



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن

برآورد مقدار فشار خاک به روش‌های تحلیلی و عددی در قطعه شمالی- جنوبی

خط هفت متروی تهران

مرتضی کاظمی چوری

اساتید راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی- دکتر محمد عطائی

اساتید مشاور:

دکتر شکرالله زارع- مهندس محمد رضا بیطرفان

آذر ۸۹

شماره: ۵۰۱۷۶۰۵
 تاریخ: ۱۳/۱/۸۹
 ویرایش:



مدیریت تحصیلات تکمیلی
 رقم شماره (۴)

بسمه تعالی

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مرتضی کاظمی رشته مهندسی معدن گرایش استخراج معدن تحت عنوان مقدار فشار خاک به روش های تحلیلی و عددی در قطعه شمالی-جنوبی خط هفت متروی تهران که در تاریخ ۸۹/۰۹/۲۳ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه) امتیاز (۱۷) دفاع مجدد مردود

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

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادارامتیا	سید محمد اسماعیل جلالی	استاد	
۲- استادارامتیا	محمد عطایی	دانشیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	فرهنگ سرشکی	استادارامتیا	
۴- استاد ممتحن	سید رحمان ترابی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	احمد رمضان زاده	استاد	

تأیید رئیس دانشکده:

تقدیم به مادرم

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

تقدیم به پدرم

او که برایم بهترین الگو در به دست گرفتن سکان کشتی زندگی در بین امواج سهمگین و بیمناک آن می باشد.

شایسته است که اکنون که به فضل الهی این تحقیق به پایان رسیده است، از زحمات اساتید گرانقدر آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و آقای دکتر محمد عطائی که با رهنمودهای ارزشمندشان مراد را انجام هرچه بهتر این پایان نامه یاری فرمودند تشکر و سپاسگزاری کنم.

از اساتید ارجمند و مشاور پایان نامه ام جناب آقای دکتر شکرالله زارع و جناب آقای مهندس محمدرضا بیطرفان که همواره با صبر و حوصله به راهنمایی ام پرداخته اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از شرکت مهندسی سپاسد که در انجام این تحقیق همکاری لازم را نموده اند نیز کمال تشکر و قدردانی را دارم

تعهد نامه

اینجانب سید علی کاشانی چرخ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته استخراج مواد دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه خواص و مقادیر عناصر سنگین در پودرهای تصفیه و تصفیه شاهرود تحت راهنمایی دکتر محمدعلی... متعهد می شوم

- تحلیلات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصدات 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 محرک یا تسلیلی 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 تأثیر گذار 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 یافتههای آنها) استفاده شده است شواهد 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، شواهد و اصول اخلاقی رعایت شده است.

تاریخ ۸۹،۱۰/۱۵

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

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

چکیده

یکی از مهمترین فاکتورها در انتخاب روش حفاری مناسب، پایداری سینه کار تونل است. این مسئله بخصوص برای حفاری مکانیزه با ماشین حفاری TBM صادق است، چنانکه برای نمونه سپر فشار تعادلی زمین (EPBS) و سپر دوغابی (SS) برای حفاری در شرایط ژئوتکنیکی نامناسب و هیدرولوژی در دهه‌های اخیر توسعه داده شده‌اند. فشار نگهداری سینه کار تونل با تغییر سرعت گردش نقاله مارپیچی به عنوان تابعی از نرخ پیشروی ماشین کنترل می‌شود. این فشار باید از فرونشست (شکست فعال) و بالازدگی (شکست غیر فعال) خاک روی تونل جلوگیری کند. روش‌های تحلیلی (روش تعادل حدی و آنالیز حدی)، تجربی و عددی (روش المان محدود) اغلب برای تحلیل پایداری سینه کار تونل استفاده می‌شود. در این تحقیق پایداری سینه کار تونل در قطعه شمالی- جنوبی خط هفت متروی تهران به وسیله روش‌های تحلیلی- تجربی و عددی بررسی شده است. سپس مقادیر فشار به دست آمده از روش‌های تحلیلی- تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه شده و در نهایت روش مناسب برای برآورد فشار خاک در خط هفت متروی تهران بر طبق شرایط ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی ناحیه پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی:

ماشین حفر تونل، ماشین فشار تعادلی زمین، سپر دوغابی، نقاله مارپیچی، فرونشست، گسیختگی فعال، بالازدگی، گسیختگی غیر فعال، روش‌های تحلیلی- تجربی، روش تعادل حدی، روش آنالیز حدی، روش‌های عددی، روش المان محدود، خط هفت متروی تهران

فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- محدوده مورد مطالعه ۳
- ۳-۱- ضرورت و هدف تحقیق ۴
- ۴-۱- سازمان‌دهی پایان نامه ۵

فصل دوم: زمین شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر احداث خط هفت متروی تهران

- ۱-۲- ساختگاه خط هفت متروی تهران ۸
- ۲-۲- چینه‌شناسی مسیر احداث تونل ۸
- ۳-۲- وضعیت آب‌های زیرزمینی ۹
- ۴-۲- رده‌بندی خاک در مسیر احداث خط هفت متروی تهران ۱۰

فصل سوم: بررسی ویژگی‌های عملیاتی ماشین تونل‌زنی EPB

- ۱-۳- مقدمه ۱۵
- ۲-۳- ماشین‌های سپر دوغابی ۱۵
- ۱-۲-۳- پارامترهای کلیدی ۱۶
- ۳-۳- ماشین سپر فشار تعادلی زمین ۱۷
- ۱-۳-۳- جنبه‌های زمین شناسی و ژئوتکنیک ۱۸
- ۲-۳-۳- عملیات خروج خاک حفاری ۱۹
- ۳-۳-۳- معیارهای انتخاب بین سپر دوغابی و فشار تعادلی زمین ۲۰
- ۱-۳-۳-۳- ویژگی‌های خاک ۲۰

- ۲۱.....۳-۳-۲- کله حفار و ابزارهای حفاری
- ۲۲.....۳-۳-۳- تزریق در فضای خالی پشت سگمنت
- ۲۴.....۳-۳-۴- چگونگی خروج مواد حفاری شده
- ۲۴.....۴-۳- مقایسه بین سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین

فصل چهارم: روش‌های تحلیلی و تجربی برآورد فشار خاک

- ۲۷.....۴-۱- مقدمه
- ۲۷.....۴-۲- نظریه ترزاقی
- ۳۲.....۴-۳- روش‌های تحلیلی
- ۳۳.....۴-۳-۱- روش میوریمما
- ۳۴.....۴-۳-۲- روش برومز و بنمارک
- ۳۴.....۴-۳-۳- روش اتکینسون و پاتز
- ۳۵.....۴-۳-۴- روش دیویس و همکاران
- ۳۶.....۴-۳-۵- روش کروس
- ۳۷.....۴-۳-۶- روش محکم و همکاران
- ۳۸.....۴-۳-۷- روش لکا و دورمیو
- ۴۱.....۴-۳-۸- روش جانسکز و استاینر
- ۴۵.....۴-۳-۹- روش کواری و آنگونستا
- ۴۸.....۴-۳-۱۰- روش برویر
- ۵۰.....۴-۳-۱۱- روش کارانزا-تورس
- ۵۲.....۴-۳-۱۲- سایر روش‌ها

فصل پنجم: بررسی روش‌های بهسازی شیمیایی خاک

- ۵-۱- مقدمه ۵۷
- ۵-۲- خصوصیات دوغاب ۵۷
- ۵-۲-۱- انواع مختلف کیک ۵۸
- ۵-۲-۱-۱- مدل غشایی ۵۸
- ۵-۲-۱-۲- مدل نفوذی ۵۸
- ۵-۳- عامل‌های بهسازی مشتمل بر خاک برای ماشین EPB ۵۹
- ۵-۳-۱- فوم ۶۱
- ۵-۳-۲- پلیمرها ۶۲
- ۵-۵- آزمایشات بهسازی خاک ۶۴
- ۵-۶- پهنه‌بندی خط هفت متروی تهران بر اساس نوع مواد افزودنی ۶۷

فصل ششم: برآورد فشار خاک با روش‌های تحلیلی و تجربی

- ۶-۱- مقدمه ۷۰
- ۶-۲- محاسبات فشار سینه کار تونل به روش تحلیلی و تجربی ۷۰
- ۶-۳- پهنه‌بندی مسیر در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰ ۷۳
- ۶-۴- پهنه‌بندی مسیر حفاری در موقعیت ۲۰+۷۰۰ - ۲۱+۳۰۰ ۹۰

فصل هفتم: برآورد فشار خاک با کاربرد روش عددی

- ۱-۷- مقدمه ۱۰۸
- ۲-۷- اطلاعات ورودی ۱۰۸
- ۳-۷- محاسبات ۱۱۳
- ۴-۷- نتایج خروجی ۱۱۷
- ۵-۷- منحنی‌های بار-جابجایی و ضریب ایمنی-جابجایی ۱۲۰
- ۶-۷- مقایسه نتایج تحلیلی و عددی در موقعیت ۲۰+۸۰۰ تا ۲۰+۹۰۰ ۱۲۱
- ۷-۷- مقایسه روش‌های تحلیلی و عددی ۱۲۲
- ۸-۷- بررسی فشار در مناطق آبدار با روباره‌های مختلف ۱۲۷

فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱-۸- نتیجه‌گیری ۱۳۰
- ۲-۸- پیشنهادات ۱۳۳
- پیوست ۱۳۵
- منابع ۱۴۴

شکل‌ها

- شکل (۱-۱): محدوده خط هفت متروی تهران..... ۴
- شکل (۱-۲): موقعیت سازه نگهبان در منطقه بریانک و ساختمان دنای پنج..... ۸
- شکل (۲-۲): نوع کلی خاک در قطعه شمالی - جنوبی خط هفت متروی تهران..... ۱۳
- شکل (۱-۳): سپر ترکیبی با دو اتاقک..... ۱۶
- شکل (۲-۳): سپر فشار تعادلی زمین..... ۲۰
- شکل (۳-۳): ناحیه بازشدگی کله حفار در ماشین‌های فشار تعادلی..... ۲۲
- شکل (۴-۳): پر شدن فضای خالی پشت سگمنت..... ۲۳
- شکل (۵-۳): مقایسه بین محدوده دانه‌بندی خاک خط هفت تهران با حد استاندارد ماشین..... ۲۵
- شکل (۱-۴): ناحیه سست‌شدگی در تونل‌های کم عمق..... ۲۸
- شکل (۲-۴): تشکیل قوس در تونل‌های عمیق..... ۲۸
- شکل (۳-۴): مدل بار روی تونل..... ۳۰
- شکل (۴-۴): رابطه بین ارتفاع سست‌شدگی با ارتفاع روباره..... ۳۱
- شکل (۵-۴): قوس بالای تونل..... ۳۱
- شکل (۶-۴): مدل پایداری سینه‌کار در روش میوریمما..... ۳۳
- شکل (۷-۴): مدل تحلیل پایداری سینه‌کار تونل..... ۳۴
- شکل (۸-۴): شمایی از روش بارگذاری در روش دیویس..... ۳۵
- شکل (۹-۴): عدد پایداری برای روش کران بالا و پایین برای یک تونل..... ۳۶
- شکل (۱۰-۴): روش‌های مختلف شکست در سینه‌کار تونل به روش کروس..... ۳۷
- شکل (۱۱-۴): مکانیزم شکست در روش محکم..... ۳۷
- شکل (۱۲-۴): مکانیزم‌های شکست مخروطی..... ۴۰
- شکل (۱۳-۴): مقادیر N_s^{c+} و N_γ^{c+} برای مکانیزم فرونشست..... ۴۰
- شکل (۱۴-۴): نمایی از چگونگی توزیع بار روی سینه‌کار تونل در روش جانسکز و استاینر..... ۴۱
- شکل (۱۵-۴): شکل ضریب فشار جانبی خاک..... ۴۴
- شکل (۱۶-۴): شکل زاویه شکست گوه..... ۴۴
- شکل (۱۷-۴): مدل سیلو و گوهی هورن..... ۴۶
- شکل (۱۸-۴): نمودارهای محاسبه برای ضرایب بدون بعد F_0, F_1, F_2 و F_3 ۴۷

- شکل (۴-۱۹): مدل چند گوه‌ای ۴۹
- شکل (۴-۲۰): طرح اصلی کاکو - کرزل برای محاسبه فشار وارد بر تونل ۵۱
- شکل (۴-۲۱): تغییرات فشار جانبی خاک در مقابل جابجایی سینه کار ۵۲
- شکل (۵-۱): تشکیل کیک فیلتر از نوع مدل غشایی ۵۹
- شکل (۵-۲): تشکیل کیک فیلتر از نوع مدل نفوذی ۵۹
- شکل (۵-۳): چگونگی اتصال ذرات به وسیله پلیمر ۶۲
- شکل (۶-۱): نمایی از مسیر احداث خط هفت متروی تهران ۷۰
- شکل (۶-۲): مقطع طولی گمانه اکتشافی در موقعیت ۱۳+۲۰۰-۱۲+۵۰۰ ۷۱
- شکل (۶-۳): پلان طراحی ایستگاه بریانک ۷۲
- شکل (۶-۴): نمونه‌ای از لایه‌بندی خاک در مسیر حفاری تونل در خط هفت متروی تهران ۷۳
- شکل (۶-۵): توزیع تقریبی تنش از سازه و خاک روی تونل مترو در منطقه بریانک ۷۵
- شکل (۶-۶): چگونگی توزیع بار یکنواخت توسط شالوده مستطیلی ۷۶
- شکل (۶-۷): موقعیت ساختمان‌ها نسبت به محور تونل در منطقه بریانک ۷۷
- شکل (۶-۸): گوه‌های تشکیل شده در موقعیت ۱۲+۷۰۰-۱۲+۶۰۰ ۸۳
- شکل (۶-۹): مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل به روش‌های تحلیلی و تجربی ۸۹
- شکل (۶-۱۰): مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل ۹۰
- شکل (۶-۱۱): گوه‌های تشکیل شده در موقعیت ۲۰+۹۰۰-۲۰+۸۰۰ ۹۶
- شکل (۶-۱۲): کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل به روش‌های تحلیلی و تجربی ۱۰۱
- شکل (۶-۱۳): مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل با دامنه تغییرات ۱۰۱
- شکل (۶-۱۴): مقایسه فشارهای فرونشست، ساکن و بالازدگی و در موقعیت ۱۲۵۰۰-۲۶۰۰۰ ۱۰۲
- شکل (۶-۱۵): مقایسه کمترین فشار محاسباتی در موقعیت ۱۲۵۰۰-۲۶۰۰۰ با شرکت SELI ایتالیا ۱۰۳
- شکل (۶-۱۶): مقایسه کمترین فشار محاسباتی با فشار حفاری در خط هفت متروی تهران ۱۰۴
- شکل (۷-۱): ماشین حفاری فشار تعادلی زمین قطعه شمالی - جنوبی خط هفت متروی تهران ۱۰۹
- شکل (۷-۲): هندسه مدل در خط هفت متروی تهران در موقعیت ۲۰+۹۰۰-۲۰+۸۰۰ ۱۱۰
- شکل (۷-۳): مش‌بندی دو بعدی در موقعیت ۲۰+۹۰۰-۲۰+۸۰۰ ۱۱۱
- شکل (۷-۴): مش‌بندی سه بعدی در موقعیت ۲۰+۹۰۰-۲۰+۸۰۰ ۱۱۱
- شکل (۷-۵): فشار منفذی آب (اولیه) ۱۱۲
- شکل (۷-۶): تنش موثر خاک (اولیه) ۱۱۳
- شکل (۷-۷): پایان فاز محاسباتی ۱۱۵
- شکل (۷-۸): پنجره محاسبات جعبه Multipliers ۱۱۵
- شکل (۷-۹): جابجایی کل در پایان فاز اول ۱۱۷

- شکل (۷-۱۰): جابجایی عمودی در پایان فاز اول..... ۱۱۸
- شکل (۷-۱۱): جابجایی کل در پایان فاز دوم (کاهش فشار سینه‌کار)..... ۱۱۸
- شکل (۷-۱۲): جابجایی کل در پایان فاز سوم (کاهش Φ -c)..... ۱۱۹
- شکل (۷-۱۳): جابجایی عمودی در پایان فاز سوم (کاهش Φ -c)..... ۱۱۹
- شکل (۷-۱۴): رابطه بین ضریب بار با جابجایی کل (فاز دوم)..... ۱۲۰
- شکل (۷-۱۵): رابطه بین ضریب ایمنی با جابجایی کل (فاز سوم)..... ۱۲۱
- شکل (۷-۱۶): مقایسه فشار تحلیلی و عددی در مناطق خشک با $C=D$ ۱۲۲
- شکل (۷-۱۷): مقایسه فشار تحلیلی و عددی در مناطق خشک با $C=2D$ ۱۲۳
- شکل (۷-۱۸): مقایسه فشار تحلیلی و عددی در مناطق خشک با $C=3D$ ۱۲۳
- شکل (۷-۱۹): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با $C=D$ و $\Phi=20$ ۱۲۴
- شکل (۷-۲۰): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با $C=D$ و $\Phi=25$ ۱۲۵
- شکل (۷-۲۱): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با $C=D$ و $\Phi=20$ ۱۲۵
- شکل (۷-۲۲): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با $C=D$ و $\Phi=35$ ۱۲۶
- شکل (۷-۲۳): فشار نگهداری در عمق‌های مختلف مناطق آبدار خط هفت متروی تهران..... ۱۲۸

جدول‌ها

- جدول (۲-۱): مقایسه بین دو گروه عمده خاک..... ۱۰
- جدول (۲-۲): طبقه‌بندی خاک‌ها به روش انگلیسی..... ۱۱
- جدول (۲-۳): طبقه‌بندی خاک‌ها به روش آمریکایی..... ۱۱
- جدول (۲-۴): طبقه‌بندی خاک مسیر احداث تونل خط هفت متروی تهران..... ۱۲
- جدول (۴-۱): ارتفاع سست‌شدگی در روش ترزاقی..... ۳۰
- جدول (۴-۲): مقادیر ضریب فشار جانبی خاک..... ۴۳
- جدول (۴-۳): مقادیر زاویه شکست گوه..... ۴۳
- جدول (۴-۴): مقادیر مختلف ضرایب فشار جانبی..... ۴۴
- جدول (۴-۵): ضرایب ایمنی پیشنهادی برای فشارهای خاک و آب..... ۴۵
- جدول (۴-۶): نمونه‌ای از فشار محاسبات سینه‌کار استفاده شده برای سپر EPB و SPB در ژاپن..... ۵۳
- جدول (۴-۷): روش‌های تحلیلی برای برآورد فشار سینه‌کار..... ۵۴
- جدول (۴-۸): فرمول‌های تحلیلی و تجربی برآورد فشار کل سینه‌کار..... ۵۴

- جدول (۴-۹): روش‌های محاسبه فشار نگهداری با توجه به شرایط ژئوتکنیکی ۵۵
- جدول (۵-۱): خلاصه‌ای از میزان استفاده از عامل‌های بهسازی خاک در ماشین EPB ۶۳
- جدول (۵-۲): خلاصه‌ای از مطالعه موردی روی ماشین EPB با بهسازی شیمیایی خاک ۶۵
- جدول (۵-۳): مطالعه موردی بهسازی شیمیایی خاک ۶۶
- جدول (۵-۴): نوع مواد افزودنی با توجه به شرایط خاک و آب زیرزمینی در خط هفت متروی تهران ۶۸
- جدول (۶-۱): داده‌های طراحی خاک در خط هفت متروی تهران ۷۴
- جدول (۶-۲): طبقه‌بندی خاک از روی گمانه در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰ ۷۴
- جدول (۶-۳): پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰ ۷۴
- جدول (۶-۴): استاندارد بارگذاری ۷۵
- جدول (۶-۵): ضریب تأثیر تنش ۷۷
- جدول (۶-۶): موقعیت ساختمان و بار محاسبه شده روی تونل در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰ ۷۸
- جدول (۶-۷): مشخصات پارامترهای هر لایه خاک در روش برویر ۸۳
- جدول (۶-۸): کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰ ۸۸
- جدول (۶-۹): کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل با در نظرگیری دامنه تغییرات ۸۹
- جدول (۶-۱۰): لایه‌بندی خاک در موقعیت ۲۰+۷۰۰ - ۲۱+۳۰۰ ۹۱
- جدول (۶-۱۱): پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک در موقعیت ۲۰+۷۰۰ - ۲۱+۳۰۰ برای روش‌های همگن ۹۱
- جدول (۶-۱۲): میانگین پارامترها فیزیکی و مکانیکی خاک برای هر لایه در موقعیت ۲۰+۷۰۰ - ۲۱+۳۰۰ ۹۵
- جدول (۶-۱۳): کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل در موقعیت ۲۰+۷۰۰ - ۲۱+۳۰۰ ۱۰۰
- جدول (۶-۱۴): کمترین فشار محاسباتی با دامنه تغییرات فشار در موقعیت ۲۰+۷۰۰ - ۲۱+۳۰۰ ۱۰۰
- جدول (۶-۱۵): مقایسه فشار حفاری با فشار محاسباتی در موقعیت ۱۲+۵۰۰ - ۱۲+۷۰۰ ۱۰۴
- جدول (۶-۱۶): طول سست‌شدگی برای روش‌های سه بعدی سیلو و گوه در خط هفت متروی تهران ۱۰۶
- جدول (۷-۱): پارامترهای طراحی خاک در خط هفت متروی تهران ۱۰۹
- جدول (۷-۲): خصوصیات ماشین EPB ساخت شرکت Lovat ۱۱۰
- جدول (۷-۳): مقایسه نتایج عددی با روش‌های تجربی و تحلیلی در موقعیت ۲۰+۸۰۰ تا ۲۰+۹۰۰ ۱۲۱
- جدول (۷-۴): مقایسه روش عددی با روش‌های تحلیلی برای خاک‌های غیر چسبنده ۱۲۳
- جدول (۷-۵): مقایسه نتایج عددی با روش‌های تحلیلی در خاک چسبنده ۱۲۶
- جدول (۷-۶): مقایسه فشار در مناطق آبدار خط هفت متروی تهران ۱۲۷

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

ماشین‌های حفاری در نواحی شهری با توجه به شرایط زمین‌شناسی به پنج نوع سپر باز^۱، سپر هوای فشرده^۲، سپر دوغابی^۳، سپر فشار تعادلی زمین^۴ و سپر ترکیبی^۵ تقسیم‌بندی می‌شوند. از روش سپر باز برای حفاری در خاک‌های با چسبندگی زیاد، در تراز بالاتر از آب‌های زیرزمینی و شرایط پایدار زمین می‌توان استفاده کرد. از روش سپر هوای فشرده برای حفاری در خاک‌های با چسبندگی تقریباً زیاد، تراز آب‌های زیرزمینی متوسط و شرایط تقریباً پایدار می‌توان استفاده کرد. روش سپر فشار تعادلی به طور معمول برای حفاری در خاک‌های دانه ریز، در تراز پایین‌تر از آب‌های زیرزمینی و شرایط ناپایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. از سپر دوغابی برای حفاری در خاک‌های دانه درشت با چسبندگی متغیر، در تراز پایین‌تر از آب‌های زیرزمینی و شرایط ناپایدار استفاده می‌شود، با این تفاوت که مواد حاصله از حفاری در این روش به وسیله لوله به بیرون انتقال داده می‌شود. البته نسل امروزی ماشین فشار تعادلی در همه نوع خاک و حتی سنگ توسعه داده شده است. برآورد فشار نگهداری لازم برای پایداری سینه‌کار حفاری یکی از مهمترین عوامل مؤثر در راندمان ماشین حفاری در نواحی شهری است. اگر فشار اعمالی به سینه‌کار کمتر از حد تعادلی باشد، فرونشست^۶ رخ می‌دهد و اگر فشار اعمالی به سینه‌کار بیشتر از حد تعادلی باشد، بالازدگی^۷ رخ می‌دهد. روش‌های تجربی^۸ - تحلیلی^۹ و عددی^{۱۰} روش‌های مناسبی برای برآورد فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل است. به طور کلی برای پایداری سینه‌کار، فشار وارده از ماشین به سینه‌کار باید تا اندازه‌ای بزرگتر یا مساوی مجموع فشار خاک و آب (در صورت وجود) باشد.

¹ Open Shield

² Compressed Air Shield

³ Slurry Shield

⁴ Earth Pressure Balance Shield

⁵ Mix Shield

⁶ Collapse

⁷ Blow Out

⁸ Empirical Methods

⁹ Analytical Methods

¹⁰ Numerical Method

برای تخمین فشار خاک پارامترهای فیزیکی خاک (مانند تخلخل، پوکی، وزن مخصوص خاک)، پارامترهای مکانیکی خاک (مانند چسبندگی و اصطکاک)، هندسه تونل (مانند قطر و عمق) و نیز ارتفاع آب زیرزمینی لحاظ می‌گردد.

۱-۲- محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، بخش شمالی- جنوبی مسیر احداث خط ۷ متروی تهران است. برای احداث متروی خط هفت تهران گمانه‌های اکتشافی در منطقه‌ای به فاصله یک کیلومتر، در مسیری به طول تقریبی ۲۷ کیلومتر حفر شده است. متروی خط هفت تهران در دو محدوده شمالی- جنوبی (بزرگراه نواب تا خیابان کوهستان) به طول ۱۴ کیلومتر و محدوده شرقی- غربی (بزرگراه نواب تا ورودی بزرگراه محلاتی) به طول ۱۲/۵ کیلومتر احداث خواهد شد. شکل (۱-۱) مسیر خط هفت متروی تهران را بر روی نقشه تهران نشان می‌دهد. تمامی مسیر حرکت قطار، به صورت زیرزمینی احداث می‌شود. با توجه به زمین شناسی منطقه و کارهای اکتشافی انجام گرفته، حدود ۶۰ درصد تونل و ایستگاه‌های قطار شهری با آب زیرزمینی برخورد خواهند داشت. دو نوع سفره آب زیرزمینی در گستره طرح وجود دارد که به آن سفره عمقی و سفره سطحی گفته می‌شود. سفره سطحی در عمق‌های کم زمین در بخش شمالی- جنوبی وجود دارد. منابع تغذیه سفره زیرزمینی را جریان آب‌های زیرزمینی از بلندی‌های شمالی، نفوذ آب بارندگی، آبیاری فضا‌های سبز و نشت لوله‌های آب و فاضلاب می‌باشند. از لحاظ سنگ‌شناسی بخش شمالی- جنوبی دارای رسوبات آبرفتی دانه درشت (قلوه سنگ و تخته سنگ) است، که بیشتر از سنگ‌های آذرین و آذرآواری تشکیل یافته است. با توجه طراحی انجام گرفته توسط شرکت پیمانکار شرایط برای ماشین EPB مناسب تشخیص داده شده است.



شکل (۱-۱): محدوده خط هفت متروی تهران (زمین فن آوران، ۱۳۸۶)

۱-۳- ضرورت و هدف تحقیق

فشار خاک به همراه فشار آب، اثر قابل توجهی بر روی سازه‌های زیرزمینی دارند. بارهای زنده مربوط به وسایل نقلیه سهم کمتری روی فشار وارده بر سازه دارند و می‌توان از آنها صرف نظر کرد، بجز در شرایطی که تونل در اعماق کم به روش کند و پوش^۱ احداث می‌شود. برآورد فشار نگهداری لازم برای پایداری سینه‌کار حفاری یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر طراحی و حفظ عملکرد صحیح ماشین و در نتیجه افزایش راندمان پیشروی ماشین حفاری در نواحی شهری است. اگر فشار اعمالی به سینه‌کار کمتر از حد تعادلی باشد، نشست^۲ رخ می‌دهد و اگر فشار اعمالی به سینه‌کار بیشتر از حد تعادلی باشد، بالازدگی^۳ رخ

^۱ Cut and Cover

^۲ Collapse

^۳ Blow Out

رخ می‌دهد. از روش‌های تحلیلی^۱ و تجربی^۲ روش‌های مناسبی برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل استفاده می‌باشند. در این تحقیق سعی شده است با بکارگیری روش‌های تحلیلی و تجربی از جمله روش-های ترزاقی جانسکز و استاینر^۳، لکا و دورمیو^۴، آنگونستا و کواری^۵ و برویر^۶ و سایر روش‌های تحلیلی، فشار خاک سینه‌کار با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی منطقه برآورد گردد و نتایج حاصله را با روش عددی، فشار ماشین حفاری و فشار محاسباتی شرکت SELI ایتالیا مقایسه گردد. برای مدل‌سازی عددی می‌توان از نرم افزارهای المان محدود نظیر ANSYS، GTS-MIDAS، PLAXIS 3D TUNNEL و ABAQUS و نرم افزارهای تفاضل محدود نظیر FIAC 2D & FLAC 3D با توجه به پیوستگی محیط خاکی، استفاده کرد. در این تحقیق از نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL با توجه به کاربرد گسترده آن در تونل‌سازی دنیا برای محیط خاکی، تخصصی بودن نرم افزار برای تحلیل پایداری سینه‌کار و مدل‌سازی ماشین EPB، تعیین فشار فرونشست خاک و کاربرد آسان آن استفاده شده است.

۱-۴- سازمان‌دهی پایان نامه

به طور کلی مطالب این تحقیق در هشت فصل ارائه شده است. در فصل اول، راجع به کلیات و ضرورت انجام تحقیق بحث می‌شود و سرفصل بقیه مطالب به شرح زیر می‌باشد:

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

¹ Analytical Methods

² Empirical Methods

³ Jancscec & Steiner

⁴ Leca & Dormieux

⁵ Anagnostou & Kovari

⁶ Broere

فصل سوم- بررسی ویژگی‌های عملیاتی ماشین‌های تونل‌زنی EPB: در این فصل به معرفی ماشین‌های متدوال در حفاری تونل در مناطق شهری، عملکرد و کارایی آنها و تفاوت‌های مشخصات ظاهری ماشین و مزایا و معایب آنها پرداخته می‌شود.

فصل چهارم- روش‌های تحلیلی و تجربی برآورد فشار خاک: این فصل به بررسی روش‌هایی تعیین فشار خاک از سال ۱۹۶۶ تاکنون، و قابلیت‌های کاربرد روش‌ها را با توجه به خصوصیات هندسی تونل و مکانیکی خاک معرفی می‌کند.

فصل پنجم- بررسی روش‌های بهسازی شیمیایی خاک: در این فصل به معرفی مواد افزودنی در ماشین‌های حفاری و قابلیت کاربرد آنها با توجه به نوع خاک و آب زیرزمینی پرداخته شده است.

فصل ششم- برآورد فشار خاک به روش‌های تحلیلی و تجربی: در این فصل به برآورد فشار خاک در خط هفت متروی تهران به روش‌های تحلیلی پرداخته شده است.

فصل هفتم- تحلیل پایداری سینه‌کار به روش عددی: در این فصل مدل‌سازی برآورد فشار خاک و تحلیل پایداری سینه‌کار در خط هفت متروی تهران به روش المان محدود به کمک نرم افزار PLAXIS 3D (v.1.2) TUNNEL پرداخته شده است.

فصل هشتم- در این فصل، نتایج حاصل از تحقیق و پیشنهادات مطرح شده است.

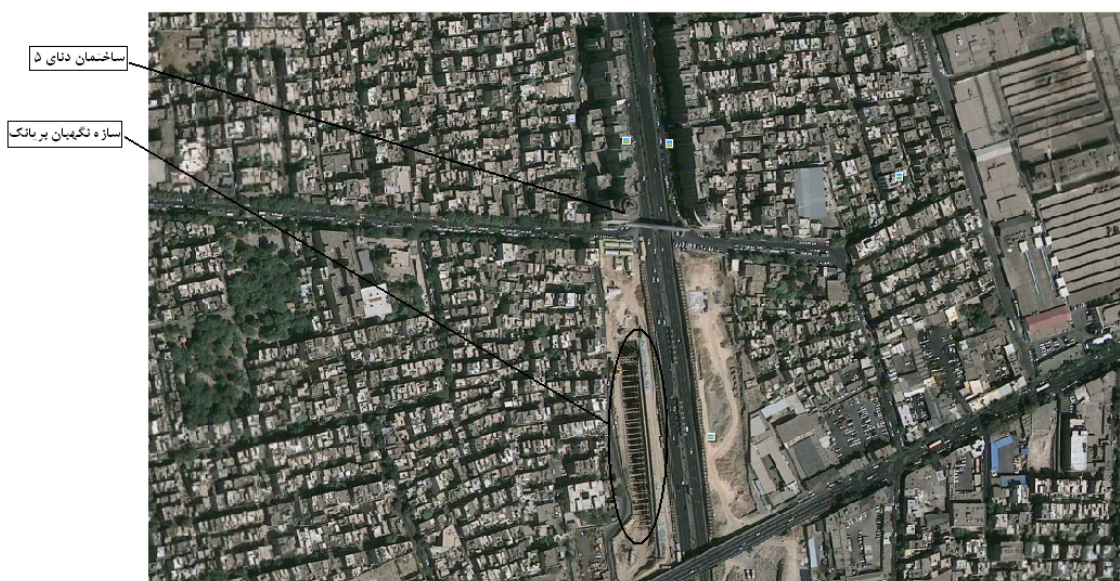
فصل دوم

زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر احداث

خط هفت متروی تهران

۱-۲- ساختگاه خط هفت متروی تهران

بخش شمالی - جنوبی خط هفت متروی تهران به طول تقریبی ۱۴ کیلومتر با بهره‌مندی ۱۲ ایستگاه از بزرگراه نواب تا خیابان کوهستان در دست احداث است. تمامی فضای حفاری به صورت زیرزمینی با ماشین حفاری فشار تعادلی زمین^۱ با توجه به طراحی صورت گرفته (از سوی شرکت پیمانکار) احداث می‌گردد (زمین فن آوران، ۱۳۸۶). شکل (۱-۲) موقعیت سازه نگهبان در منطقه بریانک و ساختمان دنا را می‌نماید. پنج را در مسیر احداث تونل نشان می‌دهد.



شکل (۱-۲): موقعیت سازه نگهبان در منطقه بریانک و ساختمان دنا (Google Earth.2009)

۲-۲- چینه‌شناسی مسیر احداث تونل

اطلاعات لازم برای شناسایی چینه‌شناسی منطقه در طول مسیر احداث تونل مترو مورد نظر، با ۱۵ گمانه^۲ و ۸ چاهک^۳ برای تعیین نوع خاک، سطح آب زیرزمینی منطقه و انجام آزمایشات آزمایشگاهی لازم حفر و مورد مطالعه قرار گرفته است. خاک در طول مسیر مترو مورد نظر، از رسوبات آبرفتی دامنه‌ای

^۱ Earth Pressure Balance

^۲ Bore Hole

^۳ Trial Pit

متعلق به کواترنری تشکیل یافته که به سازند آبرفتی تهران موسوم است. ضخامت این رسوبات در گستره طرح برابر ۶۰ متر گزارش شده است. اجزای تشکیل دهنده رسوبات آبرفتی در گستره طرح از ذرات بسیار ریز رس تا تخته سنگ‌های بزرگ را در بر می‌گیرد، که از توزیع دانه‌بندی متغیری در عمق و گسترش سطحی برخوردار است. این سازند از لایه‌های متناوب خاک‌های ریز و درشت دانه تشکیل یافته که می‌تواند بر طراحی و ساخت پروژه مورد نظر اثرگذار باشد. اجزای درشت تشکیل دهنده رسوبات آبرفتی محل (قلوه سنگ‌ها و تخته سنگ‌ها) که بیشتر از سنگ‌های آذرین و آذرآواری تشکیل یافته‌اند، بسیار مقاوم، سخت و ساییده هستند (زمین فن آوران، ۱۳۸۶).

۲-۳- وضعیت آب‌های زیرزمینی

طبق اطلاعات به دست آمده از گمانه‌های اکتشافی، حدود ۶۰ درصد از طول تونل و ایستگاه‌های قطار شهری با آب‌های زیرزمینی برخورد خواهند داشت. بنابراین وضعیت آب‌های زیرزمینی نقش تعیین کننده‌ای را در طراحی و ساخت سازه‌های زیرزمینی مورد نظر ایفا خواهد کرد. دو نوع سفره آب زیرزمینی شناخته شده در گستره طرح وجود دارد که می‌تواند بر روی کارهای عمرانی طرح مورد نظر اثرگذار باشد. این سفره را که در رسوبات آبرفت دامنه‌ای تهران شکل گرفته‌اند، می‌توان سفره‌های اصلی و سطحی نام‌گذاری کرد. سفره اصلی در گستره طرح به‌طور عمده غیرمحصور با ضخامت متغیر می‌باشد. این سفره در بخش شرقی - غربی مسیر، حد فاصل کیلومترهای ۲ تا ۱۲ در عمق ۱۵ تا ۵۵ متری با ضخامت ۵ تا ۴۰ متری، با تونل و ایستگاه‌ها برخورد خواهد داشت. سفره سطحی که در عمق‌های کم زمین، در بخش‌های شمالی گستره طرح شکل گرفته، از کیلومتر ۱۹ تا ۲۵ در عمق ۱۰ تا ۴۵ متری با ضخامت ۵ تا ۳۵ متری، با تونل و ایستگاه‌ها برخورد خواهد کرد. دلیل تشکیل این سفره وجود لایه‌هایی از رسوبات ریز دانه در لابلای رسوبات درشت دانه، در بخش شمال غربی شهر تهران می‌باشد. منابع تشکیل سفره‌ها در گستره طرح عوامل مختلفی هستند، این منابع عبارتند از (زمین فن آوران، ۱۳۸۶):

- جریان زیرزمینی از بلندی‌های شمالی.
- نفوذ آب بارندگی‌ها.
- آبیاری فضا‌های سبز.
- نشت از لوله‌های آب، فاضلاب و مخازن فاضلاب.

۲-۴- رده‌بندی خاک در مسیر احداث متروی خط هفت تهران (شمالی- جنوبی)

رده‌بندی انواع خاک‌ها و شناسایی خواص خاک‌ها براساس رده یا گروه آنها، حایز اهمیت فوق‌العاده زیادی در تقریباً تمام کارهای اجرایی است، زیرا خواص مکانیکی و فیزیکی خاک‌ها تابعی از جنس، شکل، اندازه و چگونگی توزیع اندازه دانه‌ها است. اساس رده‌بندی مهندسی خاک در مکانیک خاک، اندازه دانه‌ها و خاصیت خمیری خاک است. در سیستم‌های مختلف رده‌بندی، خاک‌ها به دو دسته خاک‌های درشت دانه (عمدتاً شن و ماسه) و خاک‌های ریزدانه (سیلت و رس) تقسیم می‌شوند. در جدول (۱-۲) مقایسه‌ی بین این دو دسته از خاک‌ها آورده شده است.

جدول (۱-۲): مقایسه بین دو گروه عمده خاک (وفائیان، ۱۳۷۶)

خاک ریز دانه (مثل رس)	خاک درشت دانه (مثل ماسه)
درصد پوکی زیاد در حالت طبیعی	درصد پوکی کم در حالت طبیعی
دارای چسبندگی (برحسب مقدار آب)	فاقد چسبندگی
اصطکاک داخلی از صفر تا یک مقدار زیاد (برحسب شرایط)	دارای اصطکاک داخلی
فشرده‌گی پذیری	فاقد فشرده‌گی پذیری
نشت پذیری	نشت بلافاصله پس از عملکرد بار
نفوذپذیری ناچیز	نفوذپذیری زیاد
تورم‌پذیر	فاقد تورم در برابر آب

طبقه‌بندی خاک‌ها بر اساس مقدار درصد اجزای ریز در دو سیستم طبقه‌بندی انگلیسی^۱ و آمریکایی^۲ به ترتیب در جدول‌های (۲-۲) و (۳-۲) درج شده است.

^۱ British System Classification Soil (BSCS)

^۲ Unified System Classification Soil (USCS)

جدول (۲-۲): طبقه‌بندی خاک‌ها به روش انگلیسی (Ian Smith, 2006)

توصیف	نشانه‌های زیرگروه	نشانه‌های گروه	نوع خاک	درصد اجزای ریز (زیر ۶۰ میکرون)
شن ماسه‌ای لای‌دار و یا رسی خوب و یا بد دانه‌بندی شده	GWM, GPM GWC, GPC	G-F	I	۱۵ تا ۵
		S-F		
شن ماسه‌ای لای‌دار و یا رس‌دار با خاصیت خمیری پائین تا متوسط	GML, GMI GCL, GCI	GF	II	۳۵ تا ۱۵
		SF		
ماسه شنی لای‌دار و یا رسی با خاصیت خمیری پائین تا متوسط	SML, SMI SCL, SCI	FG	III	۶۵ تا ۳۵
		FS		
لای و یا رس شنی با خاصیت خمیری پائین تا متوسط	MLG, MIG CLG, CIG	F	IV	۱۰۰ تا ۶۵
لای و یا رس ماسه‌ای با خاصیت خمیری پائین تا متوسط	MLS, MIS CLS, CIS			
لای و یا رس با خاصیت خمیری کم تا متوسط	ML, MI CL, CI			

جدول (۳-۲): طبقه‌بندی خاک‌ها به روش آمریکایی (Braja M. Das, 2007)

توصیف	نشانه‌های گروه	درصد اجزای ریز (زیر ۷۴ میکرون)
شن خوب و یا بد دانه‌بندی شده با لای یا رس	GW-GM, GP-GM GW-GC, GP-GC	۱۲ تا ۵
شن لای‌دار	GM	۱۲ تا ۵۰
شن رسی	GC	
ماسه لای‌دار	SM	۱۰۰ تا ۵۰
ماسه رسی	SC	
لای (سیلت) با خاصیت خمیری کم	ML	۱۰۰ تا ۵۰
رس با خاصیت خمیری کم	CL	

طبقه‌بندی خاک مسیر احداث تونل متروی خط ۷ تهران به دو روش انگلیسی و آمریکایی در جدول (۴-۲) درج شده است.

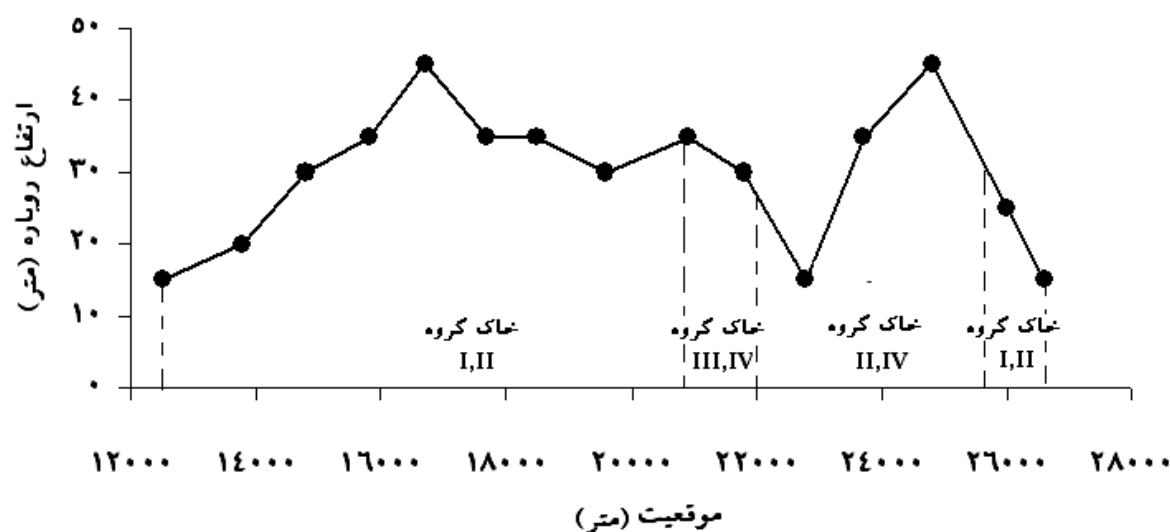
جدول (۴-۲): طبقه‌بندی خاک مسیر احداث تونل متروی خط ۷ تهران (زمین فن آوران، ۱۳۸۶)

روش آمریکایی	روش انگلیسی	فواصل (Chainage)
GW-GM,GM,ML	GWM,GML,MLG	۱۲+۵۰۰-۱۳+۷۰۰
GW-GM,GM,GC	GWM,GML,GCI	۱۳+۷۰۰-۱۴+۷۵۰
GC,CL	GCL,GCI,CLG,CIG	۱۴+۷۵۰-۱۵+۳۰۰
GM,GC	GML,GCL	۱۵+۳۰۰-۱۵+۸۰۰
GP-GC,GP-GM,GW-GC	GPC,GPM,GWC	۱۵+۸۰۰-۱۶+۵۰۰
GP-GC,GP-GM,GW-GC,GW-GM	GPC,GPM,GWC,GWM	۱۶+۵۰۰-۱۷+۲۰۰
GP-GC,GP-GM	GPC,GPM	۱۷+۲۰۰-۱۷+۶۰۰
GW-GM,GM	GWM,GML	۱۷+۶۰۰-۱۸+۰۰۰
GW-GM,GP-GM	GWM,GWC,GPC,GML	۱۸+۰۰۰-۱۸+۷۰۰
GW-GM,GM	GWM,GML	۱۸+۷۰۰-۱۹+۴۰۰
GW-GM,GM,GC	GWM,GML,GCL,GCI	۱۹+۴۰۰-۲۰+۰۰۰
GC,SM,GW-GM	GCL,GCI,SMI,GWM	۲۰+۰۰۰-۲۰+۹۰۰
ML,CL	ML,CL	۲۰+۹۰۰-۲۱+۶۰۰
CL	CL,MIS	۲۱+۶۰۰-۲۲+۲۰۰
GC,CL	GCL,CLG,CL	۲۲+۲۰۰-۲۲+۵۰۰
GC,CL	GCL,CLG	۲۲+۵۰۰-۲۳+۷۰۰
CL,GC	CLG,CL,GCL,CLG	۲۳+۷۰۰-۲۴+۱۵۰
CL	CL	۲۴+۱۵۰-۲۴+۶۵۰
GM,GC,CL	GML,GCL,CLG,CL	۲۴+۶۵۰-۲۵+۲۰۰
CL	CLG,CL	۲۵+۲۰۰-۲۵+۵۵۰
GM,CL	GML,CLG	۲۵+۵۵۰-۲۶+۲۰۰
GW-GC,GP-GC	GWC,GPC	۲۶+۲۰۰-۲۶+۶۰۰

جمع‌بندی:

براساس مطالب ذکر شده خاک مسیر احداث قطعه شمالی- جنوبی خط هفت متروی تهران طبق طبقه‌بندی انگلیسی از چهار نوع کلی خاک تشکیل شده است. از بزرگراه نواب تا بزرگراه چمران (۱۲+۵۰۰ تا ۲۰+۹۰۰) خاک عمدتاً از شن (نوع یک) و ماسه (نوع دو)، از بزرگراه چمران تا بزرگراه همت (۲۰+۹۰۰-۲۲+۲۰۰) خاک عمدتاً از سیلت (نوع سه) و رس (نوع چهار)، از بزرگراه همت تا بلوار پاکنژاد (۲۲+۲۰۰-۲۵+۵۵۰) خاک عمدتاً از ماسه (نوع دو) و رس (نوع چهار) و از بلوار پاکنژاد تا خیابان کوهستان (۲۵+۵۵۰-۲۶+۶۰۰) خاک عمدتاً از شن (نوع یک) و ماسه (نوع دو) تشکیل شده است. از انتهای بزرگراه چمران (۲۲+۲۰۰) تا بلوار پاکنژاد (۲۵+۵۵۰) تونل زیر تراز آب زیرزمینی قرار دارد.

شکل (۲-۲) نوع کلی خاک در قطعه شمالی- جنوبی خط هفت متروی تهران را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۲): نوع کلی خاک در قطعه شمالی- جنوبی خط هفت متروی تهران

فصل سوم

بررسی ویژگی‌های عملیاتی ماشین‌های تونل‌زنی *EPB*

۳-۱- مقدمه

ماشین‌های حفر تونل در خاک، معمولاً به ماشین‌های با سپر دوغابی یا سپر آبی و سپر فشار تعادلی زمین تقسیم بندی می‌شوند. انتخاب بین یک ماشین دوغابی و یک ماشین سپر فشار تعادلی و یا ترکیبی از این دو یا ماشین‌های دیگر (سپر ترکیبی) معمولاً نمی‌تواند بر اساس یکی از پارامترها مثل نوع خاک، توزیع ابعادی ذرات در لیتولوژی‌های گوناگون، وجود یا عدم وجود آب زیرزمینی، سطح آب زیرزمینی در صورت وجود آب و یا در نظر گرفتن عمق تونل انجام شود. بلکه همه پارامترهای ذکر شده در انتخاب ماشین اهمیت دارند. بنابراین برای انتخاب صحیح بین دو نوع ماشین لازم است که خصوصیات هر دو نوع ماشین مورد توجه قرار گیرد (Guglielmetti et al, 2007).

۳-۲- ماشین‌های سپر دوغابی^۱

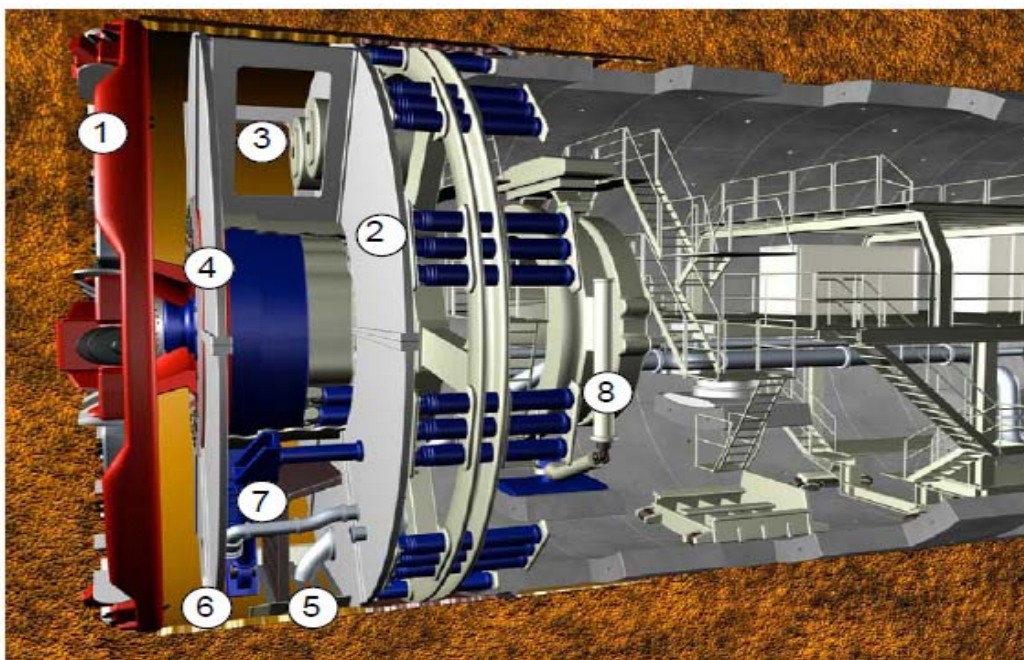
یک ماشین سپر دوغابی، سینه‌کار حفاری را با تزریق سیال (دوغاب بنتونیت^۲)، نگهداری می‌کند. دوغاب اساساً از یک محلول بنتونیت در آب با بعضی از مواد افزودنی در صورت نیاز ساخته می‌شود. خاک حفاری با سیال تزریقی مخلوط شده و در داخل اتاقک حفاری به صورت سیال، برای ایجاد تعادل فشار باقی می‌ماند. اتاقک حفاری^۳ را محفظه انباشت خاک حفاری^۴ نیز می‌گویند، که در واقع فاصله بین سینه‌کار حفاری و دیواره فلزی جداکننده بین اتاقک حفاری از بقیه قسمت‌های ماشین حفاری است. یک سیستم تزریق سیال، دوغاب تازه را وارد اتاقک حفاری کرده و مواد حفاری شده‌ی مازاد به کمک لوله خروجی از اتاقک حفاری خارج می‌شود. برای ایجاد تعادل بین جریان ورودی و خروجی، دوغاب را تحت فشار در اتاقک حفاری نگه می‌دارند. بدین ترتیب، با تغییر در جریان ورودی و خروجی دوغاب، امکان کنترل مقدار فشار سینه‌کار فراهم می‌شود (Toan, 2006). شکل (۳-۱) یک نوع سپر ترکیبی را نشان می‌دهد.

¹ Slurry Shield Machines

² Bentonite

³ Excavation Chamber

⁴ Plenum



۱- کله حفار، ۲- دیواره فشار، ۳- بالشتک هوا، ۴- دیواره غوطه ورکنی^۱، ۵- خط دوغاب، ۶- سنگ شکن، ۷- خط خوراک‌دهی، ۸- نصاب
 شکل (۱-۳): سپر ترکیبی با دو اتاقک (Rehm, 2006)

۳-۲-۱- پارامترهای کلیدی

فرآیند پایدارسازی سینه‌کار و تاج تونل برای دو روش سپر دوغابی و سپر آبی مشابه هم است، اما سپر آبی به علت استفاده از یک بالشتک هوا، ماشین پیچیده‌تری است. امروزه فقط سپرهای نوع دوغابی یا سپر ترکیبی استفاده می‌شوند. ماشین سپر آبی به وسیله ویس^۲ و فریتگ^۳ اختراع شد و به وسیله بید^۴ و تیلن^۵ در دهه ۱۹۷۰ ساخته شده است. در سپر آبی فشار اعمالی از طرف اتاقک حفاری به سینه‌کار، به فشار زمین و فشار هیدرواستاتیک (در صورت وجود) بستگی دارد. بخشی از فشار نگهداری سینه‌کار به وسیله دوغاب تزریقی و بخشی دیگر به وسیله فشار وارده از بالشتک هوا روی دوغاب تأمین می‌شود. این ماشین دارای دو دیواره است، دیواره جلویی اتاقک حفاری را به دو قسمت تقسیم کرده و دیواره عقبی اتاقک

¹ Submerged wall

² Weyss

³ Freitag

⁴ Bade

⁵ Theelen

حفاری را از بقیه قسمت‌های ماشین جدا می‌کند. اتاقک جلویی که کله حفار در آن واقع شده به وسیله سیال پر می‌شود و بخش کوچکی از اتاقک عقبی به وسیله دوغاب پر شده و بقیه‌ی قسمت آن با هوای فشرده پر می‌شود که به آن اصطلاحاً بالشتک هوا می‌گویند. دیواره عقبی در محل ورودی و خروجی هوای فشرده قرار گرفته است. مقدار هوای بالشتک هوا به وسیله یک سیستم اتوماتیک تنظیم می‌شود. دوغاب ورودی و خروجی با عملکرد سیستم انتقال دهنده مواد حفاری کنترل می‌شود. در سپرهای دوغابی قدیمی، کنترل فشار در اتاقک حفاری با تعادل جریان ورودی و خروجی فراهم می‌شد. اگر حجم خارج شده خیلی کم باشد، مواد بیشتری درون اتاقک حفاری انباشته شده، در نتیجه فشار افزایش می‌یابد. در سپر آبی، کنترل فشار در اتاقک حفاری با کنترل فشار بالشتک هوا و هوای فشرده وارد بر دوغاب در اتاقک جلویی انجام می‌شود. علاوه بر این بالشتک هوا نوسانات فشار را نیز تعدیل می‌کند. از طرف دیگر فشار بیش از اندازه دوغاب به صورت خودکار با کاهش فشار هوا در بالشتک هوا کاهش می‌یابد و یک تعادل در سیستم ایجاد می‌کند. خصوصیات جریان دوغاب به خصوصیات زمین و اجزای دوغاب شامل آب و بنتونیت و سایر مواد افزودنی نظیر پلیمرها بستگی دارد. دوغاب علاوه بر اعمال فشار روی سطح سینه‌کار، باعث خنک شدن ابزار و روان‌سازی مؤثر نیز می‌شود (Guglielmetti et al, 2007).

۳-۳- ماشین سپر فشار تعادلی زمین^۱

ماشین سپر فشار تعادلی در ۱۵ سال اخیر برای حفاری فضاهای زیرزمینی در نواحی شهری توسعه داده شده است. ماشین سپر فشار تعادلی با بهره‌مندی از مواد افزودنی می‌تواند در خاک‌های چسبنده تا خاک‌های دانه‌ای با چسبندگی کم و در زمین‌های غیرهمگن دارای سنگ و خاک بکار رود. تکنولوژی EPB اساساً مبنی بر استفاده از خاک حفاری شده موجود در اتاقک حفاری برای نگهداری سینه‌کار است (Rehm, 2006). فشار نگهداری سینه‌کار به کمک فشار اعمالی بر خاک حفاری موجود در اتاقک

^۱ Earth Pressure Balance Shield Machine

حفاری فراهم می‌شود، حفر در کله حفار TBM به وسیله ابزارهای برش مانند دیسک‌ها یا پیک‌ها انجام می‌گیرد. خاک حفاری شده در اتاقک حفاری (شبهه اتاقک حفاری سپر دوغابی) انباشته می‌شود و سپس به کمک نقاله ماریپیچی به بیرون منتقل می‌شود. مقدار خاک خارج شده از اتاقک حفاری متناسب با سرعت گردش نقاله ماریپیچی است، در حالی که مقدار خاک حفاری شده متناسب با نرخ نفوذ TBM است. بنابراین تعادل دینامیکی مبتنی بر تعادل حجم خاک حفاری شده و حجم خاک خارج شده در اتاقک حفاری ایجاد می‌شود و تنظیم این تعادل به واسطه تغییر سرعت گردش نقاله ماریپیچی صورت می‌گیرد. مواد انباشته شده در اتاقک حفاری برای ایجاد فشار نگهداری و پایداری سینه‌کار استفاده می‌شود. فشار سینه‌کار با تغییر سرعت گردش نقاله ماریپیچی که خود تابعی از نرخ نفوذ ماشین است، کنترل می‌شود. روی هم‌رفته توابع اساسی در حفاری با ماشین EPB خروج خاک حفاری و کنترل فشار سینه‌کار تونل است. نقاله ماریپیچی امکان توزیع فشار در اتاقک حفاری را از مقدار حداکثر (در روی تراز کف اتاقک حفاری) تا دریچه خروجی فراهم می‌کند. جک‌های هیدرولیکی فشار طولی را بر روی سپر و دیواره‌ی تنظیم‌کننده اعمال می‌کنند، یعنی با باز و جمع شدن جک‌ها عمل سگمنت‌گذاری در داخل سپر پشتی و حرکت رو به جلوی ماشین فراهم می‌شود. فشار اعمالی ماشین باید به اندازه‌ای باشد که ضمن نگهداری سینه‌کار تونل، سبب کاهش نیروهای اصطکاکی روی سپر شود (Borghi, 2006).

۳-۳-۱- جنبه‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیک

اینکه چه خاک‌هایی بیشتر برای حفاری EPB مناسب هستند، از لحاظ فنی موضوع مهمی است. به خصوص درباره حفاری آسان و بهسازی مناسب خاک این مسأله اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. انتخاب و مدیریت حفاری EPB از جنبه‌های مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرد که به تفصیل در ذیل آورده شده است (Guglielmetti et al, 2007):

۱- نوع خاک (چسبنده، اصطکاکی، سنگ خرد شده و غیره): نوع خاک در کارآیی ماشین، بهسازی خاک داخل اتاقک حفاری و پایداری سینه کار مؤثر است. کاربرد این ماشین در خاک‌هایی که مقدار مصالح دانه ریز آن کمتر از ۱۰ درصد است، مناسب نمی‌باشد.

۲- نفوذ و محل سطح آب زیرزمینی: استفاده از EPB در خاک‌هایی با نفوذ پذیری کمتر از $10^{-5} m/s$ و افت فشار کمتر از ۳ بار مناسب است. اگر نفوذ پذیری بزرگتر از $10^{-5} m/s$ باشد، به نوع و مقدار عامل‌های افزودنی اضافه شده به اتاقک حفاری و نیز چگونگی کارکرد نقاله مارپیچی تعیین کننده عملکرد ماشین خواهند بود.

۳- لایه‌بندی خاک و ناپیوستگی نسبت به مقطع تونل (حفاری ماشین EPB روی سینه کار با لایه‌بندی مختلف خاک)

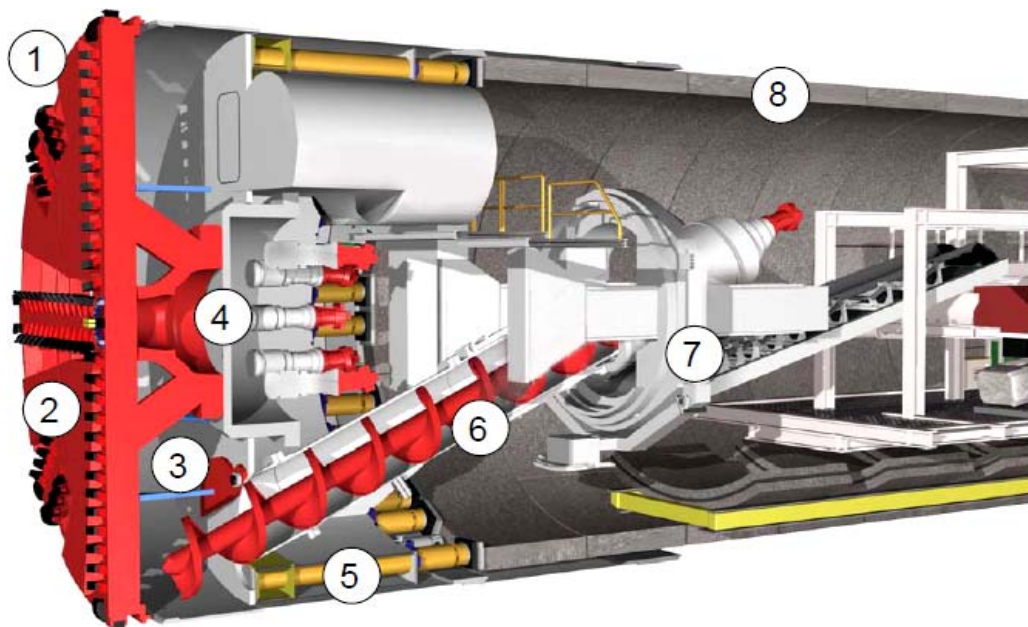
۴- درصد بزرگترین ابعاد، سختی و ساینده‌گی سنگ (در صورت وجود): این جنبه از لحاظ فرسایش، شکست مکانیکی تجهیزات و انسداد کله حفار و در نتیجه توقف در حفاری اهمیت دارد.

۵- مواد با فعالیت شیمیایی بالا: مسأله بهسازی خاک در خاک‌های با فعالیت شیمیایی بالا نظیر رس‌ها از لحاظ چسبندگی و انسداد کله حفار دارای اهمیت است.

۳-۲- عملیات خروج خاک حفاری

پس از حفاری باید مواد حفاری شده به وسیله نقاله مارپیچی از داخل اتاقک حفاری خارج شوند. نقاله مارپیچی مواد حفاری شده را برداشته و روی نوار نقاله ریخته و مواد خروجی از نوار نقاله به وسیله واگن و کامیون‌ها به بیرون برای دمپ منتقل می‌شود. وقتی نفوذپذیری خاک در اتاقک حفاری بیشتر از حد لازم و تراز تونل زیر سطح آب زیرمینی باشد، فشار آب می‌تواند به داخل تونل و در نتیجه در سرتاسر نقاله مارپیچی جریان یابد. برای کاهش نفوذپذیری خاک در مقابل آب و اجتناب از جریان آب بهتر است که عامل‌های بهسازی بر روی نقاله مارپیچی نیز تزریق شود. از آنجا که حجم خاک خروجی از نقاله مارپیچی

محدود است، بهسازی یک راه حل سریع و مناسب برای تغییر خصوصیات خاک حفاری است. شکل (۳-۲) یک نوع سپر فشار تعادلی زمین را می‌دهد (Borghi, 2006).



۱- سینه‌کار، ۲- کله حفار، ۳- اتاقک حفاری، ۴- دیواره فشار^۱، ۵- جک فشاری، ۶- نقاله مارپیچی، ۷- نصاب، ۸- سگمنت
 شکل (۳-۲): سپر فشار تعادلی زمین (Rehm, 2006)

۳-۳-۳- معیارهای انتخاب بین سپر دوغابی و فشار تعادلی زمین

ماشین حفاری شهری فقط می‌تواند یک سپر دوغابی یا یک سپر فشار تعادلی زمین یا سپر ترکیبی (ترکیبی از دو ماشین) باشد. انتخاب نهایی بین سه نوع ماشین به شرایط خاص پروژه بستگی دارد. معیارهایی لازم برای انتخاب ماشین به طور خلاصه شامل ۱- ویژگی‌های خاک ۲- نوع کله حفار، ۳- چگونگی تزریق فضای پشتی، ۴- چگونگی خروج مواد حفاری شده می‌باشد (Guglielmetti et al, 2007).

۳-۳-۳-۱- ویژگی‌های خاک

بسیاری از مؤلفین به منظور انتخاب ماشین خاک، را به دو طبقه تقسیم‌بندی کرده‌اند، که یک رده از خاک برای ماشین‌های حفاری سپر دوغابی و رده دیگر برای ماشین سپر فشار تعادلی زمین مناسب

¹ Bulkhead

هستند. طبیعی است که در بعضی موارد نقاط اشتراک هم وجود دارد. در سپر دوغابی با تشکیل کیک^۱، سینه‌کار نگهداری می‌شود. در خاک‌ها با نفوذپذیری زیاد امکان تشکیل کیک بسیار مشکل است. به دلیل نفوذپذیری بالا در خاک دانه‌ای و همچنین مشکلات جدایش در خاک‌های ریز دانه، باید حد بالای اندازه ذرات و حد پایین اندازه ذرات مشخص گردند. در سپر فشار تعادلی زمین مستقیماً از خاک حفاری شده داخل اتاقک حفاری برای نگهداری سینه‌کار استفاده می‌شود. چنانچه مواد داخل اتاقک حفاری تقریباً به شکل خمیری یا دوغابی با دانسیته بالا (به عنوان مثال مخلوط رس با آب) باشد، فشار نگهداری را می‌توان به راحتی تنظیم کرد. اما مخلوط رس و آب تنها کافی نیست، بلکه برای تغییر خصوصیات خاک باید موادی به آن اضافه کرد. به علاوه یکی از مهمترین عوامل برای عملکرد مناسب EPB ایجاد افت فشار در نقاله مارپیچی است. مقدار فشار در پایین اتاقک حفاری از یک مقدار کمینه شروع شده تا در نقاط تزریق نقاله مارپیچی به بیشترین مقدار رسیده و در دریچه خروجی مقدار فشار به صفر می‌رسد. بدون بهسازی خاک استفاده از EPB در خاک‌های سست و سپر دوغابی در خاک‌های با نفوذپذیری بالا دارای مشکلاتی است. به هر حال، هر دو نوع ماشین در صورت وجود قطعات با ابعاد خیلی بزرگ دارای مشکلاتی هستند (Guglielmetti et al, 2007).

۳-۳-۲- کله حفار و ابزارهای حفاری

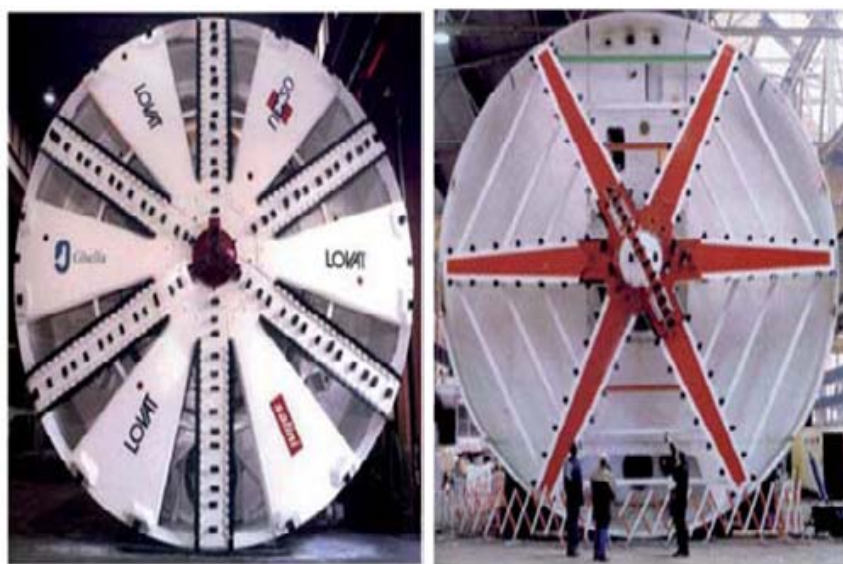
موقعیت و ساختار ابزارهای حفاری روی کله حفار بر میزان حجم خاک حفاری تأثیر دارد. نسبت بین ناحیه بازشدگی^۲ در کله حفار و بخش حفاری شده، تأثیر مستقیمی روی ظرفیت نگهداری مکانیکی و کنترل فشار نگهداری سینه‌کار دارد. معمولاً برای سپر دوغابی نسبت بازشدگی کله حفار بیشتر از ۵۰ درصد است. در صورتی که برای ماشین سپر فشار تعادلی بین ۲۰ تا ۳۵ درصد تغییر می‌کند. شکل (۳-۳) ناحیه بازشدگی کله حفار در ماشین‌های فشار تعادلی را نشان می‌دهد. در حقیقت تشکیل کیک در یک

¹ cake

² Opening Ratio

سپر دوغابی یک فاصله بین سینه کار و دوغاب ایجاد می‌کند. بر عکس در ماشین EPB، سینه کار با توجه به خاک حفاری موجود در اتاقک حفاری نگهداری می‌شود. لذا ساختار کله حفار در سپر دوغابی باید سبکتر از ساختار یک EPB باشد، همچنین نسبت باز شدگی کله حفار ماشین دوغابی، بزرگتر و تعداد ابزارهای برش نصب شده روی آن کمتر است.

امروزه قابلیت حفاری کله حفار در سنگ برای اجتناب از ورود کارگران به داخل اتاقک حفاری برای برداشت قطعات خیلی بزرگ بهبود یافته است (Guglielmetti et al, 2007).



ب) سپر فشار تعادلی زمین

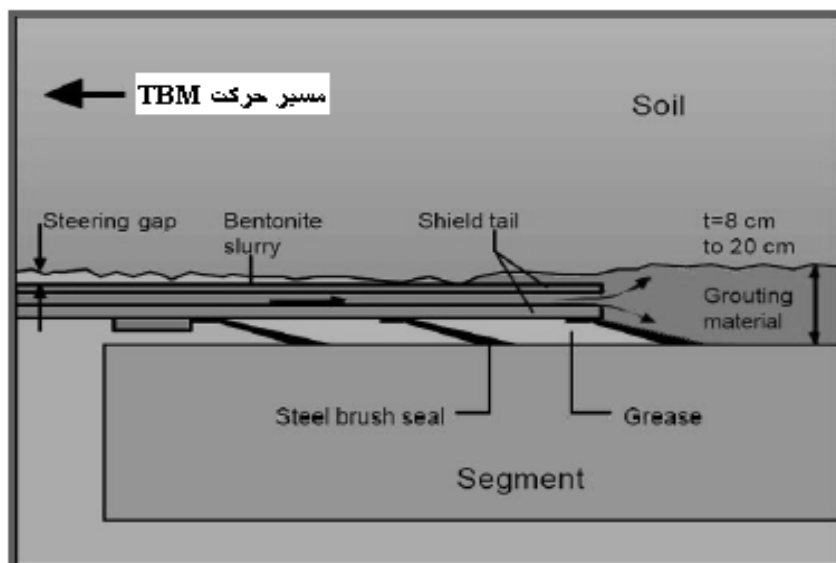
الف) سپر دوغابی

شکل (۳-۳): ناحیه باز شدگی کله حفار در ماشین‌های فشار تعادلی (Guglielmetti et al, 2007).

۳-۳-۳-۳- تزریق در فضای خالی پشت سگمنت

در تونل‌های حفاری شده به وسیله ماشین‌های سپر دوغابی و فشار تعادلی در نواحی شهری از سگمنت‌های پیش ساخته به عنوان نگهداری استفاده می‌شود. سگمنت‌ها را در پایان هر سیکل حفاری در انتهای سپر جاگذاری می‌شوند، یعنی در منطقه‌ای که جک‌های هیدرولیکی فشار را برای پیشروی اعمال می‌کند. در پشت سگمنت فضای خالی به وجود می‌آید، این فضاها را خالی توسط سه عامل مخروطی

شدن سپر برای پیشروی آسانتر ماشین (تفاوت بین قطر در قسمت جلو و عقب سپر)، تفاوت بین قطر سپر و سگمنت‌های پیش ساخته‌ی نصب شده و برش اضافی لازم برای حرکت ماشین پدید می‌آیند. نصب صحیح و انتقال یکنواخت بار بر روی سگمنت‌ها و پر شدن فضای خالی بین سگمنت و خاک، نشست سطح زمین را کنترل می‌کند. پرکردن معمولاً با تزریق دوغاب سیمان انجام می‌گیرد. یک واشر (برس سیمی در سه ردیف) از ورود دوغاب سیمان از شکاف بین سگمنت و سپر جلوگیری می‌کند. دوغاب سیمان مخلوطی از سیمان، دانه‌های ریز، آب و دیگر افزودنی‌ها است. در حفاری مکانیزه بحث بر این است که چگونه فضای خالی بین مقطع حفاری شده و قسمت بالای سپر در طول سپر باید پر شوند. واضح است که در ماشین سپر دوغابی به طور طبیعی دوغاب بنتونیت با فشاری که به اتافک حفاری اعمال می‌شود از آن خارج شده و فضای خالی را پر می‌کند. در ماشین‌های EPB فقط فوم، هوا و آب فضای خالی را پر می‌کنند، بدون اینکه هیچ گونه نگهداری مؤثری صورت گیرد. شکل (۳-۴) نحوی پر شدن فضای پشت سگمنت را نشان می‌دهد (Gruebl, 2006).



شکل (۳-۴): پر شدن فضای خالی پشت سگمنت (Gruebl, 2006)

۳-۳-۴- چگونگی خروج مواد حفاری شده

تفاوت بین سیستم خروج مواد در سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین این است که مواد در ماشین سپر دوغابی به صورت مخلوطی از آب، بنتونیت، پلیمر و خاک حفاری از اتاقک حفاری برای کارگاه جدایش در سطح زمین پمپاژ می‌شوند. اما در ماشین سپر فشار تعادلی زمین مواد خروجی به کمک لوکوموتیو به بیرون منتقل می‌شوند. تنها در موارد محدودی در سپر فشار تعادلی زمین، مواد از طریق خطوط لوله و پمپاژ با افزودن آب به مواد استخراجی به بیرون از تونل منتقل می‌شوند. در ماشین سپر دوغابی قسمت جامد از مایع جدا شده و در ناحیه دمپ باطله انباشته می‌شود و قسمت مایع با افزودن بنتونیت تازه دوباره وارد سیکل حفاری می‌شود. اما در ماشین سپر فشار تعادلی زمین، مواد بدون اینکه هیچ فرآیندی روی آن صورت بگیرد، دپو می‌شوند (Borghini, 2006).

۳-۴- مقایسه بین سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین

معیارهای انتخاب سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین در نواحی شهری عمدتاً تحت تأثیر شرایط ژئوتکنیکی، عوامل اقتصادی و زیست محیطی است. اگر چه پایداری سینه کار و کنترل فرونشست برای هر دو ماشین باید لحاظ می‌شود (www.lovat.com).

- روش سپر دوغابی به دلیل جدایش بنتونیت نیاز به تأسیسات بزرگی دارد و برای محیط شهری به دلیل کمبود فضا از EPB استفاده می‌شود.

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

- آلودگی زیست محیطی در هر دو روش وجود دارد.

- نیاز به جدایش بنتونیت از خرده حفاری در سپر دوغابی امکان انسداد لوله به وسیله ذرات درشت وجود دارد. در روش حفاری EPB امکان کلوخه شوندگی خاک در اتاقک و نقاله مارپیچی امر ضروری است. در روش حفاری سپر دوغابی وجود دارد. بنابراین بهسازی مناسب در هر دو روش عامل مهمی به شمار می‌آید.

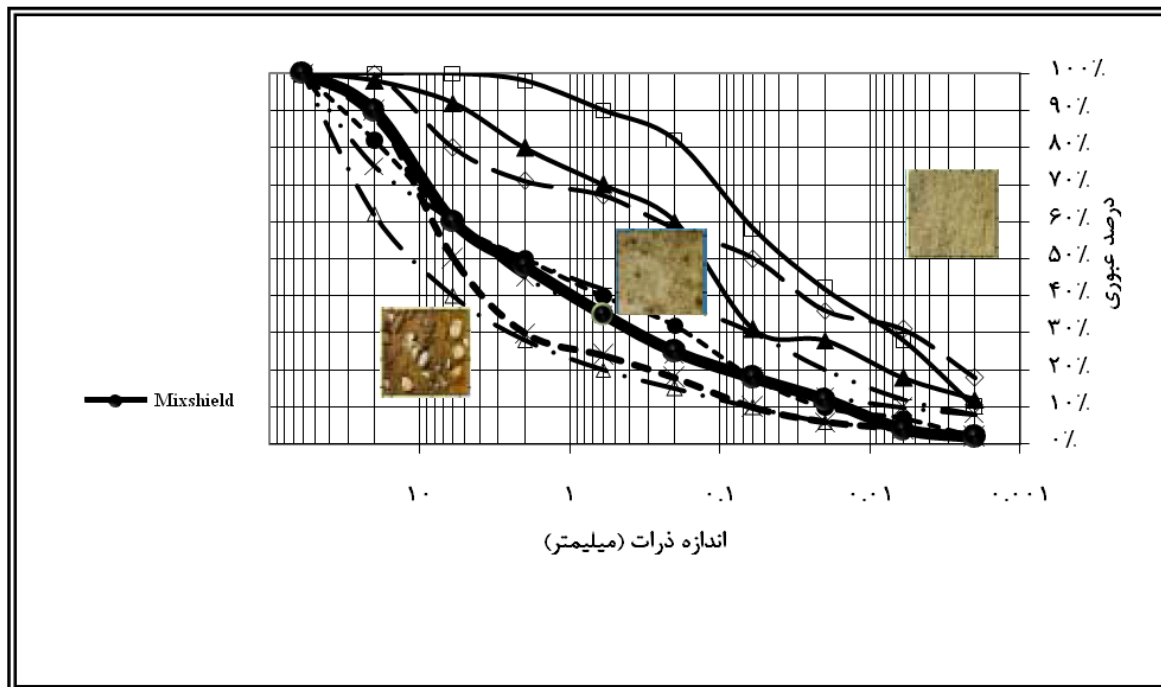
- در هر دو ماشین امکان بالازدگی در اعماق کم وجود دارد.

- محیط تونل در ماشین دوغابی نسبت به ماشین فشار تعادلی زمین از تمیزی خوبی برخوردار است.

جمع بندی:

ماشین دوغابی عمدتاً برای خاک‌های دانه درشت استفاده می‌شوند. هر چند ماشین‌های EPB در ابتدا برای خاک‌های دانه ریز استفاده می‌شدند، اما با توسعه روش‌های بهسازی خاک برای خاک‌های دانه درشت مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

شکل (۳-۵) مقایسه بین محدوده دانه‌بندی خاک خط هفت تهران با حد استاندارد ماشین EPB از نوع سپر ترکیبی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳-۵) بنظر می‌رسد که در خط هفت متروی تهران با توجه به دانه‌بندی خاک، شرایط برای ماشین EPB از نوع Mixshield مناسب می‌باشد.



شکل (۳-۵): مقایسه بین محدوده دانه‌بندی خاک خط هفت تهران با حد استاندارد ماشین EPB

فصل چهارم

روش‌های تحلیلی و تجربی برآورد فشار خاک

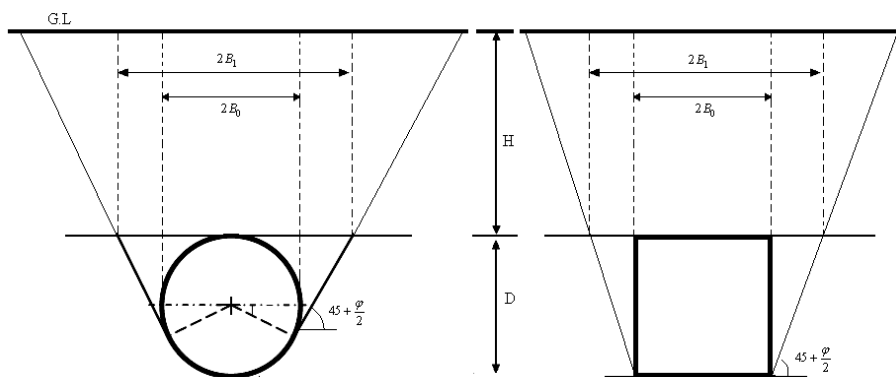
۴-۱- مقدمه

فشار خاک یا سنگ به همراه فشار آب، اثر قابل توجهی بر روی سازه‌های زیرزمینی دارند. بارهای زنده مربوط به وسایل نقلیه سهم کمتری روی فشار وارده بر سازه دارند و می‌توان از آنها صرف نظر کرد، بجز در شرایطی که تونل در اعماق کم به روش کند و پوش^۱ احداث می‌شود. برآورد فشار نگهداری لازم برای پایداری سینه‌کار حفاری یکی از مهمترین عوامل بر راندمان حفاری ماشین در نواحی شهری است. در مناطق خاکی معمولاً در اعماق کم با اعمال فشار بیشتر یا کمتر از حد تعادلی، به ترتیب بالازدگی و فرونشست و در مناطق با عمق بیشتر معمولاً پدیده فرونشست رخ می‌دهد. روش‌های تحلیلی و تجربی روش‌های مناسبی برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل می‌باشند.

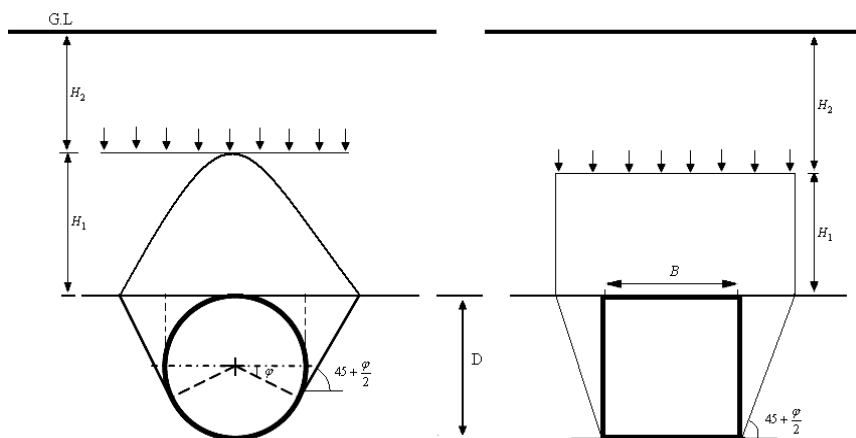
۴-۲- نظریه ترزاقی

نظریه ترزاقی برای محاسبه بار روی تونل در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده ارائه شده است. اگر قسمتی از توده خاک در بالای فضای تونل در حین حفاری به حد تسلیم برسد، خاک در آن ناحیه دچار ریزش شده و در نتیجه توده‌های خاک مجاور نیز تحت تأثیر ناحیه سست‌شدگی از وضعیت ساکن خود خارج می‌شوند. در نواحی کم عمق ($H < 2B_1$)، مطابق شکل (۴-۱)، ناحیه سست شده به سطح زمین می‌رسد که اصطلاحاً حالت بدون قوس را تشکیل می‌دهد. فشار عمودی روی تونل در این حالت از رابطه (۴-۱) به دست می‌آید. در نواحی عمیق ($H > 2B_1$)، قوسی مطابق شکل (۴-۲) در بالای تونل تشکیل می‌شود. در این حالت، توده خاک بالای قسمت قوسی و بار ثابت روی سطح زمین به عنوان یک بار ثابت روی قسمت قوسی اعمال می‌شود. فشار عمودی روی تونل در حالت وجود قوس از رابطه (۴-۲) به دست می‌آید.

¹ Cut and Cover



شکل (۱-۴): ناحیه سست‌شدگی در تونل‌های کم عمق (Terzaghi, 1943).



شکل (۲-۴): تشکیل قوس در تونل‌های عمیق (Terzaghi, 1943).

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H}{B_1}} \right) + q_0 \left(e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H}{B_1}} \right) \quad (1-4)$$

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_1}{B_1}} \right) + (\gamma \cdot H_2 + q_0) \cdot \left(e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_1}{B_1}} \right) \quad (2-4)$$

در این روابط c چسبندگی خاک، K_0 ضریب فشار جانبی خاک که از رابطه $(K_0 = 1 - \sin \varphi)$ به دست می‌آید، H ارتفاع روباره، D ارتفاع تونل، B_0 نصف عرض یا قطر تونل، B_1 نصف عرض بارگذاری، H_1 ارتفاع قوسی و H_2 فاصله سطح زمین تا تاج قوسی، q_0 بار سطحی، γ وزن مخصوص خاک، φ زاویه اصطکاک داخلی و σ_v فشار عمودی متوسط روی تاج تونل می‌باشد.

عرض بارگذاری برای مقاطع مربع یا مستطیل و دایره به ترتیب از روابط (۳-۴) و (۴-۴) به دست می‌آید.

$$B_1 = B_0 + D \cdot \tan(45 - \varphi/2) \quad (۳-۴)$$

$$B_1 = R \left[\tan(45 - \varphi/2) + (\cos(45 - \varphi/2))^{-1} \right] = R \left[\cot \left(\frac{45}{2} + \frac{\varphi}{4} \right) \right] \quad (۴-۴)$$

که در این روابط R شعاع تونل است. در عمق‌های خیلی زیاد از ارتفاع روباره صرف نظر شده و فشار عمودی از رابطه (۵-۴) به دست می‌آید.

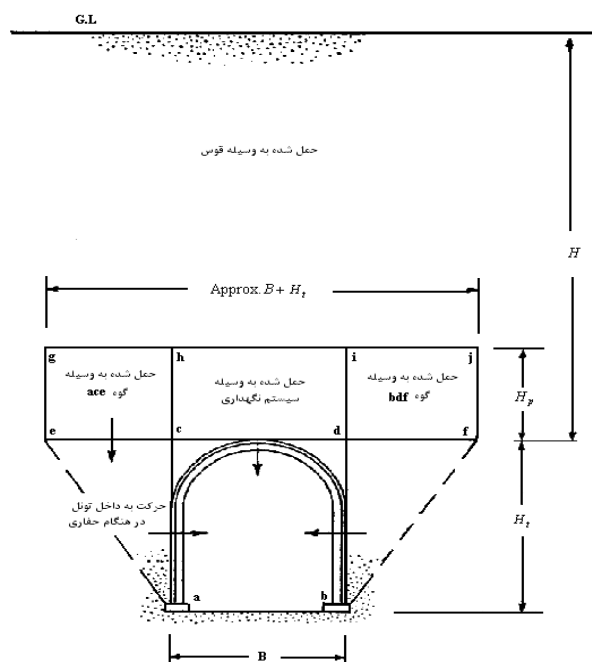
$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \quad (۵-۴)$$

در مواردی که تونل در مناطق ماسه‌ای حفاری می‌شود، جنبه‌های ایمنی لحاظ شده و (c = 0) در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط، فشار عمودی از رابطه (۶-۴) به دست می‌آید (Terzaghi, 1943).

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma}{K_0 \cdot \tan \varphi} \quad (۶-۴)$$

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 می‌باشد. نکته مهم در کاربرد روش ترزاقی، محاسبه صحیح ارتفاع سست‌شدگی است. ترزاقی برای محاسبه ارتفاع سست‌شدگی مطابق شکل (۳-۴) رابطه (۷-۴) ارائه نموده است.

$$H_p = C * (B + H_t) \quad (۷-۴)$$

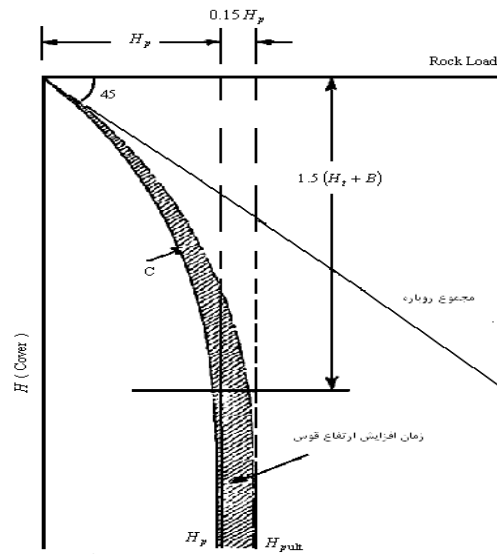


شکل (۳-۴): مدل بار روی تونل (Tien, 1996)

مقدار ضریب ثابت C برای حالاتی در حالتی که تونل بالاتر یا زیر سطح آب زیرزمینی حفاری شده باشد، در جدول (۱-۴) آمده است. طبق تجارب ترزاقی بار واقعی سست‌شدگی معمولاً به مقدار H_{Pmin} در مقایسه با H_{Pmax} نزدیکتر است. طبق پیشنهاد ترزاقی برای جلوگیری از افزایش ارتفاع سست‌شدگی، باید سیستم نگهداری بلافاصله بعد از حفر فضا نصب شود. همچنین مطابق شکل (۴-۴) بعد از نصب سیستم نگهداری حدوداً ۱۵ درصد به ارتفاع سست‌شدگی اولیه اضافه می‌شود (Tien, 1996).

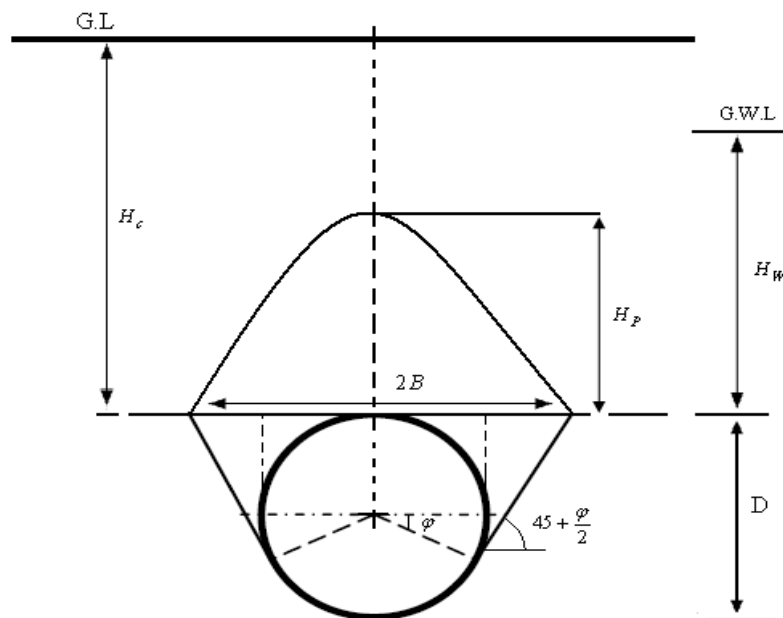
جدول (۱-۴): ارتفاع سست‌شدگی در روش ترزاقی (Tien, 1996)

نوع خاک	مقدار	تونل بالای تراز آب زیرزمینی		تونل پایین تراز آب زیرزمینی	
		H_{Pmin}	H_{Pmax}	H_{Pmin}	H_{Pmax}
ماسه متراکم	اولیه	$0.27(B + H_t)$	$0.60(B + H_t)$	$0.54(B + H_t)$	$1.02(B + H_t)$
	نهایی	$0.31(B + H_t)$	$0.69(B + H_t)$	$0.62(B + H_t)$	$1.38(B + H_t)$
ماسه سست	اولیه	$0.47(B + H_t)$	$0.60(B + H_t)$	$0.94(B + H_t)$	$1.02(B + H_t)$
	نهایی	$0.54(B + H_t)$	$0.69(B + H_t)$	$1.08(B + H_t)$	$1.38(B + H_t)$



شکل (۴-۴): رابطه بین ارتفاع سست‌شدگی با ارتفاع روپاره روی یک تونل در ماسه یا سنگ خرد شده (Tien, 1996).

در روش محاسباتی دیگر، ارتفاع سست‌شدگی از تقسیم تنش قائم بر وزن مخصوص خاک به دست می‌آید. در شکل (۵-۴) قوس بالای تونل را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۴): قوس بالای تونل (ITA, 2000)

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_c}{B_1}} \right) + q_0 \left(e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_c}{B_1}} \right) \quad (8-4)$$

$$H_p = \sigma_v / \gamma_d \quad (9-4)$$

فشار جانبی خاک جلوی ماشین حفاری در مرکز تونل در حالتی که تونل بالای سطح آب زیرزمینی حفاری شده باشد، از رابطه (۱۰-۴) به دست می‌آید.

$$\sigma_T = K_a \times \gamma_d \times (H_p + R) \quad (10-4)$$

$$K_a = (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi) \quad (11-4)$$

که در آن K_a ضریب فشار جانبی خاک در حالت فعال است. در حالتی که تونل زیر سطح آب زیرزمینی حفاری شود، ناحیه‌ی بالای تونل به دو بخش تقسیم کرده و فشار ناحیه خشک از رابطه (۱-۴) به دست می‌آید و به عنوان یک بار ثابت روی قسمت آبدار اعمال می‌شود. در این شرایط از تقسیم فشار قائم بر وزن مخصوص غوطه‌ور خاک، ارتفاع سست‌شدگی به دست می‌آید. از مجموع فشار آب و فشار خاک، فشار کل به دست می‌آید (ITA, 2000). روابط ارائه شده برای محاسبه فشار قائم روی تونل در خاک‌های دانه‌ای را می‌توان برای خاک‌های چسبنده نیز استفاده نمود. طبق پیشنهاد ترزاقی در محاسبه بار روی تونل اگر عرض بارگذاری از نسبت چسبندگی به وزن مخصوص خاک کوچکتر باشد ($B_1 \leq c/\gamma$)، در هر عمقی فشار روی سقف تونل، صفر منظور می‌شود (Terzaghi, 1943).

۳-۴- روش‌های تحلیلی

یکی از روش‌های بررسی پایداری ساختار خاک استفاده از روش‌های تحلیلی است. به کمک این روش‌ها می‌توان حدود ناپایداری را در ساختار خاک تعیین کرد. این روش به دو روش آنالیز حدی و تعادل حدی تقسیم می‌شود. روش‌های تحلیلی در پایداری سینه‌کار تونل در ذیل توضیح داده شده است.

۴-۳-۱- روش میوریما^۱ (۱۹۶۶)

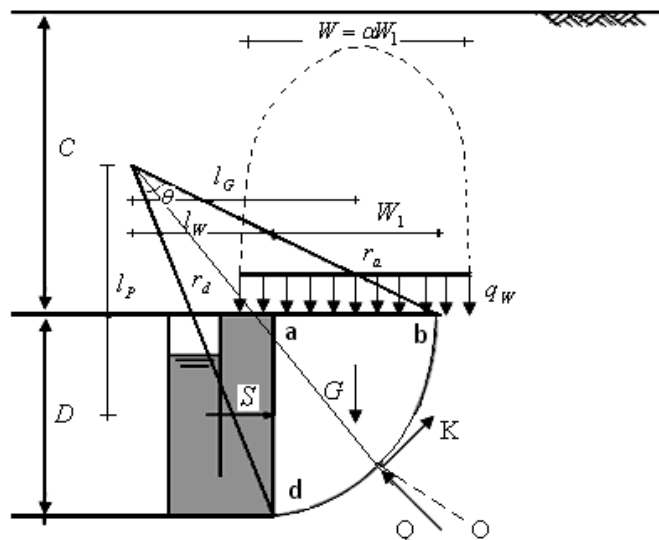
در این مدل سطح گسیختگی به صورت پیچ^۲ لگاریتمی در نظر گرفته شده و بار ناشی از وزن خاک q_w بر طبق نظریه ترزاقی (۱۹۴۳) محاسبه می‌شود. در شکل (۴-۶) مدل پایداری سینه‌کار در روش میوریما را نشان می‌دهد. برای پایداری سینه‌کار لازم است که تعادلی بین ممان حاصل از نیروهای وزن $(q_w + G)$ و نیروی اعمال شده روی سینه‌کار تونل (S) و مقاومت برشی در طول سطوح گسیختگی به وجود می‌آید. در این روش شرایط پایداری سینه‌کار بسیار نامساعد در نظر گرفته می‌شود، بنابراین بیشترین فشار نگهداری از روابط (۴-۱۲)، (۴-۱۳) و (۴-۱۴) به دست می‌آید (Broere, 2001).

$$S = (G.l_G + q_w.W_1(l_w + W_1/2) - c(r_d^2 - r_a^2)/2 \tan \phi) / 2R.l_p \quad (۴-۱۲)$$

$$P = S \cdot D \quad (۴-۱۳)$$

$$r_a = r_d \cdot e^{\theta \cdot \tan \phi} \quad (۴-۱۴)$$

که در این رابطه r_a شعاع شروع گسیختگی، r_d شعاع پایان گسیختگی، W عرض بارگذاری و G وزن گوه است.



شکل (۴-۶): مدل پایداری سینه‌کار در روش میوریما (Broere, 2001).

¹ Murayama

² Spiral

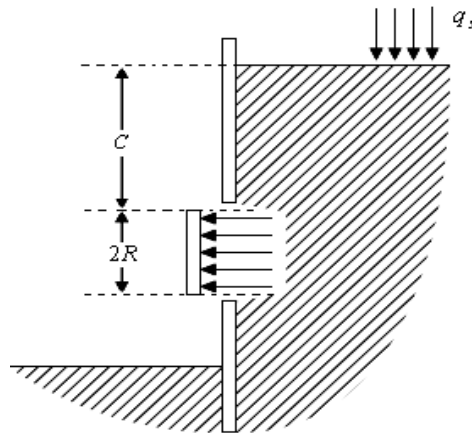
۴-۳-۲- روش برومز و بنمارک^۱ (۱۹۶۷)

این روش برای بررسی تحلیل پایداری فضای نگهداری نشده در یک خاک چسبنده و زهکشی نشده به کار می‌رود. معیار کمترین فشار لازم برای پایداری سینه‌کار از رابطه (۴-۱۵) به دست می‌آید.

$$\sigma_T = \gamma \cdot (C + R) + q_s - N \cdot c_u \quad (۴-۱۵)$$

که در آن، 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 ($N \leq 6$) و σ_T حداقل فشار پایداری است.

در شکل (۴-۷) مدل تحلیل پایداری سینه‌کار تونل برومز و بنمارک را نشان می‌دهد (Takemura, j, 1990 , Langmaak, 2000).



شکل (۴-۷): مدل تحلیل پایداری سینه‌کار تونل (Guglielmetti et al, 2007)

۴-۳-۳- روش اتکینسون و پاتز^۲ (۱۹۷۷)

این روش برای تعیین حداقل فشار نگهداری سینه‌کار حفاری در شرایط خاک خشک غیر چسبنده برای تونل بدون پوشش، با دو شرط حدی متفاوت (۱) $\gamma = 0, q_s > 0$ و (۲) $\gamma > 0, q_s = 0$ استفاده می‌شود. مورد دوم شامل دو روش کران پایین است که معمولاً با در نظرگیری یک ضریب ایمنی فرمول این روش مطابق روابط (۴-۱۶) و (۴-۱۷) است (Guglielmetti et al, 2007).

¹ Broms & Bennemark

² Atkinson & Potts

$$S_{\min} = [2K_p / (K_p^2 - 1)] \gamma \cdot R \quad (16-4)$$

$$K_p = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi) \quad (17-4)$$

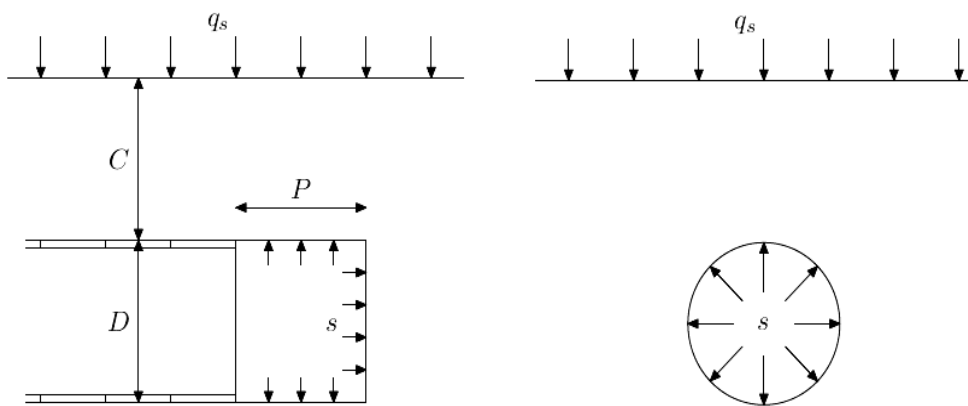
در این رابطه φ زاویه اصطکاک داخلی، K_p ضریب فشار غیر فعال خاک است.

۴-۳-۴- روش دیویس و همکاران^۱ (۱۹۸۰)

این روش برای تحلیل پایداری یک تونل با شعاع R در خاک چسبنده در جایی که سیستم نگهداری تونل به فاصله P از سینه کار حفاری نصب شده، به کار می‌رود. روش کران بالا و پایین تحت شرایط کلی برای دو حالت خاص یعنی $P = \infty$ (مطابق شکل (۸-۴)) و $P = 0$ تحلیل شده است. حالت $P = 0$ برای شرایطی که حفاری با TBM انجام شده باشد، استفاده می‌شود. دو روش کران پایین با یک میدان تنش سیلندری و یک میدان تنش بیضوی تعریف می‌شود. ضریب پایداری برای دو میدان تنش به ترتیب در روابط (۴-۱۸) و (۴-۱۹) تعریف شده است و در شکل (۴-۹) رابطه ضریب پایداری با روبراه و قطر تونل آورده شده است. ضریب پایداری بزرگتر از ۶ بیانگر ناپایداری سینه کار تونل در این روش است (Broere, 2001).

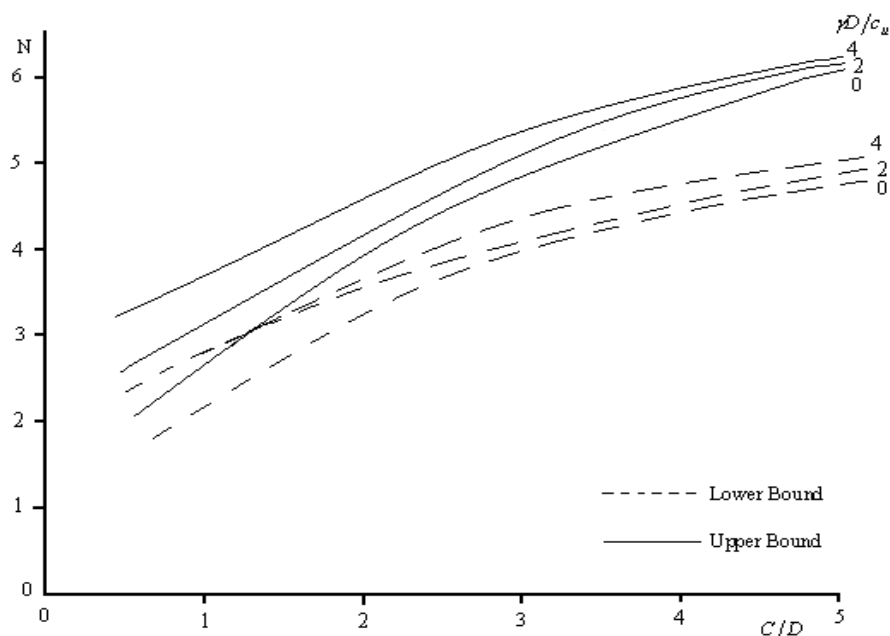
$$N = 2 + 2 \ln(C/R + 1) \quad (18-4)$$

$$N = 4 \cdot \ln(C/R + 1) \quad (19-4)$$



شکل (۸-۴): شمایی از روش بارگذاری در روش دیویس (Broere, 2001).

¹ Davis et al



شکل (۴-۹): عدد پایداری برای روش کران بالا و پایین برای یک تونل (Broere, 2001)

۴-۳-۵- روش کروس^۱ (۱۹۸۷)

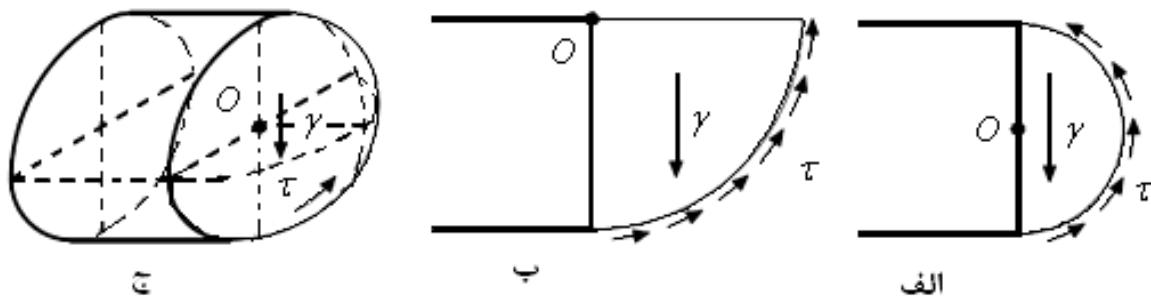
در این روش کمترین فشار نگهداری برای حالات مختلف شکستگی، مطابق شکل (۴-۱۰)، در نظر گرفته می‌شود. شکل (ب) یک مدل با سطح گسیختگی یک ربع دایره را نشان می‌دهد که متناظر با بیشترین مقدار برای حداقل فشار نگهداری سینه‌کار را در رابطه (۴-۲۰) است و در بسیاری از موارد مدل نیم‌بیضی که در رابطه (۴-۲۱) آورده شده است، حل نزدیک‌تری به واقعیت نتیجه می‌دهد.

$$S_{\min} = \cot \varphi \cdot (D \cdot \gamma' / 9 - \pi \cdot c / 2) \quad (۴-۲۰)$$

$$S_{\min} = \cot \varphi \cdot (D \cdot \gamma' / 3 - \pi \cdot c / 2) \quad (۴-۲۱)$$

در این روابط c چسبندگی و S_{\min} حداقل فشار نگهداری است (Broere, 2001).

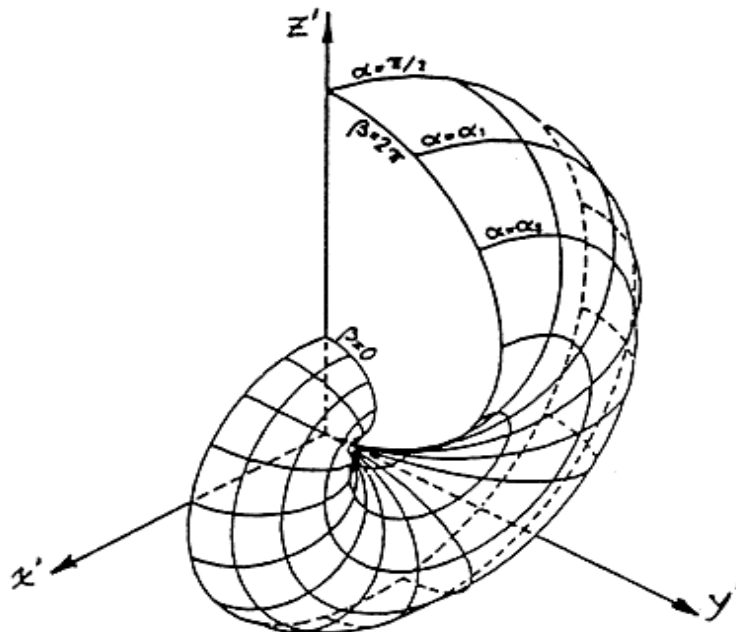
^۱ Krause



شکل (۴-۱۰): روش‌های مختلف شکست در سینه‌کار تونل به روش کروس (Broere, 2001)

۴-۳-۶- روش محکم و همکاران^۱ (۱۹۸۹)

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 می‌نماید. بار عمودی روی گوه به کمک روابط ترازقی محاسبه می‌شود. شکستگی پیچ لگاریتمی در مدل ارائه شده توسط محکم مطابق شکل (۴-۱۱) بروز می‌نماید.



شکل (۴-۱۱): مکانیزم شکست در روش محکم (Mohkam et al, 1989)

¹ Mohkam et al

۴-۳-۷- روش لکا و دورمیو^۱ (۱۹۹۰)

روش‌های کران بالا^۲ و کران پایین^۳ لکا و دورمیوکس برای پایداری سینه‌کار تونل‌های دایره‌ای کم عمق در مواد نظیر خاک‌های ماسه‌ای ارائه شده است. در روش کران پایین میدان تنش را برای یک جسم تحت اثر میدان تنش تا حدی در نظر می‌گیرند که جسم تحت تأثیر این میدان تنش گسیخته نشده و یا در لحظه شروع گسیختگی باشد. در این حالت تنش تعیین شده از بار واقعی گسیختگی کوچکتر است. در مقابل، در روش کران بالا میدان تنش را برای یک جسم تحت اثر میدان تنش تا حدی در نظر می‌گیرند که جسم تحت تأثیر این میدان تنش گسیخته شده و یا قبلاً گسیخته شده باشد. در چنین شرایطی، تنش تعیین شده از بار واقعی گسیختگی بزرگتر است. موضوع تعیین فشار سیال نگهدارنده جلوی سینه‌کار تونل یک مسأله سه بعدی است که با استفاده از روش طراحی حالت حدی مطالعه شده است. چنین فشار نگهدارنده‌ای به وسیله هوا، دوغاب بنتونیت یا فشار خاک (در سپر فشار تعادلی زمین) تأمین می‌شود. ایمنی در مقابل نشست^۴ و بالازدگی^۵ سینه‌کار مبتنی بر ساز و کارهای حرکت بلوک‌های مخروطی در جلوی سینه‌کار تونل می‌باشد. روش کران بالا مطابق شکل (۴-۱۲) شامل سه مکانیزم شکست MI، MII و MIII است. مکانیزم‌های 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 خاک‌های ضعیف حفر شده روی می‌دهد. در این حالت فشار دوغاب باعث پرتاب حجم زیادی از خاک در جلوی سپر می‌شود. در روش تک بلوک و دو بلوک زاویه بین محور مخروط با محور تونل با (α) در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است. در روش MIII نیز شبیه روش MI زاویه بین محور مخروط با محور تونل با (α) تعریف شده، با این تفاوت که سرعت ناپیوستگی در طول سطح شکست به طرف بیرون است. در

¹ Leca & Dormieux

² Upper Bound

³ Lower Bound

⁴ Collapse

⁵ Blow Out

روش کران بالا زمانی نشست و بالازدگی را می‌توان کنترل کرد که به ترتیب روابط (۲۲-۴) و (۲۳-۴) برقرار باشد.

$$N_s \cdot Q_s + N_\gamma \cdot Q_\gamma \leq Q_T \quad (22-4)$$

$$N_s \cdot Q_s + N_\gamma \cdot Q_\gamma \geq Q_T \quad (23-4)$$

در روابط (۲۲-۴) و (۲۳-۴) Q_T ، Q_γ و Q_s پارامترهای بارگذاری هستند، که از روابط (۲۴-۴)، (۲۵-۴) و (۲۶-۴) به دست می‌آید.

$$Q_s = (K_p - 1) \sigma_s / \sigma_c + 1 \quad (24-4)$$

$$Q_T = (K_p - 1) \sigma_T / \sigma_c + 1 \quad (25-4)$$

$$Q_\gamma = (K_p - 1) \gamma \cdot D / \sigma_c \quad (26-4)$$

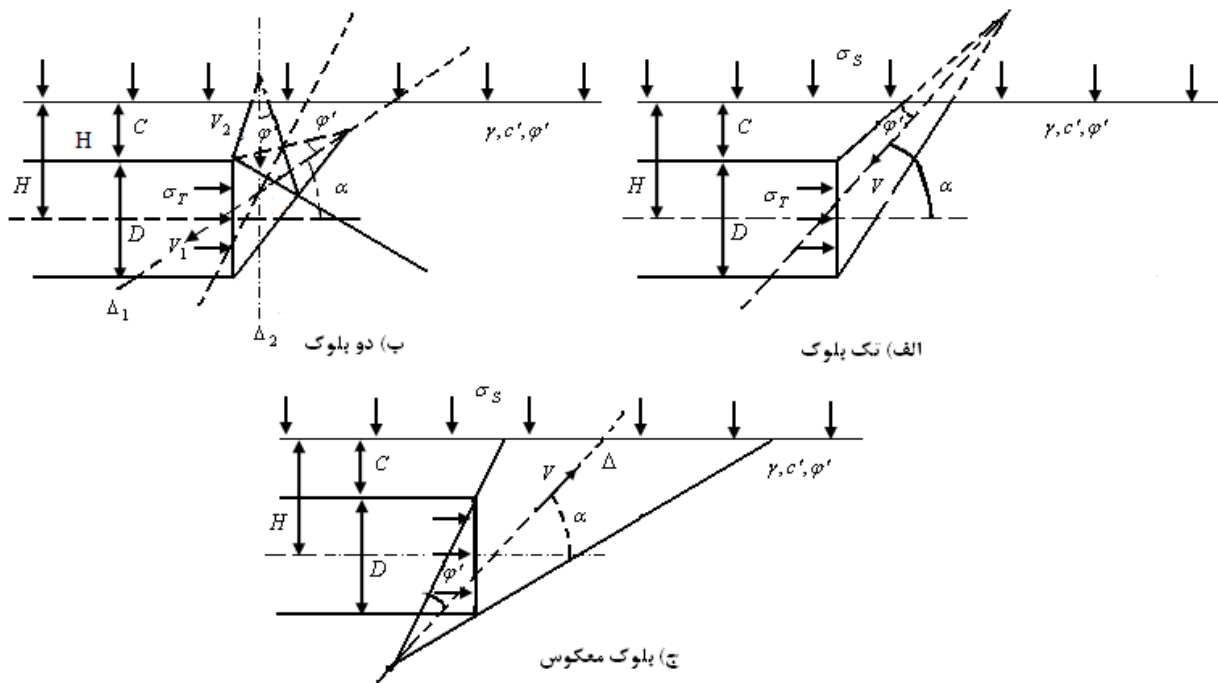
ضرایب وزنی N_s و N_γ با توجه به شکل (۱۳-۴) تابعی از نسبت C/D و ϕ' هستند. حالت ایده‌آل مکانیزم شکست دو بلوک در حالت کران بالا در تونل‌های کم عمق $C/D \leq 0.25$ برای زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه است. نتایج شکست یک بلوک و دو بلوک در حالت $C/D > 1$ مشابه هم است. N_s^{c+} تقریباً همیشه کوچکتر از N_γ^{c+} و 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.

$$\sigma_T = \gamma \cdot D \cdot N_\gamma + c \cdot N_c + \sigma_s \cdot N_s \quad (27-4)$$

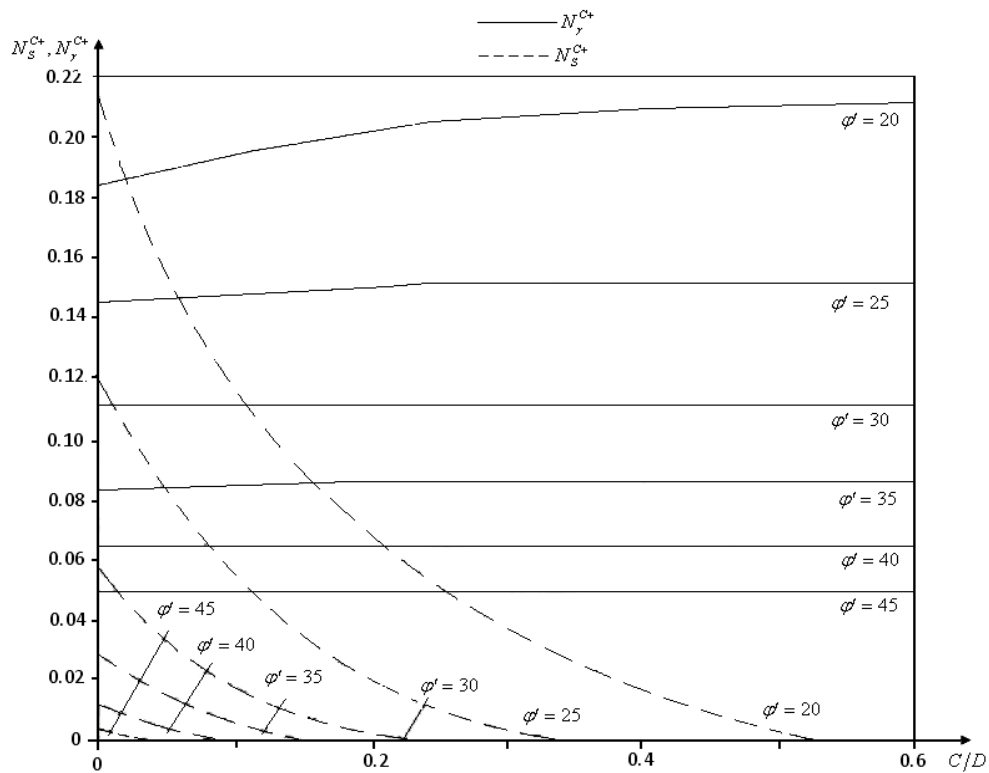
$$N_c = (N_s - 1) / \tan \phi \quad (28-4)$$

$$\sigma_T = N_s \sigma_s + N_\gamma \gamma D \quad (29-4)$$

از رابطه (۲۷-۴) فشار مؤثر خاک در حالت زهکشی شده برای روش کران بالا به دست می‌آید که برای محاسبه فشار کل بایستی فشار آب زیرزمینی را در صورت وجود به آن اضافه کرد. از رابطه (۲۹-۴) برای محاسبه فشار خاک در شرایطی که چسبندگی صفر است، محاسبه می‌شود (Leca & Dormieux, 1990).



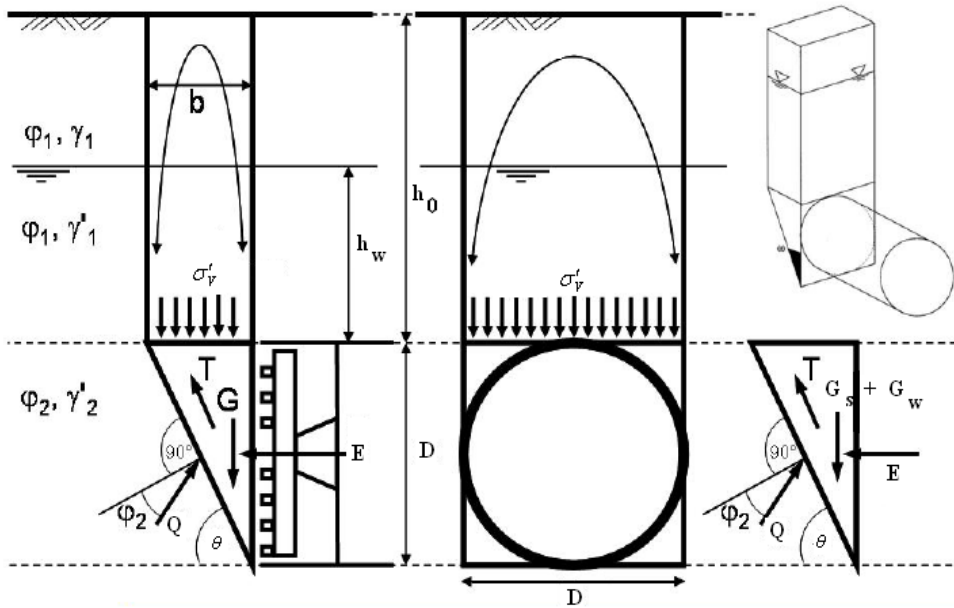
شکل (۴-۱۲): مکانیزم‌های شکست مخروطی (Leca & Dormieux, 1990)



شکل (۴-۱۳): مقادیر مکانیزم نشست برای N_γ^{c+} و N_s^{c+} (Leca & Dormieux, 1990)

۴-۳-۸- روش جانسکز و استاینر^۱ (۱۹۹۴)

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 است و مطابق شکل (۴-۱۴) ارائه شده است.



شکل (۴-۱۴): نمایی از چگونگی توزیع بار روی سینه کار تونل در روش جانسکز و استاینر (Jansecec & Steiner, 1994)

فشار عمودی وارد از سیلو بر روی گوه بر طبق رابطه ترازقی در دو حالت بدون آب از رابطه کلی (۴-۳۰) و در حالتی که دارای آب زیرزمینی است، از رابطه کلی (۴-۳۱) به دست می‌آید. که در این روابط γ_d وزن مخصوص خشک خاک، γ' وزن مخصوص غوطه‌ور خاک، K_0 ضریب فشار جانبی خاک که از رابطه $(K_0 = 1 - \sin \varphi)$ به دست می‌آید.

$$\sigma'_v = \frac{a \cdot \gamma_d - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left[1 - e^{-\frac{h_0 \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right] + q_0 \cdot e^{-\frac{h_0 \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \quad (۴-۳۰)$$

$$\sigma'_v = \frac{\alpha \gamma' - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left[1 - e^{-\frac{h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right] + \left[\frac{a \cdot \gamma_d - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left(1 - e^{-\frac{h_0 - h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right) + q_0 e^{-\frac{h_0 - h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right] \cdot e^{-\frac{h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \quad (۴-۳۱)$$

¹ Jansecec & Steiner

در این روابط c چسبندگی خاک، φ زاویه اصطکاک داخلی خاک، h_0 روباره خاک، h_w ارتفاع آب زیرزمینی، a طول سست‌شدگی، q_0 بار سطحی، σ'_v فشار قائم مؤثر در قسمت خشک و آبدار وارده بر گوه است. برای محاسبه فشار جانبی مؤثر خاک لازم است که وزن سیلو، وزن گوه، نیروی چسبندگی و نیروی برشی را از روابط (۳۲-۴) تا (۳۵-۴) به دست آورده و مقدار حاصله را در رابطه (۳۷-۴) جاگذاری کرده تا نیروی مؤثر جانبی خاک به دست آید. مقدار فشار مؤثر جانبی خاک از نیروی مؤثر جانبی خاک به دست می‌آید و با افزودن آن به فشار آب، فشار کل وارده بر سینه‌کار به دست می‌آید.

$$G_s = B.D.\cot\theta.\sigma'_v \quad (۳۲-۴)$$

$$G_w = \frac{B.D^2.\gamma'.\cot\theta}{2} \quad (۳۳-۴)$$

$$K = \frac{B.D.c}{\sin\theta} \quad (۳۴-۴)$$

$$T = \frac{D^2.\cot\theta}{2} (c + K_{A3}.\bar{\sigma}'_v.\tan\varphi) \quad (۳۵-۴)$$

$$\bar{\sigma}'_v = \sigma'_v + \frac{1}{3}D.\gamma' \quad (۳۶-۴)$$

$$E = - \frac{(\cos\theta.\tan\varphi - \sin\theta).\Sigma(G_s + G_w) + \Sigma(2T + K)}{\sin\theta.\tan\varphi + \cos\theta} \quad (۳۷-۴)$$

مقدار ضریب فشارجانبی سه بعدی خاک را می‌توان از روابط (۴۰-۴) یا شکل (۴-۱۵) و جدول (۴-۲) به دست آورد، همچنین زاویه شکست نیز بایستی به گونه‌ای تعیین می‌شود، که فشار خاک حداکثر گردد. زاویه شکست از شکل (۴-۱۶) و جدول (۴-۳) به دست می‌آید. در جدول (۴-۴) مقادیر دیگری برای ضریب فشار جانبی خاک در سیلو و گوه تعریف شده است. اثر روباره بر روی زاویه شکست گوه برای روباره‌های بزرگتر و مساوی ۲ برابر قطر تونل ($h_0 \geq 2D$) کم می‌شود (Jancsecz & Steiner, 1994). روش سیلو ترزاقی فقط برای روباره‌های بزرگتر از ۲ برابر قطر تونل ($h_0 > 2D$) قابل کاربرد است در غیر اینصورت از روش روباره ($\sigma_v = \gamma \times h$) استفاده می‌شود (Thewes, 2009).

$$S = E + W \quad (38-4)$$

$$\sigma_T = \frac{4.S}{\pi.D^2} \quad (39-4)$$

$$K_{A3} = \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta - \cos^2 \theta \cdot \tan \varphi - \frac{K \cdot \alpha}{1.5} \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi}{\cos \theta \cdot \sin \theta + \tan \varphi \cdot \sin^2 \theta} \quad (40-4)$$

$$K \approx 1 - \sin \varphi + \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (41-4)$$

$$\alpha = (1 + 3C/D) / (1 + 2C/D) \quad (42-4)$$

$$a = (B.D \cdot \cot \theta) / 2(B + D \cdot \cot \theta) \quad (43-4)$$

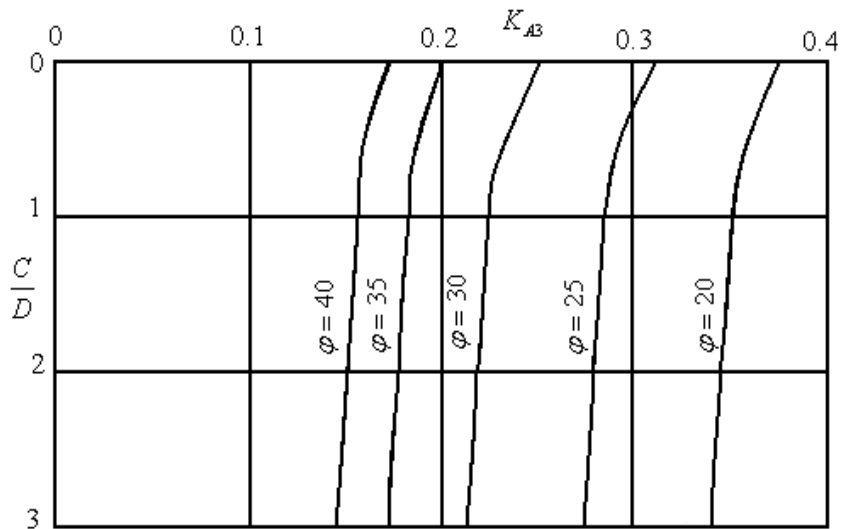
در این روابط، G_s وزن سیلو، B عرض گوه برابر $(B = \pi.D/4)$ که در محاسبات برابر قطر تونل در نظر گرفته می‌شود، D قطر تونل، θ زاویه شکست، G_w وزن گوه، K نیروی چسبندگی، K_{A3} ضریب فشار جانبی سه بعدی خاک، T نیروی برشی خاک، E نیروی موثر جانبی خاک، W نیروی آب، S نیروی کل وارد روی سینه کار تونل و σ_T تنش کل است.

جدول (۲-۴): مقادیر ضریب فشار جانبی خاک (Jancsecz & Steiner, 1994)

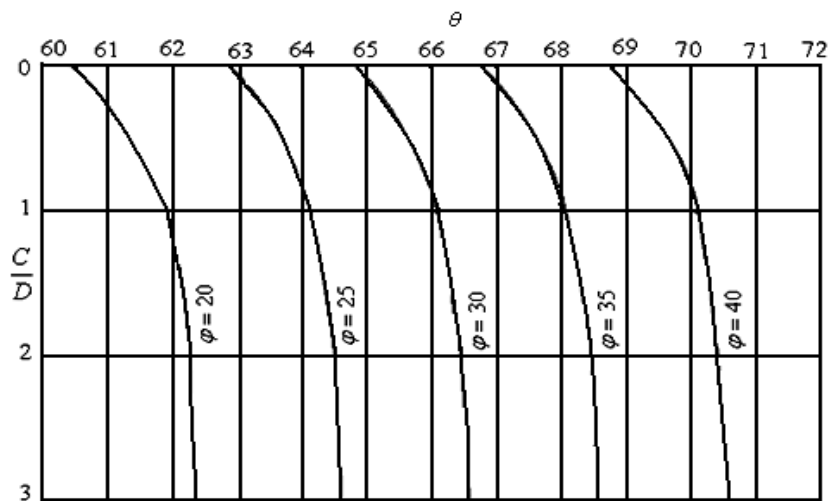
$\frac{C}{D}$	K_{A3}				
	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$
۰	۰/۳۸۶	۰/۳۱۰	۰/۲۴۸	۰/۱۹۹	۰/۱۵۹
۱	۰/۳۵۴	۰/۲۷۹	۰/۲۲۲	۰/۱۷۷	۰/۱۴۱
۲	۰/۳۴۸	۰/۲۷۳	۰/۲۱۷	۰/۱۷۳	۰/۱۳۸
۳	۰/۳۴۵	۰/۲۷۱	۰/۲۱۴	۰/۱۷۱	۰/۱۳۶
$K_{A2} = \tan^2(45 - \varphi/2)$	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۲۲
$K = (K_0 + K_{A2})/2$	۰/۵۷۴	۰/۴۹۱۶	۰/۴۱۶۷	۰/۳۴۹	۰/۲۸۷

جدول (۳-۴): مقادیر زاویه شکست گوه (Jancsecz & Steiner, 1994)

$\frac{C}{D}$	θ				
	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$
۰	۶۰/۳۴۰	۶۲/۶۱۱	۶۴/۸۰۲	۶۶/۹۰۰	۶۸/۹۱۸
۱	۶۱/۸۹۰	۶۴/۱۶۱	۶۶/۲۸۶	۶۸/۲۸۳	۷۰/۱۷۷
۲	۶۲/۱۹۷	۶۴/۴۶۴	۶۶/۵۸۰	۶۸/۵۶۶	۷۰/۴۲۳
۳	۶۲/۳۲۲	۶۴/۵۹۲	۶۶/۷۰۶	۶۸/۶۸۳	۷۰/۵۲۷
$45 + \varphi/2$	۵۵/۰	۵۷/۵	۶۰/۰	۶۲/۵	۶۵/۰
$K = (K_0 + K_{A2})/2$	۰/۵۷۴	۰/۴۹۱۶	۰/۴۱۶۷	۰/۳۴۹	۰/۲۸۷



شکل (۴-۱۵): شکل ضریب فشار جانبی خاک (Jancsecz & Steiner, 1994)



شکل (۴-۱۶): نمودار زاویه شکست گوه (Jancsecz & Steiner, 1994)

جدول (۴-۴): مقادیر مختلف ضرایب فشار جانبی (Kirsch, 2009)

$K_{\text{sil}}o$	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 (۴-۵) آمده است.

$$S = \eta_E E + \eta_W . W \quad (4-44)$$

در این رابطه η_E ضریب ایمنی خاک و η_W ضریب ایمنی آب است.

جدول (۴-۵): ضرایب ایمنی پیشنهادی برای فشارهای خاک و آب (Broere, 2001)

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

۴-۳-۹- روش کواری و آنگونستا (روش دوم-۱۹۹۶)

این روش مبتنی بر نظریه سیلوی جانسن^۱ (۱۸۹۵) و مدل سه بعدی سیلو و گوه هورن^۲ (۱۹۶۱) است. کلیات چگونگی اعمال بار در این روش در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است. در این روش، برای ماشین سپر فشار تعادلی فشار نگهداری مؤثر با فرض حالت زهکشی شده از رابطه (۴-۴۵) به دست می‌آید.

$$s' = F_0 \cdot \gamma' \cdot D - F_1 \cdot c + F_2 \cdot \gamma' \cdot \Delta h - F_3 \cdot c \frac{\Delta h}{D} \quad (4-45)$$

که در آن، s' فشار نگهداری مؤثر، D قطر تونل، c چسبندگی خاک، γ' وزن مخصوص غوطه‌ور خاک، Δh افت فشار بین اتاقک حفاری و خاک F_0 ، F_1 ، F_2 و F_3 ضرایب بدون بعدی هستند، که تابعی از φ و

¹ Janssen

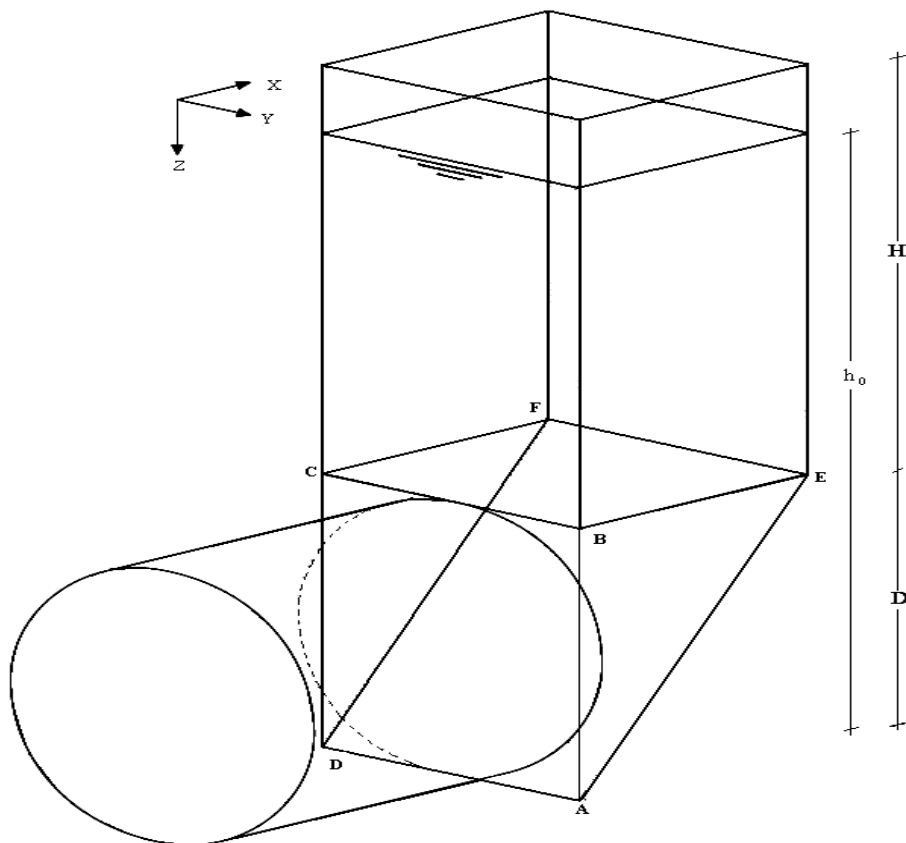
² Horn

H/D هستند. این مقادیر بدون بعد با استفاده از شکل (۴-۱۸) به دست می‌آید، همچنین کمترین فشار

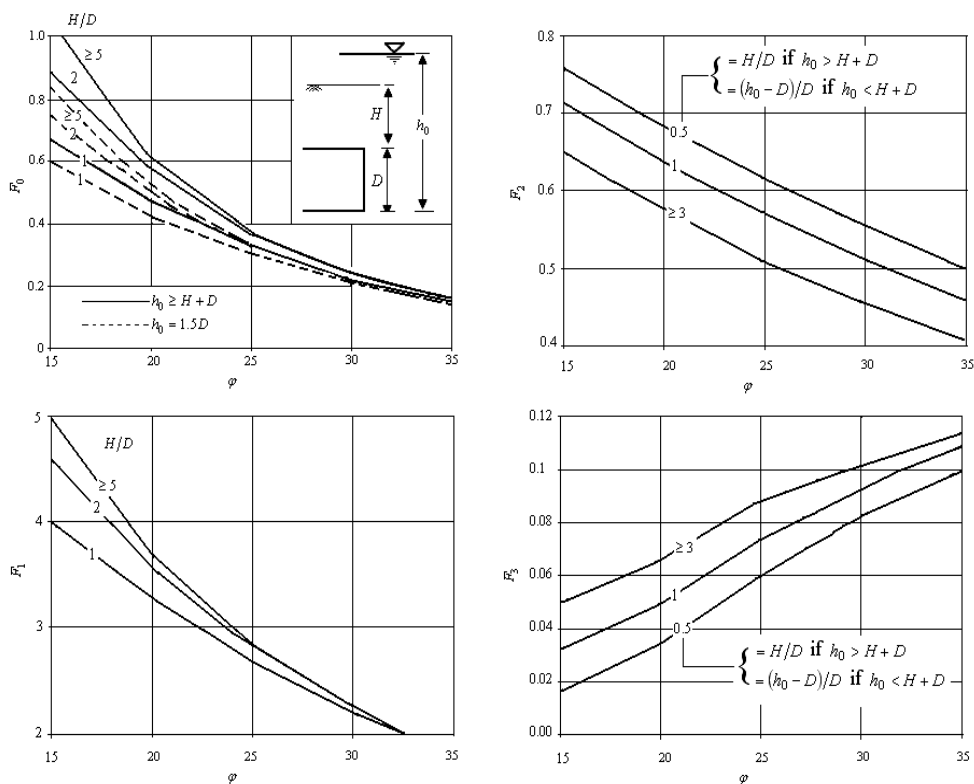
نگهداری از نظر تئوری در خاک‌های خشک غیر چسبنده از رابطه (۴-۴۶) قابل محاسبه است.

$$s = F_0 \cdot \gamma_d \cdot D - F_1 \cdot c \quad (4-46)$$

در این رابطه S فشار نگهداری کل و γ_d وزن مخصوص خشک خاک است.



شکل (۴-۱۷): مدل سیلو و گوهی هورن (Kovari & Anagnostou, 1997)



شکل (۴-۱۸): نمودارهای محاسبه برای ضرایب بدون بعد F_0 ، F_1 ، F_2 و F_3 (Kovari & Anagnostou, 1997)

فشار پایداری سینه 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 (Toan, 2006):

- 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 محل‌های از پیش تعیین شده برای EPB و دوغابی به منظور نگهداری در نواحی شهری پر تراکم و شرایط متغیر زمین
- تزریق برای تثبیت بولدرها سست شده بین کله حفار و سینه‌کار برای کاهش آسیب‌های وارده به ابزارهای برش روی کله حفار
- ساختارهای زیرزمینی واقعی از قبیل لوله‌گذاری^۱، تزریق با فشار بالا^۲، پایپ جکینگ^۳ یا حتی ساختارهای پیچیده

۴-۳-۱۰- روش برویر^۴

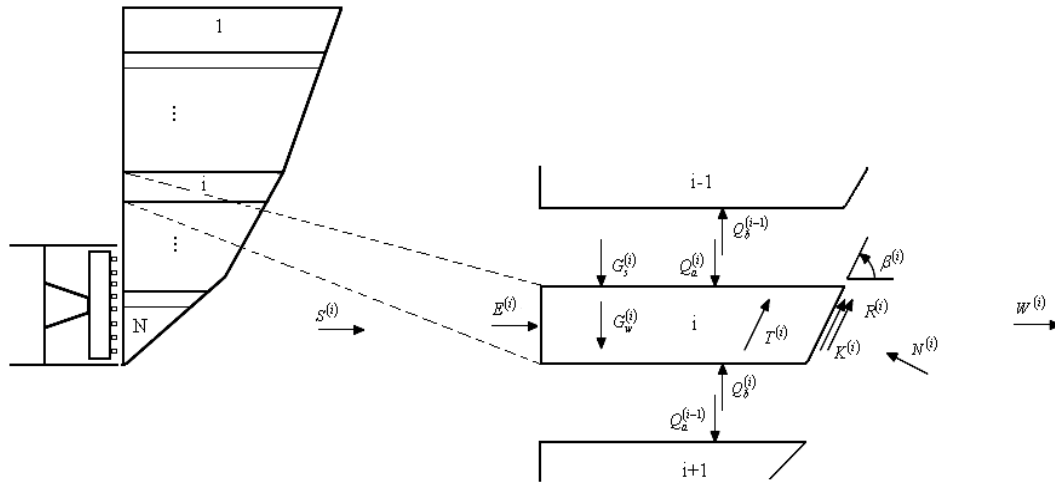
مدل پایداری گوه یک روش تعادل حدی است که اساس آن از روش سیلو و گوه گرفته شده است. اولین مسأله در روش سیلو و گوه این است که خاک در آن همگن فرض می‌شود که این مسأله با در نظر گرفتن لایه‌های غیرهمگن خاک در روش برویر برطرف شده است. دومین مسأله انتقال نیروی نگهداری روی اسکلت خاک است که در مدل جانسکز و کواری تمام نیروی نگهداری روی گوه مؤثر فرض می‌شدند و سینه‌کار نشست ناپذیر یا آب‌بند فرض می‌شود. اگر از دوغاب بنتونیت برای نگهداری سینه‌کار استفاده شود، بنتونیت تا یک طول مشخصی قبل از تشکیل کیک فیلتر نفوذ می‌کند که این مسأله تنها در زمان توقف اهمیت دارد. سومین مسأله با در نظر گرفتن قوس خاک، برآورد دقیق‌تری از کمترین فشار نگهداری حاصل می‌شود. در روش‌های جانسکز و کواری از اثر قوس صرف نظر می‌شود در نتیجه مقدار بزرگتری از کمترین فشار نگهداری حاصل می‌شود. در مدل گوه و سیلوی برویر مطابق شکل (۴-۱۹) گوی شکستگی به N قطعه کوچکتر به صورت افقی تقسیم شده است.

¹ Forepoling

² Pipe Jacking

³ jet grouting

⁴Broere



شکل (۴-۱۹): مدل چند گوه‌ای (Broere, 2001)

این قطعه‌ها هر کدام ممکن است ضخامت متفاوتی داشته باشند. به هر حال، هر کدام از قطعه‌ها همگن فرض می‌شوند و با توجه با این شرایط زاویه گوه θ_i بین قطعه i صفحه گسیختگی و صفحه افقی تعریف می‌شود. زاویه شکست هر گوه با سعی و خطا به اندازه ای در نظر گرفته می‌شود که بیشترین نیروی خاک در حالت شکست به دست آید. هر قطعه در نتیجه نیروهایی از قطعه بالا ($i-1$) و قطعه پایین ($i+1$) یعنی به ترتیب $Q_a^{(i)}$ و $Q_b^{(i)}$ ، وزن مؤثر گوه $G_w^{(i)}$ و نیروی روباره $G_s^{(i)}$ را تحمل می‌نماید. در صفحات شکست مایل، نیروی چسبندگی $K^{(i)}$ موازی با سطح و نیروی اصطکاک $R^{(i)}$ که ناشی از نیروی عمودی $N^{(i)}$ بر سطح شکست عمل می‌کنند. فرض می‌شود بر سطوح جانبی هر گوه نیروی برشی $T^{(i)}$ اعمال می‌شود، که در همان جهت $K^{(i)}$ ، در خلاف جهت تغییر شکل گوه اعمال شود. تعادل نیروها وقتی حاصل می‌شود که نیروی مؤثر خاک $E^{(i)}$ در سطحی که با نیروی آب $W^{(i)}$ جمع می‌شود، معادل نیروی نگهداری $S^{(i)}$ گردد. نیروی مؤثر خاک از رابطه (۴-۴۷) به دست می‌آید. از تقسیم نیروی مؤثر خاک بر مساحت تونل، فشار مؤثر خاک مطابق رابطه به دست می‌آید.

$$E = -\frac{\zeta'_-}{\zeta'_+} \left[G_s + G_w + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\zeta^{(i)}_-} (2T^{(i)} + K^{(i)}) \right] \quad (47-4)$$

$$\frac{\zeta'_+}{\zeta'_-} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\zeta^{(i)}_+}{\zeta^{(i)}_-} \quad (48-4)$$

$$\zeta_{-}^{(i)} = \cos \theta^{(i)} \tan \varphi^{(i)} - \sin \theta^{(i)} \quad (49-4)$$

$$\zeta_{+}^{(i)} = \sin \theta^{(i)} \tan \varphi^{(i)} + \cos \theta^{(i)} \quad (50-4)$$

$$S = E + W \quad (51-4)$$

در مواردی که خاک همگن است، گوه به صورت کامل در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط، نیروی مؤثر خاک از رابطه (۵۲-۴) به دست می‌آید که رابطه آن مطابق روش والز^۱ و جانسکز است. در روابط برویر ضریب فشار جانبی خاک از رابطه جکی به دست می‌آید.

$$E = - \frac{(\cos \theta \cdot \tan \varphi - \sin \theta) \cdot \Sigma(G_s + G_w) + \Sigma(2T + K)}{\sin \theta \cdot \tan \varphi + \cos \theta} \quad (52-4)$$

در کاربرد روش‌های سه بعدی جانسکز و برویر طول سست‌شدگی از نسبت مساحت سیلو به محیط آن مطابق رابطه (۵۳-۴) به دست می‌آید.

$$a = B * D \cdot \cot \theta / 2(B + D \cdot \cot \theta) \quad (53-4)$$

در محاسبات دو بعدی این طول نصف عرض گوه در نظر گرفته می‌شود و عرض گوه در محاسبات پایداری سینه‌کار برابر قطر تونل در نظر گرفته می‌شود. بنابراین سه فشار مختلف با توجه به طول سست‌شدگی الف) بدون قوس خاک ($a = \infty$) ب) قوس دو بعدی ($a = R$) پ) قوس سه بعدی ($a = R/1 + \tan \theta$) به دست می‌آید.

$$11-3-4 \text{ روش کارانزا-تورس}^2 (2004)$$

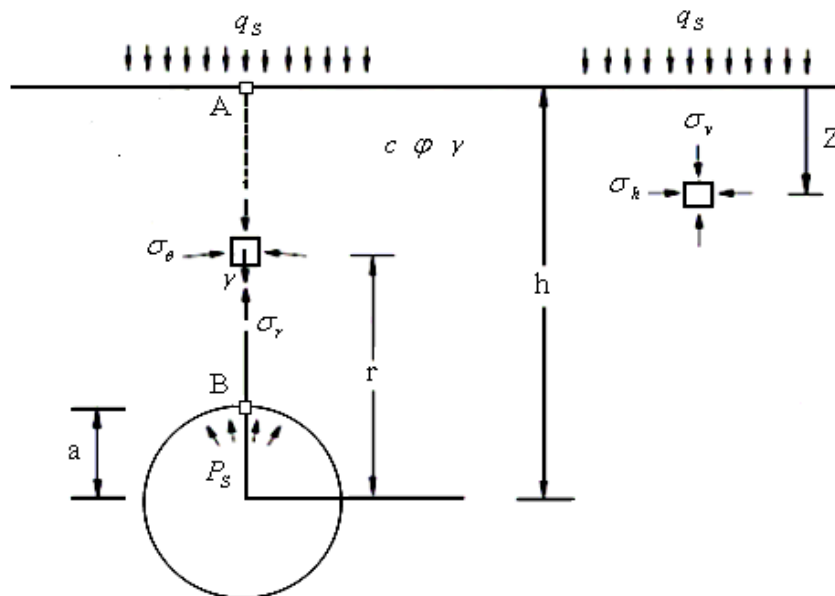
این روش، روش کامل شده کاکو-کرزل^۳ (۱۹۵۶) است که در شکل (۲۵-۴) نشان داده شده است. روش کاکو-کرزل برای تحلیل پایداری سینه‌کار تونل دایره‌ای کم عمق در شرایط خاک خشک ارائه شده است.

¹ Walz

² Carranza, Torres

³ Caquot, Kerisel

در این مدل سطح گسیختگی به صورت استوانه‌ای یا کروی در نظر گرفته می‌شود. طرح اصلی کاکو - کرزل برای محاسبه فشار وارد بر تونل مطابق شکل (۴-۲۰) است (Repetto.L, 2005).



شکل (۴-۲۰): طرح اصلی کاکو-کرزل برای محاسبه فشار وارد بر تونل (Repetto.L, 2005).

فشار نگهداری از رابطه (۴-۵۴) به دست می‌آید.

$$\frac{p_s}{\gamma a} = \left[\frac{q_s}{\gamma a} + \frac{c}{\gamma a} \cdot \frac{1}{\tan \varphi} \right] \left[\frac{h}{a} \right]^{-K(N_\varphi^{FS}-1)} - \frac{1}{K(N_\varphi^{FS}-1)-1} \left[\left(\frac{h}{a} \right)^{1-K(N_\varphi^{FS}-1)} \right] - \frac{c}{\gamma a} \frac{1}{\tan \varphi} \quad (54-4)$$

$$FS = \frac{c}{c^{cr}} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi^{cr}} \quad (55-4)$$

$$N_\varphi^{FS} = 1 + \sin(\text{Arc tan}(\tan \varphi / FS)) / (1 - \sin(\text{Arc tan}(\tan \varphi / FS))) \quad (56-4)$$

در این روابط γ وزن مخصوص مواد و پارامترهای برشی خاک طبق تعریف موهر - کولمب شامل زاویه φ اصطکاک، φ^{cr} زاویه اصطکاک در حالت بحرانی، c چسبندگی، h فاصله از مرکز تونل تا سطح زمین، پارامتر

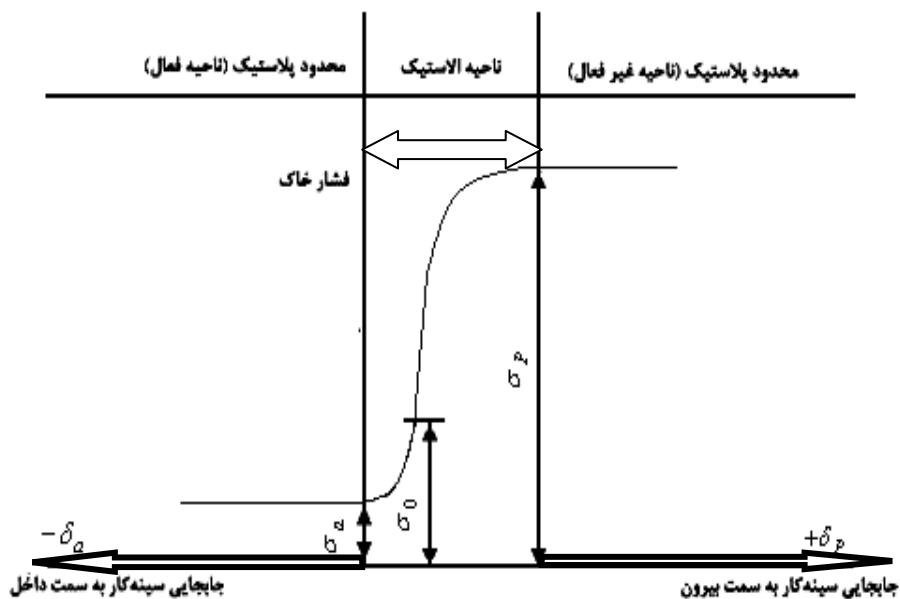
K وابسته به نوع حفاری تونل سیلندری (K=1) حفاری بیضوی (K=2)، FS فاکتور ایمنی، q_s بار روباره، p_s فشار نگهداری است (Repetto.L, 2005).

۴-۳-۱۲- سایر روش‌ها

برای تونل‌زنی با ماشین فشار تعادلی، استفاده از یک فشار نگهداری سینه‌کار که بتواند کمترین تغییر شکل در سینه‌کار را تخمین زده و پایداری آن را تأمین نماید، مطلوب است. فشار استاتیکی مطابق شکل (۴-۲۱) باید بین فشار فعال و غیر فعال باشد (Russo, 2003). در گزارش‌ها برویر برای محاسبات فشار نگهداری در بیشتر خطوط مترو هلند رابطه (۴-۵۷) پیشنهاد شده که مقدار آن کمی بزرگتر از فشار فعال است.

$$\sigma_T = K_a \cdot \sigma'_v + \sigma_w + 20 \text{kPa} \quad (۴-۵۷)$$

$$K_a = 1 - \sin \varphi / 1 + \sin \varphi \quad (۴-۵۸)$$



شکل (۴-۲۱): تغییرات فشار جانبی خاک در مقابل جابجایی سینه‌کار (Russo, 2003)

که در آن، σ'_v تنش مؤثر، σ_w فشار آب، σ_T فشار نگهداری و K_a ضریب فشار جانبی خاک است. نمونه‌ای از محاسبات فشار سینه‌کار برای ماشین EPB و SPB در ژاپن در جدول (۴-۶) آمده است.

متروی پورتو^۱ با تونل به قطر ۸ متر با ماشین EPB حفاری شده است. فشار پایه سینه کار $\sigma_T = \sigma_w + 60\text{kPa}$ برای محاسبات در نظر گرفته شد، و در مرحله دوم فشار مؤثر به وسیله کواری و آنگونستا با در نظرگیری بدترین شرایط ژئوتکنیکی ($\sigma'_T = 20\text{kPa}$ به علاوه یک فاکتور ایمنی) در نظر گرفته شده است. در متروی تورین تونل حفاری با قطر ۸ متر به وسیله ماشین EPB انجام گرفته است تونل بالای سطح آب زیرزمینی واقع است، فشار طراحی $\sigma_T = \sigma + 30\text{kPa}$ (که σ فشار به روش کواری و آنگونستا با ضریب ایمنی ۲ محاسبه شده است) در نظر گرفته شد. در جدول (۴-۷) مشخصات تمامی روش‌های تحلیلی و در جدول (۴-۸) خلاصه‌ای از فرمول‌های محاسباتی تحلیلی و تجربی فشار سینه کار تونل آورده است.

جدول (۴-۶): نمونه‌ای از فشار محاسبات سینه کار استفاده شده برای سپر EPB و SPB در ژاپن (Russo, 2003)

فشار نگهداری	نوع خاک	قطر خارجی ماشین (m)
فشار خاک ساکن	سیلت نرم	۷/۴۵
فشار خاک ساکن + فشار آب + ۲۰ کیلوپاسگال	ماسه، خاک چسبنده	۸/۲۱
فشار خاک ساکن + فشار آب + نوسان فشار	ماسه ریز	۵/۵۴
فشار خاک ساکن + (۳۰-۵۰ کیلوپاسگال)	ماسه، خاک چسبنده	۴/۹۳
فشار خاک ساکن + فشار آب	شن، سنگ بستر، خاک چسبنده	۲/۴۸
فشار خاک فعال + فشار آب	شن، خاک چسبنده	۷/۷۸
فشار خاک ساکن + ۱۰ کیلوپاسگال	سیلت نرم	۷/۳۵
فشار خاک ساکن + ۲۰ کیلوپاسگال	خاک چسبنده	۵/۸۶
فشار آب + (۱۰-۲۰ کیلوپاسگال)	شن	۶/۶۳
فشار خاک ساکن	خاک چسبنده	۷/۰۴
فشار فعال خاک + فشار آب + نوسان فشار (۲۰ کیلو پاسگال)	خاک چسبنده، ماسه	۶/۸۴
فشار آب + ۳۰ کیلوپاسگال	خاک ماسه، چسبنده، شن	۷/۴۵
فشار آب + (۴۰-۸۰ کیلوپاسگال)	ماسه، چسبنده، شن	۱۰
فشار فعال خاک + فشار آب + نوسان فشار	ماسه	۷/۴۵
فشار فعال خاک + فشار آب + نوسان فشار (۲۰ کیلو پاسگال)	ماسه، خاک چسبنده	۱۰/۵۸
فشار آب + ۳۰ کیلوپاسگال	ماسه، خاک چسبنده، شن	۷/۲۵

¹ Porto

جدول (۴-۷): روش‌های تحلیلی برای برآورد فشار سینه‌کار (Guglielmetti et al, 2007)

روش‌ها	سال ارائه	نوع مدل	سطح گسیختگی	معیار گسیختگی
هورن	۱۹۶۱	سه بعدی	خطی (گوه + سیلو)	-
میورینا	۱۹۶۶	دو بعدی	اسپیرال	موهر- کولمب
برامز و بننمارک	۱۹۶۷	دو بعدی	تعریف نشده	ترسکا
اتکینسون و پاتز	۱۹۷۷	دو بعدی	تعریف نشده	موهر- کولمب
دیویس	۱۹۸۰	دو بعدی	تعریف نشده	ترسکا
کروس	۱۹۸۷	دو بعدی- سه بعدی	دایره	موهر- کولمب
محکم	۱۹۸۹	دو بعدی- سه بعدی	اسپیرال + سیلندری	موهر- کولمب
لکا و دورمیوکس	۱۹۹۰	دو بعدی	تعریف نشده	موهر- کولمب
جانسکز و استاینر	۱۹۹۴	سه بعدی	خطی (گوه + سیلو)	موهر- کولمب
کواری و آنگونستا	۱۹۹۴ و ۱۹۹۶	سه بعدی	خطی (گوه + سیلو)	موهر- کولمب
برویر	۲۰۰۱	سه بعدی	خطی (گوه + سیلو)	موهر- کولمب
کارنزا و تورس	۲۰۰۴	سه بعدی	تعریف نشده	موهر- کولمب و هوک- براوون

جدول (۴-۸): فرمول‌های تحلیلی و تجربی برآورد فشار کل سینه‌کار

روش‌ها	فرمول‌های فشار نگهداری کل سینه‌کار تونل
ترزاقی	$\sigma_T = K_a \cdot H_p \cdot \gamma' + \sigma_w$
میورینا	$\sigma_T = \left((G \cdot l_G + q_w \cdot W_1 (l_w + W_1/2) - c(r_d^2 - r_a^2)/2 \tan \phi) / 2R \cdot l_p \right) + \sigma_w$
برومز و بننمارک	$\sigma_T = (\gamma \cdot (C + R) + q_s - N \cdot c_u) + \sigma_w$
اتکینسون و پاتز	$\sigma_T = \left(2K_p / (K_p^2 - 1) \right) \cdot \gamma \cdot R + \sigma_w$
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 (روش دوم)	$\sigma_T = \left(F_0 \gamma' D - F_1 c + F_2 \gamma' \Delta h - F_3 c \frac{\Delta h}{D} \right) + \sigma_w$
برویر	$\sigma_T = \left(- \frac{\zeta'_-}{\zeta'_+} \left[G_s + G_w + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} (2T^{(i)} + K^{(i)}) \right] \cdot \frac{4}{\pi \cdot D^2} \right) + \sigma_w$
کارنزا-تورس	$\frac{p_s}{\gamma \cdot a} = \left[\frac{q_s}{\gamma \cdot a} + \frac{c}{\gamma \cdot a \cdot \tan \phi} \right] \left[\frac{h}{a} \right]^{-K(N_\phi^{FS}-1)} - \frac{1}{K(N_\phi^{FS}-1)-1} \left[\left(\frac{h}{a} \right)^{1-K(N_\phi^{FS}-1)} \right] - \frac{c}{\gamma \cdot a \cdot \tan \phi} + \sigma_w$

جمع‌بندی:

روش‌های محاسبه فشار با توجه به شرایط خاک به روش‌های تجربی و تحلیلی (آنالیز حدی و تعادل حدی) می‌توان مطابق جدول (۴-۹) تقسیم‌بندی می‌شوند. اساس روش‌های تعادل حدی از روش ترزاقی گرفته شده است. روش ترزاقی به دو روش روباره (برای عمق‌های کم) و روش سیلو (برای عمق زیاد) تقسیم می‌شود. در بین روش‌های تحلیلی روش‌های اتکینسون و پاتز، کروس و محکم پارامتر عمق را لحاظ نکرده و فشار در این روش‌ها به قطر تونل، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک بستگی دارد.

جدول (۴-۹): روش‌های محاسبه فشار نگهداری با توجه به شرایط ژئوتکنیکی

روش‌ها	توضیحات
روش تجربی	خاک چسبنده و غیر چسبنده
آنالیز حدی	خاک چسبنده و زهکشی نشده
	خاک غیر چسبنده برای تونل بدون پوشش
	خاک چسبنده
	خاک غیر چسبنده
تعادل حدی	لکا و دورميو
	ميورما
	کروس
	محکم
	جانسکز و استاینر
	کواری و آنگونستا
	برویر
	خاک غیر چسبنده

فصل پنجم

بررسی روش‌های بهسازی شیمیایی خاک

۵-۱- مقدمه

تزریق آب به خاک حفاری برای انتقال فشار نگهداری مناسب بر روی سینه کار تونل و در نتیجه کاهش توان مصرفی ماشین حفاری جزء در مواردی که خاک همگن، پایدار و کم ساینده باشد، همیشه مناسب نیست. برای همین، معمولاً مواد افزودنی به خاک حفاری اضافه می‌کنند، به طوری که باعث بهبود خصوصیات فیزیکی خاک شود. هدف اصلی از افزایش عامل‌های به‌ساز^۱ خاک، تضمین کنترل فشار نگهداری سینه کار تونل، انتقال مناسب مواد به نقاله مارپیچی، حداقل کردن گشتاور روی کله حفار و کاهش فرسایش ابزارهای برش می‌باشد. انواع مختلفی از عامل‌های به‌سازی شامل دوغاب‌ها، فوم‌ها، پرکننده‌ها، پلیمرها و غیره وجود دارند. مواد افزودنی با توجه به خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و نوع خاک حفاری انتخاب می‌شوند.

۵-۲- خصوصیات دوغاب

ماشین سپر دوغابی فشاری را روی دوغاب داخل اتاقک حفاری اعمال می‌کند که این فشار به سطح سینه کار منتقل می‌شود. اعمال فشار مناسب به واکنش صحیح خاک و دوغاب وابسته است. دوغاب با فشار، وارد منافذ خاک شده و آن را به شکل کیک یا خمیر^۲ در می‌آورد، که امکان توزیع صحیح فشار بر روی سینه کار را فراهم می‌آورد. فاصله نفوذ و ضخامت کیک تابع فشار اعمالی، اندازه دانه خاک و دوغاب همچنین گرانش دوغاب است. هر کدام از این عوامل به فعالیت سطحی ذرات دوغاب، خصوصیات جریان دوغاب، شرایط آب زیرزمینی و میزان نمک در آب زیرزمینی بستگی دارند. کیک دوغاب همچنین بر عملکرد نگهداری در اتاقک حفاری تأثیر دارد. وقتی که اتاقک حفاری خالی است فشار هوای فشرده به جای فشار سیال، علاوه بر نگهداری سینه کار، از تراوش آب جلوگیری می‌کند. نظر به این که خاک حفاری به صورت دوغاب با پمپاژ خارج می‌شود، لازم است در انتقال مواد مطمئن شد که اولاً برای انتقال سیال با

^۱ Conditioning Agents

^۲ Paste or Cake

سرعت مناسب قطر لوله انتقال متناسب با حجم سیال است و ثالثاً امکان رسوب کردن دانه‌های بزرگتر در طول لوله انتقال وجود دارد. بنابراین باید ذرات بزرگتر را از ذرات کوچکتر پیش از انتقال جدا کرد. تجربیات به دست آمده حاکی از آن است که تغییرات در نوع و مقدار پلیمرهای افزودنی به دوغاب بنتونیت باعث بهبود در جدایش سیال و کاهش آلودگی محیط زیست شده است (Milligan, 2000).

۵-۲-۱- انواع مختلف کیک

آگاهی از نوع و کارکرد کیک خیلی مهم است. ضخامت بیش از اندازه کیک برای پایداری مفید نیست. در حالی که غشای خیلی نازک از کیک برای نگهداری سینه‌کار تأثیر کمتری دارد، همچنین نفوذ مقدار زیاد آب در خاک اجتناب‌ناپذیر است و می‌تواند باعث تورم در خاک‌های رسی شده و راندمان را کاهش دهد. دو نوع مدل کیک فیلتر با توجه به اندازه دانه‌های خاک استفاده می‌شود، که عبارتند از:

۵-۲-۱-۱- مدل غشایی^۱

برای خاک دانه ریز در مدل غشایی با غشای نازک یک مانع پیوسته روی سینه‌کار ایجاد می‌شود. تشکیل یک غشاء برای ایجاد حداقل پایداری، توزیع فشار یکنواخت‌تر و ایجاد یک نوع چسبندگی مصنوعی در خاک‌های غیرچسبنده، بسیار مهم است که در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. مدل غشایی برای سپر دوغابی در ماسه‌ها استفاده می‌شود. این مدل نمی‌تواند برای سپرهای EPB که در آن‌ها از فوم به عنوان بهسازی استفاده می‌شود به کار رود، زیرا مدت دوام فوم محدود بوده و همچنین مدل غشایی در خاک تشکیل نمی‌شود (Maidl, 2003).

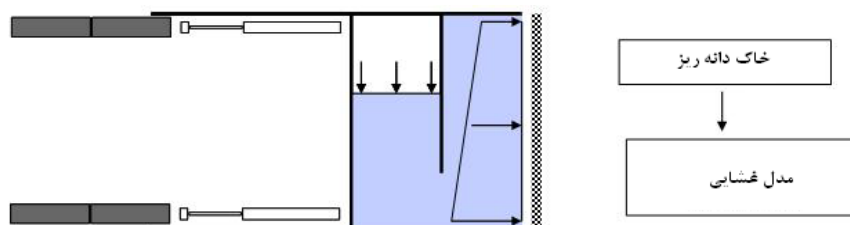
۵-۲-۱-۲- مدل نفوذی^۲

این مدل برای خاک دانه درشت به دلیل نفوذپذیری بالا استفاده می‌شود. در این مدل، فوم یا بنتونیت در داخل خاک نفوذ می‌کنند. مدل نفوذی برای سپر دوغابی مورد استفاده در شن و ماسه و همچنین در

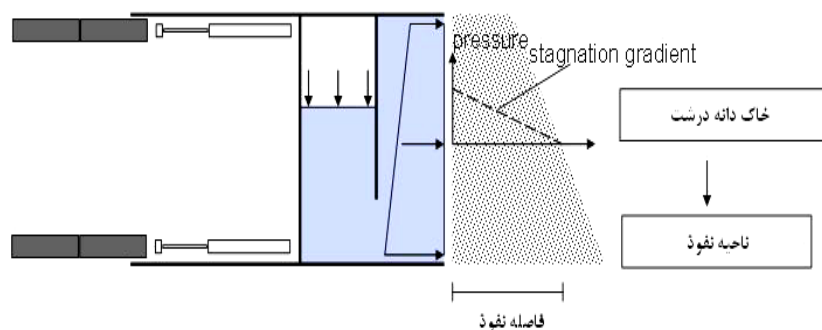
¹ Model Membrane

² Model Penetration

ماسه‌های درشت که امکان تشکیل مدل غشایی نیست، به کار می‌رود. در سپر EPB با بهسازی فوم، این مدل برای ماسه‌ها به کار می‌رود (Maidl, 2003). مدل نفوذی کاملاً به تغییرات فشار حساس است. معمولاً با یک افزایش در فشار باعث انتقال دوغاب درون خاک می‌شود که در شکل (۵-۲) تشکیل یک کیک فیلتر از نوع نفوذی نشان داده شده است.



شکل (۵-۱): تشکیل کیک فیلتر از نوع مدل غشایی (Thewes, 2009)



شکل (۵-۲): تشکیل کیک فیلتر از نوع مدل نفوذی (Thewes, 2009)

۵-۳- عامل‌های بهسازی مشتمل بر خاک برای ماشین EPB

عامل‌های بهسازی خاک فوم‌ها، آب یا روغن مخلوط با رس بنتونیت یا محلول پلیمر هستند. در EPB نقش عامل‌های بهسازی خاک، بهبود خصوصیات فیزیکی خاک، افزایش تراکم‌پذیری و حالت خمیری خاک، کاهش مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری خاک و کاهش زاویه اصطکاک داخلی است. در نتیجه، عدم موفقیت در تحقق معیارهای بالا باعث انسداد کله حفار، کلوخه‌شوندگی یا بروز مشکلاتی در انتقال

مواد می‌شود. بدون عامل‌های بهسازی خاک استفاده از EPB به خاک‌های دانه ریز محدود می‌شود (Maidl, 1990). مواد معمول مورد استفاده برای EPB، بنتونیت، فوم‌ها و پلیمرها هستند. پلیمرها و دوغاب بنتونیت به صورت مایع با تغییرات در خواص جریان سیال به خاک اضافه می‌شوند. تعیین مقدار دقیق مواد افزودنی اهمیت زیادی دارد. دوغاب بنتونیت در صنعت تونل‌سازی متشکل از مخلوط بنتونیت و آب است. شکل‌گیری ژلی با تمرکز ۳ تا ۶ درصد در هر حجم با تغییر در خواص سیال همراه است. بنتونیت برای بالا بردن حجمی از دوغاب که بتواند خرده‌های حفاری را حمل کرده استفاده می‌شود (Posmas, 2001). پلیمرها از ترکیبات شیمیایی کوچکی به نام منومرها تشکیل یافته‌اند که به واسطه یک فرایند شیمیایی مونومرها به صورت یک زنجیر بزرگ به یکدیگر متصل می‌شود. پلیمرها به صورت جداگانه یا ترکیب با بنتونیت برای تشکیل دوغاب مناسب، استفاده می‌شود. بعضی از انواع پلیمرهای طبیعی نظیر شکرهای سلولزی، نشاسته‌ها و پروتئین‌ها می‌تواند برای بهسازی خاک استفاده شوند. به علاوه، پلیمرهای سینتیک نظیر پلی‌اکریلامیدها^۱، کربوکسی متیل سلولز^۲ و پلی‌آنیونیک سلولز^۳ نیز می‌توانند استفاده شوند. پلیمرهای سینتیک در صنعت حفاری نفت توسعه داده شده و یک جایگزین برای دوغاب بنتونیت هستند. وقتی آن‌ها با بنتونیت استفاده می‌شوند، توانایی دوغاب بنتونیت برای تشکیل کیک فیلتر و نگهداری ساختار متفرق کننده بهبود می‌یابد. هرچند پلی‌اکریلامیدها و مشتقاتشان به عنوان عامل‌های بهسازی خاک خیلی مهم هستند به ویژه در ماشین حفاری EPB که از فوم یا بنتونیت برای پایداری سینه‌کار استفاده می‌شوند (Milligan, 2000).

¹ Polyacrylamid

² Carboxymethyl Cellulose

³ Polyanionic Cellulose

۵-۳-۱- فوم^۱

فوم عبارتست از حالت فیزیکی از یک مایع خاص که حاوی سورفکتانت (عامل فوم‌سازی) است و به وسیله هوا منتشر می‌شود. فوم، هوا را به صورت یک غشاء با انبساط خود احاطه می‌کند، بنابراین شکل‌گیری حباب‌ها از این مایع است. خصوصیات حباب‌ها با نسبت انبساط فوم^۲، نسبت بین فوم و حجم مایع اصلی و همچنین با نوع و غلظت عامل تشکیل فوم در مایع کنترل می‌شود. از دیگر پارامترهای مهم، کنترل تأثیر نرخ تزریق فوم^۳ در بهسازی است که به صورت نسبت بین حجم فوم تزریق شده و حجم خاک بهسازی شده تعریف می‌شود. برای استفاده از فوم در اتاقک حفاری دانستن طول زمانی که فوم به صورت مخلوط فوم و خاک درون اتاقک حفاری و نقاله ماریپیچی باقی مانده، اهمیت دارد. در طول این مدت، به علت کم شدن اثر اتصال‌دهندگی فوم، یک کاهش فشار در سینه‌کار و یک کاهش پایداری در مواد حفاری ایجاد می‌شود. پایداری فوم تابع ابعاد و یکنواختی حباب‌ها و پایداری غشای کیک است. ابعاد حباب تا حد ممکن باید کوچک و یکنواخت باشد. در فوم با ابعاد متغیر حباب‌های بزرگتر، حباب‌های کوچکتر را در بر گرفته و سبب تجزیه فوم می‌شوند (Milligan, 2000).

عوامل اساسی برای کنترل و پایداری خصوصیات فوم عبارتند از:

الف- ضریب غلظت^۴: دامنه فاکتور غلظت فوم بین ۰/۵ تا ۵ درصد است که شدیداً وابسته به مقدار مجموع آب در خاک است، آب تزریقی برای حفاری و آب زیرزمینی است. ضریب غلظت با CF نشان داده می‌شود و از رابطه (۱-۵) محاسبه می‌شود.

$$CF = 100 \times \frac{ms}{mf} \quad (1-5)$$

که در آن، ms جرم عامل فعال‌سازی در محلول و mf جرم محلول است.

¹ Foam

² Foam Expansion Ratio (FER)

³ Foam Injection Ratio (FIR)

⁴ Concentration Factor

ب- نرخ انبساط فوم: به صورت نسبت بین حجم فوم در محفظه فشار (Vf) و حجم محلول اصلی (VF) تعریف می‌شود، که دامنه ۱۰ تا ۳۰ درصد است. نرخ انبساط با FER نمایش داده می‌شود و مقدار آن با توجه به رابطه (۲-۵) محاسبه می‌گردد

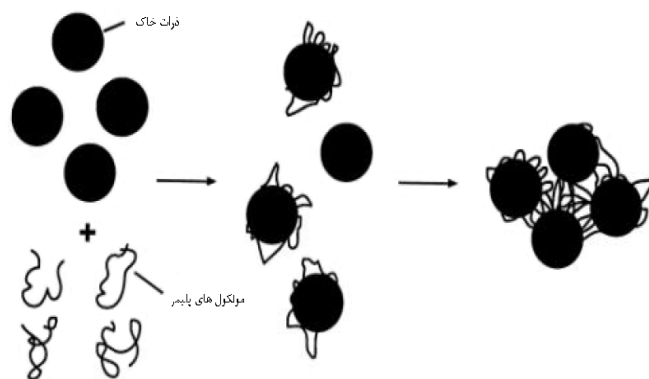
$$FER = \frac{V_f}{V_F} \times 100 \quad (2-5)$$

ج- نرخ تزریق فوم: نرخ تزریق فوم با FIR نمایش داده می‌شود و به صورت نسبت حجم فوم در محفظه فشار (Vf) به حجم برجای خاک حفاری (Vs) تعریف می‌شود. دامنه تغییرات آن بین ۱۰ تا ۸۰ درصد است، اگر چه معمولاً بین ۳۰ تا ۶۰ درصد است.

$$FIR = \frac{V_f}{V_s} \times 100 \quad (3-5)$$

۵-۳-۲- پلیمرها

پلیمرها عامل‌های آماده‌سازی مناسبی در ترکیب فوم‌ها هستند. عامل‌های پلیمری با توجه به غلظت‌شان برای اصلاح ویسکوزیته مواد حفاری شده و تسهیل حرکت آنها داخل اتاقک حفاری استفاده می‌شوند. از مهمترین مزایای پلیمرها، کاهش چسبندگی خاک‌های چسبنده و افزایش پایداری فوم است. شکل (۳-۵) چگونگی اتصال ذرات به وسیله پلیمر را نشان می‌دهد (Borghì, 2006).



شکل (۳-۵): چگونگی اتصال ذرات به وسیله پلیمر (Milligan, 2000)

خلاصه‌ای از میزان استفاده از عامل‌های بهسازی خاک در سپر EPB مبنی بر پیشنهادات موريسون در جدول (۵-۱) آمده است. معمولاً برای عملکرد بهتر ماشین EPB از نرخ‌های بزرگتری از مواد افزودنی برای بهسازی در خاک‌های حاوی رس خشک، رس با خاصیت خمیری بالا و خاک‌های دانه‌ای نیاز است. در قسمت‌هایی که دارای فشار آب زیرزمینی بالایی می‌باشند، بهسازی بیشتری نیاز است. برای سینه‌کار غیر همگن ممکن است، بهسازی مناسب برای دو نوع خاک لازم باشد، مگر اینکه مواد حفاری شده داخل اتاقک حفاری ترکیب همگنی را ایجاد کنند.

جدول (۵-۱): خلاصه‌ای از میزان استفاده از عامل‌های بهسازی خاک در ماشین EPB (Milligan, 2000)

نوع خاک	خصوصیات خاک حفاری	بهسازی
رس با خاصیت خمیری	تثبیت خاک با کاهش مقاومت در اتاقک حفاری	مصرف فوم بالا در کله حفار برای جلوگیری از کلوخه شوندگی
رس ماسه‌ای یا لای‌دار، لایه بندی شده	حفاری آسانتر، کمی خاک ساینده است، امکان انسداد، احتیاج به تثبیت دارند	آب به تنهایی مقاومت برشی خاک را در نقاله ماریپیچی کم نکرده، در رس سفت مقدار متوسط فوم در کله حفار، افزایش مواد روانساز به فوم ممکن ساینده‌گی را کاهش دهد.
شن و ماسه رس دار	جریان آسان خاک حفاری، امکان انسداد در ذرات ریز بیشتر از ۱۰ درصد است، افزایش ساینده‌گی	افزایش پلیمر در کله حفار برای کاهش فرسایش، افزایش پلیمر جذب کننده آب در نقاله ماریپیچی اگر کنترل جریان آب لازم باشد.
ماسه ریز لای دار	عدم جریان، عدم انسداد، امکان جریان آب زیرزمینی، ساینده‌گی بالا، مشکلات افزایش قطعات بزرگ	۰.۱ درصد
شن، ماسه		۰.۲۵ درصد
شن و بولدر		۱-۳ درصد
بولدر و قلوه سنگ	امکان انسداد کله حفار و نقاله ماریپیچی	مواد افزودنی با مقدار زیاد برای محافظت در برابر بولدر و قلوه سنگ در کله حفار تزریق می‌شود

بعضی از نکات مهم که در بهسازی خاک باید به آن‌ها توجه کرد عبارتند از (Milligan, 2000):

- بهتر است، مواد افزودنی در نقطه کله حفار تزریق شود.
- رس‌های سفت یا سنگ‌های سخت می‌بایستی با ابزارهای برش به تکه‌های با اندازه مناسب برای انتقال با مواد افزودنی، شکسته شوند.
- در خاک‌های دارای بولدر و قلوه سنگ، سرندهای روی دهانه سپر نصب شده، طوری که قطعات خیلی

بزرگ به وسیله سیستم عقب دیسک کاتر قبل از ورود به اتاقک حفاری شکسته می‌شود. این اندازه بحرانی است و ممکن است نوع نقاله مارپیچی را تعیین کند.

- پورت‌های مناسب بایستی قابلیت مخلوط‌سازی سریع مواد افزودنی و توزیع تقریباً یکنواخت آن با خاک حفاری را فراهم آورد.

- طراحی داخل اتاقک حفاری بایستی به گونه‌ای باشد تا بهترین ترکیب از خاک و مواد افزودنی را در زمان دسترسی فراهم آورد، و چون خاک بهسازی نشده می‌تواند باعث انسداد سیستم شود. هر پورت تزریق عامل‌های بهسازی خاک، بایستی یک خط جدا برای انتقال مواد افزودنی داشته باشد. بنابراین اگر پورتهای مسدود شد ممکن است با اتصال به یک فشار هیدرولیکی بالا باز شود. اگر از یک خط لوله چندین پورت منشعب شود در صورت انسداد لوله، مواد افزودنی وارد پورت‌های دیگر می‌شوند. زمانی مسئله انسداد بحرانی است که بیشتر پورت‌ها مسدود شوند. طراحی پورت بایستی به گونه‌ای باشد ضمن حداقل انسداد، به بهسازی مناسب خاک کمک کند. عواملی که در مخلوط‌سازی مؤثر خاک حفاری شده و مواد بهسازی نقش دارند شامل موقعیت تعداد نقاط تزریق، سرعت گردش کله حفار، شکل اتاقک حفاری و نقاط تخلیه، زمان مخلوط‌سازی در کله حفار، روش‌های تزریق و کنترل نرخ تزریق است. نمونه‌گیری منظم و پایش برای برقراری فرآیند مؤثر و کاهش هزینه‌ها لازم است.

۵-۵- آزمایش‌های بهسازی خاک

۵-۵-۱- آزمایش نفوذ فوم: هدف از این آزمایش تعیین میزان عمق نفوذ فوم تزریق شده در سینه‌کار که ممکن است در خاک نفوذ کند. اگر نفوذ خیلی زیاد باشد، مصرف فوم ممکن است بیش از اندازه باشد (Duarte, 2007).

۵-۵-۲- آزمایش فرونشست (اسلامپ): هدف از این آزمایش برآورد خصوصیات شکل‌پذیری (پلاستیسیته) مواد بهسازی شده در داخل اتاقک حفاری به وسیله آزمایش اسلامپ است. مزیت آزمایش این است که در

زمینه بتن در همه جا از یک استاندارد استفاده می‌شود. اسلامپ حدود ۱۲ سانتی‌متر برای رسیدن به یک خصوصیت پلاستیسیته خوب در اتاقک حفاری و همچنین استفاده از یک نشانگر در تعیین بهسازی مناسب خاک بر اساس میزان اسلامپ پیشنهاد شده است (Duarte, 2007).

۵-۳-۵- آزمایش اصطکاکی: هدف از این آزمایش چک کردن اصطکاک بین نمونه ای از خاک بهسازی شده و سطح فلزی، ارزیابی فرسایش انرژی مصرفی بر طبق نوع خاک بهسازی شده است (Duarte, 2007). خلاصه‌ای از مطالعه موردی روی ماشین EPB با بهسازی شیمیایی خاک در جدول (۵-۲) و خلاصه‌ای از مطالعات موردی بهسازی شیمیایی خاک توسط بون و همکاران^۱ در سال (۲۰۰۵) در جدول (۵-۳) درج شده است.

جدول (۵-۲): خلاصه‌ای از مطالعه موردی روی ماشین EPB با بهسازی شیمیایی خاک (Borghì, 2006)

مشخصات	توضیحات
<p>پروژه تونل واشنگتن آمریکا (WMATA)</p>	<p>قطر تونل ۵/۷ متر، شرایط خاک: رس، ماسه رسی، ماسه شنی، مشکلات مواجه شده شامل: رس با سفتی و چسبندگی بالا در کله حفار، افزایش آب باعث لغزش رس روی نقاله مارپیچی شد. مشکلات در کنترل فشار سینه‌کار در لایه غیرهمگن</p>
<p>پروژه تونل میلان ایتالیا (Passante Ferroviario)</p>	<p>قطر تونل ۸ متر، شرایط خاک: ماسه آبرفتی و شنی، ذرات ریز کمتر از ۲۰ درصد، بالای سطح آب زیرزمینی، بهسازی خاک: $C_p = 0.7\%$، $C_f = 1.5\%$، $FER = 5-8\%$ و $FIR = 60-80\%$، در زمین‌های آبدار $FIR = 50-60\%$</p>
<p>پروژه متروی خط ۵ والنسیا اسپانیا</p>	<p>قطر تونل ۸ متر، شرایط خاک: ماسه آبرفتی و شنی، ذرات ریز کمتر از ۱۵ درصد، زیر سطح آب زیرزمینی، مشکلات مواجه شده شامل: عدم تراکم‌پذیری مخلوط، فقط بنتونایت تزریق شده، اما فوم با $FIR = 20-30\%$ نتایج بهتری داد و تراکم‌پذیری بیشتر شد</p>
<p>پروژه تونل سیاتل آمریکا (West Seattle)</p>	<p>قطر تونل ۳/۴ متر، شرایط خاک: رس، سیلت، ماسه و شن، مشکلات نشست جزئی ماسه استفاده فوم، بنتونیت و پلیمر ($C_p = 0.5-2\%$) فوم برای کاهش گشتاور و فرسایش مناسب نبوده است.</p>
<p>پروژه تونل سن دیاگو آمریکا (South Bay Ocean Outfall)</p>	<p>قطر تونل ۴ متر، شرایط خاک: سیلت رسی، ماسه، شن، بولدر، نفوذپذیری بالا، مشکلات ذرات شنی ریز و فوم‌ها باعث انسداد نقاله می‌شد. بهسازی شیمیایی خاک $FIR = 25-35\%$، $PIR = 50\%$</p>

¹ Boone et al

جدول (۳-۵): مطالعه موردی بهسازی شیمیایی خاک (Borghì, 2006)

مرجع	توضیحات	FER	FIR (%)	C _F (%)	C _p (%)	عوامل های بهسازی	خاک
Tamai et al, (1989)	اسلامپ ۱۰-۲۰ سانتی متر		۵۵-۶۰		۰/۵-۳	پلی کلرید سدیم	ماسه
	اسلامپ ۱۵ سانتی متر		۵۵-۶۰		۰/۵-۳	پلی کلرید سدیم	
	اسلامپ ۴-۱۲ سانتی متر		۵۵-۶۰		۰/۵-۳	استات وینیل- کوپلیمر اسید اکریلیک	
	اسلامپ ۴-۱۶ سانتی متر		۵۵-۶۰		۰/۵-۳	ایزوبوتیلن- کوپلیمر اسید مالیک	
Kodma & Yamaguchi (1990)	جریان خمیری، اجتناب از حالت رسوب	۸	۲۰	۳		مخلوط A	رس نرم
		۸	۳۰	۳		مخلوط A	رس ماسه دار
		۶	۶۰	۱	۲	مخلوط B	شن ماسه دار
		۸	۴۰	۳		مخلوط A	رس سخت
Person & Marcheselli (1994)	اسلامپ ۵-۱۵ سانتی متر	۵-۸	۴۰-۸۰	۱/۵	۰/۷	سورفکتانت آنیونیک، پلیمر سینتیک	شن، ماسه
Kanaysu et al (1995)	۴-۸ سانتی متر	۶	۱۵-۲۲	۱		سورفکتانت آنیونیک، پلیمر سینتیک، بنتونیت	شن
			۱۲-۱۸		۲		
World Tunneling (1996)	انسداد کله	۱۰-۱۵	۵۰-۱۵۰	۵		سورفکتانت	ماسه رس دار
Wallis (1995), Herrenknecht & Maidl (1996)		۱۰	۲۵-۳۵	۰/۷		سورفکتانت آنیونیک، پلیمر سینتیک	شن، ماسه دانه ریز
Quebaud et al (1998)	اسلامپ ۱۲ سانتی متر	۱۰	۵-۱۵		۱-۵	سورفکتانت آنیونیک	ماسه لای دار
Williamson et al (1999)	برای خاک دانه ای با ریزدانه	۱۰	۳۰	۳		سورفکتانت آنیونیک، پلیمر، کربوکسی متیل سلولز	شن و ماسه لای دار
	برای خاک دانه ای دانه درشت	۸	۳۰	۲	۱	سورفکتانت آنیونیک، کربوکسی متیل سلولز	شن و ماسه
Psomas & Houlsby (2002)	مخلوط فوم و پلیمر، بنتونیت برای مناطق آبدار	۸	۳۰	۲	۱	سورفکتانت آنیونیک، کربوکسی متیل سلولز، پلیمر اکریلیک، بنتونیت	شن، ماسه و بولدر
		۹-۴۰	۲۰-۵۰		۳	پلیمر سینتیک، بنتونیت	ماسه همگن

۵-۶- پهنه‌بندی خط هفت متروی تهران بر اساس نوع مواد افزودنی

تونل خط هفت متروی تهران در قطعه شمالی - جنوبی در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۹+۴۰۰ و ۲۵+۰۰۰ تا ۲۶+۲۰۰ بالاتر از تراز آب زیرزمینی قرار دارد. خاک مسیر حفاری ماشین EPB در مناطق خشک بیشتر از ماسه و سیلت و کمی رس تشکیل شده است. در مناطق خشک به دلیل حفر فضا در عمق متوسط و خصوصیات مکانیکی مناسب خاک منطقه احداث تونل، سینه‌کار حفاری تقریباً پایدار است. مواد افزودنی بیشتر جهت کاهش فرسایش ابزارهای برش، سپر و کاهش گشتاور روی کله حفار ماشین تزریق می‌شود. بنابراین در مناطق خشک فوم و بنتونیت می‌تواند مناسب باشد. تونل در موقعیت ۱۹+۴۰۰ تا ۲۵+۰۰۰ پایین‌تر از تراز آب زیرزمینی قرار دارد. خاک مسیر حفاری ماشین EPB در مناطق آبدار بیشتر سیلت، رس و ماسه تشکیل شده است. در مناطق آبدار به دلیل حفر فضا در عمق‌های کم تا متوسط و تراز آب زیرزمینی بالا سینه‌کار حفاری ناپایدار است. در عمق‌های کم امکان فرونشست و بالازدگی بیشتر است. در خاک‌های رسی امکان انسداد کله حفار و در خاک‌های ماسه‌ای دانه درشت مسأله نشت سینه‌کار بیشتر است. بنابراین بایستی موادی به عنوان بهسازی استفاده نمود که ضمن تحکیم خاک و تأمین فشار تعادلی از انسداد کله حفار و نشت آب جلوگیری کند. برای آب‌بندی، کاهش فرسایش قطعات و انسداد کله حفار پلیمر و بنتونیت روی کله حفار و نقاله ماریپیچی تزریق می‌شود. در جدول (۴-۵) نوع مواد افزودنی با توجه به شرایط خاک و آب زیرزمینی پیشنهاد شده است.

جدول (۴-۵) نوع مواد افزودنی با توجه به شرایط خاک و آب زیرزمینی در خط هفت متروی تهران

مواد شیمیایی پیشنهادی	طبقه‌بندی خاک	فواصل (Chainage)
فوم و بنتونیت	GWM,GML,MLG	۱۲+۵۰۰-۱۳+۷۰۰
فوم و بنتونیت	GWM,GML,GCI	۱۳+۷۰۰-۱۴+۷۵۰
فوم، بنتونیت و پلیمر	GCL,GCI,CLG,CIG	۱۴+۷۵۰-۱۵+۳۰۰
فوم و بنتونیت	GML,GCL	۱۵+۳۰۰-۱۵+۸۰۰
فوم و بنتونیت	GPC,GPM,GWC	۱۵+۸۰۰-۱۶+۵۰۰
فوم و بنتونیت	GPC,GPM,GWC,GWM	۱۶+۵۰۰-۱۷+۲۰۰
فوم و بنتونیت	GPC,GPM	۱۷+۲۰۰-۱۷+۶۰۰
فوم و بنتونیت	GWM,GML	۱۷+۶۰۰-۱۸+۰۰۰
فوم و بنتونیت	GWM,GWC,GPC,GML	۱۸+۰۰۰-۱۸+۷۰۰
فوم و بنتونیت	GWM,GML	۱۸+۷۰۰-۱۹+۴۰۰
پلیمر و بنتونیت	GWM,GML,GCL,GCI	۱۹+۴۰۰-۲۰+۰۰۰
پلیمر و بنتونیت	GCL,GCI,SMI,GWM	۲۰+۰۰۰-۲۰+۹۰۰
پلیمر و بنتونیت	ML,CL	۲۰+۹۰۰-۲۱+۶۰۰
پلیمر و بنتونیت	CL,MIS	۲۱+۶۰۰-۲۲+۲۰۰
پلیمر و بنتونیت	GCL,CLG,CL	۲۲+۲۰۰-۲۲+۵۰۰
پلیمر و بنتونیت	GCL,CLG	۲۲+۵۰۰-۲۳+۷۰۰
پلیمر و بنتونیت	CLG,CL,GCL,CLG	۲۳+۷۰۰-۲۴+۱۵۰
پلیمر و بنتونیت	CL	۲۴+۱۵۰-۲۴+۶۵۰
پلیمر و بنتونیت	GML,GCL,CLG,CL	۲۴+۶۵۰-۲۵+۲۰۰
فوم، بنتونیت و پلیمر	CLG,CL	۲۵+۲۰۰-۲۵+۵۵۰
فوم و بنتونیت	GML,CLG	۲۵+۵۵۰-۲۶+۲۰۰
فوم و بنتونیت	GWC,GPC	۲۶+۲۰۰-۲۶+۶۰۰

جمع‌بندی:

نوع مواد بهسازی با توجه به نوع و دانه‌بندی خاک و وضعیت آب زیرزمینی تعیین می‌شود. بنتونیت برای همه نوع دانه‌بندی خاک در مناطق خشک و آبدار و فوم برای خاک‌های دانه‌ای در مناطق خشک و نوع ضد آب آن می‌تواند در این مناطق استفاده شوند. از پلیمر می‌توان برای همه نوع دانه‌بندی خاک در مناطق خشک و آبدار به همراه بنتونیت استفاده کرد.

فصل ششم

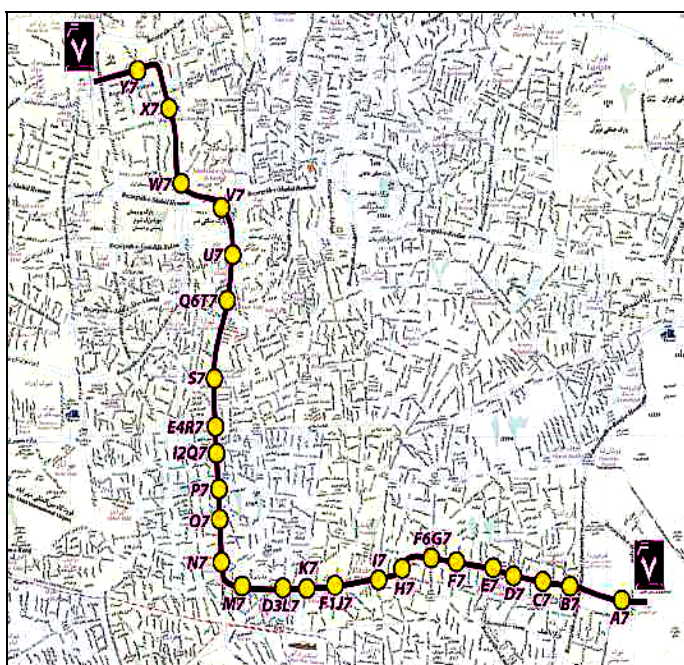
برآورد فشار خاک با روش‌های تحلیلی و تجربی

۱-۶- مقدمه

در مناطق شهری به دلیل حفر تونل در عمق‌های کم و محیط‌های معمولاً خاکی پایداری سینه‌کار حفاری اهمیت زیادی در پیشروی ماشین حفاری، کنترل فرونشست زمین، ایمنی فضای احداث شده و حفظ سازه‌های سطحی دارد. از جمله روش‌های مناسب برای برآورد فشار نگهداری سینه‌کار تونل، روش‌های تحلیلی و تجربی است. در این فصل به پهنه‌بندی خط هفت متروی تهران (قطعه شمالی- جنوبی) از لحاظ فشار خاک پرداخته شده و فشارهای محاسباتی با فشارهای محاسباتی شرکت SELI ایتالیا مقایسه شده و نتایج آن با فشار اعمالی از ماشین حفاری EPB مقایسه شده است.

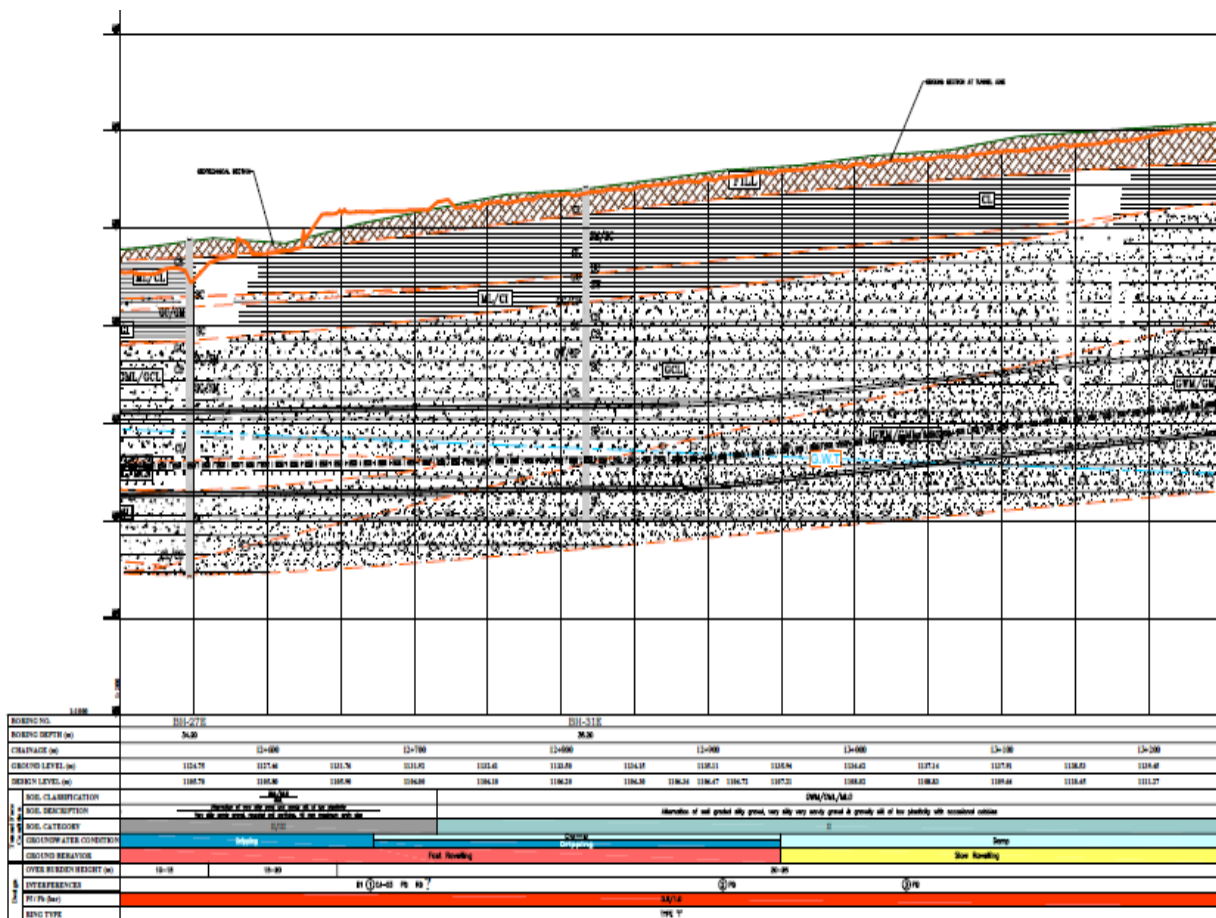
۲-۶- محاسبات فشار سینه‌کار تونل به روش تحلیلی و تجربی

قطعه شمالی - جنوبی خط هفت متروی تهران به طول تقریبی ۱۴ کیلومتر با بهره‌مندی ۱۲ ایستگاه از بزرگراه نواب (ابتدای بریانک) تا خیابان کوهستان در دست احداث است. شکل (۱-۶) مسیر احداث خط هفت متروی تهران را نشان می‌دهد.

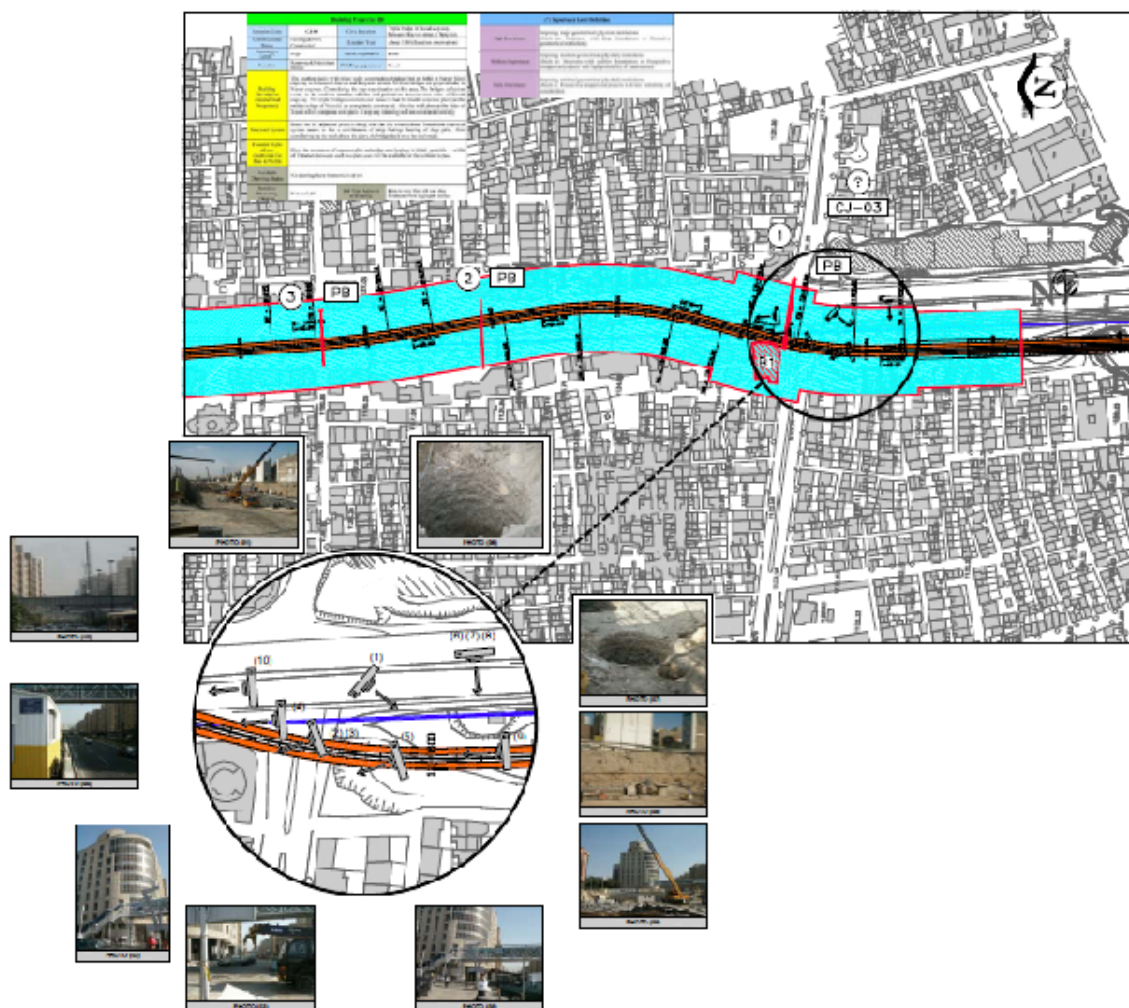


شکل (۱-۶): نمایی از مسیر احداث خط هفت متروی تهران (زمین فن آوران، ۱۳۸۶)

از لحاظ سنگ‌شناسی بخش شمالی- جنوبی دارای رسوبات آبرفتی دانه‌درشت (قلوه سنگ و تخته سنگ) است، که بیشتر از سنگ‌های آذرین و آذرآواری تشکیل یافته است. مسیر حفاری تونل خط هفت متروی تهران در بخش شمالی- جنوبی با دو شرایط مختلف از لحاظ آب زیرزمینی مواجه است. در محدوده ایستگاه‌های N₇ تا T₇ تونل بالای سطح آب زیرزمینی و در محدوده ایستگاه‌های U₇ تا Y₇ تونل زیر سطح آب زیرزمینی حفاری خواهد شد. شکل (۲-۶) مقطع طولی گمانه اکتشافی در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰ در بزرگراه نواب (ابتدای منطقه بریانک) را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۳-۶) پلان طراحی ایستگاه بریانک در ابتدای مسیر حفاری ماشین EPB در قطعه شمالی- جنوبی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۶): مقطع طولی گمانه اکتشافی در موقعیت ۱۲+۵۰۰-۱۳+۲۰۰ (زمین فن آوران، ۱۳۸۶)



شکل (۳-۶): پلان طراحی ایستگاه بریانک (زمین فن آوران، ۱۳۸۶)

حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه کار (فشار فرونشست) به صورت دو بعدی و سه بعدی با توجه به شرایط هندسی (نسبت روباره به قطر تونل) محاسبه می‌شود. با توجه به عمق زیاد مسیر شمالی- جنوبی در بیشتر مسیر قوس خاکی در بالای تونل تشکیل می‌شود. با فرض محیط همگن برای روش‌های دو بعدی و سه بعدی (به جزء مدل برویر)، از میانگین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک در محیط خشک و آبدار با توجه به لاگ‌های اکتشافی برای برآورد فشار خاک استفاده می‌شود. مقدار میانگین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک از روابط (۱-۶) تا (۴-۶) به دست می‌آید.

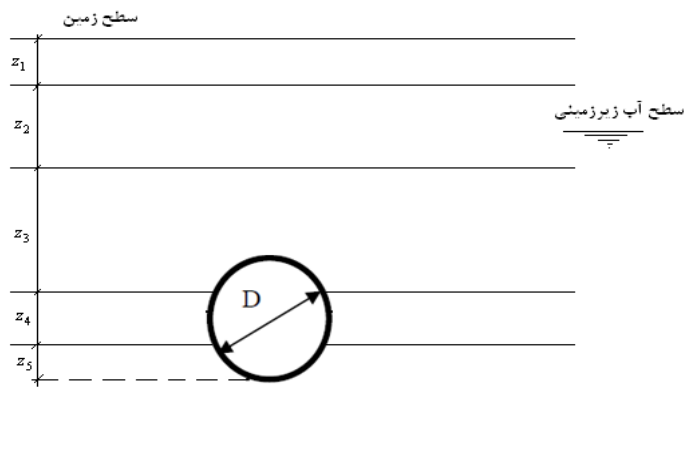
$$\bar{\gamma}_d = \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot z_i \right) / \sum_{i=1}^n z_i \quad (1-6)$$

$$\bar{\gamma}' = \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot z_i \right) / \sum_{i=1}^n z_i \quad (2-6)$$

$$\bar{c} = \left(\sum_{i=1}^n c_i \cdot z_i \right) / \sum_{i=1}^n z_i \quad (3-6)$$

$$\bar{\phi} = \left(\sum_{i=1}^n \phi_i \cdot z_i \right) / \sum_{i=1}^n z_i \quad (4-6)$$

در این روابط $\bar{\gamma}_d$ وزن مخصوص خشک معادل خاک، γ_i وزن مخصوص هر لایه خاک، $\bar{\gamma}'$ وزن مخصوص غوطه ور معادل خاک، z_i ضخامت هر لایه خاک c_i چسبندگی هر لایه خاک، \bar{c} چسبندگی معادل خاک، ϕ_i زاویه اصطکاک داخلی خاک برای هر لایه و $\bar{\phi}$ زاویه اصطکاک معادل خاک است. شکل (۴-۶) نمونه‌ای از لایه‌بندی خاک در مسیر احداث تونل در خط هفت متروی تهران را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۶): نمونه‌ای از لایه‌بندی خاک در مسیر حفاری تونل در خط هفت متروی تهران

۳-۶- پهنه‌بندی مسیر در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰

خاک این پهنه عمدتاً از ماسه و سیلت تشکیل شده است. تونل در بالای سطح آب زیرزمینی حفاری خواهد شد. فشار سینه‌کار به صورت دو بعدی و سه بعدی برای حالت همگن و سه بعدی برای حالت غیرهمگن محاسبه می‌شود. اطلاعات لایه‌بندی و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک به کمک داده‌های

طراحی خاک در خط هفت متروی تهران در جدول (۱-۶) با توجه به لاگ‌های اکتشافی استخراج و در جدول (۲-۶) و (۳-۶) درج شده است.

جدول (۱-۶): داده‌های طراحی خاک در خط هفت متروی تهران (زمین فن آوران، ۱۳۸۶)

پارامترهای مکانیکی خاک		پارامترهای فیزیکی خاک		طبقه‌بندی خاک
ϕ' (deg)	c' (kN/m ²)	γ_d (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	
۳۸	۲۰	۱۷	۱۹	I
۳۵	۳۰	۱۷	۱۹	II
۳۰	۳۰	۱۷	۱۹	III
۲۷	۴۰	۱۷	۱۹	IV

جدول (۲-۶): طبقه‌بندی خاک از روی گمانه در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰ (زمین فن آوران، ۱۳۸۶)

۳۱-۳۵	۲۶/۸-۳۱	۲۴-۲۶/۸	۲۰-۲۴	۶/۷-۲۰	۲-۶/۷	۰-۲	ضخامت لایه (m)
II,III	II	III	II	II,III	III,IV	I,II	طبقه‌بندی خاک

جدول (۳-۶): پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰ (زمین فن آوران، ۱۳۸۶)

اصطکاک (درجه)	چسبندگی (کیلو پاسکال)	وزن مخصوص خشک (کیلو پاسکال)	روباره (متر)	موقعیت ^{۷۴} (کیلومتر+متر)
۳۲	۳۰	۱۷	۱۵	۱۲+۵۰۰-۱۲+۶۰۰
۳۲	۳۰	۱۷	۱۹	۱۲+۶۰۰-۱۲+۷۰۰
۳۲	۳۰	۱۷	۲۰	۱۲+۷۰۰-۱۲+۸۰۰
۳۲	۳۰	۱۷	۲۲	۱۲+۸۰۰-۱۲+۹۰۰
۳۲	۳۰	۱۷	۲۲	۱۲+۹۰۰-۱۳+۰۰۰
۳۲	۳۰	۱۷	۲۲	۱۳+۰۰۰-۱۳+۱۰۰
۳۲	۳۰	۱۷	۲۲	۱۳+۱۰۰-۱۳+۲۰۰

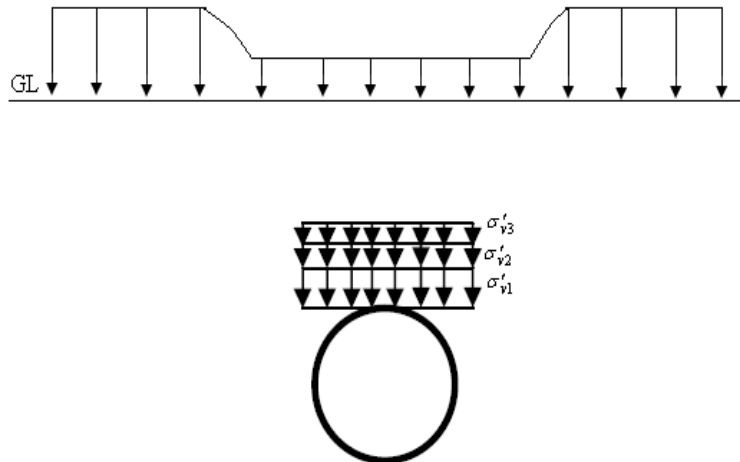
مقدار بار سربار در منطقه را با توجه به منبع بارگذاری می‌توان از جدول (۴-۶) تعیین کرد که در خط هفت متروی تهران بارهای ترافیکی در مسیر حفاری ۲۰ کیلو پاسکال و بار ساختمان ۱۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

⁷⁴ Chainage

جدول (۴-۶): استاندارد بارگذاری (Australian Standard, 2002)

منبع بارگذاری	فشار توزیع شده یکنواخت (کیلو پاسکال)
راه آهن	۲۰ کیلو پاسکال
جاده اصلی و بزرگراه	۲۰ کیلو پاسکال (دائمی)، ۱۰ کیلو پاسکال (موقت)
جاده اصلی و پیچ	۱۰ کیلو پاسکال
پیاده رو	۵ کیلو پاسکال
ساختمان	۱۰ کیلو پاسکال برای هر طبقه

اثر بار ساختمان بر روی تونل به دلیل انطباق بارها مطابق شکل (۵-۶) از روش بوسینسک^۱ محاسبه شده و با بار قائم ترزاقی جمع شده است.



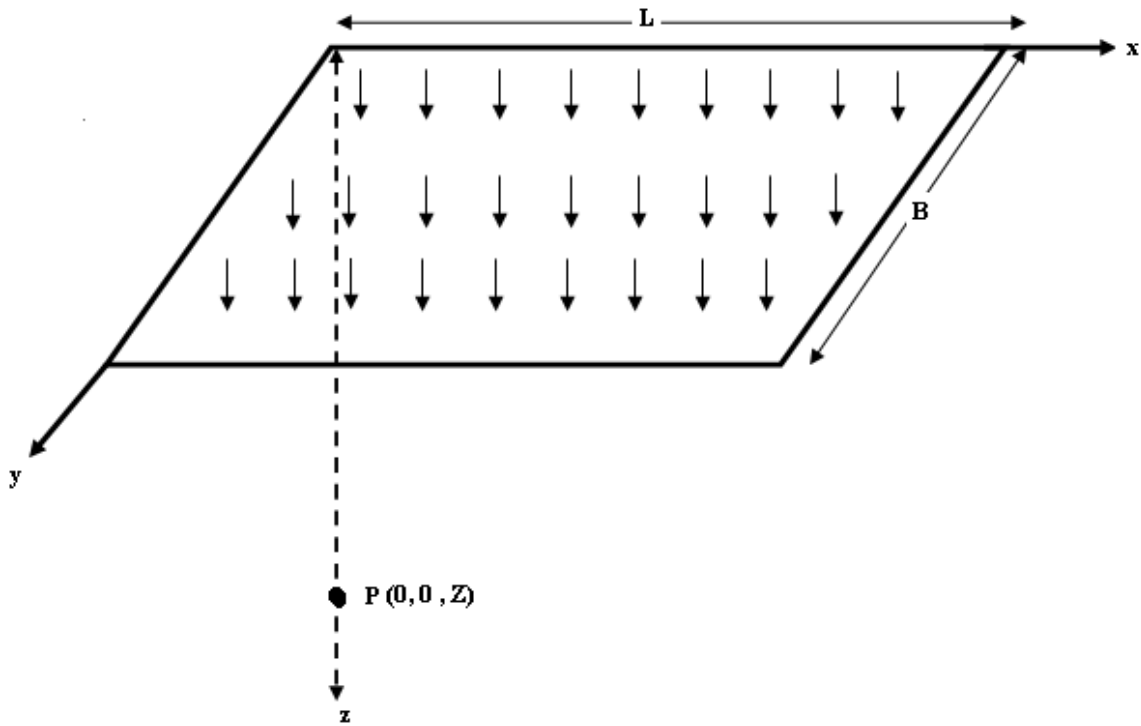
شکل (۵-۶): توزیع تقریبی تنش از سازه و خاک روی تونل مترو در منطقه بریانک

روش بوسینسک

اغلب بارهای وارده به خاک توسط پی‌های ساختمانی به صورت مستطیل می‌باشد. چگونگی توزیع تنش و اثر آن روی سازه به کمک روابط بوسینسک محاسبه می‌شود (Braja M. Das, 2007). شکل (۶-۶) چگونگی توزیع بار یکنواخت توسط شالوده^۲ مستطیلی را نشان می‌دهد.

^۱ Boussinesq

^۲ Foundation



شکل (۶-۶): چگونگی توزیع بار یکنواخت توسط شالوده مستطیلی (Braja M. Das, 2007)

مقدار تنش وارد از شالوده در نقطه P در زیر گوشه شالوده مستطیلی از رابطه (۵-۶) به دست می‌آید.

$$\sigma_v = q \times I \quad (۵-۶)$$

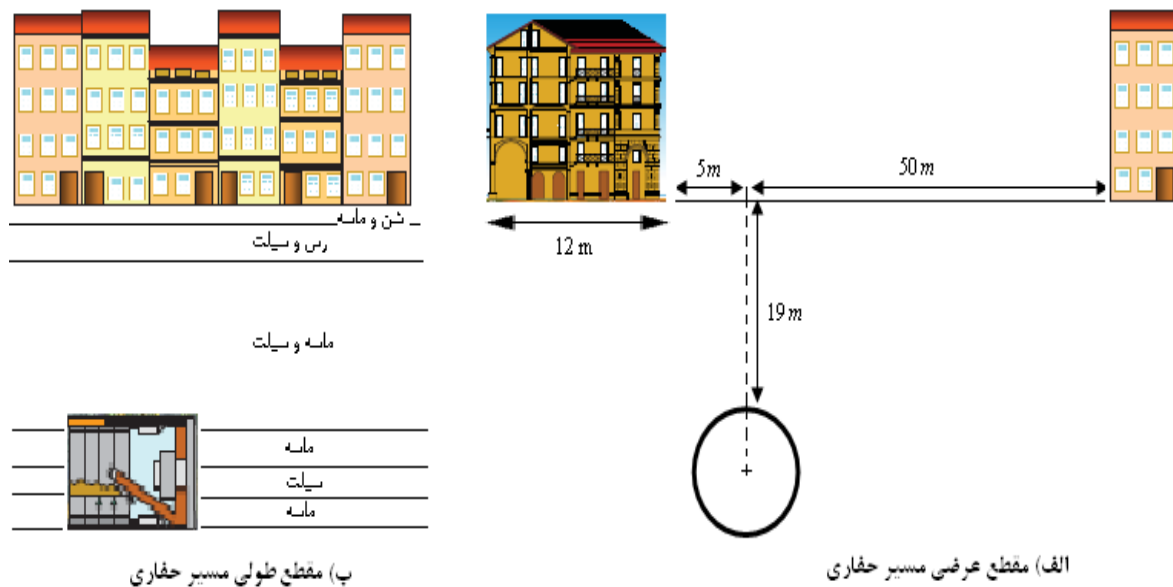
در این رابطه q بار ساختمان، I ضریب تأثیر تنش و σ_v تنش قائم زیر یکی از گوشه‌های سطح بارگذاری مستطیل شکل است. مقدار ضریب تأثیر تنش با در نظرگیری نقطه تأثیر تنش در خارج یا داخل سطح بارگذاری از جدول (۵-۶) به دست می‌آید (Braja M. Das, 2007). در این جدول پارامتر m از نسبت عرض سطح بارگذاری به عمقی که اثر تنش شالوده را نسبت به آن محاسبه شده، به دست می‌آید

$$\left(m = \frac{B}{Z} \right) \text{ همچنین پارامتر } n \text{ از نسبت طول سطح بارگذاری به عمق مورد نظر به دست می‌آید } \left(n = \frac{L}{Z} \right)$$

جدول (۵-۶): ضریب تأثیر تنش (Braja M. Das, 2007)

n	m																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0
0.1	0.0047	0.0092	0.0132	0.0168	0.0198	0.0222	0.0242	0.0258	0.0270	0.0279	0.0293	0.0301	0.0306	0.0309	0.0311	0.0314	0.0315	0.0316	0.0316	0.0316
0.2	0.0092	0.0179	0.0259	0.0328	0.0387	0.0435	0.0474	0.0504	0.0528	0.0547	0.0573	0.0589	0.0599	0.0606	0.0610	0.0616	0.0618	0.0619	0.0620	0.0620
0.3	0.0132	0.0259	0.0374	0.0474	0.0559	0.0629	0.0686	0.0731	0.0766	0.0794	0.0832	0.0856	0.0871	0.0880	0.0887	0.0895	0.0898	0.0901	0.0901	0.0902
0.4	0.0168	0.0328	0.0474	0.0602	0.0711	0.0801	0.0873	0.0931	0.0977	0.1013	0.1063	0.1094	0.1114	0.1126	0.1134	0.1145	0.1150	0.1153	0.1154	0.1154
0.5	0.0198	0.0387	0.0559	0.0711	0.0840	0.0947	0.1034	0.1104	0.1158	0.1202	0.1263	0.1300	0.1324	0.1340	0.1350	0.1363	0.1368	0.1372	0.1374	0.1374
0.6	0.0222	0.0435	0.0629	0.0801	0.0947	0.1069	0.1168	0.1247	0.1311	0.1361	0.1431	0.1475	0.1503	0.1521	0.1533	0.1548	0.1555	0.1560	0.1561	0.1562
0.7	0.0242	0.0474	0.0686	0.0873	0.1034	0.1169	0.1277	0.1365	0.1436	0.1491	0.1570	0.1620	0.1652	0.1672	0.1686	0.1704	0.1711	0.1717	0.1719	0.1719
0.8	0.0258	0.0504	0.0731	0.0931	0.1104	0.1247	0.1365	0.1461	0.1537	0.1598	0.1684	0.1739	0.1774	0.1797	0.1812	0.1832	0.1841	0.1847	0.1849	0.1850
0.9	0.0270	0.0528	0.0766	0.0977	0.1158	0.1311	0.1436	0.1537	0.1619	0.1684	0.1777	0.1836	0.1874	0.1899	0.1915	0.1938	0.1947	0.1954	0.1956	0.1957
1.0	0.0279	0.0547	0.0794	0.1013	0.1202	0.1361	0.1491	0.1598	0.1684	0.1752	0.1851	0.1914	0.1955	0.1981	0.1999	0.2024	0.2034	0.2042	0.2044	0.2045
1.2	0.0293	0.0573	0.0832	0.1063	0.1263	0.1431	0.1570	0.1684	0.1777	0.1851	0.1958	0.2028	0.2073	0.2103	0.2124	0.2151	0.2163	0.2172	0.2175	0.2176
1.4	0.0301	0.0589	0.0856	0.1094	0.1300	0.1475	0.1620	0.1739	0.1836	0.1914	0.2028	0.2102	0.2151	0.2184	0.2206	0.2236	0.2250	0.2260	0.2263	0.2264
1.6	0.0306	0.0599	0.0871	0.1114	0.1324	0.1503	0.1652	0.1774	0.1874	0.1955	0.2073	0.2151	0.2203	0.2237	0.2261	0.2294	0.2309	0.2320	0.2323	0.2325
1.8	0.0309	0.0606	0.0880	0.1126	0.1340	0.1521	0.1672	0.1797	0.1899	0.1981	0.2103	0.2183	0.2237	0.2274	0.2299	0.2333	0.2350	0.2362	0.2366	0.2367
2.0	0.0311	0.0610	0.0887	0.1134	0.1350	0.1533	0.1686	0.1812	0.1915	0.1999	0.2124	0.2206	0.2261	0.2299	0.2325	0.2361	0.2378	0.2391	0.2395	0.2397
2.5	0.0314	0.0616	0.0895	0.1145	0.1363	0.1548	0.1704	0.1832	0.1938	0.2024	0.2151	0.2236	0.2294	0.2333	0.2361	0.2401	0.2420	0.2434	0.2439	0.2441
3.0	0.0315	0.0618	0.0898	0.1150	0.1368	0.1555	0.1711	0.1841	0.1947	0.2034	0.2163	0.2250	0.2309	0.2350	0.2378	0.2420	0.2439	0.2455	0.2461	0.2463
4.0	0.0316	0.0619	0.0901	0.1153	0.1372	0.1560	0.1717	0.1847	0.1954	0.2042	0.2172	0.2260	0.2320	0.2362	0.2391	0.2434	0.2455	0.2472	0.2479	0.2481
5.0	0.0316	0.0620	0.0901	0.1154	0.1374	0.1561	0.1719	0.1849	0.1956	0.2044	0.2175	0.2263	0.2324	0.2366	0.2395	0.2439	0.2460	0.2479	0.2486	0.2489
6.0	0.0316	0.0620	0.0902	0.1154	0.1374	0.1562	0.1719	0.1850	0.1957	0.2045	0.2176	0.2264	0.2325	0.2367	0.2397	0.2441	0.2463	0.2482	0.2489	0.2492

شکل (۶-۷) موقعیت ساختمان دناي پنج را در فاصله ۵ متری از محور تونل را نشان می‌دهد. تأثیر بار ساختمان در مسیر حفاری در جدول (۶-۶) آورده شده است.



شکل (۶-۷): موقعیت ساختمان‌ها نسبت به محور تونل در منطقه بریانک (موقعیت ۱۲+۶۰۰ تا ۱۲+۷۰۰)

جدول (۶-۶): موقعیت ساختمان و بار محاسبه شده روی تونل در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰

بار تقریبی وارده از چپ (کیلو پاسکال)	بار تقریبی وارده از راست (کیلو پاسکال)	فاصله ساختمان‌ها از محور تونل (متر)		موقعیت (کیلومتر+متر)
		چپ	راست	
۱	-	۲۵	-	۱۲+۵۰۰-۱۲+۶۰۰
۱۰	۰	۵	۵۰	۱۲+۶۰۰-۱۲+۷۰۰
۵	۰/۵	۱۰	۴۰	۱۲+۷۰۰-۱۲+۸۰۰
۴	۱	۱۵	۳۰	۱۲+۸۰۰-۱۲+۹۰۰
۴	۱	۱۵	۳۰	۱۲+۹۰۰-۱۳+۰۰۰
۴	۱	۱۵	۳۰	۱۳+۰۰۰-۱۳+۱۰۰
۴	۱	۱۵	۳۰	۱۳+۱۰۰-۱۳+۲۰۰

حداقل فشار نگهداری سینه‌کار تونل به روش‌های مختلف در موقعیت ۱۲+۶۰۰ تا ۱۲+۷۰۰ مطابق ذیل محاسبه شده و فشار موقعیت‌های دیگر در این پهنه در جدول (۶-۸) درج شده است.

۶-۳-۱- روش ترزاقی

در این روش ابتدا فشار قائم روی تونل محاسبه شده و با تقسیم آن بر وزن مخصوص خشک خاک ارتفاع سست‌شدگی در موقعیت ۱۲+۶۰۰ تا ۱۲+۷۰۰ محاسبه شده و سپس با ضرب ارتفاع سست‌شدگی در وزن مخصوص و ضریب فشار جانبی خاک در حالت فرونشست (فعال)، حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار در تاج تونل بدست می‌آید. فشار سینه‌کار بین دو حالت ساکن و فرونشست محاسبه می‌شود.

طول سست‌شدگی:

$$B_1 = R \times [\tan(45 - \varphi/2) + (\cos(45 - \varphi/2))^{-1}] = 4.57 \times [\tan(45 - 16) + (\cos(45 - 16))^{-1}] = 7.8 \text{ m}$$

فشار قائم روی تونل:

$$\sigma'_{v_1} = \frac{B_1 \times \gamma - c}{K_0 \times \tan \varphi} \left(1 - e^{-K_0 \times \tan \varphi \times \frac{H}{B_1}} \right) + q_0 \times \left(e^{-K_0 \times \tan \varphi \times \frac{H}{B_1}} \right) =$$

$$\frac{7.8 \times 17 - 30}{(1 - \sin 32) \times \tan 32} \left(1 - e^{-(1 - \sin 32) \times \tan 32 \times \frac{19}{7.8}} \right) + 20 \times \left(e^{-(1 - \sin 32) \times \tan 32 \times \frac{19}{7.8}} \right) = 188.3 \text{ kPa}$$

فشار قائم کل برابر مجموع فشارهای محاسبه شده به روش ترزاقی و بوسنيسک است:

$$\sigma_{v_T} = (\sigma'_{v_1} + \sigma'_{v_2}) = (188.31 + 10) = 198 \text{ kPa}$$

ارتفاع سست‌شدگی:

$$H_p = \sigma_{v_T} / \gamma_d = 198 / 17 = 11.7 \text{ m}$$

ضریب فشار فعال خاک:

$$K_a = (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi) = (1 - \sin 32) / (1 + \sin 32) = 0.307$$

حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار در مرکز تونل:

$$\sigma_T = K_a \times (H_p + R) \times \gamma_d = 0.307 \times 16.2 \times 17 = 85 \text{ kPa}$$

حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار در تاج تونل:

$$\sigma_T = K_a \times H_p \times \gamma_d = 0.307 \times 11.7 \times 17 = 61 \text{ kPa}$$

همچنین فشار ساکن را با ضرب ضریب فشار ساکن خاک مطابق زیر به دست می‌آید. بهتر است، فشار وارد به سینه‌کار در دو حالت فرونشست و ساکن باشد.

ضریب فشار ساکن خاک:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi = 1 - \sin 32 = 0.47$$

فشار ساکن خاک:

$$\sigma_T = K_0 \times (H_p + R) \times \gamma_d = 0.47 \times 16.2 \times 17 = 129 \text{ kPa}$$

فشار ساکن در تاج تونل ۹۲ کیلو پاسکال است. ارتفاع سست‌شدگی با کمی احتیاط انتخاب شده، با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه در صورت استفاده از ارتفاع سست‌شدگی پیشنهادی ترازقی در جدول (۱-۴) فشار محاسباتی کمتری برآورد می‌شود.

۶-۳-۲- روش لکا و دورمیکس

در این روش حداقل فشار نگهداری را برای شکست فرونشست محاسبه می‌شود. به دلیل اینکه نسبت روباره به قطر تونل بزرگتر از یک است، نتایج شکست یک بلوک و دو بلوک به هم نزدیک است. اثر پارامتر بار سطحی به دلیل $(C/D \geq 0.6)$ صفر است.

پارامتر چسبندگی خاک:

$$N_c = (N_s - 1) / \tan \varphi = -1 / \tan 32 = -1.6$$

حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل:

$$\sigma_T = \gamma \times D \times N_\gamma + c \times N_c + \sigma_s \times N_s = 17 \times 9.14 \times 0.1 - 1.6 \times 30 = 0$$

۶-۳-۳- جانسکز و استاینر

در روش جانسکز و استاینر تنش قائم برای روباره‌های بزرگتر از ۲ برابر قطر تونل از روش سیلو ترازقی استفاده می‌شود. در این روش از اثر قوس روی تونل صرف نظر شده و این فرض برای روش‌های کواری، جرمسکید، میر و کرش نیز صادق است.

طول سست‌شدگی:

$$a = \frac{R}{1 + \tan \theta} = \frac{4.57}{1 + \tan 67} = 1.4$$

تنش قائم روی تونل:

$$\sigma'_{v_1} = \frac{a \times \gamma_d - c}{K_{\text{silos}} \times \tan \varphi} \left[1 - e^{-\frac{h_0 \times K_0 \times \tan \varphi}{a}} \right] + q_0 \times e^{-\frac{h_0 \times K_0 \times \tan \varphi}{a}} = \frac{1.4 \times 17 - 30}{(1 - \sin 32) \times \tan 32} \left[1 - e^{-\frac{19 \times (1 - \sin 32) \times \tan 32}{1.4}} \right] + 20 \times e^{-\frac{19 \times (1 - \sin 32) \times \tan 32}{1.4}} = -20 \text{ kPa}$$

تنش قائم کل روی تونل برابر است با:

$$\sigma'_v = (\sigma'_{v_1} + \sigma'_{v_2}) = (0 + 10) = 10 \text{ kPa}$$

وزن سیلو:

$$G_s = B \times D \times \cot \theta \times \sigma'_v = 9.14^2 \times \cot 67 \times 10 = 355 \text{ kN}$$

وزن گوه:

$$G_w = \frac{B \times D^2 \times \gamma \times \cot \theta}{2} = \frac{9.14^3 \times 17 \times \cot 67}{2} = 2755 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی:

$$K = \frac{B \times D \times c}{\sin \theta} = \frac{9.14^2 \times 30}{\sin 67} = 2723 \text{ kN}$$

نیروی برشی:

$$T = \frac{D^2 \times \cot \theta}{2} (c + K_{A3} \times \sigma'_v \times \tan \varphi) = \frac{9.14^2 \times \cot 67}{2} (30 + 0.193 \times 62 \times \tan 32) = 664 \text{ kN}$$

نیروی مؤثر خاک:

$$E = -\frac{(\cos \theta \times \tan \varphi - \sin \theta) \times \Sigma(G_s + G_w) + \Sigma(2T + K)}{\sin \theta \times \tan \varphi + \cos \theta} = \frac{((\cos 67 \times \tan 32 - \sin 32) \times \Sigma(355 + 2755)) + \Sigma(2723 + 1328)}{\sin 67 \times \tan 32 + \cos 67} = 0$$

۶-۳-۴- روش انگونستا و کواری (روش اول)

تنها تفاوت این روش و سایر روش‌های این گروه با روش جانسکز و استاینر به نوع ضریب فشار جانبی

خاک مربوط است.

فشار قائم روی تونل:

$$\sigma'_{v_1} = \frac{a \times \gamma_d - c}{K_{\text{silos}} \times \tan \varphi} \left[1 - e^{-\frac{h_0 \times K_0 \times \tan \varphi}{a}} \right] + q_0 \times e^{-\frac{h_0 \times K_0 \times \tan \varphi}{a}} = \frac{1.4 \times 17 - 30}{0.8 \times \tan 32} \left[1 - e^{-\frac{19 \times 0.8 \times \tan 32}{1.4}} \right] + 20 \times e^{-\frac{19 \times 0.8 \times \tan 32}{1.4}} = -12 \text{ kPa}$$

فشار قائم کل روی تونل برابر است با:

$$\sigma'_v = (\sigma'_{v_1} + \sigma'_{v_2}) = (0 + 10) = 10 \text{ kPa}$$

وزن سیلو:

$$G_s = B \times D \times \cot \theta \times \sigma'_v = 9.14^2 \times \cot 67 \times 10 = 355 \text{ kN}$$

وزن گوه:

$$G_w = \frac{B \times D^2 \times \gamma \times \cot \theta}{2} = \frac{9.14^3 \times 17 \times \cot 67}{2} = 2755 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی:

$$K = \frac{B \times D \times c}{\sin \theta} = \frac{9.14^2 \times 30}{\sin 67} = 2723 \text{ kN}$$

$$T = \frac{D^2 \times \cot \theta}{2} (c + K_{\text{wedge}} \times \bar{\sigma}'_v \times \tan \varphi) = \frac{9.14^2 \times \cot 67}{2} (30 + 0.4 \times 62 \times \tan 32) = 629 \text{ kN}$$

نیروی وارده بر گوه برابر است:

$$E = -\frac{(\cos \theta \times \tan \varphi - \sin \theta) \times \Sigma(G_s + G_w) + \Sigma(2T + K)}{\sin \theta \times \tan \varphi + \cos \theta} = \frac{((\cos 67 \times \tan 32 - \sin 67) \times \Sigma(355 + 2755)) + \Sigma(2723 + 1259)}{\sin 67 \times \tan 32 + \cos 67} = 0$$

فشارهای محاسبه شده به روش میر، جرمسکید و کرش نیز صفر است. طبق رابطه ترازقی ($a \leq c/\gamma$) برای

روابط سیلو و گوه سه بعدی با توجه به چسبندگی و وزن مخصوص خاک، فشار قائم روی تاج تونل از

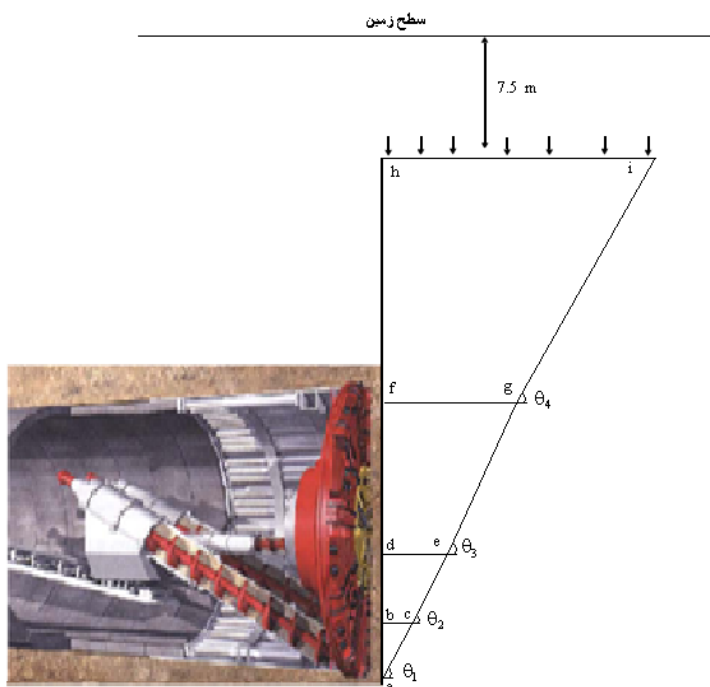
طرف خاک صفر است و فشار خاک روی سینه کار نیز صفر است.

۶-۳-۵- برویر

در موقعیت ۱۲+۶۰۰ تا ۱۲+۷۰۰ خاک از شش لایه تشکیل شده است، زاویه شکست هر لایه با توجه به شکل (۴-۲۱) بدست آمده است. اثر بار سازه روی سطح گوه اول ۱۵ کیلوپاسکال است. عرض گوه برابر قطر تونل ۹/۱۴ فرض شده و طول هر گوه با محاسبه طول آخرین گوه بدست می‌آید. مشخصات پارامترهای هر لایه خاک در روش برویر در جدول (۶-۷) آورده شده است. در شکل (۶-۸) لایه‌بندی خاک را در محدوده مورد مطالعه در روش برویر را نشان می‌دهد.

جدول (۶-۷): مشخصات پارامترهای هر لایه خاک در روش برویر

۲۶/۸-۳۱	۲۴-۲۶/۸	۲۰-۲۴	۶/۷-۲۰	۲-۶/۷	۰-۲	ضخامت لایه (m)
II	III	II	II,III	III,IV	I,II	طبقه‌بندی خاک
۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۵	۲۵	چسبندگی خاک (kPa)
۳۵	۳۰	۳۵	۳۲/۵	۲۸/۵	۳۳/۵	زاویه اصطکاک داخلی
۷۱	۶۹	۷۱	۶۹	۷۱	۷۲	زاویه شکست



شکل (۶-۸): گوه‌های تشکیل شده در موقعیت ۱۲+۶۰۰-۱۲+۷۰۰

طول گوه اول:

$$l_{bc} = \frac{h_{ab}}{\tan \theta_1} = \frac{1.2}{\tan 71} = 0.4 \text{ m}$$

طول گوه دوم:

$$l_{de} = \frac{h_{bd}}{\tan \theta_2} + l_{bc} = \frac{2.8}{\tan 69} + 0.4 = 1.5 \text{ m}$$

طول گوه سوم:

$$l_{fg} = \frac{h_{df}}{\tan \theta_3} + l_{de} = \frac{4}{\tan 71} + 1.5 = 2.9 \text{ m}$$

طول گوه چهارم:

$$l_{hi} = \frac{h_{hf}}{\tan \theta_4} + l_{fg} = \frac{13.5}{\tan 69} + 3 = 8.2 \text{ m}$$

در گوه اول تنش قائم برابر مجموع بار ترافیکی، بار روباره و بار سازه است.

$$\sigma'_{v_1} = ((17 \times 7.5) + 20 + 15) = 163 \text{ kPa}$$

وزن سیلو اول :

$$G_{s_1} = B \times l_{hi} \times \sigma'_{v_1} = 9.14 \times 8.2 \times 163 = 12217 \text{ kN}$$

وزن گوه اول:

$$G_{w_1} = \frac{B \times (l_{hi} + l_{fg}) \times h_{fh} \times \gamma_d}{2} = \frac{9.14 \times 11.2 \times 12.5 \times 17}{2} = 10877 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی روی گوه اول:

$$K_1 = \frac{B \times h_{fh} \times c'_1}{\sin \theta_4} = \frac{9.14 \times 12.5 \times 30}{\sin 69} = 3671 \text{ kN}$$

برای محاسبه نیروی برشی روی گوه اول ابتدا تنش متوسط قائم را محاسبه کرده، که برابر است با:

$$\overline{\sigma'_{v_1}} = \sigma'_{v_1} + \frac{1}{3} \times h_{fh} \times \gamma_d = 163 + \frac{1}{3} \times 12.5 \times 17 = 234 \text{ kPa}$$

نیروی برشی:

$$T_1 = \frac{h_{fh} \times (l_{hi} + l_{fg})}{2} \times (c'_1 + K_0 \times \overline{\sigma'_{v_1}} \times \tan \phi'_1) = \frac{12.5 \times (8.2 + 2.9)}{2} (30 + (0.46 \times 234 \times \tan 32.5))$$

$$= 6838 \text{ kN}$$

گوه دوم:

طول سست شدگی:

$$a = \frac{A_{\text{silo}}}{U_{\text{silo}}} = \frac{2.9 \times 9.14}{2 \times (2.9 + 9.14)} = 1.1 \text{ m}$$

برای محاسبه تنش قائم روی گوه دوم، گوه اول به عنوان یک سیلو روی گوه دوم در نظر گرفته و بار گوه اول را روی گوه دوم اعمال می‌شود.

$$\sigma'_{v_2} = \frac{a \times \gamma_1 - c'_1}{K_0 \times \tan \phi'_1} \left(1 - e^{-K_0 \times \tan \phi'_1 \times \frac{h_{hf}}{a}} \right) + (\sigma'_{v_1}) \times \left(e^{-K_0 \times \tan \phi'_1 \times \frac{h_{hf}}{a}} \right)$$

$$= \frac{1.1 \times 17 - 30}{0.46 \times \tan 28.5} \left(1 - e^{-0.46 \times \tan 32.5 \times \frac{12.5}{1.1}} \right) + (163) \times \left(e^{-0.46 \times \tan 32.5 \times \frac{12.5}{1.1}} \right) = -37 \text{ kPa}$$

وزن سیلو دوم:

$$G_{s_2} = B \times l_{de} \times \sigma'_{v_2} = 9.14 \times 4 \times 0 = 0 \text{ kN}$$

وزن گوه دوم:

$$G_{w_2} = \frac{B \times (l_{de} + l_{fg}) \times h_{df} \times \gamma_2}{2} = \frac{9.14 \times 4.4 \times 4 \times 17}{2} = 1367 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی روی گوه دوم:

$$K_2 = \frac{B \times h_{df} \times c'_2}{\sin \theta_3} = \frac{9.14 \times 4 \times 30}{\sin 71} = 1160 \text{ kN}$$

برای محاسبه نیروی برشی روی گوه دوم ابتدا تنش متوسط قائم را محاسبه کرده، که برابر است با:

$$\overline{\sigma'_{v_2}} = \sigma'_{v_2} + \frac{1}{3} \times h_{bd} \times \gamma_2 = 0 + \frac{1}{3} \times 4 \times 17 = 23 \text{ kPa}$$

نیروی برشی گوه دوم:

$$T_2 = \frac{h_{df} \times (l_{fg} + l_{de})}{2} (c'_2 + K_0 \cdot \overline{\sigma'_{v_2}} \cdot \tan \phi'_2) = \frac{4 \times 4.4}{2} (30 + (0.43 \times 23 \times \tan 35))$$

$$= 325 \text{ kN}$$

گوه سوم:

برای محاسبه تنش قائم روی گوه سوم، گوه دوم به عنوان یک سیلو روی گوه سوم در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned}\sigma'_{v_3} &= \frac{a \times \gamma_2 - c'_2}{K_0 \times \tan \phi'_2} \left(1 - e^{-K_0 \times \tan \phi'_2 \times \frac{h_{df}}{a}} \right) + (\sigma'_{v_2}) \times \left(e^{-K_0 \times \tan \phi'_2 \times \frac{h_{df}}{a}} \right) \\ &= \frac{0.64 \times 17 - 30}{0.43 \times \tan 35} \left(1 - e^{-0.46 \times \tan 35 \times \frac{4}{0.64}} \right) + 0 \times \left(e^{-0.46 \times \tan 35 \times \frac{4}{0.64}} \right) = -55 \text{ kPa}\end{aligned}$$

هیچ فشاری از گوه دوم بر روی گوه سوم وارد نشده، بنابراین فشار صفر است.

وزن سیلو سوم:

$$G_{S_3} = B \times l_{de} \times \sigma'_{v_3} = 9.14 \times 1.5 \times 0 = 0 \text{ kN}$$

وزن گوه سوم:

$$G_{w_3} = \frac{B \times (l_{de} + l_{bc}) \times h_{bd} \times \gamma_3}{2} = \frac{9.14 \times 1.9 \times 2.8 \times 17}{2} = 413 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی روی گوه سوم:

$$K_3 = \frac{B \times h_{bd} \times c'_3}{\sin \theta_2} = \frac{9.14 \times 2.8 \times 30}{\sin 69} = 822 \text{ kN}$$

برای محاسبه نیروی برشی روی گوه دوم ابتدا تنش متوسط قائم را محاسبه کرده، که برابر است با:

$$\overline{\sigma'_{v_3}} = \sigma'_{v_3} + \frac{1}{3} \times h_{bd} \times \gamma_3 = 0 + \frac{1}{3} \times 2.8 \times 17 = 16 \text{ kPa}$$

$$T_3 = \frac{h_{bd} \times (l_{de} + l_{bc})}{2} \times (c'_3 + K_0 \times \overline{\sigma'_{v_3}} \times \tan \phi'_3) = \frac{2.8 \times 1.9}{2} (30 + (0.5 \times 16 \times \tan 30)) = 92 \text{ kN}$$

گوه چهارم:

برای محاسبه تنش قائم روی گوه چهارم، گوه سوم را به عنوان یک سیلو روی گوه سوم در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned}\sigma'_{v_4} &= \frac{a \times \gamma_3 - c'_3}{K_0 \times \tan \phi'_3} \left(1 - e^{-K_0 \times \tan \phi'_3 \times \frac{h_{bd}}{a}} \right) + (\sigma'_{v_2}) \times \left(e^{-K_0 \times \tan \phi'_3 \times \frac{h_{bd}}{a}} \right) \\ &= \frac{0.2 \times 17 - 30}{0.5 \times \tan 30} \left(1 - e^{-0.5 \times \tan 30 \times \frac{1.5}{0.2}} \right) + 0 \times \left(e^{-0.5 \times \tan 30 \times \frac{1.5}{0.2}} \right) = -82\end{aligned}$$

هیچ فشاری از گوه سوم بر روی گوه چهارم وارد نشده، بنابراین فشار صفر است.

وزن سیلو چهارم:

$$G_{S_4} = B \times l_{bc} \times \sigma'_{v_4} = 9.14 \times 0.4 \times 0 = 0 \text{ kN}$$

وزن گوه چهارم:

$$G_{w_4} = \frac{B \times l_{bc} \times h_{ab} \times \gamma_4}{2} = \frac{9.14 \times 0.4 \times 1.2 \times 17}{2} = 37 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی روی گوه چهارم:

$$K_4 = \frac{B \times h_{ab} \times c'_4}{\sin \theta_4} = \frac{9.14 \times 1.2 \times 30}{\sin 71} = 348 \text{ kN}$$

برای محاسبه نیروی برشی روی گوه چهارم ابتدا تنش متوسط قائم را محاسبه کرده، که برابر است با:

$$\overline{\sigma'_{v_4}} = \sigma'_{v_4} + \frac{1}{3} \times h_{ab} \times \gamma_4 = 0 + \frac{1}{3} \times 1.2 \times 17 = 6.8 \text{ kPa}$$

نیروی چسبندگی روی گوه چهارم:

$$T_4 = \frac{h_{ab} \times l_{bc}}{2} \times (c'_4 \times K_0 \times \overline{\sigma'_{v_4}} \times \tan \phi'_4) = \frac{1.2 \times 0.4}{2} (30 + (0.43 \times 6.8 \times \tan 35)) = 1.2 \text{ kN}$$

$$\zeta_-^{(i)} = \cos \theta^{(i)} \times \tan \phi^{(i)} - \sin \theta^{(i)}$$

$$\zeta_-^1 = \cos 69 \times \tan 32.5 - \sin 69 = -0.71$$

$$\zeta_-^{(i)} = -0.71 - 0.72 - 0.73 - 0.72 = -2.9$$

$$\zeta_+^{(i)} = \sin \theta^{(i)} \times \tan \phi^{(i)} + \cos \theta^{(i)}$$

$$\zeta_+^{(i)} = 0.95 + 0.99 + 0.87 + 0.99 = 3.8$$

$$\frac{\zeta'_+}{\zeta'_-} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\zeta_+^{(i)}}{\zeta_-^{(i)}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{0.95}{-0.71} + \frac{0.99}{-0.72} + \frac{0.87}{-0.73} + \frac{0.99}{-0.72} \right) = -1.3$$

وزن کل سیلوها:

$$G_s = \sum_{i=1}^N G_s^{(i)} = 8042 \text{ kN}$$

وزن کل گوه‌ها:

$$G_w = \sum_{i=1}^N G_w^{(i)} = 7770 \text{ kN}$$

نیروی مؤثر خاک:

$$E = -\frac{\zeta'_-}{\zeta'_+} \left[G_s + G_w + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\zeta_{-}^{(i)}} (2T^{(i)} + K^{(i)}) \right]$$

$$= 0.77 \times \left[12217 + 12694 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{17343}{-0.71} + \frac{1810}{-0.72} + \frac{1006}{-0.73} + \frac{350}{-0.72} \right) \right] = 0$$

بنابراین سینه‌کار پایدار است. نتایج محاسبات در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰ در شکل‌های (۶-۹) و

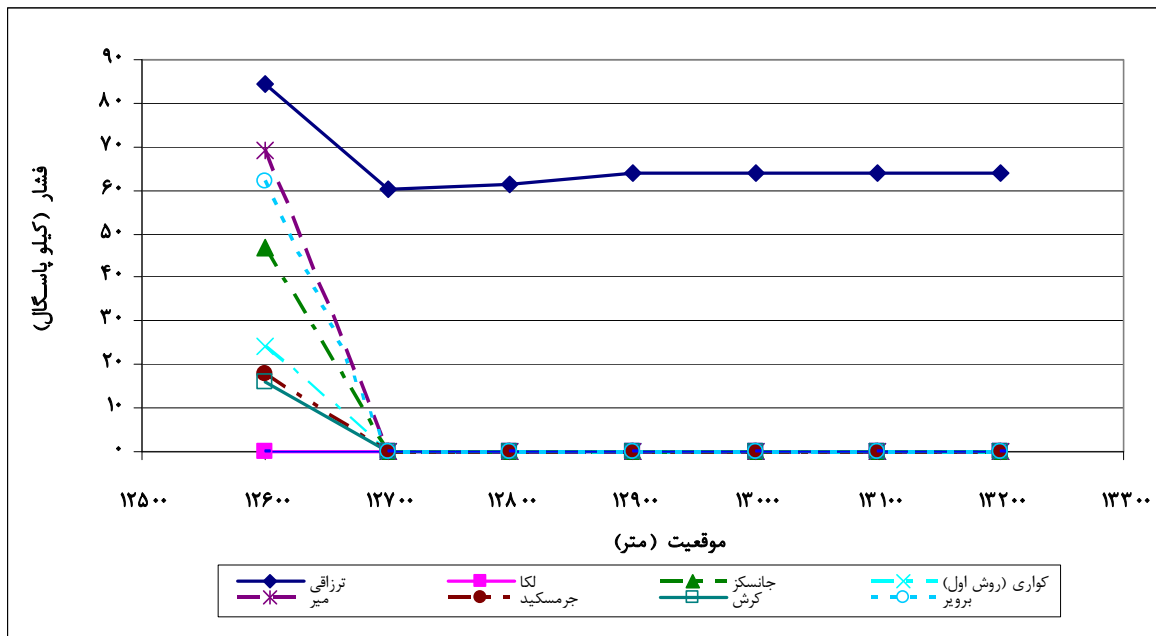
(۶-۱۰) و جدول‌های (۶-۸) و (۶-۹) درج شده است. روش‌های تحلیلی، فشار را برای موقعیت ۱۲+۷۰۰

تا ۱۳+۲۰۰ به دلیل چسبندگی بالای خاک و در نظرگیری طول بارگذاری کم برای $C > D$ صفر یا ناچیز

برآورد می‌کنند.

جدول (۶-۸): کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۳+۲۰۰

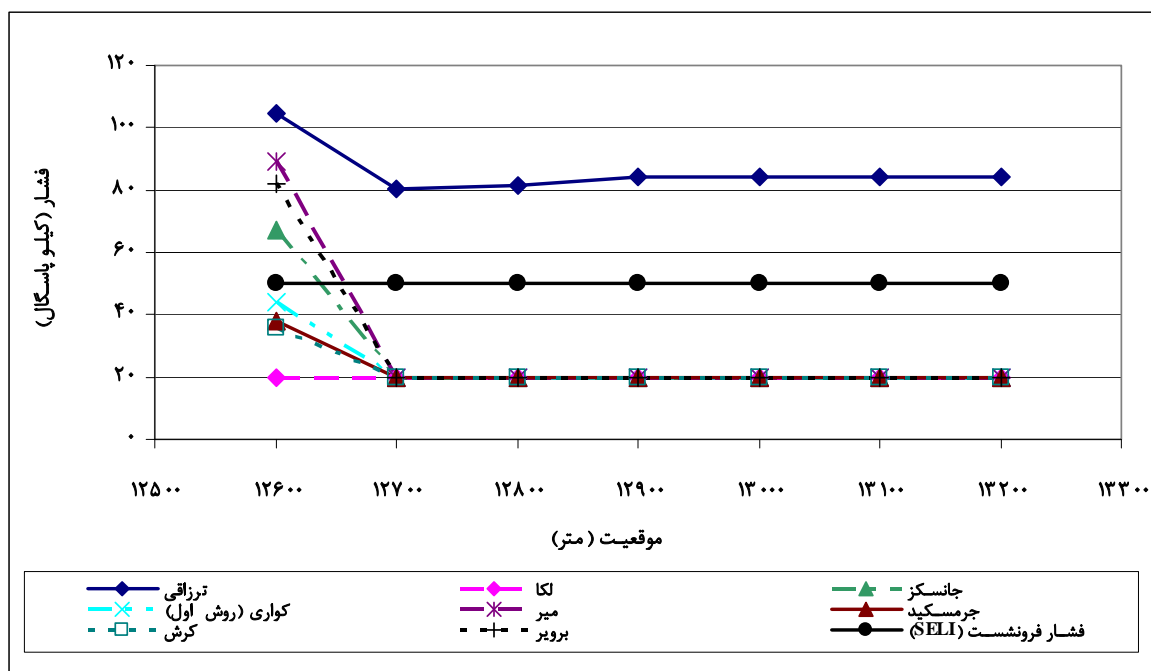
فشار نگهداری سینه‌کار در تاج تونل (کیلوپاسکال)								موقعیت (Km+m)
بزرگ	کوتاه	جرم‌سکید	میر	کواری (روش اول)	جانسکر	لکا	ترزاقی	
۶۲	۱۶	۱۸	۶۹	۲۴	۴۷	۰	۸۵	۱۲+۶۰۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۱	۱۲+۷۰۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۲/۲	۱۲+۸۰۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۴/۹	۱۲+۹۰۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۴/۹	۱۳+۰۰۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۴/۹	۱۳+۱۰۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۴/۹	۱۳+۲۰۰



شکل (۹-۶): مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل به روش‌های تحلیلی و تجربی

جدول (۹-۶): کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل با در نظرگیری ۲۰ کیلوپاسکال به عنوان دامنه تغییرات فشار

فشار نگهداری سینه کار در تاج تونل (کیلوپاسکال)								موقعیت (Km+m)
بروبر	کرش	جرمسکید	میر	کوارى (روش اول)	جانشکر	لکا	ترزاقی	
۸۲	۳۶	۳۸	۸۹	۴۴	۶۷	۲۰	۱۰۵	۱۲+۶۰۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۸۱	۱۲+۷۰۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۸۲	۱۲+۸۰۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۸۵	۱۲+۹۰۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۸۵	۱۳+۰۰۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۸۵	۱۳+۱۰۰
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۸۵	۱۳+۲۰۰



شکل (۶-۱۰): مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل با در نظرگیری ۲۰ کیلو پاسکال به عنوان دامنه تغییرات فشار به روش‌های تحلیلی و تجربی

۴-۶- پهنه‌بندی مسیر حفاری در موقعیت ۲۰+۷۰۰-۲۱+۳۰۰

خاک این پهنه بیشتر از ماسه، سیلت و رس تشکیل شده است، تونل حفاری زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد. فشار سینه‌کار به صورت دوبعدی و سه‌بعدی برای حالت همگن و سه‌بعدی برای حالت غیر همگن محاسبه می‌شود. اطلاعات لایه‌بندی و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک در جدول‌های (۶-۱۰) و (۶-۱۱) درج شده است. بار ترافیکی در مسیر حفاری ۲۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است، اثر بار ساختمان به دلیل فاصله مناسب سازه و عمق بالای تونل صرف نظر شده است. در این پهنه یک میانگین از وزن مخصوص خاک در بالای سطح آب زیرزمینی، و یک میانگین از وزن مخصوص خاک در زیر سطح آب زیرزمینی محاسبه شده است. در تمامی روش‌ها فشار مؤثر خاک محاسبه شده که با افزایش فشار آب، فشار کل بدست می‌آید.

جدول (۶-۱۰): لایه‌بندی خاک در موقعیت ۲۰+۷۰۰-۲۱+۳۰۰

۳۲-۴۰	۲۸-۳۲	۱۹-۲۸	۴-۱۹	۰-۴	(m) ضخامت لایه
II	II,III	III	IV	IV,II	طبقه‌بندی خاک

جدول (۶-۱۱): پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک در موقعیت ۲۰+۷۰۰-۲۱+۳۰۰ برای روش‌های همگن

موقعیت (کیلومتر+متر)	روباره (متر)	ارتفاع آب از سطح تا تاج (متر)	γ_s (kPa)	γ' (kPa)	c' (kPa)	φ' (°)
۲۰+۷۰۰-۲۰+۸۰۰	۳۵	۱۸	۱۹	۱۰	۲۹	۳۵
۲۰+۸۰۰-۲۰+۹۰۰	۳۵	۳۰	۱۹	۱۰	۲۹	۳۵
۲۰+۹۰۰-۲۱+۰۰۰	۳۵	۳۰	۱۹	۱۰	۲۹	۳۵
۲۱+۰۰۰-۲۱+۱۰۰	۳۸	۳۰	۱۹	۱۰	۲۹	۳۵
۲۱+۱۰۰-۲۱+۲۰۰	۳۸	۳۰	۱۹	۱۰	۲۹	۳۵
۲۱+۲۰۰-۲۱+۳۰۰	۳۵	۳۰	۱۹	۱۰	۲۹	۳۵

۶-۴-۱- ترزاقی

طول سست‌شدگی:

$$B_1 = R * [\tan(45 - \varphi/2) + (\cos(45 - \varphi/2))^{-1}] = 4.57 \times [\tan(45 - 14.5) + (\cos(45 - 14.5))^{-1}] = 8 \text{ m}$$

فشار قائم وارده از قسمت خشک به تر:

$$\sigma'_{v_1} = \frac{B_1 \times \gamma_d - c'}{K_0 \times \tan \varphi'} \left(1 - e^{-K_0 \times \tan \varphi \times \frac{H_d}{B_1}} \right) + q_0 \times \left(e^{-K_0 \times \tan \varphi \times \frac{H_d}{B_1}} \right) =$$

$$\frac{8 \times 17 - 35}{(1 - \sin 29) \times \tan 29} \left(1 - e^{-(1 - \sin 29) \times \tan 29 \times \frac{5}{8}} \right) + 20 \times \left(e^{-(1 - \sin 29) \times \tan 29 \times \frac{5}{8}} \right) = 73 \text{ kPa}$$

فشار قائم کل ستون خاکی روی تونل:

$$\sigma'_{v_2} = \frac{B_1 \times \gamma' - c'}{K_0 \times \tan \varphi'} \left(1 - e^{-K_0 \times \tan \varphi \times \frac{H_w}{B_1}} \right) + \sigma'_{v_1} \times \left(e^{-K_0 \times \tan \varphi \times \frac{H_w}{B_1}} \right) =$$

$$\frac{8 \times 10 - 35}{(1 - \sin 29) \times \tan 29} \left(1 - e^{-(1 - \sin 29) \times \tan 29 \times \frac{30}{8}} \right) + 73 \times \left(e^{-(1 - \sin 29) \times \tan 29 \times \frac{30}{8}} \right) = 129 \text{ kPa}$$

ارتفاع سست‌شدگی:

$$H_p = \frac{\sigma_{v_T}}{\gamma'} = \frac{129}{10} = 12.9 \text{ m}$$

حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار در مرکز تونل:

$$\sigma_T = (K_a \times (H_p + R) \times \gamma') + \gamma_w \times H_w = (0.35 \times 17.4 \times 10) + 345.7 = 406.6 \text{ kPa}$$

حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار در تاج تونل:

$$\sigma_T = (K_a \times H_p \times \gamma') + \gamma_w \times H_w = (0.35 \times 12.9 \times 10) + 300 = 345 \text{ kPa}$$

در محاسبات کارگاه بهتر است فشار بین دو حالت فرونشست (فعال) و ساکن باشد. بنابراین فشار ساکن در

این فاصله برابر است با:

ضریب فشار ساکن خاک:

$$K_0 = 1 - \sin \phi = 1 - \sin 29 = 0.52$$

فشار ساکن خاک

$$\sigma_T = (K_0 \times (H_p + R) \times \gamma') + \gamma_w \times H_w = (0.52 \times 17.4 \times 10) + 345.7 = 436 \text{ kPa}$$

فشار ساکن در تاج تونل ۳۶۷ کیلو پاسکال است.

۶-۴-۲- روش لکا و دورمیکس

اثر پارامتر بار سطحی به دلیل $(C/D \geq 0.6)$ صفر است. فشارهای محاسباتی در جدول (۶-۱۵) آمده

است. فشار با فرض حالت زهکشی شده محاسبه شده و فشار آب برای محاسبه فشار کل به آن اضافه

می‌شود.

پارامتر چسبندگی خاک:

$$N_c = (N_s - 1) / \tan \phi = -1 / \tan 29 = -1.8$$

حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل:

$$\sigma_T = \gamma' \times D \times N_\gamma + c \times N_c + \sigma_s \times N_s + \gamma_w \times H_w = 10 \times 9.14 \times 0.09 - 1.8 \times 35 + 300 = 300$$

۶-۴-۳- روش جانسکز و استاینر

طول سست‌شدگی:

$$a = \frac{R}{1 + \tan \theta} = \frac{4.57}{1 + \tan 62.5} = 1.6$$

فشار قسمت خشک:

$$\sigma'_{v_1} = \frac{a \times \gamma_d - c}{K_0 \times \tan \phi} \left[1 - e^{-\frac{h_d \times K_0 \times \tan \phi}{a}} \right] + q_0 \cdot e^{-\frac{h_0 \times K_0 \times \tan \phi}{a}} = \frac{1.6 \times 17 - 35}{(1 - \sin 29) \times \tan 29} \left[1 - e^{-\frac{5 \times (1 - \sin 29) \times \tan 29}{1.6}} \right] + 20 \times e^{-\frac{5 \times (1 - \sin 29) \times \tan 29}{1.6}} = -8.4 \text{ kPa}$$

فشار سیلو بر گوه:

$$\sigma'_{v_2} = \frac{B_1 \times -c'}{K_0 \times \tan \phi'} \left(1 - e^{-K_0 \times \tan \phi' \times \frac{H_w}{B_1}} \right) + \sigma'_{v_1} \times \left(e^{-K_0 \times \tan \phi' \times \frac{H_w}{B_1}} \right) = \frac{1.6 \times 10 - 35}{(1 - \sin 29) \times \tan 29} \left(1 - e^{-(1 - \sin 29) \times \tan 29 \times \frac{30}{1.6}} \right) + 0 \times \left(e^{-(1 - \sin 29) \times \tan 29 \times \frac{30}{1.6}} \right) = 0 \text{ kPa}$$

وزن سیلو:

$$G_s = B \times D \times \cot \theta \times \sigma'_v = 9.14^2 \times \cot 62.5 \times 0 = 0 \text{ kN}$$

وزن گوه:

$$G_w = \frac{B \times D^2 \times \gamma' \times \cot \theta}{2} = \frac{9.14^3 \times 10 \times \cot 62.5}{2} = 1987 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی:

$$K = \frac{B \times D \times c'}{\sin \theta} = \frac{9.14^2 \times 35}{\sin 62.5} = 3296 \text{ kN}$$

نیروی برشی:

$$T = \frac{D^2 \times \cot \theta}{2} (c' + K_{A3} \times \bar{\sigma}'_v \times \tan \varphi) = \frac{9.14^2 \times \cot 62.5}{2} (35 + 0.27 \times 30.5 \times \tan 29)$$
$$= 860 \text{ kN}$$

نیروی خاک:

$$E = - \frac{(\cos \theta \times \tan \varphi - \sin \theta) \times \Sigma(G_s + G_w) + \Sigma(2T + K)}{\sin \theta \times \tan \varphi + \cos \theta} =$$
$$\frac{((\cos 62.5 \times \tan 29 - \sin 62.5) \times \Sigma(0 + 1987)) + \Sigma(1720 + 3296)}{\sin 62.5 \times \tan 29 + \cos 62.5} = 0$$

نیروی خاک در این روش صفر است، با توجه به وجود آب فشار لازم برای نگهداری برابر فشار آب است.

فشار آب در تاج تونل:

$$\sigma_w = h_w \times \gamma_w = 30 \times 10 = 300 \text{ kPa}$$

با اعمال فاکتور ایمنی پیشنهادی جانسکز فشار کل برابر است با:

$$\sigma_w = \eta_w \times h_w \times \gamma_w = 1.05 \times 30 \times 10 = 315 \text{ kPa}$$

با کمی احتیاط با اضافه کردن ۲۰ کیلو پاسکال به عنوان دامنه تغییرات فشار، فشار در تاج تونل کل برابر است با:

$$\sigma_w = \eta_w \times h_w \times \gamma_w + 20 = 1.05 \times 30 \times 10 + 20 = 335 \text{ kPa}$$

فشارهای خاک روش کواری، میر، جرمسکید و کرش نیز صفر است. و فشار کل وارد به تاج تونل مساوی

۳۰۰ کیلو پاسکال است، با افزایش ۲۰ کیلو پاسکال دامنه تغییرات فشار این فشار در تاج ۳۲۰ کیلو

پاسکال می‌رسد.

۴-۴-۶- روش کواری و آنگونستا (روش دوم)

در این روش فشار مؤثر خاک با فرض تعادل هیدرولیکی ($\Delta h = 0$) محاسبه شده و فشار آب برای محاسبه

فشار کل به آن اضافه می‌شود.

فشار مؤثر خاک:

$$s' = F_0 \times \gamma' \times D - F_1 \times c + F_2 \times \gamma' \times \Delta h - F_3 \times c \times \frac{\Delta h}{D} = 0.22 \times 10 \times 9.14 - 2 \times 35 = 0 \text{ kPa}$$

حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه کار در تاج تونل:

$$\sigma_T = s' + \gamma_w \times H_w = 0 + 300 = 300 \text{ kPa}$$

۶-۴-۵- برویر

در موقعیت ۲۰+۸۰۰-۲۰+۹۰۰ خاک از چهار لایه کلی تشکیل شده است، زاویه شکست هر لایه با توجه به شکل (۴-۲۴) بدست آمده است. عرض گوه برابر قطر تونل ۹/۱۴ فرض شده و طول هر گوه با محاسبه طول آخرین گوه بدست می آید. در جدول (۶-۱۲) میانگین پارامترها فیزیکی و مکانیکی خاک برای هر لایه موقعیت ۲۰+۸۰۰-۲۰+۹۰۰ آورده شده و در شکل (۶-۱۱) گوه‌های تشکیل شده در موقعیت ۲۰+۸۰۰ تا ۲۰+۹۰۰ نشان داده شده است.

جدول (۶-۱۲): میانگین پارامترها فیزیکی و مکانیکی خاک برای هر لایه در موقعیت ۲۰+۷۰۰-۲۱+۳۰۰

طبقه بندی خاک	پارامترهای فیزیکی خاک		پارامترهای مکانیکی خاک		زاویه شکست
	γ_t (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (deg)	θ (deg)
IV,II	۱۹	۱۷	۳۵	۳۱	۷۰
IV	۱۹	۱۷	۴۰	۲۷	۶۷
III	۱۹	۱۷	۳۰	۳۰	۶۹
II,III	۱۹	۱۷	۳۰	۳۲/۵	۶۹
II	۱۹	۱۷	۳۵	۳۰	۷۰

طول گوه سوم:

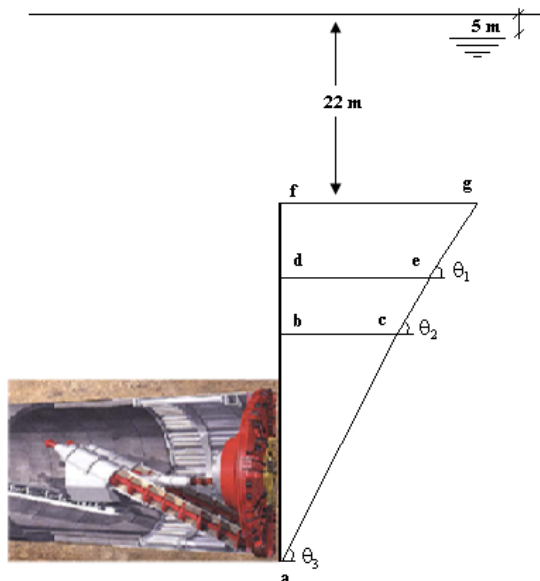
$$l_{bc} = \frac{h_{ab}}{\tan \theta_3} = \frac{12}{\tan 70} = 4.4 \text{ m}$$

طول گوه دوم:

$$l_{de} = \frac{h_{bd}}{\tan \theta_2} + l_{bc} = \frac{4}{\tan 69} + 4.4 = 5.9 \text{ m}$$

طول گوه اول:

$$l_{fg} = \frac{h_{df}}{\tan \theta_1} + l_{de} = \frac{6}{\tan 69} + 5.9 = 8.2 \text{ m}$$



شکل (۶-۱۱): گوه‌های تشکیل شده در موقعیت ۲۰+۸۰۰ تا ۲۰+۹۰۰

تنش قائم روی گوه:

$$\sigma'_{v_1} = ((17 \times 5 + 17 \times 10) + 20) = 275 \text{ kPa}$$

وزن سیلو اول :

$$G_{s_1} = B \times l_{de} \times \sigma'_{v_1} = 9.14 \times 8.2 \times 275 = 20611 \text{ kN}$$

وزن گوه اول برابر است :

$$G_{w_1} = \frac{B \times (l_{de} + l_{fg}) \times h_{df} \times \gamma'_1}{2} = \frac{9.14 \times 14.1 \times 6 \times 10}{2} = 3866 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی روی گوه اول:

$$K_1 = \frac{B \times h_{bd} \times c'_1}{\sin \theta_1} = \frac{9.14 \times 6 \times 30}{\sin 69} = 1764 \text{ kN}$$

برای محاسبه نیروی برشی روی گوه اول ابتدا تنش متوسط قائم را محاسبه کرده، که برابر است با:

$$\overline{\sigma'_{v_1}} = \sigma'_{v_1} + \frac{1}{3} \times h_{bd} \times \gamma'_1 = 275 + \frac{1}{3} \times 6 \times 10 = 295 \text{ kPa}$$

نیرو برشی:

$$T_1 = \frac{h_{bd} \times (l_{de} + l_{bc})}{2} \times (c'_1 + K_0 \times \overline{\sigma'_{v_1}} \times \tan \phi'_1) = \frac{6 \times 14.1}{2} (30 + (0.5 \times 295 \times \tan 30))$$

$$= 4871 \text{ kN}$$

طول سست‌شدگی:

$$a = \frac{A_{\text{silo}}}{U_{\text{silo}}} = \frac{9.14 \times 5.9}{2 \times (9.14 + 5.9)} = 1.8 \text{ m}$$

برای محاسبه تنش قائم روی گوه دوم، گوه اول را به عنوان یک سیلو روی گوه دوم در نظر گرفته و بار گوه اول را روی گوه دوم اعمال می‌شود.

$$\sigma'_{v_2} = \frac{a \times \gamma_1 - c'_1}{K_0 \times \tan \phi'_1} \left(1 - e^{-K_0 \times \tan \phi'_1 \times \frac{h_{df}}{a}} \right) + (\sigma'_{v_1}) \times \left(e^{-K_0 \cdot \tan \phi'_1 \cdot \frac{h_{df}}{a}} \right)$$

$$= \frac{1.8 \times 10 - 30}{0.5 \times \tan 30} \left(1 - e^{-0.5 \times \tan 30 \times \frac{6}{1.8}} \right) + (275) \times \left(e^{-0.5 \times \tan 30 \times \frac{6}{1.8}} \right) = 79 \text{ kPa}$$

وزن سیلو دوم:

$$G_{S_2} = B \times l_{de} \times \sigma'_{v_2} = 9.14 \times 5.9 \times 79 = 4245 \text{ kN}$$

وزن گوه دوم:

$$G_{W_2} = \frac{B * (l_{bc} + l_{de}) \times h_{bd} \times \gamma'_2}{2} = \frac{9.14 \times 10.3 \times 4 \times 10}{2} = 1883 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی گوه دوم:

$$K_2 = \frac{B \times h_{bd} \times c'_2}{\sin \theta_2} = \frac{9.14 \times 4 \times 30}{\sin 69} = 1175 \text{ kN}$$

برای محاسبه نیروی برشی روی گوه دوم ابتدا تنش متوسط قائم را محاسبه کرده، که برابر است با:

$$\overline{\sigma'_{v_2}} = \sigma'_{v_2} + \frac{1}{3} \times h_{bd} \times \gamma_2 = 79 + \frac{1}{3} \times 4 \times 10 = 92 \text{ kPa}$$

نیروی برشی:

$$T_2 = \frac{h_{bd} \times (l_{bc} + l_{de})}{2} \times (c'_2 + K_0 \times \overline{\sigma'_{v_2}} \times \tan \phi'_2)$$

$$= \frac{12 \times (4.4 + 5.9)}{2} (30 + (0.46 \times 92 \times \tan 32.5)) = 3526 \text{ kN}$$

طول سست‌شدگی:

$$a = \frac{A_{\text{silo}}}{U_{\text{silo}}} = \frac{12}{1 + \tan 70} = 1.5 \text{ m}$$

برای محاسبه تنش قائم روی گوه سوم، گوه دوم را به عنوان یک سیلو روی گوه سوم در نظر گرفته و بار گوه دوم را روی گوه سوم اعمال می‌شود.

$$\sigma'_{v_3} = \frac{a \times \gamma_2 - c'_2}{K_0 \times \tan \phi'_2} \left(1 - e^{-K_0 \times \tan \phi'_2 \times \frac{h_{bd}}{a}} \right) + (\sigma'_{v_2}) \times \left(e^{-K_0 \times \tan \phi'_2 \times \frac{h_{bd}}{a}} \right)$$

$$= \frac{1.5 \times 10 - 30}{0.46 \times \tan 32.5} \left(1 - e^{-0.46 \times \tan 32.5 \times \frac{4}{1.5}} \right) + (79) \times \left(e^{-0.46 \times \tan 32.5 \times \frac{4}{1.5}} \right) = 8.7 \text{ kPa}$$

وزن سیلو سوم:

$$G_{S_3} = B \times l_{bc} \times \sigma'_{v_3} = 9.14 \times 4.4 \times 8.7 = 350 \text{ kN}$$

وزن گوه سوم:

$$G_{W_3} = \frac{B \times l_{bc} \times h_{ab} \times \gamma'_3}{2} = \frac{9.14 \times 4.4 \times 12 \times 10}{2} = 2413 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی گوه سوم:

$$K_3 = \frac{B \times h_{ab} \times c'_3}{\sin \theta_3} = \frac{9.14 \times 12 \times 35}{\sin 70} = 4085 \text{ kN}$$

برای محاسبه نیروی برشی روی گوه سوم ابتدا تنش متوسط قائم را محاسبه کرده، که برابر است با:

$$\overline{\sigma'_{v_3}} = \sigma'_{v_3} + \frac{1}{3} \times h_{ab} \times \gamma_3 = 8.7 + \frac{1}{3} \times 12 \times 10 = 49 \text{ kPa}$$

نیروی برشی:

$$T_3 = \frac{h_{ab} \times l_{bc}}{2} \times (c'_3 + K_0 \times \overline{\sigma'_{v_3}} \times \tan \phi'_3) = \frac{12 \times 4.4}{2} (35 + (0.5 \times 49 \times \tan 30)) = 1297 \text{ kN}$$

$$\zeta_-^{(i)} = \cos \theta^{(i)} \times \tan \phi^{(i)} - \sin \theta^{(i)}$$

$$\zeta_-^1 = \cos 69 \times \tan 32.5 - \sin 69 = -0.7$$

$$\zeta_+^{(i)} = \sin \theta^{(i)} \times \tan \varphi^{(i)} + \cos \theta^{(i)}$$

$$\zeta_+^1 = \sin 69 \times \tan 32.5 + \cos 69 = 0.95$$

$$\frac{\zeta'_+}{\zeta'_-} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\zeta_+^{(i)}}{\zeta_-^{(i)}} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{0.93}{-0.7} + \frac{0.93}{-0.7} + \frac{0.88}{-0.74} \right) = -1.3$$

وزن کل سیلو:

$$G_s = \sum_{i=1}^N G_s^{(i)} = 25206 \text{ kN}$$

وزن کل گوه:

$$G_w = \sum_{i=1}^N G_w^{(i)} = 8162 \text{ kN}$$

نیروی مؤثر خاک:

$$E = -\frac{\zeta'_-}{\zeta'_+} \left[G_s + G_w + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} (2T^{(i)} + K^{(i)}) \right] = 0.79 \times \left[25206 + 8162 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{11518}{-0.7} + \frac{8227}{-0.7} + \frac{6679}{-0.74} \right) \right]$$

$$= 0 \text{ kN}$$

نیروی مؤثر خاک با توجه به خصوصیات مکانیکی خاک صفر است و تنها بایستی فشار کل آب را محاسبه کرد.

فشار آب در تاج تونل:

$$w = \gamma_w \times H_w = 30 \times 10 = 300 \text{ kPa}$$

با اعمال فاکتور ایمنی پیشنهادی بروی فشار کل برابر است با:

$$\sigma_T = 0 + \eta_w \times W = 0 + 1.05 \times 300 = 315 \text{ kPa}$$

با کمی احتیاط با اضافه کردن ۲۰ کیلو پاسکال به عنوان دامنه تغییرات فشار، فشار در تاج تونل کل برابر است با:

$$\sigma_T = 0 + \eta_w \times W + 20 = 0 + 1.05 \times 300 = 335 \text{ kPa}$$

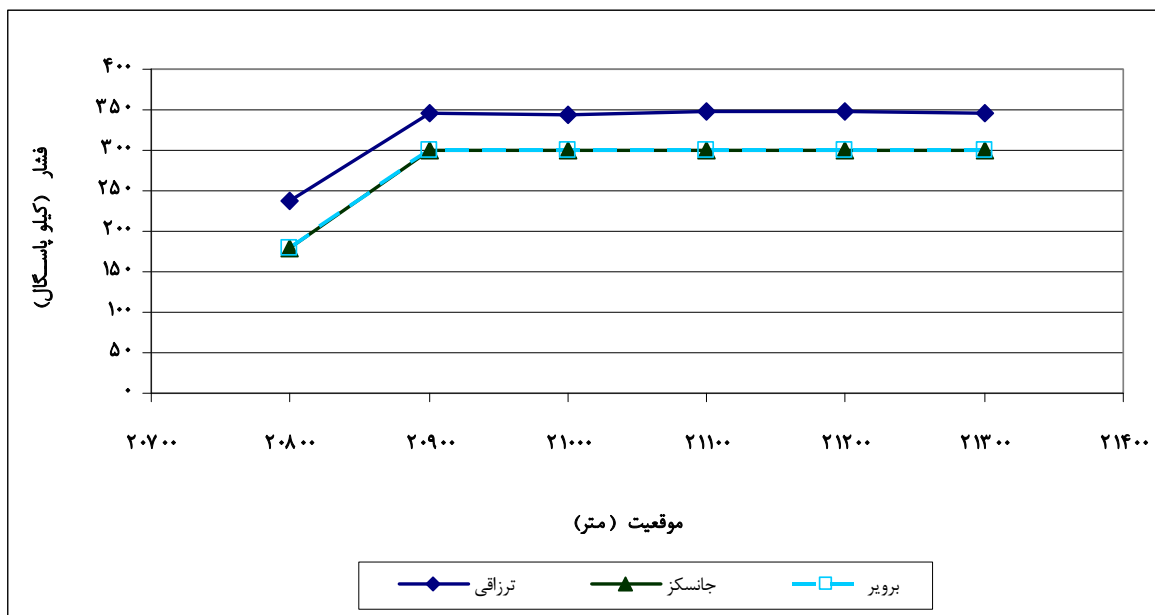
نتایج فشارهای محاسباتی به روش تحلیلی و تجربی در جدول‌های (۱۳-۶) و (۱۴-۶) و شکل‌های (۱۲-۶) و (۱۳-۶) درج شده است. به دلیل یکسان بودن فشارهای تحلیلی در بعضی مناطق فقط یک روش در نمودارهای (۱۲-۶) و پیوست درج شده است.

جدول (۱۳-۶): کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل در موقعیت ۲۰+۷۰۰ - ۲۱+۳۰۰

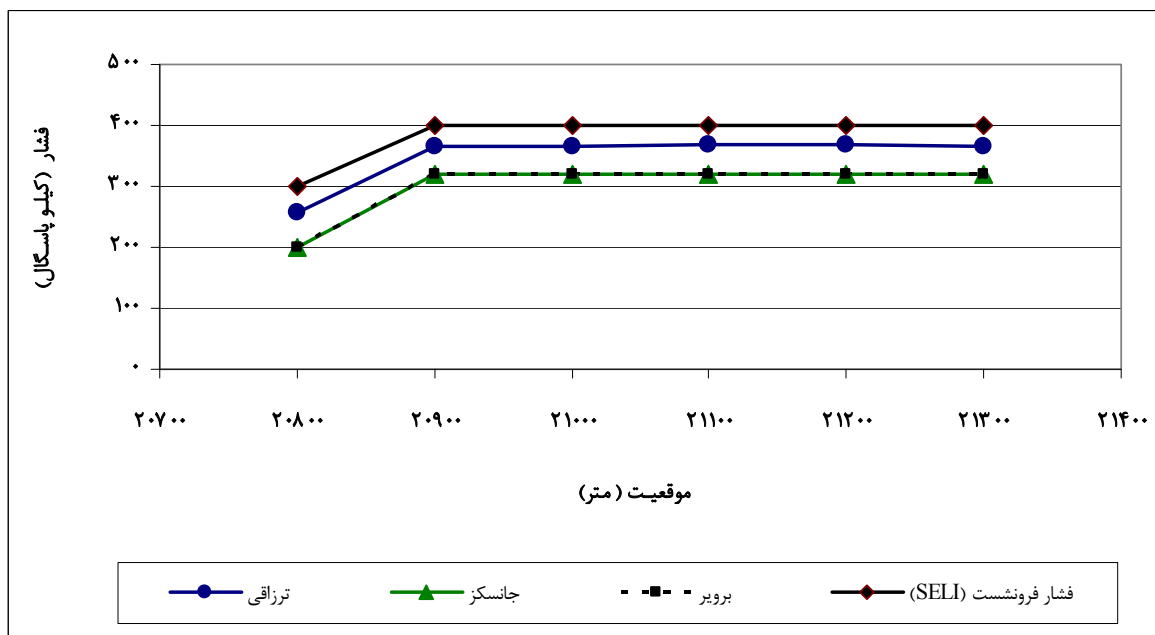
موقعیت (Km+m)	فشار نگهداری سینه‌کار در تاج تونل (کیلوپاسکال)								
	ترازی	لکا	پانسکر	کوری (روش اول)	میز	پوسکید	کرنش	برویر	کوری (روش دوم)
۲۰+۸۰۰	۲۳۶	۱۸۰	۱۸۹	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۹	۱۸۰
۲۰+۹۰۰	۳۴۵	۳۰۰	۳۱۵	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۱۵	۳۰۰
۲۱+۰۰۰	۳۴۵	۳۰۰	۳۱۵	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۱۵	۳۰۰
۲۱+۱۰۰	۳۴۸	۳۰۰	۳۱۵	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۱۵	۳۰۰
۲۱+۲۰۰	۳۴۸	۳۰۰	۳۱۵	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۱۵	۳۰۰
۲۱+۳۰۰	۳۴۵	۳۰۰	۳۱۵	۳۱۵	۳۱۵	۳۱۵	۳۱۵	۳۱۵	۳۱۵

جدول (۱۴-۶): کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل با دامنه تغییرات فشار در موقعیت ۲۰+۷۰۰ - ۲۱+۳۰۰

موقعیت (Km+m)	فشار نگهداری سینه‌کار در تاج تونل (کیلوپاسکال)								
	ترازی	لکا	پانسکر	کوری (روش اول)	میز	پوسکید	کرنش	برویر	کوری (روش دوم)
۲۰+۸۰۰	۲۵۶	۲۰۰	۲۰۹	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۹	۲۰۰
۲۰+۹۰۰	۳۶۵	۳۲۰	۳۳۵	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۳۵	۳۲۰
۲۱+۰۰۰	۳۶۵	۳۲۰	۳۳۵	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۳۵	۳۲۰
۲۱+۱۰۰	۳۶۸	۳۲۰	۳۳۵	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۳۵	۳۲۰
۲۱+۲۰۰	۳۶۸	۳۲۰	۳۳۵	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۳۵	۳۲۰
۲۱+۳۰۰	۳۶۵	۳۲۰	۳۳۵	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۳۵	۳۲۰

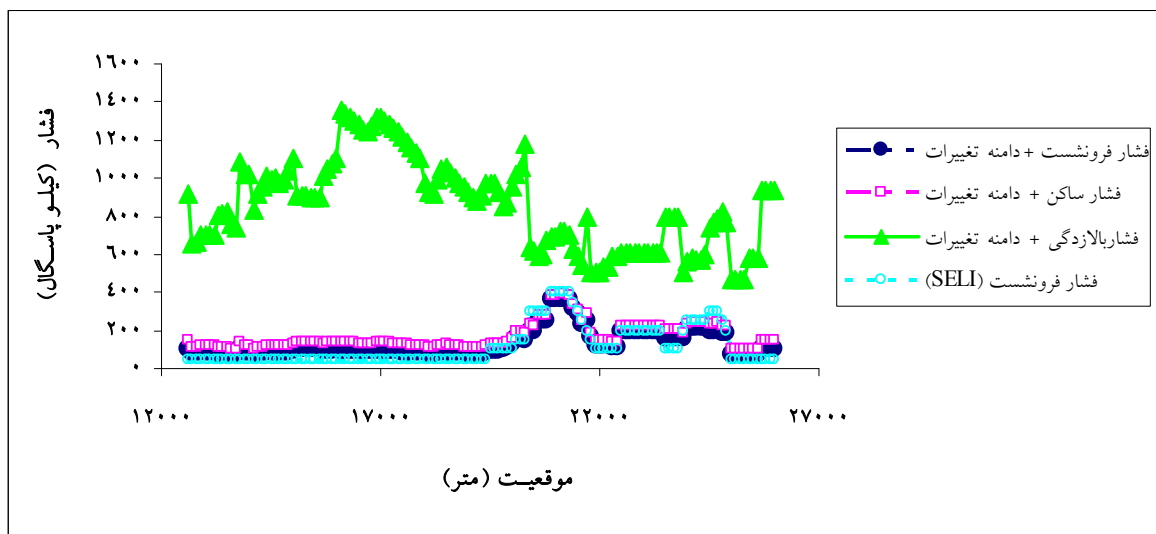


شکل (۶-۱۲): کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل به روش‌های تحلیلی و تجربی



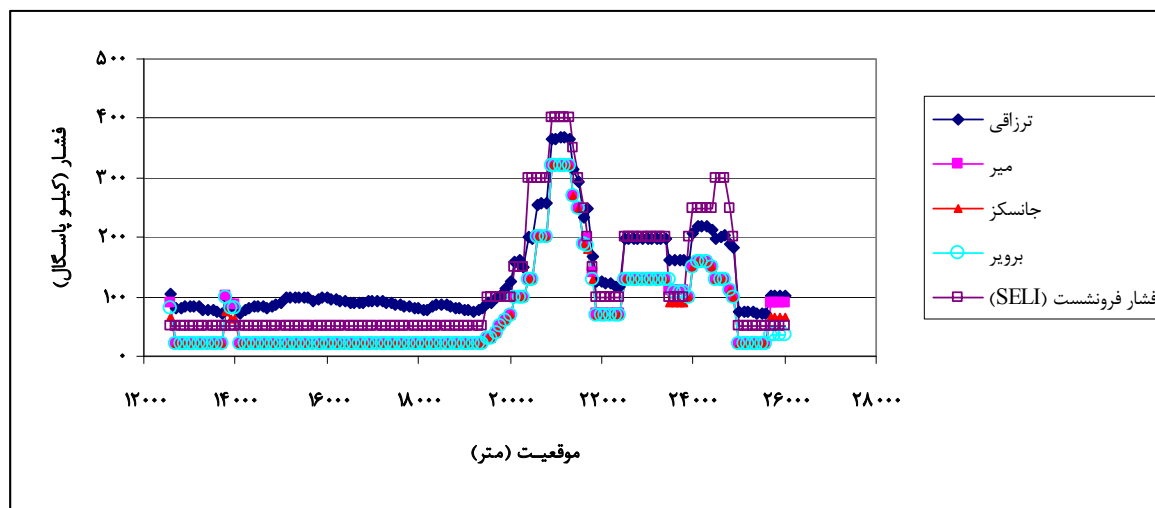
شکل (۶-۱۳): مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل با در نظرگیری ۲۰ کیلو پاسکال به عنوان دامنه تغییرات فشار به روش‌های تحلیلی و تجربی

پهنه‌بندی سایر مسیرهای حفاری از لحاظ فشار سینه‌کار در پیوست آمده است. شکل (۶-۱۴) مقایسه فشارهای فرونشست، ساکن و بالازدگی در موقعیت ۱۲۵۰۰ تا ۲۶۰۰۰ را نشان می‌دهد. فشار لازم بر نگهداری سینه‌کار بهتر است بین فشار فرونشست و فشار ساکن باشد. فشارهای فرونشست و ساکن طبق روش ترزاقی به ترتیب حدود ۸۰ کیلو پاسکال و ۱۰۰ کیلو پاسکال در مناطق خشک است. فشارهای فرونشست و ساکن در مناطق آبدار با وضعیت ژئوتکنیکی و هیدرولوژی نامناسب به ترتیب ۳۷۰ کیلو پاسکال و ۴۰۰ کیلو پاسکال است. بیشترین فشار بالازدگی ۱۴۰۰ کیلو پاسکال در مناطق خشک و ۱۲۰۰ کیلو پاسکال در پهنه آبدار برآورد شده است. البته فشار بالازدگی بیشتر در نواحی کم عمق رخ داده و معمولاً از بررسی آن در عمق‌های زیاد صرف نظر می‌شود.



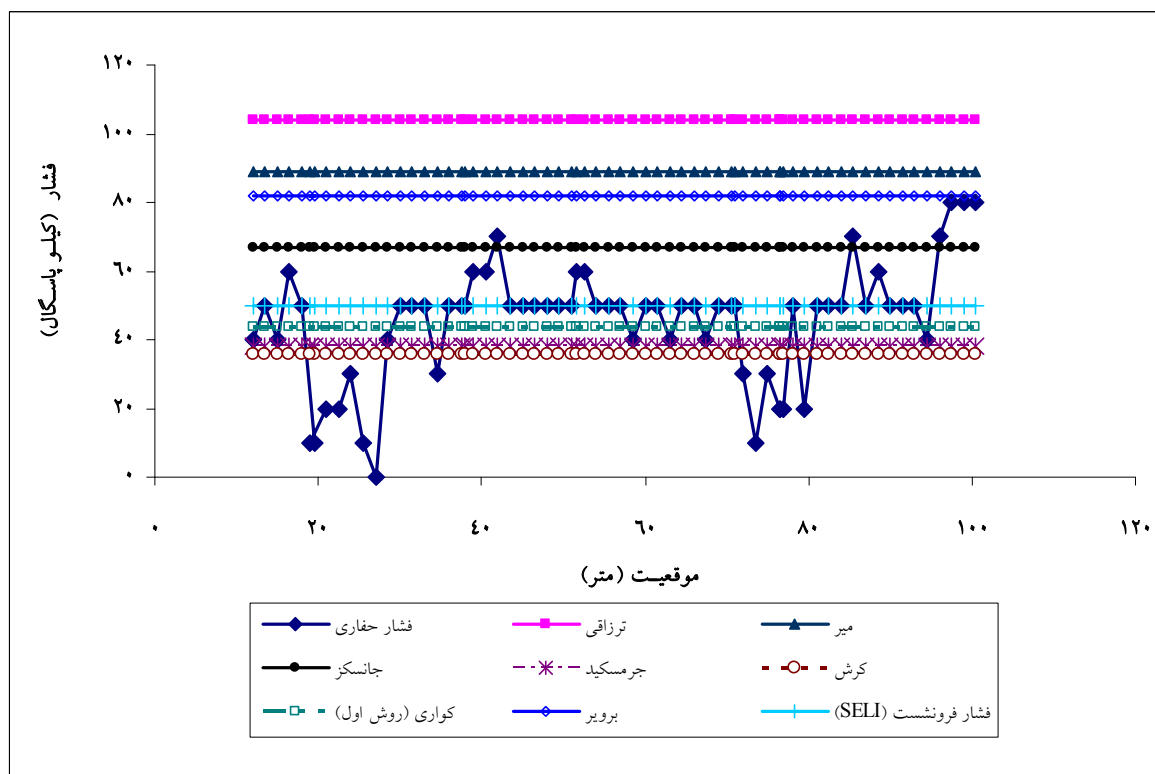
شکل (۶-۱۴): مقایسه فشارهای فرونشست، ساکن و بالازدگی و در موقعیت ۱۲۵۰۰-۲۶۰۰۰

در شکل (۶-۱۵) مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل به روش‌های تحلیلی و تجربی در موقعیت ۱۲۵۰۰-۲۶۰۰۰ با شرکت SELI ایتالیا را در نظر گرفتن دامنه تغییرات نشان می‌دهد.



شکل (۶-۱۵): مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۱۲۵۰۰-۲۶۰۰۰ با شرکت SELI ایتالیا با در نظر گرفتن دامنه تغییرات فشار

فشار در مناطق خشک با عمق کم ($C < 2D$) بین ۳۶ تا ۸۰ کیلو پاسکال و با عمق متوسط ($C > 2D$) ۲۰ تا ۱۰۰ کیلو پاسکال با روش‌های دو بعدی و سه بعدی برآورد شده که این فشار در تمام مناطق خشک به میزان ۵۰ کیلو پاسکال توسط شرکت SELI برآورد شده است. فشار در مناطق آبدار با وضعیت ژئوتکنیکی و هیدرولوژی نامناسب ۳۲۰ تا ۳۷۰ کیلو پاسکال با روش‌های دو بعدی و سه بعدی برآورد شده که این فشار توسط شرکت SELI به میزان ۴۰۰ کیلو پاسکال برآورد شده است. در شکل (۶-۱۶) مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل به روش‌های تحلیلی و تجربی و فشار محاسباتی شرکت SELI، را با فشار حفاری ماشین در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۲+۶۰۰ نشان می‌دهد. فشار محاسباتی در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۲+۶۰۰ بین ۱۶ تا ۸۴ کیلو پاسکال است. نتایج مقایسه فشارهای محاسباتی با فشار حفاری ماشین EPB در موقعیت ۱۲+۵۰۰ تا ۱۲+۶۰۰ با در نظرگیری ۲۰ کیلو پاسکال به عنوان دامنه تغییرات فشار در جدول (۶-۱۵) درج شده است.



شکل (۶-۱۶): مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل به روش‌های تحلیلی و تجربی با فشار حفاری در خط هفت متروی تهران

جدول (۶-۱۵): مقایسه فشار حفاری با فشار محاسباتی در خط هفت متروی تهران در موقعیت ۱۲+۶۰۰-۱۲+۵۰۰

فشار نگهداری سینه کار در تاج تونل (کیلوپاسکال)									موقعیت (Km+m)	
SELI	فشار حفاری	برویر	کرش	جرمسکید	میر	کوارای (روش اول)	جانسکز	لکا		
۵۰	۲۰-۶۰	۸۲	۳۶	۳۸	۸۹	۴۴	۶۷	۲۰	۱۰۴	۱۲+۶۰۰

مقایسه فشار محاسباتی با فشار حفاری در شکل (۶-۱۶) نشان می‌دهد که روش برویر، میر و ترزاقی فشار ایمن‌تری برآورد می‌کنند. ولی فشار حفاری بیشتر بین دو روش جانسکز و کوارای قرار دارد که با کمی احتیاط می‌توان روش جانسکز را به عنوان یک روش مناسب انتخاب کرد.

نتیجه‌گیری

با توجه به شرایط ژئوتکنیکی، هیدرولوژی و هندسی مسیر احداث تونل (نسبت روباره به قطر تونل)، خط هفت متروی تهران به چهار منطقه از لحاظ فشار سینه‌کار تقسیم‌بندی می‌شود.

۱- مناطقی که $C < 2D$ و تونل بالاتر از تراز آب زیرزمینی است: در بین روش‌های سه بعدی مورد استفاده در این مناطق روش میر به دلیل در نظرگیری ضریب فشار سه بعدی صفر برای گوه با توجه به چسبندگی خاک، فشار بیشتر و در نتیجه ایمن‌تری را برآورد می‌کند. به طور کلی در بین روش‌های سه بعدی، روش میر، جانسکز و برویر فشار ایمن‌تری برآورد می‌کنند. در صورت همگن بودن محیط خاکی نتایج روش برویر با روش کرش به دلیل در نظرگرفتن ضریب فشار سه بعدی یکسان، مساوی است. نتایج سیلو و گوه سه بعدی با روش دو بعدی ترزاقی به دلیل در نظرگیری طول سست‌شدگی یکسان ($a = \infty$) و اعمال تمام فشار خاک روی تونل، به هم نزدیک است. مقایسه فشار برآورد شده به وسیله روش‌های تحلیلی و تجربی در موقعیت $12+500$ تا $12+600$ با فشار حفاری ماشین EPB، نشان می‌دهد که فشار محاسباتی جانسکز - استاینر فشار مناسبی است. علت افزایش فشار، توقف در حفاری و شرایط ژئوتکنیکی نامناسب (چسبندگی پایین خاک، وجود بولدر و رس در مسیر حفاری) در آن محدوده می‌باشد.

۲- مناطقی که $C < 2D$ و تونل پایین‌تر از تراز آب زیرزمینی است: در این مناطق علاوه بر کم بودن روباره وجود آب باعث افزایش فرونشست یا بالازدگی در مسیر حفاری می‌شود. بنابراین در این مناطق بهتر است از روش ترزاقی به دلیل برآورد فشار ایمن‌تر استفاده شود. به طور کلی امکان بالازدگی برای روباره‌های کوچکتر از قطر تونل ($C < D$) در مناطق خشک و در مناطق آبدار برای ($D < C < 2D$) بیشتر است. بنابراین در این مناطق بهتر است حداکثر فشار وارده از ماشین برابر تنش قائم باشد.

۳- مناطقی که $C > 2D$ و تونل بالاتر از تراز آب زیرزمینی است: در این مناطق فشار برآورد شده به روش سه بعدی صفر است. بنابراین در این مناطق به دلیل پایداری مناسب سینه‌کار، تونل پایدار است. به علت

وجود سازه‌ها در مسیر حفاری و توقف در ماشین حفاری به دلیل مشکلات فنی بهتر است، ۶۰ تا ۸۰ کیلو پاسکال فشار به سینه‌کار اعمال شود. طبق بررسی‌های ترزاقی برای تمامی عمق‌هایی که $(C > 2D)$ و نسبت چسبندگی به وزن مخصوص خاک بزرگتر یا مساوی طول سست‌شدگی باشد، فشار قائم روی تونل صفر است. طول سست‌شدگی در خط هفت متروی تهران برای روش‌های سه بعدی سیلو و گوه با توجه به زاویه اصطکاک و زاویه شکست گوه مطابق جدول (۶-۱۶) است.

جدول (۶-۱۶): طول سست‌شدگی برای روش‌های سه بعدی سیلو و گوه در خط هفت متروی تهران

زاویه اصطکاک خاک	زاویه شکست گوه	طول سست‌شدگی	c'/γ_d	c'/γ'
۲۷	۶۵	۱/۴۵	۴	۲/۳۵
۳۰	۶۶	۱/۴	۳	۱/۷۶
۳۵	۶۸	۱/۳	۳	۱/۷۶
۳۸	۷۰	۱/۲	۲	۱/۱۷

۴- مناطقی که $C > 2D$ و تونل پایین‌تر از تراز آب زیرزمینی است: فشار خاک برای روش‌های سه بعدی صفر است و تنها فشار آب به عنوان فشار نگهداری برآورد می‌شود. در بین روش‌های سه بعدی، روش جانسکز و برویر فاکتور ایمنی آب را به میزان ۱/۰۵ در نظر می‌گیرند و در نتیجه این روش‌ها فشار بیشتری برآورد می‌کنند. بارهای ترافیکی ناشی از حرکت ماشین‌ها، بار پیاده رو و پل عابر پیاده ناچیز است. بارهای سازه‌های بزرگ مثل ساختمان و پل بتنی نزدیک به مسیر حفاری را می‌توان در نظر گرفت. طبق بررسی محقق در جدول (۶-۶) از تأثیر سازه‌ها در $C > 2D$ برای حالتی که فاصله شالوده سازه از مرکز تونل بیشتر از ۳۰ متر باشد، می‌توان صرف نظر کرد.

فصل هفتم

برآورد فشار خاک با کاربرد روش عددی

۷-۱- مقدمه

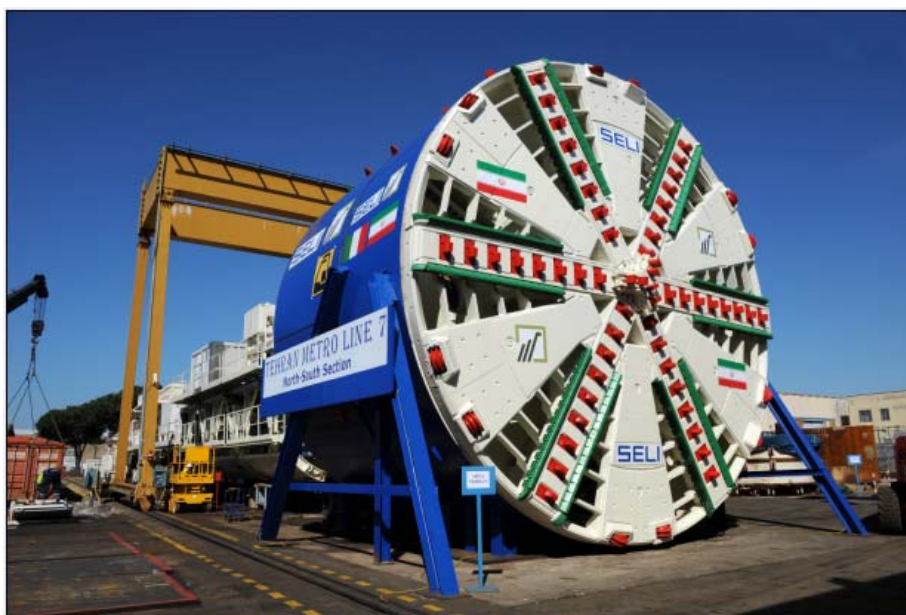
روش المان محدود برای تحلیل سازه‌ها در محیط‌های پیوسته قابلیت کاربرد دارند. در این روش محیط پیوسته به صورت مجموعه‌ای مرکب از تقسیمات کوچکتر بنام المان (اجزاء) نمایش داده می‌شود. هر المان توسط گره‌های اطراف خود تعریف می‌شود که ارتباط المان‌های مجاور از طریق گره‌های مشترک می‌باشد. نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL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

۷-۲- اطلاعات ورودی

آنالیز المان محدود به وسیله نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL شامل رسم هندسه، شرایط مرزی و خصوصیات مواد، مش‌بندی، اعمال شرایط اولیه شامل اعمال فشار آب (در صورت وجود) و فشار موثر اولیه می‌باشد.

۷-۲-۱- هندسه

خط هفت متروی تهران (قطعه شمالی - جنوبی) به وسیله ماشین حفاری EPB به طول ۱۰/۵ متر، قطر ۹/۱۴ متر و طول کلی ۹۰ متر مطابق شکل (۷-۱) حفاری می‌شود. در موقعیت ۲۰+۸۰۰-۲۰+۹۰۰ تونل زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد. هندسه مدل برای این پهنه با طول ۵۰ و عرض ۵۰ متر و امتداد ۶۰ در جهت محور Z در نظر گرفته شده است. این پهنه شامل پنج لایه خاک است که در مدل ساخته شده، لایه اول به ارتفاع ۴ متر، لایه دوم به ارتفاع ۱۵ متر، لایه سوم به ارتفاع ۹ متر، لایه چهارم به ارتفاع ۴ متر و لایه پنجم به ارتفاع ۱۸ متر است.



شکل (۱-۷): ماشین حفاری فشار تعادلی زمین قطعه شمالی - جنوبی خط هفت متروی تهران

۲-۲-۷- شرایط مرزی

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

۳-۲-۷- خصوصیات مواد

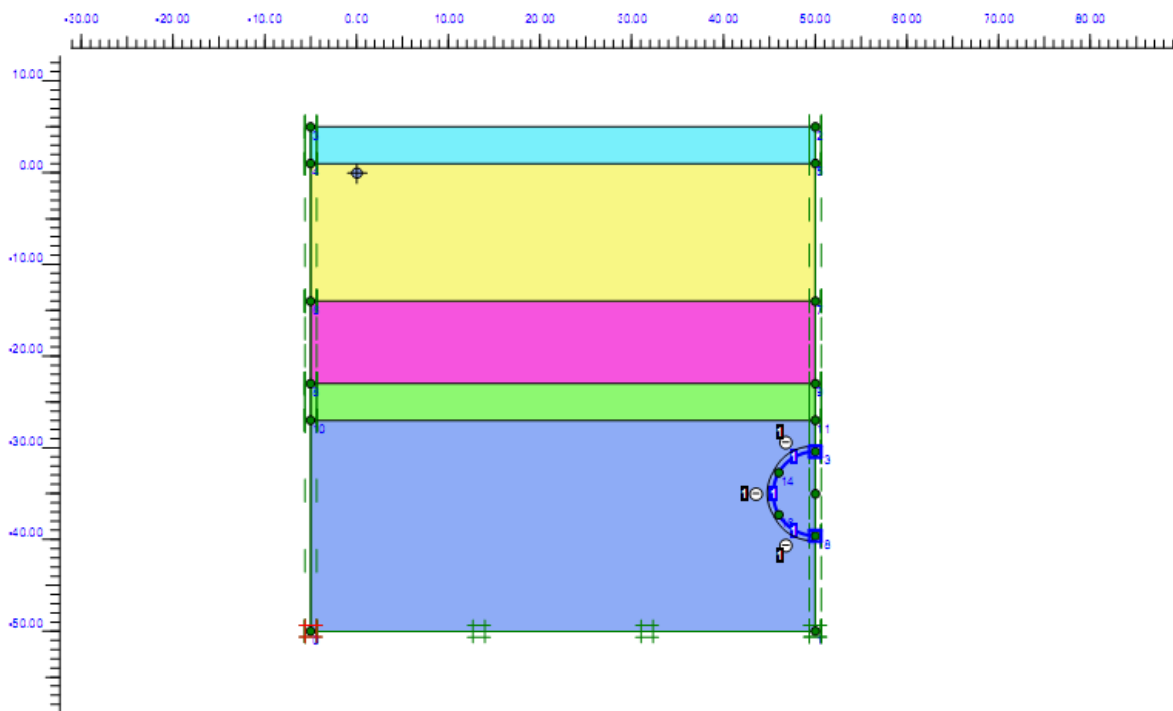
خصوصیات مواد شامل گروه‌های خاک، ماشین حفاری است. پارامترهای طراحی خاک در خط هفت متروی تهران در جدول (۱-۷) و خصوصیات ماشین EPB ساخت شرکت Lovat در جدول (۲-۷) آورده شده است. شکل (۲-۷) هندسه مدل در موقعیت ۲۰+۷۰۰ - ۲۱+۳۰۰ را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۷): پارامترهای طراحی خاک در خط هفت متروی تهران (زمین فن آوران، ۱۳۸۶)

ضریب پواسون	مدول الاستیک	پارامترهای مکانیکی خاک		پارامترهای فیزیکی خاک		طبقه‌بندی خاک
		φ' (deg)	c' (kPa)	γ_d (kN/m ³)	γ_t (kN/m ³)	
ν	E_t (MPa)					
۰/۲۷	۱۰۰	۳۸	۲۰	۱۷	۱۹	شن
۰/۲۷	۸۰	۳۵	۳۰	۱۷	۱۹	ماسه
۰/۳	۵۰	۳۰	۳۰	۱۷	۱۹	سیلت
۰/۳۵	۳۰	۲۷	۴۰	۱۷	۱۹	رس

جدول (۲-۷): خصوصیات ماشین EPB ساخت شرکت Lovat (Toan, 2006)

واحد	مقدار	علائم	پارامترهای ماشین EPB
-	الاستیک	نوع مواد	خصوصیات
MN/m	۱۲۶۰۰	EA	صلبیت محوری
MN m ² /m	۸۵	EI	صلبیت خمشی
m	۰.۲۸۵	d	ضخامت
kN/m/m	۵۰.۷۷	w	وزن
-	۰.۰۰۰	ν	نسبت پواسون



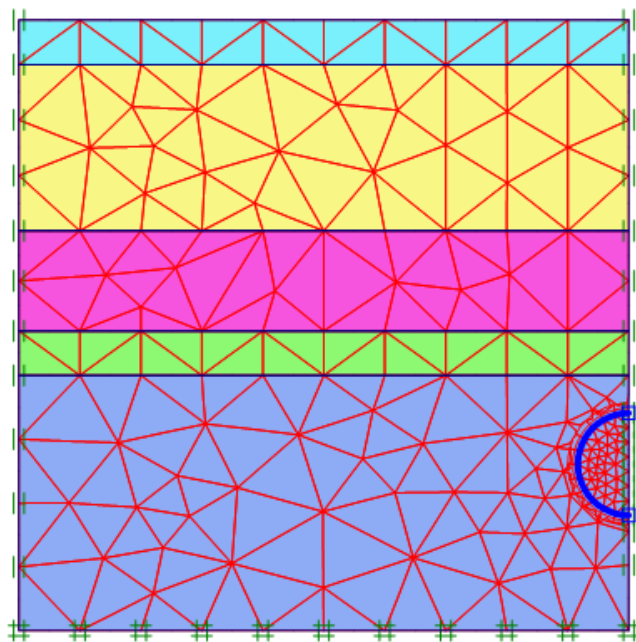
شکل (۲-۷): هندسه مدل در خط هفت متروی تهران در موقعیت ۲۰+۷۰۰ - ۲۱+۳۰۰

از مشخصات ماشین حفاری متروی تورین ایتالیا به خاطر تشابه مشخصاتی با ماشین حفاری خط هفت متروی تهران و عدم تأثیر در میزان فشار محاسباتی در مدل سازی استفاده شده است.

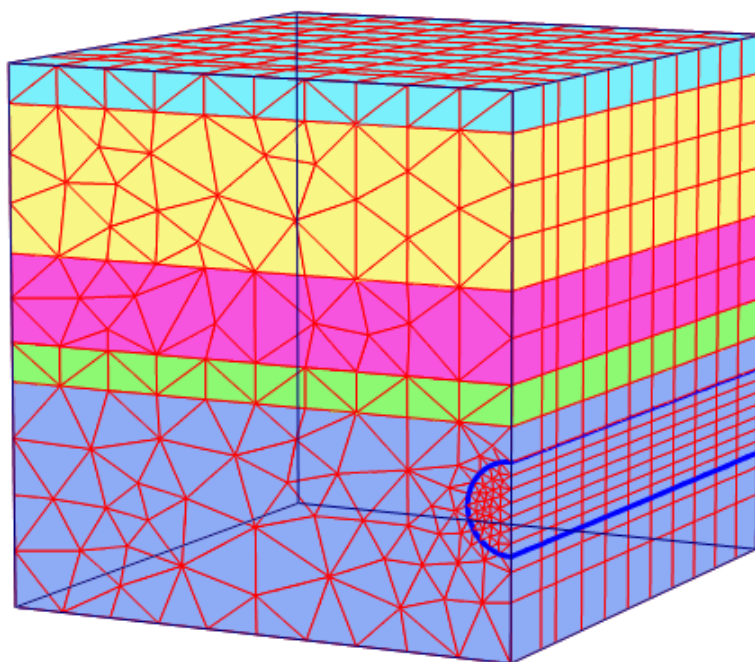
۴-۲-۷- مش بندی

وقتی مدل هندسی به طور کامل رسم و مشخصات مصالح به توده‌ها و اجزای سازه‌ای تخصیص داده شد، هندسه مدل به المان‌های محدود به منظور انجام محاسبات المان محدود، تقسیم می‌شود. نرم افزار ابتدا

مدل هندسی را به صورت دو بعدی به ابعاد 55×55 و سپس به صورت سه بعدی به ابعاد $55 \times 55 \times 60$ مش بندی می کند. نوع اصلی المان در مش، المان مثلثی ۱۵ گرهی است که در شکل (۳-۷) و (۴-۷) نشان داده شده است.



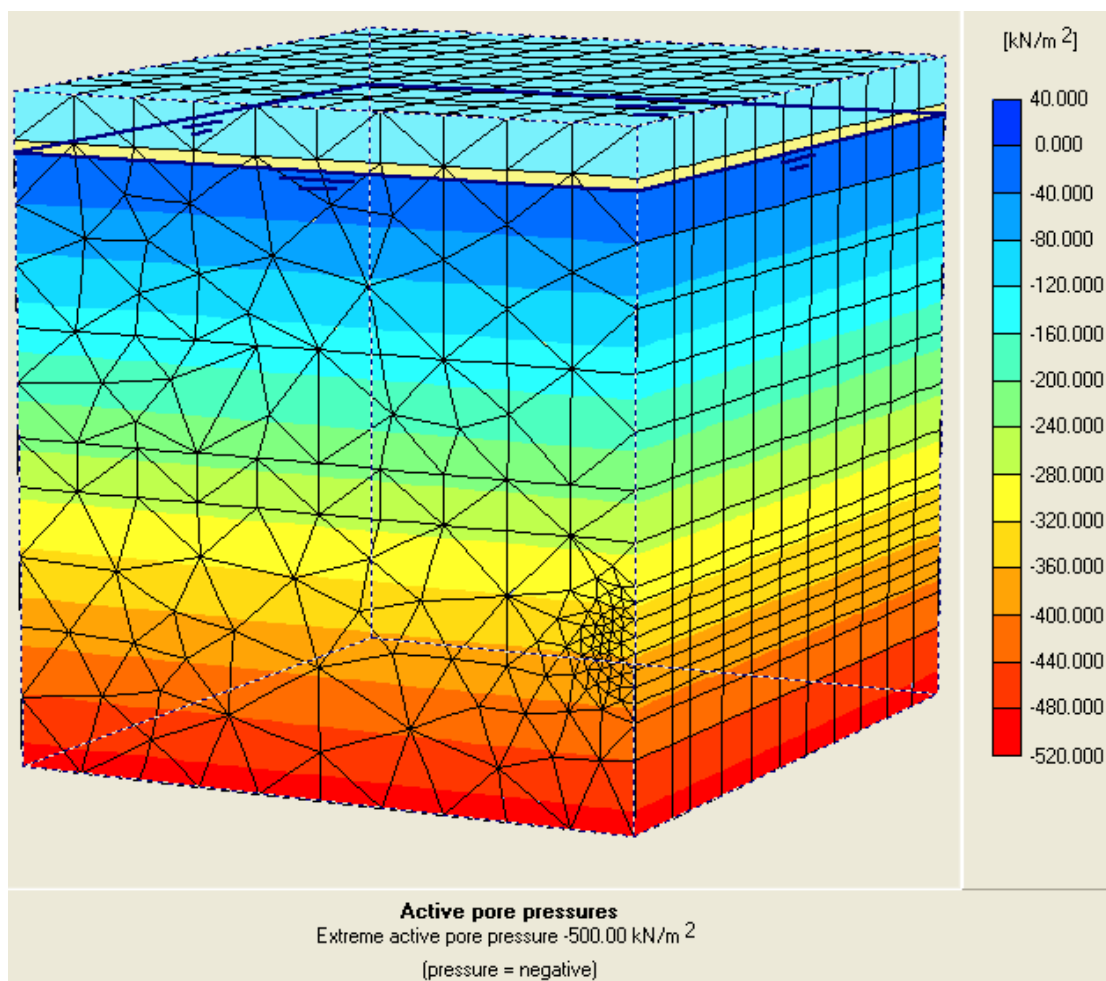
شکل (۳-۷): مش بندی دو بعدی در موقعیت $21+300-20+700$



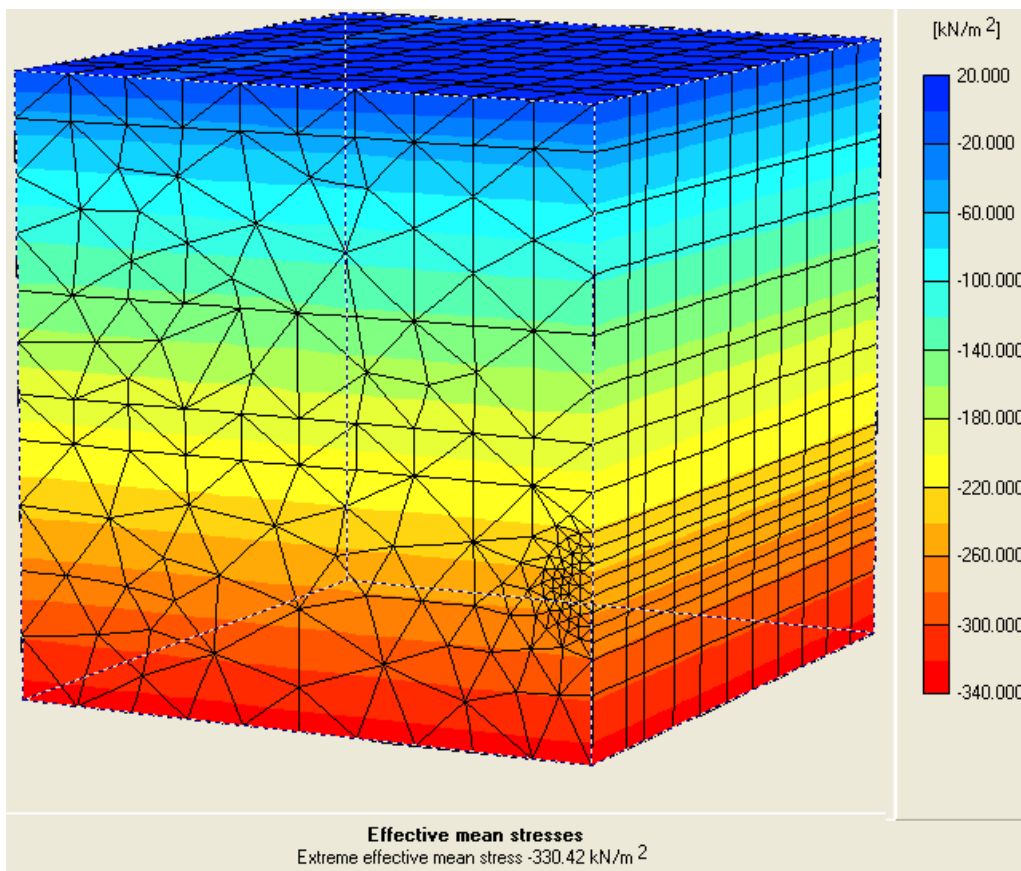
شکل (۴-۷): مش بندی سه بعدی در موقعیت $21+300-20+700$

۷-۲-۵- شرایط اولیه

با رسم هندسه مدل و مش‌بندی، شرایط اولیه شامل فشار آب مبنی بر سطح آب زیرزمینی و تنش مؤثر مبنی بر ضریب فشار جانبی خاک ایجاد می‌گردد. سطح آب زیرزمینی در پهنه مورد مطالعه در عمق ۵ متری از سطح زمین است. شکل (۵-۷) فشار منفذی آب و شکل (۶-۷) تنش مؤثر را در مدل نشان می‌دهد. فشار آب در کف مدل ۵۲۰ کیلو پاسکال در شکل (۵-۷) و تنش مؤثر خاک در کف مدل ۳۴۰ کیلو پاسکال در شکل (۶-۷) با توجه به شرایط آب و خاک توسط نرم افزار محاسبه شده است.



شکل (۵-۷): فشار منفذی آب (اولیه)

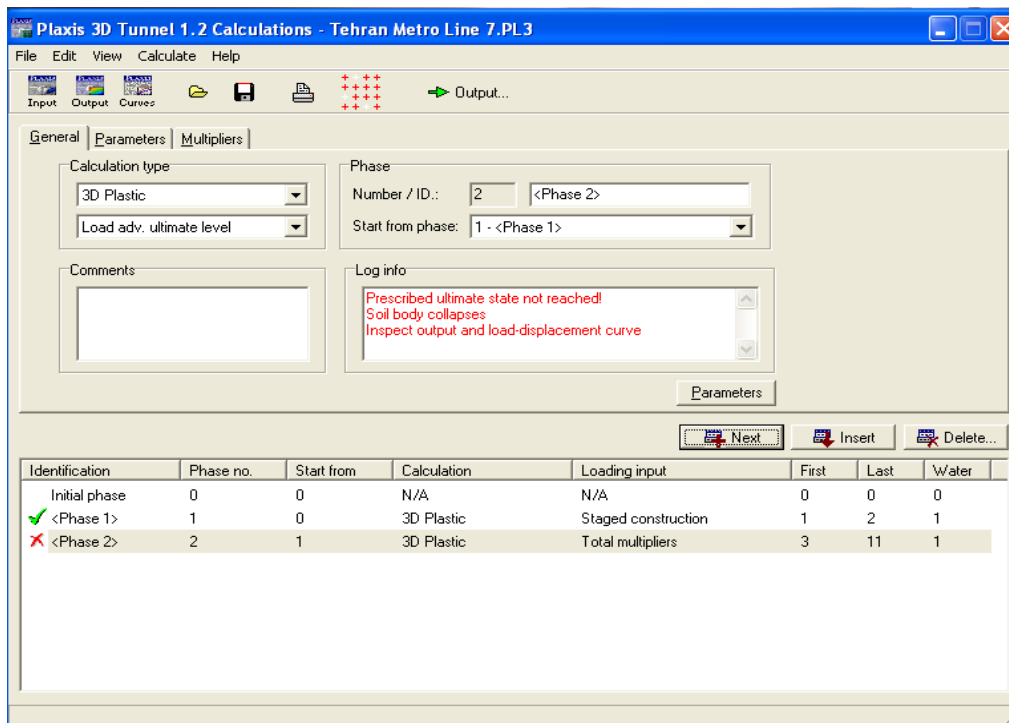


شکل (۶-۷): تنش موثر خاک (اولیه)

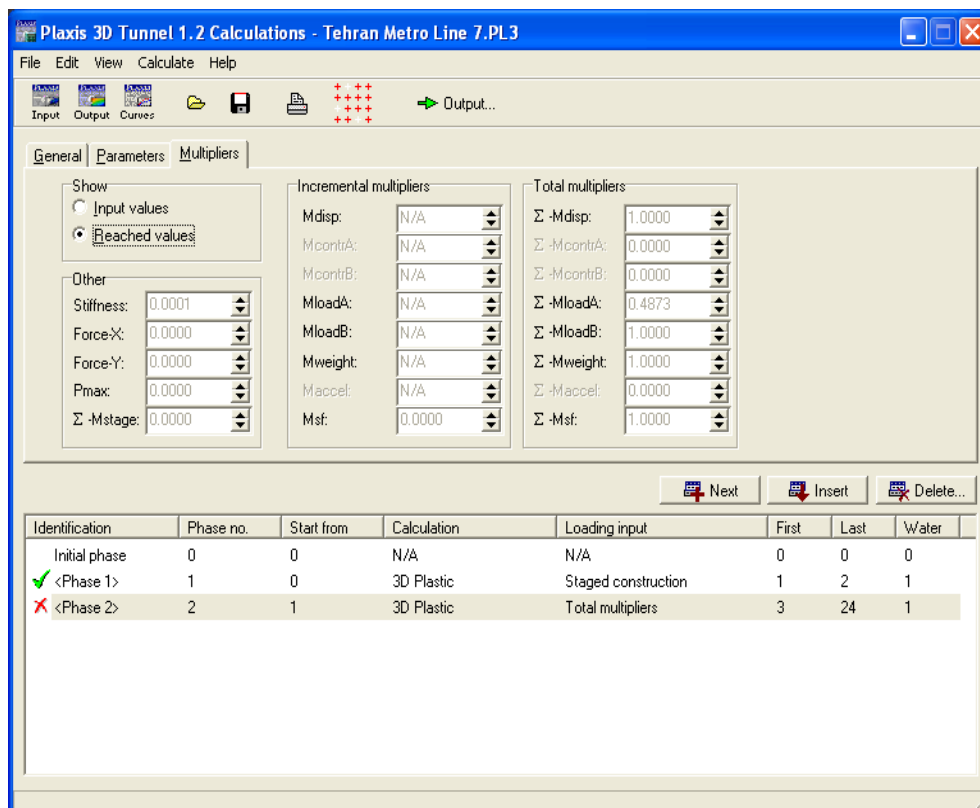
۳-۷- محاسبات

در عملیات مهندسی یک پروژه به چند فاز تقسیم می‌شود. به طور مشابه یک عمل محاسبه در PLAXIS نیز به چند فاز تقسیم می‌شود. در مطالعه موردی در خط هفت متروی تهران روی پایداری سینه‌کار متمرکز شده است. فاز ساختاری اول شامل حفاری خاک و نصب ماشین حفاری است. با استقرار ماشین در قطعه اول اصطکاک و چسبندگی کم می‌شود، بنابراین همان خصوصیات خاک با یک ضریب کاهش مقاومت (۰/۹) در محدوده ماشین به مدل اعمال می‌شود. سینه‌کار به وسیله سیال (بنتونیت یا فوم) با وزن مخصوص ۱۲ کیلو نیوتن بر متر مکعب نگهداری می‌شود. فشار سینه‌کار در تاج تونل ۶۵۵ کیلو پاسگال (عمق ۳۵ متری) با توجه به فرمول $(\gamma \cdot h)$ و در کف تونل ۷۶۳ کیلو پاسگال (عمق ۴۴ متری) با توجه به فرمول $(\gamma \cdot h + \gamma_B \cdot D)$ اعمال شده است و شیب فشار بین تاج و کف تونل در داخل اتاقک

حفاری ۱۲ کیلو پاسکال بر متر است. انقباض ناشی از اضافه حفاری و مخروطی بودن در انتهای ماشین به اندازه ۰/۴۸ درصد در نظر گرفته شده است. برای ایجاد یک تونل خشک فشار منفذی در کلاسترهای درون تونل در قطعه اول غیرفعال می‌شود و حداقل فشار نگهداری را می‌توان با کاهش فشار سینه‌کار تا اندازه‌ای که فرو نشست روی سینه‌کار رخ داده، به دست آورد. با ایجاد فاز دوم که شروع آن از فاز اول محاسباتی است همه بارهای تعریف شده به عنوان بار سیستم A (در این مورد فقط جهت Z نماینده فشار سینه‌کار است) به تدریج به صفر کاهش پیدا می‌کند. قبل از شروع محاسبه نقاط تنش و جابجایی برای تولید منحنی بار-جابجایی یا تنش-کرنش تعیین می‌گردد. اولین فاز محاسباتی با موفقیت به پایان می‌رسد. در فاز محاسباتی دوم فرونشست رخ می‌دهد که در قسمت Log info شکل (۷-۷) نرم افزار پیامی مبنی بر فرونشست سینه‌کار داده شده است. در شکل (۷-۸) $\sum MloadA$ در جعبه Multipliers به مقدار ۰/۴۸۷۳ رسیده است. بنابراین حداقل فشار سینه‌کار برای جلوگیری از فرونشست در بالای تونل از ضرب فشار ۶۵۵ کیلو پاسکال در ضریب ۰/۴۸۷۳ به مقدار ۳۱۹ کیلو پاسکال و در پایین تونل ۳۷۲ کیلو پاسکال به دست می‌آید.



شکل (۷-۷): پایان فاز محاسباتی



شکل (۷-۸): پنجره محاسبات جعبه Multipliers

۷-۳-۱- آنالیز ایمنی

آنالیز ایمنی با کاهش پارامترهای مکانیکی خاک می‌توان به کار گرفته شود که این روش کاهش ϕ -c نامیده می‌شود. وقتی خواسته شود که ضریب ایمنی را برای یک موقعیت در دست را محاسبه نماییم، این روش انتخاب می‌شود. تمام آنالیز را معمولاً در آخرین فاز محاسباتی تعریف می‌نمایند. در ساختار مهندسی فاکتور ایمنی از نسبت بار ناشی از شکست به بار مجاز تعریف می‌شود، اگرچه این تعریف همیشه مفید نیست. تعریف دیگری که در مکانیک خاک مطابق رابطه (۷-۱) بسیار استفاده می‌شود.

$$SF = \frac{S_{\text{available}}}{S_{\text{needed fore equilibrium}}} \quad (۷-۱)$$

که S مقاومت برشی است. ضریب ایمنی از نسبت مقاومت واقعی به کمترین مقاومت محاسبه شده تعریف می‌شود. با توجه به روابط کولمب فاکتور ایمنی از رابطه (۷-۲) بدست می‌آید.

$$SF = \frac{c + \sigma_n \cdot \tan \phi}{c_r + \sigma_n \cdot \tan \phi_r} \quad (۷-۲)$$

در این رابطه c چسبندگی خاک، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک در حالت واقعی، c_r چسبندگی بحرانی خاک و ϕ_r ضریب اصطکاک بحرانی خاک است. مطابق توضیح بالا از روش کاهش ϕ -c می‌توان در PLAXIS برای محاسبه ضریب ایمنی کلی استفاده کرد. چسبندگی و تانژانت زاویه اصطکاک مطابق رابطه (۷-۳) به یک نسبت مشابه کاهش می‌یابد.

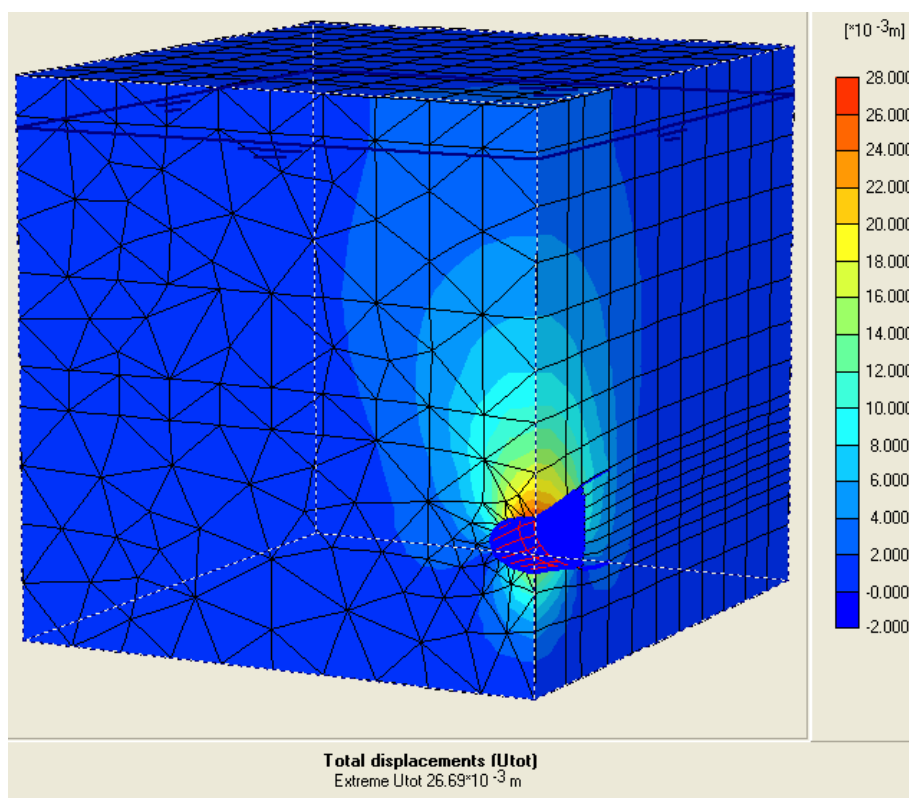
$$\sum Msf = \frac{c}{c_r} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_r} \quad (۷-۳)$$

کاهش پارامترهای مقاومتی به وسیله ضریب افزایشی کل $\sum Msf$ کنترل می‌شود. این پارامتر گام به گام افزایش یافته تا این که شکست در فاز محاسباتی سوم روی دهد. اولین ضریب افزایش برای کاهش

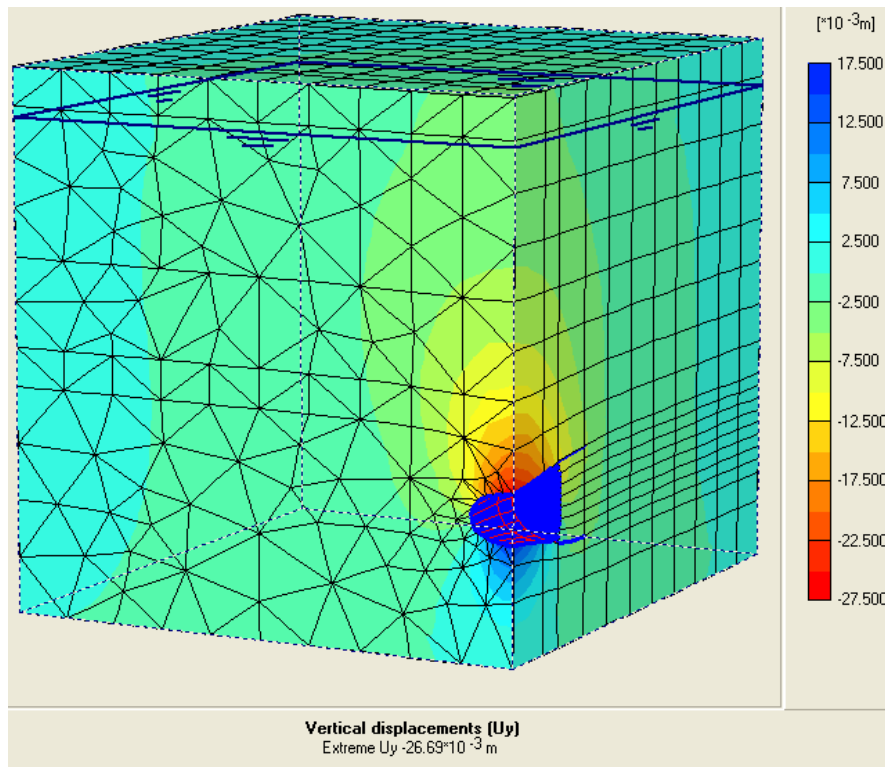
مقاومت، به صورت پیش فرض ۰/۱ است. تغییر شکل به دست آمده برای فاز دوم (کاهش فشار سینه‌کار) و فاز سوم (کاهش Φ -c) در پنجره خروجی می‌توان مشاهده کرد.

۴-۷- نتایج خروجی

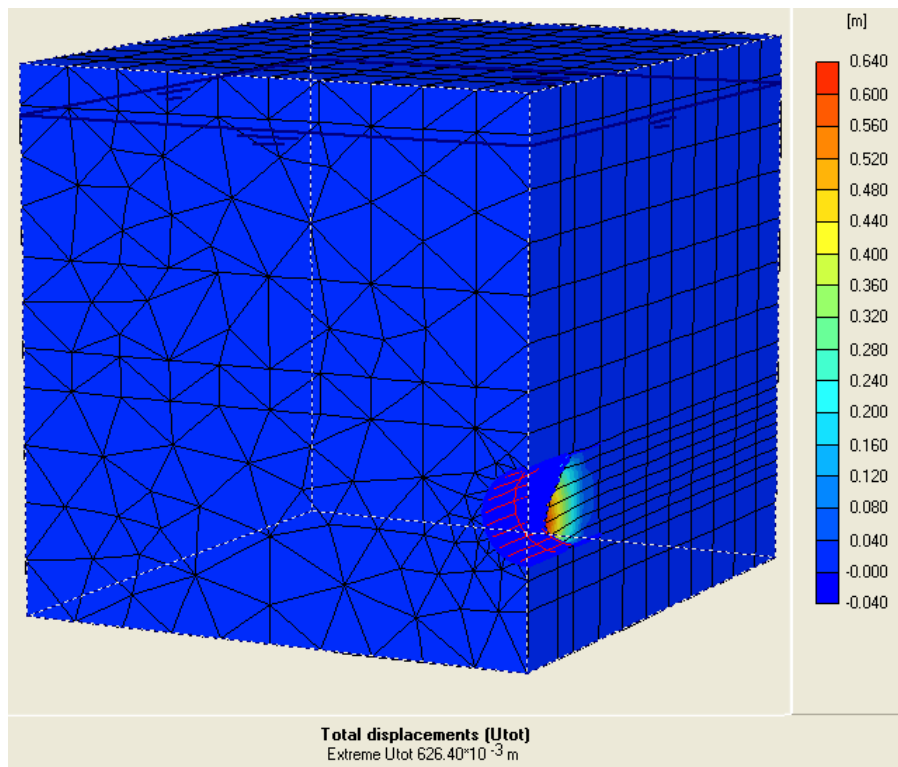
در شکل‌های (۷-۹) و (۷-۱۰) جابجایی کل و عمودی در پایان فاز اول را نشان می‌دهد، که بیانگر آن است فشار سینه‌کار به اندازه کافی برای پایداری سینه‌کار بزرگ است. بیشترین تغییر شکل در انتهای ماشین اتفاق می‌افتد، که دلیل آن ناشی از انقباض خاک است. فاز دوم و سوم بیانگر نشست در سینه‌کار می‌باشند. در شکل (۷-۱۱) مربوط به فاز دوم (کاهش فشار سینه‌کار) جابجایی خاک به داخل سینه‌کار را نشان می‌دهد. شکل‌های (۷-۱۲) و (۷-۱۳) مربوط به فاز سوم (کاهش Φ -c) مکانیزم گسیختگی تا سطح زمین را نشان می‌دهد.



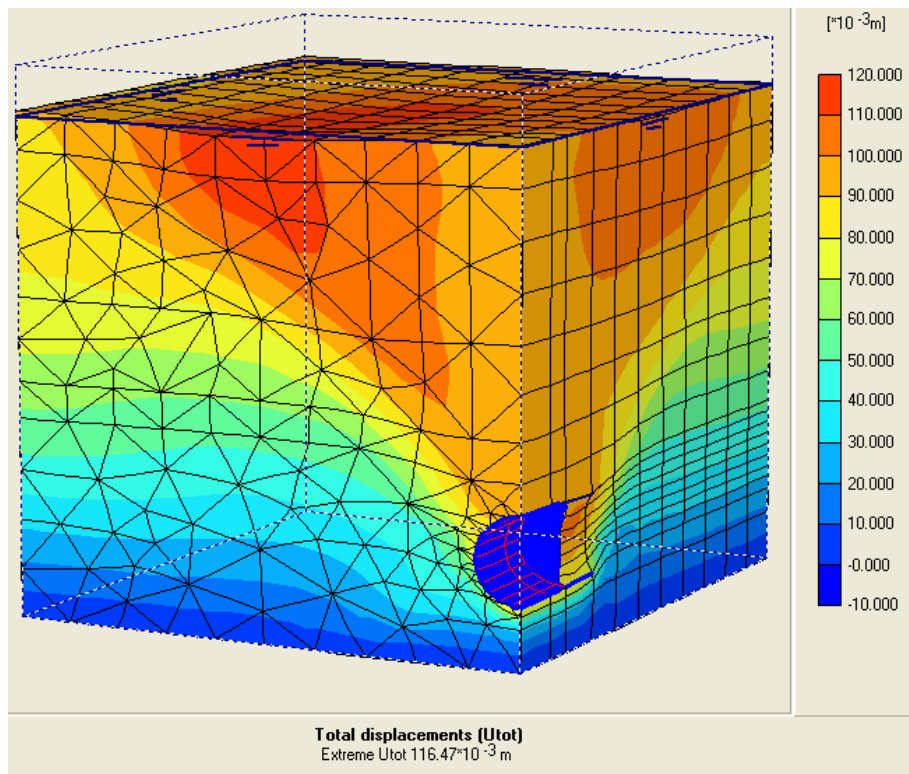
شکل (۷-۹): جابجایی کل در پایان فاز اول



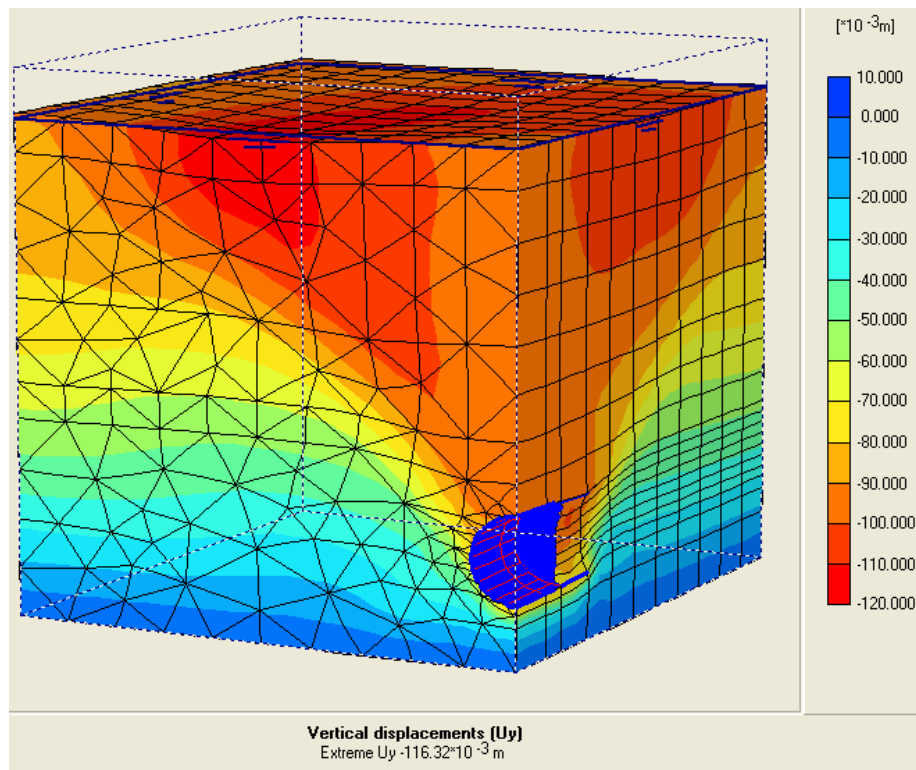
شکل (۷-۱۰): جابجایی عمودی در پایان فاز اول



شکل (۷-۱۱): جابجایی کل در پایان فاز دوم (کاهش فشار سینه‌کار)



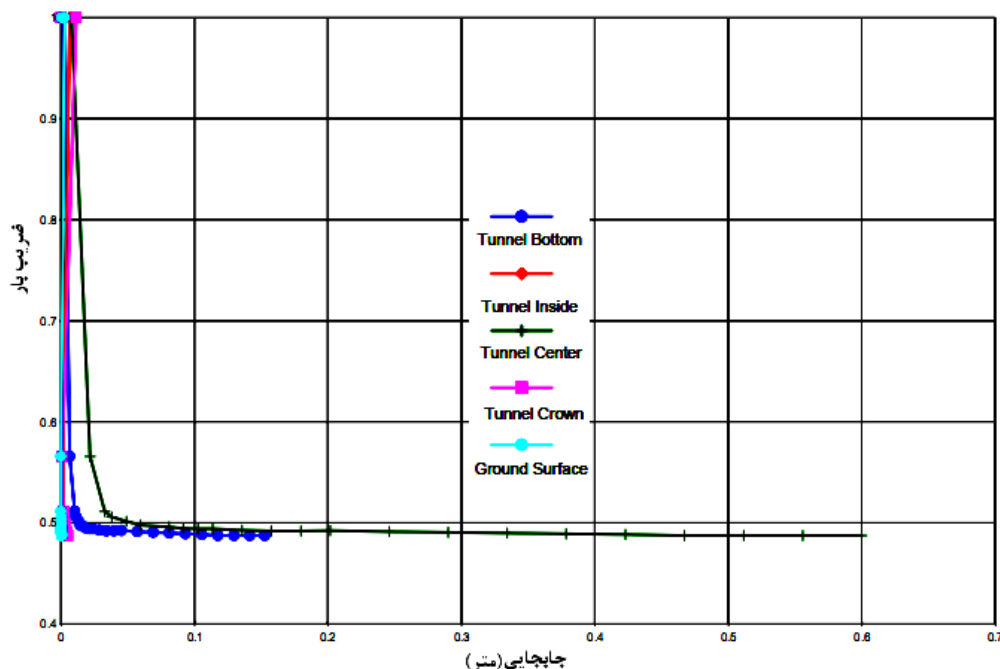
شکل (۷-۱۲): جابجایی کل در پایان فاز سوم (کاهش Phi-c)



شکل (۷-۱۳): جابجایی عمودی در پایان فاز سوم (کاهش Phi-c)

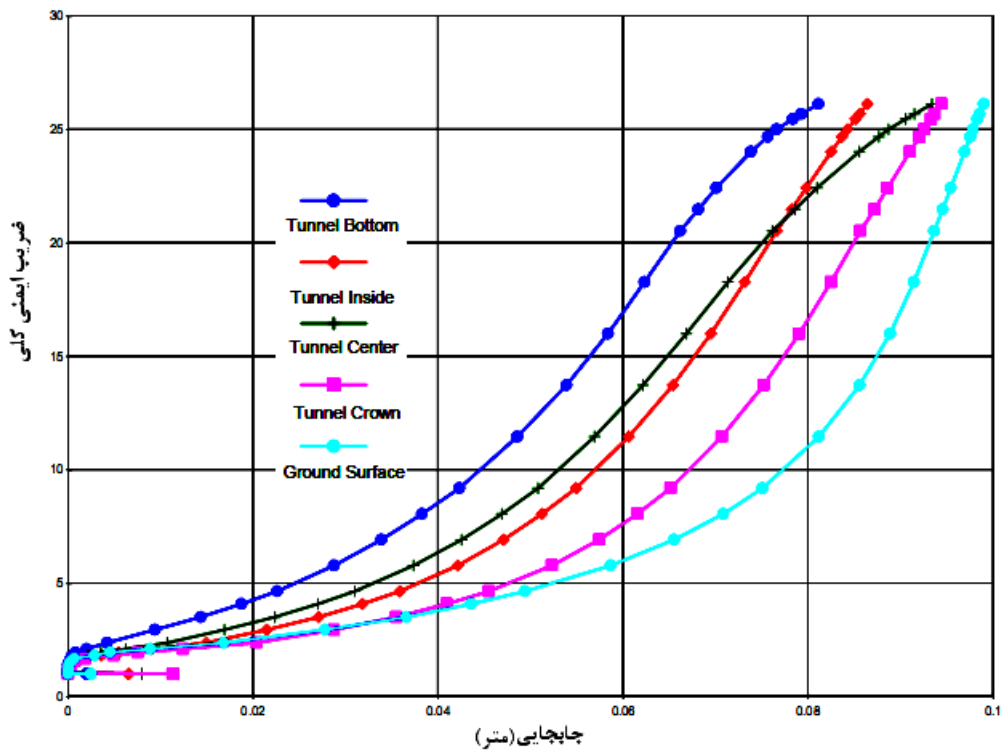
۷-۵- منحنی‌های بار-جابجایی و ضریب ایمنی-جابجایی

برنامه منحنی‌ها برای رسم کردن منحنی بار-جابجایی، منحنی ضریب ایمنی-جابجایی تنش-کرنش با توجه به نقاط از پیش تعیین شده در هندسه مدل استفاده می‌شود. در شکل (۷-۱۴) رابطه بین ضریب بار با جابجایی کل و در شکل (۷-۱۵) رابطه بین ضریب ایمنی با جابجایی کل در نقاط مختلف یک تونل را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۱۴): رابطه بین ضریب بار با جابجایی کل (فاز دوم)

که مطابق نتایج به دست آمده کمتر از $0/5$ سانتی‌متر فرونشست روی سطح زمین در شرایط واقعی خواهیم داشت. خاک در جلوی ماشین با اعمال حداقل فشار (319 کیلو پاسکال و کمتر از آن) حداکثر به اندازه‌ای 60 سانتیمتر در جهت افقی جابجا شده و به داخل تونل حرکت می‌کند.



شکل (۷-۱۵): رابطه بین ضریب ایمنی با جایجایی کل (فاز سوم)

۶-۷- مقایسه نتایج تحلیلی و عددی در موقعیت ۲۰+۸۰۰ تا ۲۰+۹۰۰

مقایسه نتایج عددی با روش‌های تجربی و تحلیلی در جدول (۷-۳) نشان می‌دهد که در این مناطق فشار محاسبه شده به روش عددی با فشار روش‌های تحلیلی همخوانی بیشتر دارد.

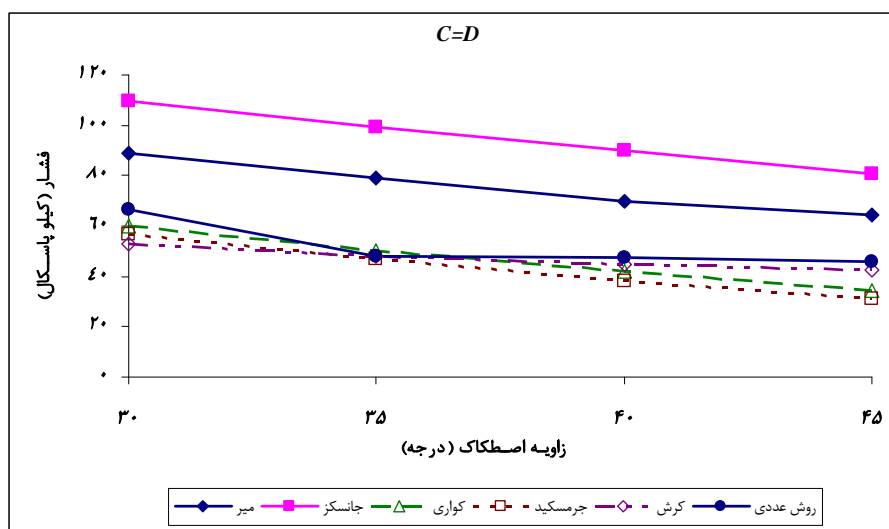
جدول (۷-۳): مقایسه نتایج عددی با روش‌های تجربی و تحلیلی در موقعیت ۲۰+۸۰۰ تا ۲۰+۹۰۰

فشار نگهداری سینه‌کار در تاج تونل (کیلو پاسکال)										نوع فشار
عددی	کواری (روش دوم)	پروبر	گرتن	جرم‌سکید	میز	کواری (روش اول)	جانسکر	لکا	نراقی	
۳۱۹	۳۰۰	۳۱۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۱۰	۳۰۰	۳۴۵	حداقل فشار
	۳۲۰	۳۳۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۲۰	۳۳۰	۳۲۰	۳۶۰	حداقل فشار با دامنه تغییرات

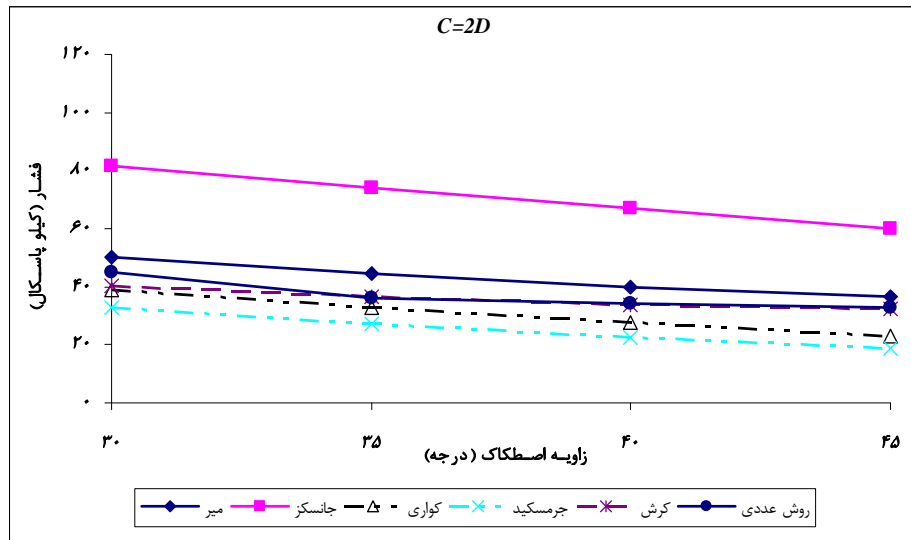
۷-۷- مقایسه روش‌های تحلیلی و عددی

با توجه به شرایط تغییرات ژئوتکنیکی زمین در مسیر احداث خط هفت متروی تهران، در این بخش تأثیر تغییر پارامترهای مکانیکی خاک بر مقدار فشار نگهداری بررسی شده است. در ابتدا مطالعه بر روی خاک های دانه‌ای با زاویه اصطکاک ۳۰ تا ۴۵ درجه با مدول یانگ ۳۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون ۰/۳ و چسبندگی صفر انجام گرفته که نتایج مقایسه روش‌های تحلیلی برای نسبت ارتفاع روباره (C) به قطر تونل (D) ۱، ۲ و ۳ در شکل‌های (۷-۱۴) تا (۷-۱۶) نشان داده شده است. برای $C=D$ و اصطکاک کوچکتر از ۳۵ درجه نتایج کواری با روش عددی تطابق خوبی دارد. با افزایش اصطکاک روش کرش نتایج حاصل از کاربرد روش کرش با روش عددی نزدیک‌تر است. نتایج روش جانسکر با توجه به در نظر گرفتن ضریب ایمنی ۱/۵ تا ۱/۷۵ همواره در مقایسه با سایر روش‌ها مقادیر بیشتری را برآورد می‌کند.

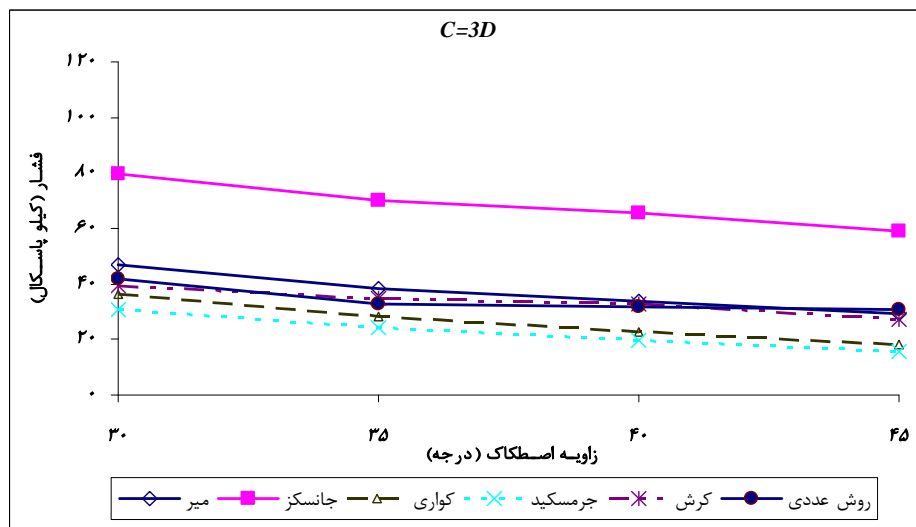
جمع‌بندی نتایج حاصل از مقایسه روش عددی با روش‌های تحلیلی و برای خاک‌های مذکور در جدول (۷-۴) آمده است. در این جدول علامت H، L و E بترتیب بیانگر آن است که فشار برآورد شده با روش عددی در مقایسه با روش‌های تحلیلی بزرگتر، کوچکتر و مساوی است.



شکل (۷-۱۶): مقایسه فشار تحلیلی و عددی در مناطق خشک با $C=D$



شکل (۷-۱۷): مقایسه فشار تحلیلی و عددی در مناطق خشک با $C=2D$

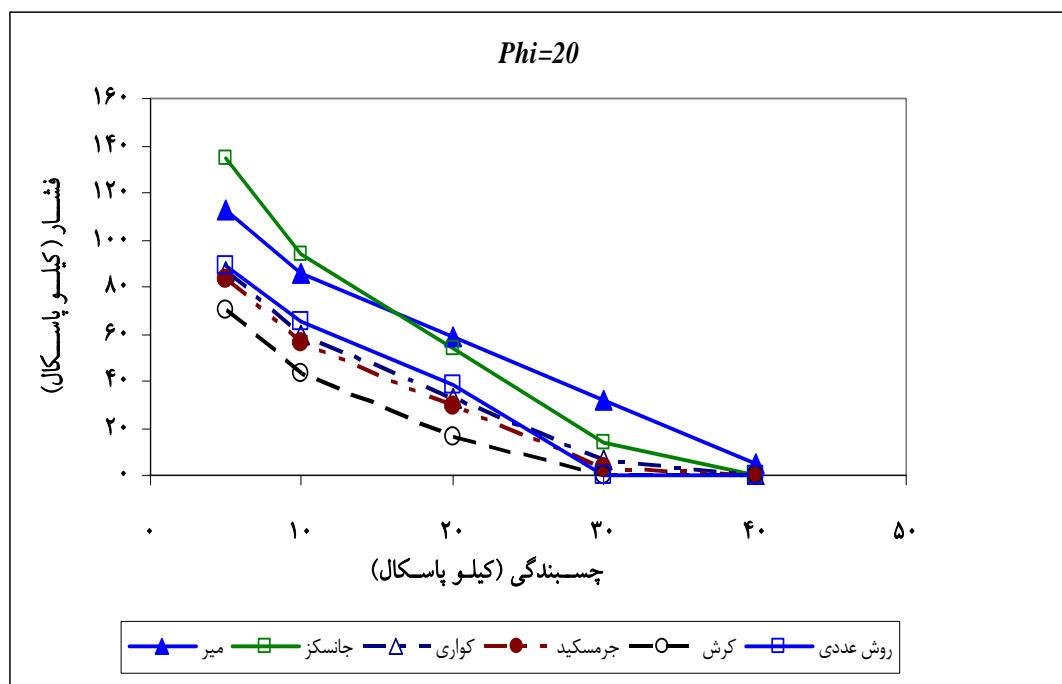


شکل (۷-۱۸): مقایسه فشار تحلیلی و عددی در مناطق خشک با $C=3D$

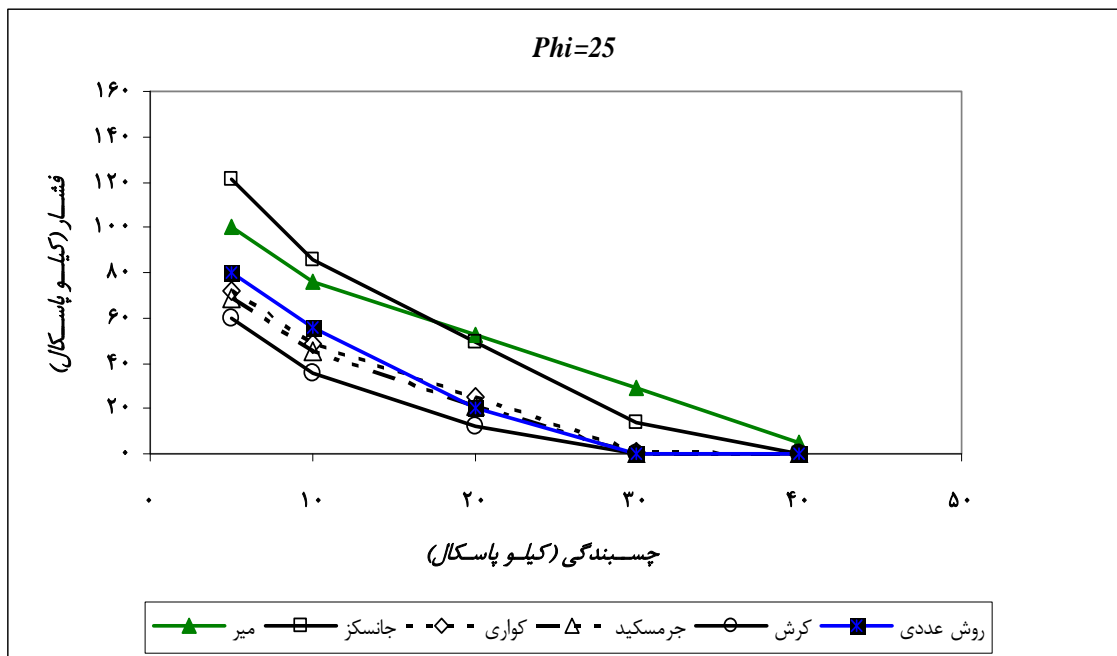
جدول (۷-۴): مقایسه روش عددی با روش‌های تحلیلی برای خاک‌های غیر چسبیده

روش‌ها		میر				جانسکرز				کواری				جرمسکید				کرش				
پارامترها																						
C/D	ϕ	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	
۱		L	L	E	E	L	L	L	L	H	E	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
۲		L	L	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
۳		L	L	L	E	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L	L	H

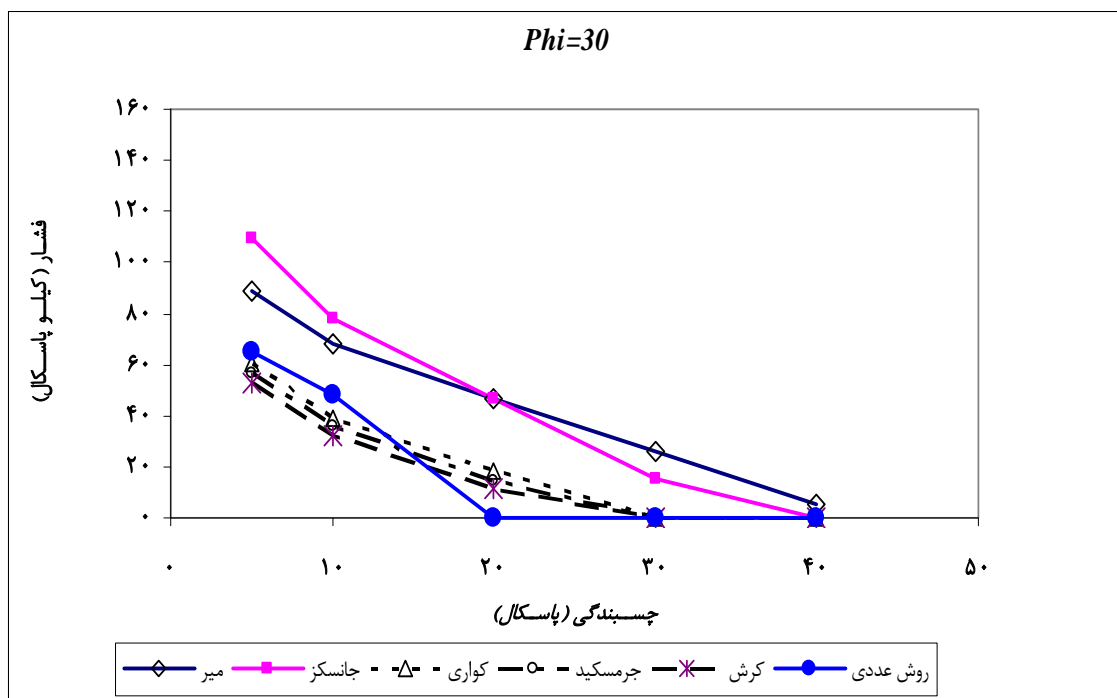
بررسی اثر چسبندگی خاک بر فشار وارد بر سینه‌کار نیز حالت‌های مختلفی برحسب روباره به قطر تونل بررسی شده است. تغییرات فشار در خاک‌های چسبیده با چسبندگی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلو پاسکال و اصطکاک ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ در خط هفت متروی تهران برای $C=D$ در شکل‌های (۷-۱۷) تا (۷-۲۰) نشان داده شده است. در نهایت جمع‌بندی تغییرات فشار برای $C=2D$ و $C=3D$ در جدول (۷-۵) آمده است. فشار نگهداری به روش جانسکز با اعمال ضریب ایمنی ۱/۵ برای خاک در این نواحی محاسبه شده که برای چسبندگی کمتر از ۲۰ کیلو پاسکال روش جانسکز فشار بیشتر را نسبت به روش میر برآورد می‌کند. برای چسبندگی بزرگتر از ۲۰ کیلو پاسکال روش میر فشار بیشتر را نسبت به روش جانسکز برآورد می‌کند. در تمام عمق‌ها نواحی خشک فشار میر و جانسکز از فشار عددی بیشتر است. برای چسبندگی بیشتر از ۳۰ کیلو پاسکال فشار محاسبه شده به روش عددی صفر در مناطق با $C=D$ برابر صفر است. که این فشار در روش‌های تحلیلی برای چسبندگی بیشتر از ۴۰ کیلو پاسکال در این مناطق صفر است.



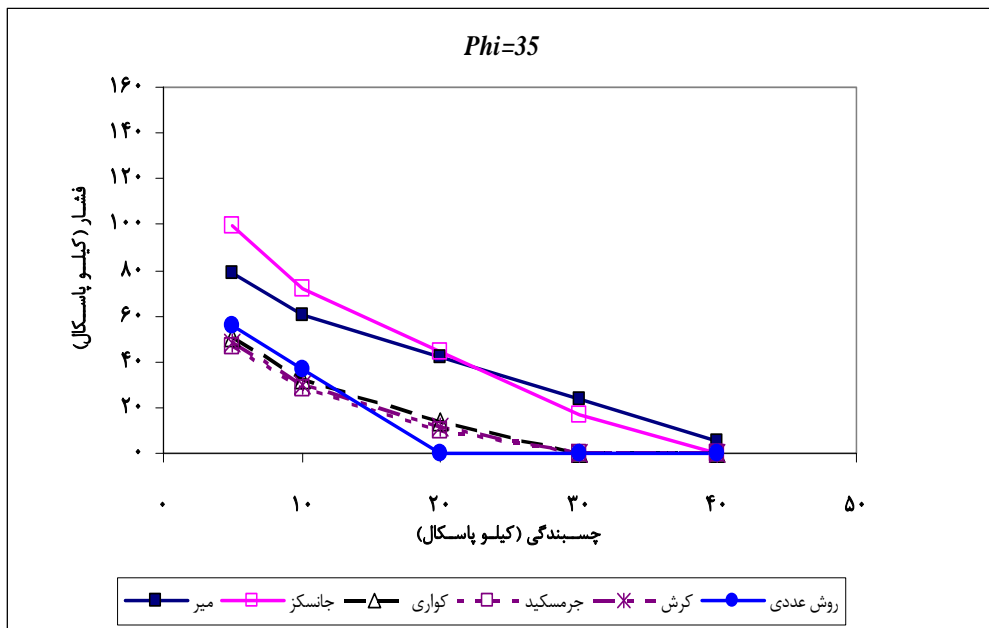
شکل (۷-۱۹): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با $C=D$ و $\Phi=20$



شکل (۷-۲۰): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با $C=D$ و $\Phi=25$



شکل (۷-۲۱): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با $C=D$ و $\Phi=30$



شکل (۷-۲۲): مقایسه فشار تحلیلی و عددی با $C=D$ و $\Phi=35$

جدول (۷-۵): مقایسه نتایج عددی با روش‌های تحلیلی در خاک چسبنده

ϕ'	۲۰					۲۵					۳۰					۳۵				
	۵	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
C/D	جانسکرز و استاینر																			
۱	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
۲	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H
۳	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H
	میر																			
۱	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
۲	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H
۳	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H	L	L	H	H	H
	کواری و آنگونستا																			
۱	H	H	H	E	E	H	H	H	E	E	H	H	L	E	E	H	H	L	E	E
۲	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
۳	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
	جرمسکید																			
۱	H	H	H	E	E	H	H	H	E	E	H	H	L	E	E	H	H	L	E	E
۲	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
۳	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
	کرش																			
۱	H	H	H	H	E	H	H	H	E	E	H	H	L	E	E	H	H	L	E	E
۲	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
۳	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H

۷-۸- بررسی فشار در مناطق آبدار با روباره‌های مختلف

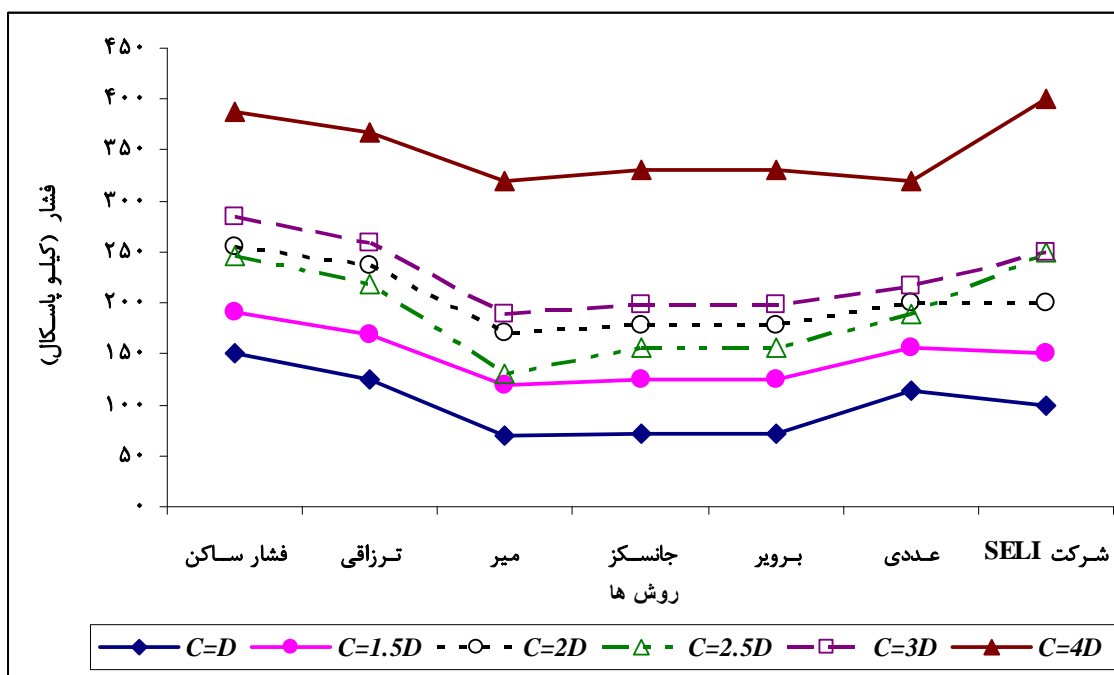
فشار در مناطق آبدار خط هفت متروی تهران با روباره‌های $C = D$ با ارتفاع تقریبی ۵ متر آب، $C = 1.5D$ با ارتفاع تقریبی ۱۰ متر آب، $C = 2D$ با ارتفاع تقریبی ۱۵ متر آب، $C = 2.5D$ با ارتفاع تقریبی ۱۳ متر آب، $C = 3D$ با ارتفاع تقریبی ۱۷ متر آب و $C = 4D$ با ارتفاع تقریبی ۳۰ متر آب با روش‌های تحلیلی-تجربی و عددی مطابق جدول (۷-۶) به دست آمده است.

جدول (۷-۶): مقایسه فشار در مناطق آبدار خط هفت متروی تهران

فشار نگهداری سینه‌کار (کیلو پاسکال)							مشخصات هندسی
شرکت SELI	عددی	برویر	جانسکز	میر	ترزاقی	فشار ساکن	
۱۰۰	۱۱۴/۵	۷۲/۵	۷۲/۵	۷۰	۱۲۴/۸	۱۵۱	$C = D$
۱۵۰	۱۵۶/۱	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۰	۱۶۸/۵	۱۹۱/۶	$C = 1.5D$
۲۰۰	۱۹۹/۹	۱۷۷/۵	۱۷۷/۵	۱۷۰	۲۳۷/۵	۲۵۵/۷	$C = 2D$
۲۵۰	۱۹۰	۱۵۶/۵	۱۵۶/۵	۱۳۰	۲۱۹	۲۴۶	$C = 2.5D$
۲۵۰	۲۱۷	۱۹۸/۵	۱۹۸/۵	۱۹۰	۲۵۸/۲	۲۸۵/۵	$C = 3D$
۴۰۰	۳۱۹	۳۳۱/۵	۳۳۱/۵	۳۲۰	۳۶۸	۳۸۶/۸	$C = 4D$

مطابق نتایج بدست آمده در بین روش‌های تحلیلی-تجربی و عددی با توجه به وضعیت روباره و ارتفاع آب، فشار استاتیکی همیشه ایمن‌ترین فشار در مناطق آبدار است. در بین فشارهای فرونشست، فشار محاسبه شده به روش ترزاقی فشار بیشتر و ایمن‌تری را نسبت به سایر روش‌ها برآورد می‌کند. روش عددی با در نظرگیری پارامترهای بیشتری از خاک مثل مدول الاستیک و ضریب پواسون، همگنی یا ناهمگنی خاک، خصوصیات ماشین حفاری، مواد بهسازی، بررسی نشست سینه‌کار و زمین و نشست آب تحلیل صحیح‌تر و منطقی‌تری از پایداری سینه‌کار نسب به روش‌های تحلیلی و تجربی دارد. فشار محاسباتی شرکت SELI ایتالیا در مناطق آبدار برای $C \geq 2.5D$ نسبت به روش‌های عددی و ترزاقی، بیشتر برآورد شده که این فشار تقریباً با فشار استاتیکی برابر است. با توجه به نتایج روش عددی می‌توان برای مناطق $C \geq 3D$ ، فقط فشار آب را با در نظر گرفتن ۲۰ کیلو پاسکال دامنه تغییرات به عنوان فشار

سینه‌کار در روش‌های تحلیلی استفاده کرد. در مجموع فشار در مناطق آبدار قطعه شمالی- جنوبی خط هفت متروی تهران بین ۱۰۰ کیلو پاسکال تا ۴۰۰ کیلو پاسکال تغییر می‌کند. شکل (۷-۲۲) فشار نگهداری در عمق‌های مختلف مناطق آبدار خط هفت متروی تهران را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۲۳): فشار نگهداری در عمق‌های مختلف مناطق آبدار خط هفت متروی تهران

نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ذکر شده، روش‌های تحلیلی جانسکز و عددی روش مناسبی برای محاسبه فشار در خط هفت متروی تهران است. در مناطقی که تونل بالای تراز آب زیرزمینی حفاری می‌شود و شرایط ژئوتکنیکی نامناسب و نامشخص است، فرمول $\sigma_T = K_0 \times \sigma'_v + 20$ برای محاسبه فشار سینه‌کار پیشنهاد می‌شود. در مناطقی که تونل پایین تراز آب زیرزمینی حفاری می‌شود و شرایط ژئوتکنیکی نامناسب و نامشخص است، فرمول $\sigma_T = K_0 \times \sigma'_v + \gamma_w \times H_w + 20$ برای محاسبه فشار سینه‌کار پیشنهاد می‌شود.

فصل هشتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۸-۱- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی پایداری سینه‌کار تونل از لحاظ استاتیکی پرداخته شده است. برای پایداری سینه‌کار تونل و ادامه حفاری لازم است فشار تعادلی بر سینه‌کار حفاری اعمال نمود. به منظور برآورد فشار فرونشست سینه‌کار تونل در خط هفت متروی تهران از روش‌های تحلیلی - تجربی و عددی استفاده شده است. فشار در مناطق خشک با عمق کم (نسبت روباره به قطر تونل کوچکتر از دو) با روش‌های تجربی - تحلیلی بین ۳۶ تا ۸۰ کیلو پاسکال و روش عددی ۵۵ تا ۷۰ کیلوپاسکال و با عمق متوسط (نسبت روباره به قطر تونل بزرگتر از دو) با روش‌های تجربی - تحلیلی بین ۲۰ تا ۱۰۰ کیلو پاسکال و روش عددی به طور متوسط ۲۵ تا ۴۵ کیلو پاسکال برآورد شده که این فشار در تمام مناطق خشک به میزان ۵۰ کیلو پاسکال توسط شرکت طراح مترو (SELI) برآورد شده است. با توجه اطلاعات ژئوتکنیکی کلی در منطقه و تغییرات شرایط خاک نمی‌تواند یک فشار مناسب باشد. با توجه به آنالیز حساسیت انجام گرفته روی پارامتر مکانیکی خاک برای خاک‌های با چسبندگی بیشتر از ۳۰ کیلو پاسکال فشار صفر یا کم است. برای خاک‌های دانه‌ای با چسبندگی صفر فشار برای مناطق $C=D$ ۵۰ تا ۱۱۰ کیلو پاسکال و برای مناطق $C>2D$ فشار بین ۳۰ تا ۸۰ کیلو پاسکال برآورد شده است. در مجموع برای مناطق خشک حداقل فشار نگهداری بین ۴۰ تا ۸۰ کیلو پاسکال با در نظر گرفتن شرایط ژئوتکنیکی و سازه‌ای منطقه توسط محقق پیشنهاد می‌شود. فشار در مناطق آبدار با وضعیت ژئوتکنیکی و هیدرولوژی نامناسب ۳۲۰ تا ۳۷۰ کیلو پاسکال با روش‌های دو بعدی و سه بعدی برآورد شده و ۳۱۹ کیلو پاسکال با روش عددی برآورد شده که این فشار توسط شرکت طراح مترو (SELI) به میزان ۴۰۰ کیلو پاسکال برآورد شده است. فشار در این مناطق با احتیاط بیشتری برآورد شده که این فشار با روش عددی محاسبه شده اختلاف قابل توجهی دارد. با توجه به شرایط ژئوتکنیکی، هیدرولوژی و هندسی مسیر احداث تونل (نسبت روباره به قطر تونل)، خط هفت متروی تهران به چهار منطقه از لحاظ فشار سینه‌کار تقسیم‌بندی می‌شود.

۱- مناطقی که $C < 2D$ و تونل بالاتر از تراز آب زیرزمینی است: در بین روش‌های سه بعدی مورد استفاده در این مناطق روش میر به دلیل در نظرگیری ضریب فشار سه بعدی صفر برای گوه و همچنین چسبندگی بالای خاک، و روش جانسکز با در نظرگیری ضریب ایمنی خاک، فشار بیشتر و ایمن‌تری را برآورد می‌کنند. به طور کلی در بین روش‌های سه بعدی، روش میر، جانسکز و برویر فشار بیشتری را برآورد می‌کنند. در صورت همگن بودن محیط خاکی نتایج روش برویر با روش کرش به دلیل در نظرگرفتن ضریب فشار سه بعدی یکسان، مساوی است. نتایج سیلو و گوه سه بعدی با روش دو بعدی ترازقی به دلیل در نظرگیری طول سست‌شدگی یکسان ($a = \infty$) و اعمال تمام فشار خاک روی تونل، به هم نزدیک است. مقایسه فشار برآورد شده به وسیله روش‌های تحلیلی و تجربی در موقعیت $12+500$ تا $12+600$ با فشار حفاری ماشین EPB، نشان می‌دهد که فشار محاسباتی جانسکز- استاینر فشار مناسبی است. علت افزایش فشار، توقف در حفاری و شرایط ژئوتکنیکی نامناسب در آن محدوده می‌باشد.

۲- مناطقی که $C < 2D$ و تونل پایین‌تر از تراز آب زیرزمینی است: در این مناطق علاوه بر کم بودن روباره وجود آب باعث افزایش فرونشست یا بالازدگی در مسیر حفاری می‌شود. بنابراین در این مناطق بهتر است از نتایج روش عددی استفاده شود. به طور کلی امکان بالازدگی برای روباره‌های کوچکتر از قطر تونل ($C < D$) در مناطق خشک و در مناطق آبدار برای ($D < C < 2D$) بیشتر است. بنابراین در این مناطق بهتر است حداکثر فشار وارده از ماشین برابر تنش قائم باشد.

۳- مناطقی که $C > 2D$ و تونل بالاتر از تراز آب زیرزمینی است: در این مناطق فشار برآورد شده به روش سه بعدی و عددی صفر است. بنابراین در این مناطق به دلیل پایداری مناسب سینه‌کار، تونل پایدار است. به علت وجود سازه‌ها در مسیر حفاری و توقف در ماشین حفاری به دلیل مشکلات فنی بهتر است، از روش سیلو ترازقی استفاده شود. طبق رابطه ترازقی $\left(a \leq \frac{c}{\gamma}\right)$ برای تمامی عمق‌هایی (نسبت روباره به قطر

تونل بزرگتر از دو) که نسبت چسبندگی به وزن مخصوص خاک بزرگتر یا مساوی طول سست‌شدگی باشد، فشار قائم روی تونل صفر است.

۴- مناطقی که $C > 2D$ و تونل پایین‌تر از تراز آب زیرزمینی است: فشار خاک برای روش‌های سه بعدی صفر است و تنها فشار آب به عنوان فشار نگهداری برآورد می‌شود. در بین روش‌های سه بعدی، روش جانسکز و برویر فاکتور ایمنی آب را به میزان $1/0.5$ در نظر می‌گیرند و در نتیجه این روش‌ها فشار بیشتری برآورد می‌کنند. بارهای ترافیکی ناشی از حرکت ماشین‌ها، بار پیاده رو و پل عابر پیاده ناچیز است. بارهای سازه‌های بزرگ مثل ساختمان و پل بتنی نزدیک به مسیر حفاری را می‌توان در نظر گرفت. طبق بررسی محقق در جدول (۶-۶) از تأثیر سازه‌ها در $C > 2D$ برای حالتی که فاصله شالوده سازه از مرکز تونل بیشتر از ۳۰ متر باشد، می‌توان صرف نظر کرد. با توجه به در نظرگیری شرایطی واقعی‌تر از منطقه در این تحقیق از مدل‌سازی عددی با نرم افزار PLAXIS استفاده شده است. در فاز اول مدل‌سازی میزان جابجایی در انتهای ماشین بررسی شده و در فاز دوم به نشست سینه‌کار و محاسبه کمترین فشار نگهداری و بیشترین جابجایی بررسی شده است. کمترین فشار لازم برای نگهداری در تاج تونل ۳۱۹ کیلوپاسکال است. در فاز دوم میزان جابجایی در سطح زمین کمتر از $0/5$ سانتی‌متر است. مقایسه نتایج عددی با روش‌های تجربی و تحلیلی نشان می‌دهد که روش ترزاقی فشار بیشتری را نسبت به سایر روش‌ها برآورد می‌کند. روش المان محدود با در نظرگیری پارامترهای بیشتری از خاک مثل مدول الاستیک و ضریب پواسون، خصوصیات ماشین حفاری و مواد بهسازی، فشار مناسب‌تری برآورد می‌کند. با توجه به شرایط ژئوتکنیکی منطقه و عدم انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی با جزئیات بیشتر در مناطقی که تونل در عمق کم $C < 2D$ ، بالاتر از تراز آب زیرزمینی و شرایط ژئوتکنیکی نامناسب حفاری می‌شود، بهتر است از روش میر و جانسکز برای فشار خاک استفاده شود. در مناطقی که $C < 2D$ ، تونل پایین‌تر از تراز آب زیرزمینی و شرایط ژئوتکنیکی منطقه نامناسب است بهتر است از روش ترزاقی استفاده شود. خاک

مسیر حفاری ماشین EPB در مناطق خشک بیشتر از ماسه و سیلت و کمی رس تشکیل شده است. در مناطق خشک به دلیل حفر فضا در عمق متوسط و خصوصیات مکانیکی مناسب خاک منطقه احداث تونل، سینه‌کار حفاری تقریباً پایدار است. مواد افزودنی بیشتر جهت کاهش فرسایش ابزارهای برش، سپر و کاهش گشتاور روی کله حفار ماشین تزریق می‌شود. بنابراین در مناطق خشک فوم و بنتونیت می‌تواند مناسب باشد. خاک مسیر حفاری ماشین EPB در مناطق آبدار بیشتر سیلت، رس و ماسه تشکیل شده است. در مناطق آبدار به دلیل حفر فضا در عمق‌های کم تا متوسط و تراز آب زیرزمینی بالا سینه‌کار حفاری ناپایدار است. در عمق‌های کم امکان فرونشست و بالازدگی وجود دارد. در خاک‌های رسی امکان انسداد کله حفار و در خاک‌های ماسه‌ای دانه درشت مسأله نشت سینه‌کار بیشتر است. بنابراین بایستی موادی به عنوان بهسازی استفاده نمود که ضمن تحکیم خاک و تأمین فشار تعادلی از انسداد کله حفار و نشت آب جلوگیری کند. برای آب‌بندی، کاهش فرسایش قطعات و جلوگیری از انسداد کله حفار پلیمر روی کله حفار و نقاله ماریچی تزریق می‌شود.

۸-۲- پیشنهادات:

۱- با توجه نیاز به احداث خطوط مترو بیشتر در تهران و سایر مراکز استان‌های پرجمعیت و نیاز مطالعات بیشتر در این زمینه با توجه اهمیت موضوع، جمع‌آوری اطلاعات ساخت متروهای مختلف در دنیا و ایجاد یک بانک اطلاعاتی مناسب برای دانش پژوهان پیشنهاد می‌شود.

۲- با توجه به چسبندگی مناسب خاک و برقراری رابطه ترزاقی $\left(a \leq \frac{c}{\gamma}\right)$ برای مدل‌های سیلو و گوه در خط هفت متروی تهران، می‌توان دریافت که فشار روی تاج تونل صفر است. عمق تونل حفاری در خط هفت متروی تهران از کم تا متوسط است و سینه‌کار تونل پایداری نسبی در مناطق خشک را دارد،

بنابراین پیشنهاد می‌شود حداقل ۴۰ تا ۸۰ کیلوپاسکال فشار به سینه‌کار، به دلیل وجود سازه‌ها در مسیر وارد شود.

۳- در مناطقی که $C > 2D$ و تونل بالاتر یا پایین‌تر از تراز آب زیرزمینی با ژئوتکنیکی نامناسب و نامشخص است، فشار استاتیکی برای محاسبه فشار پیشنهاد می‌شود.

۴- اطلاعات ژئوتکنیکی در خط هفت متروی تهران کلی است، در مناطق کم عمق و آبدار که امکان فرونشست و بالازدگی بالا است. اعمال فشار تعادلی و بهسازی مناسب خاک تأثیر مهمی بر پایداری تونل دارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در این مناطق بررسی ژئوتکنیکی دقیق‌تری انجام گیرد.

۵- بررسی اثر احداث خط متروی هفت تهران بر سازه‌های موجود چون فاضلاب و ساختمان‌های قدیمی، تونل توحید و سازه‌هایی که در آینده ساخته خواهد شد (مثل تونل خط ۹ مترو)، پیشنهاد می‌شود.

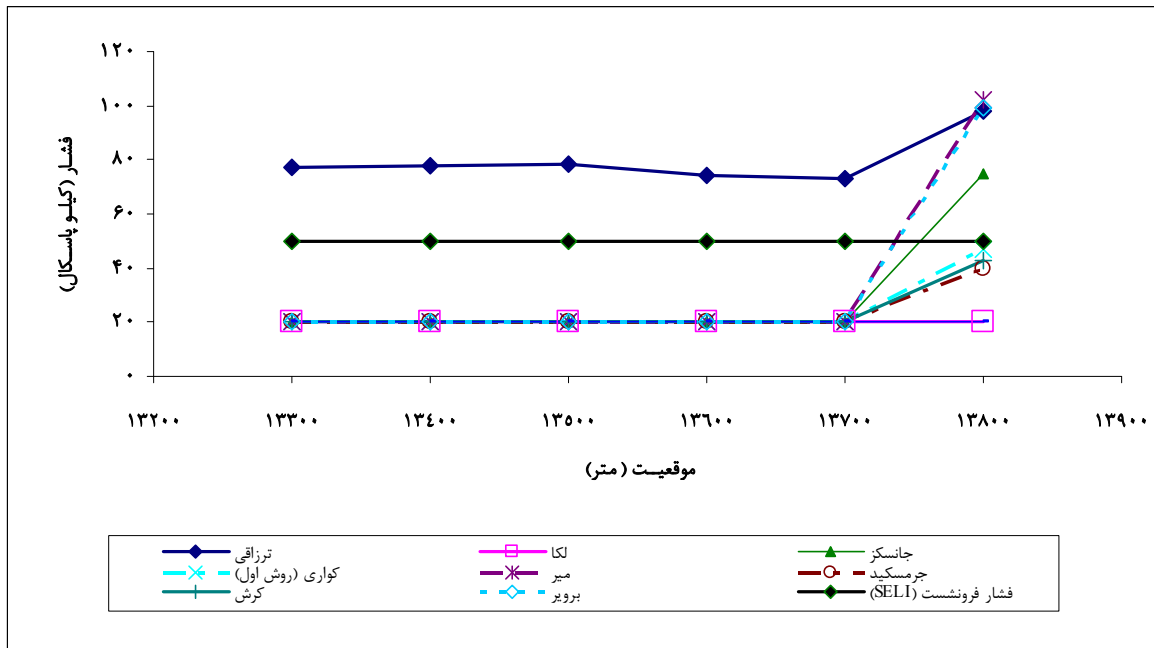
۶- برای مدل‌سازی مسیرهایی که از پیچیدگی خاصی برخوردارند استفاده از نرم افزار GTS-MIDAS و FIAC 3D پیشنهاد می‌شود.

۷- مطالعه اثر نشت آب و تحکیم خاک به ویژه در مناطق آبدار با عمق کم، نشست پل‌های روگذر و زیرگذر در مسیر حفاری و عرض بارگذاری تونل و تأثیر زمان توقف ماشین روی آن پیشنهاد می‌شود.

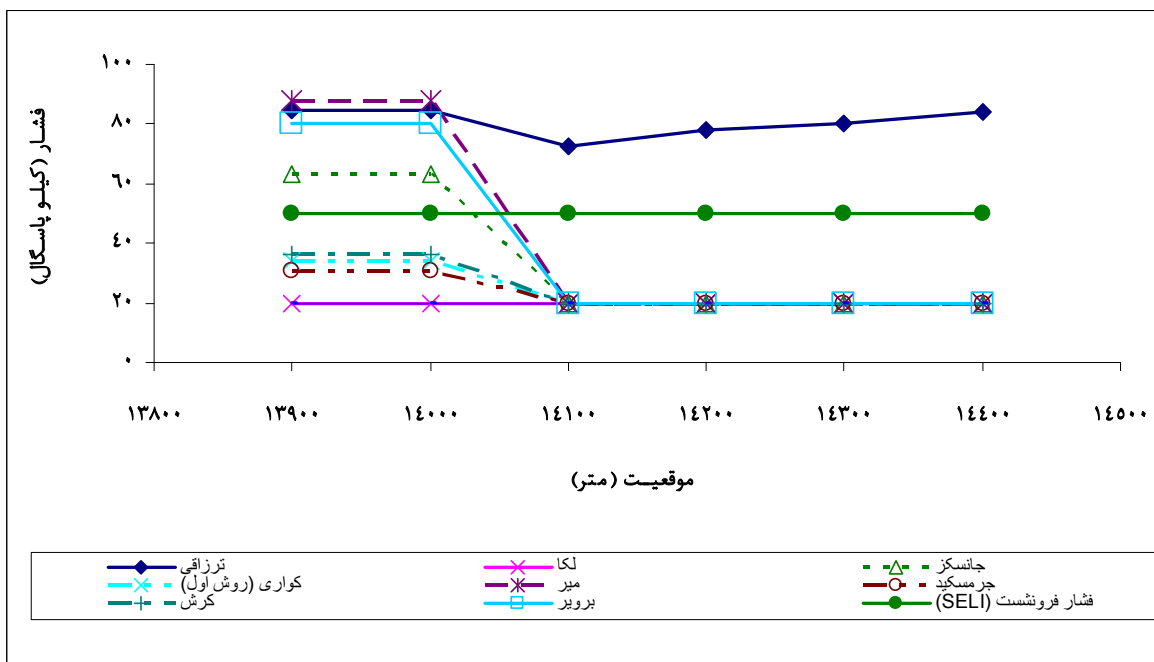
۸- مطالعه روی چند طبقه کردن خطوط متروهای آینده با توجه مشکلات ترافیکی، آلودگی صوتی و هوا و موقعیت استراتژیک تهران پیشنهاد می‌شود.

پیوست

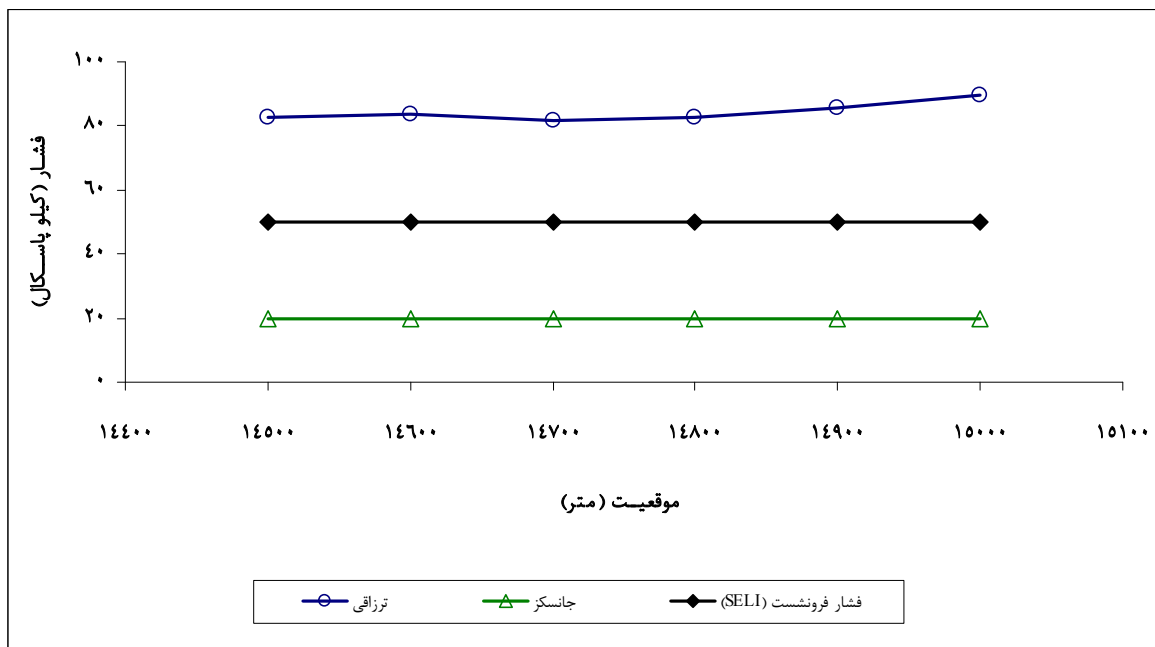
فشار سینه‌کار سایر مسیرهای حفاری با در نظرگیری ۲۰ کیلو پاسکال دامنه تغییرات



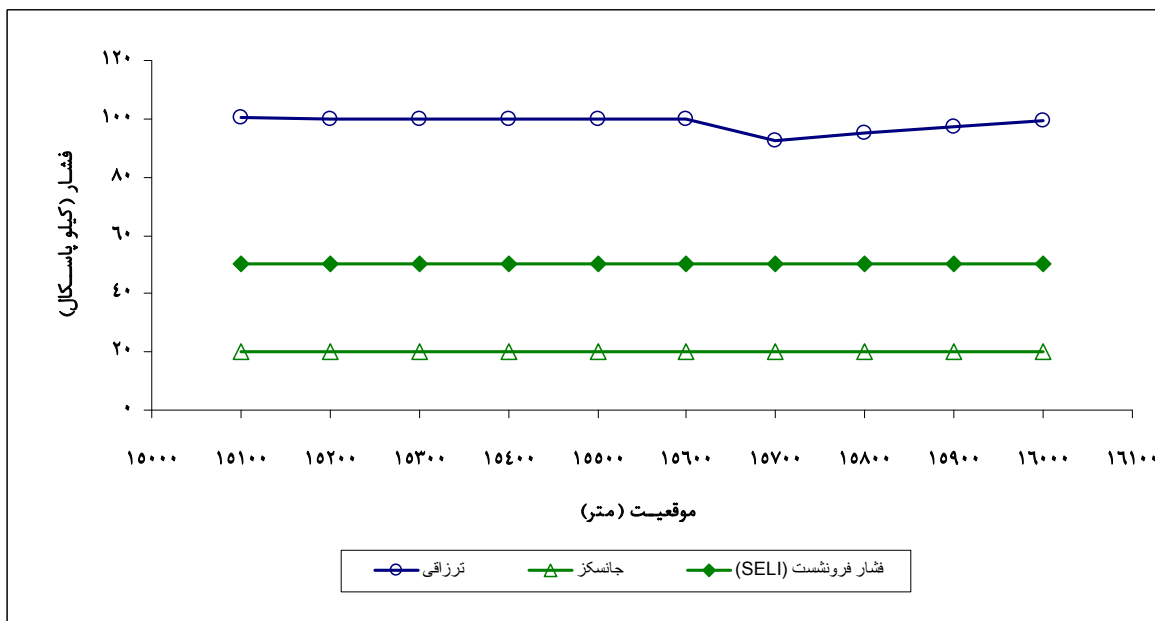
شکل ۱: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل در موقعیت ۱۳۳۰۰-۱۳۸۰۰



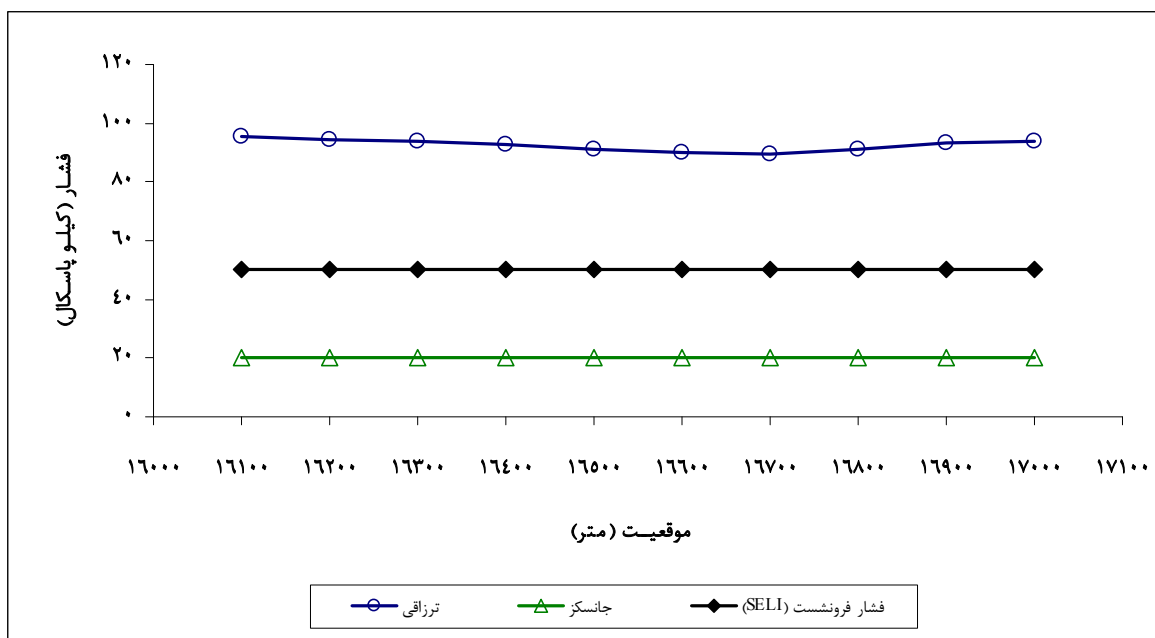
شکل ۲: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل در موقعیت ۱۳۹۰۰-۱۴۴۰۰



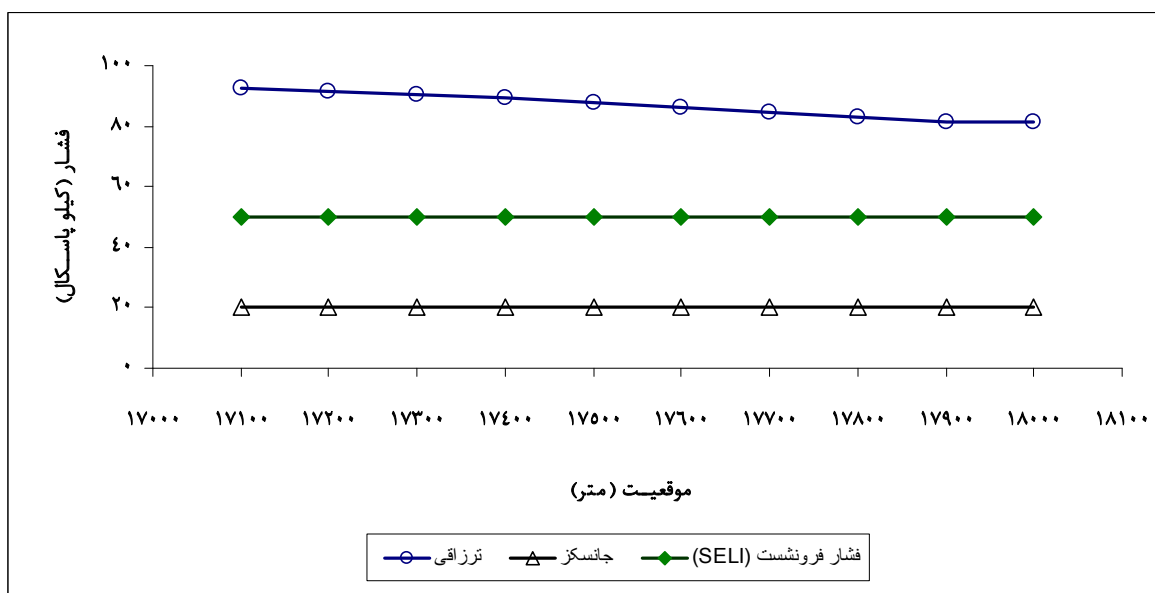
شکل ۳: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۱۴۵۰۰-۱۵۰۰۰



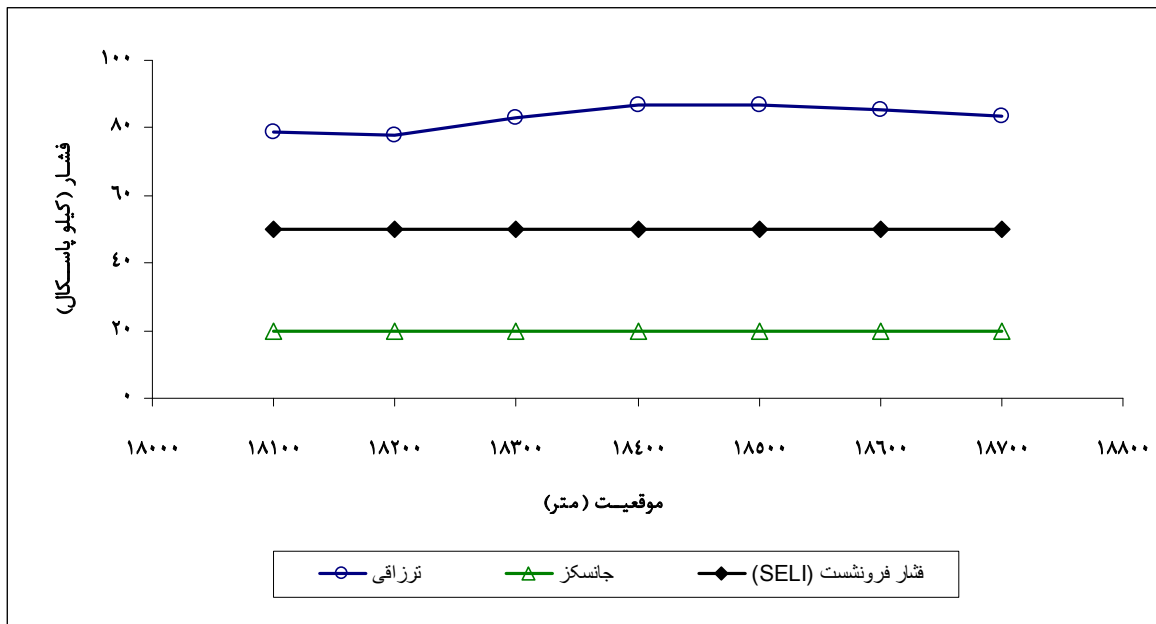
شکل ۴: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۱۵۱۰۰-۱۶۰۰۰



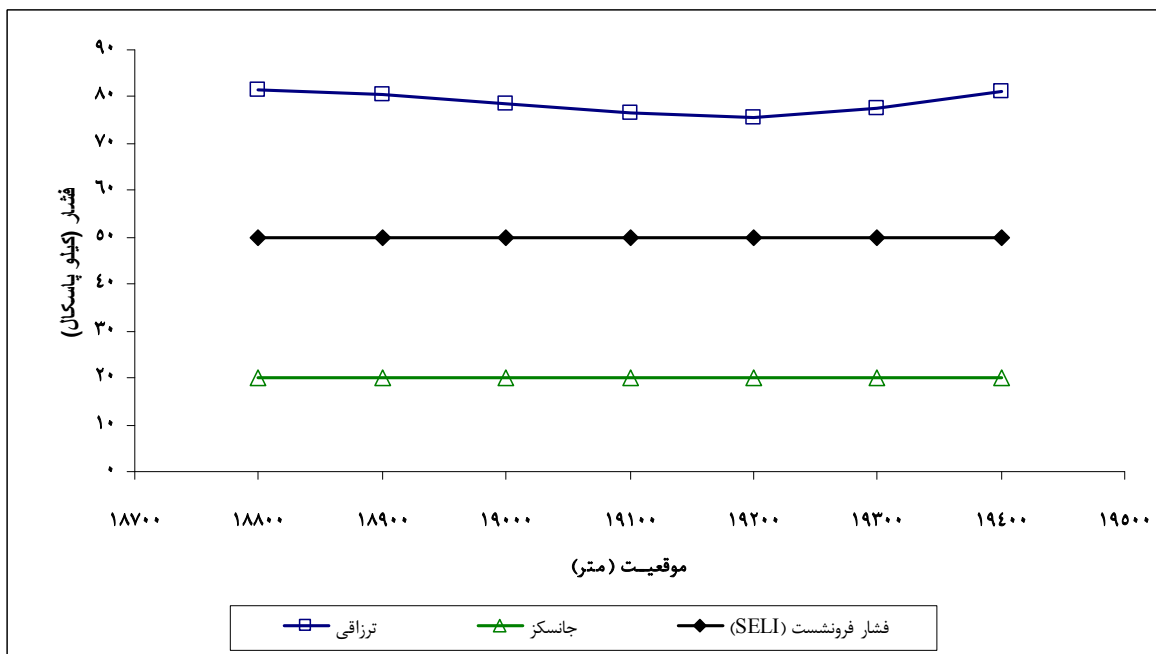
شکل ۵: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۱۶۱۰۰-۱۷۰۰۰



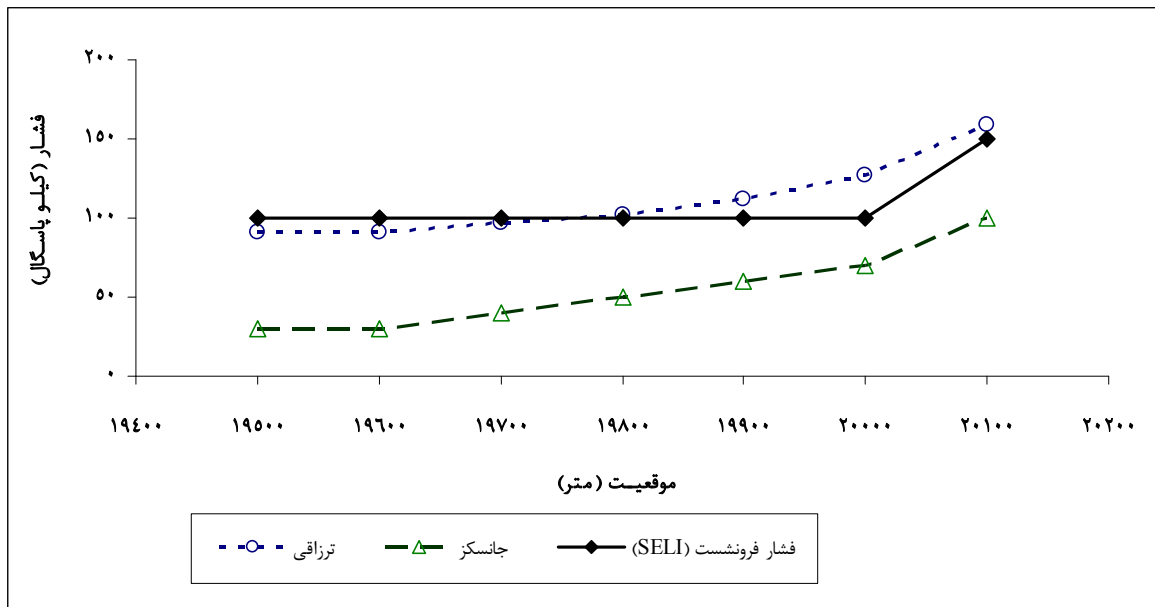
شکل ۶: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۱۷۱۰۰-۱۸۰۰۰



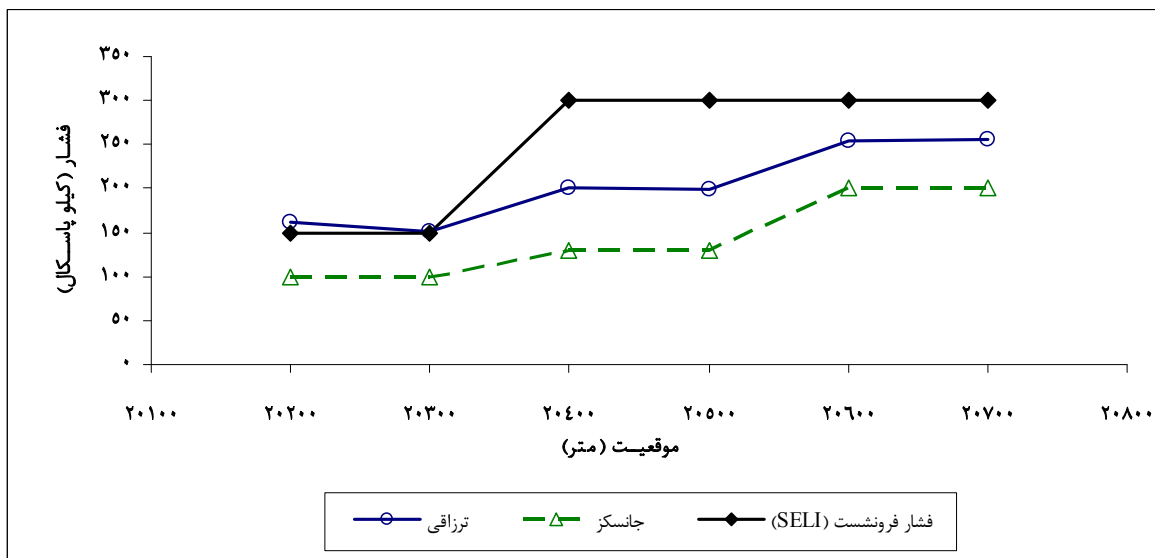
شکل ۷: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۱۸۱۰۰-۱۸۷۰۰



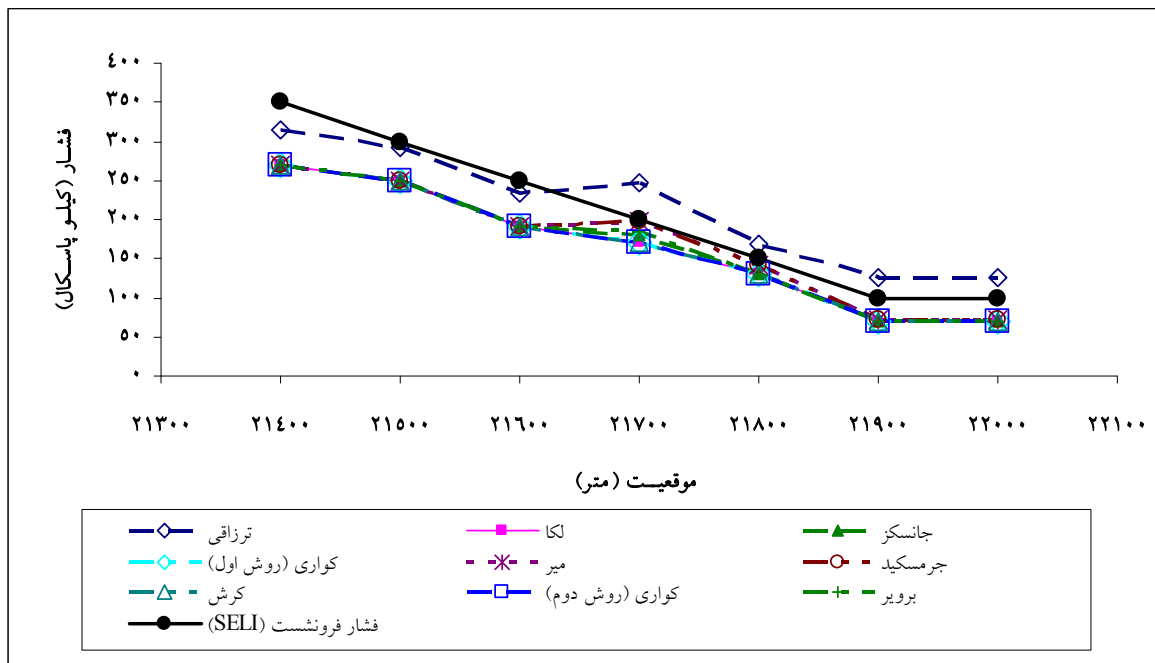
شکل ۸: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۱۸۸۰۰-۱۹۴۰۰



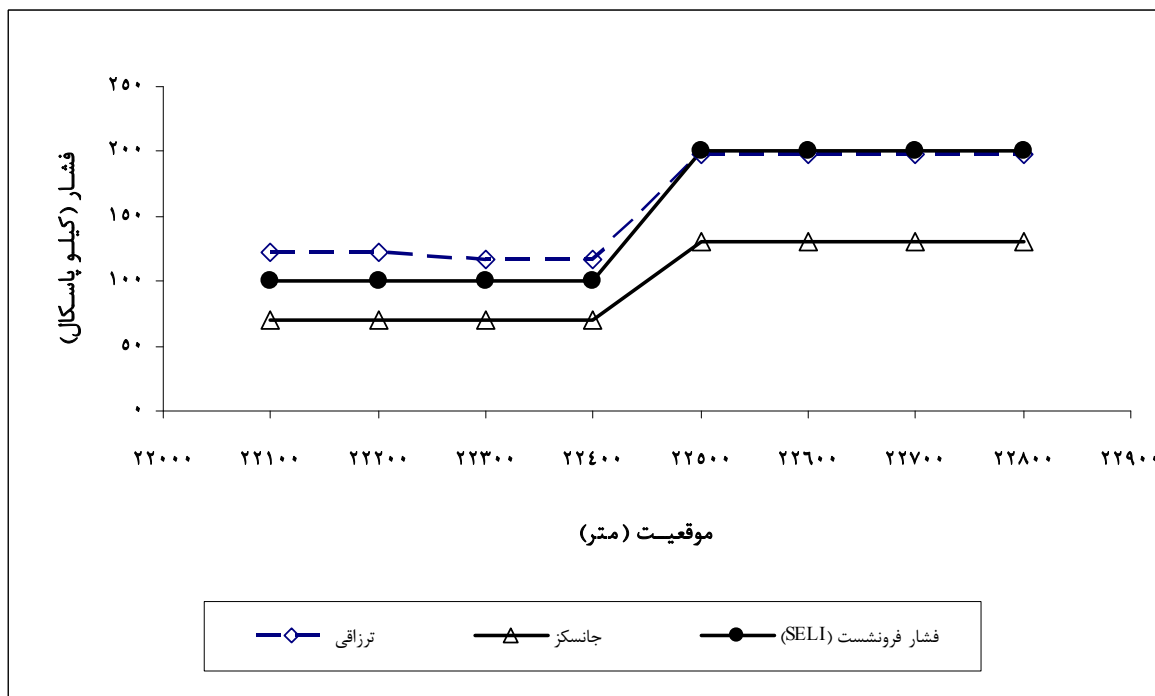
شکل ۹: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل در موقعیت ۱۹۵۰۰-۲۰۱۰۰



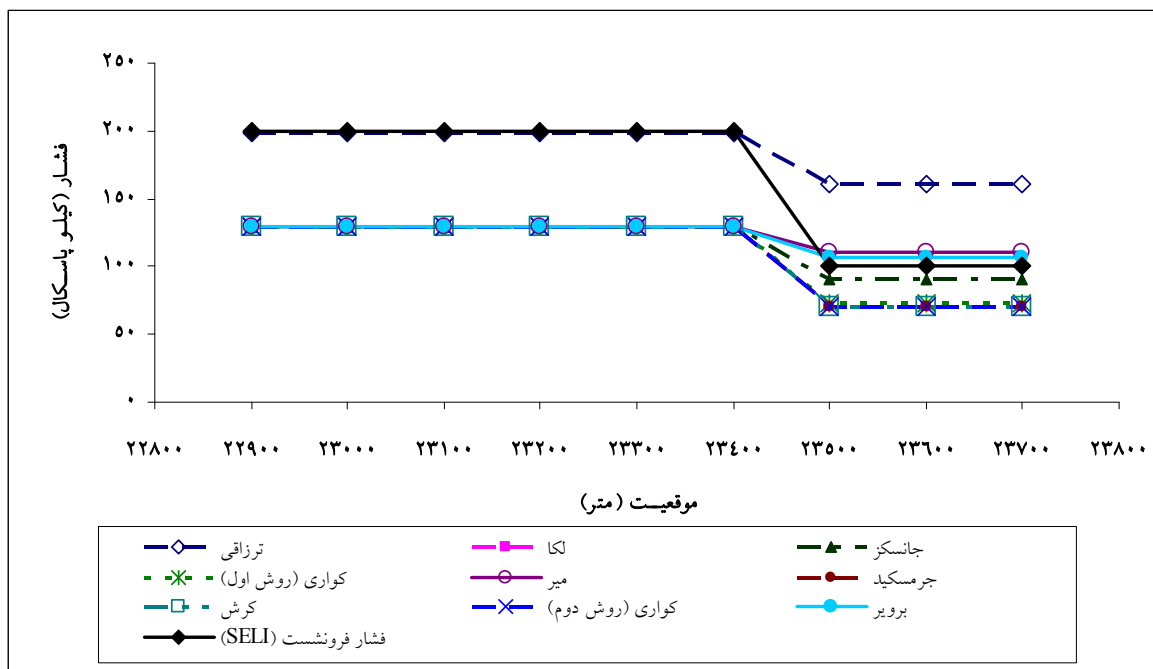
شکل ۱۰: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل در موقعیت ۲۰۲۰۰-۲۰۷۰۰



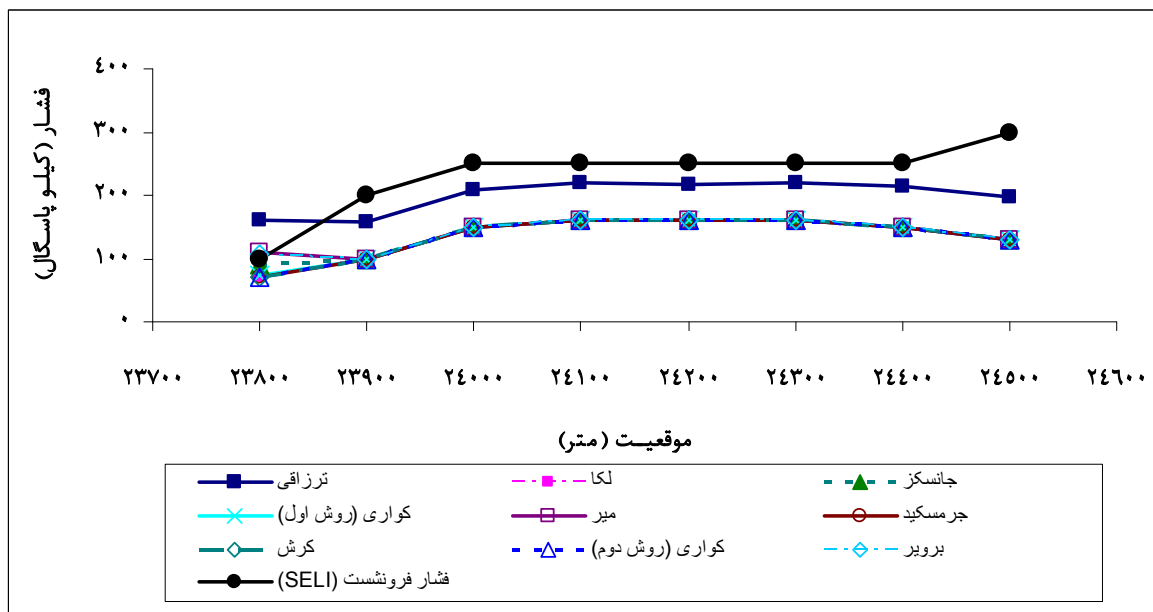
شکل ۱۱: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۲۱۴۰۰-۲۲۰۰۰



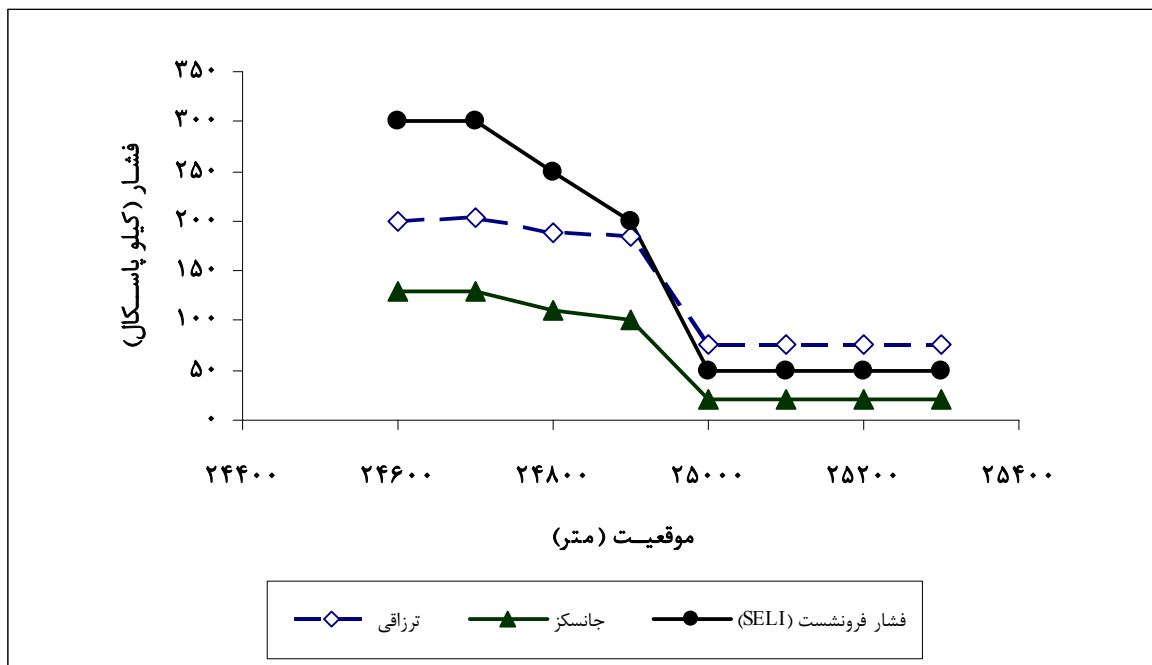
شکل ۱۲: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۲۲۱۰۰-۲۲۸۰۰



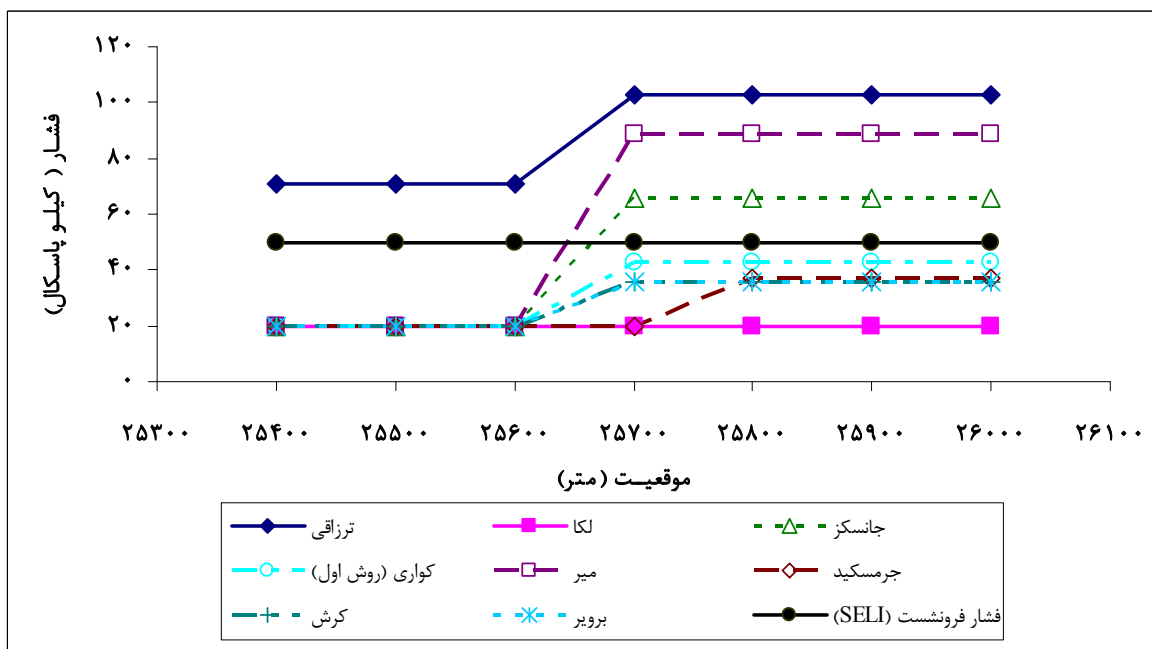
شکل ۱۳: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۲۲۹۰۰-۲۳۷۰۰



شکل ۱۴: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه کار تونل در موقعیت ۲۳۸۰۰-۲۴۵۰۰



شکل ۱۵: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل در موقعیت ۲۴۶۰۰-۲۵۲۰۰



شکل ۱۶: مقایسه کمترین فشار لازم برای نگهداری سینه‌کار تونل در موقعیت ۲۵۴۰۰-۲۶۰۰۰

منابع

منابع فارسی

وفائیان، محمود، ۱۳۷۶، خواص مهندسی خاک. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان
مهندسين مشاور زمين فن آوران، ۱۳۸۶، گزارشات زمين شناسی و ژئوتکنیکی خط هفت متروی تهران

منابع لاتین

Anagnostou.G and Kovari.K (1997) “Face stabilisation in closed shield tunnelling”. Rapid Excavation and Tunnel Construction, Las Vegas.

Australian Standard (2002), “Earth Retaining Structures” Standards Australia.

Braja M. Das (2007) “Advanced Soil Mechanics” Publishing Taylor & Francis, pp 40-42.

Borghi .X.F, (2006), PhD. thesis “Soil conditioning for pipe-jacking and tunnelling” University of Cambridge.

Broere, W (1998). “Face Stability Calculation for a Slurry Shield in Heterogeneous Soft Soils” Geotechnical Laboratory, Delft University of Technology, The Netherlands.

Broere,W (2001), PhD. Thesis.“Tunnel Face Stability & New CPT Applications” Delft University of Technology, The Netherlands.

Duarte, M (2007) PhD. thesis. “Foam as a soil conditioner in tunnelling: physical and mechanical properties of conditioned sands”, University of Oxford.

Gruebl F. (2006). “Modern design aspects of segmental lining”. International Seminar on Tunnels and underground works. LNEC, Lisbon, 29-30 of June 2006.

Smith, I (2006), “Smith’s elements of soil mechanics” Wiley Blackwell, Technology & Engineering 538 pages.

ITA, (2000), “Guidelines for the design of shield tunnel lining” International Tunnelling Association Volume 15, Number 3.

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. 531-549.

Kirsch.A. (2009), “On the face stability of shallow tunnels in sand”. logos Verlag Berlin GmbH.

Langmaack. L, (1990). “Advanced Technology of Soil Conditioning in EPB Shield Tunnelling .

Leca E., Dormieux L. (1990). “Upper and lower bound solutions for the face Stability of shallow circular tunnels in frictional material”. Geotechnique, Volume 40, No. 4, pp. 581-606.

Maidl, U (2003). “A comparison between slurry and earth pressure balanced shields” Maidl + Maidl Consulting Engineers, Bochum, Germany.

Milligan, G.W.E. (2000). “Lubrication and soil conditioning in tunnelling, pipejacking and microtunnelling”. Geotechnical Consulting Group. London, UK.

Mohkam. M.and, Wong Y.W. (1989) “three dimensional stability analysis of the tunnel face under fluid pressure”. In G. Swoboda, editor, Numerical Methods in Geomechanics, pages 2271–2278, Rotterdam. Balkema.

Psomas, S (2001). Master thesis, “Properties of foam/sand mixtures for tunnelling applications” University of Oxford.

Rehm U. (2006). “Global Overview of Shields Machines. Postgraduate master course in Tunnelling and Tunnel Boring Machines” V Edition 2005-06, Politecnico di Torino, Italia.

Repetto L., Tuninetti A., Guglielmetti V., Russo G (2005), Shield tunnelling in sensitive areas: a new design procedure for optimisation of the construction-phase management

Russo, G (2003) “evaluating the required face-support pressure in EPBS advance mode” Gallerie e Grandi Opere Sotterranee n.71.

Takemura.J, Kimura.T, Wong.F.S (2000). “Undrained stability of two-dimensional unlined tunnels in soft soil”. PROC OF JSCE No.418. pp 267-277.

Terzaghi. K. (1934). “Theoretical Soil Mechanics”. John Wiley & Sons.

Thewes, M (2009). “Face stability and annular grouting” ITI/AITES-Training Course Tunnel Engineering.

Tien.J.H (1996), Master thesis “A Literature Study of The Arching Effect”. civil engineering national taiwan university.

Toan.D.N, (2006), Master thesis “TBM and Lining Essential Interfaces” Politecnico di Torino.

Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu (2007) “Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control” publishing Taylor & Francis e-Library 89-100.

www.google earth.com

www.lovat.com

Abstract

The stability of the face is one of the most important factors in selecting the adequate method of excavation of a tunnel. This is particularly true for mechanized tunneling and specific boring machines (TBM), as, for examples, the Earth Pressure Balanced Shield (EPBS) and the Slurry Shield, have been developed in the recent decades for managing the instability of the excavation profile in unfavorable geotechnical and hydro geological conditions, with challenge external constraints. The support pressure is controlled by varying the screw rotation speed, as a function of the TBM penetration rate. This pressure must avoid both the collapse (active failure) and the blow-out (passive failure) of soil mass near the tunnel face. The analytical (Limit equilibrium and limit analysis methods), experimental and numerical (finite element method) methods are frequently used for analysis the stability of tunnel face. In this research, the tunnel face stability of north-south section of Tehran Metro Seven Line is investigated by analytical-experimental and numerical methods. Then the pressure values obtained using numerical method are comparing with analytical-experimental methods and finally the proper method for estimation of earth pressure in Tehran Metro Seven Line According to geological and geotechnical conditions of the region is proposed.

Keywords: TBM, earth pressure balance machine, Slurry Shield, Screw collapse, active failure, blow out, passive failure, analytical–experimental methods, Limit equilibrium method, limit analysis method, Numerical Methods, finite element method, Tehran Metro Seven Line.



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

**Estimation of earth pressure by analytical and numerical methods in
North-South Section of Tehran Metro Line 7**

Morteza Kazemi Chavaree

Supervisors:

Dr. Seyed-Mohammad Esmail Jalali

Dr. Mohammad Ataei

Advisors:

Dr. Shokrollah Zare

Mohammad Reza Bitarafan

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

December 2010