وزارت کشور
سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور
انتشارات

سری منابع آموزشی شهرداری‌ها
۹۴

حفاری و خاکبرداری

تهیه و تنظیم:
معاونت آموزشی
پژوهشکده مدیریت شهری و روستایی
سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور

بسم الله الرحمن الرحيم

حفاری و خاکبرداری

نویسنده:

علیرضا طبرسا

وزارت کشور
سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور
پژوهشکده مدیریت شهری و روستایی

جمهوری اسلامی ایران
وزارت کشور
استانداری خراسان جنوبی

شهرداری بیرجند

سری منابع آموزشی شهرداری‌ها

سرشناسه: طبرسا، علیرضا، ۱۳۵۶ -
عنوان و نام پدیدآور: حفاری و خاکبرداری/ مولف علیرضا طبرسا؛ تهیه و تنظیم معاونت آموزشی پژوهشکده مدیریت شهری و روستایی سازمان شهرداریها و دهیاری‌های کشور؛ مجری استانداری خراسان جنوبی، شهرداری کرمان، پژوهشکده فرهنگ، هنر و معماری جهاد دانشگاهی
مشخصات نشر: تهران: راه‌دان: سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور، انتشارات، ۱۳۹۰
مشخصات ظاهری: ج، ۱۷۴ ص.: مصور، جدول، نمودار
فروست: منابع آموزشی شهرداری‌ها
شابک: ۳-۸۲-۵۹۵۰-۶۰۰- ۹۷۸
موضوع: عملیات خاکی
موضوع: گودبرداری
موضوع: ساختمان‌سازی -- پیش‌بینی‌های ایمنی
شناسه افزوده: استانداری خراسان جنوبی
شناسه افزوده: شهرداری کرمان
شناسه افزوده: جهاد دانشگاهی، پژوهشکده فرهنگ، هنر و معماری
شناسه افزوده: سازمان شهرداریها و دهیاریهای کشور. پژوهشکده مدیریت شهری و روستایی. معاونت آموزشی
شناسه افزوده: سازمان شهرداریها و دهیاریهای کشور. انتشارات
رده بندی کنگره: ۱۳۹۰ ۷ح ۲ط / TA۷۱۵
رده بندی دیویی: ۶۲۴/۱۵۲
شماره کتابشناسی ملی: ۲۷۰۹۵۸۷

عنوان : حفاری و خاکبرداری
ناشر: راه دان، انتشارات سازمان شهرداریها و دهیاریهای کشور
تهیه و تنظیم: معاونت آموزشی پژوهشکده مدیریت شهری و روستایی
مجری: دفتر امور شهری وشوراهای استانداری خراسان جنوبی،پژوهشکده فرهنگ، هنر و معماری جهاد دانشگاهی، شهرداری کرمان شهرداری بیرجند
مدیر پروژه: حسین رجب صلاحی، سیدکاظم اولیایی، عبدالحسین شهابی، جواد وحدتی فرد
ناظر پروژه: جواد نیکنام، علیرضا صفری
نویسنده: علیرضا طبرسا
ویراستار: تهمینه فتح الهی
صفحه‌آرا: فاطمه سادات شاکری
شمارگان: ۳۰۰۰ نسخه
نوبت چاپ: اول
تاریخ چاپ: بهار ۱۳۹۱
قیمت:
شابک: ۳-۸۲-۵۹۵۰-۶۰۰-۹۷۸
نظارت **چاپ:** عقیق ۴-۸۸۹۳۲۴۰۳

حق چاپ و نشر برای انتشارات سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور محفوظ است

پیشگفتار

گسترش شهرنشینی و مسائل و مشکلات خاص زندگی شهری، بیش از پیش ضرورت توجه همه جانبه به راهبردهای سودمند برای بهینه سازی زندگی ساکنان شهرها را لازم ساخته است . در میان عوامل تاثیرگذار در شهرها مانند محیط زیست شهری، حمل و نقل شهری، ایمنی شهری و برنامه ریزی شهری، یک عامل بسیار مهم‌که تاثیر فزاینده و تعیین‌کننده‌ای بر دیگر عوامل سازنده زندگی شهری دارد، مدیریت شهری است . هر فعالیت اجتماعی بدون وجود مدیریت سازمان یافته که اهداف و ابزارهای رسیدن به آنها را مشخص کند و فعالیت‌ها را هماهنگ سازد - از هم می‌پاشد و به بی نظمی می‌گراید . شهرها نیزکه پیچیده‌ترین و متنوع‌ترین جلوه‌های زندگی اجتماعی بشری را در خود دارند بدون وجود نظام مدیریت شهری‌که ضمن انجام برنامه ریزی‌های لازم برای رشد و توسعه آینده شهر به مقابله با مسائل و مشکلات کنونی آنها بپردازد بی سامان می‌گردند .

در نظریه‌های جدید مدیریت، به بالاترین سازمان از نظر کیفیت، سازمان متعالی می‌گویند . یک سازمان زمانی متعالی است‌که تمام اعضا به ماهیت ذاتی و درونی روابط خود اهمیت دهند، بدین معناکه هر فردی برای کارآیی بیشتر از هیچ‌کوششی دریغ نورزد . بر خلاف یک رابطه متقابل خشک و رسمی‌که در آن طرفین به چگونگی تقسیم منافع علاقمندی نشان می‌دهند، اعضاء یک سازمان متعالی و برتر بیشتر مایل اند بدانند چگونه هر یک از آنان می‌توانند نفع بیشتری به سازمان ارائه دهند، افزون بر این، تمامی اعضا سازمان به این موضوع علاقمندندکه چگونه می‌توانند برای افراد خارج از سازمان نیز مثمر ثمر باشند .

نظام مدیریت شهری نیز می‌باید به جایگاه متعالی خود برای خدمات رسانی بهتر به منظور رضایتمندی هر چه بیشتر شهروندان کشور دست یابد . مهمترین راه برای رسیدن به این هدف برای نظام مدیریت شهری دست یابی به جریان دانش و اطلاعات بهتر در جهت اخذ تصمیم مناسب وکاهش خطاها در تصمیم گیری و اجرا می‌باشد . داشتن دانش و اطلاعات از عدم قطعیت در روند تصمیم گیری‌ها می‌کاهد . مهمترین ابزار دست یابی به اطلاعات در جهان امروز متون نوشتاری یا الکترونیک می‌باشدکه اگر

حاصل تلفیق علم و عمل باشند تاثیرگذاری آن به مراتب بر مخاطبین بیشتر خواهد بود . به منظور انتشار دست آوردهای جدید علمی و عملی در زمینه‌های مختلف مدیریت شهری پژوهشکده مدیریت شهری و روستایی سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور با همکاری دفتر امور شهری و شوراهای استانداری خراسان جنوبی اقدام به انتشار کتب آموزشی ای با عناوین زیر نموده است تا گامی هر چند کوچک در ارتقاء سطح علمی شهرداری‌ها کشور برداشته شده باشد .

۱ حفاری و خاکبرداری شهری .

۲ زیر سازی و روسازی راه .

۳ راهسازی و ماشین آلات ساختمانی .

کتاب حاضر با عنوان حفاری و خاکبرداری شهری در چهار فصل تهیه شده است . فصول این کتاب عبارتند از : فصل اول: مقدمه ای بر حفاری و خاکبرداری شهری؛ فصل دوم: اکتشافات زیر سطحی؛ فصل سوم آزمایش‌های صحرایی و ژئوتکنیک و فصل چهارم: فضاهای زیر زمینی .

در پایان از همکاری صمیمانه آقایان سیدکاظم اولیائی معاون امور عمرانی استانداری خراسان جنوبی، حسین رجب صلاحی معاون آموزشی پژوهشکده مدیریت شهری و روستایی سازمان شهرداری‌ها و دهیاری کشور، عبدالحسین خان شهابی مدیرکل دفتر امور شهری و شوراهای استانداری خراسان جنوبی، شهرداری کرمان و پژوهشکده فرهنگ، هنر و معماری جهاد دانشگاهی که در تهیه، تدوین و نشر این کتاب تلاش فراوانی نمودند نهایت تقدیر و تشکر به عمل می‌آید .

محمد رضا بمانیان
رئیس پژوهشکده مدیریت شهری و روستایی
سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور

قهرمان رشید
استاندار خراسان جنوبی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ..... أ
فصل اول: مقدمه‌ای بر حفاری و خاک‌برداری شهری ۱
مقدمه ۳
۱-۱. فرصت ها ۵
۱-۲. تهدیدها ۸
۱-۳. ضعف‌ها ۹
۱-۴. قوت‌ها ۱۰
خلاصه ۱۶
آزمون ۱۶
فصل دوم: اکتشافات زیر سطحی ۱۷
۲-۱. اکتشافات ۲۰
۲-۲. انواع حفاری اکتشافی ۲۲
۲-۲-۱. چاهک دستی ۲۳
۲-۲-۲. ترانشه یا خندق ۲۶
۲-۲-۳. تونل اکتشافی ۲۶
۲-۲-۴. چاه ژرف ۲۷
۲-۲. گمانه زنی ۲۷
۲-۳. انواع نمونه گیرها ۴۰
۲-۳-۱. نمونه گیر قاشقی ۴۱
۲-۳-۲. نمونه گیر پیچشی ۴۱
۲-۳-۳. نمونه گیر جدار نازک ۴۲
۲-۳-۴. نمونه گیر پیستونی ۴۲
خلاصه ۴۳
آزمون ۴۴
فصل سوم: آزمایش‌های صحرایی در ژئوتکنیک ۴۳
۳-۱. حفاری و نمونه برداری ۴۷
۳-۲. آزمایش های صحرایی یا برجا (In situ Test) ۵۰

۳-۲-۱. آزمایش نفوذ استاندارد (S.P.T) ۵۳
۳-۲-۱. تصحیح آزمایش نفوذ استاندارد ۵۶
۳-۲-۱-۲. موارد کاربرد آزمایش نفوذ استاندارد ۵۷
۳-۲-۲. آزمایش نفوذ مخروط (CPT) ۵۹
۳-۲-۲-۱. انواع مخروط ۶۲
۳-۲-۲-۲. آزمایش نفوذ مخروط با تعیین فشار آب حفره ای CPTU ۶۴
۳-۲-۲-۳. آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی SCPT (Seismic Cone Penetration Test) ۶۶
۳-۳. آزمایش لوفران ۶۹
۳-۴. آزمایش‌های آزمایشگاهی ۶۹
خلاصه ۷۱
آزمون ۷۱
فصل چهارم: فضاهای زیرزمینی ۶۹
۴-۱. انواع حفریات زیر زمینی ۷۴
۴-۱-۱. تونل ۷۴
۴-۲. اکتشاف مسیر تونل ها ۸۱
۴-۳. بررسی های مقدماتی ۸۳
۴-۴. تونل زنی و ژئوتکنیک ۸۵
۴-۵ . تعیین شرایط زمین ۸۷
۴-۶. نشست سطح زمین ۹۰
۴-۷. روش های نگهداری تونل ها ۹۱
۴-۸. نگهداری در سنگ ۹۲
۴-۹. نگهداری در خاک ۹۶
۴-۱۰. رفتار سنجی در تونل ها ۹۷
۴-۱۱. روش های حفاری و اجرای تونل ها ۹۷
۴-۱۱-۱. روش چال زنی و آتشباری ۹۷
۴-۱۱ـ۲ . روش چکش هیدرولیکی (Rammer) ۹۸
۴-۱۱-۲-۱. مکانیزم شکست سنگ ۱۰۰
۴-۱۱-۳. ماشین‌های TBM ۱۰۱
۴-۱۱-۳-۱ . معرفی قسمت های مختلف TBM ۱۰۲
۴-۱۱-۳-۲. عملکرد TBM ۱۰۴
۴-۱۱-۳-۳. استفاده از اشعه لیزر جهت هدایت ماشین حفار ۱۰۶

۴-۱۱-۳-۴. عوامل موثر در عملکرد TBM ۱۰۶
۴-۱۱-۳-۵. ویژگی های TBM ۱۰۸
۴-۱۱-۳-۶. ماشین‌های کوچک تونل‌زنی ۱۰۹
۴-۱۱-۳-۷ . دامنه کاربرد ۱۰۹
۴-۱۱-۳-۸ . انتخاب پیشانی برشی ۱۰۹
۴-۱۱-۳-۹. قابل اعتماد بودن TBM ها ۱۱۰
۴-۱۱-۳- ۱۱. قسمت های مختلف ماشین TBM ۱۱۰
۴-۱۱-۳-۱۱. الگوهای چیدمان ابزار برش ۱۲۲
۴-۱۱-۳-۱۲. چنگ زن ها یا کفشک ها ۱۲۴
۴-۱۱-۳-۱۳. جک های رانش صفحه حفار ۱۲۵
۴-۱۱-۳-۱۴. سیستم بارگیری و تخلیه مواد ۱۲۶
۴-۱۱-۳-۱۵. بازوی نصاب ۱۲۶
۴-۱۱-۳-۱۶. سپر صفحه حفار ۱۲۷
۴-۱۱-۳-۱۷. انواع ماشین‌های حفار تمام مقطع ۱۳۱
۴-۱۱-۳-۱۷- ۱. ماشین‌های حفر تونل از نوع باز ۱۳۱
۴-۱۱-۳-۱۷- ۲. ماشین‌های حفر تونل تک سپره ۱۳۴
۴-۱۱-۳-۱۷-۳. ماشین‌های حفر تونل با سپر تلسکوپی ۱۳۷
۴-۱۱-۳-۱۸. انتخاب نوع ماشین ۱۳۹
۴-۱۱-۳-۱۹. مزایا و معایب ماشین‌های تمام مقطع ۱۴۰
۴-۱۱-۳-۲۰. مزایا و معایب TBM تک سپر ۱۴۲
۴-۱۱-۳-۲۱. مزایا و معایب TBM سپر تلسکوپی ۱۴۳
۴-۱۱-۳-۲۲. مقایسه فنی- اجرایی ۱۴۴
۴-۱۱-۳-۲۳. مقایسه هزینه سرمایه گذاری ۱۴۵
۴-۱۱-۴. ماشین حفاری یا کله گاوی یا رود هدر (Road Header) ۱۴۶
۴-۱۱-۴-۱ . قدرت و وزن رود هدر ۱۴۸
۴-۱۱-۴-۲ . انواع برش در رود هدر ۱۴۹
۴-۱۱-۴-۳. توانایی برش رود هدر ۱۵۰
۴-۱۱-۴-۴. مزایای رود هدر ۱۵۱
۴-۱۲. روش تونل سازی اتریشی(NATM) ۱۵۱
۴-۱۳. روش‌های مختلف اجرای محفظه‌های زیر زمینی ۱۵۹
۴-۱۳-۱ . روش دیوار دیافراگمی ۱۶۰

۴-۱۳-۲. روش دیوارشمعی پیوسته ۱۶۴
۴-۱۳-۳. روش مهار متقابل ۱۶۶
۴-۱۳- ۴. روش میخ کوبی خاک ۱۶۷
۴-۱۳-۴-۱. حفاری سوراخ ها جهت قرارگیری میخ ۱۶۸
۴-۱۳-۴-۲. نصب میخ ها و اجرای دوغاب ریزی ۱۶۹
۴-۱۳-۴-۳ . اجرای پوسته موقت ۱۷۰
۴-۱۳- ۴-۴. احداث تراز بعدی خاک‌برداری ۱۷۱
۴-۱۳-۴- ۵ . احداث پوسته دائمی و نهایی ۱۷۱
۴-۱۳-۵. سپرکوبی ۱۷۲
خلاصه ۱۷۳
آزمون ۱۷۴
فهرست منابع و مراجع ۱۷۵

فهرست جداول و اشکال

عنوان **صفحه**

شکل شماره ۲-۱: نمونه ای از یک چاهک دستی ۲۴

شکل شماره ۲-۲: حفر یک چاهک دستی ۲۴

شکل شماره ۲-۳: جزئیات یک چاهک دستی ۲۵

شکل شماره۲-۴: نمونه ای از ترانشه حفر شده به وسیله بیل مکانیکی ۲۶

شکل شماره ۲-۵: نمونه ای از دستگاه حفاری با آب ۲۹

شکل شماره ۲-۶ : نمونه ای از دستگاه حفاری با آب ۳۰

شکل شماره ۲-۷: نمونه های مته مارپیچ تو پر ۳۱

شکل شماره ۲-۸: نمونه های مته مارپیچ توخالی ۳۲

شکل شماره۲-۹: روش حفاری با اعمال ضربه مداوم به خاک ۳۴

شکل شماره ۲-۱۰: کلیات تجهیزات مورد استفاده در حفاری دورانی ۳۵

شکل شماره ۲-۱۱: نمونه ای از دستگاه حفاری دورانی در حال کار ۳۶

شکل شماره ۲-۱۲: تجهیزات دستگاه حفاری، غلاف فولادی، میله حفاری، سر مته حفاری ۳۶

شکل شماره ۳-۱: نمائی از عملیات حفاری و نمونه برداری ۴۸

جدول شماره ۳-۱: مشخصات گمانه های حفر شده ۴۹

شکل شماره ۳-۲: نمائی از عملیات صحرائی[11] ۵۱

شکل شماره ۳-۳: حدود و دامنه کاربرد آزمایش های صحرایی مختلف (بر حسب اندازه ذرات خاک) ۵۲

شکل شماره ۳-۴: مقایسه بین هزینه و کارآیی یا دقت آزمایش های صحرایی مختلف ۵۳

شکل شماره ۳-۵: مراحل مختلف آزمایش نفوذ استاندارد ۵۵

جدول شماره ۳-۲: اصلاح پارامترهای در آزمایش نفوذ استاندارد (N) ۵۶

جدول شماره ۳-۳:دانسیته نسبی خاک‌های دانه ای بر حسب مقادیر عدد نفوذ استاندارد ۵۸

جدول شماره ۳-۴: ارتباط بین سفتی خاک های رسی بر حسب عدد نفوذ استاندارد ۵۸

جدول شماره ۳-۵: حدود تقریبی از مقدار مدول الاستیسیته بر حسب مقادیر عدد نفوذ استاندارد در خاک‌های ریزدانه و درشت دانه ۵۹

شکل شماره۳-۶: تغییرات مقاومت نوک (q_c) با کشش مؤثر قائم (σ'_v) و ۶۱
شکل شماره ۳-۷: مراحل آزمایش نفوذ مخروط ۶۱
شکل شماره ۳-۸: مخروط مکانیکی ۶۲
شکل شماره ۳- ۹: مخروط اصطکاکی الکتریکی ۶۲
شکل شماره ۳-۱۰: مخروط پیزو الکتریک ۶۳
شکل شماره ۳-۱۱: مخروط لرزه ای ۶۳
جدول شماره ۳-۶: انتخاب نوع مخروط لازم در آزمایش ۶۴
شکل شماره ۳-۱۲: وسایل اندازه گیری فشار آب حفره ای در قسمت فوقانی نوک مخروط ۶۵
شکل شماره ۳-۱۳: وسایل اندازه گیری فشار آب حفره ای در قسمت فوقانی نوک مخروط ۶۵
شکل شماره۳ـ۱۴: وسایل اندازه گیری فشار آب حفره ای در قسمت فوقانی نوک مخروط ۶۶
شکل شماره ۳-۱۵: نتایج حاصل از انجام آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی SCPT ۶۷
شکل شماره۳-۱۶: تجهیزات لازم برای آزمایش نفوذ مخروط در سازه های فراحل ساحل ۶۸
شکل شماره۳-۱۷: تجهیزات لازم برای آزمایش نفوذ مخروط در سازه های فراحل ساحل ۶۸
جدول شماره ۳-۷: نتایج آزمایشات لوفران ۶۹
شکل شماره ۳-۱۸: عملیات اندازه گیری سطح آب ۷۰
جدول شماره ۴-۱: طبقه بندی فضاهای زیرزمینی از منظر اهمیت پایداری ۸۳
جدول شماره ۴-۲: مشخصات عمومی حفاری های زیرزمینی ۸۶
شکل شماره ۴-۱: ریزش سقف معادن و حفرات زیر زمینی ایجاد شده در سنگ لایه لایه افقی و جلوگیری از آن توسط سنگ دوزی ۹۳
جدول شماره ۴-۳: رابطه کیفیت سنگ و سیستم حایل مناسب برای تونل ۹۴
جدول شماره ۴-۴: عوامل موثر بر عملکرد TBM و شرایط مرتبط با تونل سازی ۱۰۷
جدول شماره ۴-۵: نرخ پیشروی TBM متناسب با قطر تونل ۱۰۷
شکل شماره ۴-۲: تصویر TBM اولیه ۱۱۱
شکل شماره ۴-۳: قسمت های مختلف ماشین تمام مقطع ۱۱۲
شکل شماره ۴-۴: دستگاه TBM با صفحه حفار پر ۱۱۲
شکل شماره ۴-۵: صفحه حفار ستاره ای مورد استفاده در تونل مترو زوریخ ۱۱۳

شکل شماره ۴-۶: صفحه حفار با ابزار برش مجزا ۱۱۳
شکل شماره ۴-۷: محدوده استفاده از ابزارهای برش ۱۱۴
شکل شماره ۴-۸: هندسه برش ایجاد شده توسط دیسک های برشی ۱۱۵
شکل شماره ۴-۹: فرسوده شدن رینگ خارجی ۱۱۷
شکل شماره ۴-۱۰: افزایش نرخ مصرف دیسک برشی با افزایش نیروی فشاری ۱۱۸
شکل شماره ۴-۱۱: اشکال مختلف استهلاک دیسک های برشی ۱۱۹
جدول شماره ۴-۶ : جدول رده بندی سنگ ها بر اساس قابلیت حفاری به وسیله ماشین‌های تونل کنی ۱۲۲
شکل شماره ۴-۱۲: برنده های دیسکی ۱۲۲
شکل شماره ۴-۱۳: آرایه ابزار برش در صفحه حفار ۱۲۳
شکل شماره ۴-۱۴: ساختمان ماشین و چنگ زن ها ۱۲۵
شکل شماره ۴-۱۵: تصویر جک های رانش صفحه حفار ماشین حفار تلسکوپی ۱۲۶
شکل شماره ۴-۱۶: تصویر سپر هوای فشرده ۱۲۷
شکل شماره ۴-۱۷: تصویر سپر گل ۱۲۸
شکل شماره ۴- ۱۸: مقطع سپر گل ۱۲۹
شکل شماره ۴-۱۹: تصویر سپر EPB ۱۳۰
شکل شماره ۴-۲۰: تصویر سپر های ترکیبی گل و EPB ۱۳۰
شکل شماره ۴-۲۱: تصویر دستگاه TBM تک سپره ۱۳۲
شکل شماره ۴-۲۲: تصویر دستگاه TBM سپردار ۱۳۴
شکل شماره ۴-۲۳: فلوچارت کلی سیکل پیشروی ماشین TBM باز ۱۳۵
شکل شماره ۴-۲۴: فلوچارت کلی سیکل پیشروی ماشین TBM تک سپره ۱۳۷
شکل شماره ۴-۲۵: فلوچارت کلی سیکل پیشروی ماشین TBM با سپر تلسکوپی ۱۳۹
جدول شماره ۴-۷: مفروضات مورد استفاده در پیش بینی سرعت حفاری تونل ۱۴۴
شکل شماره ۴-۲۶: رود هدر ۱۴۸
جدول شماره ۴-۸: مشخصات رود هدرهای تاج مخروطی و تاج طبلکی ۱۵۰
جدول شماره ۴-۹: مشخصات انواع مختلف رود هدر ۱۵۱

شکل شماره ۴-۲۷: مراحل اجرای دیوار دیافراگمی ۱۶۳
شکل شماره ۴-۲۸: نمونه ای از دستگاه حفاری دیوار دیافراگمی ۱۶۴
شکل شماره ۴-۲۹: نحوه چیدمان دیوار شمعی پیوسته ۱۶۵
شکل شماره ۴-۳۰: دستگاه حفاری شمع ۱۶۵
شکل شماره ۴-۳۱: قفسه های آرماتور مورد نیاز شمع درجا ۱۶۶
شکل شماره ۴-۳۲: روش مهار متقابل ۱۶۷
شکل شماره ۴-۳۳: عملیات خاکبرداری با توجه به توانایی خاک در پایدار ماندن بدون مهار ۱۶۸
شکل شماره ۴-۳۴: سوراخ ها با توجه به طول، قطر، جهت و فواصل معین بر اساس طراحی ۱۶۸
شکل شماره ۴-۳۵: سوراخ ها با توجه به طول، قطر، جهت و فواصل معین بر اساس طراحی ۱۶۹
شکل شماره ۴-۳۶: نصب میخ در سوراخ های حفر شده ۱۶۹
شکل شماره ۴-۳۷: نصب میخ ها در سوراخ های حفر شده ۱۷۰
شکل شماره ۴-۳۸: ایجاد پوسته موقت برای ایجاد تکیه گاه و مهار سطح خاکبرداری قبل از مراحل بعدی خاکبرداری ۱۷۰
شکل شماره ۴-۳۹: هم پوشانی بین مسلح کننده های شکریت جهت حفظ یکپارچه گی دیواره ۱۷۱
شکل شماره ۴-۴۰: احداث پوسته و نمای نهایی ۱۷۲
شکل شماره ۴-۴۱: نمونه ای از روش سپرکوبی ۱۷۳

فصل اول

مقدمـــه‌ای بـــر حفـــاری و خاک‌برداری شهری

اهداف

هدف از مطالعه این فصل، آشنایی با مطالب زیر می‌باشد:

۱. تبیین اهمیت مبانی حفاری و خاک‌برداری شهری در پروژه‌های مختلف عمرانی

۲. ایستگاه‌های زیرزمینی مترو، تونل‌های قطار شهری و فضاهای عمومی

مقدمه

در حال حاضر چه موضوعی اجتماعی از اهمیت برخوردار است؟ گروه‌های ذی‌نفع با توجه به محیط، کار و موضوعات مدیریتی به چه میزان سازمان یافته هستند؟ نگرش دولت درخصوص استفاده از خدمات خارجی در گسترش صنعت تونل چیست؟ آیا موانع مهمی در جهت موفقیت صنعت تونل وجود دارد؟

مطابق قانون برنامه چهارم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی، در زمینه استفاده بهینه از منابع آب کشور باید بالغ بر ۴۰۰ کیلومتر تونل، فقط جهت انتقال آب احداث شود. شرایط خاص اقلیمی ایران عموماً خشک و نیمه خشک است و با محدودیت منابع آب روبرو است و هم چنین کوهستانی بودن بیش از نیمی از سرزمین ایران که به صورت رشته‌کوه‌های ممتد و پیوسته فلات ایران را در بر گرفته است، دارای منابع آب فراوانی می‌باشد. [۳]

این شرایط موجب شده تا احداث تونل‌های انتقال آب در ایران مورد توجه بیشتری قرار گرفته و پروژه‌های عظیمی برای رفع نیازهای کشور در دست اجرا یا مطالعه باشند. به طوری که در حال حاضر ۷۰ کیلومتر تونل انتقال آب در دست بهره‌برداری بوده، ۲۲۵ کیلومتر تونل در دست ساخت و بیش از ۱۰۰ کیلومتر در حال مطالعه می‌باشند. با ساخت و بهره‌برداری این تونل‌ها جمعاً بیش از چند میلیارد متر مکعب آب منتقل خواهد شد.

در قرن حاضر، پیشرفت تکنولوژی از یک سو و افزایش روزافزون جمعیت و نیاز آنان به خدمات بیشتر از سوی دیگر، باعث افزایش درخواست برای فضاهای عمومی شده است. از مهم‌ترین نقش‌های این خدمات، شبکه راه‌های درون شهری است. این شبکه باید پاسخ‌گوی جابجایی هزاران خودرو در روز باشد. کافی نبودن راه‌های درون شهری در برقراری ارتباط مناسب، نیاز به احداث تونل‌ها اعم از جاده‌ای و قطارهای زیرزمینی را آشکار می‌کند.

در حال حاضر، امکانات موجود از ایـن نـوع، پاسـخگوی نیازهـای موجـود نیسـت. در دیگـر شهرها، مانند مشهد، اصفهان، تبریز، شیراز و اهواز نیـز بـا فواصـل زمـانی مختلـف، احـداث خطوط مترو آغاز گردیده است.

- فقدان سازمان نظام مهندسی خاص صنعت تونل
- فقدان انسجام در جامعه حرفه‌ای صنعت تونل
- عدم هماهنگی سیستم آموزش عالی با نیازهای توسعه نیروی انسانی صنعت تونل
- پراکندگی نیروها، امکانات و تجهیزات گروه‌های تخصصی

نبود سیستم‌های جامع فاضلاب شهری، تقریبـاً در تمـامی شـهرهای کشـور، مـی‌توانـد زمینه کاری گسترده‌ای را فراهم آورد. در همین راستا نیز طرح‌هـای مختلفـی بـرای ایجـاد فاضلاب شهری در مناطق مختلف کشور در دست مطالعه و اجرا می‌باشد و در بعضی شهرها نیز اقدامات اجرایی مربوط به این طرح‌ها شروع شده است. تهران و رشت نمونه‌هایی از این قبیل هستند. بیست درصد جمعیت ایران در حوزه آبریز تهران زندگی می‌کنند، اما تنها دو درصد منابع آب کشور در این حوزه وجـود دارد. از طرفـی نزدیـک بـه ۷۰ درصـد آب‌هـای سطحی کشور فقط در ۱۶ رودخانه جاری هستند. لذا گریزی از اجرای طرح‌های انتقـال آب نیست. در حال حاضر آب در فاصله حدود ۱۹۵ کیلومتر از زابل به زاهدان منتقل می‌شود. از زاینده‌رود با طی مسافت ۳۳۰ کیلومتر به یزد مـی‌رود، از زرینـه‌رود بـه تبریـز بـا فاصـله‌ای حدود۱۸۰ کیلومتر، از سرشاخه‌های دز در کوه‌های زاگـرس بـه فـلات مرکـزی و شـهرهای مرکزی از جمله قم و چند شهر دیگـر و از منـابع عمـده و متمرکـز آب شـیرین در منطقـه زاگرس به فلات مرکزی. این انتقال آب‌ها براسـاس مطالعـات جـامع صـورت گرفتـه انجـام می‌شود. تا به حال، مطالعات مربوط به ۳۲حوزه فرعی کشـور و هشـت حـوزه اصـلی کشـور انجام شده است. [۳]

۱-۱. فرصت ها

احداث تونل برای مقاصد مختلف از جمله تونل‌های انتقال آب، فاضلاب شهری، راه، راه‌آهن، قطار شهری و فضاهای زیرزمینی، اعم از نیروگاه‌ها، انبارهای عمومی و نظامی، پناه‌گاه هـا و ... هر روز افزایش می‌یابد که مهمترین آنها شامل:

انحراف، انتقال آب و نیروگاهی	۴۲۹ کیلومتر
راه و راه‌آهن	۱۱۵ کیلومتر
قطارهای شهری	۱۹۱ کیلومتر
جمع‌آوری آب های سطحی	۴۰ کیلومتر

جمعاً ۷۷۵ کیلومتر که تا سال ۱۴۰۰، به ۱۸۰۰ کیلومتر افزایش می‌یابد.

شرایط اقلیمی رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس، محور ترانزیت، سرزمین خشـک، شـهرهای در حال توسـعه و تونلهـای شـهری، پـروژه‌هـای پدافنـد غیـر عامـل، موقعیـت ژئوپلتیـک، ژئواستراتژیک و ژئودزی توسعه ایران در سال ۱۴۰۰ بدون توسعه در بخشهای آب، نیروگـاه، راه و ترابری و خدمات شهری، امکان ندارد.

تاکنون فقط ۷۰ کیلومتر تونل انتقال آب در دست بهره‌برداری اسـت، درحـالی‌کـه ۲۲۵ کیلومتر در دست ساخت و ۱۰۰ کیلومتر در دست مطالعه می‌باشد.

مطابق قانون برنامه چهارم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی، جهت استفاده بهینه از منابع آب کشور نیاز به احداث بالغ بر ۴۰۰ کیلومتر تونل انتقال آب می‌باشد، چـرا کـه ایـن میزان با توجه به شرایط خاص اقلیمی ایران که عمومـاً خشـک و نیمـه خشـک اسـت و بـا محدودیت منابع آب روبرو است، امری حیاتی است.

برنامه‌ریزی برای رشد و توسعه فن تونل‌سازی در کشور از طریق استفاده از تکنولوژی روز حفر تونل و بومی کردن آن، تربیت نیروی انسانی و مورد توجه قرار دادن رشته‌های مرتبط با این صنعت، تقویت پیمانکاران مربوطه و تدوین و تنظیم قوانینی که بتواند ریسک‌های ناشی از عملیات اجرایی تونل را برای پیمانکار کاهش دهد.

موقعیت جغرافیایی کشور ایران شرایط ویژه زیر را به وجود آورده که لزوم ایجاد شبکه‌های حمل و نقل کارا، مناسب و استاندارد را ایجاب می‌کند، از جمله این شرایط می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

ـ وجود تنگه هرمز و امکان اتصال دو سوی خلیج فارس و حمل و نقل سریع کالا از این طریق

در صورتی که این شرایط و امکان استفاده از هر یک به عنوان فرصتی مناسب در جهت توسعه حمل و نقل کشور را در کنار جغرافیای کوهستانی ایران مورد توجه قرار دهیم، به نیاز فوق‌العاده کشور به حفر تونل‌های راه و راه‌آهن پی برده می‌شود. در بسیاری از فرصت‌های اقتصادی حمل و نقل ذکر شده، در صورتی که اقدامات فوری و برنامه‌ریزی مناسب برای بهره‌برداری از فرصت‌های اقتصادی حاصل از شرایط ارتباطاتی ذکر شده انجام نشود، مسیرهای ترانزیت کالا از طریق ایران در رقابت بین‌المللی از دست خواهد رفت. اهمیت این اقدامات هنگامی بیشتر آشکار می‌شود که بدانیم طول تونل‌های بزرگتر از ۱/۵ کیلومتر جاده‌ای در ایران، کمتر از ۰/۵ درصد این تونل‌ها در جهان با شرایط یکسان جغرافیایی می‌باشد.

نزدیک به ۵۵ کیلومتر تونل با کاربری راه در حال بهره‌برداری است که اگر ۱۰ درصد خطا به علت نواقص جمع‌آوری و دسترسی به اطلاعات و عدم انعکاس آخرین وضعیت تونل‌های راه را نیز به این مقدار اضافه کنیم، حدود ۶۰ کیلومتر تونل راه وجود دارد.

البته لازم به توضیح است که در حال حاضر ساخت راه‌های جدید در ایران شتابی بیش از پیش گرفته که در مجموعه آنها تونل‌های متعددی نیز وجود دارد. از جمله مهم‌ترین این تونل‌ها می‌توان به تونل‌های آزادراه تهران ـ شمال و آزادراه تهران ـ رودهن اشاره کرد.

احداث نیروگاه‌هایی هم چون نیروگاه زیرزمینی سد کارون ۳، شهید عباس‌پور، مسجد سلیمان و سایر موارد با احجام حفاری بسیار زیاد از جمله اقدامات موفق و قابل توجه در این زمینه بوده است. در حال حاضر نیز احداث شفت‌های نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه‌بیشه و فضاهای زیرزمینی نیروگاه سیمره، از جمله موارد قابل توجه دردست اقدام می‌باشند.

تا آغاز سال ۱۳۸۴ تعداد سدهای در دست بهره‌برداری در قالب سدهای بتنی و خاکی مخزنی به ۱۵۷ سد رسیده و تعداد سدهای در دست اجرا نیز به ۸۴ سد، در ابتدای سال ۱۳۸۴، افزایش یافته است. در حال حاضر ۱۶۰ سد نیز در مرحله مطالعاتی قرار دارند. بالطبع تونل‌های مرتبط با آنها حجم قابل ملاحظه‌ای از کار را شامل می‌شوند.

شرایط آب و هوایی خشک باعث شده است که احداث تونل‌های انتقال آب در ایران مورد توجه بیشتری قرار گرفته و پروژه‌های عظیمی برای رفع نیازهای کشور در دست اجرا یا مطالعه باشند. به طوری که در حال حاضر ۷۰ کیلومتر تونل انتقال آب در دست بهره‌برداری بوده، ۲۲۵ کیلومتر تونل در دست ساخت و بیش از ۱۰۰ کیلومتر در حال مطالعه می‌باشند. با ساخت و بهره‌برداری این تونل‌ها جمعاً بیش از چند میلیارد متر مکعب آب منتقل خواهد شد.

دولت ایران نیز با توجه به کمبودها و نیاز به فضاهای زیرزمینی در رابطه با کاربردهای مختلف آنها، سرمایه‌گذاری در بخش تونل‌سازی را بالاخص در سال‌های اخیر مورد توجه قرار داده و اتخاذ استراتژی‌های توسعه‌ای، منجر به ایجاد تغییرات اساسی در این بخش شده است. از جمله تحولات مهم چند سال گذشته صنعت تونل ایران احداث فضاهای زیرزمینی

با کاربردهای متفاوت در احجام و طول‌های بسیار زیاد می‌باشد. امروزه پروژه‌هایی در حال انجام است که از لحاظ کمی و کیفی در زمره بزرگ‌ترین سازه‌های زیرزمینی در دستِ احداثِ جهان می‌باشد. علاوه بر توجه دولت به احداث این نوع سازه‌ها در داخل کشور باید به همکاری مشترک با کشورهای همسایه، مانند تونل مواصلاتی انزاب بین ایران و تاجیکستان نیز اشاره داشت. [۳]

۱-۲. تهدیدها

- کاهش بودجه‌های عمرانی و سمت‌گیری بودجه دولت بخش‌های خدماتی
- افزایش ریسک سرمایه‌گذاری در پروژه‌های عمرانی
- فقدان حمایت مالی و معنوی از صنعت تونل و نهادهای مرتبط چون انجمن تونل ایران در برنامه‌های درازمدت
- عدم تصویب سند ملی راهبردی توسعه فن‌آوری صنعت تونل ایران
- عدم اجرای صحیح بندهای اصل ۴۴ قانون اساسی در واگذاری سهام شرکتهای دولتی در بخش صنعت تونل به بخش خصوصی

امروزه بسیاری از سازه‌های مهم و حساس زیرزمینی با رعایت استانداردهای جهانی و با طراحی و اجرای کارشناسان ایرانی به انجام می‌رسد. نکته دیگر در این باره به کارگیری تکنولوژی روز صنعت تونل در پروژه‌های در حال اجرا است. کاربرد روش‌های سنتی در حفر فضاهای زیرزمینی دچار یک روند نزولی شده و به تدریج ماشین‌آلات پیشرفته جایگزین آنها می‌شوند. البته در ایران نیز همانند سایر کشورهای جهان کاربرد این تجهیزات با مشکلاتی همراه است و متخصصان داخلی در جهت سازگاری هر چه بیشتر این ماشین‌آلات با شرایط زمین‌شناسی پروژه‌های مربوط تلاش می‌کنند. [۳]

۱-۳. ضعف‌ها

- فقدان استراتژی و یک سند راهبردی در سطح ملی برای صنعت تونل با توجه به برنامه چشم‌انداز ۲۰ ساله
- فقدان سازمان نظام مهندسی خاص صنعت تونل
- فقدان انسجام در جامعه حرفه‌ای صنعت تونل که با ایجاد انجمن تونل این ضعف در حال کمرنگ شدن است.
- فقدان استانداردهای طراحی و ساخت تونل با توجه به دانش و تکنولوژی‌های جدید
- عدم هماهنگی سیستم آموزش عالی با نیازهای توسعه نیروی انسانی صنعت تونل
- پراکندگی نیروها، امکانات و تجهیزات گروه‌های تخصصی صنعت تونل
- فقدان بانک اطلاعاتی از امکانات و پتانسیل‌های موجود در صنعت تونل

در قرن حاضر، پیشرفت تکنولوژی از یک سو و افزایش روزافزون جمعیت و نیاز آنان به خدمات بیشتر از سوی دیگر، باعث افزایش درخواست برای فضاهای عمومی شده است. از مهم‌ترین نقش‌های این خدمات، شبکه راه‌های درون شهری است. این شبکه بایستی پاسخ‌گوی جابجایی هزاران خودرو در روز باشد.

کافی نبودن راه‌های درون شهری در برقراری ارتباط مناسب، نیاز به احداث تونل‌ها اعم از جاده‌ای و قطارهای زیرزمینی را آشکار می‌کند. در حال حاضر، امکانات موجود از این نوع، پاسخگوی نیازهای موجود نیست. عدم سیستم‌های جامع فاضلاب شهری، تقریباً در تمامی شهرهای کشور، می‌تواند زمینه کاری گسترده‌ای را فراهم آورد. در همین راستا نیز

طرح‌های مختلفی برای ایجاد فاضلاب شهری در مناطق مختلف کشور در دست مطالعه و اجرا می‌باشد و در بعضی شهرها نیز اقدامات اجرایی مربوط به این طرح‌ها شروع شده است.

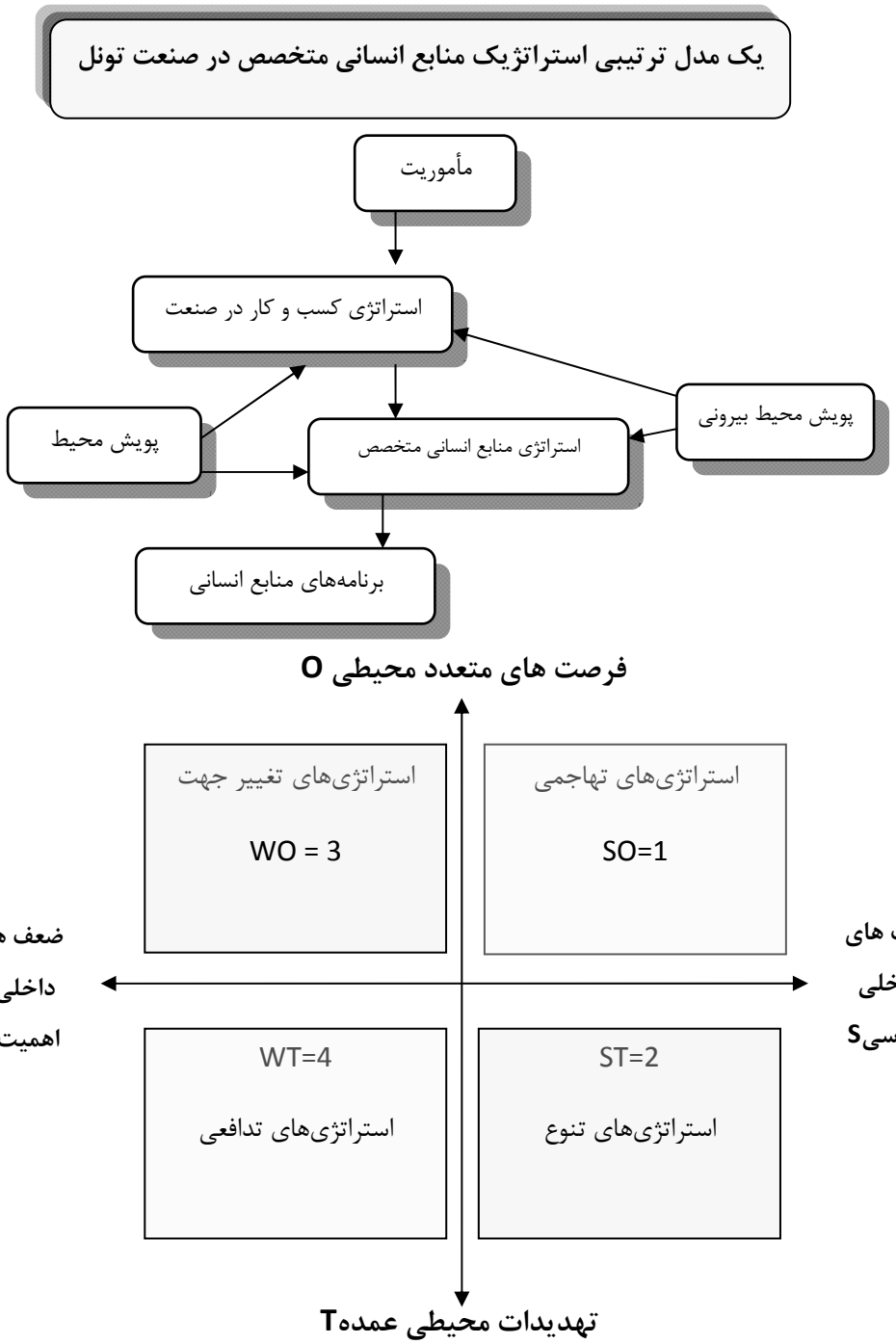
به طور خلاصه می‌توان گفت که کشور ایران در رابطه با در اختیار داشتن فضاهای زیرزمینی با کاربردهای مختلف از جایگاهی مناسب و مطابق با نیازهای خود برخوردار نیست و باید در جهت تدوین یک استراتژی عمومی برای توسعه این امر اقدام شده، پتانسیل‌های تجهیزاتی تونل‌سازی گسترش داده شود [۳].

۱-۴. قوت‌ها

- تجربه‌های طولانی متخصصین و کارگران ایرانی در سال های متمادی در حفر قنات و تونل
- کوهستانی بودن ایران و توجه به حفر تونل در دهه‌های اخیر
- وجود نیروی انسانی ماهر و ارزان
- سمت‌گیری صنعت تونل و مجهز شدن به سیستم‌های مکانیزه حفاری از جمله TBM
- توجه صنعت ایران به تولید ماشین‌آلات تخصصی حفاری تونل
- وجود شرکت های پیمانکاری و مشاور که با شرکت های خارجی، در حال انتقال تکنولوژی و تجربیات می‌باشند.
- برگزاری کنفرانس‌های تونل و سمت‌گیری به علمی‌شدن صنعت تونل

حفاری تونل در مسیر راه‌های مواصلاتی نظیر جاده‌ها و راه‌آهن، انتقال آب و فضاهای زیرزمینی مرتبط با سدسازی و نیروگاه ها از جمله این کاربردها می‌باشد. از طرف دیگر استخراج منابع عظیم معدنی کشور نیز مستلزم انجام حفاری‌های فراوان است. کاربردهای

شهری تونل مانند قطار زیرزمینی، فاضلاب و تونل‌های پیاده‌رو نیز رشد چشمگیری در سال‌های اخیر داشته است.


یک مدل ترتیبی استراتژیک منابع انسانی متخصص در صنعت تونل
مأموریت
استراتژی کسب و کار در صنعت
پویش محیط بیرونی
پویش محیط
استراتژی منابع انسانی متخصص
برنامه‌های منابع انسانی
فرصت های متعدد محیطی O
استراتژی‌های تغییر جهت
WO = 3
استراتژی‌های تهاجمی
SO=1
ضعف های
داخلی با
اهمیتW
قوت های
داخلی
اساسیS
WT=4
استراتژی‌های تدافعی
ST=2
استراتژی‌های تنوع
تهدیدات محیطی عمدهT

طی دو دهه اخیر، صنعت تونل‌سازی و علوم وابسته به آن همانند مهندسی مکانیک سنگ و ژئوتکنیک و ایجاد شبکه‌های ارتباطی درون شهری و نیز گسترش سیستم‌های انتقال آب در کشور جمهوری اسلامی ایران جایگاهی بسیار مهم را دارا بوده است. از طرفی با توجه به چشم‌انداز بیست ساله برنامه‌های توسعه کشور و توجه به ایجاد ساختارهای زیربنایی، این جایگاه در مراتب بالاتری قرار گرفته است.

انجمن تونل ایران به منظور گسترش، پیشبرد و ارتقای فناوری صنعت تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی و توسعه کمی و کیفی نیروهای متخصص و بهبود بخشیدن به امور آموزشی، پژوهشی و اجرایی در زمینه‌های مرتبط با این صنعت تشکیل گردیده است. ایجاد زمینه و تحکیم روابط علمی، تحقیقاتی و فنی در سطح ملی و بین‌المللی و تشویق و ترغیب پژوهشگران و دست‌اندرکاران صنعت تونل‌سازی به عنوان اهم وظایف در اساسنامه انجمن گنجانده شده است.

امروزه در جهان از سه دانش مکانیک خاک، مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی با فناوری اجرا در یک شاخه مهندسی تحت عنوان ژئوتکنیک به کار گرفته می‌شود. همچنین شرکت‌های مختلفی امروز در جمع مشاوران، پیمانکاران، سازندگان و تأمین‌کنندگان مواد و تجهیزات در کشور وجود دارند که زمینه فعالیت آنها در یکی از زیرشاخه‌های ژئوتکنیک قرار می‌گیرد. تعداد و تنوع طرح‌های عمرانی، صنعتی و نفتی در سال‌های اخیر و پیش‌بینی ادامه این روند در سال‌های آینده در کشور، دورنمای مناسبی را برای فعالان بخش ژئوتکنیک ترسیم نموده است.

از ابتدای قرن سیزدهم هجری، احداث اولین تونل‌های راه و راه‌آهن در دستور کار دولت ایران قرار گرفت. در آن زمان به دلایلی احداث راه‌آهن بین شمال و جنوب اولویت یافت. مسیر این خط آهن نیز باتوجه به کوهستانی بودن مسیر آن بالاجبار در بعضی بخش‌ها

منجر به حفر تونل‌هایی شد. اقدامات بعدی در زمینه احداث تونل‌های راه و راه‌آهن با سرعتی نه چندان زیاد ادامه یافت.

حفر تونل‌های انتقال آب نیز با توجه به توزیع نامناسب منابع آبی کشور، همیشه مورد توجه بوده است. در رابطه با تونل‌های انتقال آب، سوابق موجود و ارائه شده توسط سازمان ذی‌ربط از احداث اولین تونل انتقال آب با نام کوهرنگ ۱ در سال ۱۳۲۷ حکایت دارد. این تونل به طول ۲۸۰۰ متر، مقطع نعل اسبی و دایره‌ای و به ظرفیت ۲۰ متر مکعب بر ثانیه در استان چهارمحال بختیاری حفر شده است.

امروزه به طور سالانه ۲۹۷ میلیون متر مکعب آب از طریق این تونل منتقل می‌شود. این تونل در مدت ۵ سال و با روش انفجاری سنتی حفر شده است.

احداث اولین تونل‌های انحراف آب را می‌توان با ساخت اولین سدهای کشور که با ساختار و روش‌های نوین احداث شده‌اند، در ارتباط دانست که به سال ۱۳۲۶ هجری شمسی و ساخت سد مخزنی گلپایگان باز می‌گردد. این سد بر روی رودخانه قمرود در گلپایگان با ارتفاع ۵۶ متر و از نوع خاکی سنگریزه‌ای احداث شده است. در رابطه با نیروگاه‌های زیرزمینی نیز نیروگاه سد دز اولین نیروگاه برق آبی کشور است. این نیروگاه هم زمان با اتمام کار احداث این سد در سال ۱۳۴۱ با ۸ واحد ۶۵ مگاواتی و مجموع ۵۲۰ مگاوات به بهره‌برداری رسیده و هم‌اکنون نیز در شبکه تولید برق در حال بهره‌برداری است.

در زمینه دیگر، تونل‌های مرتبط با خدمات شهری، اولین تونل‌های مرتبط با قطار شهری به شبکه قطار شهری تهران مربوط می‌باشد. سابقه شروع به حفر این تونل‌ها به سال ۱۳۶۵ باز می‌گردد که از سال ۱۳۷۹ نیز بهره‌برداری اولین خطوط آن آغاز شده است. اولین تونل‌های مربوط به قطار شهری در ایران به روش‌های ترانشه باز و نیمه مکانیزه حفر شده‌اند. بیست درصد جمعیت ایران در حوزه آبریز تهران زندگی می‌کنند، اما تنها دو درصد منابع آب کشور در این حوزه وجود دارد. از طرفی نزدیک به ۷۰ درصد آب‌های سطحی

کشور فقط در ۱۶ رودخانه جاری هستند. لذا گریزی از اجرای طرح‌های انتقال آب نیست. در حال حاضر آب در فاصله حدود ۱۹۵ کیلومتر از زابل به زاهدان منتقل می‌شود. از زاینده‌رود با طی مسافت ۳۳۰ کیلومتر به یزد می‌رود، از زرینه‌رود به تبریز با فاصله‌ای حدود ۱۸۰ کیلومتر، از سر شاخه‌های دز در کوه‌های زاگرس به فلات مرکزی و شهرهای مرکزی از جمله قم و چند شهر دیگر و از منابع عمده و متمرکز آب شیرین در منطقه زاگرس به فلات مرکزی. این انتقال آب‌ها براساس مطالعات جامع صورت گرفته انجام می‌شود. تا به حال، مطالعات مربوط به ۳۲ حوزه فرعی کشور و هشت حوزه اصلی کشور انجام شده است.

ضرورت تأمین مواد معدنی در راستای برنامه‌های توسعه و سیاست‌های دولت، حفر فضاهای گسترده زیرزمینی را ایجاب می‌نماید که از آن جمله می‌توان به معدن زیرزمینی زغال سنگ مرکزی طبس اشاره کرد که استخراج آن به صورت مکانیزه طراحی شده و برآورد تولید سالیانه آن نیز ۱/۵ میلیون تن می‌باشد.

به طور کلی، امروزه دولت در قالب وزارتخانه‌های نیرو، راه و ترابری، کشور (شهرداری‌ها) و صنایع و معادن به طور عمده و وزارتخانه‌های دفاع، نفت و جهاد کشاورزی به میزان کمتر، به احداث سازه‌های زیرزمینی می‌پردازد. به تازگی در تمامی این سازمان‌ها با تصویب قوانین و ایجاد امکان عقد قراردادهایی با ساختارهای متنوع، امکان مشارکت شرکت‌های خارجی و داخلی در سرمایه‌گذاری و اجرای پروژه‌ها فراهم شده است. از دیگر اقدامات جدید انجام شده می‌توان به حضور مؤثر و بی سابقه متخصصان داخلی در پروژه‌های مختلف احداث فضاهای زیرزمینی اشاره داشت. [۳]

خلاصه

با توجه به شرایط خاص پروژه های مرتبط با حفاری شهری و گسترش آن فرصت‌هایی نظیر ایجاد تونل‌های انتقال آب، فاضلاب شهری، راه آهن، قطار شهری و انبارهای عمومی و... بوجود آمده که این امر باعث رشد و توسعه محیط‌های شهری می شود و در این راستا باید نقش عواملی نظیر انسجام بخشی فعالیت‌های حرفه ای در صنعت حفاری زیرزمینی، منابع مالی پروژه، نیروهای کارآمد و متخصص و آیین نامه های موجود و... را در مطالعات طراحی و اجرا در نظر گرفت.

آزمون

۱. اهمیت ایجاد فضاهای زیرزمینی در پروژه های عمرانی را توضیح دهید؟
۲. برخی از موانع موجود در احداث تونل‌های شهری را به اختصار شرح دهید؟
۳. عوامل موثر در توسعه صنعت تونل‌زنی و فضاهای زیرزمینی شهری را نام ببرید؟

فصل دوم

اکتشافات زیر سطحی

اهداف

هدف از مطالعه این فصل، آشنایی با مطالب زیر می باشد:

۱. روش‌های مختلف اکتشافات

۲. شناسایی تحت الارضی

۳. تعیین مشخصات فنی لایه های خاک

۲-۱. اکتشافات

از آنجائی که بار سازه های ساخته شده در سطح شهر در نهایت به زمین منتقل می شوند، لازم است پیش از انجام هر گونه عملیات ساختمانی بر روی سطح زمین ابتدا اطلاع و شناخت کافی از ویژگی ها و رفتار خاکریز سطح زمین در دست باشد. مجموعه عملیات شناسایی لایه های خاک زیرزمین و تعیین ویژگی های فیزیکی و مکانیکی آنها اکتشافات زیر سطحی نامیده شود.

هدف کلی اکتشافات زیر سطحی را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود: [6, 19]

۱. تعیین لایه بندی خاک شامل:

الف) ژرفا، ضخامت و توالی لایه های خاک

ب) شناسایی و طبقه بندی خاک

پ) تعیین ویژگی های مهندسی خاک شامل مقاومت برشی، قابلیت فشردگی، سختی، نفوذپذیری، خاصیت تورم و حساسیت یخبندان

۲. تعیین ویژگی های سنگ شامل:

الف) ژرفا از سطح زمین تا لایه سنگ بستر

ب) شناسایی و طبقه بندی سنگ

پ) بیان کیفیت سنگ شامل سختی، میزان درز و شکاف ها و هوازدگی سنگ

۳. تعیین تراز ایستایی سطح آب زیر زمینی

۴. شناسایی شرایط ویژه و غیرعادی به منظور تأمین تمهیدات بعدی

به طور معمول انجام اکتشافات زیر سطحی طی چهار مرحله زیر صورت می پذیرد:

الف) جمع آوری اطلاعات اولیه در رابطه با سازه سطحی پیشنهاد شده

در این مرحله لازم است اطلاعات در رابطه با نوع سازه ای که قرار است در محل احداث شود و کاربرد آن، مقررات و آئین نامه های محلی و نحوه و میزان بارهای وارده از طرف سازه به زمین جمع آوری شود. برای نمونه در رابطه با احداث پل لازم است دهانه پل، بار پایه های پل و بار تکیه گاه های آن در دسترس باشد.

ب) جمع آوری اطلاعات پیشین موجود در رابطه با خاک منطقه

یکی از روش های کاهش هزینه های مطالعات ژئوتکنیکی جمع آوری اطلاعاتی است که از مطالعات پیشین انجام شده در منطقه بدست آمده باشد. این اطلاعات را می‌توان به طور معمول با مراجعه به منابع زیر به دست آورد:

۱. نقشه های زمین شناسی منتشر شده از طرف سازمان نقشه برداری کشور

۲. گزارش های مطالعات ژئوتکنیک سازه های موجود در مجاورت محل احداث پروژه

ج) بازدید محلی

مهندس ژئوتکنیک پروژه باید ابتدا بازدید دقیقی از محل احداث پروژه داشته باشد. اطلاعات حاصل از چنین بازدیدهایی در بسیاری از موارد می‌تواند در برنامه ریزی مطالعات بعدی مفید واقع شود.

برخی از مواردی که باید در هنگام بازدید محل به آن توجه نمود، عبارتند از:

۱. بررسی روئیدنی های سطحی موجود در محل احداث پروژه که می‌تواند اطلاعاتی از خاک منطقه به دست دهد.

۲. بررسی توپوگرافی عمومی منطقه، وجود خاک دستی، بررسی وضعیت ترک ها و ناپایداری های احتمالی در شیب ها، بررسی خاصیت تورم خاک و موارد مشابه

۳. مشاهده وضعیت زهکشی و تراوش آب در محل احداث پروژه

۴. بازرسی تراشه های طبیعی یا موضوعی موجود در منطقه که می‌تواند لایه بعدی خاک‌های زیرسطحی را نشان دهد.

۵. بازرسی ساختمان های مجاور محل احداث پروژه و نشانه های خرابی مانند ترک در دیوارها که می‌تواند حاصل نشست لایه های رس نرم و یا نشان دهنده وجود خاک های مسئله دار در محل احداث پروژه باشد.

۶. احداث چند چاهک در حین بازدید محلی می‌تواند اطلاعات اولیه بسیار مفیدی فراهم کند که در برنامه ریزی مطالعات بعدی استفاده می‌شود.

د) تعیین دستورالعمل انجام اکتشافات زیر سطحی بر اساس مشاهدات بند قبلی:

در این مرحله با حفر گودال های درون زمین به روش های مختلف، نمونه هایی از ژرفای خاک به منظور شناسایی خاک استخراج می‌شود. نوع و تعداد این گودال ها بر اساس نوع سازه احداثی و مشاهدات حاصل از شرایط محل احداث پروژه انتخاب می‌شود. پیشنهاداتی نیز در این زمینه در متون فنی یافت می‌شود که پس از معرفی روش های حفاری زیر سطحی در ادامه این فصل معرفی می شوند. [6, 19] .

۲-۲. انواع حفاری اکتشافی

حفاری های اکتشافی بسته به شرایط زیر سطحی خاک و سنگ و هم چنین میزان اهمیت و هزینه پروژه مطالعات زیرسطحی می‌تواند با یک چند روش زیر صورت پذیرد:

۱. چاهک دستی

۲. ترانشه

۳. تونل اکتشافی

۴. چاه عمیق

۵. گمانه اکتشافی

در هر یک از روش های فوق در واقع زمین به نحوی حفر می‌شود و از داخل آن نمونه‌هایی از خاک به منظور انجام آزمایشات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل می‌شود و یا این که در همان محل حفر شده آزمایش های بر جا بر روی خاک انجام می‌شود. در ادامه هر یک از روش های اشاره شده در بالا معرفی می شوند. [6, 21].

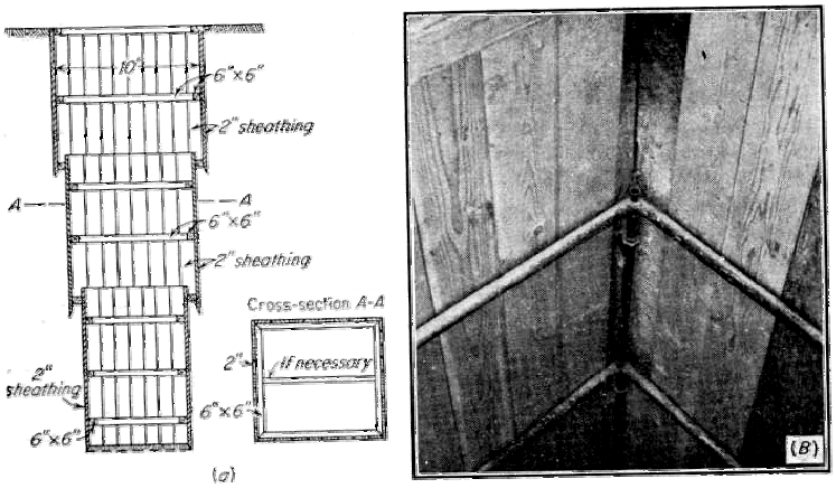
۲-۲-۱. چاهک دستی

چاهک دستی، گودالی است که یا توسط مقنی و یا با استفاده از بیل مکانیکی در سطح زمین حفر می‌شود. به طور معمول پلان این گودال ها به صورت مربع با ضلع حدود ۱/۲ متر می باشد. ژرفای چاهک دستی بسته به نوع خاک و تجهیزات حفاری تعیین می‌شود و به طور کلی به سطح آب زیرزمینی و سنگ بستر محدود می‌شود.

ژرفای چاهک دستی اغلب کمتر از ۹ متر می باشد و حفر چاهک با ژرفای بیشتر به دلیل دشواری و زمان بر بودن عملیات حفر خاک به ندرت صورت می پذیرد. در رسوبات ریزدانه، چاهک به طور معمول با دیواره قائم حفر می‌شود، در حالی که در خاک های ریزدانه، دیواره چاهک به دلیل ریزش بودن مصالح به صورت شیب‌دار اجرا می‌گردد. شکل ۲-۱- نمونه ای از یک چاهک دستی را نشان می‌دهد.

شکل شماره ۲-۱: نمونه ای از یک چاهک دستی

شکل شماره ۲-۲: حفر یک چاهک دستی



شکل شماره ۲-۳: جزئیات یک چاهک دستی

برخی مزایای استفاده از چاهک دستی عبارتند از:

الف) امکان بازدید چشمی از لایه بندی خاک وجود دارد.

ب) می‌توان آزمایش وزن مخصوص در محل در کف و یا جداره های چاهک انجام داد و با استفاده از آن درصد تراکم خاک را به دست آورد.

ج) نمونه های خاک برداشت شده از چاهک دستی دارای کیفیت بالایی می باشند. به عبارت دیگر هیچ عاملی در چاهک دستی برای اتلاف مصالح نمونه خاک وجود ندارد.

د) امکان اخذ نمونه دست نخورده از جداره و کف چاهک وجود دارد. یکی از انواع نمونه دست نخورده که می‌توان از چاهک دستی به دست آورد، نمونه بلوکی در خاک ریز دانه می باشد.

با وجود مزایای فوق همان گونه که پیشتر نیز اشاره شد، چاهک دستی تنها برای اکتشافات زیر سطحی در ژرفاهای کم کاربرد دارد و برای شناسایی خاک در ژرفاهای بیشتر نیاز به استفاده از روش های دیگر می باشد [6].

۲-۲-۲. ترانشه یا خندق

ترانشه ها گودبرداری های طویلی هستند که توسط ماشین آلاتی از قبیل بولدوزر و بیل مکانیکی در عرضی محدود و ژرفایی بین ۳ تا ۵ متر به منظور شناسایی خاک و انجام مطالعات مربوطه حفر می شوند. مزایای حفر ترانشه های مشابه چاهک‌های دستی می‌باشد. ترانشه ها به منظور شناسایی شرایط زمین شناسی خاک در یک منطقه وسیع و به ویژه در مطالعه گسل ها کاربرد دارد.

شکل شماره۲-۴: نمونه ای از ترانشه حفر شده به وسیله بیل مکانیکی

۲-۲-۳. تونل اکتشافی

تونل اکتشافی در واقع حفره ای افقی با ابعاد تقریبی عرض و ارتفاع به ترتیب برابر ۱/۵ و ۲ متر می باشد که به منظور شناسایی زیر سطحی در شیب های تند به کار می رود. این تونل‌ها آدم رو می باشند و می‌توان پس از حفر آن آزمایش های بر جا نیز در آن انجام داد.

از آنجائی که حفر این تونل ها بسیار زمان بر و پر هزینه می باشد، جز در پروژه های خـاص که انجام آن لازم باشد از این روش استفاده نمی‌شود.

۲-۲-۴. چاه ژرف

در این روش چاه قائم با ژرفا و قطر زیاد در زمین حفر می‌شود. دیواره این چاه ها به منظـور جلوگیری از ریزش مصالح مهار می‌شود و حفر این چاه ها تا ژرفای ۳۰ متر نیز گزارش شده است. اگر چه با حفر این چاه ها می‌توان اطلاعات بسیار مفیدی از شرایط زیر سطحی خاک تا ژرفای زیاد به دست آورد اما همانند تونل های اکتشافی از آنجائی که حفـر ایـن چـاه‌هـا مستلزم صرف زمان و هزینه زیاد، استفاده از ماشـین آلات ویـژه مـی باشـد، از آن تنهـا در پروژه های خاص و با اهمیت زیاد استفاده می‌شود.

۲-۲. گمانه زنی

در این روش، حفره ای با قطر کم توسط دستگاه های دستی و یا مکـانیکی در خـاک حفـر می‌شود و نمونه خاک جهت انجام آزمایش های فیزیکی و مکانیکی از آن استخراج می‌شود.

حفره ایجاد شده گمانه نام دارد و بنـابراین روش مـذکور بـه روش گمانـه زنـی موسـوم می‌باشد. در این روش بر خلاف روش های قبلی امکان بازدید چشمی از ژرفای خاک فـراهم نمی باشد و تنها از طریق بررسی و مطالعه نمونه های خاک استخراج شده می‌توان خـاک را شناسایی نمود. روش های مختلفی برای گمانه زنی در خاک و سـنگ و هـم چنـین جهـت نمونه برداری از آنها توسعه پیدا کرده اند که در ادامه معرفی می شوند.

الف) حفاری با آب

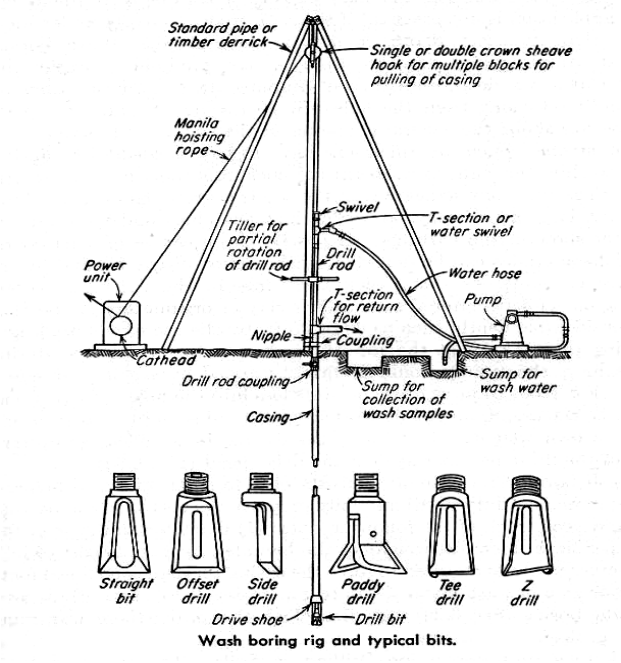
این روش یکی از ابتدایی ترین روش ها برای حفاری می باشد. در این روش حفـاری خـاک توسط اثر هم زمان مته خرد کننده و فشـار آب صـورت مـی پـذیرد. نمونـه ای از دسـتگاه حفاری با آب در شکل (۲ـ5) نشان داده شده است. روش کار به این صورت است که به طور معمول ابتدا یک غلاف یا لوله فولادی به طول ۱/۵ متر تا ۳/۵ متـر توسـط ضـربه بـه درون خاک کوبیده می‌شود. سپس مته خردکننده توسط میله حفاری یا کابل به ژرفای مـوردنظر حفاری خاک منتقل می‌شود. در نوک مته خردکننده سوراخ هایی تعبیه شـده اسـت کـه از طریق این سوراخ ها آب با فشار به سطح حفاری پاشیده می‌شـود و سـبب دوران و حرکـت قائم مته می‌شود.

اثر همزمان فشار آب و حرکت بالا و پایین مته سبب حفاری خاک می‌شود. از طرفی آب پمپ شده به درون گمانه توسط پمپاژ به طور دائم از گمانه تخلیه می‌شود و بر روی سـطح زمین در محفظه ای جمع آوری می‌شود تا پس از ته نشینی، خـاک بـه دسـت آمـده بـرای مطالعه استفاده شود.

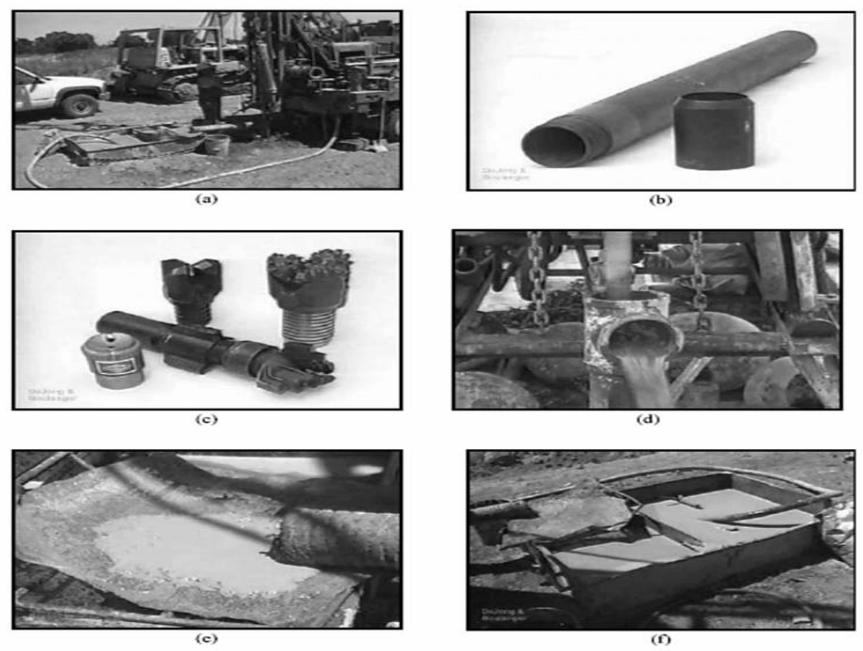
در خاک های ریزدانه که خاک خاصیت ریزش کمتری دارد، حفاری را مـی‌تـوان بـدون لوله فولادی نیز انجام داد. به منظور تهیه نمونه خاک و یا انجام آزمایشهای بـه جـا در ایـن روش، لازم است در هر عمق مورد نظر، مته خرد کننده از داخل گمانه خارج شود و سـپس نمونه گیر و یا تجهیزات آزمایش بر جا به انتهـای میلـه حفـاری متصـل مـی‌شـود و جهـت نمونه‌برداری از خاک به داخل گمانه فرستاده می‌شود.

از آنجائی که نمونه برداری از خاک به این روش زمان بر می باشد، استفاده از ایـن روش گمانه زنی برای ژرفاهای زیاد کاربرد ندارد و به طور معمول حداکثر ژرفای حفـاری بـه ایـن روش به ۲۵ متر محدود می‌شود. ضعف دیگر این روش دست خوردگی شدیدی است که در

نمونه بر اثر ضربه و فشار آب در خاک ایجاد می‌شود و دلیل اصلی استفاده از این روش ارزان بودن آن می باشد.



شکل شماره ۲-۵: نمونه ای از دستگاه حفاری با آب



شکل شماره ۲-۶ : نمونه ای از دستگاه حفاری با آب

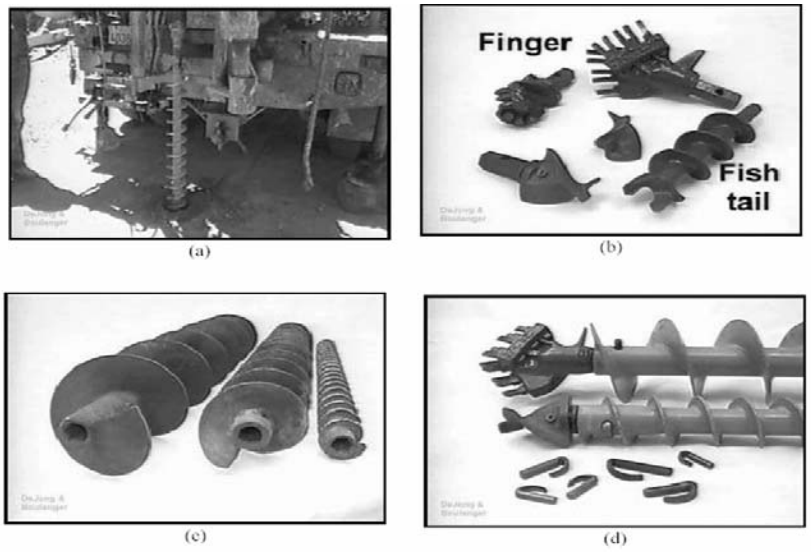
ب) حفاری با مته مارپیچ یا مته حلزونی

این روش مانند حفاری با آب یکی از روش های ساده گمانه زنی می باشد. مته مارپیچ در واقع یک میله تو پر یا تو خالی است که دارای پره های مارپیچ در جداره خود می باشد. به هنگام گمانه زنی، چرخاندن میله مارپیچ سبب می‌شود میله درون خاک نفوذ کند و همانند یک پیچ، زمین را حفر کند.

از طرفی چرخش مداوم پره های مته مارپیچ سبب می‌شود خاک دست خورده حفاری شده به سطح زمین منتقل شود و بنابراین در این روش گمانه زنی به طور پیوسته نمونه دست خورده خاک از داخل گمانه به دست می آید. اما به دلیل مخلوط شدن خاک لایه‌های مختلف، تشخیص ژرفای مربوط به نمونه های خاک به دست آمده دشوار است و بنابراین نمونه مناسبی از این روش حاصل نمی‌شود، اما از این روش اغلب در شناسایی و

تعیین مرزهای منابع قرضه در ساخت خاکریزها و سدهای خاکی، در تعیین ژرفای سنگ بستر در ژرفاهای حاکم و در حفر چاه های کنترل سطح آب استفاده می‌شود. مته مارپیچ در دو نوع دستی و موتوری (مکانیکی) موجود می باشد.

از این مته ها در حفاری های کم ژرفا استفاده می‌شود. قطر مته در این دستگاه ها بین۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی مترمی باشد. مته ها مارپیچ مکانیکی نیز در دو نوع توپر و توخالی وجود دارند. نمونه ای از مته مارپیچ توپر در شکل (۲-۷) نشان داده شده است.

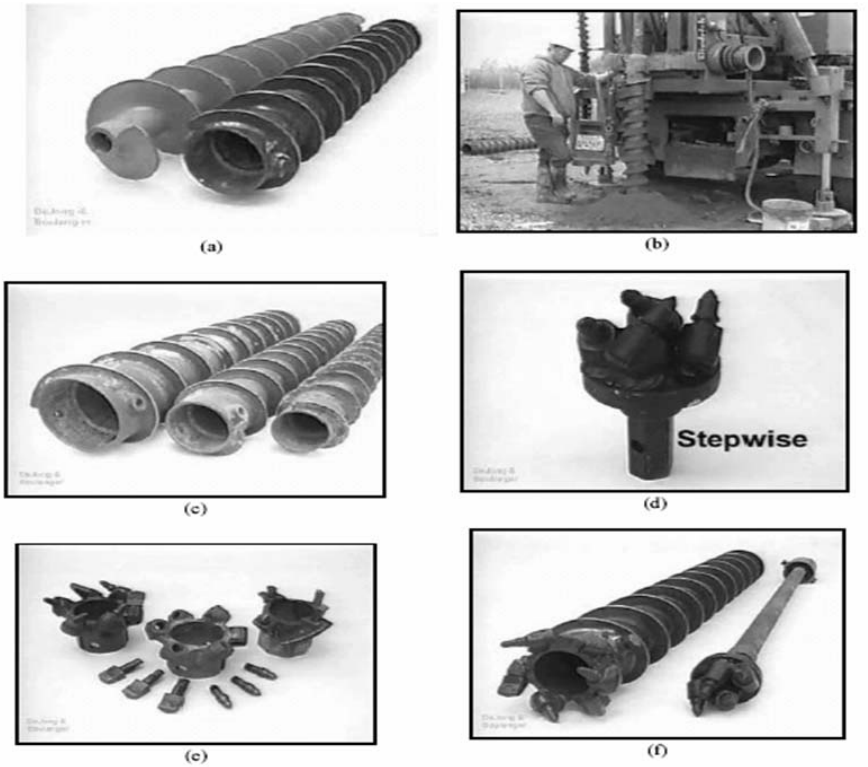


شکل شماره ۲-۷: نمونه های مته مارپیچ تو پر

از این مته‌ها برای کاربردهای اشاره شده در بالا استفاده می‌شود. به منظور نمونه‌برداری دست نخورده از خاک و یا برای انجام آزمایش های بر جا در مته مارپیچ توپر لازم است مته از خاک خارج شود و نمونه گیر وارد گمانه شود.

در این صورت اگر خاک جداره گمانه ریزشی باشد، لازم است به همراه گمانه زنی با مته مارپیچ لوله یا غلاف فولادی نیز برای حفاظت جداره درون خاک رانده شود.

به منظور غلبه بر ضعف های موجود در روش حفاری با مته مارپیچ توپر، نمونه‌های مته مارپیچ توخالی طراحی شده اند. نمونه ای از این مته در شکل (۲ـ۸) نشان داده شده است.



شکل شماره ۲-۸: نمونه های مته مارپیچ توخالی

در این روش میله مرکزی حفاری تو خالی می باشد و استفاده از این دستگاه مزایای زیر را به همراه دارد:

ـ امکان استفاده از دستگاه های نمونه گیر و انجام آزمایش‌های بر جا بدون نیاز به بیرون آوردن مته مارپیچ فراهم می باشد. همان گونه که در شکل(۲ـ۸) مشاهده می‌شود در انتهای مته تو خالی درپوش قرار دارد که مانع ورود خاک به داخل میله تو خالی مته می‌شود.

ـ در هنگام انجام آزمایش بر جا در هر ژرفای مورد نظر، درپوش از طریق میلـه داخـل متـه توخالی برداشته می‌شود و دستگاه مربوط به داخل میله مارپیچ تو خالی فرستاده می‌شود تا در ژرفای موردنظر آزمایش را انجام دهد و سپس درپوش مجدداً نصب مـی‌شـود و حفـاری ادامه می یابد. در واقع با نصب درپوش، مته مارپیچ تو خالی همانند مته تو پر عمل می کند.

ـ امکان حفاری در خاک های ریزشی بدون نیاز به غلاف فراهم می باشد.

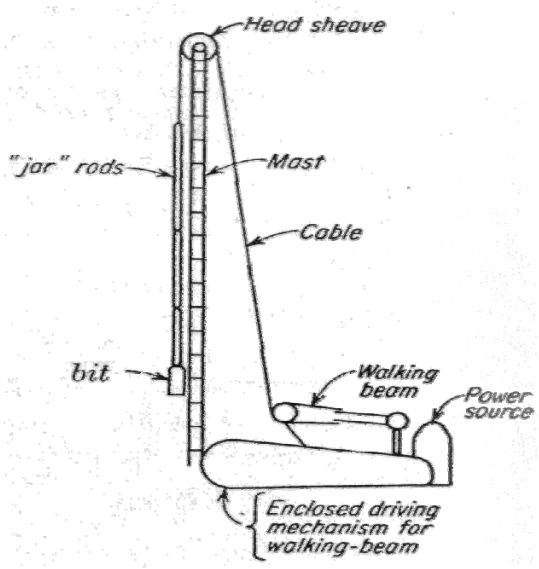
ـ امکان نصب ابزارگذاری از طریق لوله فراهم می باشد.

ـ نمونه برداری از طریق میله توخالی سبب می‌شود نمونه ها در ژرفاهای مختلف از یکدیگر قابل تفکیک باشند.

ـ از مته توخالی می‌توان به عنوان غلاف برای حفاری دورانی که در ادامه معرفی مـی‌شـود، استفاده نمود.

ج) حفاری ضربه‌ای

در این روش حفاری با اعمال ضربه مداوم به خاک صورت می گیرد. کاربرد روش مذکور در گذشته در حفـاری لایـه هـای سـنگی و خـاک سـخت بـوده اسـت. امـا امـروزه بـه دلیـل دست‌خوردگی بالای ایجاد شده در خـاک توسـط ضـربه هـای وارده، اسـتفاده از ایـن روش تقریباً منسوخ شده است. شکل زیر موید این مطلب می باشد.



شکل شماره۲-۹: روش حفاری با اعمال ضربه مداوم به خاک

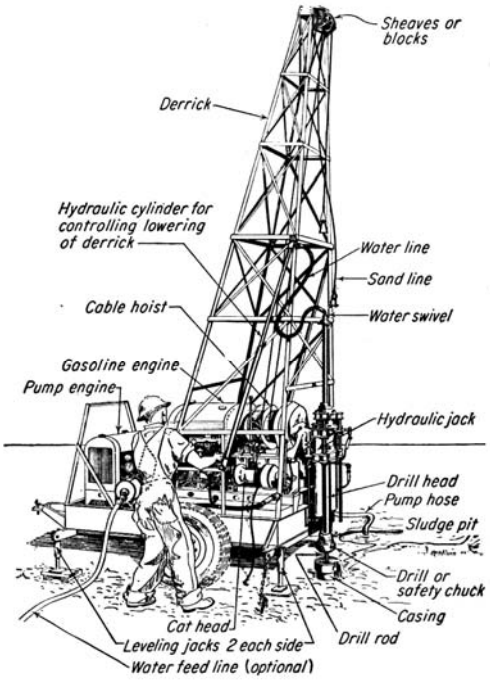
د) حفاری دورانی

این روش حفاری متداول ترین و مهم ترین روش شناسایی زیر سطحی در خاک و سنگ می باشد. با این روش می‌توان در خاک و سنگ تا صدها و حتی هزاران متر حفاری نمود. نمونه های خاک دست خورده و دست نخورده به راحتی بیشتر و کیفیت بالاتر در این روش استخراج می شوند.

سرعت حفاری در این روش نیز نسبت به روش های پیشین بالاتر می باشد. کلیات تجهیزات مورد استفاده در حفاری دورانی در شکل (۲ـ۱۰) نشان داده شده است. این تجهیزات به طور کلی عبارتند از دستگاه حفاری، غلاف فولادی، میله حفاری، سر مته حفاری و انواع نمونه گیر که در شکل (۲ـ۱۲) به همراه جزئیات مربوط نمایش داده شده‌اند.

در این روش حفاری توسط سرمته ها و به کمک ترکیب فشار و دوران صورت می‌پذیرد.

شکل (۲-۱۱) نمونه ای از دستگاه حفاری دورانی در حال کار را نشان می‌دهد.



Trailer-mounted rotary drill rig.

شکل شماره ۲-۱۰: کلیات تجهیزات مورد استفاده در حفاری دورانی

شکل شماره ۲-۱۱: نمونه ای از دستگاه حفاری دورانی در حال کار

شکل شماره ۲-۱۲: تجهیزات دستگاه حفاری، غلاف فولادی، میله حفاری، سر مته حفاری

روال کار در حفاری دورانی به این صورت است که ابتدا غلاف فولادی درون خاک رانـده می‌شود. غلاف فولادی جز در حفاری سنگ سالم و خاک چسبنده سخت همواره نیاز است.

این غلاف به منظور جلوگیری از ریزش مصالح جداره گمانه استفاده می‌شود. در قسمت انتهای غلاف کفشک وجود دارد که بر روی آن سر مته حفاری دندانه دار نصب شده است. این سر مته با عمل فشار و دوران به درون خاک رانده می‌شود و غلاف را به درون خاک می‌برد. در برخی موارد قطعه مجاور تراش نیز به غلاف متصل می‌شود تا موجب تسهیل عملیات نفوذ، غلاف و حفاری شود.

غلاف فولادی به صورت قطعات مجزا موجود می باشند که به یکدیگر متصل می شوند و تا هر ژرفای دلخواه قابل نفوذ می باشند. در ژرفاهای زیاد و در خاک های سخت تر که اصطکاک جداره گمانه با غلاف زیاد می باشد، حفاری به صورت تلسکوپی انجام می‌شود، با خارج نمودن غلاف آسان تر صورت پذیرد.

مشاهده می‌گردد غلاف‌ها دارای قطرهای مختلف هستند، به نحوی که با افزایش ژرفای حفاری می‌توان غلاف با قطر کمتر را درون غلاف بالایی وارد نمود تا در ژرفای مورد نظر قرار گیرد.

پس از وارد نمودن غلاف فولادی درون گمانه، مغزه گیر به داخل غلاف رانده می‌شود. طول این مغزه گیر به طور معمول ۳ متر است. مغزه گیر با اثر همزمان فشار و دوران به درون خاک رانده می‌شود. مغزه گیر تو خالی می باشد و با نفوذ آن، نمونه خاک توسط فنری که درون آن قرار دارد به سمت داخل مغزه گیر هدایت می‌شود.

به این ترتیب نمونه خاک به طور دائم و پیوسته از داخل گمانه استخراج می‌شود. در واقع با استفاده از مغزه گیر و حفاری دورانی می‌توان نمونه گیری پیوسته انجام داد که روش بسیار مفیدی در اکتشافات زیرسطحی می باشد. مغزه گیر قادر است در هر ژرفایی خاک را استخراج کند و برای نفوذ به ژرفاهای بیشتر در انتهای خود به میله حفاری متصل

می‌شود که قادر است نیروی فشار و دوران لازم جهت حفر خاک توسط مغزه گیر را از دستگاه در سطح زمین به مغزه گیر منتقل کند.

در هر نوبت حفاری، مغزه گیر قادر است نمونه ای حداکثر به اندازه طول خود که به طور معمول سه متر می باشد استخراج کند. این نمونه به دلیل اثر دوران و فشار مغزه گیر به جداره نمونه، دست خورده است و برای تهیه نمونه دست نخورده از مغزه گیر دوجداره استفاده می‌شود. مغزه گیر دو جداره، همان گونه که از اسمش برمی آید، دارای دو جدار تودرتو می‌باشد. به هنگام حفاری و اخذ نمونه، جداره بیرون دوران می کند و خاک را حفر می کند، در حالی که جداره داخلی ثابت است و بنابراین نمونه خاک اخذ شده تحت تأثیر دوران مغزگیر قرار نمی گیرد. هم چنین استفاده از مغزگیر دو جداره مانع تماس مستقیم آب مصرفی جهت خنک نمودن در حین حفاری با نمونه خاک می‌شود و بنابراین میزان دست خوردگی نمونه خاک کاهش می یابد.

انواع نمونه‌گیرها در حفاری دورانی بسته به میزان اهمیت نمونه و تجهیزات موجود متفاوت می باشند. هدف از استفاده از نمونه گیرها، اخذ نمونه های دست نخورده و دست‌خورده خاک می باشد. در ادامه ابتدا به تشریح تفاوت های نمونه های خاک دست خورده و دست نخورده پرداخته می‌شود و سپس انواع نمونه گیرها در حفاری دوران معرفی می‌شوند.

به طور کلی سه نوع نمونه خاک تعریف می‌شود که عبارتند از:

نمونه دست نخورده، نمونه دست خورده و نمونه دست بازسازی شده

نمونه دست نخورده، نمونه ای است که از زمان نمونه برداری در حین نمونه برداری، بسته بندی، حمل، نگهداری و آماده سازی به منظور انجام آزمایش، تغییری در بافت و رطوبت آن صورت نپذیرد.

منظور از بافت خاک نیز نحوه قرارگیری ذرات یا دانه های خاک در کنار یکدیگر می‌باشد. علاوه بر حفظ رطوبت و بافت خاک، لازم است در هنگام اخذ نمونه دست نخورده از خاک تلفات مواد حداقل باشد و به عبارت دیگر، کل مصالح اخذ شده توسط نمونه گیر به طور یکپارچه و بدون تغییر در رطوبت و بافت اخذ گردد و بخشی از مصالح در دست نرود.

به منظور حفظ رطوبت نمونه های خاک دست نخورده، آن را در موم یا پارافین نگهداری می کنند. هم چنین جهت حفظ بافت خاک دست نخورده، لازم است شکل و نحوه قرارگیری طبیعی ذرات خاک در کنار یکدیگر حفظ گردد. برای این منظور نباید تنش بیشتر از محل اخذ نمونه گیری اعمال شود.

این تنش می‌تواند در هنگام وارد کردن نمونه گیر جهت اخذ نمونه خاک ایجاد شود. جهت جلوگیری از اعمال این تنش مذکور در هنگام نمونه برداری، باید استوانه نمونه گیر جدار نازک باشد. در این رابطه بخشی به نام نسبت مساحت به صورت زیر تعریف می‌شود:

نسبت مساحت : $A_R(\%) = \frac{D_O{}^2 - D^2{}_i}{D^2{}_i} \times 100$

که در آن:

D_O : قطر خارجی نمونه گیر استوانه ای تو خالی

D_i : قطر در نمونه گیر استوانه ای تو خالی

است.

به طور معمولی اگر نسبت مساحت حدود ۱۰ درصد باشد، می‌توان با استوانه نمونه گیر مورد نظر نمونه دست نخورده اخذ نمود. البته در کنار حفظ مقدار نسبت مساحت، لازم است نفوذ نمونه گیر به داخل خاک به صورت استاتیکی باشد و نباید ضربه به نمونه گیر وارد شود. از نمونه دست نخورده به منظور انجام آزمایش های مکانیکی بر روی خاک استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که اخذ نمونه دست نخورده برای خاک های ریزدانه از

اهمیت بیشتری برخوردار می باشد و این در حالی است که در خاک های درشت‌دانـه، اخـذ نمونه دست نخورده بسیار دشوار می باشد.

از طرفی بافت و رطوبت خاک در خاک های ریزدانه نقش تعیین کننده تـری بـر رفتـار مکانیکی خاک دارند. بنابراین حساسیت در رابطه با اخذ نمونه دست نخـورده بیشـتر بـرای خاک های ریزدانه معنی پیدا می کند.

برخلاف نمونه دست نخورده، در نمونه دست خورده بافت و رطوبت خاک تغییر می کند و نمونه برداری به صورتی است کـه ویژگـی هـای فـوق در مراحـل نمونـه بـرداری، حمـل، نگهداری و آماده سازی جهت انجام آزمایش ممکن است تغییر کنند.

اخذ نمونه دست خورده آسان تر و ارزان تر از اخذ نمونه دست نخورده می باشد. از ایـن نمونه ها برای انجام آزمایش های فیزیکی مانند دانه بندی، حـدود اتربـرگ، هیـدرومتری و تراکم استفاده می‌شود. البته در این نمونه نیز نباید اتلاف مصالح بیش از ۱۰ درصد باشد. به عبارت دیگر بازیافت مغزه بیش از ۹۰ درصد باشد.

همان گونه که پیشتر اشاره شد، در کنار نمونه دسـت نخـورده و نمونـه دسـت خـورده، نمونه بازسازی شده نیز وجود دارد. نمونه بازسازی شده، نمونه ای است که به طـور معمـول از منبع به صورت دست خورده اخذ می‌شود و در آزمایشگاه رطوبت و میـزان تـراکم آن بـه طـور دلخـواه و مطـابق بـا شـرایط خـاک در خـاکریز بازسـازی مـی‌شـود. بـرخلاف نمونـه دست‌خورده، بر روی این نمونه آزمایش های مکانیکی نیز انجام می‌شود. [19]

۲-۳. انواع نمونه گیرها

همان‌گونه که در بخش های قبلی بیان شد، در حفـاری خـاک و شناسـایی زیرسـطحی بـه کمک اخذ نمونه های خاک و انجام آزمایش های فیزیکی و مکانیکی بـر روی آن، اطلاعـات

مورد نیاز خاک جهت طراحی سازه های سطحی به دست می‌آید. اخذ نمونه خاک به کمک نمونه گیرها صورت می گیرد و در این بخش انواع نمونه‌گیرها معرفی می شوند.

۲-۳-۱. نمونه گیر قاشقی[1]

از نمونه گیر قاشقی برای اخذ نمونه های دست خورده استفاده می‌شود.

این نمونه گیر از کفشک، غلاف فولادی (که در امتداد طولی به دو نیمه شکافته شده است) و ناحیه اتصال به میله حفاری تشکیل شده است. غلاف فولادی که قسمت میانی نمونه گیر را تشکیل می‌دهد، دارای قطر ۳۴/۹۳ میلی متر و قطر خارجی ۵۰/۸ میلی متر می باشد.

نمونه گیرهایی با قطر داخلی ۶۳/۵ میلی متر و قطر خارجی ۷۶/۲ میلی متر وجود دارند. وقتی که گمانه به عمق مطلوب رسید، مته بیرون کشیده شده و نمونه گیر قاشقی به سر میله حفاری متصل و به مته گمانه فرستاده شود.

نمونه گیر با استفاده از ضربات چکش به داخل خاک رانده شده و سپس ضربات چکش به بالای میله حفاری نواخته می‌شود. وزن چکش ۶۲۲ نیوتن بوده و برای هر ضربه، چکش از ارتفاع ۷۵ سانتی متری رها می‌گردد. مجموع تعداد ضربات لازم برای دو مرحله ۱۵ سانتی متری انتهایی عدد نفوذ استاندارد نامیده می‌شود.

۲-۳-۲. نمونه گیر پیچشی[2]

وقتی که نهشته خاک، ماسه همراه با سنگریزه باشد، امکان اخذ نمونه توسط نمونه گیر قاشقی همراه با فنر مغزگیری نیست. علت این امر را می‌توان به بسته شدن فنرها به علت

[1]. Spoon Sampler
[2]. Scraper Bucket

وجود سنگریزه ها نسبت داد. در چنین حالتی برای اخذ نمونه های دست خورده می‌توان از نمونه گیر پیچشی مطابق شکل زیر استفاده نمود.

این نمونه گیر دارای یک کلاهک بوده و می‌تواند به انتهای میله حفاری وصل شود. در این حالت نمونه گیر به داخل خاک رانده شده و با پیچاندن آن، نمونه گیر، خاک را برش داده و به داخل محفظه خود می ریزد.

۲-۳-۳. نمونه گیر جدار نازک[1]

به این نمونه گیر، نمونه گیری شلبی[2] هم می گویند. این نمونه گیر از فولاد بدون شکاف ساخته می‌شود و از آن برای اخذ نمونه های رسی دست نخورده استفاده می‌شود. این نمونه گیرها معمولاً دارای قطرهای خارجی ۲ و ۳ اینچ می باشند. نوک این نمونه گیرها لب تیز بوده و انتهای آن قابل اتصال به میله حفاری می باشد.

برای انجام نمونه گیری، نمونه گیر به سر میله حفاری وصل و به ته گمانه فرستاده شده و با فشار به داخل خاک رانده می‌شود. سپس نمونه اخذ شده همراه با نمونه گیر به بیرون کشیده می‌شود. هر دو انتهای نمونه گیر کاملاً مهر و موم و نمونه گیر و نمونه داخل آن در درون کیسه پلاستیکی قرار داده شده و برای انجام آزمایش به آزمایشگاه فرستاده می‌شود.

۲-۳-۴. نمونه گیر پیستونی[3]

وقتی که قطر نمونه های دست نخورده بزرگتر از ۳ اینچ شود، نمونه ها در هنگام بالا کشیدن نمونه از ته گمانه، ممکن است از داخل نمونه گیر بیرون بیفتند. در چنین مواردی

1. Thin Walled Sampler
2. Shellby Tube
3. Piston Sampler

استفاده از نمونه گیرهای پیستونی بسیار مفید می باشند. نمونه گیرهای پیستونی در انواع مختلف یافت می شوند. لیکن نمونه گیر پیشنهاد شده توسط استربرگ (۱۹۵۲) از نوع متداول بوده و این نمونه گیر متشکل از یک لوله جدار نازک و یک پیستون که انتهای لوله جدار نازک را می بندد، می باشد.

در این حالت نمونه گیر به ته گمانه فرستاده شده و سپس در وضعیتی که پیستون روی خاک قرار دارد، لوله جدار نازک به کمک فشار هیدرولیک به داخل خاک رانده می‌شود و سپس به کمک سوراخی که در میله پیستون قرار دارد، فشار پیستون رها می‌گردد.

تماس پیستون با خاک در هنگام نمونه گیری، باعث می‌شود که سطح خاک در هنگام ورود به نمونه گیر تغییر شکل نداده و میزان دست خوردگی آن نسبت به نمونه گیر جدار نازک کمتر باشد. [6]

خلاصه

از اهداف کلی اکتشافات زیر سطحی می‌توان به تعیین لایه بندی خاک، تعیین ویژگی های سنگ، تعیین تراز ایستایی سطح آب زیر زمینی و شناسایی شرایط ویژه و غیرعادی به منظور تأمین تمهیدات بعدی اشاره نمود.

همچنین حفاری های اکتشافی بسته به شرایط زیر سطحی خاک و سنگ و هم چنین میزان اهمیت و هزینه پروژه مطالعات زیرسطحی می‌تواند با کمک چاهک دستی، ترانشه، تونل اکتشافی، چاه عمیق و گمانه اکتشافی صورت پذیرد.

از روش‌های مختلف گمانه زنی ماشینی می توان به روشهای حفاری با کمک جت آب، روش دورانی، روش ضربه ای و روش مته مارپیچ اشاره نمود. در انجام مطالعات شناسایی

زیرسطحی نیاز به اخذ نمونه های خاک و انجام آزمایش های فیزیکی و مکانیکی بر روی آن بوده که این مهم با کمک روش‌های نمونه گیری صورت می پذیرد.

آزمون

۱. اهداف کلی اکتشافات زیرسطحی را نام ببرید؟
۲. مراحل انجام اکتشافات زیر سطحی را توضیح دهد؟
۳. روش‌های مختلف حفر گمانه های ماشینی را نام ببرید؟
۴. دلایل اخذ نمونه‌های دست نخورده خاک را در مطالعات ژئوتکنیک شرح دهید؟
۵. محدودیت‌های حفاری ماشینی با کمک روش آب شستشویی را توضیح دهید؟
۶. انواع نمونه‌گیرهای مورد استفاده در مطالعات ژئوتکنیکی را ذکر نمایید؟

فصل سوم

آزمایش های صحرایی در ژئوتکنیک

اهداف

هدف از مطالعه این فصل، آشنایی با مطالب زیر می باشد:

۱. شرح خدمات ژئوتکنیکی

۲. مطالعات صحرایی

۳. اجرای عملیات حفاری

۴. انجام آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی

۵. تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده

۶. ارائه گزارش

جهت دستیابی به اهداف تعیین شده، می بایستی مطالعات ذیل صورت گیرد: [6, 19]

- بررسی های ژئوتکنیکی از طریق حفاری، نمونه برداری و آزمایش‌های صحرایی
- بررسی های ژئوتکنیکی از طریق آزمایش و تحقیق در آزمایشگاه
- تعیین میزان نفوذپذیری خاک از طریق آزمایشات آزمایشگاهی و صحرایی
- بررسی مشخصات فنی استاتیکی معرف رفتار خاک
- بررسی ظرفیت باربری مجاز انواع پی های سطحی
- بررسی فشار محرک و مقاوم خاک در حالت استاتیکی و زلزله
- خاکبرداری و تعیین شیب پایدار شیب ها
- توصیه های فنی و کاربردی لازم

۳-۱. حفاری و نمونه برداری

به عنوان نمونه گزارش ارائه شده براساس حفر تعدادی گمانه حفاری شده در مسیر مترو می باشد که تاکنون حفاری و آزمایش های آزمایشگاهی آن به اتمام رسیده است. حفاری گمانه، ماشینی و به روش مغزه گیری ممتد (Continues Coring) می باشد. بعد از حفاری تعدادی از چاه ها جهت تعیین تراز آب زیرزمینی پیزومتر گردیده است. مشخصات گمانه های حفر شده در جدول زیر آمده است. [11]

شکل شماره ۳-۱: نمایی از عملیات حفاری و نمونه برداری

جدول شماره ۳-۱: مشخصات گمانه های حفر شده

شماره گمانه	مختصات X	مختصات Y	عمق گمانه (m)	ضخامت خاک دستی	تراز سطح آب
BH-1	0502277	3960736	31	-	-
BH-1-1	0501541	3960711	30	-	-
BH-1-2	0499982	3962846	30	-	-
BH-1-3	0500743	3960814	37	-	9.0
BH-1-4	0500539	3960950	40	-	9.0
BH-3	0500079	3961991	30	0.5	9.6
BH-4	0500067	3962360	30	1.0	8.5
BH-5	0499982	3962846	30	0.5	8.0
BH-6	0499861	3963258	30.5	-	-
BH-7	0500141	3965723	30	2.5	20.0
BH-9	0499559	3964283	30	2.0	20.0
BH-11	0499473	3964708	35	2.5	20.0
BH-11-1	0499388	3964469	30	1.0	21.0
BH-12	0499870	3966042	45	-	30.0
BH-13-1	0499846	3965761	45	2.0	24.0
BH-14	0499915	3966185	40	5.0	30.0
BH-15	0499788	3966692	40	-	30.0
BH-15-1	0499980	3966949	45	-	30.0
BH-16	0499947	3967256	30	3.0	29.5
BH-25	0502104	3960685	20.5	2.0	10.0
BH-26	0503113	3960827	30.0	-	-
BH-27	0503496	3960459	20.0	2.0	14.0
BH-28	0503917	3959854	20.0	-	11.0
BH-29	0503913	3959325	20.0	1.5	20.0
BH-30	0503989	3958997	20.0		
BH-31	0504214	3958623	20.0	2.0	13.0

BH-32	0504407	3958404	20.0	11.0

۳-۲. آزمایش های صحرایی یا برجا (In situ Test)

با توجه به این که در مواردی هم چون خاک های رسی حساس و نرم، خاک هـای سـخت، خاک های ماسه ای و شنی و رس های ترک‌دار امکـان اخـذ نمونـه دسـت نخـورده دشـوار می‌باشد و تعیین مقاومت یا تغییر شکل پذیری نمونه های خاک در شرایط واقعی از اهمیت زیادی برخوردار است، لزوم آزمایش های صحرایی یا برجا مطرح می‌گردد.

شکل شماره ۳-۲: نمایی از عملیات صحرایی[11]

لازم به ذکر است که این آزمایش ها مبتنی بر خواص مختلف خاک می باشد که از ایـن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

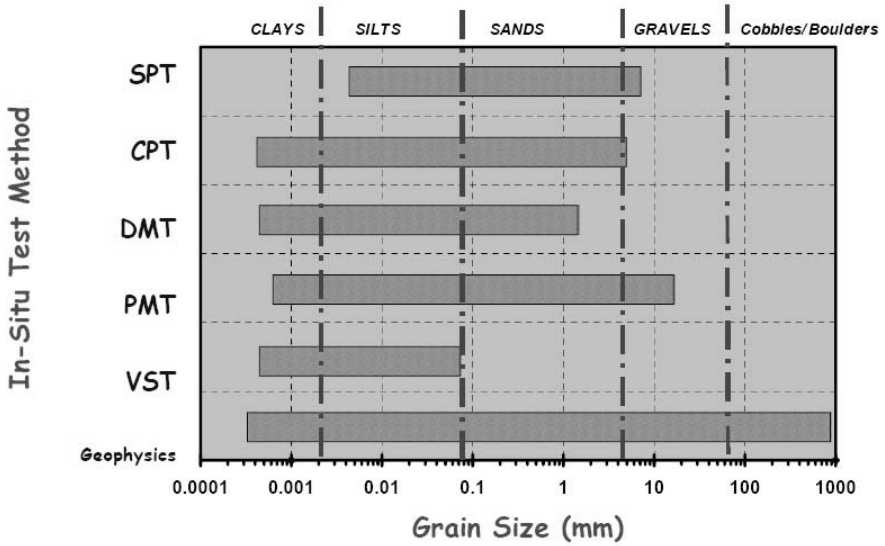
۱. آزمون‌های مبتنی بر نفوذ مانند: آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)، آزمـایش نفـوذ مخـروط (CPT)

۲. آزمون‌های مبتنی بر تعیین مقاومت و یا تغییر شکل پذیری مانند: آزمایش برش پره (VST)، آزمایش فشار سنجی (PMT)، آزمایش بارگذاری صحرایی (PLT)، آزمایش برش برجا

۳. آزمون‌های مبتنی بر مطالعات ژئوفیزیکی خاک‌ها

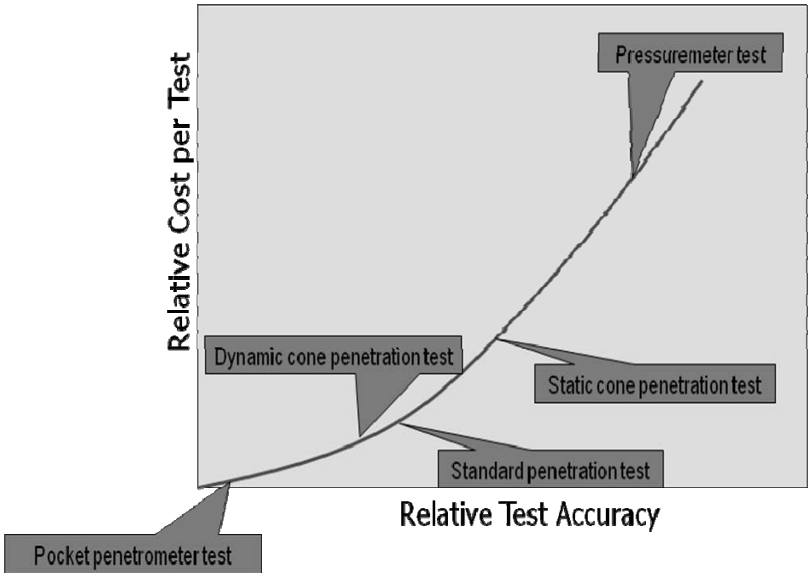
۴. آزمون‌های مبتنی بر تعیین نفوذپذیری خاک‌ها

لازم به ذکر است هر یک از آزمایش های ذکر شده بستگی به مشخصات و خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها دارد. شکل زیر حدود و دامنه کاربرد آزمایش‌های صحرایی مختلف را بر حسب اندازه ذرات خاک نشان می‌دهد.



شکل شماره ۳-۳: حدود و دامنه کاربرد آزمایش های صحرایی مختلف (بر حسب اندازه ذرات خاک)

هم چنین شکل زیر مقایسه بین هزینه و کارآیی یا دقت آزمایش های صحرایی مختلف را نشان می‌دهد. همان طوری که از شکل دیده می‌شود، با افزایش دقت نسبی آزمایش هزینه انجام آزمایش زیاد می‌گردد.



شکل شماره ۳-۴: مقایسه بین هزینه و کارآیی یا دقت آزمایش های صحرایی مختلف

۳-۲-۱. آزمایش نفوذ استاندارد (S.P.T)

به منظور اخذ اطلاعات لازم در مورد میزان تراکم نسبی خاک(Dr) برای خاک‌های غیرچسبنده و یا شاخص سختی خاک برای خاک های چسبنده و هم چنین اخذ نمونه دست خورده از لایه‌های خاک در هنگام اجرای عملیات حفاری، آزمایش نفوذ میله استاندارد (S.P.T = Standard Penetration Test) به طور متوسط تعداد ضربه های معرف رفتار خاک حوزه تأثیر بار پی ها با توجه به فشار فوقانی (Overburden pressure) اصلاح گردیده است.

این آزمایش اولین بار در کشور سوئد در سال ۱۹۰۵ میلادی انجام گرفت و سپس در سال ۱۹۵۸ میلادی تحت شماره ASTM DIZ 88 استاندارد گردید. این آزمایش با توجه به سادگی و سرعت انجام آن کاربردهای فراوانی در مهندسی ژئوفیزیک داشته و در

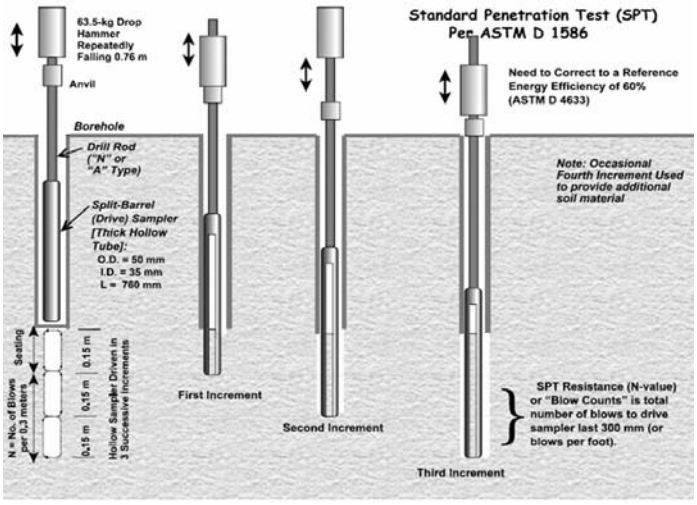
مطالعات استاتیکی و یا دینامیکی می‌توان از نتایج آن بهره برد. روش انجام این آزمایش به صورت زیر می باشد: [6, 19,21]

یک وزنه ۶۳/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۷۶ سانتی متری بر روی نمونه گیر دو کفه ای نواخته می‌شود. تعداد ضربات لازم برای نفوذ ۳ مرحله ۱۵ سانتی متری قرائت و یادداشت می‌گردد.

در نهایت مجموع تعداد ضربات لازم برای نفوذ دو مرحله ۱۵ سانتی متری انتهایی به عنوان عدد نفوذ استاندارد (N) گزارش می‌گردد.

$$N = N2 + N3$$

اشکال زیر گویای این مطلب می باشد.



شکل شماره ۳-۵: مراحل مختلف آزمایش نفوذ استاندارد

۳-۲-۱. تصحیح آزمایش نفوذ استاندارد

به علت پارامترهایی هم چون روش انجام آزمایش، جنس خاک، سطح آب زیرزمینی، اثر سربار و اثر انرژی مؤثر لازم است، عدد به دست آمده از آزمایش نفوذ استاندارد (N) اصلاح گردد، این عدد اصلاح شده با Ncor نمایش داده می‌شود.

$$N_{cor} = N_F \times C_N \times C_E \times C_R \times C_B \times C_S$$

N_F = مقدار عدد نفوذ استاندارد به دست آمده از صحرا

C_N = ضریب اصلاح فشار مؤثر سربار

C_E = ضریب اصلاح نسبت انرژی چکش

C_R = ضریب اصلاح طول میله رابط

C_B = ضریب اصلاح قطر گمانه

C_S = ضریب اصلاح روش نمونه گیری

جدول زیر اصلاح مربوط به پارامترهای مذکور را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۳-۲: اصلاح پارامترهای در آزمایش نفوذ استاندارد (N)

Factor (1)	Equipment variable (2)	Term (3)	Correction (4)
Overburden pressure	—	C_N	$(P_a/\sigma'_{vo})^{0.5}$
Overburden pressure	—	C_N	$C_N \leq 1.7$
Energy ratio	Donut hammer	C_E	0.5–1.0
Energy ratio	Safety hammer	C_E	0.7–1.2
Energy ratio	Automatic-trip Donut-type hammer	C_E	0.8–1.3
Borehole diameter	65–115 mm	C_B	1.0
Borehole diameter	150 mm	C_B	1.05
Borehole diameter	200 mm	C_B	1.15
Rod length	<3 m	C_R	0.75
Rod length	3–4 m	C_R	0.8
Rod length	4–6 m	C_R	0.85
Rod length	6–10 m	C_R	0.95
Rod length	10–30 m	C_R	1.0
Sampling method	Standard sampler	C_S	1.0
Sampling method	Sampler without liners	C_S	1.1–1.3

خطاهای متحمل در آزمایش ناشی از شرایط محیطی انسانی و تغییرات می باشد. شرایطی همچون پدیده جوشش در کف گمانه، وجود خاک های ماسه ای، افزایش فشار آب حفره ای در رس های اشباع، سرعت انجام و شمارش ضربات، کمانش میله های رابط، اصطکاک بین قطعات و خطاهای مربوط به نمونه گیر می‌تواند در نتایج حاصل از آزمایش تأثیرگذار باشد. [17, 18]

۳-۲-۱-۲. موارد کاربرد آزمایش نفوذ استاندارد

با توجه به سهولت انجام آزمایش می‌توان از نتایج آن در موارد زیر بهره جست:

الف) تخمین ظرفیت باربری خاک

ب) کنترل تراکم

ج) برآورد پتانسیل خاک ها

پارامترهایی هم چون مدول الاستیسیته، مقاومت زهکشی شده، دانسیته نسبی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌تواند قابل استخراج از نتایج آزمایش باشد.

از پارامترهای قابل استخراج در خاک های دانه ای می‌توان به موارد زیر اشاره نمود :

خاک‌های ماسه ای $\varphi = ۰.۳۶N_{۷۰} + ۲۷$

خاک‌های شنی $\varphi = ۴.۵N_{۷۰} + ۲۰$

جدول زیر دانسیته نسبی را برای خاک های دانه ای بر حسب مقادیر عدد نفوذ استاندارد نشان می‌دهد.

جدول شماره ۳-۳: دانسیته نسبی خاک‌های دانه ای بر حسب مقادیر عدد نفوذ استاندارد

شرح		بسیار سست	سست	متوسط	متراکم	بسیار متراکم
تراکم نسبی D_r		0	0.15	0.35	0.65	0.85
SPT N'_{70}:	ریز	1–2	3–6	7–15	16–30	?
	متوسط	2–3	4–7	8–20	21–40	> 40
	درشت	3–6	5–9	10–25	26–45	> 45
ϕ:	ریز	26–28	28–30	30–34	33–38	
	متوسط	27–28	30–32	32–36	36–42	< 50
	درشت	28–30	30–34	33–40	40–50	
γ_{wet}, kN/m^3		11–16*	14–18	17–20	17–22	20–23

همچنین ارتباط بین سفتی خاک های رسی بر حسب عدد نفوذ استاندارد به صورت جدول زیر می باشد:

جدول شماره ۳-۴: ارتباط بین سفتی خاک های رسی بر حسب عدد نفوذ استاندارد

سفتی			N'_{70}	q_u, kPa	توضیحات
بسیار نرم	NC	رس جوان	۰-۲	<۲۵	در اثر فشردن در میان انگشتان دست بیرون می‌زند
نرم			۳-۵	۲۵-۵۰	در اثر فشردن بسیار آسان تغییرشکل می‌دهد
متوسط			۶-۹	۵۰-۱۰۰	؟؟
سفت	افزایش OCR	کهنه/خودگیر (سیمانی شده)	۱۰-۱۶	۱۰۰-۲۰۰	تغییرشکل دادن آن با فشردن دست دشوار است
بسیارسفت			۱۷-۳۰	۲۰۰-۴۰۰	تغییرشکل دادن آن با فشردن دست بسیار دشوار است
سخت			> ۳۰	>۴۰۰	تغییرشکل دادن آن با فشردن دست تقریباً غیرممکن است

* تعداد ضربات و تقسیم‌بندی OCR جنبهٔ راهنما دارد ـ در خاک رس «استثنای از قانون» بسیار متداول است .

با توجه به اهمیت پارامتر مدول الاستیسیته در مطالعات مهندسی ژئوتکنیک، جدول زیر حدود تقریبی از مقدار مدول الاستیسیته بر حسب مقادیر عدد نفوذ استاندارد در خاک‌های ریزدانه و درشت دانه را نشان می‌دهد.

جدول شماره ۳-۵: حدود تقریبی از مقدار مدول الاستیسیته بر حسب مقادیر عدد نفوذ استاندارد در خاک‌های ریزدانه و درشت دانه

خاک	SPT	CPT
ماسه (عادی تحکیم یافته)	$E_s = 500(N + 15)$	$E_s = (2 \text{ تا } 4)q_u$
	$= 7000\sqrt{N}$	$\approx 8000\sqrt{q_c}$
	$= 6000N$	— — —
	— — —	$E_s = 1.2(3D_r^2 + 2)q_c$
	$\ddagger E_s = (15000 \text{ تا } 22000) \cdot \ln N$	$^*E_s = (1 + D_r^2)q_c$
ماسه (اشباع)	$E_s = 250(N + 15)$	$E_s = Fq_c$
		$e = 1.0 \quad F = 3.5$
		$e = 0.6 \quad F = 7.0$
تمامی ماسه‌ها (عادی تحکیم‌یافته)	$\P E_s = (2600 \text{ تا } 2900)N$	
ماسه (بیش تحکیم یافته)	$\dagger E_s = 40000 + 1050N$	$E_s = (6 \text{ تا } 30)q_c$
	$E_{s(OCR)} \approx E_{s,nc}\sqrt{OCR}$	
ماسهٔ شن‌دار	$E_s = 1200(N + 6)$	
	$= 600(N + 6) \quad N \le 15$	
	$= 600(N + 6) + 2000 \quad N > 15$	
ماسهٔ رس‌دار	$E_s = 320(N + 15)$	$E_s = (3 \text{ تا } 6)q_c$
لایها، لای ماسه‌دار یا لای رس‌دار	$E_s = 300(N + 6)$	$E_s = (1 \text{ تا } 2)q_c$
	چنانچه $q_c < 2500$ kPa	$^\S E'_s = 2.5q_c$
	$2500 < q_c < 5000$	$E'_s = 4q_c + 5000$
	که دراین جا:	
	$E'_s =$ مدول محدود شده $= \frac{E_s(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} = \frac{1}{m_v}$	
رس نرم یا لای رس‌دار		$E_s = (3 \text{ تا } 8)q_c$

۳-۲-۲. آزمایش نفوذ مخروط (CPT)

این آزمایش در مواردی هم چون شناسایی لایه‌های خاک زیرین زمین، تخمین ظرفیت باربری، نشست و طراحی شمع ها بکار می‌رود. این آزمایش در سال ۱۹۳۴ میلادی در کشور هلند ابداع و سپس توسعه یافت و اصالتاً به عنوان ابزاری برای تعیین موقعیت و تخمین چگالی لایه‌های ماسه موجود در داخل رس های نرم به منظور طراحی شمع‌های کوبشی بکار می‌رفت. در این آزمایش یک مخروط با زاویه رأس ۶۰ درجه و سطح قاعده

۱۰سانتی متر مربع با سرعت یکنواختی در حدود ۲ سانتی متر بر ثانیه به داخل خاک رانده شده و مقاومت نوک مخروط (qc) و مقاومت جداره اصطکاکی (qs) اندازه گیری می‌شود. این آزمایش در شرایط استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده می باشد. شکل زیر مشخصات مخروط مورد نظر را نشان می‌دهد. [16,17, 18]

در صورتی که فشار لازم برای فرو بردن نوک مخروط با F1 و فشار لازم برای فرو کردن نوک و غلاف اصطکاکی با F2 نمایش داده شود، می‌توان پارامترهای qc , qs را به صورت زیر تعیین نمود:

$$q_c = \frac{F_1}{A_c}$$

$$q_s = \frac{F_2 - F_1}{A_S}$$

AC و AS به ترتیب مساحت نوک و جداره مخروط می باشد.

مقاومت نوک به دست آمده از آزمایش نفوذ مخروط به زاویه اصطکاک داخلی خاک (درخاک های دانه ای) و به سفتی خاک‌های رسی مرتبط می باشد. شکل زیر تغییرات مقاومت نوک (qc) با کشش مؤثر قائم (σ'_v) و زاویه اصطکاک داخلی خاک در ماسه را نشان می‌دهد.

شکل شماره۳-۶: تغییرات مقاومت نوک (q_c) با کشش مؤثر قائم (σ'_v) و

زاویه اصطکاک داخلی خاک در ماسه

شکل زیر مراحل آزمایش نفوذ مخروط را نشان می‌دهد.

شکل شماره ۳-۷: مراحل آزمایش نفوذ مخروط

۳-۲-۲-۱. انواع مخروط

با توجه به اهمیت مخروط در تعیین مشخصات ژئوتکنیکی لایه های خاک، می‌توان به انواع زیر اشاره نمود:

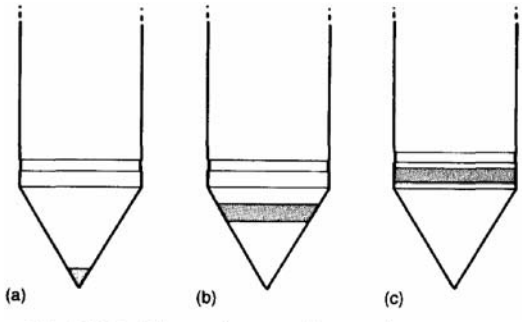
الف) مکانیکی

شکل شماره ۳-۸: مخروط مکانیکی

ب) اصطکاکی الکتریکی

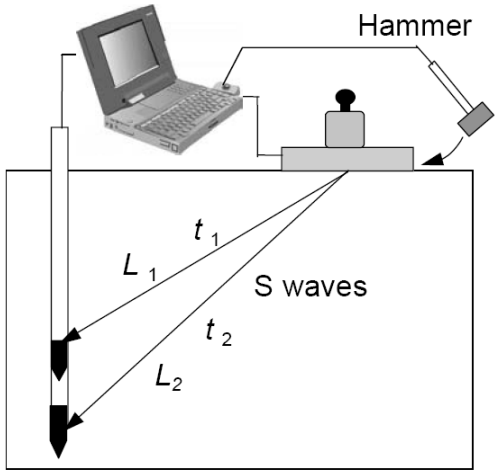
شکل شماره ۳- ۹: مخروط اصطکاکی الکتریکی

پ) پیزو الکتریک



شکل شماره ۳-۱۰: مخروط پیزو الکتریک

ت) لرزه ای



شکل شماره ۳-۱۱: مخروط لرزه ای

جدول زیر چگونگی انتخاب نوع مخروط لازم در آزمایش را نشان می‌دهد.

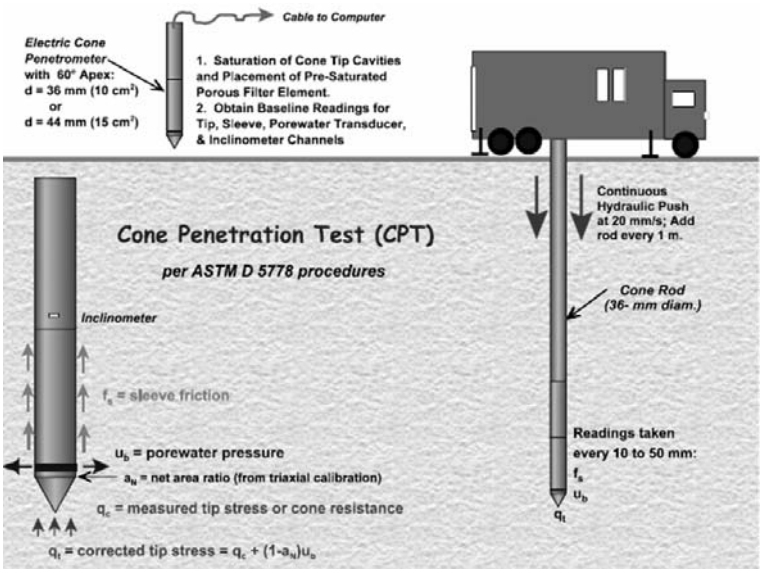
جدول شماره ۳-۶: انتخاب نوع مخروط لازم در آزمایش

Method	Procedure	Applicable Soil Types	Applicable Soil Properties	Limitations / Remarks
Electric Cone Penetrometer (CPT)	A cylindrical probe is hydraulically pushed vertically through the soil measuring the resistance at the conical tip of the probe and along the steel shaft; measurements typically recorded at 2 to 5 cm intervals	Silts, sands, clays, and peat	Estimation of soil type and detailed stratigraphy Sand: ϕ', D_r, σ_{ho}' Clay: s_u, σ_p'	No soil sample is obtained; The probe may become damaged if testing in gravelly soils is attempted; Test results not particularly good for estimating deformation characteristics
Piezocone Penetrometer (CPTu)	Same as CPT; additionally, penetration porewater pressures are measured using a transducer and porous filter element	Silts, sands, clays, and peat	Same as CPT, with additionally: Sand: u_o / water table elevation Clay: σ_p', c_h, k_h OCR	If the filter element and ports are not completely saturated, the pore pressure response may be misleading; Compression and wear of a mid-face (u_1) element will effect readings; Test results not particularly good for estimating deformation characteristics
Seismic CPTu (SCPTu)	Same as CPTu; additionally, shear waves generated at the surface are recorded by a geophone at 1-m intervals throughout the profile for calculation of shear wave velocity	Silts, sands, clays, and peat	Same as CPTu, with additionally: V_s, G_{max}, E_{max}, ρ_{tot}, e_o	First arrival times should be used for calculation of shear wave velocity; If first crossover times are used, the error in shear wave velocity will increase with depth

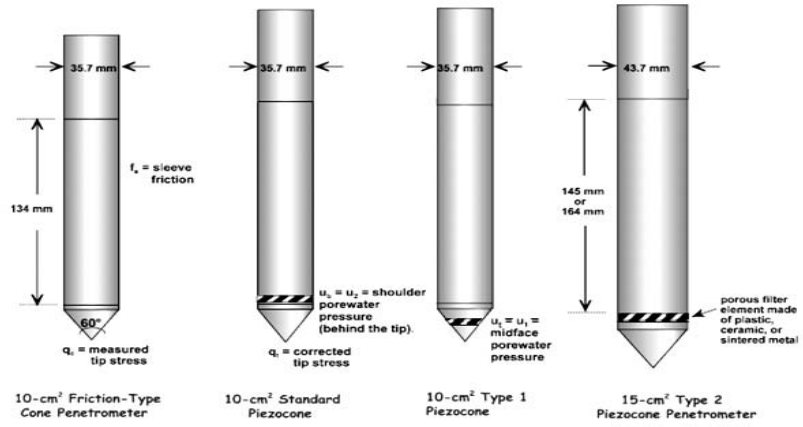
مشابه آزمایش نفوذ استاندارد می‌توان از نتایج آزمایش نفـوذ مخـروط در تعیـین زاویـه اصطکاک داخلی و مقاومت زهکشی نشده در خـاک هـای ماسـه ای و رسـی بهـره گرفـت. [6, 16,17,18]

۳-۲-۲-۲. آزمایش نفوذ مخروط با تعیین فشار آب حفره ای CPTU

در این نوع آزمایش وسایل اندازه گیری فشار آب حفره ای در قسمت فوقانی نـوک مخـروط تعبیه شده است. اشکال زیر گویای این مطلب می باشند.



شکل شماره ۳-۱۲: وسایل اندازه گیری فشار آب حفره ای در قسمت فوقانی نوک مخروط



شکل شماره ۳-۱۳: وسایل اندازه گیری فشار آب حفره ای در قسمت فوقانی نوک مخروط

شکل شماره۳ـ۱۴: وسایل اندازه گیری فشار آب حفره ای در قسمت فوقانی نوک مخروط

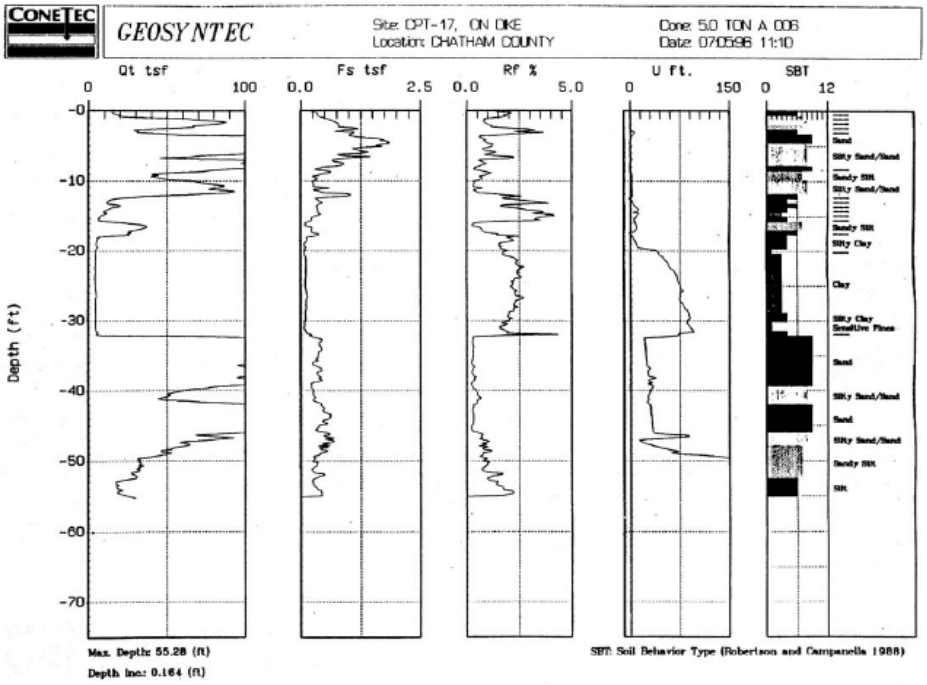
۳-۲-۲-۳. آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی SCPT (Seismic Cone Penetration Test)

در این نوع آزمایش بار به صورت دینامیکی و ضربه ای بوده و انرژی منتقل شده با توجه به وزن و ارتفاع سقوط چکش و ضریب راندمان سیستم از اهمیت زیادی برخوردار می باشد.

در بعضی از آزمایش های لرزه ای، بار دینامیکی به صورت استاتیکی متناوب اجرا می‌گردد. روش کار مانند آزمایش نفوذ مخروط در حالت استاتیکی می باشد و فقط با افزودن یک شیکر (Shacker) مقدار بار وارده، افزایش داده می‌شود.

نتایج حاصل از آزمایش نفوذ مخروط در اعماق مختلف لایه های تحت الارضی خاک به صورت پیوسته می باشد و در هر نقطه از تراز زمین اطلاعاتی هم چون مقاومت نوک، مقاومت جداره اصطکاکی، فشار آب حفره ای و نسبت اصطکاکی را نمایش می‌دهد. [16,17,18]

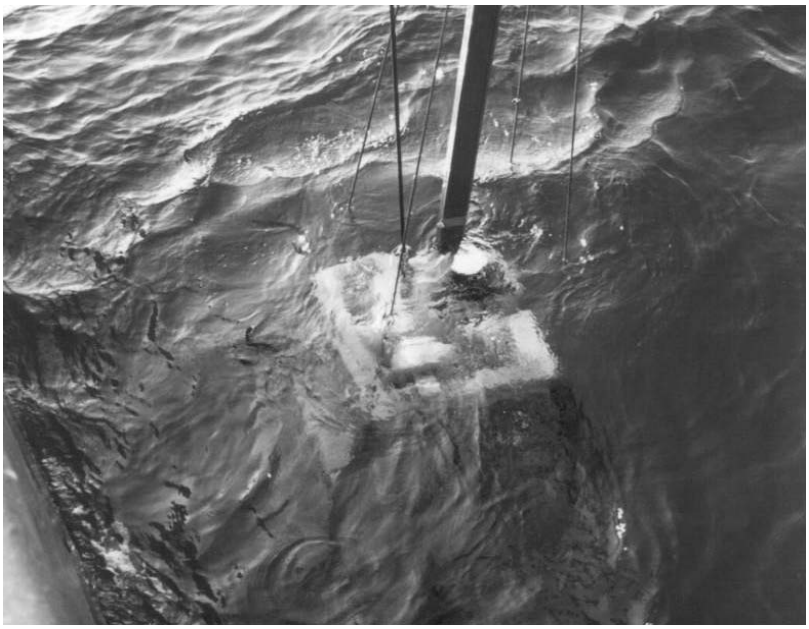
شکل زیر به صورت نمونه نتایج حاصل از انجام این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۳-۱۵: نتایج حاصل از انجام آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی SCPT

لازم به ذکر است علاوه بر مطالعات ژئوتکنیکی در خشکی، آزمایش نفوذ مخروط در سازه‌های فراحل ساحل(Offshore) به منظور تعیین خواص ژئوتکنیکی مورد نیاز لایه‌های بستر دریا مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل های زیر نمونه ای از این تجهیزات را نشان می‌دهد. [18, 19]

شکل شماره۳-۱۶: تجهیزات لازم برای آزمایش نفوذ مخروط در سازه های فراحل ساحل



شکل شماره۳-۱۷: تجهیزات لازم برای آزمایش نفوذ مخروط در سازه های فراحل ساحل

۳-۳. آزمایش لوفران

یکی از پارامترهای مهم مصالح ناپیوسته از قبیل آبرفت ها، واریزه ها و خاک های برجا، ضریب تراوایی این مصالح در صحرا می باشد که در طراحی سازه ها به ویژه سازه های آبی جزء پارامترهای اصلی به حساب می آید و در محاسبات نشت آب از پی ها و طراحی دیواره‌های آب بند به کار گرفته می شود. [11]

جدول شماره ۳-۷: نتایج آزمایشات لوفران

BH -NO.	Depth (m)	K (cm/sec)	
		Horizontal Percolation	Vertical Percolation
BH-8	4.5-5.5	4.35×10^{-5}	6.00×10^{-4}
	7.0-8.0	2.33×10^{-5}	1.88×10^{-4}
BH-3-1	4.5-5.5	1.03×10^{-4}	8.3×10^{-4}
	8.0-9.0	1.42×10^{-4}	1.15×10^{-3}
BH-15-1	4.0-5.0	8.84×10^{-5}	6.4×10^{-4}
	7.0-8.0	6.34×10^{-5}	5.11×10^{-4}
	11.5-12.5	2.48×10^{-5}	2.0×10^{-4}

۳-۴. آزمایش‌های آزمایشگاهی

از آزمایش‌های آزمایشگاهی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- آزمایش دانه بندی کامل (تجزیه مکانیکی و هیدرومتری) A.S.T.M D 422-90
- آزمایش تعیین حدود اتربرگ A.S.T.M D 423-93
- آزمایش دانسیته فاز جامد خاک A.S.T.M D 854-92
- آزمایش برش مستقیم A.S.T.M D 3080-90
- آزمایش تک محوری A.S.T.M D 2166-85

- آزمایش تعیین PH خاک A.S.T.M D 4972

- آزمایش تعیین میزان سولفات خاک B.S 1377- part 3

- آزمایش تعیین کلر خاک A.S.T.M D 1411

در اثر مطالعات انجام شده لایه های مختلف خاک شناسایی و مشخصات آنها به دست آمده است. جهت انجام محاسبات فنی باید با توجه به علم احتمالات و تجربه مهندسی در رشته مکانیک خاک از بین نتایج مختلف برای هر لایه خاک عدد قاطعی را انتخاب نموده و لایه مربوطه را به طور هموژن در نظر گرفت. ضمناً تعداد لایه های خاک را تا حد امکان به طور ایده آلیزه شده کم نمود تا امکان محاسبات ظرفیت باربری به کمک معادله تعیین ظرفیت باربری به وجود آید. بعد از انجام عملیات پیزومتری اندازه گیری سطح آب صورت می گیرد.

شکل شماره ۳-۱۸: عملیات اندازه گیری سطح آب

خلاصه

در مواردی هم چون خاک های رسی حساس و نرم، خاک های سخت، خاک های ماسه ای و شنی و رس های ترکدار امکان اخذ نمونه دست نخورده دشوار می باشد و تعیین مقاومت یا تغییر شکل پذیری نمونه های خاک در شرایط واقعی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد، لذا لزوم انجام آزمایش های صحرایی یا برجا از اهمیت شایانی برخودار می باشد.

این آزمایش ها مبتنی بر خواص مختلف خاک از جمله نفوذ، مقاومت و یا تغییر شکل پذیری، مطالعات ژئوفیزیکی و نفوذپذیری استوار می باشد. روشهای مختلف پایدارسازی از قبیل میخ کوبی خاک، دیوار دیافراگمی، دیوار شمعی و ... در مهندسی عمران کاربرد داشته و بدیهی است انتخاب این روش‌ها بستگی به پارامترهای مختلفی از قبیل شرایط ژئوتکنیکی محل، ملاحظات اقتصادی و دسترسی تجهیزات و... دارد.

آزمون

دلایل استفاده از آزمایش‌های صحرایی ژئوتکنیک را شرح دهید؟

آزمایش‌های صحرایی ژئوتکنیک مبتنی بر چه عواملی هستند؟

کاربردهای آزمایش نفوذ استاندارد را توضیح دهید؟

انواع مخروط‌های مورد استفاده در آزمایش نفوذ مخروط را نام ببرید؟

دلایل تصحیح عدد آزمایش نفوذ استاندارد در مطالعات ژئوتکنیک را ذکر نمایید؟

فصل چهارم

فضاهای زیرزمینی

اهداف

هدف از مطالعه این فصل، آشنایی با مطالب زیر می باشد:

۱. روش‌های مختلف حفاری زیر زمینی نظیر ایستگاه‌های مترو و تونل‌ها

۲. انتخاب سیستم حفاری مناسب برای پروژه مورد نظر

۴-۱. انواع حفریات زیر زمینی

حفریات زیر زمینی برای تأمین اهداف مختلفی ایجاد می شوند. حفریات زیر زمینی برای مصارف مختلفی از قبیل ترابری، استقرار تجهیزات، مراکز صنعتی و ... ایجاد می شوند. **[8]**

۴-۱-۱. تونل

مقصود از تونل راهرو زیر زمینی افقی یا تقریباً افقی است که حداقل از یک سمت به هوای آزاد راه دارد. احتمالاً اولین تونل ها در عصر حجر برای توسعه خانه ها حفر شد. این امر نشانگر ایجاد حفریات به منظور بهبود شرایط زندگی بوده است. پیش از تمدن روم باستان، در مصر، یونان، هند و خاور دور و ایتالیای شمالی، تماماً تکنیک های تونل سازی دستی مورد استفاده قرار می گرفت که در اغلب آنها نیز از فرایند های مرتبط با آتش برای حفر تونل های نظامی، انتقال آب و مقبره ها کمک گرفته شده است. در ایران نیز از چند هزار سال پیش، به منظور استفاده از آب های زیر زمینی تونل هایی برای اتصال چاه قنات ها به یکدیگر حفر شده است. طول بعضی از این تونل ها به ۷۰ کیلومتر نیز می رسد. تعداد قنات‌های ایران بالغ بر ۵۰۰۰۰ رشته برآورد شده است. جالب توجه است که این قنات های متعدد، طویل و عمیق با وسایل بسیار ابتدایی حفر شده اند.

رومی ها نیز در ساخت قنات ها و هم چنین در حفاری تونل های راه پرکار بودند. آنها در ضمن اولین دوربین های مهندسی اولیه را برای کنترل تراز و حفاری تونل ها به کار بردند.

اهمیت احداث تونل ها در دوران‌های قدیم، تا بدین جاست که کارشناسان، نشانه های احداث تونل در آن دوران را نشانگر رشد فرهنگ و به ویژه رشد تکنیکی و توان اقتصادی آن

جامعه دانسته اند. تمدن های اولیه بـه سـرعت بـه اهمیـت تونـل هـا، بـه عنـوان راه هـای دسترسی به کانی ها و مواد طبیعی نظیر سنگ چخماق پی بردند. کاربرد تونل ها دامنـه ی گسترده ای از طاق زدن بر روی قبرها تا انتقال آب و یا گذرگاه هایی جهت رفـت و آمـد را شامل شد. کاربردهای نظامی تونل ها، به ویژه از جهت بالا بـردن تـوان گریـز یـا راه هـایی جهت یورش به قرارگاه ها و قلعه های دشمن، از دیگر جنبه های مهم کـاربرد تونـل هـا در تمدن های اولیه بوده است.

تونل سازی هم زمان با انقلاب صنعتی ، به ویژه به منظور حمل و نقـل ، تحـرک قابـل ملاحظه ای یافت تونل سازی به گسترش و پیشرفت کانال سازی کمک کرد و ایـن امـر در توسعه صنعت به ویژه در قرون ۱۸ و ۱۹ میلادی در انگلستان سهم بـه سـزایی داشـت. بـه طور کلی می‌توان تونل ها را بر اساس کاربردی آنها به سه دسته تقسیم کرد. [5,8,9]

الف) تونل‌های حمل و نقل

این تونل‌ها به منظور تردد افراد و تجهیزات احداث می شوند . در ایـن دسـته از رده بنـدی تونل های راه، راه آهن، ناوبری و مترو قرار می گیرند .

یکی از اولین تونل های ارتباطی که دوران مدرن احداث شد ، تونل مال پاس بود . تونل مال پاس با طول ۱۵۷ متر بر روی کانال دومیدی در جنوب فرانسه در سال ۱۶۸۱ سـاخته شد. این سازه اولین تونل ساخته شده به وسیله حفاری و انفجار باروت بـود. در اوایـل قـرن نوزدهم به منظور عبور از قسمت های پایین دست رودخانه تایمز هیچ سازه ای موجود نبود و عابران مجبور بودند با طی یک راه انحرافـی ۳ کیلـومتری بـا قـایق مسـیر روترهایـت بـه ویپنیگ را طی کنند. در سال ۱۸۰۰ عملیات ساخت یک تونل نیز به دلیل ریزشی بـودن و مناسب نبودن رسوبات کف رودخانه متوقف شد. تا این که در حدود سال ۱۸۲۰ فـردی بـه

نام مارک ایرامبارد برونل از فرانسه ایده استفاده از سپر را مطرح نمود و در سال ۱۸۲۵ کار احداث تونل بین روترهایت وویپینگ را آغاز و علی رغم جاری شدن چند نوبت سیل در سال ۱۸۴۳ آن را بازگشایی نمود. این تونل تامس نام گرفت و اولین تونل زیر آبی بود که بدون منحرف ساختن رودخانه حفر شد. [5, 7]

ب- تونل های معدنی

این نوع از تونل ها به منظور دسترسی به مواد معدنی و ایجاد شبکه معادن، احداث می شوند. در این گروه تونل های اکتشافی، گالری ها (تونل های استخراجی)، خدماتی و زهکشی قرار دارند.

تفاوت عمده تونل های معدنی و ترابری در عمر مفید آنها می باشد. به گونه ای که تونل‌های ترابری برای دوره هی بیش از۳۰ سال و با دید یک سازه دائمی طراحی و ساخته منی شوند. در حالی که عمر کاربری تونل های معدنی بسته به نوع کاربرد پس از خاتمه عمر معدن و یا در حین فعالیت معدن به اتمام رسیده و در مواردی که به منظور کاربری موقت احداث می شوند. البته محدوده زمانی عمر تونل های معدنی ثابت نبوده و می‌تواند از ده سال تا صدها سال متغیر باشد.

تونل های زهکشی بزرگ، نظیر تونلی با طول ۷ کیلومتر در هیل کارن انگلستان، اهمیت زیادی در توسعه صنعت معدنکاری داشته اند. در سال ۱۷۵۹ جیمز برینـدلی با ساخت یک کانال به طول۱۶کیلومتر مجموعه معادن زغال دوک برید جواتر را به شهر منچستر متصل نمود . اثر اقتصادی تکمیل این کانال نصف شدن قیمت زغال در شهر و ایجاد یک انحصار واقعی برای معدن مذکور بود. تا قبل از قرن جدید اغلب تونل های معدنی به صورت سنتی (حفاری و آتشکاری) حفر می شدند. اما امروزه به دلیل پیشرفت تکنولوژی، افزایش قیمت مواد معدنی و افزایش تقاضا برای مواد معدنی، حفاری مکانیزه نیز توجیه

پذیر شده است. به گونه ای که امروزه در مواردی از دستگاه های تمام مقطع بـرای حفـاری گالری های اصلی معدن استفاده می‌شود.

ج- تونل های صنعتی

این تونل ها به منظور انتقال سیالات و یا راهروهای دسترسی بـه مراکـز صـنعتی و نظـامی احداث می شوند . این گروه شامل تونل های انتقال آب، فاظلاب و مسـیر هـای منتهـی بـه مغار های صنعتی و نظامی می‌شود. تونل های یکـی از پایـه هـای انقـلاب صـنعتی بـوده و توانستند در مقیاس بسیار بزرگ هزینه های حمل و نقل را کاهش دهنـد در انگلسـتان، در قرن ۱۸ نیز جیمز بریندلی از خانواده ای مزرعه دار با نظارت بر طراحـی و سـاخت بـیش از ۸۵۰ کیلو متر کانال و تعدادی تونل به عنوان پدر کانال و تونل های انتقال اب ملقب شد.

همان گونه که اشاره شد تونل های ارتباطی قنات ها سابقه چندین هزار ساله دارند. امـا بررسی تاریخچه پیشرفت روش ها و تکنیک ها در تونل سازی نشانگر این مطلب اسـت کـه مانند بسیاری دیگر از علوم و فنون قسمت اعظم رشد این صنعت در قـرن گذشـته صـورت گرفته و تا حال نیز ادامه دارد.

مثال های متعددی می‌توان از نقش و تأثیر عمده تونل سازی و پروژه های بزرگ صنعت از گذشته تا حال ذکر کرد . تونل مشهور مونت بلان دو کشـور فرانسـه و ایتالیـا را بـه هـم متصل می سازد. در فنلاند سازه های زیر زمینی را به صورت غارهای عظیم بـدون پوشـش بتنی، به منظور انبار مواد نفتی مورد استفاده قرار گرفته و در حال حاضر بـیش از ۷۵ انبـار نفتی در سراسر کشور فنلاند با گنجایش بیش از ۱۰ میلیون متر مکعب ساخته شده اند.

از آنجایی که تونل سازی به وقت و هزینه زیادی نیـاز دارد ، بایـد در طراحـی و سـاخت تونل مسائل متعددی مورد توجه قرار گیرد. پیش از احداث تونل بایستی منطقه مـورد نظـر مطالعه شده و مناسب ترین مسیر برای حفاری انتخاب شود. در صورت عدم انتخاب صحیح

مسیر حفر و دهانه های تونل مشکلات عدیده ای ایجاد خواهد شد. از آن جمله می‌توان بـه قرار گرفتن تونل در ذون زلزله خیز، ریزش های پی در پی، آماسنده بدون مسیر تونل، قـرار گرفتن دهانه تونل در مسیر سیلاب های فصلی و ... اشـاره کـرد. در مسـیریابی تونـل بایـد مراحل مطالعاتی زیر طی شود. [8].

- بررسی عکس های هوایی و نقشه های توپوگرافی منطقه
- مطالعه ژئوفیزیکی
- حفر گمانه های اکتشافی
- بررسی جریان های آب زیر زمینی
- حفر گالریهای اکتشافی (در تونل های معدنی)
- آزمایشات مکانیک سنگ برجا
- انجام آزمونهای آزمایشگاهی

در هر پروژه ای بسته به امکانات مالی و تجهیزات و هم چنین نوع اطلاعات مـورد نیـاز تمام و یا بخشی از مراحل فوق طی می شوند.

خاک و سنگ‌های مسیر حفر تونل باید از دید زمین شناسی مهندسی مورد توجـه قـرار گیرند تا روش و ابزار مناسب برای حفر و نگهداری تأمین شود باید توجه داشت که در اغلب موارد امکان انتخاب زمین مناسب وجود ندارد. در اغلب تونل‌های راه آهن، راه و مترو مسـیر اجباراً به پروژه تحمیل می‌شود. در این گونه موارد انعطاف پذیری انتخاب مسیر بـه حـداقل می‌رسد.

در حفر تونل تأثیر سنگ های مسیر بیشتر از ابزار و تجهیزات نگهداری می باشـد. چـرا که سنگ های مسیر علاوه بر شرایط پایداری تونل بر روند حفاری نیز به طور مستقیم تأثیر می‌گذارند. روش انتخاب شده برای حفر تونل باید کمترین آسیب را به توده سنگ وارد کند. به عنوان مثال در پروژه‌ای که روش حفاری سنتی (آتشکاری) استفاده می‌شـود، اگـر خـرج

ویژه چال‌ها بیش از حد بهینه باشد، علاوه بر افزایش هزینه حفاری موجب ایجاد درزه های جدید در توده سنگ و ایجاد دسته درزه های جدید، نمی‌توان به طور کامل جلوگیری کرد. اما می‌توان این پدیده را کنترل نمود.

پس از تعیین مسیر تونل اقدامات اولیه برای طراحی تونل و روش اجرای آن به عمل آورده می‌شود. به هنگام طراحی تونل باید به موارد زیر توجه نمود.

- مطالعه وضعیت ژئوتکنیکی محل
- تطبیق گام به گام طرح و اجرا با شرایط زمین شناسی
- در نظر گرفتن روش هایی که اجرای آنها حداقل آسیب به شرایط طبیعی زمین را در پی خواهد داشت
- پیش بینی حرکات زمین در اطراف تونل

در سال های اخیر به دنبال افزایش نیاز به ایجاد فضاهای زیرزمینی با ابعاد بزرگ‌تر و در اعماق بیشتر با حفر آنها در زمین های نامناسب، از جمله در زیر آب ضرورت شناسایی هرچه کامل‌تر شرایط زمین آشکار شده است. تجربه نشان داده است که هرجا اینگونه بررسی ها نادیده گرفته شده یا به نحو صحیح انجام نشده است عواقب ناگوار یا حداقل طولانی تر شدن زمان اجرای پروژه و افزایش هزینه را به دنبال داشته است.

بررسی‌های زمین شناسی معمولاً توسط یک یا تلفیقی از روش های زیر از قبیل گردآوری اطلاعات موجود، پرس وجوهای محلی، استفاده از عکس های هوائی، نقشه ها و نیمرخ های توپوگرافی، زمین شناسی، اطلاعات ژنوتکنیکی حفر و برداشت چاهک، ترانشه، گمانه، تونل اکتشافی و سرانجام روشهای ژنوفیزیکی و... صورت می گیرد .هر یک از این روش‌ها از کارآیی‌ها و شرایط خاص خود برخوردارند. در این گونه بررسی‌ها تنها پس از آنکه روش ساده تر و کم هزینه تر نتوانست اطلاعات مورد نیاز را به دست دهد از روش

پیچیده‌تر، گرانتر یا وقت گیرتر استفاده می‌شود. نتیجه بررسی های زمین شناسی مسیر یک تونل یا محدوده یک فضای زیرزمینی معمولاً به صورت گزارشی که همراه با نقشه ها، نیمرخ‌ها و نمودارهای مربوطه است به مهندس طراح ارائه می‌شود. در برخی از موارد بررسی‌های زمین شناسی باید در تمامی طول اجرای پروژه و حتی در زمان بهره برداری از آن نیز ادامه یابد.

تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی برای مقاصد متنوعی ایجاد می‌شود که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف) تونل های حمل و نقل و دسترسی (راه ها و بزرگراها، راه آهن، مترو و معادن)

ب) تونل های آب بر (تونل های انحراف آب، تونل های آبگیر، تونل های آب رسانی شهری و تونل های تخلیه آب و فاضلاب)

ج) فضاهای زیرزمینی بزرگ (ایستگاه های مترو، نیروگاها، انبارهای زیرزمین و کارگاهای استخراج مواد معدنی) طراحی هر یک از فضاهای فوق مستلزم دسترسی به داده های مناسب و بکارگیری تمهیدت ویژه است. در هر مورد طراح باید ضمن آگاهی دقیق از شرایط زمین، ابتدا در جهت بهبود کیفیت مصالحی که قرار است تونل در آن حفر شود اقدام نماید. در بسیاری از زمین ها تونل ها نمیتوانند خود نگهدار باشند و برای پابرجا نگهداشتن آنها باید از حایل هایی استفاده کرد.

به نظر می‌رسد که مهم ترین عامل در طراحی تونل یا هر فضای زیرزمینی دیگر، تأمین پایداری آن است. قرارگیری این گونه سازه ها در میان مصالح طبیعی، یعنی سنگ و خاک، باعث شده است که شرایط زمین شناسی نقش اصلی را در پایداری ایفا نماید. متأسفانه بسیاری از داده های مین شناسی را نمی‌توان به طور مستقیم در طراحی سازه های زیر زمینی به کار گرفت. از این رو در سال های اخیر کوشش‌های بسیاری برای طراحی ژئو تکنیکی سنگ ها، یعنی ارائه ویژگی های آنها به زبان مهندسی صورت گرفته است.

این طبقه بندی ها امروزه به طور وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند. تجربه نشان داده است که به کارگیری این طبقه بندی ها بدون آگاهی از محدودیت های آنها و شرایط پیچیده ای که زمین می‌تواند داشته باشد، ممکن است مخاطره آمیز باشد.

۴-۲. اکتشاف مسیر تونل ها

از میان کلیه فعالیت های مهندسی عمران، حفر تونل و به طور کلی فضاهای زیرزمینی بیش از همه نیاز به شناسایی زمین دارد و این گونه سازه ها باید در زمینی مطمئن و مقاوم ایجاد شود، ولی شرایط درون زمین بسیار متغیر است و بر خلاف سطح زمین، امکان شناسایی و دسترسی به تمام نقاط آن نیز وجود ندارد.

زمین های سست و ریزشی، خرد شده و گسل خورده هوازده و متورم شونده و بالاخره آبدار، بیشترین مشکلات را برای حفر تونل به وجود می آورند و این در حالی است که در بسیاری از موارد انتخاب زمین مناسب با ما نیست. به عنوان مثال اغلب تونل های راه یا راه آهن محل های گذر اجباری اند و نمی‌توان مسیر آنها را برای رسیدن به زمین قابل اطمینان به مقدار زیاد تغییر داد. در چنین شرایطی وظیفه کاوشگر عبارت است از: مطالعه مسیر موجود و اخذ آن گونه اطلاعاتی است که با استفاده از آنها بتوان طراحی تونل را به انجام رسانده به نحوی که با به کارگیری کمترین پوشش استحکامات داخلی، سازه زیرزمینی پایداری قابل قبولی در برابر عومل مخرب داشته باشد.

به طور کلی طراح سازه ای می‌تواند به میل خود مصالح مورد نیاز را انتخاب کند ولی طراح تونل مجبور است که سازه خود را در میان سنگ و خاکی که طبیعت در اختیار او قرار داده حفر کند. با آگاهی از این واقعیت امروزه کوشش میشود تا در زمان حفاری از

صدمه زدن به سنگ اجتناب شده و از آن به عنوان مصالح اصلی در ساختمان تونل استفاده گردد.

درک این مطلب که این زمین است که مصالح سازنده فضاهای زیرزمینی را تشکیل میدهد، نه پوشش های موقت و دائمی، باعث شده است که امروزه طراحان فضاهای زیرزمینی دستورالعمل زیر را به کار گیرند.[4,5,7]

الف) مطالعه دقیق شرایط زمین شناسی و ژنوتکنیکی محل

ب) تطبیق هر چه بهتر طرح و اجرای پروژه با شرایط طبیعی زمین

ج) دستکاری حداقل و محتاطانه زمین

د) ثبت دائمی حرکات زمین در اطراف فضای ایجاد شده

همان گونه که دیده می‌شود اولین قدم در طراحی فضای زیرزمینی شناسایی زمین است.

پرسشی که اغلب برای مهندسان طراح مطرح می‌شود این است که در هر مورد خاص چه نوع و چه حجم از بررسی های زمین شناسی می‌تواند اطلاعات مورد نیاز را به دست دهد؟ طبقه بندی فضاهای زیرزمینی به صورت های گوناگون انجام می‌شود. از نقطه نظر ژنوتکنیکی، مهم ترین مسئله توجه به پایداری سازه ایجاد شده است، تونل ها و فضاهای زیرزمینی معدنی اغلب جنبه موقتی دارند و باید تنها در طول مدت زمانی که استخراج ادامه دارد پایدار بماند. در مقابل، گروه دیگری از سازه های زیرزمینی هستند که باید مدت زیادی پایداری خود را حفظ کنند. بر طبق یکی از طبقه بندی های ژئوتکنیکی موجود، فضاهای زیرزمینی به شش گروه A تا F تقسیم می شوند (جدول۴ـ ۱).

جدول شماره ۴-۱: طبقه بندی فضاهای زیرزمینی از منظر اهمیت پایداری

گروه	انواع	اهمیت پایداری
A	فضاهای موقتی (اغلب تونلها و فضاهای ایجاد شده در معادن زیرزمینی).	توجه به پایداری از اهمیت بیشتری برخوردار است.
B	تونلهای قایم[1] (چاههای با قطر زیاد که در معادن یا در سد سازی و دیگر کارهای ساختمانی احداث می شوند).	نیاز بیشتری به آگاهی از شرایط زمین احساس می شود.
C	فضاهای دائمی معدنی (مانند تونلهای اصلی معادن)[2]، تونلهای انتقال آب در پروژه‌های برق آبی (به استثنای تونلهای تحت فشار)، تونلهای پیشاهنگ[3] و اکتشافی برای فضاهای زیرزمینی بزرگ.	هزینه عملیات اکتشافی زمین شناسی و ژئوتکنیکی بیشتر می شود.
D	تونلهای کوچك راه و راه‌آهن. انبارها و تصفیه خانه‌های زیرزمینی. حفرات ضربه‌گیر هیدرولیکی[4] برای تونلهای تحت فشار. تونلهای دسترسی برای پروژه‌های برق آبی.	
E	تونلهای بزرگ راه و راه آهن. فضاهای بزرگ جهت نیروگاههای هیدرولیکی[5]. پناهگاههای نظامی.	
F	ایستگاههای مترو. نیروگاههای اتمی زیرزمینی.	

همان گونه که دیده می‌شود از بالا به پایین جدول نیاز به پایداری فضای زیرزمینی بیشتر می‌شود. دستیابی به پایداری بیشتر چه در زمان ساخت پروژه و چه در طول مدت بهره برداری از آن نیاز به آگاهی دقیق تر از شرایط زمین شناسی و مشخصات ژئوتکنیکی زمین و مصالح دارد.

۴-۳. بررسی های مقدماتی

امروزه بر خلاف گذشته، عملیات مربوط به بررسی های اولیه طراحی و عملیات اجرائی پروژه های ساختمانی، مخصوصا اگر از حساسیت خاص برخوردار باشند به صورت گروهی انجام می‌شود. در یک تیم طراحی و ساختمانی، بر حسب مورد ممکن است تخصص‌هایی

همچون ژئوفیزیک، نقشه بردار، اقتصادان، زمین شناس نیز عضویت داشته باشند یا اینکه به طور مقطعی از خدمات آنها استفاده شود. [4, 8]

منظور از زمین شناس در اینجا فردی است که علاوه بر آگاهی از دانش زمین شناسی، با مبانی مهندسی راه و ساختمان نیز آشنا باشد، به نحوی که بتواند اطلاعات مورد نیاز را به زبانی که قابل استفاده برای مهندسی طراح است در اختیار او قرار دهد. اولین سوالی که معمولاً در مورد زمین شناسی مطرح می‌شود مقدار هزینه ای است که باید به آن اختصاص داد. خوشبختانه این بررسی ها با تمام نتایج مثبتی که می‌تواند به همراه داشته باشد بسیار کم خرج اند. مطالعه آماری پروژه های زیرزمینی اجرا شده در نقاط مختلف نشان داده است که بررسی های زمین شناسی محل، بین ۰/۳ تا ۲ درصد کل هزینه طرح را به خود اختصاص می دهند.

تجربه نشان داده است که شناسایی دقیق زمین می‌تواند احتمال وقوع پیشامدهای احتمالی را کاهش دهد و در مقابل، عدم توجه به آن گاهی می‌تواند عواقب ناخواسته ای را به همراه بیاورد.

به عنوان مثال برای حفر تونلی در یکی از کشورها، به دلیل عجله ای که وجود داشت، کار حفاری پس از بررسی های ناچیز اولیه و برآورد زمان حفاری به سرعت در یک لایه کوارتزیتی آغاز شد و تنها پس از اتمام حفاری بود که معلوم گردید در زیر این لایه سخت کوارتزیتی لایه ای از شیل با قابلیت حفاری خوب قرار دارد، که در صور انتقال محل تونل به داخل آن صرفه جویی بسیاری در وقت و هزینه ها صورت می گرفته است.

بررسی های زمین شناسی و ژنوتکنیکی مربوط به سازه های زیرزمینی را شاید بتوان به ۳ بخش مجزا از هم یعنی: مقدماتی(دفتری)، صحرائی و آزمایشگاهی تقسیم نمود.

بررسی های مربوط به اکتشاف مسیر تونل یا هر نوع فضای زیرزمینی دیگر با جمع‌آوری اطلاعات موجود آغاز می‌شود. نوع و مقدار اطلاعاتی که گردآوری می‌شود بستگی به اهمیت پروژه و شرایط زمین شناسی منطقه دارد. این گونه اطلاعات از طریق زیر بدست می‌آیند:

الف) عکس های هوائی، نقشه های توپوگرافی و زمین شناسی و گزارش های زمین شناسی و آب شناسی موجود منطقه.

ب) بررسی کارهای ساختمانی و معدنی انجام شده در منطقه (شامل تونل ها، معادن زیرزمینی و روباز، چاه ها و حفاری های قبلی و...) در مواردی، مخصوصا در محدوده شهرها نقشه های قدیمی حاوی مسیر قنات ها و فاضلاب ها یا خندق‌های مخروبه شهرها می‌تواند اطلاعات مناسبی در اختیار قرار دهد.

ج) تماس با سازمان های مرتبط (سازمان زمین شناسی کشور، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری، سازمان توسعه راه های ایران و ...)

د) بازدید مقدماتی از محل

۴-۴. تونل زنی و ژئوتکنیک

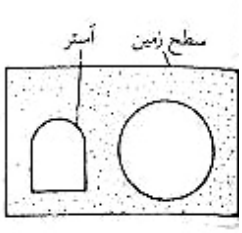
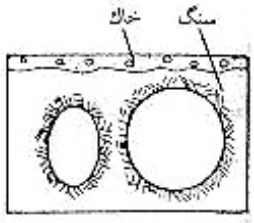
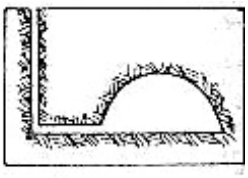
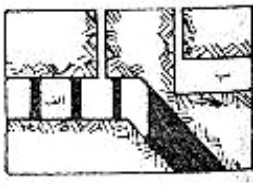
حفاری های زیر زمینی را به صورت های مختلفی می‌توان دسته بندی نمود. در یک طبقه‌بندی حفاری های زیر زمینی به سه گروه تونل ها، محفظه ها و معادن به صورت زیر تقسیم می شوند:

الف) تونل ها: در خاک یا سنگ احداث شده و به منظور حمل و نقل، انتقال آب یا دفع فاضلاب مورد استفاده قرار می گیرند.

ب) محفظه ها: فضاهای زیرزمینی بزرگی هستند که معمولاً در سنگ و برای ایجاد نیروگاه یا ذخیره نفت، گاز یا مواد دیگر استفاده می شوند.

ج) معادن: در سنگ‌ها احداث می شوند و می‌توانند شامل قسمت های مختلفی مانند تونل، شفت یا لایه ها و بخش های استخراج شده باشند. در جدول زیر مشخصات عمومی تونل‌های حفاری شده در خاک یا سنگ، فضاهای بزرگ زیرزمینی و معادن نشان داده شده است.[5,8, 20]

جدول شماره ۴-۲: مشخصات عمومی حفاری های زیرزمینی

تونل در خاک الف) در خاکهای دانه‌ای چسبنده‌فاز صفحات پوشش (آستر) یا روشهای TBM استفاده می شود. نشست زمین زیاد قابل توجه نیست. ب) در خاکهای نرم ضعیف یا ماسه‌های اشباع شده از سپر رانی در هوای فشرده یا با جبهه گل و ماشینهای حفار تونل (TBM) استفاده می شود. نشست زمین می تواند مشکل آفرین باشد.	
تونل در سنگ الف) در سنگهای سالم از چالزنی و آتشکاری یا روشهای TBM استفاده می شود. در این شرایط تونل خود نگهدار بوده و نیاز به حایل ندارد. نشست سطح زمین نیز مسئله ساز نیست. ب) در سنگهای غیر سالم از چالزنی و آتشکاری یا روشهای TBM استفاده شده و دیواره‌ها با حلقه‌های فولادی یا میل مهار محافظت می شود. آبکشی از تونل ممکن است نشست لایه خاک واقع در سطح را باعث شود.	
فضاهای بزرگ فضاهای بزرگ زیرزمینی معمولاً در سنگ با کیفیت خوب احداث شده و توسط چالزنی و آتشکاری حفاری می شوند و توسط میل مهار، توری سیمی و بتن پاشی محافظت می گردند.	
معادن استخراج مواد معدنی به «روش اتاق و پایه»[1] (الف) یا «جبهه کار طولانی»[2] (ب) انجام می شود. در حالت اخیر، نشست زمین معمولاً کنترل شده است. برای حفاری مواد معدنی از همه روشهای رایج استفاده می شود.	

در مطالعات مربوط به احداث فضاهای زیرزمینی موارد زیر حائز اهمیت می باشد:

الف) حفاری : انتخاب روش مناسب برای کندن و خارج کردن مواد از فضای زیرزمینی که عمدتاً وابسته به مقاومت و سختی مصالح است.

ب)پایداری: طراحی حایل های مناسب برای باز نگهداشتن و جلوگیری از ریزش فضای ایجاد شده در حین عملیات و در طول بهره برداری

ج) بهسازی زمین: به منظور بهبود شرایط نامطلوب یا مخاطه آمیزی که ممکن است کارگران را تهدید نماید، باعث تاخیر در کار شود، هزینه ها را افزایش دهد بر عملکرد سازه تاثیر گذارد یا اینکه باعث نشست زمین شود.

د) تاثیر بر سازه های دیگر: در نظر گرفتن تاثیر عملیات احداث فضای زیرزمینی بر سازه‌های مجاور موجود در سطح زمین به دلیل نشست سطح زمین یا لرزش‌های ناشی از انفجار.

۴-۵ . تعیین شرایط زمین

زمین های مختلف، برحسب اینکه در ارتباط با حفره زیرزمینی چه واکنشی از خود نشان دهند، طبقه بندی می شوند. به این ترتیب زمین‌ها را می‌توان به دو دسته دارای شرایط مناسب و نامناسب تقسیم کرد. در زمین‌هایی که از شرایط مطلوبی برخوردارند مشکلات غیرعادی در رابطه با حفاری به وجود نمی آید در مقابل، شرایط نامناسب می‌تواند کارگران را در معرض خطر قرار دهد، موجب توقف و تاخیر در کار و افزایش هزینه ها گردد یا اینکه بر نحوه عملکرد فضای ایجاد شده در آینده تاثیر منفی گذارد یا نشست زمین را به همراه داشته باشد. در چنین شرایطی باید قبل از آغاز حفاری شرایط زمین بهبود بخشیده شود و یا اینکه از حایل‌ها و وسایل مناسب برای نگهداری دیواره حفره استفاده شود.

عوامل اصلی تعیین کننده شرایط زمین عبارتند از:

الف) سنگ: اگر سنگ سالم، یعنی سخت و یکپارچه باشد خود نگهدار بوده و نیاز به حایل ندارد ولی سختی آن باید در زمان انتخاب روش حفاری مورد توجه قرار گیرد. سنگ‌های غیر سالم توسط سطوح ضعیف مختلف به قطعات مجزایی تقسیم می‌شود و بسته به کانی‌شناسی و میزان تجزیه شان به انواع سخت تا نرم تقسیم می شوند. سطوح ضعیف نزدیک به هم، سنگ های خردشده، جریان یابنده، متقبض شونده یا متورم شونده را به وجود می‌آورند.

ب) خاک: خاک های سفت از شرایط مناسبی برخوردارند و ممکن است تا چند روز بدون حایل پابرجا باقی بمانند. در مقابل یک خاک مشکل آفرین ممکن است ریزش کند، حرکت کند، جریان یابد، منقبض شود یا متورم گردد و در صورت عدم اتخاذ تدابیر مناسب می‌تواند حفره ایجاد شده را بلافاصله یا به تدریج مسدود نماید.

ج) آب: وجود آب زیرزمینی، آب تحت فشار یا آب خورنده مشکلاتی را به همراه دارد.

د) گازها: گازها در مواردی مسموم کننده یا منفجر شونده اند. گازها ممکن است بدون اکسیژن بوده یا عمدتاً از دی اکسید کربن، متان یا دی اکسید گوگرد حاصل شده باشد.

ه) دما: در اعماق بیش از ۱۵۰ متر دمای زیاد می‌تواند باعث مزاحمت کارگران شود.

و) زمین لرزه: لرزش های زمین باید در طراحی پوشش ها و حایل ها، به گونه ای که در مورد سازه های دیگر معمول است، اعمال گردد. در این رابطه محل برخورد با گسل‌ها می‌تواند بالقوه مخاطره آمیز باشد. در این نقاط جابجایی می‌تواند موجب بریده شدن تونل شود.

ایجاد فضای زیرزمینی باعث آزاد شدن تنش می‌شود که این عمل موجب پخش مجدد میدان تنش در پیرامون فضای زیرزمینی حفاری شده می‌گردد و کرنش ها و تغییر

شکل‌هایی را در مصالح سازنده اطراف تونل باعث می‌شود. توزیع مجدد تنش وابسته به شرایط زمین شناسی است و می‌تواند حالتی پیچیده داشته باشد.

از عوامل موثر دیگر می‌توان شکل و اندازه تونل و زمان را نام برد. با گذشت زمان و به دلیل تغییر شکل هایی که ایجاد می‌شود، میزان تنش ها در اطراف تونل افزایش می یابد. البته تغییر شکل خیلی زیاد خود موجب تمرکز تنش در اطراف تونل شده یا نشست سطح زمین را به همراه دارد.

بسیاری از مصالح زمین شناسی، از جمله خاک های ریزشی، سنگ های لایه لایه یا سنگ هایی که بر اثر سطوح ضعیف قطعه ای شده اند، به طور آنی به تغییرات تنش ناشی از حفر فضای زیرزمینی، عکس العمل نشان نمی دهند. بر اثر حفاری، توده بالای حفره سست شده و تنش‌های فشاری در آن کاهش می یابد. در چنین شرایطی سهم اصلی وزن روبار در توده وادادە بالای تونل، به زمین واقع در طرفین منتقل می‌شود و به این ترتیب پدیده «قوسی شدن» در امتداد محور تونل ایجاد می‌شود. توده خاکی یا سنگی که بار را انتقال می‌دهد به «قوس زمین» موسوم است.

در سقف قسمتی از حفره که به تازگی حفاری شده پدیده دیگری به نام «گنبدی شدن» یا «گنبدشدن» نیز ممکن است به وجود آیدکه ناشی از فرو افتادن قطعات از سقف است. بر اثر ریزش قطعاتی از سقف تونل، حفره ای به وجود می آید که ممکن است با ریزش قطعات بیشتری از سقف، آن اندازه پیشروی کند که جبهه کار با سنگ یا خاک پر شود. در مواردی ممکن است ریزش تا سطح زمین ادامه یابد. مقاومت تونل بدون حایل در برابر ریزش با مفهوم «زمان پابرجایی» سنجیده می‌شود.

زمان پابرجایی عبارت از فاصله زمانی است که طی آن خاک یا سنگی که فضای زیرزمینی در آن احداث شده، بدون هیچ گونه حایلی در جای خود باقی بماند. در بسیاری از

موارد، زمان برجایی غیر قابل پیش‌بینی است، زیرا به عوامل مختلفی چون مقاومت مصالح، ناهمگنی‌های موجود در خاک و سنگ، نیروی تراوش آب و ابعاد بخش بدون حایل بستگی دارد. زمان پابرجایی می‌تواند از صفر، در شن های متحرک، تا چند روز در مورد خاک‌های سفت و سنگ خیلی خرد شده، تا اساساً دایم در سنگ های سالم یا درزه دار تغییر کند. [5, 7,9]

۴-۶. نشست سطح زمین

براثر حفر تونل، شرایط در زمین تغییر می کند که الزاماً تغییر شکل هایی را به همراه خواهد داشت؛ به این ترتیب که تاج تونل بر اثر حفاری نشست می کند که ممکن است نهایتاً به نشست سطح زمین منجر شود. نشست سطحی هم چنین ممکن است بر اثر آبکشی از تونل و پایین رفتن سطح ایستایی نیز انجام شود.

یکی از مشکل‌ترین جنبه های مهندسی تونل، ارزیابی آثار تغییر شکل بر سطح زمین و خطرات بالقوه ای است که برای ساختمان های واقع در تونل و محدوده افراد آن ممکن است ایجاد شود. در شرایطی که امکان نشست وجود دارد برای حفر تونل و نگه داری آن باید از روش هایی استفاده کرد که نشست زمین به حداقل ممکن محدود شود. در مواردی برای جلوگیری از نشست سطح زمین، بهسازی یا تقویت زمین از پایین به بالا انجام می‌شود که معمولاً هزینه زیادی را برداشته و ممکن است موفقیت آمیز نباشد. مقدار نشست زمین عمدتاً به شرایط زمین شناسی و روش حفاری بستگی دارد. در خاک‌های سفت و اغلب توده های سنگی در صورتی که از روش اجرایی مناسبی استفاده شود مقدار نشست قابل اغماض خواهد بود. در زمان ایجاد فضاهای بزرگ در رسها یا معدن کاری به روش جبهه کار طولانی باید نشست زمین، که میزان آن می‌تواند قابل توجه باشد، از قبل ارزیابی شود. در جاهایی که لایه هایی از خاک بر روی سنگ قرار گرفته است و تراز سطح

ایستابی بالاست، حفر تونل در سنگ باعث پایین رفتن سطح ایستابی و نشست سطحی خاک‌ها می‌شود.

نشست زمین بر اثر حفاری های زیر زمینی در سنگ معمولاً به اهمیت حفاری در خاک نیست، معذلک در حالات استثنایی ممکن است در تونل‌زنی یا معدن‌کاری در زمین های نرم، به دلیل تقارب و بسته شدن فضای ایجاد شده، نشست سطحی حادث شود. در شرایط خاص ممکن است خاک های سطحی واقع در روی سنگ هایی که تونل در آن حفر شده، زهکشی شده و نشست هایی را متحمل شوند.

استخراج موادی چون زغال سنگ، نمک، گوگرد و گچ از سنگ هایی نرم رسوبی ممکن است باعث نشست های سطحی هم زمان با معدن‌کاری یا نشست تاخیری سطح زمین گردند. استخراج زغال سنگ عمده ترین علت نشست سطحی بوده و میزان آن اساساً به شرایط زمین شناسی و روش استخراج بستگی دارد. در روش اتاق و پایه (جدول۱۱ــ۳) تخریب معدن، یعنی ریزش سقف قسمت های حفاری شده ممکن است سال ها بعد از پایان عملیات استخراج صورت بگیرد، در نتیجه نشست سطح زمین نیز حالتی تاخیری دارد. در مقابل در روش جبهه کار طولانی، تخریب بخش های استخراج شده به طور کامل کنترل شده و هم زمان با عملیات انجام می‌شود و لذا نشست سطحی نیز کنترل شده و قابل پیش بینی است. [6, 19]

۴-۷. روش های نگهداری تونل ها

پس از آنکه تونل یا فضای زیرزمینی حفر شد اگر نتواند پابرجا بماند باید با حایل هایی مستحکم شود. حایل هایی که برای نگهداری فضای زیرزمینی به کار می‌روند به دو دسته موقت و دائمی تقسیم می شوند. سنگ های سالم، از جمله سنگ های آذرین و متبلور و

برخی از سنگ های رسوبی سخت، در طی اجرا و در زمان بهره برداری تونل حالت «خودنگه دار» دارند. در صورتی که بسیاری دیگر از سنگ ها و تقریباً همه خاک ها باید در طول حفاری با حایل هایی نگهداری شوند و پس از آن نیز نیاز به پوشش های محافظ دائمی دارند. طراحی حایل تونل بر مبنای فشار زمین و نوع سنگ انجام می‌شود.

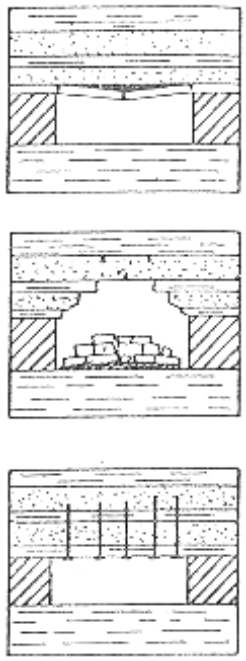
فشار زمین به کمک روابط تحلیلی یا تجربی برآورد می‌شود. فشار زمین می‌تواند از مقدار زیاد در مورد رس‌های نرم یا سفت، تا صفر یا مقدار ناچیز در مورد سنگ های سالم تغییر کند. قاب های فولادی، تیرک های چوبی، صفحات پوششی، میل مهار، شبکه توری و بتن پاشی روش هایی هستند که جهت نگهداری فضاهای حفرشده در سنگ های متوسط یا ضعیف به کار گرفته می‌شوند. در معادن، حایل موقتی اغلب با جایگذاری و عدم استخراج بخش ها یا پایه هایی از ماده معدنی تامین می‌شود.

در خاک ها زمان پابرجایی کم است، از این رو جبهه کار نیز نیاز به حایل دارد. نگهداری این قسمت ها توسط چوب بست، فشار هوا یا با استفاده از ماشین‌های خودکار حفر تونل (TBM) انجام می‌شود. طاق و دیواره ممکن است به طور موقت توسط صفحات پوششی یا سپر نگه داری شوند. پوشش دائمی تونل های حفر شده در خاک به طور درجا با بتن ریخته شده یا با نصب قطعات بتنی یا فلزی ایجاد می‌گردد. [5, 7,8,9] .

۴-۸. نگهداری در سنگ

تونل ها و حفره های معدنی ایجاد شده در سنگ معمولاً «خود نگهدار» هستند. حفره‌ها و بخش های استخراج شده در معادن، به ویژه در معادن زغال سنگ، به جای مقطع دایره‌ای یا بیضوی دارای مقطع مستطیلی اند. در اینجا تنش ها عمدتاً توسط دیواره‌های تونل و در کارگاه های استخراج توسط پایه ها و قسمت های حفاری نشده تحمل می‌گردد.

پس از حفاری تونل در سنگ های دارای لایه بندی افقی، لایه های واقع در سقف، تغییر شکل داده و تشکیل یک قوس فشاری می دهند که بار لایه های بالایی را تحمل می کنـد. در نتیجه بارهای روباره از اطراف حفره به دیواره ها و حفره ها منتقل می‌شود. شکل زیر این مطلب را نشان می‌دهد.



شکل شماره ۴-۱: ریزش سقف معادن و حفرات زیر زمینی ایجاد شده در سنگ لایه لایه افقی و جلوگیری از آن توسط سنگ دوزی

میزان تغییر شکل لایه سقف تـابعی از ابعـاد دهنـه، وزن لایـه و ضـخامت آن، مقاومـت کششی و مشخصات درزه هاست. در سنگ های دارای درزه های زیـاد، بـا دوخـتن و مهـار کردن لایه ها می‌توان یک تیر مرکب تشکیل داد و سقف را مقاوم کرد. هم چنین ظرفیـت باربری پایه ها تابعی از جنس و ابعاد پایه است.

تونل های احداث شده برای مقاصد عمرانی تقریباً به طور استاندارد توسط بتن پوشش می گیرد. در این روش ها ایجاد حایل دو مرحله ای است. به این ترتیب که در طی عملیات حفاری از حایل موقت و پس از آن از حایل دائم استفاده می‌شود. در روش هایی که در سال های اخیر ابداع شده حایل های مورد نیاز در خلال عملیات تونل‌زنی با حایل‌های دائمی تلفیق می شوند. امروزه برای تونل‌زنی واقع در سنگ از پوشش بتنی کمتر استفاده می‌شود. ابعاد حفاری و کیفیت سنگ عواملی هستند که در انتخاب نوع حایل تاثیر می گذارند. جدول زیر گویای این مطلب می باشد.

جدول شماره ۴-۳: رابطه کیفیت سنگ و سیستم حایل مناسب برای تونل

کیفیت سنگ	Q	طبقه‌بندی ترزاقی	سیستم حایل مناسب
عالی یا بسیار خوب	۱۰۰ ـ ۱۰۰۰	سخت و یکپارچه	بدون حایل تا حداکثر میل مهارهای تزریقی کشیده نشده (حتی تا دهانه‌های ۱۰۰ متر)
بسیار خوب	۴۰ ـ ۱۰۰	توده‌ای کمی درزدار	میل مهار با فاصله زیاد (تا ۳ متر)
خوب	۱۰ ـ ۴۰	سخت، لایه‌لایه، کمی درزدار	میل مهار با فاصله کمتر و برای دهانه‌های بزرگتر ترکیبی از میل مهار، بتن تقویت شده و توری سیمی
متوسط تا ضعیف	۴ ـ ۱۰ ۱ ـ ۴	تا حدی قطعه‌ای ورگه‌ای[1]	فاصله بین میل مهارها کاهش یافته و بر ضخامت شاتکریت افزوده می‌شود
بسیار ضعیف	۰/۱ ـ ۱	بسیار قطعه‌ای و رگه‌ای	دامنه‌ای از میل مهارهای نزدیک به هم و شاتکریت تا میل مهار وقابهای فولادی و قوسهای بتنی که میزان آن بسته به دهانه تونل و وجود رسهای متورم شونده یا سنگ فشارنده معین می‌شود
بی‌نهایت ضعیف	۰/۰۱ ـ ۰/۱	سنگ فشارنده، عمق متوسط	کاربرد گسترده شاتکریت تقویت شده با توری سیمی با قابهای فولادی و قوسهای بتنی
به‌طور استثنایی ضعیف	۰/۰۰۱ ـ ۰/۰۱	سنگهای فشارنده، در عمق زیاد، سنگ متورم شونده	

به طور کلی فضاهای زیرزمینی بزرگ و قسمت های استخراج شده معادن به ندرت پوشش گذاری می شوند. فضاهای زیر زمینی بزرگ معمولاً در سنگ های با کیفیت خوب احداث می شوند که محتاج حداقل پوشش اند. در معادن نیز حایل توسط پایه ها تامین می‌شود یا در صورت استفاده از جک هایی که پس از پایان استخراج جمع آوری می‌شوند، سقف تونل های دائمی معادن را می‌توان با میل مهار کنترل کرد. حفاری های با ابعاد متوسط در سنگ خوب یا سنگ با درزه های بسته و نه چندان زیاد (با مقادیر RQD بین

۹۰ تا ۱۰۰) معمولاً نیاز به حایل کمی دارند یا در مواردی بدون حایل پابرجا می‌مانند. [8, 20]

تونل های با قطر بیش از ۸ متر و محفظه های بزرگ در صورت نیاز با میل مهار حایل‌بندی می‌شود. در شرایط نامطلوب تر معمولاً از توری سیمی، بتن پاشی یا تلفیقی از این روش ها استفاده می‌شود. از مهمترین روش های نگهداری فضاهای ایجاد شده در سنگ می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

الف) میل مهار و کابل مهاری

ب) شاتکریت

ج) قاب های فولادی

د) پوشش های بتنی

ه) روش های تلفیقی

۴-۹. نگهداری در خاک

تونل هایی را که در خاک ایجاد می شوند می‌توان با یک یا تلفیقی از روش هایی که در مورد سنگ گفته شد، به طور موقت یا دائم پابرجا نگه داشت. در خاک های ضعیف و زمین‌های نامناسب ایجاد حایل برای تونل اغلب به صورت بخشی از عملیات حفاری و به طور هم زمان با آن انجام می‌شود.

در خاک ها، به جز در مواردی که از روش های سپررانی استفاده میشود، نگه‌داری توسط «قاب های فولادی »حاصل می‌شود. در حد فاصل بین این قاب ها تیرک های چوبی یا فلزی قرار داده می‌شود. تیرک ها بسته به شرایط زمین به طور چسبیده به هم یا با فاصله قرار می گیرند. حایل دیگری که در مواردی مصرف می‌شود، ورق های فلزی است که می‌توان آنها را همراه یا بدون قاب های فولادی به کار گرفت. برای بالا بردن استحکام

این صفحات پوششی، می‌توان آنها را بدون صورت موج دار (مانند صفحات ایرانیت) در آورد. در شرایطی که حفاری به روش سپرانی انجام شود، ایجاد حایل برای بخش‌های حفاری شده با استفاده از جفت نمودن قطعات پیش ساخته بتنی (یا فلزی) در کنار یکدیگر به دست می‌آید.[5, 9]

۴-۱۰. رفتار سنجی در تونل ها

تونل از سازه هایی است که باید رفتار آن هم زمان با آغاز عملیات اجرایی به دقت و بطور مداوم کنترل شود. رفتار سنجی تونل ها و فضاهای زیر زمینی، مخصوصاً آنهایی که از خطر زیادی برخوردارند، معمولاً تا پایان دوره بهره برداری ادامه می یابد. استاده از تکنیک های مختلف و نصب ابزار هایی برای سنجش رفتار تونل ها کاربرد بیشتری پیدا می کند. استفاده از این روش ها مخصوصاً در پروژه های واقع در مناطق شهری، از اهمیت زیادی برخوردار است.[7, 20]

۴-۱۱. روش های حفاری و اجرای تونل ها

۴-۱۱-۱. روش چال زنی و آتشباری

در این روش حفاری و پیشروی معمولاً تکرار چرخه چالزنی، انفجار، تخلیه و نصب حایل ها است. در تونل ها و فضاهای دارای مقاطع بزرگتر معمولاً از روی یک یا چند ردیف سکّو عملیات حفاری به پیش می رود. در روش حفاری چند مرحله ای، پیشانی تونل در مقاطع

کوچک حفر میشود و پس از مستحکم نمودن دیواره به یکدیگر متصل مـی شـوند. بـه ایـن ترتیب بخش تاج تونل ایجاد می‌گردد. در مرحله بعد حفاری کف تونل انجام شده و بر ارتفاع آن افزوده می‌شود. [7]

۴-۱۱ـ۲ . روش چکش هیدرولیکی (Rammer)

استفاده از چکش های هیدرولیکی برای حفاری تونل، عمدتاً توسط ایتالیایی ها ابداع شده و در تعدادی از تونل های این کشور مورد استفاده قـرار گرفتـه اسـت. شـاید قـوانین سـخت استفاده از مواد منفجره یکی از دلایل ارائه این روش بوده است. هر چند که سرمایه گـذاری اولیه کم تولید زیاد و راندمان مناسب در گسترش این روش تاثیر بسـزایی داشـته و دارنـد. این چکش ها بر روی بازوی هیـدرولیکی مناسـبی ماننـد بـوم بیـل هـای مکـانیکی نصـب می‌شوند. نسل رایج بیل های مکانیکی متوسط تا سنگین، ترکیب مورد نیاز سرعت، قدرت و نیرو و هم چنین قابلیت مانور ایده آل، این چکـش هـا را در انجـام وظـایف سـنگین قـادر می‌سازد.

حفاری تونل با چکش در مقایسه با روش چالزنی و آتشباری، در بسیاری موارد می‌توانـد دارای ارجحیت باشد. در هنگام استفاده از چکش همواره مراحل سیکل کاری کمتـر اسـت. چکش هیدرولیکی درمقایسه با TBM نیز از مزیت سرمایه گذاری کمتـر بهـره منـد اسـت. علاوه بر آن حفاری شکل های مختلف مقطع تونل را ممکن می سازد. عوامل مختلفی مانند نوع سنگ، طول تونل، شرایط عمومی منطقـه، برنامـه ریـزی کـار امکانـات موجـود و ... در استفاده از چکش هیدرولیکی موثرنـد. روش چـال‌زنـی و آتشـباری معمـولا شـامل مراحـل چال‌زنی، خرج گذاری و آتشباری، تهویه، لق گیری، بارگیری، تخلیه و نگهداری می‌باشد. در صورت مقایسه، استفاده از چکش هیدرولیکی، حفاری به صورت مراحلی از قبیل شکسـتن سنگ، بارگیری و تخلیه و نگهداری کاهش می یابد.

به علاوه درصورت بزرگی مقطع، بارگیری و تخلیه می‌تواند هم زمان با شکستن سنگ صورت گیرد. در این صورت جبهه کار به چند قسمت تقسیم شده و ماشین آلات مختلفی بدون ایجاد مزاحمت برای یکدیگر به طور هم زمان کار می کنند. در صورتی که ارتفاع تونل زیاد باشد تقسیم جبهه کار به دو بخش تاج و پایه نیز موجب افزایش راندمان می‌شود. پایه تونل می‌تواند با فاصله معینی از جبهه کار تاج و به طور هم زمان نیز حفر شود.

لق گیری، کندن مواد سست سقف و دیواره است که برای جلوگیری از حوادث ناشی از افتادن آنها صورت می گیرد. لق گیری معمولاً به وسیله وسایل مخصوصی صورت می گیرد و در صورت حفاری جبهه کار توسط چکش هیدرولیکی می‌توان عملیات لق گیری را با استفاده از چکش هیدرولیکی انجام داد. در این حالت چکش باید به صورت تقریبا افقی و در وضعیت مورب به سمت بالا کار کند. بازیابی مواد سست از سقف یا دیواره نیازمند این است که چکش مورد استفاده در لق گیری پر قدرت نباشد.

چکش باید نسبتاً کوچک بوده (در حدود ۳۰۰ کیلوگرم) و فشار کار هم تا حد امکان کم باشد. برای اقتصادی بودن تونل زنی توسط چکش هیدرولیکی میزان مناسبی از تولید مورد نیاز است. مشخصات مورد نیاز برای این کار را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱. سنگ مورد استخراج ساختمان مستحکمی نداشته باشد و فاصله بین شکستگی ها و درزه ها یا سایر ناپیوستگی ها نباید بیشتر از ۳۰ تا ۵۰ سانتی متر باشد.

۲. مقاومت سنگ استخراجی باید به گونه ای باشد تا اجازه میزان تولید مناسبی را به وسیله نفوذ ابزار حاصل شود.

در یک تونل طویل سنگ‌ها ندرتا همگن هستند و در صورت مواجه شدن با سنگی با مقاومت بالا در جبهه کار تونل، همواره انفجار در امتداد محور تونل توصیه شده است. این

شکستگی در سنگ غالباً کافی بوده و بنابراین پس از آن چکش قادر به پیشروی حفاری خواهد بود. مته در هر حال باید با زاویه ۹۰ درجه نسبت به جبهه کار قرار گیرد.

در غیر این صورت انرژی ضربه به هدر خواهد رفت. در هنگام عملیات شکست نباید اجازه داده شود که چکش از حالت عمودی خارج شود. در صورت جابجایی چکش یا سطح شکست باید به سرعت زاویه چکش تصحیح شود. در هر نوبت نباید بیش از پانزده ثانیه به یک نقطه ضربه زده شود. در صورت نفوذ نکردن مته در سنگ باید محل مته تغییر داده شود. کارکرد زیادی در یک نقطه گرد سنگ را در زیر مته جمع کرده و باعث کاهش اثر ضربه و افزایش درجه حرارت مته می‌شود. [5, 7]

۴-۱۱-۲-۱. مکانیزم شکست سنگ

هنگامی که پیستون چکش بالای مته ضربه می زند. یک موج تنش فشاری به نوک مته فرستاده می‌شود. مته در تماس با سنگ بوده و توسط اعمال موج تنش فشاری سنگ را می شکند. فورا و به دنبال موج تنش فشاری یک موج تنش کششی وابسته به پیستون چکش در مته بوجود آمده باعث بالا رفتن پیستون از قسمت بالای مته می‌شود. این چرخه تنش های فشاری و کششی در مته برای هر ضربه چکش تکرار می‌شود. به وضوح هر عاملی که در پایداری موج تنش فشاری در حین کار دخالت کند به عنوان مثال کار کردن آزاد (یعنی چکش کار کند، اما به چیزی ضربه نزند) یا خم شدن مته در اثر اهرم شدن کارایی چکش را کم کرده و باعث شکستن احتمالی مته در اثر خستگی خواهد شد. سیکل ممتد تنش های فشاری و کششی در مته حتی در شرایط بکارگیری صحیح آن باعث ایجاد خستگی در مته می‌شود که می‌تواند موجب شکست مته قبل از فرسوده شدن آن شود. همین‌طور هر عاملی که در سیکل تنش های فشاری و کششی دخالت کند، تنش‌های خستگی را که به مته

اعمال می‌شود افزایش داده و نیز احتمال شکستگی در اثر خستگی را به طور سریعی افزایش می‌دهد. شاید بتوان دو سری از عوامل زیر را در افزایش خستگی در مته بیان نمود.

۱. علت اصلی تنش های خستگی در مته، وارد آمدن فشاهای جانبی بر مته می باشد که باعث خمیدگی آن می‌شود. بنابراین بکارگیری مته به عنوان اهرم، استفاده از زاویه نادرست در هنگام بکارگیری مته و در هنگام شکست و یا تلاش برای شکستن زمین به صورت کشیدن در داخل زمین (در امتداد عمود بر مته) همگی در کاهش طول عمر مته مؤثر است و باید از اقدام آنها اجتناب شود. باید به خاطر داشت که نیروی هیدرولیکی قابل دسترسی در ماشین در صورتی که ماشین به صورت نادرست استفاده شود از مقاومت مته تجاوز کرده و می‌تواند مته را بشکند.

۲. سایر دلایل افزایش تنش‌های خستگی در مته عبارتند از:

کارکرد آزاد : در این حالت نوک مته در تماس مناسب با سنگ نیست.

سرما : دمای پایین باعث می‌شود که مته بیشتر در معرض شکست ناشی از خستگی باشد. مته ها باید قبل از استفاده گرم شوند.

خسارت های حرارتی و مکانیکی: هر شکلی از نقص در سطح مته، آنرا بیشتر در معرض شکست ناشی از خستگی قرار می‌دهد.

ضربه بر فلز: باید از هر گونه تماس فلز با فلز اجتناب شود؛ زیرا که تماس فلز به فلز به تشکیل ترک های ناشی از خستگی و شکست ناگهانی مته منجر می‌شود.

خوردگی: یک مته زنگ زده بیشتر در معرض شکست ناشی از خوردگی قرار دارد.

۴-۱۱-۳. ماشین‌های TBM [1]

[1]. Tunnel Boring Machine

دستگاه های T.B.M یکی از مهم‌ترین ماشین آلات حفر تونل می‌باشندکه قادرند تونل را به صورت تمام مقطع حفر کنند. این ماشین‌ها تمام مقاطع تونل‌ها را یک جا حفر می‌کنند و معمولاً آنها را به نام ماشین‌های حفر تونل و با علامت اختصاری T.B.M می‌شناسند. تکامل و گسترش این دستگاه ها سبب شده است که آهنگ پیشروی تونل ها در حد قابل توجهی افزایش یابد.

امروزه در سنگ‌های نسبتا سخت نیز برای حفر تونل از این ماشین ها استفاده می‌کنند. اولین ماشین از این نوع در سال ۱۸۸۰میلادی به قطر ۲/۱۳ متر به کار گرفته شد. همین نوع ماشین در سال۱۸۸۲میلادی برای حفر بخشی از یک تونل زیر دریای مانش به کار رفت. در واقع اولین ماشین تونل‌کنی واقعی از این نوع طی سال های ۱۹۵۰میلادی توسط شخصی به نام جیمز رابینز در ایالات متحده امریکا ساخته شد که قادر بود در انواع مختلفی از سنگ‌ها و تحت شرایط زمین‌شناختی متفاوت تونل حفر کند. در سال۱۹۵۴میلادی نوع جدیدی از ماشین های تمام مقطع رابینز به قطر ۷/۸۵ متر برای حفر تونل های سدی در ایالت داکوتای جنوبی امریکا به کار گرفته شد.

در ابتدا تاج حفار این ماشین دارای ترکیبی از برش دهنده های دیسکی و چنگکی بود ولی سرمته های چنگکی قادر به حفاری در زمین های سخت نبود و حتی گاهی در جریان حفر این نوع سرمته ها به طور کامل کنده می شدند. به همین خاطر اصلاحاتی در مورد ترتیب قرار گیری و نوع برش دهنده ها صورت گرفت. در ماشین اصلاح شده سر مته ها همگی از نوع دیسکی بودند. این ماشین قادر بود ساعت ها و حتی روزها بدون اینکه نیازی به تعویض سر مته ها باشد عمل حفاری را انجام دهد. [5, 7,9]

۴-۱۱-۳-۱ . معرفی قسمت های مختلف TBM

اجزای مختلف ماشین‌های حفر تونل را می‌توان به صورت زیر اشاره نمود.

۱. بدنه اصلی: بدنه اصلی دستگاه از قسمت های مختلفی تشکیل شده که از جمله اجـزاء اصلی آن می توان به پیشـانی حفـاری (Cutter head)، دیسـک هـای حفـاری (Cutter Disc) اشاره نمود. از دیگر اجزاء اصلی که در قالب چندین سپر محافظت می شوند می توان به الکتروموتورهای چرخش پیشانی حفاری، جک های اعمـال نیـروی فشـاری بـه پیشـانی حفاری، جک های جانبی، جک های اعمال نیروی رو به جلو، تسمه نقاله برای حمل نخالـه حاصل از حفاری اشاره نمود. سپرهای محافظت کننده به ترتیب عبارتند از:

الف) سپرجلویی Front Shield

ب) سپر متحرک Telescope Shield

ج) سپر دنباله ای Rear Shield

د) سپر انتهایی Tail Shield

۲. قسمت های پشتیبانی: این بخش، تـدارکات و پشـتیبانی فعالیـت هـای بدنـه اصـلی دستگاه را برعهده داشته و از قسمت های مختلفی تشکیل شده است. این قسمت ها برروی واگن های متوالی نصب شده و همگام با پیشروی عملیات حفاری، بـرروی ریلـی مخصـوص توسط TBM کشیده می‌شود. بر حسب کاربرد می توان قسمت های مختلف را به شرح زیر تقسیم بندی نمود:

الف) تخلیه و حمل نخاله حاصل از حفاری

ب) سیستم های پایدار سازی جداره تونل شامل حمل سگمنت (Segment) و تزریق دوغاب سیمان (Grouting)

ج) الکترو موتورها و دیزل ژنراتور برق اضطراری و کابل های برق

د) پمپ ها و مخازن آب و هوای فشرده

ه) سیستم جمع آوری و تصفیه هوای آلوده

و) پمپ های هیدرولیک تامین فشار هیدرولیکی قسمت‌های مختلف TBM و Backup

ز) قسمت های تعمیر و نگهداری

ح) اپراتور ها و سیستم های هدایت دستی

ط) سیستم هدایت تنظیم خودکار (PLC) و فعالیت های TBM و Backup

ی) گمانه زنی پیشرو

علاوه بر سیستم پشتیبانی همراه TBM قسمت‌های دیگری مانند کابل های برق، لوله‌های آب و جت فن های تامین هوا و ... فعالیت هایی را پشتیبانی می نمایند. سیستم ترابری نفرات، تجهیزات، قطعات پیش ساخته پوشش تونل و حمل مواد حاصل از حفاری ترابری ریلی (Rolling Stock) و سیستم تخلیه نخاله را می توان از دیگر سیستم های پشتیبانی دانست [5].

۴-۱۱-۳-۲. عملکرد TBM

در TBM عملیات حفاری توسط تاج حفار که مجهز به سرمته ها می‌باشد، صورت می‌گیرد. نیروی فشاری پشت ماشین که توسط سیستم هل دهنده هیدرولیکی تامین می‌شود باعث چرخیدن تاج حفار به میزان ۴ تا ۷ دور در دقیقه می‌شود. ماشین توسط تعدادی جک‌های هیدرولیکی به دیواره تونل محکم می‌شود.

مراحل مختلف پیشروی TBM به شرح زیر می باشد:

مرحله ۱: شروع حفاری

ماشین توسط دیوارگیرهای های اصلی کاملا به دیـواره هـای تونـل محکـم مـی‌شـود. پایـه نگهدارنده دنباله ماشین آزاد است.

مرحله ۲: پایان سیکل حفر

ماشین محکم به دیواره های ثابت شده و پیشانی برشی به سـمت جلـو رانـده شـده اسـت. پایه‌های نگهدارنده دنباله آزاد هستند.

مرحله ۳: آزاد شدن دیوارگیرها

دیوارگیرها پس از اینکه پایه های نگهدارنده دنباله ماشین را به دیوار محکم کردند آزاد می شوند.

مرحله ۴: جلو بردن ماشین

ماشین یا بدنه اصلی ماشین که دراین مرحله آزاد است توسط جـک هـای محـوری کـه در درون دنباله قرار دارند به جلو هل داده می شوند. ماشین برای محکـم شـدن بـه دیـواره و شروع مرحله بعدی آماده است.

لازم به ذکر است اگر زمین سست یاشد (سنگ های مارنی یا گچی) باید حلقـه ای کـه معمولا پوشش پیش ساخته ای متشکل از قسعات بتنی یا فلزی می باشد به کار برده شـود تا جک های هیدرولیکی (دیوارگیرها) به آن متکی گردند و ایـن قطعـات پـیش سـاخته بـا پیشروی ماشین به تدریج نصب می شوند.

مواد خردشده یا کنده شده از طریق پوسته استوانه ای شکلی که در داخل تاج حفار قرار دارد به درون یک تسمه ـ نقاله تخلیه می شوند و به پشت دستگاه جهت حمل و خارج شدن هدایت می گردند.

۴-۱۱-۳-۳. استفاده از اشعه لیزر جهت هدایت ماشین حفار

یک روش جدید برای راهنمایی ماشین حفار در هر دو جهت عمودی و افقی استفاده از اشعه لیزر می باشد. دستگاه تولید کننده اشعه لیزر به ماشین حفار متصل می باشد و اشعه نورانی را در جلوی تونل و در قسمتی که دستگاه باید حفر کند تولید می کند. اگر ماشین حفاری از وضعیت صحیح منحرف شود اشعه بر روی صفحه مخصوصی این وضعیت را نشان می‌دهد و مسئول مربوطه می‌تواند اصلاحات لازم را در وضعیت دستگاه انجام دهد.

۴-۱۱-۳-۴. عوامل موثر در عملکرد TBM

شرایط اجرایی تونل سازی به عوامل متعددی نظیر شرایط سنگی مختلف، قابلیت TBM، قطر تونل حفر شده و طبیعت و شرایط زمین و مخصوصاً وجود آب های زیر زمینی بستگی دارد. علاوه بر تعمیر و نگهداری عوامل زیاد دیگری نیز بر زمان برش ماشین تاثیر دارند. همه این موارد بر عملکرد کلی TBM اثر دارند.

پارکز (Parkes) عوامل موثر بر عملکرد TBM را به ۵ دسته تقسیم کرده است که مطابق جدول۴ـ۴ می باشد. هم چنین این محقق در ۱۰ کشور مختلف بر روی TBM ها مطالعاتی انجام داد و پیشنهادهایی به شرح زیر را ارائه نمود:

۱. به مسایل زمین شناختی اولیه توجه کافی شود و اثرات و منافعی که چنین مطالعاتی بر بهبود عملکرد TBMها دارند، بیشتر شناسانده شوند.

۲. توجه بیشتری برای یافتن روش های شناسایی مقدماتی زمین شناسی هم قبل از احداث تونل هم در جریان حفر و احداث تونل های پیشرو مبذول شود.

۳. از زمان بیکاری کاسته شود.

۴. با توسعه و پیشرفت ماشین سعی شود که از این ماشین در دامنه گسترده تری از شرایط زمین به ویژه در شرایط زمین های ناپایدار استفاده گردد.

جدول شماره ۴-۴: عوامل موثر بر عملکرد TBM و شرایط مرتبط با تونل سازی

نوع عامل	شرایط و ویژگی های مرتبط در مراحل مختلف تونل سازی
زمین	زمین شناسی، ویژگی های سنگ و آبهای زیرزمینی
طرح تونل	قطر و طول
مسایل محلی	مقررات کارگری، ساعات کاری
سیاست های مدیریتی	نیروی انسانی، استفاده از TBM، تعمیر و نگهداری، سیستم های حمایتی
قابلیت های ماشین	فشار محوری، توان، گشتاور، قطر دیسک، خصوصیات تعمیر و نگهداری

بر مبنای مطالعات صورت گرفته در ۶۵ تونل در کشورهای اروپایی، امریکا، استرالیا و آفریقای جنوبی مهمترین عامل ویژه در نرخ پیشروی TBM، قطر تونل می باشد. جدول ۴ـ۵ این مطلب را نشان می‌دهد. [5, 20]

جدول شماره ۴-۵: نرخ پیشروی TBM متناسب با قطر تونل

قطر (متر)	بهترین نرخ پیشروی (متر بر ساعت)
4	1.9
5.5	1.55
8.5	1
9	0.95

۴-۱۱-۳-۵. ویژگی های TBM

۱. اندازه تونل و قابلیت تغییر

با استفاده از TBM می‌توان تونل هایی با قطرهای مختلف حفر کرد. به عنوان مثال در سال های۱۹۶۳ تا ۱۹۶۴ میلادی، TBM رابینز با قطر 11.15 متـر، فشـار محـوری ۲۷۳ تـن و توان ۷۴۶ کیلووات، به نحو موفقیت آمیزی در حفر ۵ تونل به طول ۵۰۳ متر اسـتفاده شـد. شرایط سنگی تونل‌ها، ماسه سنگ و رس همراه با لایه هایی از سنگ آهک بود. این ماشـین اصلاح شد و با قطر ۱۰/۳۴ برای حفر تونل در زیر رودخانه و در ماسـه سـنگ کـه چنـدین گسل آن را قطع کرده بود به کار گرفته شد. این موضوع نشان می‌دهـد کـه مـی‌تـوان قطـر ماشین را مناسب با شرایط کار تغییر داد.

۲. شرایط سنگ سخت

سنگ های سخت با استفاده از ماشین‌های دارای برش دهنده های کاربید تنگسـتنی قابـل حفر بوده که در این رابطه نرخ های پیشروی بالای ۱/۵ متـر در سـاعت و بـا نـرخ حـداکثر ۳۲/۹ متر در روز و ۱۱۱ متر در هفته با این ماشین گزارش گردیده است.

۳. بهبود عملکرد حفر

تونل انحرافی بزرگ Vinstra با طول km 17 با استفاده از دو TBM رابینز بـا قطـر ۴/۷۵ متر، فشار محوری ۳۷۵ تن و توان پیشانی برش ۸۴۰ کیلووات کـه بـا بـرش دهنـده هـای دیسکی مجهز بودند، حفر گردید. سنگ ها از جنس شیل بودند. انتخاب حفـر بـا TBM در چنین شرایط زمین شناختی بر مبنای کاهش وسایل نگهداری سـنگ در مقایسـه بـا روش چالی‌زنی و آتش باری و نرخ پیش بینی شده ۲/۷۳ متر در ساعت بود.

در روش حفر با TBM نیاز به وسایل نگهداری کمتر است. در منطقه گسله به منظور کنترل مؤثر باید زمین را توسط قاب های فولادی قوسی، توری فولادی کنترل کرد.

۴-۱۱-۳-۶. ماشین‌های کوچک تونل‌زنی

طرحی TBM های کوچک و جمع و جور حوزه کاربرد این ماشین را در آینده افزایش خواهد داد. یک گام عمده در این راستا توسط Synde صورت گرفته است که TBM جمع و جوری با قطر ۴/۸۷ متر وقابلیت حفر تونل هایی با شعاع قوسی ۱۲/۲ متر با دیوارگیرهای افقی یا قائم ساخته است.

ماهیت جمع و جور بودن این نوع TBM نه تنها آنرا از نظر طولی کوتاهتر می سازد بلکه وزن را سبکتر و قابلیت مانور را بیشتر و شعاع چرخش را کوچکتر می کند. این نوع ماشین قابلیت تغییر پذیری و انطباق پذیری برای عملیات در دامنه گسترده ای از شرایط زمین را دارا است.

۴-۱۱-۳-۷ . دامنه کاربرد

TBMها را در دامنه گسترده ای از انواع سنگ ها می‌توان به کار برد. این ماشین‌ها را می‌توان برای کاربرد در انواع مختلف شرایط سنگی طراحی کرد.

۴-۱۱-۳-۸ . انتخاب پیشانی برشی

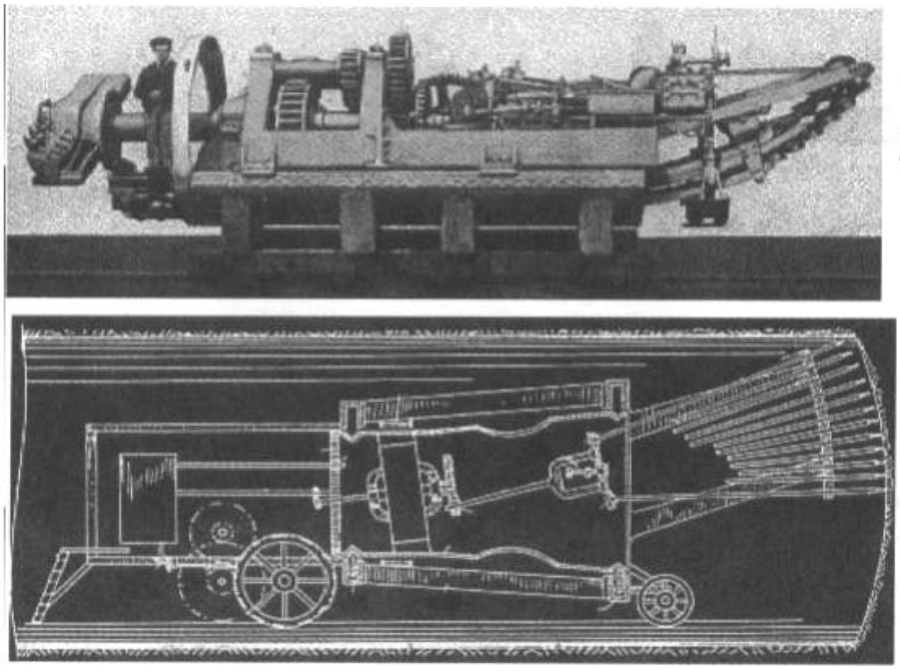
تاج حفار برشی، انتخاب برش دهنده ها جهت پیشانی و نرخ های اجرایی پیش بینی شده نیاز به بررسی و ارزیابی دقیقی دارند و اطلاعات و آگاهی های دقیق از شرایط سنگی که تونل در آن حفر می‌شود می‌تواند در انتخاب صحیح پیشانی برشی، نوع سرمته ها و آرایش آنها کمک زیادی بکند.

۴-۱۱-۳-۹. قابل اعتماد بودن TBM ها

حفر تونل توسط TBM یک روش قابل اعتماد برای حفاری است. انتخاب نوع TBM، نیروی محوری و طرح پیشانی برشی عومل اصلی و حیاتی هستند که مستلزم ارزیابی و بررسی دقیق شرایط ژئوتکنیکی و زمین شناسی محل می باشند. TBM را می‌توان برای حفر در بیشتر شرایط زمین شناسی انتخاب کرد و اطلاعات کافی از عملکرد TBM و ویژگی های اجرایی آنها در این سنگ ها باید تعیین گردند.

۴-۱۱-۳- ۱۱. قسمت های مختلف ماشین TBM

صرفنظر از مدل و سیستم ماشین، در شکل۴ـ۲ بخش های تشکیل دهنده ماشین تمام مقطع نشان داده شده است. البته سازندگان این ماشین آلات با توجه به تکنولوژی در اختیار و نوع کاربرد ماشین، تغییراتی را در جزئیات این ابزار ایجاد می نمایند.



شکل شماره ۴-۲: تصویر TBM اولیه

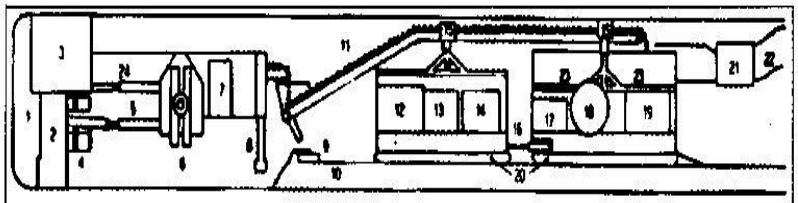
الف) بدنه

بدنه ماشین، محور اصلی دستگاه را تشکیل می‌دهد که تمام قسمت ها مثل صفحه حفار، الکتروموتورها، سیستم هیدرولیک و نظایر آنها بر روی آن نصب شده اند. بسته به نوع ماشین، اجزای بدنه متفاوت است ولی در حالت کلی، مجموعه ای از اجزای فولادی می‌باشد. موتور های محرکه دستگاه، انرژی لازم برای چرخش صفحه حفار را تأمین می‌کنند البته بین الکتروموتور اصلی و صفحه حفار، سیستم جعبه دنده وجود دارد که به کمک آن می‌توان سرعت ها و گشتاورهای مختلفی را برای صفحه حفار تأمین کرد.

در بعضی ماشین‌ها الکتروموتورها در کنار صفحه حفار قرار دارد و در برخی دیگر، موتور محرکه در عقب دستگاه واقع شده و حرکت چرخشی به وسیله محوری که در امتداد محور ماشین تعبیه شده است، به صفحه حفار منتقل می‌شود.

ب) صفحه حفار

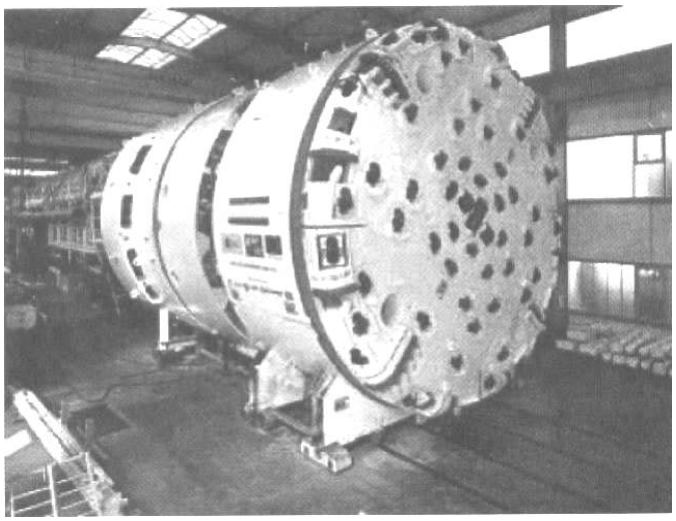
مهم‌ترین قسمت دستگاه، صفحه حفار آن است که در جلوی دستگاه قرار دارد (شکل۴ـ۳) این صفحه که دایره ای شکل بوده و حول محور خود که منطبق بر محور دستگاه و محور تونل می باشد، می چرخد.



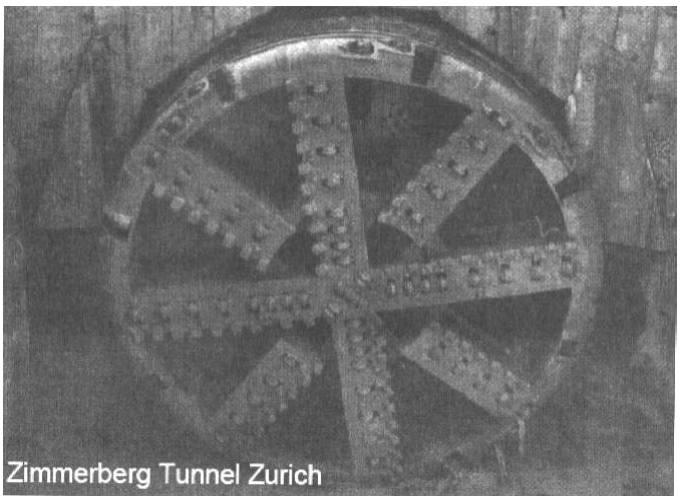
1- کانر هد
2- سپرهای جانبی
3- سپر بالایی
4- موتور محرک
5- اهرم پیش راننده
6- کفشک
7- اتاق کنترل
8- جک گیرش عقبی
9- صفحه متعادل کننده
10- جرم متعادل کننده
11- نوار نقاله
12- محفظه سیال
13- تاسیسات الکتریکی
14- ترانسفورماتور
15- سپر بالایی
16- رام کوبه
17- زیرانور
18- قرقره کابل
19- کمپرسور هوا
20- سورنمه
21- جعبه دنده
22- مجرای تهویه
23- محفظه هوا
24- اهرم اصلی

شکل شماره ۴-۳: قسمت های مختلف ماشین تمام مقطع

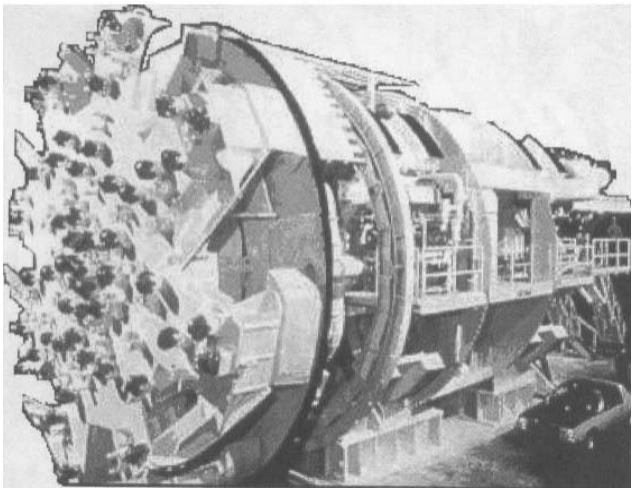
ابزارهای حفاری بر روی این صفحه نصب می شوند. صفحه حفار ممکن است مسطح و یا مخروطی و به شکل صفحه پر (شکل۴ـ۵) یا به صورت ستاره مرکب از بازوهای فلزی باشد گاهی نیز صفحه حفار مرکب از تعدادی صفحه کوچک تر دایره ای (چرخک) است که بر روی هر یک از آنها ابزار حفاری نصب شده است و این صفحات کوچک به طور مجزا چرخیده و مقطع تونل به کمک مجموعه آنها حفر می‌شود (شکل ۴ـ۶).



شکل شماره ۴-۴: دستگاه TBM با صفحه حفار پر



شکل شماره ۴-۵: صفحه حفار ستاره ای مورد استفاده در تونل مترو زوریخ

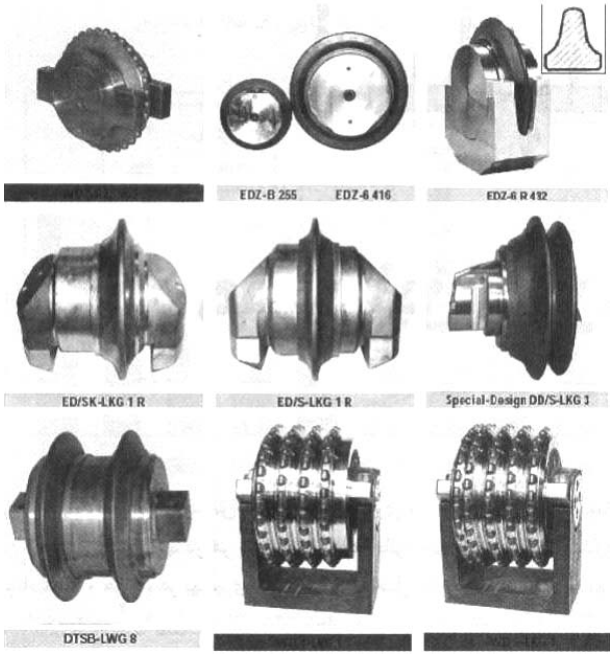


شکل شماره ۴-۶: صفحه حفار با ابزار برش مجزا

ج) ابزار برش

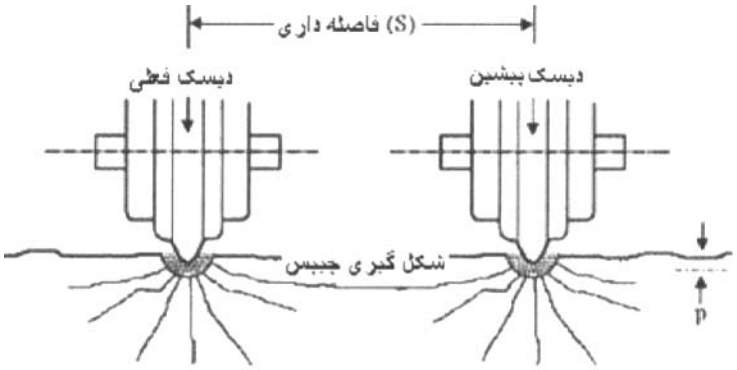
ابزار برش یکی از پر مصرف ترین و حساس ترین ابزار های حفاری می باشند. اطلاع از چگونگی عملکرد دیسک ها و زمان مفید استفاده از آنها در هر پروژه ای می‌تواند حائز اهمیت باشد. عمر دیسک ها علاوه بر مسائل فنی کوتاه مدت و هزینه، در بهره وری کل پروژه نیز دخیل بوده و می‌توانند سهم به سزایی در نتیجه عملیات داشته باشند.

ابزارهای برش به گروه های مختلفی چون برنده های تک دیسکی، چند دیسکی، برنده‌های نوع توت فرنگی و برنده های چند ردیفی تقسیم می شوند(شکل۴-۷) محدوده استفاده این ابزارها از سنگ های متوسط تا بسیار قوی را شامل می‌شود.



شکل شماره ۴-۷: محدوده استفاده از ابزارهای برش

ابزارهای برشی چند دیسکی و توت فرنگی در سنگ های بسیار سخت و مواقعی که فاصله دیسک ها باید از هم کم باشد و یا مواردی که تعویض دیسک ها به دلیل محدودیت دسترسی به سینه کار به سختی صورت می گیرد، به کار می‌روند. هندسه دیسک‌های برشی به وسیله قطر و پروفیل لبه آنها مشخص می شوند. عمق نفوذ دیسک های برشی در داخل سنگ (P) به ازای هر دور دوران کاترهد و فاصله دیسک های برشی (S) هندسه برش توده سنگ را مشخص می کنند (شکل۴ـ۸)



شکل شماره ۴-۸: هندسه برش ایجاد شده توسط دیسک های برشی

در گذشته دیسک های برشی مورد استفاده در دستگاه های TBM با مقطع V شـکل و با زاویه ۶۰ الی ۱۲۰ درجه تولید می شدند. این دیسک ها علی رغم نرخ پیشروی مناسـب، پس از سایش لبه دیسک عملکرد خود را به سرعت از دست می دادند. امروزه برای دستیابی به کارایی بیشتر دیسک های برشی با مقطع ثابت طراحی شدند که به وفور بـه کـار گرفتـه می شوند.

عمر دیسک‌های برشی به عوامل متعددی بستگی دارد که برخی از آنها عبارتند از :

- نوع و جنس سنگ
- درصد کوارتز موجود در سنگ های مسیر
- قطر دیسک
- موقعیت دیسک برشی بر روی کاترهد
- سرعت کاترهد
- فاصله بین دیسک های برشی
- فناوری بکار رفته در ایجاد شکل ابزار برش و نوع فولاد
- عملیات حرارتی یاتاقان و چگونگی آب بندی سیستم

اندرکنش ما بین دیسک برشی و سنگ مانند: لرزش ، دما و ذرات ریز خرد شده

ارتفاع روباره تونل و نیروی فشاری قطر رینگ دیسک های برشی، عملکرد دیسک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از زمان آغاز استفاده از دیسک های برشی، قطر دیسک ها به طور یکنواخت در حال افزایش می باشد. به طوری که قطر آنها از ۸ اینچ به ۲۰ اینچ افزایش یافته است. در صورتی که بار ثابتی بر دیسک های برشی اعمال شود، با افزایش قطر آنها سطح مقطع دیسک بالاتر رفته و درپی آن سطح تماس دیسک با سنگ نیز بیشتر می‌شود. در نتیجه میزان نفوذ دیسک در سنگ کاهش می یابد اما باید در نظر داشت که دیسک‌های بزرگتر برای اعمال نیروی بیشتر (که نیازمند یاتاقان بزرگتر هستند) ساخته می‌شوند. این امر ظرفیت عملکرد دستگاه را بالاتر می برد، با وجود اینکه میزان نفوذ کاهش می‌یابد. دیسک های بزرگتر دارای سرعت دورانی کمتری در یک سرعت دورانی ثابت کاترهد هستند که این به مبنای ایجاد گرمای کمتر در حفاری می باشد. در ضمن دیسک‌های برشی بزرگتر دارای بدنه برنده بیشتری برای حفاری تا قبل از فرسوده شدن هستند. در مجموع تمامی عوامل فوق موجب بالا رفتن عمر دیسک ها می‌شود. اما باید توجه داشت که در قطرهای بیش از ۱۷ اینچ افزایش چندانی در نرخ پیشروی دیده نمی‌شود. این امر ناشی از نیاز به افزایش قطر لبه دیسک جهت انتقال بار زیاد به سنگ می باشد. در این صورت نرخ نفوذ به شدت کاهش خواهد یافت.[5, 7]

این نتیجه را می‌توان به صورت رابطه ای بین هندسه دیسک برشی و نیروهای وارده بر آن تشریح نمود. با افزایش قطر و به طبع آن ضخامت لبه بیشتر، دیسک برای برش نیازمند نیروهای بیشتری در یک سنگ با نرخ نفوذ ثابت و فاصله داری ثابت دیسک ها می باشد. آزمایشات و هم چنین نتایج عملی نشان داده است که دیسک های ۱۷ اینچی بهترین نتیجه را در نرخ نفوذ ثابت در سنگ های سخت بدست می دهند. در حال حاضر دیسک‌های ۱۷ اینچی توانایی تحمل بارهای ۳۰ تنی را نیز دارند که با انجام عملیات

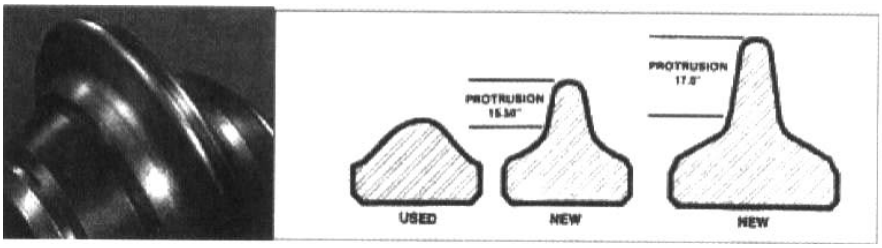
متالورژی خاص در حین ساخت، می‌توان ضخامت لبه آنها را کاهش داد . ایـن امـر موجـب افزایش کارایی دیسک برشی، افزایش عمر و کاهش هزینه ها می‌گردد.

هر یک از عوامل ذکر شده بر دو ناحیه یاتاقان و رینگ خارجی (یـا پوسـته بیرونـی) در دیسک تأثیر می گذارند که این تأثیر موجب کاهش عمر ابزار برش می‌شود.

فرسایش و شکست یاتاقان اگر بر اثر اتمام عمر دیسک در زمان طبیعی (بر اثر فرسـایش اجزای داخلی آن) نباشد، به دلیل افزایش بار وارده بر دیسک برنده و یا ناشی از ورود گرد و غبار و ذرات خرد شده حفاری بر اثر عایق بندی ضعیف می باشد.

پوسته خارجی نیز بر اثر سنگ های ساینده فرسایش یافته و پوسته پوسته می‌شود و یـا اینکه دچار تغییر شکل پلاستیک می‌گردد. فرسوده شدن رینگ خارجی بر اثر تمـاس بـین سنگ و دیسک که موجب ایجاد اصطکاک می‌شود، طبیعی می باشد.

البته عملیات حرارتی ضعیف بر روی دیسک ها در حین سـاخت موجـب کـاهش تـوان رینگ های خارجی شده و در تماس با سنگ هـای سـخت و سـاینده زودتـر از آنچـه بایـد فرسوده و پوسته پوسته می شوند.

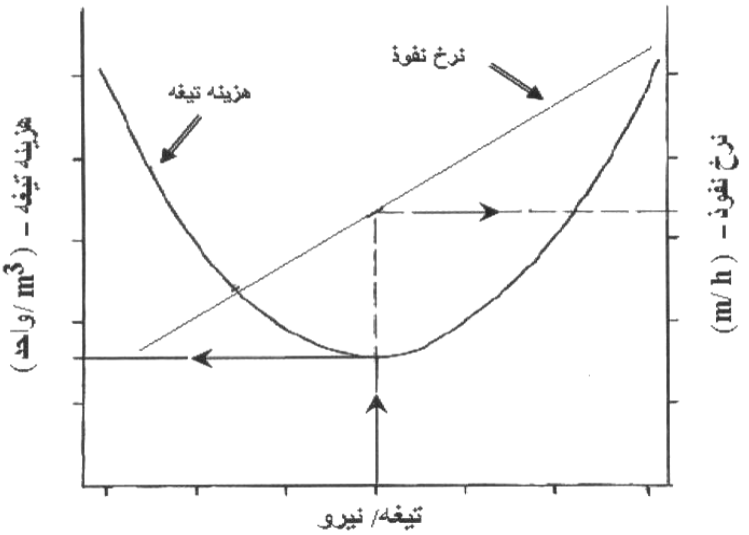


شکل شماره ۴-۹: فرسوده شدن رینگ خارجی

با افزایش سرعت کاترهد، با توجه به محدودیت سرعت خطـی دیسـک هـای برشـی بـه دلیل اصطکاک بین سنگ و ابزار برش، گرمایی عـلاوه بـر ظرفیـت گرمـایی دیسـک ایجـاد می‌شود که در پی آن عمر مفیـد دیسـک نیـز کـاهش مـی‌یابـد. بـا افـزایش فاصـله میـان

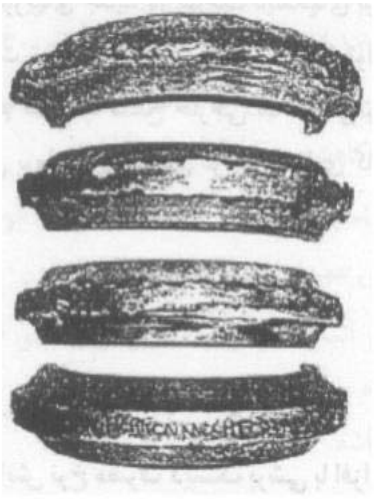
دیسک‌های برشی (افزایش فشار وارده بر هر دیسک) نیز عمر مفید دیسک ها کاهش می‌یابد. همان طور که در شکل ۴-۱۰ ملاحظه می‌شود، با افزایش نیروی فشاری بر هر دیسک، میزان مصرف دیسک ها کاهش می یابد اما این افزایش فشار پس از عبور از یک نقطه بهینه منجر به افزایش نرخ مصرف دیسک های برشی خواهد شد.

البته در صورت استفاده از تکنولوژی های جدید در ساخت دیسک های برشی می‌توان دیسک هایی با ظرفیت باربری بالاتر و هم چنین ضخامت تیغه کمتر (در یک قطر ثابت) تولید نمود. افزایش کیفیت فولاد به منظور به دست آوردن مغزه نرم همراه با سطح خارجی سخت می‌تواند عمر مفید دیسک های برشی را افزایش داده و با حفظ یک شکل پروفیل قابل قبول در طی حفاری کارایی آن را افزایش دهد.



شکل شماره ۴-۱۰: افزایش نرخ مصرف دیسک برشی با افزایش نیروی فشاری

در شکل۴ـ۱۱ اشکال انواع استهلاک دیسک های برشی که به دلیل عملیات متالورژی ضعیف در ساخت دیسک ها رخ می دهند، نشان داده شده است.



شکل شماره ۴-۱۱: اشکال مختلف استهلاک دیسک های برشی

بر اساس پژوهش های انجام شده توسط انجمن مکانیک سنگ نروژ ایجاد تغییرات مطلوب در کیفیت فولاد به کار رفته در ساخت ابزار برش می‌تواند تا ۵۰ درصد موجب کاهش هزینه دیسک‌ها گردد. در فرایند ساخت دیسک های برش پوششی در مراحل نهایی بر روی تیغه کشیده می‌شود. این پوشش در محافظت از تیغه در برابر سایش بر اثر کوارتز موجود در سنگ و عمر آن بسیار مفید می باشد. جنس و عملکرد این پوشش با شاخص پوشش دیسک شناخته می‌شود. این شاخص برای هر نوع تیغه و بسته به سازنده آن متفاوت می باشد و به دلیل فناوری بسیار بالای ساخت آن، در اکثر مواقع مقدار این شاخص به طور دقیق در اختیار شرکت های عمرانی قرار داده نمی‌شود.

اطلاع از این شاخص می‌تواند در برآورد هر چه دقیق تر عمر مفید دیسک ها بسیار مؤثر واقع شود. جهت بر آورد این شاخص می‌توان از ارتباط بین این شاخص با سایر شاخص های تونل زنی و پارامترهای دستگاه بهره گرفت.

از جمله عوامل دیگر که در نرخ مصرف دیسک های برشی و فرسوده شدن آنها مؤثر هستند، الگوی ابزار برش بر روی کاترهد می باشد. پارامتر دیگری که ذکر شد ارتفاع روباره تونل می باشد. با افزایش تنش محصور کننده میزان تنش لازم برای شکست سنگ افزایش یافته که این امر مستلزم افزایش فشار بر دیسک های برشی یا کاهش فاصله‌داری آنها می‌باشد که هر دو حالت منجر به افزایش نرخ مصرف ابزار برش خواهد شد.

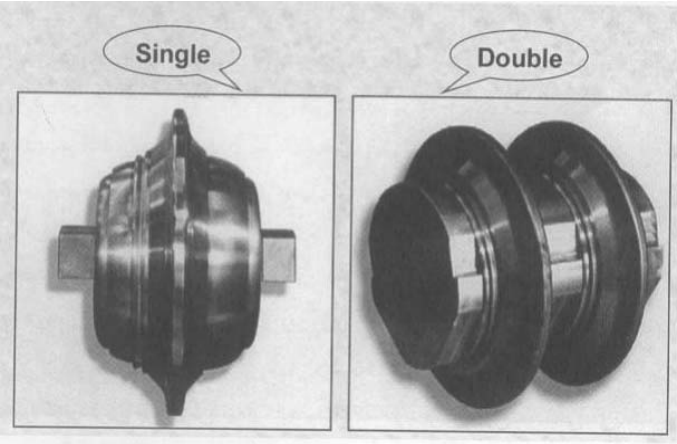
ابزار برش، بر روی صفحه حفار نصب می شوند و حفر سنگ با این ابزار انجام می‌شود. بسته به نوع زمینی که باید حفاری شود ابزار برش متفاوت است و در حالت کلی آنها را به چهار دسته ابزار برش برای حفر زمین های نرم، سنگ های نرم، سنگ های متوسط و سنگ های محکم تقسیم بندی می کنند. در این زمینه هیچ تقسیم بندی کلی جهانی وجود ندارد، اما بر اساس آنچه که مورد قبول چندین کارخانه سازنده این این ماشین‌ها است این تقسیم بندی را می‌توان مطابق جدول زیر انجام داد. در این جدول نام سنگ‌هایی که در هر یک از این چهار رده جای می گیرند، نیز درج شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود این تقسیم‌بندی بر اساس مقاومت فشاری تک محوری سنگ ها تنظیم شده و نکته مهم آن است که این تقسیم بندی را باید به عنوان یک ایده کلی تصور کرد. باید در نظر داشت که مقاومت یک سنگ خاص بسته به ویژگی هایی هم چون ساختار بلورین، شکل ذرات تشکیل دهنده، درجه سیمان شدگی، میزان هوازدگی، وجود شکستگی و مشخصه هایی از این نوع ممکن است در مقیاس وسیعی تغییر کند.

ابزار برش به انواع مختلفی چون رنده‌ها، خراشنده‌ها و تیغه‌ها تقسیم می شوند. رنده‌ها و خراشنده ها در مورد شسپرهای گل و متعادل کننده فشار زمین کاربرد دارند که در ادامه در رابطه با آنها بیشتر صحبت خواهد شد. پر کاربردترین ابزار برش، تیغه‌ها هستند که خود شامل انواع مختلفی می باشند. در ادامه هر جایی که صحبت از ابزار برش در میان باشد، منظور، تیغه است.

جدول شماره ۴-۶ : جدول رده بندی سنگ ها بر اساس قابلیت حفاری به وسیله ماشین‌های تونل کنی

رده بندی	مقاومت فشاری تک محوری	نوع سنگ
زمین نرم	ـــــ	رس، سیلت و شن سیمانی نشده ، مارن
سنگ نرم	<۵۵۰	شیل ، توف ، سنگ رس ، ماسه سنگ
سنگ نیمه سخت	۱۷۰۰ – ۵۵۰	بعضی از انواع بازالت، گرانیت و آندزیت، انواع متوسط ماسه سنگ، آهک، دولومیت، چاک، ریولیت، گنایس، شیست
سنگ سخت	۱۷۰۰ >	برخی از انواع بازالت، گرانیتو آندزیت، ماسه سنگ وآهکی که به خوبی سیمانی شده‌اند، مرمر، چرت، دیوریت، کوارتزیتو ارژلیت

ابزارهای برش به گروه‌های مختلفی چون برنده های تک دیسکی، چند دیسکی، برنده‌های نوع توت فرنگی و برنده های چند ردیفی تقسیم می شوند که محدوده استفاده این ابزارها از سنگ های متوسط تا بسیار قوی را شامل می‌شود. در شکل ۴ـ۱۲یک نمونه از ابزار برش دیسکی دیده می‌شود. [5, 9]

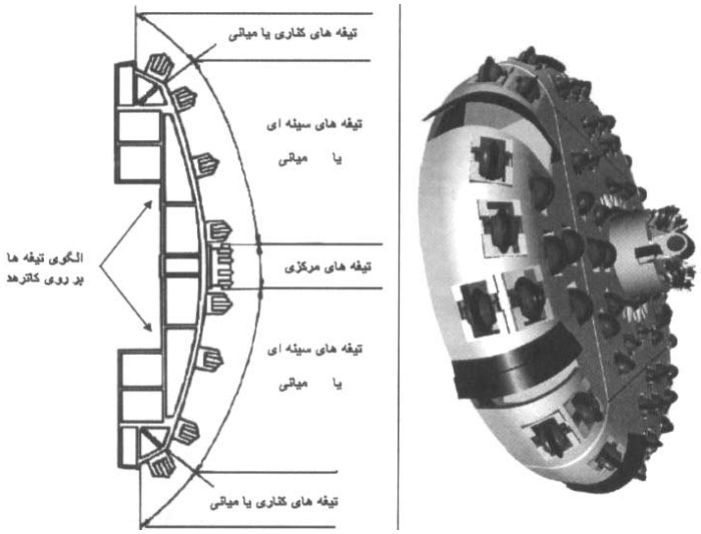


شکل شماره ۴-۱۲: برنده های دیسکی

۴-۱۱-۳-۱۱. الگوهای چیدمان ابزار برش

در ماشین‌های تونل کنی مخصوص زمین های نرم، از یک نوع ابزار برش استفاده می‌شود امادر مورد ماشین‌هایی که در سنگ هایی با ویژگی های متفاوت کار می کنند، امکان دارد

در یک ماشین از چند نوع ابزار برش متفاوت استفاده شود. ابزار برش پس از نصب بر صفحه حفار، به سه گروه مرکزی، میانی و محیطی تقسیم می شوند و هر یک از این ابزار با توجه به وظیفه ای که در حفر جبهه کار تونل به عهده دارند انتخاب می‌شود (شکل۴ـ ۱۳) .



شکل شماره ۴-۱۳: آرایه ابزار برش در صفحه حفار

الف- ابزار برش مرکزی

این ابزار برش، وظیفه حفر مرکز جبهه کار را به عنوان بخش حفاری پیشاهنگ به عهده داشته و مرکب از یک یا چند ابزار برش غلتکی هستند علت آن است که تا قبل از برش حفره مرکزی جبهه کار، ابزار برش دیسکی نمی‌توانند به خوبی عمل برش سنگ را انجام دهند. در حقیقت وظیفه ابزار برش مرکزی، حفر حفره مرکزی و آماده سازی جبهه کاربرای سایر ابزار برش است.

ب- ابزار برش میانی

این ابزار برش در واقع بدنه اصلی سیستم حفاری دستگاه را تشکیل می دهند و حفر بخش عمده ای از سطح جبهه کار، به عهده آنها است. بسته به جنس و سختی سنگ جبهه کار،

این ابزار از نوع دیسکی یا غلتکی انتخاب می شوند در مواردی که ماشین برای حفر زمین‌های نرم طراحی می‌شود به جای انواع دیسکی یا غلتکی، از دنده های حفار استفاده می کنند این ابزار به حالت عمود بر صفحه حفار، نصب می شوند.

ج- ابزار برش محیطی

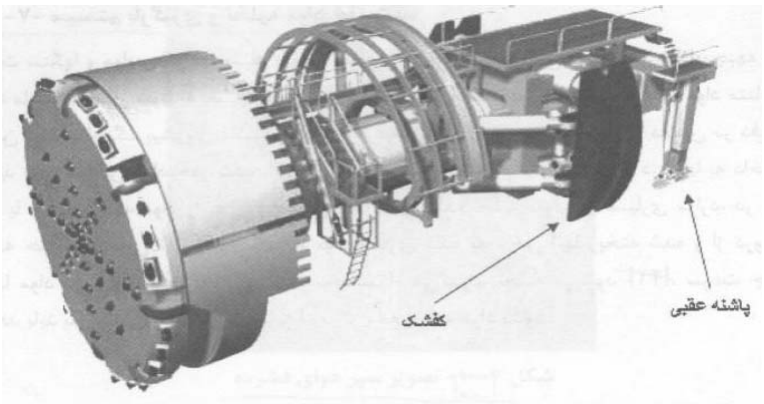
این ابزار در محیط صفحه نصب می شوند و وظیفه آنها برش سطح جانبی تونل و حفظ شکل آن است این ابزار نیز از نوع دیسکی یا غلتکی هستند جهت تأمین خلاصی لازم بین لبه خارجی این ابزار و سطح تونل، این ابزار را کمی به حالت مایل نصب می شوند. بنابراین سطح آنها عمود بر سطح جبهه کار نیست و این امر سبب می‌شود که فرسایش این ابزار، بیش از فرسایش سایر ابزارهای برش باشد به همین جهت آنها را از فولادهای آلیاژی ویژه و یا کاربید تنگستن‌های مقاوم‌تر می سازند.

تعداد کل ابزار برش لازم برای صفحه حفار تابع قطر ماشین است و با افزایش قطر، افزایش می یابد به عنوان مثال تعداد ابزار برش در یک ماشین به قطر ۴ متر و ۲۵ عدد و در مورد ماشین به قطر ۸ متر، ۵۰ عدد گزارش شده است.

۴-۱۱-۳-۱۲. چنگ زن ها یا کفشک ها

برای حرکت روبه جلوی دستگاه به واسطه جک های جلو برنده ، باید دستگاه به جایی تکیه کند. اگر پوشش اصلی تونل در پشت دستگاه استحکام کافی داشته باشد، می‌توان جک‌های طولی را به این پوشش ها تکیه داد و به کمک آنها دستگاه را جلو برد. این جکها در پیرامون دستگاه و به موازات محور آن تعبیه می شوند. تعداد و توزیع آنها به گونه ای است که فشار یکنواختی را به سیستم آن بخش از تونل که در پشت دستگاه قرار دارد منتقل می کنند. در حالت کلی، سیستم نگهداری موقت تونل در پشت دستگاه، امکان چنین فرایندی را ندارد و بنابراین در پیرامون ماشین و به حالت عمود بر محور آن، تعدادی جک تعبیه می‌کنند که

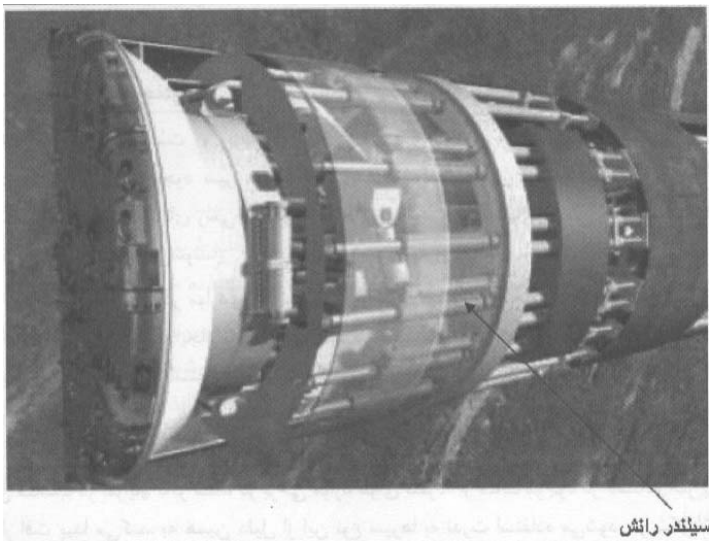
دو به دو در امتداد هم قرار دارند و به نام چنگ زن یا کفشک معروف‌اند (شکل۴ـ۱۴) در هر ماشین، دو سری چنگ در جلو و عقب دستگاه تعبیه می‌شود. به ترتیبی که خواهیم دید، پس از آن که چنگ‌زن‌ها به دیوار تونل متکی شدند، صفحه حفار دستگاه به وسیله‌ی جک‌های رانش به تدریج به جلو رانده می‌شود. در انتهای جک‌های چنگ‌زن، صفحات فلزی موقتی شکل نصب می‌کنند تا فشار وارد بر دیوار تونل کم شود و در آن فرو رفتگی ایجاد نشود. حداکثر فشار مجاز در این حالت بین ۰/۱ تا ۰/۲ مگاپاسکال است. جک های جلو برنده دستگاه به این چنگ زن ها متصل اند. [5, 7]



شکل شماره ۴-۱۴: ساختمان ماشین و چنگ زن ها

۴-۱۱-۳-۱۳. جک های رانش صفحه حفار

جک‌های رانش از یک سو به چنگ زن ها و از سوی دیگر به صفحه حفار متکی هستند و وظیفه رانش روبه جلوی کاترهد را بر عهده دارند. (شکل۴ـ۱۵) تعداد این جک ها در دستگاه های مختلف، متفاوت و معمولاً ۵ عدد می باشد.



شکل شماره ۴-۱۵: تصویر جک های رانش صفحه حفار ماشین حفار تلسکوپی

۴-۱۱-۳-۱۴. سیستم بارگیری و تخلیه مواد

قطعات سنگ ها و موادی که به وسیله صفحه حفار از جبهه کار کنده می‌شود باید از محل جبهه کار به پشت ماشین منتقل شود تا دستگاه بتواند به حفاری خود ادامه دهد. اگر سیستم دفع مواد متناسب با ماشین نباشد، آهنگ پیشروی ماشین، علی رغم ظرفیت بالای آن محدود به توانایی ماشین در دفع مواد خواهد شد. بنابراین مواد حفر شده باید بلافاصله به پشت دستگاه منتقل شده، به داخل آنها ریخته شده و از درون این جام ها مواد بر روی نوار نقاله ای که از بدنه دستگاه می گذرد، تخلیه می‌شود سرعت چرخش کاترهد باید به گونه‌ای باشد که نیروی گریز از مرکز مانع تخلیه مواد نشود.

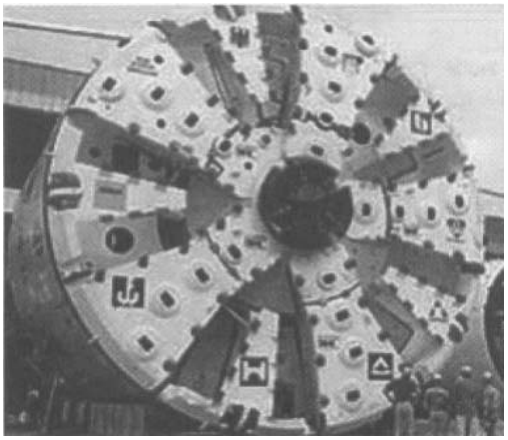
۴-۱۱-۳-۱۵. بازوی نصاب

در اغلب ماشین‌ها، یک بازوی هیدرولیکی تعبیه شده است که به کمک آن می‌توان قطعات بتنی یا فلزی مورد کاربرد برای نگهداری تونل به کار را در جای خود نصب کرد.

۴-۱۱-۳-۱۶. سپر صفحه حفار

حفر تونل در زمین های سست و ریزشی با استفاده سپرهای فولادی انجام می‌شود. مقطع این سپر ها دایره ای شکل می باشد. وجود سپر موجب ایمن شدن شرایط حفاری می‌گردد. سپرها در خاک های ضعیف غیر چسبنده، خاک های رسی و خمیری و خاک‌های تحت فشار آب به کار می روند. سپرها از لحاظ نوع به سه دسته تقسیم می شوند.

الف- سپر هوای فشرده: در مواردی که تونل در زیر سطح ایستابی واقع شده باشد و دبی آب ورودی به داخل تونل موجب باعث ایجاد تأخیر و یا توقف در فعالیت های عادی شود، از این گونه سپرها استفاده می‌شود در این سپرها با استفاده از هوای فشرده (که توسط کمپرسورهایی در سطح زمین تأمین می‌شود)، فشار هوای داخل سپر بالا برده می‌شود تا بدین وسیله از ورود آب به داخل تونل جلوگیری شود. برای جلوگیری از خروج هوای فشرده قسمت عقبی سپر مسدود می‌شود. این نوع سپرها علی رغم کارایی مناسب در شرایط ذکر شده، در برخی موارد هوای فشرده از منافذ موجود در دستگاه خارج شده و فشار افت پیدا می کند. به همین دلیل از این نوع سپرها به ندرت استفاده می‌شود. در شکل ۴ــ۱۶ تصویر این نوع سپر نشان داده شده است.[5, 7,9]



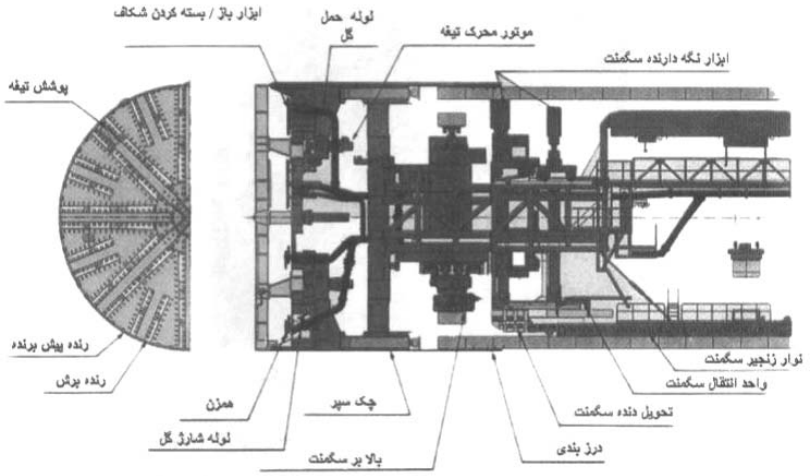
شکل شماره ۴-۱۶: تصویر سپر هوای فشرده

ب- سپرگل: در زمین های خیلی سست و محتوی آب به دلیل هجوم آب ونشست زمین نمی‌توان با روش های معمول اقدام به حفاری نمود. قسمت بیرونی این سپرها دارای منافذی جهت عبور مواد حفر شده و هم چنین دارای رنده هایی به عنوان خراشنده جبهه کار می باشند. در این موارد از سپر ویژه ای موسوم به سپر گل استفاده می‌شود. در این نوع سپرها از گلی که مخلوطی از کانی های رسی (مانند بنتونیت) و آب می‌باشد، استفاده می‌شود. گل مذکور بین جبهه کار و صفحه حفار قرار می‌گیرد. این گل دو وظیفه عمده را بر عهده دارد:

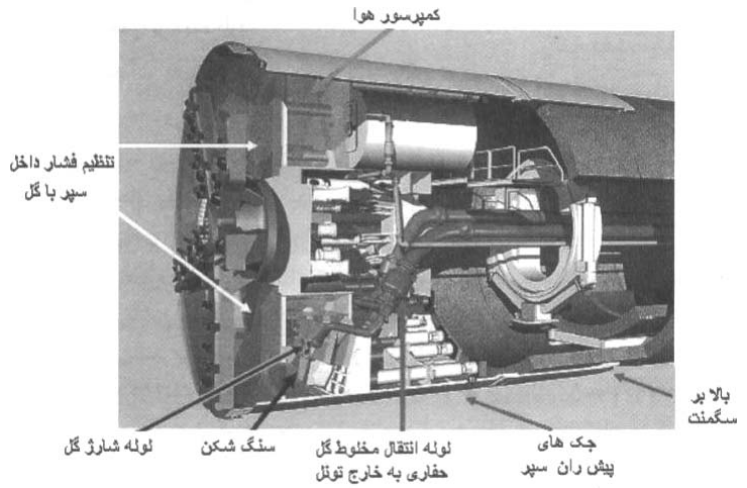
ـ جلوگیری از مورد آب به داخل سپر با استفاده از فشار گل

ـ خنک کردن ابزار حفاری

گل موجود در سپر به همراه مواد کنده شده از سینه کار به بیرون از تونل منتقل می‌شود. مخلوط حاصل در حوضچه های ویژه ای ته نشین شده، پس از جداسازی مخلوط بنتونیت و آب بار دیگر به جبهه کار تزریق می‌شود. اشکال ۴ـ۱۷ و ۴ـ۱۸ موید این مطلب می باشد.

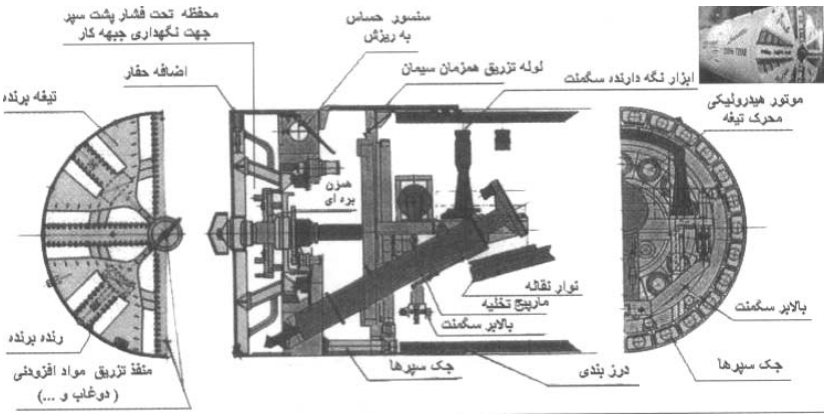


شکل شماره ۴-۱۷: تصویر سپر گل



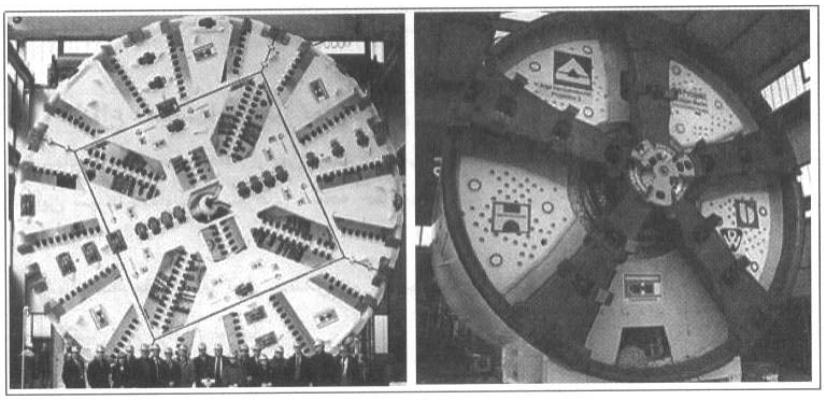
شکل شماره ۴- ۱۸: مقطع سپر گل

ج- سپر متعادل کننده فشار زمین (EPB): این سپر در زمین های سست زیر سطح ایستابی مورد استفاده قرار می گیرد. این نوع از سپرها دارای یک صفحه حفار پنجره ای شکل هستند که مجهز به دندانه های حفار می باشد . مواد حفر شده موجود در جبهه کار از طریق منافذ پنجره ای شکل در محفظه ویژه ای که بلافاصله در پشت صفحه حفار قرار دارد، جمع و متراکم می شوند. این مواد در واقع به عنوان یک نگهدارنده جبهه کار عمل کرده و علاوه بر آن از ورود آب به داخل سپر جلوگیری می کنند (شکل ۴ـ ۱۹).



شکل شماره ۴-۱۹: تصویر سپر EPB

دو مورد اخیریعنی سپر های گل و EPB امروزه به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرند. البته در مواردی نیز از سپر های ترکیبی استفاده می‌شود. این نوع سپرها مزایای سپرهای گل و EPB را یکجا دارا می باشند (شکل ۴ـ۲۱).



شکل شماره ۴-۲۰: تصویر سپر های ترکیبی گل و EPB

در رابطه با انتخاب سپر مناسب روش های مختلفی پیشنهاد شده است. به طور کلی فاکتورهای مؤثر در انتخاب سپر مناسب را می‌توان به شکل زیر تقسیم بندی نمود:

- منحنی طبقه بندی دانه ها
- شرایط نفوذ در برابر آب برای محیط (تراوایی)
- محدودیت های پایداری محیط
- کانی شناسی سنگ یا خاک محیط
- شاخص های کیفی محیط
- مقاومت سنگ

از میان موارد ذکر شده دو مورد اول بسیار حائز اهمیت می باشند. منحنی طبقه‌بندی دانه ها بیان کننده ابعاد ذرات تشکیل دهنده محیط می باشد. شرایط تراوایی نیز به واسطه ضریب هدایت هیدرولیکی سنجیده می‌شود. ضریب هدایت هیدرولیکی عبارت است از

مسافتی که آب در واحد زمان در خاک طی می کند. سنجش این ضریب نیازمند تمهیدات بسیار دقیقی می باشد؛ چرا که این ضریب به مواردی چون درجه حرارت، دانسیته رطوبت خود خاک و ... وابسته می باشد. به همین دلیل در سال های اخیر از ابزار های تراواسنج که قابلیت سنجش ظریب هدایت هیدرولیکی، در زمین را دارند، استفاده می‌شود. این ضریب بر حسب متر بر ثانیه بیان می‌شود [5, 7].

۴-۱۱-۳-۱۷. انواع ماشین‌های حفار تمام مقطع

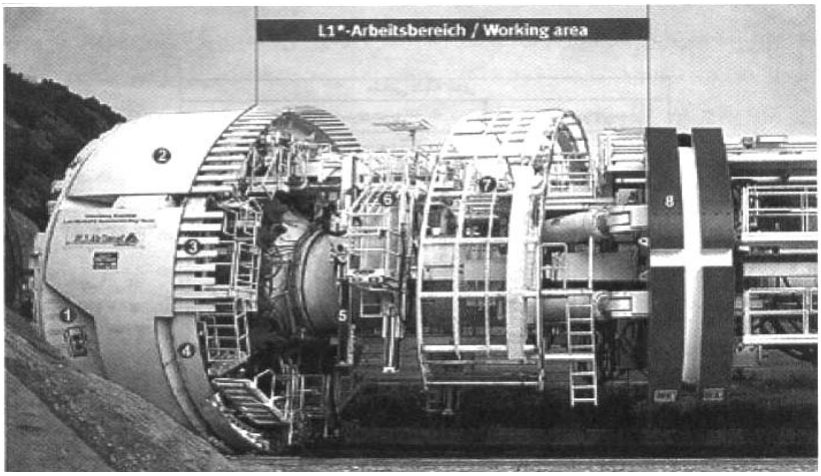
ماشین‌های حفاری تمام مقطع از طریق سپرهای مورد استفاده، طبقه‌بندی می‌شوند. لازم به ذکر است که این سپرها متفاوت از سپرهای صفحه حفار بوده و به عنوان محافظ سطح جانبی دستگاه عمل می کنند.

ماشین‌های تمام مقطع حفر تونل به شکل زیر تقسیم بندی می شوند. [5]

- ماشین حفر تونل از نوع باز
- ماشین‌های حفر تونل تک سپره
- ماشین حفر تونل با سپر تلسکوپی

۴-۱۱-۳-۱۷- ۱. ماشین‌های حفر تونل از نوع باز

ماشین‌های باز در مواردی به کار می روند که توده سنگ درون‌گیر تونل از مقاومت کافی جهت تحمل فشار کفشک های TBM برخوردار باشد و حالت ریزشی نیز داشته باشد. این ماشین‌ها طراحی های متفاوتی دارند ولی در کل دو سیستم دو کفشکه و محور اصلی عمومیت بیشتری در میان سازندگان این نوع ماشین‌ها دارند. (شکل۴ـ۲۱).



۱ـ کله حفار	۵ـ دستگاه نصب میل مهار
۲ـ سپر	۶ـ قفسه ایمنی
۳ـ سپر انگشتی	۷ ـ بالابر وایرمش
۴ـ بالابر سگمنت	۸ـ کفشک

شکل شماره ۴-۲۱: تصویر دستگاه TBM تک سپره

مهم‌ترین مزیت ماشین‌های باز نسبت به انواع سپردار، امکان دستیابی بـه سـرعت هـای بالای حفاری می باشد. این ماشین‌ها، عمل حفاری و نصب نگهداری موقت را تقریباً هم‌زمان انجام می‌دهند و به همین دلیل سرعت بالایی در اجرا دارند. در پروژه هایی که امکان حذف لاینینگ نهایی و یا اجرای سریع آن وجود دارد و شرایط سنگ نیز مناسـب (حتـی سـخت) است، این ماشین مناسب ترین انتخاب می باشد.

در شروع شیفت کاری این ماشین، بازدید اولیه انجام شده و اگر نیازی به تعویض، ترمیم و یا تعمیر دیسک ها باشد، انجام می‌شود. به طور خلاصه می‌توان سیکل حفـاری ایـن نـوع ماشین‌ها را به شرح زیر بیان نمود :

I‌ـ استقرار کفشک‌ها بر روی دیواره و تنظیم فشار: پس از فشرده شدن کفشک‌ها در دیـواره و ایجاد نیروی اصطکاک کافی جهـت عکـس العمـل در برابـر نیـروی پیشـروی، موتورهـای

کله حفار روشن می‌شود و ضمن درگیر کردن کلاچ شروع به چرخش می کند. قبل از شروع به چرخش کله حفار سیستم های تهویه و نوارهای نقاله راه اندازی شده اند.

II- پیشروی کله حفار به سمت جلو: پس از تنظیم فشار مناسب برای سیلندرهای هیدرولیک پیش برنده، کله حفار به سمت سینه حرکت داده می‌شود. در حین حرکت، کله حفار به تدریج با سنگ درگیر شده و فشار سیلندرها توسط اپراتور تا حد مناسب افزایش می‌یابد؛ به نحوی که نیروی لازم برای دیسک‌ها جهت حفاری بهینه تأمین گردد. در این حالت از توان موتورهای کله حفار تا حدود ۹۵ درصد استفاده می‌شود.

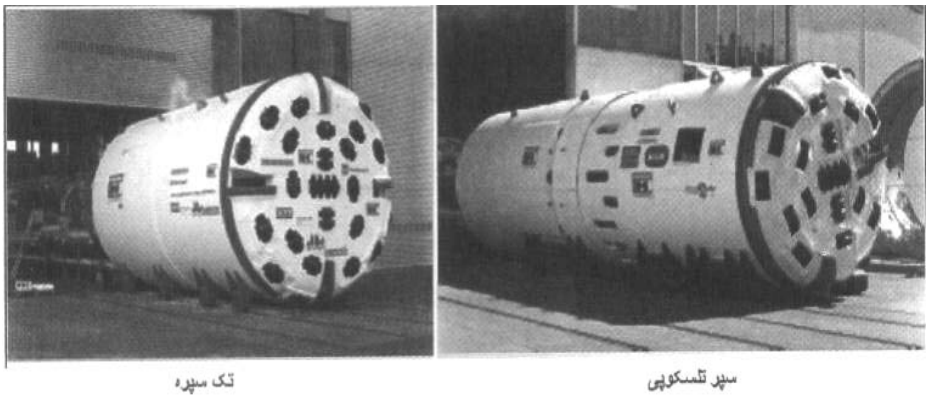
III- توقف عملیات چرخش کله حفار: پس از ادامه حفاری و پیشروی در سنگ، سیلندرهای هیدرولیک به انتهای کورس خود نزدیک می‌شوند. در این زمان، اپراتور به تدریج فشار پشت کله حفار را کاهش می‌دهد و پیشروی کاترهد متوقف می‌شود. کله حفار پس از توقف پیشروی، حدود ۶۰ ـ ۳۰ ثانیه به چرخش خود ادامه می‌دهد تا سنگ شکسته شده در سینه کار به طور کامل تخلیه شود.

IV- استقرار ماشین بر روی کف زمین: پس از تخلیه سنگ های خرد شده از جلوی سینه کار، حرکت کله حفار و هم چنین نوار نقاله متوقف می شوند. در این زمان پاشنه های عقبی ماشین توسط جک های هیدرولیک خودشان بیرون رانده شده و وزن عقب ماشین بر روی پاشنه ها منتقل شده و بدین ترتیب ماشین بر روی کف تونل، مستقر و نگهداری می‌شود.

V- حرکت رو به جلوی کفشک ها: پس از استقرار ماشین بر روی کف تونل، کفشک ها رها شده و به داخل کشیده می شوند و توسط سیلندرهای پیشروی به طرف جلوی ماشین کشیده شده و به محل استقرار جدیدشان منتقل می شوند.

VI- تنظیمات و اصلاحات: قبل از شروع سیکل جدید در صورتی که در اثر چرخش ماشین حول محورش انحرافی ایجاد شده باشد و تصحیحاتی در جهت عمودی، افقی و یا پیچشی

ماشین نیاز باشد، توسط قاب در برگیرنده کفشک ها و سیلندرهای تنظیم جهت، انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است هم زمان با عملیات حفاری ماشین نصب نگهداری موقت همانند مش و شاتکریت، بولت و یا قاب (در صورت نیاز) انجام می پذیرد. البته در انواع محور اصلی از این ماشین‌ها قبل از شروع سیکل، مسیر تنظیم و در وطل هر سیکل، یک کورس مستقیم که در طول خط محوری ماشین است، حفر می‌شود. اما در سایر انواع این نوع از TBM ها به دلیل وجود یکدست کفشک تصحیحات در حین سیکل انجام می‌گیرد (شکل ۴ـ۲۲) [5, 7] .



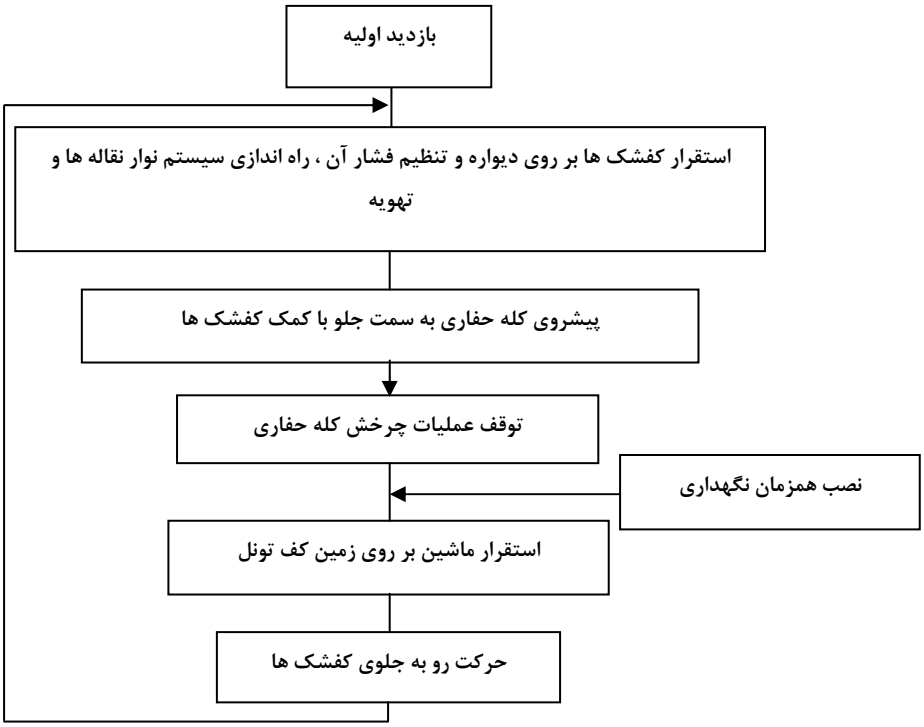
شکل شماره ۴-۲۲: تصویر دستگاه TBM سپردار

۴-۱۱-۳-۱۷- ۲. ماشین‌های حفر تونل تک سپره

در ماشین‌های تک سپره حرکت رو به جلو از طریق اعمال نیرو توسط جک های هیدرولیکی بر قطعات بتنی (سگمنت) نصب شده در انتهای سپر صورت می گیرد. این ماشین‌ها به شکل استوانه و دارای پوشش بوده که در قسمت جلوی آن، کله حفاری، در قسمت عقب دستگاه نصب کننده سگمنت و جک های پیش برنده قرار گرفته اند.

این ماشین‌ها در شرایطی به کار می روند که توده سنگ درون گیر تونل به قدری سست باشد که امکان استفاده از کفشک ها برای تأمین نیروی پیشروی منتفی بوده و نصب

قطعات بتنی در داخل سپر از ریزش دیـواره هـا جلـوگیری کـرده و محـیط مناسـبی بـرای فعالیت کارگران ایجاد نماید. سرعت پیشروی این ماشین‌ها در زمین هـای سسـت و احیانـاً ریزشی، محدود به سرعت نصب سیستم نگهداری می باشد. در چنین زمین هایی بـه علـت مقاومت پایین توده سنگ عمل حفاری به آسانی و به سرعت انجام می گیرد. لذا لزوم نصب نگهداری سگمنتی، عملاً یک سیکل کامل را به عملیات اضافه می کند. در ایـن ماشـین‌هـا سینه کار به هر دو صورت باز و بسته طراحی می‌شود که بیشتر وابسته به میزان آب ورودی به جبهه کار می باشد. تصویر این نوع دستگاه در شکل ۴ـ ۲۳ دیده می‌شود [5, 7] .



شکل شماره ۴-۲۳: فلوچارت کلی سیکل پیشروی ماشین TBM باز

سیکل حفاری TBM های تک سپره به قرار زیر می باشد:

I ـ **چرخش کله حفار:** پس از شروع کـار سیسـتم تخلیـه ماشـین (نـوار نقالـه) وآمـادگی سیستم تخلیه تونل، چرخش کله حفار آغاز می‌شود.

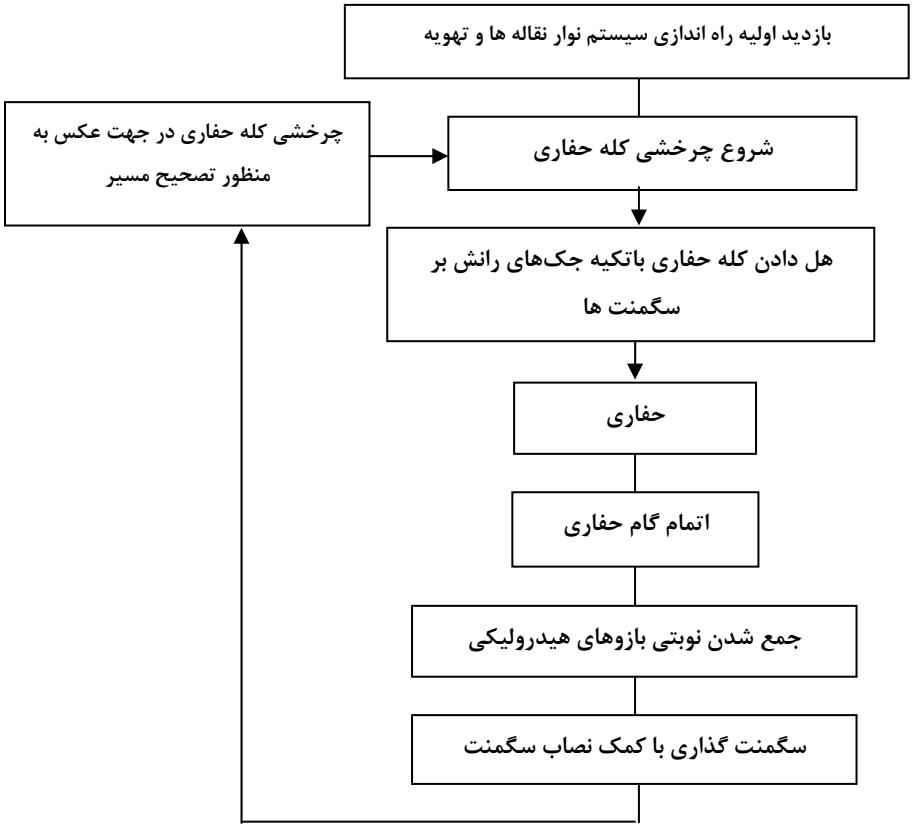
II ـ **انجام حفاری و پیشروی هم زمان ماشین به جلو:** پس از این که کله حفار آغاز به کار کرد، با اعمال فشار از طریق سیلندرهای پیش برنده بر روی سگمنت هایی کـه قـبلاً در پشت دستگاه نصب شده اند، عملیات حفاری انجام شده و ماشین هم زمـان بـه جلـو رانـده می‌شود.

III ـ **توقف بازوهای هیدرولیک پیش برنده:** با پایان یافتن کورس بازوهای هیـدرولیک، سیکل پیشروی نیز پایان می یابد.

IV ـ **تخلیه مواد باقیمانده:** در سـینه کـار پـس از اتمـام کـورس بازوهـای هیـدرولیک کله‌حفار برای چند ثانیه به چرخش خود ادامه می‌دهد تا کلیـه مـواد خـرد شـده از جلـوی سینه کار تخلیه شوند.

V**ـ نصب سگمنت ها:** با توجه بـه اینکـه فشـار بازوهـای هیـدرولیک بـر سـگمنت هـای نگهداری، نیروی پیش برنده دستگاه را فراهم می کند، نصب سگمنت ها را می‌توان جزیی از سیکل عملیات حفاری به حساب آورد. پس از توقف چرخش کله حفار، بازوهای هیدرولیکی که یک یا چند عدد از آنها روی هر قطعه از سگمنت ها قرار گرفته اند، رها شـده و پـس از نصب قطعه جدید، با اعمال فشار ناچیزی سگمنت را نگهداری می کنند. در این حالت سایر بازوها در محل قبلی خود باقی هستند تا نوبت قطعه تحت فشار آنها برسد(شکل۴ـ۲۵).

در ماشین‌های تک سپره تصحیحات چرخش ماشـین حـول محـور، از طریـق چـرخش عکس کله در هر سیکل صورت می گیرد. بدین ترتیب کـه در یکـی سـیکل کلـه در جهـت عقربه های ساعت و در سیکل بعدی در خلاف جهت عقربه های ساعت چرخش می کنـد. [5, 7]



شکل شماره ۴-۲۴: فلوچارت کلی سیکل پیشروی ماشین TBM تک سپره

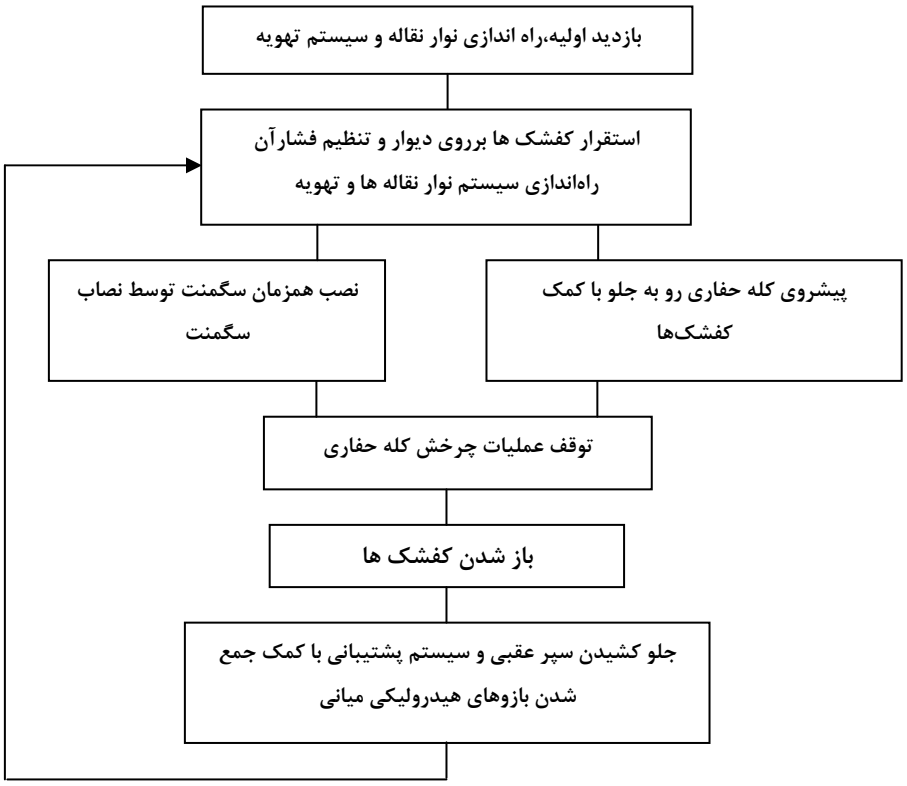
۴-۱۱-۳-۱۷-۳. ماشین‌های حفر تونل با سپر تلسکوپی

این ماشین دارای دو سپر جلو و عقب بوده و هم زمان مجهز به کفشک (مانند ماشین‌های باز) و هم جک های رانش (مانند انواع تک سپره) می باشد. به همین دلیل توانایی کار در زمین های ریزشی با مقاومت مناسب را دارا می باشد. به طور کلی این ماشین توانایی فعالیت در زمین های بسیار خرد شده و ضعیف و هم زمین های نیمه خرد شده را دارا می‌باشد.

در حالتی که زمین مقاومت مناسب را برای ایجاد رانش با کمک کفشک داشته باشد، ماشین می‌تواند به حفاری و سگمنت گذاری مستقل و هم زمان بپردازد و به همین دلیل سرعت حفاری این ماشین‌ها به طور تئوریک دوبرابر (در عمل ۳۰ درصد بیشتر) انواع تک‌سپره می باشد

ماشین‌های تلسکوپی نیز همانند انواع تک سپره، سیکل حفاری را به کمک ایجاد نیروی رانش توسط جک های انتهای سپر و سپس نصب سگمنت پس از جمع شدن بازوها و جک‌های هیدرولیکی انجام می‌دهد (شکل۴ـ۲۵)

ماشین‌های تلسکوپی دارای یک سیستم پشتیبانی می باشند. این سیستم یکی از مهم‌ترین بخش های این نوع از ماشینهای حفر تونل را محسوب می‌شود. این بخش وظیفه اصلی سرویس دهی به ماشین را بر عهده دارد. لازم به ذکر است که منظور از سیستم پشتیبانی ماشین، تریلرهای وصل شده بر آن است که روی آن تجهیزات مربوط به هدایت ماشین و اجرای تونل قرار دارد. [5, 7]



شکل شماره ۴-۲۵: فلوچارت کلی سیکل پیشروی ماشین TBM با سپر تلسکوپی

۴-۱۱-۳-۱۸. انتخاب نوع ماشین

یکی از حساس‌ترین مسائلی که در رابطه با اجرای مکانیزه حفاری تونل ها مطرح است انتخاب صحیح نوع ماشین حفار می باشد. در گام اول با بررسی شرایط زمین شناسی و برنامه زمان بندی پروژه حداقل دو نوع متفاوت از ماشین‌های تمام مقطع از نظر فنی انتخاب می شوند.

شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیک سنگ در بر گیرنده و نوع مصالح تشکیل دهنده آن یکی از مهمترین مواردی بوده که همواره اجرای تونل ها را تحت الشعاع قرار داده است. وضعیت ناپیوستگی‌ها، تغییرات لایه ها، میزان نفوذپذیری و... نیز مسایل مهمی هستند که

باید در مرحله پیش از تصمیم گیری برای انتخاب نوع ماشین مورد بررسی دقیق قرار گیرند.

برنامه زمان بندی پروژه نیز به خودی خود بر روی نوع ماشین تأثیر گذار خواهد بود. به عنوان مثال در انتخاب یک ماشین تمام مقطع از نوع باز جهت اجرای تونل، زمان معمول برای بتن ریزی و لاینینگ نهایی تونل در هر کشور که متناسب با سطح آموزش نیروی انسانی و تکنولوژی موجود در آن کشور می باشد، نیز مؤثر خواهد بود. بنابراین، این مورد به دقت بررسی شود تا ماشین توانایی اجرای به موقع پروژه را داشته باشد.

پس از انتخاب اولیه ماشین بر اساس معیارهای فنی و اجرایی بایستی مسائل اقتصادی نیز در نظر گرفته شود. [5, 20]

۴-۱۱-۳-۱۹. مزایا و معایب ماشین‌های تمام مقطع

در بخش های قبل انواع این ماشین‌ها معرفی شدند. در این قسمت به ترتیب به ذکر مزایا و معایب این ماشین‌ها پرداخته می‌شود.

مزایا و معایب TBM باز

به طور کلی مزایای این ماشین‌ها عبارتند از:

الف- هزینه سرمایه گذاری پایین: این ماشین‌ها به دلیل نداشتن سپر قیمت پایین تری نسبت به دو نوع دیگر دارند و سیستم عملکرد آنها نیز از مکانیزم ساده تر برخوردار می‌باشد.

ب- سرعت پیشروی بالا: به دلیل عدم نصب سگمنت در این نوع ماشین‌ها، سرعت حفاری آنها بالا می باشد. این ماشین‌ها در حین حفاری، قادر به نصب سیستم نگهداری موقت (همانند بولت، مش ، شاتکریت و یا قالب) می باشند و چون به زمین تکیه می کنند،

نیازی به نصب سگمنت جهت ادامه پیشروی ندارند. البته لازم به ذکر مجدد است که این ماشین‌ها در شرایط زمین شناسی مطمئن و سنگ با استحکام کافی جهت گیردادن کفشک، قادر به پیشروی هستند.

ج) سیستم اجرایی ساده تر: چون این ماشین‌ها سیستم ساده ای برای اتجرای حفاری و نصب و نگهداری موقت دارند، کار با آنها از نظر نیروی انسانی ساده تر از انواع دیگر ماشین‌ها می باشد.

عمده ترین معایب این ماشین‌ها به شرح زیر است:

الف- عدم امکان پیشروی در سنگ های سست: همانطور که ذکر شده این ماشین‌ها در شرایط زمین شناسی خوب و سنگی با استحکام کافی قادر به پیشروی با کمک گیر دادن کفشک ها به دیواره تونل هستند و در صورت برخورد با سنگ های سست، پیشروی آنها مختل خواهد شد.

ب- عدم امکان کنترل ریزش سینه کار و فضای حفاری شده: چون این ماشین‌ها از سپر استفاده نمی کنند در صورت وقوع ریزش در صورت وقوع ریزش در سینه کار و یا در قسمت عقب کله حفار، هیچ گونه کنترلی وجود نداشته و ممکن است ماشین در زیر مواد ریزشی دفن شده وکار متوقف شود.

ج- اضافه شدن هزینه نگهداری موقت به پروژه: به دلیل ضرورت نصب و نگهداری موقت توسط ماشین جهت کنترل موضعی ریزش در بخش هایی از فضای حفاری شده، هزینه های اجرایی در این ماشین‌ها افزایش افزایش چشمگیری خواهد داشت.

د- اضافه شدن زمان بتن ریزی به مدت زمان حفاری پروژه: با پایان کار تونل سازی با این ماشین و بیرون بردن آن از انتهای تونل عملیات بتن ریزی نهایی آغاز خواهد شد. در صورتی که تیم بتن ریزی دارای قابلیت های بالای اجرایی و سرعت و تجربه کافی باشند از

این زمان ذخیره شده ناشی از حفاری سریع با ماشین باز نهایت استفاده را خواهد برد. در غیر این صورت افزایش زمان بتن ریزی تونل که در مسیر بحرانی اتمام کار قرار دارد، موجب افزایش زمان کل پروژه خواهد شد. در برخی مواقع افزایش زمان اجرای پروژه ممکن است موجب غیر اقتصادی شدن کل پروژه گردد.

۴-۱۱-۳-۲۰. مزایا و معایب TBM تک سپر

مزایای اصلی این ماشین‌ها عبارتند از :

الف- امکان کار در زمینه های ریزشی: به دلیل استفاده از سپر، فضای حفاری شده از ایمنی کافی برخوردار خواهد بود.

ب- امکان کنترل نفوذ آب با سپر بسته و پمپاژ: اگر میزان ورودی آب از جبهه کار زیاد باشد و این مورد با پمپاژ و آغشته شدن آب با سنگ حفاری شده و انتقال آن بر طرف نگردد، می‌توان کله حفار را از نوع سپردار (اغلب از نوع سپر گل) انتخاب نمود.

ج- نصب نگهداری نهایی سگمنتی: به دلیل نصب نگهداری نهایی سگمنتی پس از هر گام پیشروی در پایان کار ماشین، کار تونل سازی نیز تمام شده و تونل آماده بهره برداری خواهد بود.

د- تزریق هم زمان با اجرا: هم زمان با پیشروی ماشین به فاصله ای از سینه کار، عمل تزریق دوغاب در پشت نگهداری سگمنتی به منظور درزبندی و پرنمودن فضای های احتمالی باقی مانده میان دیواره تونل و سگمنت، نیز انجام خواهد شد.

ه- جلوگیری از انحراف ماشین به دلیل قابلیت چرخش کله از هر دو طرف: در پایان هر گام پیشروی و قبل از شروع سیکل جدید، به منظور تصحیح مسیر و جلوگیری از انحراف مسیر تونل، می‌توان کله حفار را در جهت عکس سیکل قبل به چرخش در آورد.

مهم ترین معایب این ماشین نیز به شرح زیر می باشد:

الف- نرخ پیشروی کمتر آن نسبت به دو نوع دیگر: این ماشین به دلیل انتظار برای نصب سگمنت قبل از شروع گام حفاری جدید، دارای سرعت کمتری نسبت به دو ماشین دیگر می باشد.

ب- امکان گیر کردن سپر با مواجهه با همگرایی زمین: در نواحی با روبار زیاد و یا در زمین هایی که احتمال تورم سریع لایه ها وجود دارد و به طور کلی در زمین هایی که همگرایی سریع در فضای حفاری رخ می‌دهد، در صورت تعطیل چند روزه کارگاه (بسته به سرعت همگرایی) امکان گیر کردن سپر وجود دارد.

آسان ترین راه حل برای پیشگیری از بروز مشکل مذکور، جلوگیری از بروز توقف در کار ماشین می‌باشد که ممکن است دلایل مختلف فنی، مدیریتی و اقتصادی داشته باشد. یکی از موسوم ترین راه حل ها در صورت بروز این مشکل تزریق بنتونیت در پشت سپر است.

ج- نیاز به کارخانه سگمنت: چون این ماشین برای ادامه پیشروی خود نیاز به تکیه کردن به سگمنت های نصب شده دارد و از آنجا که این قطعات برای تونل به مقدار و تعداد زیاد نیاز است، احداث یک کارخانه تولید سگمنت ضروری خواهد بود. این کارخانه هزینه‌های مربوط به خود را دارد که البته در فرایند ناشی از کوتاه کردن مدت زمان اجرای کامل تونل و کم کردن هزینه های عملیاتی جبران خواهد شد. [5,7,9]

۴-۱۱-۳-۲۱. مزایا و معایب TBM سپر تلسکوپی

این نوع از ماشین‌ها به دلیل توانایی فعالیت درهر دو حالت کفشک زن (همانند ماشین‌های باز) و پیشروی با کمک تکیه دادن جک های رانش بر سگمنت‌ها (همانند ماشین تک سپره (دارای حداقل معایب و حداکثر مزایا می‌باشند. به همین دلیل به نسبت دو نوع دیگر هزینه

سرمایه گذاری بالاتری را دارا هستند. ولی در مقایسه با دو ماشین دیگر در صورت استفاده از مزایای آن می‌توان این تفاوت هزینه را از لحاظ ایمنی و زمان اجرای پروژه کاملاً توجیه نمود.

همانطور که مشاهده گردید، با توجه به معایب و مزایای این سه نوع ماشین، TBMهای تلسکوپی بر دو نوع دیگر برتری دارند. در ادامه به مقایسه فنی این سه نوع ماشین از دیدگاه مدت زمان اجرای پروژه پرداخته خواهد شد.

۴-۱۱-۳-۲۲. مقایسه فنی- اجرایی

یکی از مهم‌ترین موارد در بررسی و مقایسه ماشین‌های حفاری تمام مقطع، پیش بینی سرعت اجرای تونل با هر کدام از آنها است. در این مرحله باید کارکرد این ماشین‌ها را با هم مقایسه نمود و تأثیر آن را بر اتمام نهایی تونل محاسبه نمود. مفروضات مندرج در جدول زیر برآورد سرعت اجرای یک پروژه نمونه می باشد.

جدول شماره ۴-۷: مفروضات مورد استفاده در پیش بینی سرعت حفاری تونل

مفروضات	باز	تک سپره	سپرتلسکوپی
تعداد شیفت حفاری	۲	۲	۲
تعداد شیفت تعمیر و نگهداری	۱	۱	۱
تعداد روزهای کاری در ماه	۲۵	۲۵	۲۵
ساعات دوش شیفت حفاری	۲۰	۲۰	۲۰
ساعات یک شیفت تعمیر و نگهداری	۴	۴	۴

در جدول فوق در هر شبانه روز دو شیفت ۱۰ ساعته اجرای تونل و ۴ ساعت نیز تعمیر و نگهداری در نظر گرفته شده است. در شیفت تعمیر و نگهداری، علاوه بر رسیدگی به ماشین و اجرای تعمیرات جزیی آن، سگمنت گذاری، تعویض دیسک کاترها در صورت نیاز،

جلو بردن تجهیزات خدمات فنی (لوله های آب آشامیدنی و صنعتی، هوای فشرده، برق، تهویه و ...) و سایر فعالیت های مربوط به خدمات رسانی به اجرای تونل انجام خواهد شد.

در صورتی که شرایط زمین‌شناسی اجازه استفاده از دستگاه های باز را بدهد، با توجه به سرعت بالای حفاری این ماشین آلات، انتخاب این نوع از TBMها در جهت اتمام هر چه سریعتر پروژه می‌تواند بهترین انتخاب باشد. با در نظر گرفتن احتمال کفشک زدن ماشین تلسکوپی در بسیاری از طول مسیر تونل، سرعت اجرا با یک دستگاه ماشین تک‌سپره، ۷۰ درصد سرعت یک دستگاه ماشین تلسکوپی، خواهد بود. بنابراین در شرایطی که تنها پارامتر مؤثر زمان اجرای تونل باشد، TBMهای باز، تلسکوپی و تک سپره دارای اولویت می باشند. [9]

۴-۱۱-۳-۲۳. مقایسه هزینه سرمایه گذاری

به طور کلی هزینه سرمایه گذاری این ماشین آلات بسیار بالا می باشد . قیمت یک TBM تلسکوپی به همراه سیستم پشتیبانی آن حدود ۸/۵ تا ۹ میلیون یورو برآورد می‌شود. قیمت یک TBM تک‌سپره نیز حدود ۷ میلیون یورو می باشد. این موضوع به دلیل نداشتن سیستم کفشک زدن (و سپر کوتاهتر، در ماشین‌های تک سپر) می باشد.

یک ماشین باز نیز قیمتی پایین‌تر از دو نوع دیگر دارد . اگر هزینه سپر را ۱۰درصد قیمت کل ماشین فرض کنیم هزینه یک سپر حدود ۷ میلیون یورو خواهد بود. از این رو قیمت یک ماشین باز حدود ۶ تا ۶/۵ میلیون یورو برآورد می‌شود .

انتخاب ماشین علاوه بر دخیل بودن در مسائل فنی ـ اجرایی ، پروژه را متحمل هزینه اولیه بالایی می نماید. از این رو انتخاب صحیح ماشین نقش به سزایی در اقتصادی بودن پروژه بر عهده دارد.

لازم به ذکر است که در انتخاب دستگاه مناسب در نظر گرفتن یک متغیر غیر منطقی می باشد. برای انتخاب هر چه مناسب تر دستگاه برای یک پروژه خاص بایستی سعی شود، تمامی متغیر های فنی ـ اجرایی دستگاه و شرایط زمین شناسی محیط تواماً در نظر گرفته شود؛ چرا که ممکن است ماشینی از نظر زمان اجرای پروژه بهترین گزینه باشد. در حالی که توانایی مقابله با پدیده های زمین شناسی (هجوم آب‌های زیر زمینی، ریزش تونل و...) را نداشته باشد. توصیه می‌شود مسائل اقتصادی پس از مسائل فنی ـ اجرایی در اولویت دوم انتخاب ماشین قرار گیرند؛ به گونه ای که در مرحله انتخاب فنی حداقل دو ماشین متفاوت (و یا یک نوع ماشین با قابلیت های متفاوت) انتخاب شده و در بررسی اقتصادی یکی از این گزینه ها انتخاب شوند.

جهت تسهیل در فرایند انتخاب می‌توان از معیارهای تصمیم گیری چون AHP و یا مدل امتیاز بندی استفاده نمود. این روش ها با امتیاز بندی پارامترهای مختلف برای هر گزینه و جمع بندی آنها توانایی انتخاب گزینه مناسب را دارا می باشند. [9]

۴-۱۱-۴. ماشین حفاری یا کله گاوی یا رود هدر (Road Header)

ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع، با توجه به قابلیت ها و سرعت بالای حفاری در هر پروژه ای به عنوان یک گزینه مطرح می باشند. در ابتدا تنها قابلیت ابزار حفاری مکانیزه، حفاری بوده است (شکل۴ـ۲) با گذشت زمان و احساس نیاز به سرعت عمل در حفاری و پیشروی قابلیت های جانبی چون انتقال مواد حاصل از حفاری به بیرون، نگهداری موقت و دائمی فضای حفر شده و... افزوده شده است. در سال ۱۹۸۶ اولین ماشین تمام مقطع حفر تونل ارتباطی به انگلستان بود. در این فصل دستگاه ها و اجزای تشکیل دهنده آنها معرفی خواهد شد.

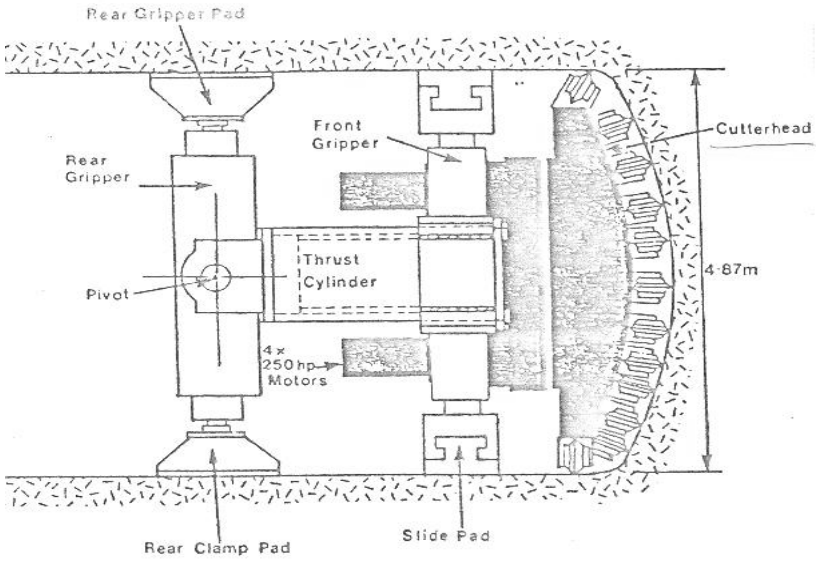
این ماشین تشکیل شده از یک بازویی که بر روی آن سر برشی نصب شده و نیروی لازم برای حفر سنگ توسط آن اعمال می‌شود. روی سر برشی قلم ها یا دندانه های برشی قرار دارند. این ماشین در حفر سنگ های لایه ای به صورت انتخابی موثر می باشند. در حقیقت با امکان استخراج انتخابی توسط این ماشین‌ها لایه های ضعیف تر حفر و در نتیجه لایه‌های محکم تر سنگی ناپایدارتر و امکان استخراج آنها آسان تر می‌شود.

با استفاده از این نوع ماشین می‌توان مقاطعی با شکل های مستطیلی و قوسی را به آسانی حفر نمود. این ماشین‌ها بیشتر به منظور حفر تونل های با مقاطع بزرگ حدود ۱۰ تا ۲۵ متر مربع مورد استفاده قرار می گیرند و قابلیت جابجایی بسیار بالایی دارند. در خاک‌های لایه ای از آنجا که مقاومت لایه ها متفاوت می باشند و نیاز به ماشین‌های با قابلیت حفر انتخابی می باشد، لذا این نوع ماشین می‌تواند با توجه به عملکرد موضعی آن انعطاف پذیری زیادی از خود نشان دهد.

در گذشته ماشین‌های حفار بازویی بیشتر در شرایط سنگی نرم مورد استفاده قرار می‌گرفت و در لایه های با مقاومت بیش از ۷۰ مگاپاسکال با مشکل مواجه می شد چرا که حفر در این‌گونه لایه ها باعث مصرف بیش از حد قلم ها و سرمته ها می شد و هزینه های تعمیر و نگهداری بالا می رفت و از طرفی به خود ماشین هم صدمه وارد می آمد. تحقیقات نشان داد که با افزایش وزن ماشین می‌توان این ماشین را برای شرایط سنگی سخت تر نیز بکار برد. از جمله king نشان داد که کاربرد ماشین‌های حفاری بازویی در انگلستان که دارای وزنی بین ۲۱/۵ تا ۸۰ تن می باشند، برای حفر سنگ هایی با مقاومت ۶۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال توجیه اقتصادی دارند.

بارگیری این نوع ماشین توسط بازوهای جمع کننده صورت می گیرد و به ناو زنجیری منتقل می‌شود. حرکت مواد خرد شده در خلاف جهت سینه کار تونل و از طریق ناو

زنجیری به طور پیوسته و به سیستم اصلی انتقال مواد خردشده هل داد می‌شود. شکل زیر یکی از انواع مختلف رود هدر را نشان می دهد. [5,7,9,20]



TBM جمع و جور با قطر 4.87 m ، توان 74.6 Kw

شکل شماره ۴-۲۶: رود هدر

۴-۱۱-۴-۱ . قدرت و وزن رود هدر

خصوصیات اصلی ماشین‌های حفار بازویی عبارتند از:

انعطاف‌پذیری، قابلیت حفر مقاطع تونلی با شکل‌های متفاوت و قابلیت مانور آن برای ایجاد تقاطع در تونل ماشین‌های سبک‌تر قدیمی (حدود ۲۵ تن یا کمتر) در حفر سنگ‌های متوسط با مشکل مواجه می‌شدند، چرا که لرزش ماشین باعث وارد شدن خسارت به سر مته‌ها و گاهی خود ماشین می‌شد، ولی در ماشین‌های سنگین حفار بازویی (۹۰تن به بالا) تمام قسمت‌های آن از استحکام بیشتری برخودار شده‌اند و در نتیجه قدرت ماشین نیز افزایش یافته، هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن کاهش یافته و حفر سنگ های سخت توسط این نوع ماشین توجیه اقتصادی یافته است.

۴-۱۱-۴-۲ . انواع برش در رود هدر

رود هدرها عمل برش را به دو صورت انجام می دهند:

۱- سیستم برش نوع مخروطی

معمول ترین نوع تاج برشی در رود هدر مخروطی هایی مـی باشـند کـه حـول محـوری در امتداد محور بازوی ماشین دوران می کند. طرح تاج برشی مخروطـی و موقعیـت نصـب آن روی بازو و گونه ای است که حداکثر نیروی برشی را بـر جبهـه کـار تونـل وارد کنـد و لـذا قابلیت اجرایی قابل قبولی در شرایط سنگی سخت از خود نشان می‌دهد. در روش مخروطی در مقایسه با روش طبلکی، زمان لازم برای خرد کردن یا نفوذ اولیه در شرایط سنگی سست و ضعیف، نفوذ اولیه و تثبیت سر برشی در جبهه کار تونل با مشکل مواجه می‌شود.

۲- سیستم برشی نوع طبلکی

این نوع سیستم برای برش در شرایط نسبتاً ضعیف مانند سنگ های رسوبی مـورد اسـتفاده قرار می گیرد. در چنین شرایطی ایـن مکـانیزم سـرعت بـرش خـوبی بـه دسـت مـی‌دهـد. ماشین‌های حفار طبلکی۲۰ تا ۳۰ درصد سبکتر از ماشین‌های حفار مخروطـی بـا ظرفیـت یکسان هستند. ویژگی های اصلی این نوع سیستم عبارتند از: انطباق پذیری آن بـا شـرایط پیچیده، قابلیت مانور، توانایی برش، سطح مقطع های بزرگ و ظرفیت بالای آن.

مقایسه تفاوت‌های عملیاتی تاج حفار مخروطی و تاج حفار طبلکی به دو طریق می‌باشد:

۱ـ مقایسه نیروی حفر و مقدار تقریبی انرژی حفر بین دو هدر تاج مخروطی و تاج طبلکـی با قدرت موتور مشابه.

۲ـ بررسی نتایج تجربیات عملی در مورد کارایی رود هدر های تاج مخروطی و رود هدرهای تاج طبلکی.

در جدول ۴ـ۸ مشخصات دو نوع رود هدر تاج مخروطی و تـاج طبلکـی مشـخص شـده است.

جدول شماره ۴-۸: مشخصات رود هدرهای تاج مخروطی و تاج طبلکی

مشخصات	رودهدر تاج مخروطی	رودهدر تاج طبلکی
قدرت موتور تاج حفار	300(KW)	300(KW)
وزن	110(ton)	95(ton)
تعداد تیغه ها	105	198
سرعت برشی متوسط	1.5(m/s)	2.8(m/s)
نیروی حفر در حرکت افقی	200(KN)	85(KN)
نیروی حفر در حرکت رو به بالا	200(KN)	300(KN)
عرض دستگاه	3.6(m)	3(m)
طول دستگاه	13.5(m)	12(m)
ارتفاع دستگاه	2.7(m)	1.85(m)
فاصله مرکز ثقل تا محور تاج	5(m)	4.5(m)

۴-۱۱-۴-۳. توانایی برش رود هدر

تجربه نشان داده که ماشین‌های حفار بازویی قادرند سنگ های با دامنه مقـاومتی متفـاوت را حفر کنند. یکی از عوامل محدود کننده در رابطه با توانایی برش این است که بـا افـزایش قدرت برش هزینه سرمته‌ها زیاد می‌شود. به منظور افزایش عمر سر مته ها و حفـظ قـدرت برش باید سرعت سر مته را کاهش داد و در نتیجه بایـد از ماشـین‌هـای حفـار سـنگین تـر استفاده شود که این امر باعث افزایش هزینه‌ها و کاهش انعطاف پذیری و قابلیـت جابجـایی می‌شود. در جدول زیر توانایی برش ماشین حفار بازویی آورده شده است.

جدول شماره ۴-۹: مشخصات انواع مختلف رود هدر

انواع اصلی رود هدر	توانایی یا قدرت برش
ماشین‌های سبک	ـ قادر به برش سنگ هایی با مقاومت ۸۰ مگا پاسکال به نحوه موفقیت آمیز است. ـ در سنگ های با مقاومت بیشتر از ۸۰ مگاپاسکال باعث بروز مشکلاتی می‌گردد.
ماشین‌های سنگین	ـ حفر موفق سنگ هایی با مقاومت تا ۱۰۰ مگاپاسکال ـ در سنگ هایی با مقاومت بیش از ۱۵۰ مگاپاسکال نمی‌توان موفق بودن عملیات حفاری را تضمین نمود.

۴-۱۱-۴-۴. مزایای رود هدر

در این روش نیازی به چال زنی و آتش بازی جبهه کار تونل نیست. هم چنین سنگ خرد شده را می‌توان هم زمان با حفر بارگیری نمود، مشروط بر اینکه سطح مقطع تونل به حد کافی بزرگ باشد و قطعات بزرگ سنگ های خرد شده را می‌توان با چکش ضربه زن خردتر کرد و به اندازه مورد نظر رساند، در نتیجه امکان انتقال و جابجایی مواد خرد شده تقریباً با کلیه سیستم ها حمل و نقل و به ویژه نقاله ها (نوارها و ...) میسر خواهد بود. هم‌چنین حفر تمام مقطع تونل با این روش در بسیاری از شرایط ژئوتکنیکی و زمین شناسی که سطح مقطع تونل از ۳۰ متر مربع متجاوز است امکان پذیر می باشد. نهایتاً محیط تونل با حداقل اضافه حفری یا پس زدگی حفر می‌شود. [5, 7]

۴-۱۲. روش تونل سازی اتریشی(NATM)

روش تونل سازی اتریشی(NATM)، در فاصله سال های ۱۹۵۷ تـا ۱۹۶۵در اتـریش ابـداع گردید. نام این روش در سال ۱۹۶۲در سالزبورگ و جهت تمیز از روش قدیمی تونل سـازی اتریشی اعطا گردید. نخستین ارائـه دهنـدگان ایـن روش ,Ladislaus von Rabcewicz Leopold Müllerو Franz Pacher بودنـد. ایـده نخسـتین ایـن روش عبـارت اسـت از استفاده از فشارهای زمین شناسی در برگیرنده توده سنگ جهت مقـاوم سـازی و نگهـداری تونل.

باید گفت که امروزه مطالعات گسترده ای از سوی متخصصین علـم مکانیـک سـنگ در ارائه طرحی مطمئن برای نگهداری فضاهای زیرزمینی صورت می گیرد کـه بتوانـد سیسـتم نگهداری را به گونه ای طراحی کند که علاوه بر ایمن بودن، از نظـر اقتصـادی نیـز معقـول باشد. نتایج این مطالعات بر ضرورت بکارگیری روش های مشاهده ای هـم چـون NATM در تونل سازی تأکید دارد . [5, 20]

الف) ویژگی های اساسی NATM

NATM روشی است مبتنی بر تابع نگاری رفتار توده های سنگ تحت بـار و مونیتورینـگ عملیات ساختمان زیرزمینی سنگ واقعیت این است که NATM به عنوان یـک مرحلـه از حفاری و نیز تکنیک های نگهداری مطرح نیست.

NATM بر هفت ویژگی استوار است:

۱) بسیج مقاومت توده سنگ: این متد بر مقاومت ذاتی توده سنگ پیرامون به عنـوان یـک جز اصلی نگهداری شده در تونل، تکیه می کند. تکیه گاه اولیه طوری هدایت می شـود کـه سنگ را قادر سازد تا بر خودش تکیه کند.

۲) حمایت شاتکریت: سست کردن و نیز تغییر شکل بی اندازه سنگ می بایست به حـداقل برسد. این امر با مهیا کردن لایه های نازک شاتکریت بلافاصله پس از پیشـروی جبهـه کـار حاصل می‌آید.

۳) اندازه گیری: هرگونه تغییر شکل ناشی از حفاری باید اندازه گرفته شود. NATM به نصب تجهیزات اندازه‌گیری در سطح بالایی نیاز دارد. این در آستر، زمین و گمانه ها جاسازی می‌شود.

۴) تکیه گاه انعطاف پذیر: آسترگیری اولیه نازک است و شرایط لایه بندی اخیر را بازتاب می دهد. این مدل به کارگیری، نسبت به تکیه گاه مجهول سریعتر به کار می‌آید و مؤثر می‌شود. مقاوم سازی با یک آستر بتنی ضخیم به دست نمی اید، بلکه با یک ترکیب منعطف از پیچ سنگ، سیم تنیده و شیارهای فولادی حاصل می گردد.

۵) بستن وارونگی: بستن سریع وارونگی و ایجاد حلقه حامل بار دارای اهمیت است. این امر در تونل های حفر شده در زمین های نرم بسیار و خیم است، جایی که هیچ مقطعی از تونل نباید بطور موقت رها شود.

۶) ترتیب قراردادی: دانش NATM بر اساس اندازه گیری مونیتورینگ پایه ریزی شده است. تغییر در متد تکیه گاه و ساختمان امکان پذیر است. این تنها در شرایطی ممکن است که سیستم قراردادی قادر به تغییرات باشد.

۷) اندازه گیری پشتیبانی رده بندی توده سنگ: رده های اصلی سنگ برای تونل و پشتیبانی متناظر آن موجود است. این‌ها برای هدایت در زمینه تقویت تونل بکار می روند. [5, 20]

ب) اصول کلی NATM

تونل زنی به روش جدید اتریشی در خاک های سست تا سنگ های سخت و مقاوم و در اعماق کم (در جهت به حداقل رساندن نشست سطح) تا اعماق زیاد و بیش از ۱۰۰۰متر تحت میدان های تنش ناشی از عملیات معدن کاری انجام گرفته است. بنابراین اصول زیر به طور کلی قابل اعمال می باشند. این اصول در مقاله آقای دکتر فکر به ترتیب زیر آورده شده است:

۱) عنصر اصلی باربری یک تونل، توده سنگ پیرامونی آن می باشد.

۲) یکی از اصول عبارت است از: حفظ مقاومت اولیه سنگ تا آنجایی که امکان داشته باشد.

۳) اتساع یا جابجایی ها باید به حداقل رسانده شود زیرا موجب پایین آوردن مقاومت می‌گردد.

۴) وضعیت تنش تک محوری یا دو محوری، شرایط نامناسب برای تونل بوده و باید از آن اجتناب گردد.

۵) دگرشکلی‌ها باید به طرزی تحت کنترل درآید که توده سنگ پیرامون تشکیل یک حلقه باربر حول تونل را بدهد. به گونه ای که از دست رفتن مقاومت به وسیله اتساع در سطحی قابل قبول نگهداشته شود. با اجرای خوب این کنترل، ایمنی و اقتصاد افزایش می‌یابد.

۶) برای رسیدن به این منظور، تکیه گاه اولیه می باست در زمان درست نصب گردد.

۷) عامل زمان ویژه سیستم ترگیبی سنگ به اضافه تکیه گاه اولیه، باید به صحت کافی تخمین زده شود.

۸) تخمین عامل زمان بستگی دارد به:

الف- آزمون های آزمایشگاهی

ب- آزمون های برجا

ج- رده بندی توده سنگ

از این سه نرخ دگرشکلی و زمان پابرجایی می‌تواند استنتاج شده و با رفتار واقعی تونل در حین ساختمان تطبیق و کنترل گردد.

۹) هرجا که دگرشکلی ها زیاد بود و یا سست شدن توده سنگ انتظار می‌رود، باید از تماس کامل تکیه گاه اولیه با جدار تونل در محل برخورد، اطمینان حاصل آید. این امر با به کار گرفتن شاتکریت به بهترین نحو حاصل می گردد.

۱۰) تکیه گاه اولیه باید نازک و دارای صلبیت خمشی پایین باشد، از این رو گشتاورهای خمشی پایین آورده و وقوع شکستگی ها در اثر خمش به حداقل می رسد.

۱۱) افزایش نگهداری با شبکه توری اضافی، قاب های فولادی، سیم های فولادی، سیم مهارها یا میل مهارها حاصل می‌آید نه با آسترگیری ضخیم تر.

۱۲) نوع و مقدار تکیه گاه و زمان نصب، از نتایج اندازه گیری دگرشکلی ها تعیین می‌گردد.

۱۳) از نظر استاتیکی تونل را می توان لوله ای ضخیم (یا حلقه ای دوبعدی) که از توده، سنگ و آسترگیری تشکیل یافته در نظر گرفت.

۱۴) از آنجا که یک لوله، مساعدترین ویژگی پایداری را بدون آن که درز داشته باشد، داراست، بستن هم زمان کف تونل در هنگامی که سنگ دارای مقاومت کافی نباشد دارای اهمیت است.

۱۵) رفتار توده سنگ با بستن به موقع کف تونل تعیین می گردد. پیشروی های زیاد در طاق منجر به دیر بسته شدن کف و آن هم منجر به تشکیل لوله نیمه آسترگیری اولیه گردیده که نتیجه آن بروز گشتاورهای بزرگ خمشی در جهت محور تونل می باشد که منجر به ایجاد تمرکز تنش زیاد در سنگ، در پای دیواره های جانبی می گردد.

۱۶) حفاری پیشانی کامل، بهترین روش برای دستیابی یک توزیع یکنواخت تنش است. هر چند که در سنگ های سست، حفاری بخش بخش، برای پایداری در حین ساختمان ممکن است، لزوم پیدا کند.

۱۷) روند حفاری و نگهداری برای پایداری مهم می‌باشد. زیرا آنها عامل زمان توده سنگ را تحت تأثیر قرار می دهند.

۱۸) تغییر در طول دوره حفاری، زمان بستن کف، طول پیشروی طاق، مقاومت و زمان نصب تکیه گاه تماماً به طور سیستماتیک برای کنترل فرایند توزیع مجدد تنش و پایدارسازی به کار گرفته می شوند.

۱۹) در موارد آستربندی مضاعف، آستربندی نهایی باید همچنان نازک باشد. تنش عمود می‌باید بر روی تمام سطح تماس بین آستربندی ها منتقل گردیده و تنش برشی در سطح برخورد می‌باید پایین باشد.

۲۰) کل سیستم، توده سنگ به اضافه پوشش باید با نگهداری اولیه پایدار گردند. در صورت خورنده بودن آب های زیر زمینی آستربندی نهایی باید قادر به پایدار سازی توده سنگ به تنهایی باشد. سیم مهارها تنها می توانند به عنوان یک نگهدارنده دائمی تلقی گردند، البته در صورتی که از گزند خورندگی در محیط های خاص در امان باشند.

۲۱) برای کنترل ایمنی سازه تونل، اندازه گیری تنش بتن و تنش برخورد در مرز بین سنگ و آستربندی ضرورت دارد. اندازه گیری دگرشکلی ها هم چنان ادامه پیدا می کند.

۲۲) فشار ایستایی آب بر روی پوشش و فشار جریان در توده سنگ با زهکشی مناسب پایین آورده می شود. به طوری که از این اصول دریافت می شود، NATM، روند و دستور کاری نیست که با دنبال کردن آن به نتیجه مورد نظر رسید بلکه عبارت است از مجموعه‌ای از ایده ها که به ویژگی های زمین شناسی منطقه توجه ویژه ای دارد. این روش در نتیجه تجربیات متعدد در کار تونلزنی به دست آمده است و برای به دست آوردن هر یک از این ایده ها و نیز جمع بندی آنها به عنوان یک روش، سال‌های زیادی، وقت صرف شده است. نوآوری اساسی این ایده، یک فن ساختمانی یا یک روش خاص محاسباتی نمی باشد، اما برای ساختمان تونل در توده سنگ و چگونگی برخورد با آن ارائه طریق می‌نماید .

یکی از اصول موفقیت آمیز این روش، گردآوری موضوعات متعدد از مهندسی عمران و مکانیک سنگ می باشد که شامل موضوعات نظری و عملی است. [5, 20]

ج) روش اجرای NATM

با اینکه هنوز هیچ پشتوانه نظری حقیقی برای NATM وجود ندارد اما عواملی وجود دارند که منجر به موفقیت این روش می گردند که عبارتند از:

۱) بتن پاشی به عنوان سازنده سازه ترکیبی قوس سنگ که به حلقه حمال سنگ موسوم بوده و حفره را احاطه می کند.

۲) بتن پاشی به مراتب قدیمی تر از NATM می باشد اما ویژگی های عالی آن از نظر مقاومت و لغزش، این روش را به عنوان یکی از ابزارهای غالب نگهداری در تونل سازی به روش NATM گردانیده است. بیشترین اهمیت آن امکان اجرای سریع برای پوشانیدن سطح تازه حفاری شده سنگ می باشد. مزیت دیگر آن دستیابی به یک مقاومت نسبی بالادر مدت زمان کوتاه، حدود ۵ نیوتن بر میلی مترمربع (مگاپاسکال) در ۶ ساعت می‌باشد.

شاتکریت در تونل سازی دارای اثر مضاعف است: محافظت سنگ در اثر هوازدگی و فرسایش: با بستن ترک‌ها تمرکز تنش در اطراف تونل کاهش یافته، هم چنین ضخامت زیاد شاتکریت به عنوان یک قوس نگهدارنده عمل می کند. در تمام موارد اتصال تنگاتنگ با سنگ مهم می‌باشد زیرا این عمل موجب می گردد سنگ، بارها را مشترک حمل نموده و ساختاری مرکب با سنگ تشکیل دهد. شاتکریت مناسب، نیاز به یک تکیه‌گاه نیمه صلب را برآورده می‌سازد، زیرا دگرشکلی شعاعی زیادی را بدون شکستگی امکان‌پذیر می سازد. با دگرشکلی های بزرگ تونل، شاتکریت می شکند. امّا در صورت مسلح شدن به توری سیمی یا رشته های فولادی، قطعات برش یافته شاتکریت خطری آنی برای خدمه ایجاد نخواهد کرد.

۳) وسیله دیگر برای ساختن طاق بیرونی، قاب های فولادی می باشد. این قاب ها در توده‌های سنگ فشرده شده و بسیار خرد شونده به کار گرفته شده و تکیه گاهی سریع و

موثر برای سنگ به شمار می‌آیند. در چند سال اخیر کاربرد قوس های پروفیلی به میزان زیاد افزایش یافته است. این قوس ها نسبت به قاب های فولادی مزایای بیشتری دارند و نیز به دلیل سبک وزن بودن، نصب آنها آسان تر می‌باشد.

۴) در تونل سازی هوراه با مفاهیم NATM، نصب میل مهارها جایگاه ویژه ای دارد و اهمیت آنها به همان اندازه اهمیت شاتکریت می باشد. این میل ها نیز مثل شاتکریت در صورت نصب موجب تشکیل حلقه حمال در اطراف توده سنگ می گردند. میل مهارها در برابر دگرشکلی شعاعی مقاومت کرده از این‌رو ایجاد دگرشکلی کنترل شده می نماید که شکل ژئومتریک تونل را حفظ می نماید. هم چنین میل مهارها از آن‌رو که تاثیر ناهمسانی و نا همگونی را کاهش می دهند، تشکیل صفحات برشی و لغزشی را مشکل تر ساخته و سبب ایجاد مقاومت ماندگار بالا حتی در توده های سنگ به شدت دستخورده می گردد که این نیز به نوبه خود سبب بهسازی کیفیت سنگ می گردد. تنش مماسی در حلقه سنگ حمال موجب افزایش چسبندگی مهاری‌ها می‌گردد. طاق‌های ثانویه ایجاد شده بین تکیه‌گاه‌ها، در برابر تمایل توده سنگ نسبت به جابجایی به داخل تونل مقاومت ایجاد می‌نماید که این مقاومت به نزدیکی مهاری‌ها بستگی دارد. در صورتی که طاق تونل تحت تنش زیاد در اثر فرایندهای تجدید آرایش دوباره قرار گیرد، یا اگر سیستم سنگ در معرض شکستگی قرار داشته باشد، تونل نیاز به بهسازی با بتن پاشی به سطح خواهد داشت.

بنابراین به طور خلاصه مواد پایدار کننده در NATM عبارتست از: شاتکریت، میل مهارها، قوس های فولادی یا پروفیلی، صفحات فولادی و....

هدف اصلی NATM ایجاد یک قوس نیمه صلب خارجی بلافاصله پس از حفاری با وسایل نگهداری از قبیل شاتکریت، کوه پیچ و غیره می باشد. این امر موجب تنظیم تنش در محدوده اطراف تونل گردیده از سست‌شدگی مخرب جلوگیری به عمل می آورد و این همان چیزی است که NATM را از روش‌های تونل‌زنی محافظه‌کارانه تمیز می دهد. زیرا

اصولاً در شیوه های سنتی تونلسازی، بار سنگ می‌بایست تماما بوسیله تجهیـزات نگهـداری تحمل شود که این کار نیز مستلزم صرف هزینه‌های زیاد می باشد.

روش NATM بیشتر در نتیجه تجربه عملی بوجود آمده و مانند دیگر روش هـایی کـه در حال تکمیل و تکوین می باشند، دستخوش تغییر و تحولات و مشکلات متعددی گردیده تا به شکل کنونی درآمده است. این روش از انعطاف پذیری قابل توجهی در شرایط مواجهـه با وضعیت های متفاوت توده سنگی برخوردار است.

به طور کلی ضروری است که مطالعات و بررسی دقیقی به منظور بررسی شـرایط زمـین ساختاری به ویژه در زمیسن های نامناسب انجام گرفته، بین هزینه های مطالعات و اجـرای عملیات رابطه ای منطقی ایجاد گردد.

تهیه مـواد و مصـالح مـورد نیـاز NATM و طریقـه ریخـتن بـتن در فضـاها، حتـی در طرح‌های کوچک تونل سازی با NATM نیاز به ساماندهی مناسب و کارآمد دارد که خـود ناشی از تجربه و مهارت بالای معدنچی ها و اجرا کاران دارد. اهمیت نصب شعاعی مهاری‌هـا به طور سیستماتیک در سنگ های سست، به منظور تأمین توزیع مناسب تنش‌های بوجـود آمده در قوس های دایره ای شکل سنگی، فوق العـاده مناسـب تشـخیص داده شـده اسـت. موفقیت در روش NATM نیاز به آموزش های تئوریک و عملی هم زمان در محل عملیـات دارد زیرا تنها در ارتباط بودن نزدیک و دقیق مهندسان با مسائل و مشـکلات در محـل کـار می تواند آنها را به اعمال راهنمایی های خاص و دقیق قادر سازد. یک بخش مهم و جـدایی ناپذیر در این روش، مشاهده رفتار تنش کرنش سنگ با فنون اندازه گیری می باشد.[7 ,5]

۴-۱۳. روش‌های مختلف اجرای محفظه‌های زیر زمینی

حفاری فضاهای زیر زمینی نیمه عمیق و عمیق، حفاظت دیواره گود، قبل یا در حین انجـام حفاری با استفاده از روش های مختلفی چون سپر چوبی، سپر فلزی(شیت پایل)، سـپرهای بتنی پیش سـاخته، اجـرای شـمع، اجـرای دیـوار دیـافراگمی، تثبیـت خـاک بـا روش jet grouting، شات‌کریت و ... . با توجه به شرایط محل، ماهیت و جنس زمین انجام می شود. در ادامه به طور مختصر به برخی از روش‌های مهم پرداخته می‌شود.[2,4]

۴-۱۳-۱ . روش دیوار دیافراگمی

دیواره های دیافراگمی یا دوغابی (Slurry Walls) ، دیوارهای بتنی مسلح یـا غیـر مسـلح ساخته شده در زیر تراز سطح زمین هستند که به منظور نگهداری دیوارهٔ گودها یا آب بندی کف سدها و مواردی که اجرای دیوارهای طولی کم عرض و عمیق در زیر سطح خاک مـورد نیاز باشد، اجرا می شوند. مراحل اجرا به صورت زیر می باشد:

حفاری به کمک دستگاه های خاص

پرکردن محل حفر شده (به طور همزمان با حفر)با گـل و بتونیـت و سـیمان(جهـت عـدم ریزش خاک دیواره)

- قرار دادن قفسه ها آرماتورهای سازه نگهبان در داخل محل حفر شده بـتن ریـزی (بتن روان و با کارائی بالا)

از مزایای این روش می توان به موارد زیر اشاره نمود:[2, 4,15]

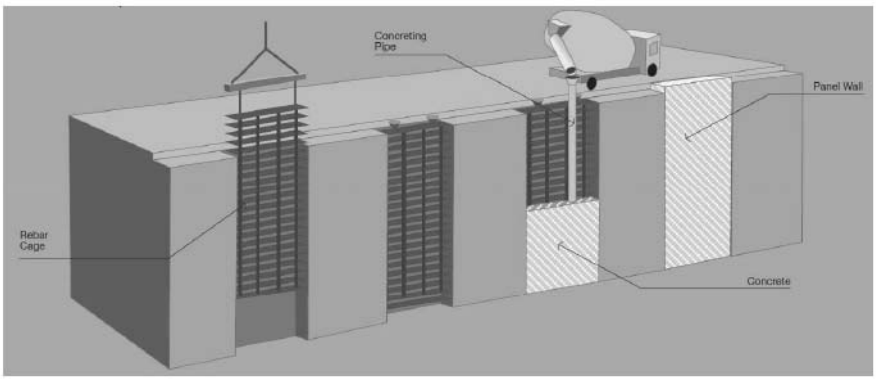
- زیاد شدن سرعت اجرای کار
- زیاد شدن درجه ایمنی کار

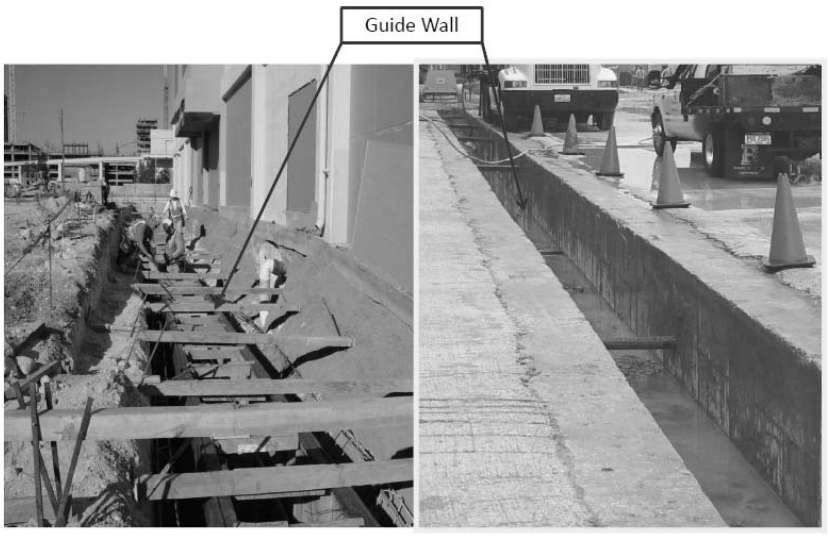
- دیوار دیافراگمی هم به عنوان سازهٔ نگهبان گود رفتار می کند و هم در حین بهره‌برداری از آن به عنوان دیوار حایل استفاده می‌شود.
- مناسب برای حفاری‌ها و گودهای با طول زیاد

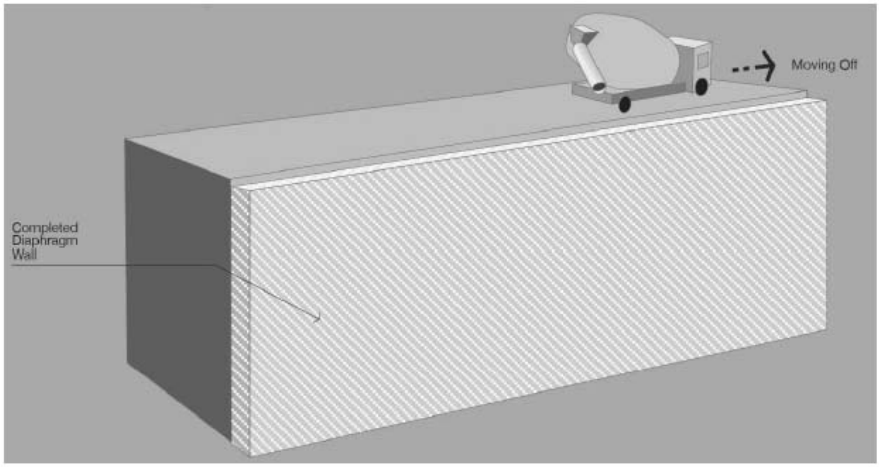
همچنین معایب این روش عبارتند از:

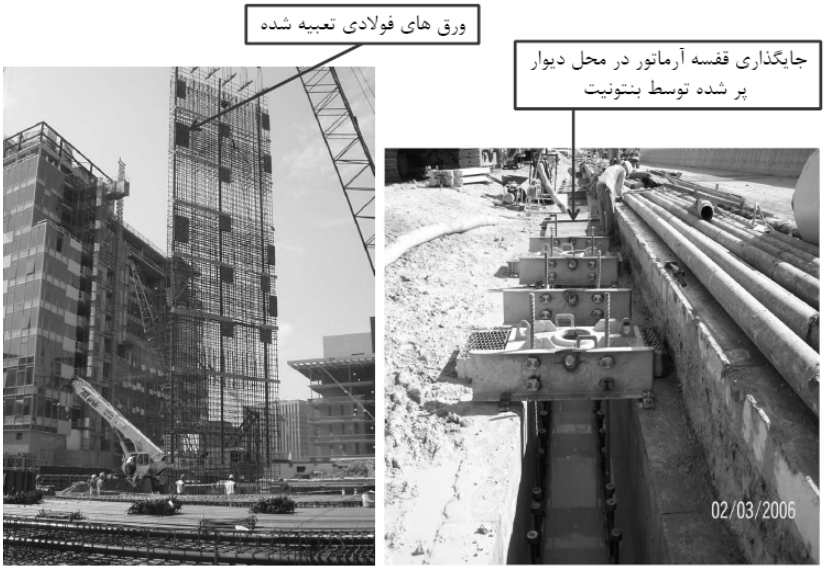
- زیاد شدن هزینه اجرای کار در حجم کم
- نیاز مند به فضای زیاد برای دستگاه حفاری مربوطه
- نیاز به دستگاه های حفاری مخصوص
- نیاز به نیروهای متخصص

شکل‌های زیر گویای مطالب فوق می باشد.




Guide Wall


Moving Off
Completed
Diaphragm
Wall



شکل شماره ۴-۲۷: مراحل اجرای دیوار دیافراگمی

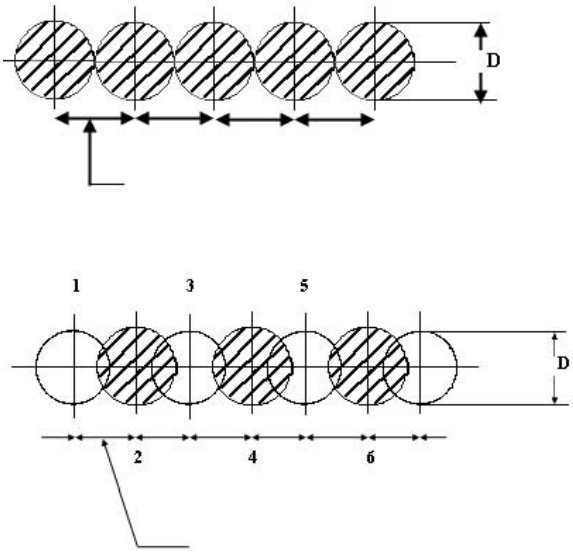
شکل شماره ۴-۲۸: نمونه ای از دستگاه حفاری دیوار دیافراگمی

۴-۱۳-۲. روش دیوارشمعی پیوسته

دیوارهای شمعی بتنی درجا معمولاً بـر روی زمینهـای موجـود و یـا بـر روی یـک خـاکریز مصنوعی ساخته می شوند. این شمع‌ها یا بـه صـورت کنـار هـم و یـا بـه صـورت متقـاطع می‌باشند. استفاده از این‌گونه دیوارها معمولاً در خاک‌های چسبنده و سنگ‌هـای ضـعیف و جاهایی که بارهای قائم سنگین اعمال می‌شود، مناسب‌تر به نظر می رسد. هم‌چنین می‌توان آنها را در خاک‌های دانه‌ای نیـز اجـرا کـرد. شـکل ۴ــ۲۹ ایـن موضـوع را نشـان مـی‌دهـد [1, 12,10].

در دیوارهای شمعی کنار هم، بایستی دقت کرد مصالح از درزهای بین شمع‌ها فرار نکند. در دیوارهای شمعی متقاطع قطر شمع‌ها معمولا بین ۱ تا ۱.۲ متر بوده که فاصله مرکـز تـا مرکز قطر شمع‌ها ۰.۹ برابر قطر شمع می باشد.

بتن ریزی درجا برای دیوارهای شمعی معمولاً به وسیله لوله ترمی انجام می‌گیرد بسـته به نوع خاک، اندود رویه این نوع دیوارها معمولاً نامنظم است در صـورت نیـاز مـی‌تـوان آن قسمت از دیوار را که بالای سطح آب قرار دارد با روکـش بتنـی درجـا پوشـاند یـا مـی‌تـوان سر شمع را تا این سطح پایین آورد.



شکل شماره ۴-۲۹: نحوه چیدمان دیوار شمعی پیوسته

شکل شماره ۴-۳۰: دستگاه حفاری شمع

شکل شماره ۴-۳۱: قفسه های آرماتور مورد نیاز شمع درجا

۴-۱۳-۳. روش مهار متقابل

روش فوق شامل مراحل زیر می باشد.

- حفر چاه های مناسب در فواصل معین در دو طرف گود

- قرار دادن پروفیل های H و I شکل با توجه به محاسبات و نقشه های اجرایی در داخل چاهک ها

- قسمت فوقانی هر دو پروفیل قائم متقابل مزبور را به کمک تیرها یا خر پاهایی به یکدیگر متصل می کنیم (پایداری پروفیل قائم)

- گودبرداری (در حین گودبرداری در صورت نیاز در ارتفاع های دیگر پروفیل قائم نیز سیستم مهار متقابل اجرا می شود)

- در صورت نیاز از الوارهای چوبی برای بین اعضای قائم استفاده می‌شود. شکل زیر موید مراحل فوق می باشد.[2]

شکل شماره ۴-۳۲: روش مهار متقابل

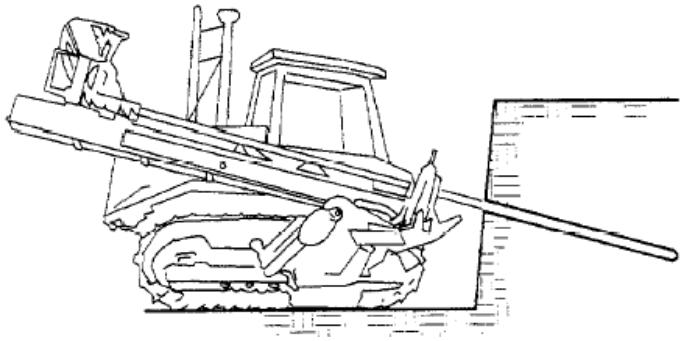
۴-۱۳- ۴. روش میخ کوبی خاک

عملیات خاک‌برداری در هر مرحله با عمق ۱ الی ۲ متر با توجه به توانایی خاک در پایدار ماندن بدون مهار برای مدت زمان ۲۴ تا ۴۸ ساعت صورت می گیرد. پهنای خاک‌برداری باید به حدی باشد که به راحتی بتوان تجهیزات لازم جهت حفاری را نصب نمود. [4, 14,17]

شکل شماره ۴-۳۳: عملیات خاکبرداری با توجه به توانایی خاک در پایدار ماندن بدون مهار

۴-۱۳-۴-۱. حفاری سوراخ ها جهت قرارگیری میخ

سوراخ ها با توجه به طول، قطر، جهت و فواصل معین بر اساس طراحی صورت گرفته ایجاد می‌گردند. حفاری به صورت خشک و با سیستم دورانی ـ ضربه ای با چکش درون گمانه و یا اسفاده از روش مته حلزونی اجرا می‌شود.



شکل شماره ۴-۳۴: سوراخ ها با توجه به طول، قطر، جهت و فواصل معین بر اساس طراحی

شکل شماره ۴-۳۵: سوراخ ها با توجه به طول، قطر، جهت و فواصل معین بر اساس طراحی

۴-۱۳-۴-۲. نصب میخ ها و اجرای دوغاب ریزی

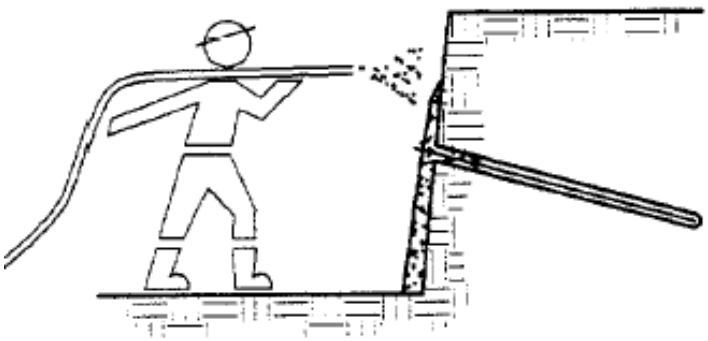
میخ ها در سوراخ های حفر شده جای می گیرند. برای آنکه میخ ها به خوبی توسط دوغـاب احاطه شوند قطعاتی جهت نگهداری فواصل بین میخ ها و دیواره داخلی سوراخ هـا بـر روی میخ ها تعبیه می‌گردد. سپس سوراخ ها توسط ملات و از طریق شلنگ های رفت و برگشت که به میخ ها متصل شده اند پرمی‌گردد. دوغاب ریزی توسط فشار جاذبه و یا با فشار اندکی اجرا می‌گردد. [1, 10]

شکل شماره ۴-۳۶: نصب میخ در سوراخ های حفر شده

شکل شماره ۴-۳۷: نصب میخ ها در سوراخ های حفر شده

۴-۱۳-۴-۳ . اجرای پوسته موقت

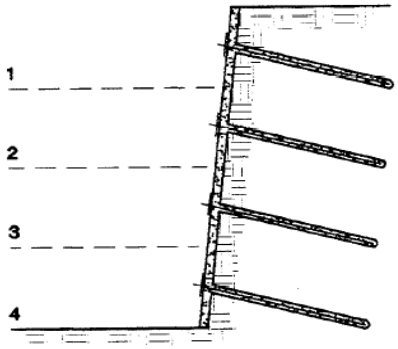
پوسته موقت برای ایجاد تکیه گاه و مهار سطح خاک‌برداری قبل از مراحل بعدی خاک‌برداری اجرا می‌گردد. رایج ترین دیواره موقتی که اجرا می‌گردد شامل یک لایه مسطح کننده سبک به همراه لایه شاتکریت به ضخامت ۱۰۰ میلیمتر می باشد. در مرحله بعد صفحات باربر بر روی میخ های برآمده از سوراخ ها نصب می گردند. مهره شش وجهی و واشرها متعاقباً بر روی صفحه باربر نصب می گردند. [4, 10]



شکل شماره ۴-۳۸: ایجاد پوسته موقت برای ایجاد تکیه گاه و مهار سطح خاک‌برداری قبل از مراحل بعدی خاک‌برداری

۴-۱۳- ۴-۴. احداث تراز بعدی خاک‌برداری

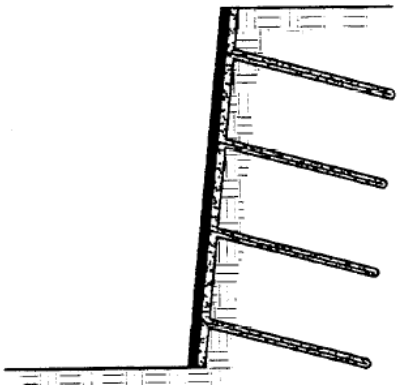
مراحل اول تا چهارم برای پایداری خاکریز تا رسیدن به عمق نهایی مورد نظر ادامه پیدا می‌یابد. جهت حفظ یکپارچه گی دیواره از هم پوشانی بین مسلح کننده های شکریت استفاده می‌شود. [13, 19]



شکل شماره ۴-۳۹: هم پوشانی بین مسلح کننده های شکریت جهت حفظ یکپارچه گی دیواره

۴-۱۳-۴- ۵ . احداث پوسته دائمی و نهایی

پس از آنکه خاک‌برداری به تراز مورد نظر رسید و میخ ها نصب شدند با توجه به نیاز پروژه ممکن است پوسته و نمای نهایی احداث گردد. پوسته نهایی ممکن است شامل بتن در جاید مسلح شاکریت مسلح و یا پانل های بتنی پیش ساخته باشد.



شکل شماره ۴-۴۰: احداث پوسته و نمای نهایی

۴-۱۳-۵. سپرکوبی

مراحل اجرای این روش به صورت زیر می باشد:

- کوبیدن سپرهایی در طرفین گود
- شروع خاک‌برداری
- پس ار رسیدن عمق گود برداری به حد کافی، در کمرکش سپرها و بر روی آنها، تیرهـای پشت بند افقی نصب می کنیم. سپس قیدهای فشاری را در جهت عمود بر صفحهٔ سپرها به پشت بندهای افقی وصل می کنیم.[2, 10]
- سپر، پشت بند و قیدهای فشاری چوبی: عرض کم و خاک‌های غیرسست
- سپر، پشت بند و قیدهای فشاری فلزی: عرض زیاد و خاک‌های سست تر

به طور کلی سپری‌ها به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند:

الف: مهار شده تک دیواره(شامل سازه‌های تک دیواره تقویتی)

ب: گیردار تک دیواره

ج: تک دیواره با سکوهای کاهنده فشار

توزیع فشار زمین و مقاومت این ساز ه ها به نوع و انعطا ف پذیری سازه و همچنین به طبیعت خاک بستگی دارد. این وابستگی در مورد سربارها نیز وجود دارد.

در ساخت سپری‌ها ممکن است از ترکیب‌های سازه‌ای زیر استفاده شود:

- سپری‌ها
- سپری‌های بتنی درجا
-دیوارهای حایل
-دیوار شمع و صفحه

شکل زیر گویای این مطلب می باشد.

شکل شماره ۴-۴۱: نمونه ای از روش سپرکوبی

خلاصه

طور کلی می‌توان تونل ها را بر اساس کاربردی آنها به سه دسته تقسیم کرد. در مسیریابی تونل باید مراحل مطالعاتی از قبیل بررسی عکس های هوایی و نقشه های توپوگرافی منطقه، مطالعه ژئوفیزیکی، حفر گمانه های اکتشافی، بررسی جریان های آب زیر زمینی، حفر گالریهای اکتشافی و انجام آزمونهای آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرند. از روش‌های حفر تونل می توان به روش TBM، رود هدر و آتشباری و... اشاره نمود. ماشین‌های تمام

مقطع حفر تونل به انواع مختلفی از قبیل ماشین حفر تونل از نوع باز، ماشین‌های حفر تونل تک سپره و ماشین حفر تونل با سپر تلسکوپی تقسیم مـی گردنـد. همچنـین از روش‌هـای مختلف حفر ایستگاه‌های زیرزمینی می توان به روش دیوار دیافراگمی، دیوار شمعی و حفـر از زیر و ... اشاره نمود. انتخاب روش‌های حفر فضاهای زیرزمینی به پارامترهـای مختلفـی از قبیل شرایط ژئوتکنیکی محل، دسترسی امکانات و تجهیزات، ملاحظات اقتصادی و اهمیـت پروژه و... بستگی دارد.

آزمون

۱. مراحل مطالعاتی مسیریابی تونل را نام ببرید؟
۲. در خصوص نشست سطح زمین ناشی از حفاری فضاهای زیرزمینی توضیح داده شود؟
۳. روش‌های نگهداری فضاهای حفاری شده در سنگ را نام ببرید؟
۴. مزایای و معایب تونل‌زنی با روش TBM را توضیح دهید؟
۵. مزایای رود هدر را ذکر نمایید؟
۶. روش‌های مختلف پایدارسازی گود را نام ببرید؟
۷. روش‌های حفاری و اجرای تونل‌ها را ذکر نمایید؟

فهرست منابع و مراجع

[۱] اسکندری، محمد- باقری، فرهاد (۱۳۸۷)، *پی و پی سازی*، نشریه بتن، جلد چهلم، تهران.

[۲] اشرفی، حمید رضا (۱۳۸۵)، اصول و مبانی گودبرداری و سازه های نگهبان، وزارت مسکن و شهرسازی، تهران.

[۳] پیش نویس سند ملی راهبردی توسعه فن آوری صنعت تونل ایران (۱۳۸۵)، هفتمین کنفرانس تونل ایران، انجمن تونل ایران، تهران.

[۴] روحانی. حسن و همکاران (۱۳۸۷)، مقدمه ای بر گودبرداری در فضای شهری، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران.

[۵] صالحی بهرام (۱۳۸۶)، فن تونل زنی با TBM، انتشارات صانعی شهمیرزادی، تهران.

[۶] طاحونی شاپور (۱۳۸۸)، اصول مهندسی ژئوتکنیک ، انتشارات امیر کبیر، تهران.

[۷]. مدنی حسین (۱۳۸۸)، تونلسازی، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.

[۸] معماریان حسین(۱۳۸۴)، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران.

[۹] وفائیان. محمود (۱۳۶۶)، بررسی پیشرفت مبانی طرح سابرت و اجرای تونل، مجموعه سخنرانی های سومین سمینار تونل سازی، تهران.

[۱۰] گودبرداری و ایمن سازی (۱۳۸۵)، معاونت شهرسازی و معماری شهرداری تهران، ۱۳۷۵.

[۱۱] گزارش خدمات مهندسی ژئوتکنیک (۱۳۸۸)، پروژه مسیر خط ۶ قطار شهری کرج و حومه ـ مهندسین مشاور ایران خاک، تهران.

[۱۲] مبحث ششم مقررات ملی ساختمان: *بارهای وارد بر ساختمان* (۱۳۸۵)، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، وزارت مسکن و شهرسازی.

[۱۳] مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان: پی و پی‌سازی (۱۳۸۸)، دفتر تدوین وترویج مقررات ملی ساختمان، وزارت مسکن و شهرسازی.

[۱۴] مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان: *طرح و اجرای ساختمان‌هایی با مصالح بنایی* (۱۳۸۴)، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، وزارت مسکن و شهرسازی.

[۱۵] مبحث دوازدهم مقررات ملی ساختمان: ایمنی و حفاظت کار در حین اجرا (۱۳۸۵)، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، وزارت مسکن و شهرسازی.

[۱۶] Craig, R. F. (2004). “Soil mechanics.” Second Edition. Taylor and Francis Group.

[۱۷] Bowles, J. E. (1982). “Foundation analysis and design.” Third Edition, Mc Graw Hill.

[۱۸] Budhu, M. (2007). “Soil mechanics and foundations.” Second Edition, John Wiley and Sons.

[۱۹] Earth Manual. (1998). U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (USBR), Denver, Coloralo.

[۲۰] Kolymbas, D. (2005). “Tunneling and tunnel mechanics.” Springer.

[21] Roy, E. Hunt. (2005) “Geotechnical engineering investigation handbook.” Second Edition, Taylor and Frarcis.

وزارت کشور

سازمان شهرداری‌ها و دهیاری‌های کشور

پژوهشکده مدیریت شهری و روستایی

استانداری خراسان جنوبی

معاونت امور عمرانی

دفتر امور شهری و شوراها

پژوهشکده مدیریت شهری و روستایی
تهران ـ بلوار کشاورز
ابتدای خیابان نادری
پلاک ۱۷
تلفن : ۸۸۹۸۶۳۹۸
نمابر: ۸۸۹۷۷۹۱۸
www.imo.org.ir
ISBN:978-600-5950-82-3
9 786005 950823
قیمت : ۴۰۰۰۰ ریال