



دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه استخراج

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن

موضوع :

آنالیز حساسیت پارامترهای موثر و مقایسه روش های تعیین فشار جبهه کار با  
روش های تحلیلی و عددی - مطالعه موردی تونل جمع آوری آب های سطحی ابوز

حسین جهانی

استاد راهنما :

دکتر شکرآ...زارع

استاد مشاور:

حامد جمشیدی

شهریور ۹۱

شماره: ۰۶/۱۹۷۸۳-۰  
تاریخ: ۱۵/۰۶/۹۶  
ویرایش: ۱

بسمه تعالی



### فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خجاند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای حسین جهانی رشته مهندسی گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان آنالیز حساسیت پارامترهای موثر و مقایسه روش های تعیین فشار جنبه کار با روش های تحلیلی و عددی- مطالعه موردی نوتل جمع آوری آب های سطحی لیونتر که در تاریخ ۱۳۹۱/۰۶/۲۶ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: کلیه) امتیاز: ۱۵/۵  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادارهما	دکتر شکر زارع	استادیار	
۲- استاد مشاور	مهندس حامد جمشیدی	کارشناس ارشد	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر سوسن ابراهیمی	استادیار	
۴- استاد منتحن	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دکتریار	
۵- استاد منتحن	دکتر احمد رمضان زاده	استادیار	

رئیس دانشکده:



این مجموعه پیشگویی است به پدر و مادر عزیز و بزرگوارم که از تولد تا مرگم را  
مدیونشان هستم. آنان که همراه زندگیم و شریک شادی‌ها و غم‌هایم بودند.

به رسم ادب و قدرشناسی، بر خود لازم می‌دانم از آقای دکتر شکرالله زارع که صبورانه  
پشتیان و راهنمای من بودند و در طول انجام این پروژه با راهنمایی‌های مفید و  
مساعدت ایشان مسیر راه را هموار نمودند و از بیچ‌گونه کمک علمی و عملی دریغ نکردند کمال  
مشکر و قدردانی را داشته باشم.

از استاد ارجمند و مشاور پایان نامه ام جناب آقای مهندس حامد جمشیدی که همواره با  
صبر و حوصله به راهنمایی‌ام پرداخته‌اند، کمال مشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از همکاری و راهنمایی‌های صمیمانه‌ی آقای مهندس امید فروغ مشکر ویژه  
می‌نمایم.

# تعهد نامه

اینجانب حسین جهانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **آنالیز حساسیت پارامترهای موثر و مقایسه روشهای تعیین فشار جبهه کار با روشهای تحلیلی و عددی-مطالعه موردی تونل جمع آوری آبهای سطحی ابوذر** تحت راهنمایی دکتر شکرآ... زارع متعهد می شوم .

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

امضای دانشجو

تاریخ

## مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها 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.

## چکیده:

یکی از پارامترهای مهم در حفاری تونل‌ها در مناطق شهری با استفاده از ماشین سپر فشار تعادلی زمین (EPB)، فشار نگهداری جبهه‌کار تونل می‌باشد، چرا که اعمال فشار کم‌تر یا بیش‌تر از حد تعادلی به ترتیب باعث ریزش و بالازدگی در جبهه‌کار تونل و سطح زمین می‌شود که نتیجه آن توقف در حفاری، نشست یا بالازدگی در سطح زمین، آسیب به ساختمان‌های اطراف تونل و افزایش هزینه‌ها می‌شود. فشار لازم برای نگهداری جبهه‌کار تونل با استفاده از سرعت گردش نقاله ماریپیچ به عنوان تابعی از نرخ نفوذ ماشین کنترل می‌شود. فشار مناسب برای نگهداری جبهه‌کار تونل با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی تونل، بارهای ترافیکی و سازه‌ای، سطح آب زیرزمینی، پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک و ارتفاع روباره به کمک روش‌های تجربی-تحلیلی (تعادل حدی و آنالیز حدی) و عددی برآورد می‌شود. در این تحقیق پایداری جبهه‌کار در تونل جمع‌آوری آب‌های سطحی ابودر با استفاده از روش‌های تجربی-تحلیلی و عددی (المان محدود) بررسی شده است سپس مقادیر بدست آمده از این روش‌ها با هم مقایسه شده است و در نهایت به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف روی فشار سینه‌کار، آنالیز حساسیت روی این پارامترها صورت گرفته است و مشخص شد که آب‌زیرزمینی و چسبندگی بیش‌ترین تاثیر را در فشار نگهداری جبهه‌کار دارد.

کلمات کلیدی:

ماشین سپر فشار تعادلی زمین، فشار نگهداری جبهه‌کار تونل، ریزش جبهه‌کار، بالازدگی، نشست، نقاله ماریپیچ، روش‌های تجربی-تحلیلی و عددی، روش تعادل حدی، روش آنالیز حدی، روش المان محدود، تونل جمع‌آوری آب‌های سطحی ابودر، آنالیز حساسیت، آب‌زیرزمینی و چسبندگی

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه

- ۱-۱- کلیات ..... ۲
- ۲-۱- ضرورت و هدف تحقیق ..... ۳
- ۳-۱- روش انجام تحقیق ..... ۴
- ۴-۱- سازماندهی پایان نامه ..... ۴

فصل دوم : بررسی مکانیزم عملکرد ماشین‌های حفاری مکانیزه در زمین‌های سست

- ۱-۲- مقدمه ..... ۷
- ۲-۲- اصول کارسپرها ..... ۷
- ۳-۲- انواع ماشینهای سپر ..... ۷
- ۱-۳-۲- سپرهای باز ..... ۸
- ۲-۳-۲- سپر بسته با نگهداری مکانیکی ..... ۱۰
- ۳-۳-۲- سپر باز با نگهداری مکانیکی ..... ۱۱
- ۴-۳-۲- سپر بسته با نگهداری هوای فشرده ..... ۱۱
- ۵-۳-۲- سپر باز با نگهداری هوای فشرده ..... ۱۳
- ۶-۳-۲- سپر دوغابی بسته ..... ۱۴
- ۷-۳-۲- سپر آبی ..... ۱۶
- ۱-۷-۳-۲- پارامترهای کلیدی ..... ۱۷
- ۸-۳-۲- سپر دوغابی باز ..... ۱۹
- ۹-۳-۲- سپر فشار تعادلی زمین ..... ۲۰
- ۱-۹-۳-۲- جنبه‌های زمین شناسی و ژئوتکنیک ..... ۲۱
- ۲-۹-۳-۲- شرایط زمین ..... ۲۲
- ۳-۹-۳-۲- چگونگی خروج مواد حفاری شده ..... ۲۳
- ۴-۲- معیارهای انتخاب بین سپر دوغابی و فشار تعادلی زمین ..... ۲۵



۲۵.....	۱-۴-۲- حوزه کاربردی (نوع خاک).....
۲۸.....	۲-۴-۲- کله حفار و ابزارهای حفاری .....
۲۹.....	۳-۴-۲- تزریق در فضای خالی پشت سگمنت .....
۳۱.....	۴-۴-۲- سیستم کنترلی .....
۳۱.....	۵-۴-۲- عملیات مواد خروجی.....
۳۲.....	۵-۲- عوامل موثر بر افت حجم در تونلسازی مکانیزه .....
۳۴.....	۶-۲- مقایسه بین سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین .....
۳۶.....	۷-۲- جمع‌بندی .....

### فصل سوم : روش‌های برآورد فشار نگهداری جبهه‌کار

۳۸.....	۱-۳- مقدمه .....
۳۸.....	۲-۳- طراحی فشار جبهه‌کار.....
۴۰.....	۳-۳- روش‌های تعیین فشار جبهه‌کار.....
۴۰.....	۱-۳-۳- روش‌های تجربی برآورد فشار جبهه‌کار.....
۴۱.....	۱-۳-۳-۱- روش COB.....
۴۱.....	۳-۳-۱-۲- روش ابداع شده توسط یاماهاکی .....
۴۱.....	۳-۳-۱-۳- نظریه ترزاقی .....
۴۴.....	۳-۳-۱-۳-۱- پیشنهاد ترزاقی برای بارهای وارده روی سیستم نگهداری تونل .....
۴۸.....	۳-۳-۲- روش‌های تحلیلی برآورد فشار جبهه‌کار.....
۵۰.....	۳-۳-۲-۱- روش هورن .....
۵۰.....	۳-۳-۲-۲- روش میوریمما (۱۹۶۶).....
۵۲.....	۳-۳-۲-۳- روش بورمز و بنرمارک.....
۵۳.....	۳-۳-۲-۴- روش اتکینسون و پاتز (۱۹۷۷) .....
۵۴.....	۳-۳-۲-۵- روش دیویس و همکاران(۱۹۸۰).....
۵۵.....	۳-۳-۲-۶- روش کروس (۱۹۸۷).....

۵۶.....	۳-۳-۲-۷- روش محکم و همکاران (۱۹۸۹)
۵۷.....	۳-۳-۲-۸- روش لکا و دورمیو (۱۹۹۰)
۶۱.....	۳-۳-۲-۹- روش جانسکز و استاینر (۱۹۹۴)
۶۷.....	۳-۳-۲-۱- ضریب ایمنی
۶۷.....	۳-۳-۲-۱۰- روش کواری و آنگونستا (۱۹۹۶)
۷۱.....	۳-۳-۲-۱۱- روش برویر
۷۵.....	۳-۳-۲-۱۲- روش کارانزا-تورس (۲۰۰۴)
۷۷.....	۳-۳-۳- روش‌های عددی در برآورد فشار جبهه‌کار
۷۷.....	۳-۳-۳-۱- آنالیز عددی دو بعدی
۷۸.....	۳-۳-۳-۲- آنالیز عددی سه بعدی
۷۹.....	۳-۳-۴- شرایط تعادل و روش بهینه پیشروی
۸۰.....	۳-۳-۴-۱- شرایط تعادل برای پیشروی سپر
۸۳.....	۳-۳-۵- انتخاب فشار جبهه‌کار
۸۴.....	۳-۳-۶- مقایسه بین روش‌های مختلف برآورد فشار جبهه‌کار
۸۷.....	۳-۴- جمع‌بندی

#### فصل چهارم : خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر احداث تونل ابودر

۹۰.....	۴-۱- ساختگاه تونل ابودر
۹۱.....	۴-۲- چینه شناسی مسیر احداث تونل
۹۲.....	۴-۳- وضعیت آب زیرزمینی در مسیر تونل
۹۳.....	۴-۴- رده بندی خاک در مسیر احداث تونل ابودر
۹۶.....	۴-۵- جمع‌بندی

#### فصل پنجم : محاسبه فشار نگهداری جبهه‌کار تونل با روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی

۹۸.....	۵-۱- مقدمه
۹۸.....	۵-۲- محاسبات فشار جبهه‌کار تونل به روش تحلیلی و تجربی

۱۰۲	۵-۲-۱- محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در مقطع شماره ۱
۱۰۷	۵-۲-۲- محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در مقطع شماره ۲
۱۰۷	۵-۲-۳- محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در مقطع شماره ۳
۱۰۸	۵-۲-۴- محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در مقطع شماره ۴
۱۱۴	۵-۳- محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل با استفاده از مدل سازی عددی
۱۱۵	۵-۳-۱- معرفی نرم افزار
۱۲۱	۵-۳-۲- تعیین فشار لازم برای نگهداری
۱۲۲	۵-۳-۲-۱- محاسبه فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع شماره ۱
۱۲۳	۵-۳-۲-۲- محاسبه فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع شماره ۲
۱۲۴	۵-۳-۲-۳- محاسبه فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع شماره ۳
۱۲۴	۵-۳-۲-۴- محاسبه فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع شماره ۴
۱۲۵	۵-۴- مقایسه نتایج روش های تجربی، تحلیلی و مدل سازی عددی
۱۲۸	۵-۵- آنالیز حساسیت
۱۲۸	۵-۵-۱- زاویه اصطکاک داخلی
۱۲۹	۵-۵-۲- چسبندگی
۱۳۰	۵-۵-۳- بار سطحی
۱۳۱	۵-۵-۴- سطح آب زیرزمینی
۱۳۳	۵-۵-۵- وزن مخصوص خاک
۱۳۳	۵-۵-۶- نسبت روباره به قطر (C/D)
۱۳۵	۵-۶- نتیجه گیری

**فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات**

۱۳۷	۶-۱- مقدمه
۱۳۷	۶-۲- نتیجه گیری
۱۴۰	۶-۳- پیشنهادات

منابع ..... ۱۴۴

فهرست اشکال

- شکل (۲-۲): سپرهای نیمه مکانیزه ..... ۹
- شکل (۱-۲): سپر دستی ..... ۹
- شکل (۳-۲): سپرهای مکانیزه ..... ۹
- شکل (۴-۲): سپر بسته با نگهداری مکانیکی ..... ۱۰
- شکل (۵-۲): سپر باز با نگهداری مکانیکی ..... ۱۱
- شکل (۶-۲): سپر بسته با نگهداری هوای فشرده ..... ۱۲
- شکل (۷-۲): سپر باز با نگهداری هوای فشرده ..... ۱۴
- شکل (۸-۲): سپرهای دوغابی ..... ۱۶
- شکل (۹-۲): هیدروشیلد/ سپر ترکیبی با دو اتاقک. ۱- کله حفار، ۲- دیواره فشار، ۲- بالشتک هوا، ۴- دیواره غوطه ورکنی  
۵- خط دوغاب ۶- سنگ شکن ۷- خط خوراکدهی ۸- نصاب ..... ۱۷
- شکل (۱۰-۲): سپر دوغابی باز از نوع تیکس ..... ۱۹
- شکل (۱۱-۲): نازل های مواد افزودنی در EPB ..... ۲۳
- شکل (۱۲-۲): سپر فشار تعادلی زمین. ۱- سینه کار، ۲- کله حفار، ۳- اتاقک حفاری، ۴- دیواره فشار، ۵- جک فشاری،  
۶- نقاله ماریپیچی، ۷- نصاب، ۸- سگمنت ..... ۲۴
- شکل (۱۳-۲): مودهای عملیاتی ماشین EPB ..... ۲۴
- شکل (۱۴-۲): دامنه کاربرد ماشین EPB ..... ۲۷
- شکل (۱۵-۲): دامنه استفاده از دستگاه EPB ..... ۲۸
- شکل (۱۶-۲): ناحیه بازشدگی کله حفار در ماشین های EPB و ناحیه بازشدگی کله حفار در ماشین دوغابی ..... ۲۹
- شکل (۱۷-۲): پر شدن فضای خالی پشت سگمنت ..... ۳۰
- شکل (۱۸-۲): افت جبهه کار ..... ۳۲
- شکل (۱۹-۲): افت شعاعی ..... ۳۲
- شکل (۲۰-۲): افت کلی ..... ۳۳
- شکل (۱-۳): محل سنسورهای فشار روی دیواره فشار ..... ۳۸

۴۲	شکل (۲-۳): ناحیه سست‌شدگی در تونل‌های کم عمق
۴۲	شکل (۳-۳): تشکیل قوس در تونل‌های عمیق
۴۴	شکل (۴-۳): قوس زمین
۴۵	شکل (۵-۳): رابطه بین ارتفاع سست‌شدگی با ارتفاع روباره روی یک تونل در ماسه یا سنگ خرد شده
۴۶	شکل (۶-۳): مدل بار روی تونل
۴۷	شکل (۷-۳): قوس بالای تونل
۵۱	شکل (۹-۳): مدل پایداری جبهه‌کار در روش میوریما
۵۲	شکل (۱۰-۳): پارامترهای موثر در روش بورمز و بنرمارک
۵۳	شکل (۱۱-۳): نمودار فاکتور بارگذاری و پارامترهای وابسته
۵۴	شکل (۱۲-۳): شمایی از روش بارگذاری در روش دیویس
۵۵	شکل (۱۳-۳): عدد پایداری برای روش کران بالا و پایین برای یک تونل
۵۶	شکل (۱۴-۳): روش‌های مختلف شکست در جبهه‌کار تونل به روش کروس
۵۷	شکل (۱۵-۳): مکانیزم شکست در روش محکم
۵۸	شکل (۱۶-۳): مقطع تونل و پارامترهای موثر در روش لکا و دورميو
۶۰	شکل (۱۷-۳): مکانیزم‌های شکست مخروطی
۶۰	شکل (۱۸-۳): مقادیر $N_s^{c+}$ و $N_\gamma^{c+}$ برای مکانیزم نشست
۶۱	شکل (۱۹-۳): مدل تعادل حدی سه بعدی
۶۳	شکل (۲۰-۳): شمایی از چگونگی توزیع بار روی جبهه‌کار تونل در روش جانسکز و استاینر
۶۶	شکل (۲۱-۳): شکل ضریب فشار جانبی خاک
۶۶	شکل (۲۲-۳): نمودار زاویه شکست گوه
۶۸	شکل (۲۳-۳): مدل سیلو و گوهی در روش کواری و آنگونستا
۶۹	شکل (۲۴-۳): فشار نگهداری موثر
۶۹	شکل (۲۵-۳): فشار نگهداری موثر به عنوان تابعی از چسبندگی و اختلاف هد هیدرواستاتیک
۷۰	شکل (۲۵-۳): نمودارهای محاسبه برای ضرایب بدون بعد $F_3$ و $F_2$ ، $F_1$ ، $F_0$

۷۲	..... شکل (۳-۲۷): مدل چند گوه‌ای
۷۴	..... شکل (۳-۲۸): مشخصات نوار باریکی از ستون قوسی در خاک
۷۶	..... شکل (۳-۲۹): طرح اصلی کاکو- کرزل برای محاسبه فشار وارد بر تونل
۷۷	..... شکل (۳-۳۰): محاسبه شعاع اصلاح شده به منظور آنالیز پایداری جبهه کار
۷۷	..... شکل (۳-۳۱): شبیه‌سازی دو بعدی که جابجایی قائم و محدوده تسلیم نشان داده شده است
۷۸	..... شکل (۳-۳۲): مقطع طولی در مدل دو بعدی
۷۹	..... شکل (۳-۳۳): مدل‌های سه بعدی (تونل دوقلو حفر شده با ماشین EPB)
۸۱	..... شکل (۳-۳۴): کاتردهای استفاده شده در تست‌های آزمایشگاهی
۸۲	..... شکل (۳-۳۵): مدل EPB بکار برده شده در تست‌های آزمایشگاهی
۸۳	..... شکل (۳-۳۶): تغییرات فشار جانبی خاک در مقابل جابجایی جبهه کار
۸۵	..... شکل (۳-۳۷): مقایسه روش‌های برآورد فشار جبهه کار و چگونگی گسترش زون پلاستیک
۹۰	..... شکل (۴-۱): موقعیت مسیر تونل بر روی بخشی از نقشه تهران
۱۰۰	..... شکل (۵-۱): مقطع شماره ۱
۱۰۱	..... شکل (۵-۲): مقطع شماره ۲
۱۰۱	..... شکل (۵-۳): مقطع شماره ۳
۱۰۱	..... شکل (۵-۴): مقطع شماره ۴
۱۰۸	..... شکل (۵-۱): گوه‌های تشکیل شده در مقطع شماره ۳
۱۱۶	..... شکل (۵-۲): تنش کل در مدل مربوط به بلوک شماره ۱
۱۱۹	..... شکل (۵-۳): مش بندی و بارگذاری الف)مقطع ۱ ب)مقطع ۲ ج)مقطع ۳ د)مقطع ۴
۱۲۲	..... شکل (۵-۴): پایان فاز محاسباتی
۱۲۷	..... شکل (۵-۵): نتایج حاصل از روش‌های مختلف جهت محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل
۱۲۹	..... شکل (۵-۶): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب زاویه اصطکاک داخلی
۱۳۰	..... شکل (۵-۷): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب چسبندگی
۱۳۱	..... شکل (۵-۸): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب بار سطحی

- شکل (۵-۹): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب سطح آب زیرزمینی ..... ۱۳۲
- شکل (۵-۱۰): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب وزن مخصوص خاک ..... ۱۳۳
- شکل (۵-۱۱): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب نسبت روباره به قطر (C/D) ..... ۱۳۴

فهرست جداول

- جدول (۲-۱): مقایسه کلی بین سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین ..... ۳۶
- جدول (۳-۱): مقایسه روشهای برآورد فشار جبهه کار ..... ۳۹
- جدول (۳-۲): ارتفاع سس تشدگی در روش ترزاقی ..... ۴۷
- جدول (۳-۳): روشهای تحلیلی برای برآورد فشار جبهه کار ..... ۴۹
- جدول (۳-۴): مقادیر ضریب فشار جانبی خاک ..... ۶۵
- جدول (۳-۵): مقادیر زاویه شکست گوه ..... ۶۶
- جدول (۳-۶): مقادیر مختلف ضرایب فشار جانبی ..... ۶۷
- جدول (۳-۷): ضرایب ایمنی پیشنهادی برای فشارهای خاک و آب ..... ۶۷
- جدول (۳-۹): فرمولهای تحلیلی و تجربی برآورد فشار کل جبهه کار ..... ۸۴
- جدول (۳-۱۰): روشهای محاسبه فشار نگهداری با توجه به شرایط ژئوتکنیکی ..... ۸۸
- جدول (۴-۱): مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده در مسیر تونل ..... ۹۳
- جدول (۴-۲): ناحیه بندی مسیر تونل براساس گسترش واحدهای خاکی در برگیرنده جبهه کار ..... ۹۵
- جدول (۵-۱): مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل ..... ۹۸
- جدول (۵-۲): مشخصات هندسی و پارامترهای ژئومکانیکی در مقاطع مختلف ..... ۱۰۰
- جدول (۵-۳): استاندارد بارگذاری ..... ۱۰۲
- جدول (۵-۴): محاسبه فشار نگهداری لازم برای جبهه کار تونل ..... ۱۰۶
- جدول (۵-۵): محاسبه فشار نگهداری لازم برای جبهه کار تونل ..... ۱۰۷
- جدول (۵-۶): محاسبه فشار نگهداری لازم برای جبهه کار تونل ..... ۱۰۷
- جدول (۵-۷): مشخصات پارامترهای هر لایه خاک در روش برویر ..... ۱۰۸
- جدول (۵-۸): محاسبه فشار نگهداری لازم برای جبهه کار تونل ..... ۱۱۴

---

جدول (۵-۹): مشخصات شبکه اجزاء محدود مقاطع مورد نظر	۱۱۶
جدول (۵-۱۰): خصوصیات ماشین EPB	۱۱۸
جدول (۵-۱۰): خصوصیات سگمنت	۱۱۸
جدول (۵-۱۱): برآورد فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع ۱	۱۲۳
جدول (۵-۱۲): برآورد فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع ۲	۱۲۳
جدول (۵-۱۳): برآورد فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع ۳	۱۲۴
جدول (۵-۱۴): برآورد فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع ۴	۱۲۵
جدول (۵-۱۵): نتایج حاصل از روش‌های مختلف جهت محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل	۱۲۶



# فصل اول

---

## مقدمه

## ۱-۱- کلیات

با توجه به توسعه و گسترش شهرها و مراکز صنعتی، از تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی برای انتقال نفت و گاز تولید برق، ایستگاه‌های مترو، حمل و نقل داخل و خارج از شهر، احداث فضاهای زیرزمینی استراتژیکی و دفاعی و انتقال آب و فاضلاب استفاده می‌شود. برای انتقال آب و فاضلاب، گزینه‌ای به جز استفاده از مجاری زیرزمینی وجود نداشته و شبکه‌های بزرگ و گسترده تونل‌های آب و فاضلاب شهری در حال احداث می‌باشند. امروزه با پیشرفت تکنولوژی، حفاری تونل‌ها عمدتاً به صورت تمام مقطع و با استفاده از ماشین‌های حفاری مکانیزه انجام می‌شود. ماشین‌های حفاری در نواحی شهری با توجه به شرایط زمین‌شناسی به پنج نوع سپر باز، سپر هوای فشرده، سپر دوغابی، سپر فشار تعادلی زمین و سپر ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شوند که از این میان، ماشین سپر فشار تعادلی زمین و سپر دوغابی متداول‌تر می‌باشند. سپر دوغابی برای حفاری در خاک‌های درشت‌دانه و سپر فشار تعادلی زمین معمولاً برای حفاری در خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد، البته نسل امروزی ماشین فشار تعادلی در همه نوع خاک توسعه داده شده است. برآورد فشار نگهداری لازم برای پایداری جبهه‌کار حفاری یکی از مهمترین عوامل مؤثر در راندمان ماشین حفاری در نواحی شهری است. فشار جبهه‌کار با تغییر سرعت گردش نقاله مارپیچی که خود تابعی از نرخ نفوذ TBM است کنترل می‌شود. اگر فشار اعمالی به جبهه‌کار کمتر از حد تعادلی باشد، فرونشست رخ می‌دهد و اگر بیشتر از حد تعادلی باشد، بالازدگی رخ می‌دهد. روش‌های تعیین فشار جبهه‌کار به سه دسته تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی می‌شود. در روش‌های تجربی بر اساس مشاهدات انجام شده در حین حفاری تونل، رابطه تجربی بین یک یا چند پارامتر و مقدار فشار جبهه‌کار برقرار می‌شود. در روش‌های تحلیلی پارامترهای متعددی در تعیین فشار جبهه‌کار لحاظ می‌شود که این روش‌ها اعداد دقیق و مناسبی برای طراحی‌های مرحله تکمیلی در اختیار طراح قرار می‌دهند. روش‌های عددی نیز معمولاً برای تایید مقادیر حاصله از روش تحلیلی و تعیین فشار جبهه‌کار در موارد

خاص مانند برخورد تونل با معارضین مورد استفاده قرار می‌گیرد. عوامل موثر در فشار نگهداری جبهه‌کار تونل شامل پارامترهای هندسی تونل، بارهای ترافیکی و سازه‌ای، سطح آب‌بیرزمینی، پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک و ارتفاع روباره می‌باشد. از جمله فعالیت‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به محاسبه فشار لازم برای نگهداری جبهه‌کار تونل متروی شهر پورتوی پرتغال توسط جردانو رسو در سال ۲۰۰۳ با استفاده از سه روش تحلیلی جانسکز- استاینر<sup>۱</sup>، انگونستا- کواری<sup>۲</sup>، لکا- دورمیو<sup>۳</sup> اشاره کرد. همچنین می‌توان به بررسی پایداری جبهه‌کار تونل‌های کم عمق حفر شده در زمین‌های ماسه‌ای، با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی توسط کرش<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۰ اشاره کرد. از جمله کارهای دیگر در این زمینه می‌توان به محاسبه فشار جبهه‌کار تونل در خط هفت متروی تهران و خط دو متروی مشهد و پروژه تونل بولگانا در ایتالیا [۲] و متروی تورینو در ایتالیا توسط راسو اشاره کرد [۲۵]. از جمله مدلسازی‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به کارهای انجام شده توسط سان با استفاده از نرم‌افزار ANSYS در سال ۲۰۰۶ و مولون با استفاده از نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup> در سال ۲۰۰۹ اشاره کرد [۲۹].

## ۱-۲- ضرورت و هدف تحقیق

یکی از مؤلفه‌های بحرانی در هنگام استفاده از ماشین سپر فشار تعادلی زمین، هم در فاز طراحی و هم در فاز ساخت، تخمین فشار نگهداری جبهه‌کار تونل می‌باشد. برآورد فشار نگهداری لازم برای پایداری جبهه‌کار حفاری یکی از مهم‌ترین عوامل بر راندمان حفاری ماشین در زمین‌های خاکی می‌باشد. 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. هدف از انجام این تحقیق

<sup>۱</sup> Jancsecz & Steiner

<sup>۲</sup> Anagnostou & Kovari

<sup>۳</sup> Leca & Dormieux

<sup>۴</sup> Crouch

برآورد فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی همانند<sup>۱</sup> COB جانسکز و استاینر لکا و دورمیو، آنگونستا و کواری و برویرمی باشد و این فشارها با نتایج حاصل از روش عددی مقایسه می‌شود و بهترین روش برای برآورد فشار جبهه کار انتخاب می‌گردد. برای مدلسازی عددی می‌توان از نرم‌افزارهای ANSYS، PLAXIS ۳D TUNNEL، ABAQUS، FIAC ۲D و FLAC ۳D استفاده کرد. در این تحقیق از نرم‌افزار PLAXIS ۳D TUNNEL با توجه به کاربرد گسترده آن در محیط‌های خاکی استفاده شده است.

### ۳-۱- روش انجام تحقیق

ابتدا با استفاده از اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های ژئوتکنیکی مختلف بر روی مغزه‌های حفاری شده پارامترهای ژئومکانیکی خاک به دست آمده است. از این پارامترها برای طراحی تونل و سیستم نگهداری تونل و تحلیل پایداری جبهه کار تونل استفاده می‌شود. در این تحقیق از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی در برآورد فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل استفاده شده و نتایج حاصل از این روش‌ها با هم مقایسه می‌شود و در نهایت به منظور بررسی میزان تاثیر هر یک از پارامترهای موثر در فشار جبهه کار آنالیز حساسیت انجام شده است. مطالعات انجام گرفته در زمینه تاثیر پارامترهای موثر روی فشار نگهداری جبهه کار محدود و پراکنده بوده و عملاً در این حیطه کار چندانی صورت نگرفته است، لذا ضرورت این تحلیل حساسیت درک می‌شود.

### ۴-۱- سازمان دهی پایان نامه

مطالب این پایان نامه در شش فصل ارائه شده است. در فصل اول راجع به کلیات و ضرورت انجام تحقیق بحث می‌شود و سرفصل بقیه مطالب به شرح زیر می‌باشد:

<sup>۱</sup> Centre Underground Bowen

فصل دوم- بررسی مکانیزم ماشین‌های حفاری مکانیزه در مناطق شهری: در این فصل به معرفی ماشین‌های متداول در حفاری تونل‌ها در مناطق شهری، مکانیزم و کارایی آن‌ها، مزایا و معایب و تفاوت‌های ظاهری آن‌ها پرداخته می‌شود.

فصل سوم- روش‌های برآورد فشار نگهداری جبهه‌کار: در این فصل به بررسی روش‌های برآورد فشار جبهه‌کار، قابلیت و کاربرد هر روش با توجه به نوع خاک و شرایط آب‌زیرزمینی پرداخته می‌شود.

فصل چهارم- خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر احداث تونل ابوذر: در این فصل به موقعیت و ساختار تونل ابوذر، وضعیت آب‌زیرزمینی، وضعیت زمین‌شناسی و طبقه‌بندی خاک مسیر احداث تونل پرداخته شده است.

فصل پنجم- محاسبه فشار نگهداری جبهه‌کار تونل با روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی: در این فصل به برآورد فشار جبهه‌کار با روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی پرداخته شده است و نتایج حاصل از این روش‌ها با هم مقایسه شده و در نهایت روی پارامترهای اساسی و تاثیرگذار روی فشار نگهداری جبهه‌کار آنالیز حساسیت انجام شده است.

فصل ششم- جمع بندی و نتیجه‌گیری

## فصل دوم

---

بررسی مکانیزم عملکرد ماشین‌های حفاری مکانیزه

در زمین‌های سست

## ۲-۱- مقدمه

در دهه های اخیر استفاده از ماشین های سپردار تمام مقطع در زمین های نرم گسترش یافته است، بنابراین انتخاب صحیح ماشین حفاری جزء مهم ترین موارد تاثیرگذار بر پیشروی تونل در مناطق شهری می باشد. زیرا این عامل تاثیر زیادی بر عملکرد ماشین، عوارض جانبی در سطح زمین (پدیده نشست و بالازدگی) استهلاک ابزارهای برشی و هزینه های ناشی از این موارد دارد. ماشین های معمول مورد استفاده برای حفر تونل در خاک معمولاً به سپر دوغابی یا سپر آبی و سپر فشار تعادلی زمین تقسیم بندی می شوند [۲].

۲-۲- اصول کار سپرها<sup>۱</sup>

پوسته سپر عموماً از یک استوانه فولادی ضخیم تشکیل شده است که از داخل این استوانه می توان عملیات حفاری را انجام داد. عموماً سپرها با توجه به تجهیزات و تمهیدات پیش بینی شده بر روی آنها به منظور پایدارسازی جبهه کار به انواع مختلف تقسیم بندی می شوند. بعضی از سپرها به منظور ایمنی و جلوگیری از ریزش خاک در نظر گرفته می شوند و برخی دیگر در خود تجهیزات و امکانات حفاری را دارا می باشند. در هنگام حفر تونل، پوسته سپر عموماً وظیفه نگهداری موقت لایه های بالایی تونل و نهایتاً وظیفه نصب پوشش داخلی تونل را بر عهده دارد [۱]. در ادامه به بررسی انواع ماشین های حفاری مکانیزه و مکانیزم عملکرد این ماشین ها پرداخته می شود.

## ۲-۳- انواع ماشین های سپر

ماشین های سپر با توجه به نحوه عملکرد، نوع خاک و مشخصات زمین، شکل ظاهری و چگونگی پایدارسازی خاک و چگونگی انتقال خاک به گروه های مختلف طبقه بندی می شوند [۱].

---

<sup>۱</sup> shield

۲-۳-۱- سپرهای باز<sup>۱</sup>

اصول کلی کارکرد این گونه از سپرها: سپرهای باز نوعی از TBM ها هستند که در آنها دیواره فشار<sup>۲</sup> وجود ندارد و شامل سپرهای دستی (شکل (۲-۱))، سپرهای نیمه مکانیزه (شکل (۲-۱)) و سپرهای مکانیزه (شکل (۲-۱)) می باشند. در سپرهای دستی حفاری با استفاده از بیل و کلنگ و سایر ابزارآلات دستی انجام می شود. در نوع نیمه مکانیزه حفاری با استفاده از رودهدر یا بیل مکانیکی متصل به سپر انجام شده و از سیستم تخلیه و جابجایی اتوماتیک استفاده می شود. در نوع مکانیزه ماشین دارای کله حفر می باشد که وظیفه برش جبهه کار را دارد. در این روش سرعت حفاری بیش تر شده و نیروی انسانی کمتری نسبت به دو روش قبل وجود دارد [۳].

اجزاء اصلی ماشین شامل موارد زیر است:

- سیستم حفاری جبهه کار (دستی، نیمه مکانیزه و مکانیزه)
- سپر نگهدارنده منطبق با مقطع حفاری (مقاطع دایره ای و غیر دایره ای)
- سیستم پیشران که متشکل از جک های محوری<sup>۳</sup> می باشد.

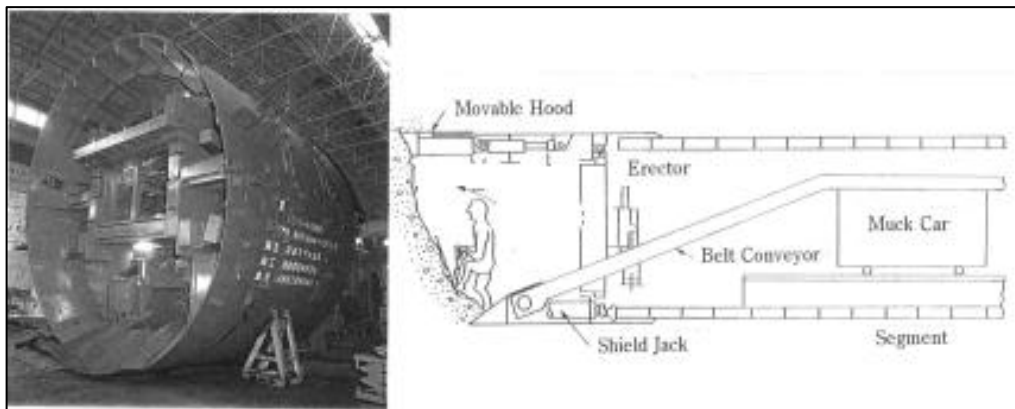
حوزه کاربری این دستگاه شامل توده سنگ هایی با ویژگی های متنوع از ضعیف تا خیلی ضعیف، به طور عمومی زمین های چسبنده یا خود نگهدار و هم چنین در زمین هایی که دارای ظرفیت خود نگهداری نیستند می توان با استفاده روش های نگهداری یا تحکیم قبل از حفر مقطع، از این ماشین استفاده کرد [۴]. این ماشین مناسب برای ماسه هایی با چگالی بالا، سنگ ریزه و سیلت سفت شده می باشد [۳].

<sup>۱</sup> Open Shield

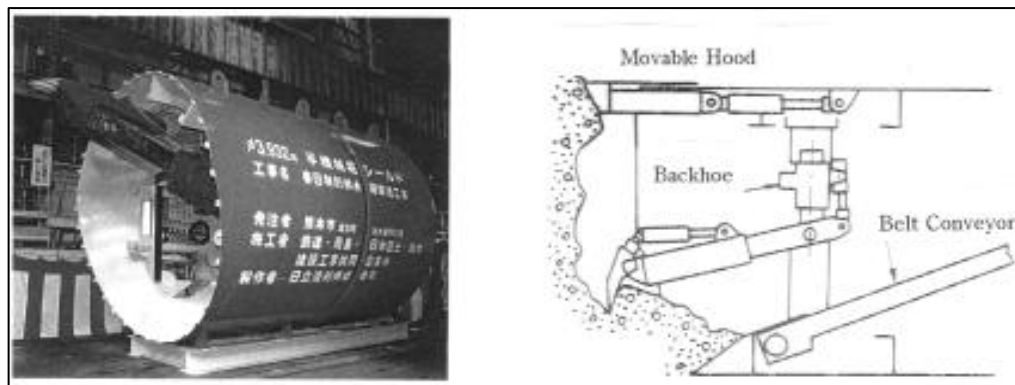
<sup>۲</sup> bulkhead

<sup>۳</sup> Thrust cylinder

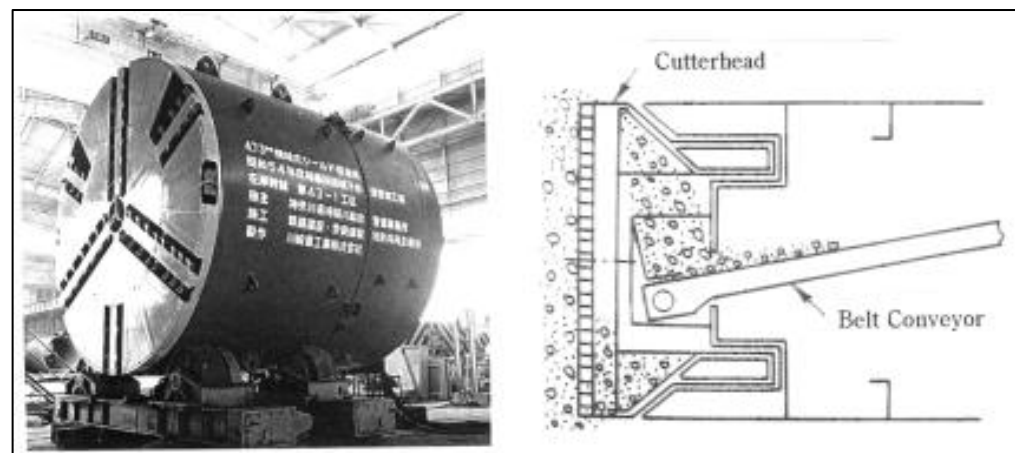




شکل (۱-۲): سپر دستی [۴]



شکل (۲-۲): سپرهای نیمه مکانیزه [۴]



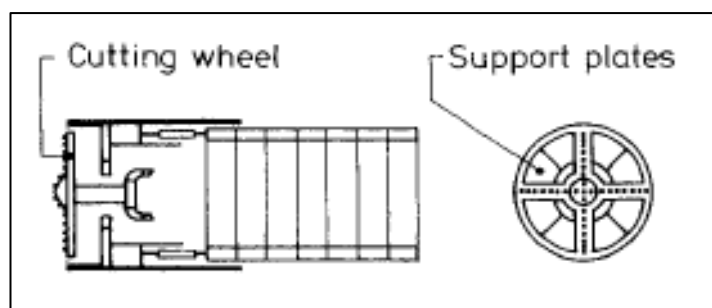
شکل (۳-۲): سپرهای مکانیزه [۴]

۲-۳-۲- سپر بسته با نگهداری مکانیکی<sup>۱</sup>

اصول کارکرد: ماشین سپر بسته با نگهداری مکانیکی یک نوع TBM است که دارای سپر سرتاسری با فاصله کمی از جبهه کار تونل می باشد. در این ماشین کله حفار علاوه بر برش جبهه کار وظیفه نگهداری آن را نیز بر عهده دارد که این کار با استفاده از صفحات متحرک<sup>۲</sup> و نیروی پیشران جک های هیدرولیکی مخصوص تامین می شود. مواد کنده شده از جبهه کار نیز از طریق دهانه های قابل تنظیم خارج می شوند. اجزاء اصلی ماشین شامل موارد زیر است:

- کله حفار چرخان که مجهز به ناخن و ابزار برشی دنداندار، سیستم اصلی انتقال مواد کنده شده و سپر محافظ سیلندری شکل که در برگیرنده تمامی اجزاء اصلی ماشین است.
- جک های پیشران طولی

حوزه کاربری این دستگاه شامل سنگ های ضعیف، زمین های چسبناک تا قسمتی چسبناک و به طور کلی در زمین های خود نگهدار در غیاب آب های زیرزمینی استفاده می شود [۳].



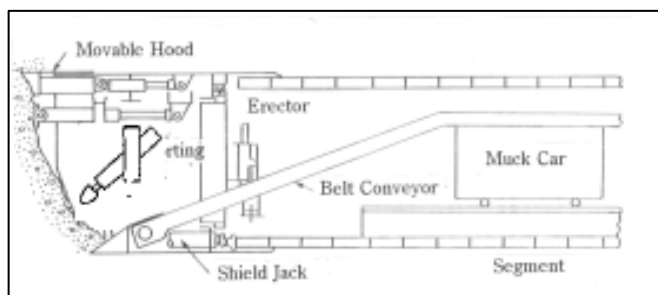
شکل (۲-۴): سپر بسته با نگهداری مکانیکی [۸]

<sup>۱</sup> Mechanically supported closed shield

<sup>۲</sup> Mobile plates

۲-۳-۳- سیر باز با نگهداری مکانیکی<sup>۱</sup>

اصول کلی کارکرد این گونه از سپرها شبیه به سپرهای نوع باز می باشد که پایداری جبهه کار با استفاده از صفحات فلزی و فشار جک های محوری تامین می شود.



شکل (۲-۵): سیر باز با نگهداری مکانیکی [۴]

اجزاء اصلی ماشین شبیه به ماشین های سیر باز می باشد و همچنین دارای صفحات فلزی نگهدارنده جبهه کار بوده که در بالای مقطع حفاری و چسبیده به سیر می باشد.

حوزه کاربری این دستگاه شامل سنگ های ضعیف، زمین های چسبناک تا قسمتی چسبناک و به طور کلی در زمین های خود نگهدار در غیاب آب های زیرزمینی استفاده می شود [۳].

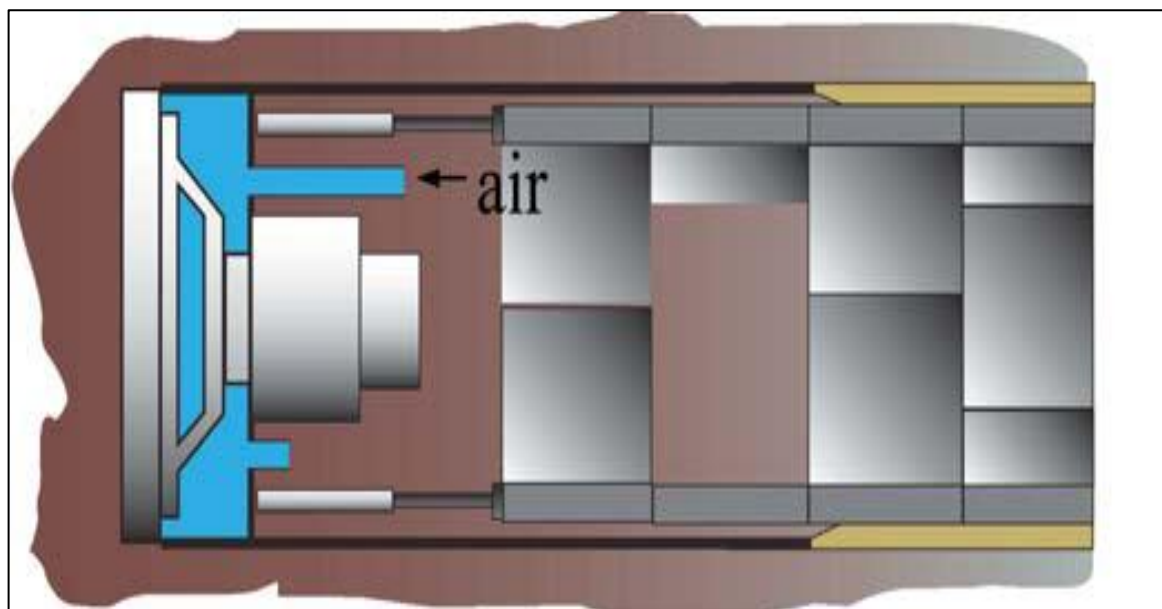
۲-۳-۴- سیر بسته با نگهداری هوای فشرده<sup>۲</sup>

اصول کلی کارکرد این گونه از سپرها: در سپرهای بسته با نگهداری هوای فشرده از کله حفار چرخان به عنوان وسیله ای برای حفر جبهه کار استفاده می شود و از هوای فشرده به منظور نگهداری جبهه کار، با یک مقدار مناسب در تقابل با فشار هیدرواستاتیکی زمین استفاده می شود [۳]. این سپرها قادر به مقابله با فشار زمین نبوده و به همین علت نگهداری طبیعی یا مکانیکی جبهه کار نیز باید مد نظر قرار گیرد. کارایی کم این ماشین ها به خاطر استفاده از هوای فشرده و افزایش احتمال آتش سوزی در تونل از معایب عمده این

<sup>۱</sup> Mechanical support open shield

<sup>۲</sup> Compressed air closed shield

نوع از ماشین های سپردار می باشد. به کارگیری این روش در زمین هایی با نفوذپذیری بیش تر از  $10^{-4}$  m/s، به دلیل فرار هوا از سینه کار دشوار می باشد. مکانیزم عملکرد این دستگاه به این صورت می باشد که برای جلوگیری از ورود آب به داخل ماشین، هوای فشرده متناسب با فشار آب موجود در جلوی دستگاه، به جبهه کار وارد می شود که با توجه به ثابت بودن فشار هوا، این امر باعث می شود در بالای جبهه کار، فشار هوای فشرده از فشار آب بیشتر شده و منجر به آزاد شدن هوا در این ناحیه گردد و فرار هوای فشرده از لایه های نفوذپذیر می تواند موجب ایجاد راه های عمده برای نفوذ آب به داخل ماشین و تونل گردد. [۲] مواد کنده شده از جبهه کار که در اتاقک حفاری تحت فشار قرار دارند، با استفاده از شیر تویی از محفظه چرخنده<sup>۱</sup> بیرون کشیده شده و منتقل می شوند [۳].



شکل (۲-۶): سپر بسته با نگهداری هوای فشرده [۲]

<sup>۱</sup> Rotary hopper

اجزاء اصلی ماشین شامل موارد زیر است:

- کله حفار چرخان که مجهز به ناخن و ابزار برشی دنداندار است.
- سپر محافظ سیلندری شکل که در برگیرنده تمامی اجزاء اصلی ماشین می باشد. قسمت جلویی این دستگاه از صفحاتی جدا کننده، که از جنس ورق ضخیم فولادی یا بتنی است، جهت جدا کردن بخشی از فضا استفاده می شود. این صفحات به صورت کاملاً آب بند عمل می کند که به منظور جدا کردن اتاقک حفاری تحت فشار از محفظه کله حفار استفاده می شود.
- جک های پیشران محوری

حوزه کاربری این دستگاه شامل زمین هایی با ظرفیت خود نگهداری کم و میزان نفوذپذیری کمتر از  $10^{-4}$  m/s می باشد. تزریق بنتونیت به جبهه کار حفاری شده می تواند نفوذپذیری را کاهش دهد [۳].

### ۲-۳-۵- سپر باز با نگهداری هوای فشرده<sup>۱</sup>

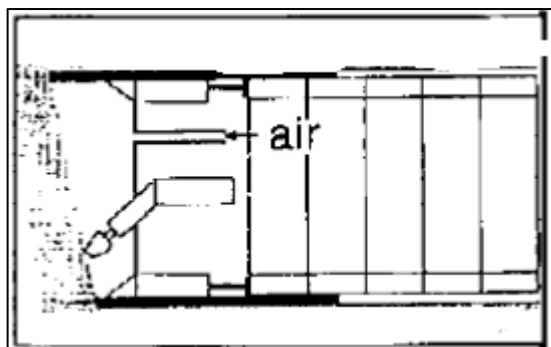
اصول کلی کارکرد این گونه از سپرها: همانند ماشین های سپرباز، حفاری جبهه کار به وسیله رودهدر انجام می شود و نگهداری جبهه کار با استفاده از مقدار کافی هوای فشرده تامین می شود که به منظور متعادل کردن فشار هیدرواستاتیکی زمین می باشد.

اجزاء اصلی ماشین شامل موارد زیر است:

- سیستم حفاری جبهه کار (رودهدر یا اکسکواتور)
- سپر محافظ که شکل آن بستگی به مقطع حفاری شده دارد.
- جک های پیشران محوری

<sup>۱</sup> Comperessed air open shield

حوزه کاربری این دستگاه همانند ماشین های سپر بسته با نگهداری هوای فشرده می باشد [۳].



شکل (۲-۷): سپر باز با نگهداری هوای فشرده [۳]

### ۲-۳-۶- سپر دوغابی بسته<sup>۱</sup>

در این سپرها از کله حفار به منظور برش جبهه کار استفاده می شود و نگهداری جبهه کار نیز به وسیله دوغابی فراهم می شود که مخلوطی از بنتونیت یا رس با آب و یا در صورت نیاز سایر مواد افزودنی مجاز می باشد که این مخلوط به داخل اتاقک حفاری پمپ شده و با نفوذ به قسمت جلویی جبهه کار یا دیواره نفوذ ناپذیر (در زمین های دانه ریز) کیک<sup>۲</sup> (کیک فیلتر) را تشکیل می دهد که از یک غشای نیمه تروای رس یا بنتونیت تشکیل شده است [۲]. اتاقک حفاری<sup>۳</sup> را محفظه انباشت خاک حفاری<sup>۴</sup> نیز می گویند که در واقع فاصله بین جبهه کار حفاری و دیواره فلزی جداکننده بین اتاقک حفاری از بقیه قسمت های ماشین حفاری است. یک سیستم تزریق سیال، دوغاب تازه را وارد اتاقک حفاری کرده و مواد حفاری شده مازاد به کمک لوله خروجی از اتاقک حفاری خارج می شود. برای ایجاد تعادل بین جریان ورودی و خروجی، دوغاب را تحت فشار در اتاقک حفاری نگه می دارند. بدین ترتیب، با تغییر در جریان ورودی و خروجی دوغاب امکان کنترل مقدار فشار جبهه کار فراهم می شود [۹]. مواد حفاری شده از جبهه کار به وسیله ابزارهایی که

<sup>۱</sup> Slurry Shield

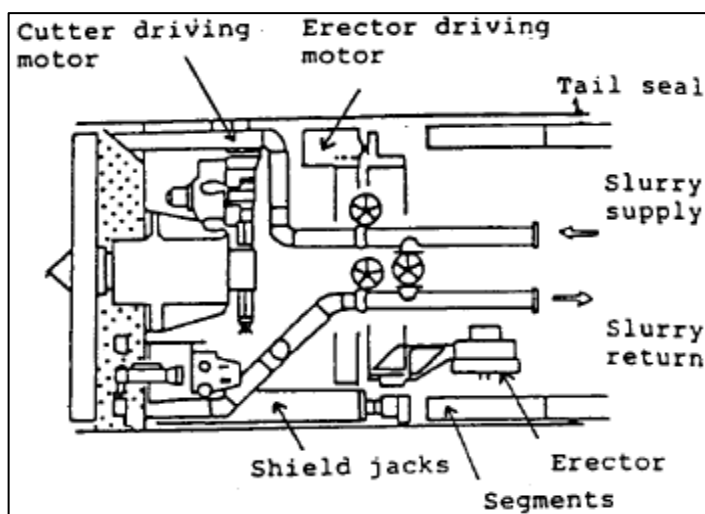
<sup>۲</sup> cake

<sup>۳</sup> Excavation Chamber

<sup>۴</sup> Plenum

روی کله حفار وجود دارد حفر می شود. این مواد شامل خاک های طبیعی و دوغابی است که دارای رس یا بنتونیت می باشد. عموماً دوغاب دارای عملکرد بهتری نسبت به هوای فشرده است، زیرا فشاری که دوغاب به جبهه کار وارد می کند، با فشار آب هماهنگی داشته و تغییرات فشار دوغاب از بالا تا پایین مقطع حفاری مطابق تغییرات فشار ایستایی طبقات آب و خاک می باشد. استفاده از دوغاب به منظور جلوگیری از ورود آب به داخل ماشین، پرهیز از نشست های احتمالی سطح زمین، مخلوط شدن با خاک جهت پمپاژ مناسب و تخلیه مواد حاصل از حفاری از جبهه کار به خارج از تونل می باشد [۱]. در این دستگاه سیستم انتقال دهنده مواد هیدرولیکی بوده (با استفاده از دوغاب) که این دوغاب از اتاقک حفاری به محل جداسازی دوغاب از مواد حفاری شده منتقل می شود، که این محل معمولاً در سطح زمین می باشد و بنتونیت استحصال شده مجدداً جهت استفاده به داخل ماشین هدایت می شود. در زمین هایی که دارای تخته سنگ باشد، می توان از سنگ شکن در اتاقک حفاری استفاده کرد. عیب بزرگ سپرهای دوغابی وجود تاسیسات جدا سازی با مصرف انرژی زیاد، مشکلات زیست محیطی، اشغال فضا و مشکلات جدا سازی بنتونیت از مواد ریز دانه خاک می باشد و به همین دلیل به سرمایه گذاری بالاتری نسبت به ماشین EPB جهت ساخت تاسیسات جدا سازی، جدا کردن بنتونیت از مواد حفاری شده و خرید مواد لازم برای دوغاب همانند بنتونیت احتیاج می باشد.

حوزه کاربری این دستگاه شامل زمین هایی با ظرفیت خود نگهداری کم و وجود آب زیرزمینی و همچنین برای حفاری در زمین های ماسه ای و ریگی به همراه سیلت مناسب می باشد. سنگ شکن نصب شده در اتاقک حفاری اجازه ورود مواد درشت دانه را تا زمان خردایش کامل به سیستم انتقال هیدرولیکی نمی دهد. استفاده از دیسک کاترها، ماشین را قادر می سازد که در سنگ نیز عملیات حفاری را انجام دهد. با استفاده از پلیمرها در دوغاب، این ماشین قادر به حفر زمینی با مقادیر بالای سیلت و رس می باشد [۲].



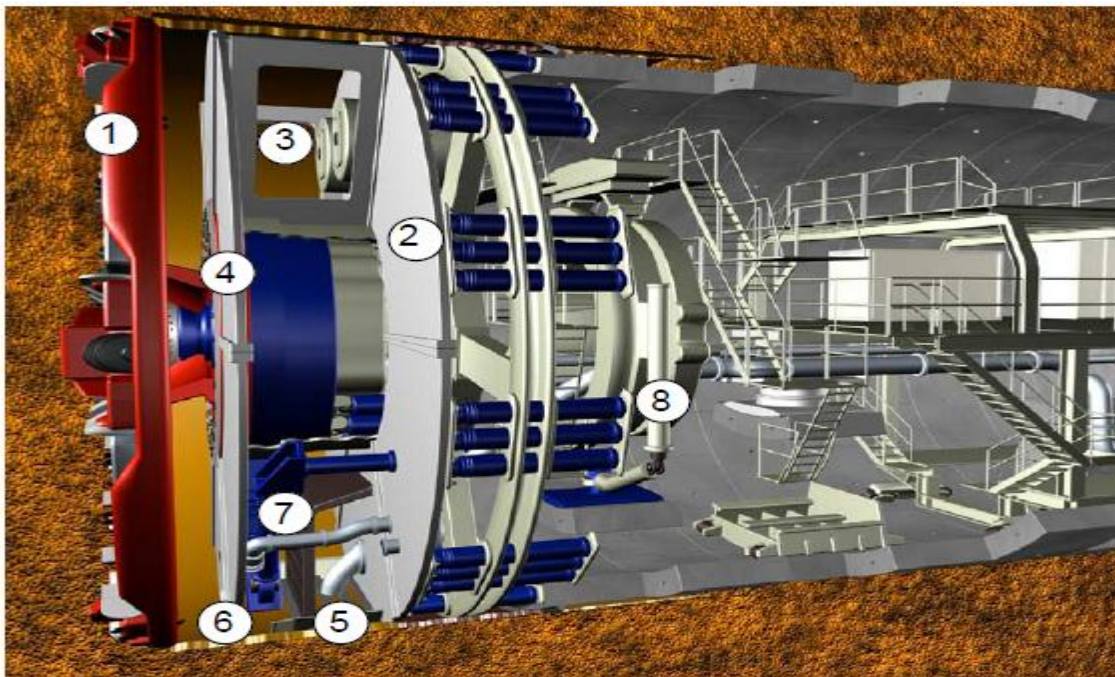
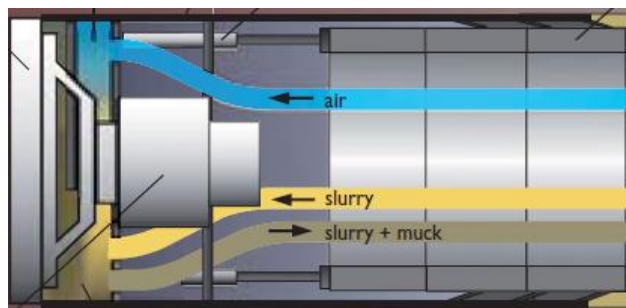
شکل (۲-۸): سپرهای دوغابی [۱۰]

### ۲-۳-۷- سپر آبی<sup>۱</sup>

این ماشین همانند سپرهای دوغابی می باشد، اما دارای یک دیواره مکمل پشت دیواره اول بوده که یک اتاقک یا محفظه کمکی با دو قسمت مجزا را ایجاد می کند. هوای فشرده در بالشتک هوا<sup>۲</sup> می تواند دوغاب را به قسمت جلوئی جبهه کار فشار دهد و در نگهداری جبهه کار موثر واقع شود. فشار بالشتک هوا به صورت خودکار می تواند کنترل شود. از حباب هوا به عنوان یک ضربه گیر برای تغییرات اجتناب ناپذیر فشار در اتاقک حفاری استفاده می شود. شکل زیر یک نوع هیدروشیلد را نشان می دهد [۹].

<sup>۱</sup> hydroshield  
<sup>۲</sup> Air Cushion





شکل (۲-۹): هیدروشیلدر/ سپر ترکیبی با دو اتاقک. ۱- کله حفار، ۲- دیواره فشار، ۲- بالشتک هوا، ۴- دیواره غوطه ورکنی  
۵- خط دوغاب ۶- سنگ شکن ۷- خط خوراک دهی ۸- نصاب [۹]

## ۲-۳-۷-۱- پارامترهای کلیدی

فرآیند پایدارسازی جبهه کار 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 پیچیده تری است. ماشین سپر آبی به وسیله ویس<sup>۱</sup> و فریتنگ<sup>۲</sup> اختراع شد، و به وسیله بدی<sup>۳</sup> و تلین<sup>۴</sup> در دهه ۱۹۷۰ ساخته شده است. در سپر آبی فشارعملی

<sup>۱</sup> Weyss

<sup>۲</sup> Freitag

<sup>۳</sup> Bade

<sup>۴</sup> Theelen

از طرف اتاقک حفاری به جبهه کار، به فشار زمین و فشار هیدرواستاتیک (در صورت وجود) بستگی دارد. فشار نگهداری جبهه کار تا قسمتی به وسیله دوغاب تزریقی و تا قسمتی دیگر به وسیله فشار وارده از بالشتک هوا روی دوغاب تامین می شود. اتاقک حفاری از بقیه قسمت های TBM به وسیله دیواره عقبی جدا شده و دیواره جلویی اتاقک حفاری را به دو قسمت تقسیم می کند. اتاقک جلویی که کله حفر در آن واقع شده، به وسیله سیال پر می شود و قسمت کمی از اتاقک عقبی به وسیله دوغاب پر شده و بقیه قسمت های آن از هوای فشرده پر می شود که به آن اصطلاحاً بالشتک هوا می گویند. دیواره عقبی در محل ورودی و خروجی هوای فشرده قرار گرفته که به وسیله یک سیستم اتوماتیک مقدار هوا تنظیم می شود. دوغاب ورودی و خروجی تابعی از سیستم انتقال دهنده مواد حفاری شده است. در سپرهای دوغابی قدیمی کنترل فشار در اتاقک حفاری با تعادل جریان ورودی و خروجی فراهم می شد. اگر حجم خارج شده خیلی کم باشد، مواد بیشتری درون اتاقک حفاری انباشته می شود در نتیجه فشار افزایش می یابد. در سپر آبی کنترل فشار در اتاقک حفاری با کنترل فشار بالشتک هوا و هوای فشرده وارده بر دوغاب در اتاقک جلویی بدست می آید، به علاوه بالشتک هوا نوسانات فشار را نیز تعدیل می کند. از طرف دیگر در صورتی که فشار دوغاب بیش از اندازه بالا باشد، بصورت خودکار با کاهش فشار هوا در بالشتک هوا کاهش می یابد و یک تعادل در سیستم ایجاد می کند. محاسبه فشار جبهه کار برای استفاده از این نوع TBM اصل اساسی می باشد، اما در نظر گرفتن خصوصیات جریان دوغاب به خصوصیات زمین و اجزای دوغاب شامل آب و بنتونیت و سایر مواد افزودنی نظیر پلیمرها بستگی بیشتری دارد. دوغاب علاوه بر اعمال فشار فعال روی سطح سینه کار، باعث خنک شدن ابزار و روانسازی موثر می شود [۲].

در ماشین های دوغابی اندازه ذرات کوچکتر از  $0.2/0$  میلی متر نباید بیشتر از  $10\%$  باشد چون هزینه های جدا کردن آن از دوغاب زیاد می شود.

۲-۳-۸- سپر دوغابی باز<sup>۱</sup>

اصول کلی کارکرد این گونه از سپرها: این ماشین همانند ماشین سپرباز با نگهداری هوای فشرده می باشد. در این ماشین نگهداری جبهه کار با استفاده از دوغاب تامین می شود و بسته به نوع کله حفار مورد استفاده، به انواع زیر تقسیم میشود:

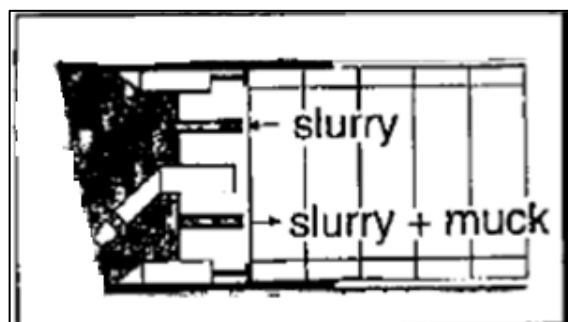
سپر تیکس<sup>۲</sup>: حفاری با استفاده از رودهدر صورت می گیرد.

سپر های جت آب: حفاری با استفاده از جت آب هایی با فشار بالا صورت می گیرد.

اجزاء اصلی ماشین شامل موارد زیر است:

- سیستم حفاری جبهه کار (رودهدر یا اسکاواتور و جت آب)
- سپر محافظ که شکل آن بستگی به مقطع حفاری شده دارد و محفظه حفاری تحت فشار که به وسیله یک دیوار از قسمت داخلی سپر جدا شده است.
- جکهای پیشران محوری

حوزه کاربردی این دستگاه نیز همانند سپرهای دوغابی بسته می باشد [۳].



شکل (۲-۱۰): سپر دوغابی باز از نوع تیکس [۳]

<sup>۱</sup>Open slurry shield

<sup>۲</sup>Thixshield

۲-۳-۹- سپر فشار تعادلی زمین<sup>۱</sup>

توسعه و ساخت سپرهای EPB در اوایل دهه هفتاد در ژاپن آغاز شد. اولین سپر فشار تعادلی در سال ۱۹۷۴ در توکیو بکار گرفته شد. این سپر دارای قطر بیرونی ۳/۷۲ متر و توسط شرکت ژاپنی IHI برای حفر یک تونل جمع آوری فاضلاب به طول ۱۹۰۰ متر طراحی شد [۴]. ماشین فشار تعادلی در ۲۰ سال اخیر برای حفاری فضاهای زیرزمینی در نواحی شهری توسعه داده شده است [۵]. دامنه کاربرد سپر فشار تعادلی با افزایش مواد افزودنی در خاک های چسبنده تا خاک های دانه ای با چسبندگی کم و در زمین های غیرهمگن دارای سنگ و خاک بکار می رود. تکنولوژی EPB اساساً مبنی بر استفاده از خاک حفاری شده موجود در اتاقک حفاری برای نگهداری جبهه کار است. فشار نگهداری جبهه کار به کمک فشار اعمالی بر خاک حفاری موجود در اتاقک حفاری فراهم می شود، حفاری در TBM به وسیله ابزارهای برش مانند دیسک ها یا پیک های<sup>۲</sup> موجود روی کله حفر انجام می گیرد. خاک حفاری شده در اتاقک حفاری (شبهه اتاقک حفاری سپر دوغابی) انباشته می شود و سپس به کمک نقاله مارپیچی<sup>۳</sup> یا پیچ ارشمیدس به بیرون منتقل می شود. مقدار خاک خارج شده از اتاقک حفاری متناسب با سرعت گردش نقاله مارپیچی است، در حالی که مقدار خاک حفاری شده متناسب با نرخ نفوذ TBM است. بنابراین تعادل دینامیکی مبنی بر تعادل حجم خاک حفاری شده و حجم خاک خارج شده در اتاقک حفاری ایجاد می شود، که تنظیم این تعادل به واسطه تغییر سرعت گردش نقاله مارپیچی صورت می گیرد و مواد انباشته شده در اتاقک حفاری برای ایجاد فشار نگهداری، برای پایداری جبهه کار استفاده می شود. فشار سینه کار با تغییر سرعت گردش نقاله مارپیچی که خود تابعی از نرخ نفوذ TBM است، کنترل می شود. روی هم رفته توابع اساسی در حفاری با ماشین EPB، خروج خاک حفاری و کنترل فشار جبهه کار تونل است. نقاله مارپیچی امکان

<sup>۱</sup> Earth Pressure Balance Shield<sup>۲</sup> pick<sup>۳</sup> Screw conveyor

پراکندگی فشار در اتاقک حفاری را از مقدار ماکزیمم (تراز کف اتاقک حفاری) تا تراز جو (دریچه خروجی) فراهم می کند. جک های هیدرولیکی فشار طولی را روی سپر و دیواره تنظیم کننده اعمال می کنند، یعنی با باز و جمع شدن جک ها عمل سگمنت گذاری در داخل شیلد پستی و حرکت رو به جلوی ماشین فراهم می شود. فشار اعمالی ماشین باید به اندازه ای باشد که ضمن نگهداری جبهه کار تونل، سبب کاهش نیروهای اصطکاکی روی سپر شود [۱].

### ۲-۳-۹-۱- جنبه های زمین شناسی و ژئوتکنیک

مسئله مربوط به این است که چه خاک هایی بیشتر برای حفاری با ماشین EPB مناسب هستند، که از لحاظ فنی موضوع مهمی محسوب می شود. مخصوصاً درباره حفاری آسان و بهسازی مناسب خاک این مسئله اهمیت بیشتری پیدا می کند. انتخاب و مدیریت حفاری EPB جنبه های مختلفی را برای آنالیز در بر می گیرد که به تفصیل در ذیل آورده شده است [۲].

۱- نوع خاک (چسبنده، اصطکاکی، سنگ خرد شده و غیره): نوع خاک در کارایی ماشین، بهسازی خاک داخل اتاقک حفاری و پایداری جبهه کار موثر است. کاربرد این ماشین در خاک هایی که مقدار مصالح دانه ریز آن کمتر از ۱۰ درصد است، مناسب نمی باشد.

۲- نفوذ پذیری و سطح آب زیرزمینی: به طور نمونه استفاده از EPB در حالت بهینه برای خاک هایی با نفوذ پذیری کمتر از  $10^{-5} m/s$  و هد آب کمتر از ۳ بار است. اگر نفوذ پذیری بزرگتر از  $10^{-5} m/s$  باشد استفاده از این ماشین، به نوع و مقدار عامل های افزودنی اضافه شده به اتاقک حفاری و نقاله مارپیچی مربوط می شود.

۳- همگن یا غیر همگن بودن خاک و ناپیوستگی نسبت به مقطع تونل (حفاری ماشین EPB روی جبهه کار با لایه بندی مختلف خاک)

۴- درصد بزرگترین ابعاد، سختی و ساینده‌گی بولدرها (در صورت وجود): این جنبه از لحاظ فرسایش و شکست مکانیکی تجهیزات، امکان ورود بولدرها به اتاقک حفاری از میان کله حفار، و در هنگام خروج از اتاقک حفاری به کمک نقاله ماریپیچی اهمیت دارد. بیشترین عرض باز شدگی به عنوان درصدی از مساحت کله حفار مهم می باشد، همچنین قطر و شیب نقاله ماریپیچی نسبت به بزرگترین قطر بولدرها در نظر گرفته می شود.

۵- درصدی از مواد با فعالیت شیمیایی بالا (یعنی گروه های رسی سنگین): هر کدام می تواند در بهسازی خاک حفاری و رفتارهای چسبندگی موثر باشند.

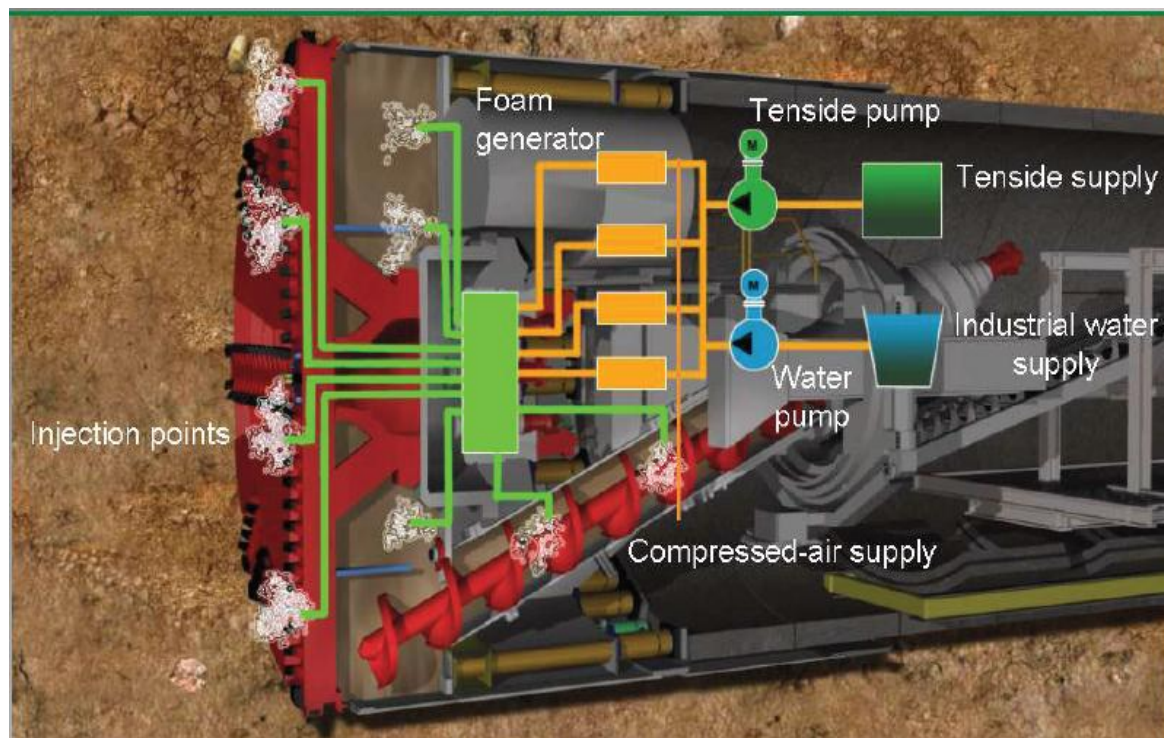
۶- استفاده نهایی و چگونگی انهدام مواد حفاری شده و این که حداقل ۳۰٪ حجم خاک را باید دانه های کوچکتر از ۰/۰۶ میلی متر تشکیل دهد.

## ۲-۳-۹-۲- شرایط زمین

تزریق آب به خاک حفاری برای انتقال فشار نگهداری مناسب بر روی جبهه کار تونل و در نتیجه کاهش توان مصرفی ماشین حفاری جز در مواردی که خاک همگن، پایدار و کم ساینده باشد، همیشه مناسب نیست. برای همین، معمولاً مواد افزودنی به خاک حفاری اضافه می کنند، به طوری که باعث بهبود خصوصیات فیزیکی خاک شود. هدف اصلی از افزایش عامل های بهسازی<sup>۱</sup> خاک، تضمین کنترل فشار نگهداری جبهه کار تونل، انتقال مناسب مواد به نقاله ماریپیچی، حداقل کردن گشتاور روی کله حفار و کاهش فرسایش ابزارهای برش می باشد. انواع مختلفی از عامل های بهسازی شامل دوغاب ها، فوم ها، پرکننده ها، پلیمرها و غیره وجود دارند. مواد افزودنی با توجه به خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و نوع خاک حفاری انتخاب می شوند [۲].

<sup>۱</sup> Conditioning Agents

این مواد از طریق نازل ها به صورت مستقیم به جبهه کار، داخل اتاقک حفاری و روی نقاله مارپیچ اضافه می شود که در شکل زیر دیده می شود [۶].



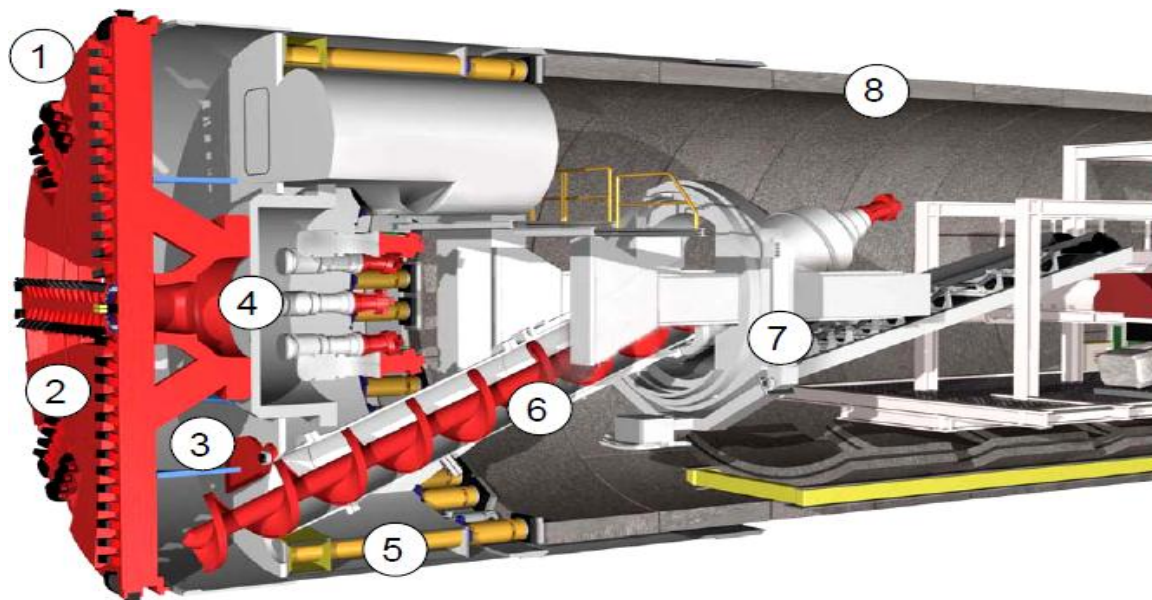
شکل (۲-۱۱): نازل های مواد افزودنی در EPB [۶]

### ۲-۳-۹-۳- چگونگی خروج مواد حفاری شده

در دستگاه EPB ابتدا مواد از جبهه کار کنده شده و به اتاقک حفاری منتقل می شود و با استفاده از نقاله مارپیچی روی نوار نقاله منتقل می شود. نقاله مارپیچ نقش یک دریچه را بازی می کند که فشار در طول آن کاهش می یابد و تا زمانی که مواد از آن تخلیه می شوند، به فشار اتمسفر می رسد. زمانی که نفوذ پذیری خاک درون اتاقک حفاری از حد مورد نیاز افزایش پیدا کند و تونل زیر سطح ایستابی باشد، آب با فشار بالا از طریق نقاله مارپیچی وارد تونل می شود، در این مواقع با اضافه کردن عامل های بهسازی به خاک درون نقاله مارپیچ، نفوذ پذیری خاک را کم کرده و مانع از نفوذ آب با فشار بالا به داخل تونل می شوند. چون

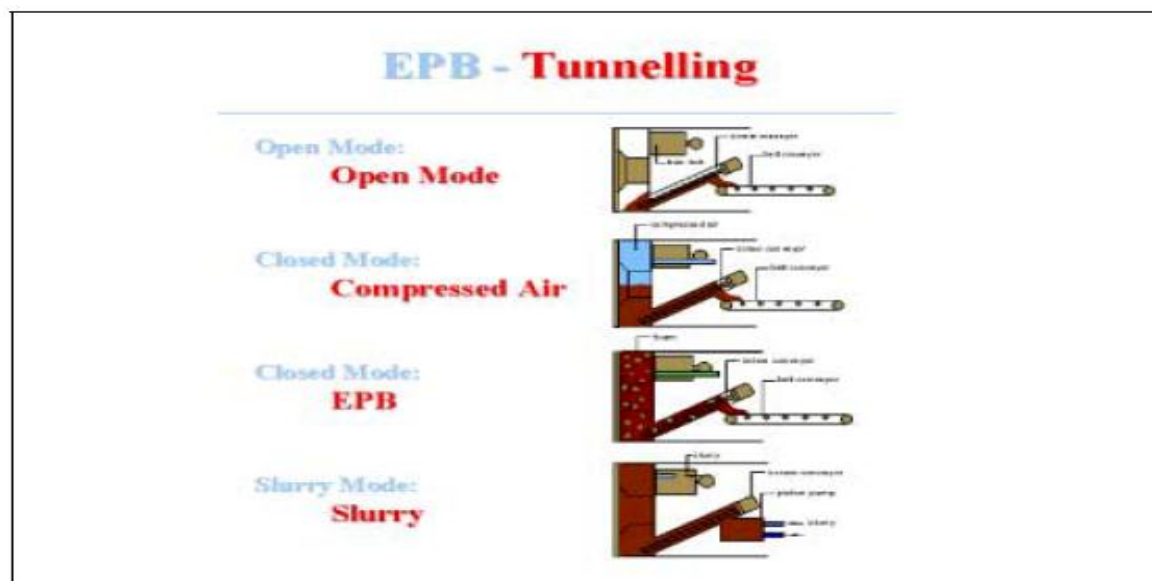


حجم مواد خارج شده از نقاله مارپیچ محدود می‌باشد، این روش بسیار موثر می‌باشد. مواد خارج شده از نقاله مارپیچ به وسیله نوار نقاله، کامیون یا واگن به محل انباشت منتقل می‌شوند [۲].



شکل (۲-۱۲): سپر فشار تعادلی زمین. ۱- سینه‌کار، ۲- کله حفار، ۳- اتاقک حفاری، ۴- دیواره فشار، ۵- جک فشاری، ۶- نقاله مارپیچی، ۷- نصاب، ۸- سگمنت [۹]

ماشین EPB با توجه به تجهیزات نصب شده روی آن می‌تواند به ۴ صورت مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۲-۱۳): مدهای عملیاتی ماشین EPB [۷]



مود باز: در زمین های پایدار که نگهداری جبهه کار لازم نبوده و باعث کاهش ۲۰٪ تا ۵۰٪ گشتاور کله حفار می شود و همچنین فرسایش ابزار برش نیز کاهش می یابد.

مود بسته با نگهداری هوای فشرده: در زمین های پایدار که آب وجود داشته باشد فشار آب را با استفاده از هوای فشرده کنترل می کنند.

مود EPB: همانطور که توضیح داده شد در زمین های ناپایدار با وجود آب با فشار بالا قابل استفاده است.

مود دوغابی: ماشین EPB محدود به فشار ۳.۵ bar می باشد در فشارهای بیش تر می توان از این مود استفاده کرد [۷].

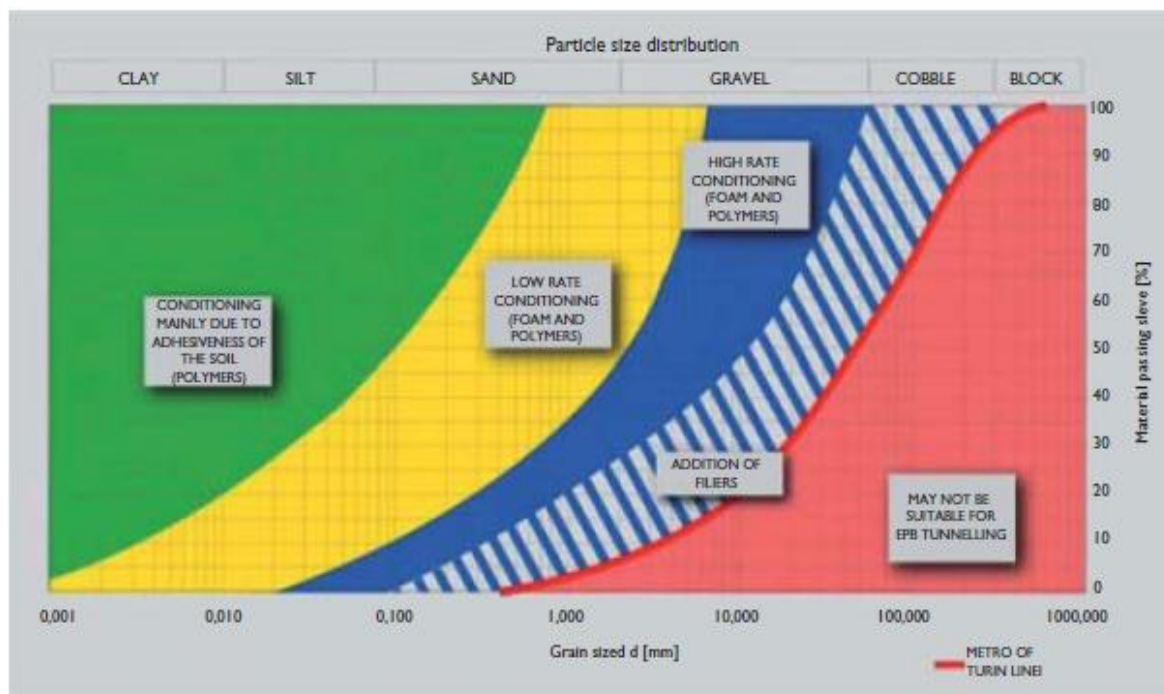
#### ۲-۴- معیارهای انتخاب بین سپر دوغابی و فشار تعادلی زمین

ماشین حفاری شهری می توانند از نوع سپر دوغابی یا یک سپر فشار تعادلی زمین یا سپر ترکیبی باشد. انتخاب نهایی بین دو نوع ماشین به شرایط خاص و واقعی پروژه بستگی دارد. معیارهایی لازم برای انتخاب ماشین به طور خلاصه شامل ۱- حوزه کاربردی (نوع خاک)، ۲- کله حفار، ۳- تزریق فضای پشتی ۴- سیستم کنترلی، ۵- طرز عمل مواد خروجی می باشد [۲].

#### ۲-۴-۱- حوزه کاربردی (نوع خاک)

بسیاری از مؤلفین خاک را به دو طبقه تقسیم بندی کرده اند، که یک دسته برای ماشین های حفاری سپر دوغابی و دسته دیگر برای ماشین سپر فشار تعادلی زمین و در بعضی موارد دارای اشتراک هستند. در سپر دوغابی با تشکیل کیک سینه کار نگهداری می شود، در خاک ها با نفوذپذیری بیشتر امکان تشکیل کیک بسیار مشکل است، بنابراین می بایست حد بالای اندازه ذرات خاک حفاری در سینه کار که به نفوذپذیری خاک مربوط است و همچنین حد پایین ذرات در خاک های ریزدانه به دلیل مشکلات جدایش مشخص گردند.

در سپر فشار تعادلی زمین مستقیماً از خاک حفاری شده داخل اتاقک حفاری برای نگهداری سینه کار استفاده می شود. چنانچه مواد داخل اتاقک حفاری تقریباً به شکل خمیری یا دوغابی با دانسیته بالا (به عنوان مثال مخلوط رس با آب) باشند، فشار نگهداری را می توان تنظیم کرد. اما مخلوط رس و آب تنها کافی نیست، بلکه برای تغییر خصوصیات خاک بایستی موادی به آن اضافه کرد. به علاوه یکی از مهمترین موارد برای عملکرد EPB، ایجاد یک افت فشار در نقاله مارپیچی است. مقدار فشار در پایین اتاقک حفاری از یک حد شروع شده تا در نقاط تزریق نقاله مارپیچی به بیشترین مقدار رسیده و در دریچه خروجی مقدار فشار به صفر می رسد. بدون بهسازی خاک، استفاده از EPP در خاک های شل و درصد کمی از ذرات ریز (۵-۱۰ درصد) با مشکل مواجه می شود. در صورتی که سپر دوغابی نیز در خاک هایی با نفوذ پذیری بالا دارای مشکلاتی هستند. هر دو نوع ماشین در صورت وجود بولدرها با ابعاد خیلی بزرگ دارای مشکلاتی هستند [۲]. ماشین EPB در یک دامنه وسیعی از انواع خاک کاربرد دارد که در شکل (۲-۱۴) دیده می شود. این ماشین در زمین هایی بدون ظرفیت یا ظرفیت کم خود نگهداری مورد استفاده قرار می گیرند. این ماشین بیشتر در زمین های سیلتی یا رسی با ماسه استفاده می شود. استفاده از مواد افزودنی همانند فوم یا دوغابی با غلظت بالا، ماشین را قادر می کند که در خاک های ماسه ای - شنی نیز قادر به حفاری باشد [۳].



شکل (۲-۱۴): دامنه کاربرد ماشین EPB [۵]

■ به دلیل نیروی چسبندگی خاک از پلیمرها استفاده می شود.

■ در این دامنه از دانه بندی، از فوم و پلیمرها استفاده می شود.

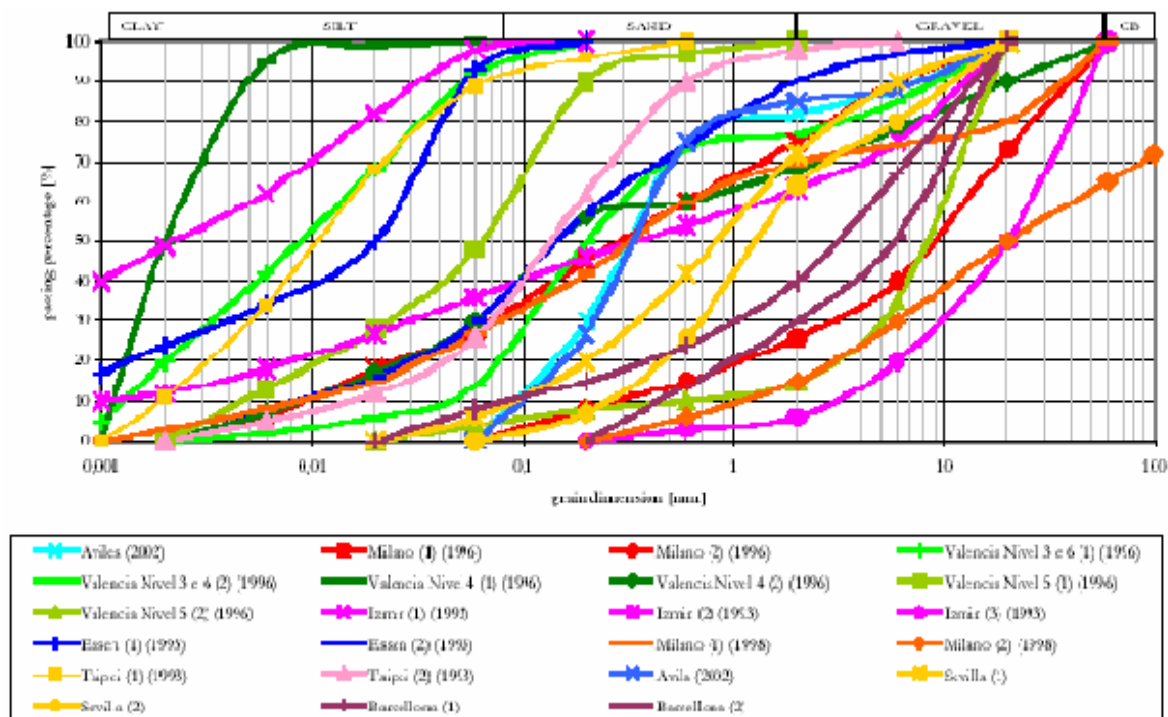
■ در این دامنه از دانه بندی، از فوم و پلیمرها استفاده می شود.

■ در این دامنه از دانه بندی، از فیلرها استفاده می شود.

■ این دامنه از دانه بندی برای حفاری با ماشین EPB مناسب نمی باشد.

نمونه هایی از استفاده از دستگاه EPB در شکل (۲-۱۵) آورده شده است که دامنه استفاده از دستگاه را

نشان می دهد [۵].



شکل (۲-۱۵): دامنه استفاده از دستگاه EPB [۵]

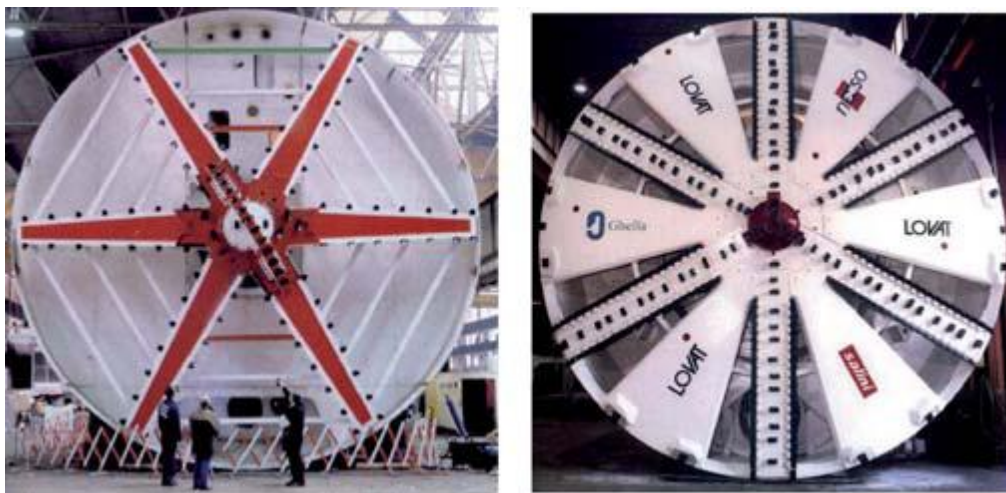
## ۲-۴-۲- کله حفار و ابزارهای حفاری

موقعیت و ساختار ابزارهای حفاری روی کله حفار در حجم موادی که با ضربه و چرخش سریع از روی جبهه کار برداشت شده، تاثیر دارد. نسبت بین ناحیه باز<sup>۱</sup> در کله حفار و مقطع حفاری شده، تاثیر مستقیمی روی ظرفیت نگهداری مکانیکی و کنترل فشار نگهداری جبهه کار دارد. معمولاً برای سپر دوغابی یا سپر آبی نسبت باز شدگی<sup>۲</sup> کله حفار بیشتر از ۵۰ درصد است، در صورتی که برای ماشین سپر فشار تعادلی بین ۲۰ تا ۳۵ درصد تغییر می کند. در حقیقت تشکیل کیک در یک سپر آبی، یک فاصله بین جبهه کار و دوغاب ایجاد می کند. برعکس اثر نگهداری برای EPB مبنی بر اعمال فشار مکانیکی مواد انباشته شده در داخل اتاقک حفاری، بر جبهه کار است. از این موضوع استنباطی که می شود این است که ساختار کله حفار در سپر دوغابی باید سبکتر از ساختار یک EPB باشد، همچنین نسبت باز شدگی بزرگتر و تعداد ابزارهای

<sup>۱</sup> Opening area

<sup>۲</sup> Opening ratio

برش نصب شده روی سپر دوغابی کمتر است. در صورتی که در مسیر حفاری تخته سنگ وجود داشته باشد در ماشین های آبی و دوغابی می توان از یک سنگ شکن استفاده کرد ولی این کار در EPB میسر نمی باشد. قابلیت حفاری کله حفار در بولدرها برای اجتناب از ورود کارگران به داخل اتاقک حفاری برای برداشت قطعات خیلی بزرگ بهبود یافته است [۲].



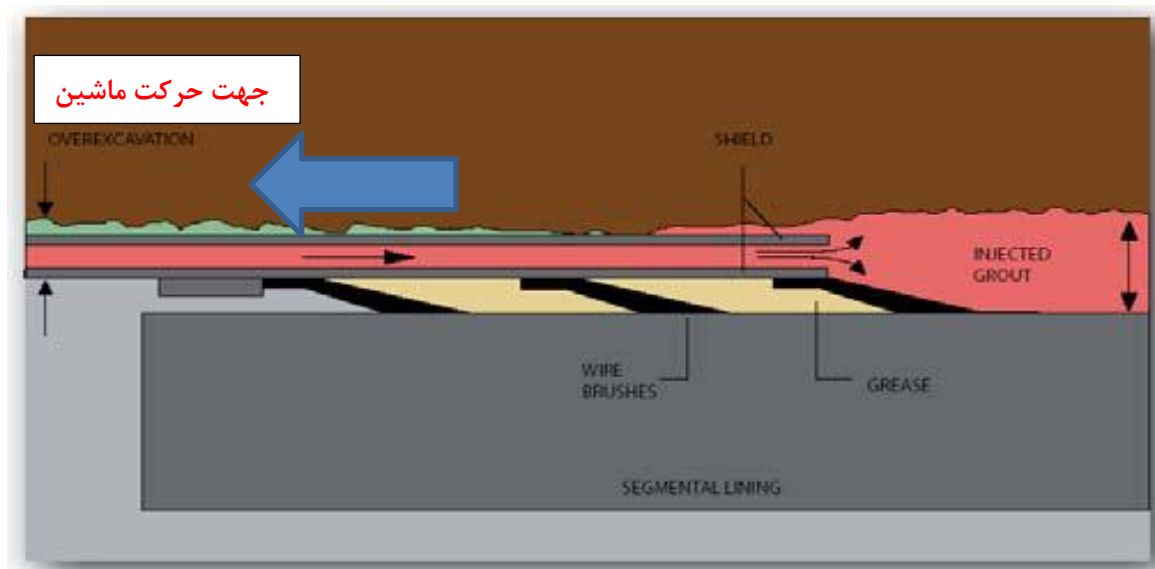
شکل (۲-۱۶): ناحیه بازشدگی کله حفار در ماشین های EPB ناحیه بازشدگی کله حفار در ماشین دوغابی [۲]

### ۲-۴-۳- تزریق در فضای خالی پشت سگمنت

در تونل های حفاری شده به وسیله سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی در نواحی شهری از سگمنت های پیش ساخته برای نگهداری تونل استفاده می شود. سگمنت ها را در پایان هر سیکل حفاری درون شیلد پشتی نصب می کنند، یعنی در منطقه ای که جک های هیدرولیکی فشار را برای پیشروی اعمال می کنند. در پشت هر رینگ فضای خالی به وجود می آید. این فضاهای خالی توسط سه عامل اصلی به وجود می آید.

- مخروطی بودن سپر که برای پیشروی آسان تر ماشین است (تفاوت بین قطر قسمت جلویی و عقبی).
- تفاوت بین قطر شیلد و سگمنت های پیش ساخته نصب شده.
- برش اضافی لازم برای حرکت ماشین.

نصب صحیح سگمنت ها و انتقال یکنواخت بار بر روی سگمنت ها و پر شدن فضای خالی بین سگمنت و خاک، نشست سطح زمین را کنترل می کند، پرکردن معمولاً با تزریق دوغاب سیمان انجام می گیرد. یک واشر ( برس سیمی در سه ردیف) از ورود دوغاب سیمان از شکاف بین سگمنت و سپر جلوگیری می کند. به علاوه دوغاب سیمان مستقیماً در داخل سگمنت (دومین مرحله تزریق) تزریق می شود. دوغاب سیمان مخلوطی از سیمان، دانه های ریز، آب و دیگر افزودنی ها است. در تونل زنی مکانیزه بحث بر این است که چگونه فضای خالی بین مقطع حفاری شده و قسمت بالای سپر در طول سپر پر می شود. واضح است که در ماشین سپر دوغابی به طور طبیعی دوغاب بنتونیت با فشاری که به اتاقک حفاری اعمال کرده از آن خارج شده، و فضای خالی را پر می کند. در ماشین های EPB فقط فوم، هوا و آب فضای خالی را پر می کنند، بدون اینکه هیچ گونه نگهداری موثری صورت گیرد. در بعضی از پروژه ها، با یک سیستم خاصی فضای خالی را با تزریق دوغاب بنتونیت پر می کنند، مقدار این فشار بستگی به فشار نگهداری سینه کار دارد، که هنوز این روش جنبه آزمایشی دارد. شکل زیر نحوه پر شدن فضای پشت سگمنت را نشان می دهد [۲].



شکل (۲-۱۷): پر شدن فضای خالی پشت سگمنت [۲]

## ۲-۴-۴- سیستم کنترلی

سیستم کنترل کامپیوتری (ثبت کننده داده ها) برای مدیریت داده هایی است که مستمراً برای TBM استفاده می شود، اپراتور اطلاعات لازم را برای هدایت صحیح ماشین از ثبت کننده داده ها بدست می آورد. به طور معمول ماشین های مدرن امروزی با ایستگاه کار، که روی سطح زمین یا در فاصله دوری از محل کار است، ارتباط مستقیمی دارند. با مانیتورینگ پیوسته امکان اجرای بهتر حفاری و نگهداری فراهم می شود. پارامترهای اساسی که برای مانیتورینگ فرایند کنترل حفاری لازم است. عبارتند از [۲]:

- فشار در اتاقک حفاری و در طول نقاله مارپیچی

- مقدار مواد حفاری شده و خارج شده

- حجم و فشار تزریق دوغاب در شکاف پشت رینگ

- گشتاور، ضربه، سرعت چرخش و سرعت پیشروی کله حفار

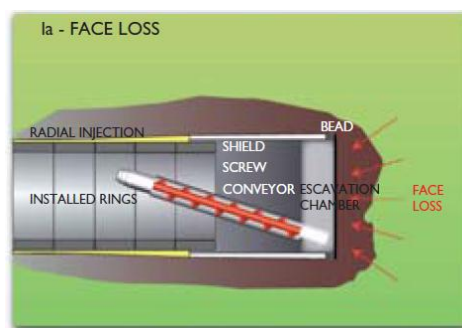
## ۲-۴-۵- عملیات مواد خروجی

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 می شوند. اما در ماشین سپر فشار تعادلی زمین مواد خروجی به کمک واگن یا نوار نقاله به بیرون منتقل می شوند. تنها در موارد محدودی در سپر فشار تعادلی زمین مواد از طریق خطوط لوله و پمپاژ با افزودن آب به مواد استخراجی منتقل می شوند. در ماشین سپر دوغابی قسمت جامد از مایع جدا شده و در ناحیه دمپ باطله انباشته شده و قسمت مایع با افزودن بنتونیت تازه دوباره وارد سیکل حفاری می شود. اما در ماشین سپر فشار تعادلی زمین، مواد بدون اینکه هیچ فرآیندی روی آن صورت بگیرد، دمپ می شوند [۵].

## ۵-۲- عوامل موثر بر افت حجم در تونلسازی مکانیزه

- کاهش فشار در جبهه کار تونل

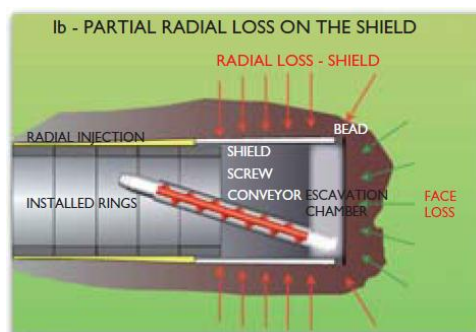
حفاری سینه کار تونل سبب رهاسازی تنش در جبهه کار شده و در نتیجه سبب جابجایی در سینه کار تونل می شود. که در نتیجه سبب افت سینه کار (face loss) می شود.



شکل (۲-۱۸): افت جبهه کار [۲]

- اضافه حفاری

حفاری کمی بیشتر از اندازه تونل در جلوی سپر که به منظور راحتی پیشروی سپر می باشد. حداقل دو فاکتور منجر به اضافه حفاری کم در جبهه کار سپر می شود. اولاً قطر کاترهدها کمی بزرگتر ساخته می شوند، دلیل این کار این است که از تماس سپر با خاک جلوگیری شود تا اصطکاک بین سپر و خاک کاهش یابد. دوماً اضافه حفاری در سینه کار تونل است.

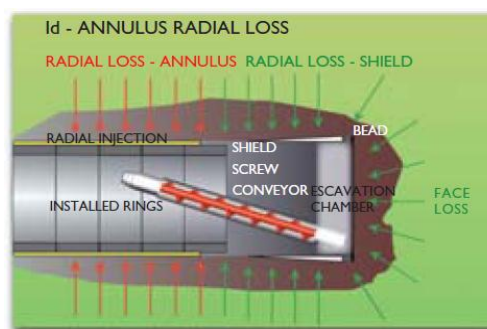


شکل (۲-۱۹): افت شعاعی [۲]



- گپ بین لاینینگ و تونل

لاینینگ که قطر آن نسبت به قطر سپر کمی کوچکتر می باشد، در داخل سپر نصب می شود و فضای دایروی بین لاینینگ و زمین فوراً با تزریق دوغاب پر می شود. بنابراین تا زمانی که دوغاب بطور کامل فضای خالی را پر کند و بطور کافی برای مقابله با فشار زمین سخت شود، زمین بصورت شعاعی به سمت لاینینگ همگرا می شود، که باعث نشست می شود.



شکل (۲-۲۰): افت کلی [۲]

مجموع جابجایی های شعاعی، افت شعاعی (RADIAL LOSS) نامیده می شود. مجموع افت جبهه کار و افت شعاعی منجر به افت حجمی کل  $V_L$  می شود که از حفاری تونل ناشی می شود. در حقیقت در تونلسازی مکانیزه، هم افت جبهه کار و هم افت شعاعی می تواند بطور مناسبی با استفاده از روش های رانش مناسب TBM کنترل شود.

اگر فشار وارده به جبهه کار تونل بطور مناسب تنظیم شده باشد، می توان افت جبهه کار را کنترل کرد و همچنین اگر فشار تزریق دوغاب بطور مناسب اعمال شود، می توان افت شعاعی را کنترل کرد. به هر حال تخمین فشار صحیح جبهه کار تونل به منظور جلوگیری از افت جبهه کار، نیازمند فهم عمیق از مکانیزم شکست زمین می باشد، مناسب ترین دامنه توزیع فشار عملی که باید بر جبهه کار تونل اعمال شود بر اساس شرایط زمین شناسی مواجه شده، سطح آب زیرزمینی و عمق تونل تعیین می شود [۲].

## ۲-۶- مقایسه بین سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین

معیارهای انتخاب بین سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین در نواحی شهری، تحت تاثیر بسیاری از فاکتورهای اقتصادی و محیطی است. اگرچه پایداری جبهه کار و کنترل نشست در هر دو ماشین جزء مسائل اساسی می باشد.

تا سال ۲۰۰۵، نقطه بحرانی استفاده از ماشین های EPB مربوط به محدودیت اندازه گشتاور کله حفار بود که تابعی از مکعب قطر حفاری است. در ابتدای کار رسیدن به قطر ۱۲ متر کار دشواری بود، اما در حال حاضر از ماشین هایی با قطر ۱۵.۲ متر نیز استفاده می شود [۱۱] و [۱].

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

- آلودگی زیست محیطی در هر دو روش وجود دارد.

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

- در روش سپر دوغابی امکان انسداد لوله به وسیله ذرات درشت وجود دارد، و در روش EPB امکان

کلوخه شوندگی خاک در اتاقک و نقاله ماریپیچی وجود دارد، بنابراین بهسازی مناسب در هر دو روش

عاملی مهمی خواهد بود.

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

مزایای ماشین سپر تعادلی زمین:

- EPB دارای سیستم آسانتری برای یادگیری و نگهداری می باشد.

- در مواقع ریزش جبهه کار حجم از دست رفته زمین (VOLUME LOSS) در ماشین سپر تعادلی زمین

محدود می باشد.

- در صورت نصب تجهیزات و طراحی ماشین برای شرایط گوناگون، در صورت برخورد به شرایط متفاوت

زمین، می توان از مودهای مختلف ماشین سپر تعادلی استفاده کرد.

- نرخ تولید بالاتر نسبت به ماشین دوغابی
- سرمایه گذاری کمتر نسبت به ماشین دوغابی
- سایت و چاه راه اندازی کوچکتر نسبت به ماشین دوغابی
- به دلیل وجود نداشتن چرخه دوغاب، مصرف افزودنی ها کمتر بوده و هزینه ها کاهش می یابد.
- روش سپر دوغابی نیاز به تاسیسات بزرگی دارد، و برای محیط شهری به دلیل کمبود فضا معمولاً از EPB استفاده می شود.
- مزایای ماشین های دوغابی:
- فشار مورد نیاز توسط دستگاه تعیین شده و کنترل می شود (کنترل فشار سیستماتیک می باشد) اما در ماشین فشار تعادلی زمین اپراتور فشار را کنترل می کند.
- گشتاور کمتر
- توان کمتر کله حفار
- مواد کنده شده تا رسیدن به سطح زمین دیده نمی شود.
- امکان تعبیه سنگ شکن و خردایش بولدرها
- فضای داخلی تونل تمیزتر می باشد.
- کاهش سایش ابزار به دلیل سرد شدن ناخن ها و کله حفار و نفوذ تکراری کمتر
- قابلیت استفاده در زمین های گاز دار به دلیل بسته بودن سیکل خروج مواد

## ۲-۷- جمع‌بندی

ماشین‌های معمول مورد استفاده برای حفر تونل در خاک معمولاً به سپر دوغابی یا سپر آبی و سپر فشار تعادلی زمین تقسیم بندی می‌شوند. ماشین‌های دوغابی بیش‌تر برای خاک‌های درشت‌دانه استفاده می‌شوند. ماشین‌های سپر فشار تعادلی زمین در ابتدا برای خاک‌های ریزدانه استفاده می‌شدند، اما با توسعه روش‌های بهسازی، برای خاک‌های درشت‌دانه نیز استفاده می‌شوند.

مقایسه کلی بین سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۲-۱): مقایسه کلی بین سپر دوغابی و سپر فشار تعادلی زمین [۱۱] و [۱]

SPB	EPB	معیارها
پایین	بالا	توان و گشتاور کله حفار
لازم	لازم	مواد افزودنی
زیاد	متوسط	فضای سایت
پیچیده	آسان	انتقال مواد خروجی
متوسط	سریع	سرعت حفاری
خوب	ضعیف	تمیزی تونل
اتوماتیک	تعیین شده	محاسبه فشار لازم
بالا	کم	هزینه سرمایه‌گذاری
اتوماتیک	محدود	تزریق در فضای خالی پشت سپر
بازشدگی ۵۰ درصد و تعداد ابزارهای برش نصب شده روی کله حفار کمتر از EPB	باز شدگی ۲۰ تا ۳۵ درصد	نسبت باز شدگی و تعداد ابزارهای برش نصب شده روی کله حفار
قابل استفاده	غیر قابل استفاده	استفاده در زمین‌های گازدار

فصل سوم

---

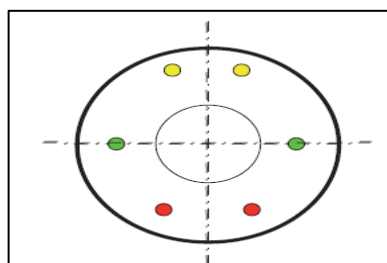
روش‌های برآورد فشار نگهداری جسمه کار

## ۳-۱- مقدمه

یکی از مولفه‌های بحرانی در هنگام استفاده از ماشین سیر فشار تعادلی زمین، هم در فاز طراحی و هم در فاز ساخت، تخمین فشار نگهداری جبهه کار تونل می‌باشد. برآورد فشار نگهداری لازم برای پایداری جبهه کار حفاری یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر راندمان حفاری ماشین در نواحی شهری می‌باشد. در مناطق خاکی معمولاً در اعماق کم با اعمال فشار بیشتر یا کمتر از حد تعادلی، به ترتیب بالازدگی<sup>۱</sup> و فرونشست<sup>۲</sup> و در مناطق با عمق بیشتر معمولاً پدیده ریزش در جبهه کار رخ می‌دهد. روش‌های تعیین فشار جبهه کار به سه دسته تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی می‌شود. در روش‌های تحلیلی پارامترهای متعددی در تعیین فشار سینه کار لحاظ می‌شود که این روش‌ها اعداد دقیق و مناسبی برای طراحی‌های مرحله تکمیلی در اختیار طراح قرار می‌دهند. روش‌های عددی نیز معمولاً برای تایید مقادیر حاصله از روش‌های تحلیلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه به بررسی روش‌های مختلف برآورد فشار نگهداری جبهه کار پرداخته می‌شود.

## ۳-۲- طراحی فشار جبهه کار

طراحی فشار جبهه کار باید همواره در طول پروژه مد نظر قرار بگیرد. در ماشین‌های فشار تعادلی زمین سنسورهای فشار سنج روی دیواره فشار نصب می‌شوند که نمونه‌ای از آن در شکل زیر دیده می‌شود.



شکل (۳-۱): محل سنسورهای فشار روی دیواره فشار [۲]

<sup>۱</sup> Blow Out

<sup>۲</sup> Collapse

۲ سنسور در قسمت بالائی، ۲ سنسور در محور وسط و ۲ سنسور در قسمت پایین دیواره فشار نصب می‌شود. سنسورهای دیگر معمولاً در طول نقاله ماریپیچ نصب می‌شود [۲].

روش‌های تحلیلی به دو روش تعادل حدی<sup>۱</sup> (LEM) و تئوری فشار زمین تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های عددی نیز به دو بخش دو بعدی و سه بعدی تقسیم‌بندی می‌شوند. مقایسه بین روش‌های عددی و تحلیلی در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۳-۱): مقایسه روش‌های برآورد فشار جبهه کار [۲]

تحلیل	فشار تعادل کلی	فشار پایدار سینه کار	تحلیل نشست	گسترش باند تسلیم	پایداری سینه کار	شبیه‌سازی فرآیند حفاری
مدلسازی سه بعدی	بلی	بلی	بلی	بلی	(**)بلی	بلی
مدلسازی دو بعدی در مقطع عرضی	خیر	خیر	(***)خیر	بلی	خیر	خیر
مدلسازی دو بعدی در مقطع طولی	(بلی)	بلی	(بلی)	بلی	(**)بلی	(بلی)
روش تعادل حدی	خیر	بلی	خیر	خیر	بلی	خیر
تئوری فشار زمین	(بلی)	بلی	خیر	خیر	خیر	خیر

(\*\*): پایداری سینه کار با اندازه‌گیری نشست‌ها تایید شده است.

(\*\*\*) : شبیه‌سازی تاثیر فشار سینه کار اعمالی بر روی نشست در این مورد ممکن نمی‌باشد.

(بلی): فقط ارزیابی تقریبی

<sup>۱</sup> Limit equilibrium methods

مشاهدات زیر از جدول (۳-۱) برداشت می‌شود.

فشار تعادل کلی به امکان مقایسه کردن تاثیرات فشار محاسبه شده روی جبهه کار و نشست سطحی اشاره دارد.

آنالیز عددی سه بعدی قابلیت چشمگیری در نشان دادن بر همکنش حفاری و خاک دارد. از لحاظ فرضی به کار بستن این روش در موقعیت‌های مختلف، نتایج کامل و قابل قبولی از تاثیرات حفاری و فشار مورد نیاز برای پایداری جبهه کار می‌دهد.

آنالیز عددی دو بعدی قابل استفاده در محور طولی و عرضی می‌باشد. اما فقط در محور طولی با دقت قابل قبول، می‌توان رفتار تغییر شکل‌پذیری جبهه کار را شبیه‌سازی کرد و تاثیر فشار به کار برده شده را محاسبه کرد.

روش‌های تعادل حدی در شرایط نامعلوم ژئوتکنیکی مفید می‌باشند که به علت سادگی استفاده از این روش‌ها می‌باشد و امکان انجام آنالیز احتمالاتی یا آنالیز حساسیت را دارا می‌باشند. این روش‌ها امکان تعیین نشست زمین را ندارند.

آنالیز عددی سه بعدی بیشترین پتانسیل را برای شبیه‌سازی فراهم می‌کند [۲].

### ۳-۳- روش‌های تعیین فشار جبهه کار

روش‌های تعیین فشار جبهه کار به سه دسته تجربی، تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی می‌شود.

#### ۳-۳-۱- روش‌های تجربی برآورد فشار جبهه کار

در روش‌های تجربی بر اساس مشاهدات انجام شده در حین حفاری تونل، رابطه تجربی بین یک یا چند پارامتر و مقدار فشار سینه کار برقرار می‌شود.



## ۳-۱-۳-۳ COB روش

در گزارش‌ها، برویر برای محاسبات فشار نگهداری در بیشتر خطوط مترو هلند رابطه (۱-۳) را پیشنهاد داده است که مقدار آن کمی بزرگتر از فشار فعال زمین است [۲].

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

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

در این رابطه،  $\sigma'_v$  تنش مؤثر،  $\sigma_w$  فشار آب،  $\sigma_T$  فشار نگهداری و  $K_a$  ضریب فشار جانبی خاک است.

در صورت وجود بار سطحی از رابطه زیر نیز می‌توان استفاده کرد [۱۴].

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

q بار سطحی و c چسبندگی خاک می‌باشد.

۳-۱-۳-۳-۲ روش ابداع شده توسط یامازاکی<sup>۱</sup>

در این روش ساده، به فشار هیدرواستاتیکی سطح زمین  $30 \text{kPa}$  اضافه می‌کنند. این روش بیشتر توسط ژاپنی‌ها استفاده شده و خواص مکانیکی یا فیزیکی زمین و هندسه تونل تأثیری ندارد [۱۵].

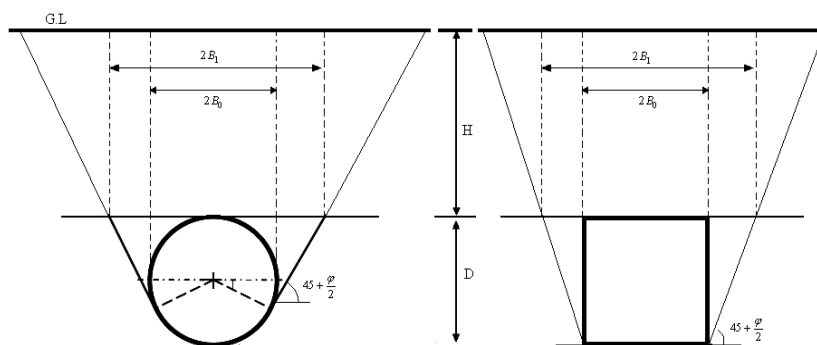
$$p = h_w + 30 \text{kPa} \quad (4-3)$$

## ۳-۱-۳-۳-۳ نظریه ترزاقی

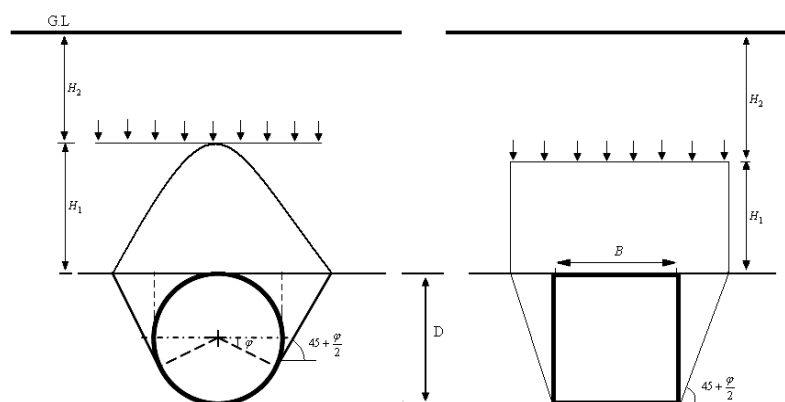
نظریه ترزاقی برای محاسبه بار روی تونل در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده ارائه شده است. ترزاقی در سال ۱۹۴۳، نظریه تئوری قوس فشار را بیان کرد که اگر قسمتی از توده خاک در بالای فضای تونل در حین حفاری به حد تسلیم برسد، خاک در آن ناحیه دچار ریزش شده و در نتیجه توده‌های خاک مجاور نیز تحت تاثیر ناحیه سست شدگی از وضعیت ساکن خود خارج می‌شوند. حرکت خاک در ناحیه سست

<sup>۱</sup> yamazaki

شدگی با ممانعت قسمتی از خاک که بین ناحیه سست شده و ناحیه ثابت مواجه می‌شود، بنابراین مقاومت برشی توده تسلیم شده را تا حد امکان در جای خود نگه‌داشته و باعث کم شدن فشار روی سیستم نگهداری می‌شود. در نواحی کم عمق ( $H < 2B_1$ )، مطابق شکل (۲-۳)، ناحیه سست شده به سطح زمین می‌رسد که اصطلاحاً حالت بدون قوس را تشکیل می‌دهد. فشار عمودی روی تونل در این حالت از رابطه (۵-۳) به دست می‌آید. در نواحی عمیق ( $H > 2B_1$ )، قوسی مطابق شکل (۳-۳) 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 (۶-۳) به دست می‌آید [۱۸].



شکل (۲-۳): ناحیه سست‌شدگی در تونل‌های کم عمق [۱۹]



شکل (۳-۳): تشکیل قوس در تونل‌های عمیق [۱۸]

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

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left( 1 - e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_1}{B_1}} \right) + (\gamma \cdot H_2 + q_0) \cdot \left( e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_1}{B_1}} \right) \quad (6-3)$$

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،  $\gamma$  وزن مخصوص خاک،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی و  $\sigma_v$  فشار عمودی متوسط روی تاج تونل می‌باشد [۱۹].

عرض بارگذاری برای مقاطع مربع یا مستطیل و دایره به ترتیب از روابط  $(7-3)$  و  $(8-3)$  به دست می‌آید [۱۹].

$$B_1 = B_0 + D \cdot \tan(45 - \varphi/2) \quad (7-3)$$

$$B_1 = R \left[ \tan(45 - \varphi/2) + (\cos(45 - \varphi/2))^{-1} \right] = R \left[ \cot\left(\frac{45}{2} + \frac{\varphi}{4}\right) \right] \quad (8-3)$$

که در این روابط  $R$  شعاع تونل است. در عمق‌های خیلی زیاد در تونلهایی با مقطع دایره ای و مربعی یا مستطیلی از ارتفاع روباره صرف نظر شده و فشار عمودی از رابطه  $(9-3)$  به دست می‌آید.

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

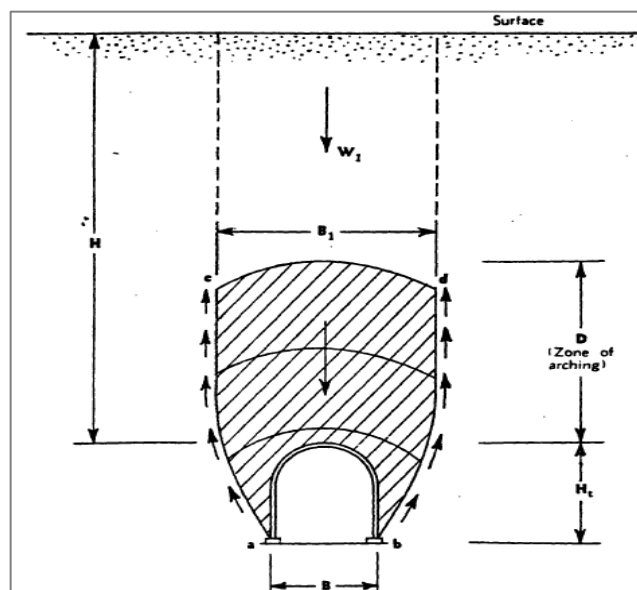
آزمایش‌های انجام شده به وسیله ترزاقی نشان داد که پدیده قوسی شدن در ماسه، در تونلهای دایروی حداکثر تا ۵ برابر شعاع از مرکز تونل و در تونل‌های مربعی حداکثر تا ۵ برابر عرض از مرکز تونل ادامه می‌یابد.

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  $(10-3)$  به دست می‌آید [۱۸].

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma}{K_0 \cdot \tan \varphi} \quad (10-3)$$

### ۳-۱-۳-۱-۳-۳- پیشنهاد ترزاقی برای بارهای وارده روی سیستم نگهداری تونل

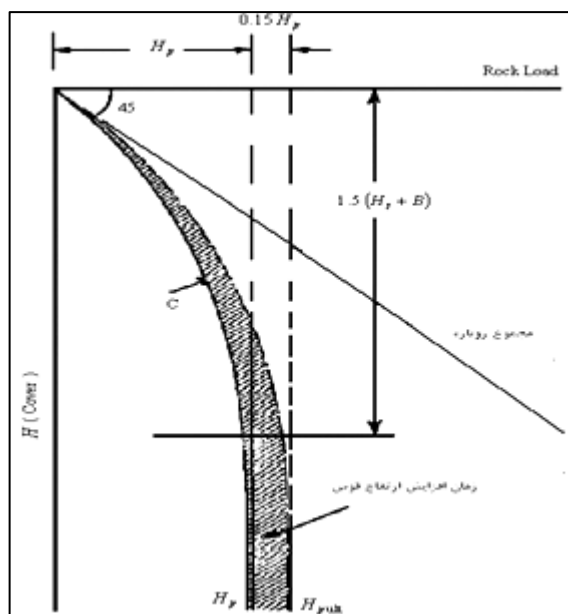
ترزاقی اطلاعات و آزمایشات زیادی از پروژه های مختلف تونلسازی به منظور طراحی بار وارده روی سیستم نگهداری، تحت شرایط مختلف زمین شناسی جمع آوری کرده است و بسیاری از توصیه های ترزاقی هنوز هم قابل می باشد. ترزاقی در نظر گرفت که بار روی سیستم نگهداری ناشی از ارتفاع موادی می باشد که در سقف تونل تمایل به افت دارند. از دیدگاه ترزاقی از تمامی شرایط زمین شناسی، سنگ های خرد شده و ماسه دارای اثر قوسی<sup>۱</sup> هستند. رفتار قوسی<sup>۲</sup> نشان دهنده ظرفیت سنگ هایی که در بالای تونل واقع شده و قسمت زیادی از وزن لایه های بالایی را تحمل می کند [۱۸]. قسمتی از زمین که این بار را منتقل می کند قوس زمین<sup>۳</sup> می گویند [۱۹].



شکل (۳-۴): قوس زمین [۱۹]

<sup>۱</sup> Arching effect  
<sup>۲</sup> Arch action  
<sup>۳</sup> Ground arch

مکانیزم رفتار قوسی در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۳-۵): رابطه بین ارتفاع سست‌شدگی با ارتفاع روباره روی یک تونل در ماسه یا سنگ خرد شده [۱۹]

همان‌طور که در شکل (۳-۵) دیده می‌شود، با افزایش ارتفاع، بار روی سیستم نگهداری نیز زیاد می‌شود اما با افزایش عمق تونل از یک حدی به بعد، بار روی سیستم نگهداری ثابت باقی می‌ماند [۱۹].

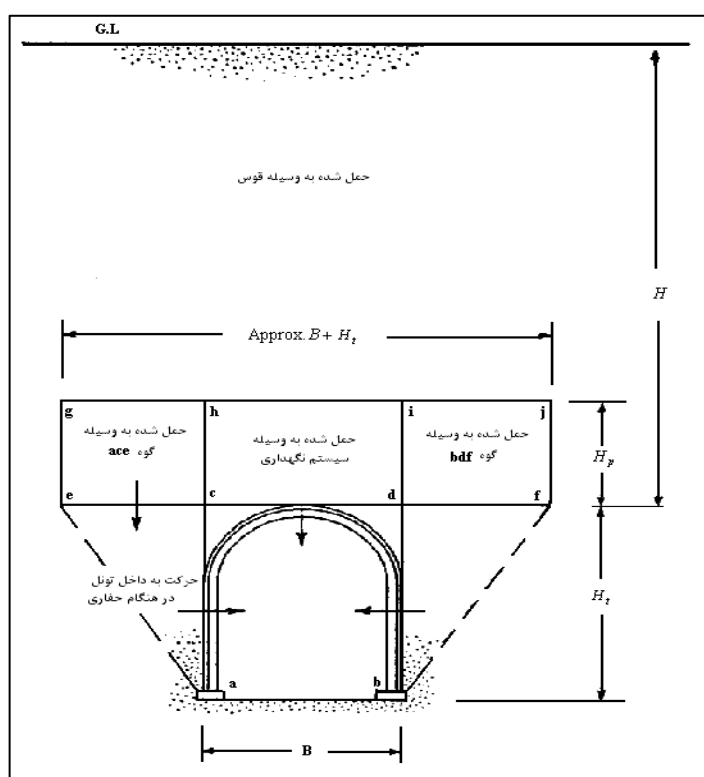
در نهایت ترازقی یک مدل ساده برای محاسبه بار روی سیستم نگهداری بیان کرد. وزن قسمت اصلی روباره با ارتفاع  $H$  توسط نیروهای اصطکاکی به موادی که در اطراف تونل واقع شده، منتقل می‌گردد. سقف تونل فقط یک قسمتی از ارتفاع  $H_p$  را تحمل می‌کند که به این ارتفاع، ارتفاع روباره معادل گفته می‌شود.

ترازقی پیشنهاد کرد که ضخامت قوس زمین ( $D$ ) را به اندازه  $1.5$  برابر عرض بارگذاری ( $B_1$ ) قرار دهیم. در داخل محدوده قوس زمین، حرکت کوچکی به داخل تونل باعث کاهش بار سنگ روی سیستم نگهداری می‌شود که مقدار آن را  $H_{pMin}$  می‌گویند. اگر میزان نشست از این حد بیش‌تر شود بار سنگ روی سیستم نگهداری افزایش یافته که مقدار آنرا  $H_{pMax}$  می‌گویند. طبق پیشنهاد ترازقی برای جلوگیری از افزایش

ارتفاع سست‌شدگی، باید سیستم نگهداری بلافاصله بعد از حفر فضا نصب شود. هم‌چنین مطابق شکل (۳-۵)، بعد از نصب سیستم نگهداری حدوداً ۱۵ درصد به ارتفاع سست‌شدگی اولیه اضافه می‌شود که به آن زمان افزایش ارتفاع قوس می‌گویند.

ترزاقی برای محاسبه ارتفاع سست‌شدگی مطابق شکل (۳-۶)، رابطه (۳-۱۱) را ارایه نموده است.

$$H_p = C \times (B + H_t) = c \times B_1 \quad (3-11)$$



شکل (۳-۶): مدل بار روی تونل [۱۹]

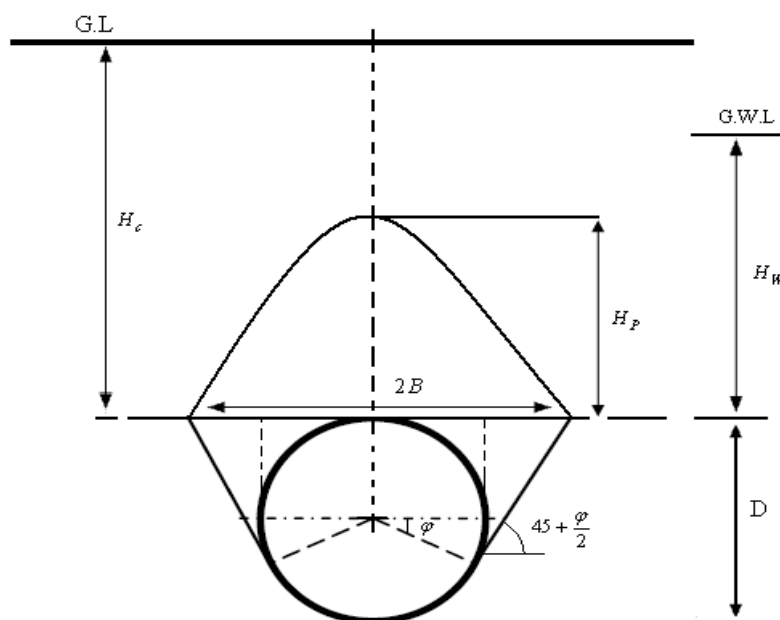
مقدار ضریب ثابت C برای حالتی که تونل بالاتر یا زیر سطح آب زیرزمینی حفاری شده باشد، در

جدول (۳-۲) آمده است [۱۹].

جدول (۳-۲): ارتفاع سست شدگی در روش ترزاقی [۱۹]

نوع خاک	مقدار	تونل بالای تراز آب زیرزمینی		تونل پایین تراز آب زیرزمینی	
		$H_{P \min}$	$H_{P \max}$	$H_{P \min}$	$H_{P \max}$
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	$0.54(B + H_t)$	$0.69(B + H_t)$	$1.08(B + H_t)$	$1.38(B + H_t)$

در روش محاسباتی دیگر، ارتفاع سست شدگی از تقسیم تنش قائم بر وزن مخصوص خاک به دست می آید. شکل زیر قوس بالای تونل را نشان می دهد.



شکل (۳-۷): قوس بالای تونل [۱۷]

$$\sigma_v = \frac{B_1 \cdot \gamma - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left( 1 - e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_c}{B_1}} \right) + q_0 \left( e^{-K_0 \cdot \tan \varphi \cdot \frac{H_c}{B_1}} \right) \quad (۱۲-۳)$$

$$H_p = \sigma_v / \gamma_d \quad (۱۳-۳)$$

فشار جانبی خاک جلوی ماشین حفاری در مرکز تونل در حالتی که تونل بالای سطح آب زیرزمینی حفاری شده باشد، از رابطه (۳-۱۴) به دست می‌آید.

$$\sigma_T = K_a \times \gamma_d \times (H_P + R) \quad (۳-۱۴)$$

$$K_a = (1 - \sin \varphi) / (1 + \sin \varphi) \quad (۳-۱۵)$$

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 را به دو بخش تقسیم کرده و فشار ناحیه خشک از رابطه (۳-۵) 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 [۱۷]. 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 [۱۹].

### ۳-۳-۲- روش‌های تحلیلی برآورد فشار جبهه کار

روش‌های تحلیلی به دو بخش تقسیم‌بندی می‌شود:

- روش‌های تعادل حدی (LEM)
- روش‌های تحلیل حدی تنش<sup>۱</sup> (LASM)

<sup>۱</sup> Limit analyses stress methods



فاکتورهای عمومی در روش‌های تعادل حدی به شکل زیر است:

- مشخص کردن سطح شکست بحرانی
- توزیع تنش را در طول سطح شکست

حل مسئله از طریق روش‌های تعادل حدی، با در نظر گرفتن خاک به عنوان یک جسم صلب صورت می‌گیرد.

روش آنالیز حدی تنش، مسئله را از حدود پائینی تا بالایی تنش مورد تحلیل و بررسی قرار می‌دهد. به بیان دیگر از حالت استاتیکی تا حالت دینامیکی مسئله را بررسی می‌کند [۲].

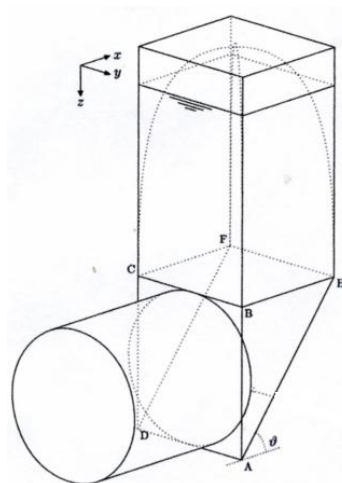
روش‌های تحلیلی برآورد فشار جبهه کار در جدول (۳-۳) آورده شده است.

جدول (۳-۳): روش‌های تحلیلی برای برآورد فشار جبهه کار [۲]

روش‌ها	سال ارائه	نوع مدل	سطح گسیختگی	معیار گسیختگی
هورن	۱۹۶۱	سه بعدی	خطی (گوه + سیلو)	-
میورینما	۱۹۶۶	دو بعدی	اسپیرال	موهر- کولمب
برامز و بنرمارک	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

۳-۳-۱- روش هورن<sup>۱</sup>

در این روش مکانیزم شکست سه بعدی بوده که به شکل سیلو و گوه می‌باشد. این روش دارای کاربرد نمی‌باشد اما توسط تعدادی از محققان برای بسط و توسعه مورد استفاده قرار گرفت [۲].



شکل (۳-۸): مکانیزم شکست در روش هورن [۲۱]

۳-۳-۲- روش میوریما<sup>۲</sup> (۱۹۶۶)

در این مدل سطح گسیختگی به صورت پیچ<sup>۳</sup> لگاریتمی در نظر گرفته شده و بار ناشی از وزن خاک  $q_w$  بر طبق نظریه ترزاقی (۱۹۳۳) محاسبه می‌شود. در شکل (۳-۹) مدل پایداری جبهه کار در روش میوریما را نشان می‌دهد. برای پایداری جبهه کار لازم است که تعادلی بین ممان حاصل از نیروهای وزن ( $q_w + G$ ) و نیروی اعمال شده روی سینه کار تونل ( $S$ ) و مقاومت برشی در طول سطوح گسیختگی به وجود آید. در این روش شرایط پایداری سینه کار بسیار نامساعد در نظر گرفته می‌شود، بنابراین بیشترین فشار نگهداری از روابط (۳-۱۶)، (۳-۱۷) و (۳-۱۸) به دست می‌آید [۲].

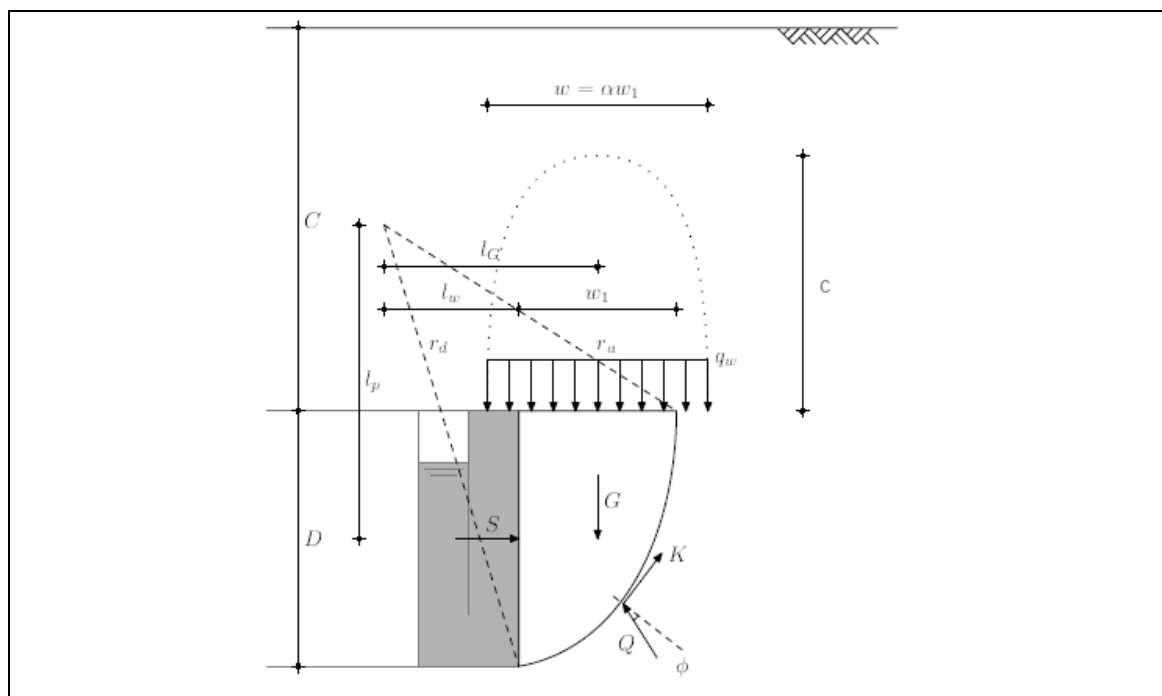
<sup>۱</sup> Horn  
<sup>۲</sup> Murayama  
<sup>۳</sup> Spiral

$$S = (G.l_G + q_w.W_1(l_w + W_1/2) - c(r_d^2 - r_a^2)/2 \tan \phi) / 2R.l_p \quad (16-3)$$

$$P = S \cdot D \quad (17-3)$$

$$r_a = r_d \cdot e^{\theta \cdot \tan \phi} \quad (18-3)$$

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



شکل (۳-۹): مدل پایداری جبهه کار در روش میوریما [۲۴]

$L_p$  فاصله عمودی مرکز دایره لغزش از محور تونل،  $L_G$  فاصله افقی مرکز دایره لغزش از مرکز جرم گوه،  $L_w$  فاصله افقی مرکز دایره لغزش از جبهه کار می باشد.

۳-۳-۲-۳- روش بورمز و بنرمارک<sup>۱</sup>

این روش در خاک‌های چسبنده غیر زهکشی شده کاربرد دارد. تحقیقات انجام شده رابطه‌ای بین تنش روی جبهه کار و مقاومت برشی غیر زهکشی شده در خاک برای تونل‌هایی با مقطع دایروی که در رس‌های همگن ساخته شده را به وجود می‌آورد. فاکتور بارگذاری ( $N$ ) از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۶].

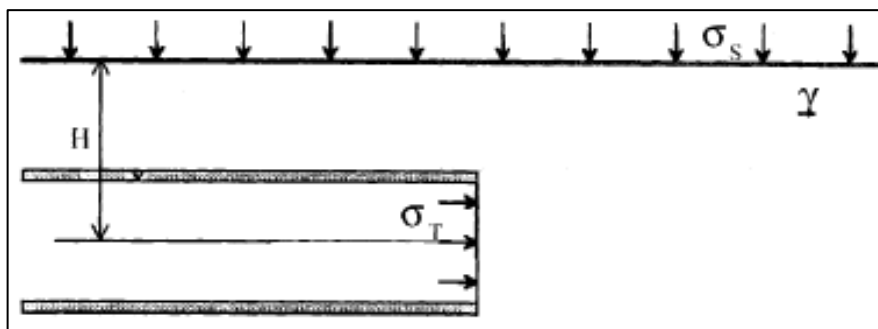
$$N = \frac{\sigma_s + \gamma H - \sigma_t}{s_u} \quad (۱۹-۳)$$

$H$ : ارتفاع مرکز تونل از سطح

$\sigma_s$ : اضافه بار سطحی

$s_u$ : مقاومت برشی غیر زهکشی شده

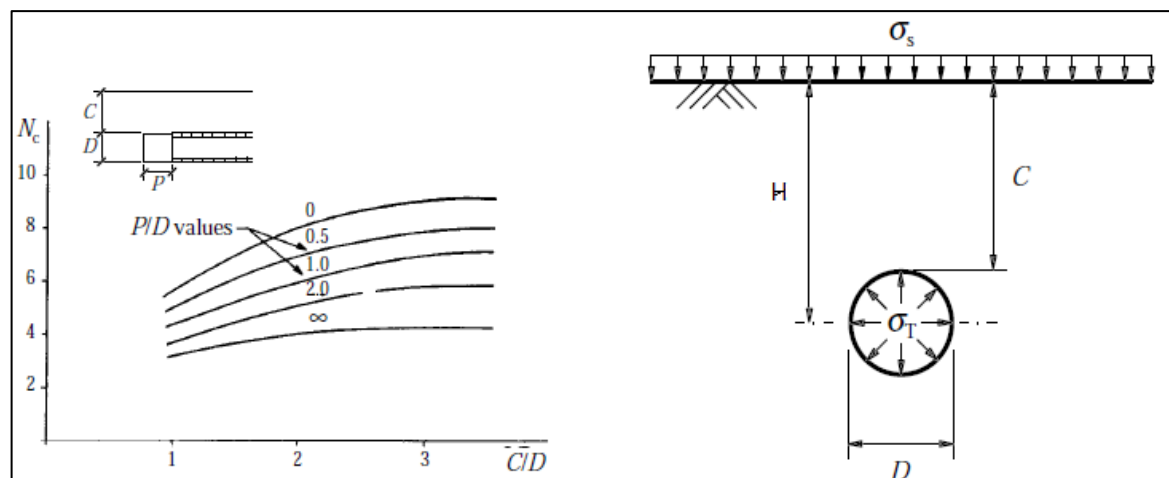
$\sigma_t$ : فشار به کار رفته در جبهه کار تونل



شکل (۳-۱۰): پارامترهای موثر در روش بورمز و بنرمارک [۱۶]

فاکتور بارگذاری ( $N$ ) نباید از ۶ بیشتر شود و در صورتی که فاکتور بارگذاری زیر ۵ باشد، تونل در حالت پایدار می‌باشد. اگر ( $N$ ) از ۵ بیشتر شود، فضای خالی اطراف سگمنت به خوبی پر نمی‌شود، اگر ( $N$ ) بیشتر از ۷ باشد، سپر تمایل به انحراف پیدا کرده و پیشرفت تونل سخت و دشوار می‌شود [۱۶]. با استفاده از این شکل (۳-۱۱) نیز می‌توان فاکتور بارگذاری را پیدا کرد [۲۰].

<sup>۱</sup> Broms & Bennemark



شکل (۳-۱۱): نمودار فاکتور بارگذاری و پارامترهای وابسته [۲۰]

در این نمودار،  $p$  طول بدون پوشش تونل و  $D$  قطر تونل می‌باشد.

### ۳-۲-۴- روش اتکینسون و پاتز<sup>۱</sup> (۱۹۷۷)

این روش برای تعیین حداقل فشار نگهداری جبهه کار 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. بار سطحی و  $\gamma$  وزن مخصوص خاک می‌باشد. مورد دوم شامل دو روش کران پایین است که معمولاً با در نظرگیری یک ضریب ایمنی، فشار نگهداری حداقل ( $S_{min}$ ) از روابط (۳-۲۰) و (۳-۲۱) بدست می‌آید.

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

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

در این رابطه  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی،  $R$  شعاع تونل،  $K_p$  ضریب فشار غیر فعال خاک است [۲].

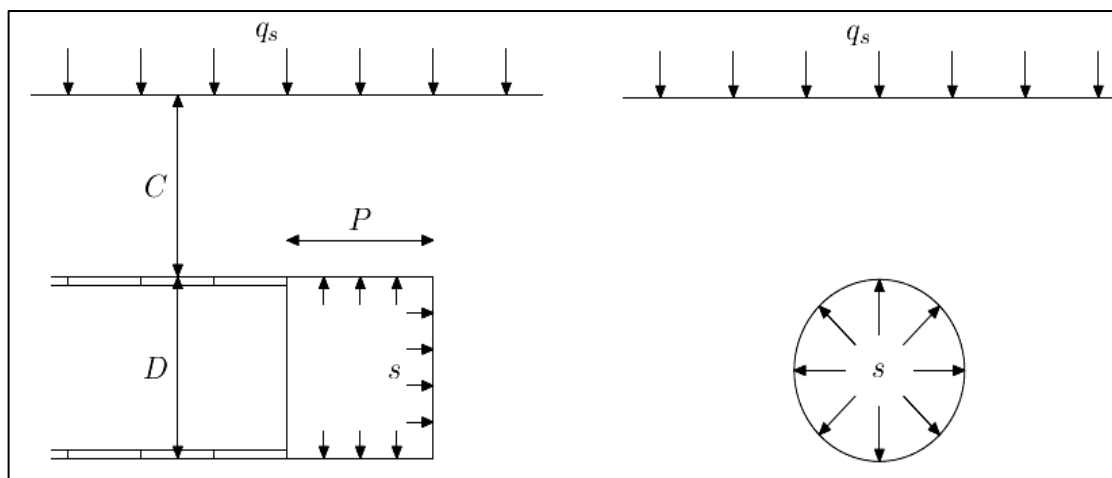
<sup>۱</sup> Atkinson & Potts

۳-۲-۵- روش دیویس و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۸۰)

این روش برای تحلیل پایداری یک تونل با شعاع  $R$  در خاک چسبنده، جایی که سیستم نگهداری تونل به فاصله  $P$  از جبهه کار حفاری نصب شده، به کار می‌رود. روش کران بالا و پایین تحت شرایط کلی برای دو حالت خاص یعنی  $P = \infty$  (مطابق شکل (۳-۱۲)) و  $P = 0$  تحلیل شده است. حالت  $P = 0$  برای شرایطی که حفاری با TBM انجام شده باشد، استفاده می‌شود که برای این حالت دو روش کران پایین با یک میدان تنش سیلندری و یک میدان تنش کروی تعریف می‌شود. ضریب پایداری برای دو میدان تنش به ترتیب در روابط (۳-۲۲) و (۳-۲۳) تعریف شده است و در شکل (۳-۱۳) رابطه ضریب پایداری با روباره و قطر تونل آورده شده است. ضریب پایداری بزرگتر از ۶ بیانگر ناپایداری جبهه کار تونل در این روش است [۲۴].

$$N = 2 + 2 \ln(C/R + 1) \quad (۳-۲۲)$$

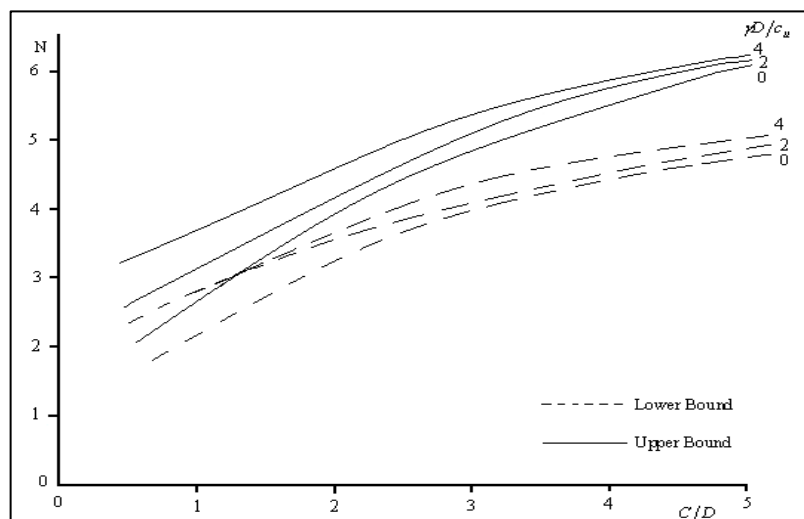
$$N = 4 \cdot \ln(C/R + 1) \quad (۳-۲۳)$$



شکل (۳-۱۲): شمایی از روش بارگذاری در روش دیویس [۲۴]

<sup>۱</sup> Davis et al

دیویس و همکاران راه حل دو بعدی برای محفظه‌های<sup>۱</sup> بدون پوشش، برای کران بالایی و پایینی بدست آوردند که در نمودار زیر دیده می‌شود [۲۴].



شکل (۳-۱۳): عدد پایداری برای روش کران بالا و پایین برای یک تونل [۲۴]

### ۳-۳-۲-۶- روش کروس<sup>۲</sup> (۱۹۸۷)

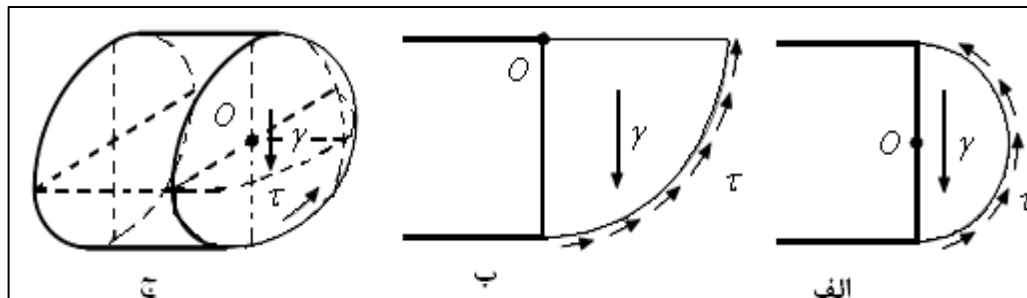
در این روش کمترین فشار نگهداری برای حالات مختلف شکستگی، مطابق شکل (۳-۱۴)، در نظر گرفته می‌شود. شکل (ب) یک مدل با سطح گسیختگی یک ربع دایره را نشان می‌دهد که متناظر با بیشترین مقدار برای حداقل فشار نگهداری جبهه کار می‌باشد و در رابطه (۳-۲۴) آورده شده است. البته کروس بیان کرد که این مکانیزم شکست همواره ایده‌آل و واقع‌گرایانه نیست. در بسیاری از موارد مدل نیم‌بیضوی (شکل ج) نتیجه نزدیک‌تری به واقعیت دارد. در این مورد حداقل فشار سینه کار از رابطه (۳-۲۵) بدست می‌آید.

$$S_{\min} = \cot \phi \cdot (D \cdot \gamma' / 9 - \pi \cdot c / 2) \quad (3-24)$$

$$S_{\min} = \cot \phi \cdot (D \cdot \gamma' / 3 - \pi \cdot c / 2) \quad (3-25)$$

<sup>۱</sup> cavity  
<sup>۲</sup> Krause

در این روابط  $c$  چسبندگی و  $S_{\min}$  حداقل فشار نگهداری است [۲۴].



شکل (۳-۱۴): روش‌های مختلف شکست در جبهه کار تونل به روش کروس [۲۴]

### ۳-۳-۲-۷- روش محکم و همکاران<sup>۱</sup> (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 به کمک روابط ترزاقی محاسبه می‌شود [۲]. بر طبق توضیحات محکم و لسچینسکی<sup>۲</sup> معادله تعادل بین نیروها و ممان‌های قائم را به صورت زیر می‌باشد:

برآیند نیروها:

$$f = \iint_D [\sigma_n + F \cdot \tau_m |n|(t/|t|) - \gamma(R-r) + P|N|] dx dy = 0 \quad (۲۶-۳)$$

برآیند ممان‌ها:

$$f = \iint_D \{rx [\sigma_n + F \cdot \tau_m |n|(t/|t|) - \gamma(R-r)] + [R \times p]|N|\} dx dy = 0 \quad (۲۷-۳)$$

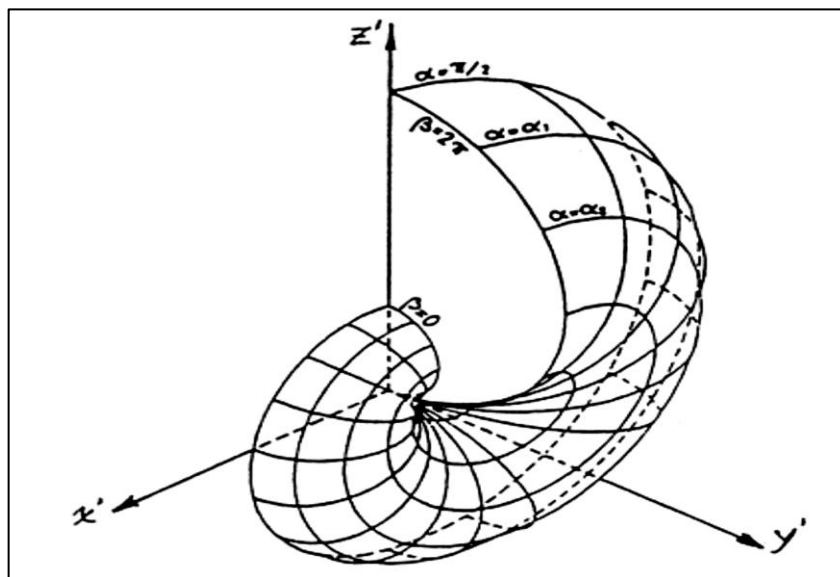
$r$  و  $R$  به ترتیب بردارهای شعاع روی سطح جبهه کار تونل و صفحه لغزش می‌باشد.  $n$  و  $N$  به ترتیب نماینده بردارهای نرمال روی سطح جبهه کار و سطح لغزش می‌باشند.  $t$  خط مماس بر سطح لغزش

<sup>۱</sup> Mohkam et al

<sup>۲</sup> Mohkam & Lechinsky



و  $P$  نیروی خارجی عمل کننده روی سطح جبهه کار می‌باشد.  $\tau_m$  مقاومت برشی و  $F$  ضریب ایمنی می‌باشد. از حل این معادله، سطح لغزش به شکل زیر بدست می‌آید [۱۵].



شکل (۳-۱۵): مکانیزم شکست در روش محکم [۱۵]

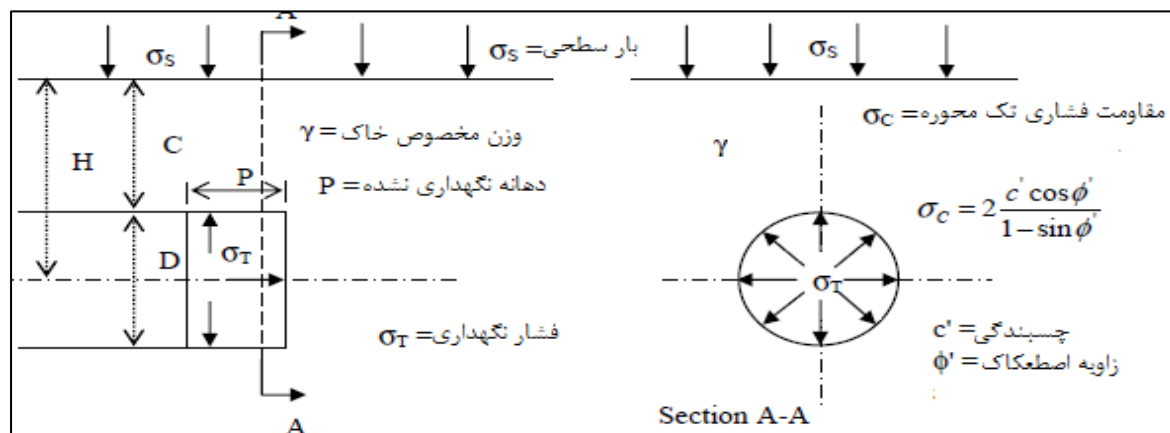
### ۳-۳-۲-۸- روش لکا و دورمیو (۱۹۹۰)

روش‌های کران بالا<sup>۱</sup> و کران پایین<sup>۲</sup> لکا و دورمیو برای پایداری سینه کار تونل‌های دایره‌ای کم عمق در موادی نظیر خاک‌های ماسه‌ای ارائه شده است. در روش کران پایین میدان تنش را برای یک جسم تحت اثر تنش، تا حدی در نظر می‌گیرد که جسم تحت تاثیر این میدان تنش گسیخته نشده و یا در لحظه شروع گسیختگی باشد. در این حالت تنش تعیین شده از بار واقعی گسیختگی کوچک‌تر است. در مقابل در روش کران بالا میدان تنش را برای یک جسم تحت اثر میدان تنش تا حدی در نظر می‌گیرد که جسم تحت تاثیر این میدان تنش گسیخته شده و یا قبلاً گسیخته شده باشد. در چنین شرایطی، تنش تعیین شده از بار واقعی گسیختگی بزرگ‌تر است. موضوع تعیین فشار سیال نگهدارنده جلوی جبهه کار تونل یک

<sup>۱</sup> Upper Bound

<sup>۲</sup> Lower Bound

مسئله 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 [۹].



شکل (۳-۱۶): مقطع تونل و پارامترهای موثر در روش لکا و دورميو [۹]

ایمینی در مقابل نشست<sup>۱</sup> و بالازدگی<sup>۲</sup> جبهه کار مبتنی بر ساز و کارهای حرکت بلوک‌های مخروطی در جلوی جبهه کار تونل می‌باشد. روش کران بالا با فرض اینکه فاصله جبهه کار از دهانه نگهداری نشده صفر می‌باشد، مطابق شکل (۳-۱۷) 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 باشد، روی می‌دهد. در این حالت فشار دوغاب باعث پرتاب حجم زیادی از خاک در جلوی سپر می‌شود. روش تک بلوک و دو بلوک به وسیله زاویه بین محور مخروط با محور تونل با  $(\alpha)$  که در شکل (۳-۱۷) نشان داده شده است توصیف می‌شوند. در روش MIII نیز شبیه روش MI زاویه بین محور مخروط با محور تونل با  $(\alpha)$  تعریف شده، با این تفاوت که مخروط وارونه بوده و سرعت ناپیوستگی در طول سطح شکست به طرف بیرون است. در روش کران بالا زمانی نشست و بالازدگی را می‌توان کنترل کرد که به ترتیب روابط (۳-۲۸) و (۳-۲۹) برقرار باشد.

<sup>۱</sup> Collapse  
<sup>۲</sup> Blow Out

$$N_s \cdot Q_s + N_\gamma \cdot Q_\gamma \leq Q_T \quad (28-3)$$

$$N_s \cdot Q_s + N_\gamma \cdot Q_\gamma \geq Q_T \quad (29-3)$$

در روابط (28-3) و (29-3)  $Q_T$ ،  $Q_\gamma$  و  $Q_s$  پارامترهای بارگذاری هستند، که از روابط (30-3)، (31-3) و (32-3) به دست می‌آید.

$$Q_s = (K_p - 1) \sigma_s / \sigma_c + 1 \quad (30-3)$$

$$Q_T = (K_p - 1) \sigma_T / \sigma_c + 1 \quad (31-3)$$

$$Q_\gamma = (K_p - 1) \gamma \cdot D / \sigma_c \quad (32-3)$$

$$K_A = \frac{1 - \sin \theta'}{1 + \sin \theta'} \quad (33-3)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \theta'}{1 - \sin \theta'} \quad (34-3)$$

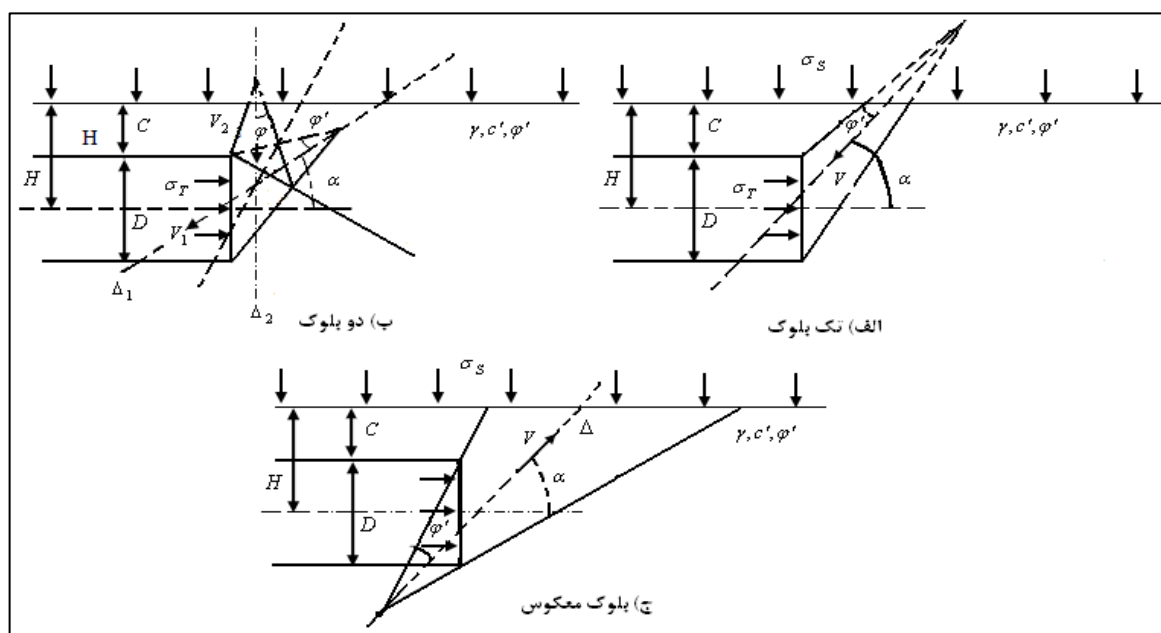
ضرایب وزنی  $N_s$  و  $N_\gamma$  با توجه به شکل (3-18) تابعی از نسبت  $C/D$  و  $\varphi'$  هستند [23]. حالت ایده‌آل مکانیزم شکست دو بلوک در حالت کران بالا در تونل‌های کم عمق  $C/D \leq 0.25$  برای زاویه اصطکاک داخلی  $30^\circ$  درجه است. نتایج شکست یک بلوک و دو بلوک در حالت  $C/D > 1$  مشابه هم است.  $N_s^{c+}$  تقریباً همیشه کوچک‌تر از  $N_\gamma^{c+}$  و برای  $C/D \geq 0.6$  به ازای هر مقدار از  $\varphi'$  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.

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

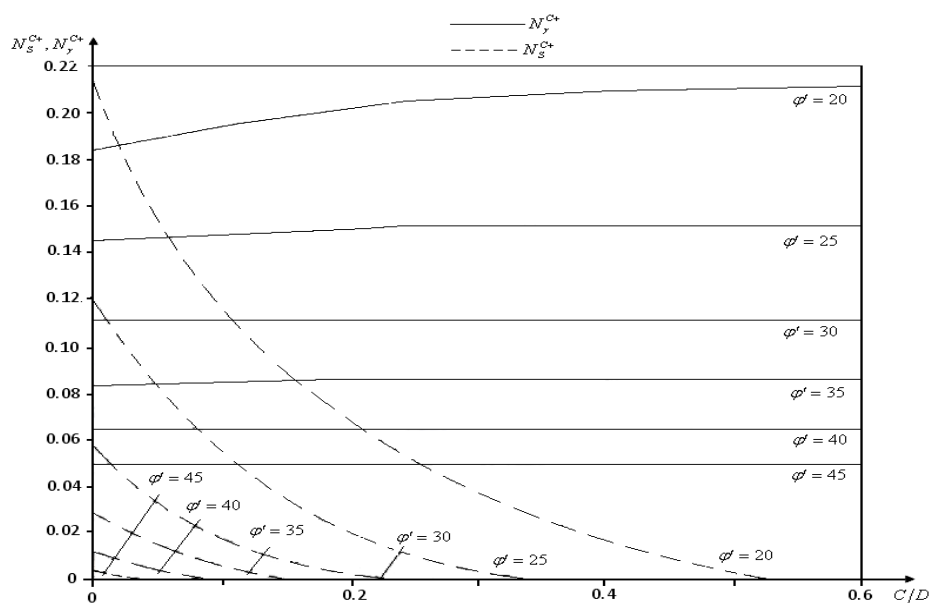
$$N_c = (N_s - 1) / \tan \varphi \quad (36-3)$$

$$\sigma_T = N_s \sigma_s + N_\gamma \gamma D \quad (37-3)$$

از رابطه (۳-۳۵) 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 (۳-۳۷) برای محاسبه فشار خاک در شرایطی که چسبندگی صفر است، استفاده می‌شود [۸].



شکل (۳-۱۷): مکانیزم‌های شکست مخروطی [۹]

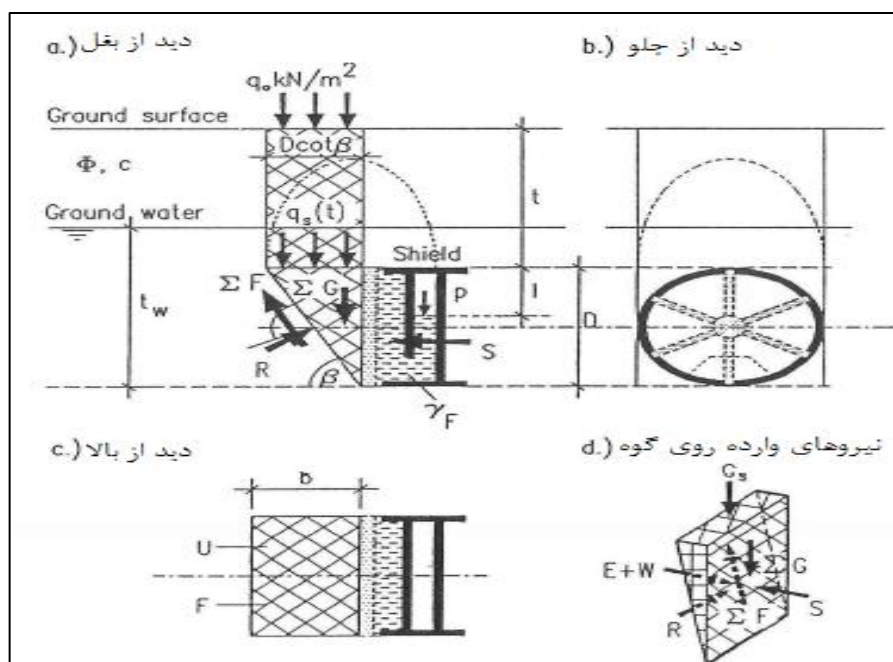


شکل (۳-۱۸): مقادیر  $N_s^{c+}$  و  $N_\gamma^{c+}$  برای مکانیزم نشست [۸]

۳-۳-۲-۹- روش جانسکز و استاینر (۱۹۹۴)

این روش بر حسب تعادل حدی بوده و فشار جبهه کار را برای تونل‌های حفر شده در خاک‌های دانه‌ای و غیر چسبنده محاسبه می‌کند. در این روش تعادل حدی به منظور تعادل آب و فشار زمین در جبهه کار و فشار نگهداری مورد نیاز محاسبه می‌شود. این روش از سال ۱۹۸۷ آزمایش شد و نتیجه این آزمایشات منطقی بود تا اینکه در سال ۱۹۹۴ این رابطه ارائه شد. 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 در شکل (۳-۱۹) نشان داده شده است [۲۲]. این روش کمترین فشار نگهداری مورد نیاز برای نگهداری جبهه کار تونل را محاسبه می‌کند [۲۴].

در این روش نیروی قائم ناشی از سیلو که روی سطح افقی گوه وارد می‌شود از رابطه قوس فشار ترازقی بیان می‌شود.



شکل (۳-۱۹): مدل تعادل حدی ۳ بعدی [۲۲]

$$q_s(t) = \frac{F}{U} \gamma^{-c} \left\{ 1 - \exp\left(t \frac{U}{F} \lambda \tan \phi\right) \right\} \quad (38-3)$$

$\gamma$  وزن مخصوص،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی،  $c$  چسبندگی،  $\lambda$  ضریب فشار زمین،  $U$  و  $F$  نیز به ترتیب محیط و مساحت صفحه افقی گوه می‌باشند. فشار قائم روی گوه تابعی از زاویه لغزش می‌باشد.

از نوشتن معادلات تعادل برای گوه به رابطه زیر می‌رسیم:

$$E = \frac{\sum G(\sin \beta - \cos \beta \tan \phi) - \sum F}{\tan \phi \sin \beta - \cos \beta} \quad (39-3)$$

حداکثر فشار زمین زمانی حاصل می‌شود که رابطه (3-40) برقرار باشد.

$$\frac{dE}{d\beta} = 0 \quad (40-3)$$

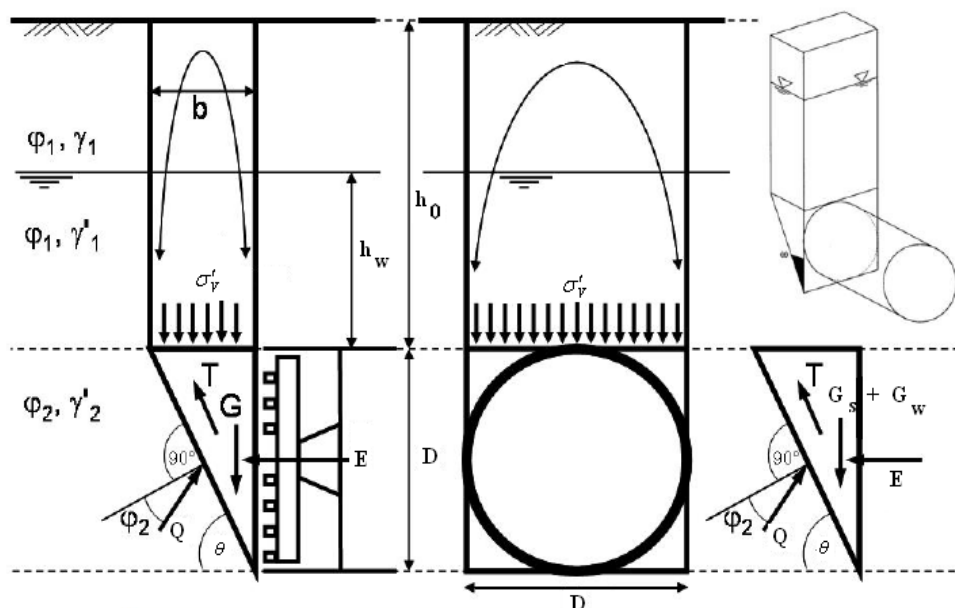
$\beta$  تابعی از  $\phi$  و  $\frac{t}{D}$  می‌باشد. مقدار  $\beta$  از جدول (3-5) و شکل (3-22) بدست می‌آید. از نمودار مشخص

است که هر چه  $\beta$  بزرگتر شود، عرض سیلو کم می‌شود و به تبع آن، فشار نیز کاهش می‌یابد. مقدار روباره وقتی از دو برابر قطر بیشتر شود فشار قائم تاثیر زیادی روی زاویه  $\beta$  ندارد [22].

ضریب فشار 3 بعدی زمین از روابط (3-52) تا (3-55) بدست می‌آید که این ضریب به زاویه لغزش، زاویه اصطکاک و مقدار روباره وابسته می‌باشد. بعد از محاسبه ضریب فشار 3 بعدی زمین، از رابطه (3-39) فشار خاک محاسبه می‌شود، سپس از رابطه (3-50) نیروی کل وارده روی جبهه کار تونل محاسبه می‌شود [8].

$$E = K_{A3} \times \sigma_v \quad (41-3)$$

به صورت کلی برای بدست آوردن فشار نگهداری جبهه کار از روابط (3-44) تا (3-49) که در زیر آورده شده، استفاده می‌شود.



شکل (۳-۲۰): نمایی از چگونگی توزیع بار روی جبهه کار تونل در

روش جانسکز و استاینر [۲۴]

فشار عمودی وارد از سیلو بر روی گوه بر طبق رابطه ترازقی در دو حالت بدون آب از رابطه کلی (۳-۴۲) و در حالتی که دارای آب زیرزمینی است، از رابطه کلی (۳-۴۳) به دست می‌آید. که در این روابط  $\gamma_d$  وزن مخصوص خشک خاک،  $\gamma'$  وزن مخصوص غوطه‌ور خاک،  $K_0$  ضریب فشار جانبی خاک که از رابطه  $(K_0 = 1 - \sin \varphi)$  به دست می‌آید [۲۳].

$$\sigma'_v = \frac{a \cdot \gamma_d - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{h_0 \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right] + q_0 \cdot e^{-\frac{h_0 \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \quad (۳-۴۲)$$

$$\sigma'_v = \frac{a \gamma' - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right] + \left[ \frac{a \cdot \gamma_d - c}{K_0 \cdot \tan \varphi} \left( 1 - e^{-\frac{h_0 - h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right) + q_0 e^{-\frac{h_0 - h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \right] \cdot e^{-\frac{h_w \cdot K_0 \cdot \tan \varphi}{a}} \quad (۳-۴۳)$$

در این روابط  $c$  چسبندگی خاک،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی خاک،  $h_0$  روباره خاک،  $h_w$  ارتفاع آب زیرزمینی،  $a$  طول سست‌شدگی،  $\gamma'$  وزن مخصوص غوطه‌وری،  $D$  قطر تونل،  $q_0$  بار سطحی،  $\sigma'_v$  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 (۳-۴۴) تا (۳-۴۸) به دست آورده و

مقدار حاصله را در رابطه (۳-۴۹) 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 جبهه کار به دست می‌آید [۲۴].

$$G_s = B.D.cot \theta . \sigma'_v \quad (۳-۴۴)$$

$$G_w = \frac{B.D^2 . \gamma' . cot \theta}{2} \quad (۳-۴۵)$$

$$K = \frac{B.D.c}{\sin \theta} \quad (۳-۴۶)$$

$$T = \frac{D^2 . cot \theta}{2} (c + K_{A3} . \bar{\sigma}'_v . \tan \varphi) \quad (۳-۴۷)$$

$$\bar{\sigma}'_v = \sigma'_v + \frac{1}{3} D . \gamma' \quad (۳-۴۸)$$

$$E = - \frac{(\cos \theta . \tan \varphi - \sin \theta) . \Sigma(G_s + G_w) + \Sigma(2T + K)}{\sin \theta . \tan \varphi + \cos \theta} \quad (۳-۴۹)$$

مقدار ضریب فشار جانبی سه بعدی خاک را می‌توان از رابطه (۳-۵۲) یا شکل (۳-۲۱) و جدول (۳-۴) به دست آورد، همچنین زاویه شکست نیز بایستی به گونه‌ای تعیین می‌شود، که فشار خاک حداکثر گردد. زاویه شکست از شکل (۳-۲۲) و جدول (۳-۵) به دست می‌آید. در جدول (۳-۶) مقادیر دیگری برای ضریب فشار جانبی خاک در سیلو و گوه تعریف شده است [۲۳]. اثر روباره بر روی زاویه شکست گوه برای روباره‌های بزرگتر و مساوی ۲ برابر قطر تونل ( $h_0 \geq 2D$ ) کم می‌شود. روش سیلو ترازقی فقط برای روباره‌های بزرگتر از ۲ برابر قطر تونل ( $h_0 > 2D$ ) قابل کاربرد است در غیر اینصورت از روش ( $\sigma_v = \gamma \times h$ ) استفاده می‌شود [۲۲].



$$S = E + W \quad (50-3)$$

$$\sigma_T = \frac{4.S}{\pi.D^2} \quad (51-3)$$

$$K_{A3} = \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta - \cos^2 \theta \cdot \tan \varphi - \frac{K \cdot \alpha}{1.5} \cdot \cos \theta \cdot \tan \varphi}{\cos \theta \cdot \sin \theta + \tan \varphi \cdot \sin^2 \theta} \quad (52-3)$$

$$K \approx 1 - \sin \varphi + \tan^2 \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (53-3)$$

$$\alpha = \frac{(1 + 3C/D)}{(1 + 2C/D)} \quad (54-3)$$

$$a = \frac{(B \cdot D \cdot \cot \theta)}{2(B + D \cdot \cot \theta)} \quad (55-3)$$

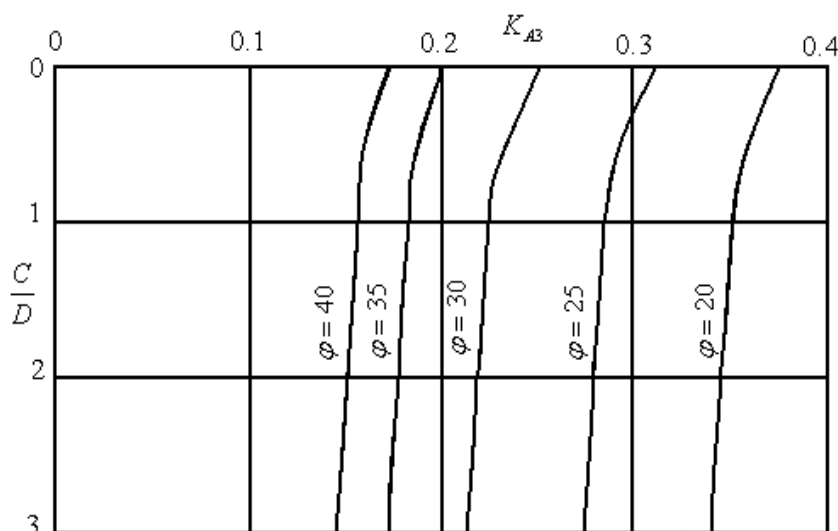
در این روابط،  $G_s$  وزن سیلو،  $B$  عرض گوه برابر  $(B = \pi \cdot D/4)$  که در محاسبات برابر قطر تونل در نظر گرفته می‌شود،  $D$  قطر تونل،  $\theta$  زاویه شکست،  $G_w$  وزن گوه،  $K$  نیروی چسبندگی،  $K_{A3}$  ضریب فشار جانبی سه بعدی خاک،  $T$  نیروی برشی خاک،  $E$  نیروی موثر جانبی خاک،  $W$  نیروی آب،  $S$  نیروی کل وارد روی جبهه کار تونل و  $\sigma_T$  تنش کل است [۲۲].

جدول (۳-۴): مقادیر ضریب فشار جانبی خاک [۲۲]

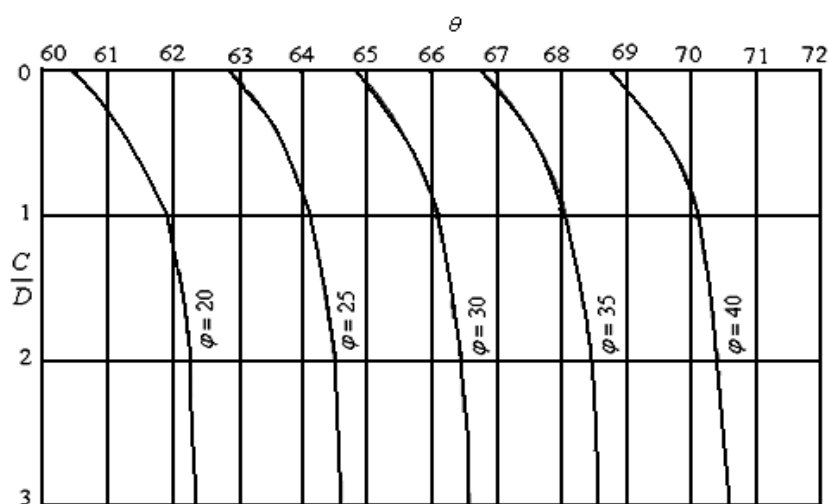
$\frac{C}{D}$	$K_{A3}$				
	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$
۰	۰/۳۸۶	۰/۳۱۰	۰/۲۴۸	۰/۱۹۹	۰/۱۵۹
۱	۰/۳۵۴	۰/۲۷۹	۰/۲۲۲	۰/۱۷۷	۰/۱۴۱
۲	۰/۳۴۸	۰/۲۷۳	۰/۲۱۷	۰/۱۷۳	۰/۱۳۸
۳	۰/۳۴۵	۰/۲۷۱	۰/۲۱۴	۰/۱۷۱	۰/۱۳۶
$K_{A2} = \tan^2(45 - \varphi/2)$	۰/۴۹	۰/۴۱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

جدول (۳-۵): مقادیر زاویه شکست گوه [۲۲]

$\frac{C}{D}$	$\theta$				
	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 25^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$
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 (۳-۲۱): ضریب فشار جانبی خاک [۲۲]



شکل (۳-۲۲): نمودار زاویه شکست گوه [۲۲]

جدول (۳-۶): مقادیر مختلف ضرایب فشار جانبی [۱۲]

$K_{\text{silos}}$	$K_{\text{wedge}}$	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)

## ۳-۳-۲-۹-۱- ضریب ایمنی

در پی تحقیقاتی که برای یافتن ضریب ایمنی مناسب برای مدل سیلو و گوه انجام می‌شد، جانسکر از دو ضریب ایمنی جدا برای فشار آب و فشار خاک استفاده کرد که نیروی کلی روی جبهه کار از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S = \eta_E E + \eta_W \cdot W \quad (۳-۵۶)$$

در این رابطه  $\eta_E$  ضریب ایمنی خاک و  $\eta_W$  ضریب ایمنی آب است [۲۴].

جدول (۳-۷): ضرایب ایمنی پیشنهادی برای فشارهای خاک و آب [۲۴] و [۲]

$\eta_w$	$\eta_E$	منابع
۱	۱/۱-۱/۳	بالتس (Balthaus, ۱۹۸۸)
۱/۰۵	$\geq ۱/۵ - ۱/۷۵$	جانسکر (۱۹۹۷)
۱/۰۵	۱/۵	برویر (Broere, ۲۰۰۱)
۱/۰۵	۱/۷	میدل و کورد (Maidle & Cordes, ۲۰۰۳)
۱/۰۵	۱/۵	Heinenord Tunnel Design
۱/۰۵	۱/۷	Botlek tunnel Design

## ۳-۳-۲-۱۰- روش کواری و آنگونستا (۱۹۹۶)

این روش مبتنی بر نظریه سیلوی جانسن<sup>۱</sup> (۱۸۹۵) و مدل سه بعدی سیلو و گوه هورن (۱۹۶۱) است. کلیات چگونگی اعمال بار در این روش در شکل (۳-۲۳) نشان داده شده است [۲۳]. در این روش، برای

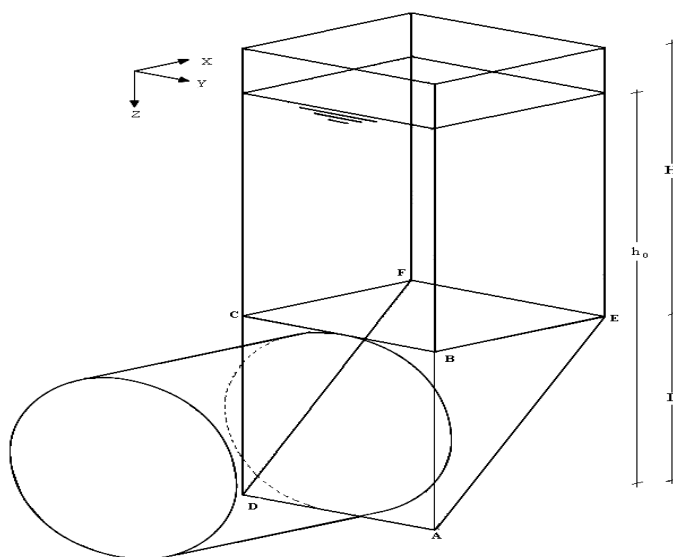
<sup>۱</sup> Janssen

ماشین سپر فشار تعادلی فشار نگهداری مؤثر با فرض حالت زهکشی شده از رابطه (۳-۶۲) به دست می‌آید [۹].

$$s' = F_0 \cdot \gamma' \cdot D - F_1 c + F_2 \cdot \gamma' \cdot \Delta h - F_3 c \frac{\Delta h}{D} \quad (۳-۵۷)$$

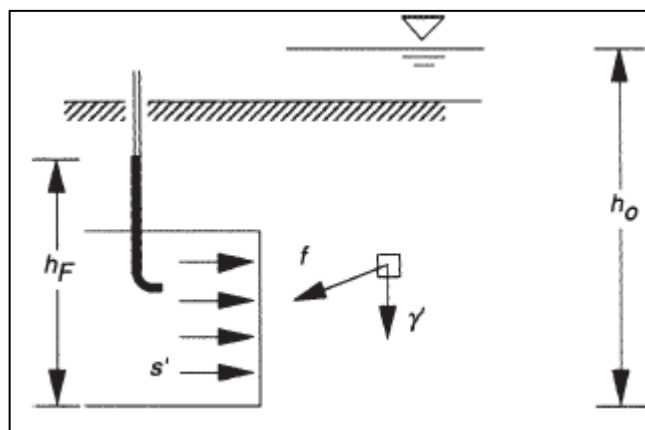
$$\Delta H = h_0 - h_f \quad (۳-۵۸)$$

که در آن،  $s'$  فشار نگهداری مؤثر،  $D$  قطر تونل،  $c$  چسبندگی خاک،  $h_0$  سطح آب،  $h_f$  سطح پیزومتریک آب درون اتاقک حفاری،  $\Delta h$  اختلاف هد آب درون اتاقک حفاری و زمین و  $F_0$ ،  $F_1$ ،  $F_2$  و  $F_3$  ضرایب بدون بعدی هستند که خود تابعی از  $\varphi$  و  $H/D$  هستند [۱۳]. این ضرایب با استفاده از یک سری نمودار بدست می‌آیند که خود این نمودارها نیز با استفاده از روش‌های عددی بدست آمده است. در این روش فشار آب به صورت کسری از هد آب در جبهه کار تونل محاسبه می‌شود، که این امر تابع جریان آب به درون اتاقک حفاری می‌باشد، به عبارتی در موارد عدم وجود جریان، هد آب به صورت کامل در نظر گرفته می‌شود، چیزی که توسط دیگر محققین محافظه کارانه فرض شده است [۹].



شکل (۳-۲۳): مدل سیلو و گوهی در روش کواری و آنگونستا [۲۴]

در رابطه بالا برای خاک‌های خشک  $\gamma_d$  (وزن مخصوص خشک) و برای خاک‌هایی که در زیر سطح ایستابی قرار گرفته‌اند از  $\gamma'$  (وزن مخصوص غوطه وری) استفاده می‌شود. معمولاً نسبت  $\frac{\gamma_d}{\gamma'}$  را برابر  $1/6$  در نظر می‌گیرند. این رابطه برای ماشین‌هایی که با مود EPB کار می‌کنند قابل استفاده است [۲۶].



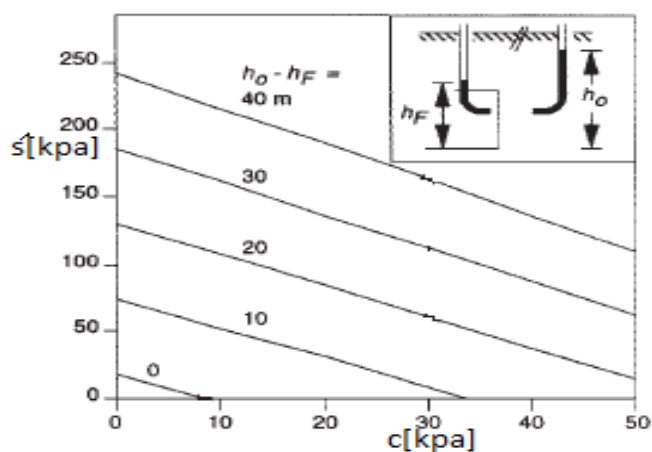
شکل (۳-۲۴): فشار نگهداری موثر [۲۶]

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

$$s = F_0 \cdot \gamma_d \cdot D - F_1 \cdot c \quad (۳-۵۹)$$

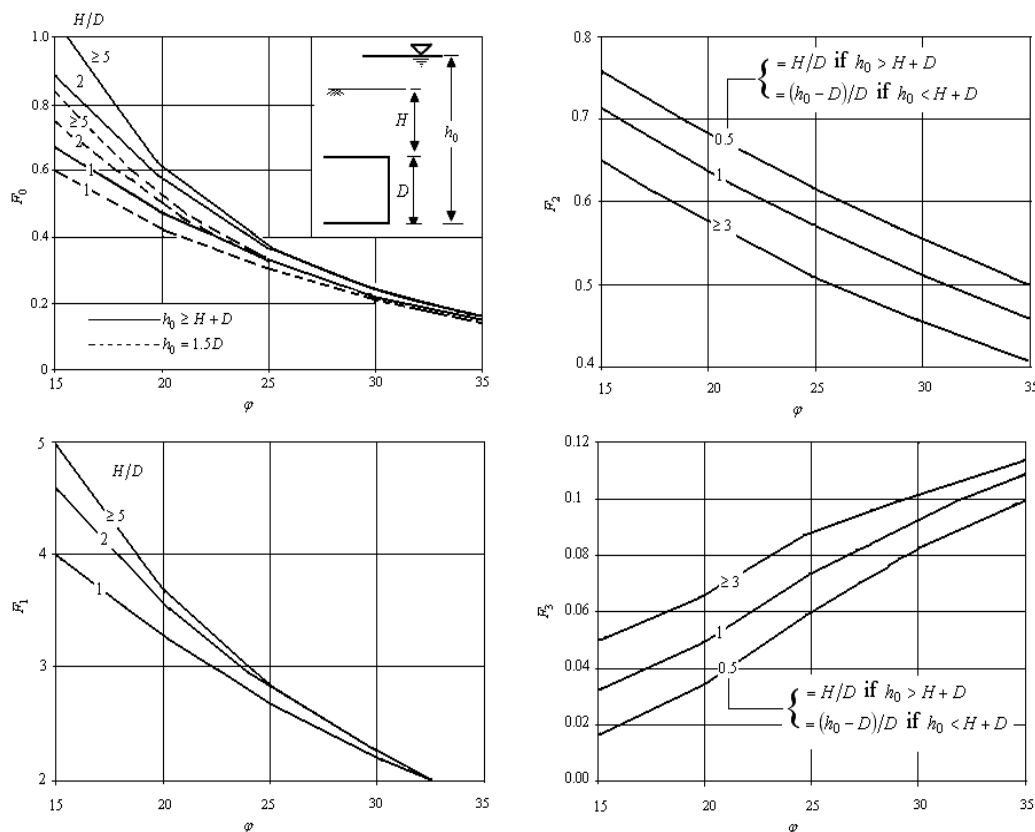
در این رابطه  $s$  فشار نگهداری کل و  $\gamma_d$  وزن مخصوص خشک خاک است [۹].

فشار نگهداری موثر را از شکل زیر نیز می‌توان بدست آورد.



شکل (۳-۲۵): فشار نگهداری موثر به عنوان تابعی از چسبندگی و اختلاف هد هیدرواستاتیک [۲۶]

همان‌طور که از شکل (۳-۲۵) پیدا می‌باشد، به منظور کاهش فشار نگهداری جبهه کار، باید اختلاف هد فشار آب مینیمم شود. برای این کار می‌توان با استفاده از زهکشی آب فشار آب را پایین آورد یا اینکه هد فشار داخل اتاقک حفاری را زیاد کنیم [۲۶].



شکل (۳-۲۵): نمودارهای محاسبه برای ضرایب بدون بعد  $F_0, F_1, F_2$  و  $F_3$  [۲۶]

فشار پایداری جبهه کار به هندسه تونل، چگونگی بهسازی خاک و نیروی نگهداری بستگی دارد. گسیختگی خاک و نشست زمین ممکن است، به ساختمان‌ها و دیگر سازه‌های مرتبط آسیب وارد کند. حتی شکست‌های کوچک می‌تواند بر ساختمان‌های اطراف اثر بگذارد، یعنی منجر به افزایش نشست شود اگر چه در بیشتر موارد اثر آن روی سازه قابل تشخیص نیست. کاربرد روش‌های مناسب ضمن کنترل نشست، می‌تواند سهم مهمی در کاهش اثرات آن داشته باشد. این روش‌ها عبارتند از [۹]:

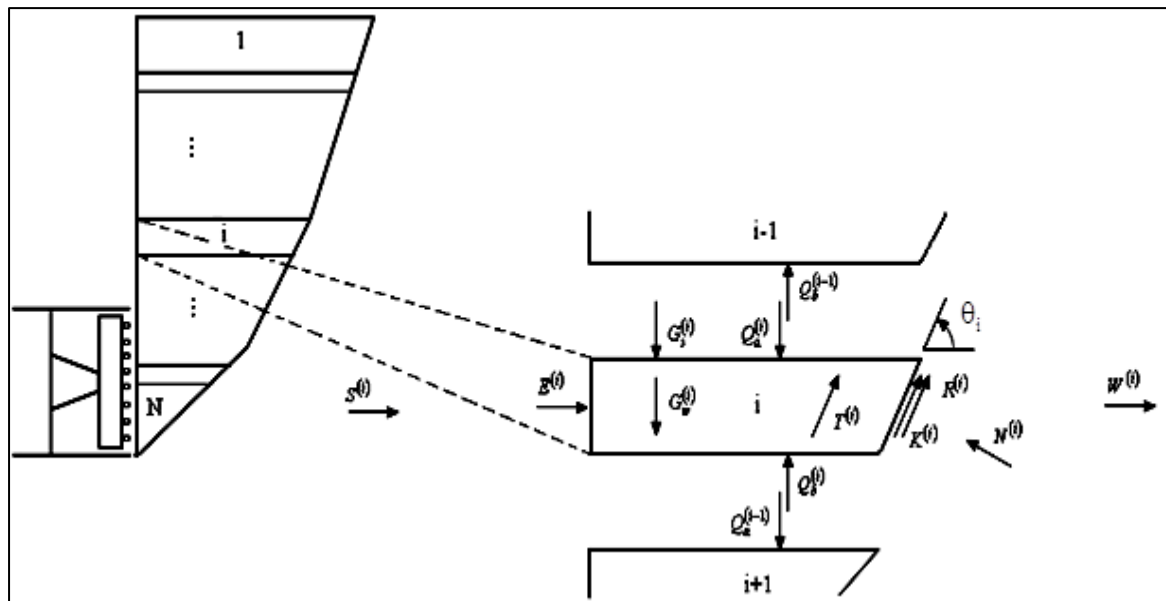
- ایجاد فشار تعادلی در سینه کار تونل
- بهسازی خاک شامل تزریق دوغاب، عملیات تزریق و انجماد به منظور افزایش مقاومت و استحکام خاک و یا کاهش نفوذپذیری خاک
- ساخت ایستگاه‌های TBM در محل‌های از پیش تعیین شده برای ماشین‌های EPB و دوغابی به منظور نگهداری زمین در نواحی شهری پر تراکم و شرایط متغیر زمین
- تزریق برای تثبیت بولدرهای سست شده بین کله حفار و جبهه کار به منظور کاهش آسیب‌های وارده به ابزارهای برش روی کله حفار
- ساختارهای زیرزمینی واقعی از قبیل لوله‌گذاری<sup>۱</sup>، تزریق با فشار بالا<sup>۲</sup>، پایپ جکینگ<sup>۳</sup> یا حتی ساختارهای پیچیده

### ۳-۲-۱۱- روش برویر<sup>۴</sup>

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 جبهه کار نشت ناپذیر یا آب‌بند فرض می‌شود. اگر از دوغاب بنتونیت برای نگهداری جبهه کار 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

<sup>۱</sup> Forepoling  
<sup>۲</sup> Pipe Jacking  
<sup>۳</sup> jet grouting  
<sup>۴</sup> Broere

حاصل می‌شود. در مدل گوه و سیلوی بر روی مطابق شکل (۳-۲۷) گوی شکستگی به  $N$  قطعه کوچکتر به صورت افقی تقسیم شده است.



شکل (۳-۲۷): مدل چند گوه‌ای [۲۴]

این قطعه‌ها هر کدام ممکن است ضخامت متفاوتی داشته باشند. به هر حال، هر کدام از قطعه‌ها همگن فرض می‌شوند و با توجه به این شرایط زاویه گوه  $\theta_i$  بین قطعه  $i$  صفحه گسیختگی و صفحه افقی تعریف می‌شود. زاویه شکست هر گوه با سعی و خطا به اندازه‌ای 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. از نوشتن معادلات تعادل در راستای افقی و قائم معادلات زیر بدست می‌آید:



$$E^{(i)} + 2T^{(i)} \cos \theta^{(i)} + (k^{(i)} + R^{(i)}) \cos \theta^{(i)} - N^{(i)} \sin \theta^{(i)} = 0 \quad (60-3)$$

$$Q_a^{(i)} + Q_s^{(i)} + Q_w^{(i)} - Q_b^{(i)} - 2T^{(i)} \sin \theta^{(i)} - (K^{(i)} + R^{(i)}) \sin \theta^{(i)} - N^{(i)} \cos \theta^{(i)} = 0 \quad (61-3)$$

$$R^{(i)} = N^{(i)} \tan \phi^{(i)} \quad (62-3)$$

از ترکیب شدن معادله ۶۵ و ۶۶ رابطه زیر بدست می‌آید:

$$G_s^{(i)} + G_w^{(i)} + Q_a^{(i)} - Q_b^{(i)} + 2T^{(i)} \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} + k^{(i)} \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} + E^{(i)} \frac{\zeta_+^{(i)}}{\zeta_-^{(i)}} = 0 \quad (63-3)$$

$$\zeta_-^{(i)} = \cos \theta^{(i)} \tan \phi^{(i)} - \sin \theta^{(i)} \quad (64-3)$$

$$\zeta_+^{(i)} = \sin \theta^{(i)} \tan \phi^{(i)} + \cos \theta^{(i)} \quad (65-3)$$

برای تمامی قطعات رابطه زیر برقرار است:

$$Q_a^{(i)} = Q_b^{(i-1)} \quad (66-3)$$

شرایط مرزی را به شکل زیر به کار می‌بندیم:

$$Q_b^{(N)} = 0, Q_a^{(1)} = 0 \quad (67-3)$$

رابطه زیر برای قطعه N ام به وجود می‌آید:

$$Q_a^{(N)} = Q_b^{(N-1)} \\ = - \left[ G_s^{(n)} + G_w^{(n)} + 2T^{(N)} \frac{1}{\zeta_-^{(N)}} + k^{(n)} \frac{1}{\zeta_-^{(N)}} + E^{(n)} \frac{\zeta_+^{(N)}}{\zeta_-^{(N)}} \right] \quad (68-3)$$

این رابطه برای تمامی قطعات نوشته می‌شود و در نهایت به رابطه زیر می‌رسیم.

$$Q_a^{(1)} = - \left[ \sum_{i=1}^N G_s^{(i)} + \sum_{i=1}^N G_w^{(i)} + 2 \sum_{i=1}^N T^{(i)} \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} + \sum_{i=1}^N k^{(i)} \frac{1}{\zeta_-^{(i)}} + \sum_{i=1}^N E^{(i)} \frac{\zeta_+^{(i)}}{\zeta_-^{(i)}} \right] = 0 \quad (69-3)$$

اگر محیط همگن باشد در این صورت تنها یک گوه وجود خواهد داشت، که رابطه بالا به شکل زیر ساده می شود.

$$E = -\frac{\zeta_-(G_s + G_w) + (k + 2T)}{\zeta_+} \quad (70-3)$$

این رابطه مشابه رابطه ارایه شده توسط جانکسز می باشد. نیروهای عمل کننده روی گوه در روابط (3-44) تا (3-54) آورده شده است. در نهایت از رابطه زیر فشار پایداری جبهه کار را محاسبه می کنند. [26]

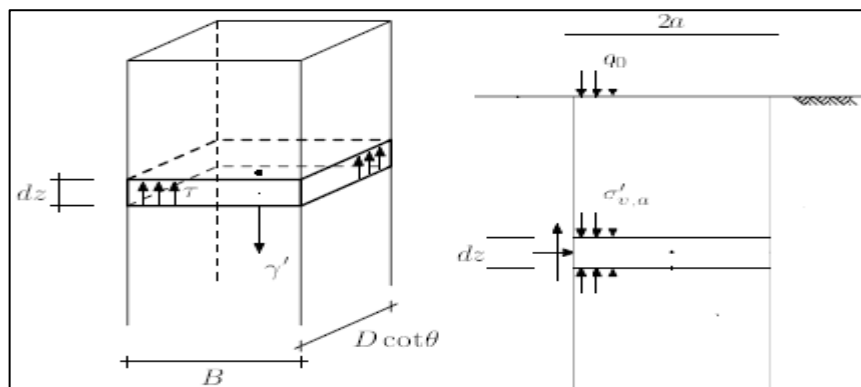
$$S = E + W \quad (71-3)$$

برای به دست آوردن تنش قائم در بالای گوه از روش ترزاقی استفاده می شود که برای باریکه ای به عرض  $2a$  معادلات تعادل نوشته شده و در روابط (3-47) و (3-48) آورده شده است.

در کاربرد روش های سه بعدی جانسز و برویر طول سست شدگی از نسبت مساحت سیلو به محیط آن مطابق رابطه (3-72) به دست می آید.

$$a = \frac{B \times D \cdot \cot \theta}{2(B + D \cdot \cot \theta)} \quad (72-3)$$

در این روابط  $D$  قطر تونل،  $\theta$  زاویه شکست و  $B$  عرض گوه می باشد که در شکل زیر دیده می شود.



شکل (3-28): مشخصات نوار باریکی از ستون قوسی در خاک [24]

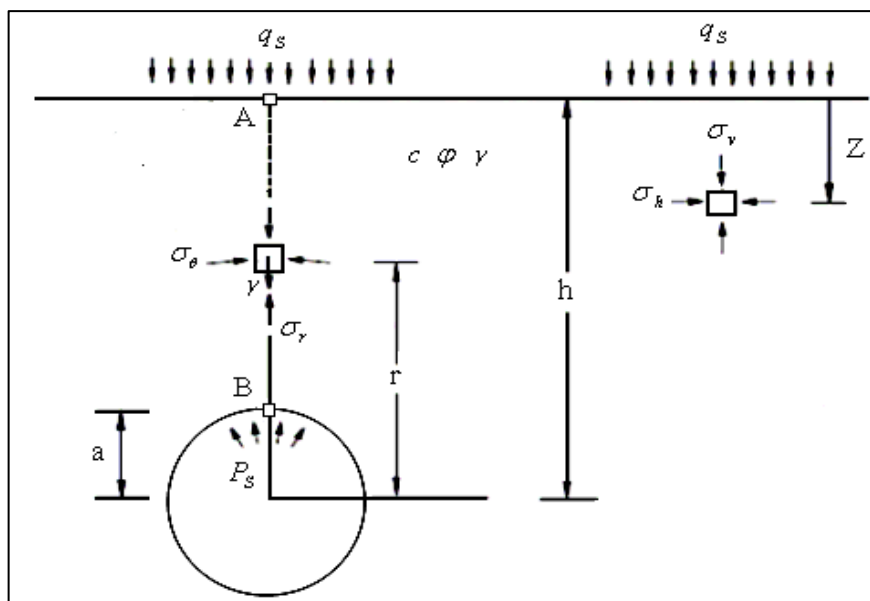
در محاسبات دو بعدی این طول نصف عرض گوه در نظر گرفته می‌شود و عرض گوه در محاسبات پایداری جبهه کار برابر قطر تونل در نظر گرفته می‌شود. بنابراین سه فشار مختلف با توجه به طول سست‌شدگی الف) بدون قوس خاک ( $a = \infty$ ) ب) قوس دو بعدی ( $a = R$ ) پ) قوس سه بعدی ( $a = R/1 + \tan \theta$ ) به دست می‌آید که این نتایج با استفاده از آزمایشات انجام گرفته بدست آمده است. مقدار بار ایجاد شده توسط هر لایه در محیط‌های لایه‌ای از روابط (۳-۴۴) تا (۳-۴۸) به صورت جداگانه محاسبه می‌شود و همانند بار  $q_0$  بر لایه زیرین اعمال می‌شود. با محاسبه بار لایه‌های بالای گوه می‌توان مقدار بار لازم برای برای پایداری جبهه کار را محاسبه کرد [۲۴].

### ۳-۳-۲-۱۲- روش کارانزا-تورس<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)

از جمله روش‌هایی که بر مبنای راه حل‌های استاتیکی می‌باشد روش کارانزا-تورس می‌باشد. این روش کامل شده کاکو-کرزل<sup>۲</sup> (۱۹۵۶) است که در شکل (۳-۲۹) نشان داده شده است. روش کاکو-کرزل برای تحلیل پایداری جبهه کار تونل دایره‌ای کم عمق در شرایط خاک خشک و به صورت دو بعدی ارائه شده است، اما به آسانی قابلیت تبدیل شدن به سه بعدی را نیز دارا می‌باشد. 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 (۳-۲۰) است [۲].

<sup>۱</sup> Carranza, Torres

<sup>۲</sup> Caquot, Kerisel



شکل (۳-۲۹): طرح اصلی کاکو- کرزل برای محاسبه فشار وارد بر تونل [۲]

فشار نگهداری از رابطه زیر به دست می‌آید.

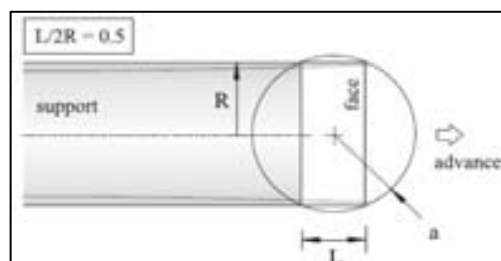
$$\frac{p_s}{\gamma a} = \left[ \frac{q_s}{\gamma a} + \frac{c}{\gamma a} \cdot \frac{1}{\tan \phi} \right] \left[ \frac{h}{a} \right]^{-K(N_\phi^{FS}-1)} - \frac{1}{K(N_\phi^{FS}-1)-1} \left[ \left( \frac{h}{a} \right)^{1-K(N_\phi^{FS}-1)} \right] - \frac{c}{\gamma a} \frac{1}{\tan \phi} \quad (73-3)$$

$$FS = \frac{c}{c^{cr}} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi^{cr}} \quad (74-3)$$

$$N_\phi^{FS} = \frac{1 + \sin(\text{Arc tan}(\tan \phi / FS))}{1 - \sin(\text{Arc tan}(\tan \phi / FS))} \quad (75-3)$$

در این روابط  $\gamma$  وزن مخصوص مواد و پارامترهای برشی خاک طبق تعریف موهر - کولمب شامل  $\phi$  زاویه اصطکاک و  $c$  چسبندگی در حالتی که نسبت تنش‌های افقی به قائم برابر ۱ می‌باشد،  $\phi^{cr}$  زاویه اصطکاک در حالت بحرانی،  $h$  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 و  $p_s$  فشار نگهداری است، این فشار را فشار بحرانی یا مینیمم فشار گویند که تحت آن امکان ریزش در جبهه کار وجود دارد.

برای آنالیز پایداری جبهه کار تونل، می‌توان سینه کار تونل را به صورت سه بعدی و طول قسمتی که بدون نگهداری می‌باشد ( $L$ ) را نیز در نظر گرفت که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۳-۳۰): محاسبه شعاع اصلاح شده به منظور آنالیز پایداری جبهه کار [۲]

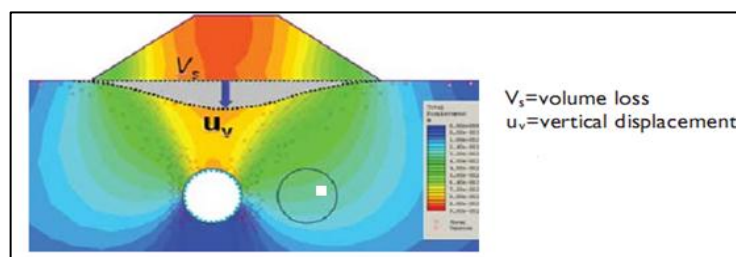
در این حالت شعاع از رابطه زیر بدست می‌آید [۲]:

$$a = \sqrt{\frac{L^2}{4} - R^2} \quad (۳-۷۶)$$

### ۳-۳-۳- روش‌های عددی در برآورد فشار جبهه کار

#### ۳-۳-۳-۱- آنالیز عددی دو بعدی

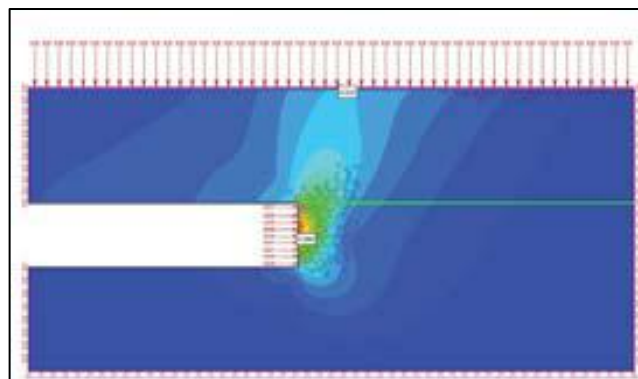
این روش‌ها بسته به اینکه مقطع به صورت عرضی یا طولی باشد، نتایج متفاوتی دارند. هر زمان که یک مقطع عرضی از محور تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد، امکان آنالیز و بررسی محدوده تسلیم و گسترش تنش را مشخص می‌کند. اما پایداری جبهه کار را مشخص نمی‌کند. در شکل زیر آنالیز عرضی در مقطع دو بعدی نشان داده شده است.



شکل (۳-۳۱): شبیه‌سازی دو بعدی که جابجایی قائم و محدوده تسلیم نشان داده شده است [۲]

در شکل (۳-۳۱) میزان نشست سطح به خوبی نمایان است و چنانچه لازم باشد می‌توان حجم تغییر شکل یافته را محاسبه نمود و آن را با مقدار متناظر در طراحی مقایسه نمود.

همان‌طور که اشاره شد شبیه‌سازی دو بعدی عرضی اطلاعاتی در رابطه با پایداری جبهه کار به ما نمی‌دهد. با استفاده از مقاطع طولی می‌توان یک شبیه‌سازی مفید از گسترش تنش- کرنش در جبهه کار تونل بدست آورد. در بعضی موارد استفاده از آنالیز عددی دو بعدی برای اندازه‌گیری تاثیر تنش‌های آزاد شده روی جابجایی اطراف جبهه کار و سطح زمین مفید می‌باشد [۲].



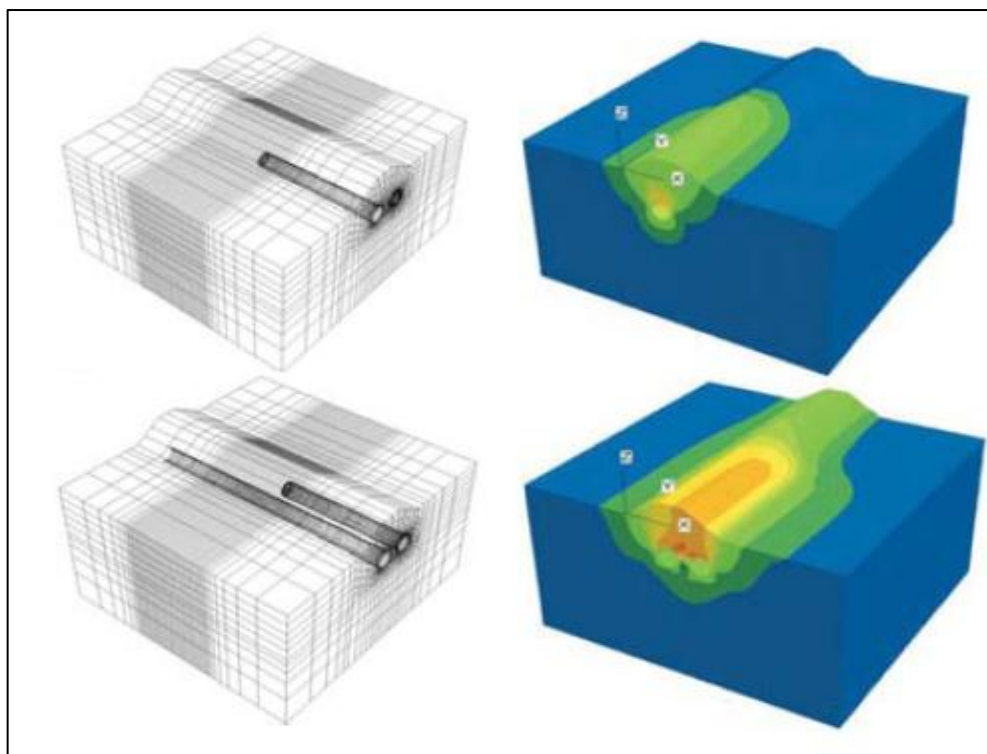
شکل (۳-۳۲): مقطع طولی در مدل دو بعدی [۲]

### ۳-۳-۲- آنالیز عددی سه بعدی

این روش ابزار کارا کتری را برای مدلسازی پروژه در دست دارد. این روش قادر به بررسی نشست سطحی و نیز شرایط پایداری جبهه کار می‌باشد. البته مواردی از عدم اطمینان نیز وجود دارد که می‌توان آن را به مسائلی نظیر محدودیت‌های نرم‌افزار، نحوه پیکره بندی مدل شامل طراحی مش، ابعاد مدل، پارامترهای ورودی و شرایط مرزی و... مرتبط دانست. این روش زمان و هزینه زیادی برای ساخت مدل و اجرای آن احتیاج دارد.

بکارگیری روش آنالیز سه بعدی گذشته از ساخت سریع مدل و انجام دقیق محاسبات، عدم اطمینان و تغییر پذیری ناشی از داده‌های ورودی را نیز بازتاب می‌دهد.

در بکار گیری آنالیز سه بعدی لازم است آنالیز حساسیت برای بازبینی تاثیر تغییرات بر پارامترهای ورودی و خروجی مربوطه صورت بگیرد. آن سوی این محدودیت‌ها، این روش به عنوان ابزاری لازم الاجرا برای مدل کردن جایگاه‌های پیچیده، نظیر همجواری تونل‌های دو قلو و تداخل ساختارهای بسیار مهم می‌باشد. شکل زیر نمونه‌ای از این بررسی‌ها می‌باشد [۲].



شکل (۳-۳۳): مدل‌های سه بعدی (تونل دوقلو حفر شده با ماشین EPB) [۲]

### ۳-۳-۴- شرایط تعادل و روش بهینه پیشروی

اگر در جبهه کار ریزش صورت گیرد یا تغییر شکل‌های غیر قابل قبول اتفاق بیفتد، لازم است که فشار نگهداری کافی به جبهه کار وارد شود. فشار جبهه کار باید به اندازه‌ای باشد که احتمال شکست ناچیز باشد.

در مورد روش EPB، همانطور که توسط Nishitake (۱۹۹۰)، گفته شده، اگر چمبر دستگاه با خاک‌های حفاری شده به درستی پر شده باشد، یعنی ماکزیمم دانسیته بدست آمده باشد، غیر ممکن است که این زمین فشرده شده با هر چیز دیگری جایگزین شود، بنابراین هیچ ماده‌ای نمی‌تواند وارد محفظه اشغال شده TBM شود، همچنین با وجود پتانسیل ناپایداری جبهه کار، هیچ ریزشی رخ نمی‌دهد.

برای ارزیابی فشار جبهه کار بهتر است که بر روی فاکتورهای زیر تمرکز کنیم [۲]:

- شرایط تعادل برای پیشروی سپر
- ملاحظات درباره انتخاب فشار پایداری
- محدودیت عملی ساخت
- اهمیت قضاوت طراحی در طول ساخت

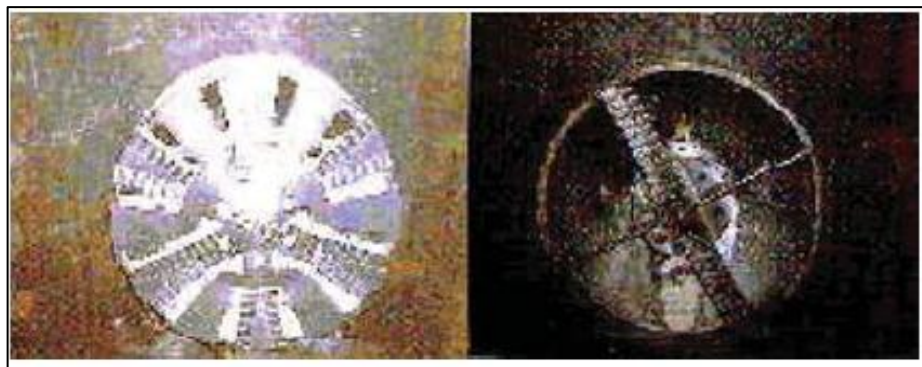
### ۳-۳-۴-۱- شرایط تعادل برای پیشروی سپر

فشار جبهه کار به نرخ پیشرفت سپر و نرخ خارج شدن مواد حفاری شده از نقاله چرخان بستگی دارد. شرایط تعادل زمانی اتفاق می‌افتد که مواد کنده شده از جبهه کار به حداکثر چگالی خود در اتاقک حفاری برسند که فشار موثری را به جبهه کار وارد کنند و حجم مواد خارج شده از نقاله چرخان از نظر تئوریک برابر با مواد کنده شده به وسیله کله حفار می‌باشد. اگر از مواد افزودنی به داخل دستگاه استفاده کردیم باید حجم مواد استفاده شده را نیز در محاسبات مربوط به نقاله چرخان اضافه کنیم. این نتایج در تحقیقات آزمایشگاهی اثبات شده که به طور خلاصه آن را نشان می‌دهیم [۲].

آموخته‌ها از تحقیقات آزمایشگاهی

در تست‌های آزمایشگاهی (مقیاس ۱:۱۰) از مدل EPB و دو نوع کاترهد مختلف استفاده شده است که در شکل‌های زیر نشان داده شده است.





شکل (۳-۳۴): کاتردهای استفاده شده در تست‌های آزمایشگاهی [۵]

آزمایش حفاری در خاک خشک غیر چسبنده (ماسه‌های ریز با زاویه اصطکاک ۳۳ درجه و  $\gamma_d = 13 - 17 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$ ) انجام شد و مانیتورینگ فشار و همچنین نشست در سطح زمین به طور پیوسته انجام گرفت.

مشاهدات زیر از مطالعه ۱۱ گزارش نتیجه‌گیری شده است. (۱۹۹۸-۲۰۰۱)

دو پارامتر کنترل ضروری از رانش TBM بدست می‌آید [۲۵]:

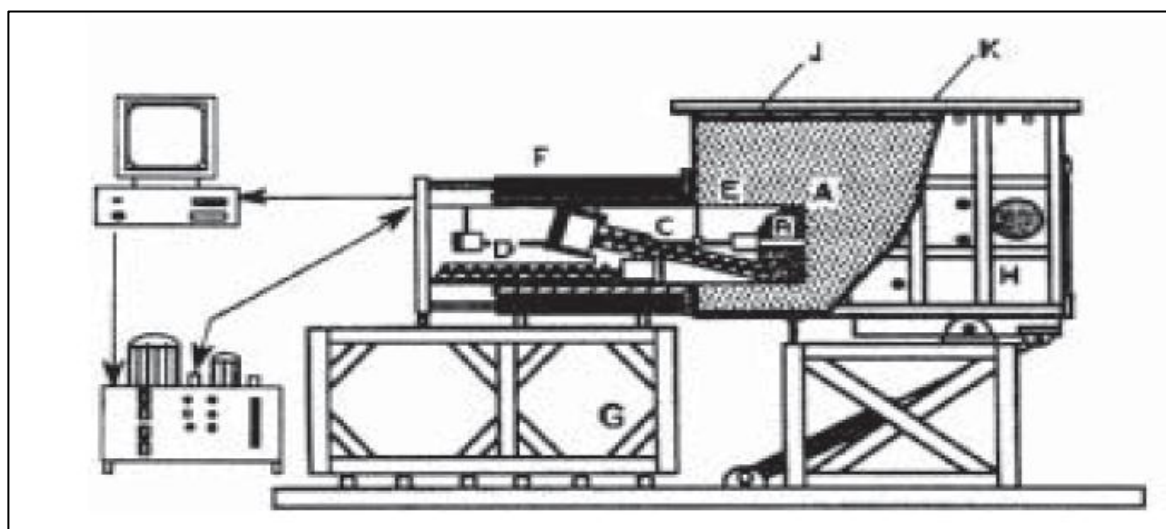
۱- R، نسبت بین توده تخلیه شده مواد توسط نوار نقاله مارپیچی و توده تئوریک حفاری شده توسط کاترهد

۲- فشار در زمینی که باید حفاری شود.

تابع ایده آل زمانی بدست می‌آید که  $R=1$  باشد.

زمانی که حجم مواد تخلیه شده کمتر از حجم تئوریک مواد حفاری شده باشد ( $R < 1$ )، وضعیت غیر فعال در زمین گسترش می‌یابد، زون پلاستیک در بالای جبهه کار گسترش می‌یابد و فشار در چمبر افزایش پیدا می‌کند.

زمانی که حجم مواد استخراج شده بیشتر از حجم تئوریکي مواد حفاری شده باشد ( $R > 1$ )، زمین وارد وضعیت فعال می‌شود، تغییر شکل عمودی زیادی در زون بین کاترهد و سطح زمین اتفاق می‌افتد و فشار در چمبر کم می‌شود [۲۵].



شکل (۳-۳۵): مدل EPB بکار برده شده در تست‌های آزمایشگاهی [۲]

با توجه به نتایج آزمایش می‌توان گفت فشاری که دستگاه باید در جبهه کار ایجاد کند بایستی با فشار زمین در حالت طبیعی برابر باشد.

با توجه به نتایج منطقی که از آزمایش به دست آمد، در صورتی که فشار نگهداری جبهه کار با فشار زمین در حالت طبیعی<sup>۱</sup> برابر نباشد به نرخ بهینه پیشرفت<sup>۲</sup> (ORA) نخواهد رسید [۲].

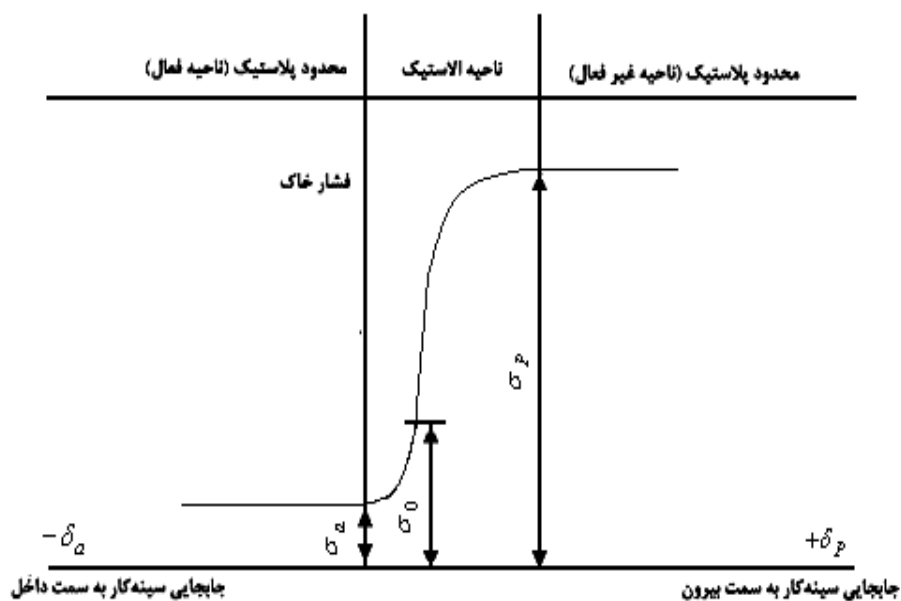
<sup>۱</sup>rest earth pressure  
<sup>۲</sup>Optimum regime of advancement

## ۳-۳-۵- انتخاب فشار سینه کار

برای تونل‌هایی که با ماشین‌های سپر بسته حفر شده‌اند، به منظور بهینه بودن فشار جبهه کار، باید شرط  $\sigma_t = \sigma_{ko}$  برقرار باشد که تغییر شکل جبهه کار حداقل بوده و پایدار باشد. این شرط با کنترل دو پارامتر بدست می‌آید.

- فشار نگهداری جبهه کار
- نرخ خارج شدن مواد از اتاقک حفاری

از نقطه نظر تئوری، مشخص است که کمتر شدن فشار دستگاه ( $\sigma_t$ ) از فشار فعال زمین ( $\sigma_{ka}$ ) باعث افزایش ریسک در نشست سطح زمین می‌شود. البته در حالتی که فشار حفاری بین مقدار فعال و غیرفعال به ترتیب به عنوان کران پایین و بالا قرار گیرد ( $\sigma_{ka} < \sigma_t < \sigma_{ko}$ )، پایداری حفاری به طور متناوب ممکن خواهد بود. فشار زمین را فعال یا غیر فعال می‌گویند زمانی که به ترتیب، تغییر شکل پلاستیسیته زمین به سمت کله حفار یا در جهت مخالف آن باشد [۲].



شکل (۳-۳۶): تغییرات فشار جانبی خاک در مقابل جابجایی جبهه کار [۲]

فشار فعال زمین به اندازه کمترین فشار قابل قبول برای جبهه کار می باشد و فشار غیر فعال زمین به اندازه بیشترین فشار قابل قبول برای جبهه کار می باشد.

جدول (۳-۹): فرمول های تحلیلی و تجربی برآورد فشار کل جبهه کار

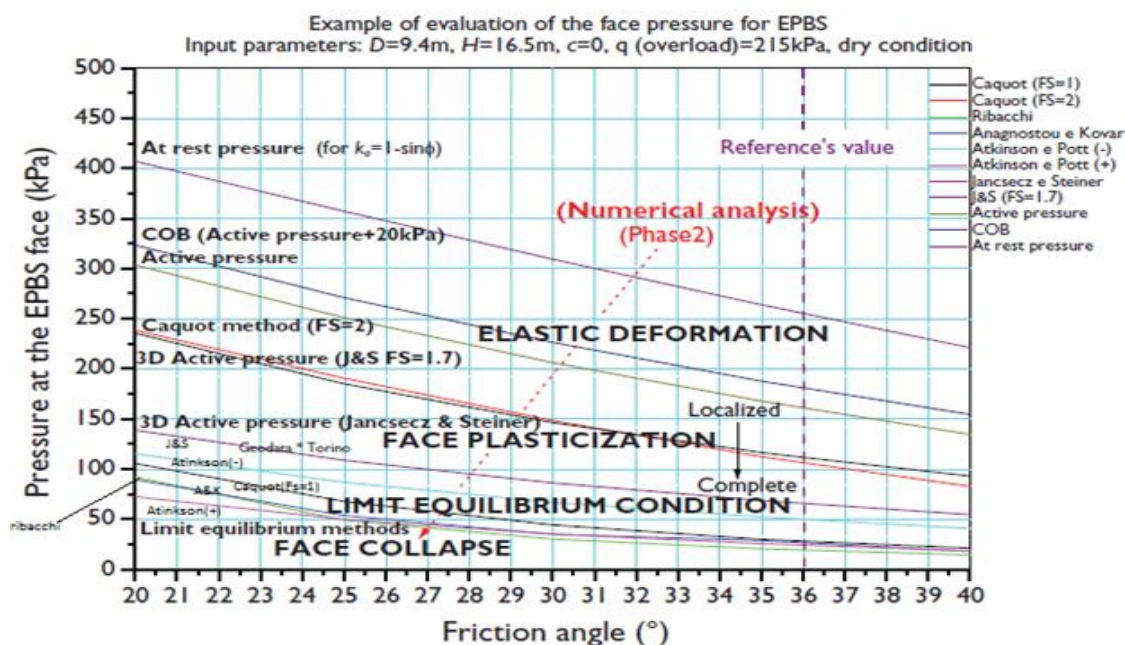
روش ها	فرمول های فشار نگهداری کل جبهه کار تونل
COB	$\sigma_T = K_a \cdot \sigma'_v + \sigma_w + 20\text{kPa}$
ترزاقی	$\sigma_T = K_a \cdot H_p \cdot \gamma' + \sigma_w$
میوریمما	$\sigma_T = \left( (G \cdot l_G + q_w \cdot W_1 (l_w + W_1/2) - c(r_d^2 - r_a^2)/2 \tan \phi) / 2R \cdot l_p \right) + \sigma_w$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

### ۳-۳-۶- مقایسه بین روش های مختلف برآورد فشار جبهه کار

برای تصور کردن تاثیر فشار نگهداری به کار برده شده برای جبهه کار تونل، نمودار زیر مفید می باشد. این نمودار حاصل حفر تونل با ماشین EPB در ایتالیا می باشد. نتایج بدست آمده از روش های مختلف تحلیلی که در این پروژه بدست آمده است در شکل (۳-۳۷) آورده شده است.

با افزایش زاویه اصطکاک داخلی توده خاک، فشار نگهداری جبهه کار کاهش می‌یابد. علاوه بر این، شرایط پتانسیل پایداری برای جبهه کار نشان می‌دهد که با کاهش دائمی فشار جبهه کار، شرایط تغییر شکل از حالت الاستیک به ریزش کامل تغییر شکل پیدا می‌کند. روش‌های عددی پیش‌بینی کردند زمانی که فشار نگهداری جبهه کار از فشار فعال زمین کمتر شود، زون تسلیم شونده در جبهه کار تونل به وجود می‌آید که نتایج زیر را در بر دارد [۲].

- زمانی که فشار نگهداری جبهه کار نصف فشار فعال زمین باشد، زون پلاستیک در رأس تونل توسعه پیدا می‌کند.
- مقادیر محاسبه شده به وسیله روش کاکو با ضریب ایمنی ۲ و روش جانکسز با ضریب ایمنی ۱/۷، یک منبع منطقی به منظور جلوگیری از گسترش زون پلاستیسیته در جبهه کار تونل و نشست سطح زمین فراهم می‌کند. مقادیر محاسبه شده با این روش‌ها به اندازه ۶۰٪ تا ۶۵٪ فشار فعال زمین می‌باشد [۲].



شکل (۳-۳۷): مقایسه روش‌های برآورد فشار نگهداری جبهه کار و چگونگی گسترش زون پلاستیک [۲]

روش جانکسز از دو روش دیگر مقادیر بالاتری ارائه می‌کند. مقادیر حد پایین لکا و دورميو به روش کواری نزدیک بوده و تفاوت مقادیر دو روش، ناشی از چسبندگی و قطر حفاری می‌باشد. روش لکا و دورميو مقادیر مناسبی برای فشار نگهداری جبهه کار در این مورد به ارائه می‌دهد [۲۵].

## ۳-۴- جمع‌بندی:

روش ترزاقی و COB بیش‌ترین استفاده را در بین سایر روش‌های تجربی دارند. به دلیل اینکه این روش‌ها مقادیر بالایی از فشار نگهداری جبهه کار ارائه می‌دهند، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. قوس فشار ترزاقی مبنای روش‌های جانسکز و استاینر، کواری و آنگونستا و برویر می‌باشد.

به طور کلی از بین روش‌های مختلف برآورد فشار نگهداری جبهه کار، روش‌های تحلیلی بیش‌ترین استفاده را در برآورد فشار سینه کار دارند. از بین روش‌های تحلیلی، روش‌های جانسکز و استاینر، کواری و آنگونستا و برویر به دلیل در نظر گرفتن مکانیزم شکست سه بعدی و قوس فشار ترزاقی، مقادیر دقیق‌تری از فشار جبهه کار ارائه می‌دهد. روش جانسکز به دلیل در نظر گرفتن ضریب ایمنی، برآورد دقیق‌تر و ایمن‌تری از فشار نگهداری جبهه کار تونل نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌کند و این روش بیش‌ترین استفاده را در برآورد فشار نگهداری جبهه کار دارد.

روش‌های محاسبه فشار با توجه به شرایط خاک به روش‌های تجربی، تحلیلی (آنالیز حدی و تعادل حدی) و عددی تقسیم بندی می‌شود که روش‌های تجربی و تحلیلی به همراه اساس هر روش و شرایط استفاده در جدول (۳-۱۰) آورده شده است.

جدول (۳-۱۰): روش‌های محاسبه فشار نگهداری با توجه به شرایط ژئوتکنیکی

روش‌ها		توضیحات	
روش تجربی	ترزاقی	خاک چسبنده و غیر چسبنده	
	COB	-	
	یامازاکی	-	
روش تحلیلی	آنالیز حدی	برومز و بنمارک	خاک چسبنده و زهکشی نشده
		اتکینسون و پاتز	خاک غیر چسبنده برای تونل بدون پوشش
		دیویس	خاک چسبنده
	تعادل حدی	لکا و دورمیو	خاک غیر چسبنده
		میورینما	خاک چسبنده و غیر چسبنده
		کروس	خاک چسبنده و غیر چسبنده
		محکم	خاک چسبنده و غیر چسبنده
		جانسکز و استاینر	خاک غیر چسبنده و کمی چسبنده
		کواری و آنگونستا	خاک غیر چسبنده
		برویر	خاک غیر چسبنده



## فصل چہارم

---

# خصوصیات زمین شناسی و ژئوتکسیکی مسیراحداث

تونل ابوذر

۴-۱- ساختگاه تونل ابوذر

مسیر تونل کمکی کانال ابوذر در راستای حاشیه شرقی کانال ابوذر واقع در خیابان ابوذر، حد فاصل بلوار ائمه اطهار تا شمال بزرگراه خاوران در سه راه افسریه واقع شده است. هدف از احداث این تونل ساماندهی وضعیت کنونی بخشی از مسیر رودخانه جاجرود می‌باشد. با احداث تونل ابوذر بخشی از روان‌آب سطحی از کانالی که هم‌اکنون در وسط خیابان ابوذر قرار دارد به زیرزمین منتقل می‌شود. کانال مذکور در مسیر رودخانه جاجرود قرار گرفته است. مطالعات طراحی این تونل که طولی حدود ۴۰۰۰ متر دارد به مهندسین مشاور ساحل واگذار گردیده است. تمامی فضای حفاری به صورت زیرزمینی با ماشین حفاری فشار تعادلی زمین صورت می‌گیرد [۲۷].



شکل (۴-۱): موقعیت مسیر تونل بر روی بخشی از نقشه تهران [۲۷]

## ۴-۲- چینه‌شناسی مسیر احداث تونل

اطلاعات لازم برای شناسایی چینه‌شناسی منطقه در طول مسیر احداث تونل مورد نظر، با ۱۰ گمانه ماشینی (با مجموع طول ۶۸۳/۵ متر) و ۹ چاهک دستی (با مجموع طول ۱۸۸/۵ متر) برای تعیین نوع خاک، سطح آب زیرزمینی منطقه و انجام آزمایشات آزمایشگاهی لازم حفر و مورد مطالعه قرار گرفته است.

مسیر تونل ابوذ در آبرفت های D سازند تهران قرار گرفته است که ویژگی های رسوب شناسی دشت آبرفتی را دارد. حفاری‌های ژئوتکنیکی انجام شده در مسیر تونل نیز نشان‌دهنده همین ویژگی‌های رسوب شناختی می‌باشد. علاوه بر این با توجه به عبور این تونل به موازات مسیر قدیمی رودخانه جاجرود، در این رسوبات شواهدی از وجود نهشته‌های متعلق به محیط‌های رودخانه‌ای (متشکل از گراول و سنگ‌ریزه با زمینه سیلتی، ماسه ای و رسی) وجود دارد. با توجه به نزدیکی مسیر تونل به ارتفاعات جنوب شرقی تهران (آنتی البرز)، احتمال برخورد مسیر تونل به واحدهای آبرفتی قدیمی نظیر آبرفت c و نیز واحدهای متراکم و سیمانی شده قدیمی‌تر مانند آبرفت‌های A و Bn وجود دارد.

از دیدگاه تقسیم بندی زمین‌شناسی، ساختگاه تونل در جنوب شرقی پهنه زمین شناسی - ساختاری البرز و غرب آنتی البرز قرار گرفته است و تحت تاثیر رسوب‌گذاری جریان‌های سطحی دامنه غربی ارتفاعات سه پایه و دامنه جنوبی کوهستان مرتفع البرز بوده است. نتایج کاوش‌های اداره کل آب‌های زیرزمینی نشان‌دهنده این است که ضخامت این آبرفت‌ها از سمت خاور به باختر زیاد می‌شود، به‌گونه‌ای که در نزدیک ورزشگاه تختی، ضخامت آبرفت کمتر از ۲۵ متر بوده و به سمت خاور به تدریج بر ضخامت آن افزوده می‌شود. این ضخامت در طول مسیر از ۵۰ تا ۱۰۰ متر متغیر است [۲۷].

## ۴-۳- وضعیت آب زیرزمینی در مسیر تونل

هیدروگراف معرف آبخوان تهران و همچنین هیدروگراف پیزومتری اطراف محل طرح، همواره روند نزولی بار هیدرولیکی آبخوان را طی سالهای اخیر نشان می‌دهد. جهت جریان آب‌های زیرزمینی در محدوده مسیر پروژه تونل ابوذ، از شمال به سمت جنوب می‌باشد. در مسیر تونل ابوذ، روند شیب هیدرولیکی و شیب توپوگرافی شمالی - جنوبی بوده و به دلیل آن که میزان شیب توپوگرافی بیش از شیب هیدرولیکی است، عمق برخورد به آب به سمت نواحی جنوبی مسیر پروژه کاهش می‌یابد. عمق آب زیرزمینی از بیش از ۴۰ متر در شمال مسیر پروژه تا حدود ۲۵ متر در نواحی جنوبی پروژه می‌رسد (ضخامت روباره از شمال مسیر پروژه به جنوب آن کاهش می‌یابد). چند کوره قنات در مسیر تونل قرار دارد که به احتمال قوی آبدار می‌باشند که موقعیت این قنات به طور دقیق مشخص نیست. بررسی پیزومترهای منطقه در طول دوره آماری ۱۳ ساله نشان از افت تراز آب زیرزمینی در طول مسیر تونل دارد. با توجه به عدم برخورد گمانه‌ها با سطح ایستابی و همچنین بر اساس نتایج مطالعات هیدروژئولوژی و بررسی وضعیت پیزومترها، مسیر حفاری تونل ابوذ بالاتر از سطح ایستابی قرار گرفته و در نتیجه حفاری در محیطی خشک صورت خواهد گرفت. هر چند ممکن است ورود فاضلاب و یا آب‌های قنات و کانال موجود ابوذ مشکلاتی را برای تونل ایجاد نماید. در مواقع برخورد به قنات آبدار و یا نواحی دارای چاههای فاضلاب ممکن است به طور ناگهانی آب وارد تونل شود. روند کلی قنات در مسیر پروژه، شمالی- جنوبی می‌باشد. مسیر قنات به طور کلی در راستای مسیر تونل ابوذ می‌باشند. از آنجا که با توجه به شرایط هیدروژئولوژیک منطقه، عمق کوره قنات منطقه، احتمالاً کمتر از ۴۰ متر است، بنابراین احتمال برخورد مسیر حفاری تونل و مسیر کوره قنات بالا می‌باشد [۲۷].

## ۴-۴- رده‌بندی خاک در مسیر احداث تونل ابوذ

یکی از مهم‌ترین فعالیت‌هایی که در مطالعات ژئوتکنیکی تونل‌های مکانیزه در خاک باید مورد توجه قرار گیرد، تفکیک مناسب واحدهای خاکی می‌باشد، زیرا تفکیک این واحدها، مبنای مطالعات دیگر بوده و تاثیر قابل توجهی بر روی نتایج برآورد فشار جبهه‌کار، مخاطرات محتمل و همچنین بر روی بهسازی خاک برای حفاری دارد. یکی از مهمترین فاکتورها که بر روی انتخاب و عملکرد ماشین مؤثر است درصد ذرات ریزدانه (رد شده از الک ۲۰۰) می‌باشد. علاوه بر درصد رد شده از الک ۲۰۰، پارامترهای دیگری که می‌توانند بر روی عملکرد ماشین مؤثر باشند، نیز به عنوان اولویت‌های بعدی لحاظ گردیدند که از جمله آنها می‌توان به ویژگیهای مکانیکی، رفتار چسبناکی (برای ذرات ریزدانه) و نفوذپذیری (برای خاکهای دانه‌ای) اشاره نمود.

با توجه به توضیحات ارائه شده در بالا و با عنایت به نتایج بدست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و همچنین با در نظر گرفتن مقیاس نقشه، لایه‌های خاکی دربرگیرنده مسیر تونل به پنج واحد زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده‌اند که در جدول زیر آورده شده است [۲۷].

جدول (۴-۱): مشخصات واحدهای زمین‌شناسی مهندسی تفکیک شده در مسیر تونل [۲۷]

ET-۵	ET-۴	ET-۳	ET-۲	واحد زمین‌شناسی مهندسی
Clayey silt & silty clay with sand, very sandy clay(or silt)	Clayey silty sand with gravel	Very silty clayey sand with gravel, very sandy clay(or silt) with gravel	Very clayey gravel with silt	توصیف خاک
>۶۰٪	۲۲-۳۴٪	۳۰-۶۰٪	۱۲-۳۰٪	درصد رد شده از الک ۲۰۰
CL,ML&CL-ML	SC,SM	SC,SM&CL	GC	نوع خاک (USCS)

واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-۲:

این واحد خاکی نیز همانند واحد ET-۱ در رده خاکهای درشت دانه قرار می‌گیرد و عمدتاً از ماسه‌شنی به همراه سیلت و رس و شن ماسه‌ای به همراه سیلت و رس تشکیل شده است. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) در این واحد بین ۱۲ تا ۳۰٪ می‌باشد. این واحد بیشتر بصورت لنتها و عدسی‌های ماسه‌ای و شنی گسترش یافته‌اند.

واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-۳:

ذرات تشکیل دهنده این واحد خاکی از ماسه رسی به همراه شن و شن‌رسی و سیلتی به همراه ماسه همچنین رس و سیلت ماسه‌ای تشکیل شده و بخش عمده‌ای از مسیر تونل از میان این واحد عبور می‌کند و درصد رد شده از الک ۲۰۰ (ذرات ریز دانه) آن بین ۳۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد.

واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-۴:

این واحد خاکی نیز در رده خاک‌های درشت دانه محسوب می‌گردد و عمدتاً از ماسه رسی به همراه شن تشکیل شده است و مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) در آن بین ۲۲ تا ۳۴٪ می‌باشد. این واحد به صورت لنتهایی با ابعاد مختلف در میان سایر واحدهای خاکی دیده می‌شود و در مجموع از گسترش چندانی برخوردار نمی‌باشد.

واحد زمین‌شناسی مهندسی ET-۵:

ذرات تشکیل دهنده این واحد خاکی عمدتاً از سیلت و رس ماسه‌ای و رس به همراه ماسه تشکیل شده است. مقدار درصد رد شده از الک ۲۰۰ (سیلت و رس) این واحد همواره بیشتر از ۶۰ درصد می‌باشد.

گسترش هر یک از واحدهای خاکی در مسیر تونل، مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر بر اساس اینکه جبهه کار تونل از چه واحدهای خاکی تشکیل شده باشد، مسیر تونل ناحیه بندی شده است که در جدول زیر دیده می‌شود. پروفیل زمین‌شناسی مسیر در پیوست آورده شده است [۲۷].

جدول (۴-۲): ناحیه بندی مسیر تونل براساس گسترش واحدهای خاکی در بر گیرنده جبهه کار [۲۹]

ناحیه زمین‌شناسی	کیلومتر از (chainage)	طول (m)	واحد زمین‌شناسی			
			ET-۲	ET-۳	ET-۴	ET-۵
۱	۰-۳۰۰	۳۰۰				
۲	۳۰۰-۶۰۰	۳۰۰				
۳	۶۰۰-۸۶۰	۲۶۰				
۴	۸۶۰-۱۲۷۲	۴۱۲				
۵	۱۲۷۲-۱۶۸۰	۴۰۸				
۶	۱۶۸۰-۲۴۰۰	۷۲۰				
۷	۲۴۰۰-۲۷۲۸	۳۲۸	L			
۸	۲۷۲۸-۳۰۰۰	۲۷۲				
۹	۳۰۰۰-۳۱۵۰	۱۵۰			L	
۱۰	۳۱۵۰-۳۶۱۷	۴۶۷				
۱۱	۳۶۱۷-۳۷۳۰	۱۲۳			L	
۱۲	۳۷۳۰-۴۱۸۰	۴۵۰				

L=Lense

## ۴-۵- جمع‌بندی

براساس مطالب ذکر شده، خاک مسیر احداث تونل ابوذر طبق طبقه‌بندی، از ۵ واحد زمین‌شناسی تشکیل شده است. بیش‌تر مسیر تونل از واحدهای زمین‌شناسی ET-۳ و ET-۵ عبور می‌کند که از خاک‌های دانه‌ریز تشکیل شده‌اند و واحدهای ET-۴ و ET-۲ به صورت لندها و عدسی‌های ماسه‌ای و شنی در مسیر تونل گسترش یافته‌اند. در تمامی مسیر، تونل به سطح ایستابی برخورد نکرده و فقط احتمال برخورد به قنات یا چاه‌های فاضلاب وجود دارد.



## فصل پنجم

---

محاسبه فشار نگهداری جسمه کارتونل باروش های

تجربی، تحلیلی و عددی

## ۵-۱- مقدمه

بررسی پایداری جبهه کار تونل، مسئله پیچیده‌ای است و برای رسیدن به یک جواب دقیق، می‌توان از آنالیز عددی سه‌بعدی استفاده کرد. هر چند در بسیاری از موارد، روش‌های تحلیلی جواب‌های رضایت‌بخشی در زمینه پایداری جبهه کار تونل ارائه می‌دهند و هنوز هم ابزار مهمی جهت طراحی محسوب می‌شوند. در این فصل با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی به محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در ۴ مقطع مختلف پرداخته می‌شود، سپس این فشارها با فشارهای حاصل از روش عددی مقایسه شده و نتایج آن نشان داده می‌شود و در نهایت به منظور بررسی میزان تاثیر پارامترهای موثر روی فشار نگهداری جبهه کار تحلیل حساسیت انجام شده است.

## ۵-۲- محاسبات فشار جبهه کار تونل به روش تحلیلی و تجربی

جهت محاسبه فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی با بررسی و تحلیل آماری نتایج حاصل از مطالعات صحرایی (لاگ گمانه‌ها و آزمایش‌های صحرایی) و آزمون‌های آزمایشگاهی برآورد و تعیین شده است که این مقادیر در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۵-۱): مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل [۲۷]

واحد زمین‌شناسی	$c'$ ( $kg/cm^2$ )	$\phi'$	$c$ ( $kg/cm^2$ )	$\phi$	$E$ ( $kg/cm^2$ )	$\nu$	چگالی خشک ( $g/cm^3$ )
FILL	۰/۱۵	۳۰	-	-	۲۵۰	۰/۲	۱/۷
ET-۲	۰/۱۵	۳۸	۰/۱۸	۳۰	۷۰۰	۰/۳	۱/۹
ET-۳	۰/۲۰	۳۲	۰/۲۵	۲۵	۴۵۰	۰/۳۲	۱/۸۵
ET-۴	۰/۱۸	۳۵	۰/۲۵	۲۷	۵۰۰	۰/۳	۱/۸۵
ET-۵	۰/۴	۲۵	۰/۴۵	۲۰	۳۰۰	۰/۳۵	۱/۸۵

حداقل فشار لازم برای نگهداری سینه کار به صورت دو بعدی و سه بعدی به عوامل متعددی همانند شرایط هندسی (نسبت روباره به قطر تونل) بستگی دارد. با توجه به عمق زیاد مسیر تونل در بیشتر مسیر قوس خاکی در بالای تونل تشکیل می شود. با فرض محیط همگن برای روش های دو بعدی و سه بعدی (به جزء مدل برویر)، از میانگین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک برای برآورد فشار خاک استفاده می شود. مقدار میانگین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک از روابط (۵-۱) تا (۵-۴) به دست می آید.

$$\bar{\gamma}_d = \left( \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot z_i \right) / \sum_{i=1}^n z_i \quad (۵-۱)$$

$$\bar{\gamma}' = \left( \sum_{i=1}^n \gamma_i' \cdot z_i \right) / \sum_{i=1}^n z_i \quad (۵-۲)$$

$$\bar{c} = \left( \sum_{i=1}^n c_i \cdot z_i \right) / \sum_{i=1}^n z_i \quad (۵-۳)$$

$$\bar{\phi} = \left( \sum_{i=1}^n \phi_i \cdot z_i \right) / \sum_{i=1}^n z_i \quad (۵-۴)$$

در این روابط  $\bar{\gamma}_d$  وزن مخصوص خشک معادل خاک،  $\gamma_i$  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،  $\phi_i$  زاویه اصطکاک داخلی خاک برای هر لایه و  $\bar{\phi}$  زاویه اصطکاک معادل خاک است.

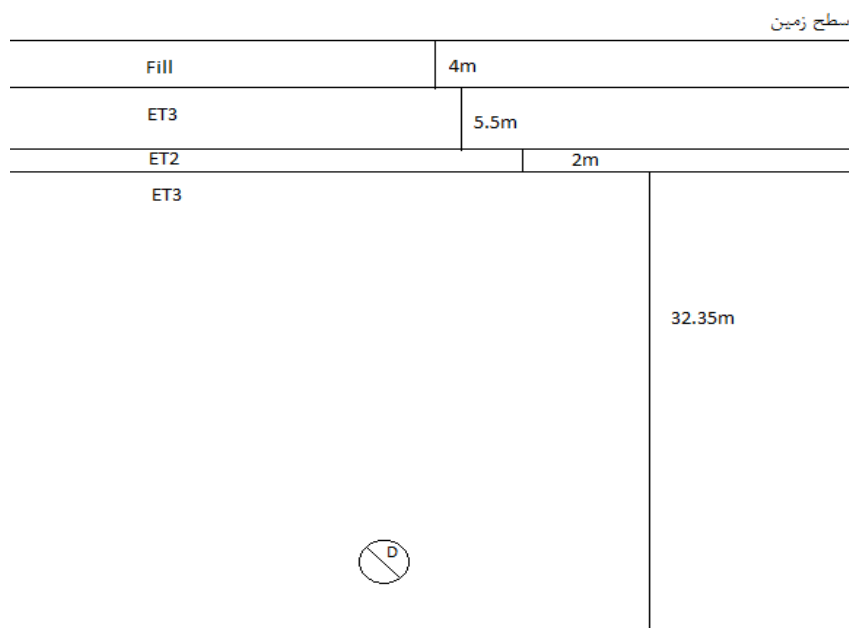
به منظور تخمین فشار نگهداری جبهه کار تونل به روش تحلیلی و تجربی، اقدام به تهیه ۴ مقطع در مسیر تونل و استخراج پارامترهای ورودی مورد نیاز شد. مقاطع انتخابی در طول مسیر تونل، حالت هایی مانند بیشترین و کمترین ارتفاع روباره، تعدد لایه بندی و جبهه کار مختلط را شامل می شود که این مقاطع از واحدهای زمین شناسی که بیشترین مسیر تونل از آن ها عبور می کند، انتخاب شده است. مقطع شماره ۱ در فاصله ۴۱۵۰ متری از مبدأ تونل، در جایی که ارتفاع روباره بیشترین مقدار است، انتخاب شده است. مقطع شماره ۲ در فاصله ۳۴۷۰ متری از مبدأ تونل، جایی که ارتفاع روباره بالا به همراه تعدد لایه بندی وجود دارد، انتخاب شده است. مقطع شماره ۳ در فاصله ۱۱۴۰ متری از مبدأ تونل، جایی که

ارتفاع روباره کم و لایه ای با ضخامت بالا و چسبندگی کم در تاج تونل وجود دارد انتخاب شده است و در نهایت مقطع شماره ۴ در فاصله ۲۳۰ متری از مبدأ تونل، جایی که ضخامت روباره بسیار کم، جبهه کار مختلط و تعدد لایه بندی در مقطع مورد نظر وجود دارد، انتخاب شده است. در مقاطع ۲ و ۴ به دلیل تعدد لایه بندی از رابطه برویر نیز به منظور برآورد فشار نگهداری جبهه کار استفاده می شود.

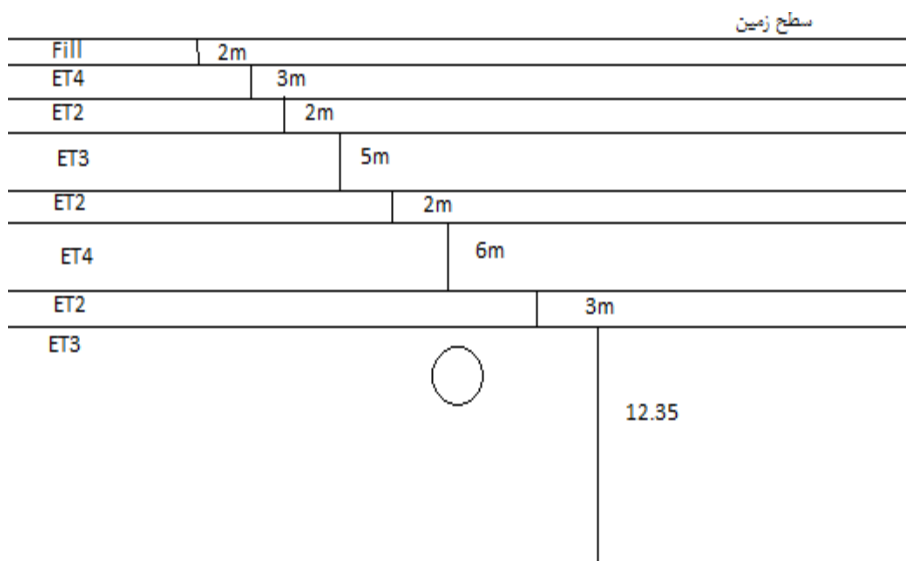
جدول (۵-۲): مشخصات هندسی و پارامترهای ژئومکانیکی در مقاطع مختلف

شماره مقطع	فاصله از مبدأ تونل (متر)	چسبندگی (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	ضخامت روباره (متر)	چگالی خشک (کیلو نیوتن بر متر مکعب)
۱	۴۱۵۰	۱۷/۵	۳۱/۵	۳۱/۵	۱۸/۵
۲	۳۴۷۰	۱۶/۸	۳۳/۹	۲۵	۱۸/۶
۳	۱۱۴۰	۲۵/۵	۳۰	۷/۲	۱۸/۴
۴	۲۳۰	۲۰/۷	۲۸/۵	۴/۵	۱۸/۲۵

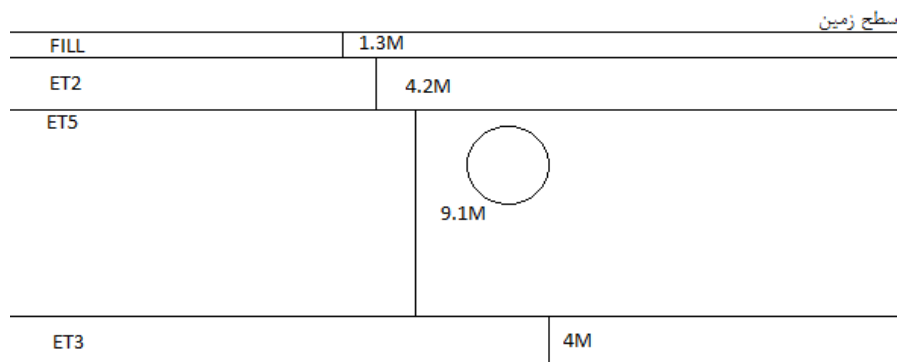
شکل مقاطع به همراه لایه بندی هر مقطع در زیر آورده شده است.



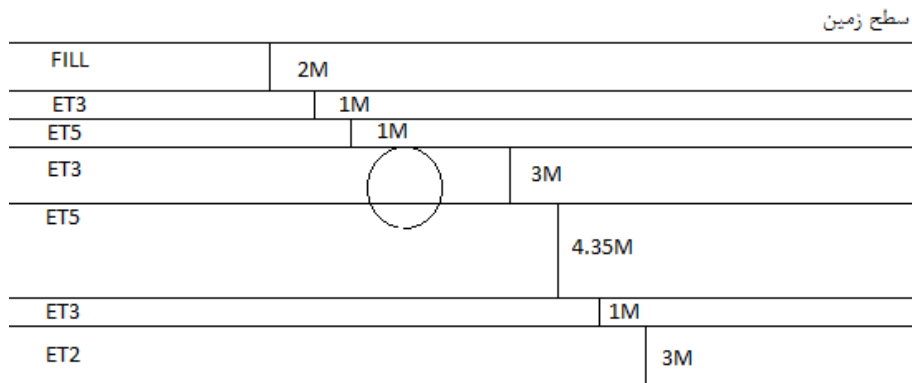
شکل (۵-۱): مقطع شماره ۱



شکل (۵-۲): مقطع شماره ۲



شکل (۵-۳): مقطع شماره ۳



شکل (۵-۴): مقطع شماره ۴

بار یکنواختی که به سطح زمین وارد می شود، شامل بار زنده ترافیک و بار مرده ناشی از بارگذاری ساختمان های مجاور می باشد. میزان بارگذاری ساختمان های مجاور بستگی به وزن و ارتفاع ساختمان ها دارد. این بارگذاری توسط بازدید و بررسی محلی و مطالعه نقشه های موجود، با توجه به تعداد طبقات و کاربری تعیین می گردد. به دلیل فاصله مناسب ساختمان ها از محور تونل، از بار ساختمان ها چشم پوشی می کنیم. مقدار بار سربار در منطقه را با توجه به منبع بارگذاری می توان از جدول (۳-۵) تعیین کرد که در تونل ابوذر بارهای ترافیکی در مسیر حفاری ۲۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است.

جدول (۳-۵): استاندارد بارگذاری [۲۸]

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

### ۵-۲-۱- محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در مقطع شماره ۱

جهت محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در مقطع شماره ۱، از اطلاعات موجود در جدول (۲-۵) به عنوان پارامترهای ورودی در روش های تحلیلی و تجربی استفاده شده است.

#### روش COB

در این روش به منظور برآورد فشار نگهداری جبهه کار ابتدا باید تنش قائم موثر را بدست آورد.

$$\sigma'_v = \gamma \times h + q = 31.5 \times 18.5 + 20 = 602.75$$

$$K_a = 1 - \sin \phi / 1 + \sin \phi = 1 - \sin 31 / 1 + \sin 31 = .32$$

چون تونل در تمامی مسیر خود در بالای سطح ایستابی قرار دارد، فشار آب برابر صفر می باشد. در نهایت فشار وارد بر جبهه کار از رابطه زیر بدست می آید.

$$\sigma_r = K_a \cdot \sigma'_v + \sigma_w + 20 \text{ kPa} = 602.75 \times 0.32 + 20 = 212.88 \text{ kPa}$$

### روش جانسکز - استاینر

در روش جانسکز و استاینر تنش قائم برای روبراه های بزرگتر از ۲ برابر قطر تونل، از روش سیلو ترازقی استفاده می شود.

طول سست شدگی:

$$a = \frac{R}{1 + \tan \theta} = \frac{2.176}{1 + \tan 67.3} = 0.641$$

تنش قائم روی تونل:

$$\sigma'_{v_1} = \frac{a \times \gamma_d - c}{K_{silo} \times \tan \phi} \left[ 1 - e^{-\frac{h_0 \times K_0 \times \tan \phi}{a}} \right] + q_0 \times e^{-\frac{h_0 \times K_0 \times \tan \phi}{a}} = \frac{0.641 \times 18.5 - 17.5}{(1 - \sin 31.5) \times \tan 31.5} \left[ 1 - e^{-\frac{31.5 \times (1 - \sin 31.5) \times \tan 31.5}{0.641}} \right] + 20 \times e^{-\frac{31.5 \times (1 - \sin 31.5) \times \tan 31.5}{0.641}} = -19.23 \text{ kPa}$$

وزن سیلو:

$$G_s = B \times D \times \cot \theta \times \sigma'_{v_1} = 4.352^2 \times \cot 67.3 \times 0 = 0 \text{ kN}$$

وزن گوه:

$$G_w = \frac{B \times D^2 \times \gamma \times \cot \theta}{2} = \frac{4.352^3 \times 18.5 \times \cot 67.3}{2} = 319 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی:

$$K = \frac{B \times D \times c}{\sin \theta} = \frac{9.14^2 \times 17.5}{\sin 67.3} = 359 \text{ kN}$$

نیروی برشی:

$$T = \frac{D^2 \times \cot \theta}{2} (c + K_{A3} \times \bar{\sigma}'_v \times \tan \phi) = \frac{4.352^2 \times \cot 67.3}{2} (17.5 + 0.2 \times 26.8 \times \tan 31.5) = 82 \text{ kN}$$

نیروی مؤثر خاک:

$$E = - \frac{(\cos \theta \times \tan \phi - \sin \theta) \times \sum (G_s + G_w) + \sum (2T + K)}{\sin \theta \times \tan \phi + \cos \theta} =$$

$$\frac{((\cos 67.3 \times \tan 31.5 - \sin 31.5) \times \sum (0 + 319)) + \sum (359 + 82)}{\sin 67.3 \times \tan 31.5 + \cos 67.3} = -21.58$$

فشار خاک در این روش منفی به دست آمده که آن را برابر با صفر در نظر می گیرند.

### روش لکا و دورميو

در این روش حداقل فشار نگهداری را برای شکست در حالت فرونشست محاسبه می شود. 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 که از شکل (۳-۱۸) مشخص می باشد.

پارامتر چسبندگی خاک:

$$N_c = (N_s - 1) / \tan \phi = -1 / \tan 31.5 = -1.63$$

حداقل فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل:

$$\sigma_T = \gamma \times D \times N_\gamma + c \times N_c + \sigma_s \times N_s = 18.5 \times 4.352 \times 0.11 - 1.63 \times 17.5 = -19.66$$

فشار خاک در این روش نیز منفی به دست آمده که آن را برابر با صفر در نظر می گیرند.

### روش انگونستا و کواری

این روش همانند روش جانکسز و استاینر می باشد، ولی در ضریب جانبی خاک با هم متفاوت می باشند.



طول سست شدگی:

$$a = \frac{R}{1 + \tan \theta} = \frac{2.176}{1 + \tan 67.3} = 0.641$$

تنش قائم روی تونل:

$$\sigma'_{v_1} = \frac{a \times \gamma_d - c}{K_{silo} \times \tan \phi} \left[ 1 - e^{-\frac{h_0 \times K_0 \times \tan \phi}{a}} \right] + q_0 \times e^{-\frac{h_0 \times K_0 \times \tan \phi}{a}} = \frac{0.641 \times 18.5 - 17.5}{(1 - \sin 31.5) \times \tan 31.5} \left[ 1 - e^{-\frac{31.5 \times 0.8 \times \tan 31.5}{0.641}} \right] + 20 \times e^{-\frac{31.5 \times 0.8 \times \tan 31.5}{0.641}} = -11.5 \text{ kPa}$$

وزن سیلو:

$$G_s = B \times D \times \cot \theta \times \sigma'_v = 4.352^2 \times \cot 67.3 \times 0 = 0 \text{ kN}$$

وزن گوه:

$$G_w = \frac{B \times D^2 \times \gamma \times \cot \theta}{2} = \frac{4.352^3 \times 18.5 \times \cot 67.3}{2} = 319 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی:

$$K = \frac{B \times D \times c}{\sin \theta} = \frac{9.14^2 \times 17.5}{\sin 67.3} = 359 \text{ kN}$$

نیروی برشی:

$$T = \frac{D^2 \times \cot \theta}{2} (c + K_{A3} \times \bar{\sigma}'_v \times \tan \phi) = \frac{4.352^2 \times \cot 67.3}{2} (17.5 + 0.4 \times 26.8 \times \tan 31.5) = 95 \text{ kN}$$

نیروی مؤثر خاک:

$$E = - \frac{(\cos \theta \times \tan \phi - \sin \theta) \times \sum (G_s + G_w) + \sum (2T + K)}{\sin \theta \times \tan \phi + \cos \theta} = \frac{((\cos 67.3 \times \tan 31.5 - \sin 31.5) \times \sum (0 + 319)) + \sum (359 + 95)}{\sin 67.3 \times \tan 31.5 + \cos 67.3} = -23.42$$

فشار خاک در این روش منفی به دست آمده که آن را برابر با صفر در نظر می گیرند.

فشار بالازدگی از رابطه زیر بدست می آید:

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \frac{1 + \sin 31.5}{1 - \sin 31.5} = 3.184$$

$$\sigma_t = K_p \times (H_p + R) \times \gamma_d = 3.184 \times (31.5 + 2.176) \times 18.5 = 4037.5157 \text{ kpa}$$

در روش های تحلیلی با اضافه کردن ۲۰ کیلوپاسکال به عنوان دامنه تغییرات فشار، فشار را در تاج تونل بدست می آورند. در این مقطع نتایج حاصل از کلیه روش ها بر پایداری جبهه کار تونل دلالت می کنند که در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۴-۵): فشار نگهداری لازم برای جبهه کار تونل در مقطع شماره ۱

روش	فشار محاسبه شده در تاج تونل (کیلوپاسکال)	فشار مفروض در تاج تونل (کیلوپاسکال)	فشار نگهداری سینه کار در تاج تونل با در نظر گرفتن ۲۰ کیلوپاسکال به عنوان دامنه تغییرات (کیلوپاسکال)
COB	۲۱۲/۸۸	۲۱۲/۸۸	۲۳۲/۸۸
جانسکز - استاینر	-۲۱/۵۷	۰	۲۰
لکا - دورميو	-۱۹/۶۶	۰	۲۰
آنگونستا - کواری	-۲۳/۴۲	۰	۲۰

به دلیل اینکه تونل بالای سطح ایستابی حفر شده است، پس در این مقاطع آب زیرزمینی موجود نمی باشد و به دلیل شکل خاص مربوط به رابطه دوم آنگونستا و کواری که هد هیدرولیکی زمین در مخرج کسر قرار می گیرد، نمی توان از این روش برای محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل استفاده کرد.

## ۵-۲-۲- محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در مقطع شماره ۲

در این مقطع به دلیل تعدد لایه بندی و غیرهمگن بودن خاک، علاوه بر روش های COB، جانکسز و استاینر، لکا و دورمیو، انگونستا و کواری از روش برویر نیز استفاده شده است. در این مقطع نتایج حاصل از کلیه روش ها بر پایداری جبهه کار تونل دلالت می کند که در جدول (۵-۵) آورده شده است.

جدول (۵-۵): فشار نگهداری لازم برای جبهه کار تونل در مقطع شماره ۲

روش	فشار محاسبه شده در تاج تونل (کیلوپاسکال)	فشار مفروض در تاج تونل (کیلوپاسکال)	فشار نگهداری سینه کار در تاج تونل با در نظر گرفتن ۲۰ کیلوپاسکال به عنوان دامنه تغییرات (کیلوپاسکال)
COB	۱۵۷/۷۵	۱۵۷/۷۵	۱۷۷/۷۵
جانکسز- استاینر	-۱۹/۳۰	۰	۲۰
لکا و دورمیو	-۱۷/۴۲	۰	۲۰
انگونستا- کواری	-۲۱/۴۲	۰	۲۰
برویر	-۲۲/۸۴	۰	۲۰

## ۵-۲-۳- محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در مقطع شماره ۳

در این مقطع از روش های COB، جانکسز و استاینر، لکا و دورمیو، انگونستا و کواری برای برآورد فشار سینه کار استفاده شده است. در این مقطع نتایج حاصل از کلیه روش ها بر پایداری جبهه کار تونل دلالت می کند که در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۵-۶): فشار نگهداری لازم برای جبهه کار تونل در مقطع شماره ۳

روش	فشار محاسبه شده در تاج تونل (کیلوپاسکال)	فشار مفروض در تاج تونل (کیلوپاسکال)	فشار نگهداری سینه کار در تاج تونل با در نظر گرفتن ۲۰ کیلوپاسکال به عنوان دامنه تغییرات (کیلوپاسکال)
COB	۷۰/۳۱	۷۰/۳۱	۹۰/۳۱
جانکسز- استاینر	۱۲/۰۶	۱۲/۰۶	۳۲/۰۶
لکا و دورمیو	-۳۵/۳	۰	۲۰
انگونستا- کواری	۰/۸۶	۰/۸۶	۲۰/۸۶

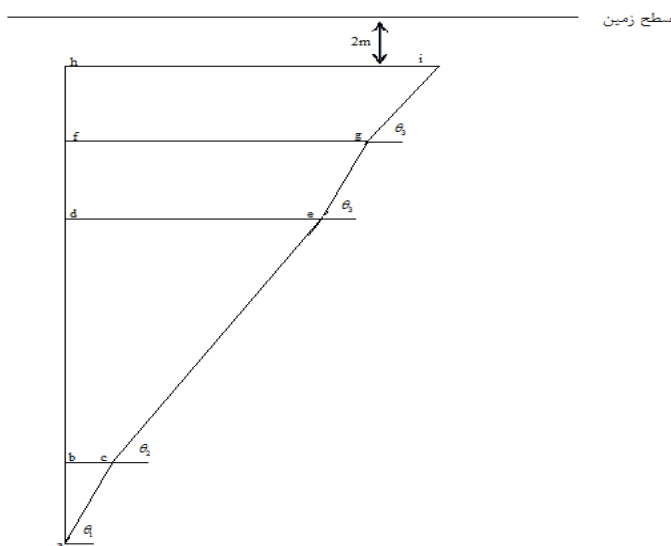
۵-۲-۴- محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل در مقطع شماره ۴

در این مقطع به دلیل تعدد لایه بندی و غیرهمگن بودن خاک، علاوه بر روش های COB، جانکسز و استاینر، لکا و دورمیو، انگونستا و کواری از روش برویر نیز استفاده شده است که محاسبات مربوطه در زیر آورده شده است.

در این مقطع خاک از پنج لایه تشکیل شده است. زاویه شکست هر لایه به گونه ای تعریف می شود که بیشترین فشار خاک در ناحیه مورد نظر بدست آید. عرض گوه برابر قطر تونل  $4/352$  فرض شده و طول هر گوه با محاسبه طول آخرین گوه بدست می آید. مشخصات پارامترهای هر لایه خاک در روش برویر در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۵-۷): مشخصات پارامترهای هر لایه خاک در روش برویر

۷-۸/۳	۴-۷	۳-۴	۲-۳	۰-۲	ضخامت لایه (m)
ET-۵	ET-۳	ET-۵	ET-۳	Fill	طبقه بندی خاک
۴۰	۲۰	۴۰	۲۰	۱۵	چسبندگی خاک (kPa)
۲۵	۳۲	۲۵	۳۲	۳۰	زاویه اصطکاک داخلی
۶۹	۷۱	۶۹	۷۱	-	زاویه شکست



شکل (۵-۵): گوه های تشکیل شده در مقطع شماره ۳

طول گوه اول:

$$l_{bc} = \frac{h_{ab}}{\tan \theta_1} = \frac{1.3}{\tan 69.5} = 0.48 \text{ m}$$

طول گوه دوم:

$$l_{de} = \frac{h_{bd}}{\tan \theta_2} + l_{bc} = \frac{3}{\tan 69} + 0.48 = 1.63 \text{ m}$$

طول گوه سوم:

$$l_{fg} = \frac{h_{df}}{\tan \theta_3} + l_{de} = \frac{1}{\tan 71} + 1.63 = 1.98 \text{ m}$$

طول گوه چهارم:

$$l_{hi} = \frac{h_{hf}}{\tan \theta_4} + l_{fg} = \frac{13.5}{\tan 69} + 1.98 = 2.45 \text{ m}$$

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

$$\sigma'_{v_1} = ((2 \times 17) + 20) = 54 \text{ kPa}$$

وزن سیلو اول :

$$G_{s_1} = B \times l_{hi} \times \sigma'_{v_1} = 4.352 \times 2.45 \times 54 = 575.35 \text{ kN}$$

وزن گوه اول:

$$G_{w_1} = \frac{B \times (l_{hi} + l_{fg}) \times h_{fh} \times \gamma_d}{2} = \frac{4.352 \times 4.43 \times 1 \times 18.5}{2} = 178.344 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی روی گوه اول:

$$K_1 = \frac{B \times h_{fh} \times c'_1}{\sin \theta_4} = \frac{4.352 \times 1 \times 20}{\sin 69} = 96 \text{ kN}$$

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

$$\bar{\sigma}'_{v_1} = \sigma'_{v_1} + \frac{1}{3} \times h_{fh} \times \gamma_d = 54 + \frac{1}{3} \times 1 \times 18.5 = 60.16 \text{ kPa}$$

نیروی برشی:

$$T_1 = \frac{h_{fh} \times (l_{hi} + l_{fg})}{2} \times (c'_1 + K_0 \times \bar{\sigma}'_{v_1} \times \tan \phi'_1) = \frac{1 \times (2.45 + 1.98)}{2} (20 + (0.47 \times 54 \times \tan 32))$$

$$= 83.45 \text{ kN}$$

گوه دوم:

طول سست شدگی:

$$a = \frac{A_{silo}}{U_{silo}} = \frac{1.98 \times 4.352}{2 \times (1.98 + 4.352)} = 0.68 \text{ m}$$

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 می شود.

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

$$= \frac{0.68 \times 18.5 - 20}{0.47 \times \tan 32} \left( 1 - e^{-0.47 \times \tan 32 \times \frac{1}{0.68}} \right) + (163) \times \left( e^{-0.47 \times \tan 32 \times \frac{1}{0.68}} \right) = 26.24 \text{ kPa}$$

وزن سیلو دوم:

$$G_{s_2} = B \times l_{de} \times \sigma'_{v_2} = 4.352 \times 1.63 \times 26.24 = 187.059 \text{ kN}$$

وزن گوه دوم:

$$G_{w_2} = \frac{B \times (l_{de} + l_{fg}) \times h_{df} \times \gamma_2}{2} = \frac{4.352 \times 3.61 \times 1 \times 18}{2} = 141.773 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی روی گوه دوم:

$$K_2 = \frac{B \times h_{df} \times c'_2}{\sin \theta_3} = \frac{4.352 \times 1 \times 40}{\sin 71} = 184.11 \text{ kN}$$

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

$$\overline{\sigma'_{v_2}} = \sigma'_{v_2} + \frac{1}{3} \times h_{fd} \times \gamma_2 = 26.24 + \frac{1}{3} \times 4 \times 18 = 32.24 \text{ kPa}$$

نیروی برشی گوه دوم:

$$T_2 = \frac{h_{df} \times (l_{fg} + l_{de})}{2} (c'_2 + K_0 \cdot \overline{\sigma'_{v_2}} \cdot \tan \phi'_2) = \frac{1 \times 3.61}{2} (40 + (0.57 \times 32.24 \times \tan 25))$$

$$= 88.1 \text{ kN}$$

گوه سوم:

طول سست شدگی:

$$a = \frac{A_{silo}}{U_{silo}} = \frac{1.63 \times 4.352}{2 \times (1.63 + 4.352)} = 0.59 \text{ m}$$

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

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

$$= \frac{0.59 \times 18 - 40}{0.43 \times \tan 25} \left( 1 - e^{-0.57 \times \tan 25 \times \frac{1}{0.59}} \right) + 0 \times \left( e^{-0.57 \times \tan 25 \times \frac{1}{0.59}} \right) = -22.9 \text{ kPa}$$

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

وزن سیلو سوم:

$$G_{S_3} = B \times l_{de} \times \sigma'_{v_3} = 4.352 \times 1.63 \times 0 = 0 \text{ kN}$$

وزن گوه سوم:

$$G_{w_3} = \frac{B \times (l_{de} + l_{bc}) \times h_{bd} \times \gamma_3}{2} = \frac{4.352 \times 2.11 \times 4 \times 18.5}{2} = 256.47 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی روی گوه سوم:

$$K_3 = \frac{B \times h_{bd} \times c'_3}{\sin \theta_2} = \frac{4.352 \times 4 \times 20}{\sin 69} = 279.69 \text{ kN}$$

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

$$\overline{\sigma'_{v_3}} = \sigma'_{v_3} + \frac{1}{3} \times h_{bd} \times \gamma_3 = 0 + \frac{1}{3} \times 4 \times 18.5 = 24.66 \text{ kPa}$$

$$T_3 = \frac{h_{bd} \times (l_{de} + l_{bc})}{2} \times (c'_3 + K_0 \times \overline{\sigma'_{v_3}} \times \tan \phi'_3) = \frac{4 \times 2.11}{2} (20 + (0.47 \times 24.66 \times \tan 32)) = 86.78 \text{ kN}$$

گوه چهارم:

طول سست شدگی:

$$a = \frac{A_{silo}}{U_{silo}} = \frac{0.48 \times 4.352}{2 \times (0.48 + 4.352)} = 0.21 \text{ m}$$

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

می شود.

$$\begin{aligned} \sigma'_{v_4} &= \frac{a \times \gamma_3 - c'_3}{K_0 \times \tan \phi'_3} \left( 1 - e^{-K_0 \times \tan \phi'_3 \times \frac{h_{bd}}{a}} \right) + (\sigma'_{v_2}) \times \left( e^{-K_0 \times \tan \phi'_3 \times \frac{h_{bd}}{a}} \right) \\ &= \frac{0.21 \times 17 - 30}{0.42 \times \tan 30} \left( 1 - e^{-0.42 \times \tan 25 \times \frac{4}{0.21}} \right) + 0 \times \left( e^{-0.42 \times \tan 25 \times \frac{4}{0.21}} \right) = -53.35 \end{aligned}$$

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

وزن سیلو چهارم:

$$G_{S_4} = B \times l_{bc} \times \sigma'_{v_4} = 4.352 \times 0.48 \times 0 = 0 \text{ kN}$$



وزن گوه چهارم:

$$G_{w_4} = \frac{B \times l_{bc} \times h_{ab} \times \gamma_4}{2} = \frac{4.352 \times 0.48 \times 1.3 \times 18}{2} = 24.74 \text{ kN}$$

نیروی چسبندگی روی گوه چهارم:

$$K_4 = \frac{B \times h_{ab} \times c'_4}{\sin \theta_4} = \frac{4.352 \times 1.3 \times 25}{\sin 69.5} = 241.6 \text{ kN}$$

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

$$\overline{\sigma'_{v_4}} = \sigma'_{v_4} + \frac{1}{3} \times h_{ab} \times \gamma_4 = 0 + \frac{1}{3} \times 1.3 \times 18 = 7.8 \text{ kPa}$$

نیروی چسبندگی روی گوه چهارم:

$$T_4 = \frac{h_{ab} \times l_{bc}}{2} \times (c'_4 \times K_4 \times \overline{\sigma'_{v_4}} \times \tan \phi'_4) = \frac{1.3 \times 0.48}{2} (40 + (0.577 \times 7.8 \times \tan 35)) = 13.3 \text{ kN}$$

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

$$\zeta_-^1 = \cos 69.5 \times \tan 32 - \sin 69.5 = -0.64$$

$$\zeta_-^i = -0.64 - 0.7 - 0.7 - 0.773 = -2.91$$

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

$$\zeta_+^{(i)} = 0.988 + 0.766 + 0.94 + 0.786 = 3.48$$

وزن کل سیلوها:

$$G_s = \sum_{i=1}^N G_s^{(i)} = 762.409 \text{ kN}$$

وزن کل گوهها:

$$G_w = \sum_{i=1}^N G_w^{(i)} = 601.287 \text{ kN}$$

نیروی مؤثر خاک:

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

$$= -37.65$$

در این مقطع نتایج حاصل از کلیه روشها بر پایداری جبهه کار تونل دلالت می کند که در جدول (۵-۸) آورده شده است.

فشار بالازدگی از رابطه زیر بدست می آید:

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \frac{1 + \sin 28.5}{1 - \sin 28.5} = 2.82$$

$$\sigma_t = K_p \times (H_p + R) \times \gamma_d = 2.82 \times (4.5 + 2.176) \times 18.5 = 348.286 \text{ kpa}$$

فشار بالازدگی در این مقاطع حدوداً بین ۳۵۰ تا ۴۰۰۰ کیلوپاسکال می باشد.

جدول (۵-۸): فشار نگهداری لازم برای جبهه کار تونل در مقطع شماره ۴

روش	فشار محاسبه شده در تاج تونل (کیلوپاسکال)	فشار مفروض در تاج تونل (کیلوپاسکال)	فشار نگهداری جبهه کار در تاج تونل با در نظر گرفتن ۲۰ کیلوپاسکال به عنوان دامنه تغییرات (کیلوپاسکال)
COB	۵۲/۹۲	۵۲/۹۲	۷۲/۹۲
جانسکز- استاینر	۳/۴۱	۳/۴۱	۲۳/۴۱
لکا و دورميو	-۲۳/۵۷	۰	۲۰
آنگونستا- کواری	-۳/۵۸	۰	۲۰
برویر	-۳۷/۶۵	۰	۲۰

### ۵-۳- محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل با استفاده از مدلسازی عددی

به منظور مدلسازی مقاطع مذکور قسمت هایی از مسیر تونل به صورت ۴ بلوک، هر کدام به طول ۵۰ متر در نظر گرفته شد و این بلوکها با استفاده از نرم افزار PLAXIS ۳D TUNNEL مدلسازی شد. در این

بخش ابتدا مراحل ساخت مدل‌ها تشریح می‌شود و سپس حداقل فشار سینه‌کار مورد نیاز برای پایداری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۵-۳-۱- معرفی نرم‌افزار

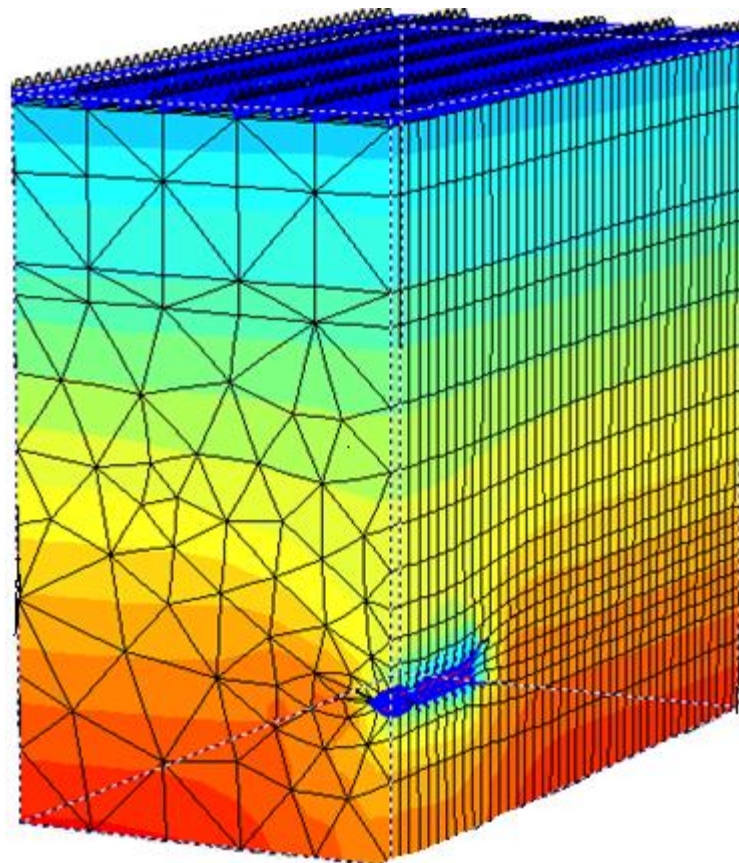
نرم‌افزار سه‌بعدی PLAXIS 3D TUNNEL براساس روش عددی اجزاء محدود یا المان محدود<sup>۱</sup> (FEM) می‌باشد. در این روش هر جسم به اجزاء کوچکتری که المان نامیده می‌شود تقسیم می‌شود که این المان‌ها در نقاطی به هم اتصال پیدا می‌کنند که به این نقاط گره گفته می‌شود. سپس به صورت هم‌زمان معادلات حاکم بر هر یک از گره‌ها را حل می‌کنیم که در نهایت نتایج مورد نظر به دست می‌آید. در این نرم‌افزار با چهار زیر برنامه مواجه خواهیم بود (ورودی داده‌ها، محاسبات، خروجی و نمودارها).

اطلاعات ورودی شامل رسم هندسه، شرایط مرزی و خصوصیات مواد، مش‌بندی، اعمال شرایط اولیه شامل اعمال فشار آب (در صورت وجود) و فشار موثر اولیه می‌باشد.

برای بدست آوردن ابعاد مدل بهینه به منظور محاسبه دقیق فشار جبهه‌کار، تحلیل حساسیت انجام شده است. ایده اولیه در این زمینه مربوط به حل دقیق ریاضی در محیط‌های الاستیک (روابط کرش) است که حداکثر زون تأثیر یک حفره زیرزمینی تا ۳ برابر قطر آن برآورد شده است، اما با توجه به اینکه زمین در شرایط طبیعی رفتار الاستیک از خود نشان نمی‌دهد و نظر به اینکه زمین پیرامون تونل از جنس سنگ نیست، لذا اقدام به ساخت مدل‌هایی با ابعاد مختلف شد و پلات‌های مربوط به تنش‌ها در اطراف تونل قبل و بعد از حفاری مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت فاصله بهینه‌ای که مرزها باید از مرکز تونل داشته باشند تا تأثیر حفر تونل بر آنها از بین برود و تنش‌ها در آن فاصله به وضیت اولیه خود برسد مشخص شد.

<sup>۱</sup> Finite Element Method

برای نمونه شکل زیر وضعیت تنش های بعد از حفاری را در بلوک شماره ۱ نشان می دهد که فاصله مرزهای آن از محور مرکزی تونل ۵D در نظر گرفته می شود.



شکل (۵-۶): تنش کل در مدل مربوط به بلوک شماره ۱  
برای تحلیل عددی مقاطع مورد نظر، بلوک هایی با مشخصات زیر در نظر گرفته می شود.

جدول (۵-۹): مشخصات شبکه اجزاء محدود مقاطع مورد نظر

شماره مقطع	روباره (متر)	عمق کف تونل (متر)	عرض مدل (متر)	ارتفاع مدل (متر)	طول مدل (متر)
۱	۳۱/۵	۸/۱۴۸	۲۵	۴۴	۵۰
۲	۲۵	۱۰/۶۴۸	۲۵	۴۰	۵۰
۳	۷/۲	۷/۴۴۸	۲۵	۱۹	۵۰
۴	۴	۷/۶۴۸	۲۵	۱۶	۵۰

در مرحله بعد شرایط مرزی به مدل اعمال می شود که شامل کلیه بارها، نیروها و جابجایی هایی می باشد که از قبل در محیط موجود بوده و باید در مدلسازی به آن اعمال گردد. با اعمال این شرایط مرزهای پایین در همه جهات ثابت شده، مرزهای بالایی آزاد گذاشته می شود و مرزهای کناری در جهت  $x$  ثابت بوده و در جهت  $y$  آزاد می باشند. سپس باید خصوصیات مواد تشکیل دهنده مدل که شامل خاک و سپر ماشین حفاری می باشد را به مدل اعمال کرد. در این مرحله باید از مدل رفتاری که متناسب با نوع خاک می باشد استفاده کرد. چندین مدل رفتاری در این نرم افزار وجود دارد که با توجه شرایط مسئله می توان از یک یا چند نوع آن استفاده کرد. نتایج بدست آمده از آزمایش های آزمایشگاهی و برجا نشان می دهد که خاک محدوده پروژه در رده خاک های بسیار سخت و متراکم قرار می گیرد. براساس توصیه های نرم افزار این نوع خاک تطابق خوبی با مدل رفتاری خاک سخت شونده دارد، بنابراین به منظور مدلسازی رفتار خاک از این مدل رفتاری استفاده شده است. در مدل سخت شونده از تئوری پلاستیسیته بجای تئوری الاستیسیته استفاده می شود و زاویه اتساع خاک را نیز در محاسبات وارد می کند. این مدل رفتاری مدول سختی خاک را با تنش موجود در خاک مرتبط می کند. در نرم افزار Plaxis به دلیل در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک با دستگاه و خاک با سگمنت یک سختی اندرکنش یا ضریب کاهش مقاومت اندرکنش ( $R_{inter}$ ) تعریف شده است و با توجه به اندازه ذرات خاک مقداری بین ۱-۰/۵ است که هر چه خاک دانه ریزتر باشد، مقدار آن به ۱ نزدیک تر می شود و در این تحقیق با توجه به توصیه نرم افزار و نوع خاک موجود در مسیر حفاری تونل، مقدار آن برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده است. در مدلسازی عددی ضریب پواسون ( $\nu_{ur}$ ) مربوط به هر لایه خاک به طور جداگانه وارد می شود. پارامترهای ژئومکانیکی خاک در جدول (۵-۱) آورده شده است.

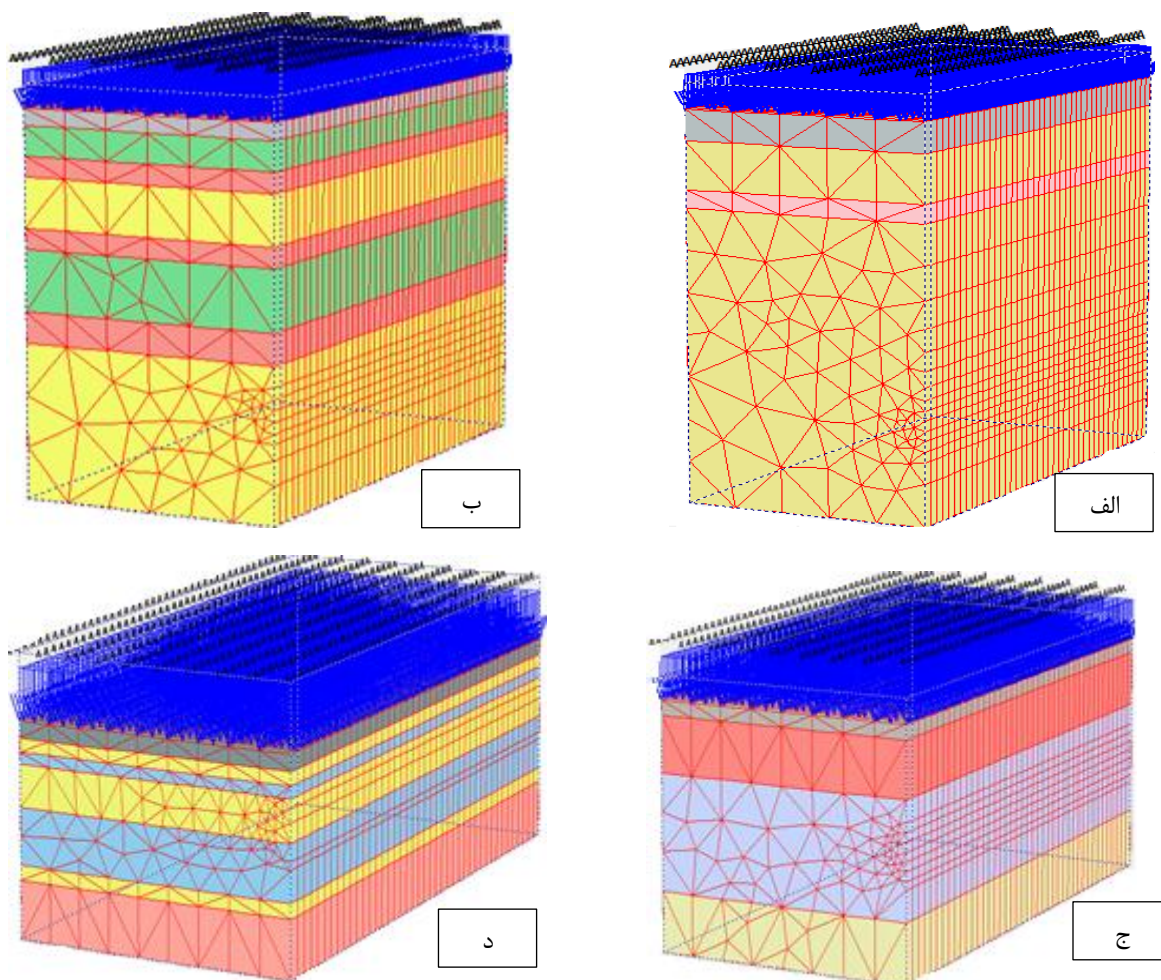
جدول (۵-۱۰): خصوصیات ماشین EPB [۲۷]

واحد	مقدار	علائم	پارامترهای ماشین EPB
-	الاستیک	نوع مواد	خصوصیات
$KN/m$	$5.87e6$	EA	صلبیت محوری
$KNm^2/m$	$3.051e4$	EI	صلبیت خمشی
m	۰.۲۵	d	ضخامت
kN/m/m	۲۸/۴	w	وزن
-	۰/۲	$\nu$	نسبت پواسون

جدول (۵-۱۱): خصوصیات سگمنت [۲۷]

واحد	مقدار	علائم	پارامترهای ماشین EPB
-	الاستیک	نوع مواد	خصوصیات
$KN/m$	$7.05e6$	EA	صلبیت محوری
$KNm^2/m$	$3.68e4$	EI	صلبیت خمشی
m	۰.۲۵	d	ضخامت
kN/m/m	۶.۷	w	وزن
-	۰/۲	$\nu$	نسبت پواسون

در مرحله بعد مش بندی انجام می شود که با توجه به حساسیت مقطع مورد مطالعه می توان مش بندی را کوچک تر کرد. نرم افزار ابتدا مدل هندسی را به صورت دو بعدی و سپس به صورت سه بعدی مش بندی می کند. نوع اصلی المان در مش، المان مثلثی ۱۵ گرهی بوده که این المان ها دارای ۶ گره در صفحه x-y و ۹ گره در جهت z هستند.



شکل (۵-۷): مش بندی و بارگذاری الف) مقطع ۱ ب) مقطع ۲ ج) مقطع ۳ د) مقطع ۴

در مرحله بعد شرایط اولیه که شامل فشار آب مبتنی بر سطح آب زیرزمینی و تنش موثر که مبتنی بر ضریب فشار جانبی خاک است، به مدل اعمال می گردد. تونل در تمامی مسیر خود از بالای سطح ایستابی عبور می کند، بنابراین در این مقاطع فشار آب وجود ندارد. در نهایت نوبت به محاسبات و گرفتن خروجی ها می رسد. این مرحله خود به چند فاز تقسیم می شود که در براساس گام پیشروی تعیین می شود که در تونل ابوذر گام پیشروی  $1/2$  متر تعیین شده است.

فاز اول: در این فاز ابتدا نقاطی روی جبهه کار تونل مشخص می شود که با استفاده از این نقاط می توان میزان جابجایی جبهه کار تونل را در چندین نقطه مشاهده کرد. سپس بارهای سطحی را فعال کرده و در صورت وجود آب، فشار آب را نیز به مدل اعمال می کنیم، سپس به مدل اجازه رسیدن به تعادل داده

می‌شود. در پایان این مرحله به منظور شبیه‌سازی واقعی‌تر از شرایط زمین، نشست‌ها به صفر کاهش می‌یابد.

فاز دوم: در این فاز ابتدا با توجه به گام پیشروی، خاک درون تونل را غیر فعال کرده و در مرحله بعد، سپر دستگاه حفاری فعال می‌شود که عمل حفر تونل در این فاز صورت می‌گیرد، سپس فشار مورد نظر به جبهه کار اعمال می‌شود. جبهه کار به وسیله سیال (بنتونیت یا فوم) با وزن مخصوص ۱۵ کیلو نیوتن بر متر مکعب نگهداری می‌شود. فشار نگهداری جبهه کار با نرخ  $15 \text{ KPa}$  از تاج تا کف تونل افزایش می‌یابد. تونل در این مرحله انقباض ناشی از اضافه حفاری به اندازه  $0.78\%$  در نظر گرفته شده که به مدل اعمال می‌شود و این مرحله تا پایان حفاری ادامه پیدا می‌کند. در صورت وجود آب زیرزمینی باید محیط داخل تونل را خشک کرد، اما در تونل ابوذر به دلیل عدم وجود آب زیرزمینی این مرحله احتیاج نمی‌باشد.

فاز سوم: در این فاز گام دوم را حفاری کرده و سپس سپر دستگاه را فعال کرده و فشار مورد نظر به دستگاه اعمال می‌شود و در نهایت انقباض ناشی از اضافه حفاری به مدل اعمال شده و به مدل اجازه داده می‌شود تا به تعادل برسد.

فاز چهارم: در این فاز گام سوم را حفاری کرده و بقیه مراحل همانند فاز سوم می‌باشد. این مراحل تا فاز نهم ادامه پیدا می‌کند.

فاز نهم: در فاز هشتم به اندازه کل طول سپر حفاری شده است و در این فاز گام هشتم حفاری می‌شود. بعد از غیر فعال کردن خاک در گام هشتم و اعمال فشار به جبهه کار و انقباض ناشی از اضافه حفاری، سپر را در گام اول غیر فعال کرده و نگهداری دیواره تونل به وسیله دوغابی با وزن مخصوص ۱۲ کیلونیوتون بر متر مکعب انجام می‌شود. فشار تزریق دوغاب به اندازه  $50 \text{ Kpa}$  بیش‌تر از فشار سینه کار می‌باشد. در نهایت به مدل اجازه رسیدن به تعادل داده می‌شود.

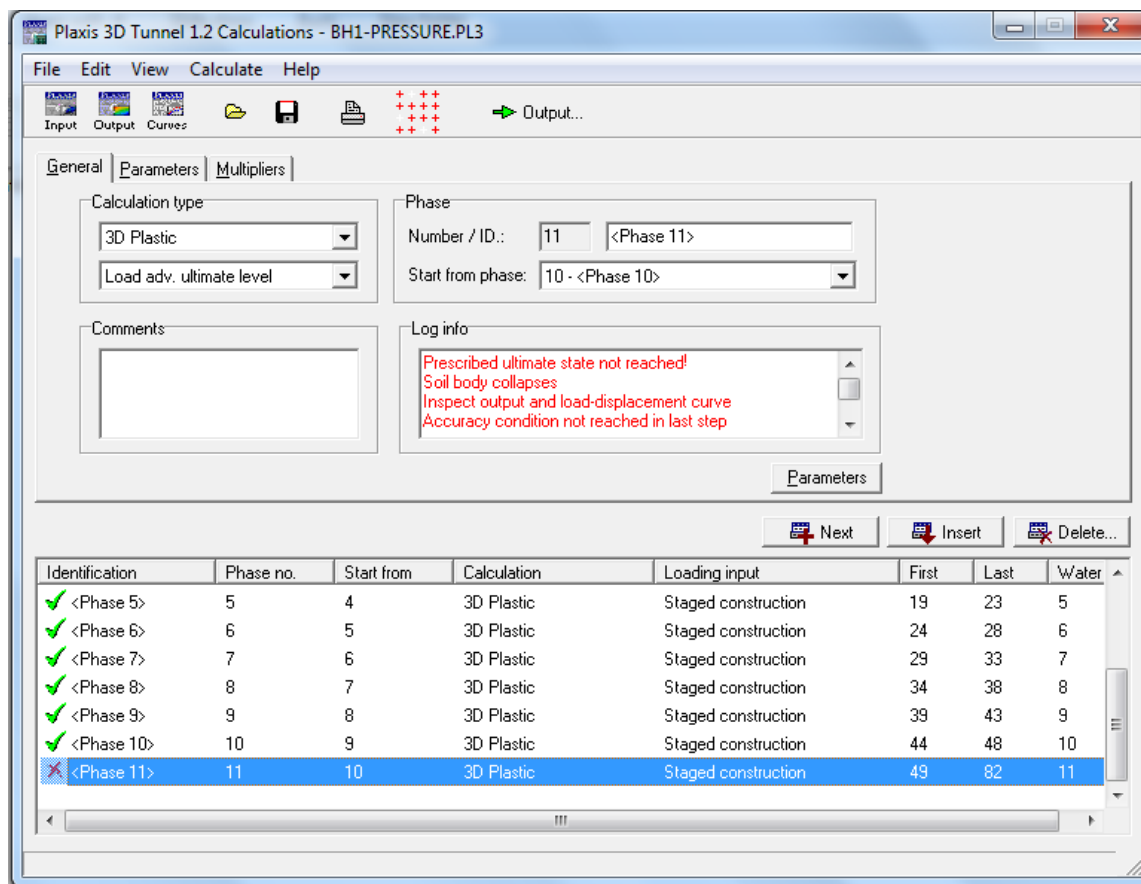


فاز دهم: در این فاز گام نهم حفاری می شود و بعد از اعمال فشار به جبهه کار و انقباض ناشی از اضافه حفاری، سپر را در گام دوم غیر فعال کرده و نگهداری دیواره تونل به وسیله دوغابی با وزن مخصوص ۱۲ کیلونیوتون بر متر مکعب انجام می شود. فشار تزریق دوغاب به اندازه  $50 \text{ Kpa}$  بیش تر از فشار جبهه کار می باشد. در مرحله بعد دوغاب تزریقی به دیواره تونل در گام اول را غیرفعال کرده و سگمنت جایگزین آن می شود و در نهایت به مدل اجازه رسیدن به تعادل داده می شود.

فاز یازدهم: در این فاز گام دهم حفر می شود و بقیه مراحل شبیه به فاز دهم می باشد. فشار محاسبه شده به اندازه حداقل فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل در نظر گرفته می شود که کمتر از این فشار باعث ریزش جبهه کار می شود.

### ۵-۳-۲- تعیین فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل

بر طبق آنچه قبلا در فصل دوم در مورد سپرهای فشار تعادلی زمین گفته شد، فشار لازم برای نگهداری جبهه کار، در هنگام حفر تونل با استفاده از این نوع سپر، برابر همان فشاری است که از طرف زمین به جبهه کار وارد می شود. حداقل فشار نگهداری را می توان با کاهش فشار جبهه کار تا اندازه ای که فرو نشست روی جبهه کار رخ دهد، به دست آورد. در صورت ریزش جبهه کار، در قسمت Log info شکل (۴-۵) نرم افزار پیامی مبنی بر فرونشست جبهه کار می دهد که در این صورت فشار باید تا اندازه ای بالا رود که ریزشی در جبهه کار اتفاق نیفتد.



شکل (۵-۸): پایان فاز محاسباتی

در مقاطع مورد نظر علاوه بر فشار جبهه کار، مواردی نیز همانند حداکثر جابجایی روی تاج تونل، حداکثر بالازدگی در کف تونل، حداکثر نشست سطح زمین و جابجایی جبهه کار نیز به دلیل اهمیت این موضوعات در نظر گرفته شده است. علامت مثبت در جابجایی جبهه کار در تمامی مقاطع نشان دهنده جابجایی جبهه کار به سمت بیرون می باشد.

### ۵-۳-۱- محاسبه فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع شماره ۱

به منظور یافتن حداقل فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل، تغییرات فشار را از  $20 \text{ Kpa}$  آغاز کرده که در فشار  $19 \text{ Kpa}$  - فرونشست در جبهه کار تونل رخ داده است، بنابراین حداقل فشار لازم برای نگهداری

جبهه کار تونل برابر  $18 \text{ Kpa}$  - می باشد که عملاً صفر در نظر گرفته می شود و در جدول (۵-۱۲) آورده شده است.

جدول (۵-۱۲): برآورد فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع ۱

وضعیت جبهه کار	جابجایی جبهه کار (mm)			نشست سطح زمین (mm)	بالا زدگی کف تونل (mm)	جابجایی عمودی روی تاج تونل (mm)	فشار
	کف	مرکز	تاج				
پایدار	۲/۵	۱۰	۲/۵	۶/۴۲	۹/۱۳	۲۱/۴	۲۰
پایدار	۳	۱۷	۳	۶/۸۸	۱۰	۲۵/۴۴	۰
پایدار	۷	۲۲	۴	۷/۱۲	۱۰/۱	۲۶/۳۳	-۱۰
پایدار	۶/۵	۲۴	۵	۸/۳۲	۱۰/۲۱	۲۷/۰۲	-۱۷
پایدار	۸	۲۶	۶	۸/۴۸	۱۰/۳۲	۲۷/۱	-۱۸
فرونشست							-۱۹

### ۵-۳-۲-۲- محاسبه فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع شماره ۲

در این مقطع تغییرات فشار را از  $20 \text{ Kpa}$  آغاز کرده که در فشار  $27 \text{ Kpa}$  - فرونشست در جبهه کار تونل رخ داده است، بنابراین حداقل فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل برابر  $26 \text{ Kpa}$  - می باشد که عملاً صفر در نظر گرفته می شود و در جدول زیر آورده شده است.

جدول (۵-۱۳): برآورد فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع ۲

وضعیت جبهه کار	جابجایی جبهه کار (mm)			نشست سطح زمین (mm)	بالا زدگی کف تونل (mm)	جابجایی عمودی روی تاج تونل (mm)	فشار
	کف	مرکز	تاج				
پایدار	۲/۵	۹	۲/۵	۷/۶	۱۰/۳	۲۲	۲۰
پایدار	۳	۱۶	۳	۷/۵۵	۱۰/۵	۲۳/۷	۰
پایدار	۴	۱۹	۴	۸/۱۵	۱۰/۸	۲۳/۸	-۱۰
پایدار	۴/۵	۲۴	۴/۵	۸/۲۲	۱۰/۹	۲۴/۲	-۲۰
پایدار	۸/۵	۲۶	۶/۵	۸/۲۸	۱۱/۱	۲۴/۶	-۲۶
فرونشست							-۲۷

## ۵-۳-۲-۳- محاسبه فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع شماره ۳

در این مقطع تغییرات فشار را از ۵۰ Kpa آغاز کرده که در فشار ۷۱ Kpa- فرونشست در جبهه کار تونل رخ داده است، بنابراین حداقل فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل برابر ۷۰ Kpa- می باشد که عملاً صفر در نظر گرفته می شود و در جدول (۵-۱۴) آورده شده است.

جدول (۵-۱۴): برآورد فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع ۳

وضعیت جبهه کار	جابجایی جبهه کار (mm)			نشست سطح زمین (mm)	بالا زدگی کف تونل (mm)	جابجایی عمودی روی تاج تونل (mm)	فشار
	کف	مرکز	تاج				
پایدار	۰	۱	۰	۱۹/۱۷	۵/۷	۲۴/۳۲	۵۰
پایدار	۰/۸	۳	۰/۸	۲۰/۳۲	۷/۹۷	۲۸/۴	۲۰
پایدار	۲/۵	۸	۲/۵	۲۰/۴۵	۹/۵	۳۲/۵۴	۰
پایدار	۳	۱۰	۳	۲۰/۶۵	۱۰	۳۲/۸۸	-۱۰
پایدار	۱۰/۵	۲۵	۹	۲۱/۳	۱۱/۱	۳۳/۲۴	-۴۰
پایدار	۱۷	۳۲	۱۰	۲۲/۲۱	۱۱/۲	۳۵/۴۸	-۷۰
فرونشست							-۷۱

## ۵-۳-۲-۴- محاسبه فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع شماره ۴

در این مقطع تغییرات فشار را از ۱۵۰ Kpa آغاز کرده که در فشار ۴۲ Kpa- فرونشست در جبهه کار تونل رخ داده است، بنابراین حداقل فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل برابر ۴۱ Kpa- می باشد که عملاً صفر در نظر گرفته می شود و در جدول (۵-۱۵) آورده شده است.

جدول (۵-۱۵): برآورد فشار جبهه کار با روش عددی در مقطع ۴

وضعیت جبهه کار	جابجایی جبهه کار (mm)			نشست سطح زمین (mm)	بالازدگی کف تونل (mm)	جابجایی عمودی روی تاج تونل (mm)	فشار
	کف	مرکز	تاج				
پایدار	-۲/۵	-۶	-۲/۵	۲۱/۰۶	۳/۷	۲۶/۰۹	۱۵۰
پایدار	۰/۵	۵	۰/۵	۲۳/۰۶	۳/۹۶	۲۷/۲۶	۰
پایدار	۶	۹	۶	۲۳/۳۷	۴/۱	۲۸/۰۶	-۱۰
پایدار	۱۲/۵	۱۹	۱۲	۲۴/۹۶	۴/۲۳	۲۹/۲۴	-۴۰
پایدار	۱۳/۵	۲۱	۱۲/۵	۲۴/۹۸	۴/۳۱	۳۰/۷۸	-۴۱
فرونشست							-۴۲

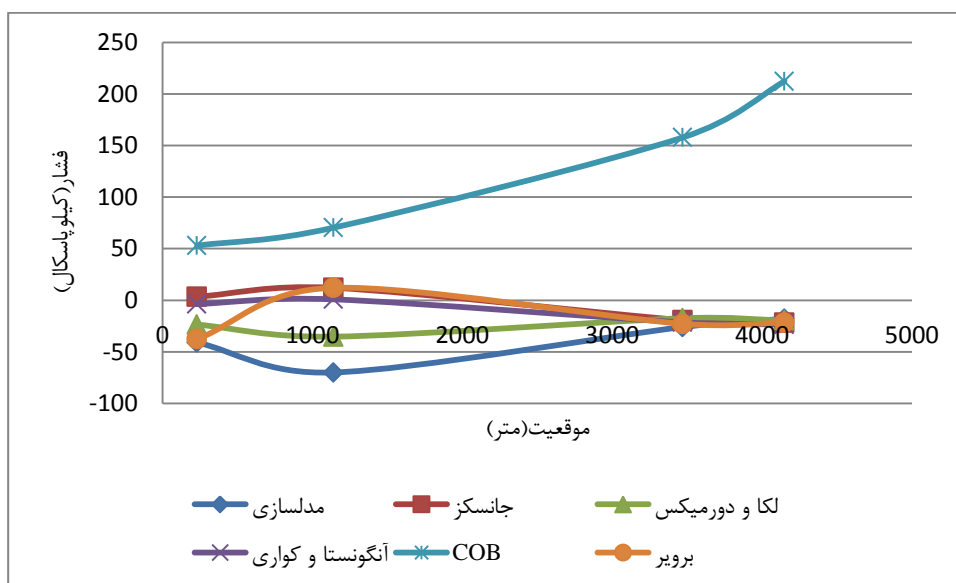
#### ۵-۴- مقایسه نتایج روش های تجربی، تحلیلی و مدلسازی عددی

نتایج حاصل از روش های تجربی، تحلیلی و مدلسازی عددی در ۴ مقطع مورد نظر در جدول (۵-۱۵) و شکل (۵-۵) نشان داده شده است. با توجه به این جدول، پراکندگی نتایج روش های تحلیلی، تجربی و عددی در مقاطع مورد بحث به وضوح دیده می شود. مقادیر محاسبه شده به عنوان فشار لازم برای نگهداری جبهه کار در روش های تحلیلی مختلف با هم همخوانی ندارد که به دلیل فرضیاتی است که در هر یک از این روش ها به منظور ساده سازی در نظر گرفته شده است، به طوری که در روش های جانسکز- استاینر و آنگونستا- کواری که بر پایه تعادل حدی استوار هستند، از مدل شکست سه بعدی گوه و سیلو هورن استفاده می شود، در حالی که در روش لکا- دورمیو، بار شکست به وسیله بلوک هایی به شکل مخروط محاسبه می شود. در مدلسازی عددی میدان تنش به وجود آمده در اطراف تونل دارای شکل هندسی مشخص و منظمی نیست. هر چقدر میدان تنش فرضی در روش های تحلیلی مذکور به میدان تنش حاصله در مدلسازی عددی شبیه تر باشد، مقادیر بدست آمده به عنوان فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل نیز به هم نزدیک تر خواهند بود.

جدول (۵-۱۶): نتایج حاصل از روش های مختلف جهت محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل

شماره مقطع	کیلومتر	روش	فشار نگهداری موثر جبهه کار (کیلو پاسکال)	
۱	۴۱۵۰	مدلسازی عددی	-۱۸	
		تحلیلی	جانسکز - استاینر	-۲۱/۵۷
			لکا - دورميو	-۱۹/۶۶
			آنگونستا - کواری	-۲۳/۴۲
		تجربی	COB	۲۱۲/۸۸
۲	۳۴۷۰	مدلسازی عددی	-۲۶	
		تحلیلی	جانسکز - استاینر	-۱۹/۳۰
			لکا - دورميو	-۱۷/۴۲
			آنگونستا - کواری	-۲۱/۴۲
			برویر	-۲۲/۸۴
		تجربی	COB	۱۵۷/۷۵
۳	۱۱۴۰	مدلسازی عددی	-۷۰	
		تحلیلی	جانسکز - استاینر	۱۲/۰۶
			لکا - دورميو	-۳۵/۳
			آنگونستا - کواری	۰/۸۶
		تجربی	COB	۷۰/۳۱
۴	۲۳۰	مدلسازی عددی	-۴۱	
		تحلیلی	جانسکز - استاینر	۳/۴۱
			لکا - دورميو	-۲۳/۵۷
			آنگونستا - کواری	-۳/۵۸
			برویر	-۳۷/۶۵
		تجربی	COB	۵۲/۹۲

نتایج حاصل از جدول (۵-۱۶) در نمودار زیر آورده شده است.



شکل (۵-۹): نتایج حاصل از روش های مختلف جهت محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل

از جدول (۵-۱۶) و شکل (۵-۹) مشخص است که روش های تحلیلی و تجربی فشار بالاتری نسبت به مدل سازی عددی برآورد می کنند که به دلیل فرضیات اولیه در نظر گرفته شده در هر روش می باشد. اما مقادیر ارایه شده توسط روش COB، تفاوت زیادی با مدل سازی عددی دارد. در روش COB، به دلیل در نظر گرفتن فشار لایه های خاک، با افزایش ضخامت روباره، فشار نگهداری جبهه کار نیز زیاد می شود. مقادیر ارایه شده توسط روش های جانسکز با آنگونستا به هم نزدیک می باشد که به دلیل در نظر گرفتن شکل شکست خاک به صورت سیلو و گوه در هر دو روش می باشد. در مناطقی که  $C > 2D$  باشد، مقادیر حاصل از روش های برویر، جانسکز و آنگونستا به هم نزدیک است که به علت تشکیل قوس فشار در بالای تونل می باشد و در این مناطق فشار برآورد شده با روش های تحلیلی و عددی منفی می باشد، بنابراین در این مناطق به دلیل پایداری مناسب جبهه کار، تونل پایدار است. در نهایت می توان گفت نتایج حاصل از روش لکا- دورمیکس به نتایج حاصل از مدل سازی عددی نزدیک تر است.

### ۵-۵- آنالیز حساسیت

به منظور بررسی میزان تاثیر پارامترهای مختلف بر روی فشار نگهداری جبهه کار تونل اقدام به انجام آنالیز حساسیت شد. از این رو مقطع شماره ۳ که دارای تونلی به قطر ۴/۳۵۲ متر، ضخامت روباره ۷/۲ متر مدول الاستیک ۴۲۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و نسبت پواسون ۰/۲ می باشد در نظر گرفته شده است و مابقی پارامترهای ژئومکانیکی در جدول (۵-۲) آورده شده است.

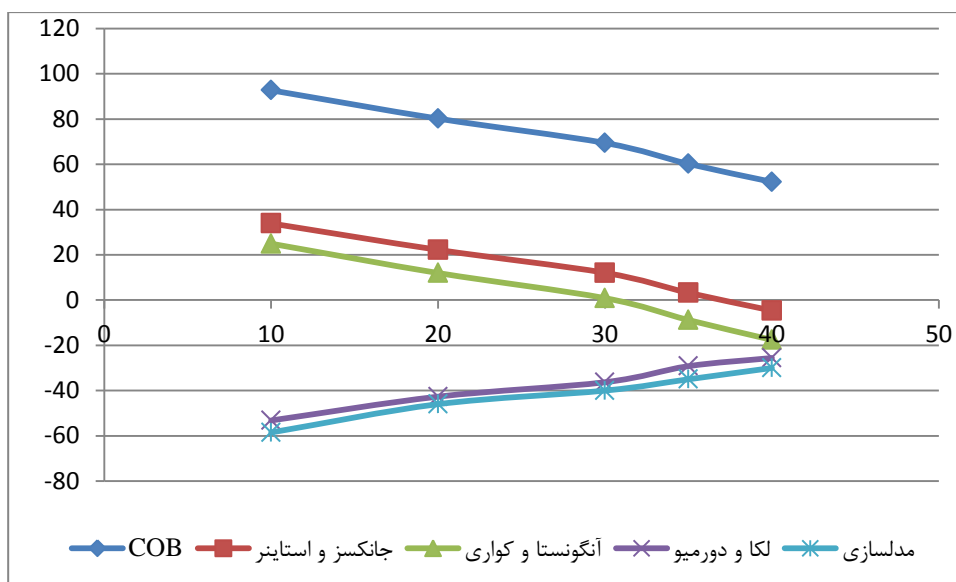
آنالیز حساسیت با استفاده از روش تجربی COB و روش های تحلیلی جانسکز- استاینر، لکا- دورمیو، آنگونستا- کواری و مدلسازی عددی انجام می شود. پارامترهای مورد بحث در این آنالیز عبارتند از: زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، بار سطحی، سطح آب زیرزمینی، وزن مخصوص خاک، نسبت روباره به قطر (C/D)

به منظور بررسی تاثیر هر یک از این پارامترها بر روی فشار جبهه کار، کلیه پارامترهای ورودی دیگر ثابت در نظر گرفته می شود.

### ۵-۵-۱- زاویه اصطکاک داخلی

شکل (۵-۱۰) نمودارهای مربوط به تغییرات فشار نگهداری جبهه کار را بر حسب زاویه اصطکاک داخلی نشان می دهد.



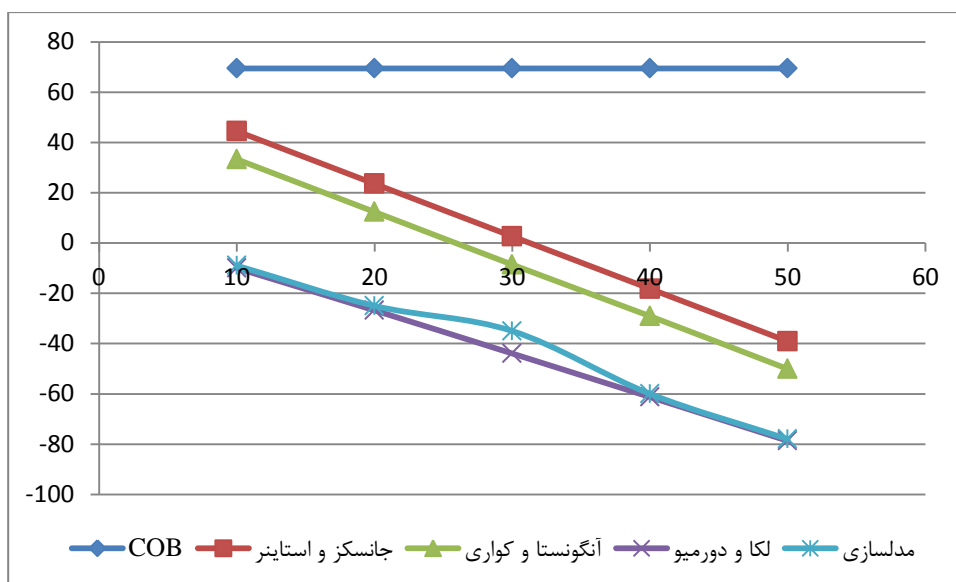


شکل (۵-۱۰): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب زاویه اصطکاک داخلی

این نمودارها سیر نزولی مقدار فشار نگهداری جبهه کار حاصل از روش های COB، جانکسز- استاینر و آنگونستا- کواری با شیب  $20\%$  و سیر صعودی روش لکا- دورمیو و مدلسازی عددی را با شیب  $14\%$  را با افزایش زاویه اصطکاک داخلی نشان می دهند. همان طور که از نمودارها مشخص است، روش لکا- دورمیو تطابق خوبی با مدلسازی عددی دارد و همچنین مقادیر برآورد شده از مدلسازی عددی نسبت به سایر روش ها کمتر می باشد. با افزایش زاویه اصطکاک، مقادیر برآورد شده توسط روش های COB جانکسز- استاینر، آنگونستا- کواری و مدلسازی به هم نزدیک می شود. علامت منفی برای مقدار فشار نشان دهنده این است که فشاری که از طرف زمین به جبهه کار تونل وارد می شود به سمت داخل آن است و علامت مثبت عکس این قضیه را نشان می دهد.

#### ۵-۲-۵- چسبندگی

شکل (۵-۱۱) نمودارهای مربوط به تغییرات فشار نگهداری جبهه کار را بر حسب چسبندگی نشان می دهد.



شکل (۵-۱۱): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب چسبندگی

این نمودارها سیر نزولی فشار جبهه کار با شیب متوسط  $20\%$  را با افزایش چسبندگی را نشان می دهند که به دلیل افزایش مقاومت فشاری تک محوره می باشد، اما چون پارامتر چسبندگی در روش COB وجود ندارد، با افزایش چسبندگی، تغییری در مقدار فشار جبهه کار رخ نمی دهد. همان طور که از شکل مشخص می باشد، شیب تمامی نمودارها تقریباً به یک اندازه است که نشان دهنده تاثیر یکنواخت چسبندگی در کلیه روش های تحلیلی و عددی به کار گرفته شده دارد. روش عددی برآورد کمتری از فشار جبهه کار نسبت به سایر روش ها دارد و با مقادیر حاصل از روش لکا و دورمیو همخوانی خوبی دارد. در کلیه روش ها به جز روش COB، با تغییر چسبندگی، دامنه تغییرات فشار جبهه کار زیاد می باشد که نشان دهنده اهمیت این پارامتر در برآورد فشار جبهه کار می باشد.

### ۵-۵-۳- بار سطحی

نمودارهای مربوط به تاثیر بار سطحی در فشار نگهداری جبهه کار در شکل (۵-۱۲) زیر آورده شده است.

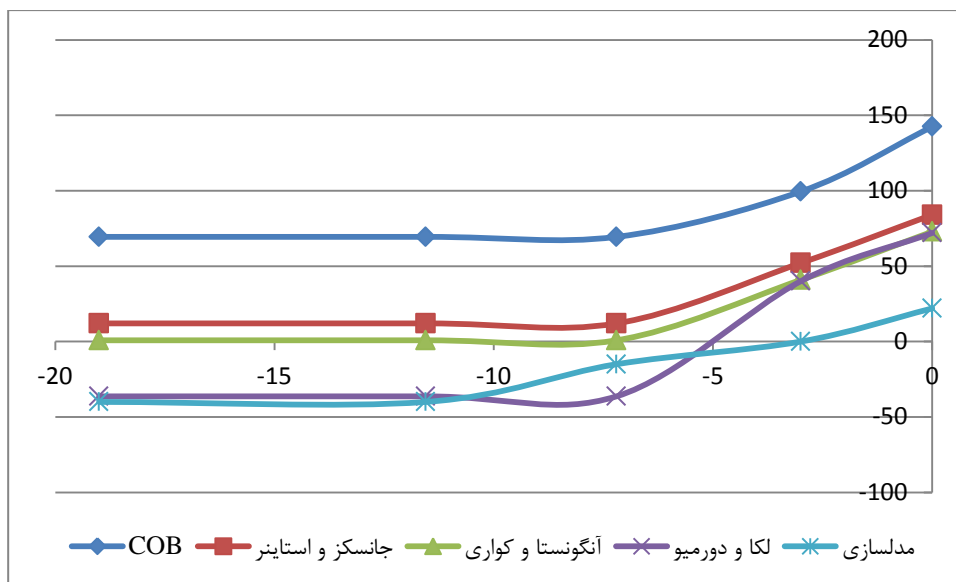


شکل (۵-۱۲): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب بار سطحی

در روش های جانسکز- استاینر و آنگونستا- کواری تاثیر بار سطحی زیاد می باشد که شیب نمودار ۳۴٪ می باشد. اما در این روش ها در صورتی که نسبت روباره به قطر بزرگتر از ۲ باشد، به دلیل تشکیل قوس فشار در بالای تونل، تاثیرات بار سطحی در فشار جبهه کار بسیار کم می شود. در روش لکا و دورمیو به دلیل اینکه نسبت روباره به قطر بیش تر از ۰/۶ می باشد بار سطحی تاثیری در مقدار فشار سینه کار ندارد. با افزایش بار سطحی در مدلسازی عددی، فشار نگهداری جبهه کار تونل را با افزایش می یابد، هر چند شیب نمودار تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب بار سطحی در این روش بسیار ناچیز می باشد.

#### ۵-۴-۵- سطح آب زیرزمینی

شکل (۵-۱۳) نمودارهای مربوط به تغییرات فشار نگهداری جبهه کار را بر حسب سطح ایستابی را نشان می دهد. در این شکل مبنا را سطح زمین در نظر می گیریم.

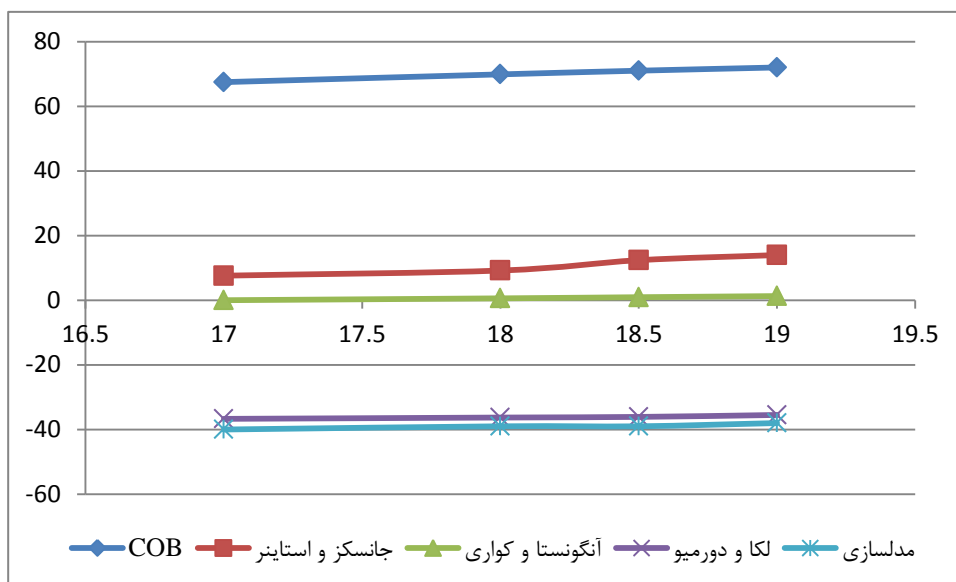


شکل (۵-۱۳): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب سطح آب زیرزمینی

همان طور که از شکل (۵-۱۳) مشخص است، تا قبل از رسیدن سطح آب زیرزمینی به تاج تونل به دلیل یکسان بودن شرایط خاک، تغییری در فشار نگهداری جبهه کار رخ نمی دهد و شیب نمودار صفر می باشد. با بالا رفتن سطح ایستابی از تاج تونل، فشار لازم برای نگهداری جبهه کار در تمامی روش ها با شیب زیادی افزایش پیدا می کند که نشان دهنده اهمیت وجود آب زیرزمینی در مسیر تونل می باشد. شیب نمودار در روش های COB، جانسکز- استاینر، آنگونستا- کواری و لکا و دورمیو به طور متوسط ۱۰۰٪ می باشد و شیب نمودار مدلسازی عددی ۸۰٪ می باشد. روش های عددی در صورت وجود آب، فشار کمتری از روش های تجربی و تحلیلی به کار گرفته شده ارایه می دهد. هر چه سطح ایستابی از تاج تونل بالاتر می رود، نتایج حاصل از روش های لکا- دورمیو، جانسکز- استاینر، آنگونستا و کواری به هم نزدیک تر می شود. به طور کلی در صورت وجود آب زیر زمینی، علاوه بر فشار وارده از طرف آب به جبهه کار تونل، چسبندگی خاک نیز هم کاهش پیدا می کند که باعث افزایش فشار لازم برای نگهداری جبهه کار تونل می شود.

## ۵-۵-۵- وزن مخصوص خاک

به منظور بررسی تاثیر وزن مخصوص خاک در فشار نگهداری جبهه کار، از وزن مخصوص خاک موجود در مسیر تونل استفاده شده است که در شکل (۵-۱۴) دیده می شود.

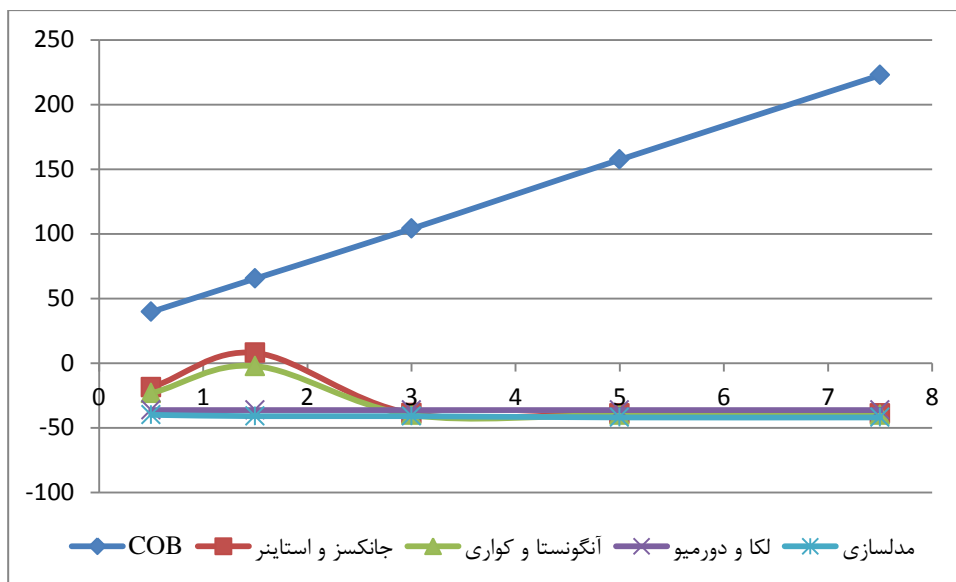


شکل (۵-۱۴): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب وزن مخصوص خاک

تغییرات وزن مخصوص در بازه نشان داده شده، تاثیر کمی بر روی مقادیر لازم برای نگهداری جبهه کار تونل در تمامی روش ها دارد. شیب نمودار در روش عددی و آنگونستا و کواری تقریباً ۱۰۰٪ و در روش لکا و دورمیو بار سطحی تاثیری در مقدار فشار نگهداری جبهه کار ندارد. شیب نمودار در روش COB و جانسکز و استاینر به طور متوسط ۲۰٪ می باشد. در مدلسازی عددی برآورد کمتری از فشار جبهه کار نسبت به سایر روش ها دارد و با نتایج حاصل از روش لکا و دورمیو تطابق دارد.

## ۵-۵-۶- نسبت روباره به قطر (C/D)

شکل (۵-۱۵) نمودارهای مربوط به تغییرات فشار نگهداری جبهه کار را بر حسب نسبت روباره به قطر (C/D) نشان می دهد.



شکل (۵-۱۵): تغییرات فشار نگهداری جبهه کار بر حسب نسبت روباره به قطر (C/D)

مطابق شکل در روش COB با افزایش عمق، فشار نگهداری جبهه کار افزایش پیدا می کند اما در روش های لکا و دورمیو و مدلسازی عددی، افزایش عمق تاثیری ناچیزی روی فشار نگهداری جبهه کار دارد و نتایج حاصل از این روش ها به هم نزدیک می باشد. در روش جانکسز-استاینر و آنگونستا-کواری تغییرات فشار نگهداری جبهه کار تا  $(C=3D)$  می باشد که ناشی از تشکیل قوس فشار در بالای تونل می باشد و در روباره های بیشتر نتایج حاصل از این روش ها به روش عددی نزدیک می باشد و شیب نمودار حاصل از این دو روش در نسبت روباره به قطر بزرگتر از ۳ صفر می باشد. به طور کلی تغییرات ضخامت روباره تاثیر زیادی روی فشار نگهداری جبهه کار دارد اما در این مقطع به دلیل نبود آب زیر زمینی و چسبندگی بالای خاک، تغییرات روباره تاثیر ناچیزی روی فشار نگهداری جبهه کار تونل دارد.

## ۵-۶- نتیجه گیری

نتایج حاصل از روش های تحلیلی و تجربی برای محاسبه فشار نگهداری جبهه کار تونل دارای پراکندگی زیادی هستند. پراکندگی و عدم انتباق نتایج مذکور با یکدیگر به دلیل اختلاف در فرضیات صورت گرفته در این روش ها می باشد. همچنین نتایج حاصل از این روش ها با مدلسازی عددی تفاوت دارد که این اختلاف ناشی از مدل شکست فرضی می باشد. در روش های تحلیلی از یک مدل شکست فرضی با شکل هندسی مشخص و منظم استفاده می شود در صورتی که در مدلسازی عددی شکست مطابق با یک شکل هندسی منظم اتفاق نمی افتد. نزدیکی مقادیر محاسبه شده از این روش ها به میزان تشابه مدل شکست فرضی در روش تحلیلی با محدوده ای از زمین اطراف تونل در مدلسازی که تحت تاثیر حفاری قرار می گیرد، بستگی دارد.

مدلسازی عددی فشار کمتری برای نگهداری جبهه کار نسبت به روش های تجربی و تحلیلی برآورد می کند. نتایج حاصل از روش لکا و دورمیو به مدلسازی عددی بسیار نزدیک است.

سطح ایستابی و چسبندگی خاک، رابطه مستقیم با فشار نگهداری جبهه کار دارد به گونه ای که تغییرات چسبندگی و سطح آب زیرزمینی نسبت به تاج تونل باعث تغییرات زیادی در فشار نگهداری جبهه کار می شود و تاثیر این عوامل از سایر پارامترهای موثر روی فشار جبهه کار بیش تر می باشد.

پارامترهای نسبت روباره به قطر (C/D)، وزن مخصوص خاک و بار سطحی تاثیر کمی روی فشار نگهداری جبهه کار تونل دارد.

## فصل هشتم

---

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات



## مقدمه

هدف از این تحقیق بررسی پایداری جبهه‌کار تونل از لحاظ استاتیکی می‌باشد. برای پایداری جبهه‌کار تونل و ادامه حفاری، لازم است فشار تعادلی بر جبهه‌کار تونل اعمال نمود. برای تعیین فشار فرونشست جبهه‌کار در تونل ابودر از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی استفاده شده است. به‌منظور تعیین فشار نگهداری جبهه‌کار در مسیر تونل ابودر، چهار مقطع انتخاب شد که این مقاطع دارای خصوصیات از جمله بیش‌ترین و کمترین ارتفاع روباره، تعدد لایه بندی در مقاطع مورد نظر و جبهه‌کار مختلط بوده که این مقاطع در خاک‌هایی انتخاب شدند که بیش‌ترین مسیر تونل از آن عبور می‌کند.

## نتیجه‌گیری:

۱- مناطقی که نسبت روباره به قطر کمتر از ۲ می‌باشد، مقادیر برآورد شده با استفاده از روش‌های تحلیلی بین ۳۷/۶۵- تا ۱۲/۰۶، روش تجربی بین ۵۲/۹۲ تا ۷۰/۳۱ و مدلسازی عددی بین ۴۱- تا ۷۰- می‌باشد. در این مناطق نتایج حاصل از روش برویر و لکا و دورميو به نتایج حاصل از مدلسازی عددی نزدیک می‌باشد و روش جانسکر مقادیر بالاتر و ایمن‌تری از فشار جبهه‌کار نسبت به مدلسازی عددی ارائه می‌دهد. به طور کلی با توجه به پیشنهاد شرکت مشاور در این مناطق، فشار نگهداری جبهه‌کار در تاج تونل را بین ۳۰ تا ۴۰ کیلوپاسکال در نظر می‌گیرند.

۲- مناطقی که نسبت روباره به قطر بیش‌تر از ۲ می‌باشد، مقادیر برآورد شده با استفاده از روش‌های تحلیلی بین ۲۳/۵۲- تا ۱۷/۴۲-، روش تجربی بین ۱۵۷/۷۵ تا ۲۱۲/۸۸ و مدلسازی عددی بین ۱۸- تا ۲۶- می‌باشد. در این مناطق نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و عددی به هم نزدیک می‌باشد و مقادیر حاصل از این نتایج منفی می‌باشد که نشان دهنده پایداری جبهه‌کار تونل در این مناطق می‌باشد.

۳- مقادیر برآورد شده برای فشار نگهداری جبهه‌کار با استفاده از روش COB، از روش‌های تحلیلی و عددی بالاتر می‌باشد چون این روش در محاسبات، تنش قائم موثر که ناشی از وزن طبقات خاک می‌باشد را در نظر می‌گیرد.

۴- نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و تجربی برای محاسبه فشار نگهداری جبهه‌کار تونل دارای پراکندگی زیادی هستند. پراکندگی و عدم انتباق نتایج مذکور با یکدیگر به دلیل اختلاف در فرضیات صورت گرفته در این روش‌ها می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از این روش‌ها با مدلسازی عددی تفاوت دارد که این اختلاف ناشی از مدل شکست فرضی می‌باشد. در روش‌های تحلیلی از یک مدل شکست فرضی با شکل هندسی مشخص و منظم استفاده می‌شود در صورتی که در مدلسازی عددی شکست مطابق با یک شکل هندسی منظم اتفاق نمی‌افتد. نزدیکی مقادیر محاسبه شده از این روش‌ها به میزان تشابه مدل شکست فرضی در روش تحلیلی با محدوده‌ای از زمین اطراف تونل در مدلسازی که تحت تاثیر حفاری قرار می‌گیرد، بستگی دارد.

۵- فشار لازم برای پایداری جبهه‌کار تونل در روش لکا و دورمیو تا حدی به مدلسازی عددی نزدیک است. اختلاف در نتایج موجود به علت اختلاف در پارامترها و مدل رفتاری در نظر گرفته شده در مدلسازی عددی و روش تحلیلی مذکور می‌باشد. در روش لکا و دورمیو فرض بر الاستیک بودن محیط اطراف تونل است، در حالی که در مدلسازی عددی سه بعدی از مدل رفتاری سخت‌شونده استفاده شده و پارامترهای ماشین حفاری نیز در محاسبات وارد می‌شود.

۶- مدلسازی عددی فشار کم‌تری برای نگهداری جبهه‌کار نسبت به روش‌های تجربی و تحلیلی برآورد می‌کند.

۷- روش جانسکز به دلیل در نظر گرفتن ضریب  $1/75$  برای فشار خاک، مقادیر بالاتری و ایمن‌تری را برای فشار نگهداری جبهه‌کار نسبت به مدلسازی عددی برآورد می‌کند.

۸- در بررسی میزان تاثیر زاویه اصطکاک داخلی در فشار جبهه‌کار، نمودارهای حاصل از روش‌های COB جانسکز- استاینر و آنگونستا- کواری با شیب نزولی  $20\%$  و روش لکا- دورمیو و مدلسازی عددی با شیب صعودی  $14\%$  را با افزایش زاویه اصطکاک داخلی نشان می‌دهند. در بررسی تاثیر چسبندگی روی فشار جبهه‌کار، تمامی نمودارها سیر نزولی فشار جبهه‌کار با شیب متوسط  $20\%$  را با افزایش چسبندگی نشان می‌دهند. همچنین در بررسی تاثیر بار سطحی روی فشار جبهه‌کار در روش‌های جانسکز- استاینر و آنگونستا- کواری تاثیر بار سطحی زیاد می‌باشد که شیب نمودار  $34\%$  می‌باشد. نتایج حاصل از مدلسازی عددی و روش لکا و دورمیو، افزایش فشار نگهداری جبهه‌کار تونل را با افزایش بار سطحی نشان می‌دهد، هر چند شیب نمودار تغییرات فشار نگهداری جبهه‌کار بر حسب بار سطحی در این دو روش بسیار ناچیز می‌باشد. در بررسی تاثیر سطح آب‌زیرزمینی روی فشار جبهه‌کار، با بالا رفتن سطح ایستابی از تاج تونل، فشار لازم برای نگهداری جبهه‌کار در تمامی روش‌ها با شیب زیادی افزایش پیدا می‌کند. شیب نمودار در روش‌های COB، جانسکز- استاینر، آنگونستا- کواری و لکا و دورمیو به طور متوسط  $100\%$  می‌باشد و شیب نمودار مدلسازی عددی  $80\%$  می‌باشد که نشان‌دهنده تاثیر زیاد آب‌زیرزمینی در فشار نگهداری جبهه‌کار تونل است. در بررسی تاثیر وزن مخصوص خاک روی فشار جبهه‌کار، تغییرات وزن مخصوص در بازه  $17$  تا  $19$  کیلونیوتون بر مترمکعب، تاثیر کمی بر روی مقادیر لازم برای نگهداری جبهه‌کار تونل در تمامی روش‌ها دارد. شیب نمودار در روش عددی و آنگونستا و کواری تقریباً  $100\%$  و در روش لکا و دورمیو به دلیل اینکه نسبت روباره به قطر بیش‌تر از  $0/25$  می‌باشد، بار سطحی تاثیری در مقدار فشار نگهداری جبهه‌کار ندارد. شیب نمودار در روش COB و جانسکز و استاینر به طور متوسط  $20\%$  می‌باشد و در نهایت در بررسی تاثیر نسبت روباره به قطر در فشار جبهه‌کار، در روش COB با افزایش عمق، فشار

نگهداری جبهه‌کار افزایش پیدا می‌کند اما در روش‌های لکا و دورمبو و مدلسازی عددی، افزایش عمق تأثیری ناچیزی روی فشار نگهداری جبهه‌کار دارد. در روش جانکسز-استاینر و آنگونستا-کواری تغییرات فشار نگهداری جبهه‌کار تا  $(C=3D)$  می‌باشد که ناشی از تشکیل قوس فشار در بالای تونل می‌باشد و در روبره‌های بیش‌تر نتایج حاصل از این روش‌ها به روش عددی نزدیک می‌باشد و شیب نمودار حاصل از این دو روش در نسبت روبره به قطر بزرگتر از ۳ صفر می‌باشد.

۹- سطح ایستابی و چسبندگی خاک، به ترتیب رابطه مستقیم و معکوس با فشار نگهداری جبهه‌کار دارد به گونه‌ای که تغییرات چسبندگی و سطح آب زیرزمینی نسبت به تاج تونل، باعث تغییرات زیادی در فشار نگهداری جبهه‌کار می‌شود و تأثیر این عوامل از سایر پارامترهای موثر روی فشار جبهه‌کار بیش‌تر می‌باشد.

۱۰- پارامترهای نسبت روبره به قطر  $(C/D)$  و وزن مخصوص خاک تأثیر کمتری نسبت به سطح ایستابی و چسبندگی خاک روی فشار نگهداری جبهه‌کار تونل در روش‌های تحلیلی و عددی دارد.

### پیشنهادات:

- ۱- بررسی اثر احداث تونل ابودر بر سازه‌های موجود همانند فاضلاب و سازه‌هایی که در آینده ساخته می‌شود (مثل تونل خط هفت متروی تهران)، پیشنهاد می‌شود.
- ۲- برای مدلسازی قسمت‌هایی از مسیر که با سازه‌های دیگر برخورد دارند، استفاده از نرم افزارهای GTS-MIDAS و FLAC<sup>3D</sup> پیشنهاد می‌شود.
- ۳- استفاده از مدل‌های رفتاری دیگر در نرم افزار PLAXIS 3D TUNNEL همانند مدل الاستیک، مدل نرم شونده و مدل موهر کولومب و مقایسه نتایج این مدل‌ها با مدل سخت‌شونده و روش‌های تجربی و تحلیلی پیشنهاد می‌شود.

- ۴- به منظور مدلسازی می‌توان از نرم‌افزارهای دیگری همانند ANSYS، FLAC<sup>3D</sup> و ABAQUS استفاده کرد و نتایج آن‌را با نتایج حاصل از نرم‌افزار PLAXIS 3D TUNNEL مقایسه کرد.
- ۵- در تحقیقات بعدی می‌توان تاثیر ابعاد مش‌بندی و زاویه اتساع خاک را در فشار جبهه‌کار بدست آورد.
- ۶- ایجاد یک بانک اطلاعاتی مناسب برای دانش‌پژوهان به منظور دسترسی بهتر و راحت‌تر به اطلاعات موجود در مورد ساخت متروهای مختلف در دنیا و ایران پیشنهاد می‌شود.
- ۷- بررسی استفاده از مود باز از کیلومتر ۱۲۰۰ تونل مورد بررسی قرار گیرد.

پوست

منابع

- ۱-Borghi .X.F, (۲۰۰۶), PhD. thesis “Soil conditioning for pipe-jacking and tunneling” University of Cambridge.pp۲۲-۲۳. ۲۴۶-۲۶۵
- ۲-Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, Ashraf Mahtab, Shulin Xu (۲۰۰۷)“Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control” publishing Taylor & Francis e-Library ۸۹-۱۰۱. ۳۶۴-۳۷۲. ۳۹۰-۴۰۲
- ۳-ITA, (۲۰۰۰), “Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines (TBMs)” International Tunnelling Association pp. ۲۰ - ۱۲۰
- ۴-Takano,Y.(۱۹۹۶), “State of the Art on Shield Tunnelling in Japan- Automation of Shield Tunnelling” Chiyoda Engineering Consultants Co., LTD., Tokyo, Japan. Pp ۱-۶
- ۵-Duarte,M (۲۰۰۷) PhD. thesis.“Foam as a soil conditioner in tunnelling: physical and mechanical properties of conditioned sands”, University of Oxford.
- ۶-Dipl, Ing.(۲۰۰۶) “Mechanized Tunnelling Full face tunnel boring machines” International Tunnelling Association, seiul. pp۶۰
- ۷-herrenknecht,martin and rehm,Ulrich.“Earth pressure Balaced Shild Technology”pp۲-۶
- ۸-Han Kim,Seung.(۲۰۱۰), PhD. thesis “Large Tunnels for Transportation Purposes and Face Stability of Mechanically Driven Tunnels in Soft Ground” The University of Texas at Austin.pp ۱۳۰-۱۵۹
- ۹-Toan.D.N, (۲۰۰۶), Master thesis “TBM and Lining Essential Interfaces” Politecnico di Torino.pp ۲۲-۲۷. ۵۲-۶۰
- ۱۰- Júlio B. Martins,(۲۰۰۱) “A Short Survey on Construction Problems and Numerical Modelling of Shallow Tunnels”Depart. Eng. Civil, University of do Minho.pp۸-۱۳
- ۱۱-Rick p,lovat“TBM Design Considerations: Selection of Earth Pressure Balance Or slurry pressure Balance Tunnel Boring Machines”President & CEO, LOVAT Inc,pp ۱-۶
- ۱۲-Kirsch.A. (۲۰۱۰), “Experimental and numerical investigation of the face stability of shallow tunnels in sand”.logos Verlag Berlin GmbH.pp ۴۳-۶۲
- ۱۳- بداغ آبادی،سعید-آخوندی،مجید،(۱۳۸۹)، " تعیین فشار سینه کار در حفاری تونل ها با EPB با استفاده از روشهای تحلیلی " چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، ص ۲-۵، تهران
- ۱۴- مختاریان اصل،مجتبی-جعفری،احمد،(۱۳۸۸)، " مقایسه روشهای تعیین فشار نگهداری سینه کار تونل با نگاهی ویژه به تونل های مترو خط ۲ تبریز " ششمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ص ۸، تهران
- ۱۵-Mohkam,m.(۱۹۸۹) “Combining Proper Confinement Pressure And Adequate Slurry for Passing Beneth Existing Structures Securely With Slurry shild”france.pp ۳۱۲-۳۱۸



- ۱۶-Drury greenwood.Jedediah,(۲۰۰۳), Master thesis, “Tree Dimensional Analysis of Surface Settlement in soft Ground Tunneling” University of Minnesota.pp ۵۱-۵۴
- ۱۷- ITA, (۲۰۰۰), “Guidelines for the design of shield tunnel lining” International Tunnelling Association Volume ۱۵, Number ۳.
- ۱۸- Terzaghi. K. (۱۹۳۴). “Theoretical Soil Mechanics”. John Wiley & Sons.pp ۷۰-۷۶. ۱۹۴-۲۰۰
- ۱۹- Tien.J.H (۱۹۹۶), Master thesis “A Literature Study of The Arching Effect”. civil engineering national taiwan university.pp ۳۹-۴۵,۱۲۰-۱۳۴
- ۲۰- Grant,Richard J and Neil Taylor,R. “ Stability of Tunnels in Clay with Overlying Layers Coarse Grained Soil”.pp ۱-۲
- ۲۱-Kolymbas, Dimitrios.(۲۰۰۵). “Tunnelling and Tunnel Mechanics” university Innsbruck, Austria, pp ۳۱۶-۳۱۸
- ۲۲- Jancsecz, S and Steiner, W. (۱۹۹۴) “Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions”.Tunnelling ۹۴, conf. proc., Inst. of Mining and Metallurgy and British Tunnelling Society, Chapman and Hall, London, UK. Pp ۵-۱۰
- ۲۳- Mohammadi,Javad and Shahriar,korosh and Moarefvand, Parviz,(۲۰۱۱), “Tunnel Face Stability Analysis in Soft Ground in Urban Tunneling by EPB Shield.(Case Study: ۷th Line in Tehran Metro)” Australian Journal of Basic and Applied Sciences. pp ۵۹۲-۵۹۴
- ۲۴-Broere,W (۲۰۰۱), PhD. Thesis.“Tunnel Face Stability & New CPT Applications” Delft University of Technology, The Netherlands. Pp ۲۸-۳۵
- ۲۵-Russo, G (۲۰۰۳) “evaluating the required face-support pressure in EPBS advance mode” pp ۵-۷
- ۲۶-Anagnostou.G and Kovari.K (۱۹۹۷) “Face stabilisation in closed shield tunnelling”. Rapid Excavation and Tunnel Construction, Las Vegas. pp ۵۵۵-۵۵۸
- ۲۷- شرکت مهندسی خاکریز آب،(۱۳۹۰)، گزارشات زمین شناسی و ژئوتکنیکی تونل ابوذر
- ۲۸-Australian Standard (۲۰۰۲), “Earth Retaining Structures” Standards Australian
- ۲۹- بداغ آبادی، سعید-زارع، شکرالله-آخوندی، مجید(۱۳۹۰). " تعیین فشار سینه کار در حفاری تونل ها با EPB با استفاده از روش عددی مزالعه موردی متروی خط تهران " نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل

## **Abstract**

One of the important parameters in tunnel excavation in urban areas using Earth Pressure Balance machine (EPB) is tunnel face pressure since applying the pressure lower or higher than balance limit causes collapse or blow out in tunnel face or ground surface respectively, so that it results stoppage in excavation, settlement or blow out in ground surface, damage to buildings near tunnel and increase in costs. Required pressure for tunnel face support is controlled using screw conveyor rotation speed as a function of machine penetration rate. Adequate pressure for face support is estimated using empirical-analytical(limit equilibrium and limit analysis) and numerical methods, by considering tunnel geometrical parameters, traffic and construction loads, underground water level, soil physical and mechanical parameters and overburden height. In this research, face stability in Abuzar surface water collecting tunnel has been studied by using empirical-analytical and numerical (finite element) methods and then values of these methods have been compared. Finally, sensitivity analysis to study the influence of different parameters on face pressure, has been done on these parameters and so underground water and cohesion showed the most influence in face support pressure.

Keywords:

Earth Pressure Balance machine, tunnel face support pressure, face collapse, blow out, settlement, screw conveyor, empirical-analytical and numerical methods, limit equilibrium method, limit analysis method, finite element method, Abuzar surface water collecting tunnel, sensitivity analysis, underground water and cohesion



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

Sensitivity analysis of effective parameters and comparison between face pressure determination methods with analytical and numerical methods- case study: Abuzar surface water accumulation tunnel

**Hossien Jahani**

Supervisors:  
**Dr. Shokrollah Zare**

Advisors:  
**Hamed jamshidi**

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

**September ۲۰۱۲**