

جمهوری اسلامی ایران  
سازمان برنامه و بودجه کشور

# ضوابط طراحی خطوط قطار شهری و حومه (جلد دوم - ضوابط طراحی سازه مسیر)

ضابطه شماره ۲-۸۰۵

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران

[nezamfanni.ir](http://nezamfanni.ir)

۱۴۰۱





شماره:	۱۴۰۱/۴۷۷۱۹۸
تاریخ:	۱۴۰۱/۰۹/۰۷

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران

موضوع: ضوابط طراحی خطوط قطار شهری و حومه

در چهارچوب ماده (۳۴) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور، ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و به استناد تبصره (۲) ماده (۴) «نظام فنی و اجرایی یکپارچه کشور» موضوع مصوبه شماره ۲۵۲۵۴/ت/۵۷۶۹۷-هـ مورخ ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ هیات محترم وزیران، به پیوست دستورالعمل شماره ۸۰۵، با عنوان «**ضوابط طراحی خطوط قطار شهری و حومه**» در قالب سه جلد زیر ابلاغ می‌شود:

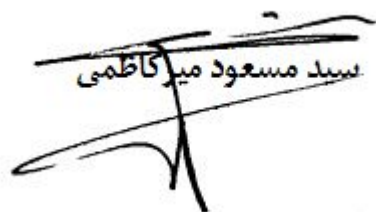
جلد اول : ضوابط طرح هندسی

جلد دوم : ضوابط سازه مسیر

جلد سوم: ضوابط طراحی سیستم تهویه

رعایت مفاد این ضابطه از تاریخ ۱۴۰۲/۰۱/۰۱ برای همه قراردادهایی که از محل وجوه عمومی و یا به صورت مشارکت عمومی و خصوصی منعقد می‌شوند، الزامی است.

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران این سازمان دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد مفاد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را اعلام خواهد کرد.

  
 سید مسعود میرزا کاظمی





## اصلاح مدارک فنی

### خواننده گرامی:

امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این ضابطه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایراد و اشکال نیست.

از این رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر

گزارش فرمایید:

- ۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
  - ۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
  - ۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
  - ۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.
- کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی و اجرایی

Email: nezamfanni@mporg.ir

web: nezamfanni.ir





## بسمه تعالی

### پیشگفتار

پس از ابلاغ ضوابط لازم‌الاجرای ۸۰۴ به منظور ایجاد اولویت‌های بالادستی در طراحی و ساخت ایستگاه‌های قطار شهری، مجموعه حاضر جهت تعیین ضوابط طراحی و ساخت مسیر قطار شهری تدوین شده است. مجموعه حاضر در هماهنگی با ضوابط ۸۰۴ تدوین شده است و انتظار می‌رود یکپارچگی و انسجام در نظر گرفته شده در فصول مختلف منجر به راهنمایی طراحان و تصمیم‌گیران در پیشبرد صحیح طرح ایستگاه‌ها و مسیر قطار شهری گردد. رعایت ضوابط حاضر در هماهنگی با مجموعه ۸۰۴ الزامی است.

ضوابط حاضر در ۳ بخش تدوین شده است:

**جلد اول: طرح هندسی در خطوط قطار شهری و حومه**

**جلد دوم: طراحی سازه مسیر در خطوط قطار شهری و حومه**

**جلد سوم: طراحی سیستم تهویه در خطوط قطار شهری و حومه**

علیرغم تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف گردید، این مجموعه مصون از وجود اشکال و ابهام در مطالب آن نیست. لذا در راستای تکمیل و پررنگ شدن این ضابطه از کارشناسان محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی را به امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور ارسال کنند. کارشناسان سازمان پیشنهادهای دریافت شده را بررسی کرده و در صورت نیاز به اصلاح در متن ضابطه، با همفکری نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق پایگاه اطلاع‌رسانی نظام فنی و اجرایی کشور برای بهره‌برداری عموم، اعلام خواهند کرد. به همین منظور و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط ابلاغی معتبر، در بالای صفحات، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده است که در صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن نیز اصلاح خواهد شد. از این‌رو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدیدتر معتبر خواهد بود.

در پایان از شرکت قطارشهری مشهد که در تهیه این ضابطه همکاری صمیمانه‌ای داشته‌اند قدردانی می‌نماید.

حمید امانی همدانی

معاون فنی، امور زیربنایی و تولیدی

پاییز ۱۴۰۱





## تهیه و کنترل «ضوابط طراحی خطوط قطار شهری و حومه (جلد دوم- ضوابط طراحی سازه مسیر)»

[ضابطه شماره ۲-۸۰۵]

### اعضای گروه تهیه کننده:

دکترای مهندسی عمران	شرکت مهندسين مشاور پژوهش	امين عمادی
فوق لیسانس مهندسی معدن	شرکت مهندسين مشاور پژوهش	صادق آمون
دکترای مهندسی معدن	شرکت مهندسين مشاور پژوهش	کميل بور
فوق لیسانس مهندسی عمران	شرکت مهندسين مشاور پژوهش	احمد رحمانی
فوق لیسانس مهندسی عمران	شرکت مهندسين مشاور پژوهش	شقایق رشیدی نیا
فوق لیسانس مهندسی عمران	شرکت مهندسين مشاور پژوهش	سید نوید قائمی

### اعضای گروه هدایت و راهبری (سازمان برنامه و بودجه کشور):

معاون امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران	علیرضا توتونچی
معاون امور راه و ترابری و مدیریت عمران شهری و روستایی	وحید سعیدیان
رییس گروه امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران	فرزانه آقارمضانعلی
کارشناس امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران	زینب سقائی نوش آبادی





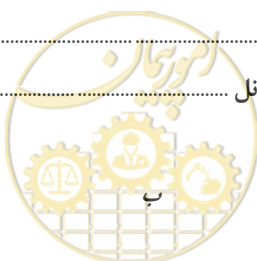
## فهرست مطالب

فصل ۱: کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۳
فصل ۲: تونل سازی مکانیزه با دستگاه حفار TBM.....	۵
۱-۲- مقدمه .....	۷
۲-۲- انتخاب نوع دستگاه حفار.....	۷
۳-۲- تعیین الزامات دستگاه حفار TBM.....	۱۲
۴-۲- طرح هندسی سگمنت .....	۱۴
۵-۲- نوار آببند .....	۲۰
۶-۲- طرح تزریق دوغاب پشت سگمنت.....	۲۴
۷-۲- مخاطرات زمین شناسی و ژئوتکنیکی.....	۳۰
۱-۷-۲- چالش های حفاری مکانیزه.....	۴۹
۸-۲- ثبت و پایش داده های ماشین حفار.....	۶۷
۹-۲- برآورد فشار جبهه کار.....	۷۲
۱۰-۲- طراحی سازه سگمنت.....	۷۵
۱-۱۰-۲- تعاریف و مفاهیم.....	۷۵
۲-۱۰-۲- مبانی تحلیل و طراحی سازه ای سگمنت.....	۷۶
۳-۱۰-۲- مدلسازی و آنالیز.....	۸۱
۴-۱۰-۲- ملاحظات طراحی.....	۹۰
فصل ۳: طراحی تونل سنتی.....	۹۳
۱-۳- مقدمه .....	۹۵
۲-۳- شکل مقطع و ابعاد تونل .....	۹۸
۳-۳- الگوی حفاری تونل.....	۱۰۴
۴-۳- گام پیشروی (طول دهانه بدون نگهداری).....	۱۱۶
۵-۳- کفبند قوسی.....	۱۲۱
۶-۳- پایدارسازی پیرامون مقطع تونل .....	۱۲۲
۷-۳- پایدارسازی جبهه کار حفاری.....	۱۲۳
۸-۳- فواصل بین مراحل حفاری .....	۱۲۵
۹-۳- پرتال .....	۱۲۶
۱۰-۳- مراحل مدلسازی عددی و تحلیل و طراحی سازه نگهدارنده در تونلسازی NATM.....	۱۳۰



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: انواع TBM های محیط سنگی و خاکی ..... ۹
- شکل ۲-۲: انتخاب ماشینهای EPB و Slurry بر اساس منحنی دانه‌بندی ..... ۱۲
- شکل ۳-۲: انواع طرح هندسی سگمنت ..... ۱۵
- شکل ۴-۲: نمایی شماتیک از هندسه محاسبه شیب‌داری طرفین سگمنت ..... ۱۸
- شکل ۵-۲: نمایی شماتیک از هندسه محاسبه شیب‌داری طرفین سگمنت ..... ۱۹
- شکل ۶-۲: فاصله بازشدگی بین درزه‌ها و جابجایی جانبی قطعات (گپ و آفست) ..... ۲۱
- شکل ۷-۲: تزریق دوغاب پشت سگمنت همزمان با پیشروی ..... ۲۶
- شکل ۸-۲: تزریق ثانویه جهت جبران کاستی‌های طرح تزریق دوغاب پشت سگمنت ..... ۲۹
- شکل ۹-۲: ارتباط مخاطرات زمین‌شناسی و شرایط غیر نرمال حفاری مکانیزه ..... ۳۱
- شکل ۱۰-۲: دیاگرام برآورد پتانسیل خطر گل گرفتگی ..... ۳۲
- شکل ۱۱-۲: تغییرات درصد ریزدانه‌ها براساس شماره رینگ‌های حفاری شده در دوره‌های مختلف ..... ۳۳
- شکل ۱۲-۲: نمایی از عملیات تمیزکاری و چک کردن لاینهای فوم ..... ۳۳
- شکل ۱۳-۲: فاکتورهای مؤثر بر سایش ابزارهای برش و ماشین EPB-TBM ..... ۳۵
- شکل ۱۴-۲: دیاگرام برآورد پتانسیل ساینده‌گی خاک‌ها در مسیر تونل ..... ۳۶
- شکل ۱۵-۲: دیاگرام برآورد پتانسیل ساینده‌گی قطعات سنگی بر اساس آزمایش سرشار - بر اساس داده‌های واقعی ..... ۳۶
- شکل ۱۶-۲: تصویر شماتیک از موقعیت ابزار برش تعویض شده در یک دوره ..... ۳۷
- شکل ۱۷-۲: عملیات تعویض ابزارهای برشی در داخل چمبر ..... ۳۸
- شکل ۱۸-۲: ابزارهای برش تعویض شده در یک دوره ..... ۳۸
- شکل ۱۹-۲: اصطلاحات مربوط به کمیت بولدرها ..... ۴۱
- شکل ۲۰-۲: نمایی از کوبل‌های حفاری شده توسط ماشین EPB-TBM در محل دمپ مصالح حفاری ..... ۴۲
- شکل ۲۱-۲: نمایی از بولدرهای حفاری شده توسط ماشین EPB-TBM ..... ۴۳
- شکل ۲۲-۲: تصویری شماتیک از آبشستگی اطراف تونل به سبب تقاطع با قنات ..... ۴۶
- شکل ۲۳-۲: نمایی از جبهه‌کار مختلط در مسیر حفر تونل ..... ۴۷
- شکل ۲۴-۲: نمایی از جبهه‌کار مختلط در حین حفاری ..... ۴۸
- شکل ۲۵-۲: فاکتورهای مورد سنجش در ارزیابی عملکرد ماشین ..... ۴۸
- شکل ۲۶-۲: خلاصه نمودارهای گرافیکی معمول در ارزیابی عملکرد TBM ..... ۴۹
- شکل ۲۷-۲: روشهای برآورد مقدار فشار جبهه‌کار ..... ۷۴
- شکل ۲۸-۲: خروج سگمنت از قالب با استفاده از (الف) مکش (ب) جک مکانیکی ..... ۷۸
- شکل ۲۹-۲: دیپوی موقت سگمنت‌ها در کارخانه تولید سگمنت ..... ۷۸
- شکل ۳۰-۲: دیپوی دائم سگمنت‌ها ..... ۷۹
- شکل ۳۱-۲: مراحل مختلف حمل سگمنت به داخل تونل ..... ۷۹



- شکل ۳۲-۲: نمایی از جک‌های پیشران دستگاه حفار در حال اعمال فشار بر ضخامت سگمنت‌های نصب شده ..... ۸۰
- شکل ۳۳-۲: نحوه اعمال بار جک‌های پیشران بر سگمنت ..... ۸۰
- شکل ۳۴-۲: نمایی شماتیک از تئوری قوس فشار ترزاقی ..... ۸۴
- شکل ۳۵-۲: افت حجم و اجزای آن در فرایند حفاری مکانیزه ..... ۸۵
- شکل ۳۶-۲: نسبت افت زمین Volume Loss ..... ۸۶
- شکل ۳۷-۲: تئوری Gap ..... ۸۷
- شکل ۳۸-۲: طبقه محاسبه میزان افت حجم در تئوری Gap ..... ۸۸
- شکل ۳۹-۲: اثر سه بعدی نشست ناشی از حفاری تونل - پروفیل نشست طولی و عرضی ..... ۸۸
- شکل ۴۰-۲: نمودار پروفیل تغییر شکل طولی (LDP) تونل ..... ۸۹
- شکل ۴۱-۲: نمایش شماتیک مدلسازی سگمنت‌ها در برابر بار کفشک‌ها ..... ۹۱
- شکل ۱-۳: اشکال مختلف تونل متناسب با شرایط زمین ..... ۹۹
- شکل ۲-۳: نمونه‌هایی از تونل‌های ریلی تک خطه با مقطع نعل اسبی ..... ۱۰۰
- شکل ۳-۳: نمونه‌هایی از تونل‌های ریلی دو خطه با مقطع دهانی و نعل اسبی ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۳: نسبت بین شعاع‌های مختلف در مقاطع نعل اسبی ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۳: نمونه‌ای از نسبت بین شعاع‌های مختلف در مقاطع نعل اسبی ..... ۱۰۲
- شکل ۶-۳: مقطع دهانی به همراه ابعاد و ارتباط بین شعاع‌های مختلف آن ..... ۱۰۲
- شکل ۷-۳: نمونه‌ای از نسبت بین شعاع‌های مختلف در مقطع دهانی ..... ۱۰۳
- شکل ۸-۳: نمونه‌ای از اجرای تونل به روش پلکانی ..... ۱۰۵
- شکل ۹-۳: اجرای رمپ در روش حفاری پلکانی ..... ۱۰۵
- شکل ۱۰-۳: نمایی از اجرای روش دیوار میانی (CD) ..... ۱۰۶
- شکل ۱۱-۳: نمایی از اجرای روش دیوار میانی با کف بند موقت (CRD) ..... ۱۰۶
- شکل ۱۲-۳: نمونه‌ای از اجرای تونل به روش گالری‌های جانبی (SD) ..... ۱۰۷
- شکل ۱۳-۳: نمونه‌ای از اجرای تونل به روش برش هسته مرکزی (RC) ..... ۱۰۸
- شکل ۱۴-۳: نمونه‌ای از اجرای تونل به روش برش هسته مرکزی (RC) ..... ۱۰۸
- شکل ۱۵-۳: انتخاب الگوهای مختلف حفاری بر اساس مقاومت زمین و ابعاد دهانه تونل ..... ۱۱۰
- شکل ۱۶-۳: انواع تغییر شکل محیط نسبت به حفاری تونل ..... ۱۱۷
- شکل ۱۷-۳: انواع رده رفتاری برای پایداری جبهه کار ..... ۱۱۸
- شکل ۱۸-۳: تعریف انواع رده رفتاری برای پایداری جبهه کار بر اساس منحنی پاسخ زمین جبهه کار (GRCface) ..... ۱۱۹
- شکل ۱۹-۳: پارامترهای مورد استفاده در تعیین عدد پایداری جبهه کار ..... ۱۱۹
- شکل ۲۰-۳: نمایش شماتیک از ترسیم منحنی GRC جبهه کار (a) و توزیع جابجایی در جبهه کار (b) ..... ۱۲۰
- شکل ۲۱-۳: استفاده از کفبند (موقت و دائم) برای بستن مقطع تونل و ممانعت از همگرایی تونل ..... ۱۲۱
- شکل ۲۲-۳: نمونه‌ای از اجرای کفبند (موقت) برای بستن مقطع طاق تونل ..... ۱۲۲
- شکل ۲۳-۳: نمونه‌ای از اجرای میکروپایل در پاشنه‌های طاق تونل ..... ۱۲۲



- شکل ۳-۲۴: نمونه‌ای از اجرای میکروپایل در داخل تونل ..... ۱۲۳
- شکل ۳-۲۵: استفاده از core برای پایداری جبهه کار تونل و سکوی کمکی برای نصب سازه اولیه ..... ۱۲۳
- شکل ۳-۲۶: استفاده از شاتکریت و بولت در جبهه کار ..... ۱۲۴
- شکل ۳-۲۷: ناحیه تاثیر حفاری در جلو و پشت جبهه کار ..... ۱۲۶
- شکل ۳-۲۸: تصویری شماتیک از مراحل حفاری تونل به روش گالری‌های جانبی ..... ۱۲۶
- شکل ۳-۲۹: نمایش شماتیک از پرتال و ناحیه پرتال جهت تحلیل و طراحی ..... ۱۲۷
- شکل ۳-۳۰: نمونه‌ای از سیستم نگهداری تونل در محدوده پرتال ..... ۱۳۰
- شکل ۳-۳۱: ابعاد مورد نیاز برای مدلسازی عددی تونل ..... ۱۳۱



## فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲: انتخاب نوع TBM با توجه به شرایط پروژه- الگوی شماره ۱	۱۰
جدول ۲-۲: انتخاب نوع TBM با توجه به شرایط پروژه- الگوی شماره ۲	۱۱
جدول ۳-۲: مشخصات و ویژگی‌های انواع سگمنت‌ها	۱۵
جدول ۴-۲: مزایا و معایب انواع طرح‌های هندسی سگمنت	۱۶
جدول ۵-۲: آزمایش‌ها و استاندارد انجام هر یک از آنها جهت تهیه و طراحی نوار آببند	۲۴
جدول ۶-۲: مقایسه دوغاب تک جزیبی و دو جزیبی	۲۷
جدول ۷-۲: روابط مختلف ارائه شده جهت تعیین تنش کششی ناشی از اعمال بار فشاری جک‌های پیشران	۹۱
جدول ۱-۳: مقایسه بین انواع روش‌های ساخت تونل	۹۵
جدول ۲-۳: مقایسه بین انواع روش‌های ساخت تونل	۹۸
جدول ۳-۳: مزایا، معایب و کاربرد انواع الگوهای حفاری تونل	۱۰۹
جدول ۴-۳: انواع الگوی حفاری تونل به همراه مزایا، معایب و کاربرد آنها	۱۱۰
جدول ۵-۳: مقایسه بین انواع الگوهای حفاری تونل	۱۱۵
جدول ۶-۳: کلاس‌بندی روش‌های کمکی برای پایدارسازی حفاریات زیرزمینی	۱۲۵
جدول ۷-۳: مخاطرات احتمالی در پرتال به همراه ملاحظات طراحی آن	۱۲۸
جدول ۸-۳: تمهیدات مدنظر برای مقابله با مخاطرات موجود در ساخت پرتال	۱۲۹





# فصل ۱

---

## کلیات





## ۱-۱- مقدمه

رعایت مفاد ضوابط طراحی ایستگاه قطار شهری و حومه، ضوابط طراحی مسیر قطار شهری، ملاحظات آب‌بندی و ضوابط ساخت سازه‌های قطار شهری توسط بتن آب‌بند و بادوام در هماهنگی با یکدیگر در طراحی ایستگاه‌ها و تونل‌های قطار شهری الزامی است.

کلیه مباحث ارائه شده در این دستورالعمل‌ها برای هر دو سازه ایستگاه و تونل قابل کاربرد است. به عبارتی دیگر کلمات ایستگاه و تونل در کلیه بخش‌های این دستورالعمل‌ها می‌تواند جایگزین یکدیگر شود.

قبل از هر گونه طراحی و ساخت، موارد قانونی و ملاحظات مرتبط با ساخت باید بصورت کامل توسط کارفرما به طراح تفهیم گردد تا فرآیندهای تکراری یا اضافی از طرح و اجرا حذف گردد.

در این دستورالعمل مباحث تکمیلی نسبت به ضوابط طراحی ایستگاه قطار شهری و حومه، در ساخت سازه‌های زیرزمینی مکانیزه و سنتی ارائه می‌شود.





## فصل ۲

---

---

# تونل سازی مکانیزه با دستگاه حفار

## TBM





## ۲-۱- مقدمه

پوشش تونل های حفر شده با ماشین حفاری مکانیزه، «پوشش سگمنتی پیش ساخته» نامیده می شود. این پوشش در زمین های سخت و نرم قابل استفاده است. چندین المان پیش ساخته (سگمنت) در کنار یکدیگر یک حلقه (رینگ) را تشکیل می دهند. با قرارگیری سگمنت ها در کنار هم یک پوشش دایره کامل در دستگاه حفار تشکیل می شود و نصب می گردد. تعداد سگمنت های مورد استفاده در هر رینگ تابعی از قطر رینگ و الزامات اجرایی است. ضخامت سگمنت ها به طور معمول بین ۲۵ تا ۵۰ سانتیمتر و عرض هر رینگ ۱ تا ۲ متر در طول تونل می باشد.

از مزایای استفاده از پوشش سگمنتی پیش ساخته می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تأمین پایداری کامل زمین اطراف که امکان ادامه کار را بلافاصله پس از نصب فراهم می نماید.
- مصالح به سهولت به درون تونل انتقال داده می شود.
- کار اضافی مانند قالب بندی و عمل آوری درون تونل نیاز نیست.
- سطحی منظم و مناسب برای دیواره تونل فراهم می کند.
- سازه ای با نیاز به نگهداری کم فراهم می کند.
- استفاده از پوشش سگمنتی پیش ساخته معایبی نیز دارد که موارد زیر از جمله آنهاست:
- سگمنت ها باید با رواداری بسیار کم نصب شوند.
- میلگردها در فواصل کم از هم قرار داده می شوند.
- فضای نگهداری سگمنت ها در محل اجرای پروژه مورد نیاز است و باید در نظر گرفته شود.
- در صورت جا به جایی نامناسب سگمنت ها امکان آسیب و تخریب آنها وجود دارد.
- ورقه ورقه شدن، ترک خوردگی و تخریب در گوشه ها با اعمال فشار بیش از حد جک ها و یا جابه جایی نامناسب سگمنت ها اتفاق می افتد.

## ۲-۲- انتخاب نوع دستگاه حفار

در این بخش کلیاتی در خصوص نحوه انتخاب دستگاه حفار ارائه شده است. موارد ارائه شده در این بخش حداقل ملزومات است و در هر پروژه با توجه به شرایط خاص می بایست تصمیم گیری شود. رعایت ضوابط بخش حاضر به عنوان حداقل ضوابط ضروری است. به طور کلی استفاده از روش های مکانیزه حفاری تونل مستلزم انتخاب ماشین مناسب با در نظر گرفتن شرایط زیر می باشد.

- ویژگی های زمین شناسی و ژئوتکنیکی طول مسیر؛
- شرایط و محدودیت های پروژه؛
- تجربه و دانش فنی موجود؛

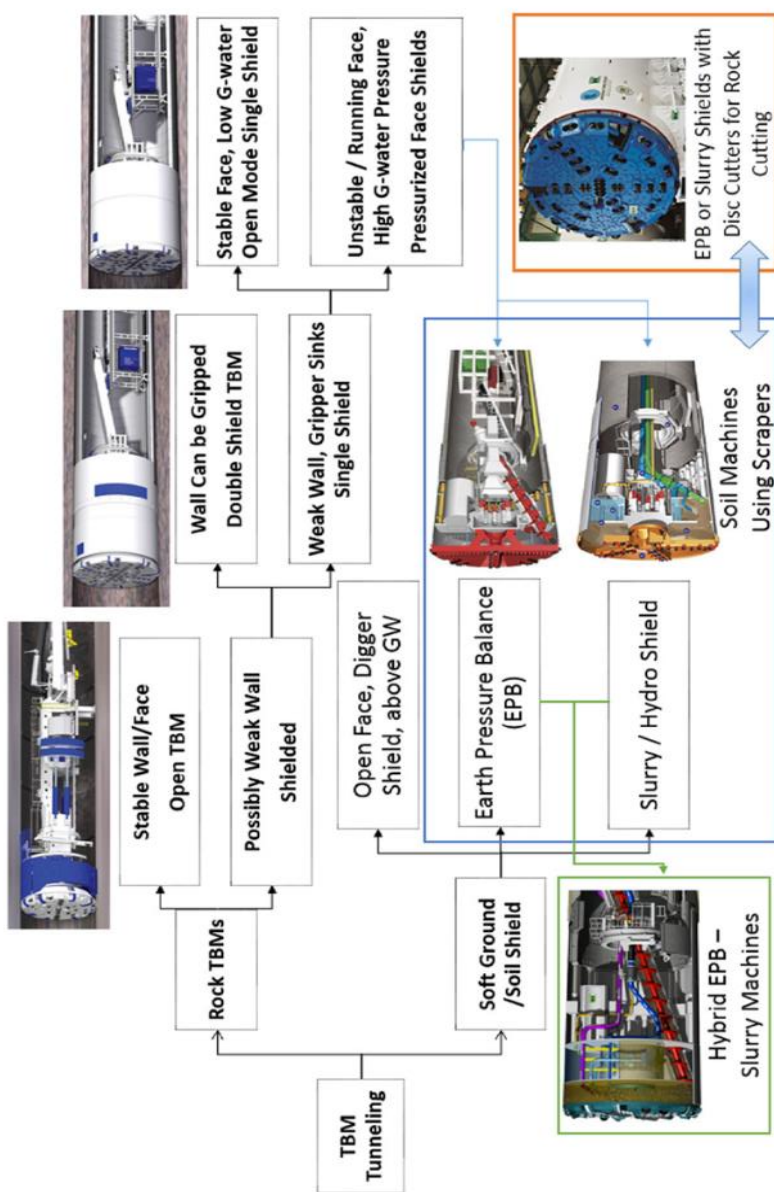


#### - زمان‌بندی پروژه.

برای انتخاب ماشین مناسب باید توانایی ماشین‌های حفاری در زمین‌های نرم، دامنه کاربرد و محدودیت‌های خاص هر یک با توجه به شرایط زمین مسیر تونل را در نظر گرفت؛ اگرچه با پیشرفت تکنولوژی ماشین‌های حفاری و با استفاده از روش‌های بهسازی و افزودنی مختلف، محدوده کاربرد ماشین‌های مختلف تا حد زیادی به هم نزدیک شده است، به گونه‌ای که انواع سپرهای بسته در بازه گسترده‌ای از خاک‌های مختلف با موفقیت استفاده می‌شوند. حفاری تونل با راندمان مورد نظر و کمترین هزینه و مشکلات اجرایی به انتخاب مناسب‌ترین ماشین بستگی دارد. بنابراین علاوه بر شرایط زمین و قابلیت بکارگیری دستگاه، دیگر عوامل به‌ویژه راندمان حفاری و هزینه‌های مربوط نیز مدنظر قرار خواهد گرفت. موضوع مهم دیگر که در تونل‌سازی در نواحی شهری اهمیت زیادی دارد بحث نشست و تخریب سطح زمین است که به مختل شدن عبور و مرور یا خسارت به بناها در سطح زمین منجر می‌شود.

انتخاب دستگاه حفار بر اساس مشخصات زمین‌شناسی مهندسی مسیر و نیاز پروژه از بین گزینه‌های ارائه شده در شکل (۱-۲) انجام می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، TBM‌ها در دو گروه سنگی و خاکی تقسیم‌بندی می‌شوند که جهت انتخاب گزینه مناسب لازم است از توصیه‌های ارائه شده در جداول (۱-۲) و (۲-۲) استفاده شود. با توجه به محدود بودن گزینه‌های تأثیرگذار در محیط‌های سنگی، انتخاب TBM با چالش جدی مواجه نخواهد بود؛ اما در محیط های خاکی لازم است فاکتورهای بیشتری مورد بررسی قرار گیرند. همان‌طور که در شکل (۱-۲) مشاهده می‌شود، ماشین‌های EPB و Slurry در زمین‌های نرم آبدار و ماشین‌های با جبهه‌کار باز در زمین‌های نرم خشک استفاده می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود ماشین‌های EPB و Slurry با دیسک‌کاتر قابل استفاده در محیط‌های سنگی می‌باشند.





شکل ۱-۲: انواع TBM های محیط سنگی و خاکی

جدول ۱-۲: انتخاب نوع TBM با توجه به شرایط پروژه - الگوی شماره ۱

TBM type Ground condition	N-value	water content or permeability	Open type		Closed type		
			Mechanical excavation type	Earth pressure type	Earth pressure balance type		Slurry type
					Earth pressure type	High-density slurry type	
Alluvium clay	0-5	300%-50%	s -Face stability -Ground settlement	1 -Difficulty in extremely weak clay -Volume control of discharged soil	-	-Earth pressure is more suitable.	s -Difficulty in extremely weak clay -Slurry spouting on surface -Increase of secondary slurry treatment plant
Diluvium clay	7-20	$W < 50\%$	1 -Existence of water bearing sand -Blockage in slit chamber	1 -Liquidity of soil -Volume control of discharged soil	-	-Earth pressure is more suitable.	1 -Increase of secondary slurry treatment plant
Soft rock (mudstone)	> 50	$W < 20\%$	1 -Existence of water bearing sand -Wear of cutter bits	- -Earth pressure with slurry is more suitable when there is water bearing sand.	-	-Suitable when there is water bearing sand	- -Suitable when there is water bearing sand
Loose sand	5-30	$10^{-2} - 10^{-3}$ (cm/s)	x -Unstable face	s -Contents of fine particles	1 -Highly-advanced excavation control	-	1 -Highly-advanced excavation control -Quality control of slurry solution
Dense sand	> 30	$10^{-3} - 10^{-4}$ (cm/s)	s -Face stability -Groundwater level, permeability	s -Contents of fine particles	1 -Wear of cutter bits -Dosage of additives	-	1 -Quality control of slurry solution
Sand gravel	> 30	$10^0 - 10^2$ (cm/s)	s -Face stability -Groundwater level, permeability	s -Contents of fine particles	1 -Wear of cutter bits -Dosage of additives	-	1 -Running away of slurry -Gravel crusher -Fluid transportation system
Sand and gravel With boulders	> 50	$10^0 - 10^1$ (cm/s)	x -Face stability -Boulder crusher -Wear of cutter bits and face	s -Contents of fine particles -Wear of cutter bits and face -Boulder crusher -Boulder diameter for screw-conveyer	1 -Wear of cutter bits -Boulder crusher -Boulder diameter for screw-conveyer	-	s -Running away of slurry -Boulder crusher -Fluid transportation system
Applicability for ground Condition changes			It is impossible to change excavation system.	Applicable Additive injection equipment becomes necessary	Applicable In general, it is widely applicable for various soil conditions.	Applicable In general, it is widely applicable for various soil conditions.	Applicable In general, it is widely applicable for various soil conditions.

Note: 1 Applicable, Item to consider when applying In case of x, reason for not applicable  
s Consideration required x Not applicable

جدول ۲-۲: انتخاب نوع TBM با توجه به شرایط پروژه - الگوی شماره ۲

Geo-technische Kennwerte Geotechnical Parameters	Baugrund Subsoil	Fels/Festgestein/ standfest bis nachbrüchig competent to caving in	Hard rock/soil nachbrüchig bis gebrüch caving in to unstable	bindig standfest cohesive stable	Boden/Lockergestein/ bindig nicht standfest cohesive not stable	Wechsellagerung mixed conditions	nicht bindig non-cohesive
Gesteinsfestigkeit $\sigma_D$ [MN/m <sup>2</sup> ] Rock Compressive strength		300 bis 50	50 bis 5	1,0	0,1		
Zugfestigkeit $\sigma_z$ [MN/m <sup>2</sup> ] Tensile strength		25 bis 5	5 bis 0,5				
RQD-Wert RQD value	RQD [%]	100 bis 50	50 bis 10				
Kluftabstand Fissure spacing	[m]	> 2,0 bis 0,6	0,6 bis 0,06				
Kohäsion Cohesion	Cu [kN/m <sup>2</sup> ]			≥ 30	30 bis 5	30 bis 5	
Kornverteilung Grain distribution	< 0,02 [%] < 0,06 [5]			30 ≥ 30	30 ≥ 30		10
TBM	o.W.						
TBM	m.W.						
TBM-S mit Schild TBM-S with shield	o.W.						
TBM-S mit Schild TBM-S with shield	m.W.						
SM-V1 ohne Stützung SM-V1 without support	o.W.						
SM-V1 ohne Stützung SM-V1 without support	m.W.						
SM-V2 mechan. Stützung SM-V2 mech. support	o.W.						
SM-V2 mechan. Stützung SM-V2 mech. support	m.W.						
SM-V3 mit Druckluft SM-V3 with compressed air	o.W.						
SM-V3 mit Druckluft SM-V3 with compressed air	m.W.						
SM-V4 Flüssigkeitsstützung SM-V4 fluid support	o.W.						
SM-V4 Flüssigkeitsstützung SM-V4 fluid support	m.W.						
SM-V5 Erddruck-Stützung SM-V5 earth pressure balance support	o.W.						
SM-V5 Erddruck-Stützung SM-V5 earth pressure balance support	m.W.						
SM-T1 ohne Stützung SM-T1 without support	o.W.						
SM-T1 ohne Stützung SM-T1 without support	m.W.						
SM-T2 Teilstützung SM-T2 partial support	o.W.						
SM-T2 Teilstützung SM-T2 partial support	m.W.						
SM-T3 mit Druckluft SM-T3 with compressed air	o.W.						
SM-T3 mit Druckluft SM-T3 with compressed air	m.W.						
SM-T4 Flüssigkeitsstützung SM-T4 fluid support	o.W.						
SM-T4 Flüssigkeitsstützung SM-T4 fluid support	m.W.						
Abbauwerkzeug Extraction tool	V	rollend (Diskenmeißel) rolling (cutter disc)	rollend (Diskenmeißel) rolling (disc bit)	schälend (Flachmeißel) stripping (flat bit)	schälend (Flachmeißel) stripping (chisel)	lösend/schälend (Stichel/Flachmeißel) loosening/stripping (cutter/flat bit)	lösend (Stichel) loosening (pick)
	T	ritzend (Spitzmeißel) notching (pick)	ritzend (Spitzmeißel) notching (point bit)	ritzend (Spitzmeißel) notching (point bit)	schälend (Flachmeißel) stripping (flat bit)	schälend (Flachmeißel) stripping (flat bit)	lösend (Stichel) loosening (pick)
o.W. = ohne Grund- bzw. Schichtwasser/without groundwater or underground water				Haupt Einsatzbereich/Main field of application			
m.W. = mit Grund- bzw. Schichtwasser/with groundwater or underground water				Einsatz möglich/application possible			

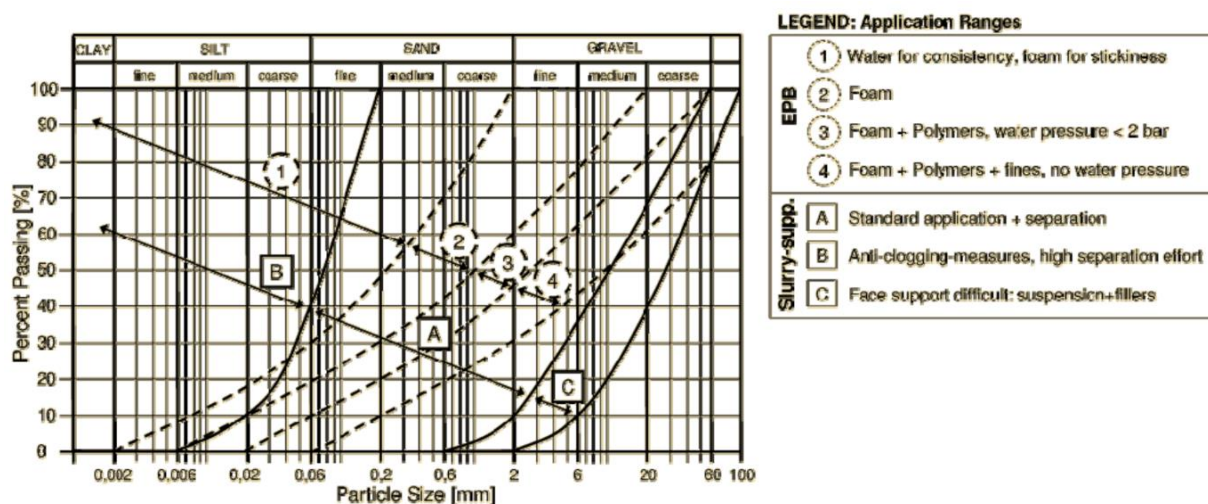
همان گونه که در جدول (۲-۱) مشاهده می شود، دستگاه حفار مناسب بر اساس شرایط زمین و مقدار نفوذپذیری ارائه شده است. همچنین در جدول (۲-۲) نیز مشاهده می شود، دستگاه حفار مناسب بر اساس جنس زمین، مقاومت محیط، مقدار چسبندگی و سطح آب زیرزمینی در دو گروه سنگی و خاکی دسته بندی شده است.

در محیط های خاکی معمولاً انتخاب TBM از بین ماشین های نوع EPB و Slurry انجام می شود که گزینه برتر می باشد بر اساس منحنی های توزیع دانه بندی و مقادیر نفوذپذیری واحدهای خاکی انتخاب شود. جهت بررسی منحنی های توزیع دانه بندی لازم است از دیاگرام ارائه شده در شکل (۲-۲) استفاده شود. در دیاگرام مذکور، خطوط خط چین مربوط به ماشین های EPB و خطوط پر رنگ مربوط به ماشین های Slurry می باشد. پس از بررسی منحنی های توزیع دانه بندی، مقدار 5-10 متر بر ثانیه به عنوان مرز بین ماشین های EPB و Slurry در نظر گرفته می شود.

در بررسی امکان سنجی استفاده از ماشین های EPB و Slurry لازم است این نکته در نظر گرفته شود که ماشین های EPB به دلیل هزینه سرمایه گذاری کمتر، سهولت استفاده و نیاز کمتر به فضای تجهیز کارگاه نسبت به ماشین های



Slurry ارجحیت بیشتری دارند؛ لذا در مواردی که امکان استفاده از هر دو نوع ماشین می‌باشد بهتر است از ماشین‌های EPB استفاده شود.



شکل ۲-۲: انتخاب ماشین‌های EPB و Slurry بر اساس منحنی دانه‌بندی

### ۲-۳- تعیین الزامات دستگاه حفار TBM

پس از انتخاب نوع دستگاه TBM، جهت اجرای موفق پروژه و کاهش هزینه‌های حفاری لازم است سایر مشخصات و الزامات TBM متناسب با پروژه انتخاب شوند؛ از این‌رو در ادامه مواردی که لازم است به سازنده دستگاه حفار اعلام شود و یا می‌بایست در انتخاب مشخصات دستگاه در نظر گرفته شود، ارائه شده است.

#### - مشخصات هندسی تونل

- نوع مقطع تونل
- حداقل قطر حفاری
- حداقل قطر داخلی تونل
- حداقل شعاع قوس مسیر تونل
- ماکزیمم شیب مسیر
- حداقل و حداکثر روباره تونل
- حداقل و حداکثر سطح آب زیر زمینی

#### - مشخصات پوشش نهایی تونل

- نوع پوشش
- ضخامت سگمنت‌ها
- چیدمان سگمنت‌ها



- الزامات مربوط به موقعیت جک‌ها و درزهای رینگ سگمنتال
- تعداد موقعیت سگمنت کلید

#### - الزامات حفاری و دستگاه

- نوع ماشین
- ماکزیمم سرعت پیشروی
- ابزار محافظتی کاترهد (صفحات Hard facing و گریل بارهای ضد سایش)
- نوع ابزار برشی (دیسک کاتر، ریپر، اسکریپر و...) با قابلیت جایگزینی (ابزار ناخنی و دیسکی)
- تعداد و نوع کپی کاتر
- جنس ابزارهای برش
- نوع مواد بهسازی (عمل آوری)
- موقعیت و تعداد نازل‌های تزریق مواد عمل آوری مصالح
- وجود سیستم Week End mode
- مقدار بازشوهای کاترهد
- موقعیت و تعداد سنسورهای فشارسنج در محفظه حفاری و نقاله مارپیچ
- نوع مخاطرات حفاری
- امکان تزریق گل بنتونیت اطراف سپر دستگاه
- نوع سیستم نقشه برداری
- ماکزیمم فشار هیدرواستاتیک
- نوع سیستم تزریق دوغاب پشت سگمنت
- تعداد نازل‌های تزریق دوغاب
- تجهیزات عملیات هایپرباریک
- سیستم توزین مصالح
- سیستم انتقال مصالح
- محل نصب سیستم نوارنقاله
- تعداد ردیف برآش‌های آب‌بند
- تعداد ردیف کاردک‌های سپر دنباله
- نوع سیستم سگمنت گذاری
- تعداد جک‌های پیشران (تراست)
- تعداد جک‌های آرتیکولیشن (جک‌های فعال و غیرفعال)



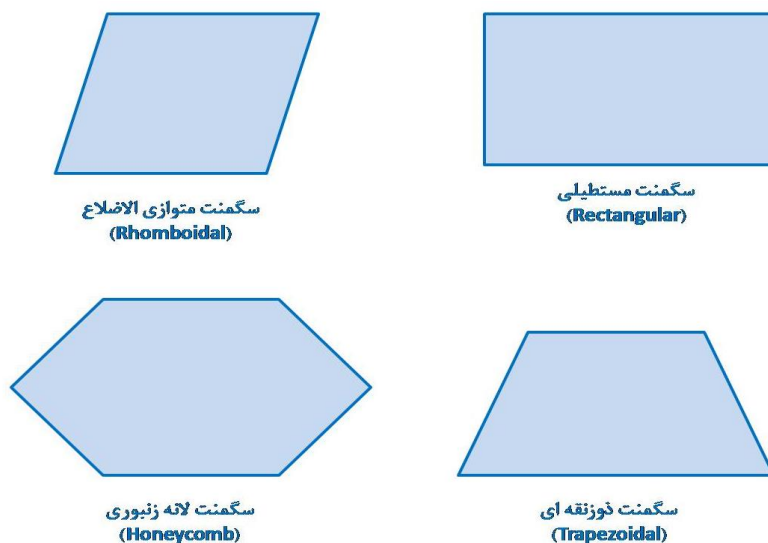
- نوع آببندی انتهایی سپر (نوع ماده افزودنی، دستی و اتوماتیک بودن)
- نوع و تعداد سنسورهای گازسنج

## ۲-۴- طرح هندسی سگمنت

اولین مرحله در طراحی یک پوشش سگمنتی، انتخاب طرح هندسی مناسب با توجه به مشخصات طرح و الزامات نهایی مورد نیاز است. منظور از طراحی هندسی، تعیین مناسب شکل و ابعاد هندسی سگمنت شامل، قطر داخلی، ضخامت، عرض، طول، تعداد قطعات سگمنت یک رینگ و چیدمان آنها و همچنین جزئیات مربوط به درزها، سطوح تماس و ادوات اتصال سگمنت‌ها به یکدیگر است. با توجه به اینکه انواع طرح هندسی موجود می‌باشد لازم است جهت انتخاب بهترین گزینه، موارد زیر در نظر گرفته شود.

- امکان تولید سگمنت با رعایت جزئیات کامل و رواداری‌های مجاز وجود داشته باشد.
  - مراحل تولید، دپو، حمل و نقل و نصب آن با سهولت انجام گیرد.
  - اندرکنش سگمنت با دستگاه حفار در نظر گرفته شود.
  - امکان رعایت الزامات سازه‌ای برای تحمل بارهای موقت و دائمی از زمان تولید تا زمان نصب و بهره‌برداری را داشته باشد.
  - در صورت نیاز الزامات آببندی مورد توجه قرار گیرد.
- به‌طور کلی سگمنت‌ها انواع مختلفی دارند که مهم‌ترین آنها عبارتند از سگمنت‌های شش وجهی یا لانه زنبوری و سگمنت‌های تتراگونال یا چهار وجهی که خود شامل سگمنت‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و متوازی‌الاضلاع می‌باشد. شکل (۲-۳) نمایی از انواع طرح‌های هندسی سگمنت را نشان می‌دهد. در هر تونل با توجه به مسائلی از قبیل کاربری تونل و میزان اهمیت آن یکی از انواع سگمنت‌ها بکار برده می‌شود.





شکل ۲-۳: انواع طرح هندسی سگمنت

از میان سیستم‌های فوق سه سیستم اول به صورت حلقه به حلقه و سیستم آخر (شش ضلعی) به صورت پیوسته اجرا می‌گردند. در جدول (۲-۳) ویژگی انواع سگمنت‌های مورد استفاده در تونل‌ها درج شده است. همچنین در جدول (۲-۴)، مزایا و معایب انواع طرح‌های هندسی سگمنت ارائه شده است که لازم است بر اساس شرایط هر پروژه نسبت به انتخاب طرح هندسی مناسب اقدام شود.

جدول ۲-۳: مشخصات و ویژگی‌های انواع سگمنت‌ها

سگمنت هنده	سیستم مستطیلی	سیستم ذوزنقه‌ای	سیستم متوازی الاضلاع	سیستم شش ضلعی
مراحل نصب	حلقه به حلقه ناپیوسته	حلقه به حلقه ناپیوسته	حلقه به حلقه ناپیوسته	پیوسته
سگمنت کلید	دارد	ندارد	دارد	ندارد
اجرای قوس و اصلاح مسیر	نیاز به سگمنت‌های خاص یا ذوزنقه‌ای (سیستم Universal)	نیاز به سگمنت‌های خاص یا ذوزنقه‌ای (سیستم Universal)	نیاز به سگمنت‌های خاص یا ذوزنقه‌ای (سیستم Universal)	نیازمند المان‌های خاص نیست- بازشدگی درزه‌های پیرامون محدود می‌شود.
آب‌بندی درز	درزهای باز یا گسکت	درزهای باز یا گسکت	درزهای باز یا گسکت	درزهای باز یا درزگیری شده



جدول ۲-۴: مزایا و معایب انواع طرح‌های هندسی سگمنت

معایب	مزایا	هندسه سگمنت
<ul style="list-style-type: none"> <li>- آببندی ضعیف</li> <li>- تاخیر و هزینه بسیار زیاد در پروژه در صورت استفاده از تزریق برای آببندی</li> <li>- عدم امکان استفاده از گسکت به شکل مناسب</li> <li>- ازدیاد عرض درز سگمنت‌ها در قوس‌ها</li> <li>- انعطاف‌پذیری کم پوشش نسبت به پوشش‌های سگمنتی دیگر</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- هم شکل و هم اندازه بودن قطعات (به جز قطعه کف)</li> <li>- کاهش هزینه‌های تولید</li> <li>- مدیریت راحت‌تر تولید، دیو و نصب قطعات</li> <li>- سرعت نصب بالاتر</li> <li>- عدم لزوم توقف حفاری در زمان نصب</li> </ul>	<p>شش ضلعی (لانه زنبوری)</p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>- نیاز به تعداد قالب بیشتر نسبت به شش‌ضلعی</li> <li>- احتمال آسیب دیدگی گسکت در زمان نصب و از بین رفتن کارایی آن</li> <li>- قفل‌شدگی کمتر سگمنت‌ها در یک رینگ</li> <li>- نصب دشوار سگمنت‌ها</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- امکان عبور از قوس‌ها با ایجاد شیب‌داری (Tapering) در طرفین رینگ</li> <li>- امکان آببندی با استفاده از نوار آب‌بند</li> <li>- آرایش مناسب درزهای طولی</li> <li>- سهولت بیشتر در تولید، دیو و نصب قطعات</li> </ul>	<p>مستطیلی</p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>- اختلاف ابعاد سگمنت‌های مختلف در یک رینگ</li> <li>- نیاز به تعداد قالب بیشتر و لزوم دقت بیشتر در ساخت قالب‌ها</li> <li>- استفاده از طول بیشتر گسکت (نسبت به سگمنت‌های مستطیلی)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- امکان عبور از قوس‌ها با ایجاد شیب‌داری در طرفین رینگ</li> <li>- امکان آببندی با استفاده از نوار آب‌بند</li> <li>- سهولت بیشتر در نصب نسبت به سگمنت‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای</li> </ul>	<p>متوازی الاضلاع</p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>- نصب مشکل‌تر نسبت به سگمنت‌های مستطیلی و متوازی الاضلاع</li> <li>- استفاده از طول بیشتر گسکت (نسبت به سگمنت‌های مستطیلی)</li> <li>- مشکل بودن ساخت قالب نسبت به سگمنت‌ها مستطیلی</li> <li>- مشکل بودن خارج کردن سگمنت از قالب</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- امکان عبور از قوس‌ها با ایجاد شیب‌داری در طرفین رینگ</li> <li>- امکان آببندی با استفاده از نوار آب‌بند</li> <li>- تعداد قالب کمتر نسبت به مستطیلی و متوازی‌الاضلاع</li> </ul>	<p>دوزنقه‌ای</p> 

پس از تعیین نوع طرح هندسی از بین گزینه‌های موجود، لازم است موارد ذیل در طراحی‌ها به‌صورت دقیق در نظر گرفته شوند.

#### - قطر داخلی رینگ

در تونل‌های مترو، قطر داخلی تونل بر اساس گاباری استاتیکی و دینامیکی وسایل نقلیه ریلی و فضاهای مورد نظر برای تاسیسات و پیاده‌روها و همچنین تلورانس‌های اجرایی دستگاه حفاری TBM تعیین می‌گردد.

#### - تعداد قطعات در رینگ

جهت تعیین تعداد قطعات یک حلقه لازم است پارامترهای زیر در نظر گرفته شوند:

- محدودیت‌های عملیاتی؛
- محدودیت تعداد درزه‌های تماسی به‌منظور جلوگیری از بین رفتن آب‌بندی پوشش؛
- جلوگیری از نشت آب به بیرون به‌واسطه تراوش از داخل تونل؛
- وزن قطعات؛
- اندازه ابعاد المان‌های حلقه؛



- شرایط دمایی بتن ریزی؛
- رفتار سگمنت تحت فشار جک های رانش و موقعیت اعمال فشار به آنها؛
- طرح وسایل نصب (داول ها، بولت ها و...).

#### - طول قطعات سگمنتی

جهت تعیین طول قطعات سگمنت لازم است موارد زیر در طراحی ها در نظر گرفته شوند:

- شرایط هندسی دستگاه TBM و امکان انتقال قطعات و قابلیت دسترسی جرثقیل به این قطعات؛
- عرض سگمنت از نظر قابلیت حمل سگمنت در تونل؛
- آرماتور مصرفی در سگمنت؛
- مراحل نصب؛
- عدم قرارگیری پد جک های TBM بر روی درز سگمنت ها.

#### - عرض قطعات سگمنتی

هرچه عرض سگمنت بیشتر باشد، زمان لازم جهت نصب پوشش تونل کاهش یافته و نرخ کل پیشروی ماشین حفاری افزایش خواهد یافت. عرض سگمنت به عواملی هم چون امکان انتقال و جابجایی سگمنت در داخل تونل، طول سپر دنباله در ماشین های EPB (محدودیت در چرخش ماشین حفاری)، ساخت رینگ سگمنتی و اجرای قوس های مسیر و همچنین به کورس جک ماشین حفار بستگی دارد که لازم است همه پارامترها در طراحی مد نظر قرار گرفته شوند.

#### - ضخامت سگمنت ها

ضخامت سگمنت بر اساس نیروهای خارجی و داخلی وارد بر پوشش بتنی در زمان تولید، نصب و بهره برداری محاسبه می شود. ضخامت سگمنت ها بین ۱۵ تا ۷۵ سانتی متر متغیر است. بر اساس اطلاعات سایر پروژه های تونل سازی، ضخامت سگمنت متناسب با قطر تونل دارای ابعاد مختلفی می باشد که لازم است به صورت دقیق و بر اساس نیروهای وارد بر تونل و الزامات مورد نیاز جهت آب بندی تعیین و برآورد شود.

#### - وزن قطعات سگمنت

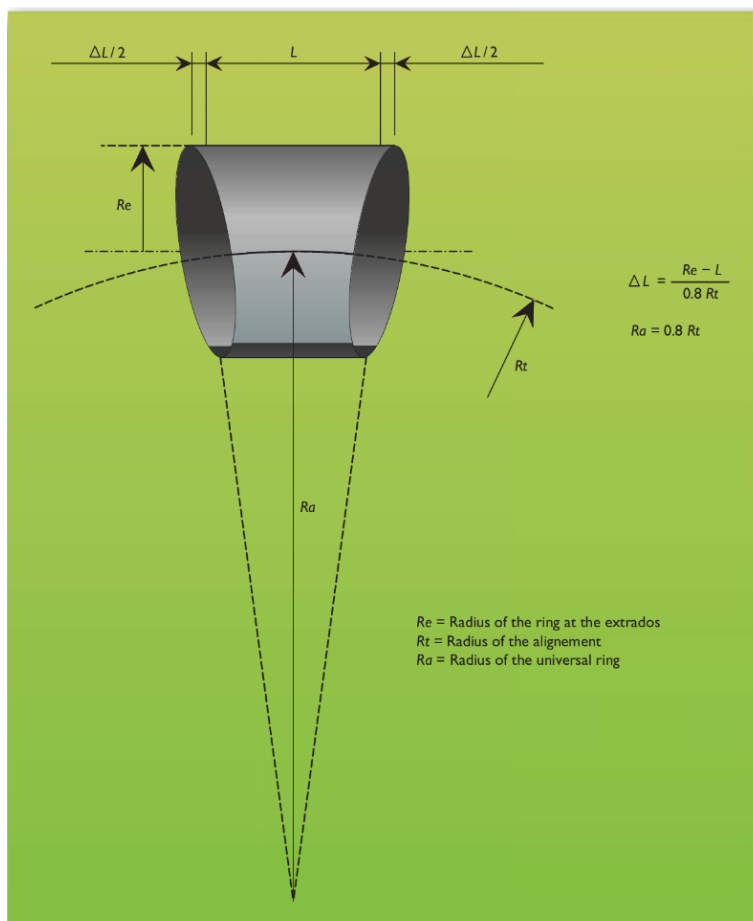
در تونل هایی با قطر بالا به جهت افزایش ضخامت سگمنت و تلاش برای کمتر کردن تعداد قطعات سگمنت، وزن سگمنت حائز اهمیت می گردد. وزن سگمنت در مرحله خارج نمودن سگمنت از داخل قالب، جابجایی و انتقال به دیپوی سگمنت و حمل به کارگاه و تونل و همچنین انتخاب مشخصات و توان مکانیکی دستگاه نصاب سگمنت ماشین حفاری تعیین کننده خواهد بود. از این رو لازم است پیوستگی ارتباط پارامترهای فوق در طراحی ها مورد توجه قرار گیرد.

#### - شیب داری طرفین رینگ (تیپرینگ)

شیب داری طرفین رینگ بر اساس پلان و پروفیل مسیر تونل و حداقل شعاع قوس موجود در هر پروژه طراحی می گردد. در تعیین شیب داری طرفین رینگ لازم است دو سمت رینگ به صورت منحنی (به جای خط مستقیم) در نظر



گرفته شود. در شکل (۴-۲) نمایی از نحوه محاسبه شیب‌داری طرفین سگمنت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شعاع رینگ در قوس بیرونی،  $R_t$  شعاع مسیر و  $R_a$  شعاع رینگ در سیستم Universal می‌باشد.



شکل ۴-۲: نمایی شماتیک از هندسه محاسبه شیب‌داری طرفین سگمنت

#### - سطوح تماس محیطی سگمنت

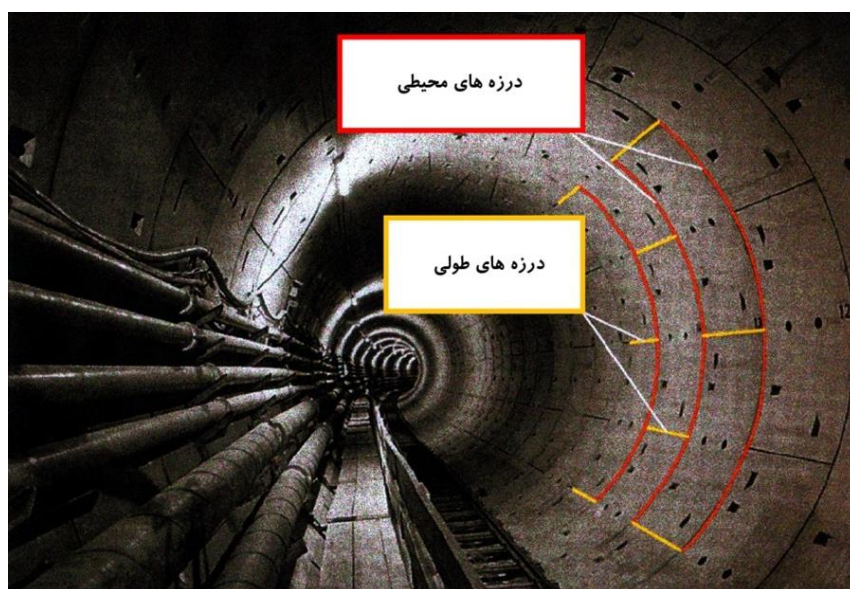
سطوح تماس محیطی سگمنت اغلب متحمل بارهایی از قبیل بارهای فشاری حاصل از نیروی پیشران ماشین حفاری که توسط جک‌های ماشین به این صفحات وارد می‌گردد و همچنین شامل نیروهای برشی حاصل از جابجایی‌های غیر متقارن رینگ‌های مجاور می‌باشد. در طرح هندسی، سطوح عرضی سگمنت در دو حالت مسطح و دو گانه (کام و زبانه) طراحی می‌گردد که ابتدا می‌بایست بارهای وارد بر سطوح سگمنت بررسی و در نهایت یکی از سطوح در نظر گرفته شود.

#### - درزهای طولی (شعاعی)

با در نظر گرفتن فشار زمین و فشار تزریق پشت سگمنت، سطوح تماس طولی سگمنت تحت اثر بارهای نیروی برشی، نیروی فشاری و لنگر خمشی قرار می‌گیرند. بنابراین لازم است در طراحی‌ها، وضعیت و سطح مقطع این سطوح مورد توجه قرار گیرد. همچنین، هندسه نهایی این سطوح می‌بایست امکان انتقال تنش بین سطوح را امکان‌پذیر نموده و



احتمال خروج از موقعیت تعریف شده را محدود کند. در شکل (۲-۵) انواع درزهای طولی و محیطی نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: نمایی شماتیک از هندسه محاسبه شیب‌داری طرفین سگمنت

#### - اتصالات بین سگمنت‌ها

از اتصالات بین سگمنت‌ها در درزهای عرضی و طولی جهت تامین دقت در نصب و جلوگیری از بیرون‌زدگی سگمنت و بازشدگی در درزهای پوشش و حفظ نیروهای فشاری اعمال شده به نوارهای آب‌بند مخصوصاً در نزدیکی دهانه‌های تونل و برآورده نمودن پایداری سگمنت حتی در مواقعی که جک‌های رانش TBM نیرویی به سگمنت اعمال نمی‌کنند، استفاده می‌گردد.

تعداد اتصالات طولی که به طور منظم در طول درزهای تماس محیطی جانمایی می‌گردند برای هر سگمنت در هر پروژه متفاوت می‌باشد. این تعداد بر اساس نیروهایی که می‌بایست به تعادل برسند و نیز حالت‌های محتمل برای حرکت حلقه‌ها، همانند چرخش یک حلقه نسبت به حلقه قبلی که می‌تواند منجر به ناهم‌ترازی سطوح تماس درزهای طولی و انحراف در مسیر تونل شود، تعیین می‌شود. اتصال بین سگمنت‌ها و رینگ‌ها را می‌توان به دو بخش کلی اتصالات بولتی و اتصالات پینی (داولی) تقسیم‌بندی نمود. در اتصالات بولتی ابتدا سگمنت‌ها در موقعیت مناسب خود قرار گرفته و سپس بولت‌ها جاگذاری و سفت می‌شوند؛ اما در اتصالات پینی، المان‌های اتصال که کاملاً مدفون بوده و نمایان نیستند، حین نصب سگمنت‌ها جاگذاری شده و به صورت کام و زبانه و یا نر و مادگی عمل می‌کنند. انتخاب نوع اتصالات متناسب با نوع و مقدار نیروهای وارد بر رینگ سگمنتی می‌باشد که در هر پروژه متفاوت است.



### - حفرات روی سطوح سگمنت‌ها

در طراحی قطعات سگمنتی لازم است حفراتی برای بلند کردن سگمنت، نگهداری تجهیزات خدماتی، تزریق پشت سگمنت و ابزاربندی بر روی سطوح سگمنت‌ها تعبیه شود؛ اما از آنجایی که به واسطه وجود حفرات در سگمنت‌ها مقاومت آن کاهش می‌یابد، می‌بایست تعداد و اندازه حفرات حتی‌الامکان کاهش یابد و موقعیت آنها به گونه‌ای باشد که مقدار پوشش مورد نیاز بر روی قفسه آرماتور تامین و در مجاورت آنها تسلیحات کافی به کار رفته باشد.

### - رواداری‌های مجاز ساخت و نصب سگمنت

رواداری‌هایی که در مراحل مختلف ساخت و نصب سگمنت ایجاد می‌شوند ناشی از قالب‌بندی، شامل هندسه قالب، ساخت، جاگذاری قفس آرماتور، اجرای پوشش شامل نصب رینگ و تغییر شکل‌های پوشش ناشی از فشار زمین و تولید سگمنت در طی زمان می‌باشد. میزان رواداری‌ها عموماً از ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر در بخش‌های مختلف سگمنت متغیر است. با این وجود میزان رواداری هر پروژه متفاوت بوده و بر اساس نوع کاربری پروژه، مدت زمان بهره‌برداری، شرایط محیط و الزامات بالادستی تعیین می‌گردد.

## ۲-۵- نوار آب‌بند

در تونلسازی مکانیزه از سگمنت به عنوان پوشش تونل استفاده می‌شود. سگمنت‌ها دارای دو سری درزهای طولی و عرضی می‌باشند که از محل این درزها احتمال ورود آب به داخل فضای تونل وجود دارد. این درزها در صورت انتخاب و نصب صحیح نوارهای آب‌بند (گسکت) بسته شده و مانع ورود آب می‌شوند. شایان ذکر است، آب‌بندی تونل‌های مترو الزامی می‌باشد.

از نظر عملکرد، نوارهای آب‌بند مورد استفاده در تونل‌ها، به دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند که بر اساس نیاز و شرایط هر پروژه در خصوص نوع نوار آب‌بند تصمیم‌گیری می‌شود.

### - نوارهای آب‌بند تراکمی الاستومتری

این نوع نوار آب‌بند در اثر متراکم شدن تحت تاثیر جک‌های پیشران، نصاب سگمنت و یا اتصالات سگمنت به همدیگر فشرده شده و در اثر تراکم ایجاد شده رینگ سگمنتال را آب‌بند می‌نمایند که مهم‌ترین نوع نوارهای تراکمی الاستومتری، نوارهای EPDM می‌باشند.

### - نوارهای آب‌بند منبسط شونده

این نوع نوارهای آب‌بند برای بدست آوردن سیستم آب‌بند بهینه بین درزه‌ها ساخته شده‌اند، این نوع مواد در تماس با آب متورم می‌شوند؛ به گونه‌ای که تمام فضاهای خالی مابین قطعات پوشش را پر می‌کنند. نوع ساده‌ای از این سیستم آب‌بند از صفحات مستطیلی شکل به ضخامت ۵-۲ mm و عرض ۲۵-۲۰ mm تشکیل می‌شود. تورم این مواد طی چند روز اتفاق می‌افتد. نوارهای آب‌بند منبسط شونده، از یک ترکیب پلیمری (که در برابر آب واکنش نشان می‌دهد) و



لاستیک طبیعی یا اورتان (Urethan) تشکیل شده‌اند. این مواد دارای ساختار مولکولی مختلفی از مواد آب دوست بوده و انبساط قابل پیش‌بینی و کنترل شده‌ای در حد ۲ الی ۳ برابر حجم اولیه را به وجود می‌آورند. در برخی از انواع این گسکت‌ها افزایش حجم تا بیش از ۸ برابر نیز می‌رسد. با توجه به اینکه امکان جذب رطوبت هوا توسط این نوارهای آب‌بند وجود دارد، باید پس از قرار دادن آنها بر روی سگمنت‌ها، به نوعی در برابر رطوبت هوا محافظت شوند. پارامترهای مؤثر در انتخاب نوع و مشخصات نوار آب‌بند به شرح زیر می‌باشد.

#### - فشار آب زیرزمینی

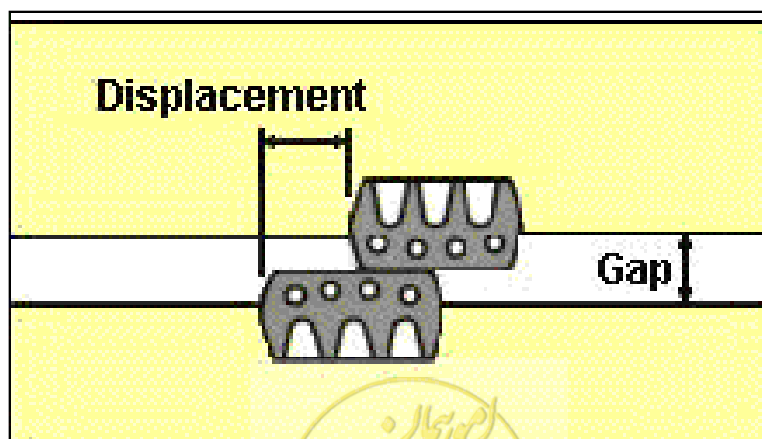
مهمترین پارامتر در طراحی و انتخاب سیستم آب‌بندی، فشار آب زیرزمینی است. کارایی نوار آب‌بند انتخاب شده باید در برابر این فشارها آزمایش شود. بیشترین فشار آب در مسیر پروژه برای انتخاب نوار آب‌بند باید در نظر گرفته شود. همچنین از آنجایی که دوره ۱۰۰ ساله جهت بهره‌برداری از تونل‌های شهری مد نظر می‌باشد و در این مدت تراز آب‌های زیرزمینی علاوه بر شرایط جوی، توسط عوامل انسانی نیز دچار تغییراتی می‌شود، لازم است ضریب اطمینانی جهت انتخاب فشار آب در نظر گرفته شود. از این‌رو، با توجه به اینکه در طول زمان آزادسازی تنش در نوارهای آب‌بند اتفاق می‌افتد لازم است ضریب اطمینان ۲ جهت انتخاب فشار آب در طراحی نوارهای آب‌بند لحاظ شود.

#### - هندسه شیار نوار آب‌بند

شیارهای نوار آب‌بند، از تغییر شکل جانبی آنها جلوگیری می‌کنند. این شیارها باید متناسب با شرایط پروژه و محدودیت‌های تولیدکنندگان نوارهای آب‌بند، انتخاب شوند. در طراحی هندسه شیار نوار آب‌بند، لازم است کنترل تنش و شکستگی در گوشه‌های سگمنت بررسی و ابعاد و عمق شیار به درستی انتخاب شود.

#### - رواداری‌های شیار و نصب قطعات سگمنتی

بازشدگی بین درزه‌های سگمنت (گپ) و جابجایی جانبی آن (آفست) ناشی از رواداری‌های ساخت و نصب قطعات باید در تعیین نوار آب‌بند در نظر گرفته شود. در این شرایط نوار آب‌بند باید بتواند در حداکثر مقادیر گپ و آفست کارایی خود را حفظ کرده و فشار آب‌بندی مورد نظر را تأمین نماید. در شکل (۶-۲) نمایی از گپ و آفست نشان داده شده است.



شکل ۶-۲: فاصله بازشدگی بین درزه‌ها و جابجایی جانبی قطعات (گپ و آفست)



تلورانس‌های نصب سگمنت‌ها تأثیر بیشتری بر مقادیر گپ و آفست داشته و باید با توجه به توانایی آب‌بندی نوارهای آب‌بند محدود شود. برای کارآیی مناسب نوارهای آب‌بند، مقادیر گپ و آفست مجاز بر اساس ابعاد هندسی گسکت و نمودارهای بار-جابجایی مشخص می‌گردد. بنابراین این موضوع باید در انتخاب پروفیل گسکت و تلورانس‌های نصب در نظر گرفته شود.

فشار سطحی مورد نیاز برای فشردن نوارهای آب‌بند در درزه‌های محیطی سگمنت، توسط جک‌های پیشران تامین می‌شود. حداقل نیروی جک‌ها بایستی برابر با نیروی برگشتی نوارهای آب‌بند باشد. نوارهای آب‌بند در امتداد درزه‌های طولی، حین نصب سگمنت توسط نصاب، تحت فشار قرار می‌گیرند؛ این فشار تا زمانی که ملات در فضای پشت سگمنت به گیرش مورد نظر برسد با پیچ نمودن سگمنت‌ها به هم حفظ می‌شود.

میزان استحکام و دوام نوارهای آب‌بند فشاری بایستی توسط آزمایش‌های مربوطه مشخص گردد. همچنین در آزمایش‌های استحکام، حداکثر فشار آبی که در آن نوار آب‌بند نفوذ ناپذیر باقی می‌ماند، تعیین می‌شود. آزمایش‌های دوام نوار آب‌بند با فاصله‌داری‌های متفاوت گپ و آفست مختلف انجام می‌گیرد تا پتانسیل‌های آسیب نوار آب‌بند حین نصب سگمنت (از قبیل جابجایی‌های متقابل و یا کاهش فشار نوار آب‌بند)، مشخص گردد. بر این اساس برای آب‌بندی سگمنت‌ها بایستی حداقل دو آزمایش با پارامترهای یکسان انجام گیرد و کمترین مقدار فشار آب قابل‌قبولی که از هر دو آزمایش بدست می‌آید، برای محاسبات مدنظر قرار گیرد.

#### - اتصالات

عملکرد نوارهای آب‌بندی و میزان فشاری که سیستم در برابر آن آب‌بند می‌شود، وابسته به میزان بسته شدن درز سگمنت‌ها یا نیروی فشاری است که سگمنت‌ها را به یکدیگر متصل می‌کند. نوع و مقدار این نیروها وابسته به روش اتصال سگمنت‌ها در رینگ و اتصال رینگ‌ها به یکدیگر است. از این‌رو لازم است کفایت مقدار نیرویی که از سمت جک‌ها به سگمنت وارد می‌شود بررسی شود.

#### - تزریق پشت سگمنت

با توجه به اینکه در حفاری مکانیزه با دستگاه TBM از انواع افزودنی‌های زودگیر و روان‌کننده در دوغاب پر کننده پشت سگمنت استفاده می‌شود، لازم است اثرات منفی آنها بر روی نوارهای آب‌بند مورد توجه و بررسی قرار گرفته و سازنده گسکت در جریان آن قرار گیرد.

#### - عمر پروژه

با توجه به اینکه تونل‌های شهری معمولاً برای دوره ۱۰۰ سال طراحی می‌شوند، نوارهای آب‌بند مورد استفاده نیز باید در طول عمر تونل کارآیی خود را حفظ کنند. یکی از مسائلی که بایستی در نظر گرفت، مسئله وارفتگی نوار آب‌بند (Relaxation) می‌باشد؛ به این معنی که با گذشت زمان تنش در داخل نوار رها شده و توانایی آب‌بندی نوار کاهش می‌یابد. مقدار رهایی تنش در نوارهای آب‌بند توسط سازنده ارائه می‌گردد. از این‌رو جهت اعمال اثر این آزادشدگی تنش در طراحی‌ها، ضریب اطمینان در نظر گرفته شده در بخش فشار آب، جوابگوی نیاز پروژه‌ها خواهد بود.

### - مقاومت نوار در مقابل مواد شیمیایی و دماهای زیاد

در صورت وقوع آتش سوزی در داخل تونل، نوارهای آب بند مورد استفاده بایستی مقاومت کافی در برابر حرارت های ایجاد شده را داشته باشند. با توجه به اینکه نوارهای آب بند در بخش خارجی سگمنت قرار می گیرند، آتش سوزی تاثیر مستقیم بر آنها ندارد؛ اما تداوم آتش سوزی تاثیر غیر مستقیم حرارتی بر روی سگمنت و در نتیجه نوار آب بند خواهد گذاشت. از این رو در طراحی نوار آب بند باید مقاومت نوار آب بند در برابر حرارت بررسی شود.

همچنین، نوارهای آب بندی که برای پروژه ها تهیه می شوند، بایستی در برابر عوامل شیمیایی موجود در زمین (آب و خاک) و همچنین عوامل اضافه شده جهت تسهیل و تکمیل امر حفاری (فوم، مواد شیمیایی اضافه شونده به دوغاب پشت سگمنت و افزودنی های دیگر) مقاوم باشند. علاوه بر این، نوارهای آب بند انتخابی باید در برابر عوامل آلودگی موضعی احتمالی آب های زیرزمینی یا فاضلاب های مسیر پایدار باشند.

### - آزمایشات کنترل کیفیت و طراحی نوار آب بند

به منظور تهیه نوار آب بند لازم است در هر پروژه آزمایش های زیر انجام شوند. در جدول (۲-۵) استانداردهای لازم جهت انجام هر یک از آزمایشات مورد نیاز جهت تهیه و طراحی نوار آب بند ارائه شده است.

(۱) آزمایش سختی سنجی (Hardness test)

(۲) آزمایش مقاومت کششی و ازدیاد طول

(a) آزمایش مقاومت کششی (Tensile Strength)

(b) درصد ازدیاد طول (%) (Elongation)

(۳) آزمایش مانائی فشار (Residual pressure deformation DVR 22h at 70<sup>0</sup> C)

(۴) تست پیرشدگی حرارتی (Thermal ageing 168 h at 70<sup>0</sup> C)

(a) تغییر در مقدار سختی (Change In Hardness)

(b) تغییر در مقاومت کششی (Change In crack Resistance)

(c) تغییر در مقدار درصد ازدیاد طول (Change In Elongation)

(۵) آزمایش بار - جابجایی گسکت

(a) رفتار بار جابجایی روی پروفیل گسکت (Load - displacement behavior)

(b) تعیین نیروی مورد نیاز برای فشردگی گسکت در گوشه (Load-displacement behavior frame corner (hardening))

(۶) آزمایش ظرفیت ارتجاعی (Restorative Capacity at 20 C)

(۷) آزمایش نشئی آب گسکت (Water Tightness test)



جدول ۲-۵: آزمایش‌ها و استاندارد انجام هر یک از آنها جهت تهیه و طراحی نوار آب‌بند

ردیف	آزمایش		روش آزمایش	حد مجاز	واحد
1	آزمایش سختی سنجی	Hardness	ISO 7619-1 & ISO 49-M	65±5	Shore A
2	آزمایش مقاومت کششی	Tensile Strength	ISO 37 Type 2- 2017	≥ 9	MPa
3	آزمایش درصد ازدیاد طول	Elongation at Break	ISO 37 Type 2	≥ 300	%
4	آزمایش مانایی فشار	Residual pressure deformation DVR 22h at 70° C	ISO 815-1: 2014	≤ 25	%
5	آزمایش پیر شدگی حرارتی	Thermal ageing 168 h at 70 ° C	ISO 188	-	-
6	آزمایش تغییر در مقدار سختی	Change In Hardness	ISO 7619-1	+8 to -5	Shore A
7	آزمایش تغییر در مقاومت کششی	Change in Tensile strength	ISO 37 Type 2	+10 to -20	%
8	آزمایش تغییر در مقدار درصد ازدیاد طول	Change in Elongation	ISO 37 Type 2	+10 to -30	%
9	آزمایش آزادسازی تنش	Stress Relaxation	ISO 3384	≤ 45	%
10	آزمایش ظرفیت ارتجاعی	Restorative Capacity at 20 C	Stuva recommendation	≥ 80	%
11	آزمایش نشت آب	Water Tightness Test acc. To STUVA Recommendations	Stuva recommendation	ضروری است ( با ارائه گراف) با گپ و آفست طراحی انجام شود (تحمل فشار طراحی).	
12	رفتار بار جابجایی روی پروفیل گسکت	Load & Deflection Test acc. To STUVA Recommendations	Stuva recommendation	ارائه دیاگرام آزمایش ( Load & Deflection) در آفست- های مختلف (تحمل فشار طراحی)	
13	تعیین نیروی مورد نیاز برای فشردگی گسکت در گوشه	Load–displacement behavior frame corner (hardening)	ISO 815	تعیین مقدار نیرو در گپ و آفست صفر- ارائه دیاگرام	
14	آنالیز شیمیایی	Resistance of based EPDM Sealing Gasket against chemicals	ISO 7619-1	65±5 Shore A	
			ASTM D 471-06	Change in hardness (point): +8 / -5 Change in volume (%): +8 / -1	
			مقاومت در برابر کلیه عوامل شیمیایی موجود در آب و خاک مسیر پروژه		
مقاومت نوار آب‌بند در مقابل انواع عوامل شیمیایی ناشی از تزریق دوغاب پشت سگمنت و املاح و سولفات‌های موجود در خاک و آب‌های زیرزمینی می‌بایست بررسی و کنترل شود.					
بایستی ابعاد گسکت مطابق با پروفیل طراحی شده تامین گردد.					

## ۲-۶- طرح تزریق دوغاب پشت سگمنت

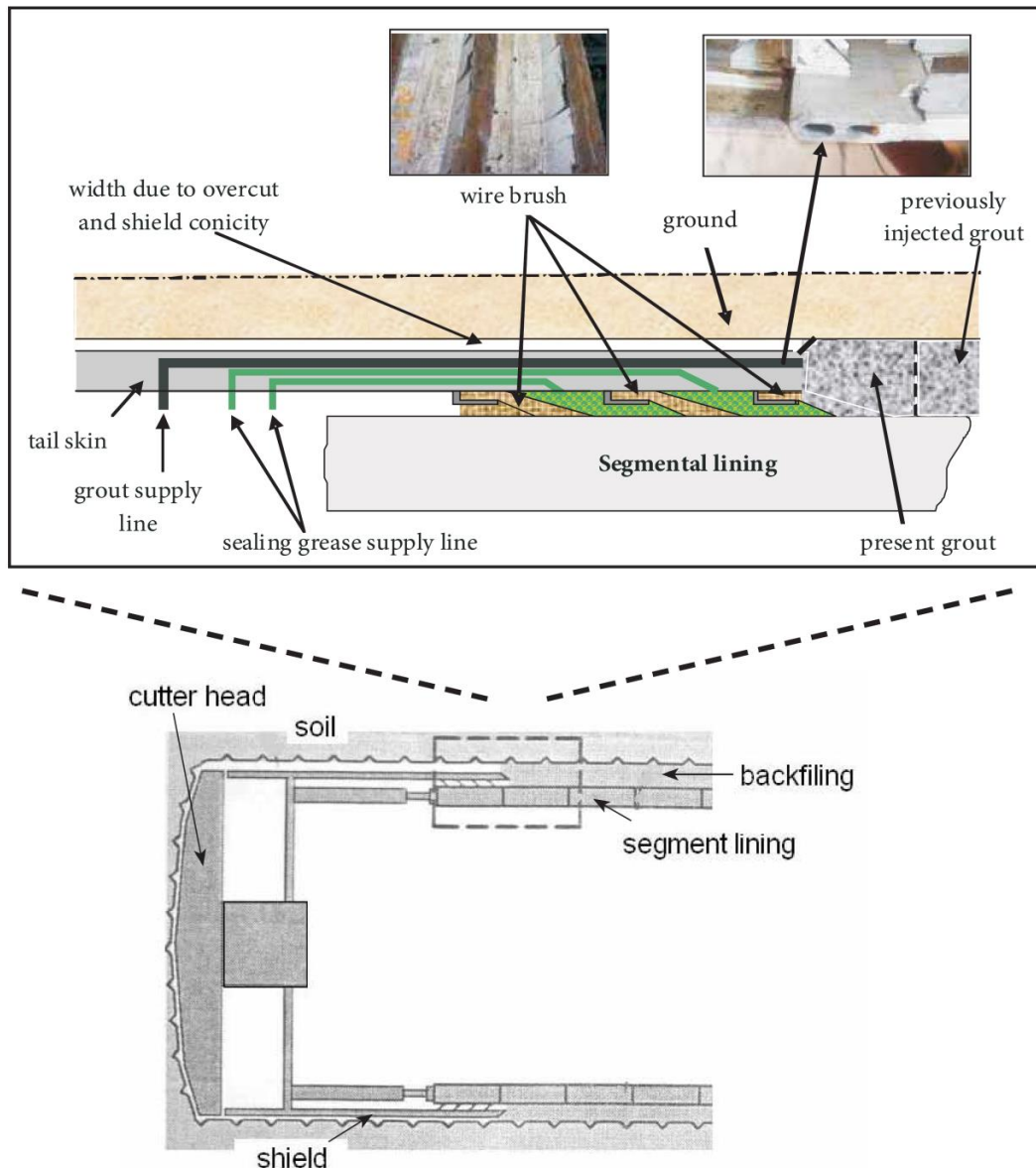
به دلیل اختلاف قطر حفاری و قطر خارجی پوشش تونل، فضای پیرامون پوشش تونل پس از عبور سپر دستگاه TBM، خالی باقی می‌ماند. عملیات لازم برای پر کردن این فضا، تزریق پر کننده (Backfill grouting) نامیده می‌شود. یکی از اجزای حیاتی و لاینفک پیشروی تونل به ویژه در محیط‌های شهری، پر کردن فضای خالی پشت سگمنت‌ها است.



هدف اصلی از تزریق دوغاب پشت سگمنت کاهش نشست سطح زمین ناشی از حفاری مکانیزه با دستگاه TBM می باشد. علاوه بر این، با اجرای صحیح دوغاب پشت سگمنت بایستی موارد زیر حاصل شود:

- سگمنت ها در جای خود محکم شده و از حرکت سگمنت ها به دلیل وزن خود، نیروهای پیشراننده دستگاه و تنش های ایجاد شده توسط TBM جلوگیری شود.
- سگمنت ها قادر به تحمل وزن سیستم پشتیبان دستگاه TBM بوده و از نشست آن جلوگیری شود.
- از نیروی شکست و تبدیل آن به یک نیروی مقاوم و همگن در اطراف رینگ جلوگیری شود.
- آب بندی تونل به همراه گسگت ها تکمیل شود. جهت دستیابی به این مهم، رعایت موارد زیر ضروری است:
  - برای جلوگیری از ایجاد خلاء در فضای پشت سگمنت بایستی دوغاب همزمان با پیشروی دستگاه TBM و به طور مداوم به فضای پشت سگمنت تزریق شود (شکل ۲-۷).
  - از سیستم انتقال مناسب دوغاب اطمینان حاصل شود. طرح دوغاب بایستی طوری انتخاب شود که در زمان پمپ کردن دچار آب انداختگی نشده و لوله ها را مسدود نکند.
  - گیرش دوغاب بایستی به نحوی باشد که پس از تزریق به پشت سگمنت از شستگی آن توسط جریان آب جلوگیری شود. از طرفی گیرش اولیه نباید باعث گیرش لوله های تزریق شود.
  - عملیات تزریق تا رسیدن به فشار مناسب که در ارتباط با فشار جبهه کار است، ادامه یابد.





شکل ۲-۷: تزریق دوغاب پشت سگمنت همزمان با پیشروی

بنابراین تزریق و پر کردن مؤثر، مناسب و کامل فضای خالی پشت سگمنت‌ها باعث به حداقل رسیدن نشست سطحی، تثبیت رینگ سگمنتی در جای خود و تأمین پایداری پوشش تونل در بلند مدت و در شرایط معمولاً اشباع زمین خواهد شد. از این رو لازم است نوع دوغاب، روش تزریق، مصالح مورد استفاده و پارامترهای کنترلی مناسب با شرایط زمین‌شناسی و هیدرولوژی منطقه انتخاب شود.

#### - انواع دوغاب پر کننده پشت سگمنت

انتخاب نوع دوغاب و ویژگی‌های آن باید با توجه به جنس و شرایط خاک مسیر تونل انجام شود. بر این اساس انواع دوغاب (یا ملات) به منظور تزریق پشت سگمنت در گذر زمان و با پیشرفت تکنولوژی به چهار نوع زیر تقسیم می‌شود:



- ملات بدون سیمان (Inert mortar)؛
- ملات با سیمان کم (Mortar with low cement)؛
- دوغاب با پایه سیمان (Cement based mortar)؛
- دوغاب دوجزئی (2- Component Grout).

در حال حاضر، در پروژه‌های تونل سازی شهری متناسب با نیاز پروژه و مشخصات زمین شناسی از ملات‌های با سیمان کم (دوغاب تک جزئی) و دوغاب‌های دو جزئی استفاده می‌شود. در جدول (۶-۲) دوغاب‌های تک جزئی و دو جزئی از نظر برخی قابلیت‌ها و ویژگی‌ها مقایسه شده‌اند. مقایسه زیر بسته به شرایط پروژه ممکن است تغییر کند.

جدول ۶-۲: مقایسه دوغاب تک جزئی و دو جزئی

GROUT TYPE ADVANTAGES CHART		
CONSIDERATION	SINGLE COMPONENT	TWO - COMPONENT
Strength	X	
Cost	X	
Transportation		X
Groundwater		X
Early Set Time		X
Early Support		X
Fluidity		X
Batching		X
Maintenance		X

دوغاب دو جزئی با استفاده از جزء A (سیمان، رس و یا بنتونیت، آب، افزودنی‌های اضافی) و جزء B (فعال کننده)، پس از مخلوط کردن دو ماده، دوغاب در چند ثانیه به حالت پلاستیک درآمده و تا حدود نیم ساعت در این حالت باقی بماند. سپس شروع به سفت شدن نموده و در عرض یک ساعت به مقاومت فشاری ۰/۰۵ تا ۰/۱ مگاپاسکال و تا ۲۴ ساعت بعد به مقاومت ۰/۵ تا ۰/۹ مگاپاسکال رسد. زمان ژل شدن و سفت شدن بر اساس نیازمندی‌های پروژه تغییر می‌کند (توجه به این نکته ضروری است که مقاومت نهایی دوغاب پر کننده پشت سگمنت می‌بایست اندکی بیشتر از واحدهای خاکی دربرگیرنده تونل باشد و افزایش بیشتر باعث افزایش هزینه‌های تولید دوغاب می‌شود که ضرورتی در آن نمی‌باشد). اگر هر دو جز با هم از طریق یک لوله تزریق شوند موجب بسته شدن لوله به دلیل زمان سفت شدن کوتاه می‌شود. بنابراین باید از دو مکانیزم برای سیستم تزریق استفاده کرد، یکی برای مخلوط کردن دو جز، درست قبل از ورود به فضای خالی پشت سگمنت و یکی برای تمیز کردن لوله.



دوغاب تک جزیی در حدود ۴ تا ۵ ساعت برای گیرش به زمان نیاز دارد و در حدود ۱۲ تا ۲۴ ساعت طول می‌کشد تا به مقاومت فشاری ۰/۰۵ تا ۰/۱ مگاپاسکال برسد. در طول این مدت دوغاب می‌تواند توسط آب زیرزمینی شسته شود بنابراین لازم است احتیاط‌های لازم در خصوص استفاده از آن در نظر گرفته شود.

دوغاب دو جزیی می‌بایست در مدت زمان ۶ تا ۱۲ ثانیه به حالت ژل مانند در بیاید. زمان ژل شدن می‌تواند به صورت شیمیایی با تغییر مقدار سیلیکات سدیم مستقیماً از درون TBM تغییر کند.

دوغاب تک جزیی به راحتی در لوله‌های تزریق گیر می‌کند و خطوط بایستی به صورت متناوب تمیز شود. دوغاب تزریق شده به راحتی قابلیت کارکرد خود را با اضافه کردن مواد دیرگیر شیمیایی از دست می‌دهد مخصوصاً در توقف طولانی مدت حفاری؛ به این دلیل نمی‌تواند مدت زمان زیادی در داخل تانکر ذخیره باقی بماند.

با توجه به موارد اشاره شده و اینکه هدف اصلی از تزریق دوغاب پر کننده پشت سگمنت، کاهش نشست سطح زمین در محیط‌های شهری می‌باشد، استفاده از دوغاب دو جزیی در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه در شرایطی که تراز پروژه پایین‌تر از تراز سطح ایستابی قرار دارد، نسبت به دوغاب تک جزیی ارجحیت دارد؛ اما در صورت عدم وجود آب‌های زیرزمینی با توجه به هزینه کمتر دوغاب تک جزیی، استفاده از این نوع دوغاب در پروژه‌ها صرفه اقتصادی خواهد داشت. با این وجود انتخاب نوع سیستم تزریق (تک جزیی و دو جزیی) می‌بایست بر اساس شرایط پروژه، خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و سایر پارامترهای موثر به صورت دقیق و کارشناسی شده انتخاب شود.

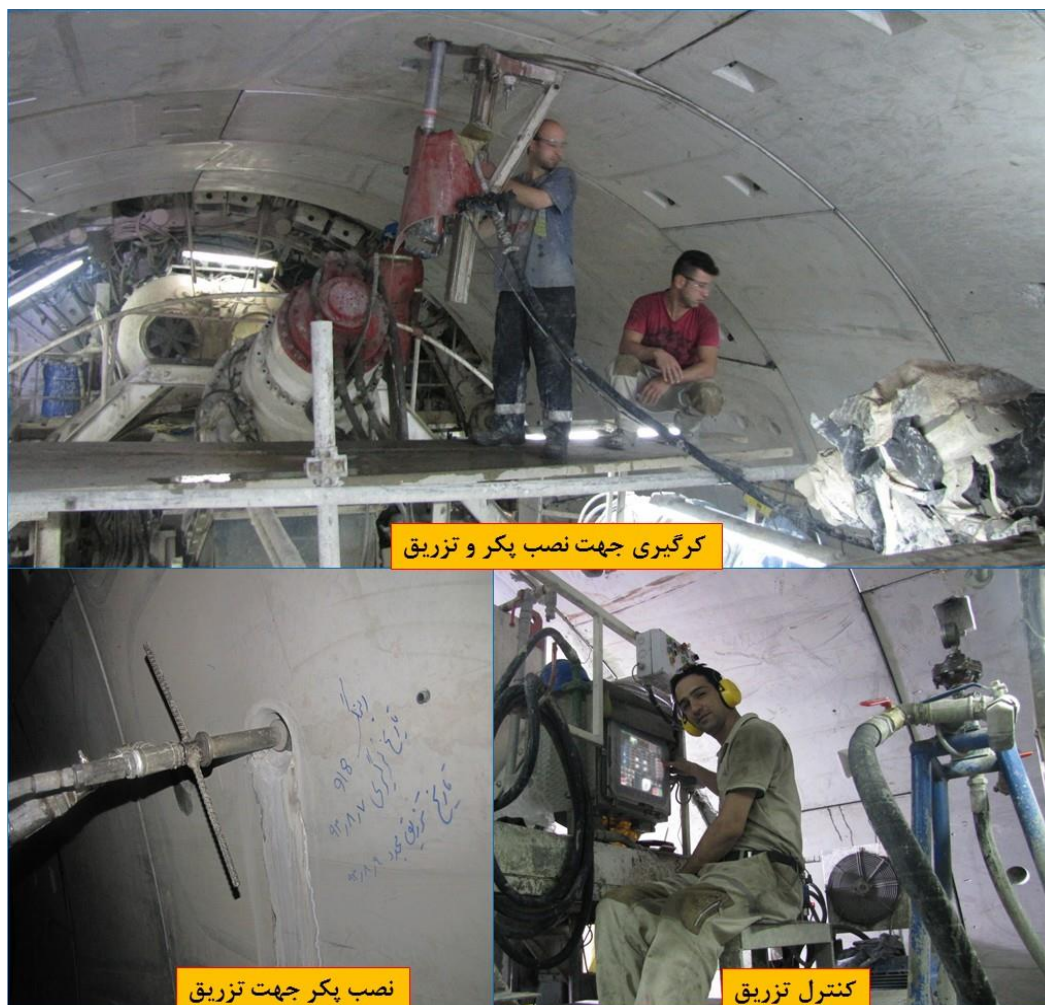
#### - انواع روش تزریق دوغاب پر کننده پشت سگمنت

از نظر روش تزریق، به طور کلی دو روش عملی وجود دارد:

(۱) تزریق به صورت شعاعی از داخل سگمنت‌ها

این روش در شرایط حفاری در زیر تراز آب‌های زیرزمینی و در زمین‌های نفوذپذیر به منظور اطمینان از پر شدن کامل فضا و خارج شدن آب از اطراف رینگ انجام می‌شود. در این روش تا زمانی که رینگ سگمنتی از محدوده داخل سپر دستگاه TBM خارج نشده و از سیستم آب‌بندی سپر عبور نکند، امکان تزریق وجود ندارد. در این شرایط، در زمین‌های ناپایدار، پیش از این که امکان تزریق فراهم شود، زمین به داخل این فضا ریزش کرده و باعث نشست خواهد شد. به همین دلیل از این روش در تونل‌های شهری نباید به عنوان روش تزریق اصلی استفاده شود و صرفاً می‌توان از این روش برای تزریق‌های ثانویه استفاده کرد (شکل ۲-۸).





شکل ۲-۸: تزریق ثانویه جهت جبران کاستی های طرح تزریق دوغاب پشت سگمنت

۲) تزریق به صورت طولی از انتهای سپر دستگاه TBM، همزمان با پیشروی تونل برای حل مشکل نشست سطح زمین در روش تزریق از طریق سگمنت ها، لوله های تزریق در داخل پوسته سپر دنباله تعبیه شده و تزریق به صورت طولی از انتهای سپر انجام می شود. به این ترتیب امکان تزریق بلافاصله و همزمان با پیشروی سپر فراهم می شود. با توجه به احتمال گرفتن مجاری تزریق و برای جلوگیری از اختلال در عملیات تزریق، اغلب در کنار هر یک از مجاری تزریق اصلی (در بدنه سپر)، برای جلوگیری از توقف حفاری، یک مجرای رزرو نیز در نظر گرفته می شود.

#### - ویژگی های لازم برای دوغاب و مواد پرکننده

در حین طراحی روش و طرح اختلاط دوغاب لازم است ملاحظات اجرایی برای کارپذیری و تزریق دوغاب، تأثیرگذاری کافی با توجه به میزان نشست سطحی و تأثیر بر فرایند حفاری و سگمنت گذاری و همچنین ملاحظات اقتصادی و در دسترس بودن و صرفه اقتصادی مصالح و افزودنی های مورد نیاز، مورد توجه قرار گیرد.



برخی ملاحظات و الزامات برای اینکه دوغاب قابلیت حمل، پمپ کردن و تزریق مناسب داشته باشد به شرح زیر می‌باشد.

- قابلیت پمپ شدن از میکسر یا همزن به محل تزریق؛
  - کارپذیری بالا در زمان حمل و در حین نگهداری در میکسر (با توجه به فاصله بچینگ تا جبهه کار و توقفات و تأخیرات حین حفاری و تزریق، این زمان ممکن است تا ۴۸ ساعت باشد)؛
  - پایایی دوغاب در زمان نگهداری، حمل و تزریق به طوری که دچار آب انداختگی، جدا شدگی و ته نشست نشود؛
  - جریان یکنواخت در حین تزریق؛
  - قابلیت پمپ شدن در لوله‌های نسبتاً باریک و مسیرهای طولانی؛
- این موارد برای فراهم شدن امکان پیشروی مناسب و به منظور پیشگیری از گیر کردن لوله‌ها و مجاری تزریق یا عملکرد نامناسب سیستم تزریق لازم است. برای اینکه عملیات تزریق دارای کارایی مورد نظر باشد، دوغاب تزریق باید موارد زیر را نیز پوشش دهد.
- فضای خالی پیرامون پوشش را به طور کامل پر کند.
  - ساینده‌گی کم مصالح
  - مقاوم در برابر آب بردگی

#### - فاکتورهای کنترلی تزریق دوغاب پشت سگمنت

حجم دوغاب تزریق شده به ازای هر رینگ پیشروی ماشین باید متناسب با حجم تئوری فضای پیرامون پوشش تونل باشد. این حجم برابر است با:

$$V_{Void} = \frac{\pi}{4} * (D_{2Exc} - D_{2ex-lin}) * L_{Ring}$$

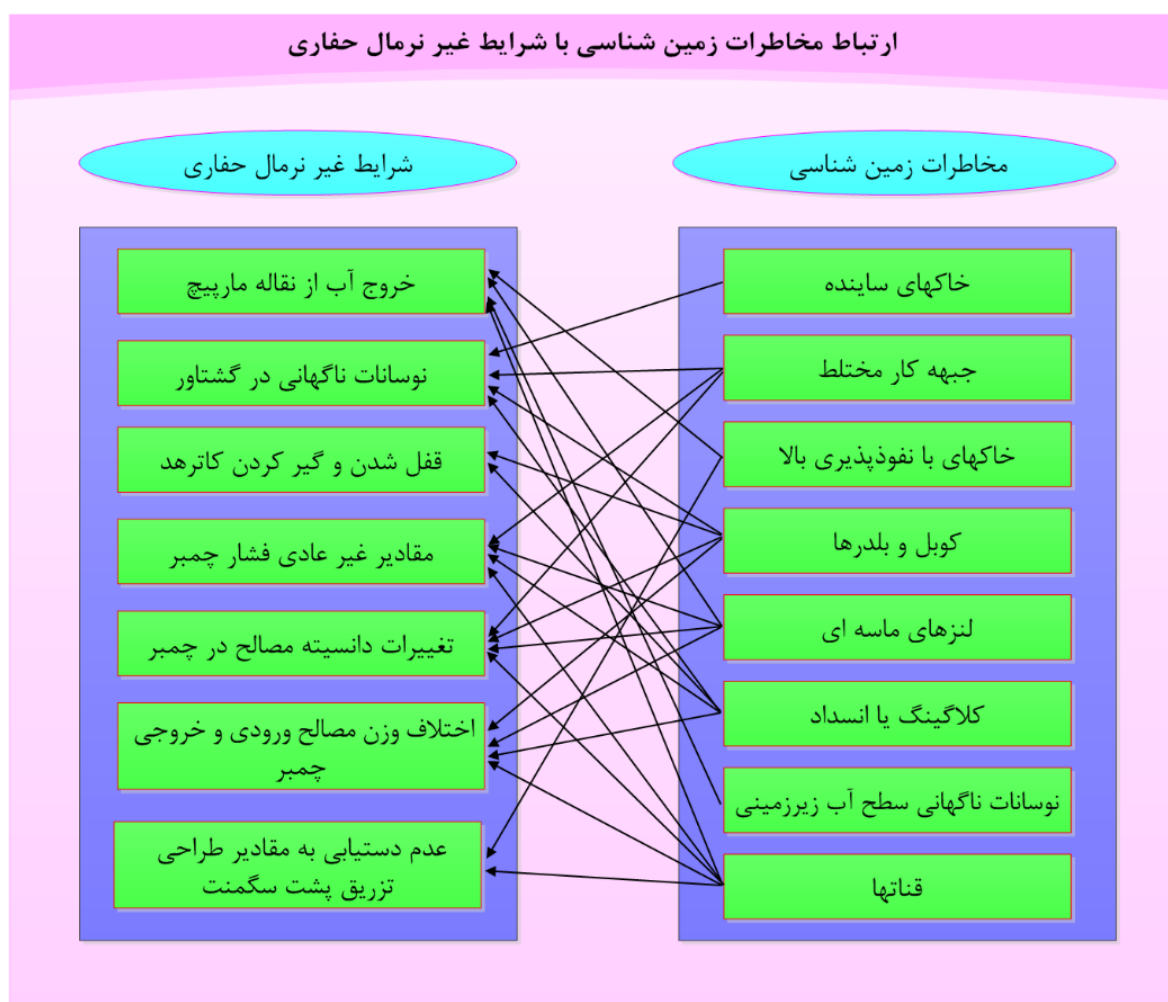
که  $V_{Void}$  حجم فضای خالی که باید پر شود،  $D_{Exc}$  قطر حفاری،  $D_{ex-lin}$  قطر خارجی پوشش تونل و  $L_{Ring}$  طول رینگ می‌باشد. با توجه به اینکه عملیات تزریق دوغاب با فشار انجام می‌گیرد، لازم است ۱۳۰ تا ۱۷۰ درصد حجم تئوری فضای خالی پشت سگمنت دوغاب تزریق شود. مقدار فشار تزریق نیز اندکی بیشتر از فشار جبهه کار می‌باشد که این مقدار، ۵۰ تا ۱۰۰ کیلو نیوتن بر متر مربع بیشتر از فشار جبهه کار در نظر گرفته می‌شود.

## ۷-۲- مخاطرات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی

امروزه بیش از ۹۰ درصد TBMهای مورد استفاده در محیط‌های شهری از نوع EPB-TBM می‌باشند لذا مخاطرات بالقوه زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی که در رابطه با این نوع ماشین‌ها (و حتی ماشین‌های Slurry) وجود دارد، باید بررسی شوند. به طور کلی این نوع مخاطرات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:



- رفتار چسبناکی (Sticky Behavior) و خطر گل گرفتگی (Clogging risk) خاک؛
  - ساینده گی خاک؛
  - نفوذپذیری خاک؛
  - وجود قطعات سنگی بزرگ (Cobbles and Boulders)؛
  - درصد ذرات ریزدانه؛
  - روانگرایی خاک؛
  - نوسان آب زیرزمینی.
- در شکل (۹-۲) ارتباط و تأثیر مخاطرات زمین شناسی با شرایط غیر نرمال حفاری مکانیزه نشان داده شده است.



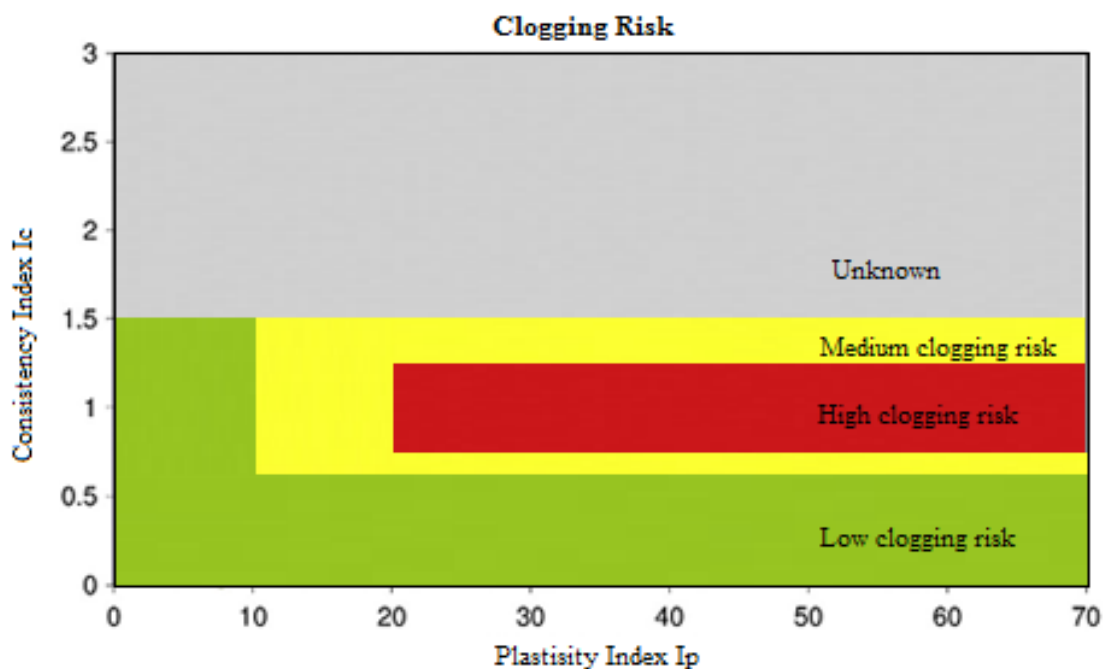
شکل ۹-۲: ارتباط مخاطرات زمین شناسی و شرایط غیر نرمال حفاری مکانیزه

در ادامه توضیحاتی مختصر در خصوص هر یک از موارد فوق ارائه شده است. لازم به ذکر است، لازم است با توجه به شرایط پروژه و مشاهدات حین اجرا، موارد ارائه تدقیق گردند.



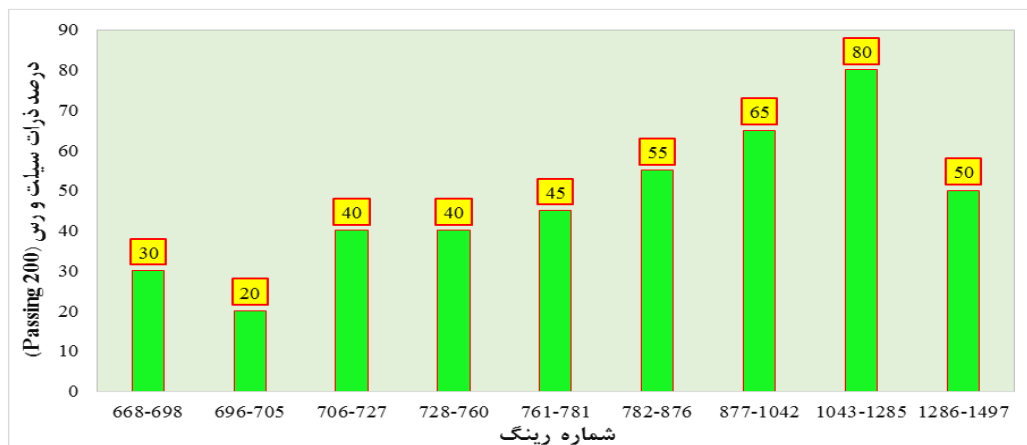
۱) رفتار چسبناکی (Sticky Behavior) و خطر گل گرفتگی (Clogging risk) خاک بر اساس دیاگرام‌های موجود، پتانسیل خطر گل گرفتگی بر مبنای شاخص استحکام ( $I_c$ ) و شاخص خمیری ( $I_p$ )، ارزیابی و دسته‌بندی می‌شود (شکل ۲-۱۰)؛ علاوه بر این با انجام بازدیدهای ادواری از جبهه کار تونل و همچنین ازبیلت مصالح حفاری شده می‌توان مقدار ذرات دانه ریز سیلت و رس را در هر دوره بررسی و خطر وقوع پدیده کلاگینگ را پیش‌بینی نمود. شکل (۲-۱۱) نمونه‌ای از تغییرات درصد ریزدانه‌ها براساس شماره رینگ‌های حفاری شده در دوره‌های مختلف حفاری در یک تونل را نشان می‌دهد. از این‌رو لازم است در زمان مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک، پارامترهای مذکور جهت برآورد پتانسیل وقوع خطر گل گرفتگی محاسبه شوند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود احتمال وقوع پدیده کلاگینگ در محدوده رینگ‌های ۱۰۴۳ تا ۱۲۸۵ بسیار بالا می‌باشد، همچنین در محدوده رینگ‌های ۸۷۷ تا ۱۰۴۲ نیز توجه به خطر کلاگینگ ضروری است. نکته قابل ذکر اینکه در هر دوره می‌بایست بازدیدهای ادواری و تهیه ازبیلت‌های روزانه زمین‌شناسی به‌صورت منظم انجام پذیرد تا بتوان در مورد وقوع و یا عدم وقوع پدیده کلاگینگ اظهار نظر کرد.



شکل ۲-۱۰: دیاگرام برآورد پتانسیل خطر گل گرفتگی





شکل ۲-۱۱: تغییرات درصد ریزدانه‌ها براساس شماره رینگ‌های حفاری شده در دوره‌های مختلف

در مواقعی که پدیده کلاگینگ مشاهده می‌شود، ماشین باید متوقف شده و کاترهد و چمبر کاملاً تمیز شوند. برای این اساس بایستی جدول زمانی به منظور بازدید ادواری ابزارها و بخش‌های مختلف ماشین که در تعامل مستقیم با خاک حفاری شده قرار دارند در دستور کار قرار گیرند و این برنامه با استفاده از تجربیات کارگاهی تدقیق شود. شکل (۲-۱۲) نمایی از تمیزکاری چمبر و چک کردن لاین‌های فوم را نشان می‌دهد. شایان ذکر است در زمان‌های توقف ماشین EPB-TBM و در مواقعی که به عملیات هایپرباریک نیاز نمی‌باشد چمبر از مصالح حفاری تخلیه شده و عملیات تمیزکاری آغاز گردد، همچنین در حین عملیات تمامی لاین‌های فوم نیز چک شده و از عدم انسداد آنها اطمینان حاصل شود.



شکل ۲-۱۲: نمایی از عملیات تمیزکاری و چک کردن لاین‌های فوم



## ۲) سایندگی خاک

با توجه به شرایط کار ماشین‌های حفار و تماس دائم و کامل بخش‌های مختلف کله‌حفار ماشین، محافظه حفاری و نقاله ماریپیچ با خاک، در صورت حفاری در خاک‌های ساینده، امکان فرسایش و آسیب دیدن این بخش‌های ماشین وجود دارد. سایندگی خاک تابع جنس، ابعاد و شکل دانه‌های خاک است. خاک‌های درشت‌دانه با دانه‌های تیز گوشه، به‌ویژه در صورت وجود کانی‌های ساینده مانند کوارتز، دارای ساینده‌گی زیاد هستند. ارزیابی سایش ابزار برش اغلب از محاسبه فاکتورهای عملکرد ماشین سخت‌تر و مشکل‌تر است. دلیل این ادعا این است که از یک سو سایش و خوردگی کاملاً و قطعاً توسط قابلیت ساینده‌گی مصالح تشکیل دهنده جبهه‌کار کنترل می‌شود و از سوی دیگر این پدیده به پیچیدگی اندرکنش بین زمین، چیدمان و جنس ابزار برش نیز مربوط می‌شود. بر این اساس عوامل تأثیرگذار بر سایش ابزار در تونلسازی مکانیزه با ماشین‌های EPB-TBM را می‌توان به‌صورت شکل (۲-۱۳) خلاصه نمود.

از آنجایی که روش مشخص و جامعی برای برآورد پتانسیل ساینده‌گی خاک‌ها وجود ندارد، جهت ارزیابی اولیه می‌توان از دیاگرام‌های موجود استفاده کرد. محققین در طی سالیان گذشته از میان آزمایش‌های مخصوص ساینده‌گی خاک، با استفاده از آزمایش LCPC در آزمایشگاه، ساینده‌گی مصالح خاکی را مورد بررسی قرار دادند و سپس نتایج به‌دست آمده را در یک دیاگرام به‌صورت روابط همبستگی درج کردند. در این دیاگرام، متوسط اندازه ذرات یا همان  $D_{50\%}$  در مقابل ضریب ساینده‌گی آزمایش LCPC (LAC) ترسیم شده است. شکل (۲-۱۴) دیاگرام مذکور را نشان می‌دهد. در این دیاگرام با مشخص بودن مقادیر  $D_{50\%}$  و همچنین نوع و جنس خاک (با استفاده از نتایج آزمایش پتروگرافی) می‌توان پتانسیل ساینده‌گی خاک را رده‌بندی کرد و مقدار ضرایب ساینده‌گی LCPC و CAI را نیز برآورد نمود.

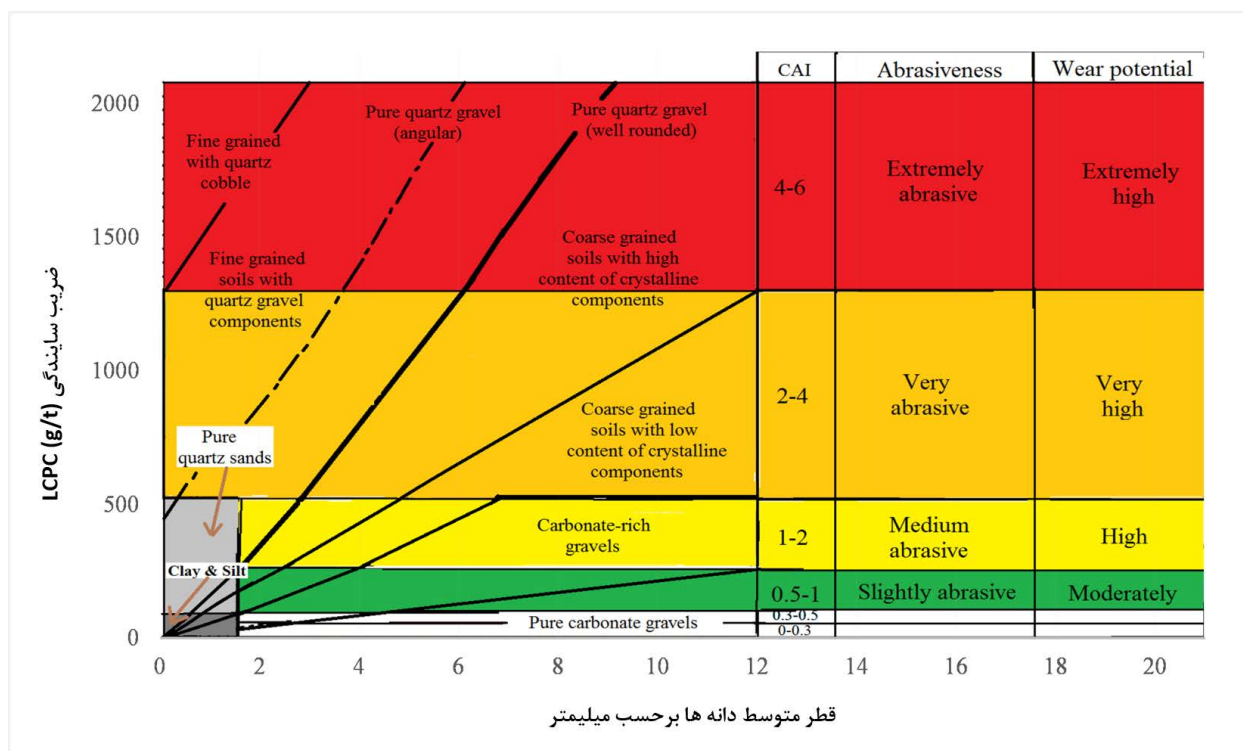
با توجه به احتمال وجود قطعات سنگی بزرگ در واحدهای خاکی، لازم است پتانسیل ساینده‌گی این قطعات نیز برآورد شود. از این‌رو در صورت برخورد با این قطعات در زمان مطالعات زمین‌شناسی و یا در حین حفاری، می‌بایست آزمایش سرشار (Cerchar) بر روی آنها انجام شود و مقدار ضریب CAI و پتانسیل ساینده‌گی قطعات سنگی بر اساس دیاگرام ارائه شده در شکل (۲-۱۵) برآورد گردد.



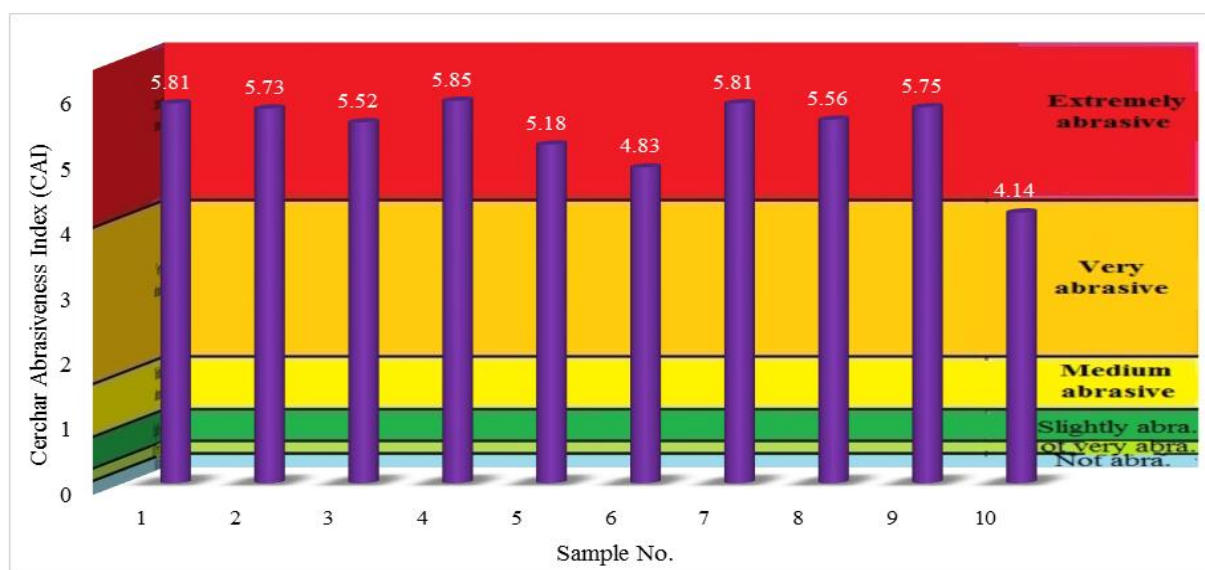


شکل ۲-۱۳: فاکتورهای مؤثر بر سایش ابزارهای برش و ماشین EPB-TBM





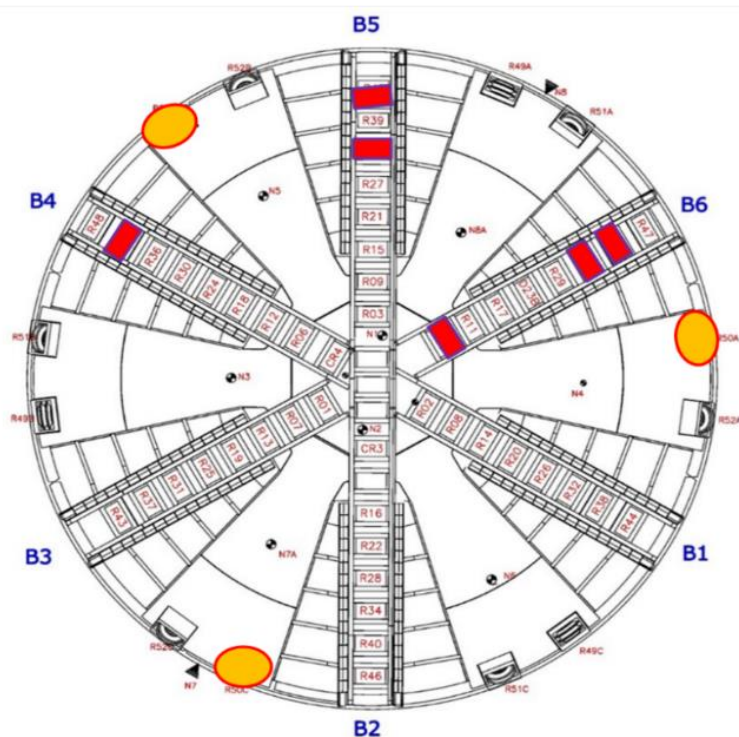
شکل ۲-۱۴: دیاگرام برآورد پتانسیل سایندگی خاک‌ها در مسیر تونل



شکل ۲-۱۵: دیاگرام برآورد پتانسیل سایندگی قطعات سنگی بر اساس آزمایش سرشار - بر اساس داده‌های واقعی



از آنجایی که سایش و خوردگی ابزارهای برش در عملکرد ماشین EPB-TBM تأثیر مستقیم خواهند داشت، لذا ثبت و بررسی ابزارهای تعویض شده در فرمت‌های مشخص ضروری می‌باشد. ثبت شماره و موقعیت ابزار برش تعویض شده باعث آگاهی از وضعیت کلیه ابزارهای برش و داشتن برنامه برای تعویض سایر ابزار برش می‌شود. در شکل (۲-۱۶) تصویر شماتیک از موقعیت ابزار برش تعویض شده بر روی کاترهد ماشین در یک دوره ارائه شده است. شکل‌های (۲-۱۷) و (۲-۱۸) نیز به ترتیب نمونه‌ای از عملیات تعویض ابزارهای برشی و ابزارهای برش تعویض شده از قبیل دیسک‌ها و رپرها را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار سایش هر کدام از ابزارهای برش به وسیله شابلون‌های مخصوص اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. نکته قابل ذکر اینکه سایش بیش از اندازه هر کدام از ابزارهای برش موجب تسریع در افزایش سایش آنها و حتی سایش بر روی بدنه کاترهد ماشین خواهد شد؛ لذا داشتن مبنایی برای تعویض ابزارهای برشی با توجه موقعیت نصب آنها بر روی بدنه کاترهد ضروری خواهد بود. در نهایت اینکه، بهسازی صحیح مصالح و تنظیم بهینه پارامترهای اپراتوری ماشین از جمله راهکارهای کاهش سایش ابزارهای برش و سایر بخش‌های دستگاه است که در تماس مستقیم با زمین قرار دارند.



شکل ۲-۱۶: تصویر شماتیک از موقعیت ابزار برش تعویض شده در یک دوره





شکل ۲-۱۷: عملیات تعویض ابزارهای برشی در داخل چمبر



شکل ۲-۱۸: ابزارهای برش تعویض شده در یک دوره



### ۳) نفوذپذیری خاک

نفوذپذیری زمین یکی دیگر از فاکتورهای بسیار مهم در عملکرد ماشین های EPB و Slurry می باشد. ضریب نفوذپذیری به همراه فشار آب زیرزمینی یکی از فاکتورهایی است که در خاک های دانه ای عملکرد ماشین را کنترل می نماید؛ به طوری که عملکرد ماشین های EPB در فشار آب حداکثر ۲ بار، به ضریب نفوذپذیری  $10E-5$  متر بر ثانیه محدود می شود. در خاک های با نفوذپذیری بالا ممکن است مشکلاتی در تثبیت فشار جبهه کار و خروج آب از نقاله مارپیچ بروز دهد. مقدار  $10E-5$  متر بر ثانیه مرز انتخاب ماشین های EPB و Slurry می باشد؛ به گونه ای که ماشین های EPB برای مقادیر نفوذپذیری کمتر از این مقدار مناسب تر می باشند. برای مقادیر بیشتر، لازم است از انواع مواد افزودنی جهت کاهش نفوذپذیری و کنترل جریان آب استفاده کرد. از این رو با توجه به اهمیت مقدار نفوذپذیری واحدهای خاکی، لازم است مقدار این پارامتر در زمان مطالعات زمین شناسی بر اساس آزمایش لوفران اندازه گیری شود. در صورت نیاز آزمایش های تکمیلی جهت تعیین ضریب نفوذپذیری مجاز می باشد.

بنابراین در فواصلی که زمین دارای نفوذپذیری بالایی می باشد باید آمادگی برای ورود احتمالی آب از نقاله مارپیچ و حفاری در شرایط غیر نرمال را داشت. همچنین در خاک های با نفوذپذیری بالا ممکن است مشکلاتی در تثبیت فشار جبهه کار و افزایش حجم دوغاب تزریق پشت سگمنت ایجاد شود که با توجه به اهمیت موضوع، می بایست تغییرات فشار جبهه کار در دو حالت بیشتر و کمتر از مقدار طراحی شده مورد بررسی قرار گیرد:

الف) در شرایطی که فشار جبهه کار از حد بالای در نظر گرفته شده تجاوز کند اقدامات زیر باید انجام شود:

- سرعت چرخش کاترهد کاهش داده شود.
- به منظور کاهش نرخ نفوذ، باید نیروی تراست کاهش یابد.
- افزایش نرخ تزریق فوم در حالی که سرعت تخلیه مصالح ثابت نگه داشته شده است.
- در صورتی که با این اقدامات فشار به حالت عادی برنگردد، موضوع باید به اطلاع مسئول راهبری ماشین رسانده شده و با نظر مسئول راهبری حفاری متوقف شود.

ب) در شرایطی که فشار جبهه کار از حد پایین طراحی کمتر شود، باید اقدامات زیر در دستور کار تیم حفاری قرار گیرد:

- در اولین گام باید به منظور بالابردن فشار تا حد طراحی، اقدام به تزریق بنتونیت به چمبر در حین حفاری شود.
- در صورت عدم افزایش فشار به مقدار مورد نظر، حفاری متوقف شده و دریچه تخلیه نقاله مارپیچ بسته شود.
- تزریق بنتونیت و پلیمر تا رسیدن فشار به حد طراحی ادامه یابد.
- شروع مجدد حفاری باید با نظر مسئول راهبری باشد.

لازم به یادآوری است، کلیه راه حل های فوق الذکر بسته به مشخصات و شرایط پروژه می تواند تغییر کند.

### ۴) وجود قطعات سنگی بزرگ

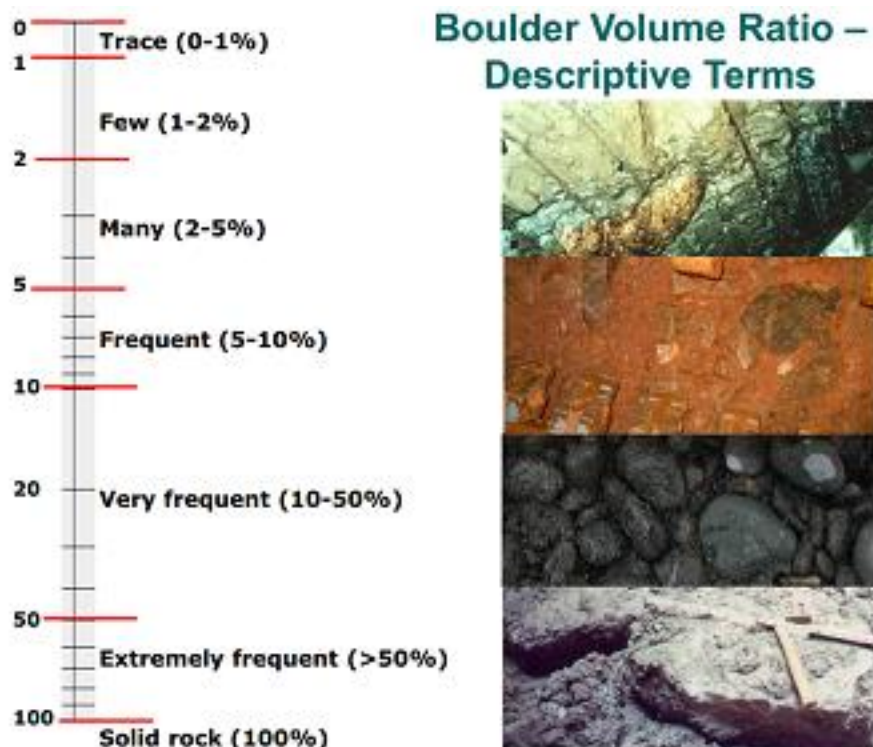
قطعات سنگی بزرگ شامل کوبل و بولدر به وفور در تونل هایی که در محیط خاکی حفاری می شوند، یافت می شوند. وجود این قطعات سنگی در جبهه کار تونل مکانیزه تمام مقطع باعث کاهش نرخ پیشروی، آسیب کله حفار و سایش ابزار



برش می‌شود. به‌طور کلی، زمانی که ماشین حفار با قطعات سنگی بزرگ مواجه گردد، رفتار متقابل ماشین و بولدرها می‌تواند به شرح ذیل باشد:

- اگر ابعاد بولدرها متناسب با بازشوهای کله‌حفار و گام نقاله مارپیچ باشد، می‌تواند توسط ماشین حفاری شده و به داخل محفظه حفاری بلعیده شود؛
  - اگر با توجه به مشخصات ماشین، ابعاد بولدرها برای حفاری بزرگ بوده و همچنین زمین دربرگیرنده بولدرها نیز سفت (Firm) باشد، امکان خرد شدن آن (با توجه به ابزارهای برش، جنس و مقاومت بولدرها) توسط ماشین وجود دارد؛
  - اگر ماتریکس یا خاک دربرگیرنده بولدرها ضعیف باشد، بولدرها از جای خود کنده شده و ممکن است که به‌وسیله کله‌حفار به بیرون از محدوده تونل هل داده شود و یا ممکن است که در محدوده جبهه‌کار باقی بماند و در بعضی مواقع همراه با کله‌حفار دوران نماید، در چنین مواقعی گشتاور ماشین به‌طور غیر عادی بالا خواهد رفت و سرانجام پیشروی ماشین متوقف می‌گردد. در این مواقع بولدرها باید به‌صورت دستی خرد شده و یا از مسیر ماشین برداشته شوند. در این شرایط امکان اضافه حفاری و نشست زمین نیز وجود دارد.
- از این رو لازم است در زمان مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، با استفاده از اطلاعات گمانه‌ها، چاهک‌های دستی و بازدیدهای میدانی، ابعاد، مشخصات پتروگرافی و ساینده‌گی قطعات سنگی بزرگ اندازه‌گیری و برآورد شوند. همچنین توصیه می‌شود جهت تکمیل اطلاعات از ارزیابی‌های زمین‌شناسی سایر پروژه‌های مشابه در منطقه (یکسان از نظر موقعیت جغرافیایی) نیز استفاده شود. در نهایت، لازم است برآوردی از درصد حجمی بولدر (نسبت حجم بولدر به حجم مصالح حفاری) در قالب پارامتر BVR، انجام شود (شکل ۲-۱۹). قابل ذکر است ابعاد و فراوانی بولدرها در طول پروژه از فاکتورهای مهم در انتخاب مشخصات ماشین حفار (گام نوار نقاله مارپیچ، نوع و جنس ابزارهای برش، چیدمان ابزار، درصد بازشو کله‌حفار، نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار و غیره) و همچنین امکان و یا عدم امکان استفاده از نوع دستگاه حفار می‌باشد.





شکل ۲-۱۹: اصطلاحات مربوط به کمیت بولدرها

بخش هایی از مسیر که پتانسیل برخورد با کوبل و بولدر وجود دارد معمولاً در مطالعات زمین شناسی مهندسی به آنها پرداخته می شود و در طول مسیر مشخص می شوند؛ با این حال باز دیدهای ادواری از جبهه کار تونل و مصالح حفاری شده امکان پیش بینی برخورد با چنین مخاطراتی را محتمل می سازد.

در شکل (۲-۲۰) نمونه ای از کوبل های حفاری شده به وسیله ماشین EPB-TBM نشان داده شده است. همان طور که در دپو مصالح حفاری مشاهده می شود، درصد زیادی از مصالح را کوبل ها شامل می شوند که حفاری در چنین شرایط زمین شناسی موجب افزایش نرخ مصرف ابزاربرشی خواهد شد؛ علاوه بر این در صورتی که بهسازی مصالح به درستی صورت نگیرد موجب آسیب به بدنه کاترهد دستگاه خواهد شد. نکته قابل ذکر دیگر اینکه در چنین شرایطی علاوه بر بهسازی مناسب مصالح، کاهش سرعت چرخش کاترهد می تواند از آسیب های جدی به کاترهد دستگاه بکاهد.





شکل ۲-۲۰: نمایی از کوبل‌های حفاری شده توسط ماشین EPB-TBM در محل دمپ مصالح حفاری

همچنین در شکل (۲-۲۱) نیز نمایی از بولدرهای برداشته شده از روی نوار نقاله ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جنس ماتریکس دربرگیرنده بولدرها و مقاومت بولدرها به‌گونه‌ای بوده است که با چرخش کاترهد ماشین بدون شکستن و خرد شدن از جبهه کار تونل جدا شده و به داخل چمبر انتقال پیدا کرده‌اند.





شکل ۲-۲۱: نمایی از بولدرهای حفاری شده توسط ماشین EPB-TBM



## (۵) درصد ذرات ریز دانه

یک خاک ایده‌آل برای ماشین EPB-TBM، خاکی است که پس از ورود به محفظه حفار، تبدیل به یک ماده پلاستیک و خمیری با قابلیت اعمال فشار به جبهه کار، نفوذپذیری کم برای جلوگیری از زهکش شدن آب زیرزمینی و آب‌بند کردن آن، خاصیت کم چسبناکی جهت عدم انسداد کله حفار و عدم افزایش در مقدار گشتاور ماشین باشد. در اغلب خاک‌های درشت‌دانه چنین شرایطی فراهم نمی‌باشد. برای دستیابی به چنین شرایطی و ایجاد خاک خمیری شکل (مشابه خمیردندان) در محفظه حفاری و جبهه کار، در صورت استفاده از مواد افزودنی (فوم، پلیمر و بنتونیت)، کم‌ترین مقدار مصالح ریزدانه مورد نیاز ۱۰ درصد می‌باشد و در صورت عدم استفاده از مواد افزودنی، این مقدار به ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

## (۶) روانگرایی خاک

روانگرایی پدیده‌ای است که در خاک‌های ماسه‌ای اشباع به هنگام وقوع زمین‌لرزه رخ می‌دهد. برای وقوع پدیده روانگرایی، وجود خاک مستعد و بالا بودن سطح آب زیرزمینی نیاز است. در اثر وقوع زلزله تنش‌های موثر بین دانه‌ای تا حد صفر کاهش می‌یابد (تنش کل تقریباً برابر با فشار آب منفذی می‌شود) و به حالت روانگرایی می‌رسد. گام نخست در هر روش ارزیابی روانگرایی، تعیین این موضوع است که آیا استعداد روانگرایی در ساختگاه مورد نظر وجود دارد یا خیر؟ روش‌های گزینشی مختلفی برای جداسازی ساختگاه‌هایی که به‌طور مشخص نسبت به وقوع پدیده روانگرایی بی‌خطر هستند از ساختگاه‌هایی که نیاز به مطالعات تفصیلی بیشتر دارند، وجود دارد. بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و نیز مشاهدات و مطالعات محلی انجام شده، معیارهای گزینشی زیر مهم‌ترین عواملی هستند که روانگرایی را کنترل کرده و متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در ارزیابی استعداد روانگرایی بر اساس آنها تعریف می‌شوند.

- تراز آب زیرزمینی؛
- نوع خاک؛
- تراکم نسبی؛
- دانه‌بندی؛
- وضعیت زهکشی؛
- شکل ذرات؛
- سن زمین‌شناسی و خصوصیات زمین ریخت‌شناسی؛
- شرایط تاریخچه‌ای (سیمانی شدن، نسبت پیش تحکیمی و ضریب فشار جانبی)؛
- فشار همه جانبه.

مراحل اصلی ارزیابی پتانسیل روانگرایی به شرح زیر است:

- محاسبه تنش برشی تناوبی ایجاد شده در حین زلزله
- محاسبه مقاومت برشی تناوبی خاک



- مقایسه تنش برشی تناوبی با مقاومت برشی تناوبی و بدست آوردن ضریب اطمینان روانگرایی

روش های مختلفی جهت تحلیل خطر روانگرایی بر اساس دانه بندی خاک و نتایج آزمایشات SPT وجود دارد که یکی از معتبرترین روش ها روش سید و همکارانش در سال ۱۹۸۴ می باشد. علاوه بر این روش، روش هایی هم چون روش (1977) NCEER، روش Boulanger و Idriss در سال ۲۰۰۴، روش (2007) Vancouver، روش Cetin و همکارانش در سال ۲۰۰۴، روش استاندارد چین، روش استاندارد پل ژاپن، روش Tokimatsu و Yoshimi در سال ۱۹۸۳، روش (1981) Shibata و روش Kokusho و همکارانش در سال ۱۹۸۳ جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی ارائه شده اند. از این رو لازم است جهت بررسی روانگرایی در هر پروژه، از روش های ارائه شده به دقت استفاده شود تا ارزیابی روانگرایی به درستی صورت گیرد.

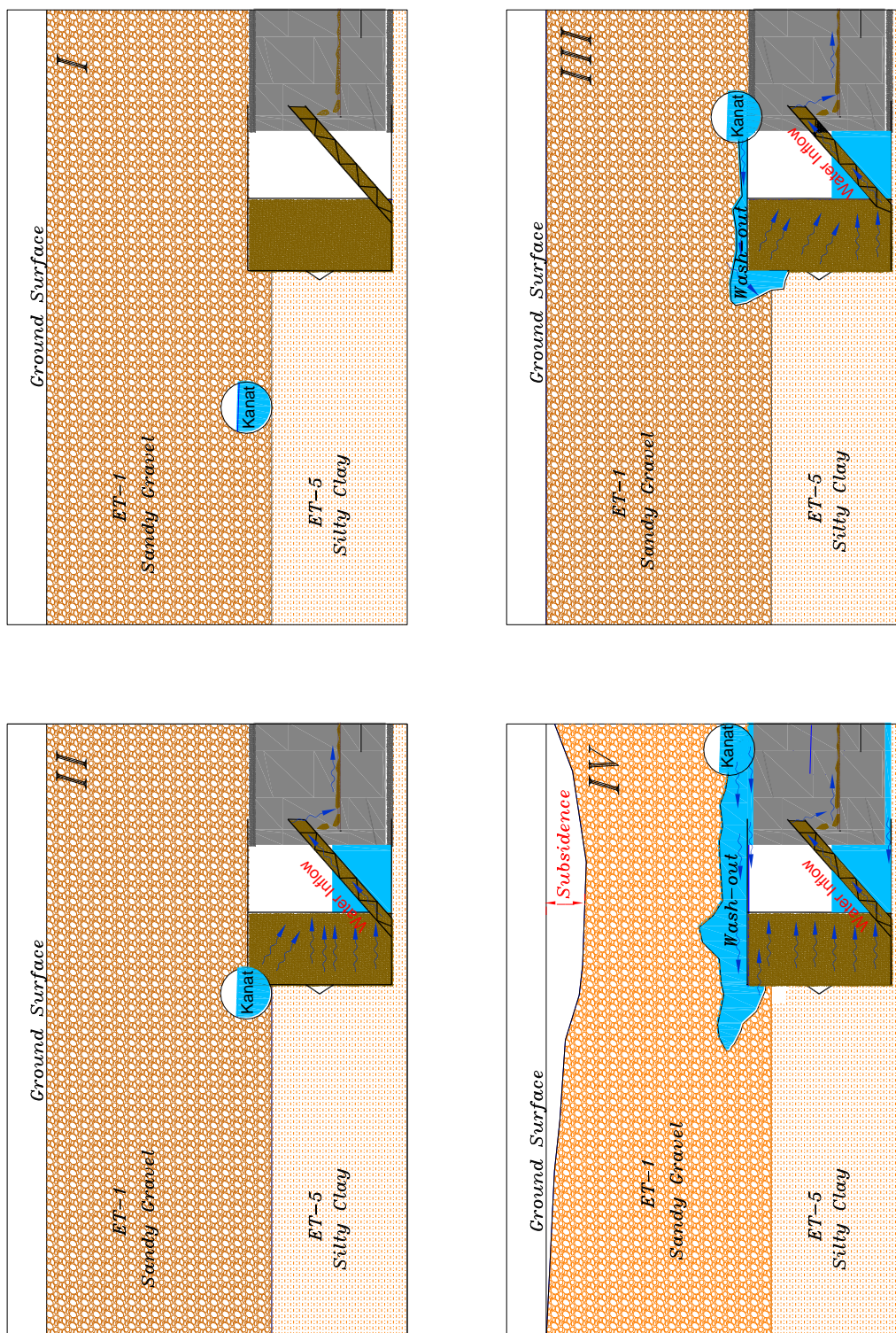
#### (۷) نوسان آب زیرزمینی

تعیین فشار جبهه کار جهت حفظ پایداری جبهه کار و جلوگیری از نشست سطح زمین یکی از مهم ترین فعالیت ها در حفاری مکانیزه با ماشین های EPB-TBM در محیط های شهری می باشد. از آنجایی که محاسبه فشار جبهه کار در ارتباط مستقیم با تراز آب زیرزمینی است، اندازه گیری مداوم و دوره ای سطح آب زیرزمینی در گمانه های حفاری شده لازم و ضروری است. از این رو لازم است در زمان مطالعات زمین شناسی، گمانه های اکتشافی تجهیز شوند تا به توان از آنها در حین اجرای پروژه استفاده کرد و تراز آب زیرزمینی را برداشت نمود.

#### (۸) برخورد تونل با قنات

بسته به موقعیت قنات ها نسبت به تونل و وضعیت آب دهی آنها، اثرات مختلفی بر فرآیند حفاری تونل با ماشین خواهند داشت که ممکن است به صورت اختلال در فشار جبهه کار، کاهش دانسیته مصالح در چمبر، خروج آب از نقاله مارپیچ، اختلال در حجم و فشار تزریق پشت سگمنت و مخاطراتی از این قبیل در حین حفاری بروز کند. در شرایطی نیز ممکن است ریزش ناگهانی قنات در بالای تونل تحت تأثیر حفاری تونل باعث وارد شدن بارهای ناگهانی و نامتقارن بر پوشش سگمنتی تونل شده و سبب آسیب دیدن پوشش تونل شود. در صورتی که قنات با فاصله کم و در تراز پایین تر از تونل قرار داشته باشد ممکن است باعث انحراف ماشین از مسیر طراحی شده گردد. همچنین در صورت برخورد تونل با قنات های احتمالی موجود در مسیر، احتمال آب شستگی خاک اطراف سگمنت ها بسیار زیاد خواهد بود. با توجه به اثرات احتمالی مختلفی که قنات ها بر روی حفاری تونل خواهد داشت و بسته به موقعیت آنها نسبت به تونل، راهکارهای مختلفی جهت عبور از آنها از قبیل انحراف مسیر قنات، پر کردن آنها، بهسازی خاک اطراف قنات باید در نظر گرفت. با توجه به اهمیت این موضوع و لزوم شناسایی دقیق موقعیت و شرایط هر رشته قنات و اثرات احتمالی آنها بر تونل، به منظور اتخاذ راهکار مناسب، علاوه بر استفاده از مطالعات اولیه پروژه، همواره باید در طول پیشروی تونل رشته قنات ها شناسایی شوند تا از مخاطرات احتمالی جلوگیری گردد. در شکل (۲-۲۲) تصویری شماتیک از آب شستگی اطراف تونل به سبب تقاطع با قنات نمایش داده شده است.

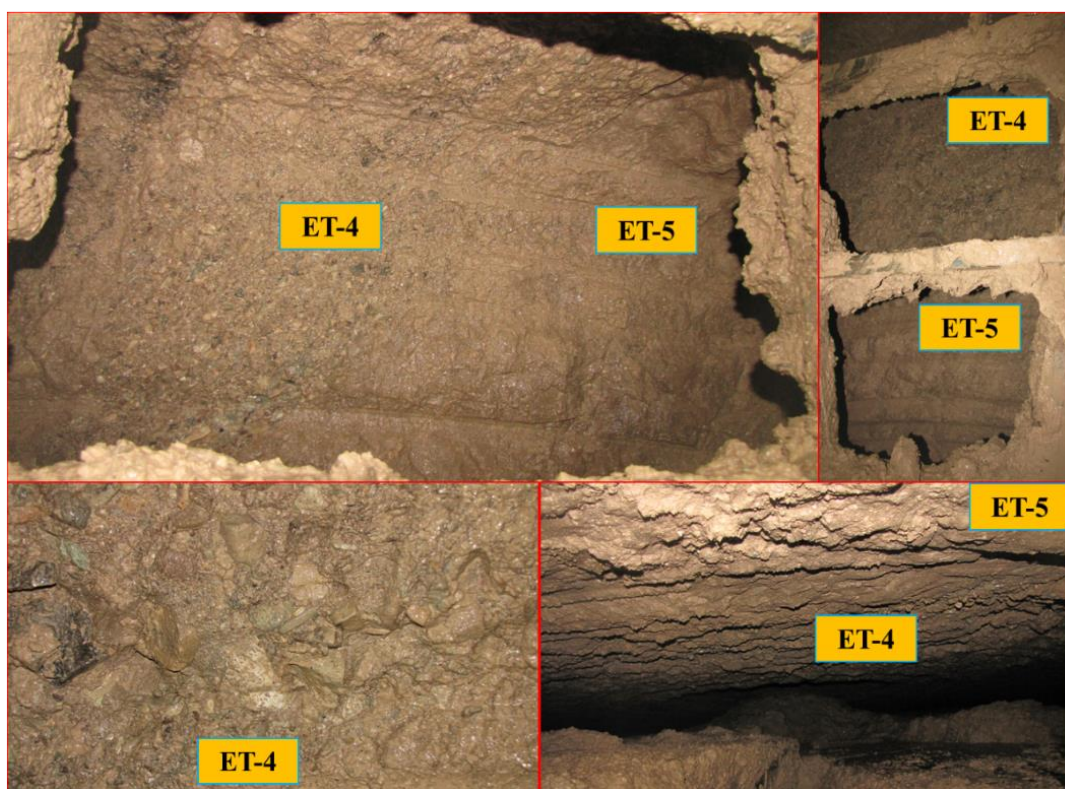




شکل ۲-۲۲: تصویری شماتیک از آب‌شستگی اطراف تونل به سبب تقاطع با قنات

### ۹) جبهه کار مختلط

در بخش‌هایی از مسیر که دو خاک با خصوصیات متفاوت در جبهه کار تونل در کنار یکدیگر قرار داشته باشند می‌تواند مشکلاتی را در روند حفاری ماشین ایجاد کند. مثلاً در بخش‌هایی که جبهه کار تونل از رسوبات دانه ریز رسی و آبرفت درشت‌دانه تشکیل شده است به سبب تفاوتی که این دو لایه خاکی در نرخ نفوذ دارند، مقدار مصالح بیشتری از لایه رسی نسبت به لایه درشت‌دانه به ماشین کشیده می‌شود و در چنین شرایطی چنانچه لایه رسی در سقف تونل باشد می‌تواند سبب نشست زمین گردد. موضوع مهم دیگر در چنین شرایطی نوسانات فشار ماشین می‌باشد. شکل (۲-۲۳) نمونه‌ای از جبهه کار مختلط را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند.



شکل ۲-۲۳: نمایی از جبهه کار مختلط در مسیر حفر تونل

با توجه به اینکه فشار داخل چمبر، نوع و مقدار افزودنی‌های مورد استفاده وابسته به جنس خاک است، در صورت اختلاف جنس، دانه‌بندی، نفوذپذیری و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بخش‌های مختلف خاک جبهه کار، مشکلاتی در حین حفاری بروز خواهد کرد. مشکل اصلی در چنین شرایطی اختلال در فشار جبهه کار می‌باشد. علاوه بر این، نوسانات گشتاور و اضافه حفاری از دیگر مشکلاتی است که امکان بروز آنها وجود دارد. نتیجه این اختلالات در صورت عدم توجه کافی به فرآیند حفاری نشست سطحی و انحراف ماشین خواهد بود. بنابراین لازم است در صورت برخورد با این شرایط و بروز علائم آن (اختلال در فشار جبهه کار و تغییرات گشتاور)، حفاری در شرایط غیر نرمال انجام گیرد.



شکل (۲-۲۴) نمونه‌ای از بازدید ادواری جبهه کار تونل را نشان می‌دهد که به دلیل وجود جبهه کار مختلط می‌بایست سقف تونل از نظر اضافه حفاری احتمالی بررسی شود. در صورت وجود اضافه حفاری باید در سریع‌ترین زمان ممکن و به محض عبور انتهای سپر ماشین EPB-TBM از محل مورد نظر (جهت جلوگیری از حرکت زمین و نشست سطح زمین)، با استفاده از سیستم تزریق دوغاب پرکننده پشت سگمنت، فضای ایجاد شده در اثر اضافه حفاری پر شود.



شکل ۲-۲۴: نمایی از جبهه کار مختلط در حین حفاری



## ۲-۷-۱- چالش‌های حفاری مکانیزه


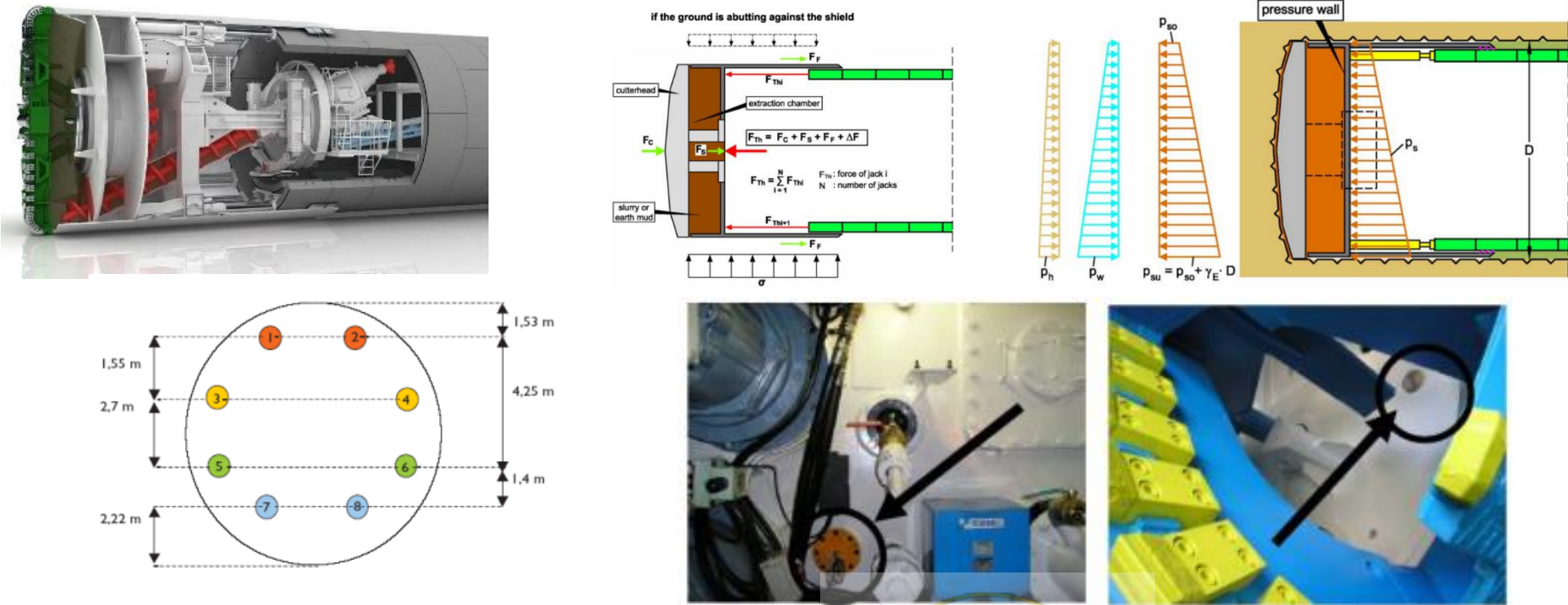
در ادامه برخی از مهم‌ترین چالش‌های حفاری مکانیزه در قالب بیان چالش و ارائه راه‌کار اولیه به‌صورت نمونه جهت حل مشکل ارائه شده است. نکته قابل ذکر این است که هر یک از چالش‌های محتمل می‌بایست به صورت تخصصی و مطابق با موارد پیشنهاد شده بررسی و رفع گردند. یادآوری می‌شود، راهکارهای ارائه شده بسته به شرایط پروژه می‌تواند تغییر کند.

## الف) مخاطرات اجرایی دستگاه حفار TBM

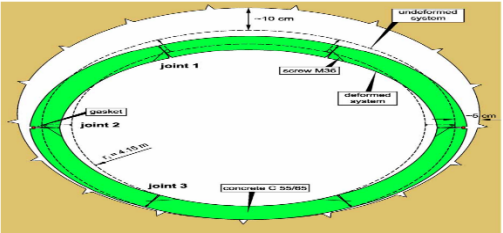
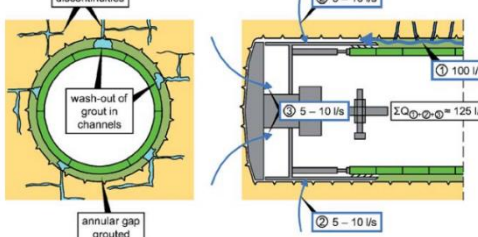

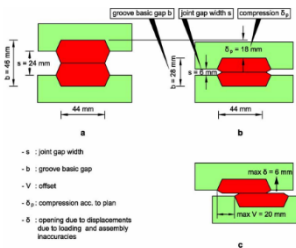

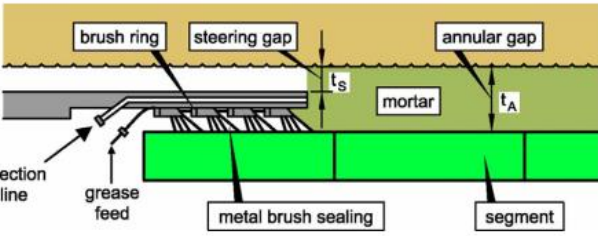
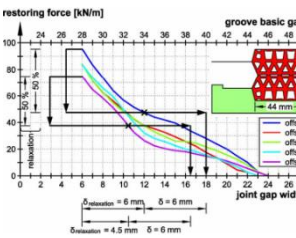
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- تأمین الزامات آب‌بندی ایستگاه و تونل.</li> <li>- پایداری دیواره ایستگاه و چشمه تونل .</li> <li>- معضلات نحوه عبور از ایستگاه.</li> <li>- توالی ساخت ایستگاه و تونل در محدوده ایستگاه.</li> <li>- انتخاب نوع روش تأمین نیروی پیشران TBM جهت شروع حفاری در ایستگاه.</li> <li>- نحوه برچیدن سگمنت‌ها در محدوده تونل.</li> <li>- تأمین الزامات پایداری سگمنت‌ها در محدوده ورود و خروج TBM.</li> <li>- تعیین مدت زمان مجاز توقف TBM در محدوده قبل از ورود به ایستگاه.</li> <li>- افزایش هزینه‌های اجرای پروژه در زمان ساخت ایستگاه بعد از عبور TBM از محدوده ایستگاه .</li> <li>- تأمین بستر مناسب جهت عبور TBM در طول ایستگاه.</li> <li>- دقت حفاری در محل ورود به ایستگاه</li> <li>- کنترل نشست در ورودی تونل..</li> </ul> <p>چالش:</p>	<p>ورود و خروج TBM از ایستگاه</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- برآورد هزینه ساخت تونل به روش حفاری مکانیزه.</li> <li>- برآورد هزینه ساخت ایستگاه.</li> <li>- برآورد هزینه توقف ماشین.</li> <li>- برآورد هزینه تاخیر در ساخت ایستگاه.</li> <li>- هزینه آماده‌سازی ایستگاه قبل از عبور TBM.</li> <li>- هزینه اجرای ایستگاه بعد از عبور TBM</li> </ul> <p>نمونه راهکار:</p>	





<p>فشار سینه کار (Face Pressure)</p>	<p>نمونه چالش:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- آسیب‌های سطحی و ایجاد چاله‌های سطحی و بالا زدگی در سطح.</li> <li>- صدمه به سازه‌های سطحی در روی مسیر همانند آسیب و یا بعضاً تخریب ساختمان‌ها.</li> <li>- شریان‌های حیاتی (خطوط انتقال آب و گاز و...) موجود در مسیر، بعثت نشست دچار آسیب و حتی حادثه خواهد شد.</li> </ul> 
<p>نمونه راهکار:</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- برآورد صحیح فشار سینه کار بر اساس استانداردها و مراجع معتبر و نیز تکنیک‌های عددی پیشرفته.</li> <li>- ارزیابی از عملکرد مناسب فشار سنج‌های نصب شده و پردازش و تفسیر صحیح آنها در طی حفاری.</li> </ul> 



آب بندی	چالش:	<ul style="list-style-type: none"> <li>- هجوم آب به داخل دستگاه و فضای کاری و اختلال در فرآیند حفاری مکانیزه و پشتیبانی آن.</li> <li>- پایین آمدن سطح آب زیرزمینی و ورود آب به داخل تونل در صورت عدم تخمین صحیح بار آبی.</li> <li>- ورود آب به جهت عدم برآورد مناسب در محاسبه فشار آب.</li> <li>- صدمه به سازه تونل از منظر مقاومتی و هندسی.</li> <li>- نشست‌های سطحی و زیرسطحی در صورت ورود آب به داخل تونل.</li> </ul>       
نمونه راهکار:		<ul style="list-style-type: none"> <li>- برآورد صحیح فشار آب بر اساس استانداردها و مراجع معتبر و نیز تکنیک‌های عددی پیشرفته که اندرکنش سازه و خاک به درستی در آنها لحاظ می‌شود.</li> <li>- انجام آزمایشات مربوط به گسکت.</li> <li>- طراحی گسکت بر اساس فشار آب موجود.</li> <li>- کنترل درزهای مفصل بندی، منافذ تزریق و سپر دنباله.</li> </ul>     



## ب) مخاطرات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک

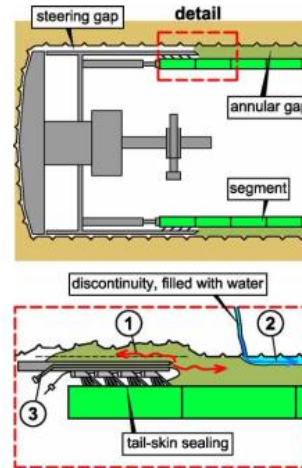
- هجوم آب به داخل دستگاه و فضای کاری و اختلال در فرآیند حفاری مکانیزه و پشتیبانی آن در صورتیکه الزامات دستگاه EPB در شرایط آبدار رعایت نشود.
- پایین آمدن سطح آب زیرزمینی در صورت ورود آب به داخل تونل.
- صدمه به سازه تونل از منظر مقاومتی و هندسی.
- آب شستگی و فرسایش دوغاب تزریق شده در پشت سگمنت.
- آب شستگی مواد ریزدانه و ورود آن به داخل محفظه حفاری و به موجب آن نشست در سطح زمین.

چالش:

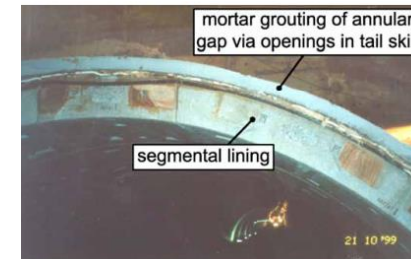
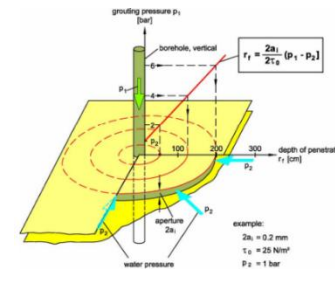
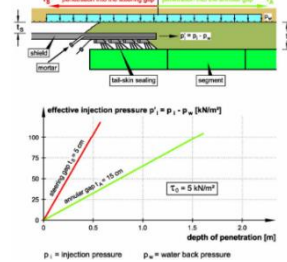
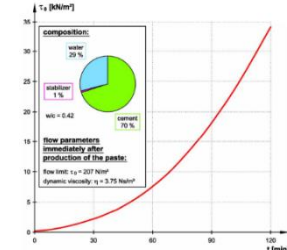
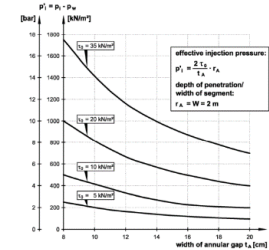
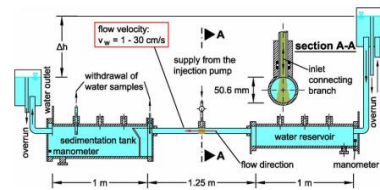
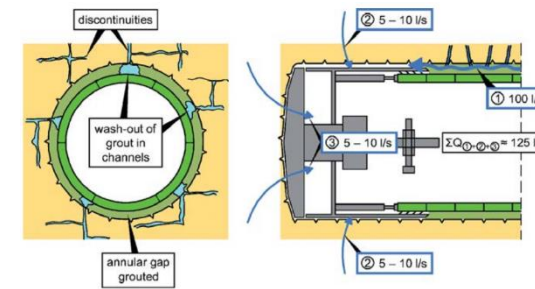
آب زیرزمینی


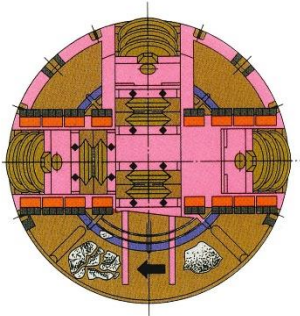
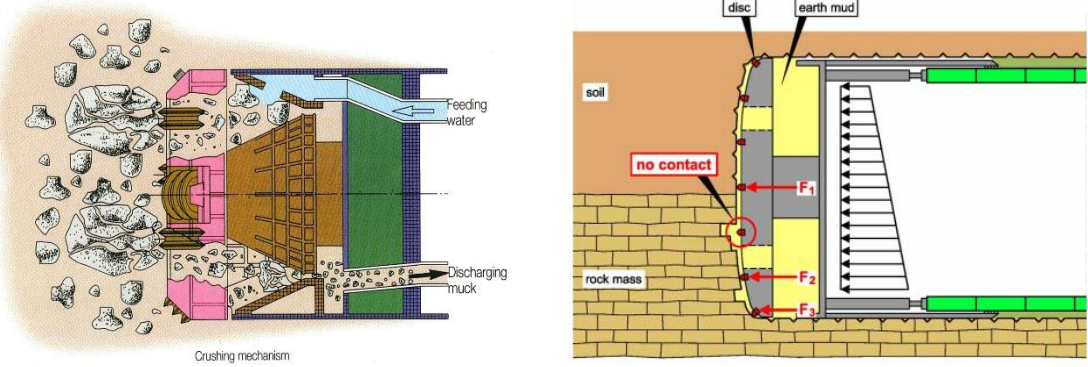

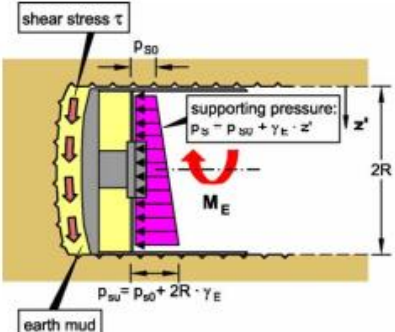
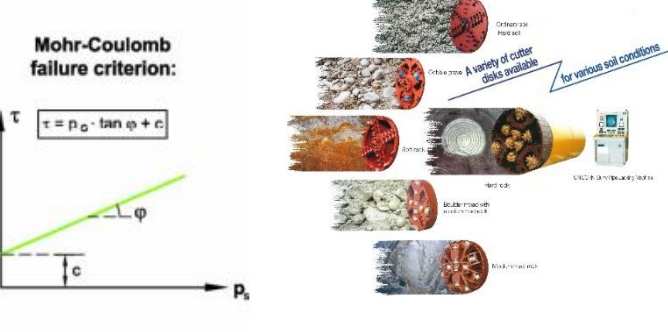
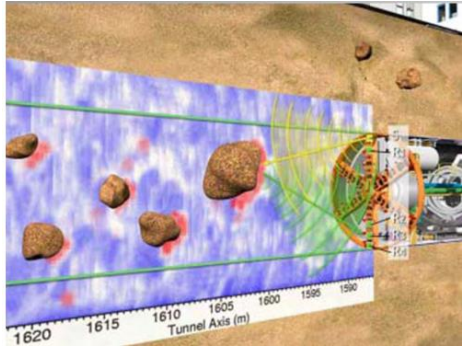
راهکار:

- برآورد صحیح از فشار تزریق و میزان شعاع نفوذ دوغاب.
- ارزیابی و نظارت از فشار تزریق در شرایط آب‌های تراوشی.
- انجام آزمایشات مربوط به تزریق دوغاب در حضور آب زیرزمینی و جلوگیری از فرسایش آن.
- استفاده از بهترین طرح اختلاط بعد از آزمایشات مربوطه و نظارت بر آن.



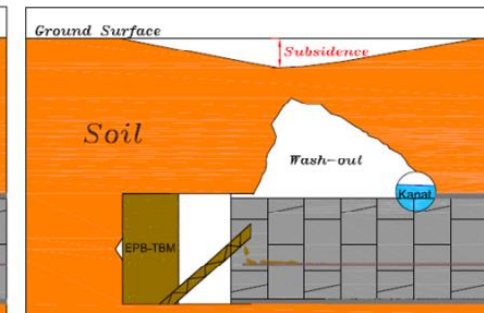
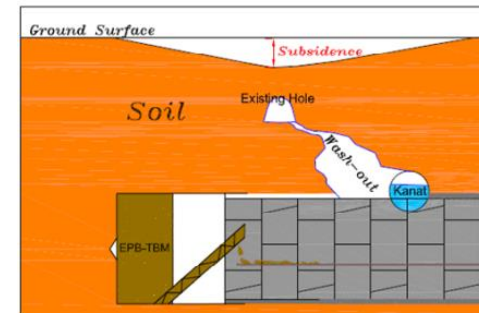
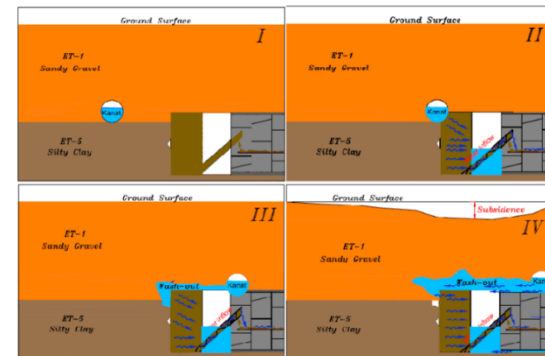
- 1 penetration of grout into the steering gap
- 2 erosion of grout
- 3 plugging of the injection lines



			<p>چالش:</p>	<p>سینه کار مختلط و بولدر</p>
			<p>راهکار:</p>	

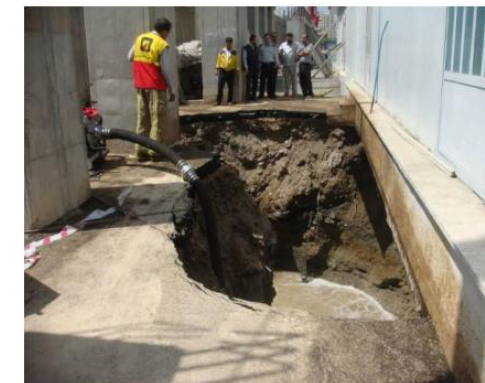
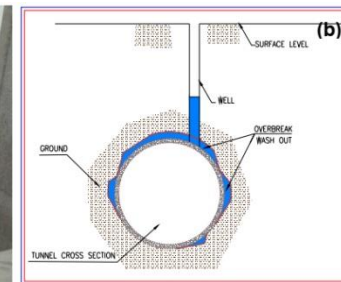
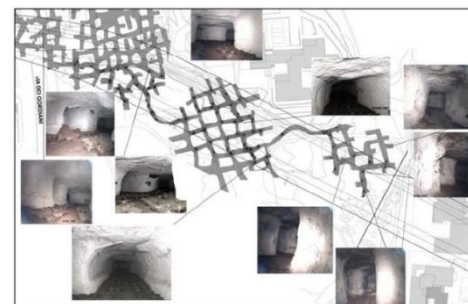


- اختلال در فشار سینه کار (اتفاک حفاری) و نیروی پیشران و گشتاور دستگاه.
- کاهش دانسیته مصالح خروجی از اتفاک حفاری.
- اختلال در حجم دوغاب تزریقی در پشت سگمنت و آب شستگی آن.
- هجوم آب به داخل دستگاه و نقاله مارپیچ.
- ریزش دیواره‌های قنات یا چاه و... و اثر آن بر روی پایداری سگمنت و نشست در سطح زمین.
- اختلال در حجم فوم تزریق شده.
- انحراف دستگاه بسته به موقعیت قرارگیری این حفاریات.

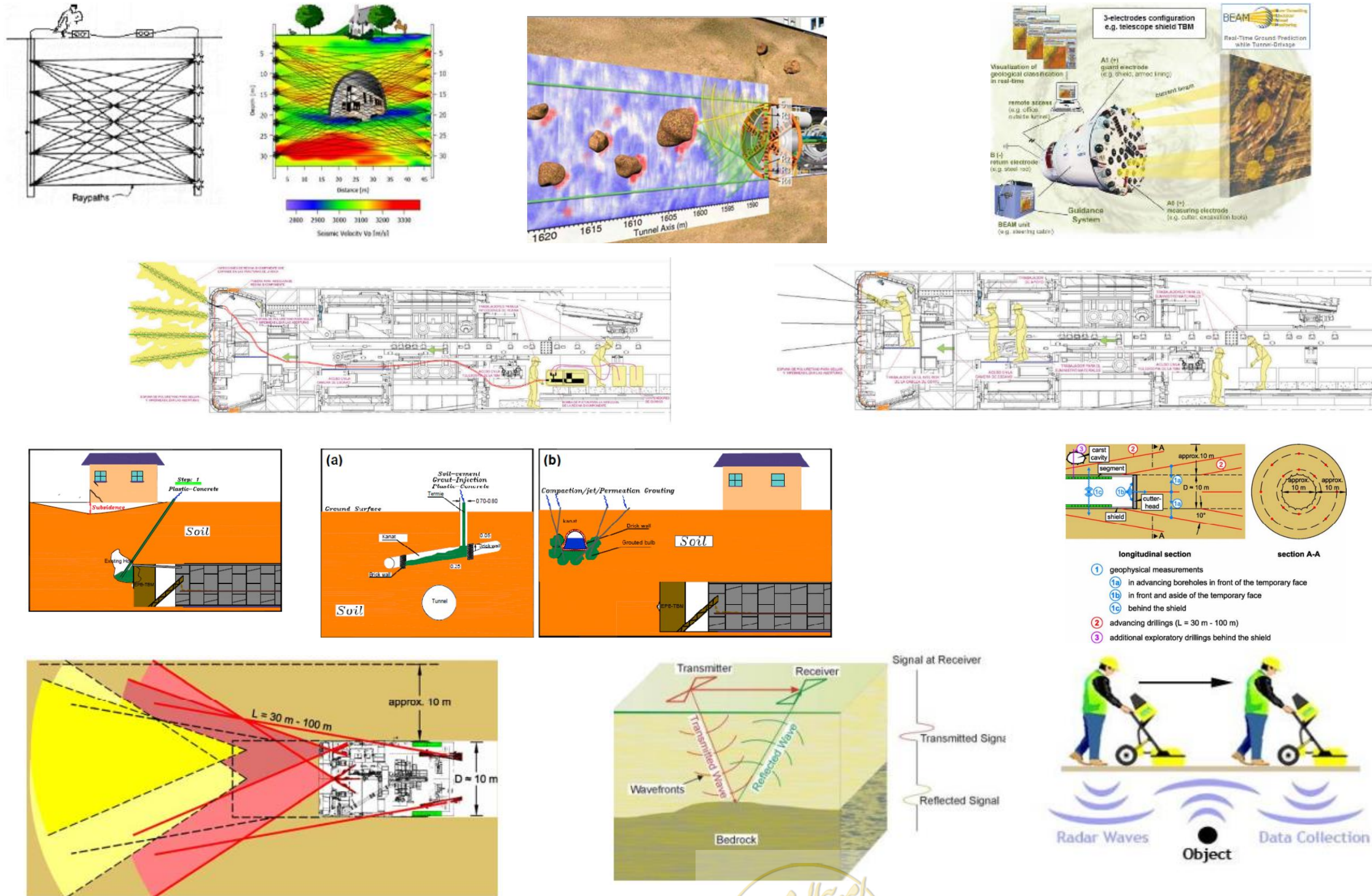


چالش:

حفاریات زیرزمینی: قنات، چاه و  
سایر موارد مشابه



- شناسایی قنات، چاه‌ها و سایر حفاریات مشابه در مسیر توسط برداشت‌های میدانی و شناسایی‌های تحت‌الارضی.
- انجام تمهیدات لازم در ارتباط با نیروی پیشران و گشتاور دستگاه قبل و حین عبور از این مناطق.
- استفاده از اقدامات مناسب تزریق و... برای عبور از این مناطق.
- منحرف نمودن قنات موارد مشابه.
- کنترل و نظارت بر مواد خارج شده از مواد حفاری و نیز عمل‌آوری خاک قبل و حین عبور از این مناطق.

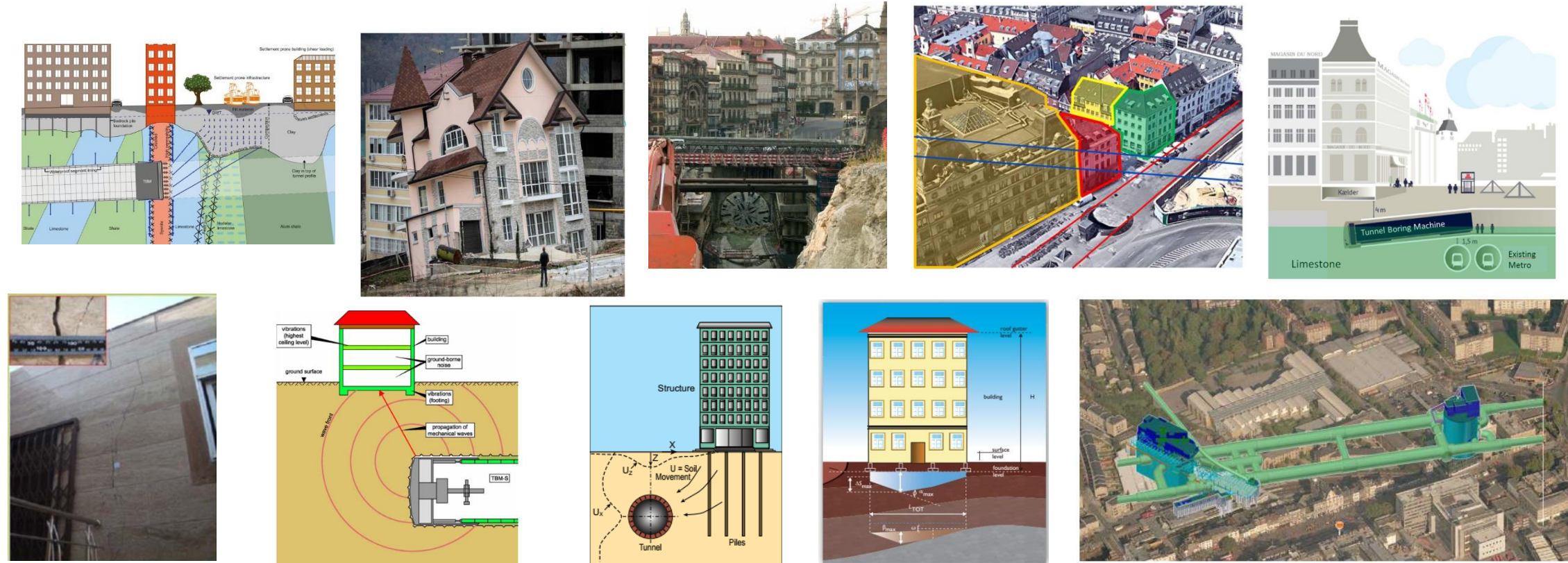


راهکار:



## ج) مخاطرات سازه های سطحی

- نشست و آسیب به سازه های سطحی.
- اثر منفی ارتعاشات بر روی سازه های سطحی مهم نظیر بافت تاریخی، بیمارستان و سایر سازه های حساس.

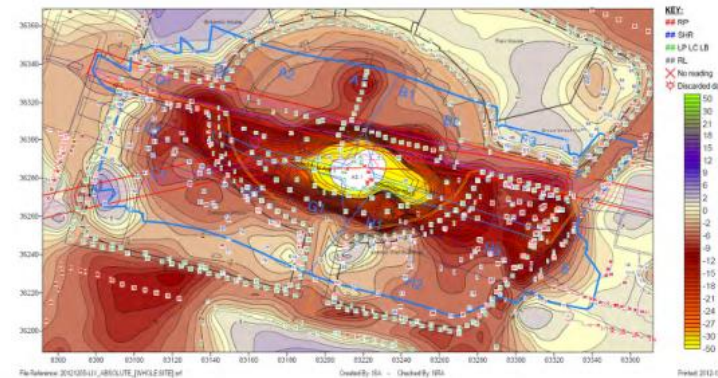
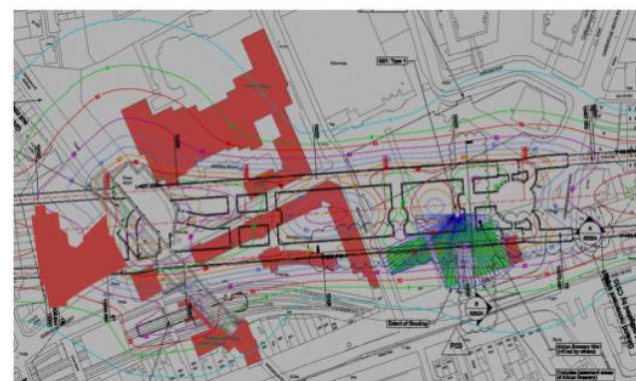
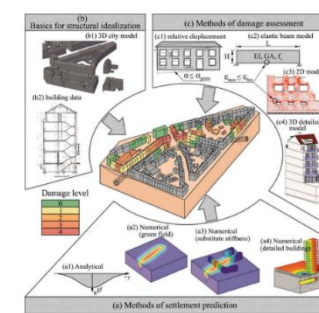
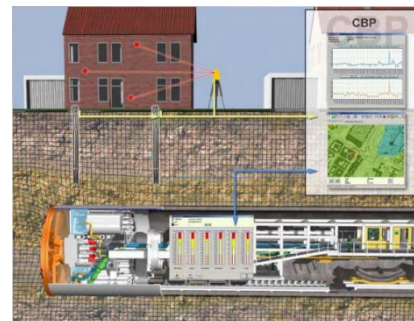
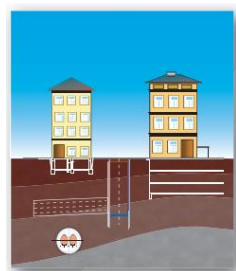


چالش:

ابنیه تاریخی،  
ابنیه خاص (بیمارستان  
و...)،  
بافت مسکونی و سایر  
موارد مشابه

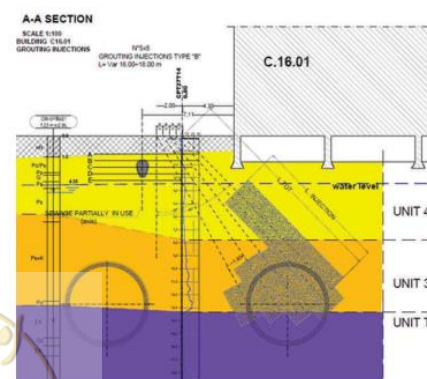
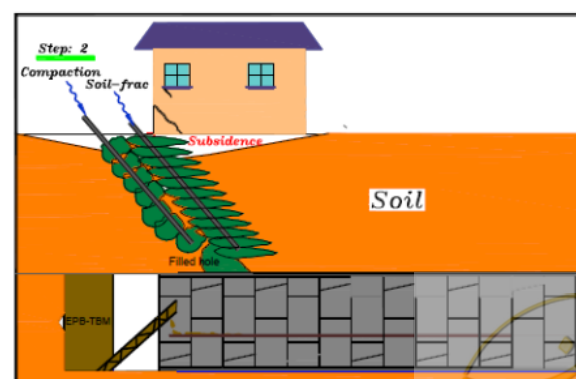
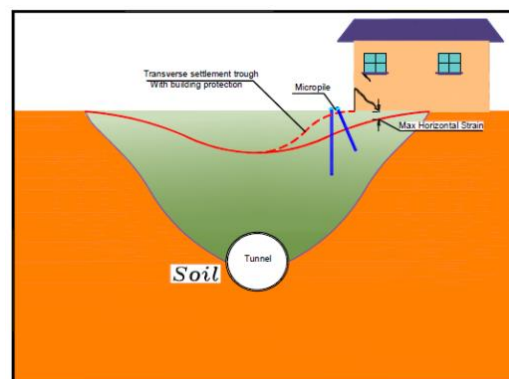
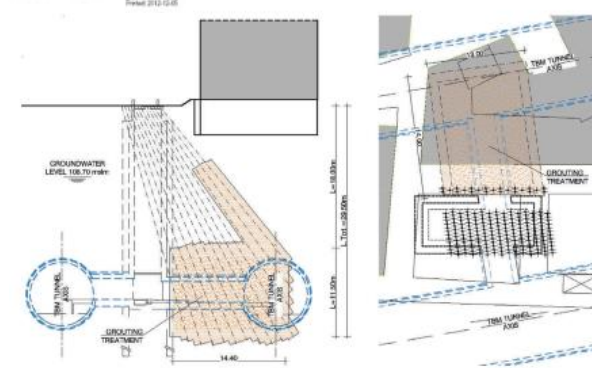
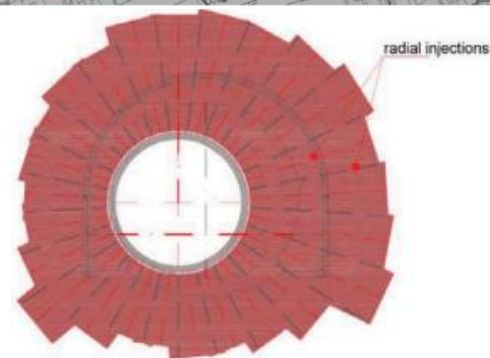


- ارزیابی از وضعیت ژئوتکنیکی مسیر.
- برنامه جامع ابزاربندی و رفتارنگاری برای سازه‌های سطحی جهت حصول اهداف نشست سنجی و اندازه‌گیری ارتعاشات و تعیین حدود هشدار و خطر.
- اورهال دستگاه و کنترل و نظارت بر روی نرخ پیشروی، فشار سینه کار، تزریق دوغاب پشت سگمنت، نیروی پیشران و گشتاور دستگاه.
- زمانبندی صحیح عملیات اجرایی و پشتیبانی دستگاه در عبور از مناطق حساس.
- شناسایی ژئوتکنیکی و انجام عملیات بهسازی شامل انواع تزریق و از روی سطح زمین، از داخل تونل، ادیت‌های دسترسی و سایر موارد مشابه.
- برآورد نشست ناشی از حفاری و تعیین رده ریسک سازه‌های سطحی.



PROJECT NAME	DATE	FILE
ASSESSMENT OF THE VIBRABILITY INDEX CLASS (A, B, C)	09/01/1401	10
1. FUNCTIONAL BEHAVIOR OF THE BUILDING		
Characteristics	Index	Assessment value
1.1.1. Building type	1	1
1.1.2. Building height	2	2
1.1.3. Building area	3	3
1.1.4. Building use	4	4
1.1.5. Building age	5	5
1.1.6. Building condition	6	6
1.1.7. Building foundation	7	7
1.1.8. Building structure	8	8
1.1.9. Building materials	9	9
1.1.10. Building details	10	10
1.1.11. Building equipment	11	11
1.1.12. Building environment	12	12
1.1.13. Building location	13	13
1.1.14. Building orientation	14	14
1.1.15. Building exposure	15	15
1.1.16. Building accessibility	16	16
1.1.17. Building safety	17	17
1.1.18. Building security	18	18
1.1.19. Building privacy	19	19
1.1.20. Building image	20	20
1.1.21. Building reputation	21	21
1.1.22. Building history	22	22
1.1.23. Building culture	23	23
1.1.24. Building identity	24	24
1.1.25. Building values	25	25
1.1.26. Building beliefs	26	26
1.1.27. Building attitudes	27	27
1.1.28. Building behaviors	28	28
1.1.29. Building emotions	29	29
1.1.30. Building perceptions	30	30
1.1.31. Building cognitions	31	31
1.1.32. Building intentions	32	32
1.1.33. Building actions	33	33
1.1.34. Building reactions	34	34
1.1.35. Building responses	35	35
1.1.36. Building outcomes	36	36
1.1.37. Building impacts	37	37
1.1.38. Building effects	38	38
1.1.39. Building consequences	39	39
1.1.40. Building results	40	40
1.1.41. Building achievements	41	41
1.1.42. Building successes	42	42
1.1.43. Building failures	43	43
1.1.44. Building problems	44	44
1.1.45. Building challenges	45	45
1.1.46. Building opportunities	46	46
1.1.47. Building threats	47	47
1.1.48. Building risks	48	48
1.1.49. Building uncertainties	49	49
1.1.50. Building unknowns	50	50
1.1.51. Building mysteries	51	51
1.1.52. Building secrets	52	52
1.1.53. Building treasures	53	53
1.1.54. Building wonders	54	54
1.1.55. Building marvels	55	55
1.1.56. Building miracles	56	56
1.1.57. Building magic	57	57
1.1.58. Building enchantment	58	58
1.1.59. Building spellbinding	59	59
1.1.60. Building mesmerizing	60	60
1.1.61. Building hypnotizing	61	61
1.1.62. Building seducing	62	62
1.1.63. Building charming	63	63
1.1.64. Building delightful	64	64
1.1.65. Building pleasing	65	65
1.1.66. Building satisfying	66	66
1.1.67. Building gratifying	67	67
1.1.68. Building rewarding	68	68
1.1.69. Building fulfilling	69	69
1.1.70. Building completing	70	70
1.1.71. Building perfecting	71	71
1.1.72. Building finalizing	72	72
1.1.73. Building concluding	73	73
1.1.74. Building summarizing	74	74
1.1.75. Building reviewing	75	75
1.1.76. Building evaluating	76	76
1.1.77. Building assessing	77	77
1.1.78. Building measuring	78	78
1.1.79. Building calculating	79	79
1.1.80. Building estimating	80	80
1.1.81. Building determining	81	81
1.1.82. Building finding	82	82
1.1.83. Building discovering	83	83
1.1.84. Building uncovering	84	84
1.1.85. Building exposing	85	85
1.1.86. Building revealing	86	86
1.1.87. Building manifesting	87	87
1.1.88. Building demonstrating	88	88
1.1.89. Building illustrating	89	89
1.1.90. Building explaining	90	90
1.1.91. Building describing	91	91
1.1.92. Building narrating	92	92
1.1.93. Building reporting	93	93
1.1.94. Building stating	94	94
1.1.95. Building declaring	95	95
1.1.96. Building asserting	96	96
1.1.97. Building maintaining	97	97
1.1.98. Building protecting	98	98
1.1.99. Building defending	99	99
1.1.100. Building supporting	100	100

PROJECT NAME	DATE	FILE
ASSESSMENT OF THE VIBRABILITY INDEX CLASS (A, B, C)	09/01/1401	10
2. FUNCTIONAL BEHAVIOR OF THE BUILDING		
Characteristics	Index	Assessment value
2.1.1. Building type	1	1
2.1.2. Building height	2	2
2.1.3. Building area	3	3
2.1.4. Building use	4	4
2.1.5. Building age	5	5
2.1.6. Building condition	6	6
2.1.7. Building foundation	7	7
2.1.8. Building structure	8	8
2.1.9. Building materials	9	9
2.1.10. Building details	10	10
2.1.11. Building equipment	11	11
2.1.12. Building environment	12	12
2.1.13. Building location	13	13
2.1.14. Building orientation	14	14
2.1.15. Building exposure	15	15
2.1.16. Building accessibility	16	16
2.1.17. Building safety	17	17
2.1.18. Building security	18	18
2.1.19. Building privacy	19	19
2.1.20. Building image	20	20
2.1.21. Building reputation	21	21
2.1.22. Building history	22	22
2.1.23. Building culture	23	23
2.1.24. Building identity	24	24
2.1.25. Building values	25	25
2.1.26. Building beliefs	26	26
2.1.27. Building attitudes	27	27
2.1.28. Building behaviors	28	28
2.1.29. Building emotions	29	29
2.1.30. Building perceptions	30	30
2.1.31. Building cognitions	31	31
2.1.32. Building intentions	32	32
2.1.33. Building actions	33	33
2.1.34. Building reactions	34	34
2.1.35. Building responses	35	35
2.1.36. Building outcomes	36	36
2.1.37. Building impacts	37	37
2.1.38. Building effects	38	38
2.1.39. Building consequences	39	39
2.1.40. Building results	40	40
2.1.41. Building achievements	41	41
2.1.42. Building successes	42	42
2.1.43. Building failures	43	43
2.1.44. Building problems	44	44
2.1.45. Building challenges	45	45
2.1.46. Building opportunities	46	46
2.1.47. Building threats	47	47
2.1.48. Building risks	48	48
2.1.49. Building uncertainties	49	49
2.1.50. Building unknowns	50	50
2.1.51. Building mysteries	51	51
2.1.52. Building secrets	52	52
2.1.53. Building treasures	53	53
2.1.54. Building wonders	54	54
2.1.55. Building marvels	55	55
2.1.56. Building miracles	56	56
2.1.57. Building magic	57	57
2.1.58. Building enchantment	58	58
2.1.59. Building spellbinding	59	59
2.1.60. Building mesmerizing	60	60
2.1.61. Building hypnotizing	61	61
2.1.62. Building seducing	62	62
2.1.63. Building charming	63	63
2.1.64. Building delightful	64	64
2.1.65. Building pleasing	65	65
2.1.66. Building satisfying	66	66
2.1.67. Building gratifying	67	67
2.1.68. Building rewarding	68	68
2.1.69. Building fulfilling	69	69
2.1.70. Building completing	70	70
2.1.71. Building perfecting	71	71
2.1.72. Building finalizing	72	72
2.1.73. Building concluding	73	73
2.1.74. Building summarizing	74	74
2.1.75. Building reviewing	75	75
2.1.76. Building evaluating	76	76
2.1.77. Building assessing	77	77
2.1.78. Building measuring	78	78
2.1.79. Building calculating	79	79
2.1.80. Building estimating	80	80
2.1.81. Building determining	81	81
2.1.82. Building finding	82	82
2.1.83. Building discovering	83	83
2.1.84. Building uncovering	84	84
2.1.85. Building exposing	85	85
2.1.86. Building revealing	86	86
2.1.87. Building manifesting	87	87
2.1.88. Building demonstrating	88	88
2.1.89. Building illustrating	89	89
2.1.90. Building explaining	90	90
2.1.91. Building describing	91	91
2.1.92. Building narrating	92	92
2.1.93. Building reporting	93	93
2.1.94. Building stating	94	94
2.1.95. Building declaring	95	95
2.1.96. Building asserting	96	96
2.1.97. Building maintaining	97	97
2.1.98. Building protecting	98	98
2.1.99. Building defending	99	99
2.1.100. Building supporting	100	100



راهکار:

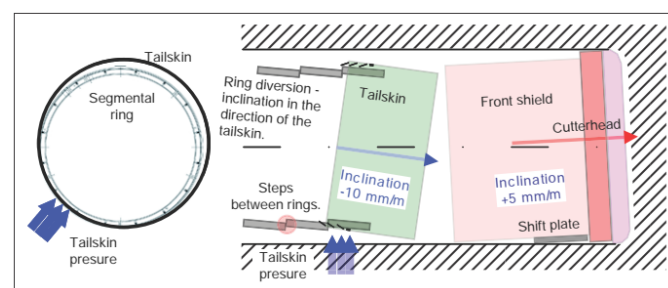
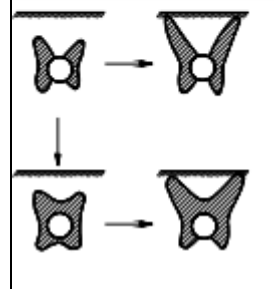
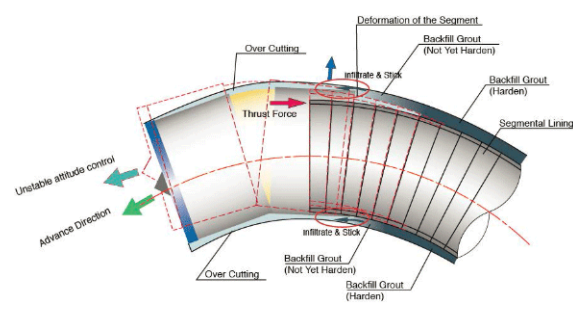
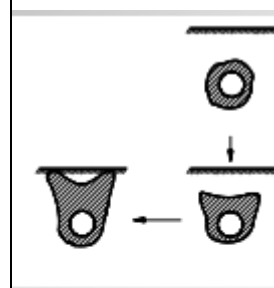
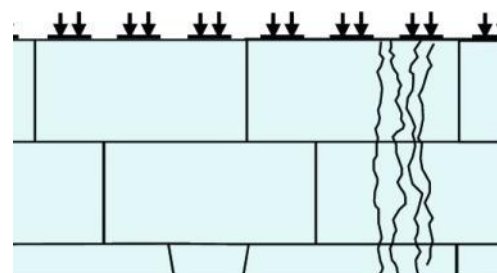
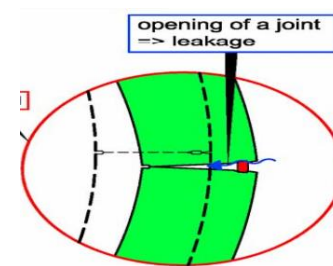
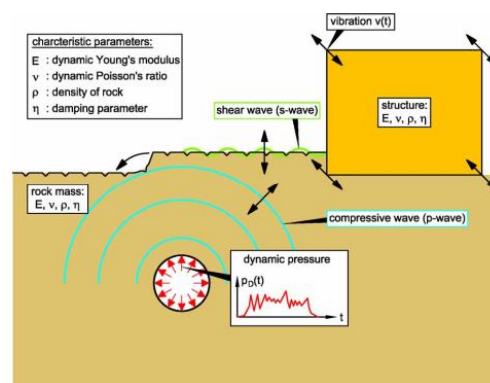
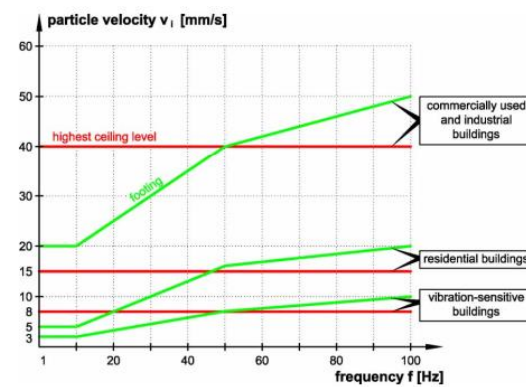
## (د) مخاطرات ناشی از هندسه مسیر

- کشیده شدن کل خاک به داخل محفظه حفاری و ایجاد گودال در روباره کم.
- اثر ارتعاشات ناشی از حفاری در شرایط روباره کم و آسیب به سازه های سطحی و حساس.
- نشست نامتوازن و صدمات جبران ناپذیر به سازه های سطحی.
- اختلال در میزان مصالح خروجی از محفظه حفاری.
- اختلال و نوسان در نیروی پیشران و گشتاور دستگاه.
- احتمال نمایان شدن فوم و سایر موارد مشابه در سطح زمین و در روباره کم.
- آسیب دیدگی و صدمات وارد بر سگمنت در شعاع قوس کم و جانمایی نامناسب محل جک های پیشران.
- اختلال و نوسان در نیروی پیشران و گشتاور دستگاه در شعاع قوس کم.
- رخ دادن رواداری های غیر مجاز.
- احتمال عملکرد نامناسب آب بندی دستگاه و نشت آب به داخل تونل.
- احتمال انحراف دستگاه از مسیر معین

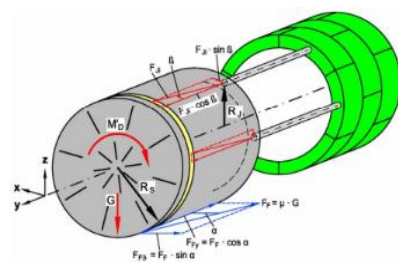
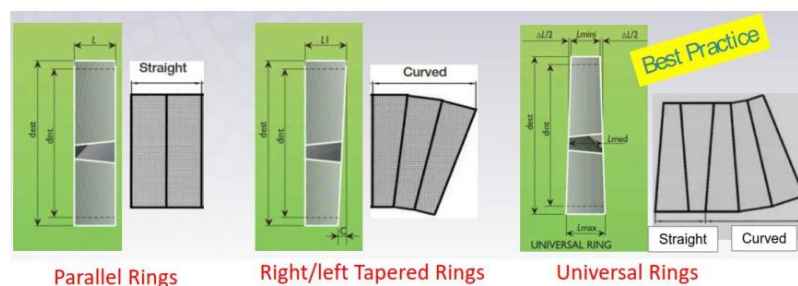
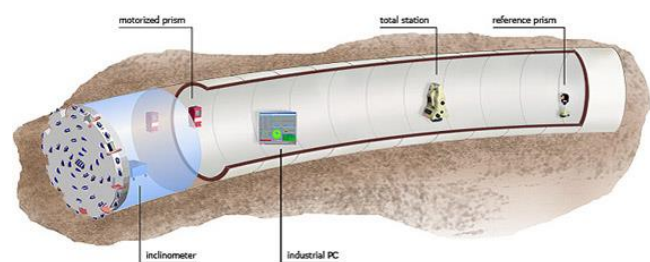
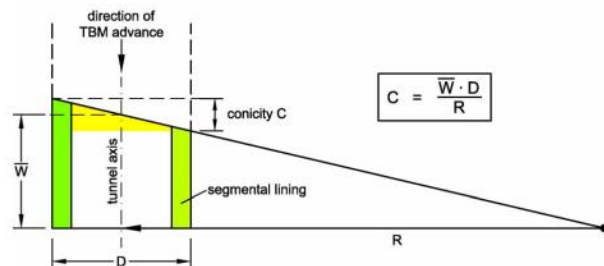
چالش:

روباره، شعاع قوس و سایر موارد مشابه

criterion	time of day	location of impact	minimum distance of TBM to location of impact
impact of vibrations on structures	0 - 24 h	all	< 10 m
human exposure to vibrations within buildings	daytime (6 - 22 h)	all, except for locations with particular need of protection (e. g. hospitals)	approx. 10 m
	nighttime (22 - 6 h)	residential areas	approx. 70 m
		commercial areas	approx. 40 m
ground-borne noise exposure within buildings	daytime (6 - 22 h)	all	approx. 15 m
	nighttime (22 - 6 h)	all	approx. 25 m



- برآورد صحیح نیروی پیشران و گشتاور، و کنترل و نظارت بر آنها در بخش‌های قوسی مسیر.
- کنترل و نظارت بر فرایند سگمنت‌گذاری در بخش‌های قوسی مسیر.
- کنترل و نظارت بر طرح هندسی سگمنت.
- برآورد صحیح از فضای فرمان‌پذیری مورد نیاز دستگاه و نظارت بر نقشه‌برداری در بخش‌های قوسی مسیر.
- کنترل درزهای مفصل بندی، منافذ تزریق و سپر دنباله در بخش‌های قوسی و روباره کم مسیر.
- برآورد صحیح از حجم و فشار دوعاب تزریقی و نظارت بر آن در پشت سگمنت در بخش‌های قوسی و روباره کم مسیر.
- برآورد صحیح فشار سینه کار و نظارت بر آن در بخش‌های قوسی و روباره کم در مسیر.



torque to be carried:

$$M_D = M_C + M_E$$

$M_C$  : resisting torque resulting from the excavation tools and the flashings on the conveyors

$M_E$  : resisting torque caused by the earth mud in front of the cutterhead

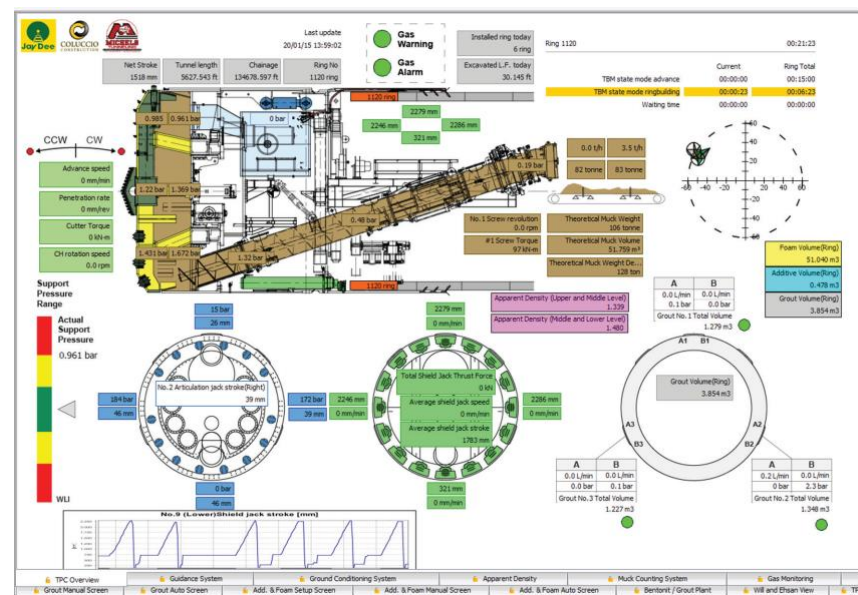
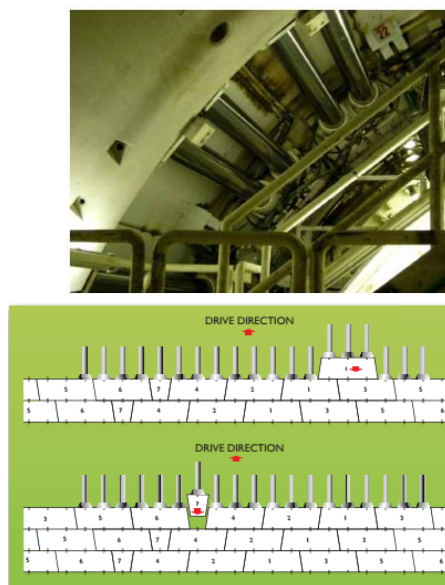
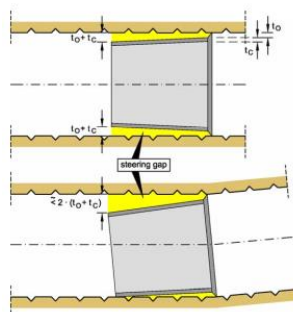
withstanding torques:

$$M_F = R_S \cdot \mu \cdot G \cdot \sin \alpha = R_S \cdot F_{F0}$$

$$M_J = R_J \cdot \sum_{i=1}^N F_{Ji} \cdot \sin \beta = R_J \cdot F_J \cdot \sin \beta$$

$M_F$  : withstanding torque due to friction between shield skin and ground

$M_J$  : withstanding torque due to axial inclination of the thrust cylinders (jacks)

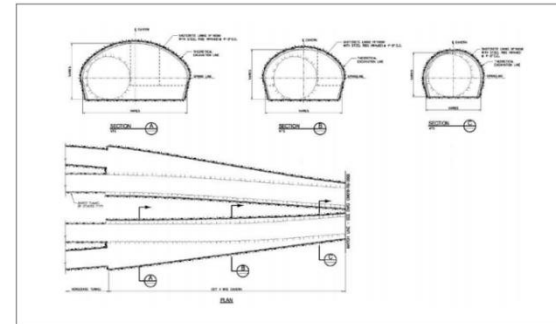
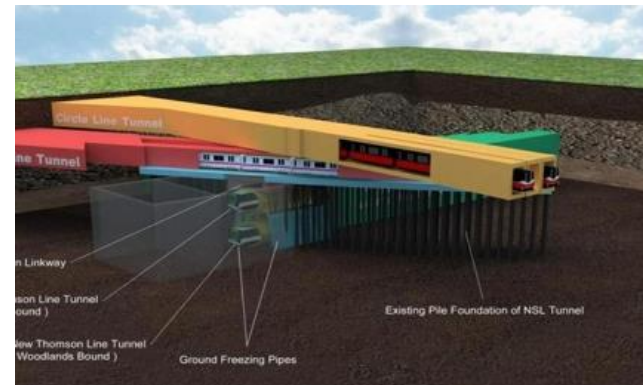


راہکار:



## ه) مخاطرات ناشی از سازه‌های زیرسطحی

- انتخاب شکل مقطع و روش اجرای لینک ارتباطی.
- ریسک مربوط به نشست ناشی از ساخت لینک ارتباطی.
- تقدم و تاخر در ارتباط با ساخت لینک ارتباطی و عبور دستگاه حفاری و مشکلات مربوطه.
- احداث لینک و مشکلات برچیدن سگمنت.
- آب‌بندی لینک ارتباطی.
- اثرات حفاری بر روی پایداری سازه مجاور و نیز بهره‌برداری از آن.

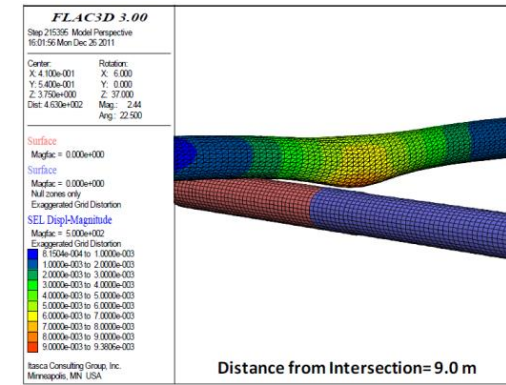
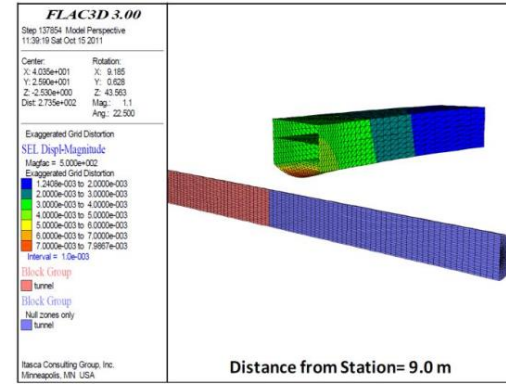
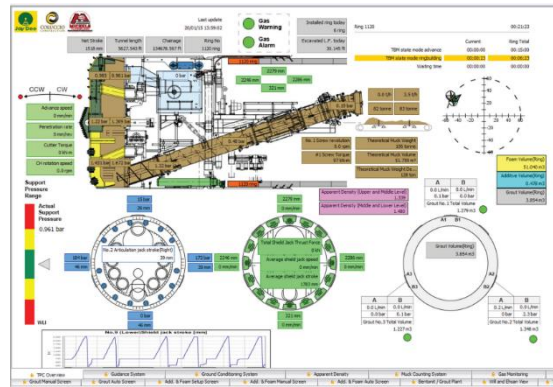


چالش:

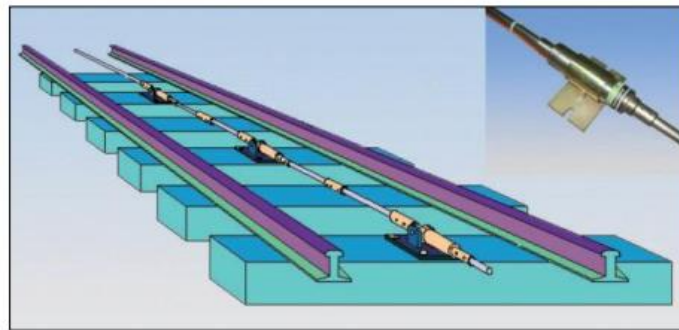
عبور از زیر خطوط  
ریلی موجود و  
ایستگاه، احداث لینک  
ارتباطی و موارد مشابه



- ابزاربندی و رفتارنگاری در سطح زمین و سازه‌های مجاور.
- ارزیابی و نظارت بر نرخ پیشروی و کنترل نیروی پیشران و گشتاور دستگاه.
- کنترل و نظارت بر فشار سینه کار و میزان مواد خارج شده از اتاقک حفاری.
- ارزیابی ریسک ناشی از نشست و در صورت نیاز اجرای طرح تقویت و بهسازی برای محدوده مدنظر.

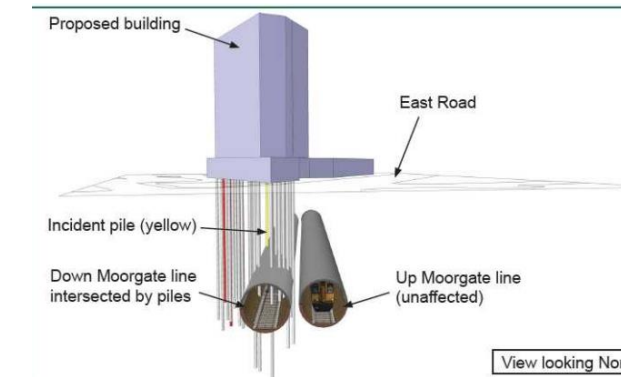


راهکار:



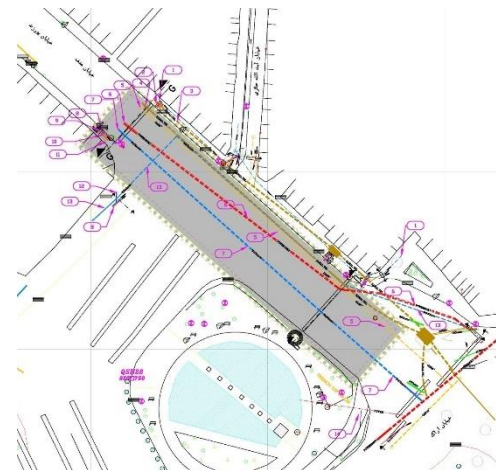
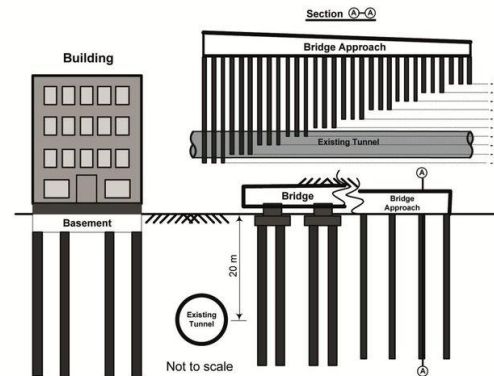
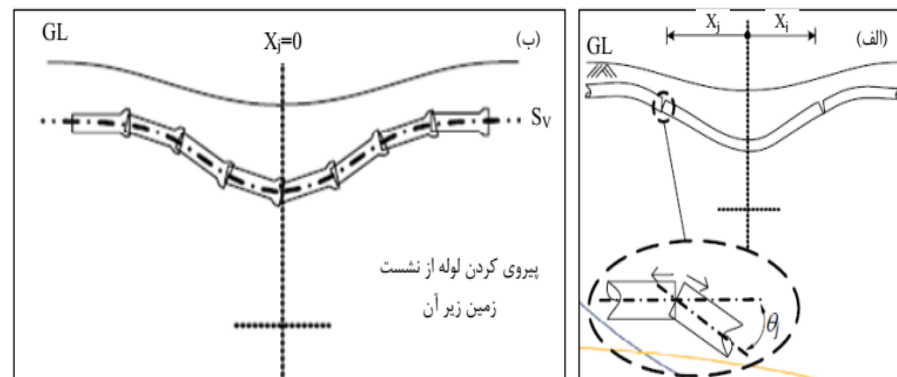
## ی) مخاطرات ناشی از معارضین سطحی و زیر سطحی

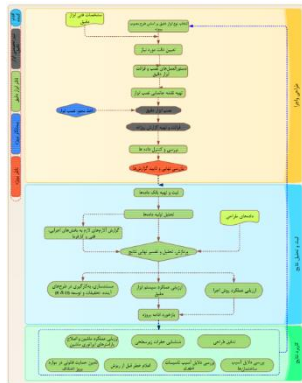
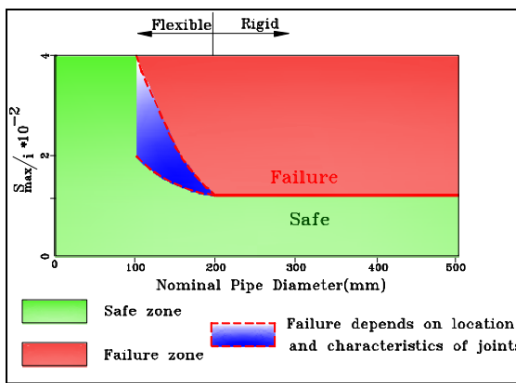
- ریسک مربوط به نشست و آسیب به سازه نگهبان و ساختمان مجاور.
- ریسک مربوط به نشست و آسیب به شریان‌های حیاتی شهر.
- آسیب به سازه کانال انتقال آب و احتمال هجوم آب به سمت دستگاه.
- اثرات حفاری بر روی پایداری سازه مجاور و نیز بهره‌برداری از آن.



چالش:

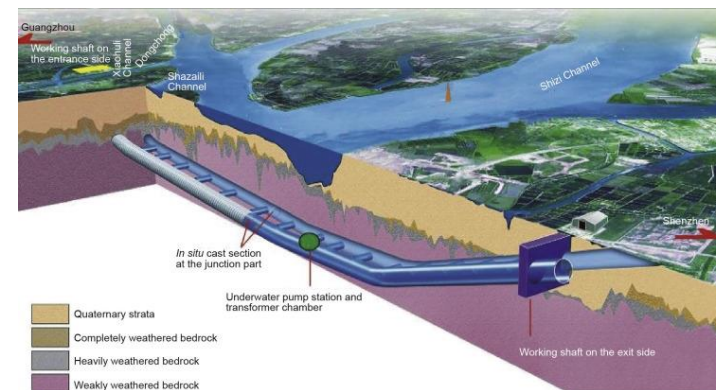
عبور از زیر و مجاورت  
سازه نگهبان (شمع،  
میکروپایل و...) سازه‌هایی  
نظیر ساختمان، مترو، پل  
و...  
عبور از مجاورت کانال  
انتقال آب و...  
عبور از زیر شریان حیاتی  
شهر (خطوط انتقال آب،  
برق، گاز و...)





## ت) مخاطرات محیط زیستی

- هجوم آب به داخل دستگاه و فضای کاری و اختلال در فرایند حفاری مکانیزه و پشتیبانی آن.
- نشست در سطح زمین و به دنبال آن آسیب به فضای سبز (درختان، چمن و...) موجود در سطح.
- تغییر اجباری در فضای سبز و بهم خوردن مناظر.



چالش:

عبور از زیر رودخانه،  
فضای سبز و موارد مشابه



- تغییر در پلان و پروفیل مسیر جهت ممانعت از عبور در زیر فضای سبز یا رودخانه.
- تعیین درختان حساس و پایش آنها در مسیر.
- تعیین محدوده تاثیر درختان بر اساس نوع، سن و... و میزان فاصله داری تونل با آنها.
- برآورد صحیح از فشار تزریق و میزان شعاع نفوذ دوغاب جهت ممانعت از ورود آن به محدوده ریشه درختان.
- ارزیابی و نظارت از فشار تزریق در شرایط عبور از زیر رودخانه و فضای سبز.
- کنترل و نظارت بر روی نرخ پیشروی دستگاه به همراه نیروی پیشران و گشتاور.

### Tree Diameter (DBH)

Less than 6 inches  
6-9 inches  
10-14 inches  
15-19 inches  
More than 19 inches

### Minimum Distance From Tree to Start Tunneling

Drip line of tree  
5 feet  
10 feet  
12 feet  
15 feet



### Prevent Compaction within the PRZ

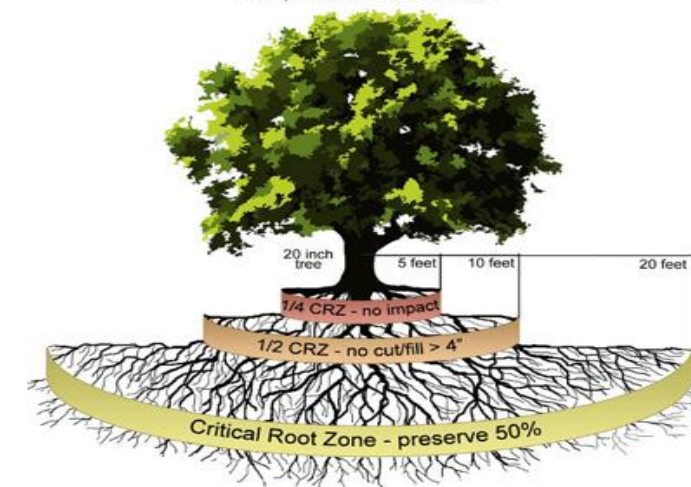
Calculating the  
**Critical Root Radius, CRR**  
of the **Protected Root Zone, PRZ**

1. First measure the tree's **circumference** (distance around) at a 4.5 foot height, in inches.
2. Divide the number by 2.
3. Express the results in feet.



The Critical Root Zone - Development Impact Zones

Example: 20 inch diameter tree



راهکار:



## ۲-۸- ثبت و پایش داده‌های ماشین حفار

در هر پروژه تونل سازی مکانیزه، شناسایی و نظارت بر یک سری پارامترهای اساسی که شاخص کنترلی اجرای آن می باشد ضروری می باشد. برای انجام این کار، TBM ها به سیستم های پیچیده پایش و هدایت مجهز شده اند که بیش از ۵۰۰ نوع داده مختلف مرتبط با تمام جنبه های عملکرد TBM را ثبت و ضبط می کنند.

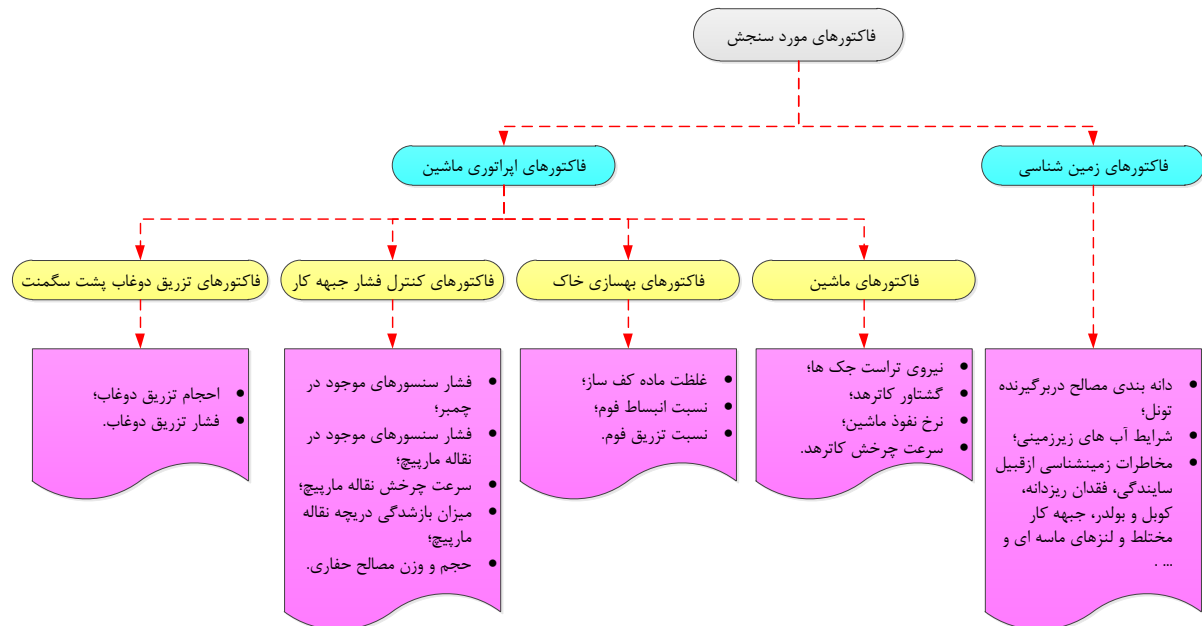
داده های ثبت شده شامل تمامی اجزای الکتریکی و مکانیکی ماشین بوده و برای کنترل عملکرد صحیح TBM و برنامه ریزی برای نگهداری منظم مورد استفاده قرار می گیرند، بدین طریق قابلیت دسترسی TBM (آماده استفاده بودن) به حداکثر می رسد. ثبت اطلاعات معمولاً در هر ۲۰ میلی متر پیشروی یا در بازه های ۵ ثانیه، ۱۰ ثانیه و یا ۱ دقیقه انجام می شود که با بررسی روزانه این پارامترها، نقاط ضعف و قوت اجرای تونل مشخص شده و با ارائه راهکار مناسب می توان عملکرد اجرایی تونل را بهبود بخشید. بنابراین لازم است در تمامی پروژه های تونل سازی مکانیزه با دستگاه TBM، این مهم انجام شده و گزارشات مربوطه به صورت ادواری (هفتگی و ماهیانه) تهیه شود.

### - فاکتورهای مورد سنجش

پایش پیوسته داده ها برای هر سیکل پیشروی ماشین در طول مدت فرآیند حفاری باید حداقل شامل فاکتورهای زمین، فاکتورهای ماشین، فاکتورهای عمل آوری خاک، فاکتورهای کنترل جبهه کار و فاکتورهای تزریق دوغاب پشت سگمنت باشد که به طور کلی می توان فاکتورهای مورد سنجش را به دو گروه فاکتورهای مستقل و فاکتورهای وابسته تقسیم بندی نمود. فاکتورهای مستقل شامل فاکتورهای زمین از قبیل دانه بندی مصالح، شرایط آب زیرزمینی، درصد قطعات سنگی کوبل و بولدر و پتانسیل ساینده گی دانه ها هستند و فاکتورهای وابسته نیز شامل فاکتورهای ماشین، فاکتورهای بهسازی مصالح، فاکتورهای کنترل فشار جبهه کار و فاکتورهای تزریق دوغاب پشت سگمنت می باشند که تحت تأثیر عوامل مختلف تغییر می کنند.

با تهیه فرم های ثبت روزانه فاکتورهای مذکور و تحلیل هر کدام از آنها، می توان عملکرد ماشین و تیم اجرایی تونل را به صورت کارشناسی و مدیریتی کنترل نموده و بهینه کرد. فاکتورهای مورد سنجش در ارزیابی عملکرد ماشین های EPB-TBM در شکل (۲-۲۵) نشان داده شده است.

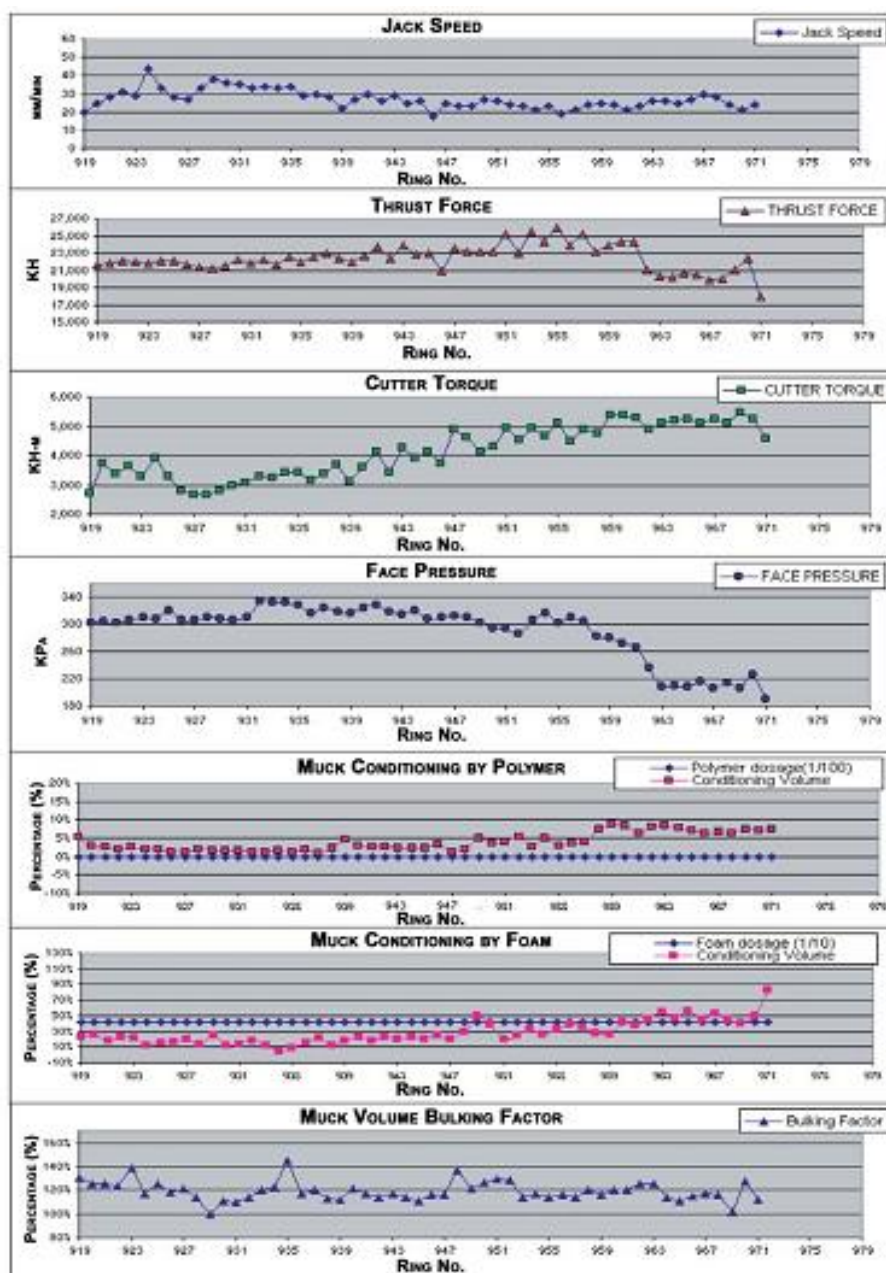




شکل ۲-۲۵: فاکتورهای مورد سنجش در ارزیابی عملکرد ماشین

#### - ارزیابی داده ها

ایجاد یک سیستم مدیریت داده برای خواندن داده های رقومی به دست آمده از سیستم پایش TBM، شناسایی خطاها و ناهمسانی های موجود در داده ها و ایجاد یک بانک اطلاعاتی متکی بر پارامترهای مختص بهره برداری، ضروری و مفید می باشد. برای این مورد نرم افزارهای همانند Excel و Access به عنوان سیستم مدیریت داده ها مناسب هستند. با استفاده از این نرم افزارها می توان نمودارهای گرافیکی رسم نمود و در تحلیل ها استفاده کرد (شکل ۲-۲۶).



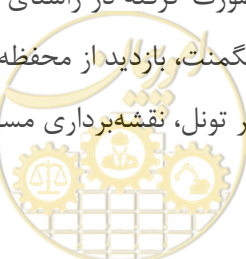
شکل ۲-۲: خلاصه نمودارهای گرافیکی معمول در ارزیابی عملکرد TBM

در تحلیل داده‌ها باید ارتباط کلیه پارامترهای اپراتوری را به صورت دو به دو و یا بیشتر بررسی کرد؛ از این رو پیشنهاد می‌شود موارد زیر در بررسی‌ها و تحلیل‌ها در نظر گرفته شوند.

- ارتباط بین مقادیر نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار؛
- ارتباط بین مقادیر فشار جبهه‌کار و نشست سطح زمین؛
- ارتباط بین مقادیر نرخ نفوذ کله‌حفار و فشار جبهه‌کار؛
- ارتباط بین مقادیر فشار جبهه‌کار و مقادیر نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار؛



- ارتباط بین مقادیر پارامترهای عمل‌آوری و نرخ نفوذ کله‌حفار؛
  - ارتباط بین مقادیر نرخ نفوذ و گشتاور کله‌حفار؛
  - ارتباط بین مقادیر نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار؛
  - ارتباط بین مقادیر عمر ابزار برش و مقادیر نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار؛
  - ارتباط بین مقادیر عمر ابزار برش و مقادیر پارامترهای عمل‌آوری؛
  - ارتباط بین مقادیر احجام و فشار تزریق دوغاب پرکننده پشت سگمنت و نشست سطح زمین؛
  - ارتباط بین مقادیر پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی و پارامترهای اجرایی؛
  - توزیع زمانی فعالیت‌ها و علل ایجاد تأخیرات؛
  - تغییرات ضریب بهره‌وری در دوره‌های مختلف.
- پارامترهای ثبت شده در تصاویر گرافیکی، ابزاری سودمند برای تحلیل فوری عملکرد TBM در طول حفاری می‌باشد. این اطلاعات را می‌توان به‌عنوان یک مبنا برای از پیش تنظیم کردن پارامترهای اپراتوری در مناطقی که شرایط خاک مشابه پیش‌بینی می‌شود به‌کار برد که نهایتاً منجر به بازدهی بیشتر و به حداقل رساندن تأثیر روی سازه‌های رو و زیرزمینی مجاور می‌شود. برای تحلیل هدفمند داده‌ها، باید کلیه پارامترها و داده‌های اجرایی در قالب فرم‌های جداگانه ثبت شوند که در ادامه به آنها پرداخته شده است.
- (۱) ثبت اطلاعات حفاری
- پایش پیوسته داده‌ها برای هر سیکل پیشروی ماشین در طول فرآیند حفاری باید به‌صورت منظم و هدفدار انجام شود. این داده‌ها که توسط اپراتور ماشین ثبت می‌شوند باید حداقل شامل موارد زیر باشند:
- تاریخ، زمان و کیلومتر از حفاری؛
  - نیروی تراست و گشتاور کاترهد؛
  - فشار سنسورها در چمبر؛
  - نرخ نفوذ و سرعت چرخش کاترهد؛
  - مقادیر فاکتورهای بهسازی خاک؛
  - وزن مصالح خروجی؛
  - سرعت چرخش و فشار سنسورهای نقاله مارپیچ؛
  - شیب، انحراف و موقعیت ماشین.
- (۲) ثبت اطلاعات اجرایی تونل
- عملیات اجرایی تونل به مجموعه فعالیت‌های صورت گرفته در راستای پیشروی تونل گفته می‌شود. این اقدامات شامل عملیات رینگ‌گذاری، تزریق دوغاب پشت سگمنت، بازدید از محفظه حفاری و تعویض ابزارهای برشی، تعویض براس‌های آب‌بند، آپارات نوار نقاله، تمیزکاری مسیر تونل، نقشه‌برداری مسیر تونل و غیره می‌باشد. اطلاعات و زمان مورد



نیاز برای اجرای هر یک از موارد فوق الذکر در پیشرفت پروژه بسیار حائز اهمیت است؛ به همین خاطر به منظور ارزیابی عملکرد پروژه و بهینه کردن زمان اجرای هر یک از آنها، ثبت و بایگانی اطلاعات مذکور در فرم های مشخص ضروری می باشد.

#### - ثبت اطلاعات شیفت اجرایی

فرم عملکرد شیفت اجرایی تونل شامل فعالیت های اجرایی و توقفات می باشد که در بازه های زمانی پنج دقیقه ایی تقسیم بندی شده است. فعالیت های اجرایی شامل عملیات حفاری، رینگ گذاری و سرویس و نگهداری ماشین می باشد؛ سایر فعالیت ها از قبیل تعویض ابزارهای برشی، تعویض برش های آب بند، تعمیرات مکانیکی و الکتریکی ماشین، آپارات نوارنقاله و تمیزکاری مسیر تونل و ماشین، تخلیه محل دپوی مصالح حفاری و غیره که موجب توقف حفاری می شود در گروه توقفات قرار می گیرند.

#### - ثبت اطلاعات تزریق دوغاب پرکننده پشت سگمنت

فرم مذکور شامل احجام و فشار تزریق دوغاب در پشت رینگ های نصب شده می باشد. ثبت احجام و فشار تزریق دوغاب برای کلیه خطوط تزریق و رینگ ها الزامی است؛ چراکه تزریق دوغاب در پشت سگمنت ها در حفاری مکانیزه شهری یکی از مراحل اصلی اجرای تونلسازی می باشد و اطمینان از پر شدن فضای خالی در پشت سگمنت ها در جهت کنترل نشست های سطحی زمین، جلوگیری از وارد شدن آسیب به ساختمان ها و تأسیسات سطحی و زیر سطحی از اهمیت و حساسیت خاصی برخوردار است.

#### - ثبت اطلاعات رینگ سگمنتال

در فرم مربوط به اطلاعات رینگ نصب شده، می بایست سریال هر یک از سگمنت های موجود در رینگ، موقعیت سگمنت کلید، مدت زمان نصب رینگ، زمان شروع عملیات رینگ گذاری، زمان پایان عملیات رینگ گذاری، مدت زمان تأخیر، مقادیر پله داری نسبت به رینگ قبل و سایر سگمنت های موجود در رینگ و مقادیر فاصله داری نسبت به رینگ قبل و سایر سگمنت های موجود در رینگ ثبت شوند.

#### - ثبت اطلاعات پرتال ورودی تونل

در فرم مذکور کلیه اطلاعات مصالح و اقلام ورودی به تونل به همراه اطلاعات مربوط به نیروی انسانی حاضر در هر شیفت ثبت می شود.

#### - ثبت اطلاعات تولید دوغاب

در این فرم وزن و حجم مصالح مصرفی در تولید دوغاب پرکننده پشت سگمنت بر اساس طرح اختلاط پروژه در هر رینگ به همراه آمار مربوط به ورود و خروج مصالح در هر شیفت ثبت می شود.



### ۳) ثبت اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی

شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل کنترل کننده شرایط حفاری و تمامی پارامترهای مربوط به ماشین می‌باشد. جنس و نوع خاک، وجود کوبل و بولدرها، تراز آب زیرزمینی و دیگر عوامل مربوط به جنس مصالح مقطع حفاری پارامترهای اجرایی (اپراتوری) ماشین را تحت تأثیر قرار داده و به نوعی تعیین کننده شرایط حفاری و پیشروی می‌باشد. به‌طور خلاصه، شرایط زمین‌شناسی مهندسی مسیر دربرگیرنده تونل، در پارامترهای زیر که عملکرد ماشین و شرایط حفاری را تعیین می‌کنند دخیل می‌باشد:

- مقدار فشار جبهه کار؛
  - مقادیر پارامترهای عمل‌آوری مصالح حفاری؛
  - نشست‌ها و جابجایی‌های سطح زمین؛
  - میزان سایش ابزارهای برشی و بدنه ماشین؛
  - شرایط تخلیه مصالح حفاری؛
  - نرخ پیشروی ماشین با تأثیر بر مقادیر پارامترهای اپراتوری مخصوصاً گشتاور کاترهد.
- به‌منظور تحلیل مناسب از عملکرد ماشین در محدوده‌های حفاری شده و پیش‌رو، می‌بایست شرایط زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل مورد ارزیابی قرار گرفته و همچنین شرایط زمین پیش‌رو تشریح شود. در بررسی مورد انتظار، لازم است کلیه مخاطرات محتمل ارزیابی و شدت وقوع هر یک تخمین زده شود.

### ۲-۹- برآورد فشار جبهه کار

در پروسه حفاری مکانیزه در محیط‌های شهری، تخمین فشار جبهه کار یکی از پارامترهای مهم اجرایی می‌باشد؛ به‌طوری‌که عدم تخمین صحیح مقدار فشار جبهه کار موجب وقوع نشست‌های سطحی غیر مجاز و حتی ریزش می‌گردد. بروز چنین مواردی، علاوه بر تحمیل خسارات مالی گسترده، باعث ایجاد مشکلات روانی و اجتماعی فراوان در محیط‌های شهری می‌گردد. از این‌رو برای جلوگیری از هر گونه اخلاف در پیشرفت پروژه، بایستی تخمین فشار جبهه کار به‌خوبی انجام گیرد.

در ماشین‌های EPB کنترل فشار جبهه کار با کنترل حجم حفاری و حجم مواد خروجی از محفظه حفاری دستگاه تأمین می‌شود. شرایط تعادلی زمانی در جبهه کار ایجاد می‌شود که دانسیته مصالح داخل محفظه حفاری به بیشترین مقدار ممکن برای اعمال فشار موثر به جبهه کار رسیده و در این شرایط معادل حجم تئوری مصالح حفاری شده، تخلیه مصالح انجام شود. بدیهی است که حجم افزودنی‌ها نیز باید برای محاسبه حجم مصالحی که توسط نقاله مارپیچ تخلیه می‌شود، در نظر گرفته شود. اساساً دو پارامتر کنترلی برای پیشروی بهینه ماشین وجود دارد که عبارتند از: فشار داخل محفظه حفاری و نسبت حجم مصالح تخلیه شده به حجم مصالح حفاری شده (R). در صورتی که نسبت R برابر با یک باشد، حالت تعادل ایجاد می‌شود. در صورتی که R کوچکتر از یک باشد، به عبارتی حجم مصالح تخلیه شده کمتر از

حجم مصالح حفاری باشد، زون پلاستیک در جلوی جبهه کار توسعه یافته و فشار داخل محفظه حفاری نیز افزایش می یابد. بالعکس، در صورتی که  $R$  بزرگتر از یک باشد، فشار در محفظه حفاری کاهش یافته و تغییر شکل در جبهه کار رخ خواهد داد؛ در این حالت اگرچه ممکن است مقدار فشار جبهه کار تثبیت شود ولی به دلیل تخلیه مصالح بیش از مقدار حفاری شده، این شرایط خطرناک و نامطلوب خواهد بود. بنابراین فشار جبهه کار به تنهایی برای کنترل پیشروی و تعیین حالت مطمئن حفاری کافی نبوده و حالت بهینه پیشروی باید با در نظر گرفتن شرایط زیر باشد:

- تعادل بین مصالح حفاری شده و مصالح تخلیه شده

- تثبیت فشار در داخل محفظه حفاری

به طور کلی، روش های تعیین فشار نگهداری جبهه کار به چهار دسته تجربی، آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی تقسیم می شود که با توجه به دقت پارامترهای مؤثر در تعیین فشار جبهه کار و همچنین فاز طراحی، از این روش ها استفاده می شود.

در روش های تجربی، بر اساس مشاهدات انجام شده در حین حفاری تونل، رابطه ای تجربی بین یک یا چند پارامتر و مقدار فشار جبهه کار برقرار می شود. در روش های آزمایشگاهی، تونل و جبهه کار در شرایط آزمایشگاهی شبیه سازی شده و با استفاده از نتایج آزمایش، فشار مورد نیاز برای نگهداری جبهه کار تخمین زده می شود؛ این روش ها دارای هزینه بالایی بوده و همیشه قابل دسترس نیستند. در روش های تحلیلی، پارامترهای متعددی در تعیین فشار نگهداری جبهه کار لحاظ می شوند که کاربرد این روش ها به مشخصات ژئوتکنیکی زمین بستگی دارد. این روش ها شامل روش های تعادل حدی کلی و تحلیل حدی تنش می باشند.

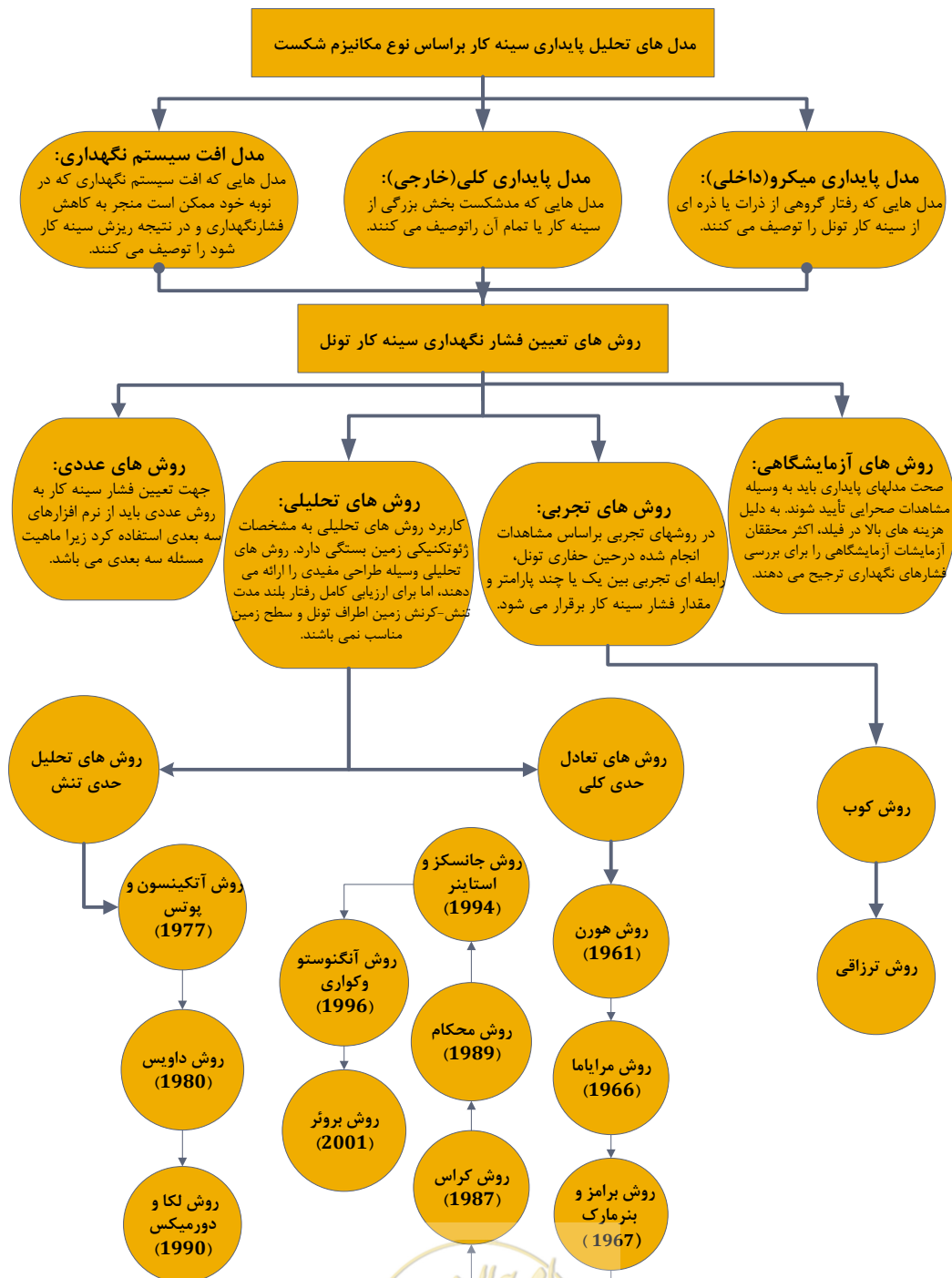
همچنین، می توان فشار نگهداری جبهه کار را به روش عددی نیز تعیین کرد که برای این منظور باید از نرم افزارهای سه بعدی استفاده کرد، زیرا ماهیت مسئله سه بعدی می باشد. در این میان، روش های تحلیلی بیشتر مورد توجه قرار گرفته و محققین زیادی روش های متفاوتی را ارائه نموده اند که تفاوت آن ها عمدتاً ناشی از فرضیات اولیه و حالت ناپایداری می باشد. روش های عددی نیز دارای خطاهای مربوط به خود می باشند؛ از این رو جواب حاصل از روش های عددی برای صحت سنجی جواب روش های تحلیلی و بالعکس استفاده می شود.

در شکل ۱-۲۷ انواع روش های برآورد مقدار فشار جبهه کار ارائه شده است. از این رو لازم است در طراحی جهت برآورد فشار جبهه کار، ابتدا با استفاده از یکی از نرم افزارهای سه بعدی مقدار فشار جبهه کار برآورد گردد؛ سپس مقدار فشار جبهه کار با استفاده از تمامی روش های تجربی و تحلیلی محاسبه و با مقدار به دست آمده از روش عددی مقایسه شود. با توجه به اینکه هر یک از روش های تجربی و تحلیلی مناسب شرایط مشخصی از زمین شناسی می باشند، نتایج حاصل بازه وسیعی را شامل خواهد شد. از این رو روشی مناسب و مورد قبول خواهد بود که دارای کم ترین اختلاف با مقدار حاصل از روش عددی باشد. پس از تعیین روش تحلیلی و تجربی مناسب، در طول مطالعات از نتایج آن به همراه روش عددی استفاده خواهد شد. در خصوص روش عددی نیز قابل ذکر است، مبنای تعیین مقدار فشار مورد نیاز جهت



پایداری جبهه کار، نشست سطح زمین بر مبنای تعیین رده ریسک می باشد که لازم است در این خصوص دقت و بررسی لازم صورت گیرد.

شایان ذکر است مقدار فشار جبهه کار در حین اجرا بر اساس نتایج ابزار دقیق و پارامترهای زمین شناسی مهندسی تدقیق شده، صحت سنجی و بازطراحی می گردد.



شکل ۲-۲۷: روش های برآورد مقدار فشار جبهه کار

## ۲-۱۰- طراحی سازه سگمنت

### ۲-۱۰-۱- تعاریف و مفاهیم

**آرما تور نردبانی (Ladder):** برای کنترل تنش های کششی ایجاد شده در اثر فشار در محل تماس جک های دستگاه حفار با رینگ (حین پیشروی دستگاه) استفاده می گردد.

**بارهای دوران بهره برداری:** بارهایی هستند که عمدتاً متأثر از شرایط زمین شناسی و محیطی حاکم بر مسیر تونل می باشند (مانند بار زمین، بار زنده، بار آب، بارهای ناشی از زمین لرزه)

**روش تیر- فنر:** در این روش پوشش بتنی تونل توسط المان تیر- ستون مدل شده که به صورت الاستیک خطی می باشد. همچنین اثرات تکیه گاهی مصالح اطراف سازه با استفاده از فنرهای وینکلر فشاری شبیه سازی می شود.

**روش تیر - محیط پیوسته:** در این روش محیط میزبان تونل مدل می گردد و تفاوت آن با مدل تیر- فنر آنست که در صورت مدل سازی مناسب شرایط موجود و توالی اجرا، اندرکنش بین خاک و پوشش نیز به خوبی لحاظ شده و تحلیل پس از همگرا شدن منجر به ایجاد تلاش هایی در پوشش می گردد.

**روش حفاری مکانیزه:** روشی برای حفاری تونل که در این روش حفاری و نصب پوشش های پیش ساخته بتنی به صورت همزمان و با استفاده از دستگاه حفاری تونل (TBM) صورت می پذیرد.

**روش ضرایب بار و مقاومت (LRFD):** یک فلسفه طراحی است که قابلیت تغییر در پیش بینی بارها و رفتار المان های سازه را در نظر می گیرد.

**سگمنت:** قطعات پیش ساخته که توسط دستگاه به صورت یک حلقه کامل در کنار هم نصب می شوند و به عنوان پوشش تونل در مقابل بارهای وارد بر سازه مورد استفاده قرار می گیرند.

**طراحی سازه ای پوشش تونل:** اطمینان از کارکرد کامل و بدون اشکال پوشش تونل در تحمل بارهای زمین و آب و دیگر بارهای زمین اطراف جهت حفظ کارکردهای مطلوب در نظر گرفته شده برای دوره ساخت و نگهداری تونل می باشد. **عرض سگمنت (عرض رینگ):** عبارتست از اندازه قطعه بتنی در جهت محور تونل.

**طول سگمنت:** عبارتست از فاصله بین دو لبه مقابل سگمنت در جهت عمود بر محور تونل و در امتداد قوس پوشش.

**سطوح تماس سگمنت ها (درزهای پوشش):** در یک دید کلی سطوح تماس و یا درزهای پوشش سگمنتی را می توان به دو دسته درزهای محیطی (عرضی) و درزهای شعاعی (طولی) تقسیم نمود. درزهای عرضی به درزهای بین سطوح سگمنت های یک رینگ با رینگ مجاور و درزهای طولی به درزهای بین سگمنت های تشکیل دهنده یک رینگ اطلاق می شود.



## ۲-۱۰-۲- مبانی تحلیل و طراحی سازه‌ای سگمنت

### ۲-۱۰-۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت سگمنت

ساخت سگمنت مشابه با تولید دیگر سازه‌های بتنی مستلزم بهره‌گیری از ترکیب مقاومت فشاری مخلوط سنگدانه، سیمان و آب به همراه مقاومت کششی فولاد می‌باشد. در ادامه به بررسی مصالح مورد نیاز جهت ساخت و تولید سگمنت پرداخته شده است.

#### الف- بتن

مقاومت نمونه استوانه‌ای ۲۸ روزه بتن بر اساس مقاومت مورد نیاز در ملاحظات طراحی تعیین می‌گردد. پیشنهاد می‌شود مقاومت بتن سگمنت در بازه ۳۵ تا ۴۵ مگاپاسکال باشد. لازم به ذکر است با توجه به بارهای وارد بر سگمنت در مراحل تولید، حمل و دپو ضروری است علاوه بر مقاومت ۲۸ روزه، مقاومت کششی و فشاری برای بتن در سنین مختلف و متناسب با بارهای وارده در این مراحل نیز تعیین گردد. در تعیین مقاومت بتن ضوابط مربوط به پایایی بتن (عمر مفید ۱۰۰ سال)، نیز می‌بایست مدنظر قرار گیرد.

#### ب- میلگردهای فولادی

تسلیح معمول برای پوشش سگمنتی میلگرد فولادی می‌باشد. قفس آرماتور در هرطرف سگمنت دارای دو لایه آرماتور عمود برهم می‌باشد. نواحی مرزی و نزدیک فرورفتگی‌های بتن باید برای سازگاری با تمرکز تنش و تشدید نیروها با میلگردهای تقویتی تسلیح شوند.

عموماً میلگردهای مورد استفاده در سازه اصلی از نوع AIII آجدار با حداقل تنش جاری شدن ۴۰۰۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع یا معادل آن می‌باشد. در موارد خاص که در نقشه‌های اجرایی ذکر می‌گردد، از انواع دیگر آرماتور نیز می‌توان استفاده کرد. استفاده از میلگرد ساده (غیر آجدار) در داخل بتن، مجاز نمی‌باشد.

#### پ- الیاف فولادی

مزایای بتن الیافی در مقایسه با بتن بدون الیاف را می‌توان بطور خلاصه بشرح ذیل بیان داشت:

- کنترل ترک‌های مویی در محدوده انقباض پلاستیک بتن
- کاهش ترک‌های انقباضی در زمان اولیه بتن ریزی
- قابلیت باربری بعد از ترک خوردگی
- افزایش استحکام در گوشه‌ها و زوایای قائم و در نتیجه کاهش لب پر شدگی
- جلوگیری از خرد شدن بتن در اثر مواجهه با ضربه و بارهای دینامیکی
- مقاومت در مقابل تورق و سایش
- مقاومت در مقابل تنش‌های خستگی
- مقاومت عالی در مقابل ضربه



بطور کلی طول الیاف فولادی ۳۰ تا ۶۰ میلیمتر و قطر آن برابر ۰/۴ تا ۱/۱ میلی متر می باشد. با افزایش رده مقاومتی بتن برای حفظ شکل پذیری بتن الیافی، افزایش مقاومت کششی الیاف فولادی توصیه می گردد. مقاومت کششی استاندارد الیاف فولادی ۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰ مگاپاسکال است و بطور کلی تا بتن با رده مقاومتی ۵۰ تا ۶۰ مگاپاسکال استفاده می شود.

مقدار الیاف فولادی استاندارد مصرفی در مخلوط بتن تولید سگمنت در حدود ۳۰ تا ۵۰ کیلوگرم در مترمکعب می باشد. مقدار بیشتر مصرف الیاف فولادی، بتنی با مشخصات بالاتر می دهد ولی ممکن است در طی زمان اختلاط اختلال ایجاد نماید. در مقادیر بالای مصرف الیاف و یا در مورد الیاف طویل، کارایی مورد نیاز بتن را باید از طریق اصلاح دانه بندی مصالح سنگی تأمین نمود.

در ارتباط با یکنواختی توزیع الیاف فولادی (میزان و جهت)، توالی اختلاط و مدت مخلوط کردن مهم می باشد. ممکن است مقاومت خمشی بتن مسلح شده با الیاف فولادی در بارگذاری های سنگین کافی نبوده و استفاده از میلگرد فولادی تقویتی نیاز باشد. همچنین شرایط جابجایی و حمل سگمنت ها ممکن است منجر به در نظر گیری میلگرد فولادی تقویتی یا افزایش تعداد قطعات یک رینگ شود.

تعیین ویژگی های مقاومتی، نسبت اختلاط مصالح و روش های مجاز اختلاط، انتقال و اجرای بتن الیافی باید منطبق بر استانداردهای ACI 544 ، RILEM TC 162-TDF و استانداردهای معتبر دیگر در این زمینه صورت بپذیرد.

## ۲-۱۰-۲- بارهای وارد بر سازه

بارهای وارده بر پوشش بتنی را می توان بطور کلی به دو دسته تقسیم بندی کرد. دسته اول بارهای دوران بهره برداری هستند که عمدتاً متأثر از شرایط زمین شناسی و محیطی حاکم بر مسیر تونل می باشند. دسته دوم بارهایی هستند که در حین فرآیند تولید، حمل، دپو و عملکرد دستگاه حفار بر سگمنت ها اعمال می شوند و باید در طراحی منظور شوند.

### الف- بارهای دوران بهره برداری

بارهای دوران بهره برداری شامل بار مرده، بار ناشی از فشار زمین، بار زنده ناشی از کاربری سطح زمین، بارهای دینامیکی حاصل از زمین لرزه، فشار آب وارد بر سازه است. کلیه بارهای فوق می بایست بر اساس مفاد ضوابط طراحی ایستگاه قطار شهری و حومه تعیین گردند.

### ب- بارهای بارهای وارده در حین فرآیند تولید، حمل، دپو و عملکرد دستگاه حفار

#### - بار حین خارج کردن سگمنت از قالب

در محاسبات بر اساس موقعیت و هندسه سیستم خارج کردن سگمنت از داخل قالب میزان تنش های تولید شده در اثر وزن سگمنت تعیین می شود. بنابراین جهت برآورد اثر این نیرو بر سگمنت لازم است، ابتدا روش خارج نمودن سگمنت از قالب تعیین شود. بر این اساس اثر اعمال نیرو بر سگمنت تولید شده مورد ارزیابی قرار می گیرد و مشخصات مقاومتی مورد نیاز در هنگام خروج از قالب تعیین خواهد شد.





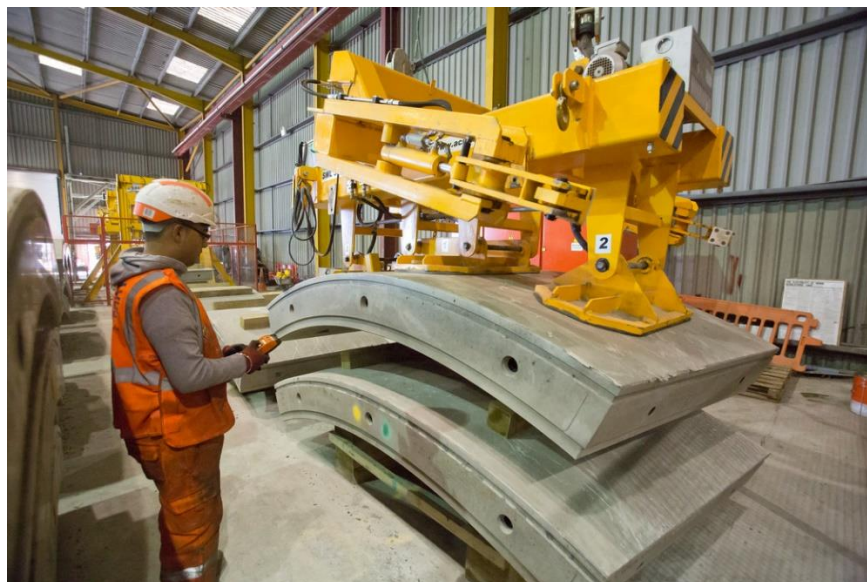
ب) خروج سگمنت از قالب بوسیله جک مکانیکی

الف) خروج سگمنت از قالب بوسیله مکش

شکل ۲-۲۸: خروج سگمنت از قالب با استفاده از (الف) مکش (ب) جک مکانیکی

#### - بار ناشی از دپوی موقت

سگمنت‌های تولید شده بلافاصله پس از تولید به دپوی دائم منتقل نخواهند شد و بر اساس ظرفیت کارخانه سگمنت برای مدت معینی در فضای کارخانه تولید سگمنت نگهداری می‌شوند. حین دپوی موقت و متناسب با سن بتن در این مرحله، تنش‌های ایجاد شده ناشی از وزن سگمنت‌های چیده شده بر روی هم کنترل می‌گردد.



شکل ۲-۲۹: دپوی موقت سگمنت‌ها در کارخانه تولید سگمنت

#### - بار ناشی از دپوی دائم

حین دپوی دائم و متناسب با سن بتن در این مرحله، تنش‌های ایجاد شده ناشی از وزن سگمنت‌های چیده شده بر روی هم کنترل می‌گردد.





شکل ۲-۳: دپوی دائم سگمنت‌ها

#### - بار حین حمل سگمنت‌ها به داخل تونل

جهت بررسی بار وارد بر قطعات در فرایند انتقال به دستگاه حفار، ابتدا نوع و شیوه انتقال سگمنت‌ها و مشخصات این بارگذاری تعیین خواهد شد و با توجه به این اطلاعات و فاصله بین تکیه‌گاه‌ها تنش موجود تعیین می‌شود. لازم به ذکر است، در حین انتقال سگمنت به دستگاه، بارهای دینامیکی ناشی از ضربه نیز به سگمنت‌ها اعمال می‌شود که باید در محاسبات مربوط به این بخش لحاظ شود.



شکل ۲-۳: مراحل مختلف حمل سگمنت به داخل تونل

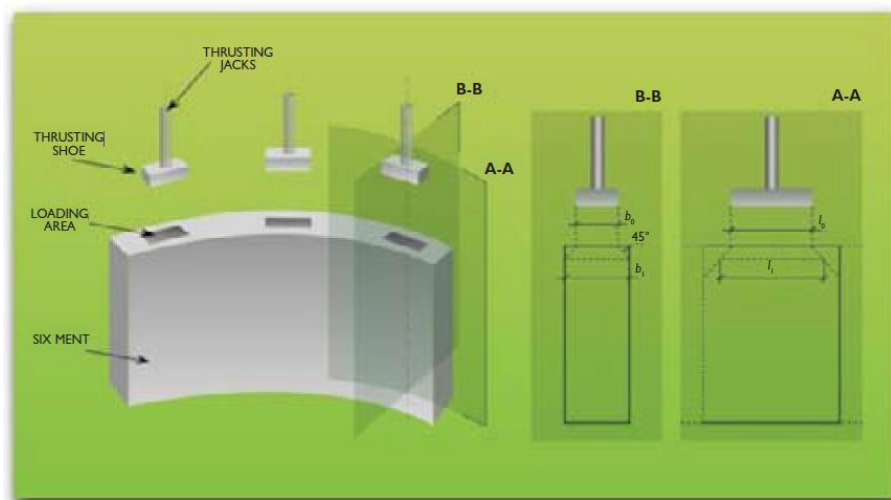


### - بار ناشی از جک‌های دستگاه حفار

جهت پیشروی دستگاه حفار مقدار نیروی تراست بر اساس مشخصات فنی دستگاه تعیین می‌گردد که این فشار از طریق کفشک‌ها، به رینگ اعمال می‌گردد.



شکل ۲-۳۲: نمایی از جک‌های پیشران دستگاه حفار در حال اعمال فشار بر ضخامت سگمنت‌های نصب شده



شکل ۲-۳۳: نحوه اعمال بار جک‌های پیشران بر سگمنت



## - بار تزریق

به طور کلی عملیات تزریق در فرایند حفاری تونل مکانیزه به دو صورت انجام می پذیرد:

### الف- تزریق تماسی

با توجه به وجود فضای خالی بین شیلد دستگاه حفار و سگمنت نصب شده، با تزریق گروت به فضای خالی بین سگمنت نصب شده تا سطح حفاری، از بارهای وارد بر پوشش بتنی کاسته خواهد شد. در تزریق اولیه (تماسی) پس از کارگذاری سگمنت فشار تزریق بصورت یکنواخت وارد می شود. علاوه بر پرکردن فضای خالی و تحکیم بیشتر پوشش بتنی و کاهش بارهای وارده به پوشش بتنی از طرف زمین، تزریق تماسی موجب کاهش احتمال وارد شدن بارهای غیر یکنواخت و متمرکز به پوشش بتنی خواهد شد. در مورد تونل های حفر شده در محیط خاکی، تزریق تماسی همزمان با خروج سگمنت از شیلد انجام می شود و با توجه به تغییر شکل یکنواخت محیط پیرامونی تونل بار تزریق به صورت فشار هیدرواستاتیک بر روی سطح خارجی سگمنت ها اعمال می گردد. اما در مورد تونل های حفر شده در سنگ، لزوماً شرایط تغییر شکل یکنواخت محیط پیرامونی و اجرای همزمان تزریق تماسی و نصب سگمنت ها صادق نیست و در این صورت امکان ایجاد فشارهای موضعی در اثر اعمال بار تزریق وجود دارد.

### ب- تزریق تحکیمی

ممکن است در بخش هایی از تونل بمنظور آب بندی، استفاده از تزریق تحکیمی ضرورت یابد، در این صورت بار ناشی از این نوع تزریق نیز باید متناسب با روش اجرای آن در نظر گرفته شود.

## ۲-۱۰-۳- ترکیب بارگذاری

به منظور تعیین ترکیب بارگذاری به مفاد ضوابط طراحی ایستگاه قطار شهری و حومه مراجعه گردد.

## ۲-۱۰-۳- مدلسازی و آنالیز

مدلسازی و تحلیل سازه ای سگمنت به دو روش تیر- فنر و تیر- محیط پیوسته انجام می شود. در روش تیر- فنر پوشش بتنی تونل توسط المان تیر- ستون مدل شده که به صورت الاستیک خطی می باشد. در این روش لازم است کلیه بارها اعم از بار وارده از جانب زمین بر پوشش مشخص باشد. همچنین در این روش اثرات تکیه گاهی مصالح اطراف سازه با استفاده از فنرهای وینکلر فشاری شبیه سازی می شود.

در روش تیر محیط پیوسته، محیط میزبان تونل نیز مدل می گردد و تفاوت آن با حالت قبل آنست که در صورت مدلسازی مناسب شرایط موجود و توالی اجرا، اندرکنش بین زمین و پوشش نیز به خوبی لحاظ شده و تحلیل پس از همگرا شدن منجر به ایجاد تلاش هایی در پوشش می گردد. بنابراین در این روش تحلیل نیازی به داشتن بار وارده از محیط بر تونل، بصورت یک الگوی بار مستقل، نبوده و تلاش های ایجاد شده در پوشش به سبب مدلسازی محیط دارای دقت بیشتری نسبت به روش تیر- فنر است.



در هر دو روش تیر- فنر و تیر- محیط پیوسته برای مدل سازی پوشش روش های متفاوتی وجود دارد که در هر روش با اعمال فرضیاتی جهت ساده سازی از حجم محاسبات کاسته می شود.

#### الف- روش اصلاح مدول الاستیسیته (استاندارد ژاپن)

در این روش رینگ بصورت یکپارچه با مدول الاستیسیته کاهش یافته مدل می شود و با اعمال ضریب افزایش دهنده و کاهش دهنده ای در لنگر به ترتیب مقادیر ممان در وسط سگمنت و محل اتصال تعیین می گردد (مقدار ضریب  $\xi$  بین اعداد ۰/۳ تا ۰/۵ توصیه شده است). مراحل تحلیل در این روش به شرح زیر می باشد:

- اصلاح مدول الاستیسیته رینگ با ضریب اصلاح  $(1 - \xi)$
  - تحلیل سازه رینگ یکپارچه با لحاظ کردن مدول الاستیسیته مرحله قبل
  - اصلاح مقادیر لنگر خمشی در محل وسط سگمنت و محل اتصال دو سگمنت با استفاده از ضرایب اصلاح زیر:
- $$\text{ضریب اصلاح لنگر خمشی در محل وسط سگمنت} = (1 + \xi)$$
- $$\text{ضریب اصلاح لنگر خمشی در محل اتصال دو سگمنت} = (1 - \xi)$$

#### ب- روش ممان اینرسی اصلاح شده

در این روش، اصلاح ممان اینرسی مقطع به جهت در نظر گرفتن اثر درزها در محل اتصال قطعات بتنی پیش ساخته بتنی (سگمنت) صورت می پذیرد. مطابق توصیه FHWA ممان اینرسی اصلاح شده تابعی از تعداد قطعات سگمنت تشکیل دهنده رینگ بوده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$I_e = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 I \quad \text{for } n > 4$$

هر یک از پارامترها در رابطه فوق عبارتند از:

$I_e$ : ممان اینرسی اصلاح شده (مؤثر) مقطع

$I_j$ : ممان اینرسی مؤثر در محل درزها

$I$ : ممان اینرسی مقطع کامل

$n$ : تعداد قطعات سگمنتی تشکیل دهنده یک رینگ

#### ۲-۱۰-۳-۱- مدل سازی به روش تیر- فنر

چنانکه پیشتر نیز گفته شد، در روش تیر- فنر پوشش بتنی تونل توسط المان تیر- ستون مدل شده که به صورت الاستیک خطی می باشد. در این روش لازم است کلیه بارها اعم از بار وارده از جانب زمین بر پوشش مشخص باشد. از میان بارهای معرفی شده در بخش قبل، با توجه به اهمیت بارهای ناشی از فشار زمین و بار دینامیکی حاصل از زمین لرزه همچنین پیچیدگی نسبی تعیین مقدار تقریبی این نیروها در این روش، روابط مختلفی توسط محققان برای محاسبه این نیروها پیشنهاد شده است.



### - اثرات تکیه گاهی مصالح اطراف سازه در روش تیر- فنر

چنانکه گفته شد بر اساس تئوری تیر- فنر، اثرات تکیه گاهی مصالح اطراف سازه با استفاده از فنرهای وینکلر فشاری شبیه سازی می شود. پژوهشگران رابطه های متفاوتی برای استخراج سختی فنر بر حسب مدول تغییر شکل پذیری محیط اطراف پوشش بتنی ارائه نموده اند. رابطه پیشنهادی جهت تخمین سختی فنر به صورت زیر محاسبه می شود.

$$K_s = \frac{E_s}{R(1 + \nu_s)}$$

در این رابطه  $E_s$  مدول الاستیسیته خاک،  $R$  شعاع تونل و  $\nu_s$  ضریب پواسون زمین است.

### - بارگذاری در مدل تیر - فنر

تعیین دقیق بارهای وارد بر پوشش تونل با بهینه سازی طراحی سازه ای مقطع، هزینه های اضافی تحمیلی به پروژه ناشی از اعمال ضرایب اطمینان غیر واقعی را کاهش می دهد. بر این اساس توصیه می شود حتماً تحلیل بارهای وارد بر سازه تونل در مراحل اولیه طراحی به صورت دقیق انجام پذیرد و نتایج این بررسی ها به عنوان بارگذاری مبنای محاسبات قرار داده شود. همچنین در بخش بعدی مدلسازی محیط اطراف تونل و در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه به عنوان روش مطلوب در تعیین دقیق مقدار بار وارد از سوی زمین اطراف به تونل معرفی شده است. برخی از روابط تحلیلی در برآورد نیروی وارد از سوی زمین اطراف به پوشش سگمنتی در ادامه ارائه شده است.

برخی روش های تحلیل در برآورد نیروی خاک عبارتند از:

#### ▪ رابطه تحلیلی ترزاقی

$$\sigma_v = \frac{B \cdot \gamma' - c}{k_0 \tan \phi} \left( 1 - e^{-k_0 \tan \phi \frac{H_w}{B}} \right) + \frac{B \cdot \gamma - c}{k_0 \tan \phi} \left( e^{-k_0 \tan \phi \frac{H_w}{B}} - e^{-k_0 \tan \phi \frac{H}{B}} \right) + q_0 \cdot e^{-k_0 \tan \phi \frac{H}{B}}$$

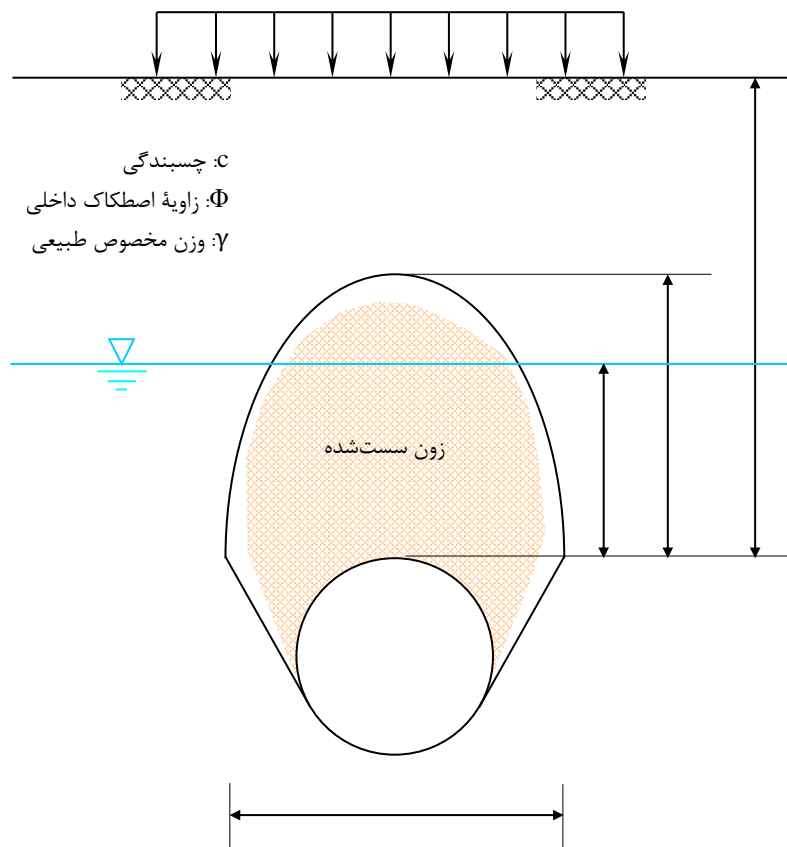
$$B = R \cdot \cot \left( \frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right)$$

$$k_0 = 1 - \sin \phi$$

$$H_0 = H_w + \frac{\sigma_v - H_w \cdot \gamma'}{\gamma}$$

که در این روابط  $k_0$  ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون بوده و مابقی پارامترها در شکل (۲-۳۴) نمایش داده شده اند. همچنین بر اساس آیین نامه ژاپن؛ حداقل بار قائم مؤثر از رابطه فوق با توجه به مشخصات مقاومتی خاک و عمق تونل، کمتر از ۱ الی ۱/۵ برابر قطر تونل و یا ۲۰ تن بر متر مربع نخواهد بود. فشار جانبی خاک بر سازه تونل تابعی از بار قائم و از نوع AT REST با ضریب فشار جانبی  $k_0$  در نظر گرفته می شود.





شکل ۲-۳۴: نمایی شماتیک از تئوری قوس فشار ترزاقی

برخی روش‌های تجربی در برآورد نیروی سنگ عبارتند از:

- روش ترزاقی (۱۹۴۶)
- روش اصلاح شده ترزاقی توسط Deere و همکاران (۱۹۷۰)
- روش ترزاقی اصلاح شده توسط Singh و همکاران (۱۹۹۵)
- رابطه Unal
- رابطه Venkatsoarlo (۱۹۸۹)
- رابطه بارتون و همکاران (۱۹۷۴ و ۱۹۷۵)
- رابطه بهاسین (۱۹۹۶)
- رابطه ارتش آمریکا (EM 1110-2-2901)



## ۲-۱۰-۳-۲- مدلسازی محیط اطراف تونل و اندرکنش خاک و سازه

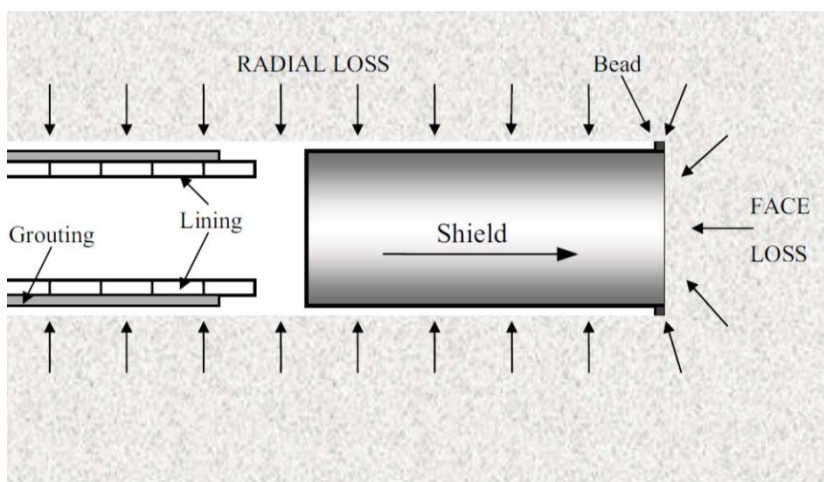
در روش تیر- فنر محیط پیرامونی تونل با استفاده از فنرهایی شبیه‌سازی می‌شود. روش دیگری که تقریب دقیق‌تری از رفتار محیط پیرامونی ارائه می‌دهد، استفاده از مدلسازی عددی با مدلسازی محیط اطراف تونل و در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه است.

### - تئوری گپ (GAP METHOD)

بهترین روش در مدلسازی مراحل حفاری با دستگاه TBM استفاده از اطلاعات دقیق حاصل از محل حفاری در حین انجام عملیات حفاری از قبیل منحنی نشست سطحی، آنالیز برگشتی پارامترهای مقاومتی مصالح حفاری شده و پارامترهای عملکردی دستگاه (حد تأثیر تزریق دوغاب پشت پوشش و عامل کیفیت اجرا) است. با این وجود، امکان دستیابی به این اطلاعات در مرحله طراحی وجود ندارد. بنابراین طراحان در مراحل آغازین طراحی تنها خصوصیات خاک اطراف و شرایط توزیع تنش در خاک را در اختیار دارند و به روابط تجربی و تحلیلی برای تعیین تخمینی از افت حجم در اثر حفاری نیاز دارند. بدین منظور از روش مدلسازی Gap Method که از روش‌های معتبر برای مدلسازی دوبعدی تونل‌های تمام مکانیزه می‌باشد، می‌توان استفاده کرد.

### - مفهوم نسبت افت زمین (Valume Loss) و روش گپ (Gap Method)

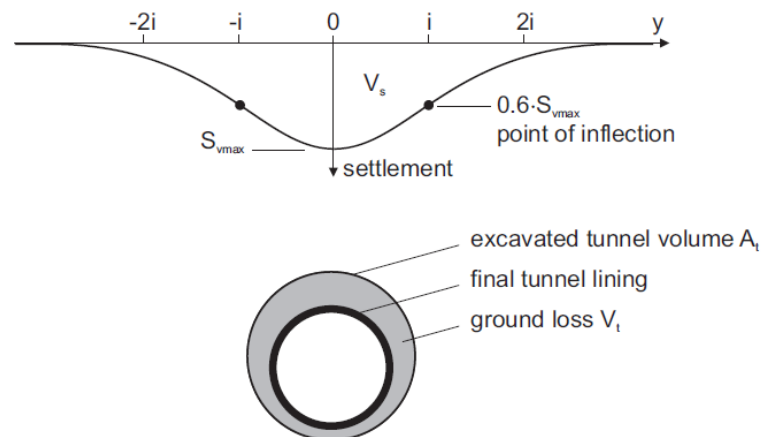
در زمان حفاری، زمین اطراف تونل به سمت فضای داخلی حرکت می‌کند. بنابراین حجم حفاری بیش از حجم حفره نهایی است. این اختلاف حجم حفاری از دو بخش اصلی تشکیل شده است: افت ناشی از حفاری جبهه کار و افت شعاعی. این افت‌ها در مجموع افت حجم کلی را تشکیل می‌دهند که بر حسب مترمکعب در متر طول تونل بیان می‌شود.



شکل ۲-۳۵: افت حجم و اجزای آن در فرایند حفاری مکانیزه

نسبت افت زمین Volume Loss (و یا GLR) که به عنوان کلیدی‌ترین پارامتر کنترل نشست زمین در تونلسازی مطرح است، برابر است با نسبت اختلاف حجم حفر شده ( $V_t$ ) بر حجم کلی حفاری ( $A_t$ ).





شکل ۲-۳۶: نسبت افت زمین Volume Loss

در شرایطی که رفتار زمین در حجم ثابت اتفاق بیفتد، حجم خالص نشست سطح زمین تقریباً با افت حجم تونل برابر است  $V_s = V_t$  بنابراین:

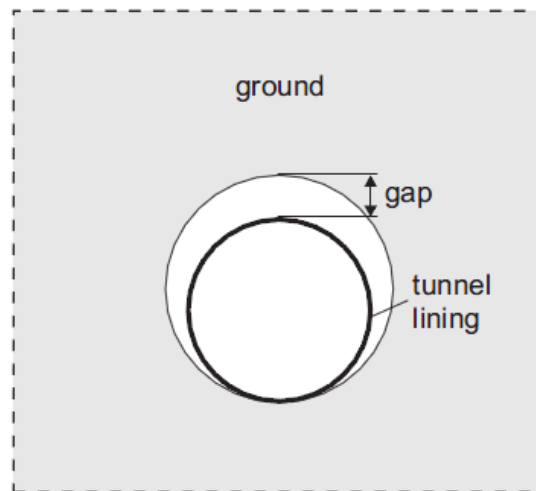
$$GLR = \frac{V_t}{A_t} \approx \frac{V_s}{A_t},$$

پیش‌بینی مقدار کل افت حجم برای طراحان تونل بسیار مفید خواهد بود، اما با توجه به ارتباط افت حجم به عواملی که در مرحله طراحی ناشناخته هستند، تعیین این پارامتر در مرحله طراحی بسیار دشوار خواهد بود. طراحان در مراحل آغازین طراحی، خصوصیات خاک اطراف و شرایط توزیع تنش در خاک را در اختیار دارند، بنابراین روابط تجربی و تحلیلی برای تعیین تخمینی از افت حجم در اثر حفاری ارائه شده است.

پیدایش تئوری Gap method حاصل تحقیقات Rowe و همکارانش در سال ۱۹۸۳ است. پس از آن این تئوری توسط افراد دیگری توسعه یافته است. در این روش مدلسازی به دو بخش متوالی تقسیم می‌شود. در مرحله اول از طریق تخصیص پارامتر گپ (g)، افت ناشی از تمام مراحل قبل از افت الاستیک سگمنت و در مرحله دوم افت الاستیک سگمنت اتفاق می‌افتد. بنابراین پارامتر کنترل‌کننده نشست در این روش میزان گپ است. بر این اساس افت کلی زمین در حین و پس از حفاری شامل چهار پارامتر زیر می‌باشد:

$$V_{Ltotal} = V_{Lface} + V_{Lshield} + V_{Ltail} + V_{Llining/time}$$





شکل ۲-۳۷: تئوری Gap

بنابراین در هنگام عملیات حفاری، پارامتر گپ (g) از جمع سه پارامتر مستقل تشکیل می‌شود:

$$g = G_p + U_{3D}^* + \omega$$

$U_{3D}^*$  = متناظر با افت زمین در جبهه حفاری TBM است (VLface).

$G_p$  = گپ فیزیکی متناظر با مجموع افت زمین در اثر اضافه حفاری سپر، افت الاستیک سپر و افت ناشی از تزریق

تماس خاک با سگمنت در قسمت Tail سپر می‌باشد (VLsheild).

$\omega$  = متناظر با اضافه افت ناشی از عملکرد اپراتور و دستگاه TBM است (VLtail).

با استفاده از مشخصات دستگاه TBM، سگمنت‌ها و وضعیت ژئوتکنیک زمین مقادیر زیر برای پارامترهای گپ (g)

محاسبه شد:

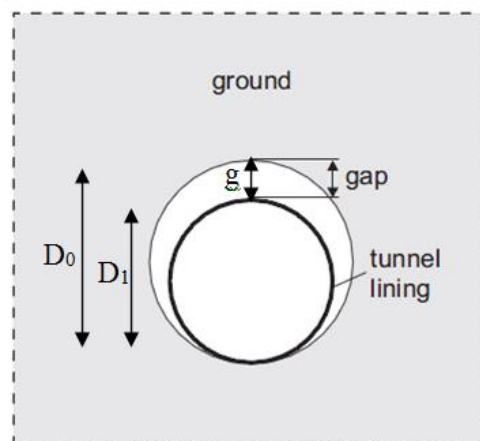
$$G_p = \alpha G'_p$$

پارامتر  $\alpha$  فاکتور تزریق گروت است که مقدار آن برابر با ۰/۰۷ در نظر گرفته می‌شود. در روش تئوری گپ فرض بر

تغییر شکل صفر در کف مقطع می‌باشد، بنابراین تمام تغییرشکل در سقف اعمال می‌شود. بنابراین مقدار افت زمین بر

اساس توضیحات فوق و رابطه زیر تعیین خواهد شد.



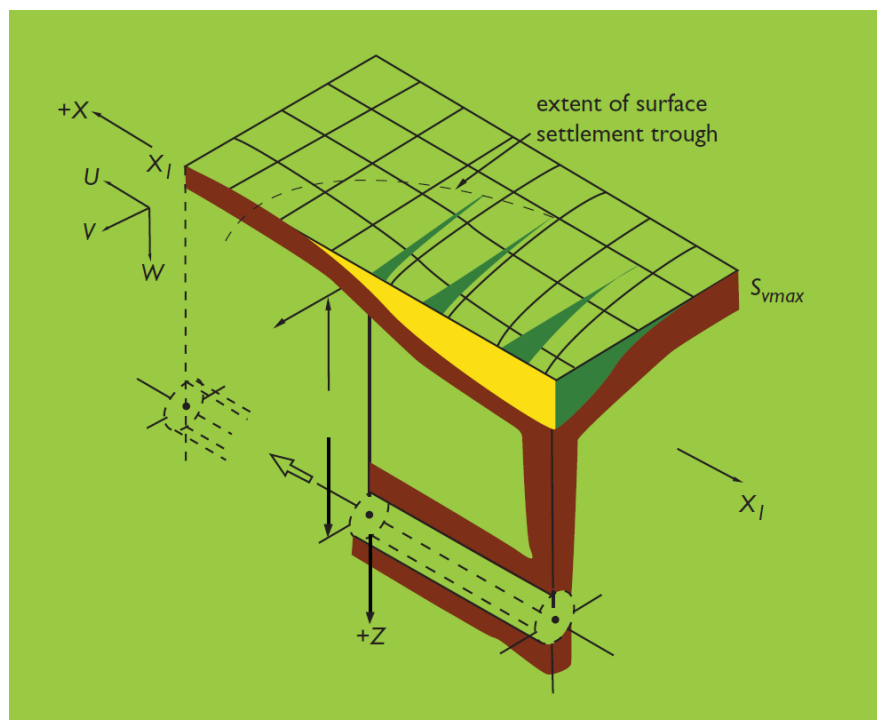


شکل ۲-۳: طبقه محاسبه میزان افت حجم در تئوری Gap

$$V_L = \frac{V_0 - V_1}{V_0} = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2} = \frac{D_0^2 - (D_0 - g)^2}{D_0^2} = \frac{9.07^2 - 9.0375^2}{9.07^2} = 0.7\%$$

#### - پروفیل تغییر شکل طولی (LDP) تونل

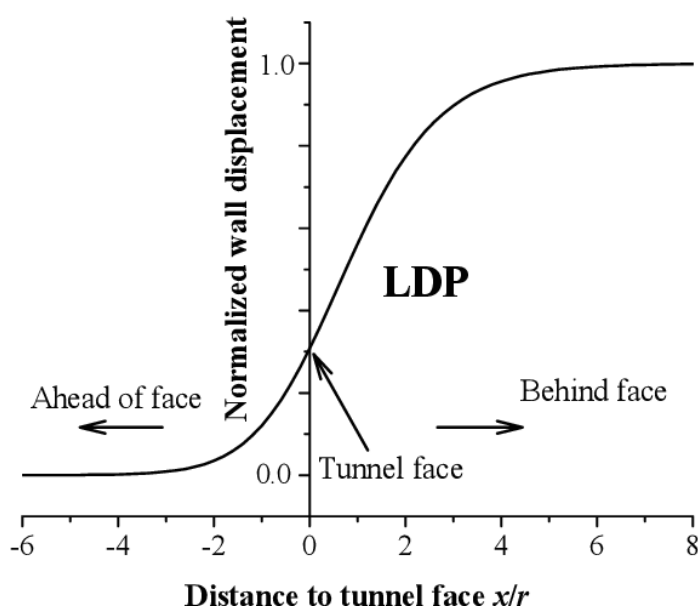
شکل زیر نمایش شماتیکی از نحوه وقوع نشست‌های طولی و عرضی در سطح زمین در اثر پیش روی جبهه حفاری را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۳۹: اثر سه بعدی نشست ناشی از حفاری تونل - پروفیل نشست طولی و عرضی



چنانکه در تصویر فوق نمایش داده شده است، علاوه بر وقوع نشست‌های عرضی در سطح زمین، نشست‌های طولی در مسیر حفاری تونل اتفاق خواهد افتاد. اثر این نشست‌ها از محل قرارگیری جبهه حفاری نیز فراتر رفته و اثر پیش‌رونده در مسیر حفاری خواهد داشت. بنابراین در صورتیکه نشست یک نقطه در راستای محور طولی تونل بر روی سطح زمین مورد پایش قرار گیرد، منحنی نشست این نقطه به ازای فواصل مختلف جبهه حفاری از آن قابل ترسیم است. در حقیقت منحنی پروفیل تغییر مکان طولی، نموداری است که محور افقی آن فاصله جبهه حفاری از نقطه پایش نسبت به قطر حفاری و محور قائم آن تغییر مکان نقطه مورد پایش را نشان می‌دهد. این نمودار میزان تغییر مکان یک نقطه خاص در فاصله معین از شروع حفاری به ازای فواصل مختلف جبهه حفاری از آن نقطه را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۴۰: نمودار پروفیل تغییر شکل طولی (LDP) تونل

چنانکه در نمودار پروفیل تغییر مکان طولی مشاهده می‌شود، نشست زمین تا فاصله‌ای حدود دو برابر قطر حفاری جلوتر از جبهه حفاری توسعه یافته است و نشست نقاط تنها نشست ناشی از عبور جبهه حفاری از محل پایش نیست. همچنین نشست نقطه مورد پایش در هنگام عبور جبهه حفاری، از مقدار نهایی آن که با فاصله گرفتن جبهه حفاری از نقطه پایش تکمیل و به مقدار ثابتی افزایش می‌یابد، کمتر است. جهت مدلسازی صحیح روند حفاری لازم است مقدار تغییر شکل زمین در هنگام عبور جبهه حفاری و نشست نهایی مربوط به همان نقطه تعیین شود تا بر اساس این اطلاعات میزان تغییر شکل زمین در هنگام نصب سگمنت و یا به عبارت دیگر میزان ترخیص تنش زمین در هنگام نصب پوشش دائم تعیین شود. در مورد تعیین ضریب ترخیص تنش توجه به مباحث ارائه شده در ضوابط طراحی ایستگاه قطار شهری و حومه نیز ضروری است.



## ۲-۱۰-۴- ملاحظات طراحی

سازه باید ظرفیت کافی در برابر بارهای حین ساخت، حمل، انتقال، نصب و بهره‌برداری را دارا باشد. مبنای طراحی اعضای بتنی آیین‌نامه بتن ایران (آبا) است. مفاد تکمیلی در ضوابط طراحی ایستگاه قطار شهری و حومه و در ادامه ارائه شده است.

### - طراحی تحت اثر بارهای وارده در حین فرآیند تولید، حمل و دپوی سگمنت‌ها

در این حالت تنش ایجاد شده در قطعات سگمنتی حین خارج کردن این قطعات از قالب، دپوی موقت و دائم، بلند کردن قطعات و انتقال به داخل تونل با تنش‌های مجاز، مقایسه می‌گردد و در صورت لزوم دستورالعمل‌هایی برای انجام فرآیندهای مذکور ارائه می‌شود. در این حالات بارگذاری هدف عدم ایجاد ترک در بتن بوده و مقاومت بتن در هر یک از این مراحل نیز در نظر گرفته می‌شود.

### - طراحی تحت اثر بارهای وارده از طریق TBM در زمان نصب

نیروی مورد نیاز برای پیشروی TBM از طریق تکیه جک‌های هیدرولیکی به رینگ‌های کار گذاشته شده منتقل می‌شود. کنترل سازه‌ای سگمنت در برابر بارهای وارده از طریق TBM، شامل موارد زیر می‌باشد:

#### ▪ کنترل لهیدگی بتن در محل کفشک‌های جک

از آنجایی که بار جک به صورت یک بار متمرکز و از طریق کفشک‌ها به بدنه سگمنت وارد می‌شود، لازم است لهیدگی بتن سگمنت در برابر بار جک کنترل شود. منظور از کنترل لهیدگی مقایسه تنش موجود در سطح اعمال بار با ظرفیت لهیدگی بتن است.

#### ▪ تنش کششی ایجاد شده در ضخامت سگمنت در راستای شعاعی

نیروی فشاری وارد بر سگمنت به واسطه اتکای جک‌های پیشران دستگاه به رینگ سبب ایجاد نیروی کششی در راستای شعاعی داخل سگمنت می‌گردد که برای غلبه بر این نیرو آرماتورهای موسوم به آرماتورهای نردبانی (Ladder) در سگمنت تعبیه می‌شود. جهت تخمین میزان کشش ایجاد شده در مقطع و ناحیه اثر تنش‌های کششی ناشی از اعمال بار جک‌های پیشران، روابط تقریبی فراوانی توسط آیین‌نامه‌ها و محققان مختلف ارائه شده است. جدول (۲-۷) خلاصه‌ای از این روابط ارائه می‌نماید.



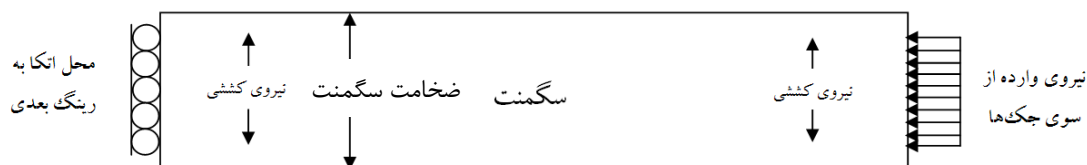
جدول ۲-۷: روابط مختلف ارائه شده جهت تعیین تنش کششی ناشی از اعمال بار فشاری جک های پیشران

	Bursting force, $T_b$	Peak Stress, $\sigma_p$	Centroid, $x_c$
Guyon (1953, 1972)	$1.1 \times 0.25(1 - \frac{a}{d})P$	$1.1 \times 0.47(1 - \frac{a}{d})\frac{P}{ab}$	-
Leonhardt [20]	$0.3(1 - \frac{a}{d})P$	-	-
BS8110 (1997)	Min of $0.23P$ and $(0.32 - 0.3\frac{a}{d})P$	-	-
Eurocode (2004)	$h/d \geq 2, 0.25(1 - \frac{a}{d})P$ $h/d < 2, 0.25(1 - 0.7\frac{a}{h})P$	-	-
Gupta and Khapre (2008)	$(0.239 - 0.267\frac{a}{d} + 0.075v)P$	-	-
He and Liu (2011)	$0.22(1 + \frac{2e}{d})^2(1 - \frac{2e}{d} - \frac{a}{d})\Sigma P$	-	-
ACI318 (2014)	$0.25(1 - \frac{a}{d})P$	-	$0.5(d-2e)$
AASHTO (2014)	$0.25(1 - \frac{a}{d})\Sigma P$	-	$0.5(d-2e)$
Zhou et al (2015)	$0.25(1 + \frac{2e}{d})^2(1 - \frac{2e}{d} - \frac{a}{d})\Sigma P$	-	-

از میان روابط فوق، رابطه زیر جهت محاسبه نیروی کششی ایجاد شده در راستای عمود بر امتداد جک های دستگاه حفار پیشنهاد می شود:

$$Z = 0.25N(1 - \frac{b}{h})$$

که در رابطه فوق،  $Z$  نیروی کششی،  $N$  نیروی فشاری وارد بر سگمنت،  $h$  ضخامت سگمنت و  $b$  عرض اتصال می باشد. روش دیگر جهت طراحی این آرماتورها اقدام به مدلسازی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار المان محدود است. در شکل زیر نمای شماتیک از مدل ساخته شده ارائه شده است.



شکل ۲-۴۱: نمایش شماتیک مدلسازی سگمنت ها در برابر بار کفشک ها

#### ▪ تنش کششی پیرامونی ایجاد شده در جهت طول سگمنت مابین کفشک ها

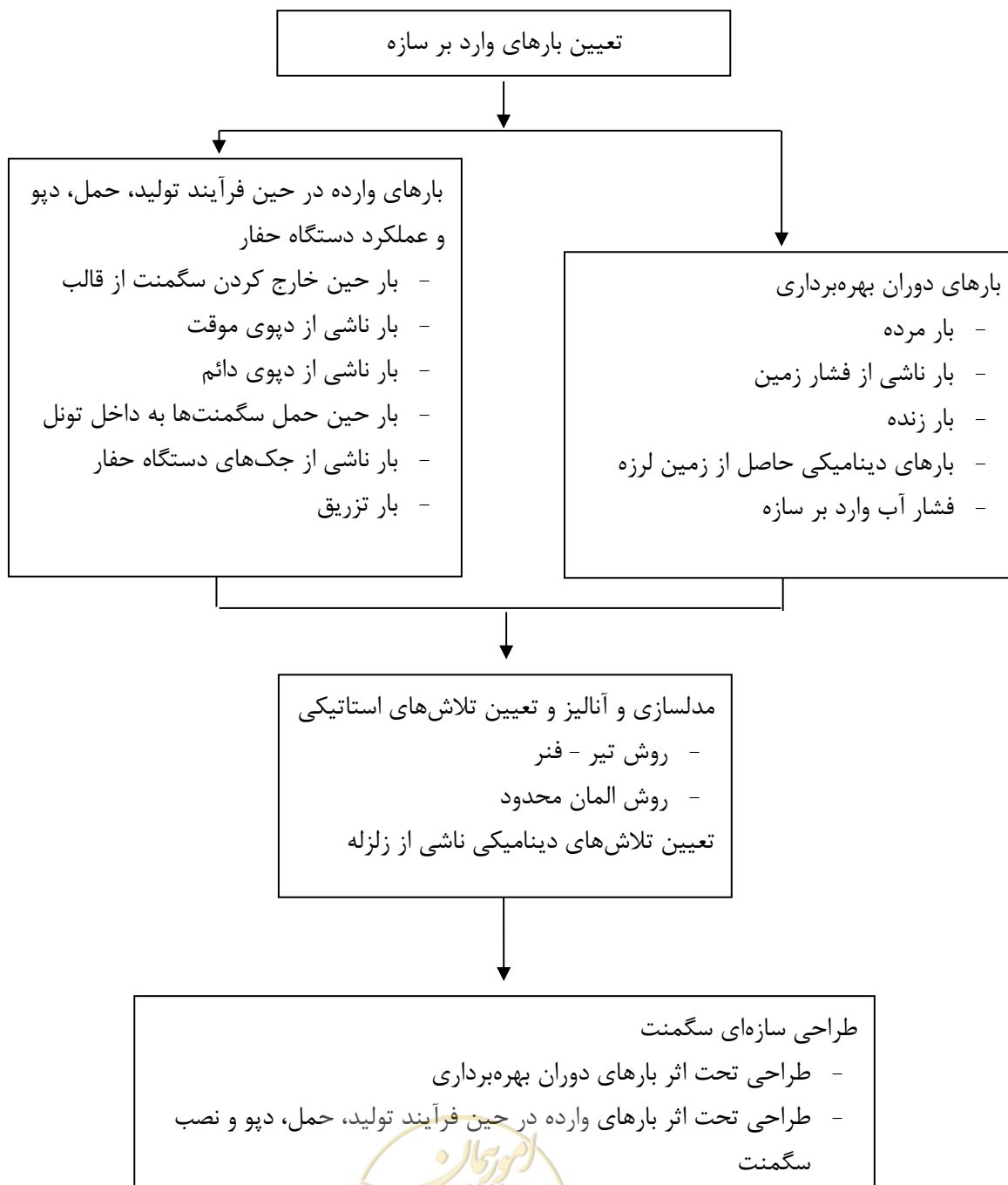
با توجه به چیدمان کفشک ها بر روی سگمنت و فاصله بین آنها، در ناحیه حفاصل دو کفشک مجاور هم که بر روی یک سگمنت قرار گرفته اند، تنش کششی ایجاد خواهد شد. برای بررسی تنش کششی پیرامونی ایجاد شده در سگمنت در حد فاصل کفشک ها لازم است مدلسازی به روش اجزای محدود انجام پذیرد.



### - طراحی تحت اثر بارهای دوران بهره‌برداری

سازه تونل سگمندی باید ظرفیت خمشی و برشی کافی جهت تحمل بارهای وارد بر سازه را دارا باشد. علاوه بر بررسی ظرفیت خمشی و برشی مقطع، اثر حفر تونل بر روی سازه‌های سطحی بر اساس بررسی نشست سطح زمین باید مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با توجه به ایجاد نیروی محوری در رینگ‌های نصب شده در تونل، لازم است ظرفیت لهیدگی مقطع در موقعیت سگمنت‌های مجاور نیز مورد بررسی قرار گیرد.

جمع‌بندی طراحی سازه‌ای تونل سگمندی به شرح دیاگرام زیر خلاصه شده است:



## فصل ۳

---

### طراحی توئل سنتی





## ۳-۱- مقدمه

روش‌های ساخت تونل و فضاهای زیرزمینی بسیار متنوع بوده (مکانیزه، سنتی و کند و پوش) و با توجه به عواملی چون ابعاد سازه زیرزمینی، مشخصات مقاومتی زمین، عمق قرارگیری تونل و ارتفاع روباره، وضعیت آب زیرزمینی، موقعیت و نوع زیرساخت‌های شهری، محل قرارگیری نسبت به سازه‌های سطحی، سطح تکنولوژی، بومی شدن روشی خاص، میزان اهمیت تسریع در ساخت از نظر کارفرما، تداخل با فعالیت‌های سطحی و ریسک پذیری کارفرما و پیمانکار انتخاب می‌شود (جدول ۳-۱ و ۳-۲).

در این فصل به بررسی عوامل مهم و تاثیرگذار در پارامترهای طراحی تونلسازی NATM پرداخته خواهد شد.

جدول ۳-۱: مقایسه بین انواع روش‌های ساخت تونل

روش کند و پوش	روش تونلسازی مکانیزه	روش تونلسازی سنتی	
ابتدا حفاری از سطح زمین تا تراز مورد نظر انجام می‌شود. سازه تونل در عمق مورد نظر احداث شده و سپس سازه ایجاد شده با استفاده از مصالح حفاری تا سطح اولیه زمین پوشانده می‌شود.	با پیشروی سپر، پوشش نهایی تونل نصب شده و بمنظور مقابله با فشار زمین و یا فشار هیدرولیکی، جبهه‌کار با استفاده از مصالح حفاری و یا دوغاب نگهداری خواهد شد.	استفاده کامل از قابلیت خودنگهداری زمینی که در آن حفاری تونل انجام می‌شود. زمین در طول حفاری با استفاده از المان‌هایی چون شاتکریت، راک بولت و قاب‌های فولادی و... نگهداری می‌شود. شرایط لازم جهت حفاری، تشکیل اثر قوس شوندگی و پایداری جبهه کار در طول حفاری تونل است. در صورت عدم وجود شرایط مذکور، بکارگیری روش‌های کمکی ضروری است.	بررسی اجمالی
اساساً از این روش در تمامی شرایط زمین‌شناسی می‌توان بهره برد. سازه نگهبان و یا روش‌های کمکی مناسب بر اساس شرایط زمین‌شناسی انتخاب می‌شود.	این روش عموماً برای تونلسازی در رسوبات آبرفتی بسیار نرم، عمدتاً در سنگ‌های بستر متشکل از رسوبات آبرفتی سخت شده و سنگ‌های نرم مربوط به دوران زمین‌شناسی نئوژن قابل کاربرد است. پاسخ نسبتاً آسان به تغییرات شرایط زمین‌شناسی. همچنین در مواردی از این روش در حفاری تونل در سنگ‌های سخت نیز بکار رفته است.	این روش عمدتاً برای تونل‌زنی در سنگ‌ها سخت تا سنگ‌های نرم دوران سوم زمین‌شناسی دارای کاربرد است. همچنین بسته به شرایط، این روش برای زمین‌های تحکیم نیافته نیز قابل کاربرد است. سیستم نگهداری فولادی، روش‌های حفاری و روش‌های کمکی را می‌توان بسته به تغییر شرایط زمین‌شناسی، تغییر داد.	شرایط زمین‌شناسی قابل کاربرد



روش کند و پوش	روش تونلسازی مکانیزه	روش تونلسازی سنتی	
روش‌های کمکی شامل بکارگیری دیوارهای نگهبان عمیق‌تر، آبکشی جهت پایین بردن سطح آب زیرزمینی، تقویت خاک و... بمنظور جلوگیری از خیز و یا جوشش خاک کف گود ضروری است.	معمولاً نوع بسته سپرهای حفاری بجز مقاطع شروع و پایان حفاری، به روش‌های کمکی نیازی ندارد.	در صورتیکه جریان آب ورودی به تونل خودنگهداری جبهه کار حفاری و یا پایداری زمین در حین حفاری را تحت تأثیر قرار دهد، بکارگیری روش‌های آب‌بندی نظیر ایجاد چاه‌های زهکشی عمیق، چاهک‌های نقطه‌ای و یا تونل‌های زهکشی ضروری است.	روش‌های کمکی مورد استفاده در صورت وجود آب زیرزمینی
معمولاً محدودیتی برای حداقل روباره وجود ندارد. تجربه حفاری تونل‌هایی با عمق ۴۰ متر و یا بیشتر وجود دارد.	معمولاً می‌توان گفت که این روش برای حداقل روباره یک تا ۱/۵ برابر قطر سپر دارای کاربرد است. در گذشته، تونل‌هایی با عمق روباره نصف قطر و یا کمتر نیز ساخته شده است. حداکثر عمق تونل در توده سنگ در حدود ۲۰۰ متر (با فشار آب ۰/۶۹ مگاپاسکال) است. با این وجود، دستاوردهای قابل توجهی در استفاده از این روش حفاری در خاک‌های ماسه‌ای با فشار آب حدود ۱ مگاپاسکال وجود دارد.	در زمین‌های تحکیم نیافته، در شرایطی که نسبت روباره به قطر تونل کمتر از ۲ باشد، بکارگیری روش‌های کمکی جهت جلوگیری از ریزش تاج تونل و نشست سطح زمین ضروری است. تجربه ساخت تونل در عمق تقریبی ۱۲۰۰ متر با استفاده از روش حفاری سنتی در ژاپن وجود دارد.	عمق تونل
اساساً شکل مقطع بصورت مستطیلی است. همچنین امکان ایجاد شکل‌های پیچیده‌تر نیز وجود دارد.	اساساً شکل مقطع حفاری دایره‌ای است. همچنین با استفاده از ماشین‌های سپری خاص می‌توان اشکالی چون نیم دایره‌ای، چند دایره‌ای، بیضوی و ... را نیز حفاری کرد. تغییر شکل مقطع حفاری در طول اجرا معمولاً دشوار است.	اساساً مقطع حفاری دارای یک شکل قوسی در تاج تونل است. شکل مقطع تونل را می‌توان در طول حفاری تغییر داد.	شکل مقطع
به هنگام استفاده از این روش هیچ محدودیتی برای ابعاد مقطع حفاری وجود ندارد.	حداکثر قطر مقطع حفاری در حدود ۱۷ تا ۲۱ متر می‌باشد.	عموماً در این روش مقاطع حفاری تا ۱۵۰ متر مربع نیز خواهد رسید. بزرگترین سطح مقطع حفاری شده در این روش ۳۷۰ مترمربع می‌باشد.	ابعاد مقطع حفاری
تقریباً هیچگونه محدودیتی به هنگام استفاده از این روش وجود ندارد.	حداقل نسبت شعاع انحنا به قطر سپر مابین ۳ الی ۵ می‌باشد.	هیچگونه محدودیتی به هنگام استفاده از این روش وجود ندارد.	مسیر



اثر بر روی محیط اطراف	روش تونلسازی سنتی	روش تونلسازی مکانیزه	روش کند و پوش
<p>برای تونل در حال حفاری در مجاورت سایر سازه‌ها، استفاده از روش‌های کمکی (کنترل نشست) ضروری است.</p> <p>به هنگام حفاری تونل در محدوده های برون شهری، آسیب به سفره- های آب زیرزمینی، و در محدوده- های شهری نیز نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل و یا آبکشی مورد توجه قرار گیرد.</p> <p>در این روش به جز در مواردی چون احداث شفت‌ها، اختلال در ترافیک سطحی بسیار محدود است. سر و صدا و لرزش تنها در مجاورت پرتال تونل وجود دارد که با استفاده از دیوار ضد صدا یا محفظه ضد صدا می‌توان با آن مقابله کرد.</p>	<p>روش‌های کمکی کنترل نشست و یا تقویت سازه‌های موجود مجاور تونل در حال حفاری ضروری است.</p> <p>در این روش به جز در مواردی چون احداث شفت‌ها، اختلال در ترافیک سطحی بسیار محدود است. سر و صدا و لرزش تنها در مجاورت پرتال تونل وجود دارد که با استفاده از دیوار ضد صدا یا محفظه ضد صدا می‌توان با آن مقابله کرد.</p>	<p>برای تونل در حال حفاری در مجاورت سایر سازه‌ها، استفاده از روش‌های کمکی (کنترل نشست) ضروری است.</p> <p>از آنجائیکه محدوده ساخت تونل در طول اجرای آن باید مسدود شود، ترافیک سطحی عمدتاً دچار اختلال خواهد شد.</p> <p>بکارگیری تمهیدات مناسب در برابر آلودگی صوتی و ارتعاشات در طول تمامی مراحل ساخت تونل الزامی است.</p>	



جدول ۳-۲: مقایسه بین انواع روش‌های ساخت تونل

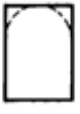

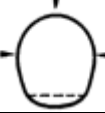
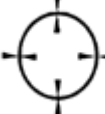
مورد مقایسه	روش		
	روش روباز (کند و پوش)	روش سپری	روش حفاری سنتی (NATM)
زمین‌شناسی	چینه‌های مختلف زمین‌شناسی	چینه‌های مختلف زمین‌شناسی	برای لایه‌های زیر سطح ایستایی تمهیدات ویژه‌ای مورد نیاز است.
موقعیت‌ها	اشغال محدوده وسیعی از سطح خیابان	اشغال محدوده کمی از سطح خیابان	اشغال محدوده کمی از سطح خیابان
تغییرات مقطع حفاری	مناسب برای مقاطع مختلف	غیر قابل کاربرد	مناسب برای مقاطع مختلف
عمق	عمق کم	عمق خاصی لازم است	عمق خاصی (کمتر از عمق مورد نیاز برای روش سپری) لازم است
آب‌بندی	آسان	دشوار	نسبتاً دشوار
نشست سطح زمین	فاقد نشست	قابل توجه	قابل اغماض
انسداد ترافیک	قابل توجه	متوسط	متوسط
خطوط لوله زیرزمینی	جابجایی و تمهیدات حفاظتی مورد نیاز است	نیازی به جابجایی و یا اقدامات حفاظتی خاصی نیست.	نیازی به جابجایی و یا اقدامات حفاظتی خاصی نیست.
ارتعاشات و آلودگی صوتی	شدید	متوسط	متوسط
جابجایی زمین	زیاد	نسبتاً زیاد	کم
تمهیدات مربوط به آب‌های زیرزمینی	آبکشی و زهکشی	تلفیقی از آب‌بندی و آبکشی	تلفیقی از آب‌بندی و آبکشی و یا آب‌بندی و زهکشی
پیشروی حفاری	تحت تأثیر تداخلات ناشی از جابجایی (ترافیک) است؛ عمر کلی پروژه کوتاه است.	فرآیند پیشروی پیچیده است؛ مدت زمان کلی اجرای پروژه متوسط است.	حفاری سریع‌تر می‌تواند آغاز شود؛ عمر کلی پروژه طولانی است.

### ۳-۲- شکل مقطع و ابعاد تونل

شکل هندسی مقطع و ابعاد تونل باید فضاهای مورد نیاز برای خطوط ترافیک، پیاده‌روی‌های ایمنی، تهویه و تجهیزات مربوطه، چراغ‌ها، سیستم کنترل ترافیک، سیستم‌های برقی، سیستم‌های ایمنی در برابر حریق و... را تامین کند. شکل هندسی حفاری تونل تا حد زیادی تابعی از روش ساخت تونل (کند و پوش، سنتی، مکانیزه، تجهیزات حفاری و بارگیری مصالح، قالب نهایی و...) و شرایط زمین‌شناسی می‌باشد.

شرایط زمین‌شناسی و میزان روباره بر روی شکل تونل تأثیرگذار می‌باشد. در شرایط زمین‌شناسی مساعد می‌توان از اشکال نعل اسبی یا مستطیلی استفاده نمود. اما در شرایط زمین‌شناسی ضعیف یا نامساعد، شکل مقطع به سمت دایره میل پیدا کرده تا توزیع بهتری از تنش‌ها پیرامون حفاریه انجام گیرد (شکل ۳-۱).



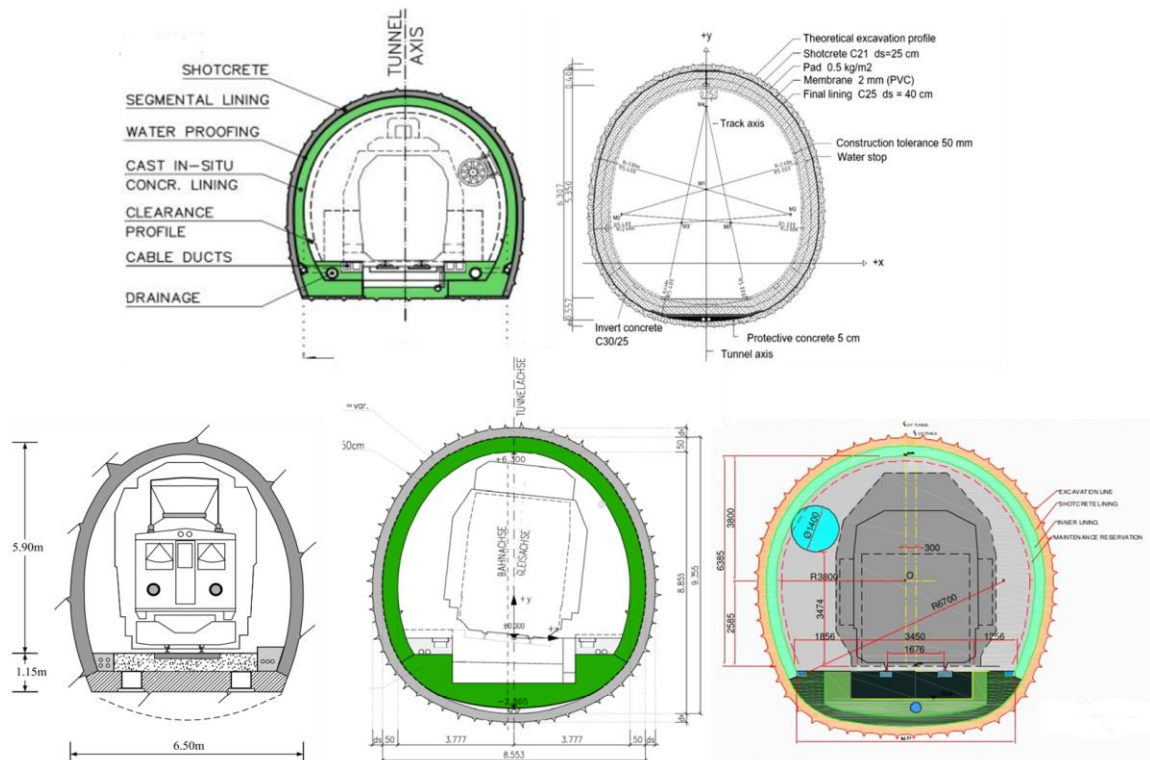
مستطیلی در مواقعی که نیروهای خارجی منجر به جابجایی‌های مخرب توده سنگ نشود از این مقطع استفاده می‌شود.	
شبه بیضوی، سهموی و یا شبه دایره‌ای در مواقعی که نیروهای قائم عمل می‌کنند مناسب است.	
نعل اسبی، قوسی در مواقعی که هم نیروهای قائم و هم نیروهای افقی عمل می‌کنند مناسب است.	
دایره‌ای در مواقعی که نیروهای همه جانبه اعمال شده و بویژه در شرایطی که فشار آب داخلی وجود دارد.	

شکل ۳-۱: اشکال مختلف تونل متناسب با شرایط زمین

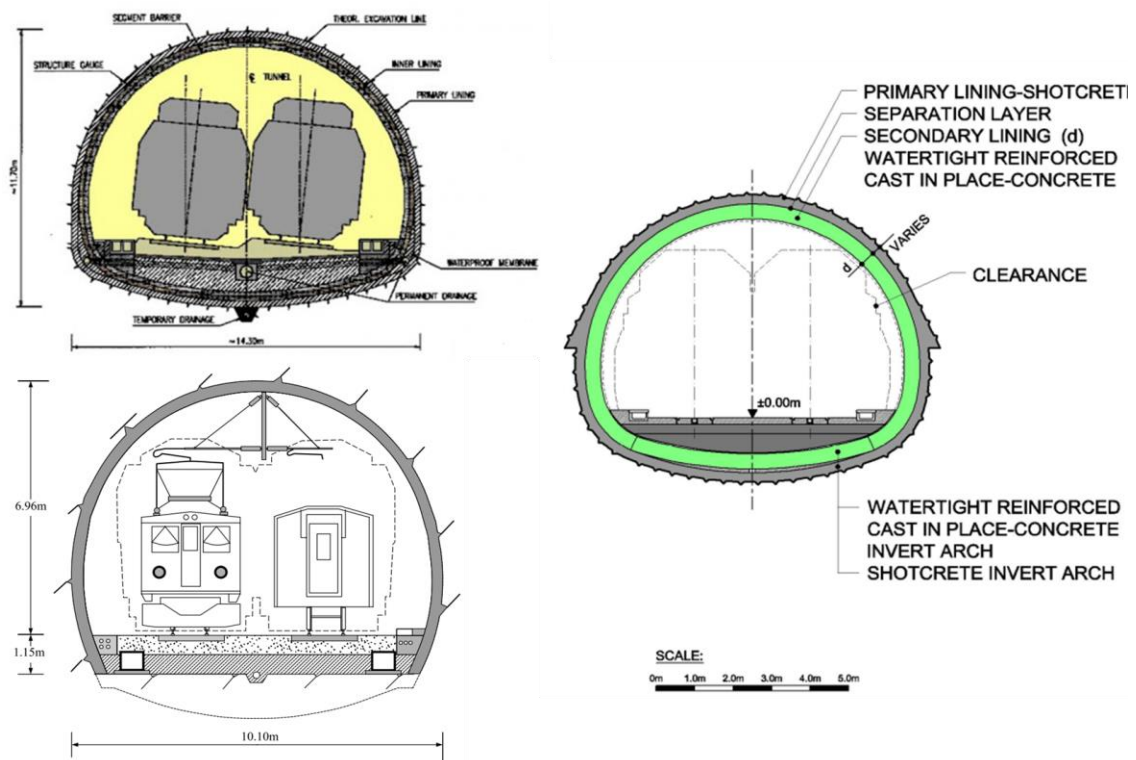
مقطع هندسی تونل در زمین‌های نرم و سست بایستی متشکل از چند قوس در سقف، دیواره‌ها و کف باشد و از دیواره‌های قائم و گوشه‌های تیز بایستی اجتناب نمود. در این صورت نیروهای وارده بر پوشش کاهش یافته و از احجام نگهداری کاسته خواهد شد. لذا در مواردی که استفاده از شکل‌های مختلف امکان پذیر باشد، باید شکلی را انتخاب کرد که موارد فنی و اقتصادی در آن لحاظ شده باشد.

مقطع تونل‌ها در روش حفاری NATM می‌تواند بصورت دایره‌ای، چهارگوش، D شکل (شکل حرف انگلیسی D که معادل ۹۰ درجه در جهت خلاف عقربه‌های ساعت چرخش یافته می‌باشد)، نعل اسبی و یا دهانی شکل (چند قوسی) باشد. برای تونل‌های مترویی که به روش NATM حفاری می‌شوند، عمدتاً از مقطع نعل اسبی و دهانی شکل برای مسیرهای تک خطه و دو خطه استفاده می‌کنند (شکل ۳-۲ و ۳-۳).



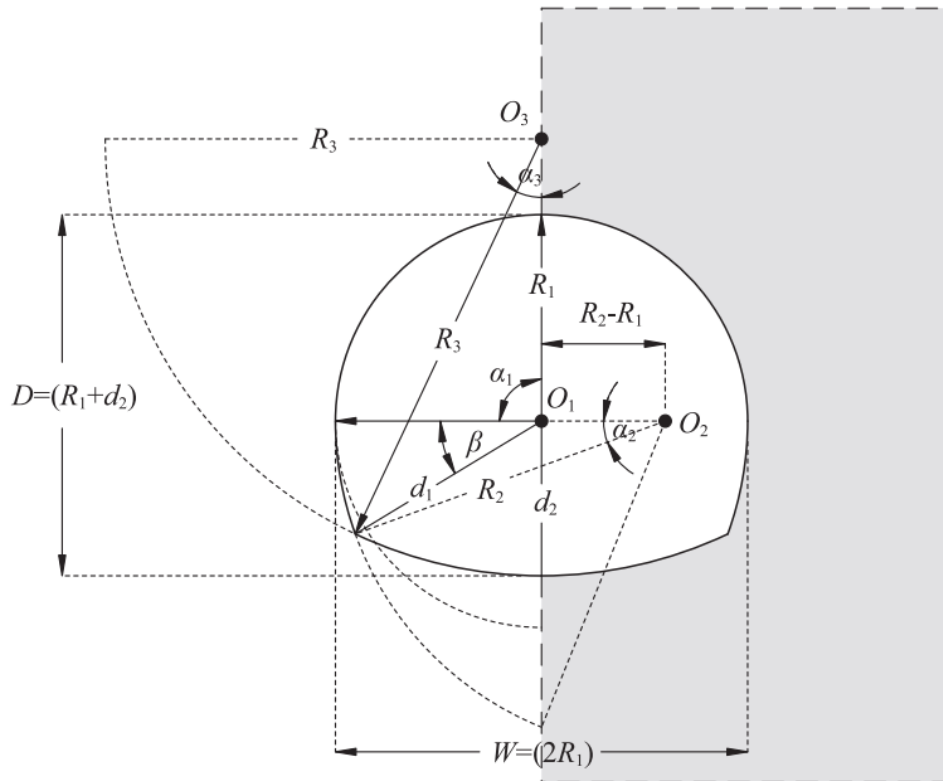


شکل ۳-۲: نمونه‌هایی از تونل‌های ریلی تک خطه با مقطع نعل اسبی



شکل ۳-۳: نمونه‌هایی از تونل‌های ریلی دو خطه با مقطع دهانی و نعل اسبی

تونل‌های NATM دارای شکل مقطع نعل اسبی می‌توانند به میزان قابل توجهی استفاده از فضا را بهبود بخشیده و حالت توزیع تنش بهتری را در مقایسه با سایر اشکال داشته باشند. ارتباط بین پارامترهای هندسی شکل مقطع نعل اسبی برای تونل‌های مرسوم شهری در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: نسبت بین شعاع‌های مختلف در مقاطع نعل اسبی

بر اساس شکل فوق، ارتباط بین پارامترهای هندسی به صورت زیر می‌باشد:

$$d_1 = \sqrt{(R_2 - R_1)^2 + R_2^2 - 2 \cos \alpha_2 \cdot R_2 (R_2 - R_1)}$$

$$d_2 = R_3 - d_1 / \sin \alpha_3 \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_3 + \beta)$$

$$\alpha_3 = \arcsin[d_1 \cdot \sin(\alpha_1 + \beta) / R_3]$$

$$\beta = \frac{3\pi}{2} - \alpha_1 - \arccos\{[(R_2 - R_1)^2 + d_1^2 - R_2^2] / [2d_1(R_2 - R_1)]\}$$

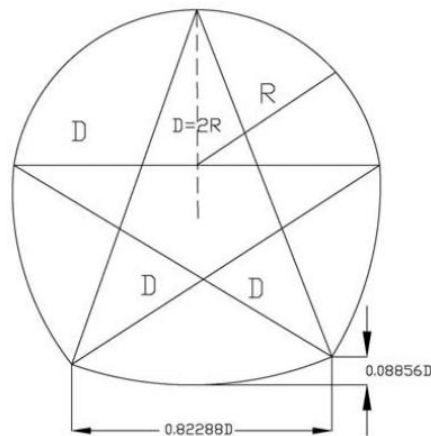
$$Area = \alpha_1 R_1^2 + [\alpha_2 R_2^2 - (R_2 - R_1) R_2 \cdot \sin \alpha_2]$$

$$+ [\alpha_3 R_3^2 - (R_3 - d_2) R_3 \cdot \sin \alpha_3]$$

در مقطع نعل اسبی، بخش بالای تونل به شکل نیم دایره و دیواره‌ها و کف آن نیز منحنی است. شعاع قوس دیواره‌ها

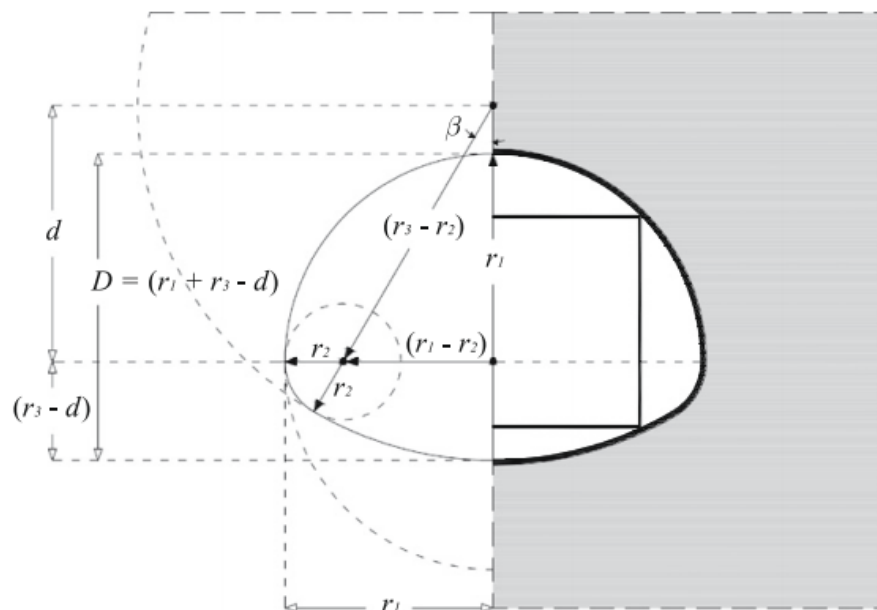
و کف تونل معمولاً دو برابر شعاع بخش بالایی است (شکل ۳-۵).





شکل ۳-۵: نمونه‌ای از نسبت بین شعاع‌های مختلف در مقاطع نعل اسبی

یک مقطع دهانی شکل نیز ترکیبی از قوس‌های دایره‌ای شکل است (شکل ۳-۶) در این مقطع، نسبت انحنای دیواره‌های مجاور باید حداکثر ۵ ( $r_1/r_2 < 5$ ) و کوچک‌ترین شعاع نیابستی کمتر از ۱/۵ متر باشد. نکته حائز اهمیت آن است که، هنگامی که حفاری در مصالح سست و ضعیف انجام می‌شود، بار قابل توجهی از سوی زمین به سیستم نگهداری وارد می‌شود. لذا در این شرایط، از نقطه نظر استاتیکی، مقاطع دارای انحنا در کف مناسب‌تر می‌باشند.



شکل ۳-۶: مقطع دهانی به همراه ابعاد و ارتباط بین شعاع‌های مختلف آن



بر اساس پارامترهای ورودی  $r_1$ ،  $r_2$  و  $r_3$ ، مشخصات هندسی مقطع دهانی شکل به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\sin \beta = \frac{r_1 - r_2}{r_3 - r_2}$$

$$d = \sqrt{r_3^2 - 2r_2(r_3 - r_1) - r_1^2}$$

$$\text{Area} = \frac{\pi}{2}r_1^2 + \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)r_2^2 + \beta r_3^2 - (r_1 - r_2)d$$

$$D = r_1 + r_3 - d$$

یکی از مشکلات شایع در طراحی تونل، گنجاندن و برآزش یک مستطیل (به طول  $b$  و عرض  $a$ ) درون مقطع دهانی است (۰ به عبارت دیگر پارامترهای  $r_1$ ،  $r_2$  و  $r_3$  باید طوری انتخاب شوند که مقطع دهانی شکل، مستطیلی را احاطه کند. یکی از راهکارهای مورد استفاده به صورت زیر می‌باشد:

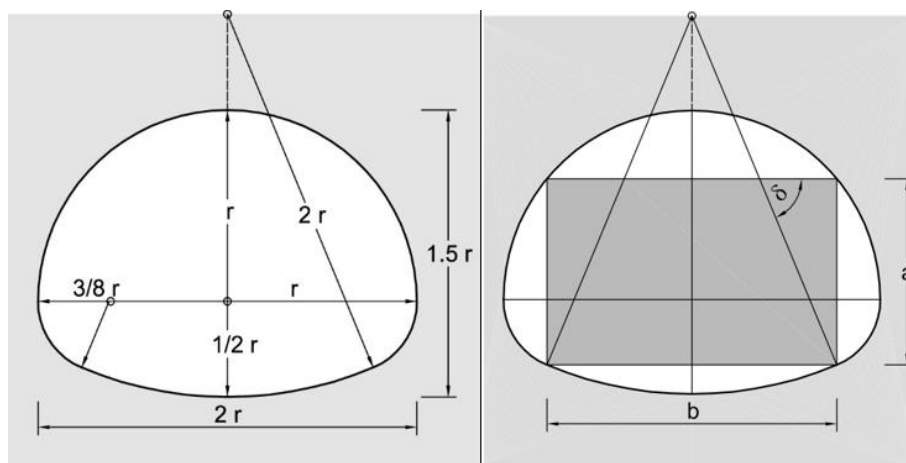
(۱) انتخاب  $r_1$

(۲) برآورد  $\sin \beta = b/2r_3$

(۳) برآورد  $r_3 = 1 / \cos \beta \left( a + d - \sqrt{r_1^2 - b^2/4} \right)$

(۴) انتخاب  $r_2$ ، به عنوان مثال  $r_2 = r_3/5$ .

در این راهکار فرض شده است که لبه‌های پایین‌تر مستطیل بر روی دایره‌ای با شعاع  $r_3$  واقع شده‌اند. یک نمونه از نسبت بین ابعاد شعاع‌های مختلف در مقطع دهانی در شکل (۳-۷) ارائه شده است.



شکل ۳-۷: نمونه‌ای از نسبت بین شعاع‌های مختلف در مقطع دهانی



### ۳-۳- الگوی حفاری تونل

ایجاد فضاهای بزرگ زیرزمینی در زمین‌هایی با مقاومت و ظرفیت باربری کم، بدون بکارگیری روش‌های خاص مهندسی و تقسیم فضا به قسمت‌های کوچکتر و حفاری مرحله‌ای امکانپذیر نمی‌باشد. جهت حفاری تونل در زمین‌های سست و با مقاومت کم، به خصوص در مورد تونل‌های با مقطع نسبتاً بزرگ، ممکن است حفاری کل مقطع تونل در یک مرحله (Full Face Excavation) به دلایلی از قبیل امکان رخداد ریزش، مسایل مربوط به نشست‌های غیرمجاز در سطح زمین و... مقدور نباشد. از جمله راهکارهای متداول در این گونه موارد، بکارگیری روش‌های بهسازی زمین جهت بهبود پارامترهای مقاومتی زمین و افزایش پایداری، استفاده از روش‌های حفاری مرحله‌ای (Sequential Excavation Method) یا همان حفاری سنتی تونل (NATM)، و در برخی شرایط بکارگیری تلفیقی از دو مورد بیان شده است.

وقتی از روش NATM برای تونلسازی در زمین‌های سست استفاده می‌شود، مقطع تونل به چندین بخش تقسیم می‌گردد و هر کدام از بخش‌ها دارای نگهداری اولیه بوده تا پایداری مقطع را افزایش و مقادیر تغییر شکل‌ها را کاهش دهد. ابعاد هر کدام از بخش‌ها باید به گونه‌ای طراحی گردد تا ضمن تأمین ایمنی برای حفاری و فرآیند نصب سیستم نگهداری، فضای لازم برای استفاده آسان از تجهیزات حفاری نیز فراهم شود. تقسیم‌بندی بیش از حد نیاز مقطع به مراحل مختلف حفاری، منجر به کاهش نرخ پیشروی، افزایش مراحل نصب نگهداری اولیه، افزایش حجم عملیات تخریب و هزینه‌های آن و تاخیر در بستن حلقه نهایی نگهداری خواهد شد.

به طور کلی الگوی حفاری تونل (تقسیم بندی سطح مقطع حفاری و ترتیب و توالی اجرای هر یک از بخش‌ها)، تابعی از ابعاد تونل، شرایط زمین شناسی، تحلیل پایداری، تجهیزات (ابعاد ماشین‌آلات و وسایل اجرای تونل)، هزینه و زمانبندی پروژه و نیز الزامات و محدودیت‌های تعیین شده (نظیر نشست و جابجایی‌های مجاز) می‌باشد. تخمین اولیه الگوی حفاری، معمولاً بر مبنای ابعاد تونل و کلاس‌بندی زمین‌شناسی توسط استانداردها، انجام می‌شود. همچنین می‌توان از تجربیات موارد مشابه در داخل و خارج نیز استفاده نمود.

الگوی‌های مرسوم حفاری تونل برای خاک، شامل روش حفاری تمام مقطع (Full Face excavation)، گالری‌های جانبی (Side Drift)، روش دیافراگم میانی (Central Diaphragm)، روش هسته مرکزی (Ring Cut)، روش حفاری طاق و پاتاق (Top heading & Benching) و روش‌های ترکیبی ابداعی می‌باشد که در ادامه معرفی می‌گردند.

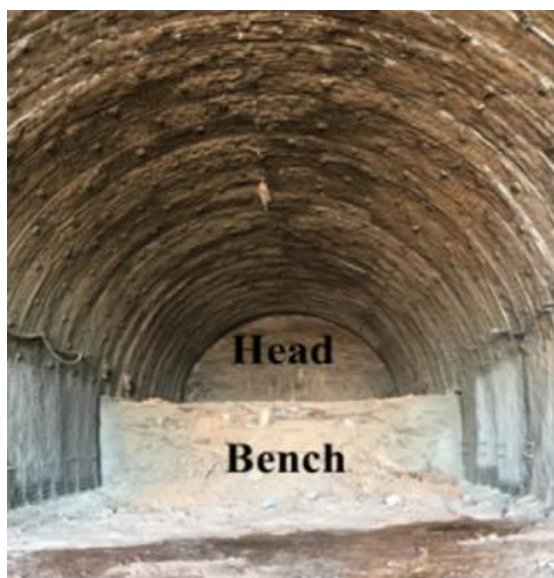
#### - روش تمام مقطع (Full Face method)

این روش بطور معمول در زمین‌هایی با مقاومت بالا که زمان خودپایداری آنها بالا بوده، استفاده می‌شود. اما روش حفاری و ساخت تمام مقطع را می‌توان در زمین‌های سست، بطور کامل و کارآمد، با بکارگیری همزمان تکنیک‌های پیش نگهداری و تقویت جبهه کار اجرا نمود. روش حفاری تمام مقطع از نظر زمان و هزینه، به دلیل برداشتن تمامی جبهه کار در یک مرحله بهترین روش بوده است.

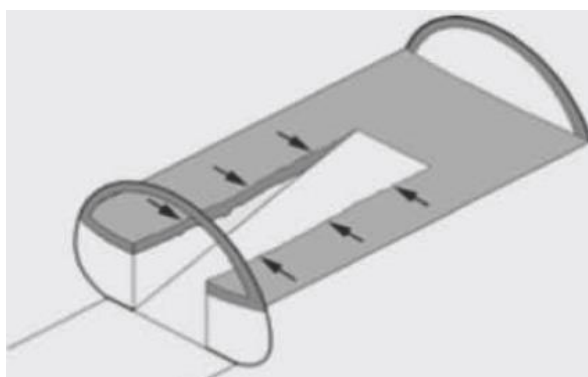


### - روش طاق و پاتاق (Top heading & Benching method)

در این روش بر حسب سطح مقطع تونل، به دو یا تعداد بیشتری بخش‌های پلکانی تقسیم و حفاری انجام می‌شود (شکل ۳-۸). بطور معمول، ارتفاع بخش طاق از ۴/۵ الی ۶ متر می‌باشد. فاصله داری بخش طاق و پاتاق بر اساس مشخصات زمین، نواحی تاثیر جبهه‌های حفاری و جلوگیری از تداخل کاری تعیین می‌شود. به منظور کاهش تاثیر جبهه‌های حفاری بر روی یکدیگر و فراهم نمودن شرایط کاری برای ماشین‌آلات و پرسنل، فاصله داری مذکور معمولاً بیشتر از ۱ تا ۱/۵ برابر قطر تونل می‌باشد. پله پایینی بسته به ابعاد مقطع می‌تواند در یک یا چند مرحله برداشته شود. در این روش معمولاً جهت اتصال پله بالایی و پایینی از رمپ استفاده می‌شود (شکل ۳-۹). همچنین مشکل پرت مصالح و دیوارهای موقت (تخریبی) در این روش وجود ندارد.



شکل ۳-۸: نمونه‌ای از اجرای تونل به روش پلکانی



شکل ۳-۹: اجرای رمپ در روش حفاری پلکانی

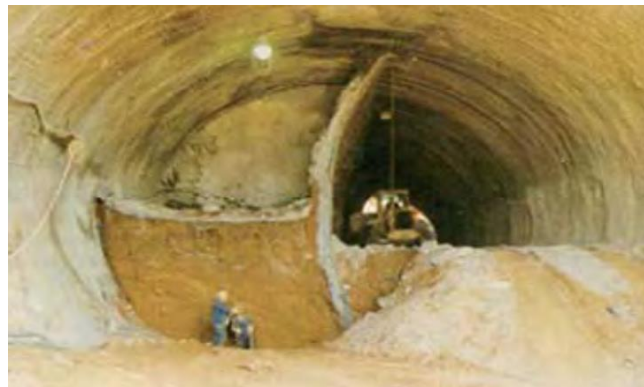


### - روش دیوار (دیافراگم) میانی (Central Diaphragm method)

روش دیگر حفر فضاهای زیرزمینی بزرگ مقطع، روش دیافراگم میانی است که در آن مقطع تونل توسط یک دیوار مرکزی (دیافراگم) به دو قسمت تقسیم می‌شود و با توجه به ابعاد تونل، هر قسمت ممکن است در چند مرحله حفاری شود (CD) (شکل ۳-۱۰). این روش برای کنترل نشست و حفاری تونل‌های کم عمق در زمین‌های سست، به کار گرفته می‌شود. گاهی اوقات ممکن است علاوه بر دیوار قائم، از یک دیوار افقی (کف‌بند) جهت کنترل همگرایی استفاده نمود (CRD) (شکل ۳-۱۱). ترتیب حفاری در این روش بر اساس تحلیل‌ها متفاوت خواهد بود.



شکل ۳-۱۰: نمایی از اجرای روش دیوار میانی (CD)



شکل ۳-۱۱: نمایی از اجرای روش دیوار میانی با کف بند موقت (CRD)

فاصله بین مراحل حفاری سمت چپ و راست برای این روش، بایستی بزرگتر از یک برابر قطر تونل باشد. قبل از ساخت پوشش نهایی، بایستی دیوار میانی تخریب شود. طول تخریب دیوار نبایستی بیش از ۲ برابر قطر تونل باشد. برای ایجاد دیافراگم مرکزی از لتیس، مش و شاتکریت استفاده می‌شود. در روش دیافراگم میانی میزان جابجایی‌ها بسیار محدود بوده، اما زمان حفاری و هزینه تخریب افزایش خواهد یافت.



### - روش گالری‌های جانبی (Side Drift method)

این روش یکی از روش‌های اصلی و قابل اطمینان در تونلسازی است که در اکثر پروژه‌های تونل شهری بکار گرفته شده است (شکل ۳-۱۲). از روش گالری‌های جانبی در مواردی که سطح مقطع حفاری بزرگ بوده و شرایط زمین شناسی ضعیف و سایر روش‌ها مناسب نباشند، استفاده خواهد شد.

ترتیب حفاری در این روش بدین صورت است که ابتدا گالری‌های کناری حفاری می‌شوند. این گالری‌ها با لحاظ نمودن ابعاد و پایداری مقطع، می‌تواند در چند مرحله حفاری شود. این روش معایبی همچون پیچیدگی‌های اجرا، مشکلات مربوط به تخریب دیوارها، فضای کاری محدود در گالری‌ها و افزایش هزینه و زمان ساخت تونل را دارا می‌باشد.



شکل ۳-۱۲: نمونه‌ای از اجرای تونل به روش گالری‌های جانبی (SD)

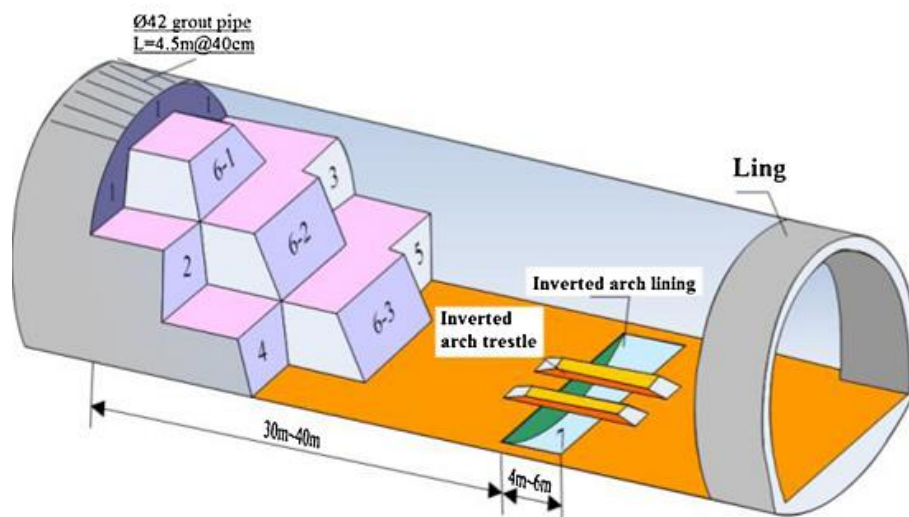
### - روش هسته مرکزی (Ring Cut method)

روش هسته مرکزی یک شیوه معمول جهت پایدارسازی جبهه کار حفاری در زمین‌های سست است. در این روش با برجای گذاشتن یک بخش از زمین (Core) در نیمه بالایی و تقسیم‌بندی بخش بالایی، از برون زدگی جبهه کار و بالا زدگی کف، حین حفاری جلوگیری به عمل می‌آید (شکل ۳-۱۳ و ۳-۱۴) حفر نیمه پایینی با یک فاصله مشخص از نیمه بالایی شروع می‌شود و این چرخه تا پایان عملیات حفاری ادامه می‌یابد. در زمین‌های نرم می‌توان از روش‌های کمکی همچون فورپولینگ، جهت پایدارسازی جبهه کار استفاده نمود.





شکل ۳-۱۳: نمونه‌ای از اجرای تونل به روش برش هسته مرکزی (RC)



شکل ۳-۱۴: نمونه‌ای از اجرای تونل به روش برش هسته مرکزی (RC)

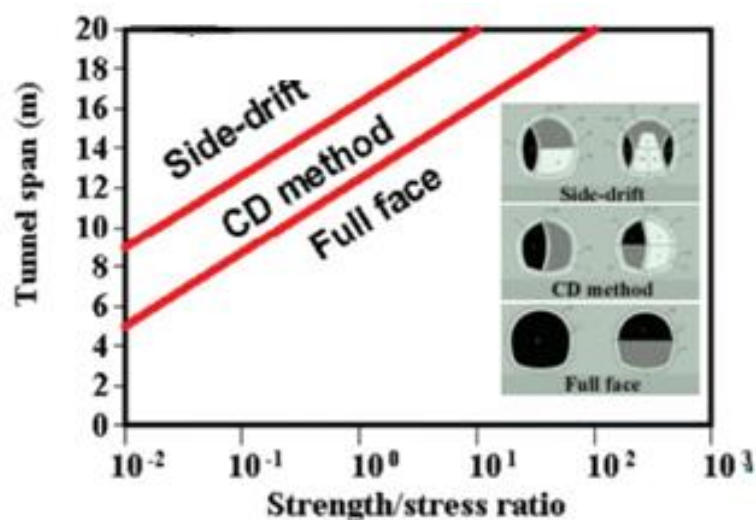
مزایا و معایب الگوهای مختلف حفاری در جدول (۳-۳) ارائه شده است.

جدول ۳-۳: مزایا، معایب و کاربرد انواع الگوهای حفاری تونل

روش	مزایا	معایب	قابلیت کاربرد
روش طاق و پطاق	فضای کافی برای ماشین آلات بزرگ، مراحل ساخت کمتر و دارای تمرکز بیشتر، سریع تر بسته شدن مقطع، بهبود شرایط تنش اعمالی به سیستم نگهداری، کنترل سرعت همگرایی، اجرا و مدیریت مناسب، هزینه کم.	اختلال در توزیع تنش اطراف بخش پطاق هنگامیکه بخش طاق دارای ابعاد بزرگی می باشد	قابل کاربرد برای شرایط زمین شناسی خوب، اهمیت کم در کنترل نشست سطحی زمین، در توده سنگ هایی با آب محتوی کم، حفاری تونل در مصالح نرم خشک و یا مرطوب
روش دیواره دیافراگم میانی (CD)	امکان کنترل نشست تاج	پیچیده بودن فرآیند احداث تونل، آهسته بودن فرآیند ساخت، مخاطرات ایمنی بیشتر، مدیریت دشوار، هزینه های بالا	قابل کاربرد برای شرایط بد زمین شناسی، نیاز به کنترل نشست سطحی، احداث تونل های یک و یا دو خطه در خاک های لس، حفر تونل های کم عمق در مصالح سست و نرم
روش دیواره دیافراگم میانی (CRD)	کنترل مؤثر نشست تاج، سرعت بستن مقطع و اتمام حفاری در هر کدام از گالری ها بالا است	مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری نسبتاً زیاد است، فرآیند ساخت کل مقطع نسبتاً آهسته است، مخاطرات ایمنی بیشتر، مدیریت دشوار، هزینه های بالا	تونل های کم عمق در مصالح سست و نرم با تأکید بر کنترل نشست سطحی
روش گالری جانبی	ضریب ایمنی بالا، کنترل مؤثر نشست ها	مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری بسیار زیاد است، با بسته شدن فوری هر بخش، تکرار حفاری منجر به رهاسازی تنش و جابجایی ها در سیستم نگهداری موقت خواهد شد، کوچک بودن سطح کار و صعوبت در بکارگیری ماشین آلات، آهسته بودن فرآیند ساخت، هزینه بالا	قابل کاربرد برای سنگ میزبان بسیار ضعیف، لزوم کنترل نشست سطحی، محیط میزبان آبدار، نشت آب در تونل های در حال حفاری در مصالح سست و نرم
روش نگهداری هسته مرکزی	مراحل ساخت کم، تجربه کامل در این روش، مدیریت ساده، عدم نیاز به نگهداری موقت تخریبی، مناسب برای بکارگیری ماشین آلات، فرآیند ساخت سریع، هزینه کمتر	در شرایط نامساعد زمین شناسی، کنترل جابجایی ها دشوار می باشد.	قابل کاربرد برای شرایط مساعد زمین شناسی، آب محتوی بالا در سنگ میزبان، وجود نشت و یا جریان آب، عدم اهمیت کنترل نشست سطحی زمین

بطور معمول حفاری تمام مقطع در شرایطی که محیط از مقاومت بالایی برخوردار باشد، استفاده خواهد شد. الگوی حفاری پلکانی در مواردی که مقطع تونل متوسط تا بزرگ باشد، استفاده می شود. برای حفاری های با مقطع بزرگ می توان از الگوهایی نظیر دیوار میانی (دیافراگمی) (Central diaphragm) یا گالری های جانبی (Side drift) استفاده نمود. یکی از نمودارهای مرسوم جهت انتخاب اولیه از الگوی حفاری، در شکل (۳-۱۵) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، نسبت مقاومت محیط به تنش برجا در کنار ابعاد تونل بعنوان پارامترهای مؤثر در انتخاب الگوی حفاری می باشد.





شکل ۳-۱۵: انتخاب الگوهای مختلف حفاری بر اساس مقاومت زمین و ابعاد دهانه تونل

برای انتخاب اولیه الگوی حفاری می‌توان از جداول زیر نیز استفاده نمود.

جدول ۳-۴: انواع الگوی حفاری تونل به همراه مزایا، معایب و کاربرد آنها

روش حفاری	تقسیم‌بندی جبهه کار	شرایط قابل کاربرد	مزایا	معایب
تمام مقطع		<ul style="list-style-type: none"> <li>- تقریباً تمامی زمین‌ها برای تونل‌هایی با مقطع کوچک</li> <li>- زمین بسیار پایدار برای تونل‌های بزرگ مقطع (بزرگتر از ۶۰ مترمربع)</li> <li>- زمین‌های تقریباً پایدار برای تونل‌هایی با مقطع متوسط (بزرگتر از ۳۰ مترمربع)</li> <li>- نامناسب برای زمین‌های نسبتاً خوبی که در آن زون‌های سست و بد پراکنده می‌باشند که در اینصورت ناچار به تغییر روش اجرا خواهد بود.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- کاهش نیروی انسانی با بکارگیری ماشین آلات</li> <li>- سهولت در مدیریت اجرا از جمله کنترل ایمنی، به علت وجود تنها یک جبهه کار حفاری</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- کل طول تونل بصورت تمام مقطع حفاری نشده و در صورت نیاز از پاتاق کمکی نیز استفاده می‌شود.</li> <li>- امکان سقوط سنگ‌های ناپایدار از تاج تونل با انرژی زیاد که مستلزم تمهیدات ایمنی بیشتری است.</li> </ul>



روش حفاری	تقسیم‌بندی جبهه کار	شرایط قابل کاربرد	مزایا	معایب
تمام مقطع با پاتاق کمکی	 طول پاتاق ۲ الی ۴ متر	<ul style="list-style-type: none"> <li>زمین‌های نسبتاً پایداری که بکارگیری روش تمام مقطع در آن دشوار است</li> <li>در شرایطی که بکارگیری روش تمام مقطع از نظر اجرایی دشوار باشد</li> <li>حفاری در زمین نسبتاً خوب با عبور از زون‌های نامساعد پراکنده در آن</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>کاهش نیروی انسانی با بکارگیری ماشین آلات و حفاری موازی طاق و پاتاق</li> <li>سهولت در مدیریت اجرا از جمله کنترل ایمنی، به علت وجود تنها یک جبهه کار حفاری</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>صعوبت در تغییر روش حفاری در شرایطی که جبهه کار حفاری ناپایدار است</li> </ul>
طاق و پاتاق	 طول پاتاق $5D <$	<ul style="list-style-type: none"> <li>زمین‌های نسبتاً پایداری که بکارگیری روش تمام مقطع در آن دشوار است</li> <li>در صورت ناپایداری جبهه کار حفاری از روش نگهداری هسته مرکزی (Ring Cut) استفاده می‌شود.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>کاهش تجهیزات و نیروی انسانی مورد نیاز با حفاری متناوب طاق و پاتاق</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>افزایش طول زمان اجرا با حفاری متناوب طاق و پاتاق</li> </ul>
پاتاق کوتاه	 $5D >$ طول پاتاق $< D$	<ul style="list-style-type: none"> <li>در صورت ناپایداری جبهه کار حفاری از روش نگهداری هسته مرکزی (Ring Cut) استفاده می‌شود.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>سازگار با تغییرات شرایط زمین‌شناسی و کاهش تجهیزات و نیروی انسانی مورد نیاز با حفاری متناوب طاق و پاتاق</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>حفاری موازی ایجاد تعادل در چرخه اجرای طاق پاتاق را دشوار می‌سازد</li> <li>افزایش طول زمان اجرا با حفاری متناوب طاق و پاتاق</li> </ul>
پاتاق کوچک	 طول پاتاق $D >$	<ul style="list-style-type: none"> <li>در شرایطی که کنترل همگرایی کمتری نسبت به روش پاتاق کوتاه نیاز باشد</li> <li>در زمین‌های مجاله شونده که بسته شدن فوری مقطع ضروری است</li> <li>در صورت ناپایداری جبهه کار حفاری از روش نگهداری هسته مرکزی (Ring Cut) استفاده می‌شود</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>سهولت در بستن سریع کف‌بند</li> <li>کاهش تجهیزات و نیروی انسانی مورد نیاز با حفاری متناوب طاق و پاتاق</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>در صورت نیاز به فعالیت ماشین‌آلات بر روی بستر طاق، انتخاب آن با محدودیت مواجه خواهد بود</li> </ul>



روش حفاری	تقسیم‌بندی جبهه کار	شرایط قابل کاربرد	مزایا	معایب
پاطاق چندتایی		<ul style="list-style-type: none"> <li>- شرایط زمین‌شناسی نسبتاً خوب و حفاری تونل‌هایی با مقاطع مرتفع و بزرگ</li> <li>- زمین‌های نامساعدی که مستلزم بکارگیری مقاطع کوچک برای بخش طاق بمنظور پایداری جبهه کار حفاری است</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- سهولت پایداری جبهه کار حفاری</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ایجاد تغییرشکل‌های زیاد در صورت تاخیر در بستن مقطع در زمین‌های نامساعد</li> <li>- کوتاه بودن طول هر پاطاق (سکو) و محدودیت فضای کاری</li> <li>- نیاز به دقت در حمل مصالح حفاری در هر یک از سکوها (پاطاق)</li> </ul>
روش دیافراگم میانی	 در روش اول دیوار میانی فقط برای بخش فوقانی مقطع در نظر گرفته می‌شود، در حالیکه در روش دوم دیوار میانی برای کل مقطع در نظر گرفته می‌شود.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- حفاری در خاک با روباره کم که مستلزم کنترل نشست سطحی زمین است</li> <li>- حفاری تونل‌های بزرگ</li> <li>- مقطع در زمین‌های نسبتاً نامساعد</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- تقسیم جبهه کار به بخش‌های کوچکتر</li> <li>- منجر به پایداری جبهه کار حفاری خواهد شد</li> <li>- نشست سطحی زمین را می‌توان کاهش داد</li> <li>- با توجه به بزرگتر بودن مقاطع حفاری در این روش نسبت به روش گالری‌های جانبی، امکان بکارگیری ماشین‌آلات و تجهیزات بزرگتر وجود دارد</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- جابجایی‌ها و یا نشست ایجاد شده در اثر تخریب دیواره میانی باید مورد بررسی قرار گیرد</li> <li>- تخریب دیواره میانی باید به فرآیند اجرا اضافه گردد</li> <li>- بکارگیری روش‌های کمکی خاص در تونل دشوار است</li> </ul>
روش گالری‌های جانبی پیشرو با دیواره‌های بتنی جانبی		<ul style="list-style-type: none"> <li>- برای زمین‌هایی با ظرفیت باربری کم و لزوم تقویت ظرفیت باربری زمین پیش از حفاری بخش فوقانی مقطع</li> <li>- حفاری در سنگ‌های نرم و یا خاک با روباره کم با بارسطحی غیرمتقارن و یا امکان وقوع زمین لغزش</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- احداث دیواره‌های بتنی نسبتاً حجیم در گالری‌های جانبی منجر به بهبود ظرفیت باربری و مقاومت در برابر فشارهای غیرمتقارن زمین خواهد شد</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- لزوم بکارگیری تجهیزات و ماشین‌آلات کوچک در حفاری گالری‌های جانبی</li> <li>- سست شدن بخش فوقانی تونل در اثر حفاری گالری‌های جانبی</li> </ul>



روش حفاری	تقسیم‌بندی جبهه کار	شرایط قابل کاربرد	مزایا	معایب
بدون دیواره- های بتنی جانبی		<ul style="list-style-type: none"> <li>- برای زمین‌هایی که دارای ظرفیت باری کافی جهت بکارگیری پاتلاق (سکو) نمی باشند</li> <li>- حفاری در خاک با روباره کم که مستلزم کنترل نشست سطحی زمین است</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- نشست سطحی زمین را می توان کاهش داد</li> <li>- تخریب دیوارهای موقت آسانتر از روش دیافراگم میانی خواهد بود</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- لزوم بکارگیری تجهیزات و ماشین آلات کوچک در حفاری گالری‌های جانبی</li> </ul>
سایر روش‌های گالری پیشرو		<ul style="list-style-type: none"> <li>- به عنوان گالری پیشرو جهت تدقیق زمین‌شناسی، گالری زهکشی و کاهش جابجایی‌ها و فشار وارده بر سیستم نگهداری مقطع نهایی</li> <li>- بکارگیری ماشین حفار تونل (TBM) در حفاری گالری پیشرو</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- با حفر گالری پیشرو می توان به اهدافی چون تدقیق زمین شناسی، زهکشی و کاهش جابجایی‌ها و فشار وارده بر سیستم نگهداری مقطع نهایی دست یافت</li> <li>- در روش حفاری چالزنی و آتشباری دیگر نیازی به ایجاد برش وسط نخواهد بود. بدین ترتیب میزان صدا و ارتعاشات نیز کاهش خواهد یافت.</li> <li>- بهبود پایداری جبهه کار حفاری به هنگام تعریض مقطع</li> <li>- در صورت حفاری کامل گالری پیشرو می توان بمنظور تهویه از آن بهره برد</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- حفاری گالری پیشرو با استفاده از دستگاه حفار تونل (TBM) ممکن است زمانبر باشد مگر اینکه زمین نسبتاً پایدار باشد.</li> <li>- لزوم بکارگیری تجهیزات و ماشین‌آلات کوچک برای حفاری گالری پیشرو</li> </ul>



روش حفاری	تقسیم‌بندی جبهه کار	شرایط قابل کاربرد	مزایا	معایب
گالری پیشرو مرکزی		- به عنوان گالری پیشرو جهت تدقیق زمین شناسی، گالری زهکش و کاهش جابجایی‌ها و فشار وارده بر سیستم نگهداری مقطع نهایی	- با حفر گالری پیشرو می‌توان به اهدافی چون تدقیق زمین شناسی، زهکشی و کاهش جابجایی‌ها و فشار وارده بر سیستم نگهداری مقطع نهایی دست یافت - در روش حفاری چالزنی و آتشیاری دیگر نیازی به ایجاد برش وسط نخواهد بود. بدین ترتیب میزان صدا و ارتعاشات نیز کاهش خواهد یافت. - بهبود پایداری جبهه کار حفاری به هنگام تعرض مقطع	- لزوم بکارگیری تجهیزات و ماشین‌آلات کوچک برای حفاری گالری پیشرو
گالری پیشرو تحتانی		- زمین‌هایی که نیازمند بکارگیری روش‌های خشک اندازی می‌باشند	- تدقیق شرایط زمین شناسی با حفر گالری پیشرو - ایجاد جبهه کار اضافی از گالری پیشرو و کاهش زمان اجرای تونل	- صعوبت در ایجاد توازن در چرخه اجرای هر یک از جبهه کارهای حفاری - لزوم بکارگیری تجهیزات و ماشین‌آلات مختلف



جدول ۳-۵: مقایسه بین انواع الگوهای حفاری تونل

مقایسه شاخص‌های مهم					طرح شماتیک	روش اجرا
هزینه	سیستم تحکیم موقت	حجم تخریب	آب بندی	زمان اجرا	شرایط کاربرد	
کم	-	-	رضایتبخش	کمترین	لایه‌های متوسط دهانه $\geq 8$ متر	روش تمام مقطع
کم	-	-	رضایتبخش	کوتاه	لایه‌های نسبتاً ضعیف دهانه $\geq 12$ متر	روش طاق و پطاق
کم	کم	-	رضایتبخش	کوتاه	لایه‌های ضعیف دهانه $\geq 12$ متر	روش طاق و پطاق با کف بند موقت بخش فوقانی
کم	-	-	رضایتبخش	کوتاه	لایه‌های ضعیف دهانه $\geq 12$ متر	روش طاق و پطاق با نگهداری هسته مرکزی جبهه کار حفاری
کم	کم	-	رضایتبخش	نسبتاً کوتاه	لایه‌های ضعیف دهانه $\geq 14$ متر	روش طاق و پطاق با تک گالری جانبی پاپلوت
نسبتاً زیاد	کم	-	رضایتبخش	نسبتاً کوتاه	لایه‌های ضعیف دهانه $\geq 18$ متر	روش دیوار میانی (روش CD)
زیاد	زیاد	-	رضایتبخش	طولانی	لایه‌های ضعیف دهانه $\geq 20$ متر	روش دیوار میانی (روش CRD)
زیاد	زیاد	-	ضعیف	طولانی	دهانه کوچک، دهانه بزرگ در صورت پیوسته بودن	روش گالری جانبی
نسبتاً زیاد	زیاد	-	ضعیف	طولانی	دهانه کوچک، دهانه بزرگ در صورت پیوسته بودن	روش حفاری مرکزی
زیاد	زیاد	-	ضعیف	طولانی	دهانه کوچک، دهانه بزرگ در صورت پیوسته بودن	روش نگهداری از گالریهای جانبی
زیاد	زیاد	-	ضعیف	طولانی	چندین دهانه	روش ستونهای تونلی
کم	کم	-	رضایتبخش	کوتاه	چندین دهانه	روش حفاری کند و پوش؛ روش اجرای معکوس

برای انتخاب الگوی حفاری بایستی در ابتدا بر اساس شکل (۳-۱۵) و نیز جدول فوق، الگو یا الگوهای اولیه را انتخاب نمود. مرحله بعد انتخاب ابعاد مراحل حفاری می‌باشد. انتخاب ابعاد اولیه مراحل حفاری باید بگونه‌ای باشد که امکان



مانور ماشین‌آلات حفاری، اجرای سیستم‌های نگهداری و پیش‌نگهداری (فورپولینگ، میکروپایل و...) در آن وجود داشته باشد.

پس از انتخاب اولیه الگو (الگوها) و ابعاد مراحل حفاری، بایستی تحلیل پایداری برای جبهه کار و مقطع مراحل حفاری انجام شده و اثرات انتخاب الگو (الگوها) بر روی نشست سطحی و نیز سازه‌های مجاور بررسی گردد. سپس با لحاظ نمودن نتایج تحلیل پایداری و ارزیابی از موارد فنی و اقتصادی، بایستی الگوی نهایی و ابعاد نهایی مراحل حفاری را تعیین نمود.

### ۳-۴- گام پیشروی (طول دهانه بدون نگهداری)

در حفاری در زمین‌های سست و نرم، بیشترین تاکید بر روی صلبیت شاکریت (مقاومت)، گام پیشروی کوتاه و بستن هرچه سریعتر مقطع (اجرای کف‌بند) می‌باشد. تعیین گام پیشروی یا طول دهانه بدون نگهداری، یکی از مهمترین مسائل در تونلسازی به روش NATM می‌باشد. بدین منظور می‌بایست از طبقه‌بندی‌های مختلف زمین‌شناسی برای تخمین اولیه گام (گام‌ها) پیشروی استفاده نمود. سپس با کمک تحلیل‌های عددی و کنترل پایداری مقطع و سیستم نگهداری، بایستی مقدار نهایی را تعیین کرد. همچنین بایستی مقدار گام پیشروی به صورتی باشد تا حداقل ۹۰ دقیقه بدون اجرای پوشش اولیه، پایدار بوده تا شرایط اجرای سازه اولیه (موقت) فراهم شود. کاهش در مقدار گام پیشروی، منجر به کاهش در نشست‌های سطحی خواهد شد. معمولاً مقدار گام پیشروی در زمین‌های نرم، بر حسب شرایط زمین‌شناسی و ابعاد حفیره، از ۰/۵ تا ۱/۵ متر متغیر می‌باشد.

#### - پایداری جبهه کار

بطور کلی می‌توان جابجایی‌های اولیه ناشی از حفاری تونل را به سه مؤلفه زیر تقسیم‌بندی کرد (شکل ۳-۱۶):

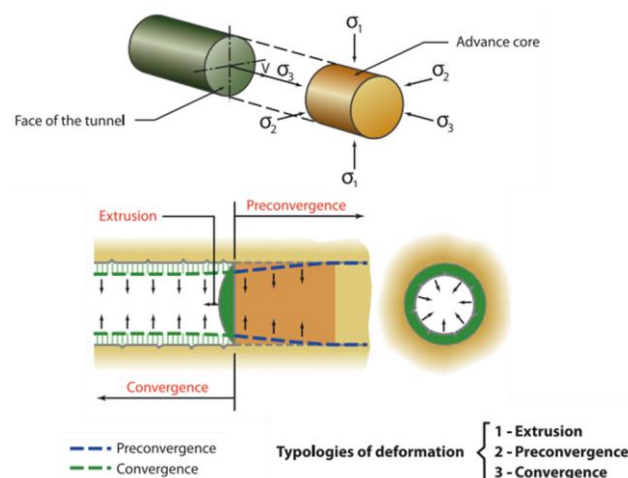
الف- پیش همگرایی (Pre-Convergence): همگرایی پروفیل تئوریک در جلوی جبهه کار که شدیداً به رابطه بین خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری هسته پیشروی (Advance core) ۱ و شرایط اولیه تنش وابسته می‌باشد.

ب- برآمدگی (شکم دادگی) جبهه کار حفاری (Extrusion): این جابجایی، بخش اولیه تغییر شکل محیط نسبت به عمل حفاری می‌باشد که عمدتاً در داخل هسته پیشروی اتفاق می‌افتد و تابعی از مقاومت و تغییر شکل‌پذیری هسته پیشروی و شرایط اولیه تنش در منطقه می‌باشد. برآمدگی روی سطح جبهه کار و در راستای محور طولی تونل بروز پیدا کرده و هندسه آن دارای دو حالت است، حالت اول جلو آمدن جبهه کار به صورت کم و بیش متقارن محوری نسبت به دیواره های تونل (باد کردن جبهه کار) و دیگری جلو آمدن جبهه کار خارج از مرکز ثقل (چرخش جبهه کار) می‌باشد.

ج- همگرایی دیواره تونل (Convergence): به صورت کاهش ابعاد سطح مقطع تئوریک فضای حفاری پس از عبور جبهه کار از آن می‌باشد.

<sup>۱</sup> - هسته پیشروی: حجمی از زمین که در جلوی جبهه کار قرار دارد و به شکل استوانه است. طول و قطر استوانه مورد نظر هم اندازه با قطر تونل می‌باشد.



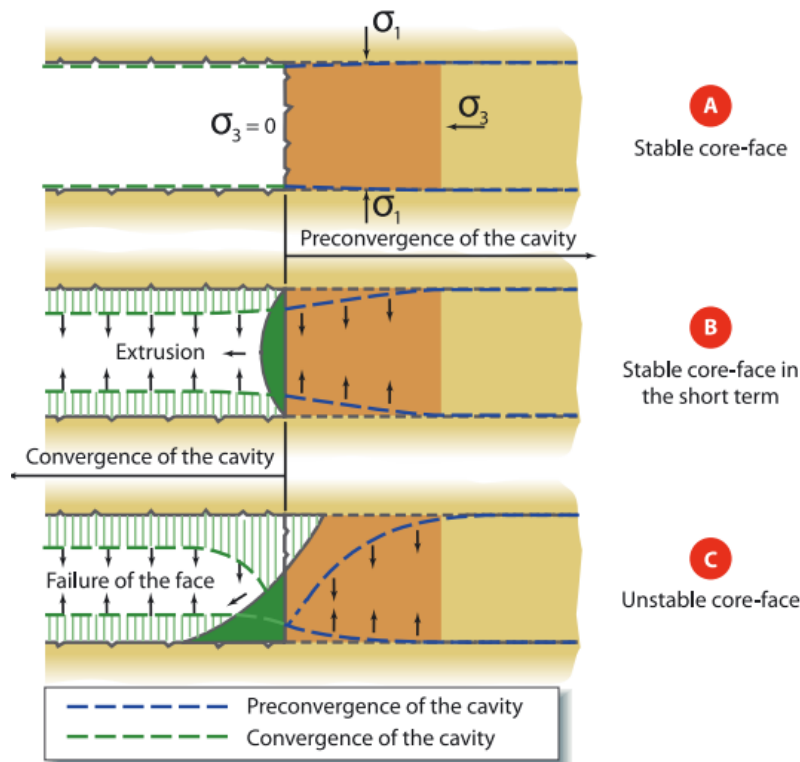


شکل ۳-۱۶: انواع تغییر شکل محیط نسبت به حفاری تونل

با توجه به مطالب فوق سه حالت اساسی می‌توان برای پایداری جبهه کار متصور شد (شکل ۳-۱۷):

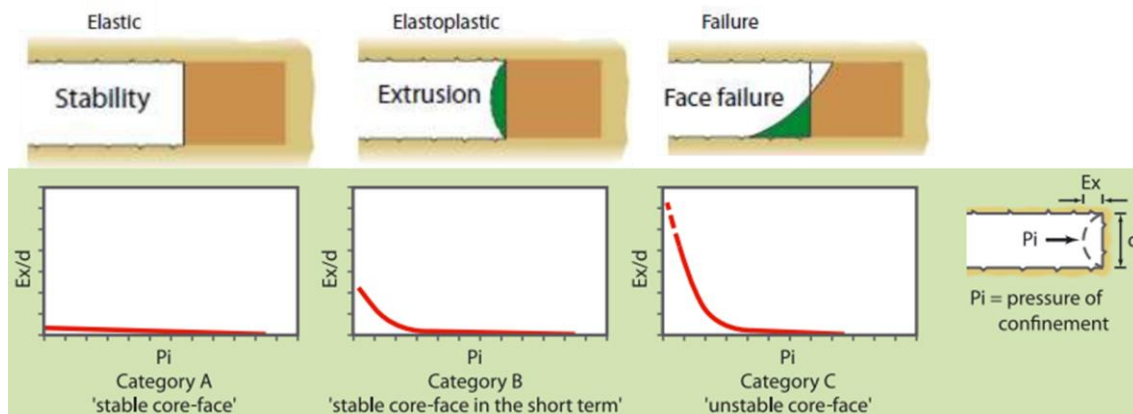
- پایدار (رده رفتاری A): شاخص رده A این است که وضعیت تنش در جبهه کار و اطراف فضای حفاری به قدری نیست که بر خواص مقاومتی محیط غلبه کند و محیط در محدوده الاستیک باقی خواهد ماند. دیواره‌های حاصل از حفاری (جبهه کار) در این شرایط پایدار باقی می‌ماند و جابجایی‌های آن محدود و قابل صرف نظر خواهد بود. همچنین پروفیل واقعی و تئوری تونل در این شرایط به هم نزدیک بوده و اثر قوس شدگی نزدیک پروفیل تونل تشکیل می‌گردد.
- پایدار در کوتاه مدت (رده رفتاری B): کاهش تدریجی فشار جانبی در جبهه کار ( $\sigma_3 = 0$ ) موجب می‌شود که وضعیت تنش در جبهه کار و اطراف تونل در حال پیشروی، برای غلبه بر مقاومت محیط کافی باشد و محیط وارد محدوده پلاستیک شود. در این حالت اثر قوس به سرعت در اطراف حفاری تشکیل نمی‌شود، بلکه بسته به ابعاد محدوده‌ای که پلاستیک می‌شود، در فاصله‌ای از آن ایجاد می‌گردد. تغییر شکل‌ها همراه با تاخیر بوده و در محدوده الاستوپلاستیک گسترش می‌یابد و در حد سانتی متر قابل اندازه‌گیری است. در این صورت عکس‌العمل زمین مهم خواهد بود و دیواره‌های تونل به داخل فضای حفاری حرکت می‌کنند. در این حالت شرایط جبهه کار تونل در وضعیت پایداری کوتاه مدت قرار دارد. این بدان معناست که در صورت عدم بکارگیری اقدامات تحکیمی، مرحله پلاستیک شدن زمین‌های اطراف تونل شروع به گسترش خواهد کرد و محدوده آن بصورت شعاعی و طولی از دیواره‌های تونل فاصله می‌گیرد.
- ناپایدار (رده رفتاری C): رده C اینگونه تعریف می‌شود که وضعیت تنش در زمین به صورت قابل توجهی از خواص مقاومتی مواد حتی در ناحیه اطراف جبهه کار بیشتر است. اثر قوس شدگی نه در جبهه کار و نه در اطراف فضای حفاری نمی‌تواند تشکیل گردد زیرا زمین مقاومت کافی ندارد. تغییر شکل‌ها غیرقابل قبول است و بلافاصله تا محدوده ریزش گسترش پیدا می‌کنند. همچنین برای اجرای تحکیمات شعاعی زمان کافی وجود ندارد و ناپایداری‌های جدی مانند ریزش جبهه کار و تخریب تونل اتفاق می‌افتد. عملیات مقاوم‌سازی و

بهسازی زمین با اجرای پیش تحکیمات باید در جلوی جبهه کار انجام گیرد تا اثر قوس به صورت مصنوعی ایجاد گردد. این رده رفتاری در زمین‌های غیر چسبنده و یا سست رخ می‌دهد.



شکل ۳-۱۷: انواع رده رفتاری برای پایداری جبهه کار

- برای پیش‌بینی رده رفتاری بایستی از منحنی پاسخ زمین (GRC) برای جبهه کار تونل استفاده نمود. بر این اساس و بر مبنای شکل (۳-۱۸) می‌توان به صورت زیر رده‌های رفتاری را مشخص نمود:
- اگر منحنی پاسخ زمین هنگامی که فشار جانبی تا مقدار صفر کاهش داده شد، در محدوده الاستیک باقی بماند و کم و بیش مستقیم باشد، رفتار جبهه کار و تونل پایدار و از نوع رده رفتاری A خواهد بود.
  - اگر منحنی مذکور هنگامی که فشار جانبی تا مقدار صفر کاهش داده می‌شود، در محدوده الاستوپلاستیک تغییر شکل بدهد، بدون اینکه به گسیختگی برسد، رفتار جبهه کار و تونل از نوع پایدار کوتاه مدت (رده B) خواهد بود.
  - در نهایت اگر این منحنی با کاهش فشار جانبی تا محدوده گسیختگی تغییر شکل پیدا کند و بخش پلاستیک آن به حالت افقی نزدیک شود، رفتار تونل و جبهه کار از نوع ناپایدار (رده C) خواهد بود.

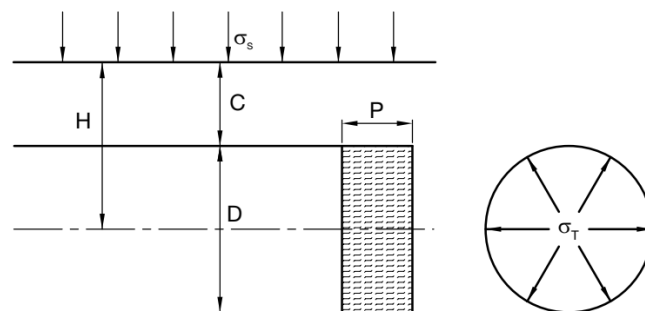


شکل ۳-۱۸: تعریف انواع رده رفتاری برای پایداری جبهه کار بر اساس منحنی پاسخ زمین جبهه کار (GRCface)

برای ارزیابی اولیه از پایداری جبهه کار در زمین‌های رسی می‌توان از عدد پایداری (N) مطابق رابطه زیر استفاده نمود:

$$N = \gamma H / c_u$$

که در آن H عمق تونل،  $\gamma$  چگالی خاک و  $c_u$  مقاومت برشی زهکشی نشده مصالح پیش از حفاری تونل می‌باشد.



شکل ۳-۱۹: پارامترهای مورد استفاده در تعیین عدد پایداری جبهه کار

در مواردی که حفاری بصورت مکانیزه و جبهه کار تحت فشار می‌باشد (TBM-EPB) و نیز بار سطحی وجود دارد،

عدد پایداری (N) بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$N = (\sigma_s + \gamma H - \sigma_T) / c_u$$

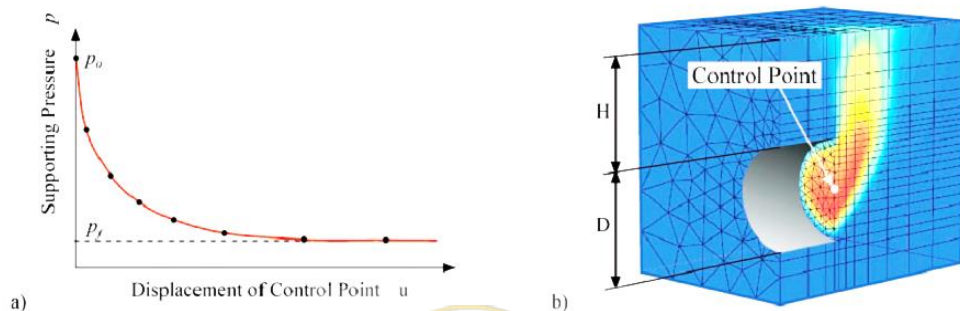
که در آن  $\sigma_s$  بار سطحی و  $\sigma_T$  فشار وارد بر جبهه کار می‌باشد (در حفاری NATM این فشار برابر صفر خواهد بود).

P در ۰ گام پیشروی بوده که مقدار آن در حفاری مکانیزه برابر صفر می‌باشد.

بر اساس مقادیر بدست آمده عدد پایداری (N)، رفتار جبهه کار به شرح زیر خواهد بود:

- هنگامیکه مقدار عدد پایداری کمتر از ۳ باشد ( $N \ll 3$ )، جبهه کار به طور کلی پایدار می‌باشد.
- هنگامیکه ( $3 < N \ll 6$ ) ملاحظات خاصی بایستی برای کنترل ریسک ناشی از نشست در نظر گرفته شود. همچنین افت حجمی زیادی هنگامیکه  $N \geq 5$  باشد در جبهه کار رخ خواهد داد.
- هنگامیکه  $N > 6$ ، جبهه کار ناپایدار است.

- علاوه بر موارد فوق‌الذکر موارد دیگری که بایستی در پایداری جبهه‌کار لحاظ شود به صورت زیر می‌باشد:
- نسبت روباره به قطر تونل ( $C/D$ ) که تاثیر عمق بر پایداری را کنترل می‌کند. برای حالتی که  $C/D < 2$  می‌باشد، بایستی حتماً آنالیز و تحلیل پایداری جبهه‌کار انجام شود.
  - نسبت  $\gamma D / c_u$  که احتمال وقوع شکست‌های موضعی در جبهه‌کار را نشان می‌دهد. برای مقادیر بیشتر از ۴، نشان می‌دهد که احتمالاً یک شکست موضعی در جبهه‌کار وجود دارد.
  - نسبت گام پیشروی به قطر تونل ( $P/D$ ) که پایداری جبهه‌کار تا حدودی متأثر از این نسبت نیز می‌باشد.
- جبهه‌کار یک تونل در زمین بدون چسبندگی (Cohesionless soils (sand)) از نظر تئوری نمی‌تواند پایدار باشد. با این حال، در این زمین‌ها معمولاً چسبندگی مختصری وجود داشته که حداقل به طور موقت بر شرایط پایداری تأثیر می‌گذارد. باید در نظر داشت که گسترش حرکت زمین به سمت سطح، تحت تأثیر پارامترهای دیگری مانند تغییر شکل‌پذیری زمین و ناهمسانگردی است. مطالعات تئوری و تجربی مربوط به ماسه‌های خشک نشان می‌دهد که عمق تونل (نسبت  $C/D$ ) تأثیر کمتری نسبت به زمین چسبنده دارد، در حالی که قطر تونل دارای یک اثر تعیین‌کننده است که بایستی در تحلیل‌ها به همراه زاویه اصطکاک در نظر گرفته شود. در برخی مراجع پایداری جبهه‌کار و امکان‌پذیری حفاری NATM در اینگونه زمین‌ها را در شرایطی که چسبندگی موثر محیط، بیشتر از ۱۰ درصد وزن مخصوص ( $\gamma$ ) ضربدر قطر مقطع حفاری ( $D$ ) باشد، معرفی شده است. پایداری جبهه‌کار را می‌توان با مرحله‌ای نمودن حفاری و کوچک نمودن سطح مقطع، افزایش داد.
- در زمین‌هایی که هم دارای چسبندگی بوده و هم زاویه اصطکاک، بایستی یک آنالیز جامع از تحلیل پایداری جبهه‌کار انجام شود.
- به طور کلی در حفاری تونل‌ها در محیط‌های شهری، بایستی ارزیابی‌های اولیه از پایداری جبهه‌کار طبق موارد فوق بعمل آمده و سپس رده رفتاری جبهه‌کار طبق روش‌های عددی بدست آید (شکل ۳-۲۰) در مرحله بعد بایستی تغییر شکل‌های جبهه‌کار به همراه نشست سطحی، با مقادیر مجاز مقایسه و در نهایت تصمیمات لازم در خصوص اقدامات پیش‌تحکیم و تحکیم اتخاذ شود.



شکل ۳-۲۰: نمایش شماتیک از ترسیم منحنی GRC جبهه‌کار (a) و توزیع جابجایی در جبهه‌کار (b)



### ۳-۵- کفبند قوسی

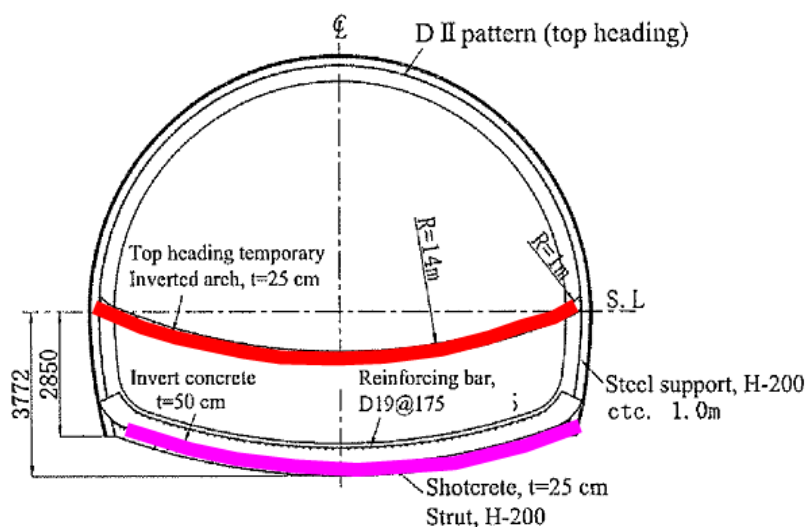
در زمین‌های نرم و با ظرفیت باربری پایین و بر اساس ابعاد تونل، میزان همگرایی و نشست در صورت نبستن مقطع تونل، افزایش خواهد یافت و پایه‌های سیستم نگهداری در زمین فرو خواهد رفت. برای این منظور می‌توان یک کفبند قوسی موقت و یا دائم در کف تونل ایجاد کرد. کفبندهای موقت باید بگونه‌ای باشد تا براحتی در طول مراحل بعدی حفاری قابل تخریب باشد. کفبند قوسی بطور معمول به یکی از سه حالت زیر اجرا می‌شود:

(۱) شاتکریت مسلح به مش

(۲) شاتکریت مسلح به مش و لتیس

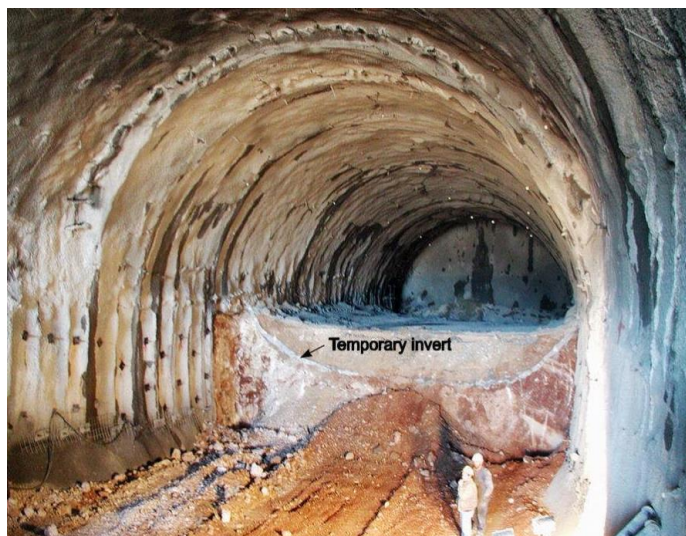
(۳) شاتکریت مسلح به مش و قاب فولادی

کف بند دائم یکی از دو گزینه ۲ و یا ۳ می‌باشد. استفاده از کفبند موقت اگرچه منجر به کاهش راندمان حفاری می‌شود، اما تاثیر چشمگیری بر روی کاهش مقادیر جابجایی‌ها و نشست دارد. نکته حائز اهمیت این است که به هنگام تخریب کفبند موقت، احتمال رخداد مقادیر بالای جابجایی وجود داشته و لذا بایستی در کنار اجرای ابزاربندی و رفتارنگاری حین تخریب، توجه ویژه‌ای به زمان مناسب تخریب در طراحی‌ها شود.



شکل ۳-۲۱: استفاده از کفبند (موقت و دائم) برای بستن مقطع تونل و ممانعت از همگرایی تونل



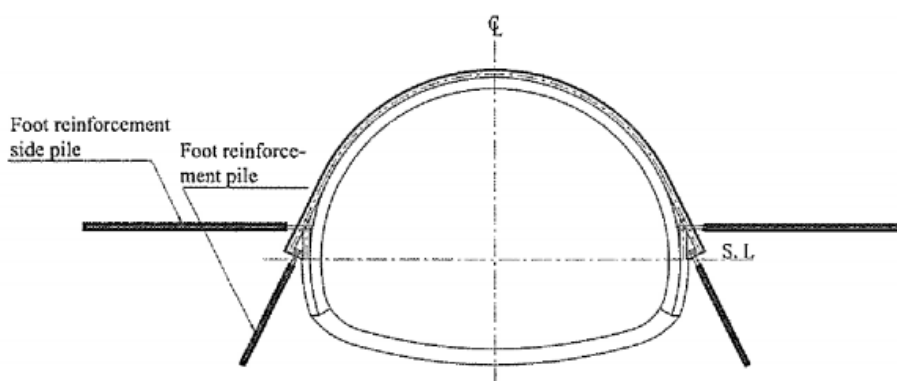


شکل ۳-۲۲: نمونه‌ای از اجرای کف‌بند (موقت) برای بستن مقطع طاق تونل

### ۳-۶- پایدارسازی پیرامون مقطع تونل

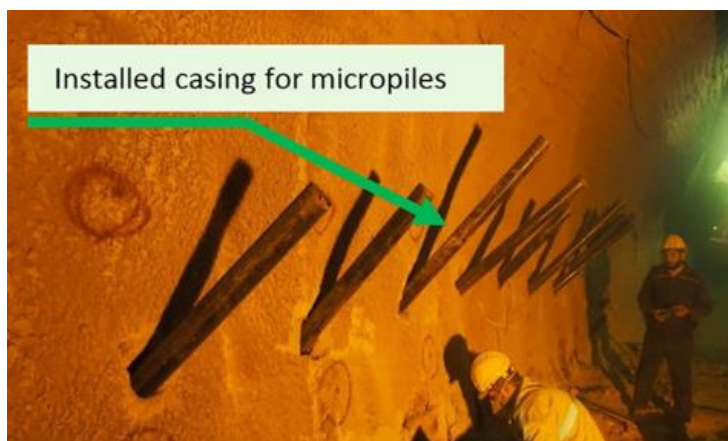
به هنگام حفاری در زمین‌های نرم، با استفاده از روش طاق و پاتاق، نشست‌های ناشی از حفاری بخش پایینی مقطع را می‌توان با استفاده از زیربندی پوشش بالایی تونل کاهش داد به نحوی که بارهای ایجاد شده توسط پوشش فوقانی به زمین زیر کف تونل انتقال یابد. با توجه به شرایط زمین و سازه پوشش فوقانی، زیربندی را می‌توان با استفاده از ستون‌های تزریق با جت، میکرو شمع‌ها و یا المان‌های مشابه اجرا کرد.

اگر مقاومت زمین اطراف پایه‌های قاب کم باشد، می‌توان با استفاده از المان‌های فولادی (میلگرد و لوله) در کنار تزریق (عادی و پر فشار (جت گروت)) جهت بالا بردن پارامترهای مقاومتی زمین استفاده نمود. لازم به ذکر بوده که در استفاده از این موارد بایستی دقت نمود تا آب استفاده شده برای حفاری، منجر به برهم زدن خاک اطراف نشود.



شکل ۳-۲۳: نمونه‌ای از اجرای میکروپایل در پاشنه‌های طاق تونل





شکل ۳-۲۴: نمونه‌ای از اجرای میکروپایل در داخل تونل

### ۳-۷- پایدارسازی جبهه کار حفاری

در زمین‌های ریزشی و سست، حتی در مقاطع کوچک، ریزش‌هایی از جبهه کار رخ می‌دهد. در چنین شرایطی توصیه می‌شود بخشی از جبهه کار در قالب هسته (core) باقی گذاشته شود (شکل ۳-۲۵) این هسته از ریزش بالقوه مخروطی از مصالح در جلوی جبهه کار، ممانعت کرده و باعث کنترل جابجایی‌ها در جبهه کار و حتی جلوی جبهه کار خواهد شد. همچنین همانند یک سکو به پرسنل اجرایی کمک نموده تا سیستم نگهداری را نصب نمایند. ابعاد هسته (Core) بایستی بگونه‌ای باشد تا امکان نصب پوشش موقت و مانور عملیاتی فراهم شود.

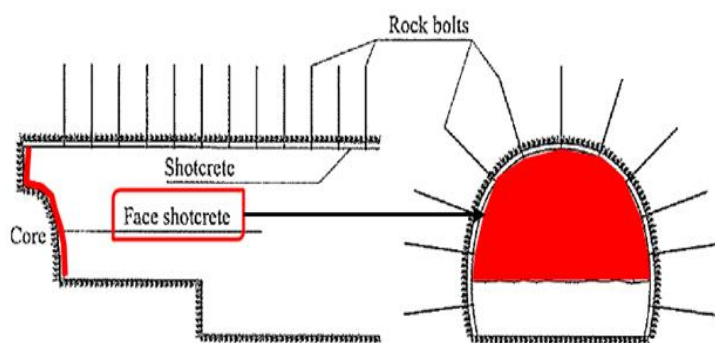


شکل ۳-۲۵: استفاده از core برای پایداری جبهه کار تونل و سکوی کمکی برای نصب سازه اولیه

گاهی اوقات می‌توان از یک لایه نگهدارنده شاتکریتی (همراه با المان‌های تقویت کننده و یا بدون آن) برای کنترل ناپایداری‌های کوچکی که احتمالاً در درون جبهه کار گسترش می‌یابد و جلوگیری از هوازدهی در محدوده جبهه کار



حفاری نیز استفاده نمود (شکل ۳-۲۶) در موارد بحرانی تر نیز می‌توان از نصب بولت‌های فایبرگلاس در جبهه‌کار برای فراهم آوردن مقاومت مورد نیاز جهت پایداری آن بهره برد. باید توجه داشت که نوع سیستم نگهداری جبهه‌کار باید به گونه‌ای باشد که به آسانی بتوان بوسیله ابزار حفاری آنرا برید.



شکل ۳-۲۶: استفاده از شاتکریت و بولت در جبهه‌کار

برای پایدارسازی جبهه‌کار، کنترل آب، کاهش نشست‌ها در محدوده جبهه‌کار و به تبع آن اثرات کم بر روی سازه‌های سطحی مجاور می‌توان از اقدامات خاصی نظیر فورپولینگ، اسپالینگ، جت گروتینگ، فایبرگلاس و میکروپایل و... مطابق جدول (۳-۶) استفاده نمود. نیاز یا عدم نیاز به هر کدام از اقدامات فوق‌الذکر، بایستی بر اساس نتایج تحلیل‌های عددی ژئوتکنیکی، تجربیات مشابه، حفظ ایمنی، مسائل محیط زیستی و مسائل اقتصادی باشد. لازم به ذکر بوده که می‌توان در مواقع ضروری از یک یا چند روش بصورت ترکیبی نیز استفاده نمود.



جدول ۳-۶: کلاس بندی روش های کمکی برای پایدارسازی حفريات زیرزمینی

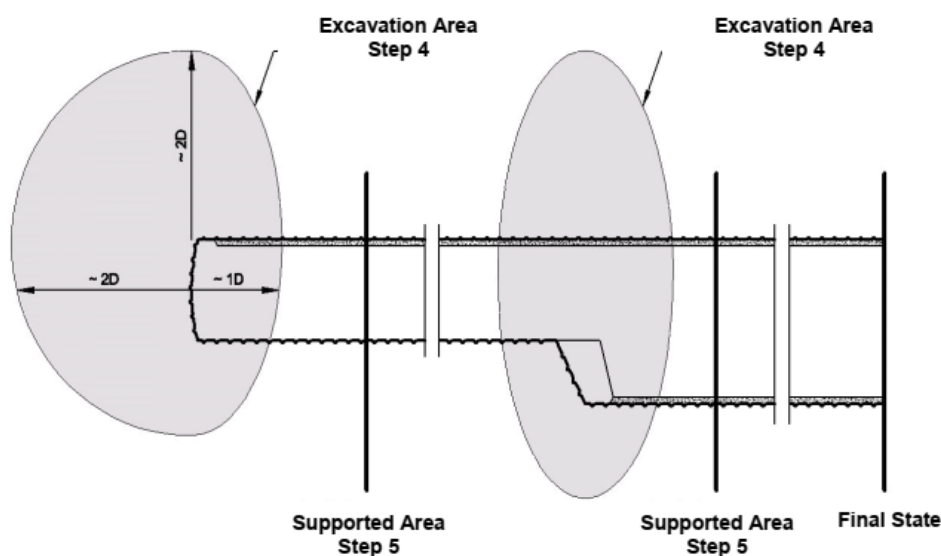
روش		ایمنی اجرا				ایمنی پیرامون
		پایدارسازی تاج	پایدارسازی جبهه کار	پایدارسازی کف	کنترل آب زیرزمینی	کنترل جابجایی زمین (در مجاورت سازه)
پیش نگهداری	فورپولینگ	○	○			●
	لوله گذاری در سقف	○	○			●
	جت گروتینگ افقی	○	○			●
تقویت جبهه کار حفاری	طاق (بخش فوقانی) قوسی شکل همراه با باقی گذاردن بخش مرکزی جبهه کار حفاری		○			●
	بتن پاشی جبهه کار حفاری		○			●
	بولت زنی جبهه کار حفاری		○			●
	تزریق جبهه کار حفاری		○			
تقویت کف	بولت های تقویت کننده کف			○		●
	شمع های تقویت کننده کف			○		●
	تزریق کف تونل			○		●
	کف بند موقت			○		●
کنترل جریان آب ورودی	زهکشی	از سطح زمین	○	○	○	
		از داخل تونل	○	○	○	
	آب بندی	تزریق	○	○	○	●
		انجماد	○	○	○	●
بهسازی زمین	تزریق تماسی		○			●
	تزریق کامل جبهه کار حفاری		○	○	○	●
	تزریق جبرانی از داخل تونل					●
	پیش تزریق از سطح زمین		○	○	○	●

○: روش های مؤثر جهت ایمنی اجرا، ●: روش های مؤثر جهت ایمنی محیط

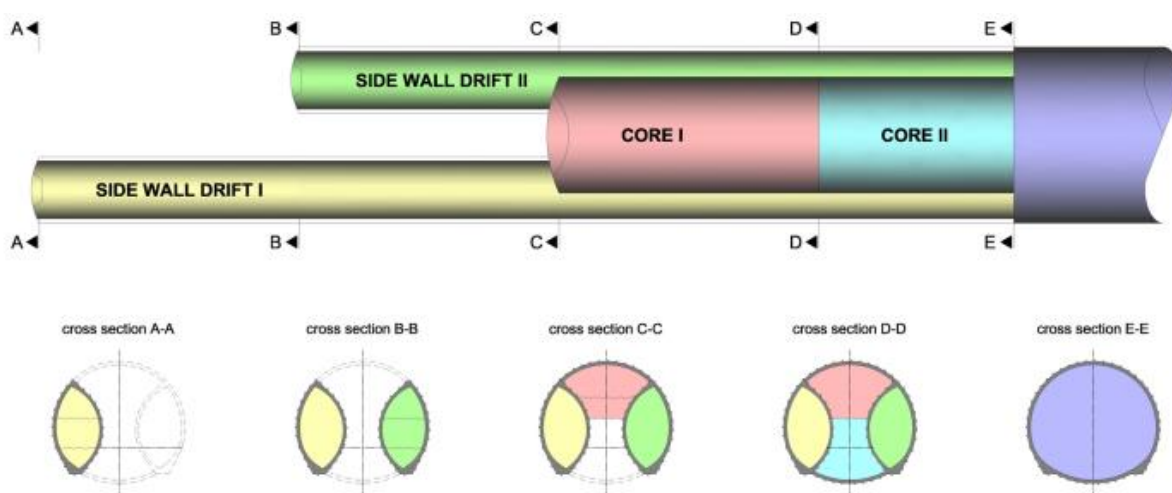
## ۳-۸- فواصل بین مراحل حفاری

فواصل بین مراحل حفاری از نکات مهم در طراحی تونل می باشد. بطور معمول ناحیه تاثیر حفاری در جلو و پشت جبهه کار (شکل ۳-۲۷)، بعنوان تخمین اولیه از فواصل مراحل حفاری ملاک قرار می گیرد. البته بایستی توجه نمود که هنگام حفاری در زمین های سست، بایستی هرچه سریعتر کل مقطع تونل بسته شود. در این صورت از میزان همگرایی ها بطور محسوسی کاسته خواهد شد. در عین حال برای تعیین فواصل حفاری، مسائل مربوط به مانور تجهیزات حفاری و بارگیری مصالح نیز باید لحاظ شود (شکل ۳-۲۸).





شکل ۳-۲۷: ناحیه تاثیر حفاری در جلو و پشت جبهه کار



شکل ۳-۲۸: تصویری شماتیک از مراحل حفاری تونل به روش گالری‌های جانبی

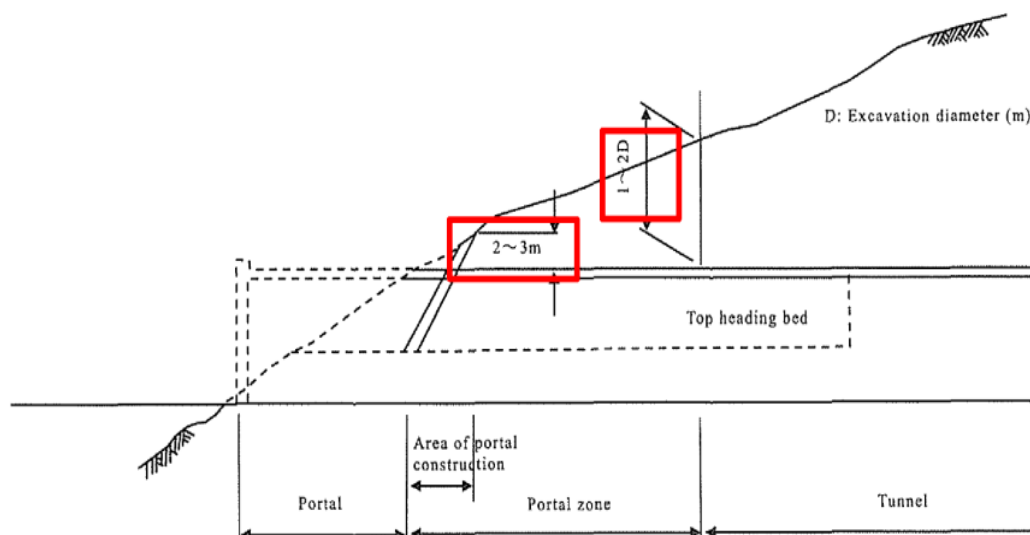
### ۳-۹- پرتال

به لحاظ هندسی پورتال تونل را می‌توان محل تلاقی تونل با سطح آزاد زمین تعریف نمود. بعبارت دیگر پورتال تونل موقعیتی است که یک حفاریه زیرزمینی با سطح زمین که معمولاً شامل ترانشه‌های طبیعی یا احداث شده می‌باشد، تلاقی پیدا می‌کند و هدف اصلی آن فراهم نمودن یک راه ایمن برای عبور نفرات، مصالح و تجهیزات از سطح زمین به زیرزمین در طول عمر پروژه می‌باشد.

بنابراین مهندس طراح بایستی تصمیمات مناسب برای سازه نگهدارنده، روش ساخت، شیب ترانشه‌ها و شکل مناسب پرتال را با لحاظ نمودن ابعاد تونل، توپوگرافی و زمین‌شناسی منطقه، آب‌های زیرزمینی در اطراف پرتال و حضور سازه‌های سطحی در مجاورت پرتال اتخاذ نماید.



ناحیه پرتال (Portal zone) به عنوان ناحیه‌ای که ضخامت روباره بین ۱ تا ۲ برابر قطر تونل بوده و تشکیل قوس زمین دشوار می‌باشد، تعریف می‌شود. پرتال (Portal) و ناحیه پرتال (Portal zone) به دلیل هندسه و اهمیت ویژه‌ای که دارد بایستی بصورت ۳ بعدی تحلیل شود. تعریف پرتال (Portal) و ناحیه پرتال (Portal zone) و به دنبال آن ابعاد مورد نیاز برای مدلسازی بر اساس شکل (۲۹-۳) می‌باشد.



شکل ۲۹-۳: نمایش شماتیک از پرتال و ناحیه پرتال جهت تحلیل و طراحی

مشکلات و مخاطرات احتمالی در ساخت پرتال در جدول (۷-۳) ارائه شده است.



جدول ۳-۷: مخاطرات احتمالی در پرتال به همراه ملاحظات طراحی آن

مسئله	توضیحات
ناپایداری شیب یا زمین لغزش	اجرای تونل در محدوده پرتال در برخی مواقع با ناپایداری شیب و یا زمین لغزش همراه می‌شود. این امر می‌تواند در اثر سست شدگی ناشی از حفاری تونل و یا حفر ترانشه پرتال باشد. در صورت وجود پتانسیل ناپایداری شیب و یا زمین لغزش ناشی از حفاری تونل، باید تمهیداتی را جهت نگهداری شیب به هنگام پیشروی تونل بکار بست.
فشار نامتقارن	بسته به موقعیت و ارتباط تونل و ترانشه پرتال ممکن است یک فشار نامتقارن بر مقطع تونل وارد شده و در نتیجه تنش زیادی در سازه تونل ایجاد شود. تا زمانیکه تونل ناپایدار است، تمهیداتی باید بمنظور ایجاد توازن در فشار زمین با استفاده از پرکردن و یا حفاری ترانشه صورت گیرد.
کافی نبودن ظرفیت باربری زمین	در محدوده پرتال، در جاییکه عمق روباره کم است، برخی مواقع ممکن است کل بار روباره بر تونل وارد شود. از آنجائیکه مصالح پرتال متشکل از نهشته‌های تحکیم نیافته و یا زون هوازه می‌باشد، میزان تغییرشکل‌ها و نشست‌ها به دلیل ظرفیت باربری کم زمین زیاد خواهد بود. بنابراین طراحی پرتال و روش اجرای تونل باید بر اساس ظرفیت باربری مورد نیاز زمین انجام شود.
ریزش جبهه کار حفاری	در محدوده پرتال، زمین اغلب ضعیف و سست می‌باشد. حتی در شرایطی که زمین متشکل از سنگ سخت باشد، وجود گسل‌ها و یا زون‌های خرد شده ممکن است منجر به توسعه شکستگی‌ها و ناپایداری جبهه کار حفاری شود. بنابراین در شرایطی که جبهه کار حفاری در زمان مورد نیاز پایدار نیست، باید از روش حفاری خاص و یا روش‌های کمکی جهت پیشگیری از ریزش جبهه کار حفاری بهره جست.
نشست سطح زمین	در محدوده پرتال، روباره کم، ظرفیت باربری ناکافی زمین و زمان ایستایی ناکافی جبهه کار حفاری ممکن است منجر به اثرات نامطلوبی در اثر نشست‌های ایجاد شده در سطح زمین شود. در صورت وجود سازه‌های دیگر در سطح زمین و اهمیت کنترل نشست سطحی، بکارگیری تمهیدات مناسب و روش‌های کمکی جهت پیشگیری از مشکلات بعدی ضروری است.
سقوط سنگ، جریان آوار و بهمن	موقعیت پرتال باید به نحوی انتخاب گردد تا از وقوع احتمالی سقوط سنگ، جریان آوار و یا بهمن در امان باشد. در صورت عدم امکان چنین جانمایی، باید تمهیدات مناسبی در برابر این مشکلات اتخاذ گردد.
سازه‌های مجاور	اثر حفاری تونل بر روی سازه‌های موجود در مجاورت آن نظیر منازل مسکونی، برج‌های فولادی، جاده‌ها و ریل‌های راه آهن و نیز اثر سر و صدا و گازهای خروجی از تونل به هنگام بهره برداری باید مورد بررسی قرار گیرد.

معمولاً به دلیل روباره بسیار کم در محدوده پرتال (Portal) و ناحیه پرتال (Portal zone)، و نیز اهمیت بالای حفظ پایداری پرتال، بایستی از سیستم نگهداری و اقدامات مناسبی برای پایدارسازی و مقابله با مخاطرات احتمالی استفاده نمود. این اقدامات بطور مختصر در جدول (۳-۸) ارائه شده است.

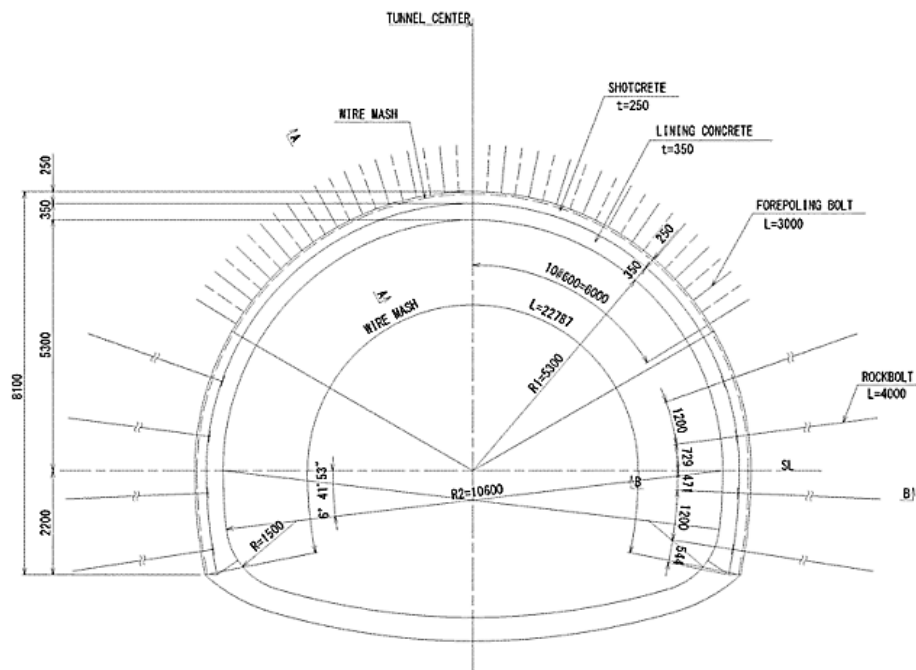
بطور کلی توصیه می‌شود در محدوده پرتال، از سیستم نگهداری (پوشش موقت) مناسب و کافی جهت تثبیت و پایدارسازی ترانشه‌ها و تونل استفاده شود. این سیستم در تونل‌های خاکی معمولاً شامل ابزارهای پیش نگهداری (فورپولینگ، جت گروتینگ، اسپایلینگ، لوله رانی و...)، میخکوبی، آنکراژ، شاتکریت مسلح به مش و کفبند (موقت و دائم) می‌باشد (شکل ۳-۳۰) در تعیین جانمایی و طراحی پرتال بایستی پایداری ترانشه‌ها، ظرفیت باربری خاک، جابجایی‌ها و تاثیر آنها بر روی سازه‌های مجاور، خاکبرداری و پر کردن پرتال و روش حفاری و ساخت پرتال لحاظ شود.



جدول ۳-۸: تمهیدات مدنظر برای مقابله با مخاطرات موجود در ساخت پرتال

مشکله روش حل کلی	ناپایداری شیب	فشار نامتقارن	ظرفیت باربری نامناسب زمین	ناپایداری جبهه کار حفاری	نشست سطحی زمین	سقوط سنگ، جریان آوار و پهمن	سازه های مجاور	ملاحظات
حفاظت (مصنوعی) شیب	○	-	-	-	-	○	-	
حفاظت (طبیعی) شیب	○	-	-	-	-	○	-	
دیوار حائل	○	○	○	-	-	-	-	دیوار حائل بزرگ
کاهش شیب جهت پایداری و یا خاکریزی	○	○	-	-	-	○	-	خاک سیمان
بولت های عمودی	○	○	-	○	○	-	-	
نصب انکر	○	-	-	-	-	○	-	شمع های حفاظتی در برابر زمین لغزش، نصب انکر
زهکشی	○	-	-	○	-	-	-	چاه های نقطه ای زهکشی، گمانه های زهکش، چاه های عمیق
تزریق شیمیایی	○	-	○	○	○	-	-	
فورپولینگ	-	-	-	○	○	-	-	لوله گذاری در سقف، فورپولینگ، فورپولینگ طویل، تزریق با جت افقی
تقویت جبهه کار حفاری	-	-	-	○	○	-	-	بتن پاشی جبهه کار، بولت زنی جبهه کار، نصب بولت های طویل
تقویت کف	-	-	○	○	○	-	-	نگهداری فولادی همراه با مهار، بولت های تقویت کننده کف، شمع های تقویت کننده کف، کفبند موقت





شکل ۳-۳: نمونه‌ای از سیستم نگهداری تونل در محدوده پرتال

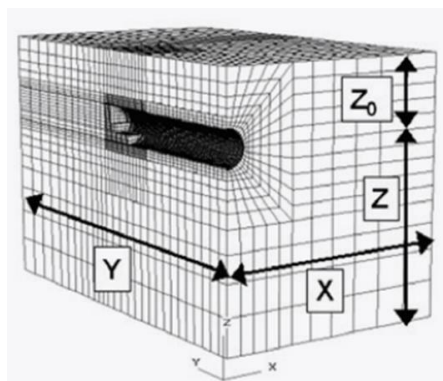
### ۳-۱۰- مراحل مدل‌سازی عددی و تحلیل و طراحی سازه نگهدارنده در تونل‌سازی NATM

مراحل مدلسازی و تحلیل و طراحی سازه نگهدارنده در تونلسازی مرحله‌ای به شرح زیر است:

- (۱) تعریف اهداف مدلسازی عددی.
- (۲) انتخاب مدلسازی عددی دو بعدی یا سه بعدی.
- (۳) ترسیم یک مدل مفهومی از آنالیز مدنظر.
- (۴) ایجاد هندسه و مش‌بندی.

ابعاد مدل‌سازی بایستی در برگیرنده محدوده مورد مطالعه و عوامل تاثیرگذار در رفتار محیط باشد. هندسه مدل باید بیانگر فیزیک مساله بوده و به اندازه کافی گسترده باشد تا بتوان به کمک آن مکانیزم حاکم بر رفتار مساله را پوشش داد. مدل باید به اندازه‌ای بزرگ باشد که مرزهای آن خارج از محدوده تاثیر فعالیت‌های مهندسی قرار گیرد (شکل ۳-۳۱). در مواقع حساس که نیاز به دقت بالا می‌باشد، بایستی از تعداد بالایی مش با ابعاد ریزتر استفاده نمود. در مواقعی که شرایط تقارن در مساله وجود دارد، می‌توان برای کاهش ابعاد مدل، تعداد مش و زمان محاسبات، از این شرایط بهره برد و نیمی از مدل را شبیه‌سازی نمود.





X – Axis	Y – Axis	Z – Axis
15 times tunnel radius or 3-3.5 times depth of tunnel	15 times tunnel radius	2-3 times depth of tunnel

شکل ۳-۳۱: ابعاد مورد نیاز برای مدلسازی عددی تونل

(۵) انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

(۶) اعمال شرایط مرزی، تنش‌های برجا و بارهای خارجی

(۷) حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری

(۸) انجام مدلسازی برای روش پیشنهادی ساخت تونل (کلیه مراحل روش اجرا می‌بایست در مدلسازی مدنظر قرار

گیرد)

(۹) بررسی نتایج و انجام طراحی





## خواننده گرامی

امور نظام فنی اجرایی، مشاورین و پیمانکاران سازمان برنامه و بودجه کشور، با گذشت بیش از چهل سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر هشتصد عنوان نشریه تخصصی - فنی، در قالب آیین نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. ضابطه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال های اخیر در سایت اینترنتی **nezamfanni.ir** قابل دستیابی می باشد.





Islamic Republic of Iran  
Plan and Budget Organization

# Specifications for Design of Urban and Suburban Railways

## *Vol. II:* Structural Design

**No.805-2**

Deputy of Technical and Infrastructure  
Development Affairs

Department of Technical and Executive  
Affairs, Consultants and Contractors

**nezamfanni.ir**





این ضابطه

با عنوان جلد دوم «ضوابط طراحی خطوط  
قطار شهری و حومه» ملاک طراحی سازه مسیر  
در خطوط قطار شهری و حومه‌ای کشور است.

