دانشکده مهندسی معدن و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

سمینار کارشناسی ارشد

حفر تونل در زمین های نرم

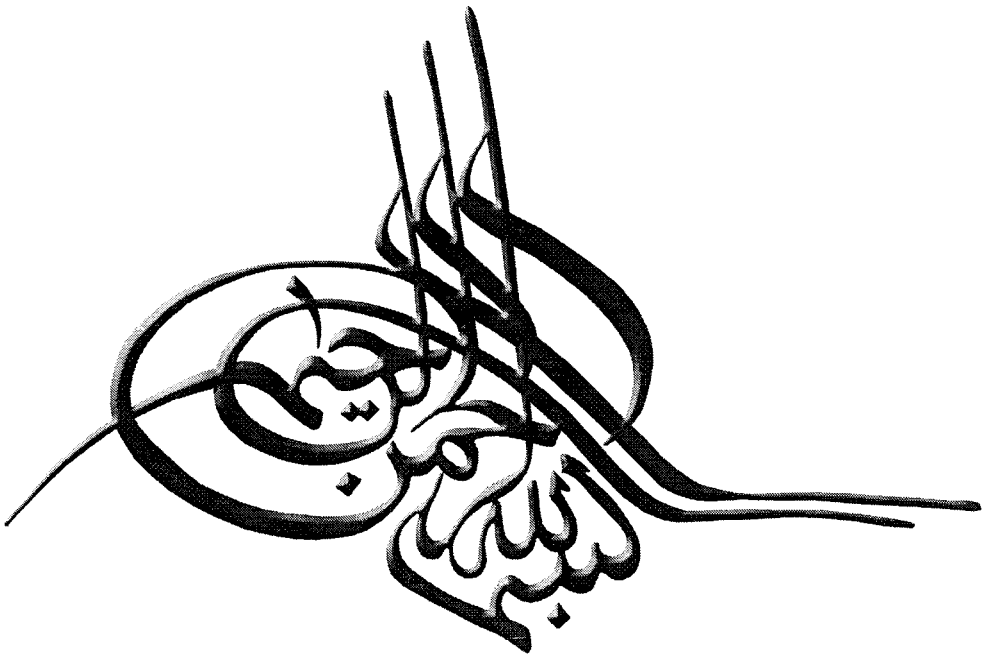
نگارش

محسن حاجی‌حسنی

استاد راهنما

دکتر علی مرادزاده

بهار ۱۳۸۵


بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیر و تشکر

اکنون که به یاری پروردگار مهربان مراحل انجام این تحقیق به پایان رسیده است، سپاسگزار همه اساتید و بزرگوارانی هستم که از راهنمایی‌هایشان بهره جستم. مراتب سپاس صمیمانه خود را از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر علی مرادزاده که با لطف و صبر فراوان در تمام مراحل تحقیق و تنظیم سمینار، اینجانب را ارشاد نموده و اندوخته علمی و تجربیات خود را در اختیار اینجانب قرار دادند، ابراز می‌نمایم و موفقیت روز افزون ایشان را از خداوند سبحان مسألت می‌نمایم. همچنین از تمامی عزیزانی که به نحوی مرا در انجام این تحقیق یاری رسانیده‌اند، قدردانی می‌نمایم.

چکیده

استفاده مناسب از فضاهای زیرزمینی به منظور ارتقاء پیشرفت در صنعت حمل و نقل نوین در حال افزایش است. در نتیجه اکثر پروژه‌های زیرزمینی به اجبار در شرایط متنوع زمین شامل خاک‌های ضعیف حاوی آب و سنگ‌های نرم اجرا می‌شوند. حفاری در زمین‌های نرم به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. در قدیم توسط روش‌های سنتی و دستی حفاری در زمین‌های نرم انجام می‌گرفت. استفاده از این روش‌ها به دلیل هزینه زیاد و ایمنی کم کاهش یافته، هر چند هنوز هم در بسیاری موارد از این روش‌ها استفاده می‌شود. با پیشرفت تکنولوژی در عرصه‌های مختلف تحولات عمده‌ای در فن تونل‌سازی صورت گرفته است. عمده‌ترین تحولات در ساخت تونل در زمین‌های نرم استفاده از انواع سپر می‌باشد که تونل‌سازی را در هر شرایطی ممکن می‌سازد. در تونل‌های با طول زیاد استفاده از سپرها باعث کاهش زمان انجام پروژه و همچنین کاهش هزینه تمام شده می‌شود. البته در استفاده از سپرها معایبی نیز وجود دارند که توجه به این معایب در هنگام طراحی عملیات حفاری، باعث کاهش مشکلات خواهد شد. در این مجموعه پس از معرفی انواع روش‌های حفر تونل در زمین‌های نرم به بررسی مزایا و معایب آنها پرداخته شده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول : کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- دیدگاه‌های ساخت ۲

۱-۳- تحقیقات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ۳

۱-۴- روش‌های سنتی و مکانیزه حفر تونل در زمین‌های نرم ۳

۱-۵- عوامل مؤثر در طراحی و انتخاب روش حفاری ۴

۱-۵-۱- شرایط زمین ۴

۱-۵-۲- ابعاد تونل ۵

۱-۵-۳- ویژگی‌های محیطی ۵

۱-۵-۴- سایر موارد ۵

فصل دوم : روش‌های سنتی حفر تونل در زمین‌های نرم و خاکی ۷

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- اساس روش‌های سنتی ۹

۲-۲-۱- بتن‌ریزی یکباره مقطع ۱۰

۲-۲-۲- حفر و پوشش در مراحل متناوب ۱۱

۲-۳- انواع روش‌های سنتی حفر تونل در زمین‌های نرم ۱۳

۲-۳-۱- روش حفاری نیمه بالایی با پله کوتاه ۱۳

۲-۳-۲- روش دیافراگم میانی ۱۴

۲-۳-۲-۱- مطالعه موردی : تونل‌های اویاما- دایریا ۱۵

۲-۳-۳- روش گالری‌های جانبی ۱۶

۲-۳-۳-۱- مطالعه موردی : متروی آتن ۱۷

۲-۳-۴- روش تونل‌سازی اتریشی ۲۱

۲-۳-۴-۱- روش قدیمی اتریشی ۲۱

۲-۳-۴-۲- روش جدید اتریشی ۲۳

۲-۳-۵- روش پوشش بتنی ۲۳

۲-۳-۶- مقایسه بین روش S.C.L و روش جدید اتریشی ۲۴

۲-۳-۷- روش آلمانی ۲۶

۲-۳-۷-۱- مطالعه موردی : متروی مادرید ۲۶

۲-۳-۸- روش انگلیسی ۲۹

۲-۳-۹- روش بلژیکی ۳۲

۲-۴- روشهای مرسوم حفاری در زمین‌های نرم ۳۵

۲-۴-۱- تکنیک‌های Pre-Lining ۳۵

فصل سوم : تونل‌سازی با استفاده از سپر ۳۸

۳-۱- مقدمه ۳۹

۳-۲- شرایط زمین‌های نرم در ارتباط با تونل‌سازی سپری ۳۹

۳-۳- فرآیند انتخاب سپر مناسب ۴۰

۳-۳-۱- اکتشاف ساختگاه ۴۱

۳-۳-۲- انجام آزمون و تهیه داده‌های مربوطه ۴۱
۳-۳-۳- توصیف ویژگی‌های سپر ۴۲
۳-۳-۴- انتخاب سیستم ماشین سپر ۴۲
۳-۴- انواع ماشین‌آلات حفاری تونل ۴۴
۳-۴-۱- تقسیم‌بندی بر اساس پوشش جبهه‌کار توسط دستگاه حفار ۴۴
۳-۴-۱-۱- دستگاه‌های حفاری تمام مقطع ۴۵
۳-۴-۱-۲- ماشین‌آلات حفاری جزء مقطع ۴۵
۳-۴-۲- تقسیم‌بندی بر مبنای وضعیت زمین ۴۵
۳-۴-۲-۱-دستگاه‌های حفاری مخصوص زمین‌های نرم ۴۵
۳-۴-۲-۲- دستگاه‌های حفاری مخصوص زمین‌های سخت ۴۶
۳-۵- اصول کار سپرها ۴۶
۳-۵-۱- قسمت‌های مختلف یک سپر ۴۷
۳-۵-۲- دوره متعارف کار سپر ۴۷
۳-۶- نشست سطح زمین و نگهداری فضای حفاری شده ۴۸
۳-۷- نگهداری و پایدارسازی جبهه‌کار ۴۸
۳-۷-۱- فشار جبهه‌کار ۴۹
۳-۷-۲- مقابله با فشار خاک و پایدارسازی جبهه‌کار ۴۹
۳-۷-۲-۱- پایدارسازی جبهه‌کار توسط هوای فشرده ۵۰
۳-۷-۲-۲- پایدارسازی جبهه‌کار توسط فشار آب یا دوغاب ۵۰
۳-۷-۲-۳-پایدارسازی جبهه‌کار توسط اعمال فشار خاک حفاری شده در اتاقک فشار ۵۱

۳-۸- تقسیم‌بندی سپرها ۵۱
۳-۸-۱- سپرهای باز ۵۴
۳-۸-۱-۱- سپرهای حفر دستی ۵۴
۳-۸-۱-۲- سپرهای نیمه مکانیزه ۵۶
۳-۸-۱-۳ سپرهای مکانیزه ۵۷
۳-۸-۲- سپر نیمه باز ۵۸
۳-۸-۳- سپر هوای فشرده ۵۹
۳-۸-۳-۱- دامنه کاربرد تونل‌سازی توسط سپر هوای فشرده ۶۰
۳-۸-۳-۲- معایب روش ۶۱
۳-۸-۳-۳- اصول کار سپر هوای فشرده ۶۱
۳-۸-۳-۴- تجهیزات هوای فشرده ۶۲
۳-۸-۴- سپر دوغابی ۶۲
۳-۸-۴-۱- نگهداری جبهه‌کار ۶۳
۳-۸-۴-۲- اصول کار سپر دوغابی ۶۴
۳-۸-۴-۳- انواع سپرهای دوغابی ۶۵
۳-۸-۵- سپر تعادلی با فشار زمین ۶۹
۳-۸-۵-۱- اصول کار سپر تعادلی با فشار زمین ۷۰
۳-۸-۵-۲- ویژگی‌های زمین و دامنه کاربرد سپر ۷۰
۳-۸-۶- سپرهای ترکیبی ۷۱
۳-۸- ۷- سپرهای خاص ۷۳
۳-۸-۷-۱- سپر چندگانه ۷۳

۳-۸-۷-۲- سپرهای دایره‌ای چند سره ۷۳
۳-۸-۷-۳- سپرهای تعریض کننده ۷۴
۳-۸-۷-۴- سپر عمودی و افقی ۷۴
۳-۸-۷-۵- سپرهای غیر دایره‌ای ۷۵
۳-۹- مقایسه بین روش‌های مختلف تونل‌سازی سپری ۷۵
۳-۱۰- فرآیند حفر با استفاده از سپر ۷۶
۳-۱۰-۱- روش‌های حفر تونل ۷۶
۳-۱۰-۱-۱- تونل‌سازی بدون ابزار حفر ۷۶
۳-۱۰-۱-۲- حفر دستی ۷۶
۳-۱۰-۱-۳- حفرمکانیکی مقطعی جبهه‌کار ۷۷
۳-۱۰-۱-۴- حفر مکانیکی تمام مقطع ۷۷
۳-۱۰-۱-۵- حفر هیدرولیکی ۷۸
۳-۱۰-۲- انتقال مواد حفاری‌شده ۷۹
۳-۱۰-۲-۱- آماده‌سازی مواد حفر شده برای انتقال ۷۹
۳-۱۰-۲-۲- انتقال مواد به بیرون محدوده جبهه‌کار تونل ۸۰
۳-۱۰-۳- ناتراواسازی و فرآیندهای تزریق در تونل‌سازی سپری ۸۱
۳-۱۰-۳-۱- آب‌بند نمودن پشت سپر ۸۲
۳-۱۰-۳-۲- روش‌های تزریق ۸۲
۳-۱۰-۴- قطعه‌گذاری ۸۳
۳-۱۱- مزایا و معایب تونل‌سازی سپری ۸۴
۳-۱۱-۱- مزایای تونل‌سازی سپری ۸۴

۳-۱۱-۲- معایب تونل‌سازی سپری ۸۴

فصل چهارم : نگهداری تونل‌ها در زمین‌های نرم ۸۶

۴-۱- مقدمه ۸۷

۴-۲- روش‌های مختلف آستربندی تونل ۸۷

۴-۲-۱- آستربندی به طریقه لوله‌گذاری ۸۸

۴-۲-۲- قطعه‌گذاری ۸۸

۴-۲-۲-۱- پر کردن پشت قطعات ۹۰

۴-۲-۳- آستربندی به روش بتن‌ریزی برجا ۹۱

فصل پنجم : ماشین حفار تمام مقطع EPB ۹۳

۵-۱- مقدمه ۹۴

۵-۲- سپرهای بکار گرفته شده در ایران تا به امروز ۹۴

۵-۳- مسایل اصلی و مهم در سپرهای EPB ۹۵

۵-۳-۱- قسمت‌های اصلی دستگاه ۹۵

۵-۳-۲- تنظیم فشار در اتاقک فشار ۹۶

۵-۳-۳- آب‌بندی دستگاه ۹۷

۵-۳-۴- تخلیه مصالح حفاری شده ۹۸

۵-۳-۵- کاهش اصطکاک بین دستگاه و زمین ۹۸

۵-۳-۶- قسمت پشتیبانی ۹۹

۵-۴- کله حفار ۱۰۰

۵-۴-۱- تمهیدات خاص بر روی کله حفار دستگاه‌های EPB ۱۰۴
۵-۴-۱-۱- Copy Cutter ۱۰۴
۵-۴-۱-۲- چرخش در دو جهت ۱۰۵
۵-۵- سپر ۱۰۵
۵-۵-۱- آب‌بندی سپر ۱۰۵
۵-۶- اتاقک فشار ۱۰۶
۵-۷- نقاله مارپیچی ۱۰۹
۵-۷-۱- قسمت حلزونی ۱۰۹
۵-۷-۲- بدنه نقاله مارپیچی ۱۱۰
۵-۷-۳- دریچه ۱۱۱
۵-۸- تسمه نقاله ۱۱۱
۵-۹- ارکتور ۱۱۲

منابع ۱۱۴

فهرست اشکال

شکل ۲-۱- واژه‌شناسی قسمت‌های مختلف تونل در روش‌های سنتی ۹

شکل ۲-۲- روش‌های مختلف حفر تونل به صورت بخشی ۱۲

شکل ۲-۳- روش حفاری نیمه بالایی با پله کوتاه ۱۴

شکل ۲-۴- زون‌های بحرانی در روش نیمه بالایی با پله کوتاه ۱۴

شکل ۲-۵- روش دیافراگم میانی ۱۵

شکل ۲-۶- میزان کرنش در دو روش نیمه بالایی و دیافراگم میانی ۱۶

شکل ۲-۷- روش گالری‌های جانبی ۱۸

شکل ۲-۸- مراحل انجام کار در تونل متروی آتن ۱۸

شکل ۲-۹- ترتیب ساختاری نگهداری موقت و مراحل عملیات در روش قدیمی اتریشی ۲۲

شکل ۲-۱۰- مراحل نگهداری دائم در روش قدیمی اتریشی ۲۲

شکل ۲-۱۱- مراحل کار در روش جدید اتریشی ۲۳

شکل ۲-۱۲- ترتیب مراحل کار در روش S.C.L ۲۴

شکل۲- ۱۳- نشست‌های سطح در دو روش اتریشی و S.C.L به ازای RMR بین ۴۰- ۲۰ ۲۵

شکل ۲-۱۴- مراحل حفر تونل به روش آلمانی ۲۶

شکل ۲-۱۵- مراحل حفر در روش آلمانی به همراه پیش برش مکانیکی ۲۷

شکل ۲-۱۶- پیشروی و نگهداری گالری‌ها در روش آلمانی ۲۷

شکل ۲-۱۷- نمایی از مراحل کار و نگهداری تونل به روش آلمانی ۲۸

شکل ۲-۱۸- مقدار همگرایی در سقف و گالری‌ها در متروی مادرید ۲۹

شکل ۲-۱۹- مراحل حفر و اجرای پوشش در روش انگلیسی ۳۰

شکل ۲-۲۰- تصویر سه‌بعدی روش انگلیسی از اجرای پوشش ۳۱
شکل ۲-۲۱- روش بلژیکی با شروع از تونل پیشرو بالایی ۳۲
شکل ۲-۲۲- حالت‌های مختلف احداث دیواره‌های جانبی در روش بلژیکی ۳۴
شکل ۲- ۲۳- جزئیات روش بلژیکی اصلاح شده یا دارای دو تونل ۳۵
شکل ۲-۲۴- پیش‌برش مکانیکی با پیش تاق ۳۶
شکل ۲-۲۵- بولت‌گذاری جبهه‌کار و محیط تونل ۳۷
شکل ۳-۱- قسمت‌های مختلف یک سپر ۴۷
شکل ۳-۲- فشار وارد به جبهه‌کار از طرف زمین ۵۰
شکل ۳-۳- تقسیم‌بندی سپرها بر اساس نوع حفاظت جبهه‌کار ۵۳
شکل ۳-۴- انواع سپرهای خاص ۵۳
شکل ۳-۵- سپر حفر دستی مجهز به کج بیل ۵۵
شکل ۳-۶- سپر دستی با نگهداری جبهه‌کار بوسیله نگهدارنده مکانیکی ۵۶
شکل ۳-۷- نگهداری جبهه‌کار در سپرهای مکانیزه (تمام مقطع) ۵۷
شکل ۳-۸- سپر کور ۵۸
شکل ۳-۹- نمایی شماتیک از یک سپر هوای فشرده ۵۹
شکل ۳-۱۰- پایدارسازی جبهه‌کار توسط هوای فشرده ۶۰
شکل۳-۱۱- نمایی شماتیک از یک سپر دوغابی ۶۳
شکل ۳-۱۲- نگهداری جبهه‌کار در سپر دوغابی ۶۴
شکل ۳-۱۳- مشکلاتی که در پایدارسازی جبهه‌کار در سپرهای دوغابی ایجاد می‌گردد ۶۵
شکل ۳-۱۴- نمایی شماتیک از یک سپر EPB ۶۹
شکل ۳-۱۵- محدوده کاری سپر تعادلی با فشار زمین ۷۱

شکل ۳-۱۶- ترکیب‌های امکان‌پذیر در سپرها ۷۲
شکل ۳-۱۷- سپر دایره‌ای چند سره ۷۳
شکل ۳-۱۸- سپر تعریض کننده ۷۴
شکل ۳-۱۹- سپر چهار گوش ۷۵
شکل ۴-۱- شمای کلی روش لوله‌گذاری ۸۸
شکل ۴-۲- شکل قطعات پیش‌ساخته جهت نگهداری تونل ۸۹
شکل ۴-۳- اتصالات بین قطعات پیش‌ساخته ۸۹
شکل ۵-۱- قسمت‌های اصلی یک دستگاه EPB ۹۶
شکل ۵-۲- محل‌هایی که احتمال نفوذ آب به درون دستگاه EPB وجود دارد ۹۷
شکل ۵-۳- آب‌بندی محل‌های نفوذ آب به درون دستگاه EPB ۹۸
شکل ۵-۴- تفاوت قطر قسمت‌های مختلف سپر برای کم کردن اصطکاک بین زمین و دستگاه ۹۹
شکل ۵-۵- قسمت‌های مختلف پشتیبانی دستگاه حفار EPB ۱۰۰
شکل ۵-۶- قسمت‌های مختلف کله حفار دستگاه حفار شیراز ۱۰۱
شکل ۵-۷- اتصال کله حفار به رینگ توسط بازوها ۱۰۲
شکل ۵-۸- پوشانیدن قسمت‌هایی که در معرض فرسایش هستند توسط جوش‌های ضد سایش ۱۰۳
شکل ۵-۹- ابزار حفاری نصب شده روی کله حفار ۱۰۳
شکل ۵-۱۰- ابزار حفاری نصب شده ثابت و قابل تعویض روی کله حفار ۱۰۴
شکل ۵-۱۱- لوله‌های تزریق گریس و گروت پشت سگمنت‌ها ۱۰۶
شکل ۵- ۱۲- محل قرارگیری دریچه نقاله مارپیچی در اتاقک حفاری ۱۰۷
شکل ۵-۱۳- امکانات تعبیه شده در اتاقک حفاری ۱۰۷

شکل ۵-۱۴- قسمت حلزونی نقاله مارپیچی ۱۱۰
شکل ۵- ۱۵- پوسته نقاله مارپیچی با هفت دریچه برای کنترل و بازدید ۱۱۰
شکل ۵- ۱۶- حمل مواد حفاری شده توسط نوار نقاله و هدایت آنها به داخل واگن‌ها ۱۱۲
شکل ۵- ۱۷- محل قرارگیری ارکتور در دستگاه EPB ۱۱۲

فهرست جداول

جدول۳-۱- شرایط زمین‌های نرم در ارتباط با تونلسازی سپری ۴۰

جدول ۳-۲- انواع آزمون‌های مؤثر در انتخاب سپر و کاربرد نتایج آنها ۴۳

جدول ۳-۳- نیازمندی‌های تکنیکی روش تونل‌سازی سپری ۴۴

جدول ۳-۴- کاربرد انواع سپر در ژاپن ۷۵

فصل اول

کلیات

ریزش گل و لای و مواد سست، کنترل زمین و عملیات حفاری را با مشکل روبرو سازد، می‌باشد. حفر تونل در چنین شرایطی باعث شکل‌گیری پیشرفت‌های فنی چشمگیر و مناسبی شده که نیل بـه ایـن هدف بیش از ۳۰ سال به طول انجامیده است. این پیشرفت‌ها شامل حفر تونل توسط شیلد، اصلاحات اساسی در اکثر روش‌های حفر تونل و شرایط زمین و بکارگیری تدابیری در احداث سازه‌های زیرزمینی می باشد [۱۵].

۱-۳- تحقیقات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی

تحقیقات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، اطلاعات اولیه را برای یافتن مشخصات زمین و همچنین بررسی امکانپذیری ساخت تونل برای استفاده در طراحی مهیا می‌سازد. برخی راهنمایی‌های کلی طراحی و اجرای تحقیقات ژئوتکنیکی برای پروژه‌های تونلسازی توسط پارکر[1] (۱۹۹۹) معرفی شده که بر افزودن تحقیقات ژئوتکنیکی در مراحل اولیه طراحی اشاره دارد. پارکر تأکید می‌کند با توجه به شرایط غیر منتظره زمین، هزینه‌های ساختمانی افزایش می‌یابد. به همین علت تحقیقات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی از اهمیت زیادی برخوردار هستند [۱۵].

۱-۴- روش‌های سنتی و مکانیزه حفر تونل در زمین‌های نرم

فضاهای زیرزمینی با ابعاد کوچکتر خطرات کمتری را در حین حفر دارند و زمان ایستایی و یا خودایستایی آنها بیشتر است. در نتیجه در روش‌های سنتی حفر یکباره تمام مقطع تونل معمول نیست و سطح مقطع با حفر تونل‌های پیشرو به قسمت‌ها و جبهه‌کارهای کوچکتر تقسیم می‌شود. احداث تونل به صورت چند بخشی مستلزم نصب، باز کردن و جابجا نمودن‌های مکرر وسایل نگهداری موقت می‌باشد. در این روش‌ها نه تنها کار زیاد و مصرف قابل ملاحظه‌ای از وسایل نگهداری لازم است، بلکه نشست سقف را نیز موجب می‌شوند [۳].

اساس روش‌های مکانیزه حفر تونل در زمین‌های نرم بر استفاده از ماشین‌آلات حفاری بخصوص ماشین‌آلات تمام مقطع یا سپرها استوار است که پیشرفت‌های چشمگیری را در سال‌های اخیر بدست آورده است. سپرها سطح مقطع تونل را در یک مرحله حفاری کرده و نگهداری ثابتی را برای پیشروی

[1] - parker

تونل تأمین می‌کنند. انتقال مصالح حفاری شده در این سیستم‌ها توسط نوار نقاله، دوغاب و یا واگن می‌باشد. از معایب این سیستم‌ها هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالا می‌باشد. همچنین در صورت خرابی بخشی از دستگاه، حفاری تماماً متوقف خواهد شد.

۱-۵- عوامل مؤثر در طراحی و انتخاب روش حفاری

عوامل مختلفی کار تونل‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مهمترین این عوامل عبارتند از [۲۳].

۱-۵-۱- شرایط زمین

این مورد اصلی‌ترین عامل است. هرچند که تنها عامل مؤثر نمی‌باشد، ولی می‌تواند محدودیت‌های عمده‌ای را برای برخی روش‌ها فراهم کند. این عامل خود به سه وضعیت تقسیم می‌گردد:

الف- زمین‌های نرم: این وضعیت شامل رس‌ها، گراول‌ها، سنگ‌های هوازده که بطور کلی در زمره موادی هستند که با روش‌های سنتی بسادگی حفر می‌شوند ولی وضعیت‌شان در ارتباط با سفره‌های آب زیرزمینی و مواجه با مقادیر قابل توجه آب مشکل آفرین می‌باشد و می‌تواند توأم با ریزش گل و لای و مواد سست، کنترل زمین و عملیات حفاری را با مشکل روبرو سازد.

ب- شرایط سنگ: این مورد شامل سنگ‌های رسوبی نسبتاً سست با مقاومت فشاری ۴۰-۱۰ مگاپاسکال تا سنگ‌های آذرین سخت با مقاومت ۳۰۰-۱۵۰ مگاپاسکال می‌شود. ثابت شده که در سنگ‌های نرم حفاری با ماشین مناسب است، ولی نیاز به نگهداری موقت بیشتری می‌باشد؛ در حالی که در سنگ‌های مقاوم حفاری با سختی بیشتری انجام می‌شود، ولی به نگهداری موقت نیاز کمتری وجود دارد.

ج- شرایط جبهه‌کارهای مختلف: در تونل‌سازی در سنگ‌های لایه‌ای افقی، اغلب با حالتی مواجه می‌شویم که در آن بخش بالای جبهه‌کار تونل در زون سنگ‌های هوازده واقع شده، در حالی که بخش پایین جبهه‌کار در سنگ‌های نسبتاً مقاومتری قرار دارد. این وضعیت مشکلاتی را برای ماشین و پیش‌بینی نگهداری موقت و مناسب برای چنین وضعیتی بدنبال خواهد داشت.

بنابراین روش حفاری و تمهیدات لازم برای نگهداری باید با وضعیت زمین مطابقت داده شود. هر اندازه که سنگ ضعیف‌تر باشد، مقطع تونل را به بخش‌های بیشتری تقسیم کرده و حفاری بخش‌ها بصورت جداگانه صورت می‌گیرد.

۱-۵-۲- ابعاد تونل

تونل‌ها چه با قطر کم در حد میکرو تونل و چه با قطر زیاد حفر شوند، نیازمند بررسی‌های ویژه‌ای هستند تا ارزیابی جامعی از وضعیت زمین حاصل شود. افزایش ابعاد تونل نیز تغییرات مهم قابل توجه‌ای را مطرح می‌سازد. در روش‌های سنتی حفر در زمین‌های نرم هر اندازه مقطع تونل بزرگتر باشد تعداد بخش‌های حفاری را باید بیشتر گرفت تا به این صورت زمان ایستایی هر بخش بیشتر باشد.

۱-۵-۳- ویژگی‌های محیطی

واقع شدن در محیط شهری، وجود سفره‌های آب زیرزمینی و تغییرات سطح آب زیرزمینی در اثر زهکشی از عوامل محیطی به شمار می‌روند. از خصوصیات دیگر محیطی رویارویی با مشکلات ناشی از ورود پیوسته یا موقت آب و گاز از سنگ‌های فراگیر تونل می‌باشد. عوامل دیگری همانند حرارت، رطوبت و فشار هوا (شامل تأثیر هوای فشرده) هم می‌توانند تأثیر عمده‌ای بر انتخاب روش حفاری داشته باشند.

۱-۵-۴- سایر موارد

بطور کلی در اکثر موارد هر طرحی منحصر به فرد می‌باشد. زیرا علاوه بر پارامترهای اصلی همانند موارد ذکر شده، پارامترهای دیگری نظیر وزن سازه‌های سطحی، حجم ترافیک، زمان مجاز جهت اجرا، سطح قیمت‌ها، کمیت و کیفیت نیروی انسانی نیز در طرح دخیل می‌باشند. بدین لحاظ می‌بایست با توجه به شرایط طرح، روش اجرای حفاری مورد نیاز انتخاب شود.

با توجه به موارد مذکور به نظر می‌رسد تونل‌سازی سپری در صورت انتخاب سپر مناسب با در نظر گرفتن موارد بالا می تواند به عنوان روشی مناسب جهت حفاری در زمین‌های نرم پیشنهاد شود.

هر چند که تونل‌سازی سپری نمی‌تواند جایگزین سایر روش‌ها شود، اما می‌تواند در شرایط زمین‌های نامناسب برای مسیرهای طولانی هنگامی که نرخ پیشروی زیادی مورد نظر می‌باشد و یا مقررات سخت‌گیرانه‌ای در مورد نشست سطح زمین وجود داشته باشد، یک جایگزین مناسب فنی و همچنین اقتصادی برای سایر روش‌های تونل‌سازی باشد.

بکارگیری مناسب تونل‌سازی سپری هنگامی امکان‌پذیر است که در کنار مزایا، معایب آن نیز در طول مراحل طراحی مورد توجه قرار گیرد. با برخی تدابیر اقتصادی در مورد تونل‌هایی که با سپر حفر می‌شوند، در بسیاری از موارد، تونل‌سازی سپری می‌تواند نسبت به ساخت تونل‌ها با روش کند و پوش و یا روش‌های سنتی با صرفه اقتصادی بهتری انجام شود.

فصل دوم

روش های سنتی حفر تونل در زمین های نرم و خاکی

۲-۱- مقدمه

بطور کلی مهمترین خطر در تونل‌سازی در زمین‌های نرم، تنش‌زدایی زمین‌های بالای قسمت حفاری شده است که با شکم دادن سقف و دیواره‌های جانبی تونل همراه است. این امر موجب ریزش‌های موضعی یا حتی تخریب کامل فضای حفر شده می‌شود و ایمنی عملیات را مختل می‌سازد. این پدیده در صورت وجود آب شدت بیشتری پیدا می‌کند. در صورت عدم کنترل این پدیده علاوه بر مشکلات ایمنی در حین احداث، موجب نشست در سطح زمین و در نتیجه وارد آمدن خسارت به تأسیسات و ساختمان‌های سطحی خواهد شد.

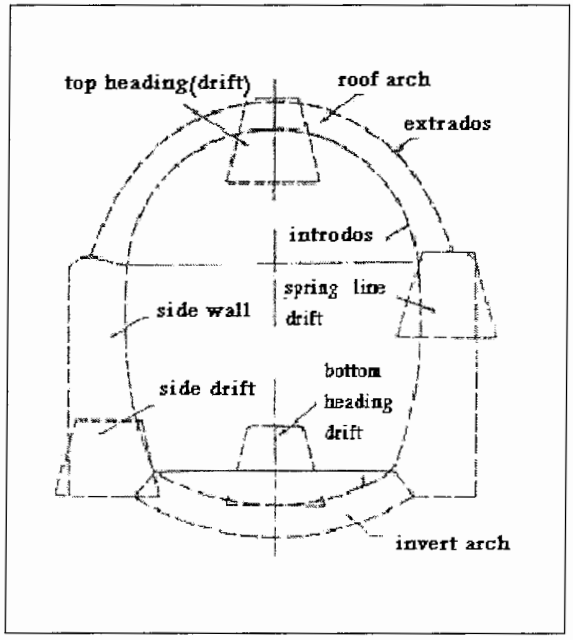
واضح است فضاهای زیرزمینی با ابعاد کوچکتر، خطرات کمتری در حین حفر دارند و زمان خود ایستایی آنها طولانی‌تر است. در نتیجه حفر یکباره تمام رخ مقطع تونل معمول نیست و سطح مقطع تونل با حفر تونل‌های پیشرو به قسمت‌ها و جبهه‌کارهای کوچکتر تقسیم می‌شود. ترتیب و مراحل اجرای این تونل‌های پیشرو یا جبهه‌کارها همیشه باید با عملیات لازم برای اجرای آنها (حفر، نصب وسایل نگهداری موقت و دائمی و غیره) همراه باشد و بسته به طبیعت سنگ و همچنین شرایط فشار سنگ، این مراحل با آنها مطابقت داشته باشد. شایان ذکر است که احداث تونل به صورت چند بخشی مستلزم نصب، بازکردن و جابجا نمودن‌های مکرر و پی‌درپی وسایل نگهداری موقت می‌باشد. در این روش‌ها نه تنها کار زیاد و مصرف مقدار زیادی از وسایل نگهداری الزامی است، بلکه نشست بیشتر سقف و ول شدن مکرر سنگ بالای فضای حفاری را نیز موجب می‌شوند. نشست سقف و ول شدن سنگ بالای فضا، رفتار غیر قابل اجتناب در هر باز کردن و تغییر و تعویض وسایل نگهداری موقت می‌باشد [۳].

با توجه به این معایب، روز به روز از کاربرد این روش‌ها کاسته می‌شود و فن تونل‌سازی از آن فاصله زیادی گرفته است؛ اما با توجه به کاربرد این روش‌ها به صورت بخشی و موضعی در حفریات

زیرزمینی و همچنین در جاهایی که تونل‌سازی مکانیزه از نظر فنی و اقتصادی امکان‌پذیر نمی‌باشد، در این فصل به شرح مختصر این روش‌ها پرداخته شده است.

۲-۲- اساس روش‌های سنتی

در این روش‌ها سطح مقطع تونل به تعدادی سطح مقطع کوچکتر تقسیم می‌شود و در طول تونل به صورت تونل‌های پیشرو با فاصله‌ای نسبت به هم جلو می‌روند. تونل‌های پیشرو با دویل‌های بالارو و یا پایین‌رو به یکدیگر وصل می‌شوند. سطح مقطع تونل به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود: قسمت بالایی یا سقف، قسمت میانی یا مغز و قسمت پایین یا کف. تونل پیشرو بالایی[۱] و تاق قوسی[۲] در قسمت بالایی، دیواره‌های جانبی در قسمت میانی و تونل پیشرو کف[۳] و کف بند[۴] در قسمت کف قرار می‌گیرند. در شکل ۲-۱ واژه‌شناسی قسمت‌های مختلف تونل نشان داده شده است [۳].



شکل ۲-۱- واژه‌شناسی قسمت‌های مختلف تونل در روش‌های سنتی [۳]

[1] - Top Heading
[2] - Roof Arch
[3] - Bottom Heading
[4] - Invert Arch

حفر تونل‌های با مقطع نعل اسبی طبق الگوی نشان داده شده در شکل ۲-۲ اجرا می‌گردد. روش‌ها به دو دسته کلی از نظر منقطع یا یکپارچه اجرا کردن پوشش تقسیم می‌شوند.

۲-۲-۱- بتن‌ریزی یکباره مقطع

در حالتی که تمام مقطع حفر شده یکباره بتن‌ریزی شود یکی از روش‌های ذیل اجرا می‌شوند [۳]:

الف: روش معمول، ایجاد یک دویل بالارو بین تونل پیشرو کف و تونل پیشرو بالایی و حفر تمام مقطع در یک طول از قبل تعیین شده می‌باشد. حفر و تعریض تونل طبق الگوی نشان داده شده در شکل ۲-۲- الف از بالا به پایین صورت می‌گیرد که باربری (در تونل ۱) و حفر (از تونل ۲ شروع می شود) می‌توانند بطور مستقل یا همزمان انجام گیرند. وقتی حفر یک حلقه در این مرحله تمام شد، پوشش از کف تا سقف به صورت پی‌درپی و برای تمام طول حلقه حفر شده صورت می‌گیرد. مزیت این روش علاوه بر تأمین شرایط خوب حمل و نقل، امکان داشتن جبهه‌کارهای متعدد و در نتیجه سرعت پیشروی زیاد می‌باشد. عیب روش عدم تهویه مناسب سینه‌کارهای پیشروی است.

ب: روش دیگری که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش پله‌ای[۱] با حفر زیرپایی یا رو به پایین طبق مراحل نشان داده شده در شکل ۲-۲- ب می‌باشد. در این حالت نیز پوشش از کف به سمت بالا در یک حلقه تمام حفر شده اجرا می‌شود. در این روش، باربری و حفر نمی‌توانند بطور کاملاً جدا از یکدیگر صورت پذیرند. به بیان دیگر حفر و باربری جدا از هم و یکی پس از دیگری انجام می‌شوند و در نتیجه از سرعت پیشروی کاسته می‌شود؛ ولی شرایط تهویه خوب است.

ج: آخرین و سومین روش از دسته اول، حفر رو به بالا از کف به سمت سقف طبق مراحل نشان داده شده در شکل ۲-۲- ج می‌باشد. این روش را می‌توان در زمین‌های متوسط سخت که سقف نیازی به نگهداری موقت ندارد، بکار گرفت. احداث پوشش مشابه روش‌های قبل از پایین به بالا و یکباره برای حلقه حفر شده صورت می‌گیرد.

---

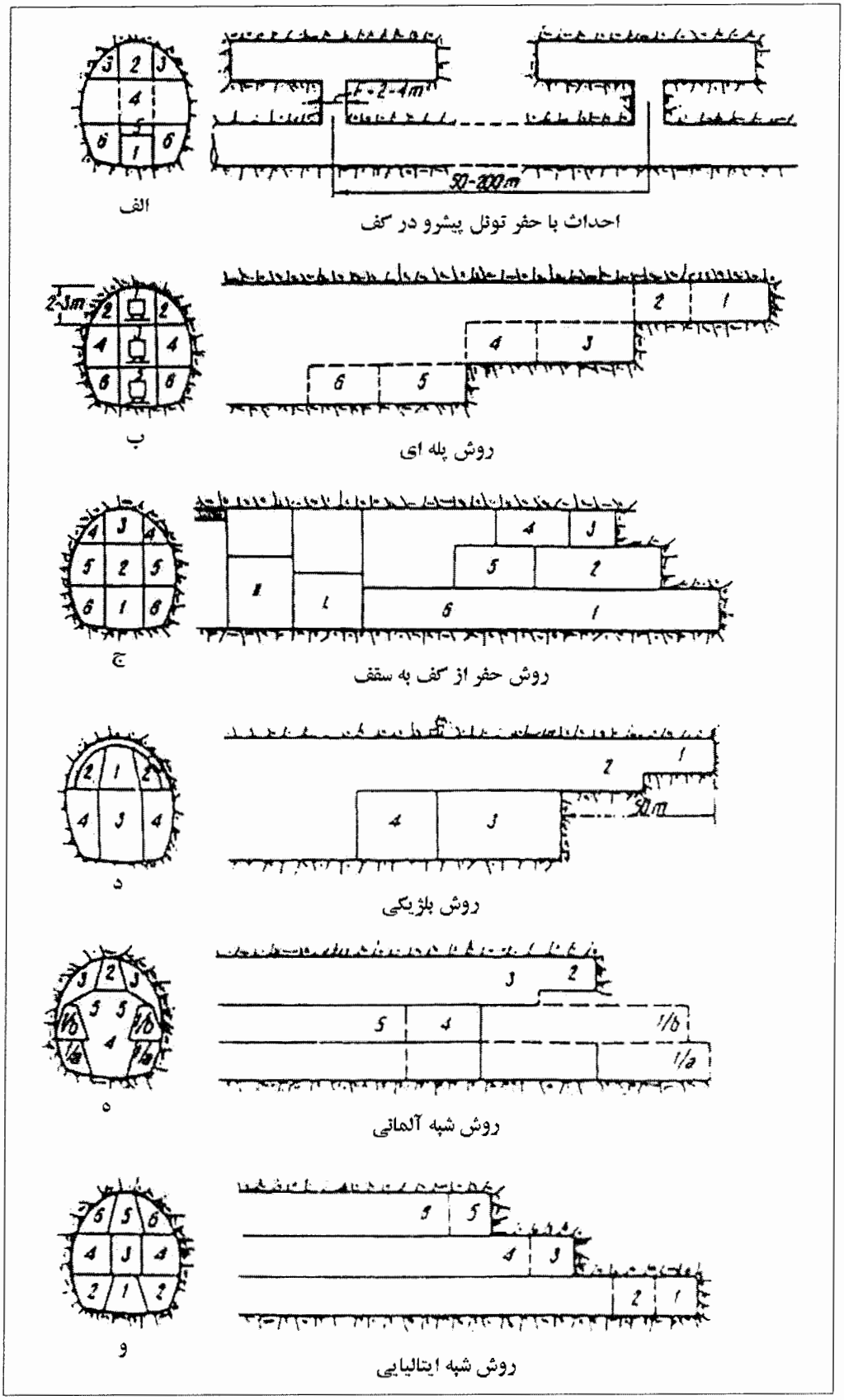
[۱] - Benching method

۲-۲-۲- حفر و پوشش در مراحل متناوب

الف: یکی از این روش‌ها حفر قسمت بالایی (روش بلژیکی) است که در آن قسمت بالایی تونل با شروع یک تونل پیشرو بالایی در یک طول از قبل تعیین شده حفر می‌شود. پس از آن طرفین تاق یا تونل پیشرو بالایی در همان طول تعریض و سپس تاق تونل با استفاده از سنگ چینی یا دیوار چینی نگهداری می‌شود. عملیات با حفر یک برش مرکزی تا تراز کف ادامه می‌یابد و از داخل این برش میانبر یا دستک‌هایی به فواصل مشخص از هم به سمت دو دیواره به صورت برش‌هایی باریک حفر می‌شوند. از داخل دستک‌ها، ابتدا زیرتاق به صورت گودکنی و شبه ستونی کنده می‌شود و سپس گودکنی در طول پایه و دیواره ادامه می‌یابد. در شکل ۲-۲- د نمایی از این روش دیده می‌شود.

ب: در صورتی که زمین از استحکام کافی برخوردار نباشد تا تاق را نگهداری کند، ابتدا دیواره‌های جانبی حفر و نگهداری می‌شوند. این کار با حفر تونل‌های پیشرو در هر دو دیواره در قسمت کف انجام شده و سپس تونل پیشرو بالایی حفر می‌گردد و با تعریض دو طرف تونل پیشرو بالایی، تاق قوسی ایجاد می‌شود. بتن‌ریزی یا نگهداری دو دیواره قبلاً صورت گرفته است(همانند روش آلمانی). قسمت میانی فقط پس از تکمیل و آماده شدن مقطع تونل برداشته می‌شود. در شکل ۲-۲- ه مراحل کار نشان داده شده است.

ج: در زمین‌های بسیار سست، حفر از قسمت پایینی و تونل پیشرو پایینی شروع شده و سپس دو طرف آن برداشته شده و نگهداری دو دیواره کف تأمین می‌شود(همانند روش ایتالیایی). تونل پیشرو مرکزی به فاصله بسیار کمی از قسمت ۲ در کف شروع و سپس دیواره‌ها حفر می‌شوند. با حفر مرحله به مرحله دیواره‌ها، نگهداری یا پوشش آنها نیز انجام می‌شود. حفر و ایجاد مرحله به مرحله قسمت بالایی یعنی ابتدا تونل پیشرو بالایی و سپس دو طرف آن، تاق قوسی تونل را تکمیل می‌کند. در شکل ۲-۲- و نمایی از این روش دیده می‌شود.



شکل ۲-۲- روش‌های مختلف حفر تونل به صورت بخشی [۳]

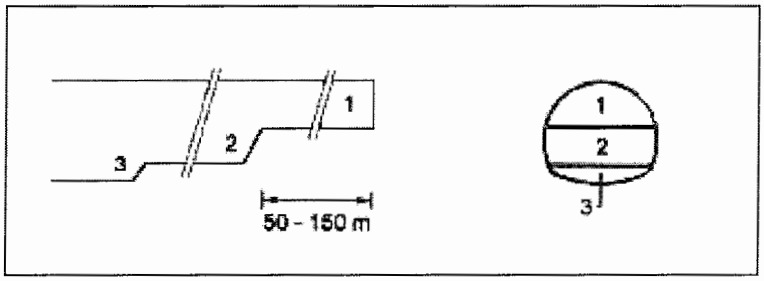
۲-۳- انواع روش‌های سنتی حفر تونل در زمین‌های نرم

حفر سنتی تونل در زمین‌های نرم به انواع روش‌های ذیل تقسیم‌بندی می‌شود.

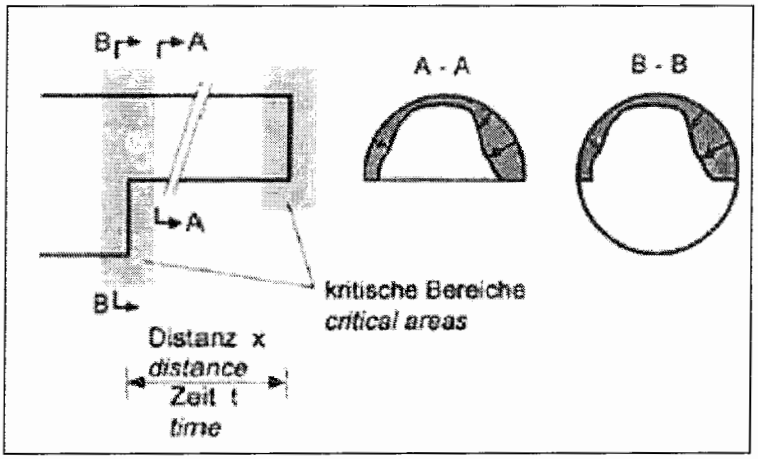
۲-۳-۱- روش حفاری نیمه بالایی با پله کوتاه[1]

حفاری در این روش بصورت پله‌ای می‌باشد که ابتدا از تاج شروع می‌شود و به سمت پایین پیش می‌رود. جبهه‌کارها در فاصله ۱۵۰-۵۰ متری به روش پله‌ای حفر می‌شوند که این فاصله به خاطر ایمنی و عدم تداخل کاری می‌باشد. در شکل ۲-۳ نمایی شماتیک از این روش دیده می‌شود[۲۱]. در این روش به علت فضای خوب کاری درجه مکانیزاسیون بالاست. معمولاً ارتفاع قسمت روبرداری بیشتر از ۴/۵ متر می‌باشد. در این روش ضروری است که جبهه‌کار بوسیله بولت‌های افقی نگهداری شود. هنگامی که در زمین‌هایی با فشارندگی بالا به روش نیمه بالایی با پله کوتاه کار می‌شود، هم جبهه‌کار و هم کف قسمت روبرداری شده به حالت بحرانی بوده و نیازمند یک الگوی بولت‌گذاری می‌باشند. کف موقت به وسیله بتن ساخته می‌شود. با بررسی مشکلاتی که در روش نیمه بالایی با پله کوتاه در سنگ‌هایی با فشارندگی بالا به وجود آمده است می‌توان به این نتیجه رسید که در این روش دو زون بحرانی در سطح حفاری جبهه‌کار روبرداری و سطح حفاری پله وجود دارد. این زون‌ها در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. در قسمت روبرداری شده، قاب‌های فولادی باعث می‌شوند که کف این قسمت بصورت بسیار نامساعدی بالا بیاید و بدین صورت قاب فولادی در کف فرو می‌رود. امکان دارد این عمل (جمع شدن، بالا آمدن کف و فرو رفتن قاب فولادی در کف قسمت روبرداری) باعث کوچک شدن مقطع حفاری و یا حتی بسته شدن مقطع شود که در این صورت باید حفاری دوباره انجام گیرد. البته با در نظر گرفتن یک طراحی مناسب برای اضافه حفاری، دیگر نیازی به حفاری دوباره نیست و برای جلوگیری از فرو رفتن قاب فولادی در کف می‌توان یک پی‌بندی مناسب برای آن در نظر گرفت. در این روش باید سعی شود که به یک فاصله مکانی X و یک فاصله زمانی t (شکل۲-۴) مناسب رسید، به گونه‌ای که دو زون بحرانی کمترین تأثیر را بر همدیگر داشته باشند. این روش در زمین‌هایی که قابلیت جابجایی بالایی دارند کاربرد زیادی ندارد[۲۰,۲۱].

[1] - Top Heading Short Bench



شکل ۲-۳- روش حفاری نیمه بالایی با پله کوتاه [۲۱]



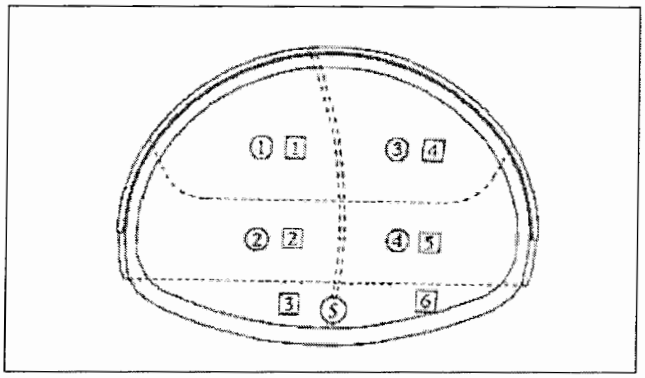
شکل ۲-۴- زون‌های بحرانی در روش نیمه بالایی با پله کوتاه [۲۱]

۲-۳-۲- روش دیافراگم میانی[1]

این روش یکی از روش‌های متداول تونل‌سازی در زمین‌های نرم است. در این روش مقطع تونل توسط یک حائل مرکزی به دو قسمت تقسیم می‌شود و با توجه به ابعاد تونل هر قسمت ممکن است در چند مرحله حفاری شود. در شکل ۲-۵ مراحل حفاری برای یک مورد خاص نشان داده شده است[۱۰,۱۳].

برای ایجاد دیافراگم مرکزی از شاتکریت مسلح و در صورت لزوم از بولت استفاده می‌شود. بولت‌هایی که در داخل مقطع بکار می‌روند معمولاً از جنس فایبرگلاس هستند[۲۰].

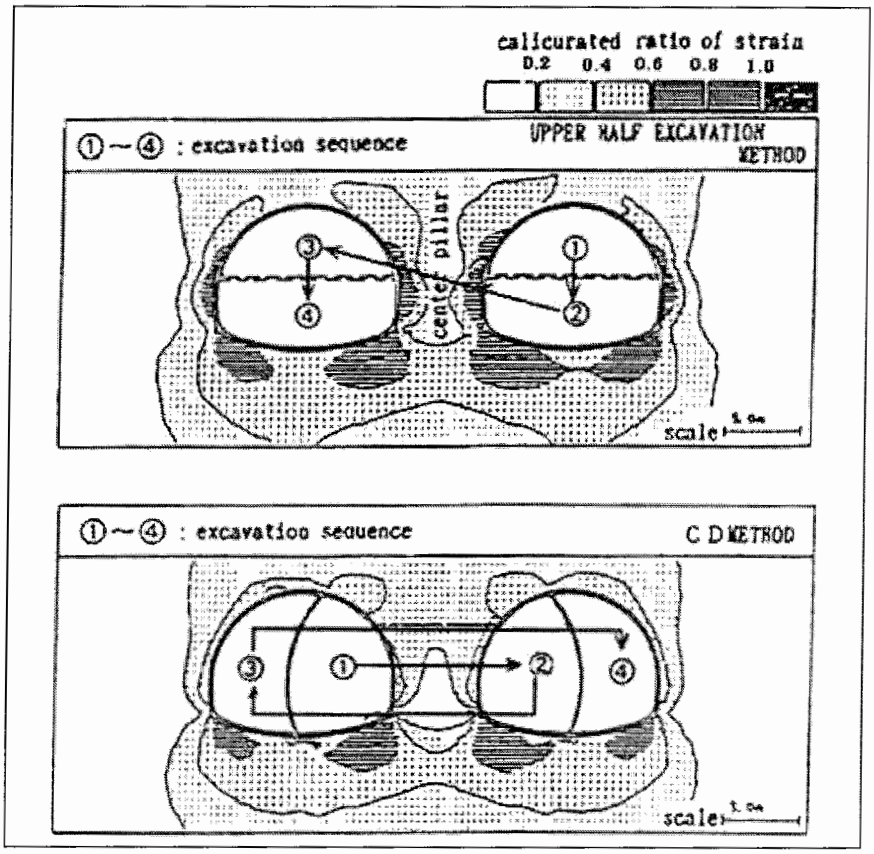
[1] - Center Diaphragm



شکل ۲-۵- روش دیافراگم میانی [۱۳]

۲-۳-۲-۱- مطالعه موردی : تونل‌های اویاما- دایریا

این تونل‌ها که در کشور ژاپن واقع هستند شامل دو تونل موازی هم با عرض ۱۲ متر و به فاصله ۳۶ متر از یکدیگر می‌باشند که ۳۸۹ متر طول و ۳۵ متر روباره دارند. در این تونل‌ها از دو روش نیمه بالایی با پله کوتاه و روش دیافراگم میانی استفاد شده و در نهایت دو روش با هم مقایسه شده‌اند. برای ساخت دیافراگم در این تونل‌ها از شاتکریت، بولت و قاب‌های فولادی استفاده شده است. برای نگهداری مقطع تونل نیز از شاتکریت، بولت و قاب‌های فولادی و برای نگهداری تاج تونل در قسمت جبهه‌کار تونل از پیش تحکیم استفاده شده است. در شکل ۲-۶ میزان کرنش‌های بوجود آمده از حفاری در دو روش دیافراگم میانی و نیمه بالایی با پله کوتاه در این دو تونل نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در روش دیافراگم میانی میزان کرنش بسیار کمتر می‌باشد[۱۰].



شکل ۲-۶- میزان کرنش در دو روش نیمه بالایی و دیافراگم میانی [۱۰]

نتایج نشان می‌دهند که روش دیافراگم میانی در مقایسه با روش نیمه بالایی با پله کوتاه نشست کمتر و جبهه‌کار پایدارتری دارد و تلفیق این دو روش با هم بسیار مفید می‌باشد. ارزیابی این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این دو روش در زمین‌هایی با مدول تغییر شکل پذیری ۵۰-۲۰ مگاپاسکال بدون پیش تحکیم[1]، سبب گسترش زون پلاستیک کششی، افزایش همگرایی و نشست می‌گردد و در نهایت موجب از بین رفتن پایداری خواهد شد[۱۳].

۲-۳-۳- روش گالری‌های جانبی[2]

در مواردی که ابعاد تونل و در واقع عرض تونل زیاد باشد، از این روش استفاده می‌شود. در این روش ابتدا دو گالری در جوانب تونل ایجاد می‌شوند. سپس قسمت تاج تا کف نیز حفر شده و در واقع پایه وسط بین دو گالری برداشته می‌شود. حفر در گالری‌ها بصورت بالا به پایین و در چند مرحله با

[1] - Fore-Poling
[2] - Side Drift

توجه به ابعاد و مسائل پایداری صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر در این روش از دو دیافراگم استفاده می‌شود که برخلاف حالت قبل در مرکز قرار ندارند[۱۲,۱۸,۱۹]. شکل ۲- ۷ مراحل ساخت تونل به روش گالری‌های جانبی را نشان می‌دهد.

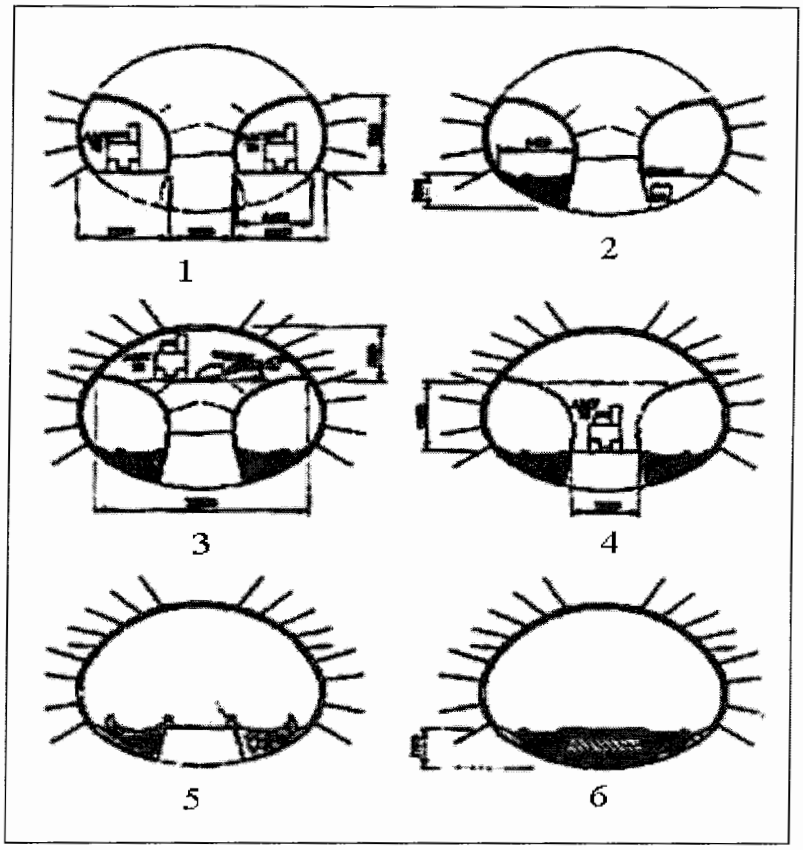
با بررسی‌ها و اندازه‌گیری های انجام شده در تونل‌هایی که با این روش ساخته شده‌اند و تحلیل نتایج بدست آمده، مشخص شده که در این روش با استفاده از نگهداری موقت و مناسب، نشست به خوبی کنترل می‌شود و توزیع تنش نیز در وضعیت خوبی قرار دارد. زون پلاستیک هم در این روش نسبت به روش‌های دیگر کمتر می‌باشد[۱۸].

۲-۳-۳-۱- مطالعه موردی : متروی آتن

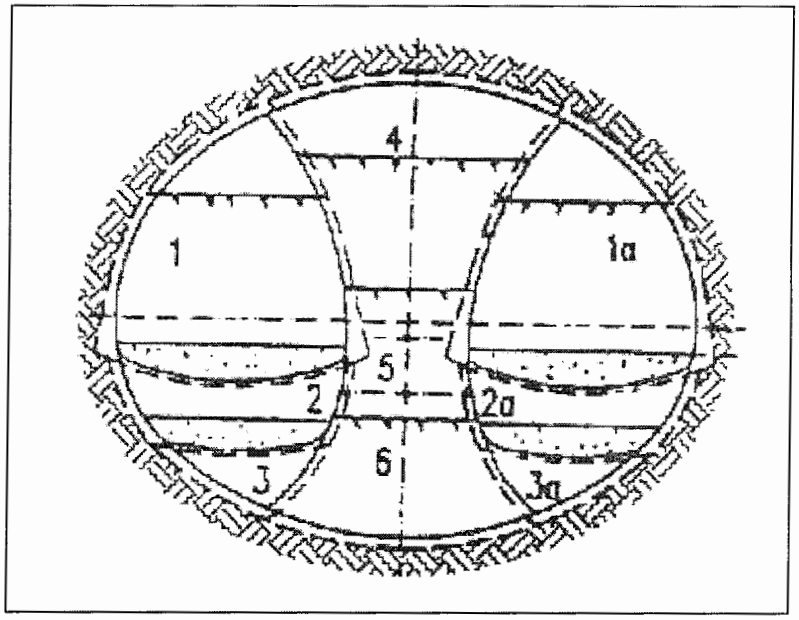
در پروژه متروی آتن از روش حفاری گالری‌های جانبی استفاده شده است که تشکیلات زمین‌شناسی آن همواره در رده سنگ‌های نرم طبقه‌بندی می‌شود. مراحل انجام کار به شرح ذیل می‌باشد[۱۸]:

۱- عملیات حفاری

همان طور قبلاً بیان شد، حفاری با روش گالری‌های جانبی توأم با پایه مرکزی می‌باشد که شکل مقطع و مراحل حفر تونل مترو در شکل ۲-۸ نشان داده شده است.



شکل ۲-۷- روش گالری‌های جانبی [۱۸]



شکل ۲-۸- مراحل انجام کار در تونل متروی آتن [۱۸]

۲- نگهداری

نگهداری تونل موارد ذیل را شامل می‌شود:

- یک لایه شاتکریت به ضخامت ۵۰ میلیمتر
- قاب‌های فولادی که در هر مرحله در فواصل بین ۱/۴- ۰/۷ متر برای جلوگیری از سست‌شدگی خاک نصب می‌شوند.
- لایه شاتکریت با ضخامت ۳۵۰ -۲۰۰ میلیمتر در محیط تونل و با ضخامت ۲۵۰-۱۵۰ میلیمتر روی دیواره‌های داخلی گالری‌ها پاشیده می‌شود که با دو لایه شبکه سیمی تقویت شده است.
- در صورت نیاز از بولت به عنوان عضو نگهدارنده ثانویه استفاده می‌شود. بولت‌ها از نوع تمام دوغابی با قطر ۲۵ میلیمتر می‌باشند.

ایجاد هر بخش گالری به صورت یک حلقه بسته، شامل کف موقت نیز می‌باشد و در قسمت مرز دیواره و کف (پاشنه) لایه شاتکریت ضخیم‌تر است. تونل توسط روش اجزاء محدود[1] مدل شده است. این مدل‌ها شامل مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی به چند صورت مختلف برای طراحی لاینینگ موقت و دائمی بوده است.

برای بدست آوردن بارهای وارد شده در طراحی لاینینگ اولیه فرض شده است که حین ساخت فقط بار ژئواستاتیک بر لاینینگ تونل اثر می‌گذارد. مقدار این بار به فاصله شاتکریت از جبهه‌کار (قسمت شاتکریت نشده) و عدد پایداری بستگی دارد که عدد پایداری (N) نسبت بین تنش اولیه (σ_o) و چسبندگی خاک زهکشی نشده (C_u) می‌باشد. این دو پارامتر در واقع بیان کننده درصد همگرایی تونل قبل از اجرای شاتکریت هستند. این درصد عامل نامحصوری (λ) نامیده می‌شود. بدین ترتیب بار وارد بر پوشش برابر است با:

$(1-\lambda)\ \sigma_o$

بدست آوردن این فاکتور از روش‌های همگرایی - همجواری و کاهش سختی مقدور است. در همگرایی- همجواری سست‌شدگی خاک در مقطع تحت بررسی، مربوط به بارهای گره‌ای شعاعی روی محیط حفاری شده می‌باشد که برابر با $\lambda \times \sigma$ می‌باشد. مقادیر بدست آمده از این بارگذاری به نتایج حاصل از بارگذاری ژئواستاتیک اضافه می‌شود. در روش کاهش سختی، سست‌شدگی خاک به کاهش

[1] - Finite Element Method (FEM)

سختی خاک (مدول یانگ) مربوط است. بارگذاری مدل بمنظور طراحی لاینینگ دائمی شامل دو فاز بوده است:

فاز اول: در این مرحله فقط فشار هیدرواستاتیک به پوشش اعمال می‌شود.

فاز دوم: در این مرحله فرض می‌شود که بار خاک و ساختمان‌های روی آن بدون کاهش بر روی پوشش دائم عمل می‌کنند. بنابراین مشارکت نگهداری موقت در تحمل بخشی از بار در دراز مدت نادیده گرفته می‌شود.

۳- رفتارسنجی

در حفر تونل‌ها در محیط‌های شهری ممکن است نشست زیادی در سطح روی دهد که این امر بر تأسیسات سطحی تأثیر خواهد داشت. بنابراین باید توجه خاصی به ارزیابی سریع نتایج حاصل از رفتارسنجی داشت تا متعاقب آن اقدامات لازم صورت پذیرد.

حداکثر نشست محاسبه شده با مدل FEM حدود۴۰-۳۰ میلیمتر بوده است؛ در حالی که حداکثر نشست در طرح حدود ۶۵ میلیمتر می‌باشد. البته این نتیجه مربوط به قسمت های کمی از تونل می‌باشد و در اغلب نقاط میزان نشست در حدود مقادیر پیش‌بینی‌شده بوده است. این میزان نشست در چند قسمت سبب ایجاد ترک‌هایی شد که شامل یک ایستگاه و پی برخی ساختمان‌های مجاور بود. دلایل ایجاد این نشست‌ها به شرح ذیل بیان شده است:

الف: وضعیت نامناسب زمین: منطقه مورد نظر در تشکیلاتی با هوازدگی نسبتاً زیاد و تکتونیزه واقع گردیده و در برخی موارد آب زیادی نیز وجود داشت.

ب: تأخیر یا نامناسب بودن احتمالی میزان نگهداری که موارد زیر از آن جمله می‌باشند:

- با وجود اینکه بولت‌ها در طی حفاری گالری‌ها و قبل از حفر ستون وسط نصب می‌شدند، اما نشست همواره بعد از هر مرحله حفر و نصب نگهداری موقت وجود داشت و این نشان می‌دهد که این بولت‌ها در چنین وضعیت‌هایی که زمین سست است، نیروی مؤثری ندارند.
- در هنگام برداشتن بخش بالایی پایه مرکزی نشست‌های بزرگی ایجاد شد که به دلیل تنش زیاد در محدوده تاج تونل و افزایش فشار منفذی می‌باشد. تأثیر در اجرای لایه‌های اول یا دوم شاتکریت در سطح تاج می‌تواند موجب بحران شود و در محدوده‌ای که نشست روی داد، مقاومت شاتکریت کافی نبوده است.

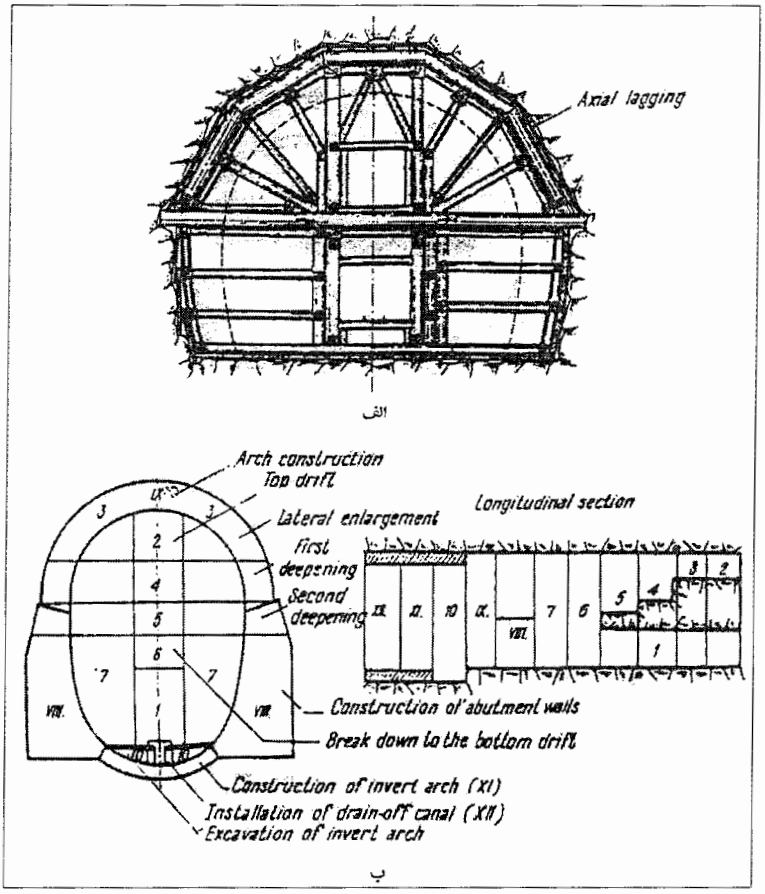
- اجرای پیش تحکیم در سقف تونل به صورت شبکه نامناسبی عمل می‌کرد. در حالی که باید با اجرای دقیق آن از همگرایی زیاد جلوگیری می‌شد.

ج: تراوش دائم آب و افزایش فشار هیدرولیکی: بر اساس ارزیابی رفتارسنجی، تغییر شکل بعد از تکمیل تونل نهایتاً بالغ بر ۱۰ میلیمتر بود (در حدود ۲۰ درصد کل تغییر شکل). نکته قابل توجهی که در مقایسه بین نشست سطح با نشست مربوط به سقف وجود داشت این بود که در پایان هر قرائت، نشست مشاهده شده در سطح بیشتر از نشست سقف است و این امر به دلیل آبکشی در حین حفاری بود که باعث ایجاد نشست مداوم در سقف می‌شد[۱۸,۱۹].

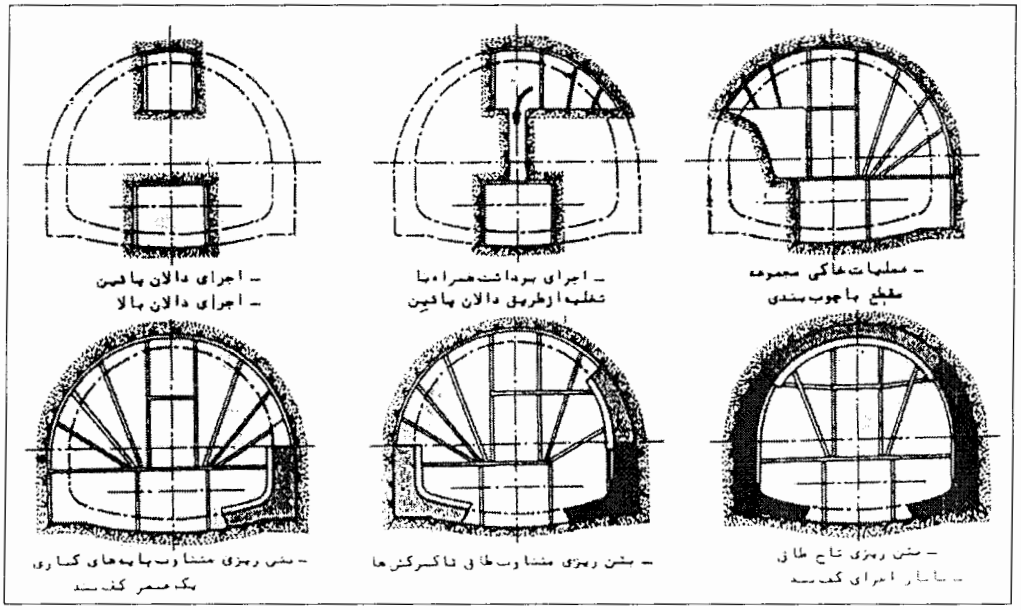
۲-۳-۴- روش تونل‌سازی اتریشی

۲-۳-۴-۱- روش قدیمی اتریشی

روش اتریشی بر اساس تجربیات بدست آمده از احداث تونل‌های مختلف تحت شرایط زمین‌شناسی متفاوت ارائه گردید. مبنای کار در روش قدیمی بدین صورت است که در ابتدا دو دالان یکی در بالا و دیگری در قسمت پایین تونل ایجاد می‌شود. به تدریج همراه با پیشروی، دالان بالایی به طرف جوانب و پایین تونل گسترش داده می‌شود. این عمل توأم با حائل‌بندی و نگهداری محیط تونل انجام می‌شود[۳]. ترتیب چوب بستکاری این روش در شکل ۲- ۹- الف نشان داده شده است. در شکل ۲- ۹- ب نیز گام‌های حفر آورده شده است. کار در این روش با حفر تونل پیشرو پایینی که به فاصله هر ۱۰۰-۵۰ متر دویلی از آن به تونل پیشرو بالایی حفر می‌شود، آغاز می‌شود. قسمت بالایی تونل از داخل تونل پیشرو بالایی تعریض و در عین حال عمیق می‌شود. البته در این روش لارده‌ها بر خلاف روش انگلیسی که لارده‌های سقف عمود بر محور تونل است، به موازات محور تونل قرار داده می‌شوند. تعریض در طول‌های کوتاهی انجام شده و برش‌ها از بالا به پایین و مرحله به مرحله تا خاکبرداری تمام سطح مقطع برداشته می‌شوند. بعد از حفر کف و ایجاد کفبند، پوشش یا بتن‌ریزی از پایین شروع و تا تاق ادامه می‌یابد. مراحل کار در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است.



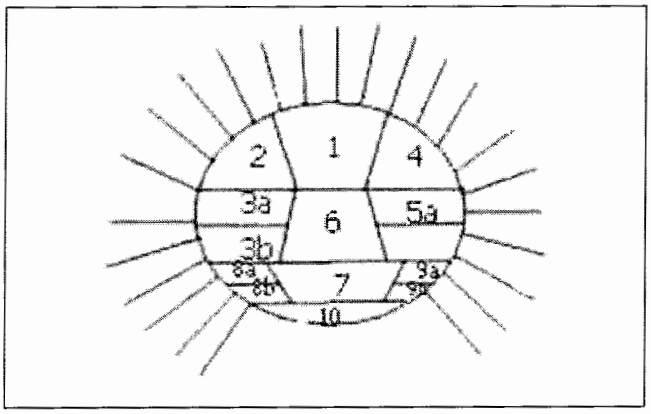
شکل ۲-۹- ترتیب ساختاری نگهداری موقت و مراحل عملیات در روش قدیمی اتریشی [۳]



شکل ۲-۱۰- مراحل نگهداری دائم در روش قدیمی اتریشی [۳]

۲-۳-۴-۲- روش جدید اتریشی[1]

به تدریج اصلاحات و تغییرات زیادی طی دهه‌های ۵۰ و ۶۰ میلادی در این روش بوجود آمد که حاصل آن کار بر روی تونل‌هایی بود که در این کشور ساخته شده بودند. بدین ترتیب روش اتریشی با ویژگی‌های جدیدی ارائه شد. بطوریکه حوزه کاربرد وسیعی در امر تونل‌سازی پیدا کرد. در این روش از شاتکریت به عنوان نگهداری اولیه که با میله‌های فولادی تقویت شده، به اضافه بولت استفاده می‌شود تا مقاومت و ظرفیت باربری توده‌سنگ حفظ شود و از انبساط و سست‌شدگی آن جلوگیری گردد. در شکل ۲-۱۱ مراحل حفر و نگهداری روش جدید اتریشی نشان داده شده است[۱۳].



شکل ۲-۱۱- مراحل کار در روش جدید اتریشی [۱۳]

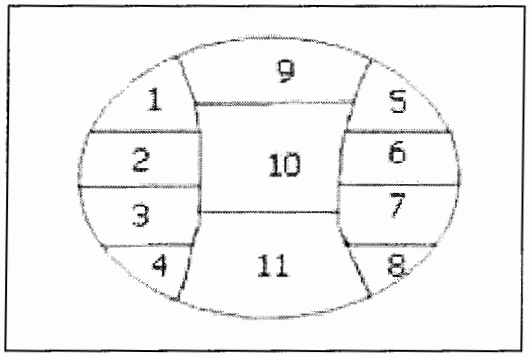
۲-۳-۵- روش پوشش بتنی[2]

از آنجایی که در تونل‌سازی در محدوده‌های شهری و تحت روباره کم، نیاز به استفاده از یک نگهداری صلب برای محدود کردن تغییر شکل‌ها و نشست احساس می‌شد، بر همین اساس در آمریکا و انگلیس یک روش متناسب با طرح لاینینگ اولیه روش اتریشی جدید ابداع گردید. اساس این روش در استفاده از شاتکریت است که با مقاطع فولادی و شبکه‌های سیمی مسلح گردیده و طراحی آن مشابه با بتن مسلح معمولی است. مراحل حفاری در این روش با حفر دو گالری در جوانب شروع و در مراحل بعدی پایه وسط برداشته می‌شود که هر کدام از گالری‌ها و پایه مرکزی طی چند مرحله حفر می‌شوند. ولی در این روش اجتناب از ایجاد گوشه‌های تیز جدی‌تر است. در شکل ۲- ۱۲ مراحل حفر

---

[1] - New Austrian Tunnelling Method (NATM)
[2] - Sprayed Concrete Lining (S.C.L)

و شکل مقطع نشان داده شده است. نگهداری اولیه شامل یک لایه شاتکریت بـه ضـخامت ۳۰ تـا ۵۰ سانتیمتر است که توسط آرماتوربندی و شبکه تور سیمی[1] مسلح شـده اسـت. اجـرای هـر قـسمت از نگهداری سازه کار مشکل و وقت‌گیری است. زیرا کیفیت و پیوستگی مراحل بتن‌ریزی و مناسب بودن همپوشانی آرماتورها اهمیت بسیار زیادی دارد. هر گونه نقص در این مرحله می‌تواند پایداری سـازه را به خطر بیاندازد. اتصال درز بین دو قسمت شاتکریت شده از کارهای مشکل و پرهزینه طرح می‌باشد.



شکل ۲-۱۲- ترتیب مراحل کار در روش S.C.L [۱۳]

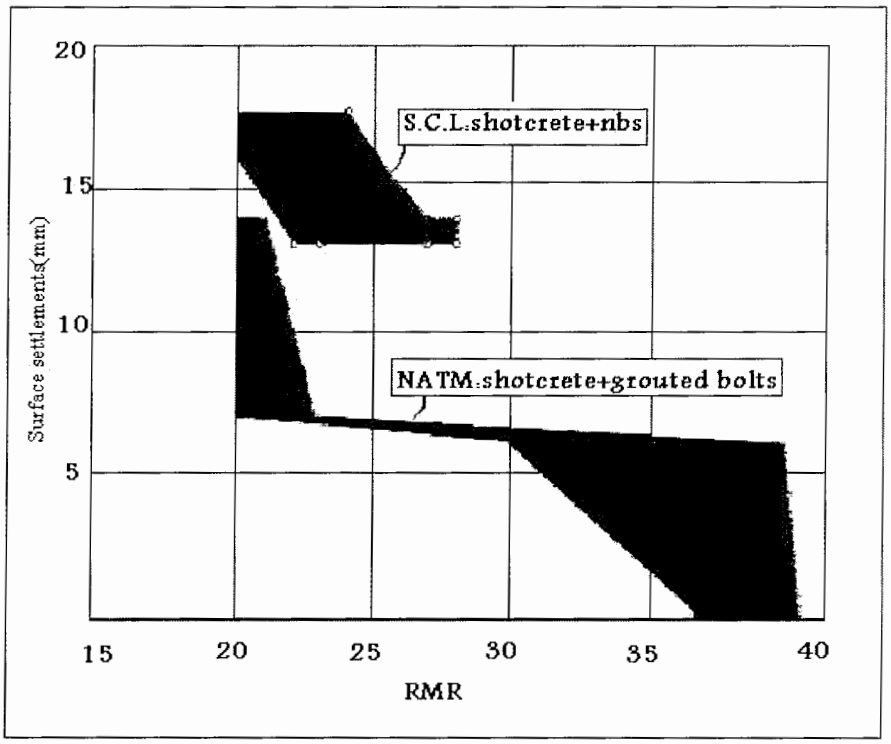
۲-۳-۶- مقایسه بین روش S.C.L و روش جدید اتریشی

- روش اتریشی با حفاری نیمه بالایی در وسط شروع و پس از آن قسمت‌های جانبی حفر می‌شـوند. اما در روش S.C.L ابتدا قسمت‌های جانبی و سپس پایه مرکزی حفر می‌شوند.
- در روش اتریشی شبکه منظم بولت همراه با لایه شاتکریت نازک اجرا می‌شود که با شبکه سیمی یا الیاف فولادی مسلح گردیده است. در روش S.C.L شاتکریت ضخیم مسلح شده با شبکه سیمی یا الیاف فولادی استفاده می‌شود.
- در روش اتریشی بر خلاف روش S.C.L پیوستگی لایه‌های شاتکریت اهمیت زیادی نـدارد و حلقـه باربر که توسط بولت‌ها ایجاد شده است قسمت بیشتر بار را تحمل مـی‌کنـد. ولـی در روش S.C.L کیفیت و پیوستگی مراحل بسیار مهم است.
- زمان نصب پوشش در روش اتریشی حدود ۴/۵ ساعت و در روش S.C.L حدود ۹ ساعت می‌باشـد. نرخ پیشروی در روش اتریشی بیشتر از روش S.C.L می‌باشد.

[1] - Wire Mesh

برای مقایسه نشست در دو روش اندازه گیری‌هایی در دو تونل مشابه صورت گرفت که هر یک از تونل‌ها به روش‌های مذکور طراحی و نگهداری شده بودند. نتایج بدست آمده بصورت زیر می‌باشند:

نشست در قسمت تاج و سطح زمین در امتداد طولی برای هر دو تونل اندازه‌گیری شد و بدین ترتیب در روش اتریشی مقدار حداکثر نشست در تاج به ازای RMR ۳۰ -۲۰ در سنگ‌های ضعیف بین ۲۰- ۵ میلیمتر و در سطح بین ۱۴-۰ میلیمتر بدست آمد. میزان نشست به ازای همین مقدار RMR در روش S.C.L برای تاج ۱۲- ۸ میلیمتر و برای سطح ۱۸-۱۳ میلیمتر بدست آمد. در شکل ۲- ۱۳ میزان نشست به ازای RMR بین ۴۰-۲۰ در هر دو روش مقایسه شده است.



شکل ۲- ۱۳- نشست‌های سطح در دو روش اتریشی و S.C.L به ازای RMR بین ۴۰ - ۲۰ [۱۳]

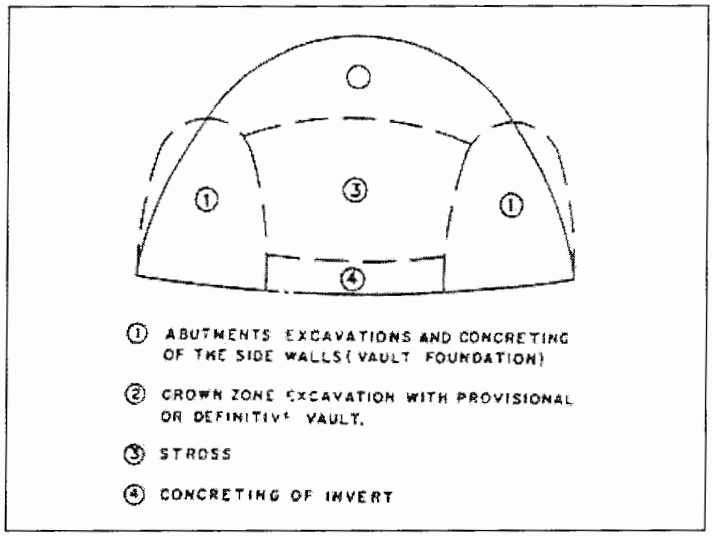
با توجه به مطالب مذکور و شکل بالا مشخص است که نشست‌های ایجاد شده در سطح در روش S.C.L نسبت به روش اتریشی بیشتر است.

با توجه به مطالب فوق هر چند از نظر تئوری روش S.C.L ممکن است روش مناسب‌تر و مؤثرتری باشد، ولی اندازه‌گیری‌های برجا ثابت می‌کند در صورتی که روش اتریشی بطور صحیح به کار برده شود، قابلیت بیشتری برای کنترل زمین و ایمنی دارد. دلایل عمده این اختلاف را بدین صورت

می‌توان توجیه کرد که در روش اتریشی به واسطه مسلح کردن توده در برگیرنده تونل، چسبندگی افزایش یافته و از توسعه زون پلاستیک جلوگیری می‌شود. در حالی که در روش S.C.L زون پلاستیک نسبت به روش اتریشی افزایش بیشتری دارد. محاسبات و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که افزایش ضخامت شاتکریت در کنترل نشست خیلی مؤثر نیست.

۲-۳-۷- روش آلمانی

یکی از روش‌های دیگری که برای حفر تونل در زمین‌های نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد روش آلمانی است. نحوه اجرای این روش بدین صورت است که ابتدا دو گالری در گوشه‌های پایین تونل حفر می‌شود و پس از نگهداری موقت، قسمتی از گالری که با محیط تونل مشترک است بتن‌ریزی می‌شود. در مرحله بعد قسمت سقف تونل حفر شده و طی چند مرحله تا کف تونل حفر می‌گردد و پس از تکمیل حفر مقطع، بتن‌ریزی کف نیز انجام می‌شود که به این ترتیب حلقه نگهداری بسته می‌شود. شکل ۲-۱۴ مراحل حفر را در این روش نشان می‌دهد.



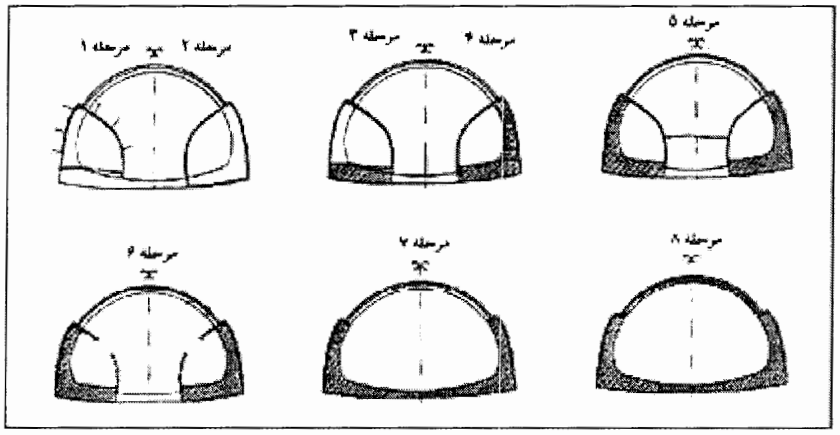
شکل ۲-۱۴- مراحل حفر تونل به روش آلمانی [۱۷]

۲-۳-۷-۱- مطالعه موردی : متروی مادرید

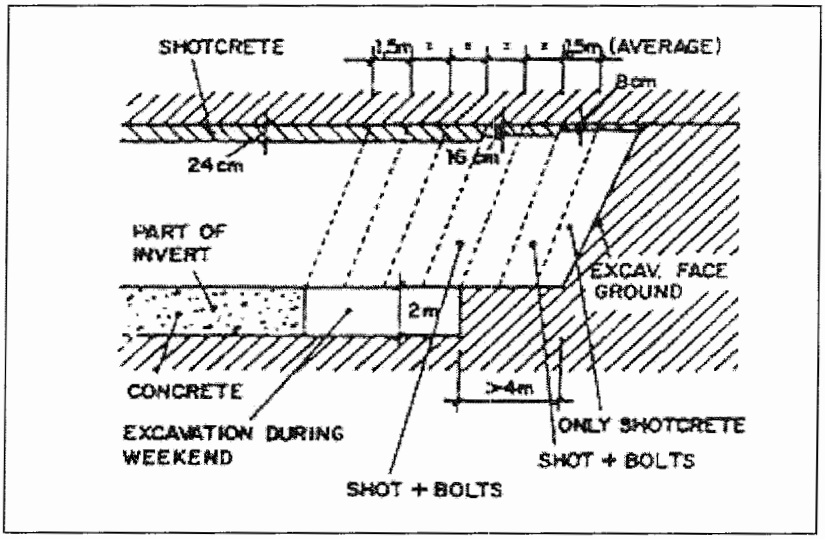
این روش در مادرید در حفر تونلی با عرض حدود ۲۰ متر در تشکیلاتی مرکب از لایه‌های خاکی و ماسه‌ای با چسبندگی متغیر مورد استفاده قرار گرفت. البته به دلیل چسبندگی بسیار کم تشکیلاتی

که تونل در آن واقع شده بود و بزرگی ابعاد تونل از روش آلمانی با قدری تغییر به همراه پیش برش مکانیکی برای نگهداری سقف استفاده شد. همچنین این روش در ساخت تونل‌های متروی مادرید و پاریس استفاده شد. اساس این روش اصلاح شده و مراحل آن مطابق با شکل ۲-۱۵ می‌باشد.

مرحله اول: حفر گالری‌ها در گوشه‌های پایین تونل و نگهداری آنها که میزان پیشروی در هر مرحله بسته به مقدار چسبندگی محیط بین ۲- ۰/۸ متر می‌باشد. نگهداری با ۲۴ سانتیمتر شاتکریت در سه مرحله ۸ سانتیمتری انجام می‌شود. بولت‌های فلزی و فایبرگلاس بعد از لایه‌های اول و دوم شاتکریت نصب می‌شوند که در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است. برای انجام کار در شرایط ایمنی بیشتر، اجرای شاتکریت و نصب بولت‌ها توسط ماشین انجام می‌شوند.



شکل ۲-۱۵- مراحل حفر در روش آلمانی به همراه پیش برش مکانیکی [۱۷]



شکل ۲-۱۶- پیشروی و نگهداری گالری‌ها در روش آلمانی [۱۷]

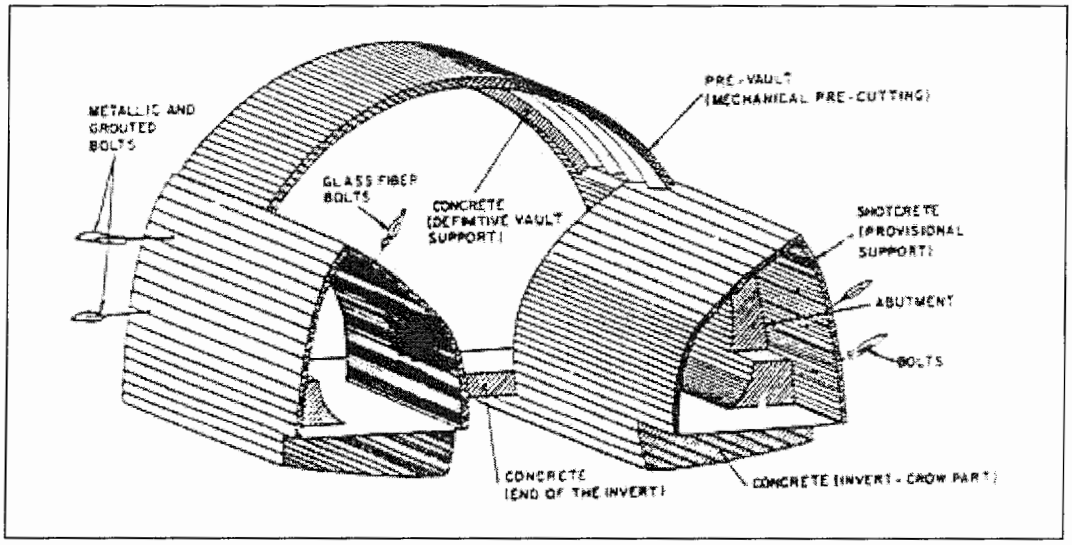
مرحله دوم: حفر و بتن‌ریزی کف گالری (با ضخامت حدود ۲ متر) به طوری کـه اجـرای آن در پایـان هفته و در طول ۴ متر صورت می گیرد(شکل ۲-۱۶).

مرحله سوم: بتن‌ریزی دیوارهای جانبی که نگهداری بخش سقف روی آن قـرار مـی‌گیـرد. در قـسمت انتهایی در بالای دیواره، لوله‌هایی برای تزریق به پشت دیوار تعبیه شده است.

مرحله چهارم: نگهداری سقف به علت بزرگی و عرض زیاد پیش از حفر انجام می‌شود. بـرای دسـتیابی به نگهداری قبل از کار حفاری، روش پیش‌برش مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. طول پیش تاق در امتداد تونل ۴/۵ متر با ۱ متر همپوشانی بود. ضـخامت پـیش تـاق ۳۰ سـانتیمتر و از نـوع شـاتکریت خشک با مقاومت ۴۵ مگاپاسکال استفاده شد.

مرحله پنجم: حفاری بخش بالایی و مرکزی تونل که بلافاصله پس از تکمیل پیش تاق بـه طـول ۳/۵ متر اجرا می‌گردد.

مرحله ششم: حفر قسمت بعدی در پایین تونل و تخریب دیواره‌های داخلی گالری‌هـا. در شـکل۲-۱۷ نمای کاملی از مراحل ساخت و نگهداری توسط روش آلمانی نشان داده شده است.

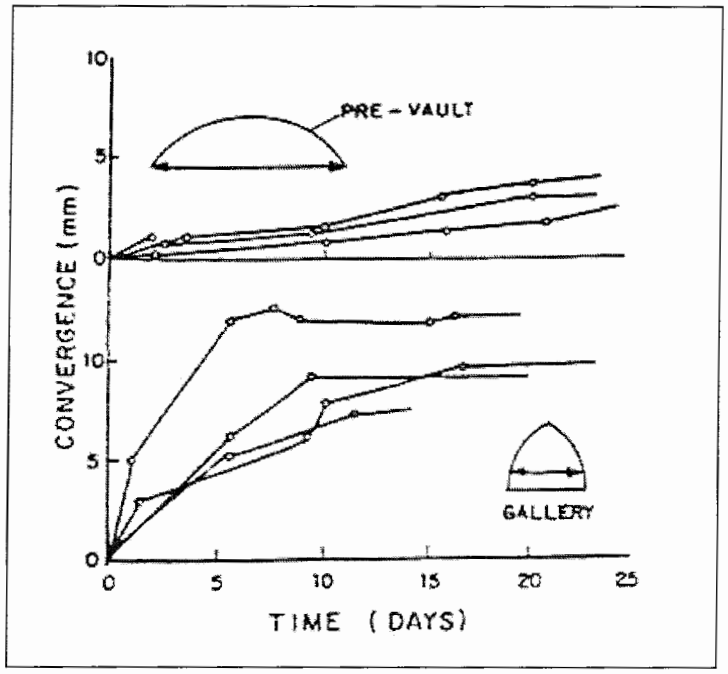


شکل ۲-۱۷- نمایی از مراحل کار و نگهداری تونل به روش آلمانی [۱۷]

مرحله هفتم: بتن‌ریزی قسمت کف بین گالری‌ها و بستن حلقه نگهداری

مرحله هشتم: بتن‌ریزی نهایی سقف که تقریباً روی دیواره‌های جانبی قرار می‌گیرد. سیستم سـاخت و ابعاد انتخاب شده برای هر المان توسط برنامه FLAC (روش تفاضل محـدود) بررسـی و تحلیـل شـد.

نتایج رفتارسنجی، همگرایی را پس از ۳۰ ساعت حدود ۱۲-۱۰ میلیمتر نشان می‌داد و در برخی موارد به ۲۰ میلیمتر نیز می‌رسید. نتایج اندازه‌گیری همگرایی در قسمت سقف و گالری‌ها در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است.



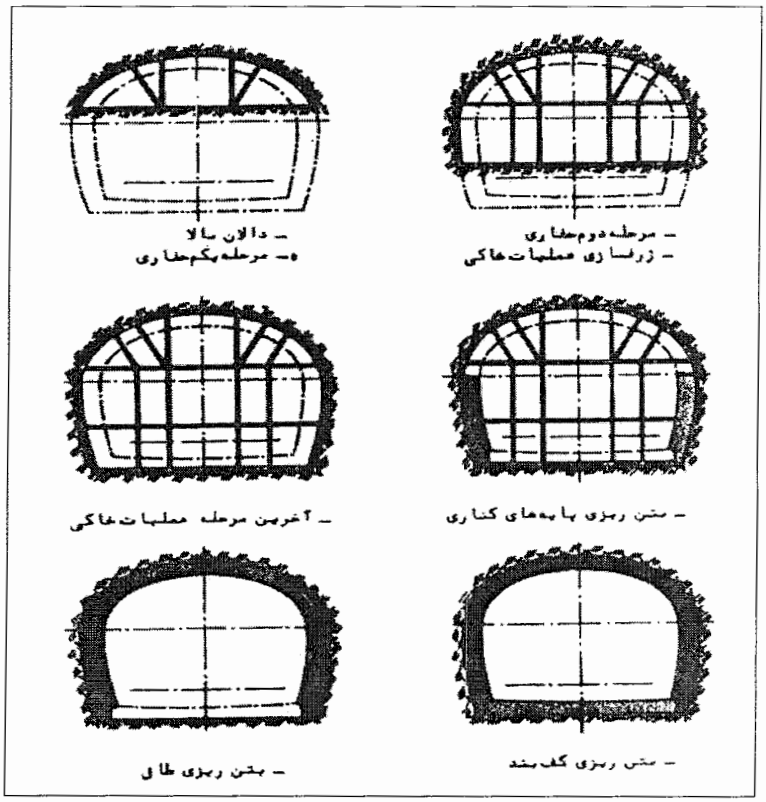
شکل ۲-۱۸- مقدار همگرایی در سقف و گالری‌ها در متروی مادرید [۱۷]

۲-۳-۸- روش انگلیسی

در روش انگلیسی مقاطعی به طول ۳ تا ۶ متر در تمام مقطع از بالا به پایین حفر می‌شوند و سپس اجرای پوشش در تمام مقطع از پایین به بالا صورت می‌گیرد. کار با حفر تونل پیشرو کف (باربری) شروع می‌شود و در هر ۶۰-۵۰ متر دویل بالارویی حفر می‌گردد تا از داخل آنها امکان حفر تونل پیشرو بالایی فراهم شود. تونل پیشرو پایینی علاوه بر تسهیل زهکشی موقت و کنترل خوب مسیر، امکان حفر تونل پیشرو بالایی را در نقاط متعدد فراهم می‌آورد. ابعاد تونل پیشرو بالایی نسبتاً کوچک است(۱/۵ متر عرض و ۱/۸ متر ارتفاع) و افقی که این تونل در آن قرار می‌گیرد بگونه‌ای است که سقف تونل پس از حفر با لبه بالایی تاج تونل پس از پوشش تقریباً منطبق باشد. پس از این که سطح مقطع تونل بطور کامل حفر شد، به فواصل ۶-۳ متر در طول مقطع حفر شده نگهداری دائم

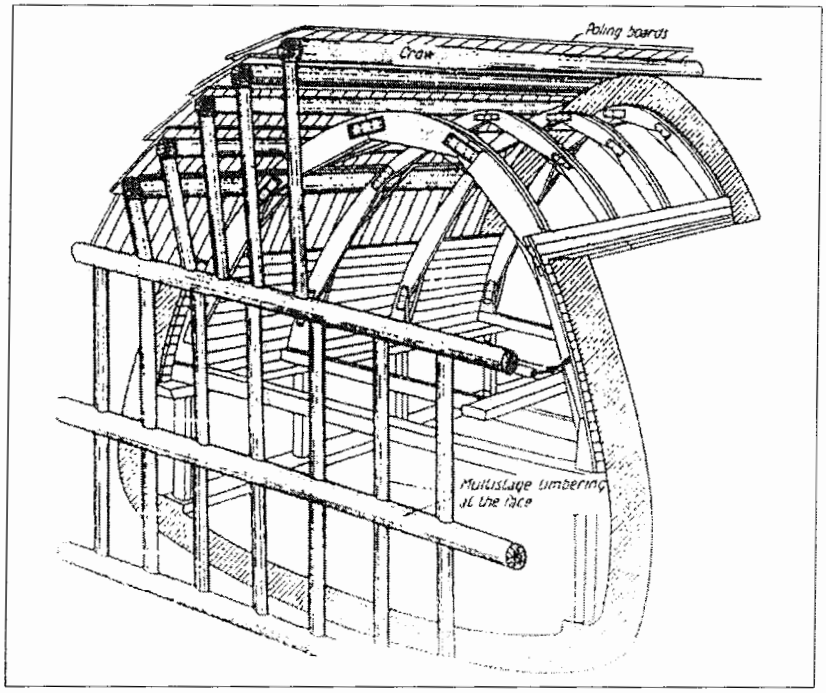
اجرا می‌گردد. این طول به خواص مکانیکی زمین بستگی دارد. هر چه زمین سست‌تر باشد، طول حلقه‌ای که باید پوشش شود کوچکتر خواهد بود [۳] .

تعریض دو طرف تونل پیشرو بالایی با عمیق‌تر کردن آن نیز همراه است و در نتیجه ستون‌ها و حایل نگهداری موقت نیز باید بطور پیوسته با ستون‌ها و حایل طویل‌تر جایگزین شوند. وقتی که کف تعریض شده قسمت بالایی به حد بالایی یا پایینی قسمت میانی رسید، کلیه پایه‌ها یا ستون‌های مایل نصب شده در تمام عرض قسمت بالایی جدید، تعویض خواهند شد. پس از تکمیل قسمت قوس تاق، دیواره‌های دو طرف تونل پیشرو کف، رو به پایین برداشته می‌شوند و در حقیقت حفر مقطع تکمیل می‌گردد. پس از تکمیل تمام مقطع، اجرای پوشش با سنگ‌چینی کف‌بند و در غیر این صورت با قالب‌بندی و بتن‌ریزی دیواره‌های جانبی شروع می‌شود. امکان سنگ‌چینی دیواره‌های جانبی نیز وجود دارد و این سنگ‌چینی تا اجرای پوشش سقف ادامه می‌یابد. در حین اجرای پوشش، چوب بست‌ها پی‌درپی برداشته شده و برای اجرای پوشش بعدی و نگهداری موقت به جلو منتقل می‌گردند. در شکل ۲-۱۹ مراحل مذکور نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۱۹- مراحل حفر و اجرای پوشش در روش انگلیسی [۳]

یک طرف حلقه پوشش ایجاد شده جدید از جلو به حلقه پوشش قبلی و از عقب به سیستم‌های نگهداری موقت وصل می‌شود. در شکل ۲-۲۰ نمایی سه‌بعدی از روش انگلیسی نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۰- تصویر سه‌بعدی روش انگلیسی از اجرای پوشش [۳]

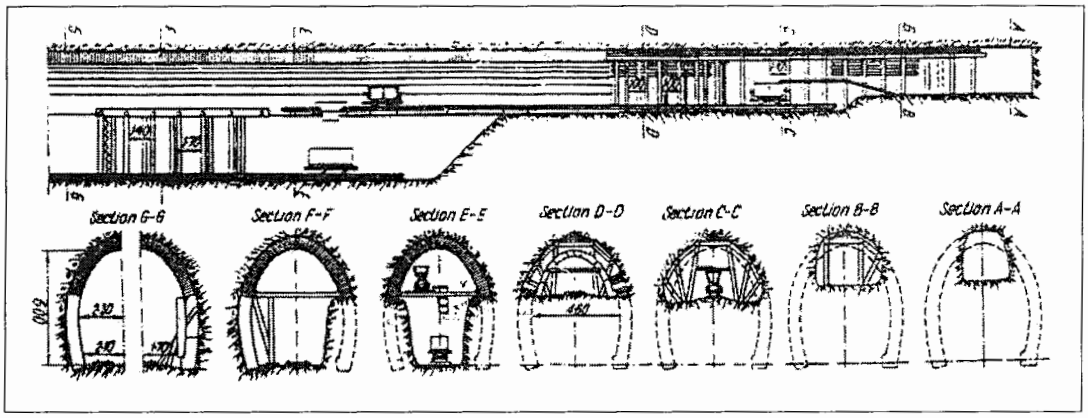
روش چوب بستکاری در روش انگلیسی علی‌رقم اینکه شرایط کاری خوب و سرعت بالایی را به دست می‌دهد، برای زمین‌های محکم‌تر مناسب‌تر است. چون در زمین‌های سست، چوب بست‌های تاج تونل قادر به مقاومت در برابر فشارهای سنگ سقف نیستند. در نتیجه برای اینکه چوب بست‌های تاج بتوانند در برابر فشارهای بالاتر مقاومت کنند، باید فاصله‌داری حایل‌های تاج و ستون‌ها را کاهش داد و یا طول مقاطع را کم کرد که این امر باعث افزایش هزینه خواهد شد.

مزیت این روش، سهولت در عملیات‌های حفر، چوب بستکاری، بارگیری، نصب و ایجاد پوشش است. این کارها از نظر زمانی تداخل ندارند. عیب این روش ضرورت حفر سطح مقطعی بزرگتر از سطح مقطع لازم پس از ایجاد پوشش است و این امر به علت در نظر گرفتن فضاهای لازم برای نصب کلاهک، بغل‌بندها، ستون‌ها و لارده‌ها می‌باشد. تخریب گهگاه چوب بست‌ها موجب تخریب دیواره و در نتیجه نشست و افزایش فشار می‌شود [۳].

۲-۳-۹- روش بلژیکی

این روش شبیه روش انگلیسی است، ولی از آن کم هزینه‌تر بوده و فقط می‌تواند در زمین‌های نسبتاً سخت بکار گرفته شود. تفاوت اصلی این روش با روش انگلیسی آن است که در روش انگلیسی قبل از شروع ایجاد پوشش، تمام سطح مقطع تونل بطور کامل حفر می‌شود، در حالی که در این روش حفر و نصب با ایجاد پوشش به تناوب صورت می‌گیرد. این روش به دو صورت اجرا می‌شود. روش اول با یک تونل پیشرو و روش دوم با دو تونل پیشرو اجرا می‌شوند [۳] .

در روش بلژیکی عملیات با حفر تونل پیشرو بالایی شروع می‌شود. تعریض دو طرف تا تکمیل حفر تاق صورت می‌گیرد. ستون‌های چوبی نگهدارنده سقف بر سنگ قسمت میانی تکیه داده می‌شوند. بتن‌ریزی یا پوشش تاق قوسی انجام می‌شود. شکل ۲-۲۱ این روش را با شروع از تونل پیشرو بالایی نشان می دهد.



شکل ۲-۲۱- روش بلژیکی با شروع از تونل پیشرو بالایی [۳]

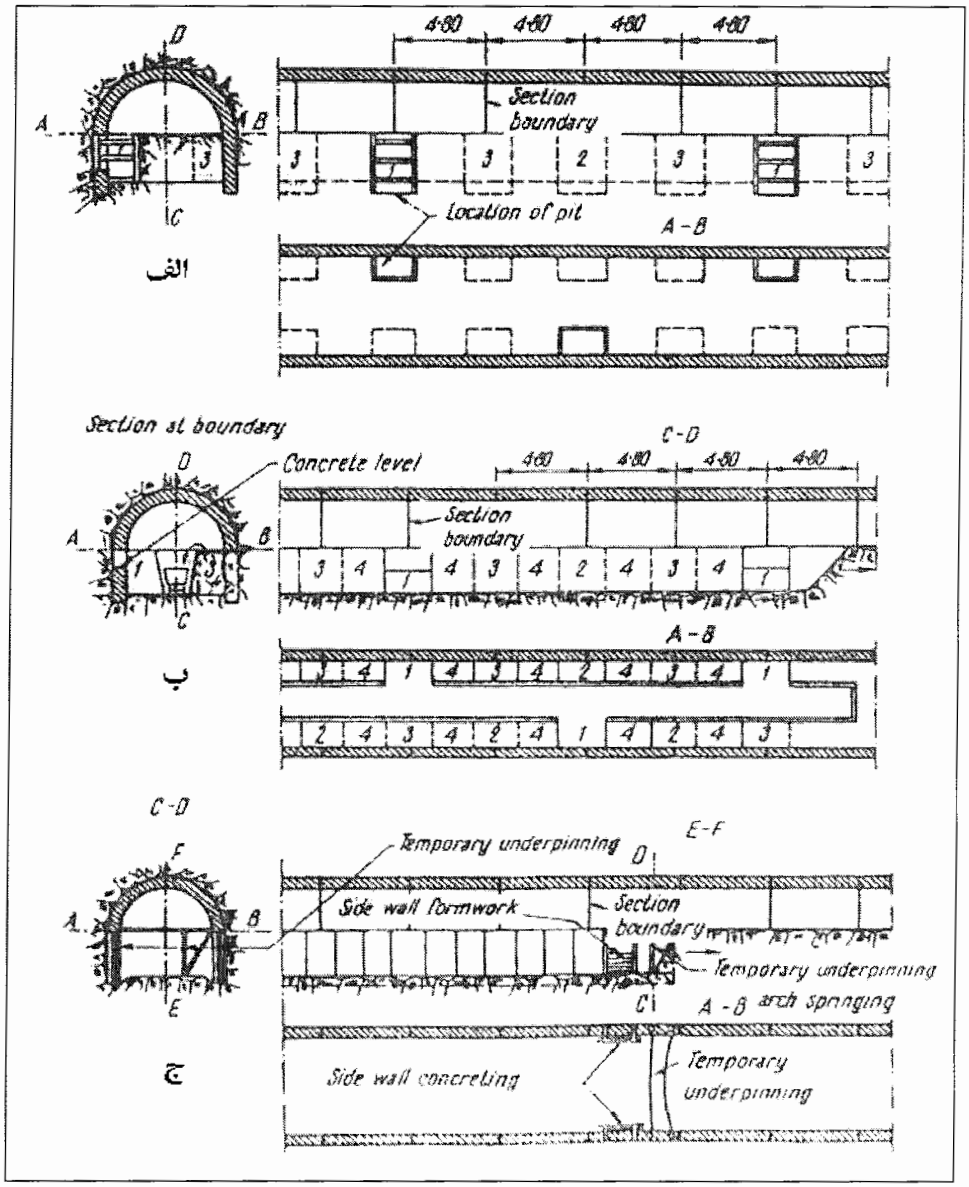
پس از تکمیل حفر و ایجاد پوشش تاق، حفر و ایجاد پوشش در بقیه قسمتهای تونل به صورت‌های مختلف ادامه می یابد:

۱- با حفر گودال‌هایی به عرض ۳-۲ متر در دیواره‌ها و تا کف تونل و با آرایشی مطابق شکل ۲-۲۲-الف، بتن‌ریزی پایه‌های کناری بطور منقطع و طبق آرایش گودالهای حفر شده انجام می‌شود. باید دقت کرد که بطور همزمان در یک مقطع دو گودال در دو طرف حفر نگردد. قسمت میانی باقیمانده را می‌توان پس از بتن‌ریزی دیواره در تمام طول تونل یا بطور همزمان با ایجاد پوشش پایه‌ها با فاصله منطقی به نحوی که از سخت شدن و صلب شدن پوشش پایه‌ها اطمینان حاصل شود، به

صورت گودکنی برداشت. بدیهی است حفر همزمان قسمت میانی با عملیات گودکنی و ایجاد پوشش در پایه‌های کناری سرعت حفر یا پیشروی را افزایش خواهد داد.

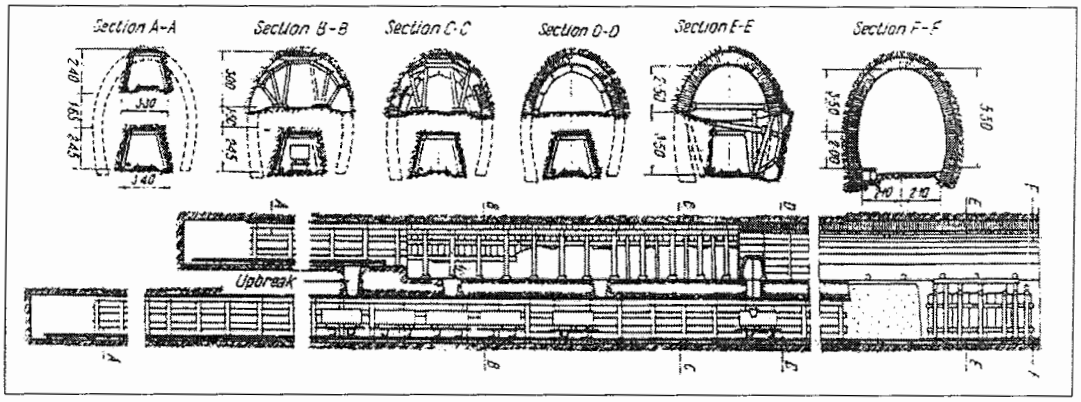
۲- برای سهولت حمل و نقل مواد و مصالح و شرایط کاری، بهتر است ترانشه‌ای مرکزی در قسمت میانی تا کف تونل حفر گردد. در این حالت دیواره‌های اطمینانی در زیر تاق و در دو طرف دیواره تونل هر کدام به عرض ۲–۱/۵ متر به منظور نگهداری تاق استخراج نشده باقی گذاشته می‌شوند. از داخل این ترانشه دستک‌هایی باریک به سمت دیواره و با آرایشی شطرنجی حفر می‌شوند. پس از حفر دستک‌ها، پایه‌های کناری از داخل آنها بتن‌ریزی می‌شوند. ریل‌گذاری در کف ترانشه صورت می‌گیرد که با این وجود عملیات بارگیری و باربری به سهولت تحقق می‌پذیرد. این روش فقط قابل استفاده در زمین‌های متوسط تا سخت است. در شکل ۲-۲۲-ب نمایی از این روش دیده می‌شود. گودکنی کار بسیار حساسی است و دستک‌های ایجاد شده نباید همزمان در کنار هم حفر شوند و در حقیقت باید در مقاطع متناوب که بین هر کدام حداقل پایه‌ای از زمین به طور موقت با عرض ۳–۲ متر باقی گذاشته شده است، ایجاد شوند. دقت خاصی در زمان بتن‌ریزی پایه‌ها در دو مقطع مجاور هم باید اعمال شود. زیرا در ایجاد تراکم بین دو قسمت بتن‌ریزی مشکلاتی بروز خواهد کرد. به همین علت برای ایجاد صلبیت لازم در پوشش، باید اقدام به تزریق دوغاب سیمان در مراحل بعدی کرد. پس از کندن دیواره و بتن‌ریزی پایه‌های کناری، در صورت لزوم عملیات کف‌کنی و نصب کف‌بند قوسی صورت می‌گیرد.

۳- دیواره‌های جانبی را می‌توان با عملیات پیوسته متناوب احداث کرد. برای این کار جبهه‌کار پیشروی در دیواره‌ها و قسمت میانی به طور پیوسته در طول ۴-۳ متر جلو برده می‌شوند. مراحل کار به صورت شکل ۲-۲۲-ج می‌باشد. در این مورد، نگهداری موقت کافی زیر تاق‌ها در دیواره‌ها از مهمترین کارهایی است که باید انجام شود و برای این کار معمولاً از تیرآهن استفاده می‌شود. گذشته از نصب تیرآهن‌ها به طور قائم، تیرآهن‌هایی نیز به طور حائل از زیرتاق بتن‌ریزی شده تا کف‌بند به منظور جلوگیری از جابجایی دیواره‌های جانبی نصب می‌شوند. این روش امکان نصب کف‌بند یا بتن‌ریزی سریع کف را بلافاصله بعد از احداث دیواره‌ها فراهم می‌سازد. در صورتی که ارتفاع دیواره‌های جانبی بیش از سه متر باشد، عملیات گودکنی بایستی در مراحل مختلف صورت گیرد.



شکل ۲-۲۲- حالت‌های مختلف احداث دیواره‌های جانبی در روش بلژیکی [۳]

روش اصلاح شده بلژیکی از دو تونل پیشرو بالایی و کف استفاده می‌کند که جبهه‌کار تونل پیشرو کف از تونل بالایی جلوتر است. فاصله دو جبهه‌کار پیشروی این دو تونل از یکدیگر فقط ۳۰-۲۵ متر است. این دو تونل توسط دویل‌هایی که به فواصل مشخص از هم حفر می‌شوند به یکدیگر ارتباط دارند. وجود تونل پایینی مشکلات حمل ونقل، بارگیری و آبکشی را حل می‌کند. در عین حال عملیات حفر و احداث دیواره‌های تونل می‌تواند بدون هیچگونه تداخلی با عملیات حمل، بارگیری، باربری و آبکشی به طور همزمان انجام شود. مراحل انجام کار در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۲۳- جزئیات روش بلژیکی اصلاح شده یا دارای دو تونل [۳]

پس از حفر و تعریض قسمت بالایی و نصب سیستم‌های نگهداری موقت، قالب‌بندی و بتن‌ریزی تاق انجام می‌گیرد. سپس عملیات با عمیق کردن ادامه می‌یابد و تونل پایینی می‌تواند در برداشت دیواره به نحو مفیدی مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۴- روشهای مرسوم حفاری در زمین‌های نرم

۲-۴-۱- تکنیک‌های Pre-Lining

استفاده از این روش‌ها مشابه با تکنیک Fore Poling بوده و در سال‌های اخیر با تکنیک‌های مختلف گسترش بیشتری یافته است. وجود تقویت بیشتر در جبهه‌کار تونل باعث فراهم آمدن تنوع ساختاری در حمایت از جبهه‌کار قبل از حفاری می‌گردد. این نگهداری‌ها می‌توانند توسط بولت‌ها به صورت یک چتر محیطی، یا یک ستون دوغاب و یا یک تاق بتن‌ریزی شده تشکیل شوند. بخش نهایی معمولاً با روش Pre-cutting مرتبط می‌باشد. این روش اولین بار در زمان ساخت متروی پاریس درسنگ‌های ضعیف و سپس مواد نرم‌تر ارائه گردید. زمانیکه این روش در زمین نرم مورد استفاده قرار گرفت، اجرا در سه مرحله انجام شد که مراحل کار در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده‌اند.

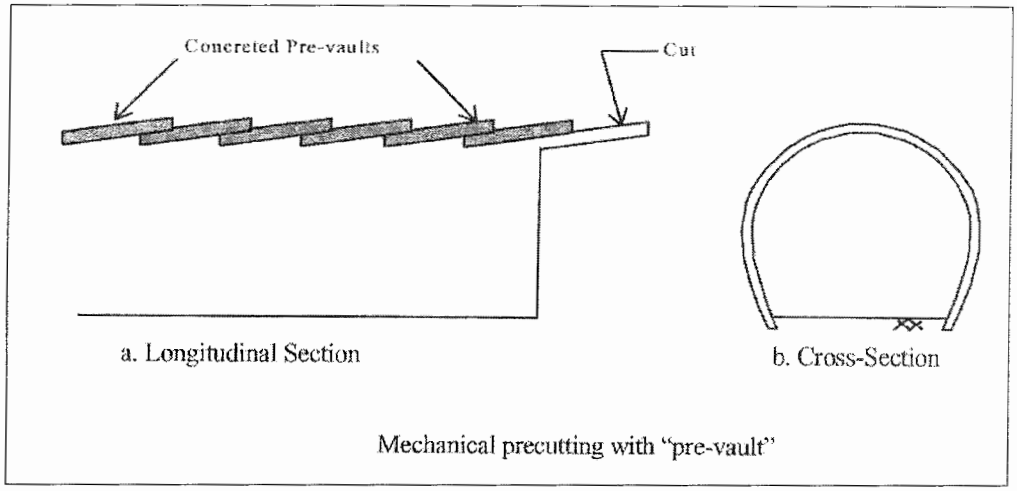
۱- حفاری در قوس و شکل‌گیری بالای جبهه‌کار و استفاده از ماشین‌های بزرگ حفاری

۲- بتن‌ریزی محل برش بمنظور فرآهم نمودن قوس، جلوتر از جبهه‌کار

۳- حفاری زیر قوس.

در حفر تونل با مقطع بزرگ لازم است از بولت‌هایی جهت کمک به پایداری مقطع استفاده شود. پیشنهاد می‌شود از بولت‌هایی با جنس فایبرگلاس که قابلیت تحمل تنش کششی بالایی را دارند

استفاده شود. این روش که از سال ۱۹۸۰ به بعد در ایتالیا استفاده شد، ایجاد تونل‌هایی با مقطع بزرگ (بیش از ۱۰۰متر مربع) را امکان‌پذیر کرد، بدون اینکه لازم باشد مقطع را تجزیه و تقسیم کرد و به صررت جداگانه حفاری نمود [۱۵].

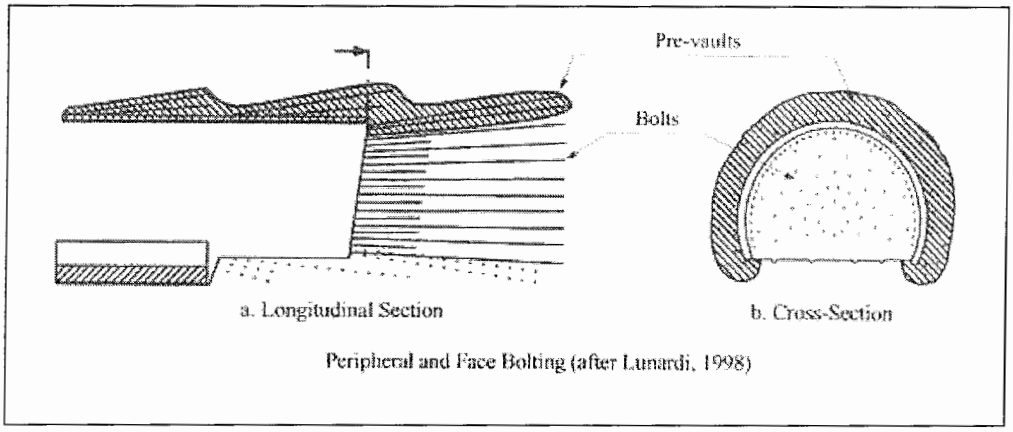


شکل ۲-۲۴- پیش‌برش مکانیکی با پیش تاق [۱۵]

این روش برای هر دو مرحله زمان ساخت و کنترل حرکت زمین بسیار مقرون به صرفه است. در فرانسه از زمانی که حفر تونل La galaure با مقطع ۱۵۰ متر مربع با موفقیت حفر گردید، برای حفر تونل با مقطع بزرگ تمام سطح مقطع تونل را با ترکیبی از بولت‌های فایبر گلاس و نصب قاب نگهداری می‌کنند. برای نخستین بار در یک پروژه تونل حمل ونقل در ایتالیا قبل از لاینینگ و بولت‌گذاری سطح مقطع، یک تاق قوسی شکل(چتری) در تونل ایجاد کردند. در شکل ۲-۲۵ طرح اولیه تکنیک چتری نشان داده شده است. این شکل مربوط به تونل san vitale می‌باشد که در قسمتی از راه آهن Caserta – Foggia در ایتالیا اجرا شده است. این تونل ۴/۲ کیلومتر طول دارد و در عمق ۱۵۰ متری و در زمین از جنس خاک، شن، رس سیلتی، رس، مارن و آهک حفر شده است. سیستم نگهداری در این تونل شامل نصب بولت فایبر گلاس به طول ۱۸ متر در مقطع و غیر قابل انعطاف کردن محیط تحت فشار بالا به وسیله سیستم چتری و زهکشی زمین از سطح مقطع می‌باشد.

اجرای تکنیک قوسی معمولاً با به کار بردن ابزار خاصی برای کنترل کیفیت طراحی بولت همراه است. بکارگیری این ابزار خاص شامل استقرار علامت‌گذارها، میله‌های همگرائی، نشانگر فشار و عکس‌العمل زمین در المان‌هایی در سرتاسر تونل می‌باشد. با افزایش حفاری با نصب کشش سنج‌ها در

جبهه‌کار، تغییر شکل زمین و مقطع بهتر پیش‌بینی می‌شود. بنابراین میزان تنظیم و تعدیل بولت‌گذاری بدست می‌آید [۱۵] .



شکل ۲-۲۵- بولت‌گذاری جبهه‌کار و محیط تونل [۱۵]

فصل سوم

تونل سازی با استفاده از سپر

۳-۱- مقدمه

روش‌های تونل‌سازی سپری به واسطه موفقیتی که که این روش‌ها در حفر تونل در محیط‌های آبدار و تونل‌های زیرآبی بدست آوردند، رواج یافتند. حفر تونل در زمین‌های نرم با استفاده از سپر به عنوان روشی جهت دستیابی به ایمنی مناسب در جریان حفر و پوشش صورت گرفت. تکنیک استفاده از سپر عقیده محدودی بود که اولین بار در نیمه سال ۱۸۸۰ در ساخت گالری پیش پا افتاده‌ای زیر رودخانه تایمز در انگلیس مورد استفاده قرار گرفت. این اولین کاربرد سپر در تونل‌سازی در شرایط زیرآبی بدون استفاده از هوای فشرده بود. دستاورد مهم دیگر در تونل‌سازی سپری، طراحی اولین سپر مدور در سال ۱۸۹۶ بود که با موفقیت در جریان حفر دومین تونل در زیر رودخانه تایمز بکار گرفته شد. این تونل نیز بدون هوای فشرده حفر شد. این سپر مبنای ساخت سپرهای بعدی شد و مشابه سپرهایی است که امروزه بکار گرفته می‌شوند. پیشرفت مهم دیگر در امر احداث تونل‌های زیرآبی، کاربرد پوشش‌های چدنی بود که در اتصال با سپر نصب می‌شدند. استفاده از هوای فشرده گام بعدی در احداث موفقیت‌آمیز تونل‌هایی بود که با مشکلات جریان آب در موقعیت‌های زیرآبی مواجه می‌شدند. سپرها در دستیابی به موفقیت در ساخت شاهراه‌ها و تونل‌های مترو در شهرهایی چون لندن و نیویورک به میزان زیادی مؤثر بودند [۱۵].

۳-۲- شرایط زمین‌های نرم در ارتباط با تونل‌سازی سپری

شرایط زمین‌های نرمی که تونل‌سازی همراه با سپر غالباً در آنها بکار برده می‌شود، به طور مختصر در جدول ۳-۱ آورده شده است.

جدول۳-۱- شرایط زمین‌های نرم در ارتباط با تونلسازی سپری [۱]

رده‌بندی اصلی خاک	توضیحات
خاک‌های ضعیف غیر چسبنده	۱- خاک‌های فاقد چسبندگی مشکلات عمده‌ای را از جنبه ایمنی و راندمان حفر برای روش‌های معمولی تونلسازی در زمین‌های نرم ایجاد می‌کنند. ۲- کاربرد سپر در شرایط هوای اتمسفر یک امر معمول است. ۳- سپرها امکان کنترل بهتری را بر روی فضاهایی که بعد از حفر تونل در بالای آن ایجاد می‌شوند، فراهم می‌کنند. ۴- این نوع خاک‌ها، ماسه‌های روان، شن‌های سست و لای را شامل می‌شوند.
خاک‌های ضعیف خمیری (پلاستیک)	۱- استفاده از سپر، امکان اعمال بهترین کنترل را بر روی خاک‌هایی که حاوی آب زیاد هستند و بسهولت در موقع کار سیلان پیدا می‌کنند، فراهم می‌آورد. ۲- کاربرد سپر در شرایط هوای اتمسفر یک امر عادی است، هر چند در موارد خاصی نیز از هوای فشرده استفاده می‌شود. ۳- از جمله این نوع خاک‌ها می‌توان رس‌های خمیری نرم را نام برد.
خاک‌های واقع در زیر سطح ایستابی	۱- خاک‌های واقع در زیر سطح ایستابی و خاک‌هایی که تحت تأثیر فشار آب قرار دارند، موجب بروز مشکلات خاصی می‌شوند. تونلسازی سپری روشی پیشرفته برای حفر موفقیت‌آمیز تحت چنین شرایطی است. ۲- حفر تونل در زیر سطح ایستایی معمولاً مستلزم کاربرد سپر است. مگر اینکه زمین با تزریق دوغاب مناسب صلبیب کافی یافته باشد، یا سطح آب پایین برده شده باشد. ۳- برای احداث تونل در زیر آب‌های آزاد، تونلسازی سپری با هوای فشرده امری معمول است، با این وجود استثنائی وجود دارد و آن موقعی است که بین تونل و آب‌های آزاد (سطح زمین) سنگ صلب با ضخامت کافی وجود داشته باشد.

۳-۳- فرآیند انتخاب سپر مناسب

عوامل بسیاری در انتخاب سپر مناسب تأثیرگذار می‌باشند. ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختگاه از عمده‌ترین این عوامل می‌باشد. طول تونل، سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شده برای طرح، تکنولوژی

موجود و قابل دسترس، میزان حقوق و دستمزد کارگران، مهارت پرسنل و غیره از عوامل تأثیرگذار بر انتخاب نوع سپر می‌باشند. در این قسمت روند انتخاب سپر مناسب بطور خلاصه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۳-۱- اکتشاف ساختگاه

الف- شناسایی منطقه: در اولین مرحله با تهیه نقشه‌های توپوگرافی و کوچک مقیاس زمین‌شناسی از منطقه و همچنین مشخص کردن عوارض مختلف مانند رودها و راه‌ها، منطقه مورد شناسایی قرار می‌گیرد. سپس با در نظر گرفتن محدودیت‌های کاری همانند اختلاف ارتفاع ورودی و خروجی و شیب مناسب تونل، خط پروژه تعیین می‌گردد. در این مرحله مسیرهای مختلف مورد بررسی و اولویت‌بندی قرار گرفته و بهترین مسیر برای انجام مطالعات مرحله بعد مشخص می‌شود. گام بعدی انجام فعالیت‌های ژئوتکنیکی در منطقه است که مطالعات صحرایی بمنظور مشخص نمودن جنس عوارض و خصوصیات زمین انجام می‌شود. در این مرحله با توجه به متراژ تونل و همچنین امکان وجود زمین‌های مشکل آفرین، امکان استفاده از سپر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ب- نمونه‌برداری و گمانه‌زنی: در این مرحله، ابتدا برداشت‌های سطحی انجام می‌گیرد و سپس در مکان‌های مشخص و مشکوک تا عمق حفر تونل گمانه زده می‌شود و سعی بر این است که زمین تا عمق قرار تونل شناسایی گردد. با استفاده از این گمانه‌ها وجود، عمق و میزان آب و همچنین شرایط نفوذپذیری منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ج- رسم نقشه‌های زمین‌شناسی و تهیه گزارش: عمق گمانه‌ها، محل و نتایج حاصل از آنها (جنس سنگ‌های مختلف در هر مغزه و طول آنها) با دقت در پروفیل طولی که از مسیر تهیه شده است، منظور می‌گردد. همچنین در این نقشه‌ها اطلاعات زمین‌شناسی مؤثر در انتخاب نوع سپر آورده می‌شود.

۳-۳-۲- انجام آزمون و تهیه داده‌های مربوطه

از مهترین آزمون‌های مؤثر در انتخاب نوع سپر، منحنی دانه‌بندی خاک، حد روانی و حد خمیری خاک، سطح ایستابی آب زیرزمینی در هر قسمت، مقاومت تک محوری و برشی سنگ و میزان سایش ذرات خاک و سنگ می‌باشد. این آزمون‌ها در جدول ۳-۲ نشان داده شده‌اند.

۳-۳-۳- توصیف ویژگی‌های سپر

بمنظور انتخاب سپر مناسب و همچنین تعیین کارایی اجرای آن در شرایط زمین‌شناسی، می‌بایست امکانات، تجهیزات و نیازهایی که باید سپر بمنظور اجرای صحیح طرح تأمین نماید، دقیقاً مشخص شود. تعیین سیستم نگهداری مورد نیاز برای تونل، فضایی که در بالای تونل بصورت آزاد وجود دارد و بطور کلی ترسیم یک شمای عمومی از طرح در این زمینه ضروری می‌باشد. در جدول ۳-۳ به مهمترین جنبه‌هایی که باید مورد توجه قرار گیرند، پرداخته شده است.

۳-۳-۴- انتخاب سیستم ماشین سپر

پس از انجام مطالعات صحرایی و توصیف شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه، با توجه به مسایل موجود در تونل‌سازی همراه با سپر می‌توان نسبت به انتخاب نوع سپر، سیستم حفر، سیستم نگهداری و حتی نوع مواد مورد نیاز برای تزریق در پشت نگهداری اقدام نمود.

جدول ۳-۲- انواع آزمون‌های مؤثر در انتخاب سپر و کاربرد نتایج آنها [۱۶]

آزمایشهای سنگ	کاربرد
برداشت‌های ژئوفیزیکی	شناسایی اولیه زمین و تعیین مراحل بعدی اکتشاف
تعیین ضریب نفوذپذیری سنگ (آزمون‌های لوژان و پمپاژ)	محاسبه میزان نفوذ آب به داخل تونل و مهار آن در صورت لزوم توسط حفر زهکش و...
آزمون بار نقطه‌ای و یا تک‌محوری آزمون مقاومت فشاری سه‌محوری	محاسبه سیستم نگهداری، نوع و اندازه ابزار برنده و محاسبه نیروهای لازم جهت خرد کردن سنگ و پیشروی دستگاه
آزمون برش مستقیم	تعیین ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ
آزمون ضربه	بدست آوردن مقاومت فشاری سنگ، محاسبه و انتخاب پارامترهای سیستم‌های حفاری ضربه‌ای
آزمایش ساینده‌گی	تعیین نوع ابزار برنده و طول عمر آنها
آزمایش‌های خاک	**کاربرد**
آزمون نفوذ استاندارد (SPT)	محاسبه نشست زمین، طراحی سیستم لوله‌گذاری، تخمین مقاومت فشاری خاک، محاسبه مقاومت خاک در برابر نفوذ لبه سپر و ابزار برنده
تعیین منحنی دانه‌بندی خاک	انتخاب دستگاه، تخمین ضریب تراوایی، حد خمیری و ...
تعیین سطح ایستابی و ضریب تراوایی	میزان نشت آب ومهار آن، طراحی نیروهای وارد بر دستگاه و انتخاب دستگاه
شاخص خمیری و حد روانی (تعیین حدود اتربرگ)	محاسبه پمپ دوغاب، طراحی سیستم نگهداری در سپر و استفاده از نقاله مارپیچی و انتخاب دستگاه
آزمایش برش مستقیم (SBT)	بدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی خاک برای طراحی جک‌ها و قسمت‌های مختلف دستگاه
تعیین رطوبت و وزن حجمی	محاسبه نیروهای زمین، بدست آوردن درصد اشباع و رسیدن به حد خمیری، محاسبه سیستم نگهداری و حمل و نقل
آزمایش مقاومت تک‌محوری و سه‌محوری	محاسبه پی و تأسیساتی که بر تونل بار وارد می‌کنند

جدول ۳-۳- نیازمندی‌های تکنیکی روش تونل‌سازی سپری [۱۶]

<table>
<tr><td colspan="2">۱- نیازمندی‌هایی که بمنظور اجرای قوانین و استانداردهای موجود باید رعایت شوند.
۲- نیازمندی‌هایی که به دلیل مسایل زیست محیطی باید رعایت شوند.</td></tr>
<tr><td>- ابعاد چاه دسترسی، ابعاد محدوده ساختگاه
- میزان مواد مجاز به استفاده برای بهبود زمین
- میزان نشت مجاز سطح در طول عملیات</td><td>- تعیین محدوده مجاز تغییر سطح آب
- امکان جداسازی روغن، گریس و بنتونیت در محیط
- تعیین امکان انتشار آلودگی
- تعیین رده مواد باطله از نظر آلودگی</td></tr>
<tr><td colspan="2">۳- نیازمندی‌هایی که در طول عملیات باید مورد توجه قرار گیرند.</td></tr>
<tr><td colspan="2">- نگهداری مطمئن جبهه‌کار با توجه به شرایط زمین
- ملاحظات ایمنی که می‌بایست در حین عملیات در نظر گرفته شوند
- تزریق
- کنترل دقیقی که بمنظور هدایت سپر مورد نیاز است
- تجهیزات اضطراری مورد نیاز</td></tr>
<tr><td>۴- نیازمندی‌هایی که در مورد آستربندی تونل باید مورد توجه قرار گیرند.</td><td>۵- نیازمندی‌هایی که بمنظورحفاظت افراد باید مورد توجه قرار گیرند.</td></tr>
<tr><td>ابعاد و شکل تجهیزات نگهداری، دوام مواد بکار گرفته شده در نگهداری، سیستم عایق سازی و آب بندی آستر</td><td>تحلیل وقوع حوادث پیش بینی نشده، سیستم‌های اضطراری بمنظور محافظت در برابر آتش، ورود آب، ریزش زمین</td></tr>
</table>

۳-۴- انواع ماشین‌آلات حفاری تونل

دستگاه‌های حفاری تونل بر اساس معیارهای مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند[۲]:

۳-۴-۱- تقسیم‌بندی بر اساس پوشش جبهه‌کار توسط دستگاه حفار

تقسیم‌بندی ماشین‌آلات حفاری تونل بر اساس پوشش جبهه‌کار به شرح ذیل است:

۳-۴-۱-۱- دستگاه‌های حفاری تمام مقطع[1]

ابزار برنده در این دستگاه‌ها بر روی مجموعه‌ای به نام کله حفار[2] که عمدتاً دایره‌ای شکل است قرار می‌گیرند و بر اثر چرخش کله حفار به دور محور خود، ابزار برنده در دوایر متحدالمرکزی بر روی زمین چرخانده شده و با اعمال نیروی فشاری[3] توسط دستگاه، باعث حفر و کنده شدن زمین مقابل کله حفار می‌شود. ابزار برنده برای زمین‌های سخت و سنگی عمدتاً از نوع Disc Cutter و برای زمین‌های نرم از انواع Drag & Knife Bit می‌باشد. این دستگاه‌ها انواع مختلفی داشته و عمدتاً با نام TBM[4] شناخته می‌شوند.

۳-۴-۱-۲- ماشین‌آلات حفاری جزء مقطع[5]

ابزار برنده این دستگاه‌ها در مجموعه‌ای متمرکز هستند که قسمت نسبتاً کوچکی از مقطع تونل را در بر می‌گیرد و حرکت این مجموعه ابزار برنده که بر روی کله حفار قرار دارد کل مقطع تونل را پوشش می‌دهد. عمده‌ترین ماشین حفاری جزء مقطع دستگاه Road Header است و ماشین‌های حفاری تونل‌های معدنی از قبیل Mobile Minerها و Disk Boom Minerها را می‌توان جزء این ماشین‌آلات محسوب کرد.

۳-۴-۲- تقسیم‌بندی بر مبنای وضعیت زمین

تقسیم‌بندی ماشین‌آلات حفاری تونل بر اساس وضعیت زمین به شرح ذیل است:

۳-۴-۲-۱-دستگاه‌های حفاری مخصوص زمین‌های نرم

مطمئن‌ترین روش حفاری در زمین‌های نرم استفاده از انواع سپرها[6] می‌باشد. سپر جسمی است فولادی و معمولاً به شکل استوانه با مقطع دایره‌ای که از ریزش مواد به داخل تونل جلوگیری کرده و توسط ماشین حفار در داخل زمین به جلو رانده می‌شود. انواع کلی سپرها عبارتند از:

الف) سپرهای باز[7] که حفاری در این گونه سپرها می‌تواند بصورت دستی یا مکانیکی انجام شود.

---

[1] - Full Face Machine
[2] - Cutter Head
[3] - Thrust
[4] - Tunnel Boring Machine
[5] - Partial Face Machine
[6] - Shield
[7] - Open Face Shield

ب) سپرهای کور[۱]

ج) سپرهای تعادل فشار زمین[۲] یا EPBS

د) سپرهای دوغابی[۳]

سپرهای تعادل فشار زمین و دوغابی از نوع تمام مقطع هستند و سپرهای باز و سپـرهای کور می‌توانند جزء سپرهای تمام مقطع یا جزء مقطع باشند.

۳-۴-۲-۲- دستگاه‌های حفاری مخصوص زمین‌های سخت

حفاری در زمین‌های سخت هم با ماشین‌آلات جزء مقطع و هم با دستگاه‌های تمام مقطع متداول است. حفاری در سنگ‌های سخت نیرو و توان بسیار بالایی را می‌طلبد.

۳-۵- اصول کار سپرها

تونل‌سازی سپری عبارت است از بکارگیری دستگاهی که حفاظت کارگاه را در برابر ریزش‌های مختلف تأمین کند و سرعت بیشتری در پیشروی حاصل نماید. یک سپر استوانه‌ای متشکل از یک استوانه بزرگ می‌باشد که بدنه آن از فولاد ضخیم ساخته شده است. از داخل این استوانه حفاری تونل انجام می‌شود. سپرهای استوانه‌ای انواع گوناگونی دارند؛ برخی تنها ایمنی کارگران را تأمین می‌نمایند و برخی دیگر بازوی حفاری دارند. اساس کار این دستگاه‌ها، حفاری تونل در تمام مقطع و غالباً به شکل دایره است.

سپر چند وظیفه اصلی را در تونل‌سازی بر عهده دارد؛ خاک‌های بالای مقطع را نگاه می‌دارد تا خاکبرداری در جبهه‌کار در پناه آن انجام شود؛ همچنین نصب قطعات پوشش تونل در انتهای آن اجرا می‌گردد. برای پیشرفت به سمت جلو، باید اتکایی برای سپر وجود داشته باشد. بدلیل سستی در زمین‌های نرم، بر خلاف زمین‌های سنگی که که جک‌ها به زمین تکیه می‌کنند، نمی‌توان از تکیه‌گاهی زمین استفاده کرد. لذا پیشروی دستگاه حفاری و سپر دور آن با تکیه بر پوشش اجرا شده توسط جک‌های افقی صورت می‌گیرد. به این دلیل پوشش از حلقه‌هایی با عرض ۰/۵ تا ۱/۵ متر متشکل از بتن مسلح پیش‌ساخته، چدن یا فولاد ساخته می‌شود[۶].

---

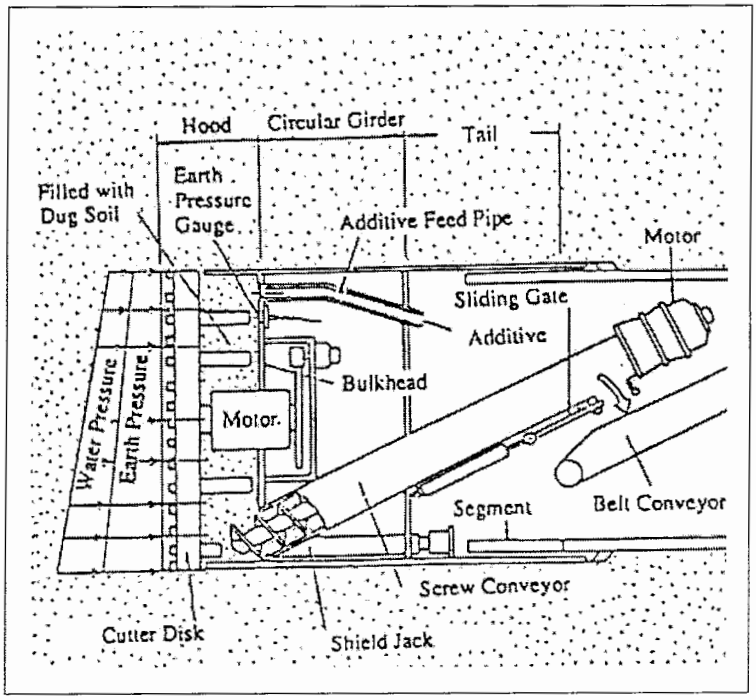
[1] - Blind Shield
[2] - Earth Pressure Balance Shield
[3] - Slurry Shield

۳-۵-۱- قسمت‌های مختلف یک سپر

لبه سپر: لبه سپر قوی‌ترین بخش یک سپر می‌باشد که کار آن تأمین پیشروی صحیح مجموعه در زمین بدون تغییر شکل استوانه می‌باشد. دستگاه حفار تمام مقطع یا جزء مقطع در زیر این بخش قرار می‌گیرد. این قسمت از سپر غالباً با یک ماده مقاوم در برابر سایش پوشش داده می‌شود.

بدنه سپر: این بخش از سپر یک پوسته استوانه‌ای شکل فولادی است که در داخل آن تجهیزاتی همانند جک‌ها و پمپ‌های هیدرولیکی برای هل دادن سپر به سمت جلو قرار دارند.

دنباله سپر: قسمت دنباله در پشت بدنه سپر قرار می‌گیرد و فضای لازم را برای نصب سگمنت‌ها در مرحله پوشش تونل فراهم می‌نماید. عرض دنباله به طور معمول ۱/۵ برابر عرض هر یک از سگمنت‌ها می‌باشد. در شکل ۳-۱ قسمت‌های مختلف یک سپر نشان داده شده است[۱۱].



شکل ۳-۱- قسمت‌های مختلف یک سپر [۱۱]

۳-۵-۲- دوره متعارف کار سپر

دوره متعارف کار یک سپر طبق مراحل ذیل است:

- حفاری تونل در طولی متناسب با یک حلقه پوشش

- پیش بردن دستگاه به کمک جک‌هایی که به آخرین حلقه پوشش تکیه می‌دهند.
- عقب کشیدن جک‌ها و جایگذاری یک حلقه تازه در فضایی که با پیشرفت سپر استوانه‌ای آزاد شده است.

۳-۶- نشست سطح زمین و نگهداری فضای حفاری شده

یک سپر همانند یک وسیله متحرک مطمئن، قبل از نصب تجهیزات نگهداری به فضای حفاری شده ایمنی می‌بخشد. سپر می‌بایست در برابر فشار خاک اطراف مقاومت کرده و در مواقع ضروری مانع ورود آب شود. به غیر از این موارد، سپر باید پارامتر مهم دیگری نیز داشته باشد و آن جلوگیری از ایجاد نشست‌های نامطلوب در اطراف فضای حفاری شده می‌باشد؛ مخصوصاً در محیط‌های شهری که کنترل نشست از اهمیت خاصی برخوردار است. دستیابی به کمترین میزان نشست در حین پیشروی تونل نیازمند تدابیر ویژه‌ای است. نصب سیستم نگهداری بلافاصله بعد از حفر فضا پیش‌نیازی برای ایجاد حداقل نشست، کمترین شل‌شدگی و جابجایی لایه‌های زمین می‌باشد. نگهداری جبهه‌کار، محدوده سپر و پشت سپر ضروری است. در طول پیشروی تونل عوامل ذیل در میزان نشست سطح مؤثر هستند[۲۲]:

- پایین رفتن سطح ایستابی و در نتیجه تغییر وزن حجمی خاک
- تغییرات تنش‌ها بدلیل جابجایی خاک در جلوی تونل
- جریان یافتن خاک درون جبهه‌کار بدلیل نگهداری ناکافی جبهه‌کار
- تغییرات ساختاری به سبب لرزش‌ها
- نشست در اثر تزریق ناکافی در پشت سپر
- کاهش قطر تونل در اثر افزایش نیروهای وارده بر پوسته نگهداری

۳-۷- نگهداری و پایدارسازی جبهه‌کار

در زمین‌های سست نگهداری جبهه‌کار ضروری است؛ چون پس از حفر تونل و از بین رفتن تعادل، خاک و آب‌های زیرزمینی وارد تونل خواهند شد. این امر جدای ایجاد مشکلاتی برای حفاری، باعث نشست سطح زمین و تخریب تأسیسات سطحی خواهد شد.

۳-۷-۱- فشار جبهه‌کار

فشار وارد به جبهه‌کار از طرف زمین در دو حالت کلی ذیل قابل بررسی است [۹]:

الف- وقتی تونل زیر سطح ایستابی قرار دارد

فشار وارد بر جبهه‌کار در حالتیکه تونل زیر سطح ایستابی قرار دارد، شامل فشار هیدرواستاتیک آب و فشار اکتیو خاک می‌باشد که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، فشار اکتیو خاک که حاصلضرب وزن مخصوص در ارتفاع و در ضریب k_0 می‌باشد با فشار هیدرواستاتیک آب (حاصلضرب وزن مخصوص آب در ارتفاع سطح ایستابی تا نقطه مورد نظر) جمع شده و وقتی تونل حفر می‌شود، تعادل طبیعی زمین از بین رفته و این نیروها به جبهه‌کار وارد می‌شوند.

ب- حالتی که تونل زیر سطح ایستابی قرار ندارد

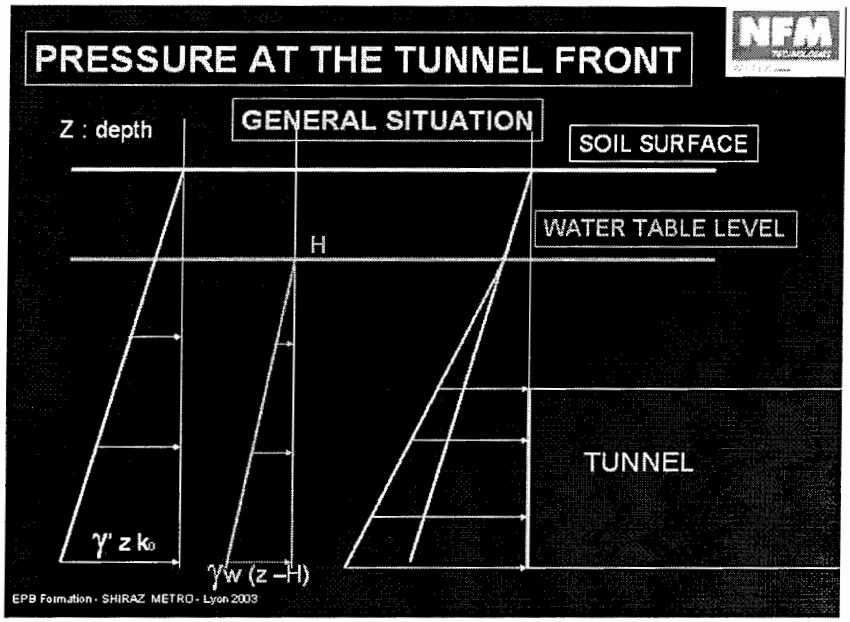
در این حالت تنها فشار اکتیو خاک است که پس از حفر تونل به جبهه‌کار وارد می‌شود. این حالت در شکل۳-۲ نشان داده شده است.

۳-۷-۲- مقابله با فشار خاک و پایدارسازی جبهه‌کار

مقابله با فشار خاک در انواع سپرهای هوای فشرده[1] به کمک فشار هوا، سپرهای دوغابی به کمک فشار آب یا دوغاب و سپرهای تعادل فشار زمین توسط فشار خاک حفاری شده در اتاقک حفاری انجام می‌شود. در این سپرها در قسمت جلوی سپر و پشت کله حفار محفظه‌ای وجود دارد که آن را اتاقک فشار[2] و یا اتاقک حفاری می‌نامند. این قسمت از درون سپر بسته است و ارتباط با آن از طریق دریچه‌هایی مخصوص صورت می‌گیرد. در این سپرها با اعمال فشار در اتاقک حفاری با روش‌های فوق‌الذکر با فشار خاک در جبهه‌کار مقابله می‌شود. در حالتی که خاک ناتراوا باشد، اعمال فشار به راحتی انجام می‌شود. ولی در زمین‌هایی که تراوایی دارند، هوا یا سیالی که در اتاقک حفاری تحت فشار می‌باشد به داخل زمین نفوذ کرده و وارد زمین می‌شود. دراین حالت ایجاد یک لایه ناتراوا در

1- Compressed Air Shield
2- Chamber

روی جبهه‌کار ضروری است که معمولاً این کار بوسیله ورود بنتونیت و تشکیل یک لایه کیک[1] انجام می‌شود[۲].



شکل ۳-۲- فشار وارد به جبهه‌کار از طرف زمین[۲۴]

۳-۷-۲-۱- پایدارسازی جبهه‌کار توسط هوای فشرده

در برخی از انواع سپرها که عموماً در قدیم کاربرد داشته و هم‌اکنون کاربرد آن محدود شده است، پایدارسازی و حفاظت جبهه‌کار توسط هوای فشرده و اعمال فشار هوا بر روی جبهه‌کار انجام می‌شود. در واقع در این روش برای مقابله با فشار زمین، فشار هوا به جبهه‌کار اعمال می‌شود. از معایب و کاستی‌های این روش ثابت بودن فشار در ارتفاع اتاقک حفاری است. هم‌اکنون از این تکنیک برای تعمیرات، تعویض ابزار برنده و داخل شدن نفرات به داخل اتاقک حفاری در سپرهای تعادل فشار خاک و یا انواع دیگر سپرها استفاده می‌شود[۲].

۳-۷-۲-۲- پایدارسازی جبهه‌کار توسط فشار آب یا دوغاب

یکی از راه‌های حفاظت جبهه‌کار، اعمال فشار آب یا دوغاب در اتاقک حفاری است. در این حالت فشار داخل اتاقک بر خلاف سیستم هوای فشرده ثابت نیست و به ازای ارتفاع جبهه‌کار یا قطر سپر و به اندازه حاصلضرب وزن مخصوص سیال داخل اتاقک در ارتفاع جبهه‌کار، فشار پایین جبهه‌کار از فشار

3- Cake

بالای جبهه‌کار بیشتر است. بنابراین تنظیم فشار در جبهه‌کار بهتر از حالت محافظت با هوای فشرده است. علی‌رغم این مزیت، در این روش باز هم تنظیم فشار در بالا و پایین جبهه‌کار به سختی امکان‌پذیر است؛ چون اختلاف وزن مخصوص خاک با سیال زیاد بوده و نهایتاً اختلاف فشار بالا و پایین جبهه‌کار نیز زیاد خواهد بود[۲].

۳-۷-۲-۳-پایدارسازی جبهه‌کار توسط اعمال فشار خاک حفاری شده در اتاقک فشار

بهترین شیوه حفاظت جبهه‌کار، اعمال فشار توسط خاک حفاری و جمع شده در اتاقک حفاری است. خاک حفاری شده که با شرایط زمین مقابل خود یعنی جبهه‌کار بسیار همخوانی و شباهت دارد و از نظر وجود آب و وزن مخصوص بسیار نزدیک به زمین دست‌نخورده است، می‌تواند اختلاف فشار بالا و پایین جبهه‌کار را بسیار دقیق‌تر از سیستم‌های قبلی تأمین نماید. فشار پایه داخل اتاقک حفاری بر مبنای فشار واقعی متوسط اندازه‌گیری شده در اتاقک حفاری و فشار برآورد شده از زمین بر مبنای اطلاعات ژئوتکنیک و محاسبات انجام شده مشخص می‌شود[۲].

۳-۸- تقسیم‌بندی سپرها

سپرها از مناظر مختلفی همچون تکنیک حفر، روش نگهداری جبهه‌کار، روش حمل مواد و نوع سیستم نگهداری بکار گرفته شده تقسیم‌بندی می‌شوند. امتیاز تونل‌سازی همراه با سپر نسبت به سایر روش‌های تونل‌سازی قابلیت این روش در زمین‌های سست، ریزشی و جریانی است. بنابراین در این روش‌ها نگهداری جبهه‌کار و دیوارهای تونل اهمیت بیشتری نسبت به سایر جنبه‌های تونل‌سازی داشته و تقسیم‌بندی سپرها عموماً بر این مبنا صورت می‌پذیرد. بر این اساس سپرها در دو گروه مهم زیر تقسیم‌بندی می‌شوند[۷]. در شکل ۳-۳ نمایی شماتیک از این ماشین‌آلات نشان داده شده است.

الف- سپرهای مرسوم

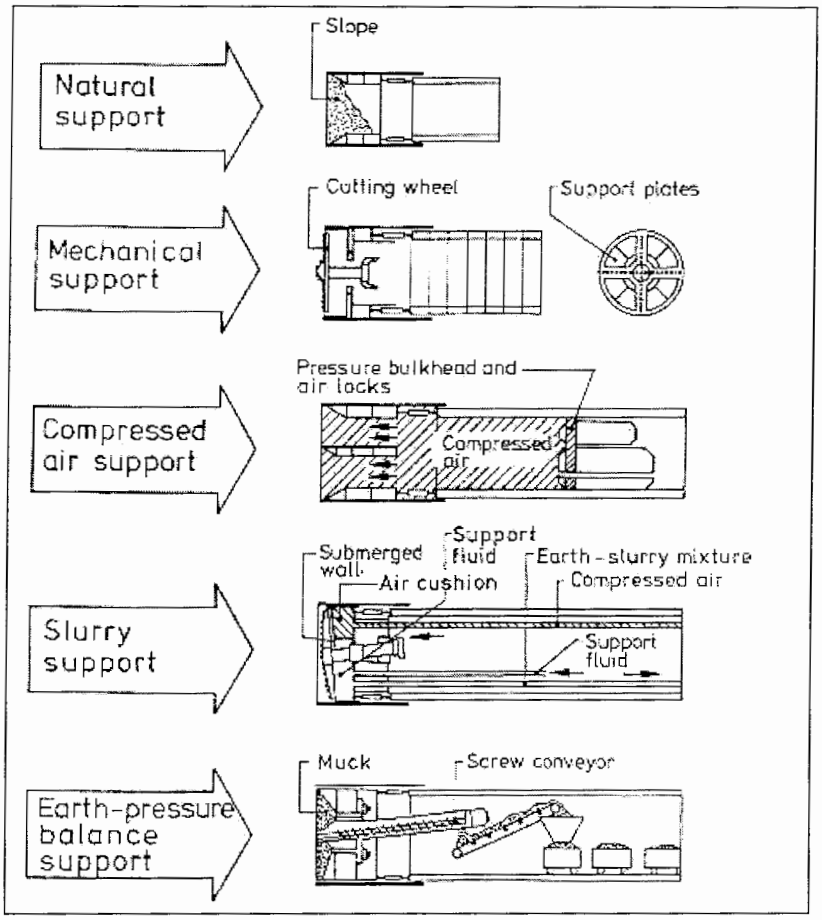
در این سپرها به دلیل مقاومت نسبتاً مناسب زمین، جبهه‌کار تونل باز بوده و یا به طریق مکانیکی نگهداری می‌شود. این سپرها عموماً برای خاک‌های غیر ریزشی و شرایط بدون آب مناسب هستند. استفاده از این نوع سپرها در زمین‌های جریانی و شرایط وجود آب‌های زیرزمینی با فنون بهسازی زمین همچون پایین آوردن سطح آب، تزریق، انجماد و غیره امکان‌پذیر است.

سپرهای مرسوم دو نوع ذیل را شامل می‌شوند:

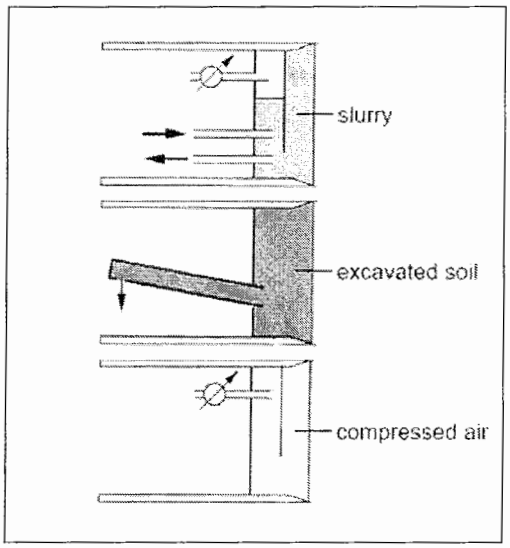
- سپرهای باز همانند سپر دستی، سپر مکانیزه و سپر نیمه مکانیزه
- سپرهای نیمه باز همانند سپر کور

ب- سپرهای خاص

مشخصه اصلی این نوع سپرها دارا بودن اتاقک حفاری جهت مقابله با فشار زمین و آب در جبهه‌کار تونل می‌باشد. به همین دلیل به این نوع سپرها، سپرهای بسته نیز گفته می‌شود. بکارگیری این نوع ماشین‌ها در شرایط نامطلوب زمین همچون زمین‌های جریانی و زمین‌هایی که زیر سطح ایستابی قرار دارند، امکان‌پذیر است. استفاده از این نوع سپرها به دلیل در اختیار داشتن تجهیزات ویژه نسبت به روش‌های مرسوم هزینه بیشتری را به همراه دارد. در شکل ۳-۴ نمایی شماتیک از سپرهای خاص نشان داده شده است. سپرهای خاص شامل انواع سپرهای هوای فشرده، دوغابی و تعادلی با فشار زمین و سپرهای ترکیبی می‌باشند[۷].



شکل ۳-۳- تقسیم‌بندی سپرها بر اساس نوع حفاظت جبهه‌کار [۱۶]



شکل ۳-۴- انواع سپرهای خاص [۷]

۳-۸-۱- سپرهای باز[1]

در این سپرها، پایداری جبهه‌کار تونل به دلیل استحکام مناسب زمین به طور طبیعی تأمین می‌شود. در صورتی که پایداری طبیعی ساختار زمین کافی نباشد، این پایداری به طریقه مکانیکی بدست می‌آید. در این سپرها در مقاطع با ابعاد بزرگتر، جبهه‌کار در حفر به چند بخش تقسیم می‌شود. مشخصه بارز سپرهای باز، تکنولوژی ساده آنها به سبب روش ساده نگهداری جبهه‌کار می باشد. انعطاف‌پذیری بالای این سپرها بویژه در روش حفر دستی و مکانیزه بخشی، امکان بکارگیری این ماشین‌ها را در دامنه وسیعی از زمین‌های چسبنده و فاقد چسبندگی و حتی جبهه‌کارهای سنگی و دارای قلوه سنگ‌های بزرگ امکان‌پذیر ساخته است. توانایی دیگر این ماشین‌ها امکان ایجاد تونل‌های با مقاطع غیر دایره‌ای بوسیله حفر دستی و مکانیزه بخشی می‌باشد. استفاده از این روش در مسیرهای کوتاه با توجه به هزینه سرمایه‌گذاری پایین آن می‌تواند یک روش اقتصادی محسوب شود. سپرهای باز عموماً برای مقاطع کوچک بکار گرفته می‌شوند. استفاده از این نوع سپرها در تونل‌سازی به روش لوله‌رانی نیز معمول می‌باشد.

بر اساس روش حفر، این سپرها در سه گروه ذیل قرار می‌گیرند:

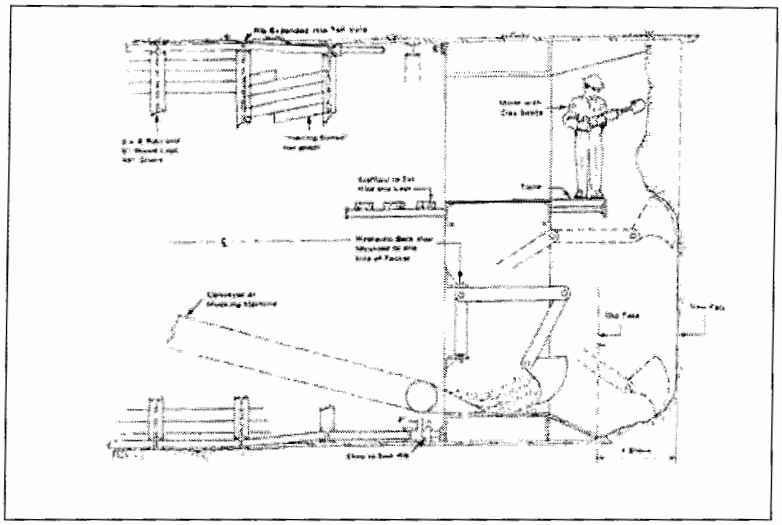
- سپرهای حفر دستی
- سپرهای نیمه مکانیزه
- سپرهای مکانیزه

۳-۸-۱-۱- سپرهای حفر دستی[2]

در این سپرها حفر جبهه‌کار تونل با استفاده از روش‌های دستی صورت می‌گیرد. نرخ پیشروی کند و هزینه کارگری بالا، کاربرد این سپر را در مسیرهای کوتاه که بکارگیری سپرهای مکانیزه یا نیمه مکانیزه اقتصادی نمی‌باشد، محدود می‌سازد. در کشورهای غیر پیشرفته که هزینه کارگری پایین است، استفاده از سپرهای دستی برای مسیرهای طولانی نیز معمول می‌باشد. در شکل ۳-۵ یک سپر حفر دستی مجهز به کج بیل نمایش داده شده است.

---

[1] - Fully open shield
[2] - Manual Shield



شکل ۳-۵- سپر حفر دستی مجهز به کج بیل [۱۱]

در سپرهای دستی می‌توان برای نگهداری جبهه‌کار از نگهداری طبیعی و یا نگهداری مکانیکی با صفحات هیدرولیکی استفاده کرد.

الف: نگهداری طبیعی[1]

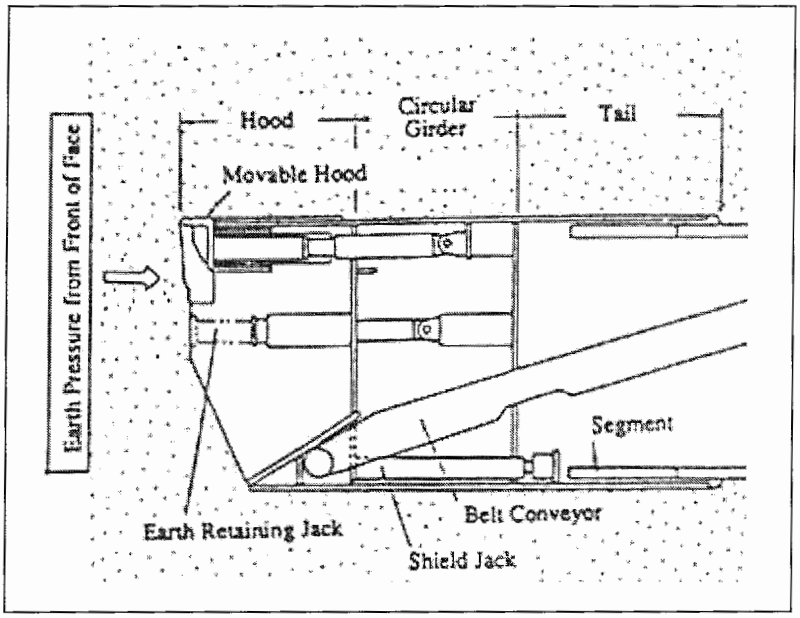
در این روش پایداری جبهه‌کار بوسیله پایداری ذاتی مواد و شیب ایجاد شده تأمین می‌گردد. در سپرهای با قطر زیاد با یک یا چند قفسه میانی می‌توان شیب خاک را به چند بخش تقسیم نمود تا بدین وسیله حجم مواد کاهش یابد. این روش در شرایط فشار آب و زمین‌های جریانی مناسب نبوده و تنها در شرایط خشک و زمین‌های زهکشی شده مناسب می‌باشد[۱۱].

ب: نگهداری مکانیکی[2] (صفحات هیدرولیکی)

در ابتدا نگهداری مکانیکی بصورت یک درپوش بود. در این روش استخراج بصورت دستی و از بالا به پایین انجام می‌گیرد و وقتی قسمتی استخراج گردید، درپوش‌ها در آن قسمت نصب می‌گردند. این روش استخراج بطور پیشرفته‌تری در دستگاه‌های امروزی بکار می‌رود. بطور کلی در روش مکانیکی قدیمی پیشروی کم و هزینه بالا است. استفاده از نگهداری مکانیکی فعال جبهه‌کار تونل، بسیار مؤثرتر و انعطاف‌پذیرتر می‌باشد. در این روش صفحات توسط جک‌های هیدرولیکی به جبهه‌کار نیرو وارد کرده و آن را نگهداری می‌کنند. در هنگام حفر، این صفحات برای مدت کوتاهی کنار

[1] - Natural Support
[2] - Mechanical Support

می‌روند. این روش در دستگاه‌های مقطعی و در زمین‌های با ویژگی‌های متغییر و طول کوتاه بسیار متداول است. روش ذکر شده برای دستگاه‌های تمام مقطع کارآمد نمی‌باشد. در این دستگاه‌ها از پیشانی برشی بسته استفاده می شود. نگهداری مکانیکی تنها برای مقابله با فشار زمین مناسب بوده و در مناطقی که زیر سطح ایستابی قرار دارند یا آب‌های آزاد وجود دارد، قابل بکارگیری نمی‌باشد[۱۱]. در شکل ۳-۶ یک سپر دستی با نگهداری مکانیکی نشان داده شده است. انتقال مواد در این روش به صورت خشک و با نوار نقاله صورت می‌گیرد.



شکل ۳-۶- سپر دستی با نگهداری جبهه‌کار بوسیله نگهدارنده مکانیکی(صفحات هیدرولیکی)[۱۱]

۳-۸-۱-۲- سپرهای نیمه مکانیزه[1](حفر بخشی)

به دلیل سرعت پیشروی کم سپرهای دستی، عموماً سپرهای تونل‌سازی به وسیله حفارها و بازوهای حفار بمنظور حفر مکانیکی زمین مجهز می‌شوند. بطور معمول کاربرد سپرهای باز به حفر بخشی تونل‌هایی با قطر کم محدود می‌شود. اما در مواقعی هم از این روش در تونل‌های بزرگ مقطع تا قطر بیش از ۱۰ متر نیز استفاده می‌شود. در این موارد در سپر ابزار حفر متعددی نصب شده و جبهه‌کار در چندین طبقه حفر می‌شود. در برخی از این سپرها امکان تعویض حفار و بازوی حفار با توجه به تغییر شرایط زمین مهیا می‌باشد. در سپرهای نیمه مکانیزه استفاده از صفحات هیدرولیکی

[1] - Semi-Mechanical Shield

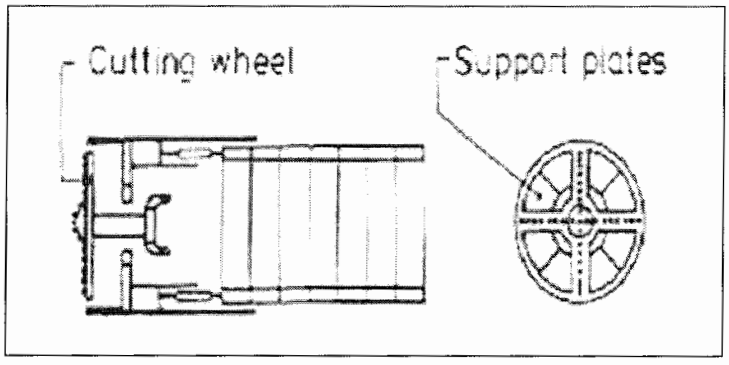
بمنظور پایدارسازی بخش‌های از جبهه‌کار معمول است. در این سپرها ایجاد مقطع غیره دایره‌ای امکان‌پذیر می‌باشد[۱۱].

در این سپرها می‌توان برای نگهداری جبهه‌کار از روش‌های نگهداری طبیعی و نگهداری مکانیکی استفاده کرد. در این روش، انتقال مواد بصورت خشک و با نوار نقاله صورت می‌گیرد.

۳-۸-۱-۳ سپرهای مکانیزه[1] (تمام مقطع)

بمنظور تونل‌سازی در زمین‌های سخت و افزایش نرخ پیشروی در زمین‌های سست، از سپرهای باز با ابزار حفر تمام مکانیزه استفاده می‌شود. تکنولوژی بکار گرفته شده در این نوع ماشین اندکی پیچیده می‌باشد. ابزار حفر ماشین مکانیزه می‌تواند یک چرخ دوار برنده یا پیشانی برشی همراه با ابزار حفر باشد. در زمین‌هایی با چسبندگی ناچیز و فاقد چسبندگی می‌توان با استفاده از دریچه کنترل کننده، مواد را به داخل سپر وارد نمود[۱۱].

در سپرهای مکانیزه، نگهداری جبهه‌کار بوسیله ابزار برش (چرخ دوار برنده، پیشانی برشی) تأمین می‌شود. در شکل ۳-۷ این نوع نگهداری مشاهده می‌شود. این نوع سپرها فقط با نیروی فشار زمین مقابله می‌کنند و در مناطقی که زیر سطح ایستای قرار دارند یا آب‌های آزاد وجود دارد، قابل استفاده نمی‌باشند. اما با بکارگیری روش‌های بهسازی زمین می‌توان از سپرهای مکانیزه استفاده نمود. در این سپرها انتقال مواد بصورت خشک و با نوار نقاله صورت می‌گیرد.

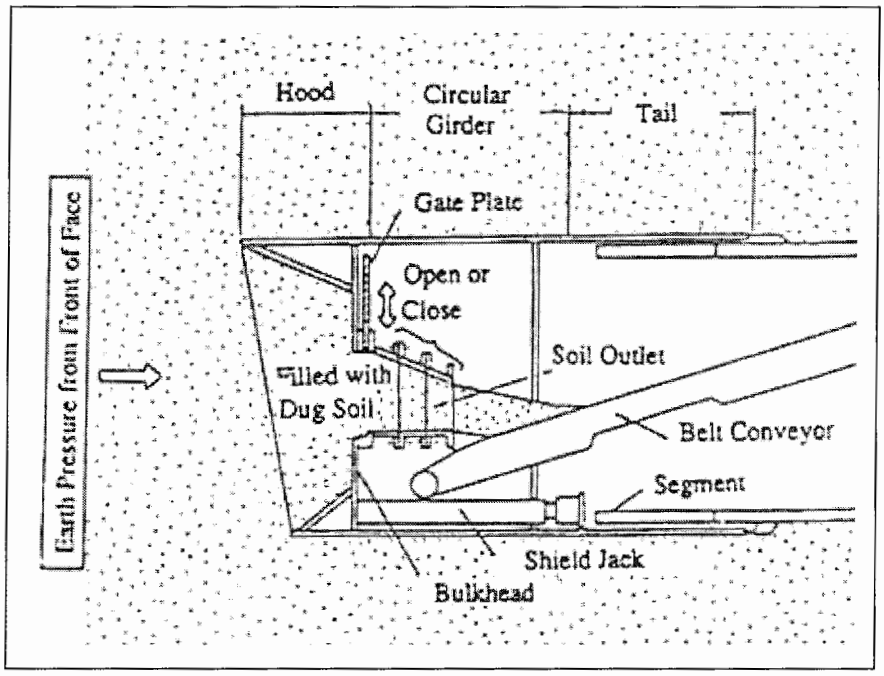


شکل ۳-۷- نگهداری جبهه‌کار در سپرهای مکانیزه (تمام مقطع)[۱۱]

[1] - Mechanical Shield

۳-۸-۲- سپر نیمه باز[1] (سپر کور[2])

به این سپر به این سبب کور اطلاق می‌شود که جبهه‌کار تونل قابل دیدن نمی‌باشد. بدلیل عدم استفاده از ابزار حفر مکانیکی در این سپر، به آن سپر دستی نیز اطلاق می‌شود. هزینه اندک تونل‌سازی با سپر مذکور در مقایسه با روش‌های مکانیکی، بکارگیری این ماشین را در مسیرهای کوتاه در زمین‌هایی با رفتار خمیری، امکان‌پذیر ساخته است. دسترسی به جبهه‌کار تونل بمنظور خارج ساختن موانع در زمین‌های ناپایدار، تنها با کمک تزریق و حفر دستی امکان‌پذیر می‌باشد. در این روش زمین به طریقه مکانیکی حفر نشده، بلکه از طریق چندین محفظه در تیغه فشاری سپر، به داخل سپر رانده می‌شود. با استفاده از محاسبات میزان حجم حفاری مجاز، می‌توان نشست در سطح زمین را کاهش داد. درشکل ۳-۸ یک سپر کور نشان داده شده است.



شکل ۳-۸- سپر کور [۱۱]

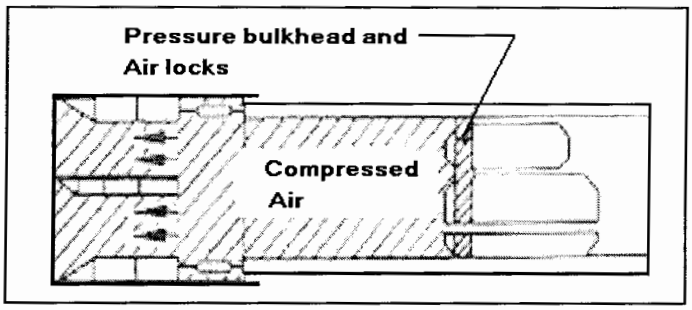
در سپرهای ژاپنی با باز کردن قطعات تیغه فشاری جلو سپر، می‌توان سپر کور را به سپر دستی معمولی تبدیل نمود. همان‌گونه که ذکر شد در این روش نگهداری جبهه‌کار بوسیله صفحات فولادی

[1] - Partially Open Shield
[2] - Blind Shield

صورت می‌گیرد که محفظه جلو سپر را درست می‌کنند. در این نوع سپرها انتقال مواد بوسیله تخلیه و حمل با نوار نقاله صورت می‌گیرد [۱۱].

۳-۸-۳- سپر هوای فشرده

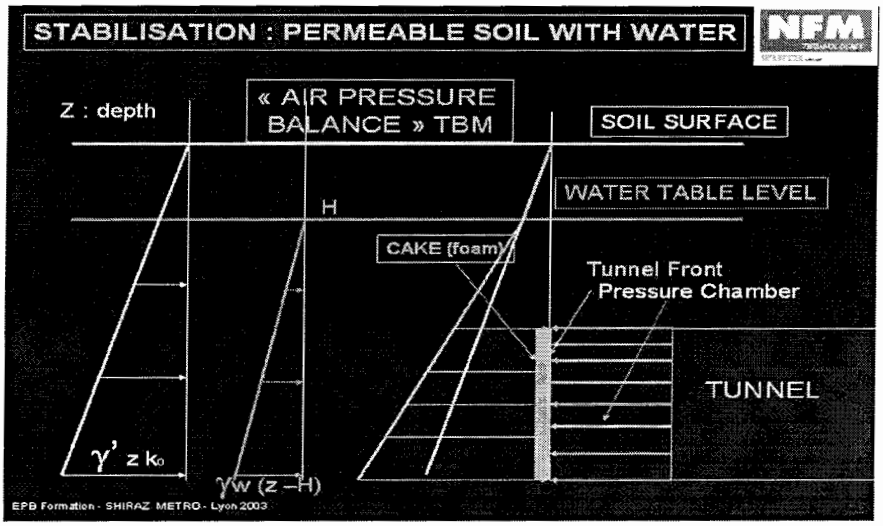
استفاده از هوای فشرده به منظور مقابله با آب‌های زیرزمینی سابقه طولانی دارد و زمان آن به سال ۱۸۲۸ باز می‌گردد. سپرهای دستی، نیمه مکانیزه یا تمام مکانیزه همراه با تجهیزات هوای فشرده و حبس هوا می‌توانند جزء سپرهای هوای فشرده محسوب شوند. در شکل ۳-۹ نمایی شماتیک از یک سپر هوای فشرده نشان داده شده است. در سپر هوای فشرده، هوا در تعادل با فشارهیدرواستاتیک آب قرار می‌گیرد، ولی قدرت مقابله با فشار زمین را ندارد. بدین منظور از نگهداری طبیعی یا مکانیکی استفاده می‌شود. استفاده از هوای فشرده بویژه در زمین‌های متخلخل یک روش مناسب برای جلوگیری از ورود آب می‌باشد. همانگونه که اشاره شد از هوای فشرده نمی‌توان به منظور مقابله با فشار زمین استفاده کرد و بدین منظور از نگهداری طبیعی یا مکانیکی استفاده می‌شود.



شکل ۳-۹- نمایی شماتیک از یک سپر هوای فشرده [۷]

اساس این روش در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است. فشار آب در عمق بطور خطی افزایش می‌یابد و جهت مقابله با ورود آب به داخل تونل، فشار هوا بیشتر یا برابر با بیشترین مقدار فشار آب وارد بر جبهه‌کار می‌باشد. فشار هوا در تمام نقاط جبهه‌کار ثابت است و بنابراین در قسمت بالای جبهه‌کار فشار هوا از فشار آب بیشتر بوده و باعث آزاد شدن هوا در این بخش می‌شود. در جاهایی که شن‌های فاقد سیمان همراه با کمی ماسه وجود داشته باشد، افت هوای فشرده به سهولت بالا می‌رود. فرار هوای فشرده از میان لایه‌های نفوذپذیر احتمال ایجاد راه‌های عمده عبور آب و جریان یافتن آب به داخل تونل را افزایش می‌دهد. در زمین‌های با تراوایی بالا، بکارگیری این روش به دلیل فرار هوا

دشوار می‌باشد. علاوه بر آن اجرای این روش نیازمند حداقل ضخامت پوشش بـه منظـور جلـوگیری از خروج ناگهانی هوا و متلاشی شدن سطح می‌باشد. همچنین بدلیل ایمنی پرسنل، اعمال فشار بیش از ۴ بار مجاز نیست[۷].



شکل ۳-۱۰- پایدارسازی جبهه‌کار توسط هوای فشرده [۲۴]

بوسیله پاشیدن یک محلول بنتونیتی به سطح جبهه‌کار، یک غشاء بـه ضـخامت چنـد میلیمتـر ایجاد شده و سطح جبهه‌کار تونل عایق می‌شود. با این اقدام هم مشکلات قبل مرتفع می‌گـردد و هـم امکان مقابله با فشار زمین فراهم می‌شود[۵].

۳-۸-۳-۱- دامنه کاربرد تونل‌سازی توسط سپر هوای فشرده

کاربرد تونل‌سازی توسط سپرهای هوای فشرده به موارد ذیل خلاصه می‌شود:

- در خاک‌هایی که پایین آمدن سطح آب زیرزمینی در آنها به دلایل تکنیکی، اقتـصادی یـا مـسایل زمین‌شناسی امکان‌پذیر نباشد.
- هنگامی که در اثر پایین آوردن سطح آب، نشست‌های خطرناکی در سطح پیش‌بینی شود.
- در هنگام تونل‌سازی در زیر آب‌های آزاد

۳-۸-۳-۲- معایب روش

- نیاز به حداقل ضخامت برای روباره تونل (بستگی به نوع زمین بمنظور جلوگیری از متلاشی شدن)
- ساعت کاری کمتر، به دلیل مشکلات کار در هوای فشرده
- کاهش کارایی ماشین
- افزایش خطر آتش‌سوزی در تونل

۳-۸-۳-۳- اصول کار سپر هوای فشرده

در سپرهای سنتی هوای فشرده، یک محفظه کاری بزرگ بین جبهه‌کار و آستربندی تونل قرار می‌گیرد. این محفظه می‌بایست کاملاً در برابر خروج هوا و ورود آب عایق‌سازی شود. کنترل آب بوسیله هوای فشرده، نیاز به تأمین منظم هوا دارد. وقوع یک اختلال می‌تواند منجر به ورود آب به داخل سپر و تونل شود. بدین منظور بوسیله اتاقک حبس هوا، محفظه هوای فشرده در داخل تونل از هوای آزاد جدا می‌شود. همانطور که بیان شد هوای فشرده مورد نیاز در سپر می‌بایست برابر و یا بیشتر از فشار هیدرواستاتیک آب در پایین سپر باشد. بنابراین تولید اضافه فشار در بالای سپر می‌تواند باعث هدر رفتن هوا شده و در مواردی خطرناک باشد که در این باره می‌بایست تدابیر لازم اندیشیده شود. در سپرهای هوای فشرده، حبس هوا دارای اهمیت فوق العاده‌ای می‌باشد که به شرایط زمین‌شناسی و آب زیرزمینی ساختگاه و همچنین ابعاد تونل بستگی دارد. در مسیرهای کوتاه تجهیزات حبس هوا می‌توانند در بالای چاه دسترسی قرار گیرند. این ترتیب قرارگیری در مسیرهای طولانی در مقاطع بزرگ به دلیل اتلاف زیاد هوا مناسب نمی‌باشد. بعلاوه اینکه در این روش کلیه فعالیت‌ها می‌بایست تحت فشار هوا صورت گیرند. در روش‌های جدیدتر، ترتیب حبس می‌تواند در داخل چاه و یا در داخل تونل قرار گیرد. بدین طریق حجم تونل زیر فشار هوا کمتر می‌شود. آستربندی پشت حبس هوا در این روش می‌بایست آب‌بندی شود. در روش‌های پیشرفته‌تر، حبس هوا در داخل سپر صورت گرفته و سایر بخش‌های تونل در شرایط هوای آزاد می باشند. در ارائه بهترین راه حل از جنبه سلامتی و ایمنی، تنها ابزار حفر مکانیکی جبهه‌کار تونل در زیر هوای فشرده قرار می‌گیرد. بدین ترتیب در طول عملیات نیاز به کار کردن در زیر هوای فشرده نمی‌باشد. ماشین‌هایی که با این روش کار می‌کنند، نیازمند تجهیزات آب‌بندی در دنباله سپر بمنظور جلوگیری از ورود آب و

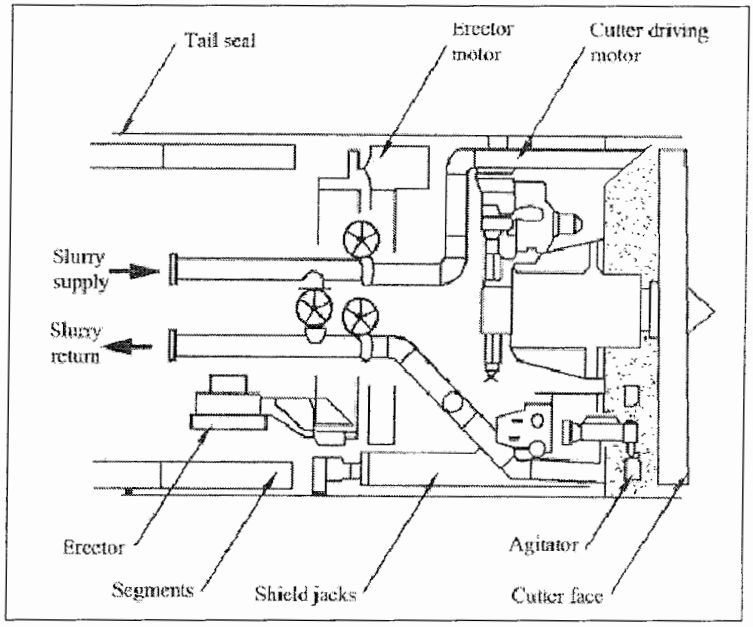
مواد به داخل سپر می‌باشند. به سبب مشکلات سپرهای هوای فشرده از جنبه ایمنی و سلامتی افـراد، استفاده از این نوع سپر نسبت بـه سـپرهای مـدرن دوغـابی و تعـادلی فـشار زمـین در حـال کـاهش می‌باشد.

۳-۸-۳-۴- تجهیزات هوای فشرده

تجهیزات تأمین هوای فشرده شامل اتاقک حبس هوا و کمپرسورهای هـوای فـشرده مـی‌باشـد. اتاقک حبس هوا، هوای فشرده را از منطقه زیر فشار اتمسفر جدا می‌سازد. کمپرسور بکار گرفته شـده می‌بایست توان تأمین هوای مورد نیاز در تونل و پایدار نگهداشتن فشار هوا را داشته باشد. تیغـه‌هـای فشار از جنس فولاد و یا چدن طراحی شده می‌بایست توانایی تحمل ۱/۵ برابر فشار بکار گرفته شده را داشته و کاملاً عایق باشند. بوسیله اتاقک‌های حبس نفرات و حبس مواد، افراد و تجهیـزات بـه داخـل محفظه فشار هوا و سپر انتقال داده می‌شوند. این اتاقک‌ها بدلیل تأمین اهداف متفـاوت مـی‌بایـست از یکدیگر جدا باشند. عموماً حبس نفرات در بالا و حبس مواد در پایین قرار می‌گیرد.

۳-۸-۴- سپر دوغابی

تونل‌سازی با استفاده از سپرهای دوغابی یک روش ایمن و مطمئن به منظور حفر تونل با حداقل نشست در سطح می‌باشد. بکارگیری این روش در انواع زمین‌های سست آبدار یا بدون آب امکان‌پـذیر می‌باشد. مبانی این روش تونل‌سازی اولین بـار توسـط Greathead (۱۸۷۴) و سـپس Haag (۱۸۹۶) بکار گرفته شد. آنها دریافتند که با عایق نمودن، بستن جلوی سپر و ایجاد یک محفظه فشار پر شده از دوغاب می‌توان جبهه‌کار تونل را پایدار نمود. گرایل Grauel در سال ۱۹۱۲ برای اولین بـار موفـق بـه ساخت این سپر شد و بین سال‌های ۱۹۵۹ تا ۱۹۶۰ اولین سپر دوغابی به منظور ساخت تونلی با قطر ۳/۳۵ متر بکار گرفته شد[۷]. در شکل ۳-۱۱ نمایی شماتیک از این سپر دیده می‌شود.

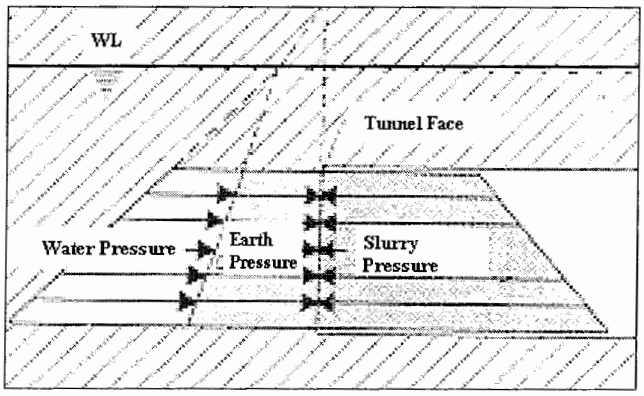


شکل۳-۱۱- نمایی شماتیک از یک سپر دوغابی [۱۵]

۳-۸-۴-۱- نگهداری جبهه‌کار

زیر سطح ایستابی و در شن و ماسه‌های سست، نگهداری جبهه‌کار با دوغاب مزایای بسیاری دارد. در این شرایط هوای فشرده مناسب نمی‌باشد. زیرا خشک کردن عملاً امکان‌پذیر نبوده و افت فشار هوا نیز زیاد می‌باشد.

در روش دوغابی از یک سیال تحت فشار برای پایدارسازی جبهه‌کار استفاده می‌شود. دوغاب در جبهه‌کار با فشار آب و فشار زمین مقابله می‌کند. در زمین‌های چسبنده نفوذناپذیر بکارگیری آب مناسب می‌باشد. در سایر موارد محلول‌های دیگر نظیر محلول آب- بنتونیت بکار گرفته می‌شود. استفاده از بنتونیت به دلیل رفتار مکانیکی، خاصیت خمیری و ظرفیت تورم آن صورت می‌گیرد. در این سیستم محلول دوغاب داخل زمین تحت فشار قرار گرفته و با ایجاد یک لایه نفوذناپذیر، آب‌بندی و پایداری جبهه‌کار را تأمین می‌کند. بکارگیری پلیمرها به جای بنتونیت نیز معمول می‌باشد. همانطور که در شکل ۳-۱۲ مشاهده می‌شود، در این روش فشاری که دوغاب به جبهه‌کار وارد می‌کند با وضع طبیعی سازگاری بیشتری دارد. زیرا افزایش فشار از بالا به پایین مقطع تابع همان قانونی است که بر فشار ایستابی ناشی از آب زیرزمینی حاکم است؛ لذا کاملاً موازی با آن می‌باشد. این نتیجه را نمی‌توان با هوای فشرده بدست آورد [۱۱, ۷].

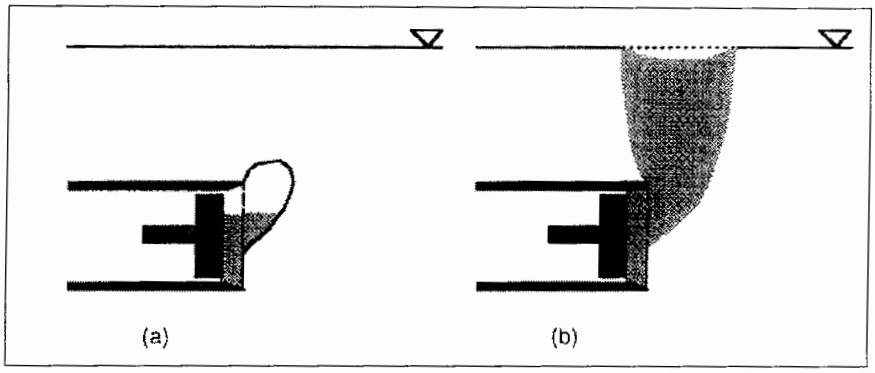


شکل ۳-۱۲- نگهداری جبهه‌کار در سپر دوغابی [۱۵]

۳-۸-۴-۲- اصول کار سپر دوغابی

در این روش جبهه‌کار تونل با استفاده از دوغاب نگهداری می‌شود. نوع محلول بکار گرفته شده بستگی به نوع زمین داشته، عموماً شامل آب و بنتونیت یا رس و در صورت نیاز سایر افزودنی‌ها می‌باشد. این محلول به داخل اتاقک حفاری در جلو جبهه‌کار پمپ می‌شود. محلول پرفشار داخل زمین شده و به شکل یک غشاء در سطح جبهه‌کار، آن را آب‌بندی می‌کند. این غشاء یک لایه نیمه‌تراوای رس یا بنتونیت می‌باشد. در این غشاء، محلول فشاری در اتاقک حفاری با فشار آب و زمین در تعادل می‌باشد.

در سپرهای دوغابی محلول نگهداری نقش واسطه انتقال مواد را نیز بر عهده دارد. زمین حفر شده بوسیله ابزار حفر، در اتاقک حفاری با محلول نگهداری مخلوط می‌شود. سپس این مخلوط به سطح زمین پمپ می‌شود. در تأسیسات جداسازی که عموماً در سطح زمین قرار می‌گیرند، محلول نگهداری از مواد حفاری شده جداسازی می‌شود. در صورت نیاز به این محلول مجدداً بنتونیت اضافه شده، سپس به جبهه‌کار تونل پمپ می‌شود. بزرگترین عیب سپرهای دوغابی نیاز به تأسیسات جداسازی است که این تأسیسات علاوه بر قیمت زیاد و مشکلات زیست محیطی، به فضا و انرژی زیادی نیاز دارند. از دیگر معایب این سپرها مشکلات اختلاط مواد ریزدانه با بنتونیت می‌باشد. دو مورد از مشکلاتی که در پایدارسازی جبهه‌کار در سپرهای دوغابی رخ می‌دهد، در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳- مشکلاتی که در پایدارسازی جبهه‌کار در سپرهای دوغابی ایجاد می‌گردد[۴]

۳-۸-۴-۳- انواع سپرهای دوغابی

الف- سپر دوغابی (ژاپنی)

این سپرها بمنظور بکارگیری در ماسه و لای طراحی شده است. محدودیت بکارگیری این سپرها در زمین‌های رسی با چسبندگی بالا بدلیل مسدود شدن محفظه‌های ورود مواد و در لایه‌های متراکم شن بدلیل نیاز به گشتاور بالا جهت غلبه بر نیروی اصطکاک وارد شده بر کله حفار می‌باشد. این مورد بویژه در ماشین‌های با قطر کم باعث بروز مشکلاتی در راهبری سپر می‌شود. مهمترین خصوصیات سپر دوغابی نوع محلول نگهداری، طراحی کله حفار و روش تنظیم و کنترل فشار نگهداری می‌باشد. کله حفار سپر دوغابی بصورت مسطح و تقریباً بسته طراحی می‌شود. بنابراین این قسمت نقش نگهداری مکانیکی جبهه‌کار را نیز عهده‌دار می‌باشد. دستیابی به جبهه‌کار تونل بمنظور جابجا نمودن موانع تنها از طریق چندین دریچه که در خلال عملیات بسته می‌باشند، امکان‌پذیر می‌باشد. ابزار حفر عموماً تیغه‌ها و دندانه‌های حفاری بوده و عموماً در دو ردیف قرار می‌گیرند. مواد حفر شده از طریق حفره‌های قرار گرفته در دو ردیف موازی وارد سپر می‌شوند. ابعاد حفره‌ها به حداکثر مواد جامد بستگی دارد. ذراتی که امکان انتقال آنها به طریق هیدرولیکی وجود نداشته باشد، در داخل حفره‌ها باقی می‌مانند. محلول نگهداری از بخش بالای اتاقک حفاری وارد می‌شود و مخلوط مواد حفر شده و غشاء محلول در مجاورت یک مخلوط کن تشکیل می‌شوند. این مخلوط کن بمنظور جلوگیری از رسوب و ایجاد یک واسطه انتقالی همگن نصب می‌گردد.

در سپرهای دوغابی فشار نگهداری در جبهه‌کار تونل متأثر از اضافه نمودن یا تخلیه دوغاب به اتاقک حفاری می‌باشد. بوسیله حسگرهای الکتریکی، اندازه فشار خالص اتاقک حفاری تعیین شده و

تغذیه مسیر انتقال بر این اساس صورت می‌گیرد. به سبب اینکه امکان مشاهده تغییرات در جبهه‌کار مهیا نمی‌باشد، کنترل پایداری آن بوسیله مقایسه حجم توده اولیه و فعلی انجام می‌گیرد. حجم فعلی توده با استفاده از اندازه‌گیری چگالی محلول نگهداری تعیین می‌شود. حجم اولیه با استفاده از وزن حجمی، تراکم و میزان خلل و فرج زمین تعیین می‌شود. این مقادیر از حفاری‌ها و مغزه‌گیری‌های اولیه بدست می‌آید [۱۲].

ب- سپر آبی (آلمانی، تمام مقطع)

سپرهای آبی در مواجه با تغییر شرایط زمین‌شناسی انعطاف‌پذیری بیشتری دارند. بکارگیری این نوع سپر در انواع زمین‌های سست و همچنین با برخی تجهیزات اضافه در سازندهای سنگی امکان‌پذیر می‌باشد. ویژگی ممتاز سپر آبی، جداسازی اتاقک حفاری با استفاده از دیواره حائل می‌باشد. تفاوت دیگر این سپر با سپر دوغابی ژاپنی استفاده از محلول آب- بنتونیت در آن است که مناسب سازندهای زمین‌شناسی اروپا می‌باشد. مهمترین مزیت سپر آبی، تنظیم فشار نگهداری با استفاده از حباب هوا و در نتیجه مستقل بودن این فشار از کیفیت محلول در مدار دوغاب می‌باشد. بنابراین روش مذکور در مواجه با تغییرات حجم دوغاب در اتاقک حفاری، انعطاف‌پذیری بالایی دارد. به عنوان مثال در هنگام برخورد با یک زون گسله، می‌توان بدون افت فشار جبهه‌کار را حفظ نمود. همچنین امکان تغییر حجم محلول در مدار (در صورت نیاز بمنظور انتقال مواد) بدون داشتن تأثیر بر فشار نگهداری امکان‌پذیر می‌باشد. با استفاده از حباب هوا و دیواره حائل، امکان ایجاد حبس هوا در اتاقک حفاری و دسترسی به جبهه‌کار تونل بمنظور جابجا نمودن موانع، تعویض و تغییر ابزار حفر بسیار ساده‌تر از سپر دوغابی انجام پذیر است. بدین منظور محلول از اتاقک حفاری خارج و هوای فشرده جانشین آن می‌گردد. برجای ماندن غشاء فیلتر همراه با خاصیت آب‌بند آن، امکان نگهداری جبهه‌کار را تنها با استفاده از هوای فشرده مهیا می‌سازد. در اثر کاهش اثر بنتونیت در اثر تماس با هوای فشرده، امکان اتلاف هوا وجود دارد. بنابراین می‌بایست برای محدود نمودن اتلاف هوا در فواصل زمانی معین با پاشیدن بنتونیت روی جبهه‌کار تونل و یا پر کردن محفظه فشار از بنتونیت، بنتونیت قبلی مجدداً تجدید شود. در کله‌های حفار دارای محفظه‌های باز، امکان جریان مواد به داخل اتاقک حفاری فراهم می‌باشد. بنابراین قسمت مذکور نقش حفر و نگهداری را تماماً عهده‌دار می‌باشد. در جلو مسیر انتقال مواد، یک

شبکه بمنظور جداسازی ذرات جامد نامناسب برای انتقال قرار می‌گیرد و در جلو شبکه نیز یک سنگ شکن هیدرولیکی بمنظور کاهش ابعاد سنگ‌ها به میزان مورد نظر نصب می‌گردد. بمنظور اجتناب از تجمع مواد در جلو شبکه از جت سیال محلول استفاده می‌شود. با توجه به انواع مختلف زمین، از ابزار حفر متفاوت در کله حفار استفاده می‌گردد [۱۲].

ج- سپر دوغابی با حفر بخشی

این سپر تلفیقی از نگهداری دوغابی و حفر بخشی می‌باشد. یک بازوی حفار تلسکوپی در مرکز تیغه برشی نصب و به طریقه اتوماتیک یا دستی در هنگام مواجه شدن با موانع سخت، جبهه‌کار را حفر می‌نماید. این روش تونل‌سازی در سازندهای نرم سنگی نیز امکان‌پذیر می‌باشد. دامنه بکارگیری این سپر مشابه سپرهای آبی می‌باشد. کله حفار ذرات جامد غیر مناسب برای سیستم انتقال دوغابی را نگه می‌دارد. در صورت نیاز ورود به اتاقک حفاری (بمنظور تعمیرات و یا جابجا نمودن موانع) بخشی از محلول یا تمام آن تخلیه شده و هوای فشرده جایگزین آن می‌گردد.

با استفاده از صفحات قابل کنترل نگهداری در اتاقک حفاری، می‌توان جلو سپر را کاملاً بست. همچنین در بخش زیرین سپر یک سنگ‌شکن بمنظور رساندن قطر ذرات به میزان مورد نظر قرار دارد [۱۲].

د- سپر دوغابی حفر با جت آب

این سپر در سال ۱۹۷۹ بوسیله Wayss & Freytag ابداع شد. در تونل‌سازی در نزدیک سطح زمین، موانع زیادی بر سر راه قرار می‌گیرند. این موانع فراوان می‌توانند موانع طبیعی بویژه در رسوبات یخچالی و موانع مصنوعی نظیر ریشه‌ها، پی‌ها، سنگ و غیره باشند. بنابراین تونل‌سازی کاملاً مکانیزه در این شرایط نیازمند تجهیزات بسیار زیاد و در نتیجه صرف هزینه بالا می‌باشد. بمنظور کاهش هزینه عملیات تونل‌سازی که در سپرهای کاملاً مکانیزه قابل دستیابی نمی‌باشد، سپرهای جت آبی ابداع گردید. در این نوع سپر به جای حفر مکانیکی، از اتاقک حفر تجهیز شده با جت سیال استفاده می‌شود. حفر دستی موانع و جابجا نمودن آسان آنها، سپر جت آبی را به یک ماشین انعطاف‌پذیر تبدیل نموده است. دامنه بکارگیری این سپر در تغییرات زمین مشابه سپرهای آبی سنتی می‌باشد. زمین‌های محکم و تحکیم یافته دامنه کاربرد این سپر را محدود می‌سازند. در زمین‌های چسبنده، تنها

پیشروی با نرخ پایین امکان‌پذیر می‌باشد. آبفشان‌ها بصورت جانبی در داخل لبه‌های برشی قرار گرفته‌اند. بنابراین تأثیر مستقیم آنها به داخل سپر محدود می‌شود. دامنه تأثیر جت‌ها ۱/۵ متر می‌باشد. بنابراین این روش در مقایسه با حفر مکانیکی دارای صرفه اقتصادی بیشتری می‌باشد. نگهداری ایجاد شده بوسیله غشاء فیلتر در جبهه‌کار تونل، تحت تأثیر جت باریک آب قرار نمی‌گیرد، بدلیل اینکه در اثر برخورد جت آب، مواد نرم اطراف سنگ‌ها جدا می‌شوند، انتقال آنها به داخل سپر بدون حجم اضافی و به سادگی صورت می‌گیرد [۱۲].

ه- سپر غشایی (فرانسوی)

اساس سپر غشایی شامل آب‌بند نمودن جبهه‌کار در داخل اتاقک حفاری با یک غشاء پاشیده شده بر روی آن می‌باشد. غشاء در اثر حفر موضعی توسط بازوی حفار تخریب شده و مجدداً تجدید می‌شود. حفاری می‌تواند بصورت مورب انجام گرفته و در نتیجه ایستایی بیشتری به جبهه‌کار داده شود. در این سپر با توجه به شرایط زمین، ابزار حفر تعویض شده و استفاده از آن در سازندهای سنگی نیز میسر می‌گردد. در این روش با پاشیدن محلول نگهداری بر روی جبهه‌کار، در یک لایه نازک زمین آب‌بند شده و در برابر نفوذ هوا محافظت می‌شود. هوای فشرده بر روی این غشاء نفوذناپذیر بر سرتاسر جبهه‌کار اثر کرده و بدین ترتیب فشار هوا قادر به تحمل فشار آب و زمین می‌گردد. بدلیل مصرف اندک محلول در این نوع سپر، احتیاجی به نصب تأسیسات جداسازی بمنظور جداسازی مواد حفر شده از محلول وجود ندارد.

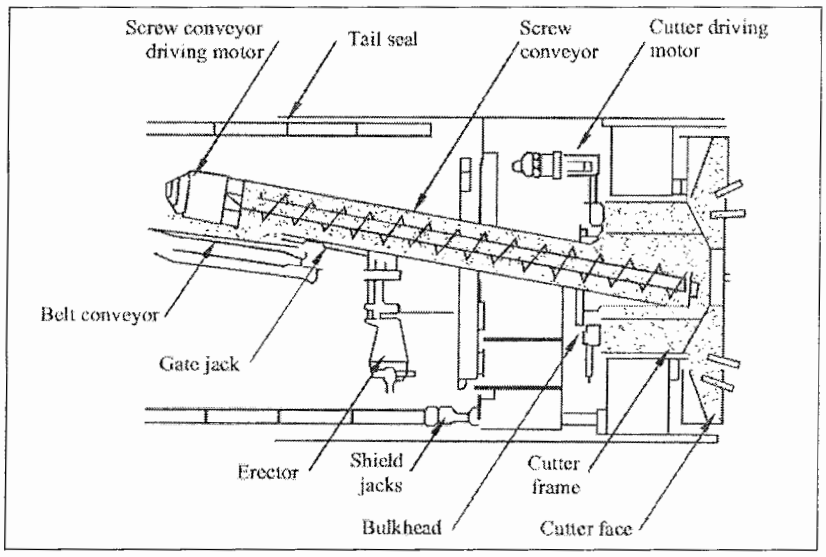
از نکات قابل توجه این سپر، دید کامل جبهه در هنگام حفاری می‌باشد. بدین ترتیب امکان مشاهده و پیشگیری از مشکلات وجود دارد. دسترسی آسان به اتاقک حفاری امکان انتقال آسان قطعه سنگ‌ها و سایر موانع را فراهم نموده است. بنابراین سپر غشایی یک روش انعطاف‌پذیر و مناسب بویژه در تونل‌های نزدیک به سطح زمین که امکان برخورد با موانع بیشتر می‌باشد به شمار می‌رود. در گذشته این سپر تنها در موارد لوله‌گذاری بکار گرفته می‌شد، ولی امروزه از آن در ساخت تونل‌های حمل و نقل نیز استفاده می‌شود [۱۲].

۳-۸-۵- سپر تعادلی با فشار زمین

توسعه سپرهای تعادلی فشار زمین در اوایل دهه هفتاد در ژاپن صورت گرفت. اولین سپر از این نوع در سال ۱۹۷۴ در ژاپن بکار گرفته شد. این سپر که در واقع ترکیبی از سپر کور و سپر دوغابی محسوب می‌شود، در سال‌های اخیر کاربرد وسیعی یافته است. اساس توسعه این سپر بر اساس سپر کور است که به منظور حفر در زمین‌های کاملاً خمیری مناسب می‌باشد.

در زمان ابداع این سپر، از سپر دوغابی بطور وسیع در زمین‌های غیر چسبنده استفاده می‌شد. با افزایش درصد مواد ریزدانه زمین در محلول نگهداری، عمل جداسازی پیچیده‌تر و پرهزینه‌تر شده، تجدید این محلول پس از طی مدت زمانی ضرورت پیدا می‌کرد. جدا از هزینه بالا و زیان‌های زیست‌محیطی، کمبود فضا در شهرهای اصلی ژاپن و مشکلات ایجاد تأسیسات جداسازی نقش مؤثری در توسعه سپرهای تعادلی داشته است. بنابراین این سپر با بکارگیری مزایای سپر کور و سپر دوغابی ابداع شد[۱۱, ۷]. نمایی شماتیک از این سپرها در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.

در زمین‌های رسی می‌توان از خود زمین به عنوان ابزار نگهداری استفاده کرد. در این روش مواد کنده شده در حین حفر تونل جمع‌آوری شده و در محفظه خاصی که بلافاصله در پشت کله حفار قرار دارد، فشرده می‌شوند و تشکلیل پوششی می‌دهند که نگهداری جبهه‌کار را تأمین می‌کند. این مواد فشرده شده قادر به تحمل فشار زمین و آب می‌باشند.



شکل ۳-۱۴- نمایی شماتیک از یک سپر EPB [۱۵]

۳-۸-۵-۱- اصول کار سپر تعادلی با فشار زمین

برخلاف سایر سپرها، پایدارسازی جبهه‌کار در سپر تعادلی فشار زمین بدون واسطه نگهداری ثانویه (هوای فشرده، محلول، صفحات مکانیکی) انجام می‌شود. در این روش مواد حفر شده توسط کله حفار به عنوان واسطه نگهداری بکار گرفته می‌شوند.

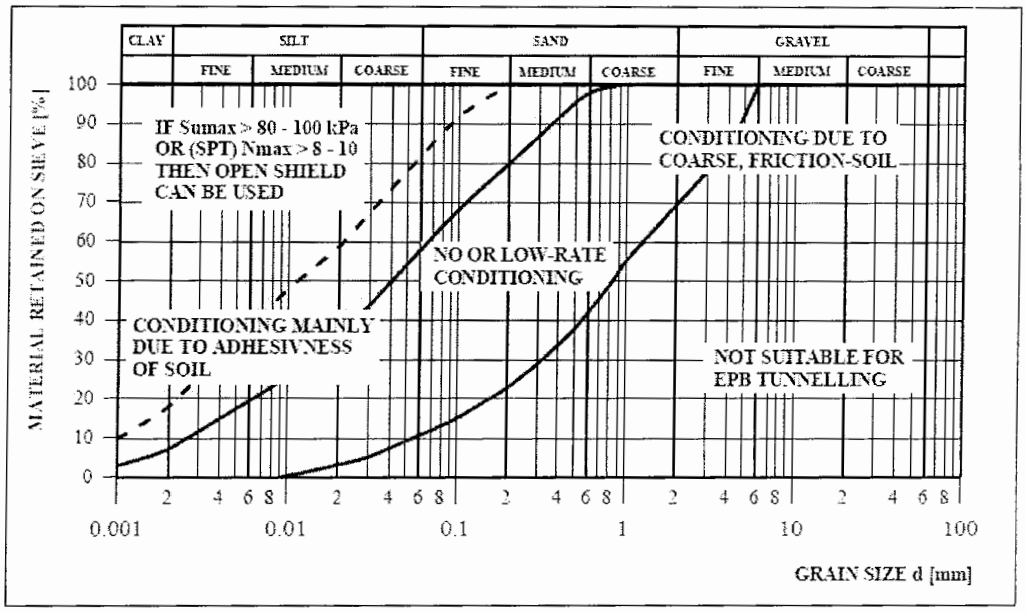
در صورتیکه فشار نگهداری ایجاد شده توسط مواد حفر شده در داخل اتاقک حفاری از حد تعادل بالاتر رود، محلول نگهداری و همچنین جبهه‌کار تونل بیشتر متراکم می‌شوند. در این زمان مواد از جلو سپر و از داخل اتاقک حفاری بوسیله یک نقاله مارپیچی یا نوار زنجیری منتقل می‌شوند. انتقال مواد می‌بایست در شرایط کنترل شده‌ای صورت گیرد تا از کاهش فشار در اتاقک حفاری و در نتیجه نشست زمین جلوگیری شود[۸].

۳-۸-۵-۲- ویژگی‌های زمین و دامنه کاربرد سپر

شکل‌پذیری و روان‌گرایی مناسب، اصطکاک داخلی کم و نفوذپذیری کم خصوصیاتی هستند که مواد حفر شده برای استفاده بمنظور واسطه نگهداری باید دارا باشند. بطور معمول هیچ زمینی چنین شرایطی را قبل از حفر ندارد و بنابراین می‌بایست به آن موادی افزوده شود. مواد حفر شده از زمین از طریق نقاله مارپیچی از اتاقک حفاری تحت فشار به داخل تونل منتقل می‌شوند. افزودن مواد به نوع خاک و همچنین مشخصه‌های ژئوتکنیکی زمین از قبیل ابعاد ذرات، آب محتوی، حد روانی و شاخص خمیری بستگی دارد. تغییر این مشخصه‌ها بصورت ذیل است[۸] :

- افزودن آب به مواد حفر شده
- افزودن بنتونیت، رس یا مواد پلیمری به مواد حفر شده
- افزودن لای به مواد حفر شده

درصد مواد افزودنی باید در طول طراحی و انتخاب روش تونل‌سازی مشخص شود. در صورت امکان باید شرایط اولیه زمین دست نخورده باقی بماند. زیرا در صورت افزودن مقدار زیادی از مواد افزودنی، مشکل جداسازی این مواد پس از انتقال بوجود می‌آید. در صورت امکان بهتر است که افزودن این مواد در خلال حفاری جبهه‌کار و در جلوی کله حفار انجام گیرد. در این صورت از مسدود شدن دریچه‌ها جلوگیری می‌شود. در شکل ۳-۱۵ محدوده کاری سپرهای تعادلی نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۵- محدوده کاری سپر تعادلی با فشار زمین [۱۴]

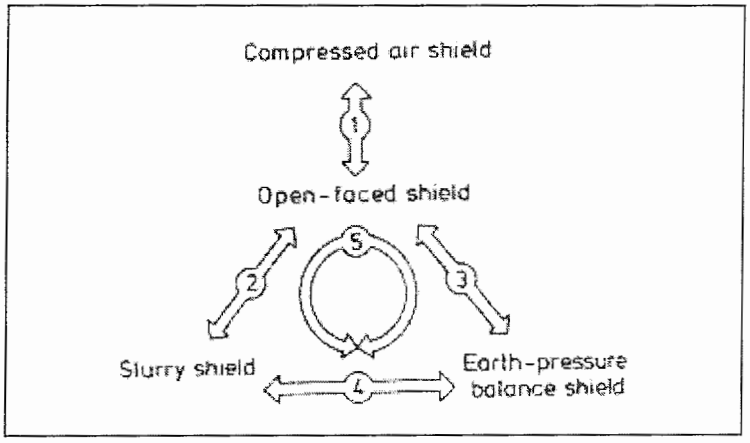
زمین‌های رسی- سیلتی و سیلتی- ماسه‌ای با روان‌گرایی کم برای بکارگیری سپرهای تعادلی مناسب می‌باشند. با استفاده از مخلوط کننده‌ها در اتاقک حفاری نیز می‌توان در زمین‌های بسیار چسبنده از این سپر استفاده کرد. توجه به این موضوع مهم است که در صورت استفاده از آب در واسطه نگهداری و انتقالی در جبهه‌کار، غشاء وجود نخواهد داشت. در صورت توزیع نامتقارن فشار نگهداری بر روی جبهه‌کار، هدایت سپر به سمت جلو نسبت به سپرهای دوغابی دشوارتر می‌شود. برخلاف سپرهای دوغابی، در این سپر امکان استفاده از سنگ‌شکن در جلو محفظه حفاری به دلیل آسیب رساندن به نقاله مارپیچی وجود ندارد. در زمین‌های غیر چسبنده با درصد مواد ریزدانه، سپرهای دوغابی عموماً مزایای بیشتری نسبت به سپرهای تعادلی دارند.

۳-۸-۶- سپرهای ترکیبی[۱]

ماشین‌های تونل‌سازی سپری که دربخش‌های قبل به آنها پرداخته شد، علی‌رغم دارا بودن تجهیزات و امکانات زیاد و پیشرفت‌های فراوان که در آنها انجام گرفته است، از لحاظ اقتصادی و زمین‌شناسی دارای محدودیت‌هایی بوده و در همه موارد قابل استفاده نمی‌باشند. بدین سبب تونل‌سازان همواره به دنبال راهی بوده‌اند که با استفاده از یک ماشین در سازندها و شرایط مختلف

[۱] - Mix shield

زمین، عملیات تونل‌سازی را انجام دهند. سپرهای ترکیبی، قابل تطبیق با شرایط قرارگیری لایه‌ها و آب می‌باشند. هر چند که تغییرات ایجاد شده در این سپرها اساساً مربوط به روش نگهداری جبهه‌کار است. تجهیزات دیگر همچون ابزار حفر و سیستم حمل و نقل نیز در آن متفاوت با موارد قبل می‌باشند[۱۱] . در شکل ۳-۱۶ انواع حالات مختلف ترکیب سپرها نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۶- ترکیب‌های امکان‌پذیر در سپرها [۱۱]

جدای از ترکیب حالت ۱ (سپر هوای فشرده - سپر باز)، تنها ترکیب ۲ (سپر دوغابی- سپر باز) و ۳ (سپر تعادلی - سپر باز) بکار گرفته شده است. ترکیب ۵ (سپر باز - سپر دوغابی - سپر تعادلی) می‌تواند نتیجه یک سپر جامع باشد. همچنین می‌بایست به این موضوع توجه داشت که در سپرهای دوغابی و تعادلی از هوای فشرده به عنوان یک سیستم پشتیبان بمنظور تعویض مته‌ها و برطرف نمودن موانع استفاده می‌شود. در هنگام طراحی یک ماشین سپر ترکیبی، کارفرما، پیمان‌کار و سازنده ماشین با مسائل مشابهی مواجه می‌باشند. زیرا جدا از قابلیت تبدیل‌پذیری ماشین، زمان و عوامل مؤثر بر هزینه‌ها پارامترهای اصلی در تعیین موفقیت یک طرح می‌باشند. به غیر از استفاده از سپر ترکیبی به عنوان سپر باز، طراحی یک سپر ترکیبی جامع بر طبق ترکیب ۵، نیازمند ترکیب سپر دوغابی و سپر تعادلی می‌باشد. در این زمینه دو راهکار مدنظر می‌باشد:

- طراحی یک سپر که کلیه امکانات و اجرای این دو روش را داشته باشد.
- طراحی یک سیستم سپر که در شرایط مختلف قابلیت تبدیل از یک سیستم به سیستم دیگر را داشته باشد

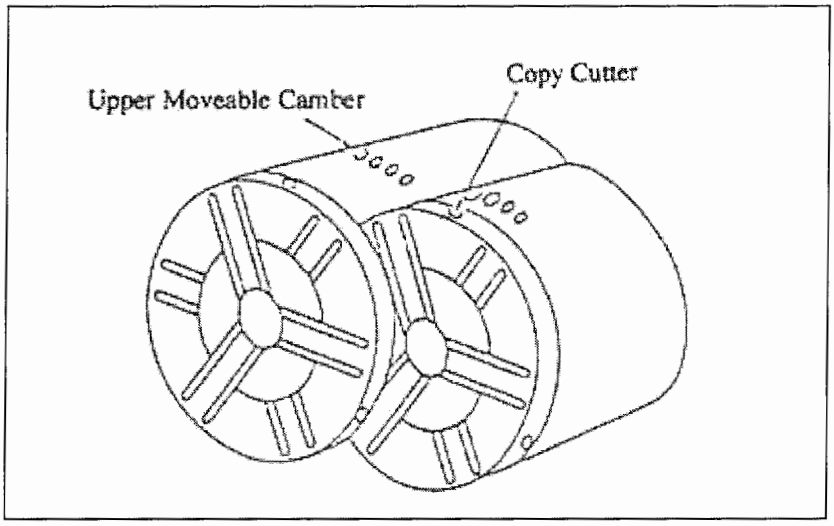
۳-۸- ۷- سپرهای خاص

۳-۸-۷-۱- سپر چندگانه[1]

مشابه سپر ترکیبی اساس سپر چندگانه، همانند سپر دوغابی می‌باشد که قابلیت تبدیل به سپر تعادلی فشار زمین و انتقال مارپیچی مواد با سپر باز با یک نوار نقاله امتداد یافته در داخل محفظه حفاری را داشته باشد. این سپر قابلیت تبدیل شدن به سپر تعادلی، دوغابی و مکانیزه را دارد[۱۱] .

۳-۸-۷-۲- سپرهای دایره‌ای چند سره[2]

سپرهای دایره‌ای چند سره، شکل خاصی از سپر می‌باشند که مقطع تونل در آنها به شکل دو یا چند دایره همپوشانی شده می‌باشد. نمایی شماتیک از این سپرها در شکل ۳-۱۷ نمایش داده شده است. ایده ساخت این سپر بر اساس ملزومات زمانی و هزینه می‌باشد. به عنوان مثال بمنظور ایجاد فضاهای بزرگ زیرزمینی، عبور دو قطار مترو در کنار هم و غیره. برخلاف فن‌آوری پیچیده این سپر، استفاده از آن دارای مزایای فنی و اقتصادی می‌باشد. یکی از این مزایا ایجاد فضای مفید بیشتر در نتیجه کاهش متراژ حفاری در مقایسه با مقطع تمام دایره‌ای می‌باشد. مزیت دیگر این سپر این است که به دلیل شکل خاص مقطع، تونل می‌تواند نزدیکتر به سطح زمین قرار گیرد که در مناطق شهری مزیت مهمی می‌باشد[۱۱] .

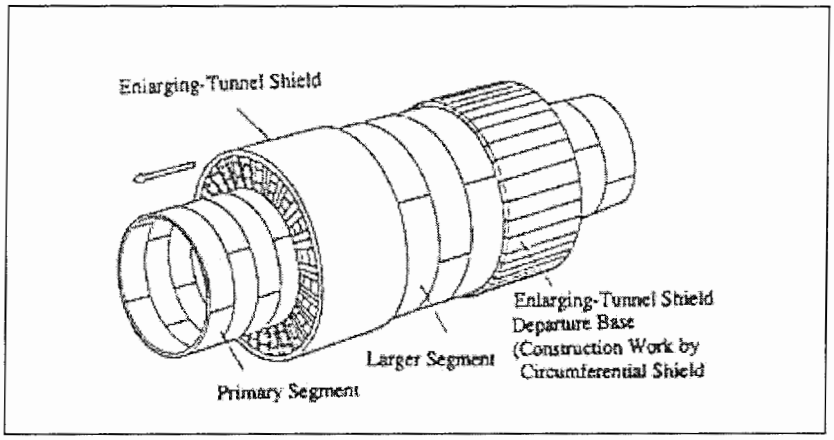


شکل ۳-۱۷- سپر دایره‌ای چند سره [۱۱]

[1] - Poly Shield
[2] - Multi -- Circular Face Shield

۳-۸-۷-۳- سپرهای تعریض کننده[1]

ایده اصلی سپرهای تعریض کننده، بر اساس نیاز به تعریض مقاطع تونل‌های سپری بمنظور رسیدن به اهداف خاص می‌باشد که در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است. این سپرها می‌توانند برای تعریض تونل‌های جدید به عنوان مثال بمنظور ساخت ایستگاه مترو بکار گرفته شوند[۱۱] .



شکل ۳-۱۸- سپر تعریض کننده[۱۱]

۳-۸-۷-۴- سپر عمودی و افقی[2]

سپرهای عمودی و افقی از توسعه ماشین‌های چند سره بوجود آمده‌اند. این ماشین‌ها بمنظور ایجاد و حفر چاه و سپس حفر تونل‌هایی که از یک طرف به زمین راه داشته باشند، ابداع شدند. این سپرها شامل یک کله حفار اصلی بمنظور حفر قائم و یک کره قابل حرکت در زیر سپر بمنظور دستیابی به حفر افقی می‌باشند. پس از حفاری قائم و ایجاد چاه، کره با زاویه ۹۰ درجه در زیر سپر دوران می‌کند و بدین وسیله سپر قادر به حفاری افقی و ایجاد تونل می‌باشد. بنابراین حفر چاه دسترسی و تونل در این روش با یک ماشین امکان‌پذیر است. برخی مزیت‌های این سپر به شرح ذیل است.

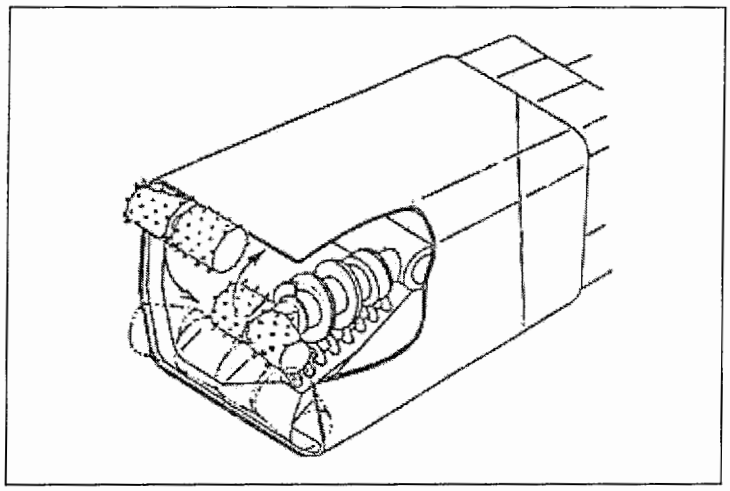
- کاهش زمان ساخت چاه تا ۵۰ درصد.
- افزایش ایمنی بویژه در چاه‌های عمیق، زیرا نیازی به شرایط کار در هوای فشرده نیست.
- چرخش ماشین حفار از چاه به داخل تونل به سادگی میسر می‌باشد.

---

[1] - Enlarging – tunnel Shield
[2] - Horizontal – Vertical Shield

۳-۸-۷-۵- سپرهای غیر دایره‌ای

در شکل ۳-۱۹ یک نوع سپر خاص به شکل چهار گوش نشان داده شده است که از این نوع سپر در مواقع خاص استفاده می‌شود[۱۱] .



شکل ۳-۱۹- سپر چهار گوش [۱۱]

۳-۹- مقایسه بین روش‌های مختلف تونل‌سازی سپری

در جدول ۳-۴ انواع روش‌های تونل‌سازی سپری و میزان کاربرد هریک از آنها در ژاپن آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بیش از ۸۵ درصد کارهایی که در ژاپن انجام شده توسط سپرهای تعادلی و سپرهای دوغابی انجام گرفته‌اند[۱۲] .

جدول ۳-۴- کاربرد انواع سپر در ژاپن (از سال ۱۹۹۲-۱۹۸۷ در ۸۹۳ مورد) [۱۲]

روش تونل سازی سپری	کاربرد (درصد)
سپر تعادلی با فشار زمین	۶۲/۵
سپر دوغابی	۲۳/۳
سپر مکانیزه	۴/۹
سپر نیمه مکانیزه	۴/۴
سپر دستی	۱/۹۹۶
سپرکور	۰/۲۹۶
روش های دیگر	۲/۴

همچنین این نکته قابل ذکر است که کاربرد و محدوده کاری سپر تعادلی با بکار بـردن افزودنـی‌هـای مختلف بسیار گسترده‌تر نیز می‌شود.

۳-۱۰- فرآیند حفر با استفاده از سپر

به جابجایی مواد از موقعیت طبیعی خود حفر گفته می‌شود. حفر می‌بایست با حـداقل اغتـشاش بر روی بافت زمین و کمترین میزان نشست با حداقل ضربه و تماس بر روی لایه‌هـای طبیعـی زمـین صورت گیرد. در تونل‌سازی سپری تنها جبهه‌کار تونل در دسترس است و مقطع تونل در پـشت سـپر قابل تغییر نمی‌باشد. ابعاد جبهه‌کار تونل بوسیله لبه‌های ابزار برنـده در جلـو سـپر محـدود مـی‌شـود. براساس روش حفر بکار گرفته شده، ابزار حفاری با توجه به شرایط زمین انتخاب می‌شود[۱۱].

۳-۱۰-۱- روش‌های حفر تونل

حفاری در تونل‌سازی سپری توسط یکی از روش‌های ذیل اجرا می‌شود:

۳-۱۰-۱-۱- تونل‌سازی بدون ابزار حفر

این روش در زمین‌های بسیار همگن بدون اجزای سخت بطور موفقیت‌آمیز قابل اجرا می‌باشد. خاک‌های سست همگن با مقاومت برشی پایین و رفتار خمیری بالا می‌توانند از طریق دریچه‌های تعبیه شده در جلو سپر به صورت مچاله شده داخل سپر شوند. تحت نیروی جک‌های فشاری، زمین مچاله شده و از دریچه‌های کنترل شده‌ای بر روی سیستم انتقال مواد قرار گرفته و به خارج هدایت می‌شود. به این نوع سپرها، اصطلاحاً سپر کور گفته می‌شود. در تونل‌سازی با این سپرها به منظور اجتناب از نشست سطح زمین، فشار و مقاومت سیستم نگهداری باید بیشتر از فشار زمین با رفتار خمیری باشد. به جز حفاری توسط سپر کور در خاک‌های چسبنده، مواد دانه‌ای نیز بدون ابزار حفاری قابل حفر هستند. در این روش خاک بوسیله سکوهای افقی محافظت شده بطور کنترل شده وارد سپر شده و از مجاری مخصوص به بیرون هدایت می‌شود.

۳-۱۰-۱-۲- حفر دستی

امروزه حفر دستی نقش فرعی را ایفا می‌کند. این روش تنها در طول‌های کوتاه و قطرهای کم و

قابل دسترسی مورد استفاده می‌باشد. در این روش در زمین‌های پایدار از چکش‌های بادی و بیل‌های دستی استفاده می‌شود. تجربه و مهارت‌های فردی عامل مهمی در موفقیت این روش حفر می‌باشند. هر چند که حفر مکانیکی به سرعت جایگزین حفر دستی شده است، انعطاف‌پذیری حفر دستی باعث شده که در حفر مکانیزه برای جابجا نمودن و برداشتن موانعی که ماشین قادر به رفع آنها نیست، از این روش استفاده شود.

۳-۱۰-۱-۳- حفرمکانیکی مقطعی جبهه‌کار

حفر مکانیکی با توجه به شرایط زمین، طول مسیر و نرخ پیشروی مورد نظر به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. با توجه به روش حفر و ماشین مورد نظر ابزار حفاری مناسب انتخاب می‌شود. با انتخاب صحیح ابزار حفر با توجه به تغییرات ناپیوستگی‌ها و لایه‌های زمین می‌توان نرخ حفر با این روش را نسبت به حفر تمام مقطع افزایش داد و در هنگام مواجهه با قطعه سنگ‌های برجا بدون خرد نمودن آنها را از جبهه‌کار تونل خارج ساخت. در این روش تعویض ابزار حفر ساده است؛ زیرا می‌توان به سادگی ماشین حفر را از جبهه‌کار فاصله داد و نسبت به تعویض برش دهنده‌های مستهلک شده اقدام نمود. با ماشین‌های حفر مقطعی ایجاد مقاطع غیر دایره‌ای نیز ممکن است. مهمترین ماشینی که به این روش عمل حفر را انجام می‌دهد، ماشین حفر بازویی می‌باشد. ماشین حفار بازویی شامل یک بازوی برش‌دهنده است که بر روی یک شاسی متحرک سوار شده است. مصالح خرد شده توسط بازوهای جمع کننده بارگیری شده و به یک ناو زنجیری منتقل می‌شوند. حرکت مواد خرد شده در خلاف جهت جبهه‌کار تونل و از طریق ناو رنجیری بطور پیوسته به سیستم انتقال مواد خرد شده انجام می‌شود. سیستم برش این دستگاه در انواع مخروطی و طبلکی می‌باشد. کاربرد برش دهنده‌های مخروطی در سنگ سخت‌های و نوع طبلکی در زمین‌های نرم است.

۳-۱۰-۱-۴- حفر مکانیکی تمام مقطع

تونل‌سازان از دیرباز به این موضوع پی برده‌اند که مقطع دایره‌ای مناسب‌ترین شکل مقطع تونل می‌باشد. این موضوع منجر به توسعه ماشین حفار تمام مقطع شد. این روش حفر مزایای زیر را دارد:

- شکل جبهه‌کار در طول حفر تونل تغییرناپذیر باقی می‌ماند.

- مقطع تونل در اندازه مناسب و بدون شکست اضافی[1] بدست می‌آید.
- از نظر پایداری، مقطع تونل بخصوص از نظر نصب نگهداری بهینه می‌شود.
- می‌توان به نرخ پیشروی بالا دست یافت.

در صورتیکه در اجرای طرح نیاز به تهیه ماشین جدید باشد، حفر تمام مقطع هزینه‌های زیادی را به طرح تحمیل خواهد کرد. هر چند که در حفر در زمین‌های ناهمگن با ماشین‌های حفر بخشی نرخ پیشروی تا حد زیادی به تجربه اپراتور ماشین بستگی دارد، ولی این امر در مورد ماشین‌های حفر تمام مقطع صادق نمی‌باشد. در این ماشین‌ها نرخ پیشروی براساس انتخاب ابزار و میزان نیروی حفر با توجه به شرایط زمین تعیین می‌شود. تغییر شرایط زمین در کارایی ماشین تأثیر زیادی دارد. همچنین تغییر ابزار حفر هزینه‌بر و دشوار می‌باشد.

عملکرد اصلی ماشین حفر تمام مقطع بر پایه چرخش یک کله حفار تجهیز شده به ابزار برش استوار است. کله حفار معمولاً با سرعتی ثابت می‌چرخد و بوسیله نیروی برشی پشت ماشین توسط یک سیستم جلو برنده هیدرولیکی به داخل جبهه‌کار تونل فشار داده می‌شود. در مرکز کله حفار، برش‌دهنده‌ها تمرکز بیشتری داشته و در این بخش عموماً از برش‌دهنده‌های دیسکی استفاده می‌شود. قسمت اصلی جبهه‌کار معمولاً با برش‌دهنده‌هایی از نوع دیسکی یا غلطشی حفر می‌شود. برش‌دهنده‌های لبه‌ای بر لبه خارجی کله حفار نصب می‌شوند که هدف از بکارگیری آنها کندن و حفر تونل به اندازه مورد نیاز است. از آنجایی که کار انجام شده توسط چنین برش‌دهنده‌هایی زیاد می‌باشد، مقاومت آنها در برابر شرایطی که موجب افزایش نرخ ساییدگی می‌شود، ضروری است.

۳-۱۰-۱-۵- حفر هیدرولیکی

در سال ۱۸۷۴ روش حفر با جت‌های کنترل شده سیال ابداع شد. این جت‌ها به منظور حفر در سپر باز مورد استفاده قرار گرفتند. امکان استفاده از این روش در زمین‌های سست جریانی میسر نبود. در سال ۱۹۷۸ با توسعه هیدروشیلد، محلول مناسبی به منظور حفر در زمین‌های سست تهیه شد. این مایع که به منظور نگهداری و انتقال بکار گرفته شد، نقش ابزار حفر را نیز بر عهده داشت. جت‌ها در طول جبهه‌کار و عمود بر جهت پیشروی نوسان می‌کنند. میزان فشار، قطر آبفشان و سرعت گردش آبفشان‌ها نرخ پیشروی را تعیین می‌کنند. دوره برش به سختی زمین و میزان موانع موجود در

1- Over break

محدوده حفر بستگی دارد. به منظور اجتناب از حفر کنترل نشده می‌بایست جت‌ها در داخل سپر قرار گیرند. بنابراین پوسته سپر عمق محدوده حفر را تعیین می‌کند. در این روش، حفر تونل تنها به مقاطع دایره‌ای محدود نمی‌شود.

با استفاده از جت‌های آب با فشار بالا (بیش از ۶۰۰ بار) می‌توان موانع موضعی را منهدم کرد. به منظور کنترل جت‌های فشار بالا و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی، از سیستم هدایت مکانیکی استفاده می‌شود. در زمین‌های چسبنده، جت‌های سیال فشار متوسط جهت حفر و تمیز نمودن ابزار حفر مورد استفاده قرار می‌گیرند[۱۱].

۳-۱۰-۲- انتقال مواد حفاری‌شده

با استفاده از تجهیزات انتقال، مواد حفر شده از جبهه‌کار به سطح زمین منتقل می‌شوند. با توجه به نوع سپر بکارگرفته شده، محتوی مواد حفاری شده متفاوت است. بنابراین روش‌های متفاوتی به منظور انتقال مواد، مورد نیاز می‌باشد[۱۱]:

- انتقال خشک برای موادی که دارای آب نمی‌باشند همانند سپرهای باز و هوای فشرده
- انتقال دوغابی برای موادی که با محلول نگهداری مخلوط شده‌اند همانند سپرهای دوغابی
- انتقال مواد بصورت خمیری همانند سپرهای تعادل فشار زمین که به این روش، انتقال خمیری گفته می‌شود.

تعیین یک سیستم خاص انتقال مواد برای هر یک از سپرها امکان‌پذیر نیست. با توجه به جنس زمین و وجود یا عدم وجود آب و همچنین نوع مواد افزودنی هنگام حفر، نوع انتقال‌دهنده تعیین می‌شود.

۳-۱۰-۲-۱- آماده‌سازی مواد حفر شده برای انتقال

خصوصیات مختلف مواد حفر شده، تجهیزات متفاوت انتقال را می‌طلبد. ابعاد اجزاء جامد و میزان همگن بودن مواد حفر شده اهمیت زیادی دارد. در صورتیکه خصوصیات مواد با توجه به سیستم حمل و نقل انتخاب شده مناسب نباشد، نصب تجهیزات خاصی مورد نیاز می‌باشد که از جمله این تجهیزات موارد ذیل قابل ذکر است:

- چکش حفر به منظور خرد کردن موانع موجود در جبهه‌کار تونل

- آبفشان‌های تزریق مایع در محفظه حفاری جهت انتقال دوغابی و خمیری
- بازوهای شستشو دهنده و ورزدهنده نصب شده در داخل محفظه حفاری
- سنگ‌شکن در جلوی نوار نقاله

۳-۱۰-۲-۲- انتقال مواد به بیرون محدوده جبهه‌کار تونل

روش‌های انتقال مواد به خارج جبهه‌کار براساس خصوصیات مواد حفاری شده و نوع روش نگهداری انتخاب می‌گردند. چهار روش عمده به شرح ذیل است[۱۱]:

الف- نوار نقاله

رایج‌ترین روش حمل مواد در سپرها، استفاده از نوار نقاله است. این روش حمل در سپرهای باز و هوای فشرده بیشترین کاربرد را دارد. مواد بعد از کنده شدن از جبهه‌کار، به روش‌های مختلف بر روی نوار منتقل می‌شوند. یکی از این روش‌ها انتقال دستی است. روش دیگر استفاده از نوار نقاله در پایین‌ترین قسمت تونل است که بیل مکانیکی و یا بازوی حفاری بعد از حفر، مواد را بر روی نوار نقاله می‌ریزند و بدین طریق مواد خارج می‌شوند. در دستگاه‌های تمام مقطع بر روی کله حفار دستگاه جعبه‌هایی تعبیه می‌شود که مواد کنده شده را در هنگام چرخش در خود جمع کرده و بر روی نوار منتقل می‌کنند. اما در سپرهای کور، نوار نقاله در زیر دریچه کنترل و تخلیه مواد قرار می‌گیرد و هنگام پیشروی و زمانی که دریچه باز است مواد بر روی نوار نقاله ریخته شده و به قسمت عقب منتقل می‌شوند. توسط هر یک از روش‌های بالا که مواد به نوار منتقل شوند، بعد از طی طول قسمت پشتیبانی سپر، مواد در کامیون یا واگن‌ها بارگیری شده و برای تخلیه به خارج از تونل منتقل می‌شوند.

ب- نقاله زنجیری

نقاله زنجیری از نظر ماهیت و نوع عملکرد تفاوت چندانی با نوار نقاله ندارد. اما ماهیت زنجیری و فلزی آن کمک می‌کند تا در مواردی همانند حمل مواد با شیب بیشتر و انتقال مواد چسبنده که نوار نقاله محدودیت دارد، کارآمد باشد. نقاله زنجیری درشاتل‌ها، دستگاه‌های حفار بازویی، بیل‌های مکانیکی و سپرهای کور بکار می‌رود.

ج- نقاله مارپیچی

این روش که معمولاً با یک نوار نقاله یا نقاله زنجیری و یا حتی پمپ دوغابی همراه است، در سپرهای تعادلی بکار می‌رود. این روش حمل مواد علاوه بر انتقال مواد در هر شیب و جهتی، مزیت بسیار بزرگی دارد که باعث استفاده از آن در دستگاه‌های تعادل فشار زمین شده است. مزیت مزبور کنترل مواد و کنترل فشار در اتاقک فشار می‌باشد.

د- انتقال دوغابی

استفاده از این روش برای انتقال مواد در دستگاه‌هایی که نگهداری جبهه‌کار توسط یک سیال حفاری انجام می‌شود، مرسوم است. در این روش سیال حفاری در اتاقک پشت کله حفار توسط یک پمپ تحت فشار قرار می‌گیرد. سپس مواد حفر شده به همراه سیال توسط پمپ دیگری که در پایین دستگاه قرار گرفته توسط یک رشته لوله به خارج از تونل منتقل می‌شوند و در آنجا توسط سرندها و هیدروسیکلون‌ها، سیال حفاری از مواد جدا شده و توسط خط لوله دیگری به جبهه‌کار منتقل می‌شود. از آنجا که قطر ذرات حفر شده با توجه به محدودیت قطر لوله و پمپ و نیز حمل توسط سیال، باید در محدوده خاصی باشد، لذا یک گریزلی و سنگ‌شکن در جلوی پمپ تعبیه می‌شود.

۳-۱۰-۳- ناتراواسازی و فرآیندهای تزریق در تونل‌سازی سپری

بخش مهمی از ماشین سپر شامل تجهیزات تزریق می‌باشد. تزریق در سپرهای هوای فشرده، دوغابی و فشار تعادلی زمین که به روش قطعه‌گذاری تونل را نگهداری می‌کنند، حائز اهمیت است. تزریق مانع از ورود آب به محدوده سپر شده و از نشست‌های احتمالی جلوگیری می‌کند. با آب‌بند نمودن دنباله سپر به همراه سایر تمهیدات، نگهداری تونل تأمین می‌شود. در این زمینه نصب تجهیزات تزریق به منظور تزریق ملات و دوغاب در پشت پوشش اهمیت زیادی دارد. استفاده از تزریق یک راهکار مناسب برای تونل‌سازی در زمین‌های مشکل‌آفرین به منظور فائق آمدن بر شرایط پیش‌بینی نشده و آماده‌سازی زمین برای بکارگیری سپر می‌باشد[۱۱]:

۳-۱۰-۳-۱- آب‌بند نمودن پشت سپر

در تونل‌سازی سپری به هنگام قطعه‌گذاری، یک حلقه که اصطلاحاً حلقه واکنش نامیده می‌شود، در پشت دنباله سپر باقی می‌ماند. این حلقه در محیط بیرونی به زمین و در محیط درونی به حلقه‌های نگهداری محدود می‌شود. آب‌بند پشت سپر نقش جدا کننده سپر از حلقه پشتیبان را بر عهده دارد. طراحی ارتفاع آب‌بند با توجه به حداقل عرض حلقه پشتیبان صورت می‌گیرد. ضخامت حلقه پشتیبان به طور معمول بین ۷۰ تا ۱۲۰ میلیمتر می‌باشد. در فضاهای بیش از ۲۵۰ میلیمتر از بتن‌ریزی تزریقی استفاده می‌شود.

آب‌بند سپر به منظور آب‌بند نمودن درز موجود در بین دنباله سپر و محیط بیرونی سگمنت‌های نگهداری بکار می‌رود. این تجهیزات باید قابلیت تحمل فشار زیاد ناشی از فشار آب و زمین را داشته باشند.

آب‌بندها انواع گوناگونی دارند از جمله موارد ذیل را می‌توان نام برد:

- آب‌بندهای پلاستیکی
- برس‌های سیمی
- بتن‌ریزی تزریقی با نگهدارنده انتهایی

در سپر حفار تونل‌های متروی شیراز از آب‌بندهای سیمی استفاده شده است.

۳-۱۰-۳-۲- روش‌های تزریق

در حین پیشروی سپر، فضای باقیمانده بین زمین و قوس بیرونی سگمنت‌های نگهداری با تزریق تحت فشار توسط دوغاب پر می‌شود. در این عمل اهداف ذیل دنبال می‌شوند:

- قرارگیری صحیح سگمنت‌ها در محل خود و جلوگیری از وارد شدن تنش خمشی و بار زیاد به آنها
- باقی ماندن تنش زمین در وضعیت طبیعی خود و کنترل نشست سطح زمین
- جلوگیری از تماس مستقیم سگمنت‌های نگهداری با زمین
- ناتراواسازی نگهداری تونل

برخی از روش‌های تزریق به شرح ذیل است[۱۱]:

الف- تزریق از داخل حفره‌های سگمنت‌های نگهداری

در این روش، تزریق از داخل سگمنت‌های نگهداری و عموماً در دو مرحله انجام می‌شود. تزریق اولیه به منظور احاطه نمودن سگمنت‌ها جهت جلوگیری از نشست آنی بکار می‌رود. در صورتیکه تزریق اولیه کافی نباشد، باعث بروز مشکلاتی در جریان حفر تونل می‌گردد. بدین جهت از تزریق ثانویه استفاده می‌شود. با استفاده از تزریق ثانویه، فضاهای خالی باقیمانده در اطراف تونل پر می‌شوند. این فضاها می‌توانند در اثر نشست و کاهش حجم مواد تزریق شده اولیه بوجود آمده و یا از ابتدا وجود داشته باشند. عموماً سیستم تزریق ثانویه در انتهای سیستم پشتیبان و به فاصله ۴۰ تا ۱۰۰ متری سپر قرار می‌گیرد. بکارگیری فشار زیاد در این تزریق منجر به تراکم مجدد زمین حفر شده اطراف تونل می‌گردد.

ب- تزریق از طریق دنباله سپر

استفاده از این روش در زمین‌های فاقد چسبندگی به منظور جلوگیری سریع از نشست زمین دارای مزیت بیشتری می‌باشد. بکارگیری این روش مستلزم استفاده از آب‌بندهای پیشرفته برس سیمی، پلاستیکی و بتن‌ریزی تزریقی با نگهدارنده انتهایی می‌باشد. در این روش فضای ایجاد شده بلافاصله توسط تزریق پر می‌شود. تزریق ثانویه می‌تواند به منظور جلوگیری از نشست در مراحل بعد صورت گیرد.

۳-۱۰-۴- قطعه‌گذاری[1]

همانگونه که اشاره شد در تونل‌سازی سپری با مقاطع دایره‌ای از قطعه‌گذاری استفاده می‌شود. در این روش قطعات پیش‌ساخته در پشت سپر نصب می‌شوند و نگهداری دنباله سپر توسط این قطعات تأمین می‌شود. این قطعات به وسیله بازو در محل خود قرار می‌گیرند.

از آنجا که قطر کله حفار کمی بیشتر از قطر بدنه سپر است، بعد از نصب قطعات پوششی بین دیواره خارجی تونل و زمین، یک حلقه یا فضای خالی بوجود می‌آید. این فضا می‌بایست سریعاً با تزریق پر شود. با استفاده از لاستیک‌های مصنوعی و برخی مواد شیمیایی این قطعات کاملاً آب‌بند می‌شوند.

1- Segmental Lining

۳-۱۱- مزایا و معایب تونل‌سازی سپری

در صورت انتخاب سپر مناسب، تونل‌سازی سپری به عنوان روشی مناسب جهت حفاری در زمین‌های نرم پیشنهاد می‌شود. تونل‌سازی سپری در شریط نامناسب زمین برای مسیرهای طولانی هنگامیکه نرخ پیشروی زیادی مورد نظر باشد و یا مقررات سخت‌گیرانه‌ای در مورد نشست سطح زمین وجود داشته باشد، یک جایگزین مناسب فنی و همچنین اقتصادی برای سایر روش‌های تونل‌سازی می‌باشد. بکارگیری مناسب تونل‌سازی سپری هنگامی امکان‌پذیر است که در طول طراحی در کنار مزایا، معایب آن نیز مورد توجه قرار گیرد. با برخی تدابیر اقتصادی در مورد تونل‌هایی که با سپر هدایت می شوند، در بسیاری از موارد، تونل‌سازی سپری نسبت به ساخت تونل با روش کند و پوش و یا روش‌های سنتی با صرفه اقتصادی بهتری انجام می‌شود.

۳-۱۱-۱- مزایای تونل‌سازی سپری

از مزایای تونل‌سازی سپری موارد ذیل را می‌توان نام برد:

- مکانیزه بودن و نرخ پیشروی بالا
- حفر تمام مقطع در یک مرحله و ایجاد مقطع دقیق برای تونل
- حداقل تأثیر بر سازه‌های سطحی و نشست کم سطح زمین
- ایمنی بالا برای پرسنل
- روش مناسب ساختمانی زیست محیطی، ثابت ماندن سطح آب زیرزمینی و آلودگی صوتی بسیار کم
- کیفیت بالا، آستر بندی بصورت اقتصادی
- حذف نگهداری موقت

۳-۱۱-۲- معایب تونل‌سازی سپری

از معایب تونل‌سازی سپری موارد ذیل قابل ذکر هستند:

- سرمایه‌گذاری بسیار زیاد اولیه
- زمان طولانی آشنایی با دستگاه

- دشوار و پرهزینه بودن تجهیز و آماده‌سازی دستگاه
- اقتصادی بودن تنها در مسیرهای طولانی
- عدم کارایی مناسب در هنگام تغییر ناگهانی شرایط زمین
- عدم شکل‌پذیری برای تونل‌هایی با مقاطع مختلف
- هزینه‌بر بودن تغییر ابعاد مقطع نظیر تعریض

بطور خلاصه می‌توان بارزترین معایب تونل‌سازی سپری را هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالا و انعطاف‌پذیری بسیار کم این روش ذکر نمود.

فصل چهارم

نگهداری تونل ها در زمین های نرم

۴-۱- مقدمه

سیستم‌های نگهداری باید دو ویژگی حفاظت فضای داخل تونل از ورود مواد زمین به داخل آن و آب‌بند بودن در کلیه جهات و همچنین تحمل بارهای استاتیکی و دینامیکی در اثر فشار روباره را داشته باشند. نوع کاربری تونل، ابعاد مقطع تونل و کیفیت سطح دیواره‌های تونل را تعیین می‌کند. تونل‌های راه آهن و راه نیازمند پاکسازی و تهویه می‌باشند. تونل‌های آب می‌بایست دارای سطح دیواره صاف بوده که امکان تعمیرات در حین بهره‌برداری در آنها وجود ندارد. بعضی مواقع می‌بایست تغییر شکل‌های ثانویه در آستربندی غیر صلب در نظر گرفته شود.

طبیعت زمین و میزان بار، بیشترین تأثیر را بر روی انتخاب سیستم نگهداری دارد. نگهداری تونل در حدود یک سوم هزینه‌های عمرانی طرح را شامل می‌شود و بنابراین می‌بایست در این مورد بهینه‌سازی صورت گیرد. در شرایط خاک‌های نرم و وجود آب‌های زیرزمینی، مقطع دایره‌ای بهترین انتخاب می‌باشد. در این مقطع نصب نگهداری دایره‌ای یا حلقه‌های مخروطی و آستربندی کامل تونل به آسانی صورت می‌گیرد.

۴-۲- روش‌های مختلف آستربندی تونل

انواع مختلف آستربندی در سه روش زیر خلاصه می‌شود:

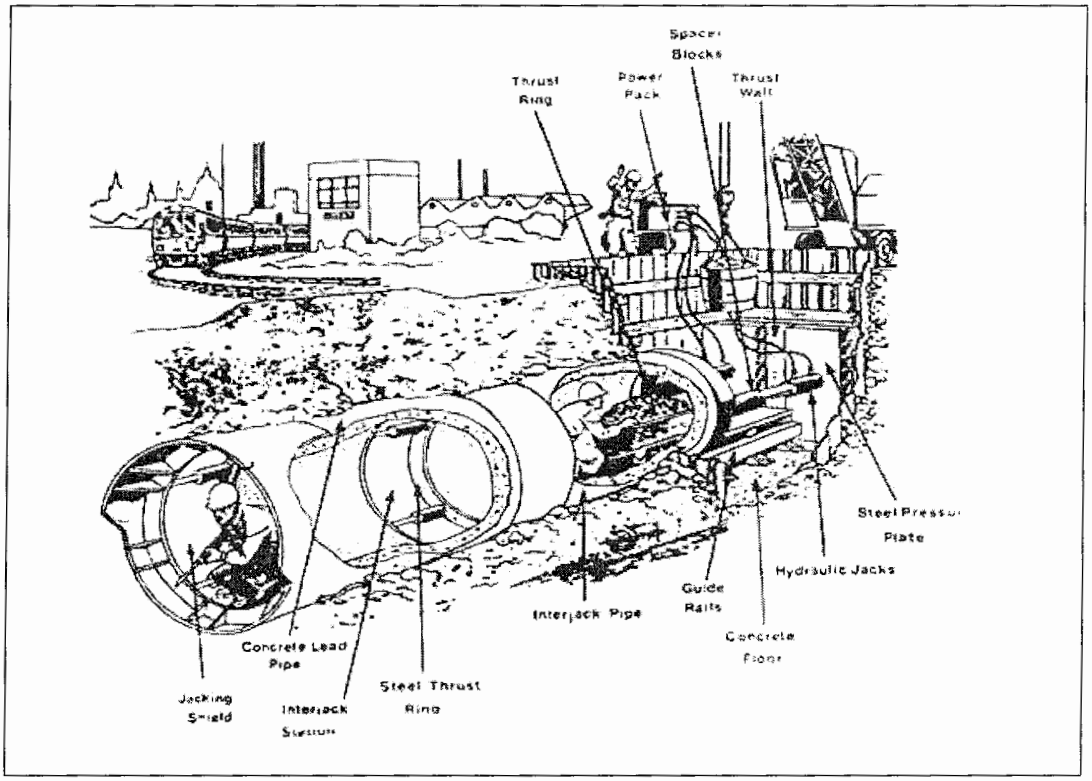
- آستربندی به طریقه لوله‌گذاری[1]
- قطعه‌گذاری[2]
- آستربندی به روش بتن‌ریزی برجا

---

[1] - Pipe Jacking
[2] - Segmental Lining

۴-۲-۱- آستربندی به طریقه لوله‌گذاری

در فرآیند لوله‌گذاری از داخل چاه دسترسی، لوله‌های آماده شده بتنی یا فولادی همزمان با حفر به سمت جلو رانده می‌شوند. نیروی افقی هول دهنده توسط جک‌هایی که به یک مانع یا دیواره قائم تکیه داده شده است به لوله‌ها اعمال می‌گردد. جک‌های هیدرولیک با ظرفیت بسیار بالا لوله‌ها را به سمت جلو هل می‌دهند. لوله‌های بتنی بویژه وقتی که درزگیری آنها انجام شود و یا تزریق دوغاب صورت گیرد، در برابر ورود آب به داخل تونل به خوبی آب‌بندی می‌شوند. لوله‌های فولادی با طول‌های مختلفی برای خطوط لوله گاز، آب و نفت مورد استفاده قرار می‌گیرند. طول این لوله‌ها می‌تواند بیش از ۱۲ متر باشد. در شکل ۴-۱ شمای کلی این روش نشان داده شده است [۲۳].



شکل ۴-۱- شمای کلی روش لوله‌گذاری [۲۳]

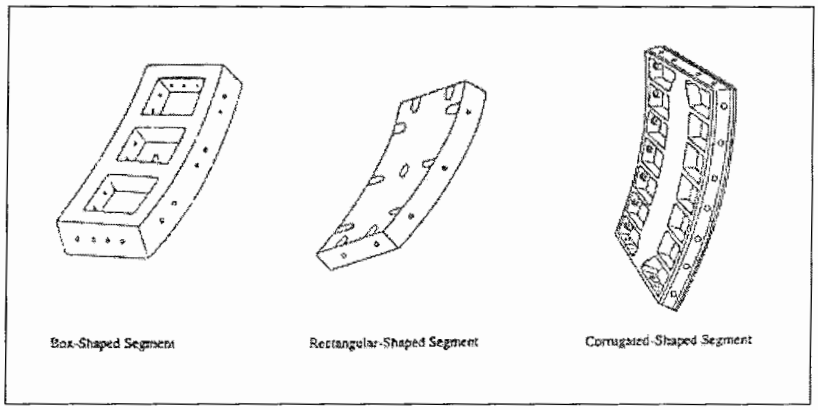
۴-۲-۲- قطعه‌گذاری

همانگونه که اشاره شد در تونل‌سازی سپری با مقاطع دایره‌ای بیشتر از قطعه‌گذاری استفاده می‌شود. در این روش قطعات پیش‌ساخته در پشت سپر نصب می‌شوند و دنباله سپر در پشت این قطعات تأمین می‌شود. این قطعات بوسیله بازو در محل خود قرار گرفته و سپس کاملاً با پیچ محکم

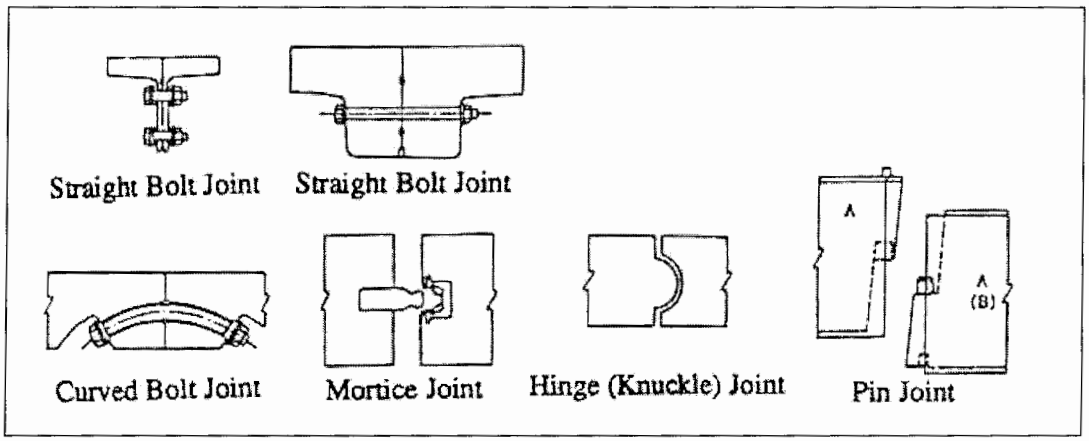
می‌شوند. از آنجا که قطر کله حفار کمی بیشتر از قطر بدنه سپر است، بعد از نصب قطعات پوششی بین دیواره تونل و بدنه خارجی تونل یک حلقه یا فضای خالی بوجود می‌آید. این فضا می‌بایست سریعاً با تزریق پر شود. با استفاده از لاستیک‌های مصنوعی و برخی مواد چسب‌گونه می‌توان این قطعات را کاملاً آب‌بند نمود [۱۲]. انواع قطعه‌های معمول در روش قطعه‌گذاری بصورت ذیل است:

- قطعات فولادی
- قطعات چدنی
- قطعات ساخته شده از بتن مسلح

در شکل ۴-۲ چند نمونه از این قطعات و در شکل ۴-۳ اتصالات این قطعات نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- شکل قطعات پیش‌ساخته جهت نگهداری تونل [۱۲]



شکل ۴-۳- اتصالات بین قطعات پیش‌ساخته [۱۲]

۴-۲-۲-۱- پر کردن پشت قطعات

برای جلوگیری سریع از نشست و ثابت نگه داشتن قطعات باید سریعاً پشت آنها پر شود. در ذیل بطور مختصر کاربرد، خصوصیات و نوع مواد بکار رفته شرح داده شده است.

الف- کاربرد پرکننده‌ها

- جلوگیری از تغییر شکل زمین در انتهای دنباله سپر
- ثابت نگه داشتن قطعه در فشار همسان زمین
- آب‌بندی تونل

ب- خصوصیت پرکننده‌ها

- ته‌نشین نشود
- سریعاً به مقاومت خوبی برسد
- مقاومت همسان و هم ارز با فشار زمین داشته باشد
- سیالیت خوب داشته باشد
- اجرای عالی در پرکردن(در فضای محدود خوب جا بیافتد)
- در مقابل آب عایق باشد

ج- جنس مواد پرکننده

- ملات سیمان
- سیمان و بنتونیت

د- روش‌های پرکردن پشت قطعات

- تزریق از سپر همزمان با حفاری
- تزریق از چال‌های سگمنت همزمان با حفاری
- تزریق از چال‌های سگمنت بعد از حفاری

۴-۲-۳- آستربندی به روش بتن‌ریزی برجا

بتن‌کاری پوشش تونل معمولاً بصورت حلقه یا قسمت‌های متوالی به طول ۱ تا ۶ متر اجرا می‌شود. هر حلقه برحسب روش اجرایی به یکی از سه صورت ذیل انجام می‌شود [۱۲]:

۱- تمام مقطع تونل یکباره بتن‌ریزی می‌شود.

۲- از کف‌بند شروع شده، سپس دیواره‌ها و در نهایت تاق را ساخته می‌شود.

۳- از تاق شروع شده، سپس دیواره‌ها و در پایان کف‌بند ساخته می‌شود.

در زمین‌های سست طریقه اخیر بکار برده می‌شود. بدین ترتیب که ابتدا تاج تونل را خاکبرداری کرده، بلافاصله بتن‌ریزی می‌کنند. سپس قسمت وسط خاکبرداری شده، بتن‌ریزی می شود. در آخرین مرحله کف‌بند بتن‌ریزی می شود. انواع روش‌های آستربندی به روش بتن‌ریزی برجا عبارتند از:

- بتن‌ریزی بوسیله قالب‌بندی
- بتن‌ریزی تزریقی
- بتن‌پاشی و رشته‌های فولادی تقویت کننده بتن

الف- بتن‌ریزی بوسیله قالب‌بندی

در این روش پشت سپر قالب‌بندی شده و بتن‌ریزی در پشت قالب‌ها انجام می‌شود. در زمین‌های پایدار بتن‌ریزی به سادگی در قالب‌ها اجرا می‌شود. در غیر این صورت، بتن‌ریزی در پناه تیغه‌های نازکی صورت می‌گیرد. پیشروی سپر با فشار آوردن جک‌های آن به بتن تامین می‌شود. بنابراین می‌بایست در این هنگام بتن مقاومت کافی پیدا کرده باشد. لذا در این روش اتلاف وقت زیاد بوده و نرخ پیشروی کند می‌باشد. در این روش هر حلقه بتن‌ریزی با اتصال مخصوصی از حلقه دیگر جدا می‌شود.

ب- بتن‌ریزی تزریقی

در این روش در پشت دنباله سپر، بتن بطور مستقیم و بصورت حلقه‌ای به پشت سپر در حال پیشروی تزریق می‌شود. این بتن از یک طرف به محیط زمین، از طرف دیگر به یک قالب متحرک و در انتهای سپر به یک بست انتهایی تماس پیدا می‌کند. بکارگیری رشته‌های فولادی تقویت کننده بتن در این روش بسیار مؤثر است.

ج- بتن‌پاشی و رشته‌ها ی فولادی تقویت کننده بتن

آستربندی به طریقه بتن‌پاشی نیازمند پایداری کافی زمین می‌باشد. بتن‌پاشی در پشت سپر و در قوس درونی فضای حفاری شده صورت می‌گیرد. بکارگیری رشته‌های فولادی بمنظور تقویت بتن در کارایی بهتر این روش مؤثر است.

فصل پنجم

ماشین حفار تمام مقطع EPB

۵-۱- مقدمه

همانطور که در فصل‌های قبل ذکر شد، سپرهای EPB نسبت به سایر سپرها مزایای فراوانی دارند و از این رو استفاده از آنها رو به افزایش است. در کشور ما نیز در متروی شهرهایی چون شیراز و تبریز از این نوع سپرها جهت حفر تونل‌های مترو استفاده می‌شود. از این رو آشنایی بیشتر با این دستگاه‌ها و نحوه عملکرد آنها مفید است. بدین جهت در این فصل به تفضیل در مورد این نوع سپرها بحث و بررسی شده است. لازم به ذکر است سپری که در این فصل بررسی می‌شود، همان سپری است که جهت حفاری متروی شیراز از شرکت NFM فرانسه خریداری شده است.

۵-۲- سپرهای بکار گرفته شده در ایران تا به امروز

اولین سپرهایی که به ایران وارد شدند سه دستگاه TBM ژاپنی ساخت شرکت کومه‌گایی است که قبل از انقلاب در پروژه تونل کوهرنگ ۳ توسط ژاپنی ها بکار گرفته شد. این TBMها با موفقیت روبرو نبوده و زیر خاک و سنگ مدفون شدند. بعدها دو عدد از این دستگاه‌ها بازسازی شده و یکی از آنها در همان پروژه و دیگری در پروژه تونل چشمه لنگان(در استان اصفهان) توسط پیمانکاران ایرانی بکار گرفته شد. دستگاه‌های مذکور از نوع Open TBM و مناسب سنگ‌های سخت بودند و به نظر می‌رسد عدم موفقیت این دستگاه‌ها به خاطر عدم آشنایی کامل با زمین و سنگ‌های مسیر بوده است. چون عمده مسیر تونل در توده‌های سنگی ناپایدار و ریزشی قرار دارد.

یک دستگاه Shield Excavator در پروژه متروی تهران و در کارگاه دردشت استفاده شده است. این دستگاه یک نوع Shield یا سپر مکانیکی ساخت فرانسه و قدیمی می‌باشد.

وزارت نیرو در سال ۱۳۷۲ اقدام به خرید ۴ دستگاه TBM از شرکت Herrenknecht آلمان نمود که به نوبت و به فواصل زمانی ساخته شده و برای پروژه‌های گاوشان، کوهرنگ ۳ و سیروان بکار گرفته شوند. اولین دستگاه از این مجموعه یک دستگاه Open TBM به قطر ۵/۵ متر برای دهانه

خروجی تونل گاوشان بود که در سال ۱۳۷۷ راه‌اندازی شده و تا کنون یک قسمت حدود ۵ کیلومتری از تونل را حفاری نموده و مجدداً مشغول حفاری قسمت دیگری از این تونل می‌باشد. این دستگاه برای سنگ‌های سخت با امکان ریزش کم در نظر گرفته شده است.

دومین دستگاه از این مجموعه یک دستگاه Hard Rock Shield (TBM) به قطر ۵ متر بوده که برای دهانه ورودی تونل گاوشان و مخصوص سنگ‌های نیمه سخت تا سخت ولی ریزشی در نظر گرفته شده است. این دستگاه در سال ۱۳۷۸ وارد کارگاه گاوشان شده، ولی تاکنون مورد استفاده قرار نگرفته و مونتاژ هم نشده است. سومین دستگاه از این مجموعه یک دستگاه Open TBM برای سنگ‌های سخت و غیر ریزشی تونل سوم کوهرنگ می‌باشد که اخیراً مونتاژ و راه اندازی شده است.

یک دستگاه Shield TBM ساخت کارخانه Lovat کانادا با قطر ۴/۶۶ متر از نوع EPB نیز در پروژه تونل خیام تهران از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۷۹ توسط شرکت برزیلی آندارده گوتیرز حفاری ۵/۵ کیلومتر تونل را با موفقیت و سر موقع به پایان رساند و همان دستگاه از سال ۱۳۷۹ تا کنون مشغول حفاری تونل ۶ کیلومتری بهمن‌یار در تهران توسط شرکت ایرانی الموت است (لازم به ذکر است که این دستگاه بصورت EPB استفاده نشده و تقریباً مشابه سپر Open Face عمل نموده است).

سپرهای دیگری نیز هم اکنون در حال خرید یا پیگیری است که برخی از آنها به شرح ذیل هستند:

- یک دستگاه TBM تلسکوپی[1] برای قطعه سوم و چهارم تونل آبرسانی دز به قمرود.

دو دستگاه سپرEPB[2] از شرکت NFM فرانسه برای متروی شیراز خریداری شده که مخصوص حفاری در زمین‌های رسی و سیلتی زیر سطح ایستابی می‌باشند. همچنین حفاری در تونل‌های متروی تبریز نیز که شرایطی مشابه شیراز دارد، توسط دستگاه‌هایی از همین نوع در حال انجام است [۲].

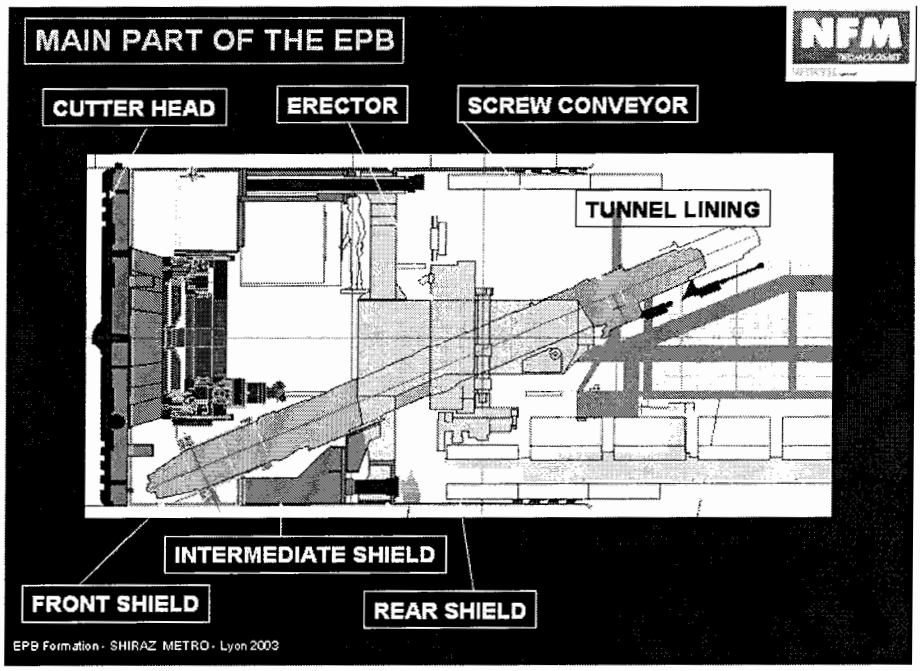
۵-۳- مسایل اصلی و مهم در سپرهای EPB

۵-۳-۱- قسمت‌های اصلی دستگاه

همانطور که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است قسمت های اصلی یک دستگاه EPB عبارتند از [۲۴]:

[1] - Telescopic or Double Shield TBM
[2] - Earth Pressure Balance Shield

- کله حفار[1] که وظیفه حفر را بر عهده دارد. سپر شامل سه قسمت Rear Shield، Intermediate Shield و Front Shield است و وظیفه ایجاد فضای کار و حفاظت از قسمت‌های اصلی دستگاه را بر عهده دارد.
- نقاله مارپیچی[2] که وظیفه حمل خاک از محفظه حفاری و تنظیم فشار اطاقک حفاری را بر عهده دارد.
- Erector که وظیفه نصب سگمنت‌ها را بر عهده دارد.



شکل ۵-۱- قسمت‌های اصلی یک دستگاه EPB [۲۴]

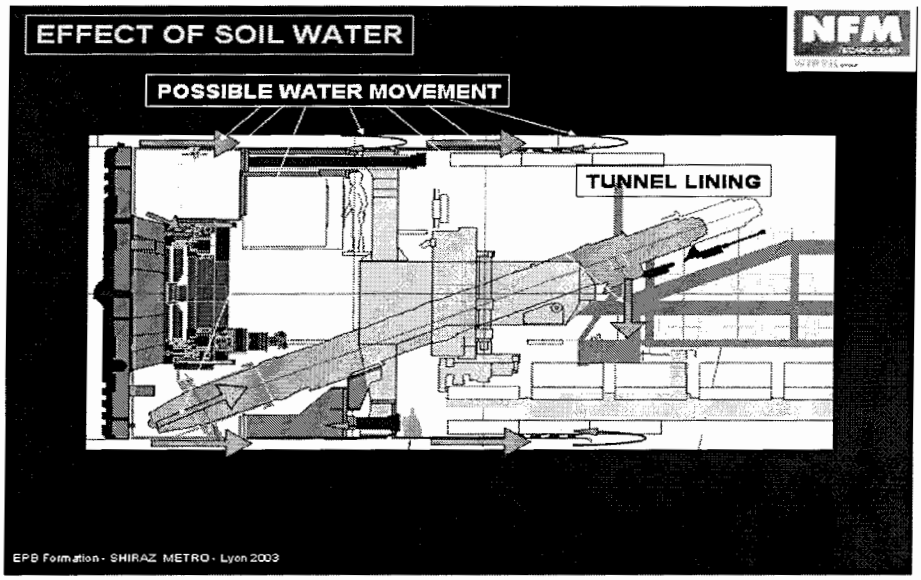
۵-۳-۲- تنظیم فشار در اتاقک فشار

برای تنظیم فشار در داخل اتاقک حفاری، خروج مصالح حفاری شده با تنظیم سرعت چرخش نقاله مارپیچی کنترل می‌شود؛ یعنی تنظیم فشار با کنترل میزان خروجی مصالح امکان‌پذیر است. هرچند که از طریق باز و بسته کردن دریچه نقاله مارپیچی[3] و یا تنظیم آن هم امکان کنترل خروج مصالح حفاری شده و در نتیجه کنترل فشار وجود دارد، اما بهتر است از راه حل اول یعنی تنظیم سرعت چرخش نقاله مارپیچی استفاده شود [۲۴].

[1] - Cutter Head
[2] - Screw Conveyor
[3] - Screw Gate

۵-۳-۳- آب‌بندی دستگاه

با توجه به شکل ۵-۲ محل‌هایی که احتمال ورود آب به داخل دستگاه وجود دارد، مشخص می‌شوند. این قسمت‌ها شامل داخل نقاله مارپیچی و دریچه آن، محل مفصل دستگاه[1]، فاصله بین سپر و سگمنت‌ها در انتهای دستگاه[2] و قسمت یاتاقان[3] اصلی دستگاه می‌باشند [۲۴].



شکل ۵-۲- محل‌هایی که احتمال نفوذ آب به درون دستگاه EPB وجود دارد [۲۴]

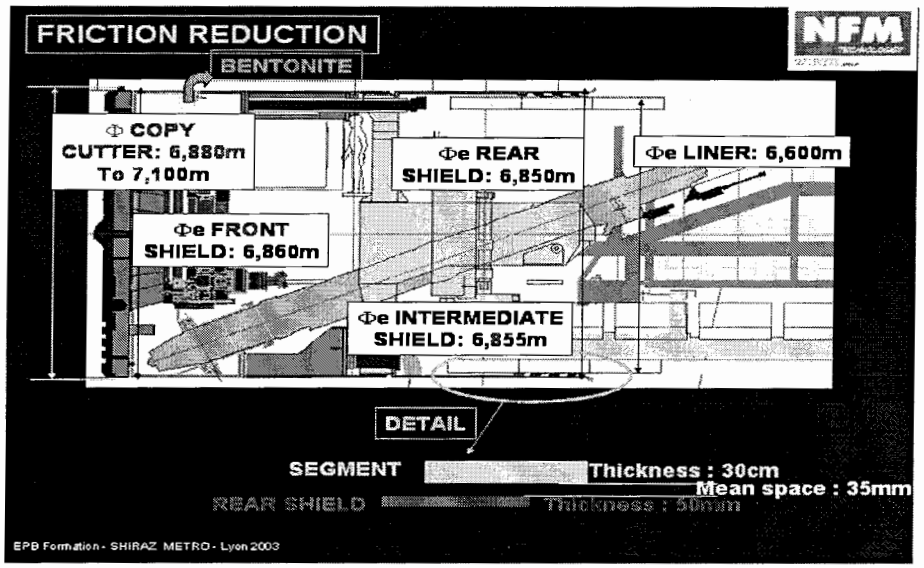
با توجه به اینکه نشت آب به داخل دستگاه و تونل ایجاد مشکل می‌کند، بنابراین در این محل‌ها تمهیدات خاصی جهت آب‌بندی دستگاه پیش‌بینی می‌شود. همانطور که در شکل ۵-۳ ملاحظه می‌شود یاتاقان اصلی دستگاه، مفصل بین دو سپر و فاصله بین سپر و سگمنت‌ها بوسیله تزریق گریس آب‌بندی یا ماستیک آب‌بندی می‌شوند.

آب‌بندی نقاله مارپیچی نیز با تنظیم نفوذپذیری مصالح حفاری شده که در داخل آن حرکت می‌کنند، ممکن می‌شود. بدین صورت که محل‌هایی برای تزریق بنتونیت در داخل نقاله مارپیچی پیش‌بینی شده که در مواقع لزوم می‌توان با تزریق بنتونیت نفوذپذیری مصالح داخل نقاله مارپیچی را کاهش داده و آب‌بندی این قسمت را تضمین نمود.

---

[1] - Articulation Joint
[2] - Tail Shield
[3] - Bearing

الف) سپر را کمی بصورت مخروطی می‌سازند که قطر انتهای آن به مقدار بسیار جزئی از جلوی آن کمتر باشد. به عنوان نمونه می‌توان به دستگاه حفار نشان داده شده در شکل شماره ۵-۴ اشاره نمود. همانطور که مشاهده می‌شود قطر حفاری در این دستگاه ۶/۸۸۰ متر، قطر سپر ابتدایی[1] برابر ۶/۸۶۰ متر، قطر سپر میانی[2] برابر ۶/۸۵۵ متر و قطر سپر انتهایی[3] برابر با ۶/۸۵۰ متر است.



شکل ۵-۴- تفاوت قطر قسمت‌های مختلف سپر برای کم کردن اصطکاک بین زمین و دستگاه [۲۴]

ب) برای کم کردن اصطکاک بین جداره دستگاه و زمین، بین این فاصله بنتونیت تزریق می‌شود. در واقع در قسمت‌هایی از پوسته سپر ابتدایی محل‌هایی برای تزریق بنتونیت پیش‌بینی می‌شود.

۵-۳-۶- قسمت پشتیبانی[4]

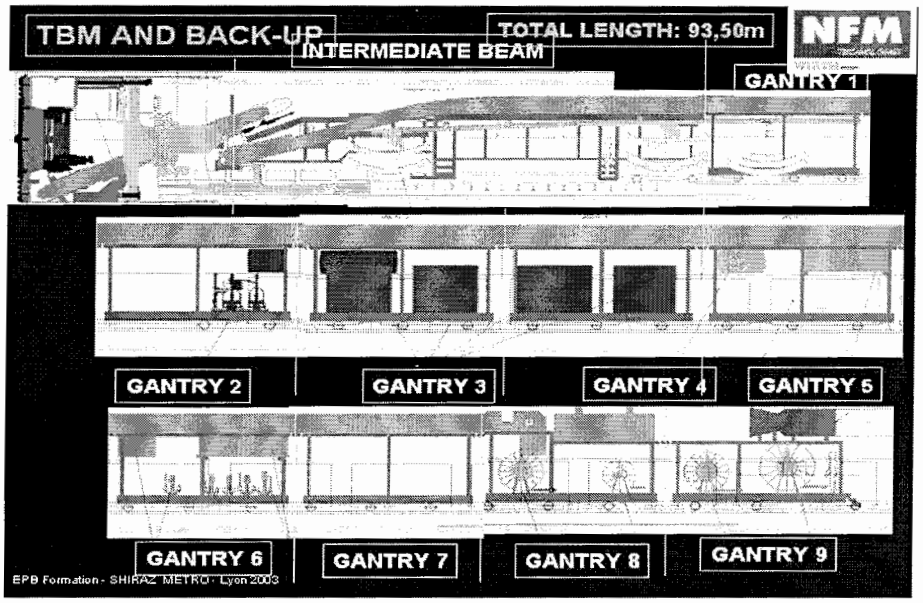
قسمت پشتیبانی دستگاه با طول کل ۹۲/۶۰ متر شامل دو قسمت زیر می باشد که در شکل ۵-۵ نشان داده شده است:

الف) پل ارتباطی[5]

ب) مجموعه Gantryها که روی ریل حرکت می‌کنند و وظیفه حمل قسمت‌های مختلف همانند انواع الکتروموتورها، پمپ‌ها و مخازن هیدرولیک، کمپرسورها، ترانسفورماتورها وغیره را بر عهده دارند.

1- Front Shield
2- Intermediate Shield
3- Rear Shield
4- Back up
5- Intermediate Beam or Connection Beam

پل ارتباطی حد واسط بین سپر و Gantryها است که روی چرخ رولیک حرکت می‌کند و از یک طرف به انتهای سپر و از طرف دیگر به Gantry اول متصل است. وظیفه اصلی این قسمت به غیر از اتصال این قسمت‌ها، ایجاد فضای مناسب جهت نصب ریل و تراورس‌های سیستـــم حمل و نقل و همچنین انتقال سگمنت‌ها به جلوی دستگاه است.



شکل ۵-۵- قسمت‌های مختلف پشتیبانی دستگاه حفار EPB [۲۴]

۵-۴- کله حفار

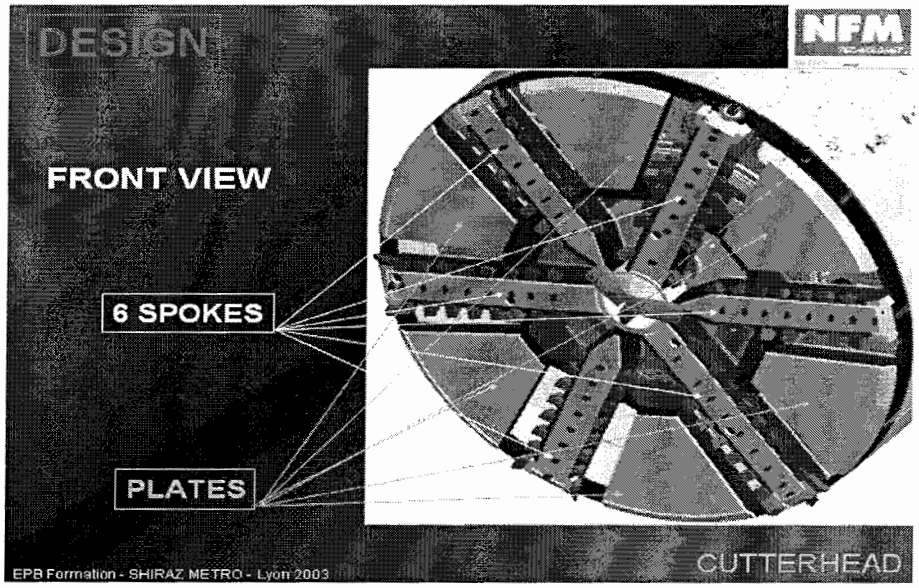
کله حفار یکی از اصلی‌ترین قسمت‌های یک سپر است که مستقیماً با زمین تماس داشته و به عنوان اولین بخش از سپر که با جبهه‌کار برخورد دارد، باعث اعمال نیروی کل دستگاه به زمین و جبهه‌کار مقابل دستگاه می‌شود. ابزار برنده[۱] از انواع مختلف و بسته به جنس زمین روی کله حفار و طبق آرایشی خاص نصب می‌شوند که بریدن، خراش دادن و کندن خاک یا سنگ را بر عهده دارند. ابـــزار برنده در سنـــگ‌ها عمـــدتاً از نوع دیسـکی[۲] و در زمین‌های خاکی و نرم از نوع خراش دهنده یا برنده[۳] هستند [۲۴].

طـــراحی کله حفار بسیار پیچیده و حســـاس است و برای هر نوع زمین و هر پروژه بصورت خاص آن پروژه طراحی می‌شود. روش‌های طراحی و راه حل مسائل عموماً یکی نیستند و روش‌ها و

[1] - Cutter Tools
[2] - Cutter Disc
[3] - Drag and Knife Bits

راه حل‌های متفاوتی برای طراحی وجود دارد. سازندگان مختلف نیز هر کدام روش‌های خاصی را با توجه به تجربیات و سلیقه‌های خود بکار می‌برند.

یکی از مسائل مهم در طراحی کله حفار، درجه یا نسبت بازشدگی صفحه یا کله حفار است که در واقع حاصل تقسیم سطح کل کله حفار به مجموع سطوح باز کله حفار است. توزیع مناسب و آرایش قرارگیری این حفرات یا فضاهای باز(که مصالح کنده شده توسط ابزار برنده از داخل آنها عبور کرده و به اتاقک فشار می‌روند) بسیار مهم است و بایستی بگونه‌ای باشد که خاک کنده شده در حاشیه و مرکز بتواند به راحتی از کله حفار عبور کرده و به اتاقک فشار وارد شود. در دستگاه‌های TBM مخصوص سنگ‌های سخت معمولاً فضای باز به حداقل ممکن می‌رسد و تنها به حاشیه کله حفار محدود می‌گردد. در شکل ۵-۶ قسمت‌های مختلف کله حفار دستگاه EPB متروی شیراز نشان داده شده است. این کله حفار دارای شش بازو[1] است که ابزار برنده روی این بازوها تعبیه شده است.

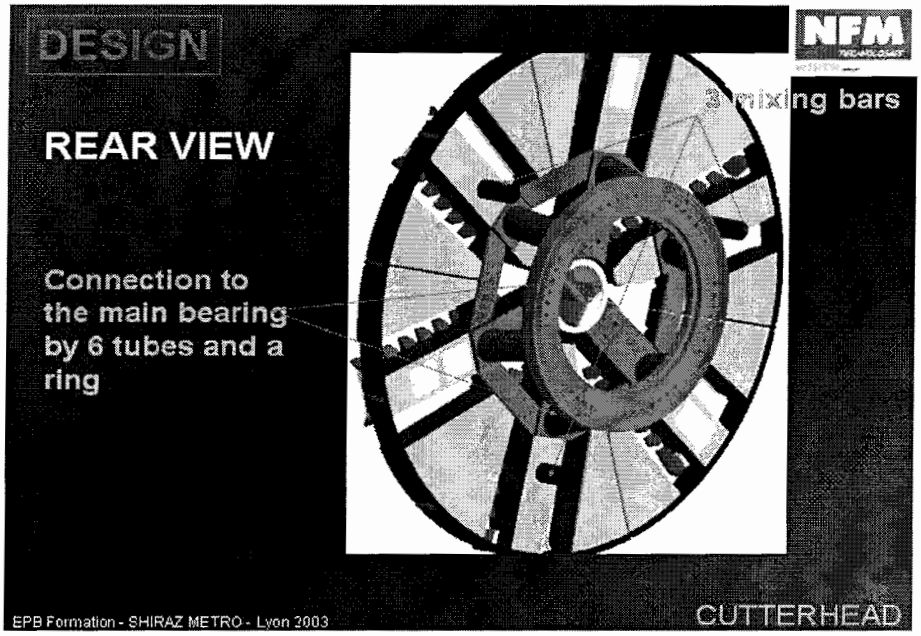


شکل ۵-۶- قسمت‌های مختلف کله حفار دستگاه حفار شیراز [۲۴]

در بین این بازوها، شش صفحه فولادی نیز وجود دارند که میزان بازشدگی کله حفار را محدود می‌کنند. در کله حفار دستگاه مذکور حدود ۳۵-۳۰ درصد فضای خالی در نظر گرفته شده است. فضاهای باز روی کله حفار و میزان بازشدگی‌ها از کناره به طرف مرکز بیشتر می‌شوند. چرا که با وجود سرعت حفاری کمتر در مرکز کله حفار، حرکت و تخلیه مصالح از مرکز بایستی سریعتر انجام

[1] -Spoke

شود. قرارگیری ابزار برنده در روی بازوها به صورتی است که هر دو بازو کل سطح دایره‌ای را پوشش می‌دهد،بنابراین در هر بار چرخش کله حفار کل سطح حفاری ۳ بار توسط ابزار برنده جاروب می‌شود. همانطور که در شکل ۵-۷ نشان داده شده است، کله حفار از پشت توسط شش بازوی قوی لوله شکل به یک رینگ متصل شده است.این رینگ به قسمت چرخنده[1]متصل شده و پیچ و مهره می‌شود [۲۴].

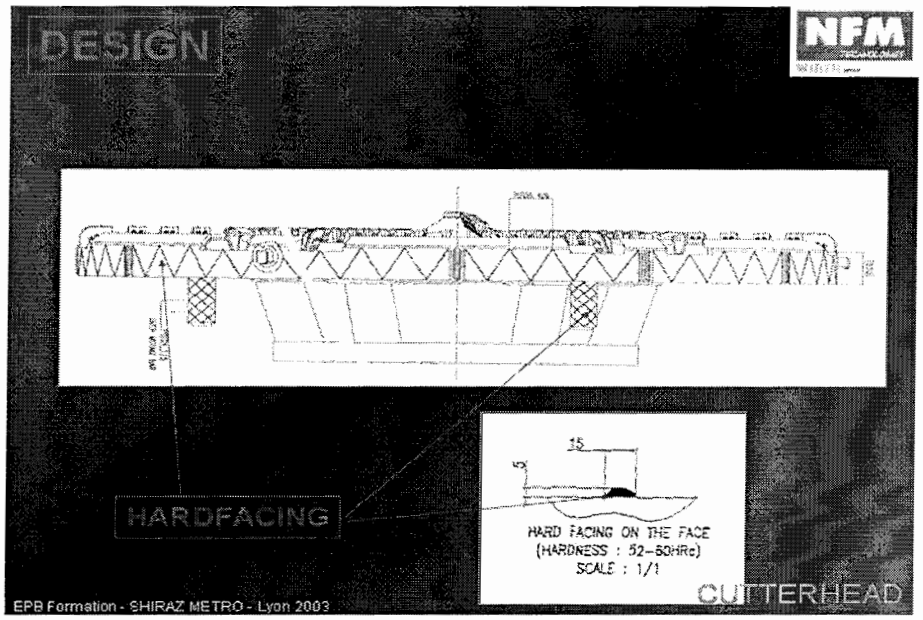


شکل ۵-۷- اتصال کله حفار به رینگ توسط بازوها [۲۴]

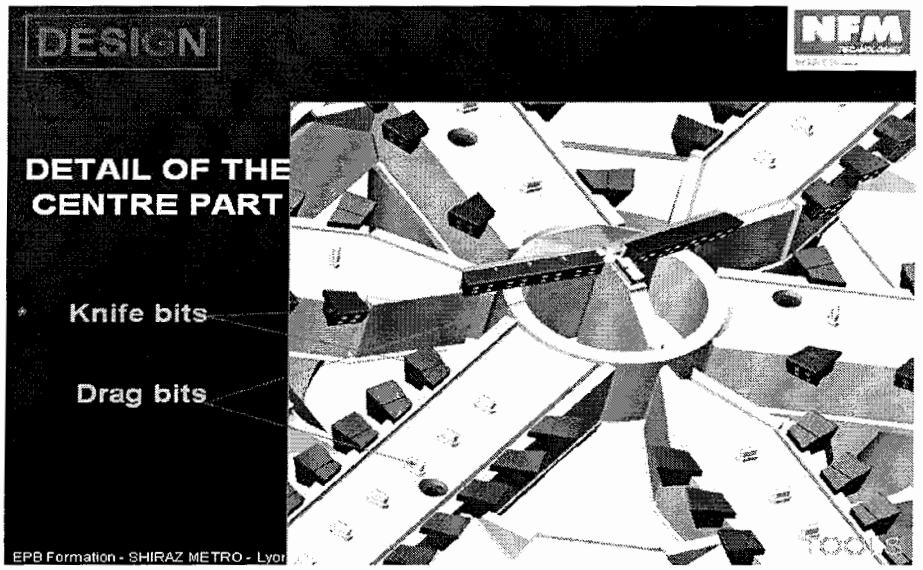
سه استوانه مخلوط کننده مصالح حفاری شده[2] که در پشت سه تا از بازوهای کله حفار قرار دارند، در شکل ۵-۸ نشان داده شده‌اند. قسمت‌هایی از کله حفار و بازوهای مخلوط کننده که درتماس شدید با خاک و در معرض فرسایش شدید هستند، بوسیلـه جوش‌های مخصوص پوشانیده شده‌اند.

ابزار برنده‌ای که روی کله حفار دستگاه شیـراز نصب شده‌اند از دو نوع کلی Knife Bit و Drag Bit هستند که در روی هر کدام از شش بازوی کله حفار و در قسمت مرکزی آن قرار دارند. Knife Bit های حاشیه کله حفار از نوع Bucket Knife Bit هستند که همزمان با کندن خاک وظیفه جهت دادن حرکت خاک به داخل کله حفار را نیز بر عهده دارند.این ابزارها در شکل ۵-۹ دیده می‌شوند.

[1] -Main Bearing
[2] -Mixing Bar

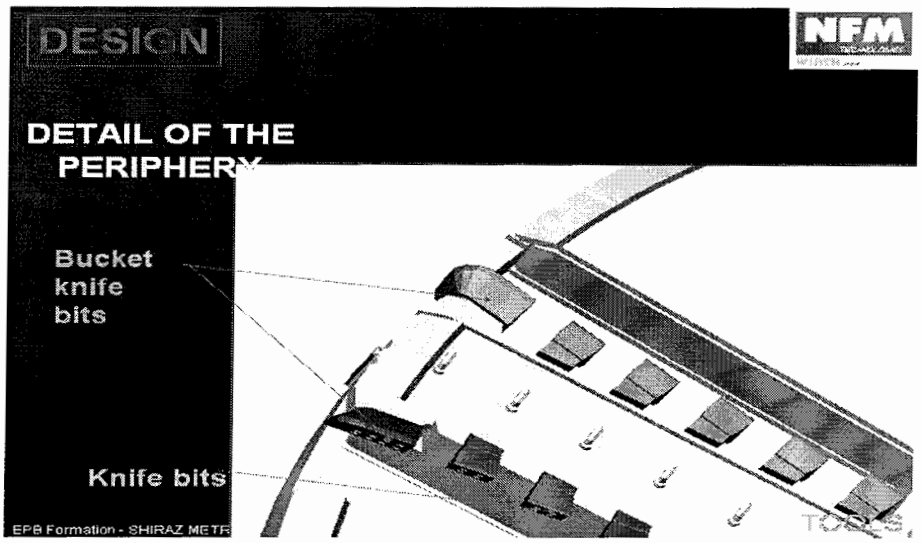


شکل ۵-۸- پوشانیدن قسمت‌هایی که در معرض فرسایش هستند توسط جوش‌های ضد سایش [۲۴]



شکل ۵-۹- ابزار حفاری نصب شده روی کله حفار [۲۴]

Drag Bit ها به بازوهای دستگاه جوش شده و ثابت هستند، ولی Knife Bitها که دارای تیغه برنده از جنس تنگستن-کارباید هستند بوسیله پیچ به بدنه کله حفار متصل شده و از داخل اتاقک حفاری قابل تعویض هستنـد. این ابزارها در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده‌اند.



شکل ۵-۱۰- ابزار حفاری نصب شده ثابت و قابل تعویض روی کله حفار [۲۴]

برای تعویض Knife Bitها، بایستی عملیات خاصی انجام گیرد. بدین ترتیب که اتاقک فشار را تخلیه نموده و فشار هوا را بر آن اعمال می‌کنند تا با فشار زمین مقابله نماید. سپس افراد متخصص از طریق Man Lock و شرایطی شبیه به عملیات غواصی زیر آب وارد اتاقک حفاری شده و اقدام به کنترل و تعویض Knife Bitهای فرسوده می‌نمایند. نحوه قرارگیری پیچ‌های بستن Knife Bitها به بدنه بگونه‌ای است که امکان تعویض از قسمت پشت کله حفار و در داخل اتاقک حفاری را فراهم می‌کند. اما تعویض Drag Bitها از داخل اتاقک حفاری امکان ندارد. چون این ابزارها به قسمت میانی بازوها جوش شده‌اند و دسترسی به آنها از داخل اتاقک حفاری امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ لذا برای تعویض آنها بایستی نقاط جوش کاری شده بریده شوند [۲۴].

۵-۴-۱- تمهیدات خاص بر روی کله حفار دستگاه‌های EPB

۵-۴-۱-۱- Copy Cutter

برای حفاری مناسب در قوس‌ها مسیر تونل، دو تیغه برنده در محیط کله حفار تعبیه می‌شود که در حالت عادی غیر فعال است. این سیستم را بصورت اتوماتیک از داخل کابین کنترل می‌توان فعال کرد و در زاوایای مورد نیاز جهت حفاری اضافه تا ۷۵ میلیمتر آن را بکار گرفت. سیستم به این صورت عمل می‌کند که در هر دور چرخش کله حفار از زاویه مورد نظر باز شده و در زاویه مورد نظر بعدی بسته می‌شود، بنابراین قطاع خاصی از مقطع را می‌توان به اندازه یک هلال مشخص حفاری اضافه کرد.

۵-۴-۱-۲- چرخش در دو جهت

در برخی از دستگاه‌ها، کله حفار قابلیت چرخش در هر دو جهت را دارد. بکارگیری چرخش در هر دو جهت بخاطر جلوگیری از غلطیدن دستگاه است [۲۴].

۵-۵- سپر[1]

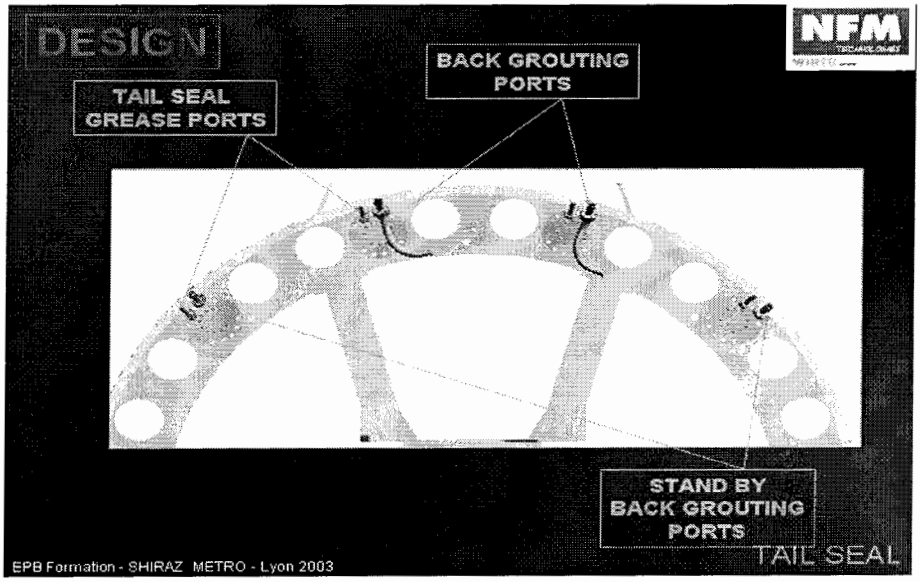
سپر یک استوانه فولادی است که معمولاً مقطع آن قسمتی از دایره و یا کاملاً دایره‌ای شکل است و از ریزش خاک و سنگ و همچنین حرکت زمین به داخل تونل جلوگیری می‌کند. در واقع سپر یک محافظ و سیستم نگهداری است که در داخل زمین حرکت می‌کند. در جلوی سپر یک سیستم حفاری وجود دارد که ممکن است کاملاً دستی یا کاملاً مکانیزه باشد. این قسمت در جلوی سپر حفاری نموده و جا را برای جلو رفتن سپر فراهم می‌کند. در انتهای سپر سیستم جک‌های جلو برنده دستگاه قرار دارند که به پوشش تونل تکیه می‌کنند. پوشش تونل‌ها در این نوع تونل‌سازی معمولاً بصورت پیش ساخته و از جنس بتن است. مقطع سپرها معمولاً دایره‌ای است، ولی مقاطع غیر دایـره‌ای هم در سپرهای باز غیر مکانیکی و یا سپرهای مجهز به سیستم حفاری جزء مقطع مرسوم هستند. سپرها از نظر عملکردی به دو قسمت کلی تقسیم می‌شوند: سپر اولیه و سپر انتهایی یا ثانویه. بخش اول محل قرارگیری سیستم حرکتی کله حفار، تکیه‌گاه جک‌های جلوبرنده، ارکتور و غیره می‌باشد. قسمت انتهایی سپر محل نصب سگمنت (قطعات بتنی پیش ساخته جهت نگهداری دائمی) می‌باشد. در این قسمت جک‌های جلو برنده سپر[2] قرار دارند که کورس جابجایی آنها در این محدوده است و به سگمنت‌های پوشش تونل تکیه کرده و سپر را جلو می‌برند.

۵-۵-۱- آب‌بندی سپر

فاصله بین پشت سگمنت‌ها و جداره داخلی تونل با تزریق گروت پر می‌شود. یکی از خـصوصیات این گروت کمک در آب‌بندی پشت سگمنت‌هاست. امـا فاصـله بـین سـگمنت و داخـل سـپر انتهـایی بوسیله تزریق ماستیک (گریس آب‌بندی) بین بـرس‌هـای سـیمی انتهـای سـپر آب بنـدی مـی‌شـود. لوله‌های تزریق گریس و گروت پشت سگمنت‌ها در شکل ۵-۱۱ نمایش داده شده‌اند. برس‌های سیمی

[1] -Shield
[2] -Thrust Cylinder

در سه ردیف در انتهای سپر بر روی سه ناحیه برجسته نصب می‌شوند. دو شیـــار ایجاد شـــده خـالی بین این برس‌ها توسط ماستیک و تزریق مـــداوم آن پر شده و باعث آب‌بندی این فضا می‌شوند.



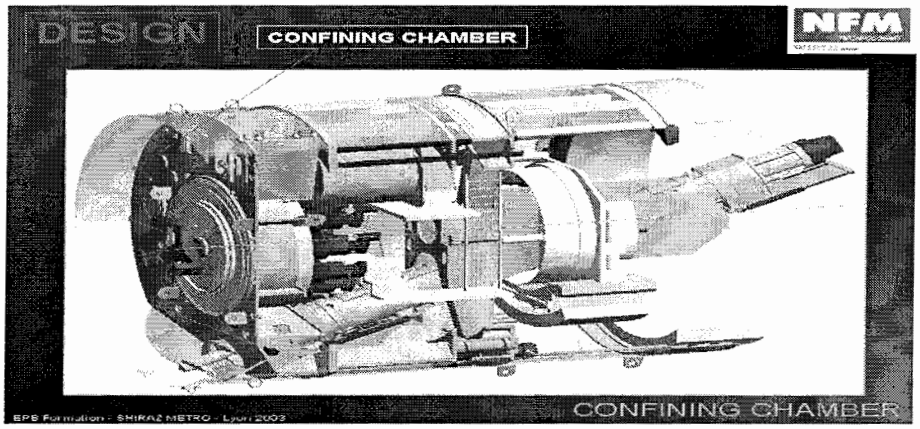
شکل ۵-۱۱- لوله‌های تزریق گریس و گروت پشت سگمنت‌ها [۲۴]

۵-۶- اتاقک فشار[1] (اتاقک حفاری)

اتاقـک فشـــار فضـایی اسـت که بین جبهه‌کار و داخل سپر قرار دارد.اتاقـــک فشار در واقـع محلی است که مصالح حفاری شده از زمین به علاوه موادی که در جلوی کله حفار به آن اضافه می‌شود وارد آن شده و از آنجا به نقاله مارپیچی راه می‌یابند و از طریق آن به داخل تونل حمل می‌شوند. همانطور که در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است ورودی نقاله مارپیچی در پایین اتاقک فشار قرار دارد که مصالح حفاری شده از آن قسمت خارج می‌شوند.

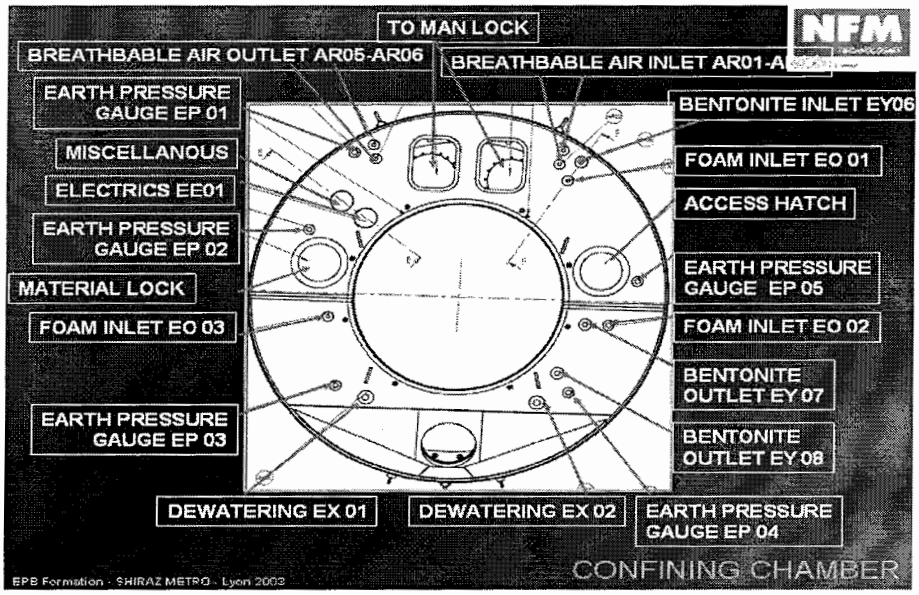
برای این که مصالح حفاری شده در اتاقک فشار خوب مخلوط شده و یک ماده تقریباً هموژن و خمیری باشند، سه بازوی مخلوط کننده[2] پشت کله حفار قرار دارند که وظیفه مخلوط کردن مداوم این مصالح را بر عهده دارند [۲۴].

[1] -Confining Chamber
[2] -Mixing Bar



شکل ۵- ۱۲- محل قرارگیری دریچه نقاله مارپیچی در اتاقک حفاری [۲۴]

در داخل اتاقک فشار تجهیزات مختلفی تعبیه شده‌اند که وظایف مختلفی را بر عهده دارند. این امکانات در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده‌اند. این امکانات در گروه‌های ذیل طبقه‌بندی می‌شوند [۲۴]:



شکل ۵-۱۳- امکانات تعبیه شده در اتاقک حفاری [۲۴]

حس گرهای اندازه‌گیری فشار[1]

این حس‌گرها در نقاط مختلفی نصب شده‌اند تا فشار در قسمت‌های مختلف اتاقک فشار در ارتفاع‌های مختلف و در نتیجه فشار متوسط آن را در هر لحظه اندازه‌گیری کنند. این ابزارها بسیار مهم هستند. چون کل سیستم‌های عملکردی و تنظیمی دستگاه برمبنای فشار اندازه‌گیری شده و متناسب آن با فشار زمین کار می‌کنند.

[1] -Earth Pressure Gauge

مجراهای ورودی فوم و بنتونیت به داخل اتاقک فشار

این مجراها برای تنظیم خصوصیات مکانیکی مصالح حفاری شده و همچنین برای یکنواختی آنها طراحی شده‌اند و بمنظور یکنواخت شدن فشار در داخل اتاقک به مصالح داخل آن فوم و بنتونیت تزریق می‌شود.

دریچه‌های Man Lock

دو دریچه Man Lock در اتاقک فشار باز می‌شوند. وظیفه اصلی این دریچه‌ها برای زمانی است که بایستی نیروی انسانی ماهر برای کارهای خاص مانند کنترل و تعویض Knife Bitها یا کنترل و خارج کردن بولدرهای سنگی و غیره وارد اتاقک فشار شوند. در این حالت بایستی پس از ایجاد کیک بنتونیت با اعمال فشار هوا در محفظه فشار، جبهه‌کار را حمایت کرد. آنگاه نیروی انسانی متخصص و کار آزموده از طریق این دریچه‌ها در حالتی شبیه به حالت غواصی (با اعمال تغییر در فشار هوا بصورت تدریجی) وارد اتاقک فشار شده و یا از آن خارج می‌شوند.

دریچه Material Lock

این دریچه که در سمت چپ اتاقک فشار قرار دارد، برای سرویس دادن و رساندن تجهیزات و خارج کردن آنها در زمان اعمال فشار هوا به جبهه‌کار و حضور پرسنل ورزیده در اتاقک حفاری استفاده می‌شود. چون باز و بسته کردن و اضافه و کم کردن فشار در Man Lock، بصورت تدریجی و بسیار کند انجام می‌شود، از این وسیله که امکان باز و بسته کردن و تغییرات فشار سریع را مهیا می‌کند، استفاده می‌شود.

مجراهای خروجی آب و بنتونیت

این مجراها که در قسمت پایینی اتاقک فشار هستند برای عملیات تعمیراتی و سرویس دهی در داخل اتاقک فشار استفاده می‌شوند.

۵-۷- نقاله مارپیچی[1]

می‌توان نقاله مارپیچی را یکی از مهمترین قسمت‌های دستگاه EPB نامید. تنظیم فشار و حفظ تعادل در اتاقک فشار و خارج کردن مصالح حفاری شده توسط این قسمت انجام می‌گیرد. قسمت‌های اصلی نقاله مارپیچی به شرح ذیل است:

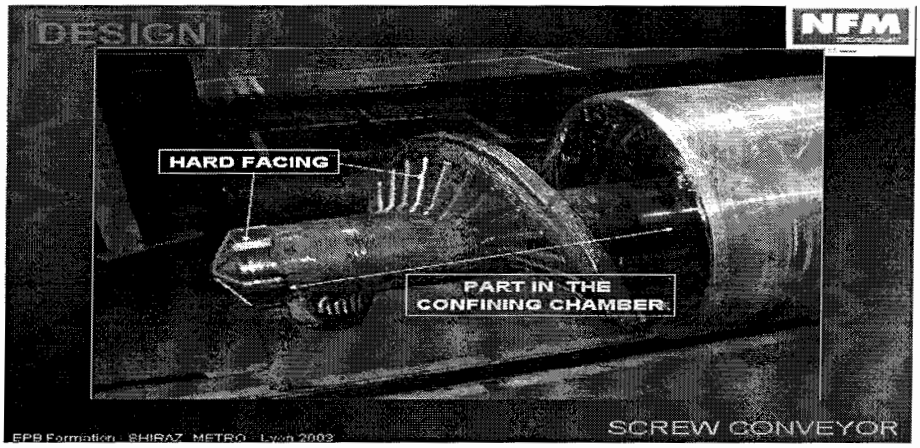
۵-۷-۱- قسمت حلزونی

این قسمت که در داخل پوسته قرار دارد، در شکل ۵-۱۴ نشان داده شده است. حلزونی از فلز سخت ساخته شده است و تمامی بال‌های آن جهت افزایش مقاومت جوشکاری مقاومتی شده‌اند. به علت اینکه بیشترین سایش در لبه‌های حلزونی رخ می‌دهد، لبه‌های حلزونی بوسیله صفحاتی که از نوع فلز بسیار مقاوم در مقابل فرسایش می‌باشند پوشیده می‌شود. اتصال این صفحات به قسمت حلزونی بوسیله پیچ می‌باشد که بنابراین بعد از فرسایش این صفحات قابل تعویض هستند.

قسمت حلزونی قابلیت چرخش در هر دو جهت را دارد. واضح است در زمان حفاری جهت چرخش به یک سمت ثابت و در زمانی که بخواهیم مصالح حفاری شده داخل اسکرو را به داخل اتاقک فشار تخلیه کنیم جهت چرخش اسکرو عکس خواهد شد. فاصله هر گام حلزونی ۶۴۰ میلیمتر و قطر داخلی پوسته که حلزونی در آن قرار دارد ۸۰۰ میلیمتر و بزرگترین اندازه بولدری که می‌تواند از این اسکرو عبور کند برابر ۲۵۰*۴۴۰ میلیمتر می‌باشد.

ابتـــدای حلـزونی در داخـل اتاقـک فشـــار قرار دارد و با تغییر سرعت چرخش حلزونی فشار تنظیم می‌شود. بطوری که در زمانی که فشار اندازه‌گیری شده کمتر از فشار خواسته شده از دستگاه باشد، این بدین معنی است که سرعت چرخش زیاد است و باید سرعت کاهش یابد و در صورتی که فشار اندازه‌گیری بیشتر از فشار خواسته شده باشد، بدین معنی است که سرعت چرخش کم است و جهت رسیدن به فشار مطلوب باید سرعت چرخش زیاد شود.

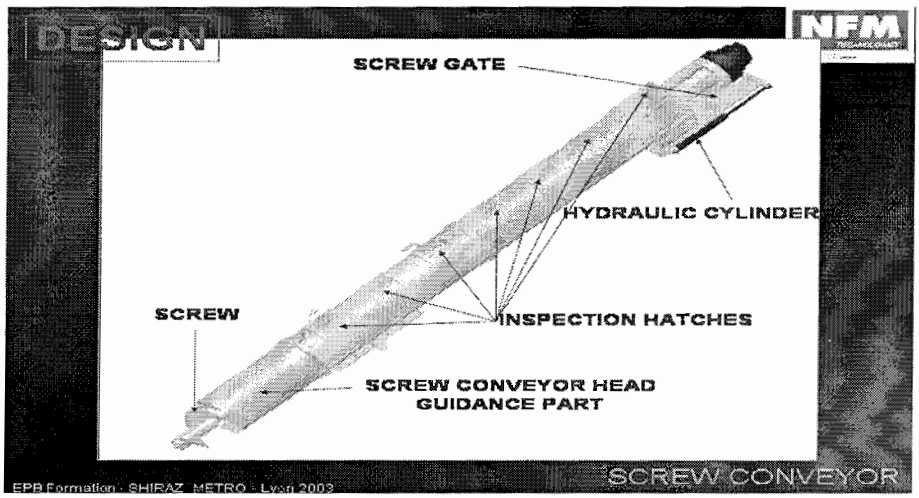
[1] - Screw Conveyor



شکل ۵-۱۴- قسمت حلزونی نقاله مارپیچی [۲۴]

۵-۷-۲- بدنه نقاله مارپیچی

این قسمت که در برگیرنده حلزونی است در دو نقطه بر روی شیلد جلویی و میانی تکیه کرده است. روی بدنه ۷ دریچه بازدید وجود دارد که در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده‌اند. ۶ دریچه از ۷ دریچه مربوط به بازدید و دسترسی به قسمت حلزونـی بمنظور تعمیر و نگهداری می‌باشد [۲۴].



شکل ۵- ۱۵- پوسته نقاله مارپیچی با هفت دریچه برای کنترل و بازدید [۲۴]

در ضمن از این دریچـه‌ها برای خارج کردن مصالح دانه‌درشت گیر کرده مابین گام‌های حلزونی نیز استفاده می‌شود. دریچه هفتم که در انتهای پوسته می‌باشد برای بازدید و تعمیر و نگهداری قسمت کوپلینگ اسکرو می‌باشد.

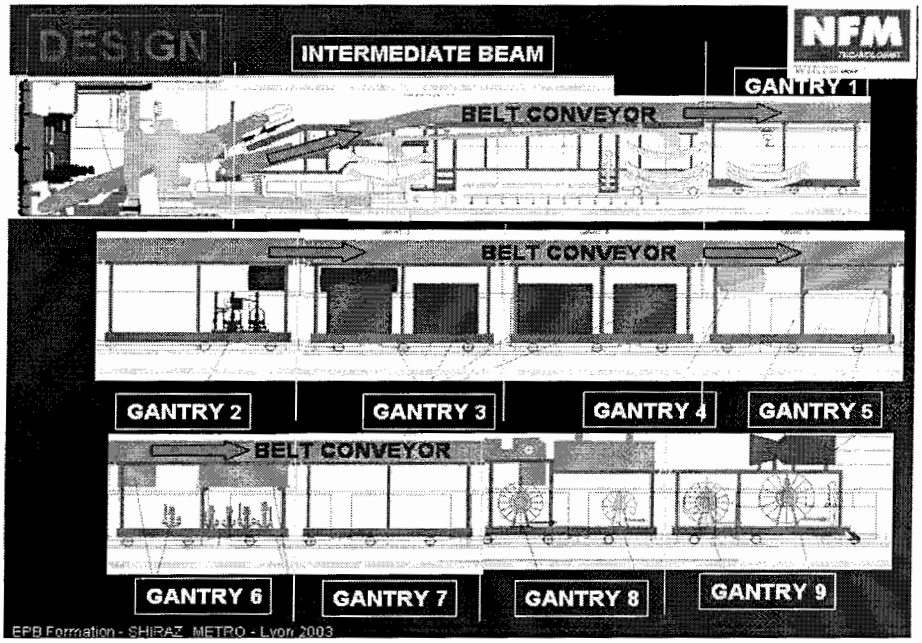
۵-۷-۳- دریچه[1]

این دریچه در قسمت زیر و انتهای نقاله مارپیچی و در بالا و ابتدای تسمه نقاله جهت تخلیه مصالح حفاری شده در داخل نقاله مارپیچی نصب شده است. این دریچه توسط دو جک هیدرولیکی که در دو طرف دریچه قرار دارند باز و بسته می‌شود. مقـدار بازشـدگی دریچه بوسیله یک دستگاه اندازه‌گیری الکتریکی خطی که در روی دریچه نصب می‌باشد اندازه‌گیری شده و مقدار آن بر روی صفحه نمایش در اتاق فرمان ثبت می‌شود. در حد فاصل مابین دریچه و تسمه نقاله حفاظ لاستیکی که در جهت امتداد تسمه نقاله بصورت رشته رشته(به منظور سهولت عبور مصالح حفاری شده) ساخته شده، نصب می‌باشد. این حفاظ باعث می شود تا در زمان تخلیه مصالح از اسکرو به روی تسمه نقاله مصالح حفاری به اطراف پخش نشوند.

۵-۸- تسمه نقاله[2]

این قسمت وظیفه حمل مصالح حفاری شده (خروجی از اسکرو) و هدایت آنها را به داخل واگن بر عهده دارد. در شکل ۵-۱۶ این قسمت از دستگاه نشان داده شده است. تسمه نقاله تقریباً از انتهای شیلد ثانویه شروع و تا گانتری شماره ۸ قبل از تانک بنتونیت ادامه دارد. در انتهای تسمه نقاله جعبه‌ای جهت هدایت مصالح به داخل واگن‌ها وجود دارد. در امتداد طول تسمه نقاله کابل ایمنی وجود دارد که در صورت نزدیک شدن بیش از حد مجاز با تسمه نقاله، تماس با کابل حادث می‌گردد و باعث قطع جریان برق تسمه نقاله و نهایتاً خاموش شدن دستگاه حفار می‌گردد. چرخش کله حفار منوط به روشن بودن و حرکت کردن تسمه نقاله و نقاله مارپیچی می‌باشد. بر روی سازه تسمه نقاله سیستم هشدار دهنده‌ای نصب شده است که اگر نوار تسمه نقاله بیشتر از ۱۵ درجه انحراف پیدا کند این سیستم فعال شده و باعث قطع حرکت تسمه نقاله می‌گردد.

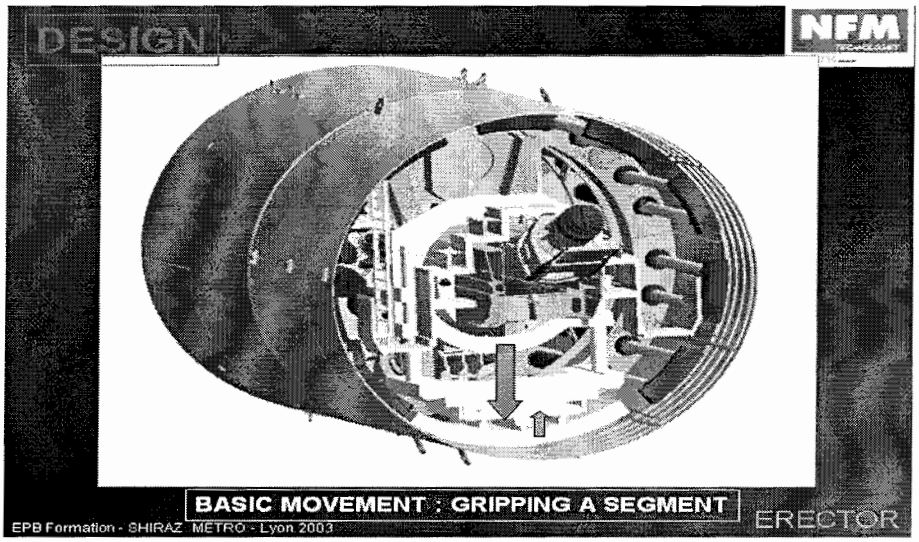
---
[1] - Screw Gate
[2] -Belt Conveyor



شکل ۵- ۱۶- حمل مواد حفاری شده توسط نوار نقاله و هدایت آنها به داخل واگن‌ها [۲۴]

۵-۹- ارکتور[1]

بطور کلی ارکتور وسیله‌ای برای نصب سگمنت‌های پیش ساخته در تونل می‌باشد. در شکل ۵-۱۷ محل قرارگیری ارکتور نشان داده شده است.



شکل ۵- ۱۷- محل قرارگیری ارکتور در دستگاه EPB [۲۴]

[1] - Erector

ارکتور در روی تیر ارکتور در انتهای شیلد اولیه تکیه کرده است. در انتهای تکیه‌گاه قلابی وجود دارد که Connection Beam به آن متصل شده و به دنبال ارکتور کشیده می‌شود. در این قسمت یک سنسور کششی برای اندازه‌گیری مقدار کشش وارده نیز نصب می‌باشد.

حرکت ارکتور به دو حرکت جزئی و کلی تقسیم می‌شود. حرکات جزئی توسط میز ارکتور و حرکات کلی بوسیله شاسی ارکتور انجام می‌گردد. ارکتور با ۶ درجه آزادی توانایی چرخش تا ۲۲۰ درجه در هر دو جهت را دارد.

بعد از گرفتن سگمنت توسط گریپینگ ارکتور، جک‌های بالانس که دارای حرکات بسیار جزئی می‌باشند، در سه نقطه باعث ثابت شدن حرکت سگمنت شده و سپس ارکتور با حرکت چرخشی و طولی، سگمنت را به محلی که باید نصب شود هدایت می‌کند و توسط جک چرخشی جزئی و جک‌های تراست، سگمنت در محل معین قرار گرفته و نصب می‌شود. کنترل ارکتور توسط سیستم رادیویی و سیستم ثابت اضطراری انجام پذیراست.

در حالت کلی برای کنترل ارکتور از سیستم رادیویی استفاده می‌شود که قابل حمل بوده و علاوه بر کنترل کلیه سیستم ارکتور، کنترل جک‌های تراست نیز بوسیله این سیستم رادیویی انجام‌پذیر می‌باشد [۲۴].

منابع

۱- طاهری،عباس.،طاهری،علی. ۱۳۸۰. *کارگاه آموزشی حفاری و تونلسازی مکانیزه و روش لوله‌رانی.* مهندسین مشاور زمین فن آوران.

۲- گروه کنترل EPB.۱۳۸۳. *آشنایی با انواع ماشین‌آلات حفاری تونل.* گزارش بخش حفاری، شرکت ساختمانی بام‌راه.

۳- یاوری، مهدی. ۱۳۸۰. *حفر چاه و تونل.* جزوه درسی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر

4-Anagnostou,G.,Kovarl,K.1994. *The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnels.* Tunnelling and Underground Space Technology,Vol. 9, No. 2, pp. 165-174.

5-Babenderede,S.,Babenderede,L.1996. *Experiences in Mechanized Tunneling ,Tunnel Boring Machine* .Wagner,H & Schvlter,A.International Congress on Mechanized Tunnelling.Italy.

6-Bickel,J.O.,Kuesel,T.R.,Elwyn,H.K.2004. *Tunnel Engineering Handbook.* Second Indian Edition.CBS publishers.

7-Hanamura,T.1996. *State of the art of the Japanese TBM Technology- New Developments, tunnel Boring Mechanics.* Wagner,H & Schvlter,A.International Congress on Mechanized Tunnelling.Italy.

8- Herrknecht,M.,Rehn,U.2003.*Earth pressure balance shield technology.*Internet.

9- Kasper,T.,Meschke,G.2005.*On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunneling.*Tunnelling and Underground Space Technology.

10-Kowari,K.1998. *Tunneling in squeezing Rock.* Internet.

11-Kurihara,K.,Kawata,H.,Konishi,J.1995.*Current practice of shield tunneling methods-A survey on Japanese shield tunneling.*Underground construction in soft ground, Balkema,Rotterdam.PP.329-336.

12-Kurihara,K.1995.*Report on current tunneling methods in Japan.* Underground construction in soft ground.Balkema.Rotterdam, PP.111-125.

13-Lagios,P.,Alifragis,D.,Pergantis,E.1996. *NATM construction of Athens metro station in soft rock.*Proc . North American Tunneling, A.A. Balkema,PP.113-118.

14- Lars Langmaack.2002.Advanced *Technology of Soil Conditioning in EPB Shield Tunnelling.* MBT International,Zurich.

15-Leca,E.,Leblais,Y.,Kuhnhenn,K.2000.*Underground Works in Soils and Soft Rock Tunnelling.*

16-Maild,B.,Herrenknecht,M.,Anheuser,L.1996.*Mechanised Shield Tunnelling*. Emst & Sohn.

17-Mair,R.J.1995.*Aspects of tunneling in soft ground*. PP.13-22. proc. underground construction in soft ground,Balkema,Rotterdam .

18-Mizuno,E.,Hirano,I.,Kataoka,K.1994. *Excavating tunnels of large cross-section with a thin overburden beneath densely populated areas*. Proc. Tunneling and ground conditions, A.A.Balkema,PP.59-66.

19-Oteo,c.,Paramer,J.,Rodriguez,J.,Romana,M.1996. *Construction of twin tunnels 20m width in the Madrid Sands*. North American Tunneling, A.A. Balkema,PP.411-420.

20-Ozsan,A.,Basarır.H.2003. *Support capacity estimation of a diversion tunnel in weak rock*. Int. J. of Engineering Geology .pp 319–331.

21-Twi,k.,Iwasaki,T.,Takekuni,K.1994. *Study on the design of large cross section highway tunnels*. Proc. Tunneling and ground conditions, Balkema, PP.363-370.

22-Walter,C.2001.*Immersed tunnel settlements,Part 1: nature of settlements*.Tunnelling and Underground Space Technology.

23-Whittaker,B.N.,Frith,R.C.1990.*TUNNELLING*.The institution of Mining and Metallurgy,London.

24- Wirth-NFM.2003.*Earth Pressure Balance formation of Shiraz Metro*.lyon