱۶	۰/۳۴۹	۰/۲۸۷

جدول ۳-۳: مقادیر زاویه شکست گوه [۲۷]

$\frac{C}{D}$	K_{A3}				
	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$
۰	۰/۳۸۶	۰/۳۱۰	۰/۲۴۸	۰/۱۹۹	۰/۱۵۹
۱	۰/۳۵۴	۰/۲۷۹	۰/۲۲۲	۰/۱۷۷	۰/۱۴۱
۲	۰/۳۲۸	۰/۲۷۳	۰/۲۱۷	۰/۱۷۳	۰/۱۳۸
۳	۰/۳۰۵	۰/۲۷۱	۰/۲۱۴	۰/۱۷۱	۰/۱۳۶
$K_{A2} = \tan^2(45 - \varphi/2)$	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۲۲
$K = (K_0 + K_{A2})/2$	۰/۵۷۴	۰/۴۹۱	۰/۴۱۶	۰/۳۴۹	۰/۲۸۷



شکل ۳-۱۴: شکل ضریب فشار جانبی خاک [۲۷]



شکل ۳-۱۵: نمودار زاویه شکست گوه [۲۷]

جدول ۳-۴: مقادیر مختلف ضرایب فشار جانبی [۱۹]

$K_{\text{sil}}o$	K_{wedge}	ارائه دهنده
۰/۸	۰/۴	آنگونستا و کواری (Anagnostou & Kovari)
۱	۰	میر و همکاران (Mayer et al)
۰/۷-۱/۵	۰/۴-۰/۵	جرمسکید (Girmscheid)
$1 - \sin \varphi$	$1 - \sin \varphi$	کرش و کولمباس (Kirsch & Kolymbas)

- ضریب ایمنی

برای محاسبات فشار کل خاک ضرایب ایمنی مختلفی برای خاک و آب ارائه شده، که در جدول (۵-۳) آمده است.

$$S = \eta_E E + \eta_w \cdot W \quad (۵۰-۳)$$

در این رابطه η_E ضریب ایمنی خاک و η_w ضریب ایمنی آب است [۲۴].

جدول ۵-۳: ضرایب ایمنی پیشنهادی برای فشارهای خاک و آب [۲۹]

η_w	η_E	منابع
۱	۱/۱-۱/۳	بالتس (Balthaus, 1988)
۱/۰۵	$\geq ۱/۵ - ۱/۷۵$	جانسنز (1997)
۱/۰۵	۱/۵	برویر (Broere, 2001)
۱/۰۵	۱/۷	میدل و کورد (Maidle & Cordes, 2003)
۱/۰۵	۱/۵	Heinenord Tunnel Design
۱/۰۵	۱/۷	Botlek tunnel Design

۸-۲-۲-۳ روش کواری و آنگونستا

این روش مبتنی بر نظریه سیلوی جانسن^۱ (۱۸۹۵) و مدل سه بعدی سیلو و گوه هورن (۱۹۶۱) است.

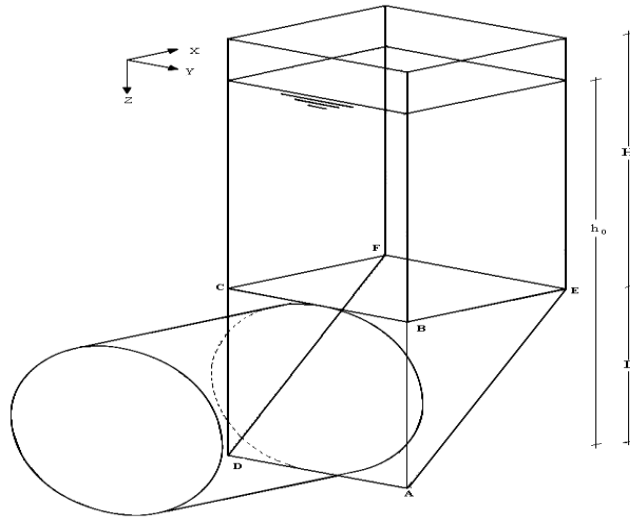
کلیات چگونگی اعمال بار در این روش در شکل (۱۶-۳) نشان داده شده است [۲۸].

$$s' = F_0 \cdot \gamma' \cdot D - F_1 c + F_2 \cdot \gamma' \cdot \Delta h - F_3 c \frac{\Delta h}{D} \quad (۵۱-۳)$$

$$\Delta H = h_0 - h_f \quad (۵۲-۳)$$

¹ Janssen

که در آن، s' فشار نگهداری موثر، D قطر تونل، c چسبندگی خاک، h_0 سطح آب، h_f سطح پیزومتریک آب درون اتاقک حفاری، Δh اختلاف هد آب درون اتاقک حفاری و زمین و F_0, F_1, F_2 و F_3 ضرایب بدون بعدی هستند که خود تابعی از ϕ و H/D هستند [۳۰]. این ضرایب با استفاده از یک سری نمودار بدست می آیند که خود این نمودارها نیز با استفاده از روش های عددی بدست آمده است. در این روش فشار آب به صورت کسری از هد آب در جبهه کار تونل محاسبه می شود، که این امر تابع جریان آب به درون اتاقک حفاری می باشد، به عبارتی در موارد عدم وجود جریان، هد آب به صورت کامل در نظر گرفته می شود، چیزی که توسط دیگر محققین محافظه کارانه فرض شده است [۱۸].

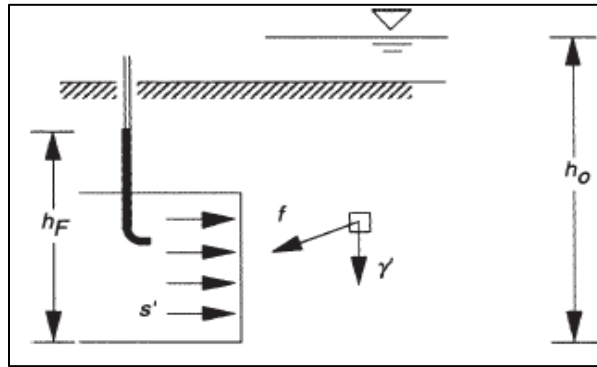


شکل ۳-۱۶: مدل سیلو و گوهی در روش کواری و آنگونستا [۲۴]

در رابطه بالا برای خاک های خشک γ_d (وزن مخصوص خشک) و برای خاک هایی که در زیر سطح

ایستایی قرار گرفته اند از γ' (وزن مخصوص غوطه وری) استفاده می شود. معمولاً نسبت $\frac{\gamma_d}{\gamma'}$ را برابر ۱/۶ در

نظر می گیرند. این رابطه برای ماشین هایی که با مود EPB کار می کنند قابل استفاده است [۳۱].



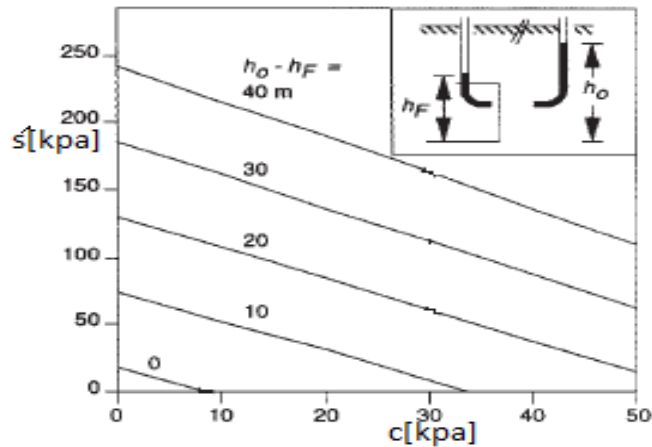
شکل ۳-۱۷: فشار نگهداری موثر [۳۱]

کمترین فشار نگهداری از نظر تئوری در خاک های خشک غیر چسبنده، از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$s = F_0 \cdot \gamma_d \cdot D - F_1 \cdot c \quad (3-53)$$

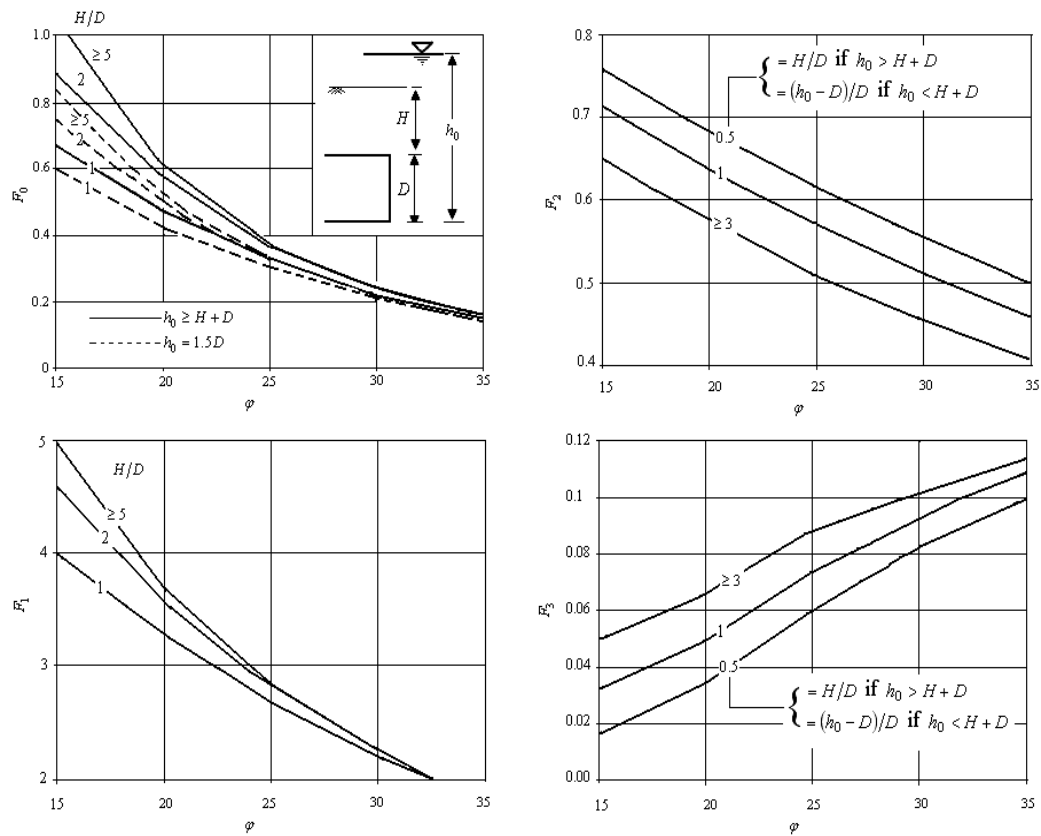
در این رابطه s فشار نگهداری کل و γ_d وزن مخصوص خشک خاک است [۱۸].

فشار نگهداری موثر را از شکل زیر نیز می توان بدست آورد.



شکل ۳-۱۸: فشار نگهداری موثر به عنوان تابعی از چسبندگی و اختلاف هد هیدرواستاتیک [۳۱]

همان طور که از شکل (۳-۱۹) پیدا می باشد، به منظور کاهش فشار نگهداری جبهه کار، باید اختلاف هد فشار آب مینیمم شود. برای این کار می توان با استفاده از زهکشی آب فشار آب را پایین آورد یا اینکه هد فشار داخل اتاقک حفاری را زیاد کنیم [۳۱].



شکل ۳-۱۹: نمودارهای محاسبه برای ضرایب بدون بعد F_0, F_1, F_2 و F_3 [۳۱]

فشار پایداری جبهه کار به هندسه تونل، چگونگی بهسازی خاک و نیروی نگهداری بستگی دارد. گسیختگی خاک و نشست زمین ممکن است، به ساختمان‌ها و دیگر سازه‌های مرتبط آسیب وارد کند. حتی شکست‌های کوچک می‌تواند بر ساختمان‌های اطراف اثر بگذارد، یعنی منجر به افزایش نشست شود اگر چه در بیشتر موارد اثر آن روی سازه قابل تشخیص نیست. کاربرد روش‌های مناسب ضمن کنترل نشست، می‌تواند سهم مهمی در کاهش اثرات آن داشته باشد. این روش‌ها عبارتند از [۱۸]:

- ایجاد فشار تعادلی در سینه کار تونل

- بهسازی خاک شامل تزریق دوغاب، عملیات تزریق و انجماد به منظور افزایش مقاومت و استحکام

خاک و یا کاهش نفوذپذیری خاک

- ساخت ایستگاههای TBM در محل های از پیش تعیین شده برای ماشین های EPB و دوغابی به منظور نگهداری زمین در نواحی شهری پر تراکم و شرایط متغیر زمین
- تزریق برای تثبیت بولدرهای سست شده بین کله حفار و جبهه کار به منظور کاهش آسیب های وارده به ابزارهای برش روی کله حفار
- ساختارهای زیرزمینی واقعی از قبیل لوله گذاری، تزریق با فشار بالا، پایپ جکینگ^۱ یا حتی ساختارهای پیچیده

۳-۲-۲-۹ روش برویر^۲

مدل پایداری گوه یک روش تعادل حدی است، که اساس آن از روش سیلو و گوه گرفته شده است. اولین مسئله در روش های سیلو و گوه این است که خاک در آن همگن فرض می شود، که این مسئله با در نظرگیری لایه های غیرهمگن خاک در روش برویر برطرف شد. دومین مسئله انتقال نیروی نگهداری روی اسکلت خاک است. در مدل جانسکز و کواری تمام نیروی نگهداری روی گوه اثر می کرد، ضمناً سینه کار نشد ناپذیر یا آب بند فرض می شد. اگر از دوغاب بنتونایت برای نگهداری سینه کار استفاده شود، بنتونایت تا یک طول مشخصی قبل از تشکیل کیک فیلتر نفوذ می کند، که این مسئله تنها در زمان توقف اهمیت دارد. سومین مسئله با در نظرگیری اثر قوس خاک برآورد دقیق تری از کمترین فشار نگهداری حاصل می شود. در روش های جانسکز و کواری اثر قوس صرف نظر می شد، در نتیجه مقدار بزرگتری از کمترین فشار نگهداری حاصل می شد. در مدل گوه و سیلوی برویر گوی شکستگی به N تکه کوچکتر به صورت افقی تقسیم شده است شکل (۳-۲۰). این تکه ها هر کدام ممکن است ضخامت متفاوتی داشته باشد. هر کدام از تکه ها همگن هستند و با توجه با این شرایط زاویه گوه θ_i بین تکه i صفحه گسیختگی و صفحه

^۱ jet grouting

^۲Broere

افقی تشکیل می‌دهد. زاویه شکست هر گوه را با توجه به چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک از شکل (۳-۲۱) بدست می‌آید. هر تکه در نتیجه نیروهایی از تکه بالا (i-1) و تکه پایین (i+1) یعنی به ترتیب $Q_a^{(i)}$ و $Q_b^{(i)}$ ، وزن موثر خود گوه $G_w^{(i)}$ و یک نیروی روباره $G_s^{(i)}$ تحت تاثیر قرار دارد. در صفحات شکست مایل، نیروی چسبندگی $K^{(i)}$ موازی با سطح، به همین ترتیب نیروی اصطکاک $R^{(i)}$ که ناشی از نیروی عمودی $N^{(i)}$ بر سطح شکست عمل می‌کنند. بر سطوح جانبی هر گوه فرض می‌شود که نیروی برشی $T^{(i)}$ اعمال می‌شود، که در همان جهت $K^{(i)}$ ، در خلاف جهت تغییر شکل گوه اعمال می‌شود. تعادل نیروی زمانی حاصل می‌شود که نیروی موثر خاک $E^{(i)}$ در سطحی که با نیروی آب $W^{(i)}$ جمع می‌شود، معادل نیروی نگهداری $S^{(i)}$ گردد. نیروی موثر خاک از رابطه (۳-۵۴) بدست می‌آید. از تقسیم نیروی موثر خاک بر مساحت تونل فشار موثر خاک بدست می‌آید [۲۹].

$$E = -\frac{\zeta'_-}{\zeta'_+} \left[G_S + G_W + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\zeta'_-^{(i)}} (2T^{(i)} + K^{(i)}) \right] \quad (۳-۵۴)$$

$$\frac{\zeta'_+}{\zeta'_-} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\zeta'_+^{(i)}}{\zeta'_-^{(i)}} \quad (۳-۵۵)$$

$$\zeta'_-^{(i)} = \cos \theta^{(i)} \tan \varphi^{(i)} - \sin \theta^{(i)} \quad (۳-۵۶)$$

$$\zeta'_+^{(i)} = \sin \theta^{(i)} \tan \varphi^{(i)} + \cos \theta^{(i)} \quad (۳-۵۷)$$

$$S = E + W \quad (۳-۵۸)$$

برای مواردی که خاک همگن است یک گوه کامل در نظر گرفته می‌شود، که نیروی موثر خاک از رابطه (۳-۵۹) می‌آید. که با نتایج بدست آمده بوسیله والز^۱ و جانسکز رابطه دارد. در روابط برویر ضریب فشار جانبی خاک از رابطه جکی بدست می‌آید [۲۹].

$$E = -\frac{(\cos \theta \cdot \tan \varphi - \sin \theta) \cdot \Sigma(G_S + G_W) + \Sigma(2T + K)}{\sin \theta \cdot \tan \varphi + \cos \theta} \quad (۳-۵۹)$$

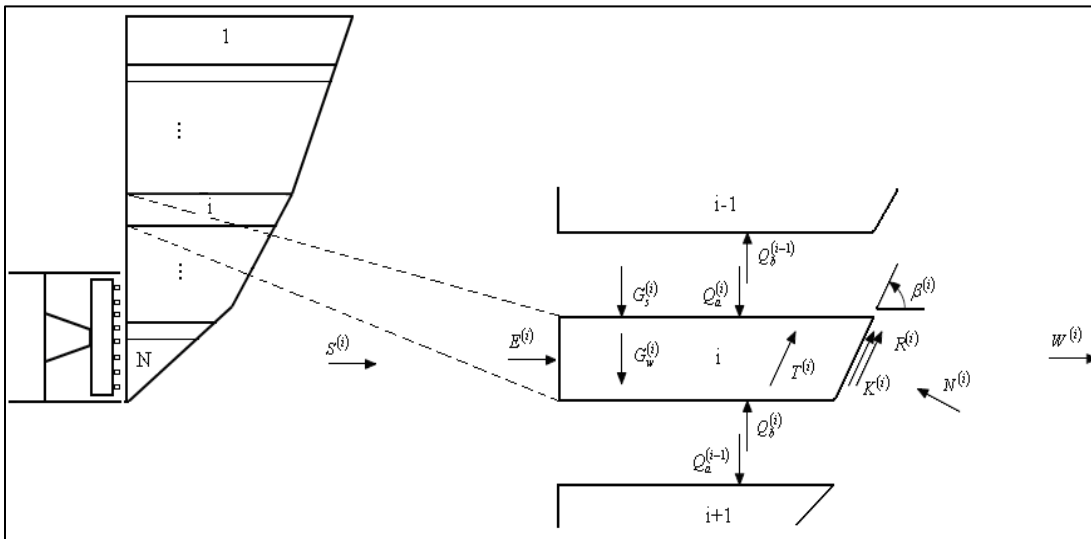
یک نکته مهم در کاربرد روش‌های سه بعدی جانسکز و برور طول سست شدگی است، که از نسبت مساحت سیلو به محیط آن بدست می‌آید. طول سست شدگی مطابق رابطه (۳-۶۰) می‌باشد.

¹ Walz

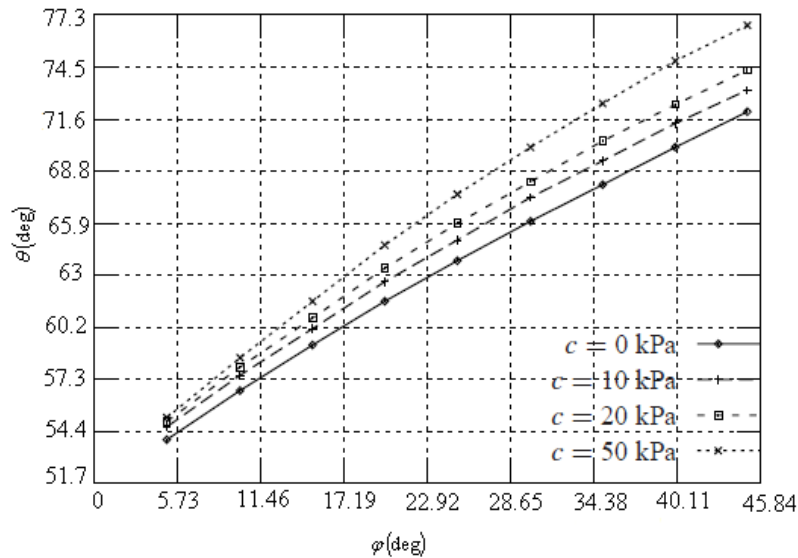
$$a = B * D \cdot \cot \theta / 2(B + D \cdot \cot \theta)$$

(۶۰-۳)

در محاسبات دو بعدی این طول نصف عرض گوه در نظر گرفته می‌شود، که عرض گوه را در محاسبات پایداری سینه کار برابر قطر تونل در نظر می‌گیرند. بنابراین سه فشار مختلف با توجه به طول سست شدگی الف) بدون قوس خاک ($a = \infty$) ب) قوس دو بعدی ($a = R$) پ) قوس سه بعدی ($a = R/1 + \tan \theta$) بدست می‌آید [۲۹].



شکل ۳-۲۰: مدل چند گوه‌ای [۲۹]



شکل ۳-۲۱: نمودار محاسبه زاویه شکست برای خاک‌های غیرهمگن [۲۹]

۳-۲-۱۰ روش کرزنا-تورس^۱

این روش، روش کامل شده کاکو-کرزل^۲ (۱۹۵۶) است، که در شکل (۳-۲۲) نشان داده شده است. مدل کاکو برای حالت خشک و شرایط تعادل را برای شکست مواد در بالا تونل دایره‌ای (استوانه‌ای یا کروی) در عمق‌های کم در نظر گرفته شده است.

$$\frac{p_s}{\gamma \cdot a} = \left[\frac{q_s}{\gamma \cdot a} + \frac{c}{\gamma \cdot a} \cdot \frac{1}{\tan \varphi} \right] \left[\frac{h}{a} \right]^{-K(N_\varphi^{FS}-1)} - \frac{1}{K(N_\varphi^{FS}-1)-1} \left[\left(\frac{h}{a} \right)^{1-K(N_\varphi^{FS}-1)} \right] - \frac{c}{\gamma \cdot a} \frac{1}{\tan \varphi} \quad (۳-۶۱)$$

$$FS = \frac{c}{c^{cr}} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi^{cr}} \quad (۳-۶۲)$$

$$N_\varphi^{FS} = 1 + \sin(\text{Arc tan}(\tan \varphi / FS)) / (1 - \sin(\text{Arc tan}(\tan \varphi / FS))) \quad (۳-۶۳)$$

طبق رابطه (۳-۶۱) γ وزن مخصوص مواد و پارامترهای برشی خاک طبق تعریف موهر - کولمب

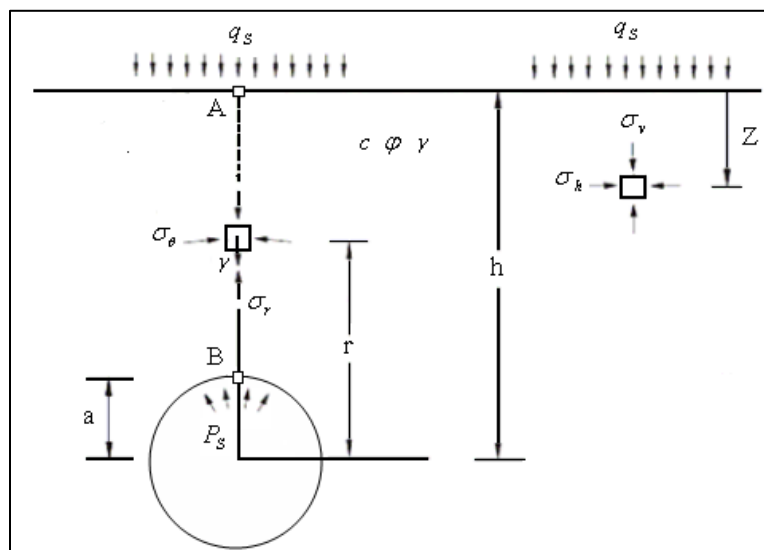
شامل φ زاویه اصطکاک، φ^{cr} زاویه اصطکاک در حالت بحرانی، c چسبندگی، h فاصله از مرکز تونل تا

سطح زمین، K پارمتر وابسته به نوع حفاری تونل سیلندری ($K=1$) حفاری بیضوی ($K=2$)، FS فاکتور

ایمنی، q_s بار روباره، p_s فشار نگهداری است [۱۶].

¹ Carranza, Torres

² Caquot, Kerisel



شکل ۳-۲۲: طرح اصلی کاکو - کرزل برای محاسبه فشار وارد بر تونل [۱۶]

۳-۳ جمع بندی

در این فصل تعدادی از روابط تجربی و تحلیلی محاسبه فشار سینه‌کار مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت که در جدول (۳-۶) به صورت کامل ارائه شده است. به طور کلی از بین روش‌های مختلف برآورد فشار نگهداری جبهه‌کار، روش‌های تحلیلی بیش‌ترین استفاده را در برآورد فشار سینه‌کار دارند. از بین روش‌های تحلیلی، روش‌های جانسکز و استاینر، کواری و آنگونستا و برویر به دلیل در نظر گرفتن مکانیزم شکست سه بعدی و قوس فشار ترزاقی، مقادیر دقیق‌تری از فشار جبهه‌کار ارائه می‌دهند. روش جانسکز به دلیل در نظر گرفتن ضریب ایمنی، برآورد دقیق‌تر و ایمن‌تری از فشار نگهداری جبهه‌کار تونل نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌کند و این روش بیش‌ترین استفاده را در برآورد فشار نگهداری جبهه‌کار دارد.

جدول ۳-۶: فرمول های تحلیلی و تجربی برآورد فشار کل جبهه کار

روش ها	فرمول های فشار نگهداری کل جبهه کار تونل
روش های تجربی	$\sigma_T = K_a \cdot \sigma'_v + \sigma_w + 20kPa$
	$\sigma_T = h_w + 30kpa$
	$\sigma_T = K_a \cdot H_p \cdot \gamma' + \sigma_w$
روش های تحلیلی	میورینا $\sigma_T = \left(\frac{(G \cdot l_G + q_w \cdot W_1 (l_w + W_1/2) - c(r_d^2 - r_a^2)/2 \tan \phi)}{2R \cdot l_p} \right) + \sigma_w$
	برومز و بنمارک $\sigma_T = (\gamma \cdot (C + R) + q_s - N \cdot c_u) + \sigma_w$
	انکینسون و پاتز $\sigma_T = \left(\frac{2K_p}{(K_p^2 - 1)} \right) \gamma \cdot R + \sigma_w$
	کروس $\sigma_T = (\cot \phi \cdot (D \cdot \gamma' / 3 - \pi \cdot c / 2)) + \sigma_w$
	لکا و دورمیوکس $\sigma_T = (\gamma \cdot D \cdot N_\gamma + c \cdot N_c + \sigma_s \cdot N_s) + \sigma_w$
	جانسکز و استاینر $\sigma_T = \left(- \frac{(\cos \beta \cdot \tan \phi - \sin \beta) \cdot \Sigma(G_s + G_w) + \Sigma(2T + K)}{\sin \beta \cdot \tan \phi + \cos \beta} \cdot \frac{4}{\pi D^2} \right) + \sigma_w$
	کواری و آنگونستا $\sigma_T = \left(F_0 \gamma' D - F_1 c + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c \frac{\Delta h}{D} \right) + \sigma_w$
	برویر $\sigma_T = \left(- \frac{\zeta'_+}{\zeta'_+} \left[G_s + G_w + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\zeta'_-^{(i)}} (2T^{(i)} + K^{(i)}) \right] \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right) + \sigma_w$
	کارانزا-تورس $\frac{p_s}{\gamma \cdot a} = \left[\frac{q_s}{\gamma \cdot a} + \frac{c}{\gamma \cdot a \cdot \tan \phi} \right] \left[\frac{h}{a} \right]^{-K(N_\phi^{FS}-1)} - \frac{1}{K(N_\phi^{FS}-1)-1} \left[\left(\frac{h}{a} \right)^{1-K(N_\phi^{FS}-1)} \right] - \frac{c}{\gamma \cdot a \cdot \tan \phi} + \sigma_w$

σ_p تنش مؤثر، σ_w فشار آب، σ_T فشار نگهداری و K_a ضریب فشار جانبی خاک، q بار سطحی، c چسبندگی خاک، h_w فشار هیدرواستاتیکی سطح زمین، H_p ارتفاع سست شدگی، r_a شعاع شروع گسیختگی، r_d شعاع پایان گسیختگی، W عرض بارگذاری، G وزن گوه، L_p فاصله عمودی مرکز دایره لغزش از محور تونل، L_G فاصله افقی مرکز دایره لغزش از مرکز جرم گوه، L_w فاصله افقی مرکز دایره لغزش از جبهه کار، q_s مقاومت برشی غیر زهکشی، N فاکتور بارگذاری، ϕ زاویه اصطکاک داخلی، R شعاع تونل، K_p ضریب فشار غیر فعال خاک، S_{min} حداقل فشار نگهداری، N_s و N_c و N_r ضرایب وزنی، G_s وزن سیلو، B عرض گوه.

به دلیل شباهت بعضی از پارامترها و متفاوت بودن تعریف آن ها، برای اطلاع دقیق تعریف پارامترها به روش مذکور در بخش تعریف هر روش مراجعه کنید.

به دلایلی که در بالا ذکر شد و دقت بالای روش جانسکز نسبت به باقی روش ها کلیه محاسبات فشار اعمالی به سینه کار در تحقیق پیش رو که در فصل بعد ارائه می شود از روابط جانسکز و استاینر محاسبه شده است.

فصل چهارم

انتخاب مناطق مناسب برای حفاری در حالت باز با

توجه به مخاطرات زمین‌شناسی مسیر حفاری

۴-۱ مقدمه

دسترسی به مهمترین پارامترهای توده‌ی خاک در برگیرنده فضاهای زیرزمینی شامل چسبندگی، مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی از طریق برداشت عوارض ساختاری از رخنمون‌های سطحی، مغزه‌های حاصل از حفاری، برداشت‌های حین اجرا و همچنین نتایج حاصل از آزمایشات امکان‌پذیر می‌باشد.

به منظور تعیین تغییرات و میزان جابجایی دیواره‌های سنگی و یا خاکی تونل مورد مطالعه، در حین اجرا و همچنین برای امکان‌سنجی حفاری در حالت باز باید همه جوانب زمین‌شناسی و مخاطرات مسیر حفاری مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا در فصل پیش‌رو ابتدا به بررسی مخاطرات پرداخته شده و در ادامه مسیر حفاری از جنبه شرایط زمین‌شناسی و مخاطرات مسیر مورد بررسی قرار گرفته و در پایان مناطق مناسب برای حفاری در حالت باز مورد انتخاب واقع شده است.

۴-۲ مخاطرات زمین‌شناسی مهندسی در حفاری مکانیزه

بطور کلی مهمترین خطرات بالقوه زمین‌شناسی مهندسی که در رابطه با سازه‌های زیرزمینی در مناطق شهری می‌توان تصور کرد شامل خطر برخورد با قنات‌های فعال و متروک، خطر نشست و روانگرایی خاک، خطر نشست تحکیمی زمین، برخورد به لایه‌های سست و زون‌های خرد شده، هجوم آب زیرزمینی و موضعی، خطر گل‌گرفتگی، وجود بولدرها و برخورد با مسیر روخانه‌های قدیمی مدفون می‌باشند. در ادامه به بررسی هر کدام از خطرات ذکر شده پرداخته می‌شود.

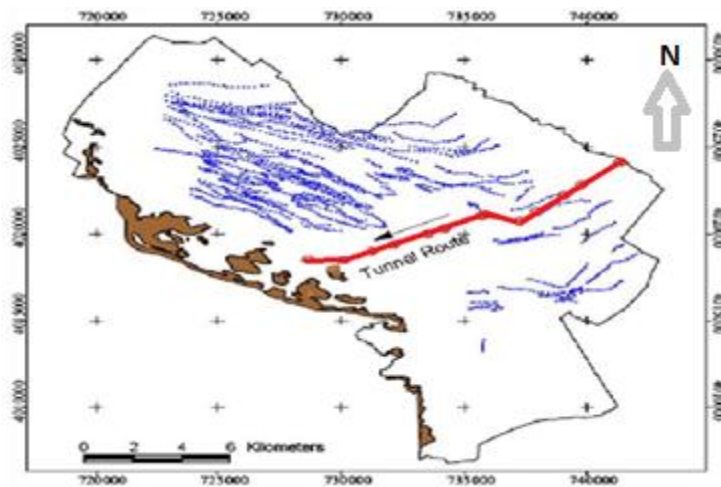
۴-۲-۱ قنات‌ها

مشکلات عمده حضور قنات‌ها در محدوده شهری ریزش قنات و نشست زمین، ورود آب‌های سطحی و پساب شهری است. شهر مشهد در گذشته دارای قنات‌های زیادی بوده، بطوریکه در محدوده‌ای به شعاع ۱۰ کیلومتر از حرم مطهر حدود ۷۸ رشته قنات وجود داشته است. قنات‌های شهر مشهد بیشتر در شمال

غرب و شمال مشهد گسترش داشته و اکثر مادر چاه‌ها در شمال غرب که از رسوبات آبرفتی دانه درشت تشکیل شده وجود دارد. توزیع رشته قنات‌ها در قسمت‌های شمال غرب شهر مشهد بیشتر از نواحی جنوبی می‌باشد. معمولاً مسیر رشته قنات‌ها به موازات آبراهه‌ها می‌باشد و مظهر آنها در محدوده مناطق مرکزی شهر قرار دارد. در این مناطق خاک غالب ریز دانه است. یک سری از رشته قنات‌ها نیز در سمت شرق و شمال شرقی مشهد وجود دارد ولی تعداد و تراکم آنها به اندازه رشته قنات‌های شمال غرب نمی‌باشد [۳۲].

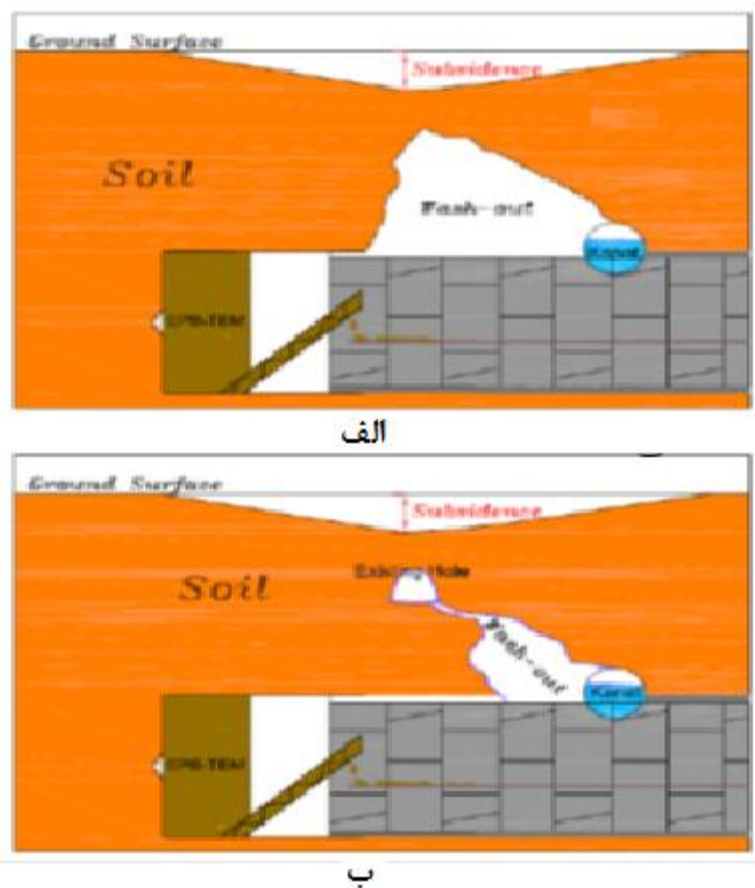
در شکل (۴-۱) ، موقعیت رشته قنات‌های گزارش شده در مشهد با مسیر خط ۲ قطار شهری نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که احتمال برخورد مسیر خط ۲ با رشته قنات‌های گزارش شده در بخش‌های شرقی و شمالی وجود دارد.

با رشد شهر میل قنات‌ها که بعضاً قطر دهانه‌های آنها در سطح زمین به بیش از ۵ متر نیز می‌رسد معمولاً بصورت کنترل نشده با خاک و نخاله پر شده و بر روی آن‌ها ساختمان سازی صورت می‌گیرد. ورود آب‌های سطحی یا پساب شهری همراه با بارگذاری سازه‌ها بمرور زمان سبب نشست سطح زمین در بالای چاه‌ها خواهد شد.



شکل ۴-۱: موقعیت قنات‌های شهر مشهد نسبت به مسیر خط ۲ قطار شهری [۴۷]

با توجه به شکل (۲-۴) اگر مجرای تونل قنات در عمق کمی قرار داشته باشد، ریزش تدریجی سقف قنات منجر به نشست سطح زمین می‌گردد. این مشکل در اعماق نیز در صورت سست بودن زمین می‌تواند اتفاق بیافتد.



شکل ۲-۴: تصویر شماتیکی از بروز آب شستگی (ب)، گسترش حفره قنات (الف) و نشست سطح زمین [۳۳]

نفوذ آب‌های سطحی و فاضلاب شهری به داخل قنات و مرطوب شدن دیواره علاوه بر اینکه به ریزش سقف قنات و رسیدن آن به سطح زمین کمک خواهد کرد. باعث تجمع فاضلاب شهری و آب‌های سطحی و هجوم ناگهانی آب‌ها به داخل تونل یا فضای زیرزمینی ایجاد شده می‌گردد.

۲-۲-۴ برخورد با لایه‌های سست و زون‌های برشی گسل‌ها

منظور از لایه‌های سست لایه‌های با تراکم بسیار کم و خواص مکانیکی پائین است. خاک‌هایی مانند خاک‌های دستی و گودبرداری‌های قدیمی پر شده که کار تراکمی بر روی آنها انجام نگردیده است و همچنین محل‌هایی که در اثر کارهای اجرایی مانند احداث سیستم زهکشی آب و فاضلاب که دارای عمق قابل توجه بوده و در نهایت بخوبی دوباره متراکم نشده‌اند از جمله مواردی است که می‌تواند اجرای فضای زیرزمینی را به طرق مختلف تحت تاثیر قرار دهد.

از موارد دیگری که قابلیت بوجود آوردن مناطق سست شونده را دارند مسیرهای قدیمی رودخانه‌ها و کانال‌های مدفون طبیعی هستند. با توجه به اینکه در این کانال‌ها معمولاً سرعت جریان آب زیاد است، عمدتاً با رسوبات سست و درشت دانه (ریزدانه کم یا بدون ریزدانه) پر شده‌اند. همچنین در این رسوبات می‌توان قطعات بسیار بزرگ نیز مشاهده نمود که اگر در هر قسمت از فضای زیرزمینی (دیواره، سقف، کف و سینه کار در حین اجرا) قرار گیرد می‌تواند مشکلات ویژه‌ای مانند ریزش قطعات در اثر وزن قطعه، لغزش توده‌ای دیواره‌ها، نفوذپذیری بالا و زهکش آب‌های زیرزمینی به فضای حفر شده، آسیب رسانی به تجهیزات حفاری و ایجاد وقفه در عملیات اجرایی در صورت وجود قطعات بسیار بزرگ، را بوجود آورند. همچنین وجود گسل‌های عمده و اصلی در محل فضاها و زیرزمینی نیز مشکلاتی مانند هجوم آب، ایجاد زون‌های سست و ریزشی و خطر گسیختگی در زمان ایجاد لغزش در امتداد گسل مرتبط با زلزله و یا تحریک شدن بوسیله سایر گسل‌های فعال اصلی دیگر را به همراه دارد [۳۴].

۳-۲-۴ خطر نشست تحکیمی زمین

این پدیده در اثر برداشت بی رویه آب زیرزمینی اتفاق می‌افتد. با پایین رفتن تراز آب زیرزمینی و در نتیجه افزایش میزان تنش مؤثر در خاک‌های ریزدانه سیلتی و رسی نشست اتفاق می‌افتد. اگرچه این

پدیده می‌تواند در انواع خاک‌ها اتفاق بیفتد، ولی خاک‌های ریزدانه استعداد بیشتری برای وقوع چنین پدیده‌ای را دارند [۳۵].

۴-۲-۴ وضعیت آب‌های زیرزمینی و برخورد با آب‌های موضعی

با توجه به نقشه‌ها و منحنی‌های هم عمق دشت مشهد (۱۳۷۸) سطح آب زیرزمینی در محدوده شهر مشهد بین اعماق ۳۰ تا ۸۰ متر متغیر بوده به‌طوریکه در نزدیکی طرقله (غرب مشهد) عمق آب ۸۰ متر و در نزدیکی کنویس (شمال شرق مشهد) عمق آب در حدود ۴۰ متر است. جهت جریان آب‌های زیرزمینی عموماً از جهت جریان‌های سطحی، شیب و توپوگرافی تبعیت می‌کند. جهت جریان آب زیرزمینی از غرب به شرق و از جنوب به طرف محدوده میانی دشت در حرکت می‌باشد و معبر خروجی در محدوده شرقی و انتهایی دشت واقع است. در سال‌های جاری با توجه به افت سطح آب‌های زیرزمینی، قطعاً تغییراتی در وضعیت خطوط تراز ایجاد شده است. با توجه به این که سطح آب زیرزمینی در محدوده طرح پایین‌تر از کف تونل می‌باشد، آب‌های زیرزمینی محدوده، مشکل خاصی در عملیات حفاری ایجاد نمی‌کند. اما در نقاطی از مسیر که سطح آب زیرزمینی بالاتر از کف تونل باشد مشکلاتی از قبیل ورود آب به تونل، آبکی شدن مصالح خروجی، احتمال نشست سطحی در اثر خروج آب و کند شدن روند پیشروی را به دنبال دارد که در این مواقع بسته به دبی آب ورودی به تونل تمهیداتی از قبیل پمپاژ آب و پایین بردن سطح آب مسیر پیشرو، بالا بردن مقدار EPB، افزایش هوای فشرده‌ی فوم، استفاده از بنتونیت درون اتاقک فشار و استفاده از فوم و یا پلیمر در دهانه ورودی نوار نقاله ماریپیچ را می‌توان مد نظر قرار داد [۳۶].

لازم به ذکر است هنگام حفاری اکثر گمانه‌ها در عمق بین ۱۰ تا ۲۳ متر به آب برخورد کرده‌اند، لیکن با توجه به توضیحات قبلی، وجود آب در اعماق کمتر از ۳۰ متر در گمانه‌ها می‌تواند مربوط به نشست فاضلاب شهری، نشست لوله آب و یا لنزهای محصور در رس باشد [۳۶].

۴-۲-۵ حفاری در شرایط وجود بولدر سنگی

عبور ماشین حفاری EPB در محیط‌های دارای بولدر و لاشه سنگ یک مسئله مهم و تاثیرگذار در حفاری تونل است. دشوار بودن متعادل‌سازی فشار خاک و احتمال اضافه حفاری، افزایش نیروی پیش برنده دستگاه که منجر به وارد آمدن خسارت بر سگمنت‌های اجرا شده در پشت شیلد می‌شود و افزایش سایش و بریدگی اجزاء ماشین که در نهایت به کاهش نرخ پیشروی می‌انجامد، از مهمترین مشکلات حفاری در زمین‌های دارای بولدر می‌باشد [۳۷].

مشکل وجود بولدر در هنگام حفر تونل با سیستم کنترل فشار سینه کار تشدیدتر می‌شود زیرا در این حالت دسترسی به صفحه حفر دستگاه برای تغییرات و یا تعمیرات احتمالی با محدودیت زیادی همراه است.

یکی دیگر از مشکلات حفاری با این دستگاه در این گونه زمین‌ها امکان گیر کردن قطعات سنگی بزرگ در درون نوار نقاله مارپیچی می‌باشد. برای رفع این مشکل بایستی قطر نوار نقاله مارپیچی برای عبور قطعات سنگی بزرگ، به حداکثر برسد تا کارایی لازم را داشته باشد البته برای اطمینان نیاز است یک تخلیه پشتی بر روی آن تعبیه شود تا در صورت گیر کردن ذرات درشت سنگی از آنجا تخلیه گردد. در حفاری مکانیزه در زمین‌های نرم و خاکی که بولدرهای سنگی نیز وجود دارد از چند نوع ابزار برش بر روی کاترهد دستگاه استفاده می‌شود که عمده ابزار برش در این حالت استفاده از ناخن‌ها و برای جلوگیری از سایش زیاد این ابزار برش در برخورد با بولدرهای سنگی از تعدادی دیسک برش نیز استفاده می‌گردد. با توجه به این موضوع شناسایی نوع کانی‌های تشکیل دهنده سنگ از روی مقاطع میکروسکوپی و در نهایت شناسایی نوع سنگ تشکیل دهنده بولدر بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

فصل چهارم انتخاب مناطق مناسب برای حفاری در حالت باز با توجه به مخاطرات زمین‌شناسی مسیر حفاری

از آنجائی که وجود بولدرهای سنگی با ابعاد بزرگتر از ۳۰ سانتیمتر در حفاری زمین‌های خاکی با دستگاه EPB می‌تواند برای حفاری مشکل ایجاد نماید لذا شناسائی این مصالح حائز اهمیت می‌باشد. نمونه‌هایی از بولدرهای سنگی موجود در چاهک L2TP1 در شکل (۳-۴) ارائه گردیده است.



شکل ۳-۴: نمونه‌ای از بولدرها در حفاری چاهک L2TP1 [۳۸]

۴-۲-۶ رفتار چسبناکی خاک و خطر گل‌گرفتگی

بعضی از خاک‌های چسبنده، مخصوصاً خاک‌هایی که شامل رس‌های با خاصیت پلاستیکی بالا هستند، تمایل به ایجاد خاصیت چسبندگی (چسبیدن ذرات رس به سطوح فلزی و یا به هر سطح دیگر) دارند، که ممکن است سبب گل‌گرفتگی در صفحه حفار، اتاقل فشار، و نوار نقاله مارپیچ و یا به دلیل وجود اصطکاک مانع از پیشروی دستگاه TBM شود. وجود خاک‌های ریز دانه دارای چسبندگی در حین حفاری باعث انسداد و گل‌گرفتگی در کله حفار و مسیر نوار نقاله مارپیچ می‌شود. این امر سبب برهم زدن توازن بین حجم مصالح کنده شده از سینه‌کار و حجم مصالح ورودی به چمبر و در نهایت بالا رفتن نیروی پیشران ماشین می‌گردد. لذا جهت متعادل نمودن شرایط دستگاه، مجبور به توقف ماشین و بالا بردن دور نوار نقاله مارپیچ می‌شویم که این امر موجب کاهش بهره‌دهی ماشین و نرخ پیشروی آن می‌شود [۳۹].

اثرات آسیب‌دیدگی و سایش کله حفار TBM در صدها پروژه تونلی سراسر دنیا مشاهده شده است. برای فهم اثر سایش ابتدا باید با دو اصطلاح سایش اولیه و سایش ثانویه آشنا گردید. سایش اولیه سایشی است که در ابزار حفاری مانند ناخن‌ها، دیسک‌ها، خراشنده‌ها، باکت‌ها و غیره رخ می‌دهد و این سایش از قبل برای این ابزار مورد انتظار بوده و بنابراین ابزار مذکور برای حفاری و تعویض متداول در فواصل زمانی مناسب طراحی گردیده‌اند. از طرف دیگر سایش ثانویه یک سایش غیر برنامه‌ریزی شده است که زمانی رخ می‌دهد که سایش اولیه در ابزار حفاری از حد خود فراتر رفته و سبب سایش بخش‌های نگهدارنده ابزار فوق شود [۴۸].

رس‌های چسبنده می‌توانند مانع چرخش آزاد دیسک‌های حفاری گردند. بنابراین با باقی‌ماندن آن‌ها در یک حالت از یک سمت دچار سایندگی بیشتر خواهند شد. بنابراین وجود مصالح رسی چسبنده در حضور رطوبت مناسب تأثیر مهمی بر عمر دیسک‌های برشی کله حفار دارد.

مهمترین اثرات رفتار چسبناکی این سنگ‌ها بر روی روند حفاری، شامل موارد زیر بوده است:

الف) با توجه به وجود رس قابل توجه در توده سنگ‌های حفاری، باعث تولید گل در مقادیر زیاد گردیده به طوری که با چسبیدن این گل‌ها به سطوح داخلی صفحه حفار و اطراف تیغه‌های برشی پس از مدتی حفاری، قسمت زیادی از فضای صفحه حفار با گل پر می‌گردد و این پدیده در طی حفاری به دفعات سبب افزایش گشتاور ماشین و در نتیجه توقف حفاری شده است. زمانی که عمدتاً جهت تمیزکاری قسمت‌های گل گرفته صفحه حفار و تیغه‌های برشی ماشین حفاری صرف می‌گردد و زمانی که برای کندن و زدودن گل‌های اطراف ابزار برشی و داخل باکت‌ها و سایر مناطق صفحه حفار صرف می‌شود، بعضاً بیشتر از مجموع زمان فعالیت‌های مربوط به حفاری در یک شیفت یا روز کاری بوده است. به منظور ارائه توضیحات بیشتر، در شکل (۴-۴) نمونه‌ای از اجزای صفحه حفار مانند تیغه‌های برشی، در دو وضعیت گل-گرفتگی و بدون گل‌گرفتگی نشان داده شده است. به علت حرارت بالای صفحه حفار، زدودن گل‌های نیم پخته چسبیده به آن بسیار مشکل‌تر از تصور رایج می‌باشد. بر اساس مشاهدات و تجربیات حاصل از مطالعات حین اجرای تونل، میزان گل‌گرفتگی و زمان صرف شده برای تمیز نمودن آن ارتباط مستقیمی با وضعیت آب موجود در زمین دارد به گونه‌ای که در شرایطی که توده سنگ‌های در بر گیرنده تونل کاملاً خشک بوده (به شرط عدم اضافه نمودن آب توسط دستگاه)، این پدیده ناچیز می‌باشد.

ب) در چنین زمین‌هایی، رس‌های چسبنده می‌توانند محل چرخش دیسک را مسدود نمایند و سبب شوند که آن‌ها در یک وضعیت خاص متوقف شده و از چرخش باز داشته شوند. در این شرایط این تیغه‌ها در طرفی که به سمت سینه‌کار می‌باشند به شدت ساییده می‌شوند و به عبارت دیگر آن‌ها دچار سایش نامتقارن می‌گردند. نمونه‌ای از ساینده‌گی نامتقارن در تیغه‌های برشی در شکل (۴-۵) نشان داده شده است. به طور کلی سایش نامتقارن باعث کاهش عمر مفید این ابزار و افت شدید کارایی آن‌ها می‌گردد. کاهش کارایی هر کدام از این ابزار نیز به نوبه‌ی خود، در صورت عدم تعویض به موقع موجب افزایش فشار

به تیغه‌های طرفین و کاهش راندمان حفاری (به علت اختلال در روند تشکیل تراشه و اتصال بهینه ترک‌ها به یکدیگر) می‌گردد. در این میان ساییدگی تیغه‌های محیطی بسیار حساس‌تر می‌باشد زیرا در صورتی که آن‌ها ساییده شوند سبب از بین رفتن و ساییدگی پوشش ضد سایش کاترهد و در نهایت قاب کاترهد خواهد شد که در این صورت به منظور انجام تعمیرات، کلیه عملیات حفاری ممکن است حتی چندین ماه به تأخیر بیافتد. لازم به ذکر است که در شرایط عادی که تیغه‌های برشی متوقف نبوده، در این ابزار به سبب چرخش مداوم حول محور خود، سایش متقارن رخ می‌دهد.



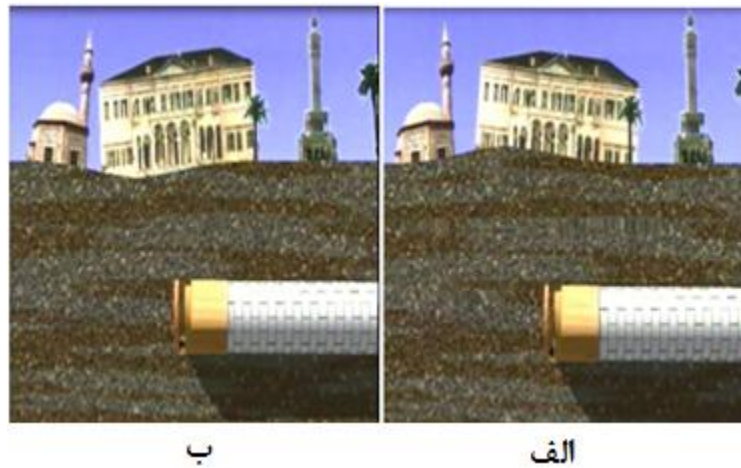
شکل ۴-۴: وضعیت تیغه‌های برشی در حالت گل گرفتگی و بدون گل گرفتگی [۳۹]



شکل ۴-۵: نمونه‌ای از ساییدگی نامتقارن تیغه‌های برشی [۳۹]

۴-۲-۷ نشست

پدیده نشست در انواع خاک‌ها اتفاق می‌افتد ولی خاک‌های ریزدانه (خاک‌های تحکیم نیافته و دارای ظرفیت باربری کم) استعداد بیشتری برای وقوع چنین پدیده‌ای دارند. پایین رفتن آب زیرزمینی، احداث سازه روی سطح، وقوع زمین لرزه و ایجاد فضای زیرزمینی ممکن است باعث ایجاد نشست شود. همانطور که در شکل (۴-۶) مشاهده می‌شود در صورت ایجاد یک فضای زیرزمینی در خاک، میدان تنش به طور موضعی بهم خورده و توزیع جدیدی از تنش‌ها در مصالح در برگیرنده فضای زیرزمینی به وجود می‌آید که تغییر شکل و مکان ذرات خاک را به دنبال دارد که بسته به عمق تاثیر تنش در پی سازه‌های مجاور، فاصله سازه تا فضای ایجاد شده و میزان جابجایی رخ داده در خاک، ممکن است باعث نشست و گسیختگی در سازه‌های اطراف شود [۴۰].



شکل ۴-۶: نمایی کلی از بالازدگی (الف) زمین و نشست (ب) [۴۰]

لازم به ذکر است بیشترین نشست‌ها در تاج تونل و در صورت عدم کنترل دقیق پارامترهای اپراتوری مثل اعمال نشدن مقدار EPB و پر نشدن فضای خالی پشت سگمنت‌ها رخ می‌دهد که با کنترل موارد فوق و بیرون کشیدن متناسب مواد حفاری از تونل با نرخ پیشروی معین و کاهش توقفات احتمالی و پیش‌بینی محل امن توقف ماشین می‌توان از بروز نشست‌های ناخواسته جلوگیری کرد.

زمان تعمیر طولانی دستگاه ناشی از خرابی‌های مهم، دوره‌های تعطیلی یا بازسازی سر حفار و جایگزینی اجزای ماشین گاهی اوقات نیز می‌تواند به نشست ناخواسته سطح منجر شود. این نشست ممکن است فاجعه‌آمیز نباشد اما می‌تواند برای مختل کردن تأسیسات حساس بالای تونل کافی باشد. شناسایی پیشاپیش مناسب‌ترین و پایدارترین مکان‌ها برای توقف دستگاه می‌تواند عموماً خطر وقوع چنین نشست‌هایی را کاهش دهد.

۴-۲-۸ روانگرایی

روانگرایی خاک به هنگام وقوع زمین لرزه یکی دیگر از خطرات زمین‌شناسی مهندسی است. برای وقوع پدیده روانگرایی وجود خاک مستعد (سیلت تا ماسه ریز دانه) و بالا بودن سطح آب زیرزمینی مورد نیاز است. در اثر وقوع زلزله تنش‌های مؤثر بین دانه‌ای تا حد صفر کاهش می‌یابد (تنش کل تقریباً برابر با فشار آب منفردی می‌شود) و به حالت روانگرایی می‌رسد.

بطور کلی اثر زلزله روی سازه‌های زیرزمینی در مقایسه با سازه‌های بنا شده روی سطح زمین به مراتب کمتر است. اما مطالعات انجام شده روی اینگونه سازه‌ها در زلزله‌های اخیر و مشاهده خسارات وارده بر آن‌ها، لزوم کنترل این سازه‌ها را بیش از پیش مشخص می‌سازد. با توجه به مدفون بودن سازه‌های زیرزمینی و احاطه شدن آن‌ها با محیط اطراف، اثرات زلزله بصورت تغییر مکان بر آن‌ها بروز می‌کند. لذا تونل‌ها باید به نحوی طراحی گردند که شکل‌پذیری لازم را در خصوص عبور امواج زلزله از خود به شکل مناسبی داشته باشند. از آنجا که مسیر حفاری بالای سطح آب زیرزمینی می‌باشد که یکی از ملزومات اتفاق افتادن روانگرایی می‌باشد پس می‌توان نتیجه گرفت احتمال خطر روانگرایی در مسیر حفاری کم می‌باشد [۴۱].

با توجه به مخاطرات ذکر شده و همچنین شرایط خاص حفاری در حالت باز که تنها در وضعیت پایدار زمین و در شرایطی که تونل با آب‌های زیرزمینی تداخلی نداشته باشد و یا فشار آب بسیار پایین باشد به

کار گرفته می‌شود در ادامه به بررسی مسیر حفاری براساس این مخاطرات پرداخته می‌شود تا مناطق مناسب برای حفاری در حالت باز مورد انتخاب واقع شود.

۳-۴ بررسی مسیر حفاری تونل برای حفاری در حالت باز

همانطور که در فصل دوم نیز اشاره شد مسیر حفاری از ایستگاه A2 شروع شده و تا ایستگاه M2 ادامه دارد این مسیر به دو بخش زیر تقسیم می‌شود که هر بخش توسط یک دستگاه حفاری تمام مقطع حفر می‌شود در ادامه به بررسی هر دو بخش مذکور از جنبه مخاطرات و زمین‌شناسی پرداخته می‌شود تا مناطق مستعد برای حفاری در حالت باز مورد انتخاب واقع شود.

- مسیر حفاری دستگاه اول از ایستگاه A2 تا F2

- مسیر حفاری دستگاه دوم از ایستگاه M2 تا F2

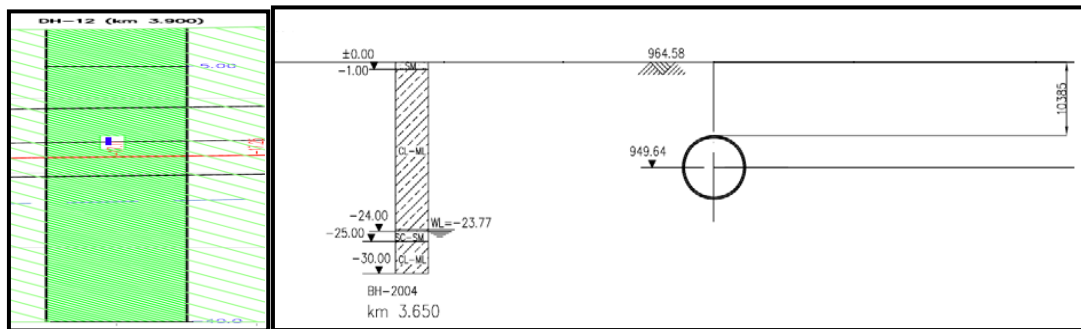
۱-۳-۴ مسیر حفاری دستگاه اول از ایستگاه A2 تا F2

مطابق شکل (۴-۷) مسیر حفاری دستگاه اول از ایستگاه A2 واقع در انتهای بلوار طبرسی شمالی آغاز شده و پس از طی مسیری به مسافت ۷ کیلومتر در ایستگاه F2 (راه آهن) کار خود را به پایان می‌رساند. مسیر مذکور دارای ۶ ایستگاه می‌باشد که در ادامه به بررسی شرایط ژئوتکنیکی مسیر حفاری دستگاه اول پرداخته می‌شود.



شکل ۴-۷: مسیر حفاری دستگاه اول [۴۲]

پروفیل زمین‌شناسی و پارامترهای مهندسی لایه‌های خاک در مسیر حفاری دستگاه اول مطابق شکل (۸-۴) و جدول (۴-۱) است، اما از آنجا که از ابتدا تا انتهای مسیر مذکور لایه‌های خاک و پارامترهای مهندسی یکسان بوده و روبراه تقریباً ثابت می‌باشد، تنها به ارائه یک مقطع برای مسیر حفاری اول بسنده کرده و در ادامه آن به بررسی پارامترها در راستای امکان‌سنجی حفاری باز در این مسیر پرداخته می‌شود.



شکل ۸-۴: مقطعی از مسیر حفاری دستگاه اول [۴۳]

جدول ۴-۱: پارامترهای مهندسی در مسیر حفاری دستگاه اول [۴۳]

شماره لایه	نوع خاک	وزن مخصوص	درصد رطوبت	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	مدول الاستیسیته
		KN/m ³	(%)	Kg/cm ²	(deg)	Kg/cm ²
	رس سیلتی	۱۶	۲۲	۰/۲۵	۲۵	۲۰۰

با توجه به پارامترهای مؤثر برای حفاری در حالت باز و مخاطرات مسیر حفاری که قبلاً در مورد آن-ها صحبت شده حال به بررسی این پارامترها در مقطع مورد نظر پرداخته می‌شود. با توجه به جنس خاک مسیر حفاری دستگاه اول که از نوع رس چسبنده می‌باشد و همانطور که قبلاً اشاره شد که در این نوع زمین باید فشار بیشتری از طرف دستگاه اعمال شود تا مانع از نشست سطح زمین شود و از طرفی در رس به دلیل چسبندگی بالا احتمال خطر گل‌گرفتگی بدون تزریق فوم و مواد بهسازی سینه‌کار بسیار بالا می‌باشد در نتیجه احتمال حفاری در حالت بدون فشار به سینه‌کار در مسیر حفاری دستگاه اول ممکن

نیست. لازم به ذکر است در مسیر مذکور طبق برداشت گمانه‌های اکتشافی، چند قنات قدیمی هم وجود داشته که این مورد نیز بر ریسک حفاری در حالت بدون فشار می‌افزاید. می‌توان نتیجه گرفت بهترین شرایط حفاری برای دستگاه اول حفاری در حالت EPB می‌باشد برای درک بیشتر در جدول (۲-۴) فشارهای اعمالی در ۳۰ سیکل حفاری مسیر آورده شده است.

جدول ۲-۴: فشارهای اعمالی ۳۰ رینگ حفاری [۱۲]

سیکل حفاری (رینگ)	فشار اعمالی (bar)	سیکل حفاری (رینگ)	فشار اعمالی (bar)
۳۱	۱/۷	۴۶	۱/۶
۳۲	۱/۹	۴۷	۱/۷
۳۳	۱/۵	۴۸	۱/۳
۳۴	۱/۷	۴۹	۱/۴
۳۵	۱/۶	۵۰	۱/۶
۳۶	۱/۵	۵۱	۱/۵
۳۷	۱/۴	۵۲	۱/۸
۳۸	۱/۸	۵۳	۱/۲
۳۹	۱/۳	۵۴	۱/۹
۴۰	۱/۷	۵۵	۱/۴
۴۱	۱/۶	۵۶	۲/۰
۴۲	۱/۴	۵۷	۱/۹
۴۳	۱/۹	۵۸	۱/۴
۴۴	۲/۰	۵۹	۱/۳
۴۵	۱/۹	۶۰	۱/۶

۲-۳-۴ مسیر حفاری دستگاه دوم از ایستگاه M2 تا F2

مسیر حفاری دستگاه دوم از ایستگاه M2 واقع در بلوار فضل بن شاذان آغاز شده و پس از طی مسیری به مسافت ۷ کیلومتر در ایستگاه F2 (راه آهن) کار خود را به پایان می‌رساند. همانطور که در شکل (۴-۹) ملاحظه می‌شود مسیر مذکور با در نظر گرفتن ایستگاه F2 دارای ۸ ایستگاه می‌باشد. در ادامه به شرح مطالعات ژئوتکنیکی در حدفاصل ایستگاه‌های مسیر حفاری دوم پرداخته می‌شود.



شکل ۴-۹: مسیر حفاری دستگاه دوم [۴۲]

با توجه به اطلاعات خروجی از گمانه‌های برداشت شده و توپوگرافی مسیر می‌توان مسیر حفاری دستگاه دوم را برای بررسی پارامترهای مهندسی و ارتقاء هر چه بیشتر کیفیت خروجی مورد نظر به سه بخش زیر تقسیم کرد:

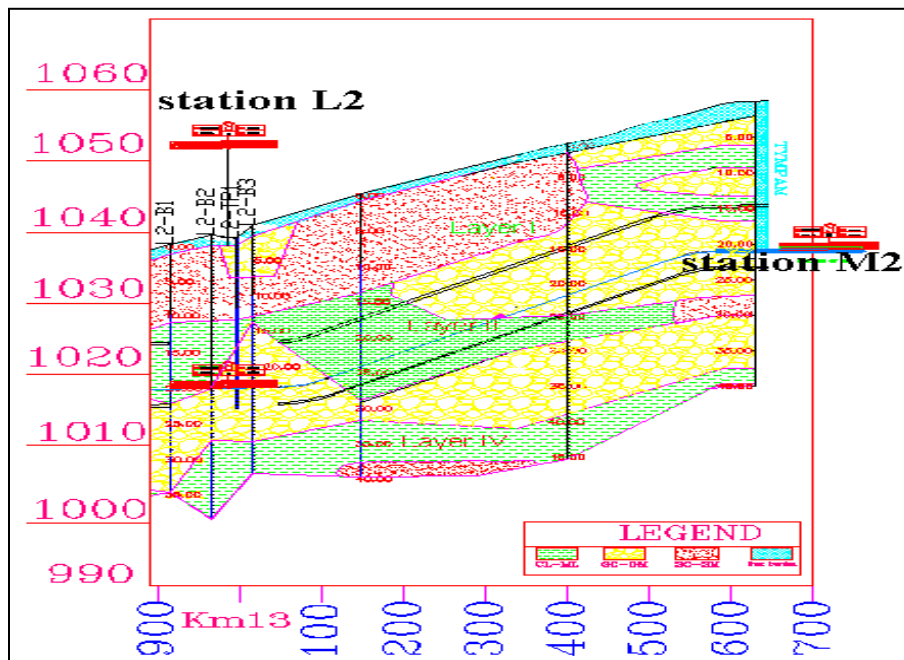
- حدفاصل ایستگاه M2 تا L2
- حدفاصل ایستگاه L2 تا K2
- حدفاصل ایستگاه K2 تا F2

۴-۳-۱-۲-۳-۱ حدفاصل ایستگاه M2 تا L2

در فاصله بین ایستگاه M2 تا L2 تعداد ۷ گمانه وجود دارد که از این تعداد حدود ۴ گمانه در ایستگاه L2 و تعداد ۲ گمانه در فاصله بین دو ایستگاه و آخرین گمانه در ایستگاه M2 قرار دارد. جدول (۴-۳) مشخصات گمانه‌ها و چاهک‌های حفر شده در بین ۲ ایستگاه و شکل (۴-۱۰) پروفیل زمین‌شناسی مسیر مورد نظر را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳: مشخصات گمانه‌ها و چاهک‌های حفر شده در محدوده مورد مطالعه [۴۳]

شماره	عمق (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
L2B1	۳۵	۷۲۹۰۶۰/۴	۴۰۱۸۵۵۴	۱۰۳۹/۲۳
L2B2	۳۵	۷۲۹۰۴۱/۲	۴۰۱۸۵۱۹	۱۰۴۰/۴۹
L2B3	۳۵	۷۲۸۹۹۷/۶	۴۰۱۸۵۰۷	۱۰۴۱/۸۷
L2TP-1	۲۴	۷۲۹۰۳۱/۷	۴۰۱۸۵۴۶	۱۰۴۰/۰۵
DH-40	۲۴	۷۲۸۸۶۷	۴۰۱۸۴۶۳	۱۰۴۶/۴۱
DH-41	۴۵	۷۲۸۶۸۴/۵	۴۰۱۸۴۰۵	۱۰۵۱/۸۱
M2TP-1	۴۰	-	-	-



شکل ۴-۱۰: پروفیل زمین‌شناسی بین ایستگاه‌های M2 تا L2 [۴۳]

- پارامترهای مهندسی لایه‌های خاک مسیر ایستگاه M2 تا L2
با توجه به پروفیل زمین‌شناسی حدفاصل دو ایستگاه در شکل (۴-۱۰) و قضاوت مهندسی روی آن، پارامترهای مهندسی لایه‌های خاک در این محدوده در جدول (۴-۴) و (۴-۵) آمده است.

جدول ۴-۴: پارامترهای مهندسی لایه‌های خاک در حدفاصل دو ایستگاه [۴۳]

شماره لایه	نوع خاک	وزن مخصوص KN/m ³	درصد رطوبت (%)	چسبندگی Kg/cm ²	زاویه اصطکاک داخلی (deg)	مدول الاستیسیته Kg/cm ²
۰	روباره	-	-	-	-	-
۱	ماسه سیلتی	۱۹	۳	۰	۳۵	۸۰۰
۲	رس سیلتی	۱۷	۳	۰/۲	۲۴	۳۰۰
۳	شن رسی	۱۹	۴	۰/۰۷	۴۰	۱۰۰۰
۴	سیلت رسی	۱۷/۵	۴	۰/۲۵	۲۰	۳۰۰

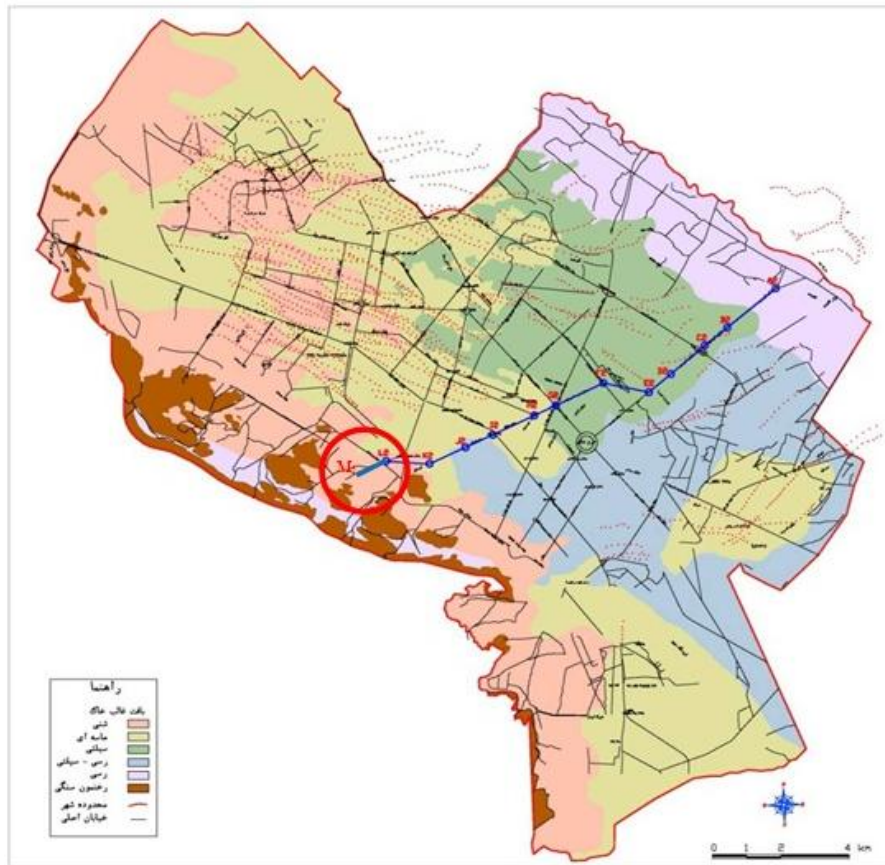
جدول ۴-۵: پارامترهای مهندسی لایه‌های خاک در محدوده گمانه‌های DH-40 تا DH-41 [۴۴]

شماره لایه	نوع خاک	وزن مخصوص	درصد رطوبت	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	مدول الاستیسیته
		KN/m ³	(%)	Kg/cm ²	(deg)	Kg/cm ²
۰	روباره	-	-	-	-	-
۱	ماسه سیلتی	۱۹	۳	۰	۳۵	۸۰۰
۲	رس سیلتی	۱۷	۳	۰/۲	۲۴	۳۰۰
۳	شن رسی	۱۹	۴	۰/۰۸	۴۰	۱۰۰۰
۴	سیلت رسی	۱۷/۵	۴	۰/۲۵	۲۰	۳۰۰

حال با توجه به مطالب فوق و پارامترهای ژئوتکنیکی محدوده مورد نظر به بررسی مخاطرات در این محدوده پرداخته می‌شود.

- قنات

در شکل (۴-۱۱)، موقعیت رشته قنات‌های گزارش شده در مشهد با مسیر خط ۲ قطار شهری نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که احتمال برخورد مسیر خط ۲ با رشته قنات‌های گزارش شده در بخش‌های شرقی و شمالی وجود دارد اما در گمانه‌ها و چاهک‌های حفاری شده در حدفاصل ایستگاه‌های M2 و L2 شواهدی از وجود قنات مشاهده نگردید، لیکن از این لحاظ مسیر مذکور دارای شرایط مساعد برای حفاری در حالت باز می‌باشد.



شکل ۴-۱۱: نقشه زمین‌شناسی شهر مشهد و قنات‌های موجود در آن [۴۷]

– برخورد به زون‌های برشی و لایه‌های سست ریزشی

وجود گسل‌های عمده و اصلی در محل فضاهای زیرزمینی نیز مشکلاتی مانند هجوم آب، ایجاد زون‌های سست و ریزشی و خطر گسیختگی در زمان ایجاد لغزش در امتداد گسل مرتبط با زلزله و یا تحریک شدن بوسیله سایر گسل‌های فعال اصلی دیگر را به همراه دارد. با توجه به نقشه زمین‌شناسی و گمانه‌ها و چاهک‌های حفر شده در حدفاصل ایستگاه‌های M2 و L2 اثری از وجود لایه‌های سست و احیاناً زون‌های برشی مشاهده نشده است. در نتیجه از این لحاظ نیز منطقه مورد نظر شرایط مساعد برای حفاری در حالت باز را دارد.

- خطر نشست تحکیمی زمین

همانطور که قبلاً ذکر شد این پدیده در اثر برداشت بی رویه آب زیرزمینی اتفاق می‌افتد. با پایین رفتن تراز آب زیرزمینی و در نتیجه افزایش میزان تنش مؤثر در خاک‌های ریزدانه سیلتی و رسی نشست اتفاق می‌افتد. اگرچه این پدیده می‌تواند در انواع خاک‌ها اتفاق بیفتد، اما خاک‌های ریزدانه استعداد بیشتری برای وقوع چنین پدیده‌ای دارند. لازم به ذکر است هیچگونه شواهدی از وجود آب زیرزمینی و یا برداشت آب در سفره‌های زیرین در محدوده مورد مطالعه مشاهده نگردیده است.

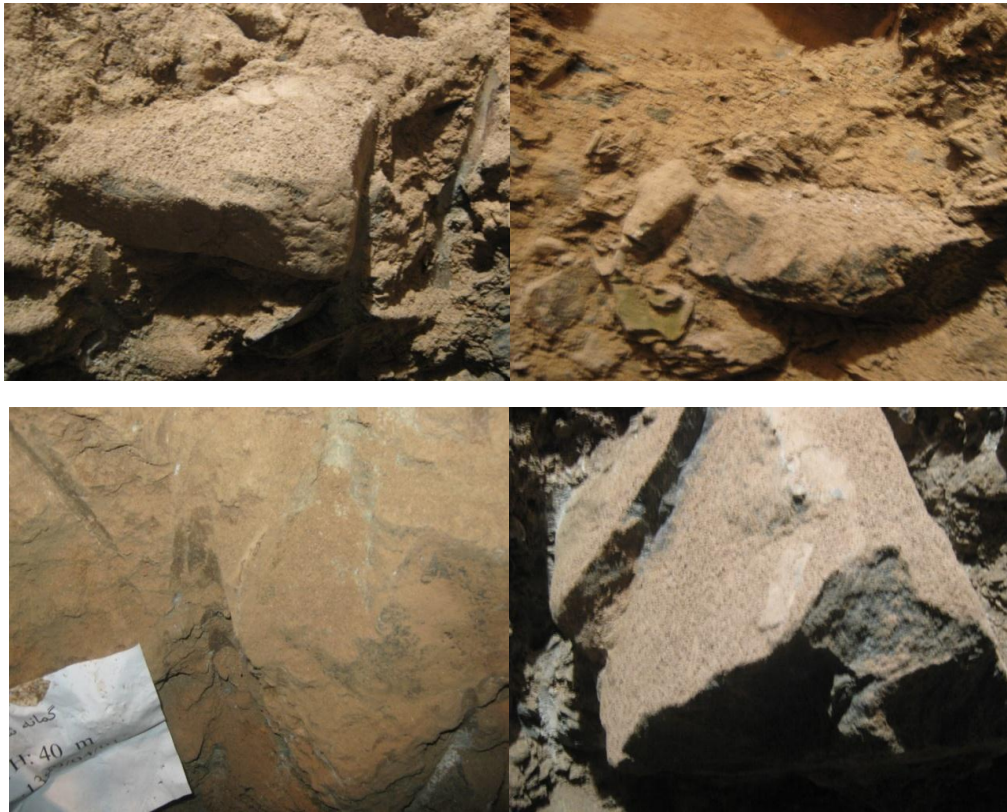
- وضعیت آب‌های زیرزمینی و برخورد با آب‌های موضعی

بر اساس مشاهدات صحرایی و گمانه‌های حفر شده، در حدفاصل ایستگاه‌های M2 و L2 سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز قرارگیری تونل می‌باشد. و هیچگونه تداخلی با مسیر حفاری ندارد.

- وجود بولدر سنگی

همانطور که در شکل (۴-۱۲) مشاهده می‌شود محدوده مورد مطالعه دارای سنگ‌هایی با ابعاد بزرگ می‌باشد و با توجه به اینکه حفاری با ماشین EPB در شرایط وجود بولدر سنگی با مشکلات زیادی روبروست برای رفع این مشکلات باید روش حفاری را تغییر داد. بهمین دلیل منطقه مورد نظر از این لحاظ برای حفاری در حالت باز مناسب می‌باشد.





شکل ۴-۱۲: نمونه‌ای از بولدرهای موجود در چاهک M2TP1 [۳۸]

- خطر وجود تاسیسات و ساختمان‌های مهم

با توجه به مطالعات سطحی انجام شده در حدفاصل ایستگاه M2 تا L2 هیچگونه ساختمان و تاسیساتی در مسیر حفاری محدوده مذکور وجود ندارد و نزدیک‌ترین ساختمان مسکونی به این منطقه در فاصله ۵۰ متری از مرکز تونل واقع می‌باشد که در شعاع تأثیر تونل قرار ندارد.

- ارزیابی پایداری سینه‌کار توسط محاسبه فشارهای اعمالی در حدفاصل ایستگاه M2 تا L2

همانطور که در فصل ۳ ذکر شد محاسبات فشار اعمالی به سینه‌کار در این تحقیق با استفاده از روابط جانسکز و استاینر صورت می‌گیرد. فاصله ایستگاه M2 تا L2 حدود ۶۰۰ متر می‌باشد محاسبات فشار در این محدوده در فواصل ۵۰ متر انجام شده که در جدول (۴-۶) آمده است.

جدول ۴-۶: مقادیر EPB محاسبه شده حدفاصل ایستگاه M2 تا L2

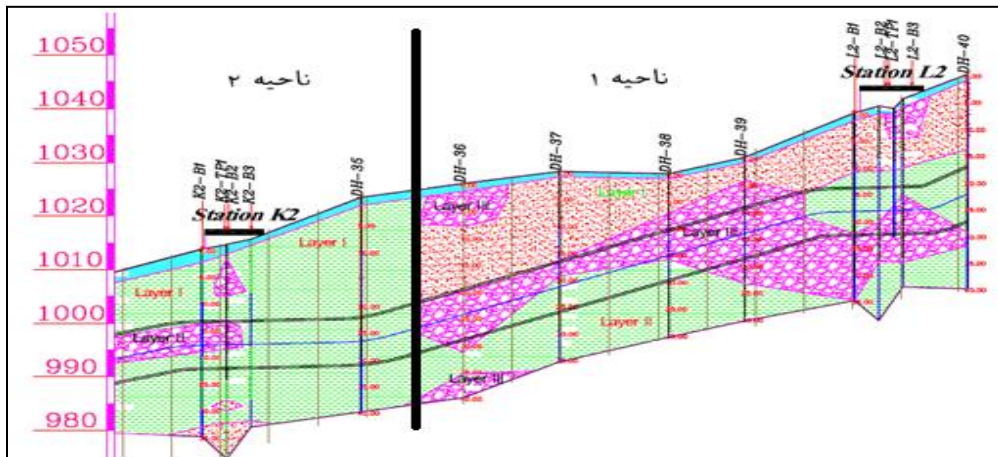
کیلومتر	فشارکف تونل (bar)		فشار مرکز تونل (bar)		فشار سقف تونل (bar)	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
۱۳۶۵۰-۱۳۶۰۰	۰/۸۳	۴/۱۳	۰/۷۰	۳/۲۴	۰/۵۸	۲/۴۰
۱۳۶۰۰-۱۳۵۵۰	۰/۸۰	۳/۹۱	۰/۶۷	۳/۰۲	۰/۵۶	۲/۲۰
۱۳۵۵۰-۱۳۵۰۰	۰/۷۹	۳/۸۹	۰/۶۷	۲/۹۹	۰/۵۶	۲/۱۸
۱۳۵۰۰-۱۳۴۵۰	۰/۸۰	۳/۹۳	۰/۶۷	۳/۰۳	۰/۵۶	۲/۲۰
۱۳۴۵۰-۱۳۴۰۰	۰/۸۴	۴/۲۲	۰/۷۲	۳/۴۰	۰/۶۱	۲/۵۵
۱۳۴۰۰-۱۳۳۵۰	۰/۸۵	۴/۳۴	۰/۷۴	۳/۴۹	۰/۶۲	۲/۶۵
۱۳۳۵۰-۱۳۳۰۰	۰/۸۰	۳/۹۳	۰/۶۷	۳/۰۳	۰/۵۶	۲/۲۰
۱۳۳۰۰-۱۳۲۵۰	۰/۷۹	۳/۸۹	۰/۶۷	۲/۹۹	۰/۵۶	۲/۱۸
۱۳۲۵۰-۱۳۲۰۰	۱/۷۲	۴/۷۲	۱/۵۳	۳/۸۲	۱/۲۵	۲/۹۳
۱۳۲۰۰-۱۳۱۵۰	۱/۷۴	۴/۸۱	۱/۵۶	۳/۹۱	۱/۲۸	۳/۰۲
۱۳۱۵۰-۱۳۱۰۰	۱/۷۷	۴/۸۹	۱/۵۹	۴/۰۰	۱/۳۰	۳/۱۱
۱۳۱۰۰-۱۳۰۵۰	۱/۸۰	۴/۹۲	۱/۶۰	۴/۰۵	۱/۳۲	۳/۱۶

با توجه به جدول (۴-۶)، مشاهده می‌شود که فشارهای محاسبه شده از کیلومتر ۱۳۶۵۰ تا ۱۳۲۵۰ شرایط مناسبی داشته ولی از آنجا به بعد مقدار فشار بالا رفته که دلیل آن تغییر جنس زمین می‌باشد. از آنجا که محدوده مذکور از لحاظ مخاطرات هیچگونه خطری را شامل نمی‌شود و تنها مشکل بالا بودن مقدار فشار در یک محدوده خاص از آن است در نتیجه برای دست یافتن به نتیجه نهایی، محدوده مورد مطالعه را برای مرحله تحلیل عددی انتخاب می‌کنیم. تا بررسی‌های دقیق‌تر و کاربردی‌تر روی آن صورت گیرد.

۴-۳-۲-۲ حدفاصل ایستگاه L2 تا K2

در فاصله بین ایستگاه L2 تا K2 تعداد ۱۳ گمانه وجود دارد که از این تعداد حدود ۴ گمانه در هر کدام از ایستگاه‌ها و ۵ گمانه در فاصله بین دو ایستگاه قرار دارد. جدول (۴-۷) مشخصات گمانه‌ها و چاهک‌های حفر شده در بین ۲ ایستگاه را نشان می‌دهد. با توجه به این مشخصات ژئوتکنیکی این گمانه‌ها، پروفیل زمین‌شناسی بین دو ایستگاه پیش‌بینی و طراحی شده است.

مطابق با پروفیل زمین‌شناسی در شکل (۴-۱۳)، مشخصات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه را می‌توان به ۲ ناحیه تقسیم نمود. ناحیه اول را می‌توان از ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ مسیر و ناحیه دوم را از کیلومتر ۱۲ تا ایستگاه K2 در نظر گرفت. مشخصات لایه‌های زمین‌شناسی این دو ناحیه در جدول‌های (۴-۸) و (۴-۹) آورده شده است.



شکل ۴-۱۳: پروفیل زمین شناسی بین ایستگاه‌های K2 تا L2 [۴۳]

جدول ۴-۷: مشخصات گمانه‌ها و چاهک‌های حفر شده در این مسیر [۴۳]

شماره	عمق (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
K2B1	۳۵	۷۳۰۳۴۴/۶	۴۰۱۸۴۵۸	۱۰۱۳.۸۳
K2B2	۴۰	۷۳۰۳۰۸/۱	۴۰۱۸۴۴۲	۱۰۱۴.۷۰
K2TP1	۲۵	۷۳۰۲۹۳/۸	۴۰۱۸۴۶۴	۱۰۱۴.۵۸
K2B3	۳۵	۷۳۰۲۵۹/۵	۴۰۱۸۴۴۶	۱۰۱۵.۶۵
DH-35	۴۰	۷۳۰۰۴۶/۶	۴۰۱۸۳۷۶	۱۰۲۳.۴۶
DH-36	۴۰	۷۲۹۸۴۸/۱	۴۰۱۸۴۵۱	۱۰۲۶.۲۹
DH-37	۳۵	۷۲۹۶۶۴/۱	۴۰۱۸۵۲۲	۱۰۲۸.۳۱
DH-38	۳۰	۷۲۹۴۶۸/۳	۴۰۱۸۶۴۳	۱۰۲۷.۹۱
DH-39	۳۰	۷۲۹۳۰۱/۶	۴۰۱۸۵۹۷	۱۰۳۰.۹۲
L2B1	۳۵	۷۲۹۰۶۰/۴	۴۰۱۸۵۵۴	۱۰۳۹.۲۳
L2B2	۴۰	۷۲۹۰۴۱/۲	۴۰۱۸۵۷۹	۱۰۴۰.۴۹
L2TP1	۲۴	۷۲۹۰۳۱/۷	۴۰۱۸۵۵۸	۱۰۴۰.۰۵
L2B3	۳۵	۷۲۸۹۹۷/۶	۴۰۱۸۵۰۷	۱۰۴۱.۸۷

جدول ۴-۸: مشخصات لایه‌های زمین‌شناسی ناحیه دوم حدفاصل ۱۲ تا ایستگاه K2 [۴۳]

شماره لایه	نوع خاک	وزن مخصوص	درصد رطوبت	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	مدول الاستیسیته
		KN/m ³	(%)	Kg/cm ²	(deg)	Kg/cm ²
۰	روباره	-	-	-	-	-
۱	سیلت رسی	۱۷/۵	۴	۰/۲	۲۴	۳۰۰
۲	شن رسی	۱۹	۴	۰/۱۱	۴۰	۱۰۰۰

جدول ۴-۹: مشخصات لایه‌های زمین‌شناسی ناحیه اول حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ مسیر [۴۳]

شماره لایه	نوع خاک	وزن مخصوص	درصد رطوبت	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	مدول الاستیسیته
		KN/m ³	(%)	Kg/cm ²	(deg)	Kg/cm ²
۰	روباره	-	-	-	-	-
۱	ماسه سیلتی	۱۸	۳	۰	۳۵	۸۰۰
۲	سیلت رسی	۱۷/۵	۴	۰/۲	۲۴	۳۰۰
۳	شن رسی	۱۹	۴	۰/۱۱	۴۰	۱۰۰۰

بر اساس این پروفیل و همچنین مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده روی مصالح خروجی از دستگاه و رخنمون دیواره‌ی شفت ایستگاه L2، عموماً دانه‌بندی خاک از ایستگاه L2 تا K2 شامل ۳ لایه به نام‌های GC-GM و CL-ML و SC-SM می‌باشد.

مطابق پروفیل زمین‌شناسی، مقطع تونل در ناحیه اول از بین لایه‌های GC-GM و CL-ML عبور می‌کند. مطابق مقطع نشان داده شده از ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ مسیر بیشتر مقطع تونل از میان یک

فصل چهارم انتخاب مناطق مناسب برای حفاری در حالت باز با توجه به مخاطرات زمین‌شناسی مسیر حفاری

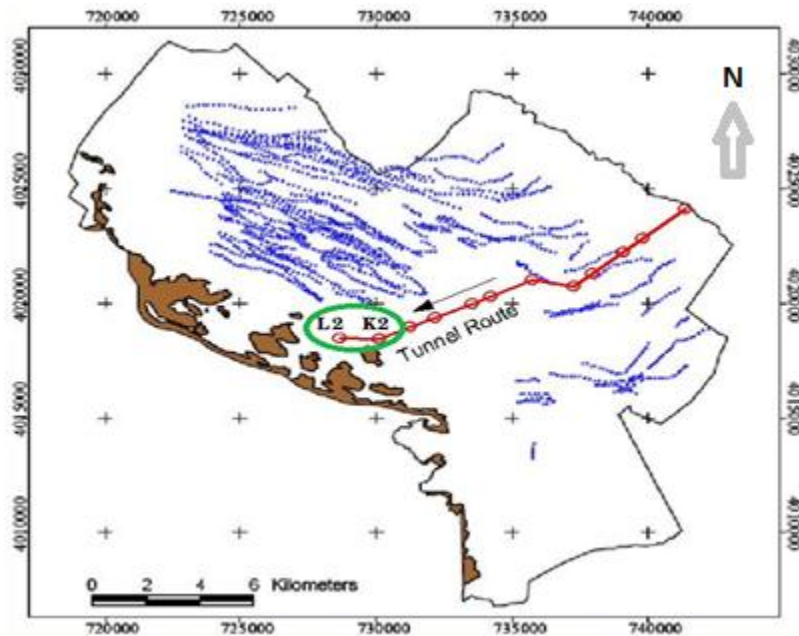
لایه گراول که حاوی قطعات بولدر می‌باشد، می‌گذرد. در ناحیه دوم از کیلومتر ۱۲ مسیر تونل از درون یک لایه رسی - سیلتی با چسبندگی بالا عبور می‌کند.

به دلیل وجود دیسک‌هایی که بر روی صفحه حفر دستگاه TBM نصب شده است، در حفاری این لایه رسی، احتمال خطر گل گرفتگی دیسک‌ها و سایش یک طرفه آنها وجود خواهد داشت و باید از روش‌های بهسازی خاک مانند تزریق فوم در حین حفاری استفاده نمود مانند محدوده A2 تا F2 که شرح داده شد مقدار فشارهای اعمالی در این محدوده بالا می‌باشد و اگر فشاری به سینه‌کار اعمال نشود احتمال خطر نشست در این محدوده بالا می‌باشد به همین دلیل مقطع مورد نظر برای حفاری در حالت باز مناسب نمی‌باشد. در ادامه به بررسی محدوده ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ مسیر از جنبه مخاطرات پرداخته می‌شود.

● بررسی مخاطرات در حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ مسیر

- قنات

در شکل (۴-۱۴)، موقعیت رشته قنات‌های گزارش شده در مشهد با مسیر خط ۲ قطار شهری نشان داده شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که احتمال برخورد مسیر خط ۲ با رشته قنات‌های گزارش شده در بخش‌های شرقی و شمالی وجود دارد اما در گمانه‌ها و چاهک‌های حفاری شده در حدفاصل L2 تا کیلومتر ۱۲ شواهدی از وجود قنات مشاهده نگردید لیکن از این لحاظ مسیر مذکور دارای شرایط مساعد برای حفاری در حالت بدون اعمال فشار به سینه‌کار می‌باشد. لازم به ذکر است پرس-وجوهای محلی نیز در این رابطه انجام شده که اهالی نیز اظهار بر نبود قنات در این منطقه داشته‌اند.



شکل ۴-۱۴: نقشه زمین‌شناسی شهر مشهد و قنات‌های موجود در آن [۴۷]

با توجه به مخاطرات ذکر شده در حدفاصل ایستگاه M2 تا L2 و مشابه بودن حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ با آن و مطالعات صورت گرفته در این راستا می‌توان نتیجه گرفت که در این مسیر نیز مانند مسیر قبل هیچگونه خطر از لحاظ مهندسی زمین‌شناسی که شامل موارد زیر است مشاهده نشده است.

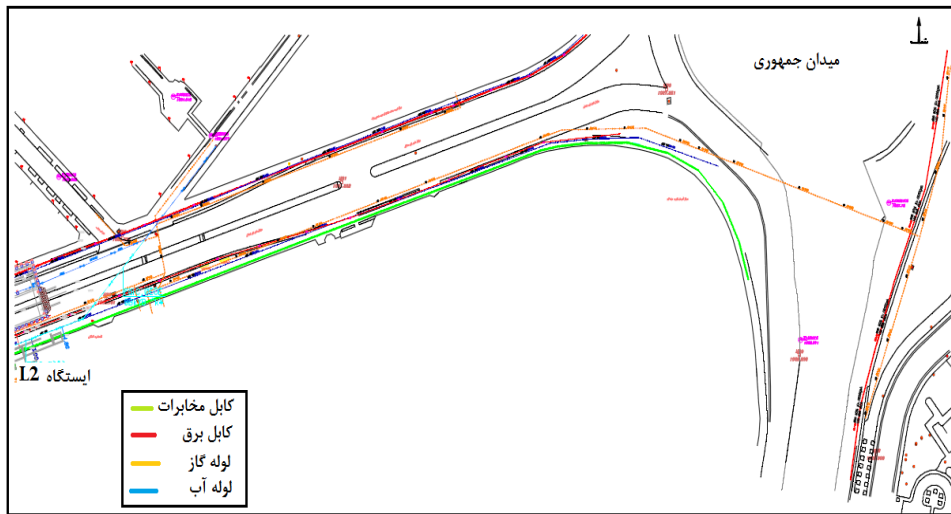
- برخورد به زون‌های برشی و لایه‌های سست ریزشی
- خطر نشست تحکیمی زمین
- وضعیت آب‌های زیرزمینی و برخورد با آب‌های موضعی

- خطر برخورد با بولدر

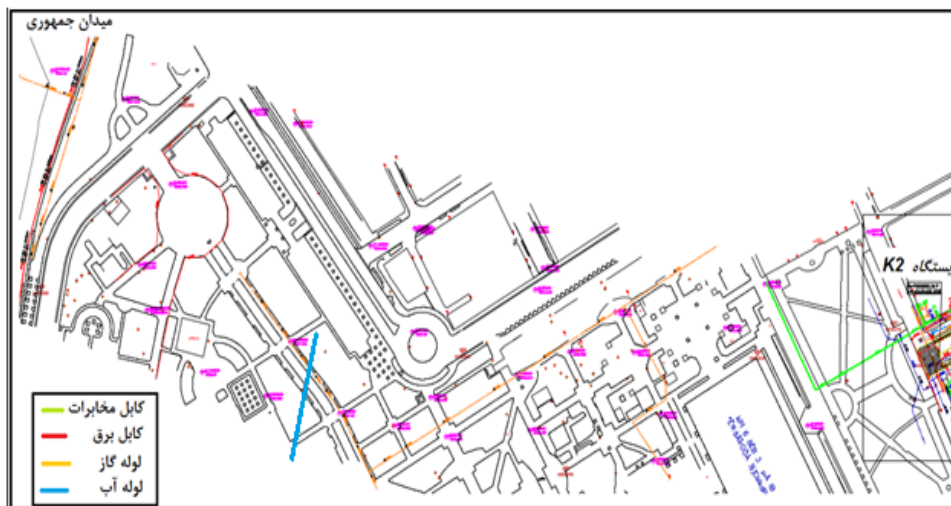
در این مسیر نیز مانند مسیر قبل خطر برخورد با بولدر را داریم همانطور که در محدوده قبلی ذکر شد حفاری به روش EPB در بولدر باعث مشکلاتی می‌شود که در این شرایط بهتر است از روش حفاری در حالت باز استفاده شود.

- تاسیسات شهری

در این بخش تاسیسات شهری و معارضین بین ایستگاه L2 و کیلومتر ۱۲ مسیر پرداخته شده است. تاسیسات شهری شامل خطوط ارتباطات، برق، گاز و آب و فاضلاب می باشد. شکل (۴-۱۵) و شکل (۴-۱۶) پلان تاسیسات شهری که بعد از ایستگاه L2 تا میدان جمهوری قرار دارد را نشان می دهد. خطوط آبی، نارنجی، سبز و قرمز به ترتیب خط لوله انتقال آب، گاز، مخابرات و برق را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۵: تاسیسات شهری بعد از ایستگاه L2 تا پل جمهوری [۴۴]



شکل ۴-۱۶: تاسیسات شهری بعد از پل جمهوری تا ایستگاه K2 [۴۴]

- شناسایی وضعیت موجود خطوط انتقال آب و فاضلاب بین ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲

بعد از ایستگاه L2 خطوط انتقال آب و فاضلاب عبارت‌اند از:

- خط لوله 150 mm آزیست واقع در پیاده‌رو لاین شرقی بلوار فضل بن شاذان و به عمق حدوداً ۱ متر و فاصله ۳ متر از دیوار.
- خط لوله 150 mm آزیست واقع در پیاده‌رو لاین غربی بلوار فضل بن شاذان و به عمق حدوداً ۱ متر و فاصله ۵ متر از دیوار.
- خط لوله فاضلاب به قطر 700 mm و با عمق ۲/۷ متر در لاین غربی سواره‌رو و فاصله از دیواره موجود ۱۲/۳ الی ۱۳/۱ m
- خط لوله انتقال آب به قطر 800 mm و با عمق ۴-۵ متری و در کیلومتراژ ۱۲۰۵۰+ واقع در بین مسجد و رستوران کوهسنگی

با توجه به اینکه عمق لوله‌های آب کم است، بنابراین حفاری تونل تاثیر چندانی بر روی آنها ندارد، ولی تا حد ممکن باید از ایجاد نشست در این فواصل جلوگیری به عمل آید [۴۴].

- شناسایی وضعیت موجود شبکه توزیع گاز بین ایستگاه L2 تا K2

بعد از ایستگاه L2 خطوط انتقال گاز عبارت‌اند از:

- خط لوله ۱۲ اینچ به صورت طولی در محل سواره‌رو لاین شرقی به عمق ۱/۳ متر در بلوار فضل ابن شاذان به فاصله ۱۱ متر از دیواره.
- خط لوله ۱۲ اینچ انشعاب گرفته شده از خط انتقال ۱۲ اینچ ذکر شده در قسمت پیاده‌روی لاین شرقی بلوار فضل ابن شاذان که از سمت دیگر مقابل اتحادیه کارگران ایران عبور پیدا می‌کند.

فصل چهارم انتخاب مناطق مناسب برای حفاری در حالت باز با توجه به مخاطرات زمین‌شناسی مسیر حفاری

- خط لوله ۱۶ اینچی که در عمق ۱/۴ متری از سطح زمین و به موازات رمپ جنوبی پل جمهوری قرار دارد.
- خط لوله ۲ اینچ در پیاده‌روی لاین غربی با عمق ۰/۸ متر و به فاصله ۱/۳ متر از دیوار. از آنجا که این خطوط نیز در اعماق کم می‌باشد حفاری تأثیر چندانی روی آن‌ها ندارد [۴۴].

- شناسایی وضعیت موجود شبکه توزیع برق بین ایستگاه L2 تا K2

- بعد از ایستگاه L2 تا پل جمهوری شبکه توزیع فشار قوی خاصی وجود ندارد. به موازات رمپ جنوبی پل جمهوری و در فاصله ۱/۲ تا ۲ متری از زمین کابل فشار قوی ۱۳۲ کیلوولت وجود دارد، که جهت اطلاع و جلوگیری از خطرات احتمالی ذکر شده است.
- در پارک کوهسنگی چند رشته برق فشار ضعیف در عمق ۰/۵ تا ۱ متری از زمین وجود دارد [۴۴].

- شناسایی وضعیت موجود تاسیسات مخابرات بین ایستگاه L2 تا K2

- بعد از ایستگاه L2 و در عرض بلوار فضل بن شاذان، چند ردیف کانال و حوضچه در عمق ۱ الی ۳ متری کانال و کابل و فیبر موجود می‌باشد.
- بعد از ایستگاه L2 و در ضلع شرقی به موازات خیابان و به فاصله ۶۰ سانتیمتری تا ۱ متری از دیوار و به عمق ۱ الی ۱/۲ متری از زمین کافو ۱۶ قرار دارد. این کابل ادامه پیدا کرده تا به میدان جمهوری رسیده است. در میدان جمهوری به موازات رمپ جنوبی پل و به عمق ۰/۸ الی ۱/۲ متری از زمین قرار گرفته شده است [۴۴].

- شناسایی وضعیت موجود چاه‌های فاضلاب در محدوده مورد مطالعه

در ادامه در جدول (۴-۱۰) موقعیت چاه‌های قرار گرفته در مسیر تونل با قطر ثابت بین ۰/۸ تا ۱ متر بعد از ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ مسیر به همراه دیگر مشخصه‌های آن‌ها به همراه توضیحات هر چاه آورده شده است .

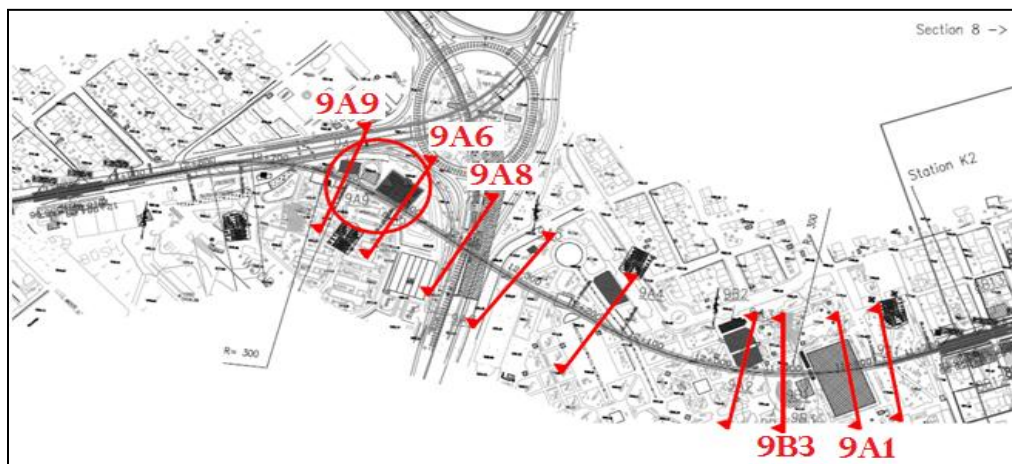
جدول ۴-۱۰: موقعیت چاه‌های قرار گرفته در حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ [۴۵]

ردیف	کیلومتراژ	موقعیت	عمق(متر)	موقعیت نسبت به تونل	توضیحات
۱	۱۲۸۸۵	داخل ایستگاه L2	۱۰	روی آکس تونل	برخورد با تونل (روباره m ۱۲/۷)
۲	۱۲۶۸۲	پشت سلف سرویس جهانگردی	۲	روی دیواره چپ تونل	احتمال برخورد وجود ندارد
۳	۱۲۶۲۵	پشت سلف سرویس جهانگردی	۱/۵	روی آکس تونل	احتمال برخورد وجود ندارد
۴	۱۲۶۱۸	پشت سلف سرویس جهانگردی	۷	روی دیواره چپ تونل	برخورد با تونل (روباره m ۹/۸)
۵	۱۲۵۷۵	پشت مرکز آموزش جهانگردی	۲۰	روی دیواره چپ تونل	برخورد با تونل (روباره m ۱۰)
۶	۱۲۵۷۰	پشت مرکز آموزش جهانگردی	۲۰	سمت چپ تونل به فاصله ۳.۷ متر	احتمال برخورد وجود ندارد
۷	۱۲۵۶۵	پشت مرکز آموزش جهانگردی	۲۰	سمت چپ تونل به فاصله ۳ متر	احتمال برخورد وجود ندارد
۸	۱۲۵۶۰	پشت مرکز آموزش جهانگردی	۲۰	روی دیواره چپ تونل	برخورد با تونل (روباره m ۱۰/۲)
۹	۱۲۵۴۴	پشت ساختمان هتل جهانگردی	۲۰	روی دیواره چپ تونل	برخورد با تونل (روباره m ۱۰/۳)
۱۰	۱۲۵۰۰	پشت ساختمان هتل جهانگردی	۳۰	روی آکس تونل	برخورد با تونل (روباره m ۱۱/۲)
۱۱	۱۲۳۱۷	داخل پارک کوهسنگی-سرویس بهداشتی ۲	۶/۵-۸	روی دیواره چپ تونل	احتمال برخورد وجود ندارد
۱۲	۱۲۳۲۰	داخل پارک کوهسنگی-سرویس بهداشتی ۲	۶/۵-۸	روی آکس تونل	احتمال برخورد وجود ندارد
۱۳	۱۲۳۲۳	داخل پارک کوهسنگی-سرویس بهداشتی ۲	۶/۵-۸	روی دیواره راست تونل	احتمال برخورد وجود ندارد
۱۴	۱۲۳۲۵	داخل پارک کوهسنگی-سرویس بهداشتی ۲	۶/۵-۸	سمت راست تونل	احتمال برخورد وجود ندارد
۱۵	۱۲۳۲۴	داخل پارک کوهسنگی-سرویس بهداشتی ۲	۶/۵-۸	سمت راست تونل	احتمال برخورد وجود ندارد

با توجه به جدول (۴-۱۰) و برخورد تونل در مسیر حفاری با چند حلقه چاه و احتمال خطر جریان آب به داخل دستگاه و تونل باید در این مسیر با کنترل فشار اعمالی به سینه کار جلوگیری از خطر نشست و جریان آب به داخل تونل جلوگیری به عمل آید.

- خطر نشست ساختمان‌های مهم موجود در بین ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ مسیر مشاور پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد ابتدا وضعیت ساختمان‌های قرار گرفته در مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد را بررسی کرده است و با توجه به موقعیت مختصاتی هر ساختمان، تعداد طبقات هر ساختمان، تعداد طبقات زیرزمین، نوع فوندانسیون، طول و عرض هر ساختمان، عمق فوندانسیون تا سطح زمین، نوع سازه، نوع دیوارها، عمر ساختمان و... میزان ریسک و خطر نشست هر ساختمان را تخمین زده است، سپس بر اساس میزان ریسک هر ساختمان، آنها را در کلاس‌های مختلفی طبقه‌بندی نموده است.

شکل (۴-۱۷) مقاطع مختلف و مهمی بین ایستگاه L2 تا K2 را نشان می‌دهد که مشاور پروژه آنها را به عنوان سازه و ساختمان‌های مهمی که تحت تاثیر خطر نشست قرار دارند مورد بررسی قرار داده است.



شکل ۴-۱۷: مقاطع مختلف تحت تاثیر خطر نشست بین ایستگاه L2 تا K2 [۴۶]

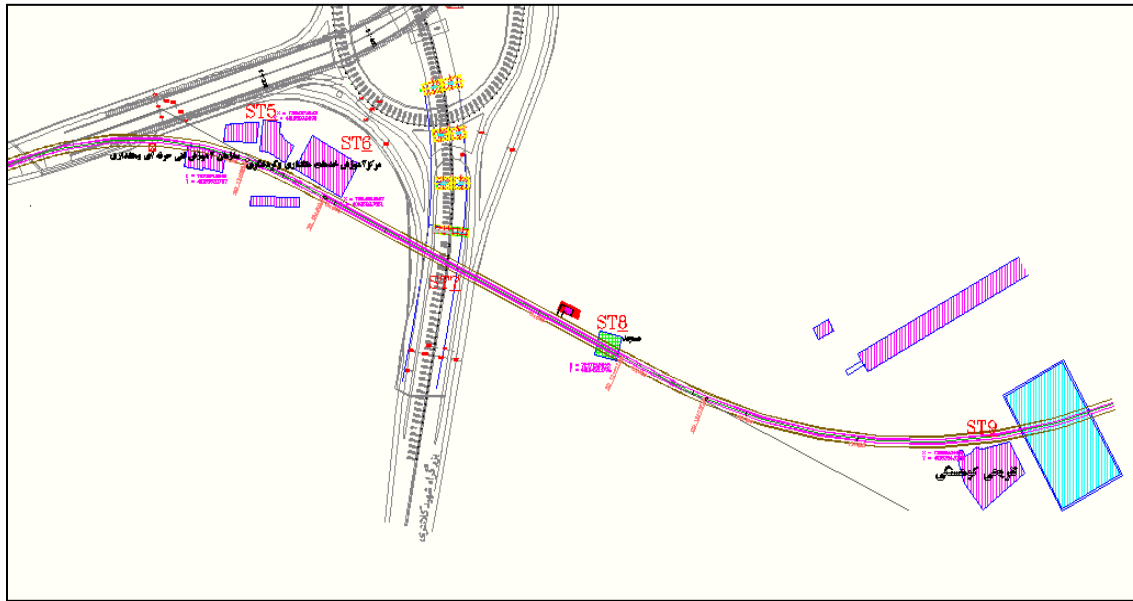
بعد از آن با توجه به میزان فاصله ساختمان‌ها از تونل و میزان نشست پیش‌بینی شده و زاویه جابجایی آنها، میزان ریسک و خطر نشستی که هر ساختمان را تهدید می‌کند مشخص و این ساختمان‌ها را در ۵

کلاس ریسک مختلف I , II , III , IV , V تخمین و برآورد کرده است. کلاس I دارای کمترین میزان ریسک و کلاس V دارای بیشترین میزان ریسک می باشد. طبق برآوردهای انجام شده، میزان ریسک ساختمان‌هایی که در کلاس I , II قرار دارند کم است، و نیازی به اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی و نصب سیستم ابزار دقیق نمی باشد. این ساختمان‌ها و سازه‌ها در جدول با رنگ سبز مشخص شده است، این در حالی است که ساختمان و سازه‌هایی که در کلاس III , IV , V قرار دارند و با رنگ قرمز رنگ نشان داده شده است، دارای بیشترین میزان ریسک نشست می باشند.

از بین مقاطع موجود ۵ مقطع در فاصله این دو ایستگاه وجود دارند که به عنوان مقطعی بحرانی و تحت تاثیر خطر نشست در نظر گرفته می شوند. نام سازه، موقعیت نسبت به مسیر تونل و کلاس ریسک نشست این ۵ مقطع در جدول (۴-۱۱) ذکر شده است. همانطور که مشاهده می شود و طی بررسی‌های صورت گرفته بر روی این ساختمان‌ها، کلاس ریسک برای هر سازه نسبت به آنچه که مشاور در نظر گرفته است، تدقیق شده است. این ۵ مقطع به ترتیب بر روی شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است. مابقی مقاطع دارای ریسک نشست پایین می باشند، بنابراین به آنها پرداخته نشده است.

جدول ۴-۱۱: موقعیت و ریسک سازه و ساختمان‌های مهم بین ایستگاه L2 تا K2 (خطر نشست) [۴۶]

ردیف	نام سازه یا ساختمان	شماره سازه	فواصل (m)	کلاس ریسک نشست
۱	سازمان آموزش فنی حرفه‌ای (غذا خوری)	9A9	۱۲۶۰۰-۱۲۶۳۵	IV
۲	هتل و مرکز آموزش جهانگردی و گردشگری	9A6	۱۲۵۰۰-۱۲۵۵۰	IV, V
۳	رمپ جنوبی پل میدان جمهوری	9A8	۱۲۳۸۰-۱۲۴۱۰	V
۴	ساختمان تفریحی و رستوران پارک کوهسنگی	9B3	۱۱۸۷۰-۱۱۹۲۰	III, IV
۵	استخر کوهسنگی	9A1	۱۱۸۰۰-۱۱۸۵۵	III



شکل ۴-۱۸: پلان ساختمان‌های مورد نظر جهت نصب ابزار دقیق حدفاصل ایستگاه L2 تا K2 [۴۶]

همانطور که در جدول (۴-۱۱) و شکل (۴-۱۸) مشاهده می‌شود، در مقطع اول و در کیلومتر ۱۲۶۰۰-۱۲۶۳۵ ساختمان سازمان فنی حرفه‌ای و ساختمان شماره یک گردشگری و زیر گذر بلوار فضل ابن شاذان وجود دارد. میزان روباره در بالای تونل در این فاصله بین ۹/۶-۹/۹ متر می‌باشد. با توجه به اینکه میزان روباره تونل کم است، خطر نشست در دیواره شمالی این ساختمان وجود دارد. ریسک نشست این ساختمان‌ها در کلاس ۴ قرار دارد. جهت اطمینان بهتر است که در این مقطع در صورت امکان اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه جهت جلوگیری از نشست این ساختمان به عمل آید. این اقدامات اصلاحی شامل تحکیم کردن پی ساختمان به وسیله تزریق گروت، زدن شمع یا اقدامات مؤثر دیگر جهت جلوگیری از نشست این ساختمان می‌باشد لذا بایستی بررسی‌های بیشتر در خصوص لزوم بهسازی خاک در این محدوده صورت پذیرد [۴۶].

در کیلومتر ۱۲۵۰۰-۱۲۵۵۰ ساختمان شماره ۲ جهانگردی و گردشگری می‌باشد. میزان روباره تونل در حد فاصل این ساختمان بین ۱۰/۲ - ۱۰/۴ است. با توجه به اینکه ریسک نشست این ساختمان در کلاس شماره ۴ یا ۵ قرار دارد، باید بررسی‌ها بیشتر در خصوص در نظر گرفتن اقدامات

فصل چهارم انتخاب مناطق مناسب برای حاری در حالت باز با توجه به مخاطرات زمین‌شناسی سیر حاری

اصلاحی و پیشگیرانه جهت جلوگیری از نشست این ساختمان به عمل آید و همزمان با نصب دستگاه‌های ابزار دقیق از جمله تیلتر کنترل‌های لازم به عمل آید.

در کیلومتر ۱۲۳۸۰-۱۲۴۱۰ تونل از زیر رمپ ضلع جنوبی پل روگذر میدان جمهوری عبور می‌کند. میزان روباره در این فاصله بین $14/6 - 13/7$ m است. با توجه با اینکه خطر نشست این مقطع در کلاس ۵ یعنی بیشترین مقدار ریسک قرار دارد، بنابراین جهت جلوگیری از نشست این مقطع نیز باید اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه‌ای صورت گیرد. البته که در این مقطع نیز نیاز به نصب دستگاه ابزار دقیق می‌باشد [۴۶].

در کیلومتر ۱۱۸۷۰-۱۱۹۲۰ ساختمان تفریحی و رستوران پارک کوهسنگی قرار دارد، که ریسک نشست این ساختمان در کلاس ۳ یا ۴ قرار دارد. میزان روباره در این فاصله بین $21/4 - 22/1$ m است. با توجه به اینکه خطر نشست این ساختمان نسبتاً کم است پیش‌بینی می‌شود که نیازی به اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه جهت جلوگیری از نشست نمی‌باشد اما بایستی بررسی‌های بیشتر در خصوص این مقطع صورت پذیرد و البته جهت اطمینان باید دستگاه ابزار دقیق بر روی ساختمان نصب شود.

در کیلومتر ۱۱۸۰۰-۱۱۸۵۵ استخر کوهسنگی قرار دارد. میزان روباره در این فاصله تا سطح زمین بین $19/1 - 20/9$ m است. عمق تقریبی این استخر حدود ۳ متر است. میزان ریسک نشست آن نیز در کلاس ۳ قرار دارد بنابراین پیشنهاد می‌شود که قبل از رسیدن به این مقطع آب استخر تخلیه شود. در این مقطع نیاز به نصب ابزار دقیق نمی‌باشد ولی همزمان با حفاری عملیات کنترل نشست سطحی باید صورت پذیرد [۴۶].

لازم به ذکر است که در کیلومتر ۱۲۲۲۳-۱۲۲۴۳ مسیر تونل از زیر مسجد واقع در کوهسنگی می‌گذرد که با توجه به اینکه میزان روباره در این مقطع ۱۷-۱۸ متر می‌باشد، و روباره روی تونل از جنس

ماسه می‌باشد، تمهیدات لازم از جمله رعایت فشار EPB لازم می‌باشد و بایستی بررسی‌های لازم در خصوص در نظر گرفتن بهسازی زمین در آن محدوده صورت پذیرد.

با توجه به مسیر مورد مطالعه که حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ می‌باشد و حساس‌ترین ساختمان‌ها با ریسک نشست ۴ و ۵ در این مسیر قرار گرفته و با توجه به گزارشات شرکت مشاور مبنی بر احتمال نشست بالا و پیشنهاد برای آماده سازی مسیر قبل حفاری، می‌توان نتیجه گرفت مسیر مذکور از این لحاظ بسیار آسیب‌پذیر بوده و احتمال حفاری در باز در این مسیر از ریسک بالایی برخوردار می‌باشد. به همین دلیل برای بررسی بیشتر در ادامه به محاسبه فشار در این محدوده بر اساس ساختمان‌های موجود در مسیر پرداخته می‌شود تا به یک نتیجه نهایی در مورد انتخاب این محدوده برسیم [۴۶].

- ارزیابی پایداری سینه‌کار توسط محاسبه فشارهای اعمالی در حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲

مقادیر فشار در محدوده مذکور برای درک بیشتر در رابطه با مخاطرات در حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲ با استفاده از روابط جانسکز و استاینر محاسبه شده که در جدول (۴-۱۲) آورده شده است.

جدول ۴-۱۲: مقادیر EPB محاسبه شده در حدفاصل ایستگاه L2 تا کیلومتر ۱۲

کیلومتر از (m)		Pmin.(bar)	Pmax.(bar)	کیلومتر از (m)		Pmin.(bar)	Pmax.(bar)
۱۲۸۰۰-۱۲۷۰۰	Crown	۰/۹۶	۱/۷۵	۱۲۴۵۰-۱۲۴۰۰	Crown	۱/۱۴	۲/۳۴
	Axis	۱/۲۵	۲/۵۸		Axis	۱/۵۲	۳/۰۱
	Heel	۱/۵۵	۳/۴۴		Heel	۱/۸۲	۴/۱۷
۱۲۷۵۰-۱۲۷۰۰	Crown	۰/۹۵	۱/۶۰	۱۲۴۰۰-۱۲۳۵۰	Crown	۰/۸۵	۳/۳۶
	Axis	۱/۲۳	۲/۵۵		Axis	۱/۰۰	۴/۲۳
	Heel	۱/۵۰	۳/۳۹		Heel	۱/۱۵	۵/۱۰
۱۲۷۰۰-۱۲۶۵۰	Crown	۱/۱۰	۲/۳۰	۱۲۳۵۰-۱۲۳۰۰	Crown	۰/۹۱	۳/۷۲
	Axis	۱/۵۰	۲/۹۱		Axis	۱/۰۶	۴/۵۹
	Heel	۱/۷۸	۴/۱۰		Heel	۱/۲۰	۵/۴۲
۱۲۶۵۰-۱۲۶۰۰	Crown	۰/۸۵	۲/۱۰	۱۲۳۰۰-۱۲۲۵۰	Crown	۱/۴۱	۳/۰۴
	Axis	۱/۱۰	۳/۱۷		Axis	۱/۶۵	۳/۷۴
	Heel	۱/۳۳	۴/۸۰		Heel	۱/۹۰	۴/۴۵
۱۲۶۰۰-۱۲۵۵۰	Crown	۱/۱۶	۳/۷۲	۱۲۲۵۰-۱۲۲۰۰	Crown	۱/۴۱	۳/۰۹
	Axis	۱/۴۹	۴/۲۳		Axis	۱/۶۵	۳/۷۹
	Heel	۱/۸۳	۵/۳۵		Heel	۱/۹۰	۴/۵۰
۱۲۵۵۰-۱۲۵۰۰	Crown	۱/۳۴	۲/۹۳	۱۲۲۰۰-۱۲۱۵۰	Crown	۱/۲۹	۲/۷۵
	Axis	۱/۵۶	۳/۲۴		Axis	۱/۵۴	۳/۴۶
	Heel	۱/۸۵	۴/۳۶		Heel	۱/۷۸	۴/۱۶
۱۲۵۰۰-۱۲۴۵۰	Crown	۰/۸۷	۲/۲۱	۱۲۱۵۰-۱۲۱۰۰	Crown	۱/۱۴	۲/۲۹
	Axis	۱/۱۵	۳/۴۰		Axis	۱/۳۸	۲/۹۹
	Heel	۱/۲۶	۴/۶۳		Heel	۱/۶۳	۳/۷۰

با توجه به فشارهای محاسبه شده طبق مخاطرات موجود در مسیر مورد مطالعه مشاهده شد که مقدار فشارهای اعمالی بالا بوده و احتمال نشست در حالت حفاری باز، زیاد است.

از آنجا که مقدار میانگین فشار اعمالی برای سازه‌های مهم در مسیر مذکور برای هتل و مرکز آموزش جهانگردی و گردشگری که در کیلومترهای ۱۲۵۵۰ و رمپ جنوبی پل میدان جمهوری در کیلومترهای ۱۲۴۰۰ به ترتیب (bar) ۲/۹۶ و (bar) ۲/۶۵ می‌باشد که خود مقدار بسیار قابل توجه‌ای است و با توجه به چاه‌های موجود در مسیر تونل می‌توان نتیجه گرفت که مسیر مورد مطالعه برای حفاری در حالت باز مناسب نمی‌باشد و احتمال خطر نشست با توجه به مطالب ذکر شده، بالا می‌باشد.

۴-۳-۲-۳ حدفاصل ایستگاه K 2 تا F2

مسیر حفاری مورد نظر از لحاظ پارامترهای مهندسی لایه خاک مانند مسیر حفاری دستگاه اول می‌باشد همانطور که از پارامترهای مهندسی در جدول (۴-۱۳) پیداست این مسیر نیز مانند مسیر حفاری دستگاه اول به دلیل چسبندگی بالا، اعمال فشار بالا برای جلوگیری از نشست و خطر گل گرفتگی دور دیسک‌ها در نتیجه آن سایش یک طرفه ابزار برش قابلیت حفاری در حالت باز را ندارد.

جدول ۴-۱۳: مشخصات لایه‌های زمین‌شناسی حدفاصل ایستگاه K2 تا F2 [۴۳]

شماره لایه	نوع خاک	وزن مخصوص	درصد رطوبت	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	مدول الاستیسیته
		KN/m ³	(%)	Kg/cm ²	(deg)	Kg/cm ²
۰	روباره	-	-	-	-	-
۱	سیلت رسی	۱۷/۵	۱۷	۰/۴	۲۰	۲۰۰
۲	شن رسی	۱۹	۱۴	۰/۱۰	۳۷	۸۰۰

۴-۴ جمع بندی

در این فصل ابتدا مخاطرات زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن مسیر حفاری از نقطه نظر مخاطرات مذکور بررسی و تحلیل شد. که پس از بررسی‌های صورت گرفته فقط حدفاصل ایستگاه M2 تا L2 مورد انتخاب نهایی واقع شد و محدوده‌های دیگر به دلیل مخاطرات موجود مثل نوع خاک بخشی از مسیر، چاه‌های فاضلاب قرار گرفته در مسیر تونل، ساختمان‌ها و تاسیسات مهم موجود در سطح تونل از ادامه کار حذف شدند. در فصل بعد به تحلیل عددی منطقه منتخب پرداخته می‌شود.

فصل پنجم

تحلیل عددی پایداری تونل در حالت

حاری باز

۵-۱ مقدمه

امروزه روش‌های عددی جزء فراگیرترین و پرکاربردترین روش‌ها در ژئومکانیک می‌باشند. با استفاده از این روش‌ها می‌توان جزئیات تنش و تغییرشکل را در نقاط مختلف یک مدل تعیین کرد. از جمله این روش‌های عددی می‌توان به روش‌های اجزاء محدود و روش تفاضل محدود اشاره کرد. FLAC و FLAC3D برنامه‌های تفاضل محدودی هستند که برای کاربردهای ژئومکانیک گسترش یافتند. FLAC توسط شرکت ITASCA در سال ۱۹۸۶ به بازار آمد و در سال ۱۹۹۴، FLAC3D نیز به آن پیوست.

در این فصل ابتدا نرم افزار مورد استفاده (FLAC3D) معرفی می‌گردد. مزایا، محدودیت‌ها و روش کار با آن بطور خلاصه توضیح داده می‌شود و در ادامه نحوه مدلسازی حفاری TBM در حالت بدون اعمال فشار به سینه کار برای دو مقطع از محدوده منتخب با استفاده از این نرم افزار توضیح داده می‌شود.

۵-۲ معرفی نرم افزار FLAC3D

نرم افزار FLAC3D که نام آن برگرفته از عبارت "Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions" است، تحلیل سریع لاگرانژی محیط سه بعدی پیوسته را به کمک روش تفاضل محدود انجام می‌دهد. پایه این نرم افزار، نرم افزار دوبعدی FLAC می‌باشد. FLAC3D، FLAC، دوبعدی را به حالت سه بعدی بسط می‌دهد و رفتار سازه‌های سه بعدی ساخته شده در خاک، سنگ و دیگر موادی که وقتی به نهایت تسلیم رسیده و رفتار پلاستیک از خود نشان می‌دهند را مدل می‌کند. مواد به وسیله المان‌های چند وجهی داخل یک شبکه سه بعدی که بوسیله کاربر جهت ساختن اشکال مورد نظر اصلاح گردیده است، نشان داده می‌شوند. هر المان در مقابل نیروها و محدودیت‌های اعمال شده مطابق با یک قانون تنش-کرنش خطی یا غیرخطی معین رفتار می‌کند. مواد قابلیت تسلیم و جریان یافتگی را دارند و نقاط شبکه در حالت کرنش زیاد می‌توانند حرکت کنند و یا جابجا گردند.

FLAC3D توانایی زیادی را برای حل مسائل پیچیده در علم مکانیک و بطور خاص در علم ژئومکانیک فراهم می‌آورد. با توجه به قابلیت‌هایی که برای نرم افزار مذکور ذکر شد تصمیم گرفته شده تا در این تحقیق از نرم افزار FLAC3D استفاده شود.

۵-۲-۱ مدل‌سازی

این عملیات شامل مراحل همچون المان بندی، انتخاب مدل رفتاری، تعیین شرایط مرزی و اولیه می‌باشد که در ادامه هر یک به تفصیل شرح داده می‌شوند.

۵-۲-۱-۱ المان بندی

اولین موضوعی که در هر مدل‌سازی عددی مطرح می‌شود، انتخاب محدوده‌ی مناسب تحلیل است. پس از انتخاب منطقه مناسب، مهمترین مسأله ایجاد یک شبکه عددی است. در ساخت شبکه‌ی المان‌ها در روش‌های عددی چه اجزای محدود و چه تفاضل محدود، دو اصل اساسی باید مد نظر قرار گیرد. اول اینکه، ابعاد مدل باید به اندازه کافی بزرگ بوده تا تأثیر مرزها بر روی رفتار مدل، به حداقل برسد. از این رو مرزهای مدل بایستی از محدوده تحت تنش یا تغییر مکان به قدر کافی دور انتخاب گردند. به طوری که وضعیت تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در نقاط مرزی قبل و بعد از اعمال تغییرات در مدل تفاوت چندانی نداشته باشد. محدوده تقریبی تأثیر را می‌توان در موارد مختلف از برخی روابط ریاضی موجود تعیین نمود. دوم اینکه، در مناطق حساس (مثلاً نقاط گوشه‌دار سازه و خاک، نقاط بارگذاری و غیره) تعداد المان‌های کافی جهت رسیدن به جواب با دقت لازم فراهم شود. لازم به ذکر است که نباید تغییر ابعاد المان‌ها به صورت ناگهانی اتفاق بیفتد، چون انتقال داده‌ها را دچار خطا می‌کند [۴۹].

پس از تعیین ابعاد مدل نوبت به ایجاد شبکه‌ی المان‌ها می‌رسد. در این مرحله باید ابعاد المان‌ها با دقت انتخاب گردد. در مناطقی که تغییر تنش‌ها و کرنش‌ها در مدل بیشتر است، المان‌هایی با ابعاد

کوچکتر و در مناطق با تأثیر کمتر، المان‌هایی با ابعاد بزرگتر انتخاب می‌شوند. اگرچه افزایش تعداد المان‌ها بر دقت جواب می‌افزاید ولی نمی‌توان نتیجه‌گیری کرد که شبکه‌بندی بهینه، شامل بیشترین تعداد المان است. به عبارت دیگر افزایش تعداد المان‌ها تا جایی که دقت قابل قبول مدلسازی برآورده شود، لازم است. در عمل معمولاً یک مسأله‌ی مشخص با تعداد المان‌های مختلف حل می‌شود و تغییرات نتایج در اثر تغییر تعداد المان‌ها بررسی می‌گردد. شبکه بهینه وضعیتی است که تعداد المان‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ای در نتایج ایجاد ننماید.

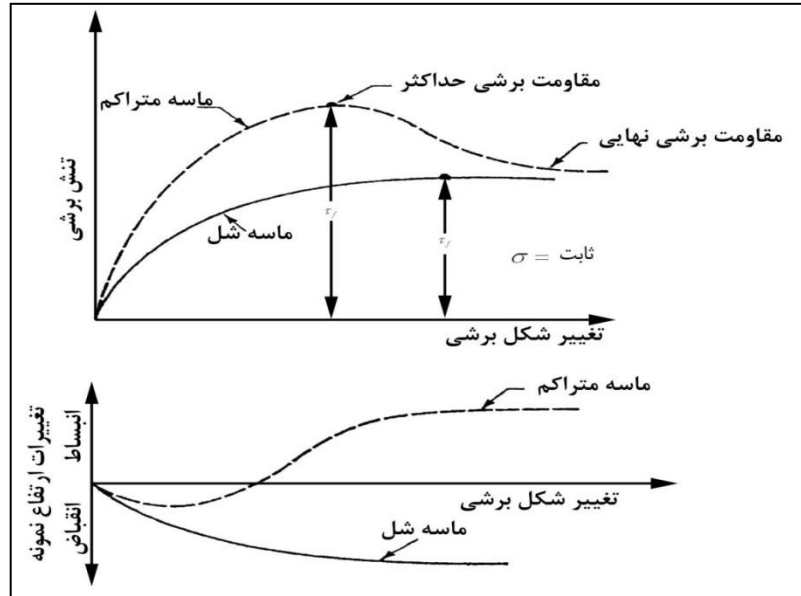
۵-۲-۱-۲ انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

پس از ایجاد شبکه‌ی المان‌ها، جزئیات دیگر مدل از جمله خصوصیات مواد موجود در مدل (مانند: خصوصیات الاستیک/ پلاستیک، رفتار بعد از شکست^۱)، مدل رفتاری، شرایط اولیه مانند حالت برجای تنش، نیروی منفذی، اشباع و بارگذاری، باید به مدل اعمال شود.

خاک‌های با ماهیت دانه‌ای رفتاری شبیه به مدل موهر – کولمب دارند. با کمی تغییر در مدل موهر – کولمب ساده و در نظر گرفتن رفتارهای غیرخطی مصالح می‌توان مدل را به واقعیت نزدیک کرد.

همانطور که در شکل (۵-۱) ملاحظه می‌شود رفتار خاک‌های دانه‌ای در شرایط متراکم و سست متفاوت است و برای در نظر گرفتن مشخصات کامل مدل باید دو نمودار تنش و تغییرات حجمی در مقابل کرنش بررسی شود. همان‌طور که در شکل زیر مشخص شده خاک‌های دانه‌ای در شرایط متراکم رفتار نرم‌شونده دارند و نیز دارای زاویه اتساع متغیر هستند. در حالت سست، خاک رفتار الاستوپلاستیک کامل داشته و زاویه اتساع صفر است [۴۹].

¹ Post-failure behavior



شکل ۵-۱: رفتار ماسه خشک در حالت متراکم و سست [۱۴]

در اکثر بررسی‌های پایداری شیب‌ها نیز از مدل مشخصه موهر-کولمب برای تعریف خواص مصالح خاک (سنگ) استفاده می‌شود. معیار موهر-کولمب مقاومت برشی مصالح را به چسبندگی، تنش نرمال و زاویه اصطکاک داخلی مصالح مربوط می‌سازد.

تابع سطح گسیختگی در مدل موهر - کولمب به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$f = \sigma_m \sin \phi + \bar{\sigma} \cos \theta - \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \sin \phi \sin \theta - c \cos \phi = 0 \quad (1-5)$$

که در این رابطه ϕ زاویه اصطکاک داخلی، θ زاویه لود^۱، c چسبندگی است. از طرفی σ از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (2-5)$$

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{1}{2} (S_x^2 + S_y^2 + S_z^2) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-5)$$

^۱ Lode Angle

مدل رفتاری استفاده شده در تحلیل‌ها، مدل الاستو پلاستیک موهر-کولمب است، که در آن مقادیر شش پارامتر ورودی، مدول حجمی K ، مدول برشی G ، مقاومت کششی T ، زاویه اصطکاک داخلی ϕ ، چسبندگی c و زاویه اتساع ψ باید تعیین شود. اگر بارگذاری شامل نیروی وزن مدل نیز باشد، در تحلیل‌ها علاوه بر پارامترهای مدل رفتاری باید مقدار چگالی نیز مشخص شود [۱۴].

مقادیر مدول حجمی و مدول برشی از روابط (۴-۵) و (۵-۵) بدست آمده‌اند.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (۴-۵)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۵-۵)$$

۵-۲-۱-۳ شرایط اولیه

قبل از هر حفاری یا ساختمان‌سازی یک حالت برجایی از تنش در زمین وجود دارد که به آن تنش برجا گفته می‌شود. در نرم افزار FLAC3D، این حالت تنش برجا را می‌توان با استفاده از وارد کردن شرایط اولیه ایجاد کرد. بطور ایده‌آل، اطلاعات حالت اولیه از اندازه‌گیری‌های زمین بدست می‌آید. اما در مواقعی که این اندازه‌گیری‌ها موجود نیست، مدل برای بازه‌ای از شرایط ممکن، می‌تواند اجرا گردد. اگرچه طول بازه معمولاً نامحدود می‌باشد، اما چند فاکتور محدود کننده وجود دارد (مانند، سیستم باید در حالت تعادل باشد، معیار شکست انتخاب شده نباید هیچگاه نقض گردد).

در یک لایه یکنواخت خاک یا سنگ با سطح آزاد، تنش‌های عمودی برابر با ρgz می‌باشند، که در آن g ، شتاب ثقل زمین، ρ چگالی جرمی مواد و z عمق از سطح زمین می‌باشند. یک باور معمول، این است که یک نسبت طبیعی بین تنش عمودی و افقی وجود دارد، که با فرمول $\frac{\nu}{1-\nu}$ بدست می‌آید. در این رابطه ν ضریب پواسون است. این فرمول با توجه به فرض وارد شدن ناگهانی نیروی ثقل به جرمی از مواد الاستیک که از جابجایی جانبی آنها جلوگیری می‌شود، بدست آمده است. این شرایط به سبب وجود

جابجایی‌های تکتونیکی، شکست مواد و غیره خیلی بندرت فراهم می‌گردد. البته اگر ما اطلاعات کافی از تاریخچه‌ی حجم مشخصی از مواد داشته باشیم، می‌توانیم کل مراحل را بصورت عددی شبیه‌سازی کنیم، تا به شرایط اولیه برای کارهای مهندسی برسیم. اما این روش در اغلب موارد غیرممکن است. بطور معمول می‌توان، یک دسته از تنش‌ها را در شبکه وارد کرده و سپس برنامه را در FLAC3D اجرا نموده تا وقتی که حالت تعادل بدست آید [۴۹].

۵-۲-۱-۴ شرایط مرزی

شرایط مرزی در یک مدل عددی عبارتند از مقدار متغیرهای زمین (مانند تنش و جابجایی)، که برای مرز شبکه‌ی هندسی عددی مشخص می‌گردد. مرزها به دو دسته‌ی مرزهای واقعی و مرزهای مصنوعی تقسیم می‌شوند. مرزهای واقعی، مانند: سطح تونل و سطح زمین، مرزهایی هستند که بطور واقعی وجود دارند. مرزهای مجازی بطور واقعی وجود ندارند، اما برای مدلسازی و محصور کردن مدل نامحدود ساخته می‌شوند. شرایطی که در هر دو نوع مرز وارد می‌گردد، مشابه هستند. شرایط مکانیکی که به مرزها وارد می‌گردد به دو حالت کلی است [۴۹]:

۱- تنش معین ۲- جابجایی معین.

۵-۲-۱-۵ بارگذاری

با اعمال شرایط بارگذاری مختلف بر روی مدل در مراحل مختلف تحلیل، امکان شبیه‌سازی تغییرات در بارگذاری فیزیکی نظیر توالی حفاری یا ساخت وجود دارد. تغییرات در بارگذاری به چند روش از جمله اعمال مرزهای جابجایی یا تنش جدید، تغییر در پارامترهای مقاومتی مصالح و یا تغییر در مدل رفتاری مصالح امکان‌پذیر است [۴۹].

۵-۲-۱-۶ اجرای محاسبات مدل

قبل از اینکه یک اجرای نهایی از مدل انجام گیرد، بهتر است ابتدا یک یا دو مدل اجرا گردد. نتایج اجرای مدل باید مورد بررسی قرار گیرد و از جواب مسأله اطمینان حاصل شود. بعد از اطمینان از صحت نتایج مدل، با افزودن شرایط مختلف به مدل فرآیند کامل محاسبه قابل انجام می‌باشد. در هر مرحله از محاسبات، با توقف اجرای برنامه، نتایج حاصله باید کنترل گردند. در صورت صحت این نتایج انجام محاسبات ادامه یافته، در غیر این صورت مدل مربوطه باید اصلاح گردد [۴۹].

۵-۲-۱-۷ معیار همگرایی

معیار همگرایی FLAC3D مشخص می‌کند که، آیا مدل به تعادل رسیده است یا نه؟ ماکزیمم نیروی نامتعادل^۱ گرهی یکی از معیارهای همگرایی می‌باشد. نیروی نامتعادل برابر با مجموع نیروهای وارده به هر گره، از طرف المان‌های مجاور می‌باشد. اگر یک گره در تعادل باشد، مجموع نیروها برابر صفر است. بنابراین، نیروی نامتعادل مقدار فاصله از حالت تعادل در یک گره خاص را بیان می‌کند. برای تعیین اینکه آیا مدل به تعادل رسیده است یا نه؟ برنامه، گره‌های با بیشترین نیروی نامتعادل را جستجو می‌کند. سپس این حداکثر نیروی نامتعادل بوسیله نیروی جاذبه وارده بر هر گره نرمال می‌شود. در مدلسازی‌های عددی، نیروی نامتعادل هیچگاه بطور دقیق، صفر نخواهد شد و یک حد پایین مجاز باید انتخاب شود [۴۹].

¹ Maximum unbalanced force

۳-۵ تغییرات و جابجایی‌های مجاز

جابجایی‌های تراز سطح زمین یا طبقه زیرین سازه‌ها، را می‌توان به عنوان تابعی از نشست‌های سطحی و تفاضلی بیان کرد. برای جلوگیری از این جابجایی‌ها که ممکن است سبب ایجاد مشکلاتی شود، پیشنهاد می‌شود تا ابزارهای هشدار دهنده و یا اخطار دهنده تغییر تراز نصب شود.

وقتی که سیستم هشدار دهنده نشانه‌هایی از جابجایی بیش از حد مجاز (غیرمجاز) لایه‌های زمین را نشان می‌دهد، فعالیت‌های ساخت باید متوقف شود و اندازه‌گیری‌ها باید با دقت برداشت شود و علل آنها باید بررسی شود تا نشست به زیر مقدار هشدار برسد [۴۶].

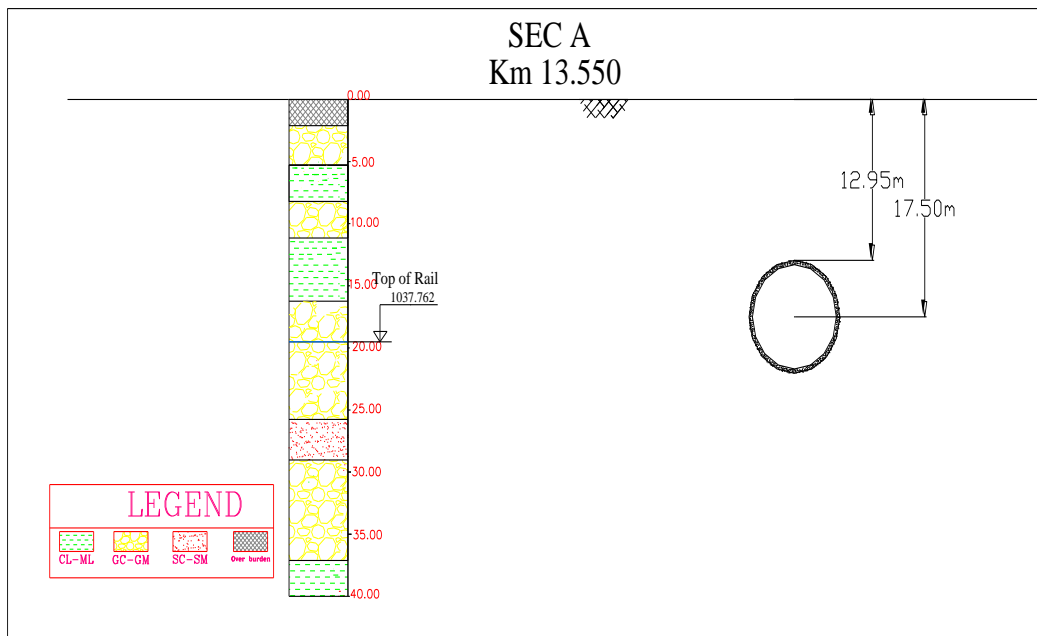
می‌توان فعالیت‌های ساخت را وقتی که نشست‌ها به کمتر از مقدار بحرانی رسید، دوباره ادامه داد. نمونه‌ای از شرایط بحرانی در جدول (۵-۱) آورده شده است.

جدول ۵-۱: هشدار دهنده تغییرات و طبقه بندی آلام ها [۴۶]

تراز اعلان خطر	تراز هشدار دهنده	
میزان نشست میلی متر	میزان نشست میلی‌متر	
۴۰	۲۰	ساختمان‌های تحت تاثیر
۵۰	۳۰	خیابان‌های عمومی و پارک‌ها

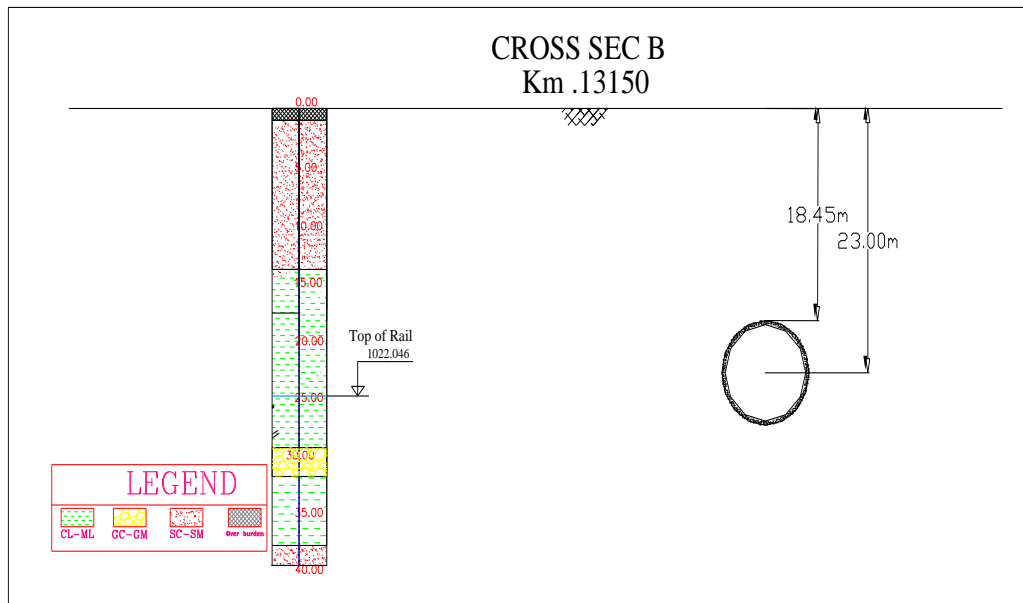
۴-۵ تحلیل عددی

به منظور تحلیل عددی و امکان سنجی استفاده از TBM در وضعیت بدون اعمال فشار به سینه کار در محدوده ایستگاه M2 تا L2، این بررسی ها در دو مقطع زمین شناسی تهیه شده در فواصل $۱۳+۵۵۰^۱$ (SECTION A) و $۱۳+۱۵۰$ (SECTION B) انجام شد. این مقاطع طوری انتخاب شده اند که حتی المقدور معرف زمین شناسی محدوده بین ایستگاه M2 تا L2 باشند، شکل (۲-۵) و (۳-۵).



شکل ۲-۵: مقطع تحلیل شده در فواصل $۱۳+۵۵۰$ SEC A- [۴۳]

^۱ ۱۳ کیلومتر بعلاوه ۵۵۰ متر



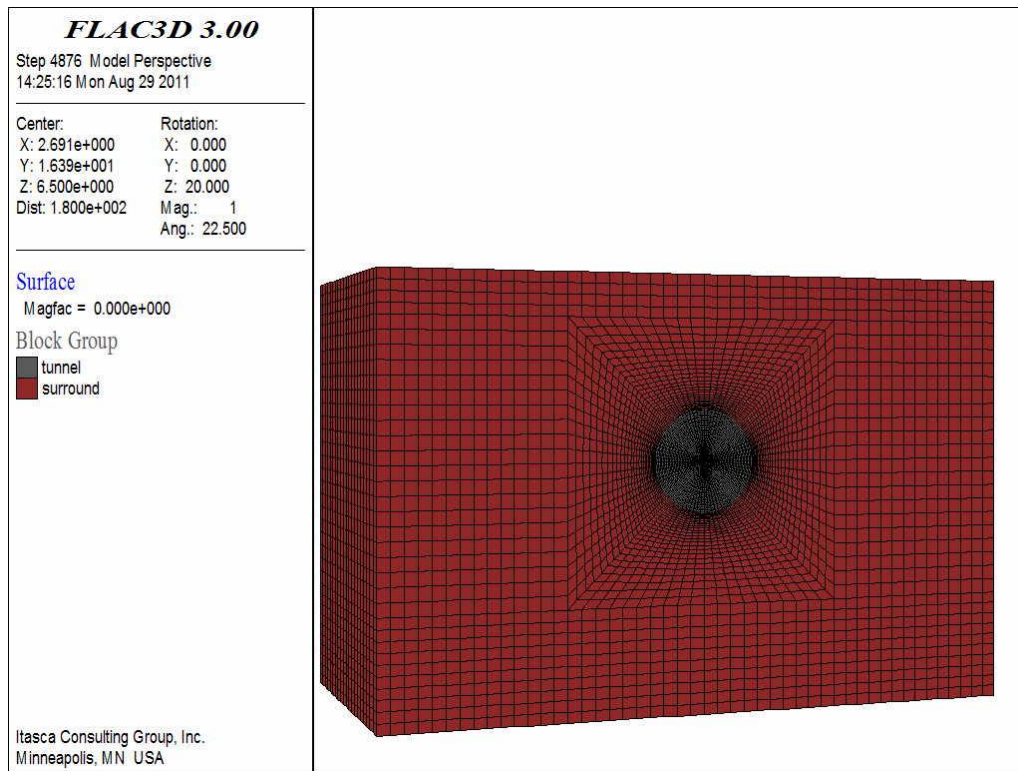
شکل ۳-۵: مقطع تحلیل شده در فواصل ۱۳+۱۵۰-SECB [۴۳]

۵-۴-۱ مقطع ۱۳+۵۵۰ (SECTION A)

همانطور که در شکل (۳-۴) مشاهده می‌شود و با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه، مقطع مورد نظر در محدوده‌ای شامل سنگ‌هایی با ابعاد بزرگ واقع است که این عامل تاثیر مثبت روی حفاری در حالت باز دارد به دلیل اینکه حفاری با اعمال فشار در این نوع زمین باعث بالا رفتن گشتاور و در نتیجه سایش ابزار برش خواهد شد و بهتر آن است در این مناطق در حالت باز یا اینکه با اعمال فشار پایین حفاری نمود. به همین دلیل در ادامه به تحلیل عددی در این محدوده برای حفاری در حالت باز پرداخته می‌شود.

۵-۴-۱-۱ المان بندی

با توجه به قطر حفاری تونل (۹/۴۳ متر) و قرار گرفتن محور تونل در عمق ۱۷/۵ متری از سطح زمین و به منظور به حداقل رساندن تاثیر مرزهای مدل در محاسبات، شبکه تفاضل محدود به طول ۶۰ متر، عرض ۳۰ متر و ارتفاع ۴۰ متر ایجاد شد (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵: شبکه تفاضل محدود ایجاد شده در نرم افزار FLAC3D

۴-۵-۱-۲ انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

با توجه به جنس خاک مدل رفتاری استفاده شده برای تحلیل موهر-کلمب انتخاب شده است.

پارامترهای مقاومتی و خصوصیات مقطع A که در مدلسازی عددی استفاده شده است در جدول (۴-۵)

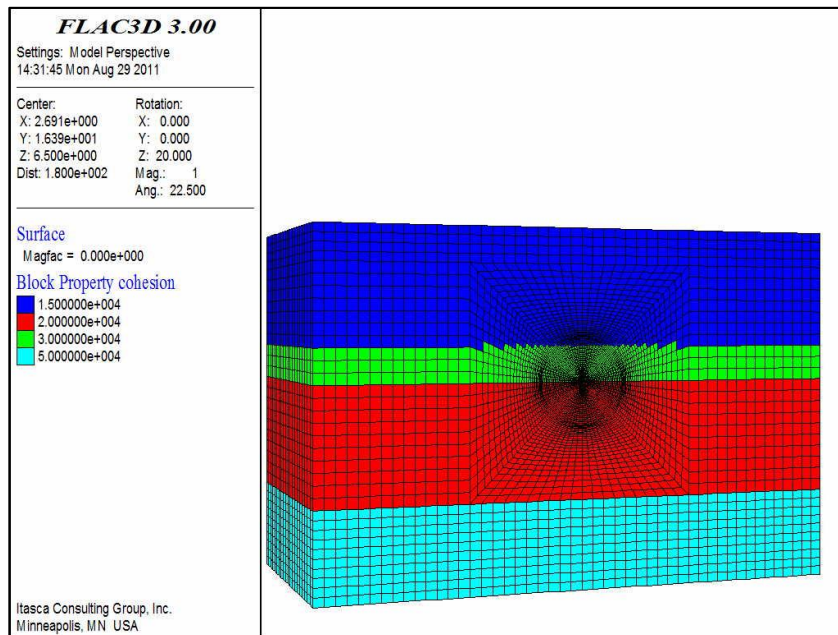
آورده شده است.

جدول ۲-۵: مقطع A، پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های خاک در مقطع ۵۵۰+۱۳ [۴۳]

شماره لایه	عمق	نوع لایه	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (degree)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	وزن مخصوص (Kg/m3)	مقاومت برشی (Mpa)	مدول بالک (Mpa)
۱	۰-۲	روباره	-	-	-	-	-	-	-
۲	۲-۱۳	گراول رسی	۱۵	۳۵	۰/۳	۳۵	۱۸۰۰	۱۳/۵	۲۹/۲
۳	۱۳-۱۷	سیلت	۳۰	۲۸	۰/۳۵	۳۰	۱۵۰۰	۱۱/۱	۳۳/۴
۴	۱۷-۳۰	گراول سیلتی	۲۰	۳۵	۰/۳	۸۰	۱۹۲۰	۳۰/۸	۶۶/۷
۵	۳۰-۴۰	گراول رسی	۵۰	۳۰	۰/۳۵	۵۰	۱۹۵۰	۱۸/۵	۵۵/۶

در شکل (۵-۵) مدل تفاضل محدود که خصوصیات لایه های مختلف برای آن مطابق جدول بالا

تخصیص یافته است مشاهده می شود.



شکل ۵-۵: لایه های مختلف خاک در مدل تفاضل محدود

۵-۴-۱-۳ بارگذاری

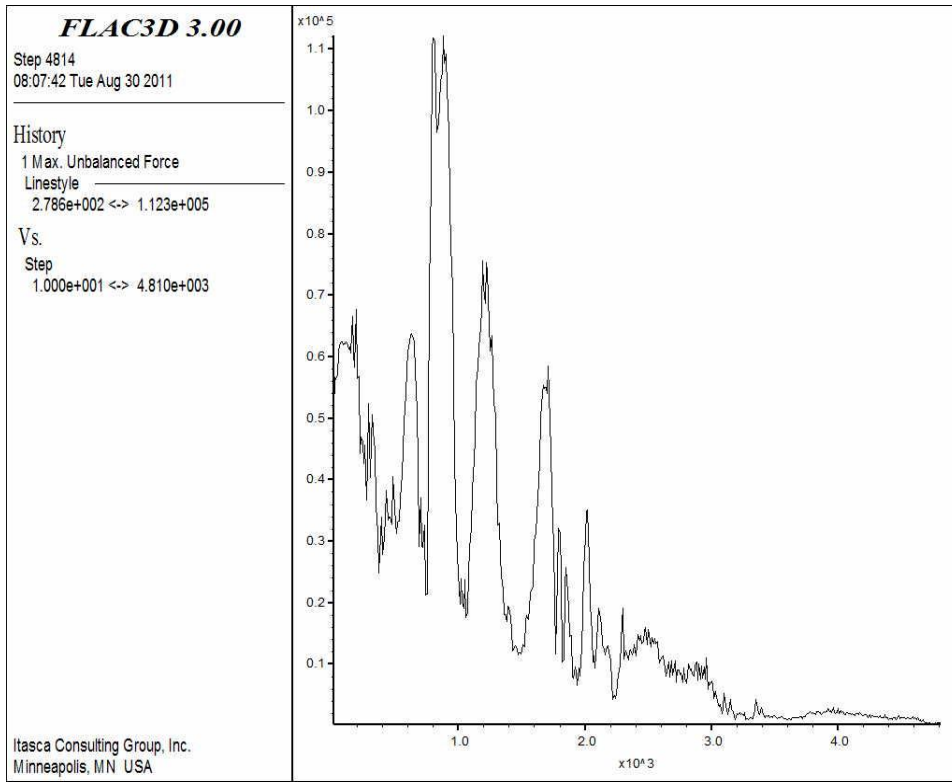
در این تحلیل بارگذاری شامل نیروی وزن لایه‌ها و بار ترافیک در سطح به میزان ۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع می باشد.

۵-۴-۱-۴ اعمال شرایط اولیه و مرزی

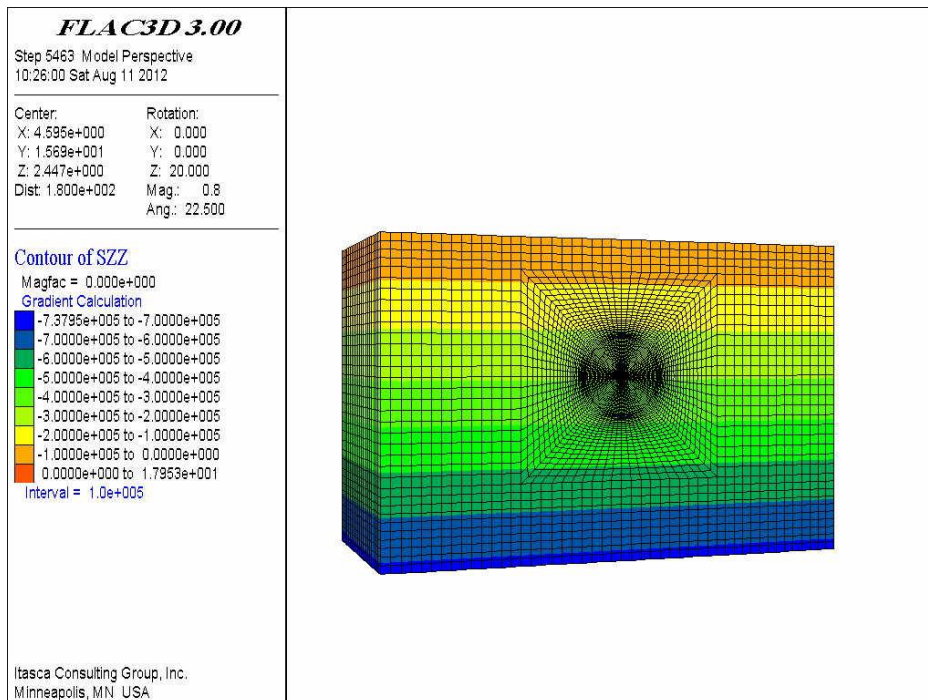
در تمامی مدل‌های عددی بایستی شرایط مرزی را بگونه‌ای تعیین کرد که با شرایط واقعی زمین قبل از حفر یک تونل یکسان باشد. بدین منظور برای اعمال شرایط مرزی واقعی، مرز مدل در نقاط مرزی ثابت شده است. بنابراین جابه‌جایی در جهت افقی نقاط انتهایی چپ و راست و همچنین جابه‌جایی در جهت قائم نقاط کف مدل صفر شده‌اند. مقدار تنش‌های برجا نیز بر اساس وزن مخصوص لایه‌های خاک و ارتفاع آنها محاسبه شده است.

۵-۴-۱-۵ انجام محاسبات اولیه

پس از اعمال شرایط اولیه و مرزی و بارگذاری قبل از حفر تونل یک بار محاسبات انجام می‌شود تا مدل به تعادل برسد. وضعیت نیروهای نامتعادل و تنش‌های قائم پس از به تعادل رسیدن مدل به ترتیب در شکل‌های (۵-۶) و (۵-۷) نمایش داده شده است.



شکل ۵-۶: تاریخچه بیشینه نیروهای نامتعادل



شکل ۵-۷: کانتور تنش‌های قائم در مدل عددی

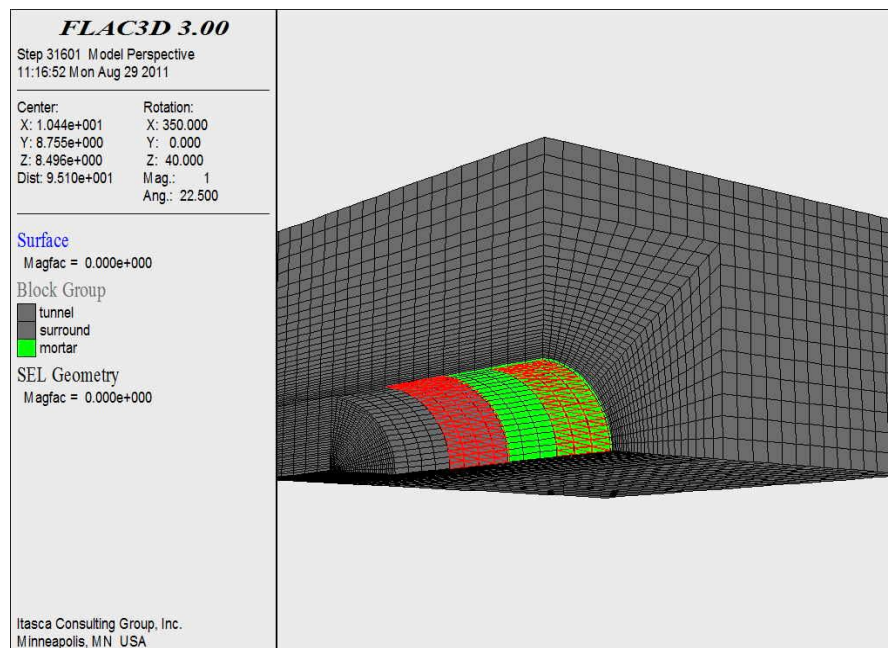
۵-۴-۱-۶ شبیه سازی شرایط حفاری در حالت باز

در این مرحله حفاری با حذف عناصر داخل تونل آغاز می‌شود. در این وضعیت هیچگونه فشاری به سینه‌کار وارد نمی‌شود. طول هر سیکل از حفاری $1/5$ متر معادل عرض سگمنت‌ها در نظر گرفته شده است. در هر مرحله از حفاری برای در نظر گرفتن اثر شیلد در محدود کردن جابجایی‌ها با استفاده از المان پوسته^۱، شیلد را وارد مدل می‌کنیم. لازم به ذکر است به دلیل اختلاف قطر حفاری و قطر شیلد در واقعیت (حدود ۱-۴ سانتی‌متر) در مدل قبل از نصب شیلد اجازه داده می‌شود این میزان جابجایی در دیواره تونل رخ دهد. این روند ادامه پیدا می‌کند تا تمام شیلد وارد تونل شود. طول این مرحله ۱۰ متر (معادل طول شیلد) می‌باشد. پس از وارد شدن کامل شیلد در مرحله بعدی حفاری، سگمنت‌گذاری آغاز می‌شود. با توجه به اختلاف قطر حفاری و قطر خارجی سگمنت‌گذاری، بین سگمنت و دیواره تونل در حدود ۱۵ سانتی متر فاصله وجود دارد که به وسیله تزریق تماسی پر می‌شود. به منظور مدل کردن سگمنت نیز از المان پوسته استفاده شده است. همچنین مدل رفتاری مورتار الاستیک در نظر گرفته شده است. مشخصات تونل، شیلد، لاینینگ و مورتار در جدول (۵-۳) آورده شده است. شکل (۵-۸) نمایی از تونل، شیلد، مورتار و سگمنت مدل شده را نشان می‌دهد.

¹ shell

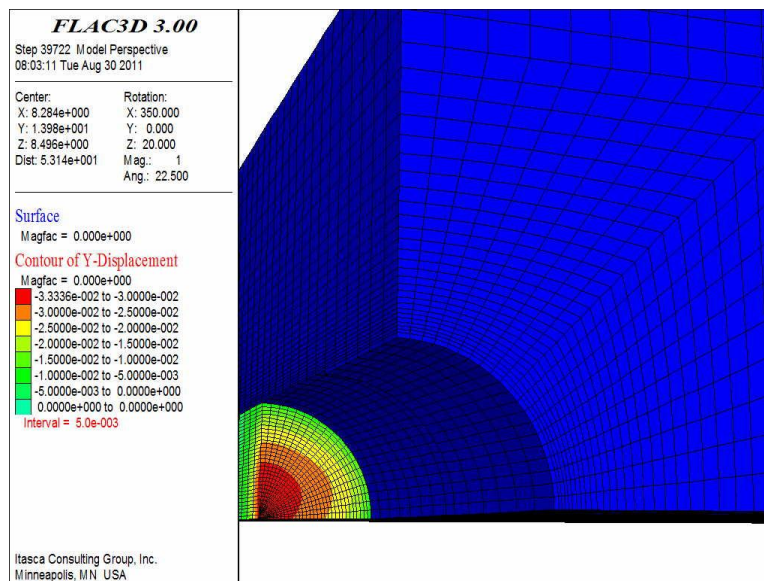
جدول ۵-۳ مشخصات تونل، شیلد، لاینینگ و مورتار مورد نیاز برای مدلسازی

متر	مشخصات	
۹/۴۳	قطر حفاری	
۹/۳۷	قطر خارجی شیلد	
۹/۳	قطر داخلی شیلد	
۹/۱	قطر خارجی لاینینگ	
۸/۴۰	قطر داخلی لاینینگ	
ضریب پواسون	مدول یانگ	مشخصات
۰/۱۵	2E+11	شیلد
۰/۲	8.0E+06	مورتار
۰/۱۵	3.5E+07	لاینینگ

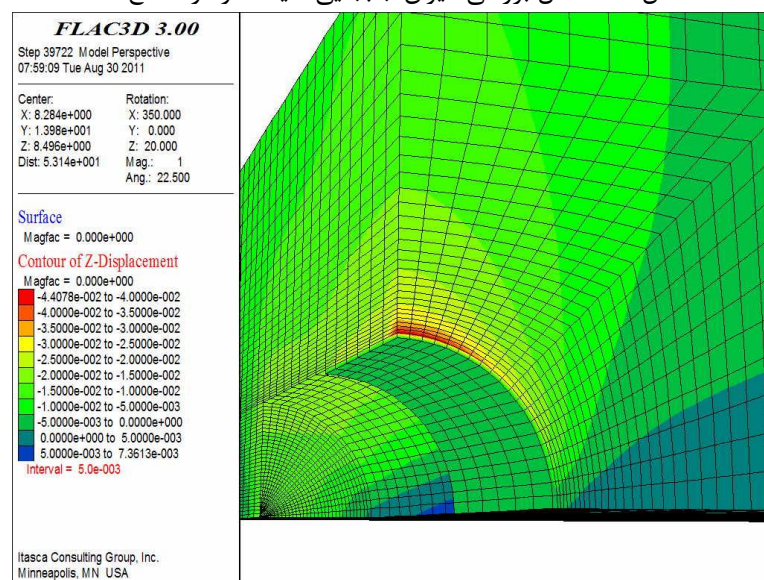


شکل ۵-۸: نمای تونل، شیلد، مورتار و سگمنت مدل شده در مقطع A

وضعیت جابجایی سینه کار و تاج تونل در جهات Y و Z پس از حفر تونل و ۱۰ متر سگمنت گذاری در اشکال (۵-۹) و (۵-۱۰) نمایش داده شده است که میزان جابجایی حداکثر نقاط شاهد در تاج تونل و سینه کار به ترتیب ۴/۴ سانتی متر و ۳/۳ سانتی متر می باشد.

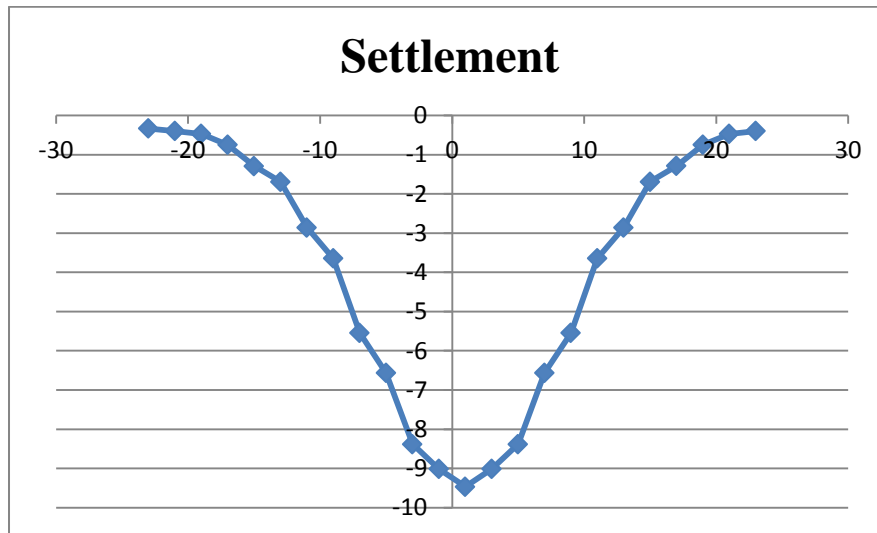


شکل ۵-۹: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار در مقطع A

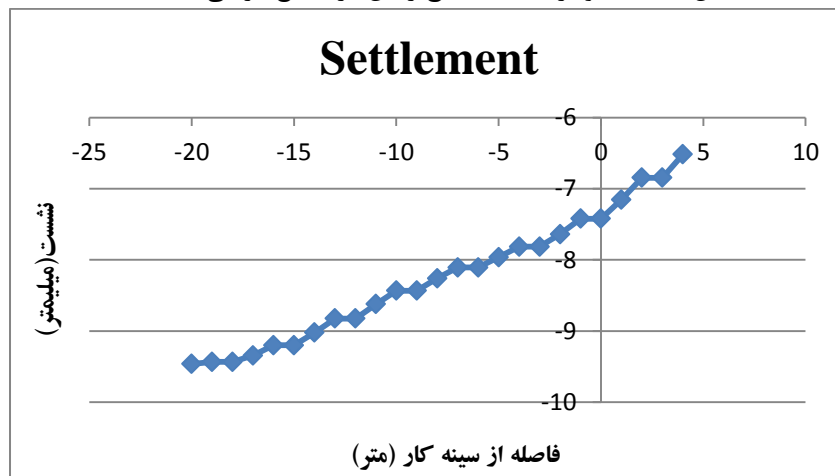


شکل ۵-۱۰: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل در مقطع A

وضعیت نشست سطحی زمین در مقطع عرضی حفاری و همچنین در مقطع طولی به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۱) و (۵-۱۲) نمایش داده شده است.



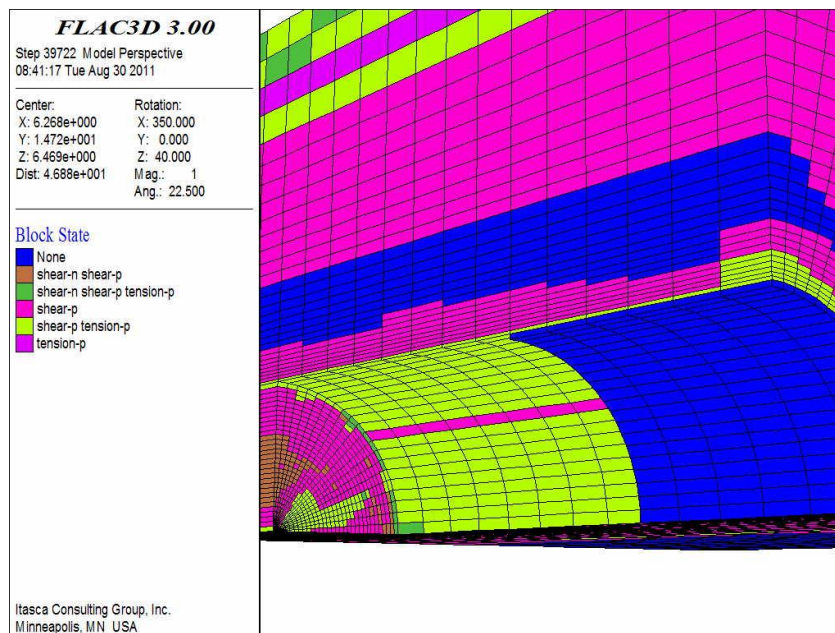
شکل ۵-۱۱: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی-SECA



شکل ۵-۱۲: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی-SECA

با توجه به اینکه مقدار نشست اتفاق افتاده در تاج تونل و سینه‌کار به ترتیب ۴/۴ سانتی‌متر و ۳/۳ سانتی‌متر می‌باشد و با توجه به نشست‌های بحرانی که در جدول (۵-۱) نشان داده شده می‌توان نتیجه گرفت نشست اتفاق افتاده در تاج تونل و همچنین مقدار نشست در سینه‌کار از حد هشدار تجاوز کرده‌اند

در نتیجه خاک در این محدوده فاقد پایداری لازم بوده به همین دلیل حالت گسیختگی در این محدوده اتفاق می افتد. منطقه پلاستیک اطراف تونل در شکل (۵-۱۳) نمایش داده شده است. این شکل گویای گسیختگی انجام شده در سینه کار می باشد.

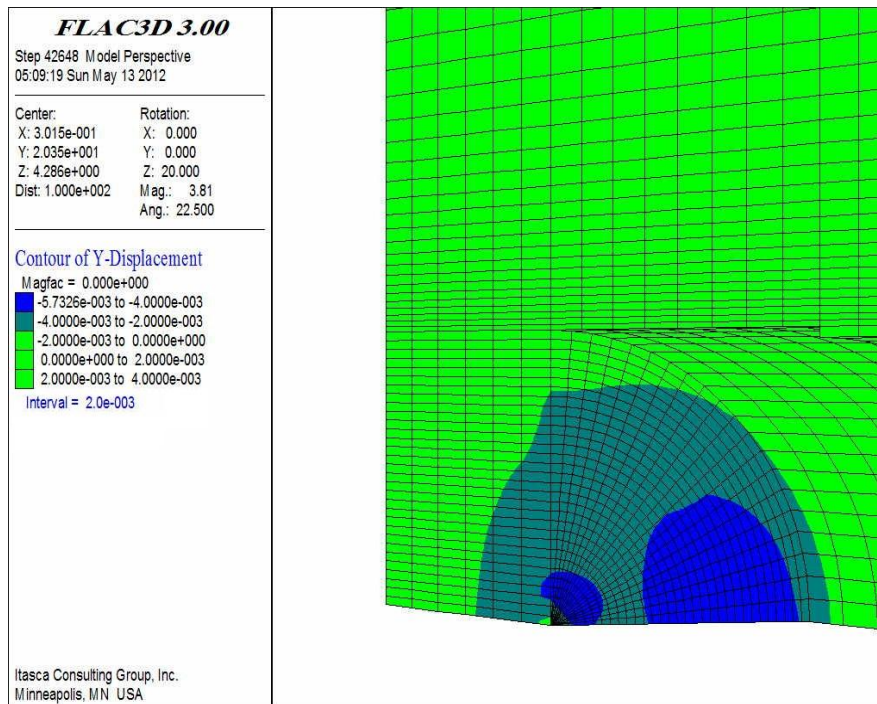


شکل ۵-۱۳: محدوده پلاستیک اطراف تونل-SECA

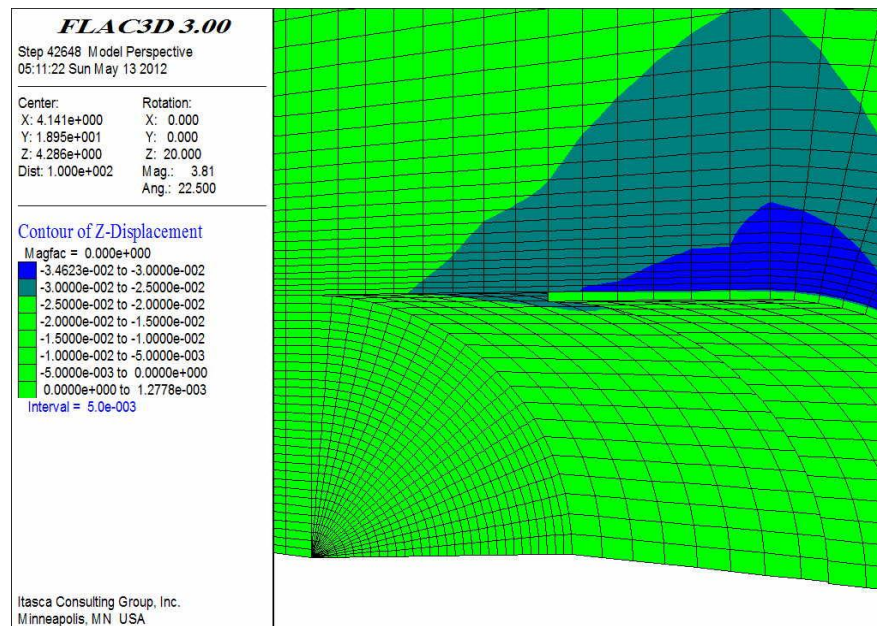
با توجه به اینکه در محدوده مذکور به دلیل نشست‌های بدست آمده امکان حفاری در حالت باز وجود ندارد سعی می شود تا با اعمال ۵۰ درصد و همچنین ۱۰۰ درصد فشار محاسبه شده در این محدوده که مقدار مینیمم ۰/۷ بار می باشد پایداری تونل را مورد بررسی قرار داد و به نتایج مناسب تر برای کاهش هزینه های پروژه دست یافت.

- اعمال ۵۰ درصد فشار محاسبه شده

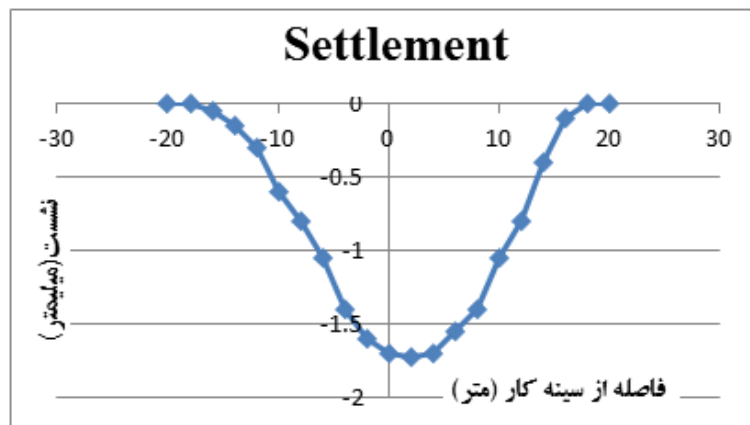
مانند مراحل قبل پس از مدلسازی و وارد کردن خصوصیات لایه ها به مدل به حفاری تونل با اعمال فشار ۰/۳۵ بار پرداخته می شود که خروجی نشست در سینه کار و تاج تونل به شکل (۵-۱۴) و (۵-۱۵) می باشد.



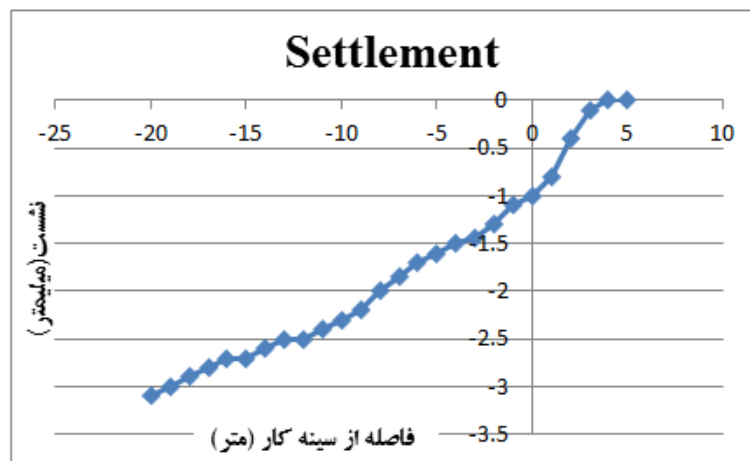
شکل ۵-۱۴: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار در مقطع A با اعمال فشار ۵۰ درصد



شکل ۵-۱۵: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل در مقطع A با اعمال فشار ۵۰ درصد



شکل ۵-۱۶: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی با اعمال فشار ۵۰ درصد-SECA

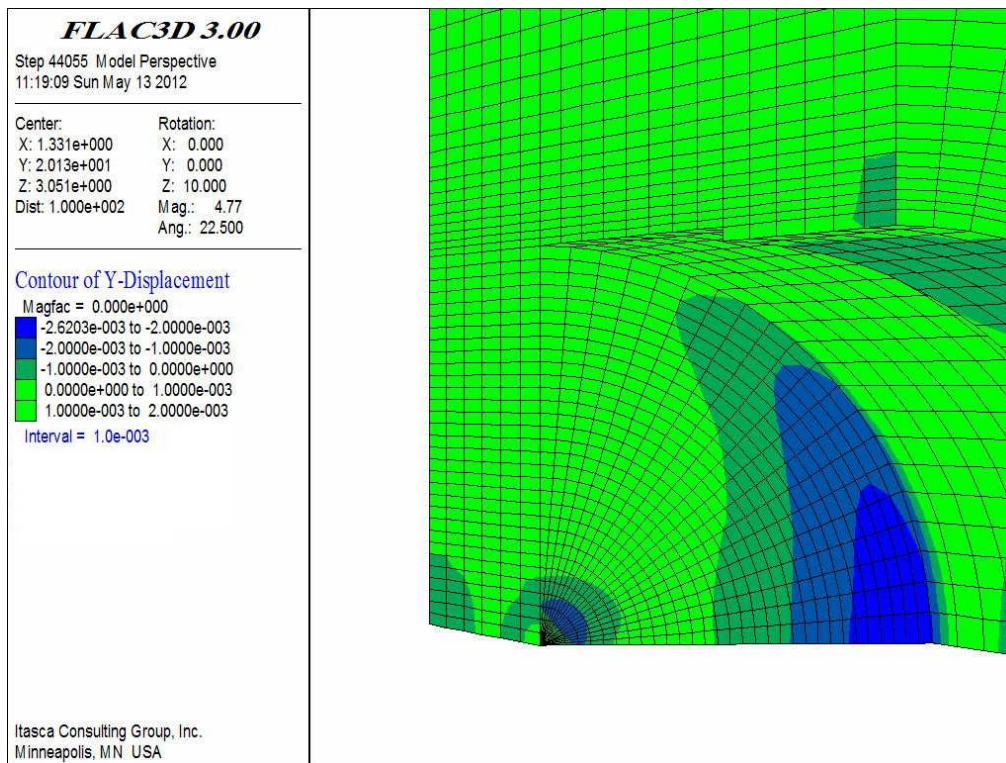


شکل ۵-۱۷: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی با اعمال فشار ۵۰ درصد-SECA

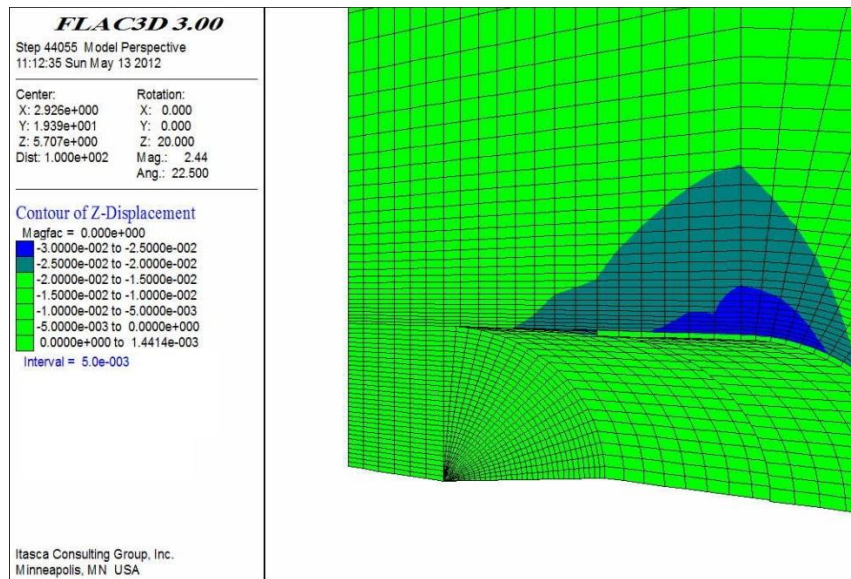
پس از حل مدل با توجه به اهمیت جبهه کار تونل مشخص شد که مقدار نشست در سینه کار ۵/۷ میلی‌متر می‌باشد که این رقم مقدار ناچیزی می‌باشد. همچنین از پروفیل عرضی و طولی در شکل‌های (۵-۱۶) و (۵-۱۷) نیز مشخص می‌شود که احتمال خطر نشست بسیار کاهش یافته که این موضوع می‌تواند گویای این باشد که در این محدوده می‌توان با فشار پایین حفاری نمود این کاهش حفاری باعث کاهش مصالح درون محفظه فشار شده و در نتیجه مقدار فوم تزریقی کاهش می‌یابد که این خود باعث صرفه جویی در هزینه‌های پروژه می‌شود.

- اعمال ۱۰۰ درصد فشار محاسبه شده

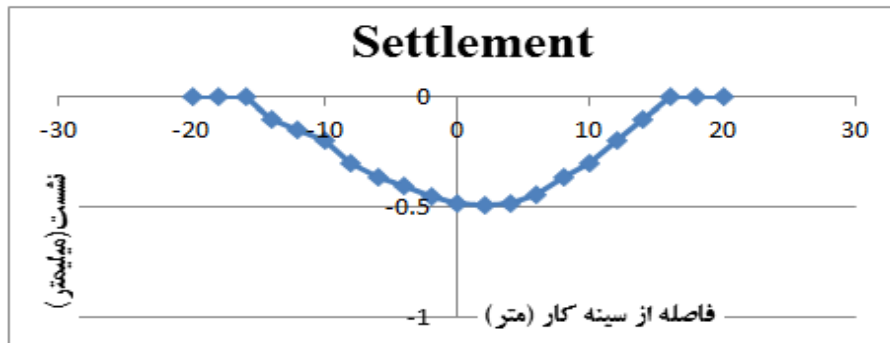
در این قسمت ۱۰۰ درصد فشار محاسبه شده به سینه کار اعمال می شود که مقدار آن ۰/۷ بار است. در ادامه خروجی نشست در سینه کار و تاج تونل در شکل های (۵-۱۸) و (۵-۱۹) آورده شده است. همچنین پروفیل عرضی و طولی مسیر مذکور در شکل های (۵-۲۰) و (۵-۲۱) مشاهده می شود.



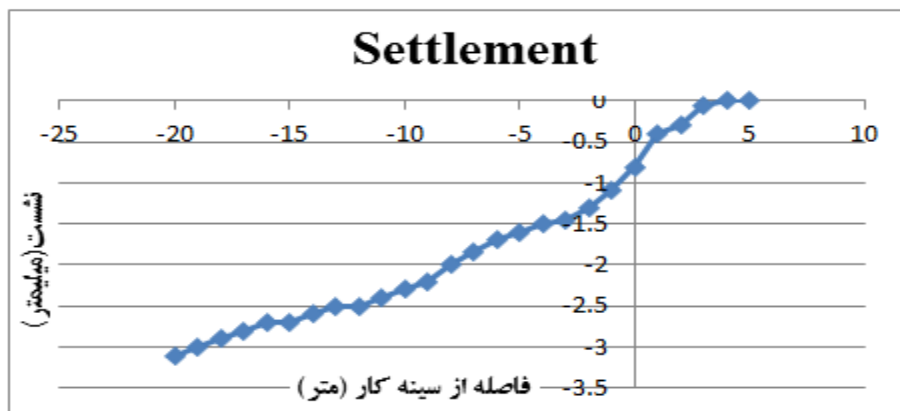
شکل ۵-۱۸: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار در مقطع A با اعمال فشار ۱۰۰ درصد



شکل ۵-۱۹: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل در مقطع A با اعمال فشار ۱۰۰ درصد



شکل ۵-۲۰: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی با اعمال فشار ۱۰۰ درصد-SECA



شکل ۵-۲۱: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی با اعمال فشار ۱۰۰ درصد-SECA

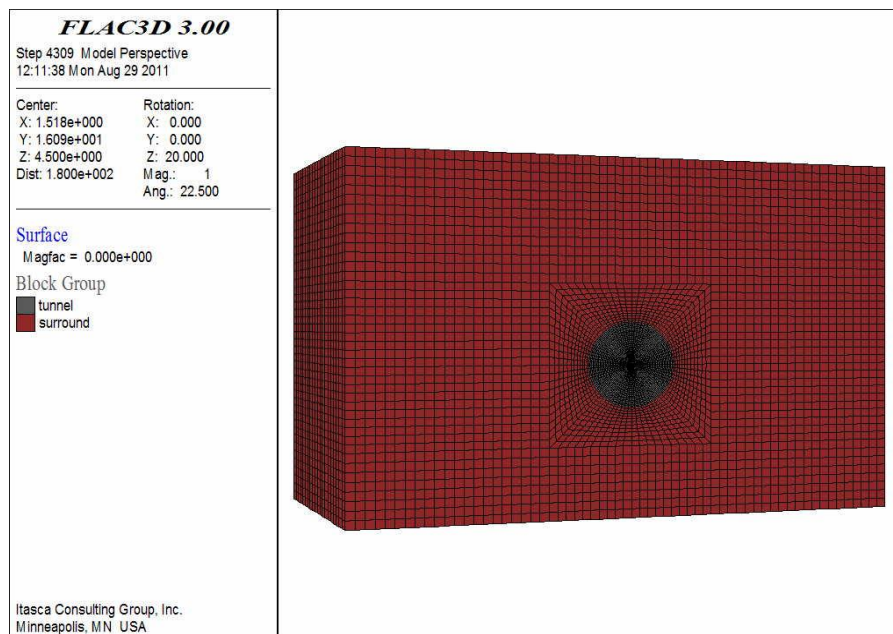
همانطور که از نتایج مشخص است نشست در سینه کار به $2/6$ میلی متر رسیده که نسبت به حالت اعمال فشار 50 درصدی کاهش یافته و این خود گویای تاثیر مثبت فشار اعمالی به سینه کار می باشد.

۵-۴-۲ مقطع ۱۳+۱۵۰ (SECTION B)

مقطع مورد نظر در محدوده ای واقع می باشد که از خاک های دانه ریز تشکیل شده است و احتمال نشست در این مقطع نسبت به مقطع قبلی بیشتر می باشد. با این حال برای رسیدن به نتیجه قطعی در ادامه به تحلیل عددی در مقطع مورد نظر پرداخته می شود.

۵-۴-۲-۱ المان بندی

با توجه به قطر حفاری تونل ($9/43$ متر) و قرار گرفتن آکس تونل در عمق 23 متری از سطح زمین و به منظور به حداقل رساندن تاثیر مرزهای مدل در محاسبات شبکه تفاضل محدود به طول 60 متر، عرض 30 متر و ارتفاع 40 متر ایجاد شد، (شکل ۵-۲۲).



شکل ۵-۲۲: شبکه تفاضل محدود ایجاد شده در نرم افزار FLAC3D

۵-۴-۲ انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

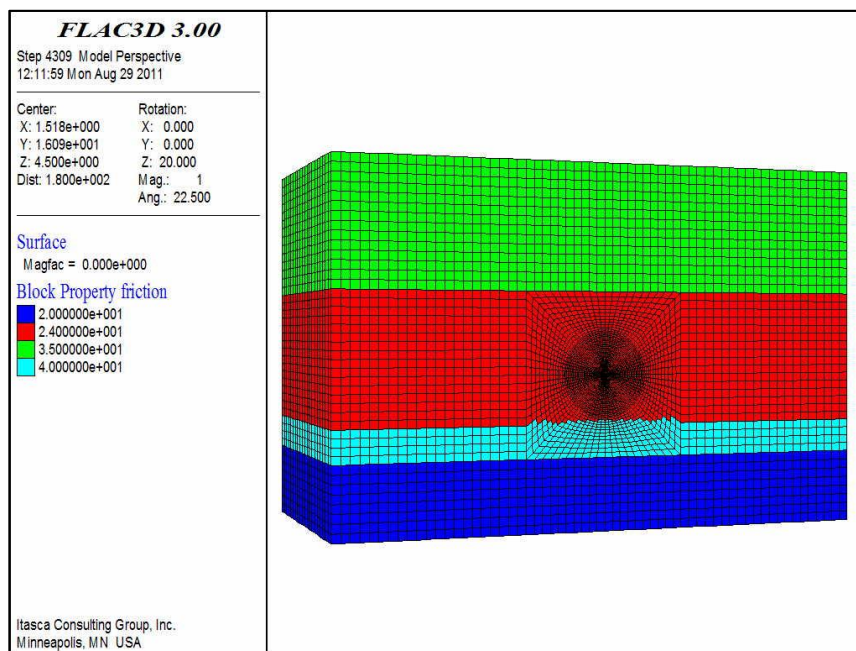
با توجه به جنس خاک مدل رفتاری استفاده شده برای تحلیل موهر-کلمب انتخاب شده است. نام لایه‌ها، پارامترهای مقاومتی و خصوصیات آنها که در مدلسازی عددی استفاده شده است در جدول (۵-۴) آورده شده است.

جدول ۵-۴: مقطع B - پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های خاک کیلومتر از ۱۵۰+۱۳ [۴۳]

شماره لایه	عمق	نوع لایه	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک داخلی (degree)	ضریب بواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	وزن مخصوص (Kg/m ³)	مقاومت برشی (Mpa)	مدول بالک (Mpa)
۱	۰-۲	روباره	-	-	-	-	-	-	-
۲	۲-۱۴	ماسه سیلتی همراه گراول	۸	۳۰	۰/۳	۸	۱۹۰۰	۳۰/۸	۶۶/۷
۳	۱۴-۲۸	سیلت رسی	۲۰	۲۴	۰/۳۵	۳۰	۱۷۰۰	۱۱/۱	۳۳/۳
۴	۲۸-۳۲	گراول سیلتی با ماسه	۱۱	۴۰	۰/۳	۱۰۰	۲۰۰۰	۳۸/۵	۸۳/۳
۵	۳۲-۴۰	رس سیلتی	۲۵	۲۰	۰/۳۵	۳۰	۱۸۰۰	۳۰/۸	۳۳/۳

در شکل (۵-۲۳) مدل تفاضل محدود که خصوصیات لایه‌های مختلف برای آن مطابق جدول بالا

تخصیص یافته است را مشاهده می‌کنید.



شکل ۵-۲۳: لایه های مختلف خاک در مدل تفاضل محدود در *SECB*

۵-۴-۲-۳ اعمال شرایط اولیه ، مرزی

شرایط مرزی در این مقطع مطابق با شرایط مرزی توضیح داده شده در بند ۵-۴-۱-۳ برای مقطع A

می باشد.

۵-۴-۲-۴ بارگذاری

در این تحلیل بارگذاری نیز شامل نیروی وزن لایه ها و بار ترافیک در سطح به میزان ۲۰ کیلونیوتن

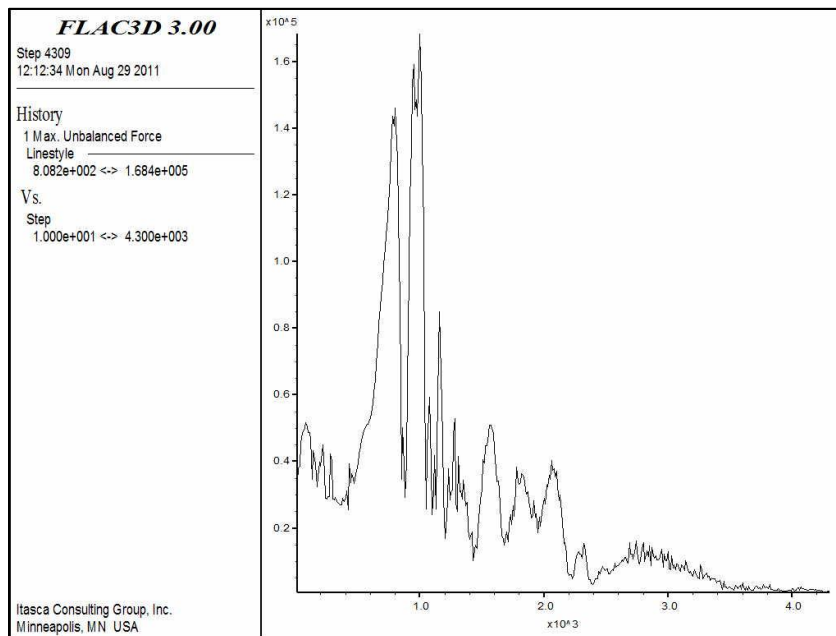
بر متر مربع در نظر گرفته می شود.

۵-۴-۲-۵ انجام محاسبات اولیه

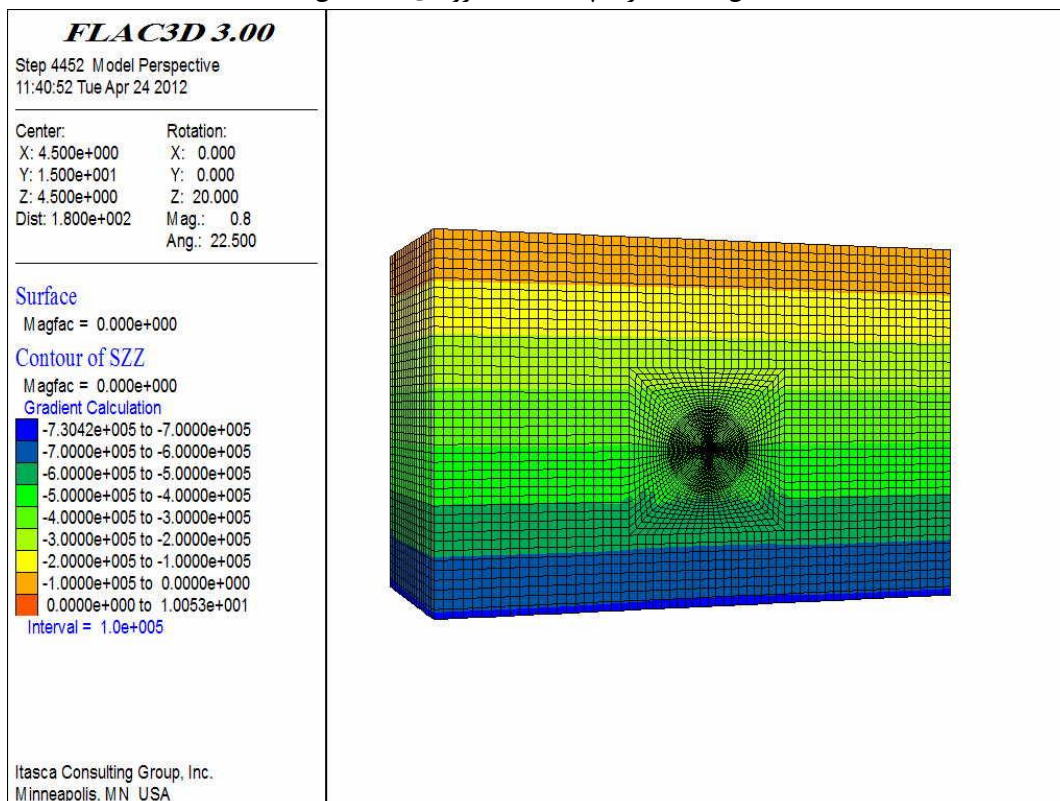
پس از اعمال شرایط اولیه و مرزی و بارگذاری قبل از حفر تونل یک بار محاسبات انجام می شود تا

مدل به تعادل برسد. وضعیت نیروهای نامتعادل و تنش های قائم پس از به تعادل رسیدن مدل به ترتیب

در شکل های (۵-۲۴) و (۵-۲۵) نمایش داده شده است.



شکل ۵-۲۴: تاریخچه بیشینه نیروهای نامتعادل

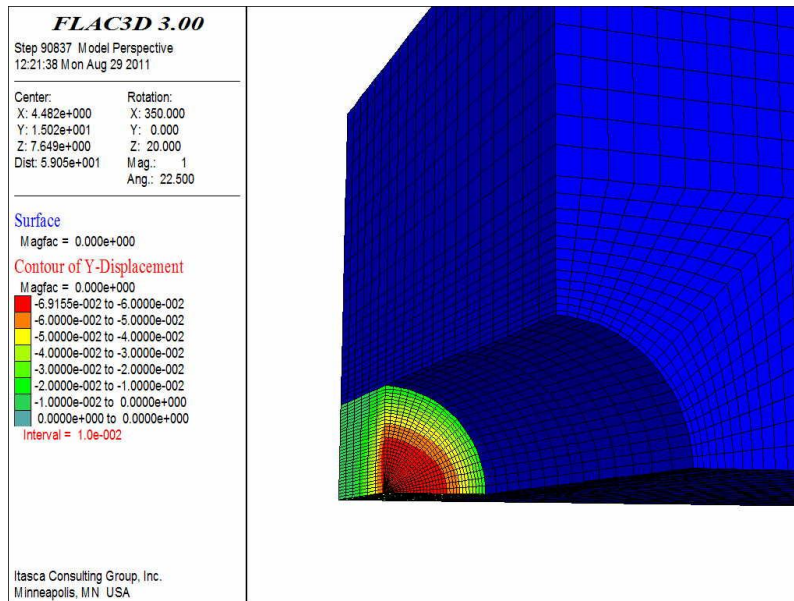


شکل ۵-۲۵: کانتور تنش‌های قائم در مدل عددی

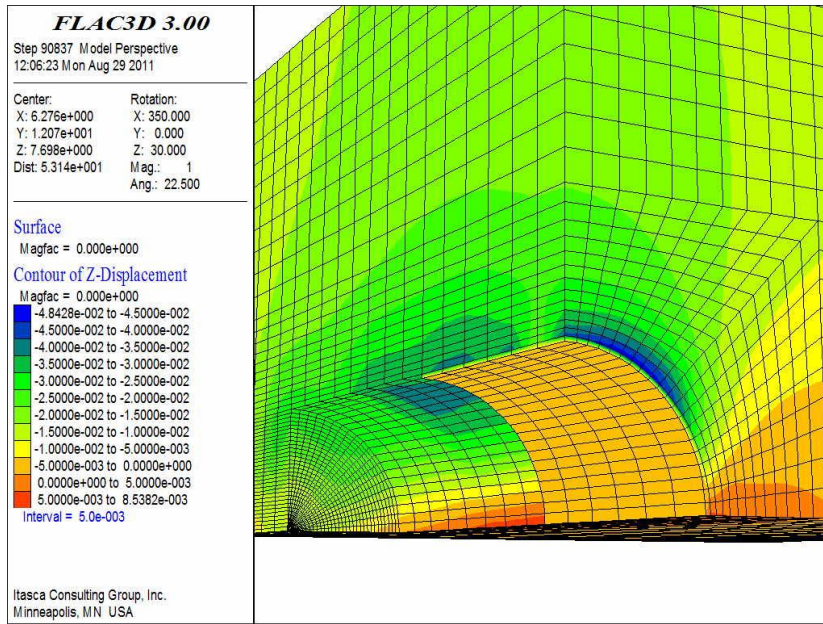
۵-۴-۲-۶ حفاری تونل و شبیه سازی شرایط حفاری در حالت باز به سینه کار

در این بخش نیز دقیقاً مطابق توضیحات ارائه شده در مدلسازی SEC A عمل می گردد به طوری که مشخصات تونل ، شیلد، مورتار و لاینینگ مطابق جدول (۵-۳) می باشد.

وضعیت جابجایی سینه کار و تاج تونل در جهات Y و Z پس از حفر تونل و ۱۰ متر سگمنت گذاری در شکل (۵-۲۶) و (۵-۲۷) نمایش داده شده است. میزان جابجایی ماکسیمم نقاط در تاج تونل و سینه کار به ترتیب ۴/۹ سانتی متر و ۶/۹ سانتی متر می باشد.



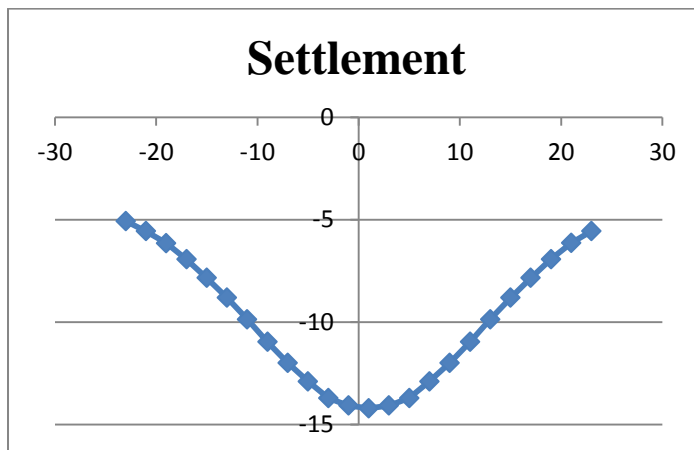
شکل ۵-۲۶: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار در مقطع B



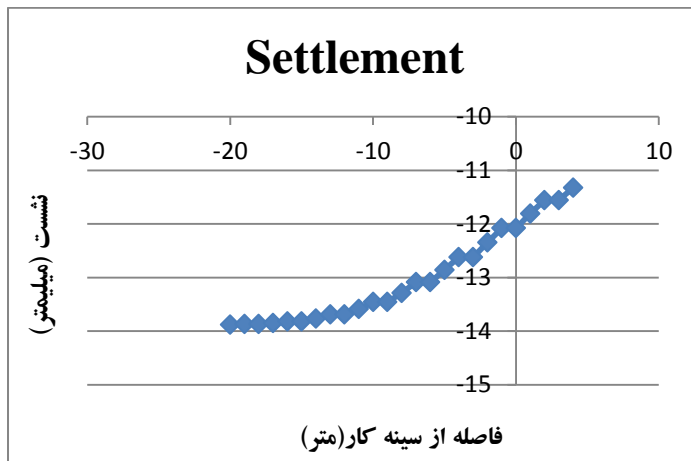
شکل ۵-۲۷: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل در مقطع B

وضعیت نشست سطحی زمین در مقطع عرضی و همچنین در مقطع طولی حفاری در *SECB* به

ترتیب در شکل‌های (۵-۲۸) و (۵-۲۹) نمایش داده شده است.

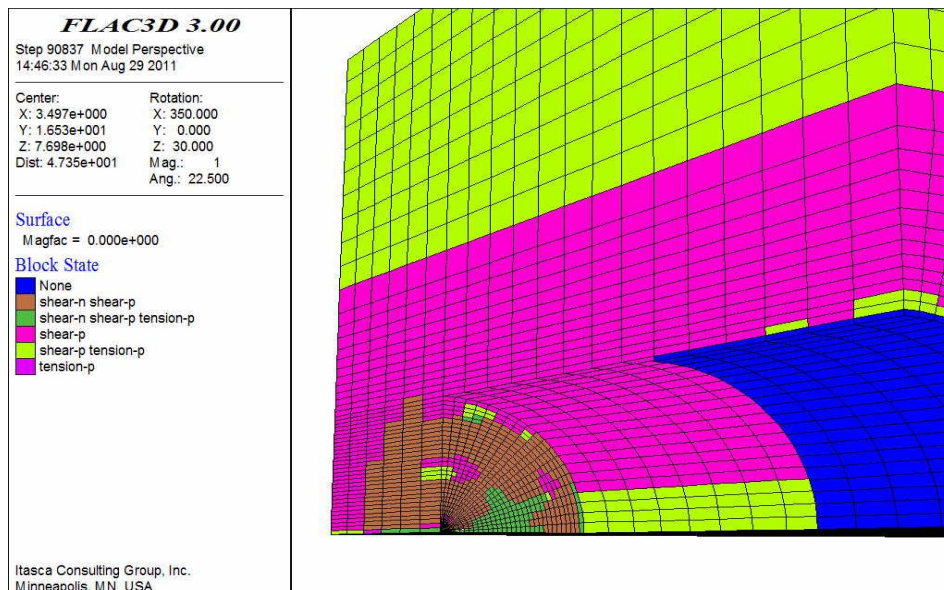


شکل ۵-۲۸: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی - *SECB*



شکل ۵-۲۹: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی-SECB

با توجه به نشست اتفاق افتاده و مقایسه آن با نشست‌های مجاز مشاهده می‌شود که نشست‌ها در این مقطع نیز مانند مقطع قبلی از حد مجاز تجاوز کرده به همین دلیل و در حالت مشابه نسبت به مقطع قبلی خاک در این محدوده فاقد پایداری لازم بوده و گسیخته می‌شود. منطقه پلاستیک اطراف تونل در شکل (۵-۳۰) نمایش داده شده است.

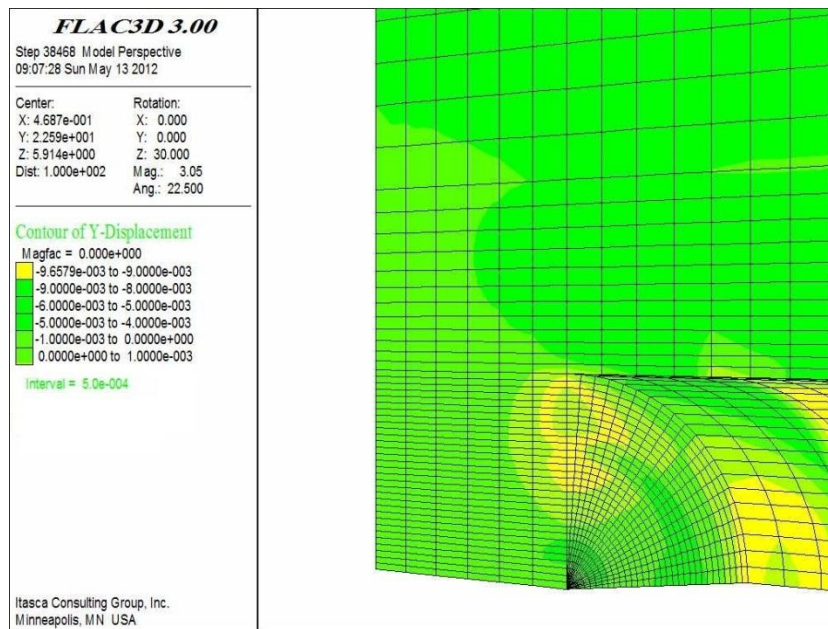


شکل ۵-۳۰: محدوده پلاستیک اطراف تونل-SECB

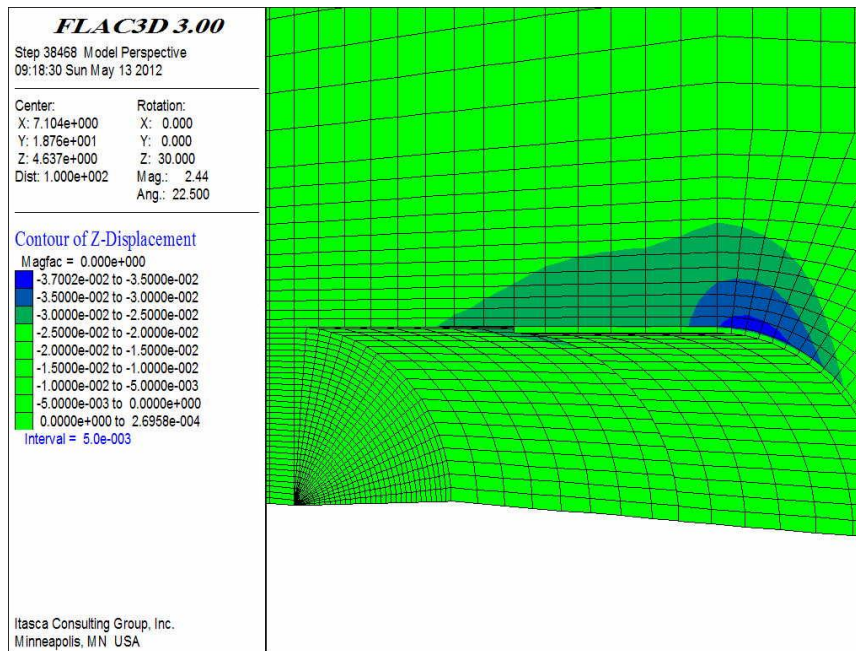
با توجه به اینکه در محدوده مذکور به دلیل نشست‌های بدست آمده امکان حفاری در حالت باز وجود ندارد سعی می‌شود تا با اعمال ۵۰ درصد و همچنین ۱۰۰ درصد فشار محاسبه شده در این محدوده که مقدار مینیمم ۱/۶ بار می‌باشد پایداری تونل را مورد بررسی قرار داد و به نتایج مناسب‌تر برای کاهش هزینه‌های پروژه دست یافت.

- اعمال ۵۰ درصد فشار محاسبه شده

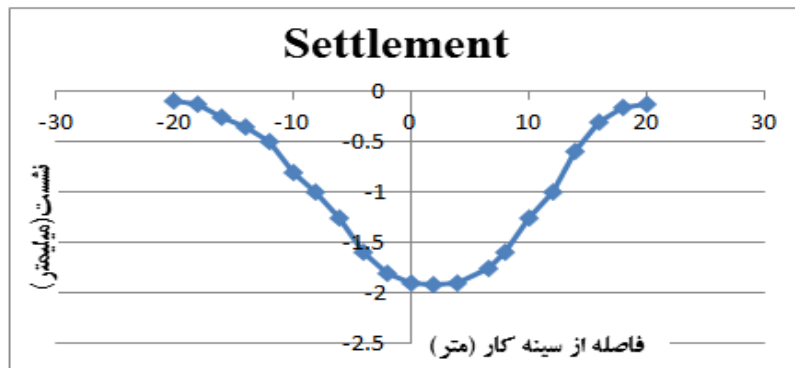
مانند مراحل قبل پس از مدلسازی و وارد کردن خصوصیات لایه‌ها به مدل به حفاری تونل با اعمال فشار ۰/۸ بار پرداخته می‌شود و خروجی جابجایی‌ها در سینه‌کار و تاج تونل به ترتیب در شکل‌های (۳۱-۵) و (۳۲-۵) آورده شده است.



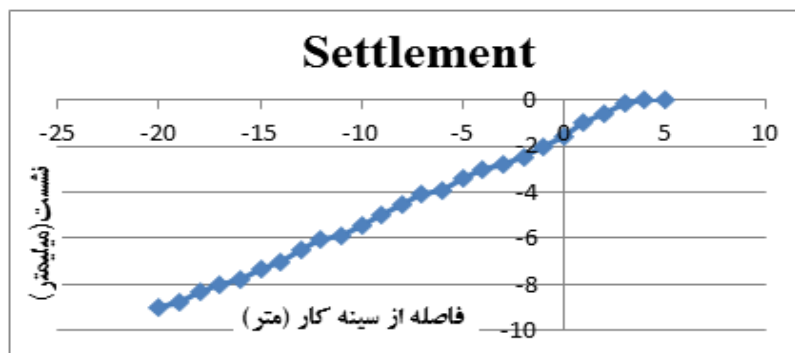
شکل ۳۱-۵: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار با اعمال فشار ۵۰ درصدی در مقطع B



شکل ۳۲-۵: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل با اعمال ۵۰ درصدی فشار در مقطع B



شکل ۳۳-۵: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی با اعمال ۵۰ درصد فشار - SECB

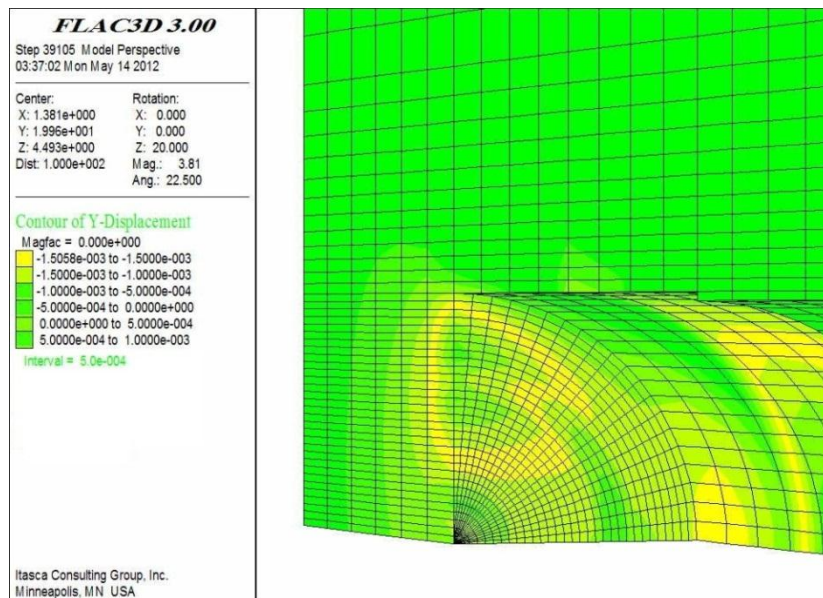


شکل ۳۴-۵: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی با اعمال ۵۰ درصد فشار - SECB

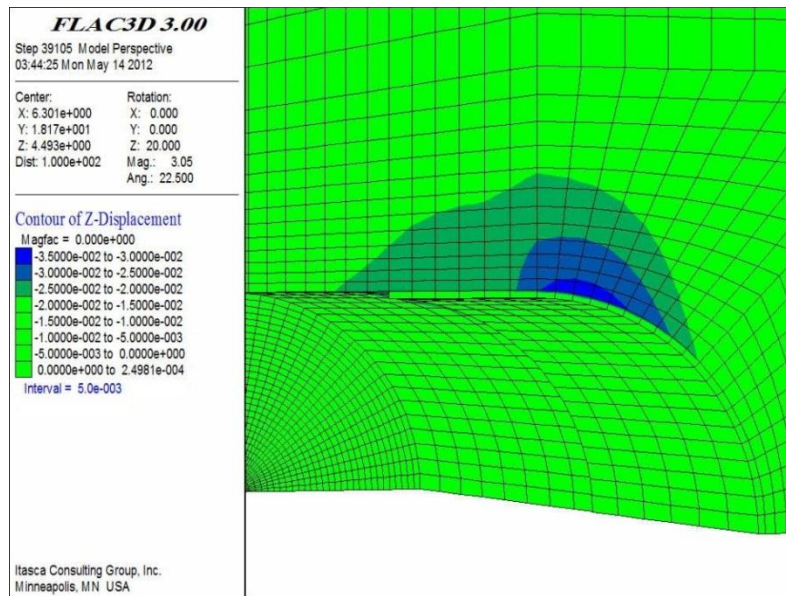
پس از حل مدل با توجه به اهمیت جبهه کار تونل مشخص شد که مقدار نشست در سینه کار ۹/۶ میلی‌متر می‌باشد که این رقم زیر مقدار نشست مجاز می‌باشد. همچنین از پروفیل عرضی و طولی مسیر که در شکل‌های (۳۳-۵) و (۳۴-۵) مشاهده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که احتمال خطر نشست بسیار کاهش یافته که این موضوع می‌تواند گویای این باشد که در این محدوده می‌توان با فشار پایین حفاری نمود تا به این شکل بتوان کمکی در صرفه جویی هزینه‌های پروژه کرد.

- اعمال ۱۰۰ درصدی فشار

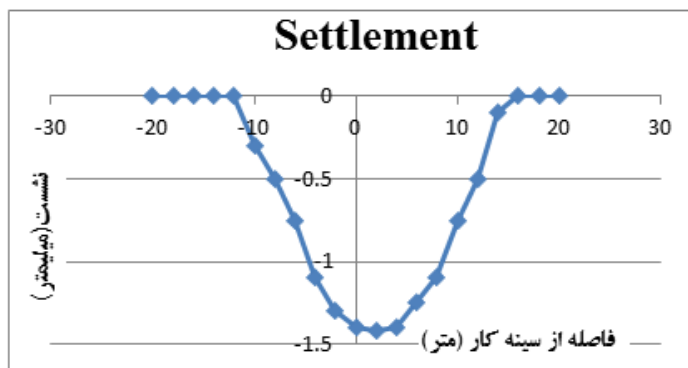
در این قسمت کل فشار محاسبه شده به مقدار ۱/۸ بار به سینه کار اعمال می‌شود همانطور مشاهده می‌شود مقدار فشار محاسبه شده در این بخش بدلیل نوع زمین‌شناسی آن نسبت به مقطع قبل بالا می‌باشد که این خود نشانه خطر نشست در محدوده‌هایی با خاک‌های دانه ریز می‌باشد. در ادامه خروجی نشست در سینه کار و تاج تونل در این بخش در شکل‌های (۳۵-۵) و (۳۶-۵) آورده شده است.



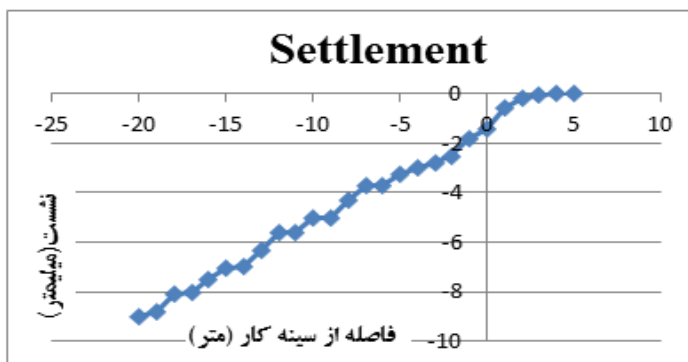
شکل ۳۵-۵: مدل بررسی میزان جابجایی سینه کار با اعمال فشار ۱۰۰ درصدی در مقطع B



شکل ۵-۳۶: مدل بررسی میزان جابجایی تاج تونل با اعمال ۱۰۰ درصدی فشار در مقطع B



شکل ۵-۳۷: نمودار نشست سطح زمین در مقطع عرضی با اعمال ۱۰۰ درصد فشار-SECB



شکل ۵-۳۸: نمودار نشست سطح زمین در مقطع طولی با اعمال ۱۰۰ درصد فشار-SECB

همانطور که انتظار می‌رفت و از نتایج و همچنین پروفیل عرضی و طولی در شکل‌های (۵-۳۷) و (۵-۳۸) مشخص می‌شود مقدار نشست در سینه کار به $1/5$ میلی‌متر کاهش یافت که این خود گویای تاثیر مثبت فشار اعمالی به سینه کار می‌باشد.

۵-۵ جمع بندی

در این فصل تحلیل عددی منطقه انتخاب شده مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت نتایج زیر بدست آمد.

- با توجه به نتایج مدلسازی در مقطع A در حالت باز جابجایی سینه کار $3/3$ سانتی‌متر بوده که با توجه به مقدار هشدار آن، این میزان جابجایی بیشتر از حد مجاز بوده و در نتیجه خاک محدوده سینه کار به حد گسیختگی رسیده و ناپایدار می‌باشد.
- با توجه به نتایج مدلسازی در مقطع B در حالت باز جابجایی سینه کار $6/9$ سانتی‌متر بوده که با توجه به مقدار آن در حالت خطر، این میزان جابجایی بیشتر از حد مجاز در این حالت بوده و در نتیجه خاک محدوده سینه کار به حد گسیختگی رسیده و ناپایدار می‌باشد.
- با اعمال 50 درصد فشار به سینه کار در دو مقطع مورد نظر مشاهده می‌شود مقادیر نشست بسیار کاهش پیدا می‌کند که می‌توان در عمل با این فشار حفاری نمود و هزینه‌های پروژه را کاهش داد.
- با اعمال فشار 100 درصد به سینه کار در دو مقطع مذکور ملاحظه شد که مقادیر نشست نسبت به حالت 50 درصد کاهش می‌یابد این خود گویای تاثیر مثبت فشار اعمالی به سینه کار می‌باشد. البته باید توجه داشت اگر مقدار فشار اعمالی از مقدار محاسبه شده تجاوز کند احتمال خطر بالا زدگی در سطح زمین وجود دارد. از این رو باید فشار اعمالی در محدوده محاسبه شده اعمال شود.

فصل هشتم

نتیجہ گیری و پیشہدات

۶-۱ مقدمه

در تحقیق حاضر، پس از غربالگری مسیر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری مشهد و رسیدن به مناطق مستعد برای حفاری در حالت باز، مناطق مستعد تحت نرم افزار FLAC3D مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در این تحقیق در فصل دوم و سوم به ترتیب به مقایسه روش‌های حفاری در دو حالت EPB و باز و بررسی روابط تجربی و تحلیلی محاسبه فشار سینه‌کار حفاری پرداخته شد. در فصل‌های چهارم مناطق مستعد برای حفاری در حالت باز از جنبه مخاطرات زمین‌شناسی و سطحی مسیر مورد جستجو قرار گرفت. در فصل پنجم نیز به تحلیل پایداری تونل در حالت باز با نرم افزار FLAC3D پرداخته شد. در این فصل از پایان‌نامه به ارائه نتایج و پیشنهادات پرداخته می‌شود.

۶-۲ نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- با افزایش روز افزون جمعیت و افزایش ترافیک‌های شهری سازه‌ی زیرزمینی مترو نقش مهم و حیاتی پیدا کرده است. با توجه به هزینه و صرف زمان بسیار زیاد برای احداث این قبیل سازه‌ها و به دلیل حمل و نقل مسافران، بدیهی است در این سازه‌ها توجه به حفظ پایداری آن‌ها بسیار مهم‌تر از جنبه‌های دیگر می‌باشد.
- در این تحقیق روند تحلیل این سازه زیرزمینی، از ابتدا تا انتها مورد بررسی واقع شد و قسمتی از مسیر به طول ۶۰۰ متر نیز با استفاده از روش‌های عددی تحلیل شد که می‌تواند هموار کننده مسیر مطالعات تکمیلی در این زمینه باشد.

- با توجه به تحلیل عددی که در این تحقیق صورت گرفت و با توجه به نتایج این تحلیل در صورت استفاده از روش حفاری در حالت باز ممکن است خساراتی به سازه وارد گردد که نتیجه آن خسارت مالی برای پروژه به همراه دارد.
- از آنجا که با اعمال فشار ۵۰ درصد و تحلیل عددی آن نتایج مناسبی بدست آمد. می‌توان حدفاصل ایستگاه M2 تا L2 به طول ۶۰۰ متر را با اعمال فشار ۵۰ درصد حفاری نمود. با این عمل مقدار مواد انباشته شده داخل محفظه فشار کاهش خواهد یافت که این خود باعث کاهش مقدار فوم تزریقی و در نتیجه کاهش هزینه‌ها می‌شود.

۳-۶ پیشنهادات

- بدیهی است اولین نکته مهم در ساخت تونل قبل از هزینه و زمان بحث پایداری می‌باشد و با حفاری در حالت باز احتمال خطر ناپایدار شدن تونل بسیار بالاست پس بهتر آن است که حفاری به صورت کنترل شده انجام شود و برای کاهش هزینه و زمان روی موارد دیگر کار شود.
- پیشنهاد می‌شود بخشی از مسیر در حدفاصل ایستگاه M2 تا L2 با اعمال ۵۰ درصد فشار، حفاری شود و با نصب ابزار دقیق و نتایج حاصل از آن برای بخش مانده این محدوده تصمیم‌گیری شود.
- پیشنهاد می‌شود بجای استفاده از مواد فوم گران قیمت خارجی برای بهسازی خاک سینه‌کار و کاهش سایش ابزار برش، کیفیت مواد داخلی را ارتقاء دهند.

منابع

- [۱] Bono.R., (2003), "Tunnelling Division-Metro Barcelona Linea 9".
- [۲] ارگان انجمن شرکت‌های ساختمانی، (۱۳۸۹) " برترین سازندگی، تونل کانال مانس " فصلنامه آبادگران، شماره ۴۳، ص ۵۲.
- [۳] مطالعات زمین‌شناسی مسیر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری مشهد، مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۸).
- [۴] مطالعات ژئوتکنیک مسیر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری مشهد، مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۸).
- [۵] صداقتی، ز. رجبی، م. و مصطفی، ع. (۱۳۹۰)، " چگونگی انتخاب ماشین حفاری بر اساس مشخصات ژئوتکنیکی مسیر در تونل‌های شهری_ مطالعه موردی خط ۷ متروی تهران " نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل.
- [۶] www.fhwa.dot.gov, Federal Highway Administration
- [۷] Toan.D.N, (2006), Master thesis "TBM and Lining Essential Interfaces" Politecnico di Torino.pp 33.
- [۸] LOVAT P., (2007), "Selection of Earth Pressure Balance or Slurry Pressure Balance Tunnel Boring Machines"
- [۹] Lang maack L. , (2002), "SOIL CONDITIONING FOR TBM CHANCES & LIMITS".
- [۱۰] Sharm EL-Sheikh. , (2006), "Utilization of underground space in Urban areas"
- [۱۱] آموزش‌های مربوط به دستگاه TBM نوع EPB، شرکت NFM، (۱۳۸۹).
- [۱۲] گزارشات اپراتوری مسیر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری مشهد، مؤسسه رهاب، (۱۳۹۰).
- [۱۳] Dipl.-Ing. Lars Langmaack., "The Truth about soil conditioning". BASF construction chemical Europe Ltd, Vulkanstr. 110 CH-80480 Zürich.
- [۱۴] طاحونی، شاپور، (۱۳۸۸)، " اصول مهندسی ژئوتکنیک " چاپ ۱۸، پارس آئین، ص ۳۷۰-۳۰۹.
- [۱۵] معصومی ع. و داوودی م. و خلدبرین ع ، (۱۳۸۷) " مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف خاک بر نشست " چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- [۱۶] Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu (2007) "Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control" publishing Taylor & Francis e-Library 89-101. 364-372. 390-402.
- [۱۷] Han Kim, Seung. (2010), PhD. thesis "Large Tunnels for Transportation Purposes and Face Stability of Mechanically Driven Tunnels in Soft Ground" The University of Texas at Austin.pp 130-159.

- [۱۸] Toan.D.N, (2006), Master thesis "TBM and Lining Essential Interfaces" Politecnico di Torino.pp 22-27. 52-60.
- [۱۹] Kirsch.A. (2010), "Experimental and numerical investigation of the face stability of shallow tunnels in sand".logos Verlag Berlin GmbH.pp 43-62.
- [۲۰] [مختاریان اصل، مجتبی-جعفری، احمد، (۱۳۸۸)، "مقایسه روشهای تعیین فشار نگهداری سینه کار تونل با نگاهی ویژه به تونل‌های مترو خط ۲ تبریز" ششمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ص ۸، تهران.
- [۲۱] Mohkam,m.(1989) "Combining Proper Confinement Pressure And Adequate Slurry for Passing Beneth Existing Structures Securely With Slurry shield"france.pp 312-318
- [۲۲] ITA, (2000), "Guidelines for the design of shield tunnel lining" International Tunnelling Association Volume 15, Number 3.
- [۲۳] Terzaghi. K. (1934). "Theoretical Soil Mechanics". John Wiley & Sons.pp 70-76. 194-200.
- [۲۴] Tien.J.H (1996), Master thesis "A Literature Study of The Arching Effect". civil engineering national taiwan university.pp 39-45,120-134.
- [۲۵] Druy greenwood.Jedediah,(2003), Master thesis, "Three Dimensional Analysis of Surface Settlement in soft Ground Tunneling"University of Minnesota.pp 51-54.
- [۲۶] Grant,Richard J and Neil Taylor,R. " Stability of Tunnels in Clay with Overlying Layers Coarse Grained Soil".pp 1-2.
- [۲۷] Jancsecz, S and Steiner, W. (1994) "Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions".Tunnelling 94, conf. proc., Inst. of Mining and Metallurgy and British Tunnelling Society, Chapman and Hall, London, UK. Pp 5-10
- [۲۸] Mohammadi,Javad and Shahriar,korosh and Moarefvand, Parviz,(2011), "Tunnel Face Stability Analysis in Soft Ground in Urban Tunneling by EPB Shield.(Case Study: 7th Line in Tehran Metro)" Australian Journal of Basic and Applied Sciences. pp 592-594
- [۲۹] Broere,W (2001), PhD. Thesis."Tunnel Face Stability & New CPT Applications" Delft University of Technology, The Netherlands. Pp 28-35.
- [۳۰] [بداغ آبادی، سعید-آخوندی، مجید، (۱۳۸۹)، "تعیین فشار سینه کار در حفاری تونل‌ها با EPB با استفاده از روشهای تحلیلی" چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، ص ۲-۵، تهران.
- [۳۱] Anagnostou.G and Kovari.K (1997) "Face stabilisation in closed shield tunnelling", Rapid Excavation and Tunnel Construction, Las Vegas. pp 555-558.
- [۳۲] [غفوری، محمد-لشکری پور، غلامرضا، (۱۳۸۸)، "بررسی مشکلات زیست محیطی ناشی از قنوات متروکه شهر مشهد"
- [۳۳] [حسینی، مهدی، (۱۳۸۹)، "برآورد تجربی و تحلیلی نشست سطح زمین ناشی از تونل سازی با سپر EPB مطالعه موردی، خط ۲ متروی مشهد" یازدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران.

- [۳۴] رحیمی، بهنام، (۱۳۸۹)، "تحلیل ساختاری، خاستگاه و شرایط دگرشکلی زون‌های برشی شکل‌پذیر در توده‌ی گرانیتوئیدی ده نو -غرب مشهد" مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۳، ص ۳۹۹ تا ۴۱.
- [۳۵] طاحونی، شاپور، (۱۳۸۸)، "اصول مهندسی ژئوتکنیک" چاپ ۱۸، پارس آئین، ص ۲۸۰-۲۳۹.
- [۳۶] غفوری، محمد-لشکری پور، غلامرضا، (۱۳۸۴)، "افت سطح آب زیر زمینی و نشست زمین در دشت مشهد" مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران.
- [۳۷] Warren Wangryul Jee and Sang-Gui Ha (2007) "Feasible Boulder treatment methods for soft ground shielded TBM", Daehan Consultant, Co. Ltd., Seoul, South Korea.
- [۳۸] مطالعات ژئوتکنیک مسیر حفاری، مهندسین مشاور سپاد اندیش، (۱۳۸۹).
- [۳۹] میرمحرابی، حسین، (۱۳۹۰)، "بررسی خطر گلگرفتگی در سنگهای رسی (آرژیلیتی) تونل اسپر" هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران.
- [۴۰] بداغ آبادی، سعید-زارع، شکرالله-آخوندی، مجید (۱۳۹۰)، "تعیین فشار سینه‌کار در حفاری تونل‌ها با EPB با استفاده از روش عددی مطالعه موردی متروی خط تهران" نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل.
- [۴۱] Youd, L. T., (1978), "Major Cause of Earthquake Damage is Ground Failure", Civil Eng, pp. 47-51.
- [۴۲] نقشه مسیر خطوط متروی شهر مشهد، شرکت قطار شهری مشهد، (۱۳۸۸).
- [۴۳] مطالعات ژئوتکنیک مسیر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری مشهد، مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۸۸).
- [۴۴] گزارشات مسیر تونل خط ۲ قطار شهری مشهد، شرکت قطار شهری مشهد، (۱۳۸۹).
- [۴۵] بررسی موقعیت چاه‌های مسیر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری مشهد، مهندسین مشاور ایمن سازان، (۱۳۹۰).
- [۴۶] مطالعات سطحی مسیر حفاری تونل خط ۲ قطار شهری مشهد، مهندسین مشاور آرت، (۱۳۹۰).
- [۴۷] حافظی مقدس، ناصر، (۱۳۸۵)، "گزارش زمین‌شناسی مهندسی پروژه ریزپهنه بندی لرزه ای شهر مشهد، سازمان مسکن و شهر سازی خراسان رضوی"

[۴۸] Herrenknecht, M. and Frenzel, C., (2005). “Long Tunnels in Hard Rock—A Preliminary Review”, pp. 343–349.

[۴۹] Itasca Consulting Group, Inc., (2005). “FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions”, version3.2,users Manual.

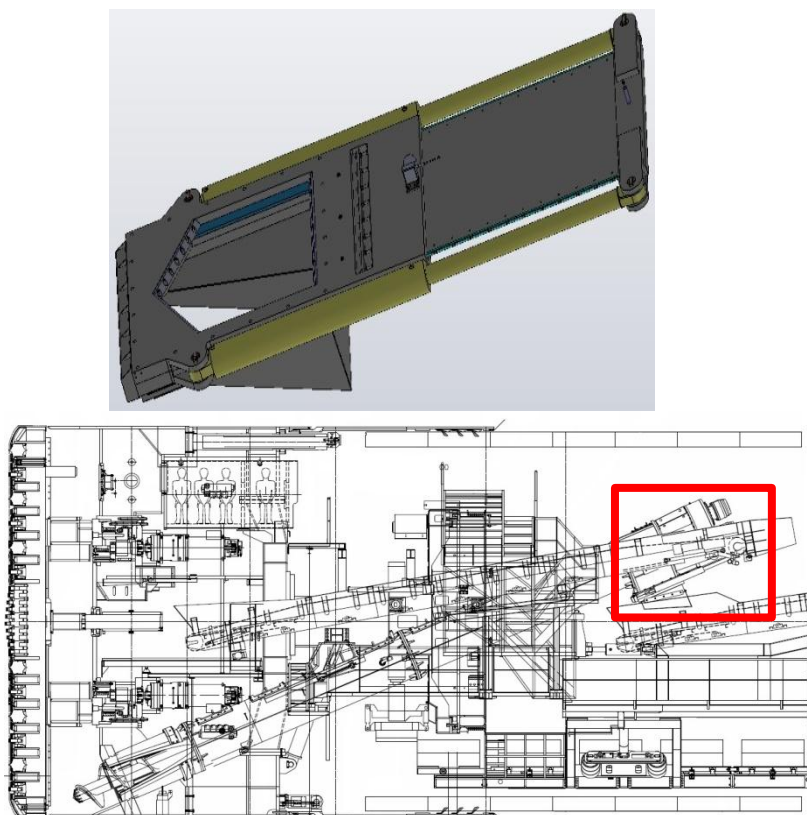
پوست

پ-۱ مراحل مونتاژ دستگاه در حالت Open

- حذف نوار نقاله ماریچ

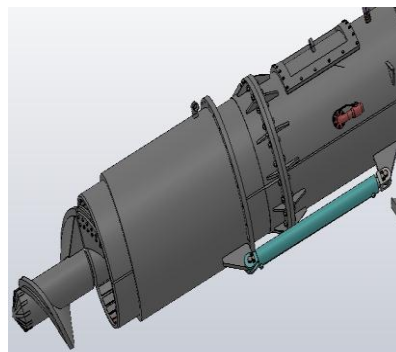
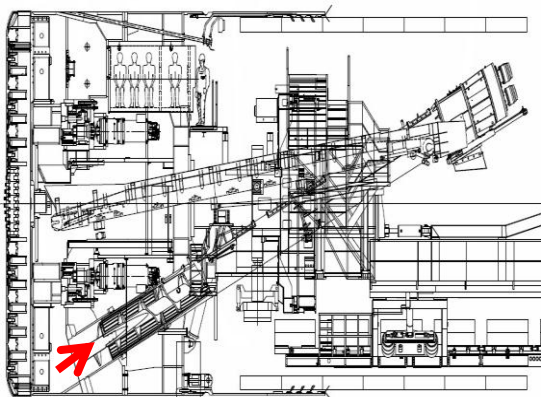
به دلیل کاربرد نداشتن نوار نقاله ماریچ در حالت حفاری بدون فشار سینه کار باید از سیکل حفاری خارج شود که مراحل حذف آن به شرح زیر است.

- بستن دریچه خروجی نوار نقاله ماریچ



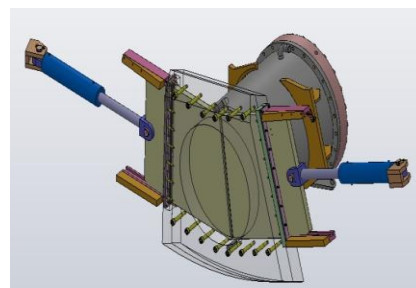
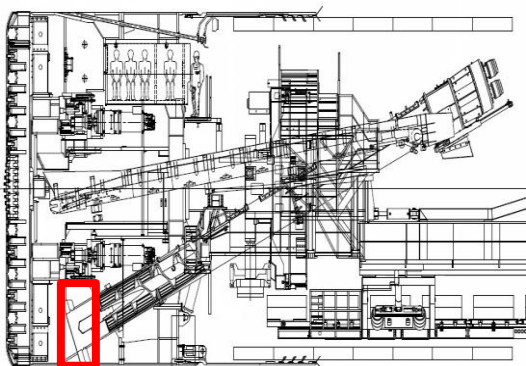
شکل (پ-۱): نمایی از دریچه خروجی نوار نقاله ماریچ [۱۲]

- خارج کردن قسمت مارپیچی اسکرو از داخل محفظه پشت کاترهد



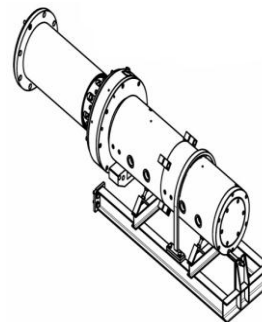
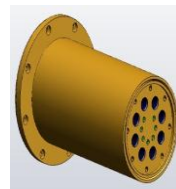
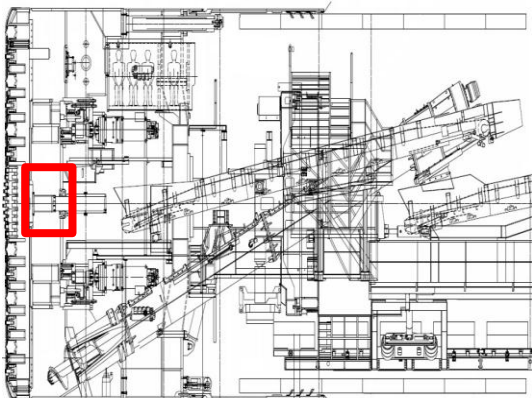
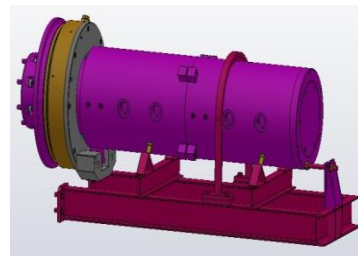
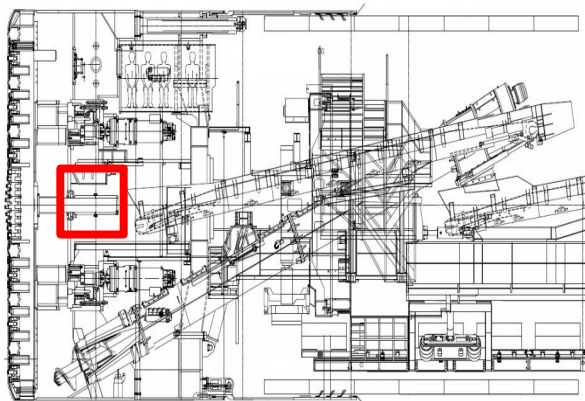
شکل (پ-۲): نمایی از قسمت ابتدایی نوار نقاله مارپیج [۱۲]

- بستن دریچه ورودی نوار نقاله مارپیج



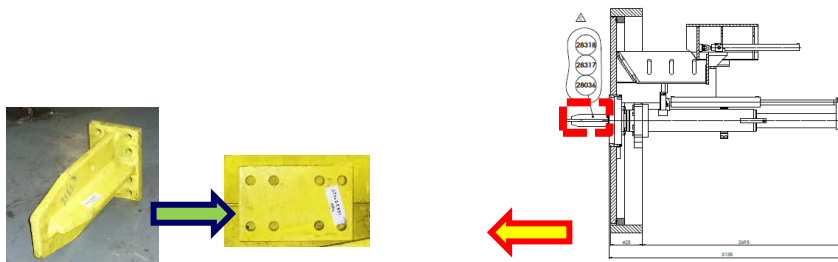
شکل (پ-۳): نمایی از دریچه ورودی نوار نقاله مارپیج [۱۲]

- حذف ابزارهای اتصال دهنده لوله‌های تزریق فوم به سینه‌کار در حالت حضور فشار



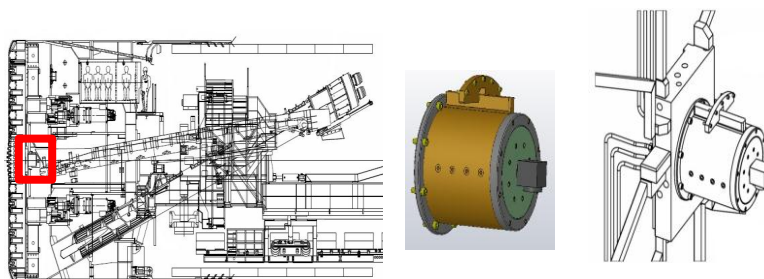
شکل (پ-۴): نمایی از ابزارهای اتصال دهنده لوله‌های تزریق [۱۲]

- حذف مخلوط کننده‌های داخل اتاقک فشار و نصب صفحات جایگزین



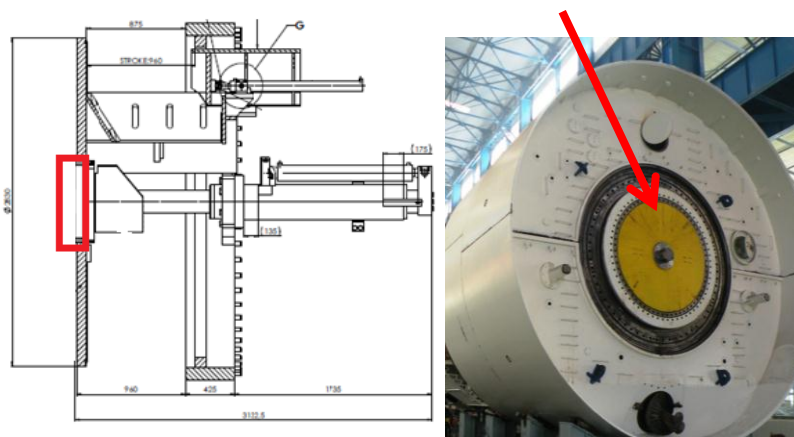
شکل (پ-۵): نمایی از همزن‌ها [۱۲]

- نصب ابزارهای اتصال دهنده لوله‌های تزریق آب با سینه کار



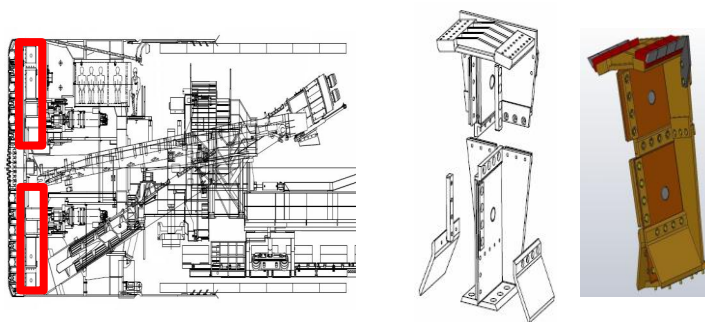
شکل (پ-۶): نمایی از ابزارهای اتصال دهنده لوله‌های تزریق آب [۱۲]

- جابجایی رو به جلوی بخش میانی پشت کاترهد در راستای به جلو کشیدن نوار نقاله (۱)



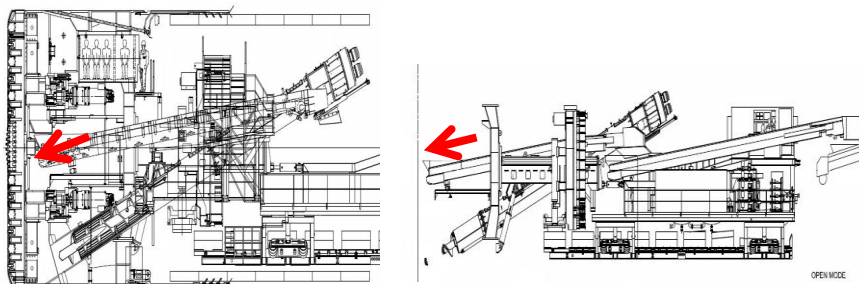
شکل (پ-۷): نمایی از ابزارهای پشت موتورهای دستگاه [۱۲]

- نصب صفحاتی روی کله حفار در راستای هدایت مصالح حفاری شده روی نوار نقاله (۱)



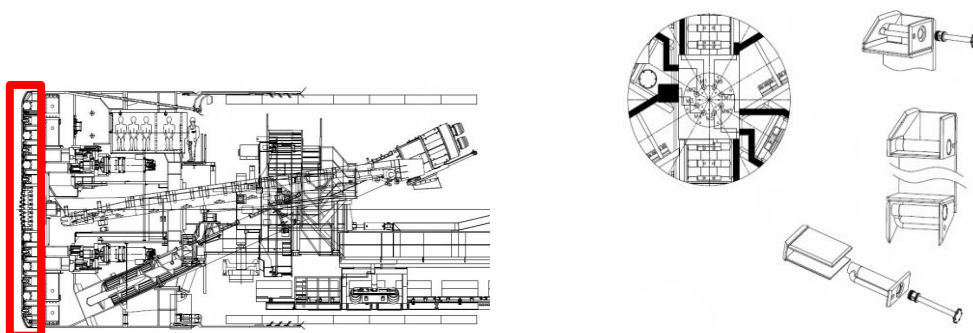
شکل (پ-۸): نمایی از صفحات نصب شده پشت کله حفار [۱۲]

- به جلو کشیدن نوار نقاله (۱) به داخل محفظه پشت کاترهد (چمبر)



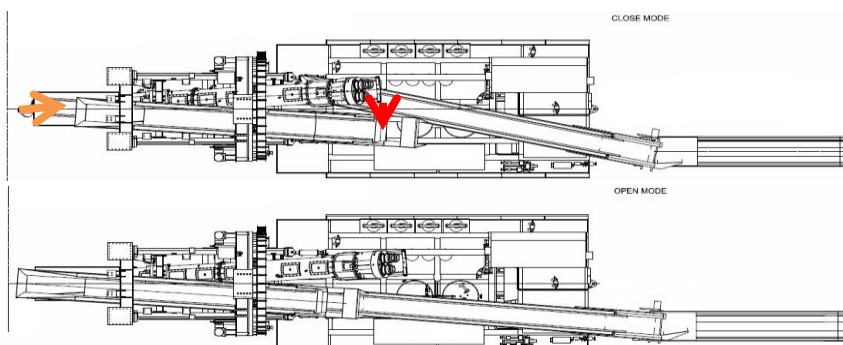
شکل (پ-۹): نمایی از ابزارهای جلوی دستگاه حفار [۱۲]

- حذف نازل‌های تزریق فوم روی کاترهد و جایگزینی بوسیله نازل‌های تزریق آب



شکل (پ-۱۰): نمایی از لوله‌های تزریق و مکان قرار گیری آن‌ها [۱۲]

- جابجا کردن نوار نقاله (۲) از زیر نوار نقاله مارپیچ به زیر نوار نقاله (۱)



شکل (پ-۱۱): نمایی از انتقال نوار ۲ به زیر نوار ۱ [۱۲]

Abstract

Construction of tunnel and underground spaces in urban areas are daily developing. Most of these spaces are excavated in soil bed due to adjacency to ground surface. One of the important and effective concerns in construction of underground spaces is cost and development rate of the project, therefore in this research by concentration on two sections of Mashhad urban subway line2 tunnel, excavation in open mode for cost and also excavation time reduction has been investigated. After analysis of these two sections by FLAC3D software, in the first section it was shown that in spite of appropriate geological conditions of this section, settlement value has exceeded the allowable value and reaches 4.4 centimeters in tunnel heading and 3.3 centimeters in tunnel face. Also in the second section settlement value in heading and face of tunnel was resulted 4.9 and 6.9 centimeters respectively. According to the results, it was determined that excavation risk in open mode in these sections is high due to the exceeding of settlement value from allowable limit and excavation probability in open mode is reduced and so it can't be excavated in this mode. After modeling by applying %50 and %100 of the calculated pressure to face in the first section, it was observed that the settlement value in face is reduced to 5.7 millimeter and 2.6 millimeter respectively. Also by applying %50 and %100 of the calculated pressure to face in the second section, it was observed that the settlement value in face reaches 9.6 millimeter and 1.5 millimeter respectively. According to the allowable limits of settlement by applying %50 of the calculated pressure in both sections, it is observed that the settlement values in this situation has been reduced rather than the case in open mode that it increases excavation probability by applying pressure of %50 and hereby injection foam volume is reduced as well as reduction of material volume filled in the pressure chamber and as a result, it followed by decrease in costs of the project.

Keywords: Underground Spaces, Face Pressure, Open Excavation, Settlement, Mashhad Subway Line2 Project, FLAC3D Software.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**The performance feasibility of EPB machine in the urban areas for excavation in
open mode_ case study mashhad subway line2 tunnel**

Supervisors:

Dr. seyed mohammad esmaeil jalali

Dr. seyed Rahman Torabei

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

In

Mining engineering

September 2012