

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه و بودجه کشور

راهنمای اجرای تونل‌های انتقال آب

ضابطه شماره ۸۸۷
آخرین ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

وزارت نیرو

دفتر توسعه نظام‌های فنی، بهره‌برداری و

دیسپاچینگ برقآبی

waterstandard.wrm.ir

معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی

امور نظام فنی و اجرایی

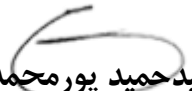
nezamfanni.ir

۱۴۰۴

شماره :	۱۴۰۴/۶۵۳۳۱۴
تاریخ :	۱۴۰۴/۱۲/۰۶
بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	

به استناد ماده (۳۴) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور و تبصره ذیل بند (۳-۱) ماده (۴) «سند نظام فنی‌و اجرایی یکپارچه کشور»، موضوع تصویب‌نامه شماره ۴۰۵۴۴/ت/۶۳۷۱۹ هـ مورخ ۱۴۰۴/۰۳/۰۶ هیئت وزیران؛ ضابطه پیوست با مشخصات زیر ابلاغ و در «سامانه نظام فنی‌و اجرایی کشور» به نشانی Nezamfanni.ir منتشر می‌شود:

عنوان:	راهنمای اجرای تونل‌های انتقال آب
شماره ضابطه:	۸۸۷
نوع ابلاغ:	راهنما (به استناد بند ۲۹ ماده (۱) سند نظام فنی‌و اجرایی یکپارچه کشور)
حوزه شمول:	همه قراردادهای جدیدی که از محل وجوه عمومی و یا به صورت مشارکت عمومی-خصوصی منعقد می‌شوند.
تاریخ اجرا:	۱۴۰۵/۰۴/۰۱ (مهلت بین تاریخ ابلاغ و تاریخ اجرا، به استناد بند ۳-۳ ماده (۴) سند نظام فنی‌و اجرایی یکپارچه کشور و به منظور اتخاذ تمهیدات لازم برای اجرای ضابطه و ملاحظات ارجاع کار می‌باشد)
متولی تهیه، اخذ بازخورد و اصلاح:	دبیرخانه طرح «طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی استاندارد آب» مستقر در وزارت نیرو
مرجع اعلام اصلاحات:	امور نظام فنی‌و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور
مفاد این بخشنامه، برای قراردادهایی که قبل از تاریخ اجرای آن منعقد شده‌اند، در صورت توافق طرفین قرارداد، قابل استفاده است.	


 سیدحمید پورمحمدی

رونوشت:

معاونت حقوقی ریاست جمهوری - سامانه ملی قوانین و مقررات جمهوری اسلامی ایران
 امور حقوقی قوانین و مقررات
 مرکز روابط عمومی، امور بین‌الملل و مدیریت دانش
 دبیرخانه مرکزی سازمان

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی و اجرایی معاونت فنی، امور زیربنایی و تولیدی سازمان برنامه و بودجه کشور، با همکاری دفتر توسعه نظام‌های فنی، بهره‌برداری و دیسپاچینگ برقابی - شرکت مدیریت منابع آب ایران - وزارت نیرو و با استفاده از نظر کارشناسان برجسته در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور مبادرت به تهیه این نشریه کرده و آن را برای استفاده به جامعه‌ی مهندسی کشور عرضه نموده است.

نظر به تخصصی بودن موضوع، مسئولیت مطالب تهیه شده، تفسیر و اصلاح آن با مجموعه مرتبط در وزارت نیرو می‌باشد. طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، دریافت‌کننده نظرات و پیشنهادهای اصلاحی در مورد این ضابطه بوده و اصلاحات لازم را امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور اعلام خواهد کرد.

با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست از این‌رو، از شما خواننده‌ی گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را منعکس فرمایید. کارشناسان مربوط نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه

تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی‌شاه - مرکز تلفن ۳۳۲۷۱ سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی و اجرایی

Email: nezamfanni@mporg.ir

web: nezamfanni.ir

طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور

تهران، خیابان فلسطین شمالی، پایین‌تر از زرتشت، کوچه پرویز روشن، پلاک ۲۷ - شرکت مدیریت منابع آب ایران - دفتر توسعه نظام‌های فنی، بهره‌برداری و دیسپاچینگ برقابی - تلفن: ۰۲۱۴۳۶۸۰۲۶۱ و ۰۲۱۴۳۶۸۰۲۸۹

Email: waterstandard@wrm.ir

web: waterstandard.wrm.ir

پیشگفتار

سازمان برنامه و بودجه کشور به عنوان متولی توسعه پایدار کشور و نظام فنی و اجرایی یکپارچه، به استناد ماده (۳۴) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه و آیین‌نامه و سند اجرایی آن، با کمک دستگاه‌های اجرایی و توان متخصصان دانشگاهی و حرفه‌ای کشور، به تهیه و ابلاغ ضوابط و مقررات و مستندات لازم در این حوزه می‌پردازد. استفاده از ضوابط و معیارها در مراحل پیدایش، پدیدآوری و بهره‌برداری طرح‌های عمرانی به‌لحاظ فنی و اقتصادی، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تدوین این ضوابط و معیارها مستلزم انجام پژوهش‌های علمی و تخصصی به دست نیروی انسانی متخصص و کارآمد و در راستای سیاست‌ها و برنامه‌های بالادستی و اولویت‌دار است.

تونل‌های انتقال آب به عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی کشور نقش مهمی در شبکه آبرسانی، جمع‌آوری و انتقال آب‌های سطحی، فاضلاب‌ها و پساب‌ها ایفا می‌نمایند. اجرای این پروژه‌ها عموماً به دلیل ابعاد قابل توجه و خصوصیات و پیچیدگی‌های اجرایی آن‌ها، حجم سرمایه‌گذاری و زمان اجرای قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد. از سویی نامعینی‌ها و ریسک‌های فراوان اجرایی، اثر زیادی در هزینه و زمان ساخت آن‌ها می‌گذارد که به منظور مدیریت و کاهش آن‌ها لازم است، ضمن دارا بودن سطح بالای فنی و اجرایی در اجرا، بیشترین استفاده از تجربیات و دانش فنی موجود در این زمینه به عمل آید. با توجه به اهمیت مبحث فوق، امور آب و آبفای وزارت نیرو در قالب طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور، تهیه «راهنمای اجرای تونل‌های انتقال آب» را با هماهنگی امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور در دستور کار قرارداد و پس از تهیه، آن را برای تایید و ابلاغ به عوامل ذینفع نظام فنی و اجرایی کشور به این سازمان ارسال نمود.

علی‌رغم تلاش، دقت و وقت زیادی که برای تهیه این مجموعه صرف گردید، در راستای تکمیل و پربارتر شدن این ضابطه، از کارشناسان محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی و پیشنهادی خود را به نشانی رایانامه امور نظام فنی و اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور (Nezamfanni@chmail.ir) ارسال فرمایند. کارشناسان، پیشنهادهای دریافت‌شده را بررسی و در صورت نیاز، با هم‌فکری نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی اقدام کرده و پس از تأیید، از طریق پایگاه اطلاع‌رسانی نظام فنی و اجرایی کشور (Nezamfanni.ir) برای بهره‌برداری عموم اعلام خواهند کرد. به همین منظور و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط ابلاغی معتبر، در بالای صفحات، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده است که در صورت هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن نیز اصلاح خواهد شد. از این‌رو همواره مطالب صفحات دارای تاریخ جدید و معتبر خواهد بود.

حمید امانی همدانی

معاون فنی، زیربنایی و تولیدی

زمستان ۱۴۰۴

و کنترل «راهنمای اجرای تونل‌های انتقال آب»

[ضابطه شماره ۸۸۷]

مجری: دانشگاه شهید بهشتی - پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور

مسئول پروژه: محمد صافی

اعضای گروه تهیه کننده:

بهمن احدی منافی	شرکت فراب	کارشناسی ارشد مکانیک سنگ
سید سعید بهشتی	دانشگاه شهید بهشتی	کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
محمد رضا پورصابر	دانشگاه شهید بهشتی	دکتری سنجش از دور
مجید حلاجی بیدگلی	شرکت جهان ابزار تونل	کارشناسی مهندسی عمران
منوچهر حمیدیان	دانشگاه شهید بهشتی	دکتری سازه‌های هیدرولیکی
مصطفی زمانیان	دانشگاه شهید بهشتی	دکتری ژئوتکنیک
حامد صاحبی	شرکت مشانیر	کارشناسی ارشد مهندسی معدن
سید حسن صحرانورد	شرکت بتن‌پاش	دکتری تکنولوژی بتن
بهزاد حسین زاده	شرکت زیستاب	کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه‌های هیدرولیکی
حسن عباسی	شرکت زیستاب	کارشناسی ارشد زمین‌شناسی
هوشنگ کرکریان	شرکت مشانیر	کارشناسی مهندسی عمران
محمد جواد محمودی	دانشگاه شهید بهشتی	دکتری مهندسی مکانیک
علی نورزاد	دانشگاه شهید بهشتی	دکتری ژئوتکنیک
زنده یاد فرشاد وزین رام	دانشگاه شهید بهشتی	دکتری مدیریت ساخت

اعضای گروه نظارت:

غلامرضا شمسی	انجمن تونل ایران	کارشناسی ارشد مهندسی معدن
بیژن یزدانی	شرکت مهندسین مشاور آرمانشهر	کارشناسی ارشد مهندسی عمران
علی یوسفی	شرکت مهندسین مشاور زمین آب	کارشناسی ارشد مهندسی معدن و زمین‌شناسی

اعضای گروه تایید کننده (کمیته تخصصی سد و تونل طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت آب کشور):

فرهاد ایمان شعار	شرکت مدیریت منابع آب ایران	دکتری مهندسی عمران - آب
علی محمد حسین نژاد	شرکت ساختمانی اویول	کارشناسی ارشد مدیریت پروژه و ساخت
رضا راستی اردکانی	دانشگاه شهید بهشتی	دکتری مهندسی عمران - زلزله
غلامرضا رستمی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	کارشناسی ارشد زمین شناسی
محمدرضا عسکری	شرکت مهندسين مشاور بندآب	دکتری مهندسی عمران
امیر فریدمجتهدی	شرکت توسعه منابع آب و نیروی	کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب
ایران		
نجمه فولادی	شرکت مدیریت منابع آب ایران	کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مهندسی آب
عباس محمدیان	شرکت مهندسين مشاور آبفن	کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه
علی یوسفی	شرکت مهندسين مشاور زمین آب	کارشناسی ارشد مهندسی معدن (زمین شناسی مهندسی)
پی		

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

علیرضا توتونچی	معاون امور نظام فنی و اجرایی
سجاد حیدری حسنکلو	کارشناس امور نظام فنی و اجرایی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱۳	مقدمه
۵	فصل اول - روش‌های حفاری در سنگ‌های سخت
۷	۱-۱- انتخاب روش اجرایی مناسب
۷	۱-۱-۱- معرفی عوامل و پارامترهای مؤثر در انتخاب روش اجرا
۱۱	۱-۱-۲- روش بررسی گزینه‌های روش‌های اجرایی ممکن (متعارف/ مکانیزه/ ترکیبی)
۱۵	۱-۱-۳- فرآیند تصمیم‌گیری و انتخاب روش اجرای برتر
۱۷	۲-۱- روش چالزنی و آتشکاری
۱۷	۱-۲-۱- طراحی و محاسبه شبکه چالزنی (قطر، عمق، زاویه، فاصله چال‌ها و ...)
۱۹	۲-۲-۱- روش‌های چالزنی و خرج‌گذاری (روش‌ها، بازده حفاری، محاسبه تأخیرات و ...)
۲۰	۳-۲-۱- انتخاب مواد ناریه و برآورد مصرف آن (محاسبات خرج ویژه)
۲۱	۴-۲-۱- اندازه‌گیری بازده انفجار و بهینه‌سازی آن (فیزیکی و اقتصادی)
۲۲	۵-۲-۱- ایمنی در عملیات آتشکاری (تجهیزات فردی، اقدامات پیشگیرانه قبل و بعد از انفجار)
۲۵	۶-۲-۱- محاسبه و کنترل ارتعاشات ناشی از انفجار و تعیین حریم ایمنی
۲۶	۷-۲-۱- رواداری‌های مجاز حفاری و روش‌های کنترل آن
۲۷	۸-۲-۱- بررسی چالش‌های تونل‌سازی به روش انفجاری جهت بهبود بازده
۲۸	۳-۱- روش حفاری مکانیزه تمام مقطع
۲۸	۱-۳-۱- انتخاب ماشین مناسب
۳۰	۲-۳-۱- تهیه مشخصات فنی و تجهیزات جانبی پشتیبان دستگاه
۳۳	۳-۳-۱- حمل، نصب، مونتاژ و راه‌اندازی دستگاه
۳۵	۴-۳-۱- تجهیز کارگاه و برآورد منابع لازم حفاری مکانیزه
۳۶	۵-۳-۱- سازماندهی کارگاه (نمودار سازمانی و شیفت‌بندی) و رویه‌های اجرایی
۳۸	۶-۳-۱- هدایت، راهبری و برنامه‌ریزی عملیات تونل‌سازی
۴۰	۷-۳-۱- نقشه‌برداری و کنترل مسیر
۴۱	۸-۳-۱- پیش‌بینی مخاطرات و روش‌های مقابله با شرایط دشوار زمین‌شناسی
۵۰	۹-۳-۱- خدمات مهندسی حین اجرا و بهینه‌سازی عملکرد دستگاه
۵۶	۱۰-۳-۱- رواداری‌های اجرایی مجاز و روش‌های کنترل آن

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۵۹	فصل دوم - روش‌های حفاری در سنگ‌های نرم و رونهشته‌ها
۶۱	۱-۲- انتخاب روش اجرایی مناسب
۶۱	۱-۱-۲- معرفی عوامل و پارامترهای موثر در انتخاب روش اجرا
۶۱	۲-۱-۲- روش‌های اجرایی ممکن در زمین نرم
۶۱	۳-۱-۲- فرآیند تصمیم‌گیری و انتخاب روش اجرای برتر
۶۲	۲-۲- روش کندوپوش
۶۲	۱-۲-۲- شناسایی معارضین و عوارض سطحی
۶۳	۲-۲-۲- انتخاب روش حفاری (گودبرداری)
۶۵	۳-۲-۲- پایدارسازی دیواره
۶۶	۴-۲-۲- اجرای سازه نگهبان
۶۷	۵-۲-۲- اجرای سازه اصلی (روش قالب‌بندی و بتن‌ریزی)
۶۸	۶-۲-۲- چالش‌ها و توصیه‌های اجرایی روش کندوپوش
۶۹	۷-۲-۲- روش آب‌بندی و عایق‌بندی درزهای اجرایی
۶۹	۸-۲-۲- روش کنترل ذرات معلق (جلوگیری از آلاینده‌گی محیط زیست)
۷۰	۹-۲-۲- ابزاربندی و کنترل نشست و کنترل تغییرشکل سازه‌های مجاور و بهسازی برای ایمن‌سازی
۷۰	۱۰-۲-۲- کنترل رواداری‌های مجاز اجرایی و روش کنترل
۷۱	۳-۲- تونل‌سازی با رویکرد جدید اتریشی ان.ای.تی.ام
۷۲	۴-۲- تونل‌سازی به روش‌های حفاری متعارف و مرحله‌ای
۷۲	۱-۴-۲- روش اجرایی حفاری مرحله‌ای تونل
۷۴	۲-۴-۲- انتخاب ماشین‌آلات حفاری و تحکیم متعارف
۷۴	۳-۴-۲- حفاری با ماشین‌های حفر بازویی
۷۵	۴-۴-۲- چالش‌ها و ملاحظات اجرایی تونل‌سازی متعارف
۷۸	۵-۲- روش حفاری مکانیزه تمام مقطع سپری
۷۸	۱-۵-۲- انتخاب ماشین مناسب
۷۹	۲-۵-۲- مشخصات فنی اصلی و تجهیزات جانبی پشتیبان دستگاه برای انجام عملیات پیش‌تحکیمی
۸۰	۳-۵-۲- حمل، نصب، مونتاژ و راه‌اندازی دستگاه
۸۰	۴-۵-۲- تجهیز کارگاه و برآورد منابع لازم (آب، برق، مواد و مصالح)

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۵-۵-۲- سازماندهی کارگاه، رویه‌های اجرایی	۸۱
۶-۵-۲- هدایت و راهبری و برنامه‌ریزی عملیات تونل‌سازی	۸۱
۷-۵-۲- روش‌های کنترل فشار سینه‌کار	۸۱
۸-۵-۲- پیش‌گیری از نشست زمین و سازه‌های سطحی	۸۲
۹-۵-۲- فعالیت‌های تکمیلی برای کنترل نشست و پایدارسازی سقف و سینه‌کار	۸۳
۱۰-۵-۲- ملاحظات کنترل نشت و هجوم آب زیرزمینی	۸۴
۱۱-۵-۲- پیش‌بینی مخاطرات و روش‌های مقابله با شرایط دشوار زمین‌شناسی	۸۶
۱۲-۵-۲- خدمات مهندسی اجرا و بهینه‌سازی عملکرد دستگاه و رواداری‌های اجرایی مجاز	۹۲
فصل سوم - روش‌های نگهداری و تحکیم اولیه	۹۳
۱-۳- استفاده از بتن‌پاشی (شاتکریت) و مش‌بندی	۹۶
۱-۱-۳- کلیات و روش‌های اجرا	۹۶
۲-۱-۳- ملاحظات و توصیه‌ها برای انتخاب طرح اختلاط بهینه	۹۶
۳-۱-۳- نمونه‌گیری و آزمایش‌های حین اجرا برای کنترل کیفیت	۹۸
۴-۱-۳- مراحل تکمیل پوشش و تجربیات بهبود بازده	۱۰۱
۲-۲-۳- قاب‌گذاری یا لتیس‌گذاری	۱۰۶
۱-۲-۳- انتخاب سطح مقطع بهینه	۱۰۷
۲-۲-۳- روش‌های تهیه، حمل و نصب	۱۰۷
۳-۲-۳- روش کنترل کیفیت ساخت و نصب مطابق استاندارد	۱۱۱
۴-۲-۳- مشکلات و چالش‌های متداول اجرای قاب و لتیس در تونل	۱۱۲
۵-۲-۳- توصیه‌های اجرایی و تجربیات بهبود بازده و کیفیت	۱۱۳
۳-۳-۳- میل مهار و پیچ سنگ‌گذاری	۱۱۶
۱-۳-۳- معرفی و انتخاب مهار یا پیچ سنگ مناسب	۱۱۷
۲-۳-۳- روش‌های حفاری و نصب	۱۱۸
۳-۳-۳- آزمایش‌های کشش و کنترل کیفیت	۱۲۰
۴-۳-۳- مشکلات و چالش‌های متداول اجرای پیچ سنگ و میل مهار در تونل	۱۲۲
۵-۳-۳- توصیه‌های اجرایی و تجربیات بهبود بازده و کیفیت	۱۲۳
۴-۳- روش‌های تزریق، انجماد، فورپولینگ و پیش‌تحکیم برای نگهداری و پیش‌گیری از نفوذ آب	۱۲۵

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۲۵	۳-۴-۱- روش های تزریق
۱۳۲	۳-۴-۲- انجماد زمین
۱۳۴	۳-۴-۳- فورپولینگ
۱۳۷	۳-۴-۴- پیش تحکیم
۱۴۱	فصل چهارم - روش های پایش و اندازه گیری
۱۴۴	۴-۱- نصب، قرائت، تحلیل ابزار دقیق و رفتارسنجی تغییرشکل زمین
۱۴۴	۴-۱-۱- روش های اندازه گیری هندسی تغییرشکل زمین
۱۴۴	۴-۱-۲- پایش تغییرشکل
۱۴۸	۴-۱-۳- چالش های اندازه گیری هندسی و پایش تغییرشکل
۱۴۹	۴-۱-۴- ملاحظات و توصیه های اجرایی برای اندازه گیری هندسی و پایش تغییرشکل
۱۵۳	۴-۲- نصب، اندازه گیری، تحلیل و کنترل گازهای نشتی به تونل
۱۵۳	۴-۲-۱- روش ها و دستگاه های اندازه گیری و تشخیص
۱۵۴	۴-۲-۲- چالش ها و ملاحظات اندازه گیری شاخص های محیطی
۱۵۴	۴-۳- اندازه گیری، تحلیل و کنترل نشت آب های ورودی به تونل
۱۵۴	۴-۳-۱- روش ها و وسایل اندازه گیری و پایش آب
۱۵۵	۴-۳-۲- چالش ها و ملاحظات اندازه گیری و پایش آب
۱۵۵	۴-۴- ثبت دبی آب های سطحی، چشمه ها، رودخانه ها، چاه ها و قنات ها و تحلیل و کنترل تغییرات
۱۵۷	۴-۵- اندازه گیری و کنترل احجام و رواداری ها و شاخص های اجرایی
۱۵۷	۴-۵-۱- انواع اندازه گیری و کنترل احجام و رواداری ها و شاخص های اجرایی
۱۵۷	۴-۵-۲- اندازه گیری ها در روش های متعارف
۱۵۹	۴-۵-۳- اندازه گیری در روش های مکانیزه
۱۶۱	فصل پنجم - روش های تجهیز و پشتیبانی
۱۶۳	۵-۱- روش تجهیز کارگاه و راه های دسترسی
۱۶۳	۵-۱-۱- مولفه ها، اجزا و فرآیند تجهیز کارگاه تونل سازی
۱۶۵	۵-۱-۲- چالش ها و توصیه های اجرایی تجهیز کارگاه تونل سازی
۱۶۷	۵-۱-۳- راه های دسترسی
۱۶۸	۵-۲- تهویه حین اجرا

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۶۸	۵-۲-۱- الزامات و ملاحظات کلی تهویه
۱۶۹	۵-۲-۲- روش‌ها و تجهیزات تهویه حین اجرا
۱۷۱	۵-۲-۳- مراحل و ملاحظات نصب و بهره‌برداری از سامانه تهویه حین اجرا
۱۷۱	۵-۲-۴- چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده سامانه تهویه
۱۷۴	۵-۳-۳- روش تامین توان، برق‌رسانی و روشنایی
۱۷۴	۵-۳-۱- برنامه‌ریزی و انتخاب روش
۱۷۵	۵-۳-۲- تهیه، جانمایی و نصب تجهیزات مورد نیاز
۱۷۵	۵-۳-۳- ملاحظات تخمین میزان توان مورد نیاز
۱۷۶	۵-۳-۴- چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده تامین برق در تونل‌سازی
۱۷۷	۵-۴-۴- روش آبرسانی و آبکشی
۱۷۷	۵-۴-۱- برنامه‌ریزی و انتخاب روش
۱۷۸	۵-۴-۲- تهیه و نصب تجهیزات مورد نیاز
۱۷۹	۵-۴-۳- تخمین میزان آب و حجم آبکشی مورد نیاز
۱۸۰	۵-۴-۴- چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده آبرسانی و آبکشی در تونل‌سازی
۱۸۱	۵-۵-۵- روش ترابری و انتقال مواد، مصالح و نفرات
۱۸۱	۵-۵-۱- برنامه‌ریزی حمل و نقل در کارگاه تونل‌سازی
۱۸۲	۵-۵-۲- روش‌ها و ماشین‌آلات ترابری
۱۸۴	۵-۵-۳- چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده ترابری و انتقال مواد و مصالح و نفرات
۱۸۶	۵-۶-۵- روش انتقال داده‌ها و مخابرات
۱۸۷	۵-۷-۷- تهیه و ساخت قطعات بتنی پیش‌ساخته
۱۸۷	۵-۷-۱- کارخانه تولید قطعات بتنی پیش‌ساخته
۱۸۸	۵-۷-۲- برنامه‌ریزی تولید قطعات بتنی پیش‌ساخته
۱۹۰	۵-۷-۳- ملاحظات، چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده ساخت و حمل قطعات بتنی
۱۹۲	۵-۸-۸- انتخاب نیروی انسانی متخصص و سازمان‌دهی
۱۹۲	۵-۸-۱- ملاحظات انتخاب نیروی انسانی
۱۹۳	۵-۸-۲- نمودار سازمانی در تونل‌سازی مکانیزه
۱۹۵	فصل ششم - روش‌های اجرای پوشش نهایی

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۹۸	۶-۱- روش بتن‌ریزی درجا با استفاده از قالب‌های ثابت و لغزان
۱۹۹	۶-۱-۱- آماده‌سازی قالب
۲۰۳	۶-۱-۲- مراحل بتن‌ریزی و نمونه‌گیری
۲۰۵	۶-۱-۳- نکته‌ها و توصیه‌های اجرایی
۲۱۲	۶-۲- روش نصب قطعات پیش‌ساخته بتنی و چدنی
۲۱۲	۶-۲-۱- روش تولید و حمل
۲۲۱	۶-۲-۲- روش کنترل کیفیت
۲۲۲	۶-۲-۳- مراحل نصب و کلیدگذاری
۲۲۵	۶-۳- روش نصب و اجرای پوشش فولادی
۲۲۵	۶-۳-۱- روش‌های ساخت و انتقال
۲۲۶	۶-۳-۲- جوشکاری و کنترل‌های کیفی
۲۲۶	۶-۳-۳- آزمون‌های پذیرش کیفیت
۲۲۹	۶-۴- روش انجام تزریق تماسی و تزریق تحکیمی
۲۳۱	فصل هفتم - روش‌های تامین ایمنی، سلامت و جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی
۲۳۳	۷-۱- کلیات
۲۳۴	۷-۱-۱- خطرات و ریسک‌های حین اجرای تونل
۲۴۰	۷-۲- نقشه راه ایمنی کارکنان در حین اجرای تونل
۲۴۰	۷-۲-۱- دستورهای حفاظت فردی
۲۴۱	۷-۲-۲- شناسایی مخاطرات و آسیب‌های کاری
۲۴۱	۷-۲-۳- تعبیه محدوده‌های امن
۲۴۲	۷-۳- نقشه راه نجات کارکنان در شرایط اضطراری
۲۴۲	۷-۳-۱- تعریف شرایط اضطراری
۲۴۳	۷-۳-۲- تمهیدات و الزامات استاندارد
۲۴۵	۷-۳-۳- علایم و ارتباطات خروج اضطراری
۲۴۵	۷-۴- شناسایی و پیشگیری از آسیب‌های زیست محیطی
۲۴۵	۷-۴-۱- ارزیابی محیط زیست منطقه
۲۴۶	۷-۴-۲- شناخت آسیب‌های احتمالی

فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۲۴۷	۷-۴-۳- تعیین سطوح استاندارد قانونی
۲۴۸	۷-۴-۴- ارزیابی ریسک
۲۴۹	۷-۴-۵- تمهیدات پیش گیرانه و اصلاحی
۲۵۵	منابع و مراجع

فهرست جدول‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۱	جدول ۱-۱- ملاحظات انتخاب دو روش اجرای متعارف و مکانیزه بر اساس معیارها و عوامل موثر در انتخاب روش اجرای تونل
۱۶	جدول ۱-۲- تاثیر غالب متغیرها بر معیارها و اولویت بندی آن‌ها بر اساس تاثیرپذیری
۲۳	جدول ۱-۳- تهدیدات، تمهیدات و اقدامات متقابل برای سلامت فردی در انفجار
۲۵	جدول ۱-۴- معیارهای سرعت برای سازه‌های مختلف براساس (انجمن بین‌المللی تونل - آی.تی.ای)
۲۶	جدول ۱-۵- رواداری‌های مجاز متداول حفاری چال‌ها و انحراف آن‌ها براساس آی.تی.ای
۲۶	جدول ۱-۶- رواداری‌های متداول مقدار مواد منفجره برای خرج انتهایی ۲۰ سانتی متر براساس آی.تی.ای
۳۱	جدول ۱-۷- مشخصات فنی اصلی ماشین تونل سازی مکانیزه
۴۱	جدول ۱-۸- ماتریس کاربرد روش‌های مختلف موقعیت سنجی و شناسایی مسیر
۵۷	جدول ۱-۹- مقادیر پیشنهادی رواداری‌های مجاز تونل سازی مکانیزه
۹۸	جدول ۳-۱- مقادیر متداول طرح اختلاط بتن پاشیده تر و خشک در تونل سازی
۹۹	جدول ۳-۲- آزمایش‌های قبل از اجرای پیشنهادی آیین‌نامه بتن اروپایی
۹۹	جدول ۳-۳- آزمایش‌های حین اجرا پیشنهادی آیین‌نامه بتن اروپایی
۱۰۰	جدول ۳-۴- روش‌های آزمایش‌های ارزیابی مقاومت در سنین اولیه
۱۰۱	جدول ۳-۵- معیارهای زبری سطح
۱۱۸	جدول ۳-۶- نمونه مقایسه‌ای از نسبت هزینه‌های انواع مهار با صفحه واشر ابتدایی
۱۱۸	جدول ۳-۷- قطرهای حفاری پیشنهادی برای مهارهای تزریقی با دوغاب پایه سیمانی (برحسب میلی‌متر)
۱۱۹	جدول ۳-۸- نمونه طرح اختلاط دوغاب تزریق پایه سیمانی
۱۳۳	جدول ۳-۹- مقایسه خصوصیات دو روش نیتروژن مایع و شورآب برای انجماد زمین

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۴- اطلاعات عملکردی مورد نیاز اندازه‌گیری و ثبت در حفاری مکانیزه برای ماشین حفاری	۱۴۶
جدول ۲-۴- اطلاعات هندسی مورد نیاز اندازه‌گیری و ثبت در حفاری مکانیزه برای ماشین حفاری	۱۴۶
جدول ۳-۴- جزئیات اطلاعاتی که در جبهه کار، محدوده سپر و شکاف حلقه سگمنت و دنباله ماشین باید ثبت شود	۱۴۷
جدول ۴-۴- معیارهای پیشنهادی تواتر و فواصل اندازه‌گیری در شرایط مختلف زمین سخت A، نیمه سخت B، نرم C	۱۴۸
جدول ۱-۵- نسبت‌های تقریبی درصد سهم مصرف برق در کارگاه مکانیزه تونل‌سازی	۱۷۶
جدول ۲-۵- نسبت‌های تقریبی درصد سهم مصرف آب در کارگاه مکانیزه تونل‌سازی با جبهه کاری خشک	۱۸۰
جدول ۱-۶- رواداری‌های عمومی ساخت سگمنت بر اساس آئین‌نامه‌های اروپایی و راهنمای شماره ۵۳۳ موسسه بتن آمریکا	۲۱۵
جدول ۱-۷- نمونه جدول ارزیابی سامانه اچ.اس.ای (ایمنی و سلامت) در پروژه تونل‌سازی	۲۳۳
جدول ۲-۷- خطرات دارای ریسک آسیب و جراحت فردی	۲۳۷
جدول ۳-۷- فهرست خطرات ژئوتکنیکی، عواقب، علائم و اقدامات پیشگیرانه	۲۳۸
جدول ۴-۷- مقادیر حدی یا مجاز عوامل شیمیایی	۲۴۲
جدول ۵-۷- مقادیر حدی یا مجاز گازها	۲۴۳
جدول ۶-۷- مقادیر حدی یا مجاز عوامل فیزیکی	۲۴۳
جدول ۷-۷- فهرست و روش‌ها و شاخص‌های ارزیابی ریسک‌های زیست محیطی در اجرای تونل‌های انتقال آب	۲۴۸

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱- درختواره ساختاری راهنمای اجرای تونل‌های انتقال آب	۲
شکل ۱-۱- مقایسه کلی هزینه روش حفاری با انفجار و حفاری مکانیزه	۱۷
شکل ۲-۱- فرآیند حفاری تونل به روش چالزنی و آتشکاری	۱۸
شکل ۳-۱- نمونه بهینه‌سازی مقدار خرج ویژه براساس سرعت پیشروی و هزینه‌های نگهداری و اضافه حفاری	۲۲
شکل ۴-۱- جانمایی عمومی بخش‌های ماشین حفاری	۳۱
شکل ۵-۱- نمونه نمودار سازمانی کلی تونل‌سازی مکانیزه	۳۹
شکل ۶-۱- شکستگی شدید سگمنت‌ها در اثر عملیات پرفشار در تونل نوسود	۴۵
شکل ۷-۱- نمونه منحنی تغییرات پیشرفت کار برحسب زمان	۵۲
شکل ۸-۱- نمونه منحنی تغییرات درصد بهره‌وری ماشین برحسب زمان	۵۲

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۹-۱- نمونه منحنی تغییرات عمر تیغه در طول تونل برحسب واحد حجم حفاری سهم یک تیغه	۵۳
شکل ۱۰-۱- نمونه منحنی تغییرات تعداد تیغه مصرفی برحسب موقعیت	۵۴
شکل ۱۱-۱- نمونه منحنی تغییرات گشتاور محرک ماشین برحسب زمان	۵۴
شکل ۱۲-۱- نمونه منحنی تغییرات مصرف پلیمر برحسب شماره حلقه های قطعات بتنی یا طول	۵۵
در ماشین های حفاری ای پی بی، پارامترهای مهم عبارتند از فشار داخل محفظه، فشار سینه کار و فشار جک ها که می باید به دقت ثبت و تحلیل شوند.	۵۵
شکل ۱-۲- کاربرد انواع روش حفاری مکانیزه و نیمه مکانیزه در انواع زمین نرم و سخت	۶۲
شکل ۲-۲- روش اجرای کندوپوش پایین به بالا	۶۳
شکل ۳-۲- روش تونل سازی کندوپوش بالا به پایین	۶۴
شکل ۴-۲- مراحل اجرایی قالب بندی و میلگرد گذاری و بتن ریزی در روش بالا به پایین با روش عملیات هم زمان با خرپای متحرک	۶۸
شکل ۵-۲- خشک اندازی ترانشه حفاری به روش چاه های زهکشی	۶۹
شکل ۶-۲- انتخاب زمان بندی بهینه اجرای نگهداری و تنظیم سختی نگهدارنده در روش تونل سازی جدید اتریشی	۷۱
شکل ۷-۲- مقطع طولی و نمای پلان حفاری مرحله ای در مقاطع متوسط و بزرگ	۷۳
شکل ۸-۲- محدوده عمومی کاربرد انواع روش های کنترل فشار سینه کار بر اساس شرایط خاک خصوصا در مناطق پر آب	۸۲
شکل ۹-۲- تزریق تحکیمی پیشانی کار با گالری پایلوت در سینه کار	۸۲
شکل ۱۰-۲- فرآیند شناسایی و پیش تزریق آب بندی جهت کنترل سفره های آب زیرزمینی و لایه های آبدار در جبهه حفاری	۸۵
شکل ۱۱-۲- گل گرفتگی تیغه ها و کله حفاری و تسمه نقاله های انتقال مصالح و سامانه تخلیه	۸۷
شکل ۱۲-۲- ریزش هم زمان سقف و سینه کار و روش کنترل آن	۸۸
شکل ۱۳-۲- تصویری از پمپ تزریق فوم دو جزئی و شماتیک از مقطع ریزشی و تزریق فوم در آن	۸۹
شکل ۱۴-۲- اشکال مختلف سقف و سینه کار مختلط	۹۰
شکل ۱۵-۲- حالت های مختلف ساییدگی تیغه دیسکی شامل تخت، تخت متعدد، دندانهای و ترک با شکست ترد در سینه کار مختلط	۹۱
شکل ۱۶-۲- استفاده از تجهیزات شناسایی تغییرات قلوه سنگ ها	۹۲
شکل ۱-۳- معیار زبری سطح بر مبنای نسبت D/L	۱۰۱
شکل ۲-۳- ترک خوردگی سطح بتن پاشیده ناشی از آبرفتگی پلاستیک حین خشک شدن در بتن پاشی ممتد در ضخامت زیاد	۱۰۲

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

شکل ۳-۳- حالت‌های ترک خوردگی شاتکریت شامل الف) خمش طولی ناشی از نشست تونل، ب) خمش عرضی ناشی از فشردگی زمین، ج) ترک برشی در محل ورود به نواحی خردشده و د) ترک برشی و شکست بتن در داخل نواحی گسله

شکل ۳-۴- ترک خوردگی شاتکریت تحت اثر ارتعاشات ناشی از انفجار در سنین اولیه

شکل ۳-۵- مقایسه میزان حجم و کیفیت بتن‌پاشی در حالت استفاده از مش و الیاف

شکل ۳-۶- مقایسه کیفیت عمومی اجرای بتن‌پاشی در تسلیح با میلگرد و الیاف و مشکل سایه‌اندازی

شکل ۳-۷- روش متداول اتصال قطعات قاب با پیچ

شکل ۳-۸- قاب پیش‌ساخته با نصب نیمه ماشینی با مقطع U شکل و اتصال کشویی قابل تنظیم و آزادسازی تغییرشکل زمین

شکل ۳-۹- استفاده از ورق‌های موج‌دار به عنوان سیستم نگهداری تونل

شکل ۳-۱۰- مراحل نصب و تکمیل پوشش نگهدارنده با قاب و بتن‌پاشی

شکل ۳-۱۱- تیپ اجرایی تخلیه فشار آب پشت سامانه نگهداری با لوله‌های زهکش داخل بتن‌پاشیده

شکل ۳-۱۲- ریزش موضعی تونل، تغییرشکل مفرط و آسیب دیدگی سامانه نگهداری و نیاز به تقویت و ترمیم آن

شکل ۳-۱۳- نصب پروفیل درطول تونل برای کمک به سامانه نگهداری قاب در محل مستعد ریزش

شکل ۳-۱۴- نصب کف‌بند قاب برای نواحی مستعد مچاله‌شوندگی و هم‌گرایی زیاد در تونل انتقال آب سبزکوه

شکل ۳-۱۵- زهکشی پیش از حفاری برای کاهش هجوم و تراوش آب حین حفاری و نصب سیستم نگهداری

شکل ۳-۱۶- استفاده از پانل ساندویچی مخصوص بافته شده با فوم میانی به عنوان سامانه نگهداری و قالب درجا

شکل ۳-۱۷- انواع حالت‌های تزریق مهارهای پس‌کشیده و عادی

شکل ۳-۱۸- حالت‌های گسیختگی محتمل مهار در سنگ

شکل ۳-۱۹- هجوم و نشست آب هنگام حفاری برای نصب مهار و پیچ سنگ

شکل ۳-۲۰- گسیختگی گوه مانند و برشی پیچ سنگ

شکل ۳-۲۱- گسیختگی کلی سیستم پیچ سنگ در زون پلاستیک

شکل ۳-۲۲- اثرات خوردگی بر کابل مهار و پیچ سنگ و ادوات آن در تونل

شکل ۳-۲۳- استفاده از میل مهار تزریقی در سنگ‌های درزه‌دار برای تقویت توده سنگ در محدوده مهار

شکل ۳-۲۴- استفاده از مش فولادی یا پلیمری برای جلوگیری از ریزش قطعات و سقوط گوه سنگ همراه با میل مهار یا پیچ سنگ

شکل ۳-۲۵- محدوده موثر بودن انواع روش تزریق برحسب اندازه ریزدانه

۱۲۶

فهرست شکل‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱۲۹	شکل ۳-۲۶- الگوی مورد استفاده تزریق آب‌بندی در دو ناحیه از تونل کوه‌رنگ (۳)
۱۳۱	شکل ۳-۲۷- نمونه الگوی اجرای پرده تزریق آب‌بندی در تقاطع با صفحه گسل و تزریق تحکیمی و تماسی نهایی
۱۳۱	شکل ۳-۲۸- استفاده از تونل کنارگذر برای تثبیت زون گسله یا ناحیه ریزشی یا ایجاد پرده برای کنترل سفره آب زیرزمینی
۱۳۲	شکل ۳-۲۹- روند برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در مورد چگونگی ادامه عملیات تزریق
۱۳۵	شکل ۳-۳۰- میخ کوبی جبهه کار با تسمه یا لوله یا تزریق پرفشار
۱۳۶	شکل ۳-۳۱- فرآیند اجرا و عملکرد فورپولینگ با پیشروی حفاری
۱۳۹	شکل ۳-۳۲- نمایی از موقعیت گالری دسترسی و نحوه اجرای آن در تونل سبزکوه
۱۳۹	شکل ۳-۳۳- نمایی از تونل‌های دسترسی نهایی و نحوه تحکیم آن‌ها به منظور عبور از ناحیه ریزشی تونل سبزکوه
۱۴۵	شکل ۴-۱- روند تغییرات تغییرشکل در طول زمان
۱۴۶	شکل ۴-۲- شاخص شدت تنش (نسبت تنش موجود به ظرفیت تنش) برای ارزیابی سامانه نگهداری با تنش‌سنج
۱۴۷	شکل ۴-۳- فرآیند اندرکنش پیشروی حفاری مکانیزه و رژیم تغییرشکلی تونل و نشست سطحی
۱۵۲	شکل ۴-۴- حالت‌های مختلف تغییرشکل تونل
۱۵۷	شکل ۴-۵- تفاوت هجوم آب به داخل تونل از سفره‌های آب زیرزمینی متمرکز و غیرمتمرکز
۱۵۸	شکل ۴-۶- دستگاه حفاری مجهز به لوازم اندازه‌گیری برای کنترل رواداری و لیزر اسکن برای کنترل رواداری و کیفیت سطح تمام شده هیدرولیکی
۱۶۵	شکل ۵-۱- نمونه جانمایی تجهیز کارگاه و راه‌های دسترسی تونل مکانیزه انتقال آب در پورتال ورودی در پروژه بازی دراز
۱۶۵	شکل ۵-۲- نمونه جانمایی تجهیز کارگاه تونل انتقال آب آزاد شامل دپوی موقت سگمنت و تدارکات اجرایی در ورودی تونل
۱۶۶	شکل ۵-۳- نمونه جانمایی تجهیز کارگاه در ورودی تونل مکانیزه انتقال آب بلند زاگرس و تونل شماره ۴ پروژه گرمسیری
۱۷۰	شکل ۵-۴- انواع تهویه در حفاری متعارف و آشکاری به روش دمیدن و مکش و ترکیبی و موقعیت تمرکز آلاینده‌ها در تونل
۱۷۰	شکل ۵-۵- نمونه جانمایی سامانه ضدغبار در حفاری مکانیزه و نیمه مکانیزه و جزییات عمومی این سامانه
۱۷۲	شکل ۵-۶- روش‌های کمکی مختلف بهبود کیفیت هوا در تونل
۱۷۳	شکل ۵-۷- موانع و پرده‌های موقت برای محبوس نمودن غبار و دود

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۵-۸- مخاطرات و چالش‌های ناشی از انباشت آب در تونل	۱۸۱
شکل ۵-۹- حمل و نقل قطعات دستگاه حفاری و مصالح به کارگاه تونل‌سازی در تونل‌های کرمان، بازی‌دراز و آزاد ۱۸۴	۱۸۴
شکل ۵-۱۰- حمل و نصب قطعات ریل در خارج و داخل تونل در تونل انتقال آب سد آزاد	۱۸۴
شکل ۵-۱۱- نمونه کالیفرنیا سوئیچ ثابت در حالت متقارن در داخل تونل	۱۸۵
شکل ۵-۱۲- اتاق کنترل ماشین حفاری مکانیزه مجهز به سامانه پایش، پردازش، ذخیره و انتقال اطلاعات و کنترل از راه دور ماشین	۱۸۶
شکل ۵-۱۳- ادوات مختلف نصب قطعات بتنی در تونل و چاه	۱۸۸
شکل ۵-۱۴- دیاگرام فرآیند تولید قطعات پیش‌ساخته پوشش تونل	۱۹۰
شکل ۵-۱۵- نمونه نمودار زمانی نیروی انسانی مورد نیاز	۱۹۴
شکل ۶-۱- تنظیم قالب در محل تغییر شیب تونل	۲۰۳
شکل ۶-۲- نمایش شماتیک فرآیند زمانی تزریقات سازه‌ای پوشش تونل	۲۰۹
شکل ۶-۳- معیار کفایت تزریق تماسی یا تحت فشار برحسب فشار و حجم تزریق	۲۱۰
شکل ۶-۴- رواداری‌های ساخت و نصب سگمنت	۲۱۶
شکل ۶-۵- علل مختلف آسیب‌دیدگی قطعات بتنی در فرآیند تونل‌سازی مکانیزه از تولید تا نصب	۲۱۹
شکل ۶-۶- انواع آسیب سگمنت و علل آن	۲۲۱
شکل ۶-۷- مراحل کنترل کیفی و پایش سلامت قطعات بتنی از مرحله تولید تا نصب و بارگذاری	۲۲۲
شکل ۶-۸- فرآیند نصب و جاذدن سگمنت	۲۲۳
شکل ۶-۹- حالت‌های جاذدن قطعه کلید به صورت شعاعی و طولی	۲۲۴
شکل ۶-۱۰- نقشه نصب انواع سگمنت شش ضلعی، مستطیلی با قطعه کلید، دوزنقه‌ای کلید مانند، متوازی‌الاضلاع با قطعه کلید	۲۲۴
شکل ۶-۱۱- روند نمای عمومی کنترل کیفی ساخت و نصب پوشش فولادی تونل آبرسان با چاه	۲۲۸
شکل ۷-۱- وابستگی تراز ریسک به فرآیند تشخیص خطرات و اقدام متقابل در طول زمان	۲۳۹
شکل ۷-۲- نمونه آماری تاثیر عوامل مختلف در تهدید سلامت و ایمنی در تونل‌سازی بر اساس پروژه‌های تونل‌سازی در چین	۲۳۹
شکل ۷-۳- جانمایی اتاق امن و نجات در انتهای ماشین حفاری مکانیزه تونل	۲۴۱
شکل ۷-۴- محفظه ایمنی ثابت با اکسیژن و تجهیزات نجات فردی که در فاصله حداکثر ۵۰۰ متری جبهه کاری قرار می‌گیرد	۲۴۱

مقدمه

تونل‌های انتقال آب به عنوان بخش مهمی از شریان حیاتی آب نقش مهم ارتباط بین منابع و سامانه توزیع آب را ایفا می‌نمایند. این سازه‌ها به دلیل ارزش اقتصادی و راهبردی بالا، نیازمند بهینه بودن هزینه‌های احداث و نگهداری و عمر مفید طولانی و ساخت بسیار با کیفیت می‌باشند. از طرف دیگر وجود نامعینی‌ها و چالش‌های فراوان در طراحی و اجرای این سازه‌ها در انواع زمین، ضرورت پرداختن دقیق به موضوع احداث این سازه‌ها و مدیریت ریسک و کنترل خطرات اجرا و برخورد با مسائل و اتفاقات پیش‌بینی نشده را به طور جدی مطرح می‌کند.

با توجه به ضرورت فوق، تدوین راهنمای اجرای تونل‌های انتقال آب براساس دانش و دستاوردهای اجرایی موجود در کشور و با بهره‌گیری از سوابق و راهنماهای جهانی در دستور کار قرار گرفت تا با هدف جمع‌آوری و به اشتراک گذاشتن تجربیات و بهترین و موفق‌ترین راهکارها، موجبات کاهش مشکلات و چالش‌های مرتبط با اجرای تونل‌های انتقال آب که یک نیاز زیرساختی کشور محسوب می‌شود را فراهم آورده و ضمن افزایش کیفیت، بهبود لازم را نیز در زمان‌بندی و هزینه‌های ساخت فراهم نماید.

لازم به توضیح است با توجه به گستردگی ابعاد و دامنه موضوع مطالعات، اجرا و بهره‌برداری تونل‌های انتقال آب، این راهنما صرفاً بر مرحله اجرا تمرکز دارد. سایر بخش‌های این موضوع، از جمله مطالعات و طراحی، امور قراردادی و حقوقی و همچنین تعمیر و نگهداری در دوره بهره‌برداری خارج از دامنه این راهنما بوده و تدوین آن‌ها در قالب تهیه ضوابط جداگانه و یا تکمیل ضوابط موجود در دستورکار قرار دارد.

بدین منظور این راهنما در هفت فصل به شرح زیر تهیه و تدوین شده است:

فصل اول - روش‌های حفاری در سنگ‌های سخت

فصل دوم - روش‌های حفاری در سنگ‌های نرم و رونهشته‌ها

فصل سوم - روش‌های نگهداری و تحکیم اولیه

فصل چهارم - روش‌های پایش و اندازه‌گیری

فصل پنجم - روش‌های تجهیز و پشتیبانی

فصل ششم - روش‌های اجرای پوشش نهایی

فصل هفتم - روش‌های تامین ایمنی، سلامت و جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی

ضابطه تهیه شده به صورت عملیاتی و براساس تجربیات واقعی اجرایی در تونل‌های کشور تهیه شده و نتیجه جمع‌آوری اطلاعات از کارفرمایان، مشاوران و پیمانکاران متعدد و مصاحبه با کارشناسان مختلف متخصص دست‌اندرکار می‌باشد. در هر فصل راهنما ابتدا توضیحات لازم در مورد روش‌ها و تجهیزات و ماشین‌آلات در حد لازم ارائه شده و سپس ملاحظات اجرا مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه به شرایط خاص اجرایی و چالش‌ها و مشکلات مربوطه پرداخته شده و سپس توصیه‌های لازم براساس تجربیات موفق اجرایی مطرح گردیده است. همچنین، درختواره نحوه

اجرای تونل‌های انتقال آب در شکل ۱ ارایه شده است.



شکل ۱- درختواره ساختاری راهنمای اجرای تونل‌های انتقال آب

- هدف

هدف از تدوین این راهنما ایجاد وحدت رویه در روش‌های اجرای انواع تونل‌های انتقال آب که در شرایط مختلف زمین، حفاری و احداث می‌گردند و به جهت اطمینان بخشی به کاهش خطر یا ریسک غیرقابل پذیرش برای جان افراد، دارایی‌ها و محیط زیست بوده و با توجه به اهداف زیر تهیه شده است:

- معرفی روش‌ها و تجهیزات و ملاحظات کلی اجرای تونل‌های انتقال آب که به صورت یکنواخت و هماهنگ در سراسر کشور مورد استفاده قرارگیرد.
- شناخت خطرات، چالش‌ها و نواقص تهدیدکننده اجرای تونل‌های انتقال آب و ارائه توصیه‌های لازم برای کاهش ریسک‌ها و ارتقای ایمنی اجرا براساس تجربیات حاصل از ده‌ها سال تونل‌سازی در کشور.
- ایجاد بسترهای قانونی و ضوابط اجرایی لازم برای اجرای تونل‌های انتقال آب در کشور و کمک به تدوین راهنماهای کاربردی‌تر در حوزه‌های طراحی، حقوقی، قراردادی، اقتصادی، مالی و همچنین طرح مسائل و مشکلات اجرایی برای پژوهشگران و متخصصان دانش و فناوری به‌منظور مطالعه، بهبود و ارتقای آن‌ها.

- دامنه کاربرد

کاربرد این راهنما برای طرح‌های متعارف اجرای تونل‌های انتقال آب با قطر تمام شده حدود ۳ تا ۶ متر با انواع روش‌های تونل‌سازی اعم از سنتی و مکانیزه با رویکرد همسان‌سازی عملیات اجرایی با یک نگاه جامع و فراگیر و بر اساس فناوری‌های تجربه شده در کشور می‌باشد. ملاحظات ارائه شده در این راهنما اغلب مسائل مربوط به اجرای تونل‌های

انتقال آب را در بر می گیرد. اما، با توجه به وابستگی روش های اجرا به فناوری و توسعه و پیشرفت ماشین آلات و تجهیزات اجرای تونل و نیز در موارد خاص، بهره گیری از سایر راهنماهای معتبر و در تطابق کلی با محتویات راهنمای پیش رو مانعی ندارد. در ارائه روش ها و تجهیزات و ماشین آلات اجرایی فرض شده است که استفاده کننده آشنایی کلی با مباحث تونل سازی دارد و لذا از ارائه تفصیلی مطالب خودداری شده است.

فصل ۱

روش‌های حفاری در سنگ‌های سخت

۱-۱- انتخاب روش اجرایی مناسب

انتخاب روش اجرای تونل مهم‌ترین بخش فرآیند یکپارچه تونل‌سازی است که دربرگیرنده ریسک‌های مختلف و نیز اثرات متقابل با شاخص‌های طراحی و اجرا نظیر هزینه، زمان، مسائل فنی و بهره‌برداری، نگهداری و دوام می‌باشد. روش کلی اجرای پروژه توسط مشاور در مطالعات مرحله توجیهی تهیه و در اسناد قراردادی پیشنهاد می‌گردد و پیمانکار در حین مناقصه، با بررسی شرایط پروژه و تغییراتی که از زمان مطالعات تا تهیه پیشنهاد رخ داده است، روش اجرای بهینه پروژه را تهیه و پیشنهاد داده و پس از تایید و ابلاغ قرارداد، آن را تدقیق نموده و مورد اجرا قرار می‌دهد. روش اجرا ممکن است در کل تونل یکسان نبوده و باتوجه به شرایط زمین، در نواحی مختلف، از ترکیب روش‌های مختلف اجرا، متناسب با شرایط در هر ناحیه استفاده گردد.

۱-۱-۱- معرفی عوامل و پارامترهای مؤثر در انتخاب روش اجرا

شاخص‌ها و عوامل بیشماری همانند هندسه، شرایط زمین، پیش‌نیازها، تجهیز، زمان و هزینه، ایمنی، سلامت و محیط زیست، پوشش و محدودیت‌های قانونی و محیطی در انتخاب روش تونل‌سازی مؤثرند، که در زیر شرح داده شده‌اند.

۱-۱-۱-۱- هندسه تونل

شاخص‌های هندسی که درانتخاب روش اجرا مؤثرند عبارتند از مسیر (پروفیل طولی، قوس‌ها و شیب‌ها)، طول و شکل و ابعاد مقطع تونل. مسیر تونل عمدتاً متأثر از شرایط زمین‌شناسی و موقعیت نواحی سست و آبدار یا گازدار و عدسی‌های گلی (رس و لای) و زاویه و جهت لایه‌بندی و پتانسیل ناپایداری آن است. شیب تونل وابسته به الزامات هیدرولیکی و جبهه کاری اجرایی از نظر حمل و تخلیه مصالح و هدایت آب و تهویه آن و قوس تونل نیز افزون بر اندازه حرکت (مومنوم) هیدرولیکی تابع محدودیت‌های حرکت دستگاه حفاری در روش مکانیزه می‌باشد. گرچه درانتخاب روش اجرا برای طول‌های مختلف محدودیت ذاتی وجود ندارد، ولی معمولاً برای تونل کوتاه از روش متعارف و برای تونل بلند استفاده از روش مکانیزه توجیه‌پذیری بهتری دارد.

در روش حفاری مکانیزه با تی.بی.ام^۱ مقطع تونل دایره‌ای بوده که به خودی خود برای انتقال آب مناسب است. در روش‌های متعارف، شکل هندسی حفاری مقاطع معمولاً غیردایره‌ای و مثلاً نعل اسبی است و در اجرای پوشش، مقطع داخلی دایره‌ای ایجاد شده یا براساس طراحی هیدرولیکی و شرایط و دبی آب عبوری از مقطع غیردایره‌ای استفاده می‌گردد. ابعاد مقطع با توجه به شرایط زمین، به طور عمده بر سامانه نگهداری موقت و پوشش تونل و مراحل حفاری آن تاثیر می‌گذارد.

۱- Tunneling Boring Machine (TBM)

۱-۱-۲- زمین‌شناسی عمومی و توپوگرافی

شرایط زمین، آب زیرزمینی و مشخصات ژئوتکنیکی از عوامل مهم موثر در انتخاب روش اجرای تونل هستند. روش‌های حفاری متعارف برای شرایط مختلف زمین انعطاف‌پذیر هستند و می‌توانند به کار گرفته شوند. در روش حفاری مکانیزه عبور از شرایط خاص زمین می‌تواند با توقف یا تاخیر همراه شود. برای فائق آمدن بر این مساله، تی.بی.ام‌های جدید قابلیت‌های بیش‌تری برای مواجهه با انواع شرایط زمین پیدا کرده‌اند. به عنوان مثال، سامانه متعادل کننده فشار زمین ای.پی.بی^۱، قابلیت افزایش قطر حفاری برای آزادسازی بخشی از تغییر مکان زمین و کاهش فشار می‌توانند در شرایط مچاله‌شوندگی زیاد و خردشدگی زیاد به پیشروی خود ادامه دهند. البته ماشین‌های دارای سپر تلسکوپی به دلیل طول بیش‌تر سپر، برای شرایط فشرددگی زیاد و مچاله‌شوندگی چندان مناسب نمی‌باشند. وجود نامعینی‌های زیاد در شرایط زمین، لزوم استفاده از تحلیل ریسک در برآورد هزینه و زمان اجرا را برای انتخاب روش حفاری تونل و لحاظ موارد متعدد پیش‌بینی نشده ضروری می‌سازد. توپوگرافی مسیر و کاهش و افزایش قابل ملاحظه سربار نیز نقش مهمی در انتخاب تمهیدات اجرایی و ریسک احداث تونل دارد. افزایش سربار می‌تواند منجر به افزایش فشار و ریسک مچاله‌شوندگی و فشار آب زیرزمینی و کاهش سربار نیز می‌تواند منجر به افزایش احتمال ریزش و گسترش تغییر شکل‌ها تا سطح زمین و رخداد نشست گردد.

۱-۱-۳- ملزومات و پیش‌نیازها

ملزومات و پیش‌نیازهای احداث تونل شامل مجوزهای قانونی، هزینه تمهیدات آغاز کار، تامین منابع مالی و تمهیدات حقوقی و قراردادی و تعیین تکلیف مستحقات بالادست و پایین‌دست تونل نظیر آبگیر و سد انحرافی، سد مخزنی و کانال‌ها یا خطوط لوله یا شبکه‌های توزیع و آبیاری و تصفیه‌خانه‌های مورد نیاز است. هر یک از این موارد مترتب هزینه و زمان خاص خود می‌باشد و اندرکنش خاص خود را با تونل دارد. مجوزهای قانونی شامل مجوزهای زیست محیطی، میراث فرهنگی، مجوزهای عبور و مرور و احداث یا تعریض راه‌های دسترسی، مجوزهای اجتماعی و جابجایی سکنی‌ها و تامین امکانات مرتبط و مجوزهای تردد و کار در شب یا روز می‌باشد. هزینه تمهیدات آغاز کار شامل هزینه‌های تملک اراضی، هزینه‌های مشاور طراحی، مطالعات و عملیات اکتشافی و شناسایی و آزمایش‌ها و گردآوری داده‌ها و دیگر هزینه‌های قانونی می‌باشد. انتخاب روش تامین منابع مالی مناسب برای حصول جریان نقدینگی مطمئن، اثر مستقیم بر هزینه و زمان اجرا می‌گذارد که در هر روش اجرا تا حدی متفاوت است. جریان نقدینگی لازم برای فعالیت در چند جبهه و نوبت کاری و با توجه به مشخصات تونل (و شمار احتمالی پیمانکاران) به طور قطع افزایش می‌یابد. تمهیدات حقوقی و نوع و روش قراردادی (قیمت ثابت، فهرست بهایی، قیمت واحد و ...) و فرآیند زمانی مورد نیاز برای انتخاب پیمانکاران و توان مالی و اجرایی آن‌ها باید به دقت و بر اساس روش اجرا و میزان ریسک مترتب آن در نظر گرفته شود.

۱- Earth Pressure Ballance (EPB)

۱-۱-۴- شرایط پشتیبانی و تجهیز

فضا و زمان مورد نیاز برای تجهیز و جمع‌آوری کارگاه از موارد مهم در برنامه‌ریزی اجرای تونل است. در تونل‌های بلند برای حصول زمان قابل قبول اجرا معمولاً حفاری از چند جبهه انجام می‌شود. در این حالت راه‌های دسترسی و تجهیز کارگاه نیز در چند نقطه فراهم می‌گردد. تامین نیازهای پشتیبانی مانند تهویه، آب و برق و مواد و مصالح اجرا و تخلیه نخاله‌های حفاری و زهاب و در نتیجه ظرفیت‌های تولید و حمل و نقل و تامین قالب خصوصاً برای اجرای پوشش تونل و نیازهای برنامه‌ریزی، کنترل و مدیریت مرتبط با آن‌ها به طور مستقیم بر هزینه اجرای تونل تاثیر می‌گذارند. به طور طبیعی نیاز پشتیبانی و تجهیز بسته به روش اجرا تفاوت‌هایی دارند و اثرات متقابل آن‌ها باید در یک فرآیند بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گیرند.

۱-۱-۵- ملاحظات سلامت، ایمنی و زیست‌محیطی

هزینه‌ها و تمهیدات مدیریت سلامت و ایمنی و محیط زیست بسته به روش اجرا متفاوتند. این تمهیدات برای کارکنان شاغل در پروژه و مجاورین آن شامل انسان‌ها، حیوانات و گیاهان باید در نظر گرفته شوند. از لحاظ سلامت و ایمنی و آلودگی محیطی، معمولاً روش‌های مکانیزه مزایای بیش‌تری نسبت به روش‌های متعارف برای کارکنان دارند و افرادی که در روش‌های مکانیزه کار می‌کنند، معمولاً از سطح فنی و مهارت بالاتری برخوردارند. الزامات تهویه نیز در روش‌های اجرای مختلف متفاوتند. در طراحی تهویه، میزان گرد و غبار، گرما و گازهای سمی و مضر تولیدی، میزان هوای لازم برای تنفس ملاک می‌باشد. در بیش‌تر موارد در حفاری مکانیزه، گازهای تولیدی توسط سیستم ترابری که در تونل در حال تردد می‌باشند، تعیین‌کننده هستند. در تونل‌های بلندتر ممکن است به چاه تهویه نیز احتیاج پیدا شود. البته در طراحی سیستم تهویه، علاوه بر طول تونل، قطر تونل و امکان به‌کارگیری داکت با قطر بیش‌تر و همچنین امکان حفر چاه تهویه و تاثیر آن بر وضعیت آب زیرزمینی و تخلیه آب به تونل، عمق چاه تهویه و وجود مشتقات گوگرد و زغال در برخی موارد مواد پرتوزا و ... تاثیرگذار است. اثرات زیست محیطی نظیر آلودگی‌های ناشی از تردد کامیون‌ها و واگن‌ها در حمل مصالح به دپو و تخلیه نخاله‌ها، صداهای منتشر شده از کارگاه، نور منتشر شده اضافی در شب، ارتعاشات ناشی از حفاری و انفجار، پراکنده شدن دود و گرد و غبار و خروج آب گل آلود حجیم یا نظایر آن باید با تمهیدات مناسب مدیریت شوند. محل تخلیه نخاله‌ها و دپوی مصالح مصرفی بهتر است تا حد امکان در نزدیک‌ترین مکان‌های ممکن به کارگاه باشند.

۱-۱-۶- محدودیت‌های اجرایی و قانونی

محدودیت‌های اجرایی شامل مواردی چون امکان تهیه و حمل دستگاه حفاری و ماشین‌آلات اجرایی به ویژه در مناطق صعب‌العبور، فضای تجهیز کارگاه و دپوی مصالح مصرفی و نخاله‌ها، امکان کار در شب، محدودیت‌های فصلی کار شامل برودت زیاد، بارش مفرط، گرما و رطوبت بیش از حد و شرایط غیرمترقبه مانند امکان رویداد سیلاب، ریزش کوه و

بهمن، رانش زمین، زلزله و نظایر آن می‌باشد که باید در انتخاب روش اجرا مدنظر قرار گیرند. محدودیت‌های قانونی معمولاً در قالب الزامات کارفرمایی مطرح می‌شوند و شامل مواردی نظیر محدودیت زیست محیطی، زهکشی آب زیرزمینی و میزان زهاب خروجی (که معمولاً به صورت فصلی متغیر است) و مسائل ایمنی و تردد می‌باشند.

- پوشش تونل

پوشش تونل‌های انتقال آب افزون بر شرایط زمین، تابع محدودیت‌های هیدرولیکی از نظر پروفیل طولی، شرایط و زبری سطحی، وجود فشار داخلی، نیاز به آب‌بندی یا زهکشی و شرایط درزها و امکانات اجرایی می‌باشد. با توجه به این مسائل، پوشش ممکن است در حفاری مکانیزه یا متعارف به صورت تک لایه یا دولایه اجرا شود. هزینه اجرای پوشش و ملحقات آن به طور معمول با هزینه حفاری برابری می‌کند. اجرای پوشش در سامانه‌های دولایه و در روش‌های متعارف حفاری، زمان اجرا را نیز تحت تاثیر قابل ملاحظه‌ای قرار می‌دهد. مشخصات پوشش تونل معمولاً تابع عوامل و پارامترهای دیگر است.

- زمان و هزینه اجرا

زمان اجرا یکی از شاخص‌های بسیار مهم در احداث تونل است. محدودیت زمانی بر تعداد جبهه‌های کاری، تعداد پیمانکاران، جریان نقدینگی لازم، هزینه‌های تجهیز و اجرا، هزینه‌های تعدیل و ادعاها و تاخیرات و هزینه عدم النفع بهره برداری و در نتیجه شاخص‌های اقتصادی و مالی طرح تاثیر مستقیم می‌گذارد. سرعت پیشروی تونل در زمین‌های سنگی با شاخص کیفی خوب با روش حفاری متعارف بین ۵ تا ۱۰ متر و در سنگ‌های سست و خرد شده حدود ۲ تا ۳ متر در روز است. در روش مکانیزه و تی.بی.ام این نرخ تا حدود ۱۵ تا ۲۰ متر در روز هم افزایش می‌یابد. البته در صورت متوقف شدن دستگاه در نواحی سست و خرد شده و پرآب ممکن است تا بیرون کشیدن دستگاه یا تامین دستگاه جدید، چند ماه تاخیر به پروژه تحمیل شود. زمان تجهیز کارگاه در روش‌های متعارف نسبت به مکانیزه چند ماه کمتر است ولی در ادامه و با نرخ پیشروی کمتر، در مجموع زمان کلی اجرا خصوصاً در تونل بلند افزایش می‌یابد.

محدودیت‌های هزینه و تامین مالی و جریان نقدینگی می‌تواند تاثیر مستقیم بر انتخاب روش اجرا بگذارند. در مقایسه کلی روش‌های مختلف اجرا، هزینه‌ها نقش بسیار مهمی دارند. این هزینه‌ها، شامل هزینه اولیه کار، تجهیز و تامین ماشین‌آلات و تجهیزات و مصالح و دستمزد، کاهش و مدیریت ریسک‌ها و شرایط پیش‌بینی نشده، خسارات زیست محیطی، بهره‌برداری و نگهداری و عمر مفید و هزینه‌های غیرمستقیم تطویل زمان اجرا می‌باشند.

۱-۱-۲- روش بررسی گزینه‌های روش‌های اجرایی ممکن (متعارف/ مکانیزه/ ترکیبی)

۱-۲-۱-۱- تعیین معیارهای ارزیابی

به منظور مقایسه دو روش متعارف و مکانیزه، عوامل و پارامترهای موثر در انتخاب روش اجرا با معیارهای موثر هر یک در جدول (۱-۱) ارائه و محدودیت یا مزیت نسبی هر روش بررسی گردیده است. افزون بر موارد این جدول، ممکن است در برخی پروژه‌ها موارد خاص دیگری هم مطرح شود که در فرآیند تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

جدول ۱-۱- ملاحظات انتخاب دو روش اجرای متعارف و مکانیزه بر اساس معیارها و عوامل موثر در انتخاب روش اجرای تونل

عامل اصلی	معیار فرعی	روش متعارف	روش مکانیزه
هندسه تونل	طول	مناسب برای طول‌های کوتاه	مناسب برای طول‌های متوسط و بلند
	شکل	قابل استفاده برای هر شکل مقطع	فقط دایره‌ای
	ابعاد مقطع (قطر)	قابل استفاده برای ابعاد کوچک و بزرگ	محدودیت ابعاد براساس نوع ماشین حفاری
	شیب	قابل استفاده برای هر شیب مثبت یا منفی	محدودیت شیب
	قوس	قابل استفاده برای هر شعاع قوس	محدودیت قوس
شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافی	تغییرات شرایط زمین	بسیار انعطاف‌پذیر	انعطاف‌پذیر در صورت پیش‌بینی
	نواحی سست و خرد شده	قابل انعطاف	احتمال گیرکردن ماشین حفاری در صورت عدم پیش‌بینی
	سفره‌ها و تراز آب زیرزمینی	قابل انعطاف	احتمال گیرکردن ماشین حفاری در صورت عدم پیش‌بینی
	مستندسازی اطلاعات	قابلیت مستندسازی و برداشت	محدودیت مستندسازی و برداشت
	سربرار زیاد	نیاز به تقویت پوشش موقت برای تحمل مچاله‌شوندگی	قابلیت بهتر متعادل کردن مچاله‌شوندگی
پوشش تونل	سربرار کم	احتمال ریزش و ناپایداری بیشتر	احتمال ریزش و ناپایداری کمتر
	شرایط پرتال ورودی و خروجی	احتمال ریزش و ناپایداری بیشتر	احتمال ریزش و ناپایداری کمتر
	کیفیت سطح تمام شده پوشش از نظر هیدرولیکی	شرایط بهتر هیدرولیکی با اجرای پوشش ثانویه بتنی درجا	احتمال کاویتاسیون در سرعت‌های بالای آب در پوشش قطعه‌ای با رواداری زیاد
	فشار آب داخلی	قابل کنترل با پوشش بتن مسلح یا فولادی	نیاز به اجرای پوشش بتنی مسلح ثانویه
	فشار آب خارجی	نیاز به تقویت پوشش در مقاطع غیردایره‌ای	تحمل متعادل نیرو به علت شکل دایره‌ای
ملزومات و پیش نیازها	پوشش اولیه و ثانویه	معمولا نیاز به پوشش دو پوسته‌ای هست	معمولا پوشش تک پوسته‌ای کافی است
	درزها و آب‌بندی	قابلیت اجرای پوشش بدون درز انقباضی	نیاز به درزبندی و آب‌بندی مناسب قطعات
	مجوزهای قانونی	معمولا کم‌تر و محدودتر است.	معمولا کمی بیش‌تر است.
	تمهیدات آغاز کار و مطالعات	به دقت مطالعات حساسیت کم‌تری دارد.	به دقت مطالعات حساس‌تر است.
	تمهیدات حقوقی و قراردادی	پیمانکاران واجد شرایط بیش‌ترند.	پیمانکاران واجد شرایط کم‌ترند.
پشتیبانی و تجهیز	تامین منابع مالی	به تامین منابع مالی حساسیت کم‌تری دارد.	حساسیت بیش‌تر به تامین منابع مالی دارد.
	مستحذات بالا و پایین‌دست	می‌توانند قبل از پایان تونل تکمیل شوند.	بعد از پایان تونل باید تکمیل شوند.
	فضای تجهیز کارگاه	فضای کم‌تری نیاز دارد.	فضای بیش‌تری نیاز دارد.
	امکانات تجهیز کارگاه	امکانات کم‌تری نیاز دارد.	امکانات بیش‌تری نیاز دارد.
	تامین تجهیزات و ماشین‌آلات	تجهیزات و ماشین‌آلات کم‌تری نیاز دارد.	تجهیزات و ماشین‌آلات بیش‌تری نیاز دارد.
نیروی انسانی	نیروی انسانی	نیروی انسانی بیش‌تر ولی عادی‌تری نیاز دارد.	نیروی انسانی کم‌تر ولی ماهرتری نیاز دارد.
	زمان تجهیز و جمع‌آوری	زمان تجهیز و جمع‌آوری کم‌تری نیاز دارد.	زمان تجهیز و جمع‌آوری بیش‌تری نیاز دارد.

ادامه جدول ۱-۱- ملاحظات انتخاب دو روش اجرای متعارف و مکانیزه بر اساس معیارها و عوامل موثر در انتخاب روش اجرای تونل

عامل اصلی	معیار فرعی	روش متعارف	روش مکانیزه
سلامت، ایمنی و محیط زیست	کارکنان	سلامت و ایمنی کارکنان بیش‌تر در خطر است.	سلامت و ایمنی کارکنان کم‌تر در خطر است.
	نیازهای تهویه	در طول‌های بلند و حین انفجار بیش‌تر است.	در جبهه کاری زیاد ولی در کل کم‌تر است.
	ارتعاشات و صداها	ارتعاشات و صوت مقطعی ولی بیش‌تر است.	ارتعاشات و صوت مداوم ولی کم‌تر است.
	نشست‌های سطحی	کنترل آن مشکل‌تر است.	بیش‌تر قابل کنترل است.
	دپوی نخاله	با وجود اضافه حفاری و بولدرها حمل و دپوی آن مشکل‌تر است.	به دلیل یکنواختی و حجم حفاری کم‌تر حمل و دپوی آن راحت‌تر است.
	حمل و نقل مصالح	به دلیل حجم بیش‌تر و در صورت استفاده از کامیون مشکل‌تر است.	به دلیل حجم کم‌تر و استفاده از سیستم مکانیزه ریلی یا خطی راحت‌تر است.
	تخلیه آب	حجم مقطعی آب در جبهه کاری قابل کنترل‌تر ولی تا قبل از اجرای پوشش نهایی بیش‌تر است.	کنترل آب در جبهه کاری، به علت محدودیت عملیات پیش‌تزیق، مشکل‌تر می‌باشد. در صورتی حجم آب در ادامه کاهش می‌یابد که لاینیگ اجرا شده آب‌بند باشد و در فشارهای بالای آب گسکت و تزیق پرکننده پشت سگمنت به تنهایی کافی نبوده و عموماً نیاز به تزیق آب‌بندی می‌باشد.
	آلودگی هوا	به صورت مقطعی در زمان انفجار بیش‌تر است.	به طور یکنواخت‌تر و قابل کنترل‌تر است.
محدودیت‌های اجرایی و قانونی	مناطق صعب العبور	محدودیت کم‌تری دارد.	محدودیت زیادی دارد.
	امکان کار در شب	نیاز به تمهیدات بیش‌تری دارد.	نیاز به تمهیدات کم‌تری دارد.
	محدودیت‌های فصل کاری	حفاری کمی انعطاف‌پذیرتر ولی اجرای پوشش دارای محدودیت است.	حفاری انعطاف‌پذیری کم‌تر ولی اجرای پوشش محدودیت زیادی ندارد.
	محدودیت‌های تردد	به دلیل حجم بیش‌تر حفاری و پوشش حجم تردد بیش‌تر است.	به دلیل حجم کم‌تر حفاری و پیش‌ساخته بودن پوشش حجم تردد کم‌تر است.
	محدودیت زهاب که بستگی به حجم و فشار آب دارد. در مقادیر بالا نیاز به پیش‌تزیق و تزیق آب بندی می‌باشد	تا قبل از اجرای پوشش نهایی کنترل آن مشکل است.	کنترل آن تابع دقت و رواداری اجرای قطعات و کیفیت آب‌بندی درزها و تزیقات است.
	حوادث غیرمترقبه	قابلیت بازیابی بیش‌تر است.	با درگیر شدن ماشین مشکل‌ساز است.
زمان و هزینه اجرا	سرعت تجهیز و جمع‌آوری	سرعت بسیار خوب است.	سرعت پایین است.
	سرعت پیشروی	سرعت پایین یا متوسط است.	سرعت بسیار خوب است.
	سرعت اجرای پوشش	در صورت نیاز به پوشش بتنی، با توجه به ملاحظات هیدرولیکی، سرعت پائین است.	در حالت تک پوسته‌ای سرعت خوب است.
	احتمال توقف و تاخیر	قابل مدیریت بیش‌تری است.	در صورت وقوع بسیار مشکل‌ساز است.
	هزینه‌های تملک اراضی	کمی کم‌تر است.	کمی بیش‌تر است.
	هزینه تجهیز و جریان نقدینگی	هزینه تجهیز کمی کم‌تر و جریان نقدینگی یکنواخت است.	هزینه تجهیز کمی بیش‌تر و جریان نقدینگی دارای پیک در ابتدا است.
	هزینه‌های مصالح	به دلیل حجم بیش‌تر پوشش کمی بیش‌تر است	به دلیل حجم کم‌تر پوشش کمی کم‌تر است.
	هزینه بهره‌برداری و نگهداری	به دلیل پیوستگی پوشش هزینه تعمیرات کم‌تر ولی به دلیل درجا بودن بتن اشکالات بیش‌تر و توابع دقت و کیفیت اجرا است.	به دلیل گسستگی پوشش هزینه تعمیرات بیش‌تر ولی به دلیل پیش‌ساخته بودن اشکالات کم‌تر و تابع کیفیت اجرا است.

ادامه جدول ۱-۱- ملاحظات انتخاب دو روش اجرای متعارف و مکانیزه بر اساس معیارها و عوامل موثر در انتخاب روش اجرای تونل

عامل اصلی	معیار فرعی	روش متعارف	روش مکانیزه
	هزینه حصول عمر مفید	به دلیل درجا بودن بتن مستلزم هزینه بیش‌تری است. البته همواره هزینه تولید و نصب یک متر مکعب قطعات بتنی پیش ساخته، به دلیل نیاز به کارخانه سگمنت و تجهیزات تولید و عمل‌آوری و ملاحظات حمل، از یک متر مکعب بتن درجا بیش‌تر بوده است. ولی در مجموع هزینه اجرای لاینینگ پیش ساخته در مقایسه با دو لایه تحکیم موقت و دائم می‌تواند کمتر باشد.	به دلیل پیش ساخته بودن بتن مستلزم هزینه کم‌تری است.
	دستمزدها	تعداد کارکنان بالاتر و ریسک سلامت و ایمنی و هزینه بیمه بیش‌تر است.	تعداد کارکنان کم‌تر و ریسک سلامت و ایمنی کم‌تر است ولی کارکنان ماهرتر و با دستمزد بالاتری هستند.
	خسارات زیست محیطی	به دلیل ریسک ناپایداری و ریزش در ورودی و سربار کم و حجم حفاری بیش‌تر افزایش می‌یابد	به دلیل فضای بیش‌تر مورد نیاز تجهیز کارگاه افزایش می‌یابد

- متغیرهای مستقل در ارزیابی

برای انتخاب روش اجرای بهینه، درحالت کلی ممکن است تمام مشخصات تونل به عنوان متغیر در نظر گرفته شوند. البته، با شروع مطالعات و مرحله به مرحله و بسته به شرایط پروژه، تعدادی از این متغیرها مشخص و تثبیت می‌شوند. معمولاً، داده‌های اصلی تونل انتقال آب عبارتند از مختصات و تراز نقطه شروع و پایان تونل (با یک رواداری منطقی در مختصات و امتداد)، دبی آب عبوری (در فصول مختلف) و سطح مقطع مورد نیاز و شرایط هیدرولیکی کلی تونل (نظیر حداکثر سرعت و فشار)، کریدور عمومی مسیر تونل با توجه به محدودیت‌های مختلف، نتایج مطالعات اولیه زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و ژئوتکنیک کریدور مسیر. تعدادی از متغیرها نظیر قطر و طول نیز می‌توانند در قالب هزینه یا زمان اثر خود را نشان دهند، اما با توجه به این که در شرایطی، تغییر زیاد قطر و طول منجر به تغییر امکان‌پذیری روش اجرا می‌شود، این متغیرها نیز مستقل در نظر گرفته می‌شوند. در مجموع متغیرهای نسبتاً مستقل تصمیم‌گیری برای وزن‌دهی در انتخاب روش اجرا عبارتند از:

- هندسی شامل طول و قطر (شکل مقطع و شیب طولی و قوس در هزینه و صعوبت کار منعکس می‌شوند)
- شرایط زمین‌شناسی و توپوگرافی (تواتر تغییرات زمین‌شناسی و وسعت و وضعیت نواحی سست و خردشده و شرایط آب زیرزمینی و تراز آب در طول تونل و تعدد و بزرگی سفره‌های آب زیرزمینی و کم شدن سربار در مسیر). به دلیل اهمیت بسیار زیاد، شرایط ژئوتکنیکی و آب زیرزمینی را می‌توان دو متغیر جداگانه فرض نمود.
- ملزومات و پیش نیازها (هزینه و زمان مورد نیاز)
- پشتیبانی و تجهیز (امکان سنجی و هزینه و زمان مرتبط)

- سلامت، ایمنی و محیط زیست (هزینه و تبعات ثانویه)
- محدودیت اجرایی و قانونی (امکان‌پذیری و هزینه)
- پوشش تونل (دو پوسته‌ای یا تک پوسته‌ای بودن و هزینه و زمان مرتبط)
- زمان و هزینه اجرا (شاخص اقتصادی و مالی طرح)

- معیارهای ارزیابی

معیارهای متعددی می‌توانند در ارزیابی و قضاوت درباره روش‌های اجرا مورد استناد قرار گیرند. این معیارها در پروژه‌های مختلف تاثیرات تا حدی متفاوت دارند. بارزترین معیارهای ارزیابی روش اجرای تونل انتقال آب عبارتند از:

- شاخص اقتصادی طرح شامل هزینه کل طرح به ازای هرلیتر آب انتقالی،
- زمان اجرای طرح،
- کیفیت انجام کار و محدودیت‌های مربوطه،
- دوام با هدف حصول حداکثر عمر مفید،
- تبعات ثانویه نظیر زیست محیطی، اجتماعی و میراث فرهنگی،
- ریسک‌های محتمل با این تعریف که ریسک برابر حاصل ضرب احتمال خطر در احتمال آسیب در احتمال ایجاد تبعات ثانویه، تقسیم بر احتمال تاب‌آوری می‌باشد.

در جدول (۱-۲) تاثیر غالب متغیرها بر معیارها ارائه و بر اساس میزان اثرات اولویت‌بندی گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود موثرترین متغیر، شرایط زمین‌شناسی و آب زیرزمینی و پس از آن سلامت، ایمنی و محیط زیست (اچ.اس.ای) قرار می‌گیرد. از نظر معیارها، شاخص اقتصادی در رتبه اول و زمان بعد از آن جای دارد. این جدول برای استخراج و برآورد کمی معیارها تحت تاثیر متغیرهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد (به عنوان مثال، برای برآورد شاخص اقتصادی اثرات هر هشت متغیر باید در نظر گرفته شود).

۱-۲-۲-۱- فرآیند ارزیابی (شامل وزن‌بندی معیارها، امتیازدهی و انتخاب روش ارزیابی)

برای انتخاب روش مناسب اجرا با وجود متغیرهای متعدد موثر، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ام.سی.دی.ام^۱ توصیه می‌شود، که موارد زیر از جمله روش‌های پرکاربرد آن هستند:

- روش تحلیل سلسله مراتبی ای.اچ.پی^۲ که در آن برای تعیین وزن معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌ها از مقایسه زوجی استفاده می‌شود. با تکمیل پرسشنامه توسط افراد خبره و مجرب، یک ماتریس مقایسه زوجی تهیه شده و امتیازدهی انجام می‌پذیرد.

۱- Multi Criteria Decision Making (MCDM)

۲- Analytical Hierarchy Process (AHP)

- روش فرایند تحلیل شبکه ای.ان.پی^۱ که شباهت زیادی به روش ای.اچ.پی دارد. اگر معیارها مستقل از هم باشند و مقایسه زوجی امکان‌پذیر باشد، ای.اچ.پی مدل تصمیم‌گیری مناسبی است، ولی اگر معیارها مستقل نباشند، روش ای.اچ.پی بهتر است.
- روش تی.او.پی.اس.آی.اس^۲ که در آن با استفاده از گزینه‌های موجود، دو گزینه فرضی تعریف می‌شوند. یکی از این گزینه‌ها ایده‌آل مثبت و دیگری ایده‌آل منفی نام دارد. معیار محاسبه نمرات در روش مذکور این است که گزینه‌ها تا حد امکان به گزینه ایده‌آل مثبت نزدیک و از گزینه ایده‌آل منفی دور باشد. بر این اساس، یک نمره برای هر گزینه محاسبه می‌شود و گزینه‌ها مطابق این نمرات رتبه‌بندی می‌شوند.
- گرچه سه روش فوق معمولاً برای انتخاب روش اجرا کفایت می‌نمایند، اما روش‌های متعدد دیگری نیز برای انجام تصمیم‌گیری چند معیاره وجود دارند که حسب نیاز می‌توان از آن‌ها استفاده نمود. الگوریتم و جزییات این روش‌ها در ادبیات فنی، موجود و در دسترس می‌باشد.

۱-۳- فرآیند تصمیم‌گیری و انتخاب روش اجرای برتر

- فرآیند تصمیم‌گیری و انتخاب روش اجرای برتر در قالب مراحل زیر تعریف می‌شود:
- تهیه فهرست داده‌های ثابت پروژه (مختصات شروع و پایان تونل، دبی آب عبوری، کریدور مسیر تونل، نتایج مطالعات اولیه زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و ژئوتکنیک کریدور مسیر و ...).
 - تهیه فهرست روش‌های مختلف امکان‌پذیر اجرا (مکانیزه، متعارف، ترکیبی ...).
 - تهیه فهرست کوتاه متغیرهای مستقل یا تقریباً مستقل پروژه و بازه تغییرات یا گزینه‌های امکان‌پذیر آن‌ها.
 - تهیه فهرست کوتاه معیارهای قضاوت متأثر از متغیرهای اصلی و محدوده پذیرش قابل قبول آن‌ها (شاخص اقتصادی، زمان اجرا، ریسک‌ها، امکان‌پذیری فنی-اجرایی، عمر مفید، تبعات ثانویه و ...).
 - تهیه فهرست نهایی گزینه‌های اجرایی همراه با طرح و برآورد مقدماتی آن‌ها و غربال‌گری اولیه (حذف گزینه‌هایی که معیارهای قضاوت مربوط به آن‌ها در محدوده قابل پذیرش نمی‌گنجد).
 - انتخاب روش تصمیم‌گیری چند معیاره (بیش از یک روش به دلیل نامعینی‌های متعدد در اولویت‌بندی).
 - وزن‌دهی معیارها (و حذف معیارهای کم اهمیت).
 - اولویت‌بندی گزینه‌های اجرایی بر اساس امتیاز کل هر یک و انتخاب گزینه برتر.

۱- Analytical Network Process (ANP)

۲- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

۱-۳-۱-۱- چالش‌ها و توصیه‌های مربوط به انتخاب روش اجرا

چالش‌ها و آسیب‌های این فرآیند که ممکن است آن را از نتایج بهینه فاصله دهد، عبارتند از:

- نواقص زیاد اطلاعات شاخص‌های مورد استفاده در فرآیند تصمیم‌گیری با توجه به جدول (۱-۲)
- عدم استخراج کامل کیفی و کمی منافع رعایت و تبعات عدم رعایت معیارها توسط مشاور یا تیم فنی پیمانکار.

جدول ۱-۲- تاثیر غالب متغیرها بر معیارها و اولویت‌بندی آن‌ها بر اساس تاثیرپذیری

معیار متغیر	شاخص اقتصادی	شاخص زمان	امکان‌پذیری فنی-اجرایی	شاخص ریسک	دوام و عمر مفید	تبعات ثانویه غیرمالی	برآیند
شرایط زمین و آب زیرزمینی							۶
سلامت، ایمنی و محیط زیست							۵
هندسی شامل طول و قطر							۳
پوشش تونل							۳
ملزومات و پیش نیازها							۳
محدودیت‌های اجرایی و قانونی							۳
پشتیبانی و تجهیز							۳
هزینه مستقیم اجرا							۲
برآیند	۸	۷	۵	۴	۳	۲	

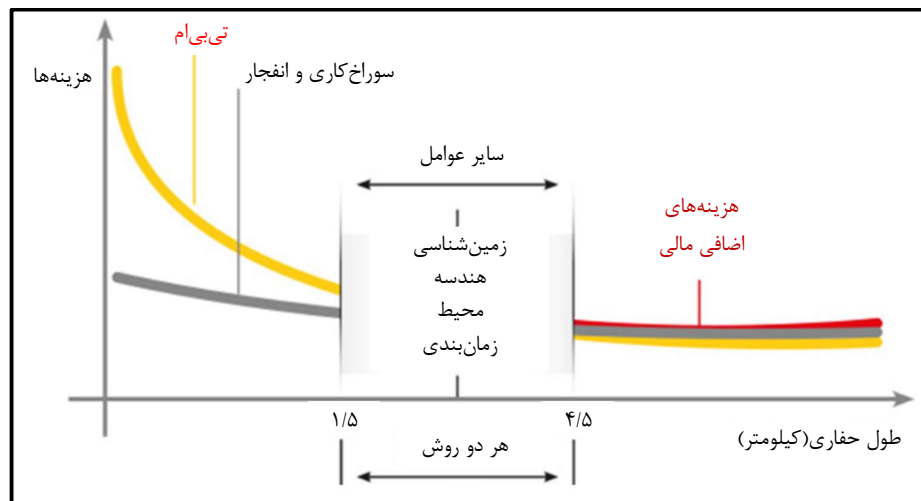
- عدم مشارکت افراد خبره و با تجربه کافی و دیدگاه‌های مختلف در تونل‌سازی در فرآیند اولویت‌بندی.
- تمایل به تصمیم‌گیری هدایت شده و عدم توجه به گزینه‌های مختلف اجرایی.
- برای حصول فرآیند تصمیم‌گیری و انتخاب روش اجرای بهینه، بهتر است توصیه‌های زیر مدنظر قرارگیرد:
 - برای انجام فرآیند تصمیم‌گیری چند معیاره با توجه به تعدد نامعینی‌ها به یک روش اکتفا نشود.
 - با توجه به تفاوت شرایط در پروژه‌های مختلف، در تکمیل پرسشنامه‌ها، اطلاعات پروژه باید به فرد خبره داده شود. هرچه اشراف فرد خبره به پروژه بیش‌تر باشد، نتیجه منطقی‌تری از اولویت‌بندی حاصل می‌شود.
 - میزان سابقه و تجربه افراد خبره در تصمیم‌گیری و اولویت‌بندی بسیار مهم است.
 - معیارهایی که به صورت کمی ارزیابی نمی‌شوند را می‌توان با تقریب و با انجام رتبه‌بندی ارزیابی نمود.
- هر یک از متغیرهای موثر بر معیارهای قضاوت، دارای نامعینی متفاوتی هستند و ترکیب آن‌ها ریسک کلی کار و احتمال انحراف از برآوردها را مشخص می‌نماید. ارزیابی ریسک می‌تواند به صورت کیفی، نیمه تحلیلی و احتمالاتی انجام پذیرد. اعمال اثرات کمی ریسک‌ها بر معیارهای قضاوت در روش‌های نیمه تحلیلی و احتمالاتی امکان‌پذیر می‌باشد.

۲-۱- روش چالزنی و آتشکاری

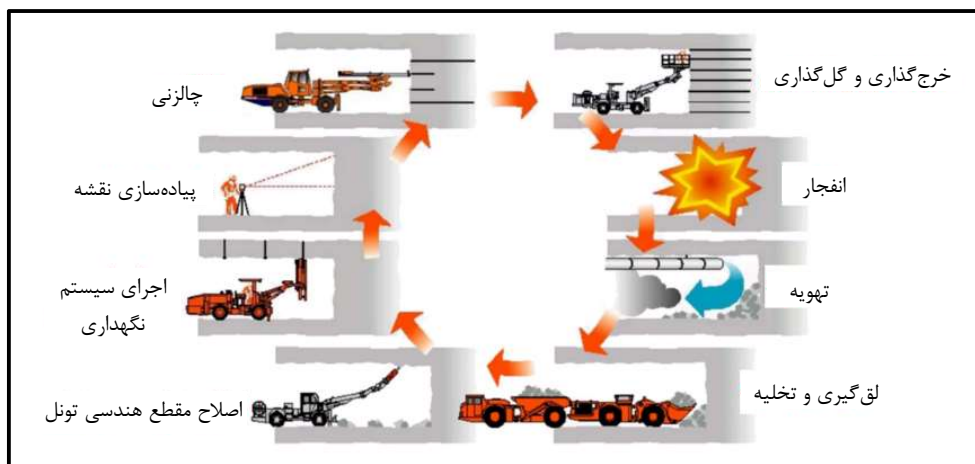
۱-۲-۱- طراحی و محاسبه شبکه چالزنی (قطر، عمق، زاویه، فاصله چال‌ها و ...)

روش چالزنی و آتشکاری یا انفجار از جمله روش‌های متعارف (سنتی) بوده و برای طیف وسیعی از شرایط زمین‌شناسی شامل زمین‌های سخت با مقاومت کم مثل زمین‌های آهکی، لوم، رسی، سنگ گچ و گچی تا زمین‌های سخت‌تر مثل گرانیت، گنیس، بازالت یا کوارتز کاربرد دارد. ویژگی‌های کاربردی مهم این روش عبارتند از:

- برای شرایط زمین‌شناسی چالش برانگیز، بسیار انعطاف‌پذیر است و در صورت نیاز می‌توان عملیات چالزنی و انفجار و نصب نگهدارنده تونل را با پیشروی هر مرحله از ساخت تونل تنظیم نمود.
- برای تونل کوتاه که صرف هزینه برای دستگاه تونل‌سازی مکانیزه اقتصادی نیست، مناسب است (شکل ۱-۱)
- برای زمانی که نیاز به مقطع عرضی غیر دایروی یا متغیر یا بسیار بزرگ برای تونل می‌باشد که اجازه استفاده از دستگاه‌های تونل‌سازی را به دلایل فنی یا اقتصادی نمی‌دهد، مناسب است.
- در روش متعارف در شرایط خاصی می‌توان چالزنی و انفجار را از جبهه‌های مختلف به صورت هم‌زمان انجام داد. در عین حال، فرآیند کاری در هر جبهه حفاری به صورت متوالی انجام می‌شود، ولی در مجموع سرعت کار افزایش پیدا می‌نماید.
- در عملیات چالزنی و آتشکاری در روش متعارف، ترتیب فرآیندهای صورت گرفته به طور کلی در شکل (۲-۱) نشان داده شده است، که از پیاده‌سازی نقشه آغاز می‌شود و به اجرای سامانه نگهداری پایان می‌یابد.



شکل ۱-۱- مقایسه کلی هزینه روش حفاری با انفجار و حفاری مکانیزه^۱



شکل ۱-۲- فرآیند حفاری تونل به روش چالزنی و آتشکاری

۱-۱-۲-۱- الگوی هندسی انفجار

طراحی الگوی هندسی انفجار با توجه به نوع برش سنگ یعنی الگوی قرارگیری چال‌های انفجار با طول و زوایای متفاوت در جبهه تونل انجام می‌پذیرد. برش‌ها انواع مختلفی دارند و مکانیسم‌های شکست متفاوتی را نیز ایجاد می‌نمایند. هرچه سطح آزاد بیش‌تری برای اعمال بار ناشی از انفجار وجود داشته باشد، اثرات ناشی از انفجار هم بیش‌تر می‌شود. معمولاً در تونل فقط یک سطح آزاد وجود دارد که همان جبهه انفجار است. بنابراین در عملیات چالزنی و انفجار برای دستیابی به بیش‌ترین اثر انفجار، هر یک از خرج‌ها باید سطح آزادی برای دیگری ایجاد نماید و از این رو لازم است با یک ترتیب مکانی و زمانی مشخص منفجر شوند. رویکرد اصولی انتخاب الگوی هندسی انفجار به دست آوردن کم‌ترین اضافه حفاری است. حصول این الگو می‌تواند متناسب با پیشرفت کار و انجام اصلاحات و بهینه‌سازی‌های لازم در قالب تعامل پیمانکار و دستگاه نظارت صورت پذیرد.

۱-۱-۲-۲- قطر و عمق چال‌ها

قطر و عمق چال انفجار باید با توجه به نوع ماده منفجره طوری انتخاب شود که فضای کافی برای خرج‌گذاری ایجاد شود و خرج مورد نیاز، چال را به طور کامل پر کند. قطر چال تقریباً از ۳۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر متغیر است که رایج‌ترین میزان آن ۴۰ الی ۵۰ میلی‌متر است. تعداد چال‌های انفجار مورد نیاز به عوامل متعددی از جمله قابلیت انفجار زمین و ابعاد مقطع حفاری بستگی دارد. عمق چال انفجار بستگی به سطح مقطع تونل و میزان مواد منفجره یعنی قطر چال دارد. براساس تجربیات موجود، به ازای یک میلی‌متر افزایش قطر چال، ۳ درصد کاهش در تعداد چال مورد نیاز ایجاد می‌شود.

۱-۱-۲-۳- زاویه و فاصله چال‌ها و ...

در برش موازی چال‌های انفجاری در راستای محور تونل و با زاویه قائم نسبت به جبهه عمل می‌کنند و برای تونل‌های

انتقال آب، که عموماً سطح مقطع کوچکی بین ۱۰ تا ۲۰ مترمربع دارند، به علت محدودیت‌های حفاری چال مناسب‌ترند. در برش زاویه‌دار، چال‌های انفجاری در یک زاویه مشخص نسبت به محور تونل قرار می‌گیرند و برای مقاطع بزرگ‌تر که امکان استقرار ماشین حفاری وجود دارد بهینه‌ترند. کم‌ریسک‌ترین الگوهای انفجار معمولاً روند مارپیچی در مقطع دارند.

۱-۲-۲-۱- روش‌های چالزنی و خرج‌گذاری (روش‌ها، بازده حفاری، محاسبه تأخیرات و ...)

۱-۲-۲-۱-۱ چالزنی

برای حفاری چال انفجار، معمولاً از جامبو دریل چرخ لاستیکی یا چرخ زنجیری که بتواند به جبهه کار رفته و سپس به فاصله ایمن از آن باز گردد، استفاده می‌شود. سرعت چالزنی این دستگاه حدود یک الی پنج متر بر دقیقه است. برای اطمینان از دستیابی به میزان پیشروی مطلوب، چال‌های انفجار معمولاً به اندازه ده درصد (عموماً ۲۰ سانتی‌متر) بیش‌تر از طول مورد نظر حفر می‌شوند، زیرا همواره سنگ به طور کامل در طول چال، منفجر نمی‌شود. در تونل‌های کوچک با سطح مقطع تا ۷ متر مربع، می‌توان از دریل‌های دستی یا چکش سه پایه استفاده نمود.

۱-۲-۲-۱-۲ خرج‌گذاری

خرج‌گذاری به معنی قرار دادن مواد منفجره به صورت کارتریج، امولوسیون یا پودر در چال انفجار است. مواد منفجره امولوسیون در بسته‌بندی‌هایی به ابعاد ۴۰ در ۳۰۰ تا ۹۰ در ۴۰۰ میلی‌لیتری وجود دارد. مواد منفجره پودری را می‌توان با استفاده از فشار هوا وارد چال حفاری نمود. با این حال، استفاده از مواد منفجره پودری در تونل‌سازی رایج نیست. نوع مواد منفجره‌ای که بیش‌تر در تونل‌سازی به دلیل سهولت کاربرد مورد استفاده قرار می‌گیرد، کارتریج است. با توجه به مقدار ماده منفجره مورد نیاز، یک ستون مواد، تعدادی کارتریج به طول تقریبی ۱۲ الی ۷۰ سانتی‌متر را شامل می‌شود. قطر کارتریج به طول آن بستگی دارد و حدود ۲ الی ۱۲ سانتی‌متر است.

۱-۲-۲-۱-۳ گل‌گذاری

گل‌گذاری برای مسدود کردن چال انفجار و حفظ گازهای ناشی از انفجار درون چال و جلوگیری از فرار آن‌ها انجام می‌شود. گل‌گذاری باعث می‌شود، این گازها بدون هیچ‌گونه اتلاف انرژی درون چال انفجار عمل نمایند.

۱-۲-۲-۱-۴ محاسبه تأخیرات

تأخیرات لازم برای انفجار در زمین‌های سخت معمولاً بیش‌تر از زمین‌های نرم و سست است. تأخیرات زمانی انفجار که معمولاً بین ۲۵ تا ۵۰۰ میلی‌ثانیه هستند طوری انتخاب می‌شوند که سنگ‌های منفجر شده از سر راه خارج شده باشند. در انفجار احتراقی معمولاً انفجارهای بعدی با تأخیر نیم ثانیه در نظر گرفته می‌شوند. معمولاً با تأخیر بیش از ۸ میلی‌ثانیه انفجارها دیگر هم‌پوشانی نخواهند داشت. با استفاده از سیستم الکترونیکی انفجار یا نائل می‌توان کنترل تأخیرات انفجار را با دقت بسیار بالا انجام داد. میزان تأخیرات پیشنهادی مواد انفجاری جدید توسط تولیدکنندگان آن‌ها

ارائه می‌گردد.

۱-۲-۳- انتخاب مواد ناریه و برآورد مصرف آن (محاسبات خرج ویژه)

۱-۳-۲-۱- انواع مواد منفجره مورد استفاده در تونل‌سازی

نمونه‌هایی از انواع مختلف مواد منفجره مورد استفاده در تونل‌سازی به قرار زیر معرفی شده‌اند:

- دینامیت- ژلاتین

به عنوان یکی از انواع مواد منفجره دینامیت-ژلاتین، می‌توان از نیترات آمونیوم نام برد. مواد منفجره تجاری از این نوع، حاوی تقریباً ۵۰ درصد آمونیوم نیترات و ۱۸ الی ۴۰ درصد ژلاتین نیتروگلیکول، پیوندهای نیتروتولول و پشم کلودیوم هستند. این مواد، قدرت بالا و ابرگازی با حجم زیاد دارند و ضدآب نیز هستند. همچنین ایمنی بالایی در حمل و نقل دارند. این مواد به صورت کارتریج مورد استفاده قرار می‌گیرند و با توجه به ضدآب بودنشان می‌توان از آن‌ها در چال‌های انفجاری مرطوب نیز استفاده نمود.

- مواد منفجره امولوسیون

به عنوان یک گزینه جایگزین برای مواد منفجره ژلگنیت می‌توان از دوغاب‌های انفجار استفاده نمود. ویژگی مواد منفجره امولوسیونی به طور خلاصه، عبارتند از درصد کم گازهای سمی در دود ناشی از انفجار، پایداری خوب در آب و حمل آسان به دلیل جامد بودن مواد.

- مواد منفجره پودری

مواد منفجره نیترات آمونیوم و آنفو^۱ و ای.ان.سی^۲ مواد منفجره پودری هستند. این ترکیب باعث می‌شود این نوع مواد منفجره در میان سایر انواع، قابلیت حمل، ایمنی در کاربری و اثر تخریبی بیش‌تر که به معنی سرعت انفجار کم‌تر در حدود ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر بر ثانیه و ابرگازی با حجم بالا و تقریباً ۱۰۰۰ لیتر بر کیلوگرم است، داشته باشند. مواد منفجره پودری عموماً ضد آب نیستند و کاربرد این مواد در تونل‌سازی، محدود است.

۱-۲-۳-۱- انواع چاشنی

از الزامات مواد منفجره ایمن، این است که در نقل و انتقال به داخل تونل به راحتی منفجر نشوند. بنابراین، مواد منفجره ایمن نیاز به انفجار آغازین پیدا می‌کنند، که خود حاوی مواد منفجره اولیه بوده که چاشنی نامیده می‌شود و

۱- Ammonium Nitrate Fuel Oil (ANFO)

۲- Ammonium Nitrate Calcium (ANC)

پربارترین آن‌ها در تونل‌های انتقال آب نوع الکتریکی آبی و تاخیری هستند.

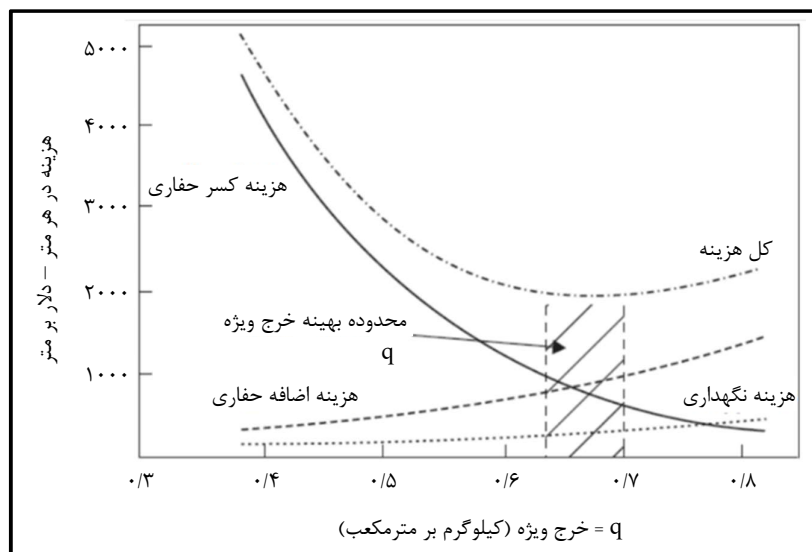
۱-۲-۳- خرج ویژه

مقدار مواد منفجره مورد نیاز به ازای انفجار یک مترمکعب از توده سنگی، خرج ویژه آن نامیده می‌شود و بستگی به پارامترهای محصور بودن توده سنگی، سخت بودن جنس و ساختار توده سنگی، تخلخل توده سنگ و ابعاد مقطع تونل و در نهایت الگوی انفجار دارد. مقدار خرج ویژه بهینه معمولاً در تونل‌های انتقال آب به حداکثر ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب می‌رسد. طول چال ویژه یعنی مقدار طول چال‌های انفجار برای هر مترمکعب حفاری معمولاً حدود ۰/۸ تا ۶ متر می‌باشد.

۱-۲-۴- اندازه‌گیری بازده انفجار و بهینه‌سازی آن (فیزیکی و اقتصادی)

پارامترهای موثر بر بازده انفجار در تونل عبارتند از:

- ویژگی‌های توده سنگی و زمین که قابل تغییر نیستند، مانند جنس و جهت لایه‌بندی،
- هندسه تونل و عوامل اجرایی که تا حدی قابل تنظیم هستند. افزایش سطح مقطع تونل میزان خرج مورد نیاز را کاهش می‌دهد. عمق بیش‌تر تونل شرایط تنش را تحت تاثیر قرار داده و البته در اعماق معمول مثلاً تا ۲۵۰ متر سربار تاثیر چندانی نمی‌گذارد.
- ویژگی‌های طرح انفجار و مواد منفجره که قابل تنظیم هستند. خطاهای حفاری در قطر، امتداد و طول چال‌ها می‌تواند از ۵۰ تا ۷۵ درصد در موثر بودن انفجار تاثیر بگذارد. شرایط ماشین‌آلات اجرایی و مهارت پرسنل و خصوصیات سنگ در این مساله تاثیر مستقیم دارند.
- بازده انفجار نیز بر اساس پارامترهای زیر سنجیده می‌شود:
 - میزان پیشروی طول حفاری شده مقطع کامل تونل به طول چال‌زنی شده مرحله انفجار بر حسب درصد،
 - خرج ویژه،
 - طول حفاری چال ویژه،
 - میزان یا درصد اضافه یا کسر حفاری.
- بهینه‌سازی هزینه انفجار با پارامترهای فوق انجام می‌شود. با افزایش خرج ویژه سرعت پیشروی و تعداد مراحل انفجار کاهش و در مقابل هزینه‌های نگهداری و اضافه حفاری افزایش می‌یابند. شکل (۱-۳) نمونه فرآیند بهینه‌سازی مقدار خرج ویژه بر اساس پارامترهای مزبور را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳- نمونه بهینه‌سازی مقدار خرج ویژه براساس سرعت پیشروی و هزینه‌های نگهداری و اضافه حفاری

طراحی و بهینه‌سازی انفجار با استفاده از نرم افزارهای تجاری نیز قابل انجام است.

۱-۲-۵- ایمنی در عملیات آتشکاری (تجهیزات فردی، اقدامات پیشگیرانه قبل و بعد از انفجار)

۱-۲-۵-۱- ملاحظات ایمنی در عملیات انفجار

اولین و مهم‌ترین نکته در ملاحظات ایمنی در عملیات انفجار رعایت نکات ایمنی در مورد ماده انفجاری از زمان حمل تا نگهداری و استفاده در برابر حرارت، آتش، اصطکاک، فشار، افتادن، ضربه خوردن، خراشیده شدن بسته‌بندی و جابجایی توسط افراد آموزش ندیده و غیرمرتبط است. نکات ایمنی کلی در مورد کارهای انفجاری در قوانین ملی و استانداردهای ایمنی مرتبط هر کشور وجود دارد. اما در این جا ذکر اقدامات پیشگیرانه زیر در این خصوص ضروری به نظر می‌رسد:

- مواد منفجره و چاشنی‌های مختلف باید جداگانه ذخیره و انبار شوند.
- انبارداری و مستندسازی حمل و مصرف مواد باید با دقت انجام گرفته و امنیت انبار مواد ناریه تامین گردد.
- مواد منفجره و چاشنی نباید با یک وسیله نقلیه جابجا شوند. در هنگام کار هم باید از تشک عایق استفاده نموده و مواد را روی زمین قرار نداد.
- تمهیدات ایمنی و اطفای حریق مناسب باید برای مواقع اضطراری در نظر گرفته شود.
- مراحل عملیات انفجار باید متوالی و بدون تداخل باشند. مثلاً نباید حفرچال و خرج‌گذاری هم‌زمان شروع شود.
- مراقبت لازم از جریان سرگردان و القایی و کابل برق در محیط باید به عمل آید. وسایل روشنایی و الکتریکی و فلزی نباید نزدیک چاشنی الکتریکی قرار گیرند. همچنین امواج رادیویی و امواج مخابراتی باید حداقل باشند و در نزدیک محیط عملیات از تلفن همراه استفاده نشود.

پس از انفجار نکات ایمنی زیر باید مورد توجه قرار گیرد:

- اطمینان از انجام تهویه کامل و مناسب و عدم وجود گاز و غبار در محل،
- قطع کلیه سامانه‌های الکتریکی متصل و کنترل دما و اطمینان از منفجر شدن کل مواد و بررسی مواد احتمالی باقیمانده و چاشنی‌های عمل نکرده در چال‌های انفجار و خارج کردن آن‌ها با آب تحت فشار.
- لق‌گیری و ریختن قسمت‌های سنگی سست شده توسط ماشین مناسب،
- تامین نور کافی و استفاده از وسایل ایمنی فردی شامل لباس، کفش، کلاه و دستکش برای پرسنل،
- حفر مجدد چال در ته چال باقیمانده از انفجار قبلی به هیچ عنوان مجاز نبوده و حتی در صورت بازرسی و تخلیه انتهایی چال ممنوع می‌باشد.

تهدیداتی که سلامت پرسنل را در انفجار تهدید می‌کند به همراه تمهیدات لازم در جدول (۱-۳) ارائه شده‌اند.

جدول ۱-۳- تهدیدات، تمهیدات و اقدامات متقابل برای سلامت فردی در انفجار

تهدید	تمهید
گرد و غبار و آلودگی هوا و کمبود اکسیژن	سامانه تهویه مناسب و استفاده از ماسک مناسب
ریزش قطعات سنگ	استفاده از ماشین‌آلات مناسب برای لق‌گیری و تخلیه مصالح منفجر شده و استفاده از کلاه و لباس ایمنی
پرتاب تکه‌های سنگ ناشی از انفجار	دور شدن از منطقه انفجار و سامانه هشدار و زمان‌بندی مناسب انفجار و پیشگیری از انفجار مواد باقیمانده و استفاده از کلاه و لباس ایمنی
آتش‌سوزی و جرقه	اجرا و کنترل مناسب سیستم‌های الکتریکی و چاشنی‌های انفجاری
فشار و موج ناشی از انفجار	دور شدن از منطقه انفجار و سامانه هشدار و زمان‌بندی مناسب انفجار و کنترل و پیشگیری از انفجار مواد منفجره باقیمانده در چال‌ها
ارتعاشات و صوت بیش از حد	دور شدن از منطقه انفجار
اجسام و سنگ‌های تیز و برنده	استفاده از لباس، کفش و دستکش ایمنی مناسب

برای اطلاعات بیش‌تر می‌توان به ضابطه شماره ۴۱۰ سازمان برنامه و بودجه کشور تحت عنوان مقررات فنی مواد منفجره و آتشباری در معادن (۱۳۸۷) و آیین‌نامه ایمنی در معادن ابلاغی وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی (۱۳۹۱) مراجعه نمود.

۱-۲-۵- تهویه

تامین هوای مورد نیاز برای پرسنل و ماشین‌آلات موجود در تونل در زمان انفجار به طوری که سطح اکسیژن به زیر ۲۰ درصد نرسد بسیار مهم است. افزون برگازها و غبار ناشی از انفجار، مونواکسید نیتروژن، مونواکسید کربن و دی‌اکسید کربن در گازهای خروجی از موتورهای بنزینی و دیزلی در فضای تونل تولید می‌شود. مقدار اکسیژن موجود در ابرگازی انفجار بسیار کم‌تر از مقدار اکسیژن لازم برای تنفس است و فقط باعث کاهش غلظت سمی ابرگازی می‌شود. بنابراین وظیفه تهویه، نه تنها تامین هوای کافی برای تنفس پرسنل در حین تونل‌سازی است، بلکه برای از بین بردن گرد و غبار و ابرگازی انفجاری و یا رقیق کردن آن و تنظیم دما و رطوبت مورد نیاز است.

زمان تهویه لازم به کارایی سامانه تهویه، مواد منفجره استفاده شده و مقررات ایمنی بستگی دارد. به عنوان یک قاعده کلی، حداقل ۱۵ دقیقه تهویه مصنوعی قبل از بازگشت مجدد به منطقه انفجار مورد نیاز است. البته، نمی توان زمان تهویه را ملاک بازگشت به محل انفجار قرار داد و ملاک باید کاهش غلظت گازهای سمی به زیر حد مجاز و تامین اکسیژن لازم باشد. انتخاب سامانه تهویه مناسب می‌تواند منجر به کاهش زمان تهویه و در نتیجه کاهش زمان یک سیکل پیشروی شود. روش‌های مختلفی برای ورود هوای تازه به جبهه کار وجود دارد. به عنوان مثال، می‌توان هوای تازه را از طریق مجاری تهویه در امتداد تونل (معمولاً به قطر ۶۰۰ الی ۱۲۰۰ میلی‌متر) که ابتدای آن در نزدیکی ورودی تونل قرار دارد به داخل تونل هدایت نمود. هوای استفاده شده را می‌توان به راحتی در امتداد تونل به بیرون هدایت نمود تا از قسمت ورودی تونل خارج شود. همچنین می‌توان از سیستم تهویه مکش و دهش استفاده نمود، که در آن با استفاده از مجاری تهویه، هوای استفاده شده از جبهه کاری تونل خارج شده و هوای تازه از فاصله حدود ۳۰ متری جبهه کاری تونل به داخل پمپاژ می‌گردد. این روش دهشی در تونل‌های انتقال آب متداول‌تر است. همچنین، این روش در شرایط هوایی سمی یا غبارآلود بسیار کارآمد است. برای تونل‌های طویل، بوستر فن‌های میانی یا در صورت امکان چاه‌های تهویه میانی برای تامین تهویه دائمی در نظر گرفته می‌شوند که طول مجاری تهویه مورد نیاز و ابعاد فن‌های تهویه را هم کاهش می‌دهد. توضیحات بیش‌تر در مورد تهویه در فصل تجهیز و پشتیبانی ارائه گردیده است.

۱-۲-۵-۳- تخلیه مصالح حفاری

تخلیه مصالح حفاری به معنی تمیز کردن جبهه حفاری از مواد حاصل از انفجار و انتقال آن به خارج از تونل می‌باشد. در تونل‌سازی انفجاری، تخلیه با استفاده از وسایل نقلیه چرخ لاستیکی و ریلی امکان‌پذیر است. برخلاف سیستم نقلیه ریلی متعارف، وسایل نقلیه چرخ لاستیکی این مزیت را دارند که می‌توانند در شیب‌های بیش‌تر از ۳ درصد هم مورد استفاده قرار گیرند و علاوه بر این هزینه کلی آن‌ها هم به دلیل عدم نیاز به نصب ریل کم‌تر است. هرچند به دلیل نیاز به مصرف انرژی زیاد به ازای هر تن از مصالح حفاری و به تبع آن تولید دود بیش‌تر از وسایل نقلیه دیزلی، تهویه قوی‌تری مورد نیاز خواهد بود.

انتخاب روش تخلیه مصالح حفاری با استفاده از وسایل نقلیه چرخ لاستیکی یا کامیونی، تسمه نقاله یا ترکیبی از این روش‌ها به ویژگی‌های پروژه بستگی دارد. کارایی پیشروی عمدتاً با مدیریت صحیح حمل و نقل مصالح در تونل ارتباط مستقیم دارد. ظرفیت بارگیری وسایل نقلیه مورد استفاده باید بر اساس مقدار مصالح حفاری تولید شده و ابعاد آن بهینه شوند. توضیحات بیش‌تر در مورد سیستم حمل و نقل در فصل تجهیز و پشتیبانی ارائه شده است.

۱-۲-۶- محاسبه و کنترل ارتعاشات ناشی از انفجار و تعیین حریم ایمنی

۱-۲-۶-۱- محاسبه ارتعاشات ناشی از انفجار

ارتعاش یکی از اثرات مضر انفجار در کنار شوک فشاری و پرتابه است که می‌توانند به سازه‌ها و افراد آسیب برسانند و از این رو باید با روش‌های مناسب محاسبه و کنترل شوند. شدت انفجار در یک فاصله مشخص تابع عوامل فاصله، میزان خرج برتاخیر، هندسه و توپوگرافی سایت و خصوصیات زمین است.

۱-۲-۶-۲- معیارهای حریم ایمنی

حریم ایمنی بر مبنای میزان ارتعاش قابل تحمل یک مولفه تعیین می‌گردد. برای انسان، سرعت حداکثر ذره $(PPV = K \left(\frac{d}{\sqrt{W}} \right)^{-\alpha})$ ۱ میلی‌متر بر ثانیه به بالا کاملاً احساس شده و بیش از ۲۰ آزار دهنده خواهد بود. میزان احساس ارتعاش، تابع فرکانس آن نیز می‌باشد و فرکانس‌های پایین در محدوده ۱۰ تا ۱۵ هرتز معمولاً بیش‌تر از فرکانس‌های بالا توسط انسان ادراک می‌شوند. در پروژه‌ها به طور معمول قوانین ملی یا قراردادی، مقادیر مجاز ارتعاش و ساعات کاری مجاز را خصوصاً نزدیک اماکن اقامتی تعیین می‌نمایند.

در اجرای بتن، سرعت ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه بر بتن با عمر بیش از ۱۰ روز اثرچندانی ندارد، تا عمر ۳ روز، سرعت بیشینه ۵۰ مجاز شمرده شده ولی در مورد بتن تازه در حال گیرش، باید مقدار بیشینه سرعت ۶ میلی‌متر بر ثانیه رعایت شود. برای توده‌های سنگی سرعت کم‌تر از ۵۰۰ معمولاً آسیب خاصی ایجاد نمی‌نماید و سرعت بالای ۹۰۰ به منزله شروع خرابی است. معیارهای سرعت برای سازه‌های مختلف بر اساس آی.تی.ای^۲ در جدول (۱-۴) آورده شده است.

جدول ۱-۴- معیارهای سرعت برای سازه‌های مختلف براساس (انجمن بین‌المللی تونل - آی.تی.ای)

اثر	حداکثر سرعت ذره (میلی‌متر بر ثانیه)
ایجاد ترک‌های جدید در توده سنگی	۶۰۰
سقوط سنگ در تونل‌های بدون پوشش	۳۰۰
ریزش نازک کاری و ترک‌های شدید در ساختمان‌ها	۱۹۰
تعدادی ترک جدید و باز شدن ترک‌های موجود	۱۴۰
حد ایمن برای تونل‌های پوشش‌دار و بتن مسلح	۱۰۰
حد ایمن برای ساختمان‌ها	۵۰
شدیدا احساس می‌شود	۳۰
آزاردهنده برای مردم	۱۰
احتمالاً برخی اعتراض می‌کنند	۵
لرزش‌ها قابل توجه است	۱
به ندرت جلب توجه می‌کند	۰/۱

۱- Peak Particle Velocity (PPV) – d: distance (m), W: charge weight per delay (kg), K & α: site constants

۲- International Tunnelling Association (ITA)

یکی از روش‌های کاهش ارتعاش انفجار، انجام انفجار کنترل شده و آرام است. این روش باعث کاهش اضافه حفاری و دستکاری کم‌تر توده سنگی و افزایش ایمنی حفاری می‌شود. البته با این کار سرعت حفاری و پیشروی تا حدی کاهش می‌یابد. معمولاً در عبور از مجاورت تاسیسات و سازه‌های حساس موجود، استفاده از این روش توصیه می‌گردد.

۷-۲-۱- رواداری‌های مجاز حفاری و روش‌های کنترل آن

رواداری‌های انفجار برای تمام پارامترهای مورد استفاده در عملیات، شامل موقعیت حفاری و قطر و امتداد چال‌ها، مقدار کم یا زیاد مواد منفجره و چاشنی‌ها، تاخیرات زمانی و اضافه و کسر حفاری باید تعریف شوند. رواداری‌های متداول حفاری چال‌ها و انحراف آن‌ها و مقدار مواد منفجره نیز در جدول‌های (۱-۵ و ۱-۶) ارائه شده‌اند.

جدول ۱-۵- رواداری‌های مجاز متداول حفاری چال‌ها و انحراف آن‌ها براساس آی.تی.ای

رواداری چالزنی	انحراف شعاعی
انحراف مجاز محل چال	۷ سانتی‌متر
انحراف مجاز نقطه انتهایی چال	۲۰ سانتی‌متر

جدول ۱-۶- رواداری‌های متداول مقدار مواد منفجره برای خرج انتهایی ۲۰ سانتی‌متر براساس آی.تی.ای

نوع چال	رواداری خرج‌گذاری (کیلوگرم بر متر)	خرج انتهایی (کیلوگرم)
چال داخل کانتور	0.05 ± 0.35	۰/۴
چال کمکی و انتهایی	0.05 ± 0.50	۰/۵
چال ابتدایی	0.10 ± 1.20	-
چال برش	0.10 ± 1.80	-

در الزامات اجرایی حفاری چال توصیه می‌شود که دست کم ۹۵ درصد موارد در محدوده رواداری‌های مجاز قرار گیرند. اگر بیش از ۵ درصد چال‌های انفجاری دارای بیش از حدود ۷ سانتی‌متر انحراف باشند، با مصالح دانه‌ای شکسته پر می‌شوند و چال جدیدی به جای آن حفاری می‌شود. کنترل رواداری‌ها و دقت اجرا با عملیات نقشه‌برداری معمولی برای موقعیت چال و قطر آن و نقشه‌برداری لیزری یا پروب میله‌ای^۱ مجهز به حسگر برای عمق و امتداد آن‌ها انجام می‌شود. دستگاه‌های جدید حفاری به طور خودکار هندسه حفاری را تنظیم و با دقت بالایی آن را پیاده می‌نمایند. کنترل کسر و اضافه حفاری نیز با عملیات نقشه‌برداری خصوصاً برای چال‌های محیطی انجام شده و بر اساس آن اصلاحات لازم در مراحل بعدی صورت می‌پذیرد. معمولاً بعد از هر پاس انفجار و بلافاصله پس از تهویه و ایمن‌سازی و قبل از لقی‌گیری، رد چال‌های محیطی کنترل شده و اصلاحات لازم برای مرحله بعدی اعمال می‌گردد. برای کنترل نرم افزاری حفاری، از راهکار اندازه‌گیری حین حفاری ام.دبلیو.دی^۲ و تحلیل رایانه‌ای آن هم استفاده به عمل می‌آید.

۱- Rod Probe

۲- Measurement While Drilling (MWD)

۸-۲-۱- بررسی چالش‌های تونل‌سازی به روش انفجاری جهت بهبود بازده

در بخش‌های پیشین ملاحظات مختلف اجرایی روش انفجاری ارائه گردید. بر اساس مرور تجربیات موجود، چالش‌ها و مسایل مهم این روش به صورت زیر می‌باشند. توجه به این موارد و رعایت ملاحظات فوق می‌تواند باعث کاهش مشکلات اجرایی و بهینه‌تر شدن روش حفاری متعارف گردد:

- کسر حفاری، که معمولاً به دلیل طراحی و اجرای نامناسب الگوی انفجار و استفاده از مقادیر نامناسب و با کیفیت پایین مواد منفجره و اثرات رطوبت ایجاد می‌شود. این مساله باعث صرف زمان و هزینه زیاد برای اصلاح مقطع شده و در صورت عدم اصلاح آن، در اجرای پوشش نهایی تونل مشکل ایجاد می‌نماید.
- اضافه حفاری، که معمولاً به دلیل عدم بهینه‌سازی خرج ویژه و افزایش آن برای افزایش سرعت پیشروی یا طراحی و اجرای نامناسب الگوی انفجار ایجاد شده و باعث افزایش حجم مصالح حفاری و پوشش بتنی و افزایش هزینه‌های پایدارسازی، تزریق و آب‌بندی می‌گردد. از طرفی معمولاً ترجیح داده می‌شود که هاله خردشده اطراف مقطع انفجاری، کاملاً لق‌گیری و برداشته شود و پوشش تونل و نگهداری با سنگ سالم در تماس باشد که این مساله هم تاحدی باعث اضافه حفاری می‌گردد. در نتیجه، افزایش زیاد حجم بتن پرکننده، باعث افزایش بار وارده بیش از مقدار پیش‌بینی شده به پوشش تونل شده و ممکن است باعث ایراد خسارت به آن شود. علاوه بر توجه به نکات فوق، روش‌های متداول پیش شکافت^۱ و اصلاح^۲ و روش‌های انفجار آرام نیز برای کاهش اضافه حفاری در انفجار به کار می‌روند.
- انفجار در مقاطع با سینه کار مختلط، چالش دیگر حفاری انفجاری است. اگر لایه‌بندی طوری باشد که بخش فوقانی از تحتانی ضعیف‌تر باشد و مثلاً انفجار بر اساس خصوصیات بخش تحتانی طراحی شده باشد، عدم اصلاح الگوی انفجار می‌تواند باعث ریزش یا اضافه حفاری در سقف تونل شود. برعکس، اگر قسمت تحتانی ضعیف‌تر باشد و مثلاً انفجار بر اساس خصوصیات بخش تحتانی طراحی شده باشد، عدم اصلاح الگوی انفجار می‌تواند باعث کسر حفاری در سقف تونل شود. لذا، بهتر است الگوی انفجار برای هر بخش جداگانه طراحی و سپس ترکیب گردد.
- محدودیت ارتعاشات محیطی، که باعث کاهش بازده و سرعت اجرا و افزایش هزینه به دلیل نیاز به انفجار کنترل شده می‌گردد. بهتر است با تنظیم برنامه زمانی انفجار و کنترل خرج بر تأخیر، برای کاهش محدودیت و بهینه‌سازی آن اقدام نمود.
- خطرات جانی، که می‌تواند ناشی از باقی ماندن مواد انفجاری در چال و پرتاب شدن سنگ و ریزش قطعات لق شده باشد. لذا در روش انفجاری، باید از تیم مجرب و تجهیزات مناسب ایمنی استفاده گردد. برای اطلاعات

۱- Pre-Splitting

۲- Trimming

بیش‌تر به آیین‌نامه ایمنی در تونل‌سازی مصوب شورای عالی حفاظت فنی موضوع ماده ۸۶ قانون کار (۱۳۹۹) مراجعه شود.

- تعداد نیروی انسانی زیاد مورد نیاز، در مقایسه با روش‌های مکانیزه و نوع کار سخت و فشرده آن‌ها از چالش‌های مهم روش انفجاری است که نیاز به برنامه‌ریزی متناسب دارد. در این زمینه، افزایش تعداد جبهه‌های کاری برای افزایش سرعت پیشرفت، باید با برنامه زمانی دقیق و بررسی تداخلات کاری انجام شود.
- زمان‌برترین بخش در فرآیند حفاری انفجاری، تخلیه مصالح و لق‌گیری و پاکسازی است و برای سایر بخش‌ها امکان موازی کاری و صرفه جویی در زمان وجود دارد. از نظر هزینه نیز، پرهزینه‌ترین بخش، مواد منفجره و ادوات و انجام آن می‌باشد که بهینه‌سازی لازم باید برای آن در طراحی انفجار انجام پذیرد. شایان ذکر است، برنامه‌ریزی برای افزایش سرعت انفجار نباید منجر به افزایش هزینه سیستم نگهداری تونل شود.

۳-۱- روش حفاری مکانیزه تمام مقطع

۱-۳-۱- انتخاب ماشین مناسب

۱-۱-۳-۱- فرآیند انتخاب ماشین مناسب حفاری

- مراحل متداول انتخاب ماشین حفاری مناسب شامل موارد زیر می‌باشد:
- طبقه‌بندی تونل و زمین برای پیش‌بینی کلی فرآیند تونل‌سازی در مسیر،
 - بررسی گزارش ژئوتکنیک و پروفیل زمین‌شناسی مسیر جهت انتخاب اولیه مشخصات مورد نیاز ماشین،
 - بررسی رفتار زمین، شامل قابلیت حفرپذیری سنگ، پایداری جبهه حفاری و دیواره‌ها، پیش‌بینی نشست سطحی، پیش‌بینی فرسایش قطعات و هجوم مصالح به منظور تعیین الزامات و ملاحظات اولیه جبهه حفاری،
 - بررسی خواص رفتار مصالح حفاری حین انتقال نظیر روانی، چسبندگی و فرسایش برای تعیین الزامات تخلیه،
 - بررسی بازیافت مصالح حفاری نظیر تراکم‌پذیری، پخش شدن و سرند شدن جهت تدقیق مشخصات ماشین،
 - تعریف فرآیند نهایی اجرا،
 - طبقه‌بندی فرآیند اجرایی بر اساس تیپ مقاطع برای مستندسازی اجرا و ثبت مشخصات زمین.

۲-۱-۳-۱- انواع ماشین تونل‌سازی مکانیزه

دستگاه‌های تونل‌سازی مکانیزه برای زمین سخت و نرم را می‌توان به چهار دسته زیر تقسیم کرد. ماشین‌های مربوط به زمین‌های نرم در فصل دوم مورد بحث بیش‌تری قرار می‌گیرند:

- دستگاه‌های حفاری تونل با جبهه باز^۱

این دستگاه‌ها برای حفاری مقاطع دایروی در زمین‌های سخت با زمان خودایستایی بالا که نیاز به پایدارسازی جبهه کاری درحین اجرا ندارند، به کار می‌روند و دارای انواع زیر هستند:

- دستگاه حفار کفشک‌دار^۲
- دستگاه حفار بزرگ‌کننده مقطع (ای.تی.بی.ام)^۳ یا ریمر^۴
- دستگاه حفار تک سپره (اس.اس.ام)^۵
- دستگاه حفار با سپر دویل (دی.اس.ام)^۶

- دستگاه حفاری سپردار با جبهه بسته^۷

دستگاه حفاری سپردار در دو مدل حفاری تمام مقطع و حفاری جزئی برای زمین سخت و زمین سست و نرم در مدل‌های مختلفی استفاده می‌گردد. دستگاه‌های تمام مقطع دارای انواع زیرند:

- دستگاه حفاری سپردار با هوای فشرده^۸ در حفاری‌های زیر سطح آب زیرزمینی که امکان هجوم آب در هر حال وجود دارد، از روش هوای فشرده برای مقابله با آن استفاده می‌شود.
- دستگاه حفاری سپردار با سیال تحت فشار^۹ در شرایطی که امکان ریزش جبهه کاری خصوصاً مصالح ریزدانه پیش‌بینی شود، از سیال تحت فشار نظیر بنتونیت برای تامین پایداری جبهه کاری درحین حفاری استفاده می‌گردد.
- دستگاه حفاری با فشار تعادلی زمین^{۱۰} در جبهه‌های حفاری ریزشی می‌توان از محفظه فشار در پشت کله حفاری با کمک فشار پیشران حرکتی برای تنظیم پایداری جبهه استفاده نمود. انواع خاص این ماشین، حفاری را در جبهه کاری به صورت استوانه‌ای، غیراستوانه‌ای، بیضوی، دو سوراخه و نظایر آن پیش می‌برند. در صورتی که امکان اختلاط مصالح حفاری جهت سخت نمودن آن برای ایجاد فشار تعادلی بهتر وجود داشته باشد، معمولاً از ماسه ۰۶، بنتونیت، پلیمرها و فوم نیز می‌توان بهره جست.

۱- Open Face TBM

۲- Gripper

۳- Extension TBM (ETBM)

۴- Reamer

۵- Single Shield Machine (SSM)

۶- Double Shield Machine (DSM)

۷- Closed Face Shield Machine

۸- Compressed Air Shield Machine (CASM)

۹- Slurry/Hydro Shield

۱۰- Earth Pressure Ballance Shield (EPBS)

- دستگاه حفاری با نگهداری مکانیکی^۱ در جبهه حفاری با سنگ سست یا درزه‌دار می‌توان از سیستم نگهداری مکانیکی برای پایدارسازی جبهه کاری درحین حفاری استفاده نمود.
- ماشین حفاری جزئی هم در مدل‌های مختلفی استفاده می‌گردد. از این موارد می‌توان به مدل بدون نگهداری جبهه کاری، نگهدارنده مکانیکی موضعی جبهه کاری، جبهه کاری با نگهدارنده هوای فشرده و یا دوغاب تحت فشار نام برد.

- دستگاه حفاری سپردار قابل تبدیل (کی.اس.ام)^۲

بسیاری از تونل‌ها در مسیر حفاری شرایط متنوعی از زمین را تجربه می‌کنند که می‌تواند طیفی از زمین سخت تا نرم را در بر بگیرد. در این حالت دستگاه حفاری باید قادر به تطبیق با این شرایط باشد و برای این منظور معمولاً از ماشین سپردار با قابلیت عملیات هوای فشرده و یا دوغاب تحت فشار استفاده می‌شود. بعضی ماشین‌ها، بالقوه دارای این قابلیت‌ها می‌باشند و بعضی امکان اضافه نمودن این قابلیت‌ها را درحین اجرا دارا هستند.

- انواع خاص ماشین حفاری

- انواع خاص ماشین حفاری هستند که حسب نیاز ساخته و استفاده می‌شوند که نمونه‌هایی از آن عبارتند از:
- ماشین حفاری با سپر تیغه‌ای، که در آن سپر ماشین از قطعات مجزا و مستقل تشکیل شده که می‌توانند به طور مستقل حرکت کنند و حالت‌های حفاری نیم مقطع یا حفاری جزئی را هم اجرا نمایند.
 - ماشین حفاری مقطع متغیر، که دارای تیغه‌های چرخنده غیرهم مرکز بوده و می‌تواند مقاطع با قطر مختلف را حفاری نماید.
 - ماشین حفاری با سپر مفصلی، که در آن سپر در طول در قطعاتی تعبیه شده و در شرایطی که نیاز به افزایش سرعت ماشین باشد از طول سپر کاسته می‌شود.

۱-۳-۲- تهیه مشخصات فنی و تجهیزات جانبی پشتیبان دستگاه

۱-۳-۲-۱- اجزای ماشین حفاری و تجهیزات جانبی پشتیبان

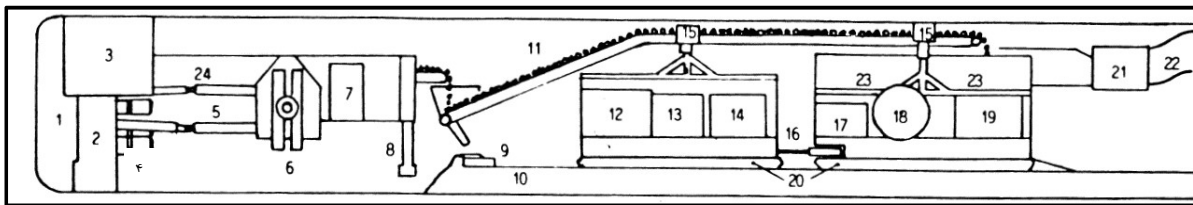
جانمایی بخش‌های ماشین حفاری در انواع مختلف آن تا حدی متفاوتند، اما در دستگاه‌های متداول و پرکاربرد می‌توان آن‌ها را به صورت تیپ مطابق شکل (۱-۴) نشان داد:

۱- کله حفاری	۹- صفحه ترازکننده	۱۷- ژنراتور
۲- تکیه‌گاه‌های جانبی	۱۰- مخزن ضایعات	۱۸- قرقره کابل

۱- Mechanical Support

۲- Convertible Shield Machine (KSM)

- | | | |
|-----------------|---------------------|-----------------|
| ۳- تکیه‌گاه سقف | ۱۱- تسمه نقاله | ۱۹- کمپرسور هوا |
| ۴- موتور محرک | ۱۲- اتاقک غذاخوری | ۲۰- سورتمه |
| ۵- کشنده تغذیه | ۱۳- اتاقک بالابر | ۲۱- جعبه تهویه |
| ۶- کفشک | ۱۴- ترانسفورمر | ۲۲- کانال تهویه |
| ۷- اتاقک هدایت | ۱۵- تکیه‌گاه فوقانی | ۲۳- سیلوی ذخیره |
| ۸- تکیه‌گاه عقب | ۱۶- کشنده | ۲۴- تیرک اصلی |



شکل ۱-۴- جانمایی عمومی بخش‌های ماشین حفاری

۱-۳-۲- مشخصات فنی دستگاه و تجهیزات جانبی پشتیبان

جزئیات مشخصات فنی دستگاه حفاری بر اساس سازنده آن متفاوت است. مشخصات مهم برای انتخاب دستگاه با شرایط مورد نیاز در جدول (۷-۱) ارائه گردیده‌اند.

جدول ۱-۷- مشخصات فنی اصلی ماشین تونل‌سازی مکانیزه

مولفه	عملکرد	شاخص	واحد
کله حفاری	مقاومت و دوام و قابلیت حفاری در مناطق دارای همگرایی	جنس دیسک‌ها یا تیغه‌ها	-
		روداری حفاری	میلی‌متر
		قطر کله حفاری	میلی‌متر
		مقاومت در برابر سایش (سختی)	راکول
		فاصله دیسک‌های برشی	میلی‌متر
		مصرف دیسک در پیشروی	متر/ #
پیشران اصلی	مقاومت و دوام و قابلیت حفاری در مناطق ریزشی و با پتانسیل گرفتگی	توان کله حفاری	کیلووات
		توان کار در دو جهت	-
		دور کله حفاری	دور در دقیقه
		گشتاور بیشینه	کیلو نیوتن متر
		گشتاور گردش در جهت خلاف	کیلو نیوتن متر
سپر	عبور از مناطق دارای همگرایی و مجاله‌شوندگی و هجوم آب	طول سپر	میلی‌متر
		شکل مخروطی در شرایط مجاله‌شوندگی زمین	-
		آب‌بندی سپر	# دورها + پمپ‌ها
فشارپذیری	عبور از مناطق دارای پتانسیل هجوم آب، مصالح و گاز	فشار عملیاتی	بار
		فشار ایستایی	بار
رانش	عبور از مناطق دارای همگرایی و سرعت پیشروی	نیروی رانش	کیلو نیوتن
		سرعت پیشروی	میلی‌متر در دقیقه
		رانش فعال	کیلو نیوتن

مولفه	عملکرد	شاخص	واحد
		نیروی رانش کفشک	کیلونیوتن
		جابجایی کفشک	میلی‌متر
		نیروی رانش جک	کیلونیوتن
		جابجایی جک	میلی‌متر

ادامه جدول ۱-۷- مشخصات فنی اصلی ماشین تونل‌سازی مکانیزه

مولفه	عملکرد	شاخص	واحد
توان تخلیه	سرعت تخلیه	ظرفیت اسکرو	مترمکعب در ساعت
		ظرفیت تسمه نقاله	تن در ساعت
		چگالی پسماند	کیلوگرم در مترمکعب
		چگالی دوغاب	کیلوگرم در مترمکعب
		دانه‌بندی پسماند تخلیه	-
تزریق فوم	آب‌بندی و حمل پسماند	تعداد نازل کله حفاری	#
		تعداد نازل محفظه	#
		تعداد نازل اسکرو (پیچنده)	#
		نرخ تزریق	مترمکعب در ساعت
تزریق پشت قطعات بتنی	آب‌بندی، تحکیم و کاهش همگرایی	نوع مواد تزریق	نوع ملات
		ظرفیت و تعداد پمپاژ	مترمکعب
		ظرفیت مخزن	مترمکعب
		ظرفیت سیال دور سپر	لیتر در دقیقه
تزریق سیال پیشانی و دور سپر	عبور از مناطق دارای همگرایی و فشارپذیری	تعداد مجرای دور سپر	#
		تعداد مجرای داخل محفظه	#
		ظرفیت سیال داخل محفظه	لیتر در دقیقه
		فشار هوا	کیلوپاسکال
		تخلیه هوا	مترمکعب در ساعت
		فشار دوغاب	کیلوپاسکال
		تراز دوغاب	میلی‌متر
		فشار زمین	کیلوپاسکال

در انتخاب مشخصات اجزای دستگاه، طول حفاری مورد نظر بسیار مهم است و باید در ابتدا به سازنده اعلام شود، چراکه اصلاح و تعمیر در حین کار مشکلات متعددی به دنبال دارد. با توجه به تجربیات موجود، تهیه و خرید دستگاه به طور مستقیم توسط کارفرما توصیه نمی‌شود.

تیغه‌های دیسکی از اجزای مهم، پرمصرف و موثر در عملکرد دستگاه حفاری هستند. این تیغه‌ها با توجه به نوع سنگ در معرض فرسایش در مودهای مختلفی قراردارند و بنابراین باید با آرایش و کیفیت مناسبی به کار روند تا در زمین سخت ساییدگی به کله حفاری سرایت ننماید.

۱-۳-۳- حمل، نصب، مونتاژ و راه‌اندازی دستگاه

۱-۳-۳-۱- ملاحظات، فرآیندها و توصیه‌های کاربردی

پس از ساخت دستگاه در کارخانه یا خرید آن، دستگاه باید به محلی که مونتاژ و راه‌اندازی می‌شود منتقل شود. فرآیند کاری حمل و مونتاژ و راه‌اندازی و انجام تست کارخانه شامل موارد زیر است:

- هماهنگی زمان‌بندی از لحاظ فصل کاری و زمان مورد نیاز حمل، مونتاژ و تست و راه‌اندازی و سازماندهی کارکنان،

- مشخصات و مراحل کار اجرا شامل طول تونل، امتداد مسیر، نوع سامانه نگهداری، وضعیت ورودی و خروجی و پایدارسازی آن‌ها، مختصات نقطه شروع کار دستگاه و فضا و تمهیدات لازم برای سوار کردن و آماده کردن دستگاه در ورودی و خارج کردن آن در خروجی،

- بررسی مقررات گمرکی برای نحوه حمل و ورود در صورت نیاز،

- مشخص نمودن ابعاد قطعات و وزن آن‌ها و نحوه بسته‌بندی و ملاحظات جابجایی آن‌ها،

- انتخاب بهترین مسیر حمل و نقل از محل تحویل دستگاه و راه‌های دسترسی کارگاهی برای آماده‌سازی دستگاه برای شروع حفاری،

- بررسی شرایط جغرافیایی کارگاه و فضای تجهیز و امکانات پشتیبانی مورد نیاز برای گروه نصب و راه‌اندازی،

- تعیین روش انتقال قطعات و اجزای لازم به کارگاه و محل دپوی آن‌ها،

- مشخصات و تعداد پرسنل و متخصصین برای مونتاژ،

- آماده کرده تمهیدات و سازه‌های لازم برای نصب و راه‌اندازی و شروع به کار دستگاه،

- محدودیت‌های حمل و نقل و مونتاژ.

افزون بر فعالیت‌های حمل و نصب و راه‌اندازی، خدمات دیگری نیز برای ماشین‌های حفاری ارائه می‌شود. فهرست

کلی این خدمات را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود. هر یک از این فعالیت‌ها نیاز به برنامه‌ریزی خاص خود را دارد که عموماً توسط سازندگان ماشین‌ها ارائه می‌گردد:

- حمل و نقل دستگاه به کارگاه یا از کارگاه،

- مونتاژ دستگاه،

- راه‌اندازی و تست دستگاه،

- آموزش پرسنل کارگاه برای کار با دستگاه و هدایت آن،

- بازرسی و ارزیابی بازده دستگاه در حین عملیات به منظور بهبود کارکرد آن،

- تعمیرات دستگاه که مواردی علاوه بر تعمیر و نگهداری و تعویض مستمر و عادی را شامل می‌شود،

- ارتقای دستگاه برای استفاده در پروژه دیگر یا شرایط جدید حفاری،

- بیرون کشیدن دستگاه‌های متوقف شده،
- بازیابی و نوسازی دستگاه‌های فرسوده با حفظ قطعات و بخش‌های ارزشمند و تعویض بخش‌های فرسوده،
- دمونتاژ و بازکردن دستگاه و بسته‌بندی آن برای حمل پس از خروج از تونل. گاهی هزینه‌های خارج کردن و دمونتاژ و حمل به حدی زیاد است که دستگاه را در زمین و در یک تونل فرعی که توسط خود آن حفر می‌شود، مدفون می‌نمایند.

۱-۳-۲- مراحل مونتاژ و دمونتاژ

جزئیات مراحل مونتاژ و دمونتاژ برای انواع ماشین حفاری و بسته به سازنده آن تاحدی متفاوت است. در ادامه، مراحل مونتاژ یک ماشین دوسپره که از انواع متداول دستگاه حفاری محسوب می‌شود، ارائه شده است. این مراحل پس از باراندازی و تخلیه قطعات در کارگاه در موقعیت متناسب با مراحل و محل نصب انجام می‌پذیرد:

- ۱- سرهم‌بندی سپر کله حفاری،
- ۲- سوارکردن سپر تلسکوپی،
- ۳- سرهم‌کردن سپر کفشک و سپر دنباله،
- ۴- سرهم‌بندی یاتاقان اصلی و شوت تخلیه،
- ۵- سوارکردن دنباله سپر کله حفاری،
- ۶- سرهم‌بندی کله حفاری،
- ۷- سرهم‌بندی بدنه اصلی و پل تجهیزات اول،
- ۸- سرهم‌کردن پل تجهیزات دوم،
- ۹- سرهم‌کردن پل نشیمن خط،
- ۱۰- سرهم‌کردن واگن‌ها.

مراحل بازکردن و دمونتاژ ماشین هم براساس روال فوق به صورت معکوس قابل انجام می‌باشد.

ملاحظات و تمهیدات مهم دیگر برای سرهم‌کردن و بازکردن دستگاه عبارتند از:

- گاهی دستگاه حفاری در روی زمین و گاهی در مغار یا فضای بسته سرهم‌بندی و آماده یا دمونتاژ می‌شود. فضای کاری برای این کار در تعیین و ساخت ابعاد قطعات دستگاه باید قبل از شروع ساخت مشخص گردد.
- ممکن است برای حرکت دستگاه و شروع به کار نیاز به قاب کمکی^۱ باشد که باید در محل مونتاژ دستگاه پیش‌بینی شود.
- برای حرکت دادن دستگاه به سمت جبهه کاری نیاز به کریدل می‌باشد که در هر صورت در فضای باز و بسته

مورد نیاز خواهد بود. در صورتی که محل سرهم کردن دستگاه با جبهه کاری فاصله بیش‌تری داشته باشد، نیاز به کریدل کمکی هم وجود خواهد داشت.

- شرایط خارج کردن دستگاه و مستحذات لازم برای آن از قبیل شافت یا تونل کمکی باید در ابتدا به دقت بررسی شده و مسائل اجرا و زمان‌بندی انجام این تمهیدات به طور مناسب تنظیم شود.
- پیش‌بینی‌های لازم برای جلوگیری از توقف دستگاه و معطلی آن در ورودی یا خروجی تونل و ریسک‌های مترتب به آن باید مورد توجه ویژه قرار گیرد. این پیش‌بینی‌ها شامل مواردی چون تامین توان، تامین مالی، اخذ مجوزها و نظایر آن می‌باشد. عواقب ناشی از این تاخیرات علاوه بر ادعاهای پیمانکار و خسارت عدم‌النفع احداث تونل، شامل افزایش ریسک ایراد خسارت به دستگاه ناشی از حوادث طبیعی نظیر سیلاب و زلزله خواهد بود.

۱-۳-۴- تجهیز کارگاه و برآورد منابع لازم حفاری مکانیزه

۱-۳-۴-۱- کلیات تجهیز و جمع‌آوری کارگاه

تجهیز کارگاه تونل‌سازی مکانیزه شامل سه بخش عمده کارهای پشتیبانی و پایه، ورودی تونل و ماشین حفاری و کارخانه تولید قطعات بتنی است که در فصل تجهیز و پشتیبانی ارائه شده است. فضاهای مورد نیاز در پرتال تونل شامل انبارها، کارگاه‌ها، جانمایی خطوط ریلی، محل تخلیه مصالح حفاری، جانمایی جرثقیل‌ها، سیلوی دوغاب و پی گراول، مخازن و تاسیسات آب، و غیره می‌باشد. همچنین تمهیدات لازم برای شروع به کار، از قبیل کریدل، پوش فریم یا همان قاب کمکی و اتافک شروع حفاری حسب نیاز باید در نظر گرفته شوند.

۱-۳-۴-۲- کارخانه تولید قطعات بتنی پوشش

در پروژه تونل مکانیزه اغلب نیاز به کارخانه تولید قطعات بتنی می‌باشد. محاسبه ظرفیت تولید، مشخصات فنی اجزا شامل قطعات بتنی، درزبندها و یراق‌آلات، جانمایی کارخانه، ظرفیت ذخیره و روش نگهداری و دیوی قطعات و حمل آن‌ها از ملاحظات اصلی این بخش می‌باشند. جزئیات مربوط به این بخش در فصل تجهیز و پشتیبانی ارائه شده است.

۱-۳-۴-۳- برآورد هزینه‌های تجهیز و جمع‌آوری کارگاه

تجهیز و جمع‌آوری کارگاه و تامین تجهیزات حفاری مکانیزه هزینه و زمان قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد و با توجه به نیاز به تامین ماشین حفاری و ساخت کارخانه تولید قطعات بتنی نیاز به نقدینگی اولیه قابل توجهی دارد. بدیهی است با افزایش طول تونل درصد نسبی این هزینه و زمان نسبت به کل کاهش می‌یابد (این درصد بین ۱۵ تا ۳۰ در پروژه‌های مختلف گزارش شده است که عمده آن مربوط به دستگاه حفاری می‌باشد). البته در فهرست بها روش پرداخت تونل‌سازی مکانیزه بر اساس مترای حفاری در نظر گرفته شده است.

۱-۳-۵- سازماندهی کارگاه (نمودار سازمانی و شیفت‌بندی) و رویه‌های اجرایی

۱-۳-۵-۱- ملاحظات نیروی انسانی

با توجه به این که تونل‌سازی مکانیزه مشابه یک خط تولید تونل می‌باشد، انتخاب نیروی انسانی ماهر و با تجربه، تجهیز، سازماندهی و آموزش آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به طوری که عملکرد مجموعه آن‌ها خللی در تولید محصول نهایی یعنی تونل ایجاد ننماید. ملاحظات مهم و لازم برای نیروی انسانی در تونل‌سازی مکانیزه به شرح زیر می‌باشند:

- آموزش، مهارت و تجربه کافی برای کار با تجهیزات خاص تونل مکانیزه شامل کارخانه ساخت قطعات بتنی، سیستم حمل و نقل با محدودیت‌های خاص در داخل تونل، کار با دستگاه حفاری مکانیزه و تجهیزات و ماشین‌های مربوطه و کنترل و هدایت آن‌ها،
- توجیه بودن در مورد شرایط پروژه و ریسک‌های حفاری مکانیزه و مخاطرات زمین مانند هجوم آب، گل، گاز و ... و آمادگی نشان دادن عکس‌العمل مناسب با انجام مانورهای تمرینی،
- رعایت پروتکل ثبت مستمر گزارش فعالیت‌ها و حوادث و بررسی آن‌ها برای استفاده در بهینه‌سازی اجرا،
- آمادگی و آشنایی کامل در مورد دستورالعمل‌های ایمنی و سلامت کار در فضای بسته در تونل‌های طولانی با دسترسی مشکل در طول ساعت کاری هر شیفت،
- آشنایی کامل با نگهداری ماشین حفاری و تجهیزات مرتبط با فعالیت هر گروه، خصوصاً بخش تعمیرات و تعویض قطعات در زمان محدود و با سرعت مناسب نظیر دیسک‌ها، تمیزکاری کله حفاری و مجاری تخلیه مصالح حفاری، تعمیرات سیستم برق و تهویه و آبرسانی و نظایر آن،
- آگاهی از شرایطی که باید به متخصص یا مدیر برای انجام اقدام متقابل مناسب مراجعه یا کسب تکلیف کرد، نظیر تغییرات قابل توجه نرخ حفاری، استهلاک، خرابی ناگهانی در بخش‌های حساس دستگاه و

۱-۳-۵-۲- نمودار سازمانی تونل‌سازی مکانیزه

انواع گروه‌های کاری مورد نیاز در تونل‌سازی مکانیزه به صورت زیر فهرست می‌شوند. رده‌های پرسنلی شامل مدیر ارشد و میانی، مهندس، تکنسین، راننده و اپراتور، سرکارگر، کارگر فنی و پرسنل خدماتی هستند. نمونه نمودار سازمانی کلی تونل‌سازی مکانیزه در شکل (۱-۵) نشان داده شده است. ملاحظات هر یک از گروه‌های کاری در تونل‌سازی مکانیزه به صورت زیر است:

- مدیریت اجرایی با توانایی کافی برای پایش مستمر اجرا و استفاده از اطلاعات ثبت شده برای بهینه‌سازی و افزایش بهره‌وری و سرعت پیشرفت کار،
- مالی، تدارکات و پشتیبانی با تمرکز بر ذخیره کافی و تامین پیوسته قطعات و نیازهای دستگاه حفاری مکانیزه،
- قراردادی و پیمان با تمرکز بر نرخ پیشرفت کار و هزینه‌های استهلاک و تعمیرات و مسائل منجر به توقف و

- تاخیر و نیازهای قراردادی و مالی کار پیوسته دستگاه،
- سلامت و ایمنی و محیط زیست و امنیت با انجام آموزش‌های لازم برای مقابله با مخاطرات محتمل در حفاری مکانیزه در اعماق زمین با محدودیت‌های دسترسی اضطراری و تامین تجهیزات ایمنی و امدادی لازم برای شرایط خاص،
 - مهندسی تجهیزات (برق، مکانیک، تهویه، هیدرولیک) با مهارت کافی و آشنایی با تجهیزات مورد استفاده برای آماده نگهداشتن و تعمیرات در حداقل زمان و پیش‌بینی افزونگی و سیستم‌های جایگزین برای موارد خاص،
 - زمین‌شناسی مهندسی (ژئوتکنیک، مکانیک سنگ، زمین‌شناسی عمومی، هیدروژئولوژی، ژئوفیزیک) مسلط به درزه نگاری و تشخیص کیفیت سنگ در جبهه حفاری برای پیش‌بینی تمهیدات و تغییرات لازم در اجرا و مهارت در استفاده از روش‌های پیش‌بینی و شناسایی مخاطرات نظیر هجوم آب، گل، گاز و انفجار سنگ و نظایر آن و نیز مسلط به تفسیر اطلاعات دستگاه در حین حفاری برای اعمال اصلاحات لازم در حفاری،
 - دفتر فنی با تمرکز بر به‌روزرسانی نقشه زمین‌شناسی و پیش‌بینی مخاطرات بر اساس اطلاعات پایش و نیز انجام اصلاحات لازم در توالی و زمان‌بندی فعالیت‌ها نظیر تسریع در تزریق پشت قطعات و تزریق‌های تماسی و تحکیمی و انجام اصلاحات لازم برای جلوگیری از اعمال بارهای غیریکنواخت و نامتقارن به پوشش بتنی،
 - آب‌بندی و تزریق با تمرکز بر کنترل عملکرد گسکت^۱ و میزان نشست آن‌ها و رواداری‌های اجرا و پیش‌بینی تمهیدات جبران مسائل ناشی از نشست مانند تزریق آب‌بندی برای تنظیم حجم آب نشستی به داخل تونل در محدوده مجاز،
 - نقشه‌برداری برای کنترل مسیر حرکت دستگاه و انحرافات آن به‌خصوص در نواحی سست و قوس و شیب،
 - مهندسی تونل (حفاری و پوشش) با تمرکز بر کیفیت و سختی سنگ و کنترل میزان پیشروی حفاری و میزان سایش قطعات و کاهش آسیب‌های قطعات بتنی ناشی از فشار متمرکز و نامتقارن جک‌ها و عدم پرکردن به موقع پشت سگمنت‌ها و ترک خوردگی‌های ناشی از آن،
 - ارزیابی و کنترل کیفی و آزمایشگاه (بتن، آب، مکانیک سنگ) با کنترل شیمیایی آب و دمای آن در تونل و کنترل کیفی ساخت قطعات بتنی در کارخانه با روش‌های غیرمخرب و نمونه‌گیری،
 - مدیریت اجرایی و تیم اپراتوری دستگاه با مهارت کافی برای تنظیم کارکرد دستگاه بر اساس شرایط زمین و نیز عملیات متناسب در شرایط برخورد با مخاطرات خاص زمین و ثبت تاریخچه اطلاعات و بررسی منظم آن‌ها برای بهینه‌سازی حفاری.

۱-۳-۶- هدایت، راهبری و برنامه‌ریزی عملیات تونل‌سازی

۱-۳-۶-۱- ملاحظات اصلی راهبری و برنامه‌ریزی اجرا

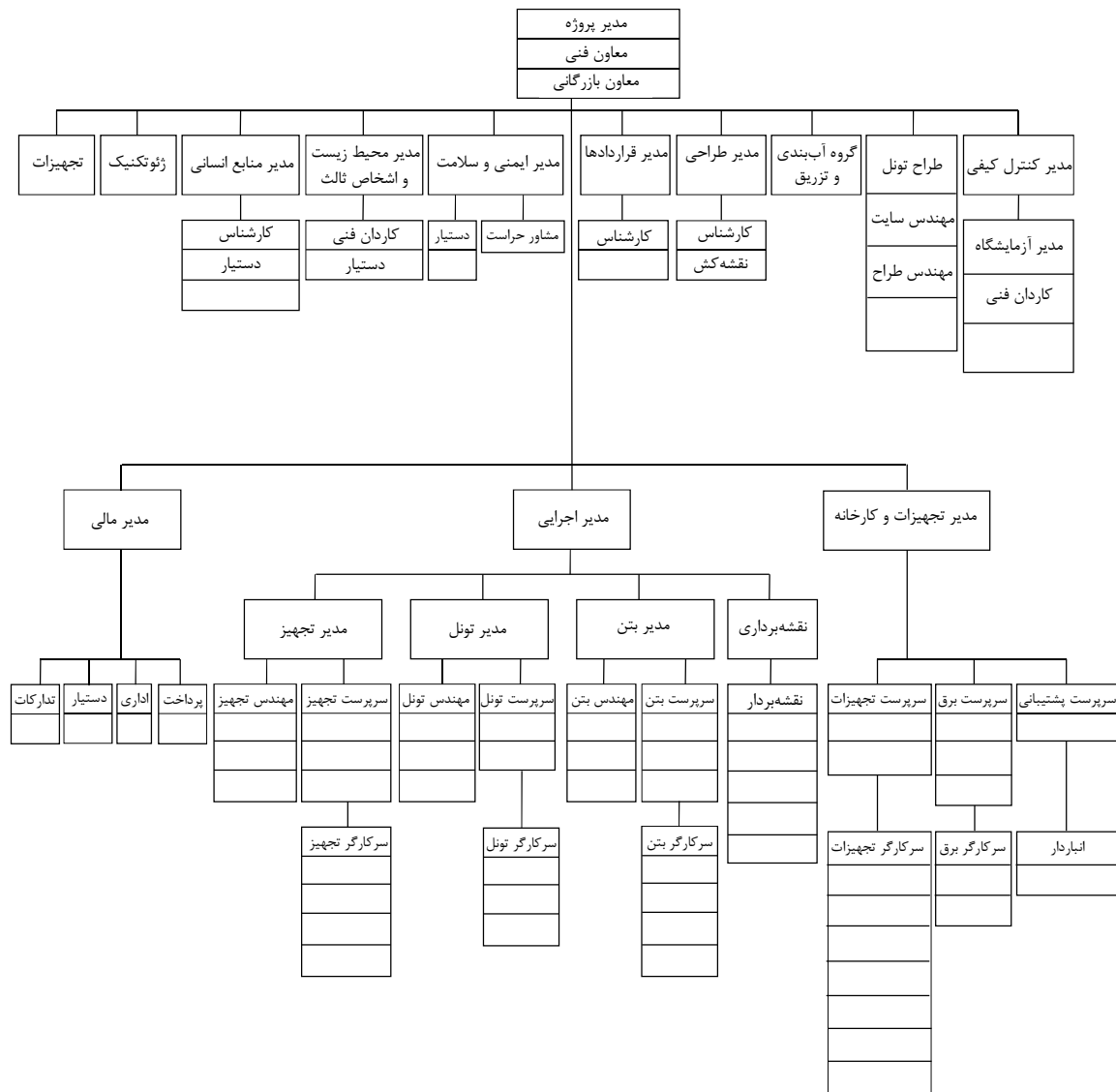
به دلیل وجود نامعینی‌های متعدد بهتر است هدایت، راهبری و برنامه‌ریزی عملیات تونل‌سازی با توجه خاص به مدیریت ریسک صورت پذیرد. عوامل کلیدی که به عنوان مقدمات برنامه‌ریزی اجرا باید مورد توجه قرار گیرند، به شرح زیر است:

- نوع قرارداد و تعیین حیطه مسئولیت کارفرما، مشاور و پیمانکار خصوصا در مواجهه با شرایط خاص در آن،
- تیم مدیریت اجرایی و کنترل پروژه مجرب و توانمند،
- سطح و دقت اطلاعات ژئوتکنیک، زمین‌شناسی و آب زیرزمینی موجود از مسیر و شناسایی مخاطرات آن،
- استفاده از پرسنل ماهر با حداقل تعداد لازم و در نظر گرفتن عوامل انسانی در اجرا در برنامه‌ریزی،
- دفتر فنی مهندسی مجرب،
- سامانه ایمنی و سلامت و محیط زیست،
- تجهیزات و ماشین‌آلات آماده و وجود روش‌های اجرایی متناسب با شرایط کاری مختلف،
- جریان مالی و نقدینگی مطمئن بر اساس برنامه‌ریزی اجرایی.

۱-۳-۶-۲- برنامه اجرایی تونل‌سازی مکانیزه

تنظیم برنامه اجرایی در تونل‌سازی مکانیزه یک فعالیت مستمر و پویا بوده و دائما به‌هنگام و اصلاح گردیده و شامل جنبه‌های مختلف نرم‌افزاری و سخت‌افزاری می‌باشد و جزئیات آن بستگی به مشخصات و شرایط پروژه دارد. برنامه اجرایی تونل‌سازی مکانیزه در زمین سخت شامل بخش‌های اصلی و مشترک زیر است:

- ورودی برنامه شامل قرارداد، نمودار سازمانی و شرح وظایف، اطلاعات تونل و ژئوتکنیک، نقشه‌های اجرایی، روش‌های اجرا، روال و سامانه گردش اطلاعات و ارتباطات، دستورالعمل ایمنی، سلامت، محیط زیست و بیمه،
- انتخاب مراحل و روش اجرا و ماشین مناسب با توجه به زمان‌بندی کلی و اطلاعات ژئوتکنیک و اجزای طرح،
- برآورد سرعت اجرا و تهیه برنامه زمان‌بندی تفصیلی و تعیین نیازهای اجرایی بر اساس آن، شامل جریان نقدینگی، مواد و مصالح، امکانات و نیروی انسانی،
- تدوین طرح تجهیز کارگاه و اجرای آن شامل کارخانه تولید قطعات بتنی، دپوی مصالح، مسیرهای حمل و نقل و تخلیه، تامین توان، آب و تهویه،



شکل ۱-۵- نمونه نمودار سازمانی کلی تونل‌سازی مکانیزه

- برنامه‌ریزی تولید، دیو، حمل و نصب قطعات پیش ساخته بتنی متناسب با برنامه پیشروی حفاری،
- آماده‌سازی ورودی تونل و حفر تونل‌های کمکی و دسترسی در صورت نیاز،
- حمل، مونتاژ و راه اندازی ماشین حفاری،
- انجام عملیات حفاری و انجام نوبت‌بندی مناسب پرسنل اجرایی برای کاهش زمان‌های وقفه به حداقل ممکن،
- ثبت اطلاعات عملکردی توسط خروجی دستگاه نقشه‌برداری و اطلاعات آماری و احجام عملیات اجرایی،
- تجزیه و تحلیل شاخص‌های عملکردی اجرا و انجام اقدامات اصلاحی جهت بهبود کارکرد،
- برنامه‌ریزی نصب قطعات، تزریق پی گراول و تزریق تماسی پشت قطعات بتنی،
- آمادگی برای شرایط خاص و خارج از پیش‌بینی و مدیریت آن نظیر عبور از گسل و نواحی سست و دارای

- همگرایی و مجال‌ه‌شوندگی شدید و پیش‌گیری از نشست دستگاه، عبور از سفره آب زیرزمینی بزرگ و پیش‌بینی نرخ و ظرفیت تخلیه آب و جلوگیری از غرقاب شدن دستگاه، تمهیدات ایمنی لازم در نواحی هجوم گاز،
- تمهیدات اجرایی لازم در حالت استفاده از دستگاه‌های با قابلیت تزریق فوم یا پلیمر یا بنتونیت و یا برنامه ریزی لازم برای اضافه نمودن این قابلیت به دستگاه در مواقع لزوم،
- انجام عملیات پایش و ترمیم‌ها و اقدامات لازم برای رفع نواقص،
- اتصال بخش‌های مختلف و احداث دسترسی‌ها و چاه‌ها در حالت استفاده از بیش از یک دستگاه حفاری یا استفاده از روش‌های ترکیبی مکانیزه و متعارف،
- آماده‌سازی خروجی تونل و خروج دستگاه و دمونتاژ آن،
- اجرای مولفه‌های فرعی پروژه مانند بند انحرافی و آبگیر و سازه خروجی و حوضچه تخلیه تونل و سرریز اضطراری،
- تحویل موقت و آب اندازی و تست تونل،
- رفع نواقص و تحویل دائم.

۱-۳-۷- نقشه‌برداری و کنترل مسیر

۱-۳-۷-۱- اهداف و روش‌های نقشه‌برداری

نقشه‌برداری در عملیات اجرایی تونل‌ها با اهداف متنوعی چون برداشت توپوگرافی ورودی و خروجی و راه‌های دسترسی و تجهیز، مسیریابی و کنترل حرکت ماشین و پیاده نمودن فراز و شیب و قوس‌های تونل و تنظیم ریل‌ها و تسمه نقاله‌ها، پیاده‌سازی موقعیت موانع مسیر و گسل‌های شناسایی شده در مسیر، شناسایی موقعیت عوارض پیش رو، کنترل تغییر شکل و همگرایی داخل تونل، درزه نگاری و ثبت عوارض، شناسایی هیدروگرافی و سطح آب زیرزمینی صورت می‌پذیرد. هر یک از این موارد را می‌توان با روش‌های مختلفی انجام داد که در ماتریس جدول (۸-۱) نشان داده شده‌اند.

جدول ۱-۸- ماتریس کاربرد روش‌های مختلف موقعیت‌سنجی و شناسایی مسیر

روش کاربرد	نقشه‌برداری متداول	جی.پی.اس ^۱	نقشه‌برداری الکترونیک	سنجش از دور	اسکن لیزری و فوتوگرامتری	ژئوفیزیک مانند تی.اس.پی. ^۲ و بیم ^۳ ، ژئورادار، لرزه‌ای، گراویمتری، ژئوالکتریک، مغناطیسی، ژئوترمال
توپوگرافی	✓	✓	✓	✓	✓	
مسیریابی تونل	✓		✓			
پیاده‌سازی موانع	✓		✓	✓		
شناسایی عوارض						✓
کنترل تغییر شکل	✓		✓		✓	
درزه نگاری	✓		✓		✓	
هیدروگرافی						✓

۱-۳-۷-۲- ملاحظات و توصیه‌های اجرایی نقشه‌برداری

- برای موثر بودن نقشه‌برداری در پروژه‌های تونل، بهتر است ملاحظات زیر در نظر گرفته شوند:
- مستندسازی و گزارش موقعیت و امتداد ماشین در برابر موقعیت و امتداد پیش‌بینی‌شده اولیه در کله حفاری و دنباله برای اطمینان از موقعیت صحیح ماشین و عدم انحراف از مسیر،
 - تعبیه و نگهداری نقاط مبنا در موقعیت و شرایط مناسب برای امکان انجام مطمئن برداشت‌ها و پیاده‌سازی‌ها،
 - استفاده از نشانگرهای سقفی در زمین‌های سخت و نقاط مناسب برای امکان استفاده آسان‌تر در طول عملیات و همچنین کنترل جابجایی‌های سقف با مقایسه با نقاط مبنا در سنگ سست‌تر،
 - استفاده از نقشه‌برداری با ربات یا نقشه‌برداری برخط با دوربین ثابت در شرایط خاص که رطوبت، دما، گاز یا غبار امکان برداشت دستی را مشکل و همراه با خطا می‌نماید،
 - اطمینان کافی در مورد تنظیم بودن دستگاه‌ها و وسایل نقشه‌برداری برای پیش‌گیری از خطاهای ناخواسته با انجام کنترل دوره‌ای و منظم کالیبراسیون.
 - استفاده از مدل‌های ریاضی مناسب جهت مدیریت خطاها و کنترل صحت کار هدایت‌گر دستگاه.

۱-۳-۸- پیش‌بینی مخاطرات و روش‌های مقابله با شرایط دشوار زمین‌شناسی

۱-۳-۸-۱- توصیه‌های اجرایی مقابله با هجوم آب زیرزمینی

هجوم آب زیرزمینی در حفاری تونل می‌تواند از گسستگی‌های توده سنگ نظیر درزه، صفحات لغزیده، توده‌های

۱- Global Positioning System (GPS)

۲- Tunnel Seismic Prediction (TSP)

۳- Beam

کارستی یا نواحی گسله رخ دهد. این اتفاق در تونل‌های عمیق بیش‌تر بوده و می‌تواند در صورت برخورد به عدسی‌های ریزدانه و خرد شده بین درزه‌ها به شکل گل‌آلود درآمده و مشکلات تخلیه ایجاد نماید یا در حجم بیش‌تر و سیلابی به دلیل ظرفیت کم یا صعوبت تخلیه در تونل دارای شیب منفی و خصوصاً دارای قطر کم، باعث غرقاب شدن ماشین و تجهیزات و ازکار افتادن آن‌ها و همچنین ایجاد اختلال در کارگذاری قطعات بتنی و نا ایمن شدن شرایط کار برای پرسنل شود. در شرایط برخورد با سفره‌های آب تحت فشار این پدیده می‌تواند همراه با ناپایداری و ریزش سینه‌کار و لهیدگی هم باشد. پیش‌بینی ابعاد این مساله مشکل، ولی با شناسایی زمین‌شناسی، برداشت‌های سطحی و گمانه‌های ژئوتکنیکی و روش‌های ژئوفیزیکی امکان‌پذیر است. در برخی شرایط ممکن است دمای آب بالا باشد و هزینه و تمهیدات اضافی برای خنک کردن دستگاه حفاری نیز ایجاد نماید. توصیه می‌شود، در صورت امکان در جانمایی مسیر تونل، از قرارگیری بخش‌های شیب منفی در نواحی آبدار و کارستی اجتناب شود، چرا که کنترل حجم بالای آب و بیش از ظرفیت‌های عملی پمپاژ و تخلیه در این شرایط عملاً بسیار مشکل و گاهی غیرممکن است.

روش‌های کلی کاهش اثرات هجوم آب به شرح زیر پیشنهاد می‌گردند:

- انجام عملیات شناسایی با حفر گمانه در پیشانی کار و ثبت و بررسی پارامترها و بررسی‌های متناوب ژئوفیزیکی،
- کاهش نفوذپذیری با انجام پیش تزریق در توده سنگی پیشانی کار ترجیحاً قبل از نفوذ آب به داخل تونل که البته درصد موفقیت آن بستگی به ساختار سفره آب و توده سنگی دارد،
- جلوگیری از هجوم آب با کمک مود بسته در ماشین تک سپره و سفره آب زیرزمینی با فشار کم (حداکثر ۸ بار) که در ماشین‌های تک سپره این امکان پیش‌بینی شده است، مانند دستگاه حفاری با فشار تعادلی سنگ سخت.
- نصب دریچه انسداد برای شوت تخلیه مصالح حفاری برای جلوگیری از هجوم آب به داخل که تنها بر روی اسکرو قابل نصب است،
- جداسازی آب از مصالح حفاری در تخلیه برای کاهش مشکلات تخلیه با روش‌هایی نظیر زهکشی،
- پیش‌بینی سامانه پمپاژ روی ماشین و در طول تونل متناسب با میزان هجوم آب به داخل در شیب منفی شامل حوضچه‌ها و لوله‌کشی مورد نیاز،
- کاهش نفوذپذیری پیشانی کار با استفاده از عملیات انجماد،
- اجرای زهکش‌های طویل در پیش رو و اطراف جبهه کاری با حداقل طول دو برابر قطر برای تخلیه آب در هجوم آب با فشارهای زیاد،
- بهبود زمین در پیشانی کار و اطراف ماشین و اطراف پوشش قطعات بتنی با تزریق ویژه برای مهار آب با فشار بالا،

- اجرای گمانه‌های زهکشی پیرامون پوشش بتنی که البته این عملیات در زمان انجام عملیات پس تزریق^۱ با هدف کاهش فشار آب و امکان تزریق انجام می‌شود، در غیر این صورت توصیه نمی‌شود،
- پیش‌بینی انجام تزریق آب‌بندی برای کاهش نشت آب از درز قطعات بتنی پیش‌ساخته جهت کاهش حجم آب ورودی به تونل،
- استفاده از پوشش دولایه یا دوجداره تونل در حفاری با ماشین سپردار به صورت بتن درجا پس از نصب سگمنت‌ها،
- تزریق فوم در جبهه حفاری برای کاهش مشکلات تخلیه مصالح حفاری هنگام هجوم گل همراه با آب،
- پیش‌بینی تمهیدات شستشو و تمیزکاری جلوی ماشین در هنگام هجوم گل،
- استفاده از سامانه تهویه مناسب در دماها و رطوبت‌های بالا،
- پیش‌بینی افزایش مدولار ظرفیت خنک کردن ماشین با لوله‌های آب سرد،
- تخلیه سریع‌تر آب در شرایط آب با دمای بالا برای کاهش اثرات آن در محیط کاری،
- کاهش زمان نوبت کاری پرسنل در شرایط آب با دمای بالا برای افزایش بهره‌وری،
- استفاده از مواد افزودنی برای دیرگیر کردن و کاهش سرعت سخت شدن دوغاب تزریقی در شرایط دمای بالای محیط،
- پیش‌بینی‌های قراردادی لازم برای مواجهه با هجوم آب بیش از مقادیر پیش‌بینی‌شده شامل مسئولیت‌ها، هزینه‌ها و بیمه انجام پذیرد.
- برای کمک به حل مناقشات اجتماعی و زیست محیطی، بهتر است کیفیت و دمای آب خروجی و تغییرات دبی روزانه اندازه‌گیری و مستندسازی گردد.

۱-۳-۸-۲- توصیه‌های اجرایی مقابله با پدیده لهیدگی و مچاله‌شوندگی

در زمین دارای مچاله‌شوندگی و مقاومت برشی بسیار کم که باعث رخداد سریع مچاله‌شوندگی می‌شود، ممکن است فشارهای ناهمگن و نامتقارن زیادی به کله حفاری وارد شده و عملاً حرکت آن را دچار مشکل نماید و باعث وقفه در پیشروی گردد. در این موارد عملیات تثبیت زمین باید قبل از ورود به این نواحی تکمیل شود. فشارهای ناهمگن و نامتقارن زیاد می‌تواند باعث تغییر شکل و آسیب احتمالی به سپر دستگاه هم شود که اصلاح و تعمیر آن بسیار دشوار خواهد بود.

پس از عبور دستگاه و نصب سامانه نگهداری پیش‌ساخته، فعالیت زمین و پدیده مچاله‌شوندگی و همگرایی ادامه یافته و ممکن است فشارهای زیادی را به صورت نامتقارن به پوشش بتنی وارد نماید. این بارگذاری نامتقارن و پیش‌بینی‌نشده

ممکن است باعث آسیب احتمالی و شکست و ترک خوردگی طولی قطعات بتنی و بازشدن درزها و آسیب دیدگی نوارهای آب‌بند آن شود. عدم تزریق به موقع پشت قطعات یا تزریق ناقص، آثار این پدیده را تشدید می‌نماید.

شواهد برخورد به این نواحی در تونل عبارتند از:

- افزایش نامتعارف نیروی رانش دستگاه برای حصول نرخ پیشروی،
 - کاهش نرخ پیشروی دستگاه،
 - افزایش نامتعارف فشار سیلندرهای جازدن و نصب قطعات بتنی،
 - کاهش زمان تعمیرات و نگهداری.
- توصیه‌ها و راهکارهای مقابله با لهیدگی و تغییر شکل‌های زیاد توده سنگی به صورت زیر پیشنهاد شده است:
- انجام عملیات شناسایی با حفرگمانه در پیشانی کار و ثبت و بررسی پارامترها و بررسی‌های متناوب ژئوفیزیکی و در صورت نیاز اجرای عملیات پیش تحکیم زمین،
 - عملیات حفاری بدون وقفه با برنامه‌ریزی منظم نوبت‌های کاری برای عبور سریع از مناطق پرخطر، زیرا پدیده مچاله‌شوندگی تابع زمان بوده و در صورت توقف دستگاه یا کاهش سرعت آن، همگرایی منجر به تماس بیش‌تر زمین با دستگاه می‌شود،
 - انجام اضافه حفاری شعاعی در حدود ۵ سانتی‌متر برای ایجاد فضای خالی در اطراف سپر (اضافه حفاری‌های بیش‌تر مثلاً ۱۰ سانتی‌متر بسیار مشکل‌تر است)، که به عنوان مثال با بستن تیغه حفاری نو یا مخصوص در اطراف کله حفاری قابل انجام است،
 - تغییر هندسه سپر به شکل مخروطی و کاهش طول سپر در ماشین‌های سپردار. ماشین‌های دو سپره معمولاً به دلیل طول بیش‌تر سپر، برای زمین‌های دارای پتانسیل لهیدگی یا مچاله‌شوندگی بالا توصیه نمی‌شوند.
 - روغن‌کاری سطوح خارجی سپر دستگاه حفاری و تزریق مکرر مواد روان‌کننده به پشت سپرها جهت کاهش اصطکاک و کنترل آثار آن،
 - افزایش نیروی رانش و عکس‌العمل کفشک‌های تکیه‌گاهی دستگاه با ضریب اطمینان بیش‌تر که البته اثرات اعمال نیروی بیش‌تر آن باید در طراحی قطعات بتنی هم لحاظ گردد.
 - حرکت ماشین با دور پایین و ذخیره گشتاور بالا و اجتناب از هر گونه توقف تا حد امکان،
 - استفاده از قطعات بتنی با مقاومت بالا و درصد فولاد بیش‌تر و تیپ‌بندی قطعات برای نواحی مستعد تغییر شکل زیاد و لهیدگی در حفاری با ماشین‌های سپردار،
 - استفاده از پوشش دولایه تونل و کاهش بار وارده به پوشش نهایی در حفاری با ماشین‌های سپردار،
 - نصب پوشش تسلیم‌شونده نظیر استفاده از دندان‌های قابل لغزش در پوشش، بتن‌پاشیده حفره‌دار یا متخلخل و اجزای فشاری با حلقه بسته یا غیربسته در حفاری با ماشین‌های بدون سپر،
 - برنامه‌ریزی و انجام هرگونه تمهیدات سرویس و نگهداری و تعویض قطعات قبل از ورود به این نواحی برای

پیش‌گیری از توقف دستگاه،

- پرکردن به موقع و سریع فضاهای خالی پشت قطعات بتنی با قابلیت شکل‌پذیری و مچاله‌شوندگی با فشار کمی بیش‌تر از معمول و نیز لحاظ اثر کاهش سختی تکیه‌گاه‌های قطعات در طراحی در صورت عدم اطمینان از تزریق کامل، در مواردی که حرکات زمین به سرعت رخ می‌دهد از مواد پرکننده زودسخت شونده برای پایدارسازی هرچه سریع‌تر محیط و بهبود شرایط تنش هم می‌توان استفاده نمود،
- استفاده از قطعات بتنی قوی‌تر یا فولادی پیش‌ساخته در این نواحی و پیش‌بینی بارگذاری نامتقارن در طراحی،
- در صورت توقف ناشی از مشکلات ضروری تی.بی.ام و گیرکردن دستگاه، بهتر است در ابتدا با اعمال فشار جک‌های کمکی در حالت پرفشار و حالت تکی^۱ حفاری را ادامه داد. البته این عمل باعث فشار بیش از اندازه به دستگاه و احتمالاً شکستگی برخی قطعات بتنی هم خواهد شد (شکل ۱-۶).



شکل ۱-۶- شکستگی شدید سگمنت‌ها در اثر عملیات پرفشار در تونل نوسود

- اگر با این عمل در اولین مرحله دستگاه عبور ننمود، می‌توان با تزریق بنتونیت یا گریس به پشت سپرها جهت کاهش اصطکاک بین سپرها و زمین و نیز متقارن نمودن فشار جک‌های کمکی به قطعات بتنی، حفاری ادامه یابد. در صورت وجود قطعات بتنی با مقاومت بالا باید قبل از این عمل آن‌ها را نصب نمود و سپس فشار به قطعات بتنی وارد نمود، زیرا در صورت شکستگی قطعات بتنی، زمان زیادی صرف درآوردن قطعات بتنی شکسته و انتقال آن‌ها به بیرون و نصب قطعات بتنی جدید می‌شود که در این مدت زمین همچنان به جمع‌شدگی خود ادامه می‌دهد و مشکلات تشدید می‌گردد.
- ایجاد دریچه مسیر فرعی در سپر. در این زمینه علاوه بر دو مورد فوق در صورت توقف طولانی و عدم استفاده از روش‌های قبلی می‌توان با برش سپر و سپس ایجاد گالری، دور دستگاه را با استفاده از حفار پیکور دستی از طرفین خالی نموده و با آزادسازی دستگاه، حفاری را ادامه داد.

۱-۳-۸-۳- توصیه‌های اجرایی مقابله با پدیده انفجار سنگ

پدیده انفجار سنگ به شکست ناگهانی سنگ همراه با آزاد شدن ناگهانی انرژی به علت تمرکز تنش زیاد گفته می‌شود. این پدیده که در سنگ‌های پرمقاومت و همگن که رفتار تردتری دارند و تحت سربار یا تنش بالا هستند، در امتداد تنش اصلی بیشینه فشاری و اغلب در پیشانی کار یا گاهی در تاج و دیواره‌های تونل رخ می‌دهد، به راحتی هم قابل پیش‌بینی نمی‌باشد. این اتفاق معمولاً در فاصله مکانی تا دو برابر قطر تونل در پشت جبهه حفاری و در فاصله زمانی چند ساعت پس از حفاری شکل گرفته و پس از پیدایش شرایط جدید تعادل تنش متوقف می‌گردد که به آن انفجار کرنش هم می‌گویند. انفجار سنگ ممکن است در زمان یا موقعیت‌های دیگری هم به دلیل بروز شرایط جدید تنش یا مثلاً حرکات زمین ناشی از زلزله هم رخ دهد. حالت خفیف این پدیده با ورقه ورقه شدن و کنده شدن سنگ‌ها و حالت شدید آن با پرتاب شدن قطعات سنگ و یا حتی در حالت حدی با فروریزش ناگهانی تونل همراه است که به طور طبیعی ممکن است به ماشین حفاری و پرسنل مشغول به کار آسیب برساند یا حداقل تخلیه مصالح را با مشکل مواجه نماید. از عواقب دیگر این پدیده، گیرکردن قسمت تلسکوپي دستگاه، اختلال در جا افتادن کفشک‌های دستگاه برای حرکت، آسیب دیدگی قطعات بتنی پوشش تونل و آسیب دیدن تسمه نقاله تخلیه مصالح و نیاز بیش‌تر برای تخلیه و تمیزکردن کف تونل می‌باشند.

روش‌های مقابله و کاهش عواقب ناشی از این پدیده به شرح زیر توصیه شده‌اند. توضیح این که چهار مورد آخر بیش‌تر در شرایط خطر خفیف‌تر و مود کنده شدن به کار گرفته می‌شود:

- اجرای حفاری متناوب افقی با آتشکاری و انفجار در اطراف محیط ماشین برای آزادسازی تنش متمرکز،
- حفاری چال‌های با قطر حدود ۱۰۰ میلی‌متر با کم‌ترین فاصله ممکن از کله حفاری برای آزادسازی تنش‌های متمرکز (غیر از ماشین دوسپره)،
- اجتناب از بارگیری کله حفاری از سمت جلو و از پیشانی کار و تغییر و تنظیم تیغه‌ها از سمت داخل برای بارگیری کله حفاری از سمت پشت و از طریق دستگاه،
- اجتناب از انجام بازرسی و کارکردن پرسنل در جلوی کله حفاری در نواحی مستعد خطر انفجار سنگ،
- نصب دوربین بازرسی در جلوی کله حفاری و ابزار تحت فرسایش تیغه‌ها،
- ممانعت از حضور پرسنل در محدوده حدود ۲ متری جلوی دستگاه در ماشین‌های بدون سپر در ساعت‌های اولیه حفاری در مناطق پرخطر،
- استفاده از سپر انگشتی که بین قطعات آن امکان نصب میل مهار وجود دارد
- اضافه نمودن شبکه میلگرد و ایمن‌سازی مسیرهای رفت و آمد برای دستگاه‌های بدون سپر،
- نصب میل مهارهای اصطکاکی و جاذب انرژی در ترکیب با شبکه فولادی و ریب (دنده)های تقویتی متوالی و بتن‌پاشی در محدوده پرخطر برای دستگاه بدون سپر،
- انتخاب نوع مناسب دستگاه با سپر تلسکوپي برای کاهش انباشت مصالح و گرفتگی در دستگاه دوسپره،

- بهره‌برداری از دستگاه دوسپره در مود تک سپره با تمیز کردن تلسکوپ،
- افزایش سرعت و کامل پرکردن حفرات پشت قطعات بتنی برای پایدارسازی هرچه سریع‌تر محیط و بهبود شرایط تنش با انتخاب روش مناسب اجرا و تزریق،
- حرکت ماشین با دور پایین و ذخیره گشتاور بالا.

۱-۳-۸-۴- توصیه‌های اجرایی در نواحی ریزشی و گسلی

ریزش تونل در جبهه حفاری معمولاً از دو ناحیه سقف و سینه‌کار رخ می‌دهد. در مورد سقف تونل، تغییرشکل زیاد در سنگ گاهی به شکل کمانش بروز پیدا می‌کند که در سنگ لایه‌ای و تحت تنش برجای زیاد به صورت شکست خمشی سنگ در امتداد لایه‌بندی و ریزش آن به داخل تونل می‌باشد. این پدیده، بیش‌تر در تونل‌هایی که به موازات لایه‌بندی حفاری می‌شوند، در نزدیکی جبهه حفاری رخ می‌دهد و زمانی که وضعیت تنش‌های برجا موازی جهت لایه‌بندی باشد حادث‌تر خواهد بود و البته پیش‌بینی آن نیز مشکل است. نتیجه این رخداد تغییرشکل غیرهمسان شدید و افزایش همگرایی عمود بر امتداد لایه‌بندی و اعمال بار نامتقارن به سامانه نگهداری و پوشش می‌باشد. در سینه‌کار نیز برخورد با لایه‌های سست به صورت تمام مقطع یا جزئی می‌تواند باعث ریزش ناگهانی روی کله دستگاه گردد. این ریزش‌ها در نواحی آبدار می‌تواند باعث هجوم گل و لای و ریزش آن روی سرمت‌ها و کاهش بازده و اختلال در کارکرد آن‌ها شود.

در نواحی گسلی، خردشدگی زیاد باعث تشدید احتمال ریزش می‌گردد. گسل‌ها امکان حرکت بلندمدت و جابجایی در زمان وقوع زمین‌لرزه را نیز دارند که البته این موارد باید در طراحی پیش‌بینی و تمهیدات لازم برای جذب، تحمل یا استهلاک جابجایی در نظر گرفته شود.

روش‌های مقابله و کاهش عواقب ناشی از این پدیده در حین اجرا به شرح زیر توصیه شده‌اند:

- استفاده از عملیات پیش‌شناسایی با حفر گمانه در پیشانی کار و ثبت و بررسی مستمر پارامترهای ثبت شده دستگاه و تطبیق آن با نیمرخ‌های زمین‌شناسی جهت تدقیق پیش‌بینی‌ها برای وضعیت پیش‌رو و بررسی‌های متناوب ژئوفیزیکی برای شناسایی نواحی پشت سینه‌کار،
- استفاده از پیش‌روی حفاری در مود بسته در ماشین‌های تک سپره و در شرایط برخورد هم‌زمان با سفره آب زیرزمینی با فشار کم (حداکثر ۱۵ بار)،
- اجرای زهکش در پیش‌رو و اطراف جبهه کاری برای کاهش فشار آب در نواحی مستعد ریزش برای کاهش پتانسیل ریزش و انباشت گل روی کله حفاری،
- بهبود خصوصیات زمین در پیشانی کار و اطراف ماشین با تزریق و عملیات پیش‌تحکیمی،
- حرکت ماشین حفاری با سرعت کم‌تر در نواحی ریزشی و گسلی برای ایجاد امکان کنترل بهتر و تثبیت محیط برای پیش‌روی ایمن ماشین. درشرایطی که احتمال نشست ماشین در نواحی سست از لحاظ وضعیت زمین وجود دارد، کاهش سرعت حرکت ممکن است باعث تشدید نشست ماشین ناشی از وزن خود گردد و برای

- جبران آن ممکن است نیاز به تغییر تراز حرکت ماشین نیز پیدا شود،
- حرکت ماشین با دور پایین و ذخیره گشتاور بالا،
- استفاده از مصالح انعطاف‌پذیر و مقاوم در نواحی گسل فعال و شاخه‌های آن‌ها برای بهبود عمر مفید.

۱-۳-۸-۵- توصیه‌های اجرایی مقابله با سایش در سنگ‌های بسیار سخت

تیغه‌های برشی از دو بخش اصلی که شامل حلقه فولادی و بدنه (حاوی یاتاقان، حلقه آب‌بندی، محور و سایر اجزا) است، تشکیل شده‌اند. حلقه از جنس فولاد با سختی حدود ۲۷ راکول^۱ است. با توجه به این که این حلقه فولادی پرمصرف‌ترین قسمت تیغه برشی است، معمولاً برای کاهش هزینه، نصب و تعویض آن در کارگاه انجام می‌گیرد. نکات مهم در زمینه مقابله با سایش به شرح زیر است:

- از لحاظ نوع، سایش عمدتاً به دو شکل نرمال و غیرنرمال تقسیم‌بندی می‌شود. در حفاری مکانیزه در سنگ سخت سایش نرمال یا سایشی که در حلقه رخ می‌دهد شایع‌ترین نوع سایش بوده و قسمت عمده هزینه مصرف ابزار را به خود اختصاص می‌دهد. سایش غیرنرمال انواع آسیب‌دیدگی تیغه نظیر سایش نامتقارن یا یک طرفه حلقه، شکستگی، خارج شدن حلقه از محل خود، لهیدگی یا قارچی شدن، لب پر شدن، خرابی یاتاقان و آب‌بند را شامل می‌شود. سایش نامتقارن و یک طرفه حلقه در اثر توقف چرخش آن ایجاد می‌شود. ترک خوردگی حلقه اشاره به ترک‌هایی دارد که در امتداد شعاعی حلقه ظاهر می‌شوند. خارج شدن حلقه تیغه از محل خود، به شکستگی و خارج شدن حلقه از روی بدنه آن به علل مختلف از جمله کیفیت پایین جوشکاری رخ می‌دهد. لب پر شدن حلقه به جدا شدن بخشی از حلقه به علت ترک‌های ایجاد شده در اثر خستگی گفته می‌شود. خطاهای عملیات حرارتی حلقه و شوک ضربه‌ای وارد به آن در اثر بارگذاری متغیر (به ویژه در زمین مختلط)، باعث لهیدگی بخشی از حلقه و یا لب پر شدن آن می‌شود. در تیغه‌های باکیفیت بیش‌ترین نوع سایش از نوع نرمال می‌باشد.

- برای کاهش سایش، استفاده از طرح مناسب کله حفاری با گوه‌های محافظ تیغه‌ها، صفحات با مقاومت سایشی بالا، تیغه پرمقاومت، تعبیه بازشوهای کوچک متعدد در کله حفاری و آدم‌روهای قابل بسته شدن برای بازدید و تمیزکاری از اهمیت زیادی برخوردار است،

- کاهش نیروی پیشران و گشتاور ماشین حفار روند سایش را کند می‌نماید،
- میزان مصرف تیغه‌ها بر حسب موقعیت نصب روی کله حفاری متفاوت است. در هر دور چرخش کله حفار تیغه‌های برشی محیطی مسافت زیادتری را روی جبهه کار تونل طی می‌کنند و بنابراین بیش‌تر دچار سایش می‌شوند و عموماً بیش‌ترین تعداد مصرف را دارند. لرزش شدید کله حفاری و اعمال بار جانبی زیاد در سنگ

۱- Rockwell Hardness

- سخت، منجر به سایش بیش‌تر تیغه‌های مرکزی می‌شود. در بخش مرکزی کله حفار به علت شعاع چرخش کوچک‌تر پدیده سُرخوردن به جای چرخش در راستای محور تیغه‌های برشی نیز می‌تواند رخ دهد.
- تغییر دمای تیغه تأثیر زیادی در سایش آن ندارد و تا دمای ۲۰۰ درجه سختی تیغه تا حدود ۵ درصد کم می‌شود.
 - مقدار مصرف این ابزار با شاخص‌های مختلف آزمایشگاهی مانند سایش سرشار^۱ و شاخص عمر دیسک برشی^۲ قابل پیش‌بینی است و هزینه آن برای هر مترمکعب سنگ برجا، به طور متوسط تخمین زده می‌شود.

۱-۳-۸-۶- توصیه‌های اجرایی مقابله با گازهای سمی

گازهای سمی از دسته متان که به سری ترکیبات اتان نیز اطلاق می‌شود، در ساختارهای مختلف خصوصاً در سنگ‌های آهکی شیلی در مجاورت هیدروکربن‌ها و ساختارهای آتشفشانی، رسوبات باکتریایی محدوده دریاچه‌ها، معادن زغال سنگ و نفت و گاز وجود دارند. این گازها بدون رنگ و بو و از هوا سبک‌تر بوده و به صورت آزاد یا همراه با آب زیرزمینی منتشر شده و در ترکیب با هوا با حضور ۵ تا ۱۵ درصدی، مخلوط قابل انفجار ایجاد می‌نمایند. بنابراین، ضمن این که به طور متداول تهویه مناسب باید در محل‌های مشکوک و بدون وقفه و حتی در زمان توقف کار به صورت ۲۴ ساعته انجام شود، اقدامات متقابل ایمنی و اضطراری در صورتی که غلظت این گازها به ۲۰ درصد حد قابل انفجار یعنی یک درصد هوا برسد، باید در دستورکار قرار گیرد. کنترل غلظت گاز به صورت منظم یا پیوسته در محل‌های دارای پتانسیل احتمالی باید انجام پذیرد و در شرایط کاری باید زیر ۰/۲۵ درصد نگه داشته شود. معمولاً در قوانین ایمنی حسب میزان احتمال وجود گاز و مقدار آن سطوح تمهیدات و ملاحظات ایمنی تعریف می‌شوند.

علاوه بر انواع گاز متان، گاز سمی و کشنده سولفید هیدروژن نیز که ناشی از تجزیه مواد آلی است، معمولاً همراه آن وجود دارد که البته با بوی تخم مرغی آن حتی در غلظت کم نیز به راحتی قابل تشخیص است. البته تداوم غلظت کم ایجاد عادت و عدم حساسیت نموده و با ایجاد عدم توجه به افزایش آن که همراه با علائمی چون سردرد، سرفه، حالت تهوع و بیهوشی، می‌تواند منجر به مرگ شود. بنابراین، غلظت این گاز باید مرتب کنترل شده و بیشینه مجاز آن در یک دوره هشت ساعته، ۱۰ دور در دقیقه می‌باشد. این گاز در غلظت ۴/۵ تا ۴۵ درصد پتانسیل احتراق یا انفجار دارد. علاوه بر الزامات تهویه بدون وقفه مشابه گاز متان، هرگونه ورود به تونل، حتی برای تعمیر تجهیزات تهویه، باید پس از انجام تست غلظت گاز و اطمینان از ایمن بودن شرایط و در صورت نیاز تهویه مستقیم گاز بدون حضور در تونل تا رسیدن به حد مجاز آن صورت پذیرد. معمولاً حضور گازها در اعماق تونل اتفاق افتاده و همراه با دما و رطوبت قابل توجه می‌باشد و لذا ظرفیت تهویه باید تمام این موارد را لحاظ نماید. به عنوان یک برآورد کلی تقریباً به ازای هر ۱۰۰ متر طول تونل یک درجه سانتی‌گراد به دما افزوده می‌شود.

۱- Cerchar Abrasiveness Index – CAI

۲- Cutter Life Index – CLI

در ساختارهای آتشفشانی و رسوبی گاز دی اکسید گوگرد هم مشاهده شده است. این گاز هم قابل انفجار بوده و غلظت مجاز آن در محیط ۲ دور در دقیقه پیشنهاد شده است. همچنین در نزدیکی معادن اورانیوم، گاز سرطان‌زای رادیواکتیو رادون نیز ممکن است وجود داشته باشد که نیاز به بررسی و تمهیدات مواجهه خاص خواهد داشت. استفاده از دستگاه‌های ای.پی.بی در محیط سنگی زمانی که مطالعات اولیه نشانگر وجود آزیست، گازهای سمی و انفجاری است، می‌تواند سرعت انتشار آن‌ها را کاهش دهد، تا ظرفیت تهویه جوابگوی رقیق‌سازی حجم گاز آزاد شده باشد. برای این کار لازم است با تزریق و گریس‌کاری بین سپر و سینه‌کار مثلاً با ماستیک، هوابندی لازم برای کاهش نفوذ گاز انجام پذیرد.

پایش گازهای سمی و پارامترهای مرتبط ذکر شده معمولاً برحسب غلظت متوسط در طول تونل یا غلظت برحسب زمان ثبت و مستندسازی می‌گردد و برای تدقیق و اصلاح سیستم تهویه به کار برده می‌شود. سایر تمهیدات ایمنی برای مقابله با گاز، عبارتند از سیستم خودکار قطع برق، تعبیه اتاقک هوابندی شده با تجهیزات تنفسی برای پناه گرفتن پرسنل تا رفع خطر یا امداد و نجات، استفاده از ماسک‌های ضد گاز برای فرار و خروج پرسنل از محدوده خطر و سامانه اطفای حریق مناسب.

۱-۳-۹- خدمات مهندسی حین اجرا و بهینه‌سازی عملکرد دستگاه

۱-۳-۹-۱- تعیین پارامترها و تغییرات قابل اندازه‌گیری

پارامترهای مهمی که عملکرد دستگاه بر اساس آن‌ها کنترل و تحلیل می‌شود، در سه بخش پارامترهای دستگاه، زمین و عملیاتی اندازه‌گیری و تحلیل می‌شوند، به صورت زیر می‌باشند:

- پارامترهای دستگاه شامل:

- توان مصرفی
 - دور کله حفاری و گشتاور
 - نیروی رانش دستگاه و نیروی جک‌ها
 - سرعت پیشروی
 - حجم تزریق در طول
 - تغییرات فشار یا دوغاب هوا یا فشار زمین در طول در ماشین‌های حفاری ای.پی.بی
- اطلاعات ژئوتکنیک مسیر بر اساس مطالعات اولیه و مقایسه با تدقیق شده بر اساس اطلاعات حفاری شامل:
- پروفیل کلی طولی زمین‌شناسی تونل و مصالح حفاری در داخل تونل،
 - پروفیل طولی میزان خردشدگی نواحی خردشده با جدول دسته‌بندی،

- پروفیل طولی شاخص‌های کیفی سنگ (آ.ام.آر^۱، آر.کیو.دی^۲، کیو.تی.بی.ام^۳) جدول دسته‌بندی،
 - پروفیل طولی محتوای کوارتز و مواد ساینده و جدول شاخص خردشوندگی و شاخص حفرپذیری،
 - پروفیل طولی سطح آب و ضریب نفوذپذیری و تراز آب و جدول پیش‌بینی میزان ورود آب،
- شاخص‌های عملکردی و عملیاتی شامل:
- میزان و نرخ فرسایش تیغه‌ها و اجزای مصرفی و تعمیرات،
 - هزینه‌های پرسنل و دستگاه بر حسب طول و زمان و آب و مصالح و انرژی‌های مصرفی، فوم و همچنین گریس جزو مصالح مصرفی گران قیمت و پرهزینه در حفاری مکانیزه محسوب می‌شوند و لذا انتخاب نوع مناسب و بهینه‌سازی مصرف آن‌ها از اهمیت بسیاری برخوردار است.
 - حجم مصالح خروجی و حجم آب خروجی بر حسب زمان،
 - پروفیل قطعات دارای همگرایی یا تغییر شکل یا نیاز به ترمیم و آب‌بندی و نقاط نشت بر حسب طول،
- در بخش بعدی نحوه ثبت و فرمت ارائه تعدادی از این پارامترها به عنوان نمونه بیان شده است.

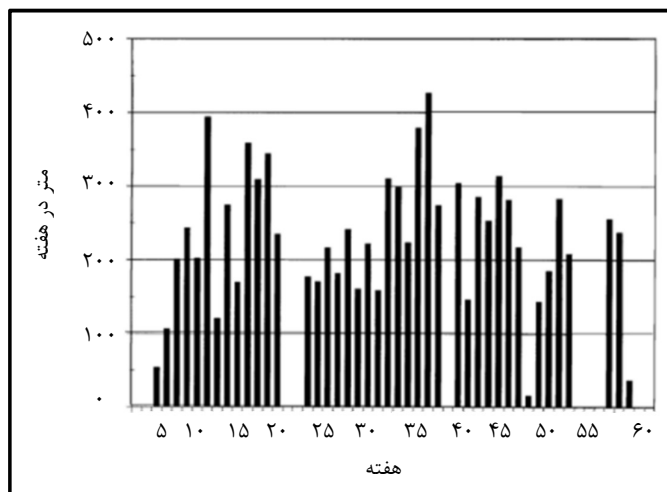
۱-۳-۹-۲- روش‌های برداشت و فرمت ثبت و نوع داده‌ها

- اطلاعات دستگاه به صورت خودکار و توسط رایانه دستگاه ثبت و در اتاق کنترل پایش می‌گردد. اطلاعات ژئوتکنیک بر اساس مطالعات اولیه تهیه و با استفاده از اطلاعات دستگاه و برداشت‌های حین اجرا تدقیق می‌شود. شاخص‌های عملکردی هم بر اساس گزارش‌های ساعتی یا روزانه و هفتگی برداشت می‌شوند. برای مستندسازی و ثبت و گزارش اطلاعات برای مدیریت عملیات اجرا، جداول یا منحنی‌های زیر تهیه می‌گردد:
- اطلاعات ماشین حفاری در حین اجرا، بر اساس داده‌های دستگاه و سایر اطلاعات جمع‌آوری شده شامل:
- سرعت نفوذ و پیش‌روی بر حسب زمان (با مشخص نمودن وقفه‌ها) و طول (و شماره حلقه قطعات پوشش) و درصد بهره‌وری ماشین بر حسب طول (مطابق شکل‌های ۷-۱ و ۸-۱)،

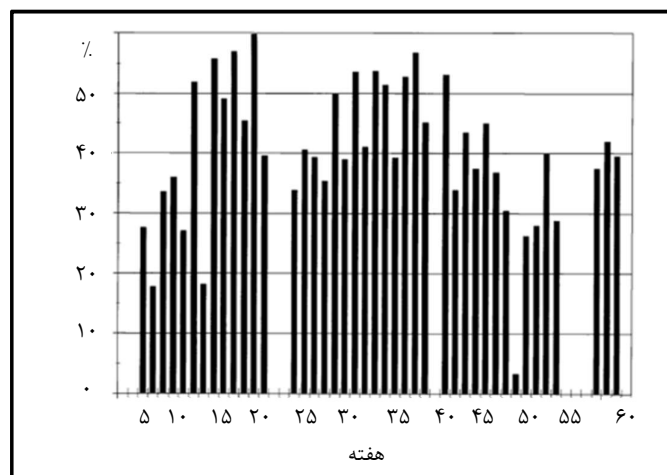
۱- Rock Mass Rating (RMR)

۲- Rock Quality Designation (RQD)

۳- QTBM

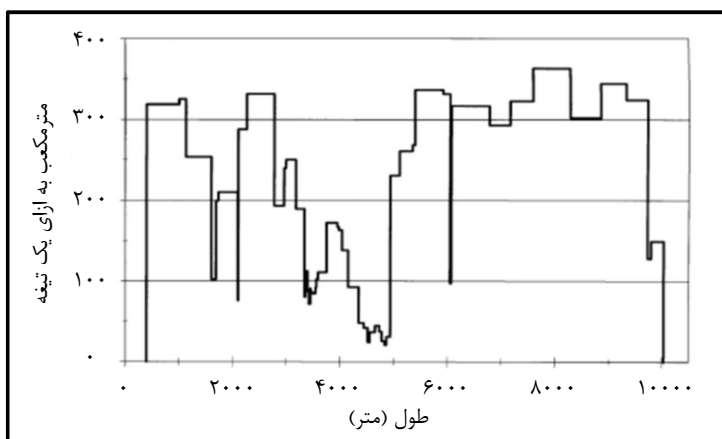


شکل ۱-۷- نمونه منحنی تغییرات پیشرفت کار برحسب زمان

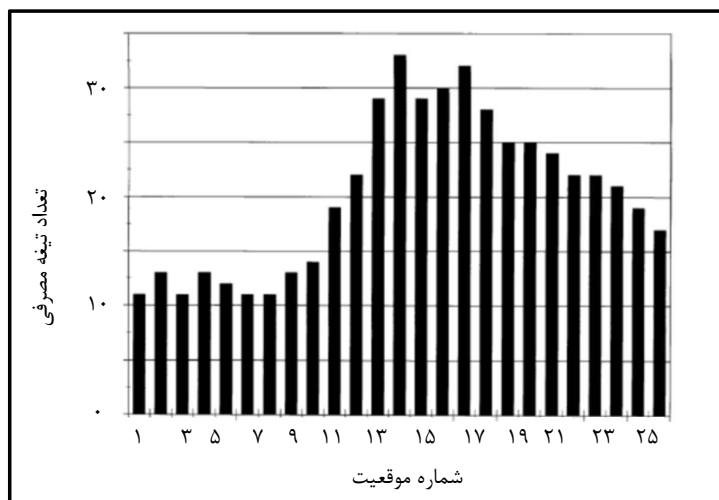


شکل ۱-۸- نمونه منحنی تغییرات درصد بهره‌وری ماشین برحسب زمان

- میزان و نرخ فرسایش تیغه‌ها برحسب طول و نقاط تعویض قطعات (مطابق شکل‌های ۱-۹ و ۱-۱۰) که در فواصل زمانی چند روزه اندازه‌گیری می‌شود.

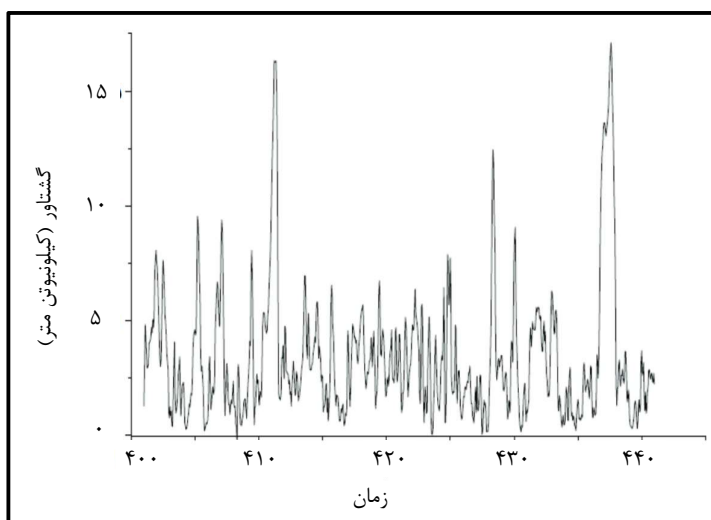


شکل ۱-۹- نمونه منحنی تغییرات عمر تیغه در طول تونل برحسب واحد حجم حفاری سهم یک تیغه



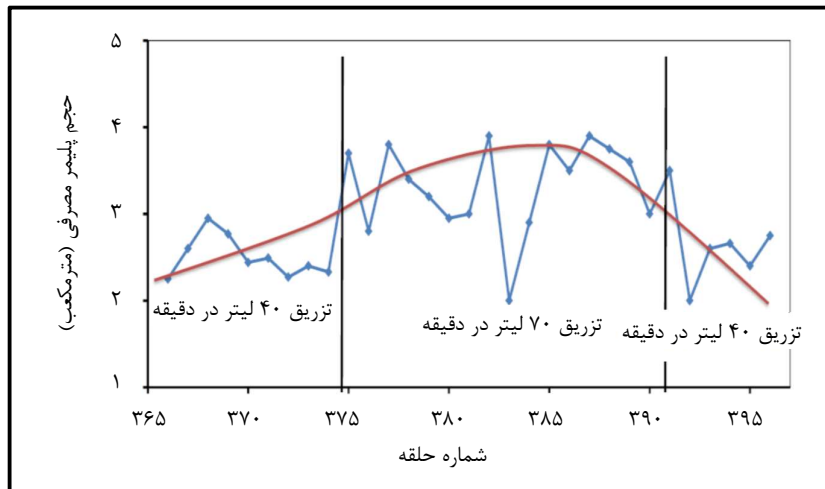
شکل ۱-۱۰- نمونه منحنی تغییرات تعداد تیغه مصرفی بر حسب موقعیت

- نیروی کل رانش (نیروی پیستون‌ها) و گشتاور دستگاه بر حسب زمان و طول (و شماره حلقه‌های پوشش) (شکل ۱-۱۱)



شکل ۱-۱۱- نمونه منحنی تغییرات گشتاور محرک ماشین بر حسب زمان

- میزان تزریق سیال (فوم، بنتونیت، ...) بر حسب طول (مطابق شکل ۱-۱۲)،



شکل ۱-۱۲- نمونه منحنی تغییرات مصرف پلیمر برحسب شماره حلقه‌های قطعات بتنی یا طول

در ماشین‌های حفاری ای پی بی، پارامترهای مهم عبارتند از فشار داخل محفظه، فشار سینه کار و فشار جک‌ها که می‌باید به دقت ثبت و تحلیل شوند.

۳-۹-۳-۱- تحلیل و تفسیر نتایج و تدوین دستور کار بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی کار دستگاه لازم است یک تیم مهندسی خبره و مجرب راهبری، با دریافت نتایج از اپراتور و تیم اجرایی و تحلیل آن‌ها، نسبت به بهینه‌سازی فشار کاری، سرعت پیشروی و سرعت چرخش کله حفاری با توجه به سایر ملاحظات نظیر کنترل نشست سطحی و مخاطرات زمین‌شناسی اقدام نموده و دستگاه را بر اساس این موارد و پارامترهای زیر با هدف حصول بالاترین بهره‌وری هدایت نمایند. پارامترها و عواملی که در عملکرد بهینه حفاری مکانیزه موثرند عبارتند از:

- نرخ خالص نفوذ (متر بر ساعت) که از توده سنگ کاملاً همگن تا خردشده در ضریب یک تا ۵ ضرب می‌شود. در توده سنگ همگن نیز مقدار نرخ نفوذ برحسب مقدار ضریب نرخ حفاری (دی.آر.تی)^۱ بسیار کم تا بسیار زیاد با ضریب یک تا ۲ اصلاح می‌گردد.
- سرعت پیشروی حفاری (متر یا نوبت بر ساعت یا روز یا هفته یا ماه) و سرعت پیشروی قطعه‌گذاری (متر یا نوبت یا حلقه کامل بر ساعت یا روز یا هفته یا ماه) با احتساب زمان وقفه برنامه‌ریزی شده کار ماشین (دقیقه) برای تعویض قطعات و تعمیرات دوره‌ای و زمان وقفه برنامه‌ریزی نشده کار ماشین (دقیقه) ناشی از شرایط ژئوتکنیکی پیش‌بینی نشده، هجوم آب و مچاله‌شوندگی، مشکلات پوشش بتنی، سامانه حمل و نقل و ماشین‌آلات و تجهیزات تخلیه و چرخه زمانی حفاری (کمینه، میانگین، بیشینه)،

۱-Drilling Rate Index (DRI)

- بهره‌وری ماشین (ساعت کار ماشین بر ساعات نوبت کاری بر حسب درصد)،
 - عمر تیغه‌های کله حفاری (ساعت یا حجم حفاری بر تعداد کله حفاری مصرفی) با توجه به فرسایش قطعات (زمان و تعداد تعویض قطعات در هر نوبت)،
 - هزینه اجرا.
- برای حصول عملکرد بهینه دستگاه از پنج شاخص فوق چهار شاخص اول باید بیشینه شده و هزینه اجرا کمینه گردد. ضریب بهره‌وری متعارف قابل قبول حدود ۲۵ درصد فرض می‌شود و در اجرا سعی می‌شود که با کنترل شاخص‌های فوق این میزان احراز شود.
- بهره‌وری مناسب به معنی رعایت برنامه مدیریت اجرایی می‌باشد و افزایش مقطعی سرعت پیش‌روی ممکن است باعث تبعات منفی برای دستگاه و ایجاد اختلال در سایر برنامه‌های تامین مالی، پشتیبانی و کنترل کیفی شود. لذا، هرگونه افزایش سرعت اجرایی باید با دیدگاه یکپارچه و لحاظ تمام این ملاحظات انجام پذیرد.

۱-۳-۱- رواداری‌های اجرایی مجاز و روش‌های کنترل آن

۱-۳-۱-۱- انواع رواداری‌های اجرایی و مقادیر مجاز آن‌ها

رواداری‌ها دارای سه نوع عمده زیر هستند:

- ۱- رواداری‌های هندسی ساخت^۱ قطعات بتنی و آب‌بندی، مشخصات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مصالح، ساخت و نصب آب‌بندها روی قطعات. این نوع رواداری‌ها در بخش پوشش مورد بررسی قرار خواهند گرفت.
- ۲- رواداری‌های اجرا^۲ شامل مسیر و امتداد حفاری و شیب و قوس، مقطع و قطر تونل، نصب قطعات بتنی، تزریق پشت قطعات بتنی.
- ۳- رواداری‌های اندازه‌گیری شامل حجم آب خروجی و نشتی به ازای واحد طول و در کل طول، نقشه‌برداری، ابزار دقیق و پایش که در فصل اندازه‌گیری و پایش به آن پرداخته می‌شود. مواردی مانند حجم آب خروجی و نشتی معمولاً جنبه حقوقی نیز داشته و در شرایط خصوصی یا خواسته‌های کارفرما در قراردادهای اجرایی گنجانده می‌شوند.

به طور کلی مقادیر مجاز رواداری‌ها در اجرای تونل بستگی به اهمیت و شرایط بهره‌برداری، طول، قطر و نوع ماشین حفاری دارد و در هر پروژه باید به طور خاص و در مرحله قبل از اجرا و انعقاد قرارداد با پیمانکار به عنوان ملاحظات طراحی برای اجرا در دفترچه مشخصات فنی خصوصی تعیین گردد. مقادیر پیشنهادی رواداری‌های مجاز در جدول

۱- Tolerance

۲- Imperfection

(۹-۱) ارائه گردیده‌اند. لازم به ذکر است که برای تونل‌های دو پوسته‌ای دقت اجرا کمی قابل کاهش یا رواداری‌ها کمی قابل افزایش است.

۳-۱-۲- چالش‌های رواداری‌ها و توصیه‌های اجرایی

عدم رعایت رواداری‌ها در ساخت و اجرای تونل مکانیزه انتقال آب می‌تواند مشکلات متعددی در اجرا و بهره‌برداری ایجاد نماید. از جمله این مشکلات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- پله شدن و ایجاد کاویتاسیون در زمان بهره‌برداری و جریان آب،
- نشست آب بیش از حد مجاز به داخل تونل و برعکس و عواقب زیست محیطی،
- اعمال بار غیرمتقارن پیش‌بینی نشده در صورت پرشدگی و تزریق ناهمسان پشت قطعات بتنی و شکست و ترک خوردگی قطعات،
- اعمال نیروهای غیرمتقارن و دارای خروج از مرکز جک‌ها به قطعات بتنی و شکستن لبه قطعات،

جدول ۹-۱- مقادیر پیشنهادی رواداری‌های مجاز تونل‌سازی مکانیزه

عنوان موضوع	پارامتر	قطر تونل کم‌تر از ۸ متر	قطر تونل بیش‌تر از ۱۰ متر	ملاحظات
مقطع حفاری تونل	قطر حفاری تونل	میلی‌متر ± 100	-	برای تونل‌های با طول بیش از ۱۰ کیلومتر کمی قابل افزایش است
مسیر تونل	شیب تونل	بسته به شیب هیدرولیکی		در تونل‌های تحت فشار قابل افزایش است
نصب قطعات بتنی	نیروی جک‌ها به قطعات بتنی	بر اساس کنترل‌های طراحی تعیین می‌شود		بسته به مشخصات تونل در طراحی بررسی و تعیین می‌شود
	قطر داخلی حلقه قطعات بتنی	میلی‌متر ± 10	میلی‌متر ± 15	
	قطر خارجی حلقه قطعات بتنی	میلی‌متر ± 10	میلی‌متر ± 15	
	محیط حلقه قطعات بتنی	میلی‌متر ± 30	میلی‌متر ± 45	
	فاصله حلقه‌ها از یکدیگر	میلی‌متر ± 10		
	بیضی شدن - قطر داخلی پوشش	$\% < 0.5$		بستگی به تعداد قطعات بتنی در هر حلقه نیز دارد
	جابجایی قطعات در صفحه تماس	میلی‌متر < 15	میلی‌متر $< 20-50$	برای پوشش‌های آب‌بند برای پوشش‌های غیر آب‌بند

- از بین رفتن آب‌بندی پوسته دنباله ماشین حفاری به علت اصطکاک بیش از حد روی سطح ناهموار پوشش بتنی،

- کاهش دوام و عمر مفید سازه.

برای کاهش این اثرات باید اثرات موارد محتمل و شایع در مرحله طراحی در نظر گرفته شده و تمهیدات لازم برای آن پیش‌بینی شود.

کنترل رواداری اجرایی بسته به نوع رواداری در سه مرحله، پیش‌بینی و کاهش، پایش و اقدامات متقابل انجام می‌شود. در مرحله کاهش، دو راهبرد پیش‌بینی موارد در طراحی و بررسی و لحاظ اثرات وقوع احتمالی و نیز به‌کارگیری روش‌های مناسب نظارت و کنترل کیفی و آزمایش‌های ساخت و اجرا مد نظر قرار می‌گیرد.

در مرحله پایش حین اجرا، اقدام بسیار مهم و ضروری، ارزیابی کیفی دقیق با اندازه‌گیری و کنترل رواداری‌ها با مقادیر مجاز قراردادی، قبل از تکمیل رینگ و نصب قطعه کلید و تایید آن برای ادامه کار است و افزایش سرعت پایش روی با رعایت کیفیت و رواداری‌های مجاز قابل قبول می‌باشد، چرا که بسیاری از اشکالات باقیمانده در این زمینه قابل جبران و بازگشت نخواهد بود. در صورت تجاوز از مقادیر مجاز یا برخورد به موارد مشکوک، گزارش کردن به طراح جهت بررسی اثرات باید انجام پذیرد. مستندسازی، نقشه‌برداری و ثبت و گزارش داده‌ها جهت بررسی از جمله اقدامات لازم در این زمینه می‌باشد.

یکی از چالش‌های اندازه‌گیری رواداری، تفکیک آن‌ها از تغییرشکل‌های پس از اجرا در مواردی نظیر بیضی شدن مقطع تونل می‌باشد. لذا، کنترل و ثبت به موقع رواداری‌ها و خطاهای اجرایی در این زمینه از اهمیت زیادی برخوردار است. در صورت تجاوز رواداری‌ها از مقادیر مجاز در مورد ساخت قطعات می‌توان بررسی‌ها و تمهیدات لازم را قبل از اجرا در دستور کار قرارداد. به عنوان مثال، تغییر ترتیب و روال نصب قطعات می‌تواند بخشی از اثرات رواداری‌های ساخت را در اجرا جبران نماید. برخی از موارد تجاوز از رواداری‌های مجاز مانند اضافه حفاری با انجام هزینه بیش‌تر قابل جبران است. برخی موارد نیز مانند اعمال نیروی نامتقارن یا بیش از حد به قطعات بتنی در صورت ایجاد شکستگی در آن‌ها نیاز به تعویض یا تعمیر و ترمیم قطعه خواهد داشت. مواردی مانند اعمال بار نامتقارن در صورت عدم تزریق کامل و پرشدن متقارن پوشش و در نتیجه اعمال بار نامتقارن به قطعات بتنی و ترک خوردگی آن‌ها ممکن است نیاز به طرح مقاوم‌سازی داشته باشد. مواردی مانند عدم رعایت شیب هیدرولیکی تونل ممکن است نیاز به بازنگری در طراحی هیدرولیکی تونل پیدا کند.

فصل ۲

روش‌های حفاری در سنگ‌های نرم و

رونهشته‌ها

۲-۱- انتخاب روش اجرایی مناسب

۲-۱-۱- معرفی عوامل و پارامترهای موثر در انتخاب روش اجرا

زمین نرم زمینی است که بدون نیاز به انفجار و به راحتی قابل حفاری باشد. در این زمین‌ها طراحی، ارتباط و وابستگی بیش‌تری با مسایل اجرایی دارد. انتخاب روش اجرا بر اساس اطلاعات به دست آمده از عوامل و پارامترهای ذکر شده در بخش ۱-۱-۱ بهینه می‌شود.

۲-۱-۲- روش‌های اجرایی ممکن در زمین نرم

انواع روش‌های اجرایی ممکن در زمین نرم عبارتند از:

- ۱- تونل‌سازی به روش کندوپوش^۱ که در زمین آبرفتی و برای حفرتونل کم عمق استفاده می‌شود.
 - ۲- تونل‌سازی به روش‌های متعارف حفاری مرحله‌ای مقطع با انواع ماشین حفربازویی^۲، ماشین حفارچندکاره^۳، ماشین حفرچکشی^۴ و بیل مکانیکی^۵.
 - ۳- تونل‌سازی به روش حفاری مکانیزه تمام مقطع برای انواع زمین با انواع تی.بی.ام سینه‌کار باز دوسپره^۶ سینه‌کار بسته با فشار دوغان و سینه‌کار بسته با فشار تعادلی زمین.
- در تونل‌سازی به روش‌های متعارف یا مکانیزه، معمولاً از رویکرد تونل‌سازی جدید اتریشی ای.ان.تی.ا استفاده می‌گردد، که در آن بر اساس پایش وضعیت زمین پس از حفاری و نگهداری و بر اساس نتایج ایزاردقیق، اقدام به بهینه سازی سامانه نگهداری می‌شود. همچنین، از این اطلاعات برای طراحی پوشش نهایی تونل هم استفاده می‌گردد. در شکل (۲-۱) کاربرد روش‌های حفاری مکانیزه و متعارف در انواع زمین نشان داده شده است.

۲-۱-۳- فرآیند تصمیم‌گیری و انتخاب روش اجرای برتر

در خصوص فرآیند تصمیم‌گیری و انتخاب روش اجرای برتر به جزئیات ارائه شده در فصل قبل در خصوص حفاری در زمین‌های سخت مراجعه شود. در این زمینه فرآیند کار مشابه بوده لکن خصوصیات و پارامترها و وزن تاثیر آن‌ها متفاوت خواهد بود.

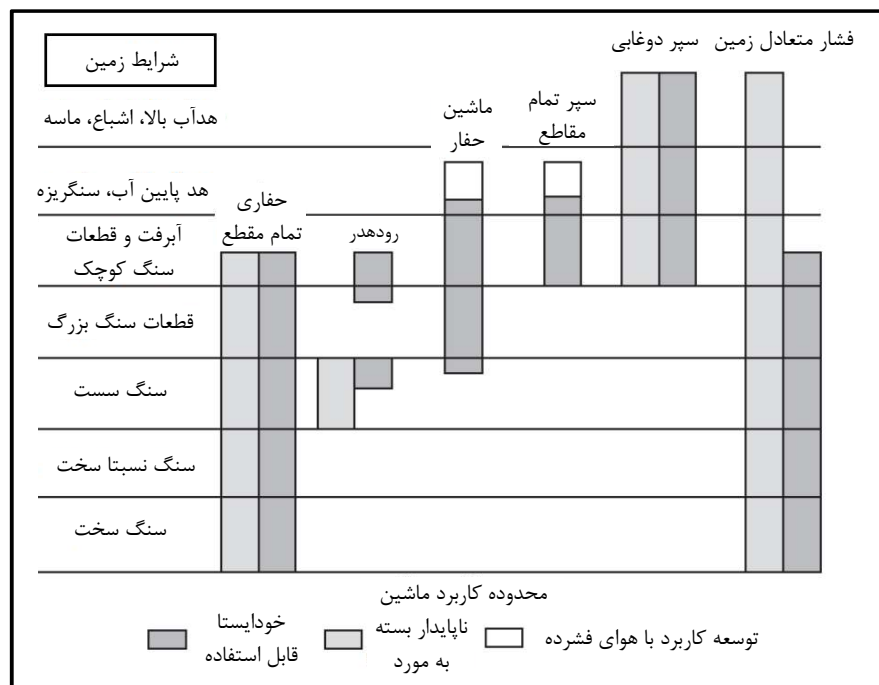
۱- Cut&Cover

۲- Roadheader (Milling & Ripping)

۳- Multi-Tool Miner

۴- Impact Hammer

۵- Backhoe



شکل ۲-۱- کاربرد انواع روش حفاری مکانیزه و نیمه مکانیزه در انواع زمین نرم و سخت^۱

۲-۲- روش کندوپوش

در زمین نرم و با عمق سربار کم تونل (حدود دو تا دو و نیم برابر قطر تونل) که در آن حفاری تونلی امکان‌پذیر نبوده یا غیراقتصادی باشد، از روش کندوپوش استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا مسیر تونل ترانشه‌برداری شده و پس از اجرای سازه تونل، روی آن خاکریزی انجام می‌شود که در محیط‌های شهری که نیاز به برقراری سریع ترافیک می‌باشد هم پرکاربرد است. این روش در تونل‌سازی مکانیزه، برای احداث چاه ورودی تونل جهت ورود ماشین حفاری یا دسترسی هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، این روش برای احداث کالورت‌های ورودی و خروجی تونل‌ها که به دلیل ملاحظات محیطی و پدافند غیرعامل پوشیده می‌شوند نیز به کار می‌رود.

۲-۲-۱- شناسایی معارضین و عوارض سطحی

اولین گام در اجرای روش کندوپوش در اختیار گرفتن محدوده زمین حفر ترانشه و حریم ایمنی و فضای مورد نیاز در اطراف آن برای عملیات اجرایی در مسیر تونل است. بدین منظور، لازم است معارضین و کاربران این محدوده، شناسایی شده و برای این تملک و عملیات اجرایی موقت آمادگی و موافقت داشته باشند. همچنین عوارض سطحی از قبیل جاده و خیابان، فضای سبز و درخت‌ها، خطوط لوله و شریان‌های حیاتی و سازه‌ها و مستحذات احتمالی در این فضا باید تعیین

۱- Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines, 2000 (ITA).

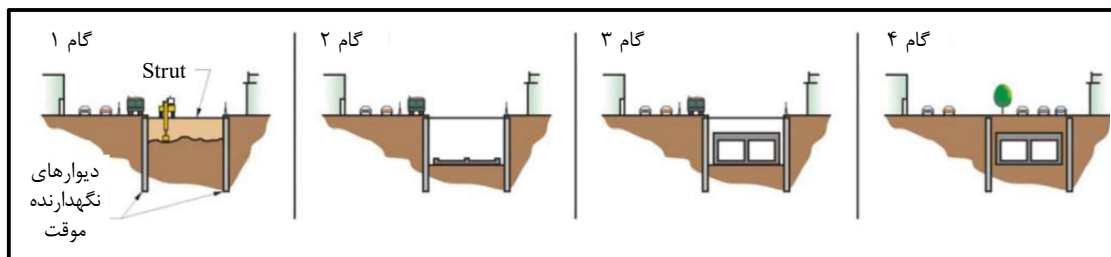
تکلیف شده و به طور موقت یا دائم تا پایان عملیات اجرایی جابجا، نگهداری یا دارای مسیر جایگزین شوند. این تملک ممکن است باعث نیاز به پرداخت هزینه‌های اجاره یا عدم‌النفع به مالکین و کاربران هم بشود، بنابراین کاهش زمان‌بندی اجرا به حداقل ممکن و عدم انحراف از آن در این موارد، اهمیت قابل توجهی خواهد داشت.

۲-۲-۲- انتخاب روش حفاری (گودبرداری)

دو راهکار کلی برای حفاری به روش کندوپوش وجود دارد که عبارتند از روش پایین به بالا^۱ و روش بالا به پایین^۲. انتخاب روش اجرا و هندسه ترانشه بستگی به محدودیت فضا و زمان دارد. مقطع حفاری اولیه در این نوع تونل‌سازی معمولاً به شکل مستطیلی یا دوزنقه‌ای است. البته در روش پایین به بالا می‌توان در داخل آن پوشش ثانویه مقطع به شکل دلخواه مثلاً دایره هم ایجاد نمود. از این روش برای کالورت‌های سرپوشیده و یا تونل‌های مستطیلی (باکس) استفاده می‌شود.

۲-۲-۲-۱- روش اجرای کندوپوش پایین به بالا

روش کندوپوش پایین به بالا در مواردی که محدودیت در اختیار گرفتن زمین به طور موقت و دائم وجود ندارد و کنترل جابجایی دیوارهای نگهدارنده اهمیت زیادی ندارد مورد توجه قرار می‌گیرد مطابق شکل (۲-۲).



شکل ۲-۲- روش اجرای کندوپوش پایین به بالا

این روش شامل مراحل زیر است:

- اجرا و نصب دیواره‌های نگهدارنده موقت مانند شمع‌ها، سپر، دیوارهای بتنی یا تزریقی دوجابی یا شیب‌های پایدار،
- زهکشی و خشک‌سازی ترانشه در صورت وجود آب،
- حفاری و نصب اجزای نگهدارنده موقت برای حفظ پایداری دیوارها حین پیشرفت حفاری،
- اجرای دال کف تونل،
- اجرای دیوارها و سقف همراه با آب‌بندی سازه در صورت نیاز،

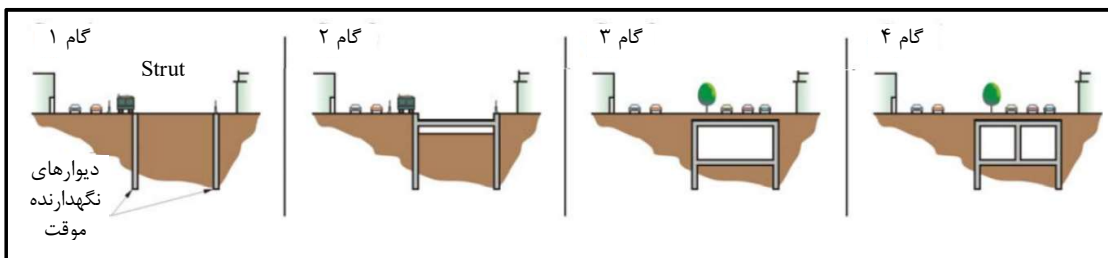
۱- Bottom-up

۲- Top-down

- خاکریزی و پرکردن ترانشه تا سطح زمین و تسطیح.
- مزایای این روش عبارتند از:
 - ساده و متداول بودن مراحل اجرایی،
 - در دسترس بودن فضای داخلی برای عملیات اجرایی و کاهش زمان اجرا،
 - هزینه و ریسک اجرای نسبتاً کم،
 - امکان اجرای آب‌بندی و زهکشی در سطح و فضای بیرونی سازه.
- معایب این روش هم عبارتند از:
 - نیاز به فضای نسبتاً بیش‌تر در سطح در مقایسه با روش بالا به پایین،
 - نیاز به زمان نسبتاً طولانی تا برگشت شرایط سطح زمین به حالت اولیه،
 - نیاز به پایدارسازی شیب حین اجرا و جابجا نمودن اجزا و شریان‌های حیاتی موجود در محدوده حفاری،
 - نیاز به زهکشی مستمر داخل ترانشه که ممکن است برای سازه‌های اطراف مشکلاتی ایجاد نماید.

۲-۲-۲- روش اجرای کندو پوش بالا به پایین

این روش در شرایطی که محدودیت زمانی در اختیار داشتن زمین وجود دارد و حرکت دیواره برای کنترل تغییر مکان سازه‌های مجاور باید محدود گردد، کاربرد بیش‌تری دارد. شکل (۳-۲)



شکل ۳-۲- روش تونل‌سازی کندوپوش بالا به پایین

- با توجه به شکل (۳-۲) اجرای این روش شامل مراحل اصلی زیر است:
- اجرا و نصب دیواره‌های تونل با شمع‌های دیواری یا دیوارهای بتنی یا تزریقی دوغابی،
 - زهکشی و خشک‌سازی ترانشه در صورت وجود آب،
 - حفاری تا تراز زیرین دال فوقانی تونل،
 - نصب و اجرا و آب‌بندی دال فوقانی و اتصال آن به دیواره‌های تونل،
 - خاکریزی و پرکردن ترانشه روی دال فوقانی تا سطح زمین و تسطیح و آماده‌سازی برای بهره‌برداری و تردد،
 - حفاری و تخلیه قسمت داخلی تونل همراه با مهار دیواره‌ها تا رسیدن به تراز زیر دال کف،
 - اجرای دال کف و اتصال آن به دیواره‌ها همراه با آب‌بندی سازه در صورت نیاز،

- اجرا و نصب دیوارهای پوشش داخلی تمام شده با کیفیت سطح و زبری مورد نیاز.
 - مزایای این روش عبارتند از:
 - بازگشت سریع شرایط سطح زمین به حالت اولیه،
 - امکان استفاده از دیوارهای نگهبان به عنوان دیوارهای دائمی و در نتیجه، کاهش هزینه تونل،
 - عملکرد دال سقف به عنوان مهار جانبی دو دیوار و اقتصادی‌تر شدن دیوارها،
 - نیاز به فضای نسبی کم‌تر برای عملیات اجرایی در سطح،
 - اجرای راحت‌تر دال سقف روی زمین بدون نیاز به قالب‌بندی،
 - امکان همپوشانی عملیات اجرایی،
 - معایب این روش عبارتند از:
 - عدم امکان اجرای غشای آب‌بندی خارجی،
 - پیچیدگی و صعوبت اجرایی اتصالات دال سقف و خصوصاً کف به دیوارها،
 - امکان بیش‌تر نشت آب از اتصالات دال به دیوار و صعوبت آب‌بندی آن‌ها خصوصاً در کف،
 - ریسک عدم رعایت رواداری‌های اجرای دیوارهای نگهبان دائمی در فضای داخلی تونل،
 - سرعت حفاری کم‌تر به دلیل محدود بودن دسترسی به ورودی‌ها و خروجی‌ها یا چاه‌ها،
 - زمان و هزینه اجرایی بیش‌تر نسبت به روش کندوپوش،
 - محدودیت اجرای موازی دال کف هم‌زمان با حفاری.
- با توجه به نکات فوق و بر اساس شرایط پروژه می‌توان نسبت به انتخاب روش مناسب حفاری اقدام نمود.

۳-۲-۲- پایدارسازی دیواره

۱-۳-۲-۲- رویکردهای پایدارسازی دیواره

پایدارسازی دیوارها در روش کندوپوش با سه رویکرد زیر انجام می‌شود:

- شیب‌های ترانشه باز، در شرایطی که فضای کافی در سطح در اختیار باشد با تعبیه شیب‌های طبیعی پایدار.
- موقت، در شرایطی که فضای کافی در سطح در اختیار نباشد، با عملکرد موقت و بدون مشارکت در باربری نهایی و معمولاً در شیب نزدیک به قائم یا قائم با سپرکوبی، شمع‌کوبی، دیواره تزریقی دوغابی و یا شمع‌های متناوب با همپوشانی یا مماس به یکدیگر صورت می‌پذیرد.
- دائم، در شرایطی که فضای کافی در سطح در اختیار نباشد، با عملکرد دائم و با مشارکت در باربری نهایی و معمولاً در شیب نزدیک به قائم یا قائم با دیواره دوغابی، شمع متناوب با همپوشانی یا مماس به یکدیگر می‌باشد.

۲-۳-۲- روش‌های پایدارسازی دیواره

روش‌های پایدارسازی دیواره که با توجه به ملاحظات فنی، اجرایی و اقتصادی بررسی و انتخاب می‌شوند، عبارتند از:

- سپرکوبی ساده یا مرکب با مقاطع و ورق‌های فولادی^۱
- دیوار- ستون مهار شده یا بدون مهار^۲
- شمع- دیوار مهار شده یا بدون مهار^۳
- شمع‌های دارای همپوشانی^۴ یا شمع‌های مماس به یکدیگر^۵
- میل مهار یا میخ کوبی^۶
- دیوار دیافراگمی دوغابی^۷

۲-۴-۲- اجرای سازه نگهبان

مراحل اجرای سازه نگهبان که معمولاً به صورت حفاری و پیش‌روی مرحله‌ای صورت می‌پذیرند، عبارتست از:

- شیب‌های ترانشه باز، به روش‌های متداول ژئوتکنیکی با شیب طبیعی، مهار، میخ‌زنی و پایدارسازی می‌شوند.
- اجرای سپرکوبی، مشابه فعالیت‌های متداول در سازه نگهبان با دستگاه سپرکوبی می‌باشد. در صورت نیاز به پایدارسازی سپر با مهار، این اجزا حین حفاری در روش پایین به بالا روی دیوار نصب می‌شوند.
- شمع دیوار یا دیوار ستون مهار شده یا بدون مهار، که مراحل اجرای آن شامل اجرای شمع یا کوبیدن ستون- شمع فولادی شیاردار یا پروفیل استاندارد بال پهن در فواصل طراحی شده، حفاری مرحله‌ای و نصب قطعات دیوار در پشت شمع‌ها یا داخل شیارهای ستون فولادی در روش پایین به بالا و نصب مهار یا تیرهای رابط در صورت نیاز برای افزایش ظرفیت باربری جانبی دیوار می‌باشد.
- شمع‌های دارای همپوشانی و شمع‌های مماس با یکدیگر، که مراحل اجرای آن شامل حفاری شمع‌های سری اول با یا بدون محفظه، قراردادن قفسه فولادی مسلح کننده و بتن‌ریزی و سپس اجرای شمع‌های ثانویه به صورت مسلح یا نامسلح می‌باشد. اجرای شمع می‌تواند به روش اختلاط عمیق خاک^۸ و از جمله جت گروت^۹ هم انجام شود.

۱- Sheet Pile

۲- Lagging

۳- Soldier Pile

۴- Secant Pile

۵- Tangent Pile

۶- Ground Anchoring/Nailing

۷- Slurry Diaphragm

۸- Deep Soil Mixing (DSP)

۹- Jet Grout

- مہار یا میخ‌کوبی، که به روش‌های متداول ژئوتکنیکی اجرا می‌شود و علاوه بر استفاده به تنهایی، در هر یک از روش‌های نگهداری دیوار قابل اضافه شدن است.
- دیوار دیافراگمی دوغابی، که در زمین‌های سست و ریزشی یا آبدار گزینه مناسبی می‌باشد و اجرای آن بسته به سختی خاک با بیل منقاری^۱ یا هیدروفرز^۲ انجام می‌شود. مراحل اجرای آن شامل حفاری مرحله‌ای با دوغاب متعادل کننده نظیر بنتونیت، نصب قفسه فولاد تسلیح کننده و بتن‌ریزی از پایین با بالا با لوله ترمی و پمپ با بتن مخصوص می‌باشد. اجرای مرحله‌ای آن می‌تواند به صورت یک جهت با حفاری تدریجی از یک طرف و یا به صورت متناوب مانند روش اجرای شمع‌های دارای همپوشانی صورت پذیرد.

۲-۵- اجرای سازه اصلی (روش قالب‌بندی و بتن‌ریزی)

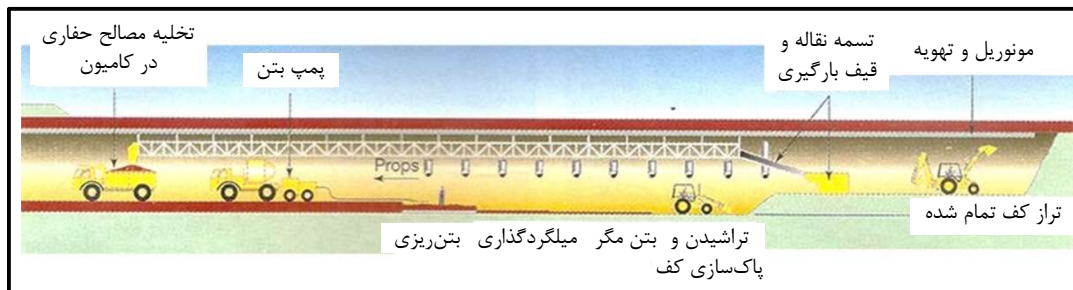
- اجرای سازه در روش پایین به بالا می‌تواند با بتن‌ریزی درجا یا قطعات پیش‌ساخته یا نیمه پیش‌ساخته به صورت کامل یا قطعه‌ای دایره‌ای یا مستطیلی و مرکب بتن و فولاد انجام شود. مراحل کار در این روش به صورت زیر است:
- ترازبندی و اجرای بتن مگر کف با رعایت تثبیت بستر و کنترل تراکم و ظرفیت باربری مجاز مورد نظر در طراحی،
- قالب‌بندی و میلگردگذاری و بتن‌ریزی دال کف به صورت متوالی به تناسب حفاری با ماشین و پمپ بتن که در این زمان محدودیت عبور از این مسیر وجود خواهد داشت،
- قالب‌بندی و میلگردگذاری دیواره‌ها با رعایت فاصله مورد نیاز از دیواره نگهدارنده یا استفاده از دیواره نگهدارنده به عنوان قالب و سپس بتن‌ریزی با لوله و پمپ. معمولاً به دلیل ارتفاع قابل توجه دیوار امکان استفاده از باکت محدود به قسمت بالایی بتن‌ریزی است. قالب‌بندی دیواره و سقف می‌تواند با قالب تونلی به صورت یکجا هم انجام شود،
- قالب‌بندی و میلگردگذاری و بتن‌ریزی دال سقف. در صورت شمع‌بندی امکان عبور و مرور از مسیر داخلی محدود می‌شود. برای جلوگیری از انسداد مسیر می‌توان از قالب تیری زیرسقف یا دال پیش‌ساخته هم استفاده نمود.
- مراحل قالب‌بندی و بتن‌ریزی در روش بالا به پایین پس از اجرای دیوار و نصب تیرهای رابط به صورت زیر است:
- پاک‌سازی و ترازبندی و اجرای قالب یا پوشش کف دال فوقانی، میلگردگذاری، برقراری اتصال با دیواره‌ها با استفاده از صفحات مدفون کار گذاشته شده در دیواره‌ها یا میلگردهای انتظار و کلیدبرشی یا کاشت میلگرد و در نهایت بتن‌ریزی دال فوقانی. قطعات دال می‌تواند به صورت نیمه پیش‌ساخته نیز به کار رود. همچنین، می‌توان برای حفظ دسترسی، بازشوهایی در دال سقف تعبیه کرد یا از سامانه تیردال استفاده نمود.
- اجرای بتن مگر و قالب‌بندی و میلگردگذاری و بتن‌ریزی دال کف به صورت متوالی به تناسب حفاری با ماشین

۱- Clamshell

۲- Hydrofraise

و پمپ بتن که در این زمان محدودیت عبور از مسیر وجود خواهد داشت. از این رو، معمولاً مطابق شکل (۴-۲) از تسمه نقاله سقفی متحرک یا خریای متحرک برای تخلیه مصالح حفاری برای اجرای هم‌زمان یا در صورت محدود بودن فضا از بازشوهای متعدد در سقف استفاده می‌شود. اتصال دال کف به دیوار نیز مشابه دال فوقانی انجام می‌شود،

– اجرای پوشش دیوار داخلی تمام شده یا اصلاح سطح دیوار برای بهره‌برداری.



شکل ۴-۲- مراحل اجرایی قالب‌بندی و میلگردگذاری و بتن‌ریزی در روش بالا به پایین با روش عملیات هم‌زمان با خریای متحرک

۲-۲-۶- چالش‌ها و توصیه‌های اجرایی روش کندوپوش

۲-۲-۶-۱- کنترل تراوش آب و زهکشی حین اجرا

در نواحی با سطح آب زیرزمینی بالا، زهکشی و خشک‌سازی، چالش بزرگ روش کندوپوش است. راهکار مناسب این مساله با توجه به مشخصات زمین و حجم آب انتخاب می‌شود و می‌تواند طیفی از روش‌های ساده، مانند زهکشی، ایجاد حوضچه و پمپاژ تا روش‌های مشکل‌تر، مانند چاه‌های زهکش را در بر بگیرد. این مشکلات در روش پایین به بالا به علت طولانی‌تر بودن زمان اجرا حادتر است. در پایین آوردن سطح آب لازم است توجه به آبیاری فضای سبز و نیاز زیست محیطی محدوده هم صورت پذیرد.

برخی ملاحظات و توصیه‌های اجرایی در این خصوص برای کاهش مشکلات مربوط به ورود آب عبارتند از:

- کاهش زمان اجرا و کاهش طول ترانشه اجرایی برای کاهش آب ورودی،
- توجه به اثرات جابجایی و نشست ناشی از زهکشی محیط و پایین آوردن قابل ملاحظه سطح آب زیرزمینی،
- آب‌بند کردن دیواره‌های نگهبان تا حد ممکن که در روش بالا به پایین با دیوارهای دائمی عملی است و در روش پایین به بالا با استفاده از دیوارهای دوجایی یا سپرهای فلزی امکان‌پذیر می‌باشد.
- استفاده از قطعات و روش‌های پیش‌ساخته سازی،
- تنظیم زمان‌بندی اجرایی برای کار در فصول خشک،
- توجه به آلوده نشدن آب‌های زهکشی و پمپ شده با روغن و سایر مواد برای امکان استفاده مجدد در محیط،
- شناسایی نواحی و جریان‌های زیرزمینی آبدار و انحراف آن‌ها در صورت امکان. در این خصوص با عنایت به

تبعات بالا و بعضاً جبران ناپذیر قطع این مسیرهای طبیعی، توجه ویژه به جریان‌های آب زیرزمینی مانند قنات و چشمه باید مبذول شود.

در شکل (۵-۲) خشک‌سازی ترانشه حفاری به روش چاه‌های زهکشی نشان داده شده است.



شکل ۵-۲- خشک‌اندازی ترانشه حفاری به روش چاه‌های زهکشی

۷-۲-۲- روش آب‌بندی و عایق‌بندی درزهای اجرایی

آب‌بندی درزهای اجرایی بستگی به روش اجرا و نوع درز و تراز آب زیرزمینی دارد. معمولاً در روش بتن‌ریزی درجا از درز اجرایی بدون قطع میلگرد در فواصل بین حدود ۶ تا ۳۰ متر با تعبیه نوار آب‌بند داخلی یا خارجی استفاده می‌شود. در روش پیش‌ساخته، نیاز به آب‌بندی درز انقباضی خواهد بود. برای آب‌بندی راهکارهای زیر وجود دارد:

- ۱- استفاده از بتن آب‌بند با تعبیه نوار آب‌بندی داخل بتن در درزهای اجرایی و آب‌بندی درزهای انقباضی و اجرایی با روش‌های درزبندی خارجی یا داخلی با نوار پوششی، تزریق مواد آب‌بند یا مواد درزبندی پلیمری،
- ۲- آب‌بندی خارجی کامل و بسته با غشای آب‌بند قیری یا پلیمری که در روش پایین به بالا عملی‌تر است،
- ۳- آب‌بندی داخلی کامل و بسته با پوشش یا غشای آب‌بند پلیمری، حرارتی یا رزین پاششی.

آب‌بندی داخلی و خارجی بسته کامل ممکن است در حین اجرا و بهره‌برداری دچار آسیب شوند و لذا باید به‌دقت تحت مراقبت قرار گیرند. همچنین وصله‌های این غشاها نقطه ضعف عمومی آن‌ها محسوب می‌شوند و باید تحت کنترل کیفی بالایی اجرا شوند که در فصل پوشش تونل به جزئیات آن پرداخته می‌شود. در مورد مواد درزبندی یا آب‌بندی داخلی، رعایت مسائل زیست‌محیطی و عدم کاربرد مواد سمی نظیر پلی‌اورتان‌ها و مواد شیمیایی حاوی سیانور برای جلوگیری از آلودگی آب داخل تونل در حین بهره‌برداری ضروری می‌باشد.

۸-۲-۲- روش کنترل ذرات معلق (جلوگیری از آلاینده‌گی محیط زیست)

برای کنترل ذرات معلق حین حفاری به روش پوش و کند از روش‌های تهویه متداول تونل و عمدتاً به صورت دمیدن هوا به سمت سینه‌کار و در جبهه حفاری از روش مرطوب‌سازی با پاشش آب یا بعضاً مکش گرد و غبار استفاده می‌شود.

۲-۹-۲- ایزار بندی و کنترل نشست و کنترل تغییر شکل سازه‌های مجاور و بهسازی برای ایمن سازی (در

صورت نیاز)

روش تونل‌سازی کندوپوش نسبت به روش‌های متداول تونل‌سازی تأثیرات بیش‌تری بر محیط اطراف خود و نشست سازه‌های مجاور می‌گذارد. این مساله به طور عمده می‌تواند ناشی از تغییر شکل و جابجایی دیوار نگهبان باشد که تا قبل از نصب مهاربندها و تیرهای رابط اتفاق می‌افتد. همچنین در محیط‌های با تراز آب زیرزمینی بالا، نشست تحکیمی ناشی از زهکشی محیط و خروج آب از اطراف ترانشه نیز باعث افزایش جابجایی‌ها در سازه‌های اطراف می‌گردد. میزان این اثرات بر سازه‌های اطراف بستگی به شرایط سایت و مشخصات سازه‌ها دارد و با توجه به پیچیدگی تحلیل آن اغلب از روش‌های پایش، برای مدیریت این اثرات بهره‌گیری می‌شود. پایش نشست‌ها با روش‌های زیر انجام می‌پذیرد:

- ۱- نصب ایزار نشست‌سنج و تغییر مکان‌سنج و دوران‌سنج روی سازه‌ها،
 - ۲- نقشه‌برداری زنده و خودکار یا منظم در سایت،
 - ۳- همگرایی‌سنجی و دوران‌سنجی دیوارهای نگهبان،
 - ۴- بازرسی منظم و بررسی اثرات ثانویه.
- راهکارهای کاهش و کنترل اثرات تغییر شکل‌ها به صورت زیر می‌باشند:
- استفاده از دیوارها با سختی جانبی بیش‌تر،
 - افزایش تعداد مهارها و پشت بندها و تیرهای رابط،
 - استفاده از سامانه‌های دیواری که کم‌تر وابسته به نصب مهاربندها می‌باشند،
 - اصلاح و بهسازی خاک اطراف قبل از حفاری،
 - تقویت پی و سیستم انتقال بار به زمین در سازه‌های اطراف با روش‌هایی نظیر پی‌بندی از زیر^۱،
 - به کاربردن سامانه پایش پویا و هوشمند،
 - برنامه‌ریزی و آمادگی برای اقدامات متقابل در صورت فرارفتن مقادیر جابجایی از حدود مجاز.

۲-۱۰-۲- کنترل رواداری‌های مجاز اجرایی و روش کنترل

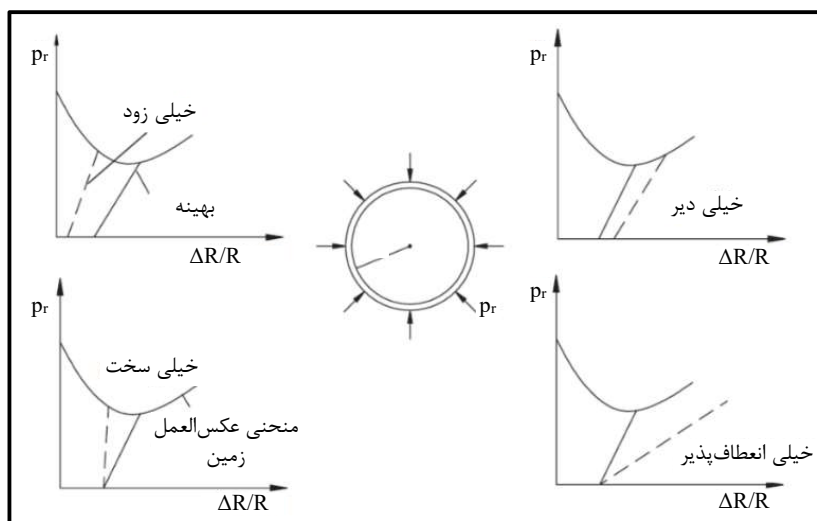
رواداری‌های مجاز اجرایی و روش کنترل آن در روش کندوپوش در سازه تونل مشابه روش‌های دیگر می‌باشد. اما در بخش اجرای دیواره با توجه به امکان هم‌گرایی و کج شدن دیوار لازم است با استفاده از روش‌هایی که برای کنترل نشست ذکر شد و کنترل دوران و کج شدگی دیوار با انحراف‌سنج یا دوران‌سنج، پایش لازم در این زمینه صورت بگیرد. معمولاً در شرایطی که از تیرهای رابط و مهاربند استفاده نمی‌شود و احتمال تغییر شکل‌های قابل توجه هم انتظار می‌رود،

۱- Underpinning

فاصله رواداری برای عدم تداخل دیوار با محیط داخلی تمام شده تونل در نظر گرفته می‌شود. در روش بالا به پایین با توجه به اجرای پوشش ثانویه دیوار، لازم است رواداری‌های اجرایی ناشی از بیرون‌زدگی موضعی هم در دیوار و هم در قسمت تحتانی سقف در نظر گرفته شده یا در زمان اجرای پوشش نهایی دیوار، در صورت نیاز موارد بیش از حد مجاز تراشیده شوند.

۲-۳- تونل‌سازی با رویکرد جدید اتریشی ان.ای.تی.ام

روش جدید تونل‌سازی اتریشی^۱ یک رویکرد اجرایی برای تونل‌سازی در مناطقی که از همگنی و پیوستگی کافی برخوردار نیستند، محسوب می‌شود. در روش ان.ای.تی.ام تثبیت تونل با آزادسازی کنترل شده تنش صورت می‌گیرد و از نتایج آن برای بهینه‌سازی روش استفاده می‌گردد. این روش، تا حدودی به صورت یک نگهدارنده فوری عمل می‌کند و از سوی دیگر انعطاف‌پذیری کافی برای آزادسازی تنش از طریق تغییر شکل شعاعی را فراهم می‌آورد و به این ترتیب توسعه تنش برشی در پوشش بتن‌پاشیده سقف قوسی، به حداقل کاهش می‌یابد. روش جدید تونل‌سازی اتریشی برای زمین نرم که هم قابلیت حفاری دستی و هم ماشینی را دارد، بسیار مناسب است. پایش وضعیت و شرایط، نقش مهمی در زمان بندی و اجرای نگهدارنده ثانویه در این روش ایفا می‌نماید؛ به طوری که مطابق شکل ۲-۶ نصب نگهدارنده در زمان درست، بار وارد بر آن را به حداقل ممکن می‌رساند و منجر به طراحی ایمن‌تر و اقتصادی‌تر می‌شود. در صورتی که نگهدارنده زود نصب شود، نیروی زیادی از زمین به آن وارد می‌شود و اگر خیلی دیر نصب شود، اجازه تغییر شکل‌های زیادی به زمین داده و ممکن است به ریزش یا ناپایداری منتهی گردد.



شکل ۲-۶- انتخاب زمان بندی بهینه اجرای نگهداری و تنظیم سختی نگهدارنده در روش تونل‌سازی جدید اتریشی

مزایای روش ان‌ای.تی.ام عبارتند از:

- امکان اجرای تونل با مقطع دایره‌ای و غیر دایره‌ای (نعل اسبی، بیضی، طاقی و ...)
 - عدم نیاز به ماشین‌آلات حفاری خاص،
 - امکان تقسیم تونل به قطعات مختلف جهت ایجاد جبهه کاری بیش‌تر برای بالا بردن سرعت اجرای تونل،
- عیب روش ان‌ای.تی.ام هم عبارت است از سرعت نسبی کم پیش‌روی در ابتدای تونل که البته با شناخت زمین و بهینه‌سازی سیستم نگهداری، سرعت به طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند افزایش یابد. جهت مطالعه بیش‌تر هوک و براون^۱ در ۱۹۸۰ جداول و نمودارهای طراحی سیستم نگهداری در روش حفاری جدید اتریشی را توسعه و ارائه داده‌اند.

۲-۴- تونل‌سازی به روش‌های حفاری متعارف و مرحله‌ای

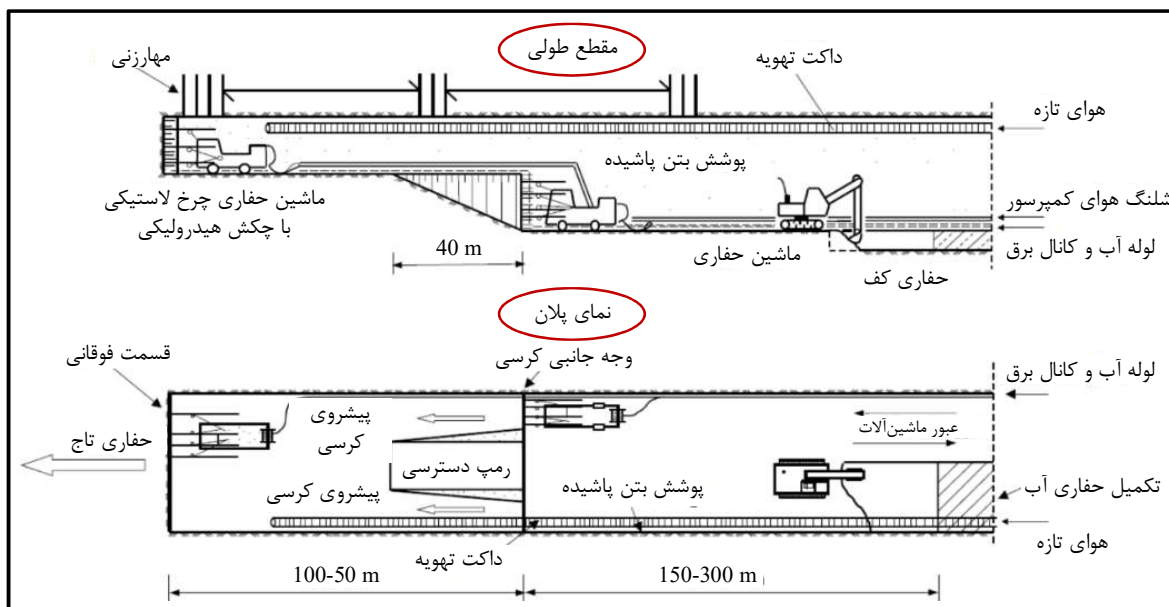
۲-۴-۱- روش اجرایی حفاری مرحله‌ای تونل

در برخی از مقاطع خصوصاً با قطر نسبتاً بیش‌تر، با توجه به وضعیت زمین‌شناسی و شرایط آب‌های زیرزمینی، ضروری است برای کنترل شرایط پایداری تونل تمهیداتی به منظور کاهش سطح مقطع حفاری، مانند اجرای چند مرحله ای آن در نظر گرفته شود. البته مرحله‌بندی حفاری تونل از نظر اجرایی محدودیت‌هایی ایجاد می‌نماید چرا که باید پس از هر مرحله حفاری، در صورت نیاز، نگهداری اولیه انجام شده و سپس حفاری ادامه یابد.

یکی از مهم‌ترین الگوها در این زمینه روش حفاری دو مرحله‌ای (تاپ و بنچ^۲) می‌باشد که جریات آن در شکل (۲-۷) نشان داده شده است. انتخاب مراحل و زمان‌بندی حفاری و نگهداری با توجه به منحنی رفتاری زمین می‌باشد. تعداد و توالی مراحل حفاری و ابعاد و هندسه آن‌ها بستگی به شرایط زمین و سطح مقطع تونل دارد. اجرای نگهدارنده در هر قسمت باید به موقع و با سختی بهینه باشد، از این رو نگهدارنده معمولاً ترکیبی از میل مهار یا پیچ سنگ و بتن پاشی است که قابلیت لازم را برای تنظیم انعطاف‌پذیری داشته باشد. پیش‌روی حفاری چندمرحله‌ای عموماً از بخش کوچکی از مقطع شروع شده و در تمام مقطع و در طول توسعه می‌یابد.

۱- Hoek, E. & Brown, E.T. (1980) Underground Excavations in Rock. Inst. Min. 537 Metall, London.

۲- Top & Bench



شکل ۲-۷- مقطع طولی و نمای پلان حفاری مرحله‌ای در مقاطع متوسط و بزرگ

بنابراین، موارد زیر در این روش باید مشخص شوند:

- ۱- توالی و زمان‌بندی حفاری در مقطع،
 - ۲- توالی و زمان‌بندی پیش‌روی در طول و ماشین‌آلات و روش انجام،
 - ۳- زمان‌بندی نصب نگهدارنده در هر قسمت و نحوه یکپارچه‌سازی آن،
 - ۴- مشخصات نگهدارنده در هر قسمت و روش اجرای آن،
 - ۵- آرایش سامانه تهویه و تخلیه و پشتیبانی (آب و برق).
- حسب شرایط و امکانات و فناوری اجرا روش چند مرحله‌ای به اشکال مختلف توالی حفاری در کشورها و پروژه‌ها اجرا شده است. هر یک از این روش‌ها ممکن است در شرایطی بهینه باشند و از این رو تنها به عنوان الگوی کلی پیشنهاد می‌شوند و انتخاب نهایی با بررسی و مقایسه ریسک، هزینه و زمان اجرا با توجه به شرایط انجام می‌پذیرد.

مراحل انتخاب الگوی مناسب عبارتند از:

- ۱- انتخاب الگوی عمومی حفاری بر اساس شرایط زمین در طول مورد نظر تونل و چالش‌های احتمالی،
- ۲- تعریف سناریوهای حفاری بر اساس توالی و زمان‌بندی‌های مختلف،
- ۳- تحلیل و برآورد میزان پوشش نگهدارنده بر اساس منحنی پایداری زمین در سناریوها،
- ۴- برآورد سرعت پیش‌روی و هزینه گزینه‌های مختلف،
- ۵- برآورد ریسک‌ها نظیر میزان نشست سطحی، میزان اثرات همگرایی و میزان پلاستیک شدن نواحی،
- ۶- مقایسه چند معیاره سناریوها و انتخاب سناریوی برتر برای طول مورد نظر تونل.

۲-۴-۲- انتخاب ماشین‌آلات حفاری و تحکیم متعارف

در روش‌های متعارف حفاری، ماشین‌آلات مختلفی به شرح زیر استفاده می‌شوند:

- ۱- ماشین‌آلات پیش تحکیم شامل تزریق و فورپولینگ حسب نیاز به پیش تحکیم،
- ۲- ماشین‌آلات حفاری زمین مانند ماشین حفر بازوئی (یا حفر گمانه انفجاری)، ماشین حفاری چکشی و ماشین‌آلات بارگیری و تخلیه مانند لودر یا کج بیل و کامیون،
- ۳- ماشین نصب میل مهار و پیچ سنگ و تزریق آن (ماشین حفر یا نصاب) یا جرثقیل سبدها برای عملیات دستی،
- ۴- ماشین‌آلات بتن پاشی تر مانند تراک میکسر حمل بتن، پمپ یا کمپرسور بتن پاش دستی و یا ربات بتن پاش و خشک شامل پمپ و کامیون حمل و مخزن مصالح و آب.

ملاحظات انتخاب این ماشین‌آلات عبارتند از:

- ۱- تعیین نیاز به پیش تحکیمی در حفاری،
- ۲- مقطع هندسی و فضای تونل و ابعاد قسمت‌های مختلف حفاری و نحوه استقرار ماشین‌آلات در جبهه حفاری،
- ۳- شرایط زمین و میزان سختی آن و تعیین نیاز به انفجار یا ماشین حفر یا بیل مکانیکی،
- ۴- نوع پوشش نگهدارنده و تعیین نیاز به نوع پیچ سنگ، نوع میل مهار، نوع بتن پاشی و قاب یا لیس،
- ۵- سرعت حفاری مورد نیاز و حجم تخلیه مصالح.

۲-۴-۳- حفاری با ماشین‌های حفر بازویی

در زمین‌های نرم برای حفاری تمام مقطع یا مرحله‌ای، از ماشین‌های حفر بازویی با دو مکانیزم حفاری چرخش محوری (رودهدر^۱) و عرضی (درام کاتر یا کله گاوی^۲) استفاده می‌شود. این ماشین‌ها در انواع و مدل‌ها و ظرفیت‌های مختلفی ساخته شده و به کار گرفته و دسته‌بندی آن‌ها بر حسب وزن و قدرت ارائه می‌شود. انتخاب ماشین مناسب بر اساس نرخ حفاری مورد نیاز و مقاومت فشاری تک محوره خاک یا سنگ انجام می‌پذیرد. برخی از انواع ماشین حفر بازویی قابلیت‌های مختلفی را به طور هم‌زمان دارا هستند که حسب نیاز روی آن نصب می‌شود و به آن ماشین چند منظوره^۳ گفته می‌شود. در تونل با مقاطع باریک‌تر و خاک سخت‌تر برای حفاری در مقطع محدودتر از چکش هیدرولیکی استفاده می‌شود. در زمین‌های نرم‌تر معمولاً استفاده از باکت ساده یا بیل مکانیکی کفایت می‌نماید.

تجهیز و پشتیبانی در روش حفاری با ماشین حفر بازویی شامل تامین توان، تخلیه مصالح، سوخت ماشین، تهویه، روشنایی و سرویس و نگهداری ماشین است. برای داشتن عملکرد و بازده مناسب دستگاه لازم است این موارد با ظرفیت

۱- Roadheader

۲- Drum Cutter

۳- Multi Task Machine-MTM

و برنامه مناسب پیش‌بینی شده و مورد استفاده قرار گیرند.

عملکرد ماشین حفر بازویی با شاخص نرخ حفاری آی.سی.آر^۱ اندازه‌گیری می‌شود. روابط تجربی متعددی برای این شاخص در شرایط مختلف ارائه شده است. بازدهی و سرعت حفاری با ماشین حفر بازویی معمولاً نزدیک به روش‌های انفجاری و تا چند برابر ماشین چکش هیدرولیکی است. ماشین حفر بازویی به دلیل امکان تداوم بارگیری کامیون‌ها با تسمه نقاله متصل به ماشین، می‌توانند بازدهی مناسبی در حفاری حاصل نمایند.

۴-۴-۲- چالش‌ها و ملاحظات اجرایی تونل‌سازی متعارف

۴-۴-۲-۱- ملاحظات کلی اجرایی با رویکرد ان.ای.تی.ام

از ویژگی‌های اساسی رویکرد ان.ای.تی.ام، برنامه اندازه‌گیری پیچیده آن است. در این روش، تغییر شکل و تنش به طور منظم کنترل، و بر اساس آن ظرفیت مناسب نگهدارنده و تدابیر تقویتی اضافی مورد نیاز تعیین می‌گردند. در صورتی که ابعاد پوشش بیش از حد مورد نیاز باشد، می‌توان با توجه به شرایط مکانیکی یکسان یا مشابه سنگ در حین پیش روی تونل، اقدامات تقویتی و حجم نگهداری را کاهش داد. در این روش، بر اساس اصول علمی، یک ابعادگذاری تجربی، صورت می‌پذیرد. معمولاً نقاط اولیه مشخصی از سقف و کف در جبهه حفاری با استفاده از یک تئودولیت الکترونیکی از نظر ژئودزیکی کنترل می‌شوند. مقاطع ثانویه اندازه‌گیری در فواصلی که میزان هم‌گرایی بین نقاط سقف و کف قرائت می‌شود، انتخاب می‌شوند. قرائت‌ها معمولاً در ابتدای هر روز انجام می‌شود، سپس با توجه به سرعت تغییر شکل‌ها و تغییرات تنش به یک‌بار در ماه کاهش می‌یابد. مشاهدات به صورت تابعی از زمان در یک نمودار ثبت می‌گردد. روش رسم نمودار تنش-زمان بسیار مفید است، به طوری که امکان شناسایی هر موقعیت خطرناکی را مدت‌ها قبل از وقوع آن فراهم می‌آورد.

۴-۴-۲-۲- ملاحظات نواحی سست و ریزشی

در تونل‌سازی با رویکرد ان.ای.تی.ام و روش حفاری مرحله‌ای، قابلیت بیش‌تری برای کنترل پایداری حین حفاری در نواحی سست و ریزشی زمین وجود دارد. حصول این قابلیت‌ها با رعایت ملاحظات و توصیه‌های زیر بهتر انجام می‌شود:

- ۱- اصلاح و تدقیق گام حفاری در مقطع و طول با توجه به شرایط زمین در مناطق سست و کوچک‌تر کردن گام حفاری تاج در مناطق ریزشی.

۲- شناسایی نواحی سست موضعی نسبت به محور تونل و تنظیم روش حفاری و نگهداری اولیه بر اساس آن.

۳- تقویت سیستم نگهداری اولیه در تاج و انجام پایش تغییر شکل قبل از ادامه حفاری سایر بخش‌های مقطع.

۴- استفاده از روش‌های پیش پایدارسازی مانند تزریق، فورپولینگ^۱، پیش تحکیم و نظایر آن در این مناطق.

۲-۴-۳- ملاحظات کنترل رواداری‌ها

در زمین نرم و سنگ سست تونل‌سازی ان‌ای.تی.ام ممکن است به دلایل زیر با اضافه حفاری یا کسر حفاری همراه باشد. معمولاً در زمین نرم کسر حفاری با هزینه کمتری جبران می‌شود اما اضافه حفاری می‌تواند هزینه و زمان اضافی زیادی را به کار تحمیل نماید:

- ۱- هم‌گرایی زیاد سامانه نگهدارنده و ریزش ناشی از اصلاح و تعویض آن که در زمین‌های با فشردگی زیاد رخ می‌دهد و باید برای پیش‌گیری از آن در زمان مناسب نسبت به تقویت نگهدارنده اقدام گردد.
- ۲- وجود لایه و عدسی سست در تاج سینه کار که اغلب پیش‌بینی آن‌ها بسیار مشکل است، ولی در صورت پیش‌بینی، با تزریق پیش تحکیمی و کاهش گام حفاری مهار می‌شوند.
- ۳- برخورد با عدسی‌ها و لایه‌های آبدار یا سفره‌های آب زیر زمینی و اضافه حفاری به صورت هجوم گل که می‌باید با روش‌های مناسب پیش‌بینی شوند، چراکه معمولاً وقفه قابل توجهی در کار ایجاد نموده و حفره‌ها و اضافه حفاری قابل ملاحظه‌ای باقی می‌گذارند.
- ۴- خطاهای کارکرد دستگاه حفاری شامل خطای اپراتور و نقشه‌بردار که در برنامه کنترل کیفی باید مد نظر قرار گیرند.
- ۵- تاخیر در نصب سامانه نگهدارنده نسبت به زمان مجاز و بهینه و ریزش تاج یا سینه کار که برای پیش‌گیری از آن، با برداشت و تفسیر اطلاعات و برنامه‌ریزی اجرایی نسبت به نگهداری به موقع زمین اقدام گردد.
- ۶- ناکافی بودن سامانه نگهدارنده و سختی آن و ریزش موضعی تاج که مشابه فوق عمل می‌شود.
- ۷- انحراف چال انفجار و تنظیم نبودن میزان خرج انفجاری در سنگ سست یا بخش‌های سست‌تر زمین که باید قبل از خرج‌گذاری کنترل شود.

۲-۴-۴- ملاحظات کنترل مخاطرات (نفوذ آب، گل گرفتگی، سینه‌کار مختلط، بولدرهای سنگی)

یکی از چالش‌های اصلی حفاری‌های متعارف، مواجهه با آب زیرزمینی در سینه‌کار است. در روش ان‌ای.تی.ام و حفاری مرحله‌ای امکان کنترل بیش‌تری روی این مساله وجود دارد، لکن عدم توجه به موقع به آن می‌تواند باعث ناپایداری کلی مقطع حفاری و غرقاب شدن تونل شود. نفوذ آب به صورت نشت^۲، جریان^۳ و هجوم^۴ اتفاق می‌افتد. برای

۱- Forepoling

۲- Leakage

۳- Ingress

۴- Flow

پیش‌بینی این مساله و مقابله با آن ملاحظات و توصیه‌های زیر می‌تواند مفید فایده قرار گیرد:

- ۱- انجام عملیات شناسایی با حفر گمانه در پیشانی کار و ثبت و بررسی پارامترها و بررسی‌های متناوب ژئوفیزیکی و استفاده از نتایج مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی برای یافتن موقعیت سفره‌های آب زیرزمینی.
- ۲- اجرای زهکش در پیش رو و اطراف جبهه کاری برای تخلیه و کاهش فشار آب.
- ۳- تحکیم، آب‌بندی و بهبود خصوصیات زمین در پیشانی کار.
- ۴- حفاری با سرعت کم‌تر برای ایجاد زمان کافی برای زهکشی و تخلیه و آب‌بندی مقطع تونل.
- ۵- در تونل‌های کم‌عمق با تراز کم آب زیر زمینی با پایین آوردن سطح آب با چاه‌های زهکش، آب‌بندی پوشش و تزریق آب‌بندی بسته به حجم آب انجام می‌پذیرد.
- ۶- در صورت عدم امکان کنترل ورود آب از روش‌هایی نظیر هوای فشرده یا انجماد برای فراهم آوردن شرایط مناسب برای حفاری استفاده می‌گردد.
- ۷- گل‌گرفتگی در زمین نرم به دلیل مواجهه با لایه‌های آبدار رس و لای و ریزدانه و هجوم آن به داخل تونل رخ می‌دهد. شناسایی و پیش‌بینی این لایه‌ها و نواحی با روش‌های مشابه شناسایی آب زیرزمینی امکان‌پذیر است. در ان‌ای.تی.ام چند مرحله‌ای حادث‌ترین وضعیت زمانی است که گل‌گرفتگی در حفاری تاج اتفاق بیفتد. علاوه بر روش‌هایی نظیر هوای فشرده یا انجماد برای احجام بالای گل، پیش تزریق و ایجاد پرده می‌تواند در اغلب شرایط کنترل مناسبی برای کاهش یا جلوگیری از ورود گل محسوب شود.
- ۸- در سینه‌کار مختلط ممکن است در قسمت‌های مختلف حفاری ان‌ای.تی.ام شرایط زمین متفاوت باشد و این مساله بر روش حفاری و نگهداری تاثیر خواهد گذاشت. همچنین ممکن است در برخی قسمت‌ها بولدرهای سنگی وجود داشته باشد که نیاز به انفجار داشته باشند. شناسایی این عوارض با برداشت دقیق اطلاعات و تدقیق پروفیل‌های زمین‌شناسی و همچنین بهره‌گیری از روش‌های شناسایی فوق امکان‌پذیر خواهد بود. در این موارد تنظیم سیستم نگهدارنده برای جلوگیری از اعوجاج در پوشش و هم‌گرایی زمین ضروری می‌باشد و اغلب استفاده از سیستم‌های با سختی بالاتر در جهت اطمینان خواهد بود، گرچه این کار به طور موضعی حجم نگهدارنده را افزایش می‌دهد. در برخی موارد که اندازه بولدر سنگی بزرگ باشد و حجم قابل توجهی از آن خارج از محدوده حفاری قرارگیرد، می‌توان با میل مهار و پیچ سنگ اقدام به پایدارسازی آن نمود.

۲-۴-۵- کنترل نشست و اثرات آن بر سازه‌های سطحی (معیارها و روش رفتارنگاری)

با استفاده از رویکرد ان‌ای.تی.ام و پایش مستمر تغییرشکل داخل تونل، می‌توان به نحو مناسب‌تری نسبت به پایش و کنترل نشست سطحی اقدام نمود. در روش حفاری متعارف، پایش و رفتارنگاری اثر نشست‌ها بر سازه‌های سطحی با روش‌های زیر انجام می‌پذیرد:

- ۱- ثبت منظم تغییرشکل داخل تونل و نشست سطحی و تحلیل ارتباط آن‌ها برای پیش‌بینی نشست سطحی،

- ۲- نصب ابزار نشست‌سنج و تغییر مکان‌سنج و دوران‌سنج روی سازه‌های سطحی،
 - ۳- نقشه‌برداری زنده و خودکار یا منظم در سطح،
 - ۴- بازرسی منظم و بررسی اثرات ثانویه مانند ترک خوردگی.
- معیار کنترل نشست در سازه‌های سطحی مشابه معیارهای بهره‌برداری نظیر بیشینه نشست متقارن و نامتقارن، بیشینه عرض ترک مجاز البته با توجه به شرایط هر سازه می‌باشد.

۲-۵- روش حفاری مکانیزه تمام مقطع سپری

۲-۵-۱- انتخاب ماشین مناسب

- اولین نکته در انتخاب ماشین حفاری توجه به قوانین و استانداردهای بالادستی نظیر قوانین تجاری، ایمنی و زیست محیطی است. مراحل انتخاب ماشین حفاری مناسب به صورت زیر می‌باشد:
- ۱- بررسی گزارش ژئوتکنیک و پروفیل زمین‌شناسی مسیر و مطالعات هیدروژئولوژی و وضعیت آب زیرزمینی جهت انتخاب اولیه نوع ماشین،
 - ۲- بررسی رفتار سامانه شامل برش‌پذیری، پایداری جبهه حفاری و دیواره‌ها، پیش‌بینی نشست، پیش‌بینی فرسایش ابزار، هجوم و چسبیدن مصالح به منظور تعیین الزامات اولیه حفاری و ملاحظات جبهه حفاری،
 - ۳- طبقه‌بندی تونل بر اساس فرآیند تونل‌سازی برای پیش‌بینی کیفی فرآیند مناسب تونل‌سازی در مسیر،
 - ۴- بررسی رفتار مصالح حفاری حین انتقال شامل روان‌گرایی و چسبندگی و فرسایش به اجزای سامانه به منظور تعیین الزامات سامانه تخلیه مصالح حفاری،
 - ۵- بررسی قابلیت بازیافت مصالح حفاری شامل تراکم‌پذیری، قابلیت پخش شدن، بازیافت و سرند شدن برای تدقیق مشخصات ماشین حفاری،
 - ۶- تعریف کلاس تونل‌سازی و فرآیند نهایی اجرا،
 - ۷- طبقه‌بندی فرآیند اجرا به مقاطع همگن برای مستندسازی فرآیند اجرا و ثبت مشخصات زمین‌شناسی.
 - ۸- دستگاه‌های حفاری مکانیزه تونل‌سازی در زمین نرم را می‌توان به دو دسته زیر تقسیم کرد:
 - دستگاه‌های حفاری سپردار با جبهه بسته^۱
 - دستگاه‌های حفاری سپردار در دو مدل حفاری تمام مقطع با تیغه‌های چرخنده (اس.ام.وی)^۲ و حفاری جزئی

۱- Closed Face SM

۲- Single Shield – V Cutter (SM-V)

با کله حفاری و حفار (اس.ام-تی)^۱ و اغلب برای زمین‌های نرم استفاده می‌شوند که در انواع شرایط، مدل‌های مختلفی دارند:

- دستگاه حفاری سپردار با هوای فشرده حفاری‌های زیر سطح آب زیرزمینی که امکان هجوم آب در هر حال وجود دارد، از روش هوای فشرده برای مقابله با آن استفاده می‌شود.
 - دستگاه حفاری با سیال تحت فشار در شرایطی که امکان ریزش جبهه کاری خصوصاً مصالح ریزدانه پیش‌بینی می‌شود، از سیال تحت فشار نظیر بنتونیت برای تامین پایداری جبهه کاری در حین حفاری استفاده می‌گردد.
 - دستگاه حفاری با فشار تعادلی زمین در جبهه‌های حفاری ریزشی می‌تواند از محفظه فشار در سردستگاه با کمک فشار پیشران حرکتی برای تنظیم پایداری جبهه استفاده نمود.
- در استفاده از ماشین (اس.ام-تی) هم در انواع شرایط از مدل‌های مختلفی استفاده می‌گردد. از این موارد می‌توان به مدل جبهه کاری بدون نگهداری، جبهه کاری با نگهدارنده مکانیکی موضعی، جبهه کاری با نگهدارنده هوای فشرده و یا دوغاب تحت فشار نام برد.

۲-۵-۱- دستگاه‌های حفاری سپردار قابل تبدیل (کی.اس.ام)^۲

بسیاری از تونل‌ها در مسیر حفاری شرایط متنوعی از زمین را تجربه می‌کنند که می‌تواند طیفی از زمین سخت تا خاک نرم را در بر بگیرد. در این حالت دستگاه حفاری باید قادر به تطبیق لازم با این شرایط باشد. در این حالت‌ها معمولاً از ماشین‌های سپردار با قابلیت عملیات هوای فشرده و یا دوغاب تحت فشار استفاده می‌شود. بعضی از ماشین‌ها بالقوه دارای این قابلیت‌ها می‌باشند و بعضی نیاز به اضافه نمودن این قابلیت در حین اجرا دارند که البته نیاز به چند نوبت کاری زمان برای اضافه نمودن آن‌ها خواهد بود.

۲-۵-۲- مشخصات فنی اصلی و تجهیزات جانبی پشتیبان دستگاه برای انجام عملیات پیش‌تحکیمی

جانمایی بخش‌های ماشین حفاری و اجزای آن مشابه موارد ذکر شده در بخش زمین سخت می‌باشد. در این بخش، تجهیزات اضافی از جمله موارد مورد نیاز برای عملیات پیش‌تحکیمی توضیح داده می‌شوند. عملیات تزریق در حفاری مکانیزه در دو شکل پیش‌تزریق در جلوی جبهه کاری برای تثبیت و پایدارسازی زمین و کاهش هجوم و نفوذ آب و گاز و پس‌تزریق در پشت قطعات بتنی برای تثبیت زمین و سنگدانه‌های پرکننده پشت قطعات انجام می‌پذیرد. اهداف عملیات پیش‌تزریق شامل کاهش خطر ناپایداری و ریزش، افزایش ایمنی فضای کاری، کاهش ریسک وقفه در زمان‌بندی و کاهش نشست و کنترل نفوذ آب و کاهش تغییرشکل زمین می‌باشند. عملیات پیش‌تزریق با نصب دستگاه حفاری

۱- Single Shield – T Cutter (SM-T)

۲- Convertible Shield Machine (KSM)

گمانه برای شناسایی و حفر چال تزریق و پمپ و مخزن تزریق برای انجام تزریق امکان‌پذیر می‌گردد. به دلیل هزینه‌های قابل توجه عملیات تزریق، انجام شناسایی لازم برای تعیین ضرورت و میزان نیاز به تزریق از اهمیت زیادی برخوردار است. دستگاه دیگری که می‌تواند روی ماشین حفاری نصب شود دستگاه بولت زنی است که در مواقع لزوم با این روش عملیات تحکیم را انجام می‌دهد.

انواع عملیات پیش تحکیمی در روش مکانیزه عبارتند از:

- ۱- تزریق درزه‌ها و نواحی سست موضعی لایه‌ای و سفره‌ها و لایه‌های آبدار،
 - ۲- تزریق لوله‌ای با لوله پی.وی.سی^۱ سوراخ‌دار شبیه فوروپولینگ با قطر حدود ۲/۵ تا ۵ سانتی‌متری یا لوله بزرگ،
 - ۳- تزریق تحکیمی ناحیه‌ای و پرده تزریق آب‌بندی جزئی و تمام مقطع،
 - ۴- اجرای ریزشمع از داخل تونل یا از سطح زمین در مجاورت تونل.
- در ادامه کاربرد هر یک از روش‌های تزریق متناظر با چالش‌های پیش رو ارائه می‌گردد.

۲-۵-۳- حمل، نصب، مونتاژ و راه‌اندازی دستگاه

مراحل و ملاحظات حمل، نصب، مونتاژ و راه‌اندازی دستگاه مشابه بخش زمین‌های سخت می‌باشد. تجهیزات اضافی از جمله موارد مورد نیاز برای عملیات پیش تحکیمی و تزریق در موارد نیاز روی دستگاه نصب می‌شوند. برای این کار دستگاه دارای محل نصب دستگاه حفاری و محل پمپ و مخزن تزریق به علاوه پیش‌بینی برق مورد نیاز در تابلو می‌باشد. همچنین، علاوه بر تمهیدات نصب و راه‌اندازی زمین سخت، معمولاً نیاز به تامپون و رینگ آب‌بندی در ورودی و خروجی نیز می‌باشد.

۲-۵-۴- تجهیز کارگاه و برآورد منابع لازم (آب، برق، مواد و مصالح)

اصول مراحل و ملاحظات تجهیز کارگاه و برآورد منابع لازم مشابه بخش زمین‌های سخت می‌باشد. تجهیز کارگاه و برآورد منابع لازم (آب، برق، مواد و مصالح) برای عملیات حفاری خاص زمین‌های نرم شامل موارد زیر است:

- ۱- قطعات بتنی و ادوات اتصال آن‌ها،
- ۲- مصالح پرکننده پشت قطعات بتنی،
- ۳- مواد لازم برای تزریق تحکیمی و پشت قطعات بتنی شامل مواد پایه سیمانی و شیمیایی،
- ۴- مصالح لازم برای اجرای فوروپولینگ، بتن‌پاشی، سامانه نگهدارنده در گالری‌ها و پایلوت‌ها و میل مهار،
- ۵- انواع فوم و پلیمر برای حفاری در خاک‌های چسبنده،

۱- Poly Vinyl Chloride (PVC)

- ۶- دوغاب و بنتونیت برای روش حفاری با دوغاب و لوله‌کشی برای تخلیه مصالح حفاری مخلوط با دوغاب با لوله،
- ۷- آب برای فوم، دوغاب، شستشو و تمیزکاری تیغه‌ها و خنک‌کاری،
- ۸- برق دستگاه حفاری و مته حفاری چال تزریق، کارکرد پمپ‌ها و دستگاه‌های شناسایی سینه‌کار براساس امواج و سامانه تهویه و روشنایی و سایر تجهیزات.

۲-۵-۵- سازماندهی کارگاه، رویه‌های اجرایی

سازماندهی کارگاه و رویه‌های اجرایی مشابه بخش زمین‌های سخت می‌باشد. با توجه به این که در زمین‌های نرم عملیات تزریق برای کنترل پایداری سینه‌کار در حین حفاری و کاهش نشست سطحی و کاهش نفوذ آب انجام می‌شود، ممکن است در مناطق کم عمق، تزریق از سطح زمین انجام شود که برای آن باید تجهیز کارگاه لازم پیش‌بینی گردد. همچنین، در برخی موارد با حفاری دستک یا گالری اقدام به ایجاد فضای لازم برای عملیات پیش‌تحکیمی و تزریق می‌گردد که رویه اجرایی آن با حالت معمول کمی متفاوت خواهد بود و زمان بیش‌تری نیاز خواهد داشت.

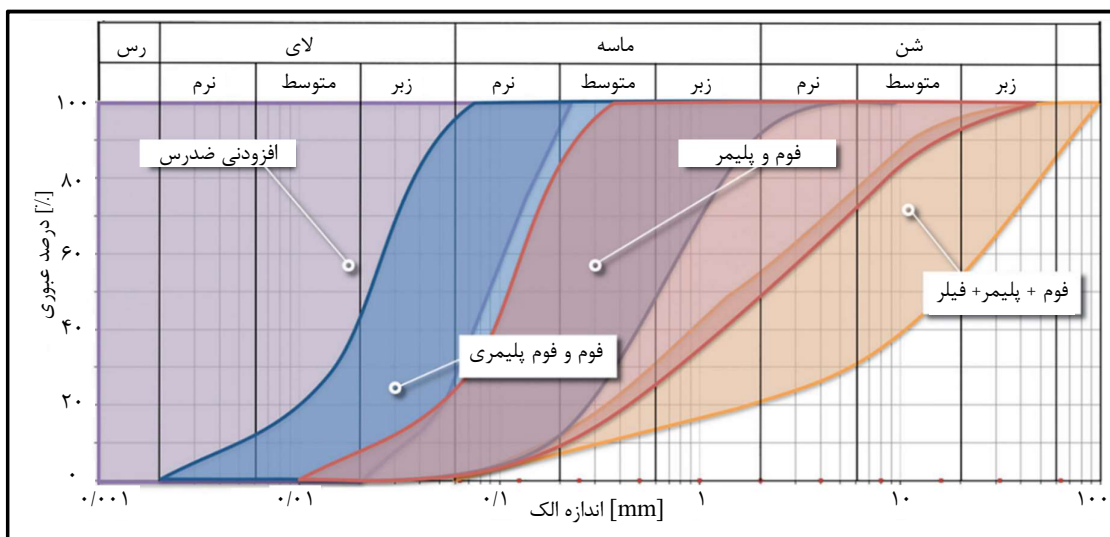
در حالت دیگر ممکن است عملیات تحکیم در زمان ورود به ناحیه سست و ریزشی یا آبدار انجام شده یا ادامه یابد که در این حالت نیز تمهیدات لازم برای تنظیم سرعت پیش‌روی دستگاه بسیار مهم است. در برخی موارد در نواحی سست با طول کم، پس از عملیات پیش‌تحکیم برای عبور که با اهمیت بیش‌تری در قسمت فوقانی متمرکز می‌شود، پیش‌روی با سرعت ادامه می‌یابد تا باعث توقف دستگاه نشود. در نواحی سست با طول بیش‌تر، حساسیت عملیات پیش‌تحکیم بیش‌تر شده و سرعت پیش‌روی باید طوری تنظیم شود که دستگاه در این ناحیه دچار نشست نشود. در این حالت تحکیم بستر تحتانی هم دارای اهمیت زیادی خواهد بود.

۲-۵-۶- هدایت و راهبری و برنامه‌ریزی عملیات تونل‌سازی

پس از انتخاب دستگاه و تجهیز و سازماندهی کارگاه و حمل و مونتاژ تی بی ام، نوبت به برنامه‌ریزی عملیات اجرایی و راهبری آن می‌رسد. روند این کار مشابه بخش ۱-۳-۶ می‌باشد. در تونل‌سازی در زمین‌های نرم و استفاده از دستگاه‌های سپردار، مراحل مربوط به تزریق فوم، فشار متعادل یا تزریق دوغاب نیز به برنامه اجرایی اضافه می‌شود. همچنین مخاطرات حفاری در این زمین‌ها با زمین‌های سخت تفاوت‌هایی دارد که در ادامه به آن پرداخته شده است.

۲-۵-۷- روش‌های کنترل فشار سینه‌کار

کنترل فشار سینه‌کار در حالت کلی با هوای فشرده، فشار متعادل زمین و فشار دوغاب در پیشانی دستگاه انجام می‌پذیرد. در شکل (۲-۸) محدوده عمومی کاربرد انواع روش‌ها برای شرایط مختلف خاک نشان داده شده است. کاربرد هر یک از این روش‌ها بستگی به دانه‌بندی خاک و میزان شن، ماسه و لای و رس آن دارد. توجه شود که محدوده کاربرد این روش‌ها بستگی به توسعه فناوری مواد و تجهیزات داشته و بر اساس آن تغییر می‌نماید.

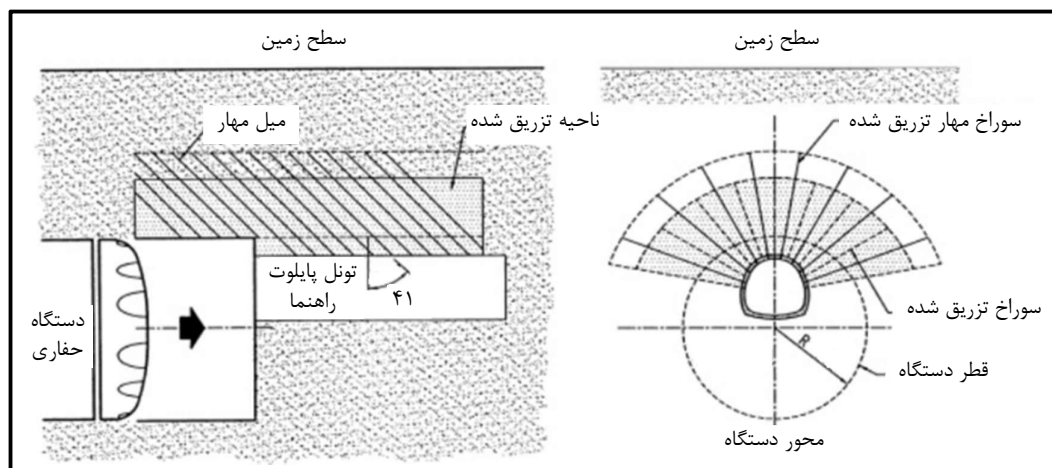


شکل ۲-۸- محدوده عمومی کاربرد انواع روش‌های کنترل فشار سینه‌کار بر اساس شرایط خاک خصوصا در مناطق پرآب

۲-۵-۸- پیش‌گیری از نشست زمین و سازه‌های سطحی

نشست زمین در تونل‌های نسبتاً کم عمق در ماشین‌های ای.پی.بی با بالانس نمودن فشار داخل محفظه و تخلیه کنترل شده مصالح حفاری، کنترل می‌شود. برای موارد خاص و عبور از مجاورت سازه‌های حساس به منظور کنترل و کاهش نشست و تغییر شکل سازه‌های سطحی معمولاً با عملیات پیش‌تحکیمی و به صورت زیر عمل می‌شود:

- ۱- افزایش سرعت پیش‌روی و نصب پوشش صلب و تزریق تماسی برای کاهش تغییر مکان زمین در نواحی همگن،
- ۲- تزریق تحکیمی تاج پیشانی و اطراف کار با یا بدون لوله،
- ۳- تزریق تحکیمی پیشانی کار با گالری فوقانی یا در اطراف دستگاه،
- ۴- تزریق تحکیمی پیشانی کار با گالری پایلوت در سینه‌کار (شکل ۲-۹)،



شکل ۲-۹- تزریق تحکیمی پیشانی کار با گالری پایلوت در سینه‌کار

- ۵- تزریق تحکیمی از سطح زمین در تونل‌های کم عمق،
- ۶- جت گروتینگ یا اختلاط عمقی از سطح زمین برای تحکیم زمین در تونل‌های کم عمق،
- ۷- اجرای شمع^۱، تزریق پرفشار^۲، اختلاط عمقی^۳، ریزشمع^۴ یا پی‌بندی از زیر^۵ برای سازه‌های دارای پی ضعیف و حساس به نشست.

۲-۵-۹- فعالیتهای تکمیلی برای کنترل نشست و پایدارسازی سقف و سینه‌کار

ناپایداری‌های سقف و سینه‌کار در نواحی سست و ریزشی می‌تواند باعث تشدید نشست سطحی شود و لازم است پیش‌بینی‌های لازم برای این نواحی انجام پذیرد. به منظور اطمینان از مدیریت صحیح تغییرشکل و نشست این نواحی، لازم است موارد زیر مد نظر قرارداشته باشند:

- ۱- در صورت حساسیت نشست سطحی لازم است علاوه بر تمهیدات تسکینی و پیشگیرانه، سامانه پایش تغییرشکل در داخل تونل و سطح زمین نیز برای رصد رژیم نشست تعبیه گردد. این سامانه باید علاوه بر پایش پیش‌روی با جبهه کار در سطح، وضعیت نواحی حساس عبور شده را نیز کنترل نماید. در داخل تونل نیز هم‌گرایی‌سنجی و پایش لازم باید صورت پذیرد.
- ۲- کنترل تزریق تماسی و پر شدن کامل پشت قطعات بتنی در حداقل زمان و با کم‌ترین تخلخل و به صورت یکنواخت انجام شود،
- ۳- تکمیل تزریقات و تثبیت نواحی ریزشی برای پایداری بلند مدت و پیش‌بینی اثرات آن‌ها بر پوشش تونل و اجرای تقویت‌های لازم در پوشش برای باربری دراز مدت صورت پذیرد،
- ۴- در زمین‌های حاوی ساختار حساس به آب و رطوبت مانند مارن باید پیش‌بینی لازم برای آب‌زدایی و احداث پرده آب‌بند، هدایت آب سطحی و عمقی، حفر گالری‌های زهکش و نظایر آن در دستورکار قرارگیرد.
- ۵- در زمین حساس ممکن است پدیده‌های ژئوتکنیکی مانند تغییر تراز آب زیرزمینی باعث نشست در زیر سطح تونل هم بشود. در این شرایط برای کنترل تغییرشکل، لازم است تدابیر تحکیمی در زیر سازه تونل هم اجرا گردد.

۱- Piling

۲- Jet Grouting

۳- Deep Mixing

۴- Micro Piling

۵- Underpinning

۲-۵-۱۰- ملاحظات کنترل نشت و هجوم آب زیرزمینی

نشت و ورود آب در زمین‌های نرم و حاوی ریزدانه باعث گلی شدن مصالح در اطراف کله حفاری و در نتیجه افزایش گشتاور مورد نیاز حرکت دستگاه گردیده که نیاز به تمیزکاری مکرر تیغه حفاری را ایجاد می‌نماید. تمیزکاری تیغه‌ها در زمین‌های دارای پتانسیل مچاله‌شوندگی و تغییرشکل زیاد باید به سرعت انجام شود. در زمین‌های دارای پتانسیل مچاله‌شوندگی و جمع شدگی که دارای مقاومت کم و سربار زیاد هستند، با جمع‌شدگی زمین در قسمت سپرها و بسته شدن درزه‌های موجود در لایه‌های این محدوده، به علت بالا بودن فشار زمین در این قسمت و نیز نصب قطعات بتنی و تزریق پشت آن، آب موجود در این محدوده به جلوی کله حفاری آمده و به همین دلیل آب ورودی به تونل در سینه‌کار افزایش می‌یابد.

هجوم آب زیرزمینی در حفاری تونل می‌تواند از گسستگی و درزه، صفحات برشی، توده کارستی یا نواحی گسله رخ دهد. این اتفاق در تونل‌های عمیق بیش‌تر بوده و می‌تواند در صورت برخورد به عدسی‌های ریزدانه و خردشده بین درزه‌ها به شکل گل‌آلود با مصالح حفاری مخلوط شده و مشکلات تخلیه ایجاد نماید یا در حجم بیش‌تر و سیلابی به دلیل ظرفیت کم یا صعوبت تخلیه در تونل شیب‌دار منفی، باعث غرقاب شدن ماشین و تجهیزات و از کار افتادن آن‌ها و همچنین ایجاد اختلال در کارگذاری قطعات بتنی و نایمن شدن شرایط کار برای پرسنل شود. در شرایط برخورد با سفره‌های آب تحت فشار این پدیده همراه با ناپایداری و ریزش جبهه حفاری و لهیدگی هم می‌تواند باشد. پیش‌بینی ابعاد این مساله مشکل ولی با اکتشافات و گمانه‌های ژئوتکنیکی و روش‌های ژئوفیزیکی امکان‌پذیر است. در برخی شرایط ممکن است دمای آب بالا باشد و هزینه و تمهیدات اضافی برای خنک کردن دستگاه حفاری ایجاد نماید.

اما اثرات منفی قابل ملاحظه این پدیده‌ها در تونل به شرح زیر است:

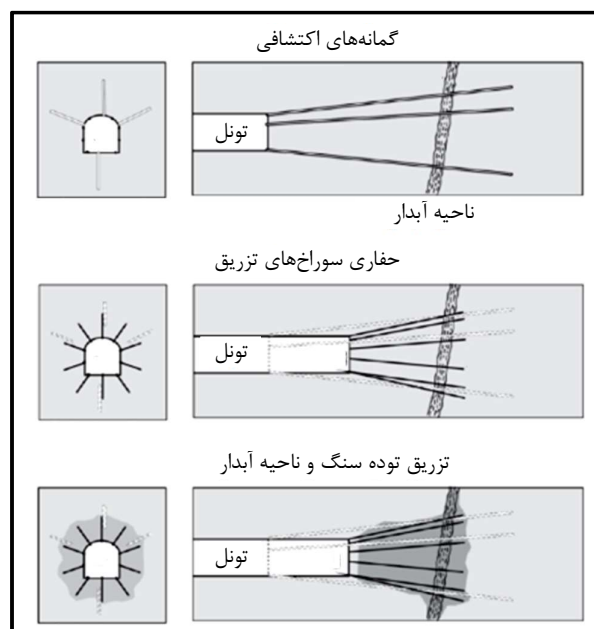
- ۱- افزایش صعوبت عملیات اجرایی در تونل.
- ۲- ایجاد خرابی مکانیکی و الکتریکی غیرمعمول تی.بی.ام و تجهیزات پشتیبان و صرف زمان زیاد برای رفع آن‌ها.
- ۳- صرف زمان و انرژی زیاد برای تمیزکاری و آبکشی به علت جمع شدگی زیاد مصالح تونل، تحت فشار آب ورودی خصوصاً در قسمت‌های حساس دستگاه تی.بی.ام.
- ۴- صعوبت عملیات ترابری داخل تونل با مدت زمان بیش‌تر و عملیات لجن‌برداری و تمیزکاری داخل تونل به علت جمع شدن غیرمعمول آب در بعضی از قسمت‌های مسیر تونل.
- ۵- گرفتگی پمپ و پر شدن لوله انتقال با لجن همراه با آب و ترکیدن لوله و صرف زمان زیاد برای جایگزینی آن.
- ۶- شسته شدن مصالح پرکننده پشت قطعات بتنی که با افزایش رواداری‌های غیر مجاز و مشکلات رفع و صرف زمان و هزینه گزاف آن به دلیل تاثیر بر شرایط هیدرولیک تونل توأم است.
- ۷- به تجربه ثابت شده است که مواد معلق و محلول در آب با طی مسیر در تونل ته نشین شده و با توجه به وجود آهک در آنها، کاملاً متراکم و سفت می‌گردند و موجب صعوبت در تردد، تعمیر و نگهداری خطوط ریلی و بالا رفتن هزینه تعمیر و نگهداری لوکوموتیوها خواهد شد. برای لجن‌برداری، بارگیری و انتقال آنها به خارج از

تونل، استفاده از پیکور دستی، نیروی انسانی، کفی بارگیری، لوکوموتیو و تجهیزات ترابری مجزا و صرف زمان زیاد با توجه به عدم امکان تخصیص تجهیزات ترابری مشغول به کار حفاری و تردد مستمر الزامی است.

۸- استهلاک و وارد آمدن خسارت‌های فراوان به دستگاه تی.بی.ام و کاهش محسوس نرخ حفاری در طول دوره و در نتیجه تحمیل هزینه بالای بالاسری مضاعف به کارگاه.

روش‌های مقابله با هجوم آب به صورت زیر پیشنهاد شده است. شایان ذکر است، مقابله با هجوم آب و گل در تونل‌های با قطر کم و شیب‌های سرازیری یا منفی مشکل‌تر است:

- ۱- انجام عملیات شناسایی با حفر گمانه در پیشانی کار و ثبت و بررسی پارامترها و بررسی‌های متناوب ژئوفیزیکی،
- ۲- کاهش نفوذپذیری با انجام تزریق در پیشانی کار ترجیحاً قبل از نفوذ آب به داخل تونل که البته درصد موفقیت آن بستگی به ساختار سفره آب و زمین دارد، در شکل (۲-۱۰) فرآیند شناسایی و پیش تزریق آب‌بندی جهت کنترل سفره‌های آب زیرزمینی و لایه‌های آبدار در جبهه حفاری ارائه شده است.



شکل ۲-۱۰- فرآیند شناسایی و پیش تزریق آب‌بندی جهت کنترل سفره‌های آب زیرزمینی و لایه‌های آبدار در جبهه حفاری

- ۳- پیش‌روی حفاری با ای.پی.بی با توجه به شرایط سفره آب زیرزمینی که در حالت فشار آب زیاد (حداکثر ۱۰ بار) ولی با دبی کم امکان‌پذیر می‌باشد. در حالت فشار و دبی بالا عملاً کارکرد دستگاه با اختلال مواجه می‌شود.
- ۴- نصب دریچه انسداد برای شوت تخلیه مصالح حفاری برای جلوگیری از هجوم آب به داخل،
- ۵- جداسازی آب از مصالح حفاری در تخلیه برای کاهش مشکلات تخلیه با روش‌هایی نظیر زهکشی،
- ۶- کاهش نفوذپذیری پیشانی کار با عملیات انجماد،
- ۷- اجرای زهکش طویل در پیش رو و اطراف جبهه کار با حداقل طول دو برابر قطر برای تخلیه هجوم آب با فشار زیاد،

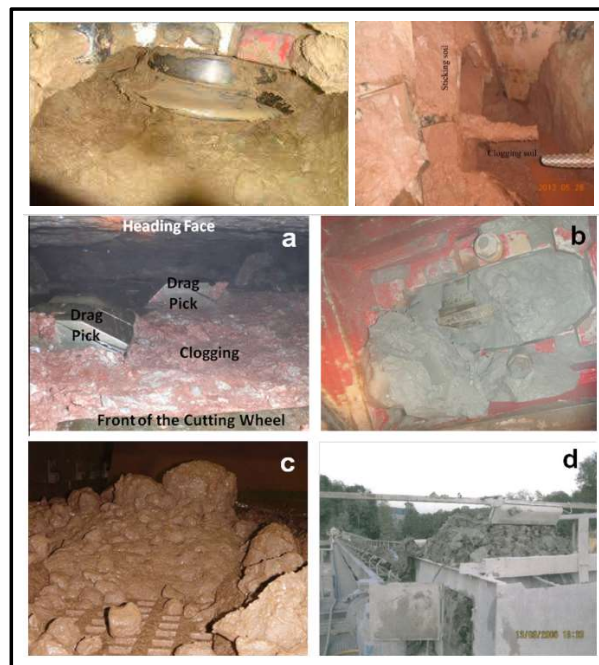
- ۸- بهبود خصوصیات زمین در پیشانی کار و اطراف ماشین و قطعات بتنی با تزریق برای مهار آب با فشار بالا،
- ۹- اجرای گمانه‌های زهکشی در پیرامون پوشش بتنی،
- ۱۰- استفاده از پوشش دولایه یا دوجداره تونل در حفاری با ماشین‌های سپردار،
- ۱۱- استفاده از فوم برای تزریق در جبهه حفاری برای تسهیل تخلیه مصالح حفاری در هنگام هجوم گل با آب،
- ۱۲- پیش‌بینی تمهیدات شستشو و تمیزکاری جلوی ماشین در هنگام هجوم گل،
- ۱۳- استفاده از سامانه تهویه مناسب در دماها و رطوبت‌های بالا،
- ۱۴- پیش‌بینی افزایش مدولار ظرفیت خنک کردن ماشین با لوله‌های آب سرد،
- ۱۵- تخلیه سریع‌تر آب در شرایط آب با دمای بالا برای کاهش اثرات آن در محیط کاری،
- ۱۶- کاهش زمان نوبت کاری پرسنل در شرایط آب با دمای بالا برای افزایش بهره‌وری،
- ۱۷- استفاده از مواد افزودنی برای دیرگیرکردن سخت شدن دوغاب تزریقی در شرایط دمای بالای محیط.

۲-۵-۱۱- پیش‌بینی مخاطرات و روش‌های مقابله با شرایط دشوار زمین‌شناسی

۲-۵-۱۱-۱- پدیده گل‌گرفتگی

در خاک ریزدانه نرم و مرطوب، گرفتگی، انسداد و چسبندگی گل ایجاد شده باعث اختلال در عملکرد تیغه‌های حفاری دستگاه، مجاری خروج مصالح حفاری و تسمه نقاله انتقال آن‌ها و سامانه تخلیه بیرونی و در نتیجه کاهش عملکرد دستگاه می‌شود. این پدیده باعث اعمال فشار به دستگاه جهت تامین رانش بیش‌تر و نیاز به زمان و نیروی انسانی برای تمیزکاری و عملاً کاهش سرعت پیش‌روی و کلوخه شدن و ریزش سینه‌کار و در مجموع افزایش هزینه تونل‌سازی می‌گردد.

عوامل مختلفی نظیر مشخصات خاک نرم، جنس و دانه‌بندی آن، خصوصیات تیغه حفاری، افزایش دما، میزان آب و رطوبت خاک بر شدت این گرفتگی تاثیر می‌گذارند. تجربیات نشان داده است که این پدیده بیش‌تر در خاک‌های دارای شاخص سفتی^۱ بین ۰/۵ تا ۰/۵۷ رخ می‌دهد. در زمین‌هایی که حاوی ریزدانه کم‌تری هستند، اضافه شدن بنتونیت پتانسیل این پدیده را تشدید می‌نماید. در شکل (۲-۱۱) پدیده گل‌گرفتگی بخش‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۱- گل گرفتگی تیغه‌ها و کله حفاری و تسمه نقاله‌های انتقال مصالح و سامانه تخلیه

به محض رصد مواد چسبنده در سینه‌کار تمهیدات مقابله با پدیده گل‌گرفتگی در دستور کار قرار می‌گیرد. برای کاهش گرفتگی راهکار متداول استفاده از مواد عمل‌آوری خاک نظیر فوم و پلیمر و آب نمک است که باعث افزایش روانی و کاهش چسبندگی می‌گردند. انتخاب نوع این مواد بستگی به خصوصیات خاک و میزان رطوبت دارد. فوم‌ها که معمولاً ترکیبی از مواد صابونی^۱ و آب هستند باعث کاهش گشتاور مورد نیاز حرکت و کاهش مصرف انرژی و کاهش نفوذپذیری خاک می‌شوند. پلیمرها علاوه بر کاهش چسبندگی باعث روانی حرکت مصالح درشت دانه هم می‌شوند و دارای انواع مختلف هستند پلی‌اکریلامیدها^۲، گم‌ها^۳، سلولوز اترها^۴، کارپوکسیمتیل سلولوز^۵ در برخی موارد مخلوط آب و نمک (کلرید سدیم) هم استفاده شده که خواص بهبود دهنده مشابهی داشته است.

۲-۱۱-۵-۲- ملاحظات کنترل ریزش سقف و سینه‌کار

ریزش سقف و سینه‌کار ممکن است به طور مستقل یا هم‌زمان در نواحی سست و ریزشی اتفاق بیفتد. تمهیدات متناظر برای مقابله با این مساله هم در سینه‌کار و سقف تاحدی متفاوت است. معمولاً در سقف عملیات پایدارسازی و در

۱- Surfactant

۲- Polyacrylamides, Gums, Cellulose Ethers, Carboxymethyl Cellulose

۳- Gums

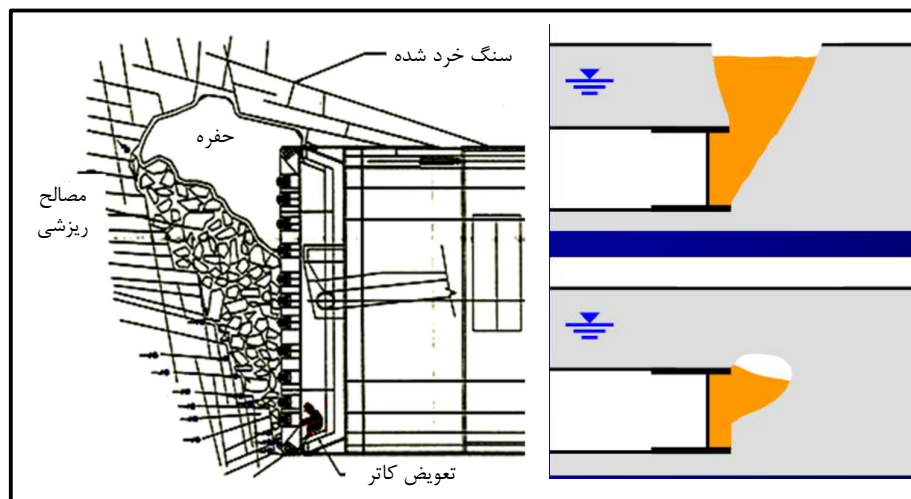
۴- Cellulose Ethers

۵- Carboxymethyl Cellulose

سینه‌کار عملیات بهسازی قبل از حفاری صورت می‌پذیرد.

مسایل و چالش‌های متداول کنترل سقف و سینه‌کار عبارتند از:

- توزیع ناهمگن و غیرقابل کنترل فشار سینه‌کار،
 - چسبندگی و ایجاد نیروی برشی بسیار زیاد در تیغه‌ها در سینه‌کار،
 - قوس‌زدگی در سینه‌کار ناشی از ریزش موضعی،
 - ناپایداری و ریزش نواحی سست سینه‌کار حین حفاری.
 - ناپایداری کلی نواحی آبدار و سست در سقف یا سینه‌کار تا سطح زمین،
 - ریزش سقف روی ماشین و افزایش فشار و لهیدگی و کاهش بازده ماشین یا گیرکردن آن،
- در شکل (۲-۱۲) چالش‌های متداول در کنترل سینه‌کار و ریزش‌های مختلف محتمل نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲- ریزش هم‌زمان سقف و سینه‌کار و روش کنترل آن

روش‌های پیشگیری و کاهش عواقب ناشی از این پدیده‌ها به شرح زیر توصیه شده‌اند:

- انجام عملیات شناسایی با حفرگمانه در سقف و پیشانی کار و بررسی پارامترها و بررسی متناوب ژئوفیزیکی،
- اجرای زهکش در پیش رو و اطراف جبهه کاری برای کاهش فشار آب،
- بهسازی و بهبود خصوصیات زمین در پیشانی کار و اطراف ماشین با تزریق که می‌تواند از حفارهای داخل ماشین یا با استفاده از گالری کمکی فوقانی انجام شود. در سینه‌کار استفاده از رادهای فایبرگلاس و تزریق در آن‌ها که در حین حفاری توسط ماشین بریده می‌شوند و در سقف هم استفاده از فورپولینگ و مهارهای خود حفر تزریقی برای تثبیت و بهسازی متداول است. عملیات تحکیم و پایدارسازی در سقف پس از عبور کله حفاری هم می‌تواند ادامه یابد.
- حرکت با سرعت کمتر ماشین حفاری قبل از رسیدن برای تکمیل عملیات پایدارسازی ناحیه ریزشی،
- استفاده از طرح مناسب کله حفاری با گوه حفاظت تیغه، صفحات با مقاومت سایشی بالا، تیغه پر مقاومت،

تعبیه بازشوی کوچک متعدد در کله حفاری و آدام روی قابل بسته شدن (انجام این کارها در حین حفاری وقت گیر و هزینه‌بر است)،

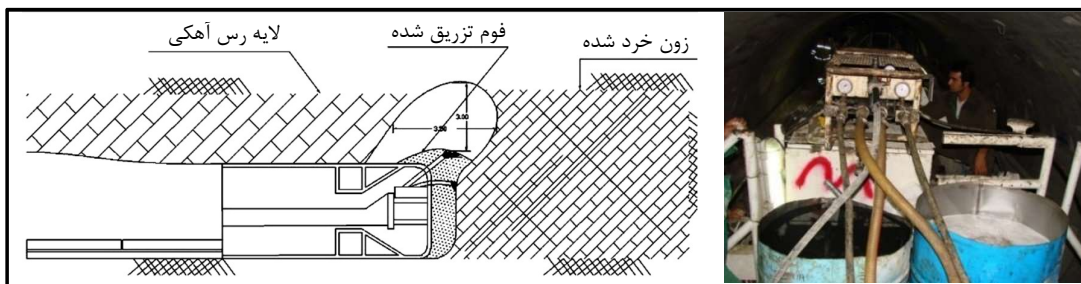
در صورت ورود به ناحیه ریزشی و رخداد ریزش اقدامات زیر می‌تواند در دستور کار قرار گیرد:

- اولین اقدام، آزادسازی کله حفاری و خرد کردن بلوک‌های سنگی قفل شده افتاده در باکت‌ها است، که با خرد کردن و خارج نمودن با استفاده از جک هیدرولیکی و پیکور صورت می‌پذیرد. در این مرحله، معمولاً مصالح ریزدانه به شکل ساعت شنی از منافذ کله حفاری خارج می‌گردند.

- فعال‌سازی موتور کمکی و افزایش توان دستگاه پس از پایان آزادسازی کله حفاری (شامل تمیزکاری، بازکردن راه ورودی باکت‌ها و خروج مصالح داخل کله حفاری).

- تزریق فوم انبساطی تحکیمی دو جزئی (پس از آزادسازی کله حفاری و سگمنت گذاری) در سینه‌کار با حفاری چال‌های کوتاه ۱ تا ۲ متری و از طریق فضاها در دسترس کله حفاری (مانند آدمرو و باکت‌ها) با استفاده از رادهای فایبرگلاس خود تزریق یا رادهای فولادی مشبک خود حفر در ارتفاع‌های مختلف بالای کله حفاری و سپر پس از بستن تمامی فضاها باز. این فوم از نوع فوم‌های دو جزئی با نرخ انبساط بالا بوده و شروع تزریق از لوله‌های با طول کمتر و در ارتفاع کمتر انجام می‌پذیرد.

در شکل (۲-۱۳) تصویری از پمپ تزریق فوم در جزی و شماتیک از مقطع ریزشی و تزریق فوم در آن نشان داده است.



شکل ۲-۱۳- تصویری از پمپ تزریق فوم دو جزئی و شماتیک از مقطع ریزشی و تزریق فوم در آن

- پس از پایان تزریق و ایمن شدن سینه کار، تمام باکت‌ها و دریچه آدمرو و سایر منافذ که قبل از تزریق با گچ کاملاً بسته شده‌اند، باز و تمیزکاری می‌شوند. همچنین، با توجه به ایمن شدن فضای فوقانی کله حفاری و سینه کار، برای آزادسازی کله حفاری لازم است در صورت نیاز حتی با عبور از دریچه آدمرو و پیکورزنی و تخلیه مصالح پشت کله حفاری نقاطی از کله حفاری که با زمین درگیر است آزاد شوند.

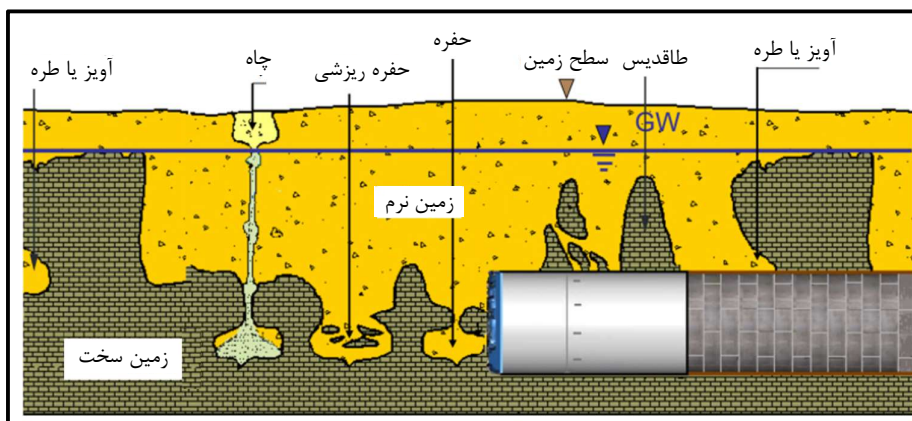
- پس از تکمیل تزریق و تمیزکاری اطراف کله حفاری، حفاری با سرعت چرخش و رانش پایین شروع می‌شود. در چنین شرایطی در صورت نیاز پس از هر نیم کورس یا کمتر اقدام به کنترل سینه کار می‌گردد.

لازم به توضیح است در مدت زمان عبور از نواحی ریزشی، معمولاً موتور و گیربکس‌های کله حفاری در اثر گشتاورهای بالا و قفل شدن‌های ناگهانی و مکرر کله حفاری تحت فشار نیروهای خمشی حاصل از عکس‌العمل کله حفاری با زمین بوده و موتورها تحت فشار ممکن است دچار آسیب شوند و لذا باید تحت کنترل و سرویس مرتب باشند.

۲-۵-۱۱-۳- مواجهه با سینه کار مختلط و برخورد با قطعات سنگی

سینه کار مختلط به مواجهه لایه‌ای، ناحیه‌ای یا بلوکی با دو یا چند نوع مصالح در یک مقطع با اختلاف زیاد (مثلاً ۵ تا ۱۰ برابر) در خصوصیات مکانیکی نظیر مقاومت محوری، مدول ارتجاعی، نفوذپذیری و پایداری اطلاق می‌شود. بعضی به تغییرات متعدد و زود هنگام در امتداد محور تونل نیز این تعریف را تعمیم داده‌اند. معمولاً در تونل‌های بلند و دارای قطر بزرگ احتمال برخورد با سینه کار مختلط افزایش می‌یابد. این مواجهه باعث تعدد و ترکیب مسائل سینه کار شده و پیچیدگی تونل‌سازی را در حفاری، پایداری سینه کار، تخلیه مصالح و مسائل آب زیرزمینی افزایش می‌دهد.

در شکل (۲-۱۴) اشکال مختلف سقف و سینه کار مختلط نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴- اشکال مختلف سقف و سینه کار مختلط

مسائل حفاری در شرایط مختلط شامل موارد زیر است:

- حرکت تیغه از زمین نرم به سخت به آن ضربه وارد می‌کند.
 - حرکت تیغه از زمین نرم به سخت در کله حفاری ایجاد ارتعاش می‌نماید.
 - نیروی رانش به صورت غیریکنواخت در کله حفاری توزیع می‌شود.
 - هدایت دستگاه مشکل‌تر می‌شود.
 - استهلاک و سایش تیغه‌ها در اثر افزایش شکستگی و خراشیدگی بیش‌تر می‌شود.
- در شکل (۲-۱۵) مودهای مختلف ساییدگی تیغه دستی شامل: تخت، تخت متعدد، دندان‌های و ترک با شکست ترد در سینه کار مختلط نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵- حالت‌های مختلف ساییدگی تیغه دیسکی شامل تخت، تخت متعدد، دندانهای و ترک با شکست ترد در سینه کار مختلط

- پیش‌روی دستگاه به علت کاهش نیروی رانش و سرعت چرخش کله حفاری کم می‌گردد.
- با افزایش و تنوع فعالیت‌های محفظه سینه کار، سرعت عملیات اجرایی کاهش پیدا می‌کند.
- در سینه کار مختلط بلوکی حرکت بلوک‌های سنگی با چرخش کله حفاری باعث تشدید سایش تیغه‌ها می‌شود.

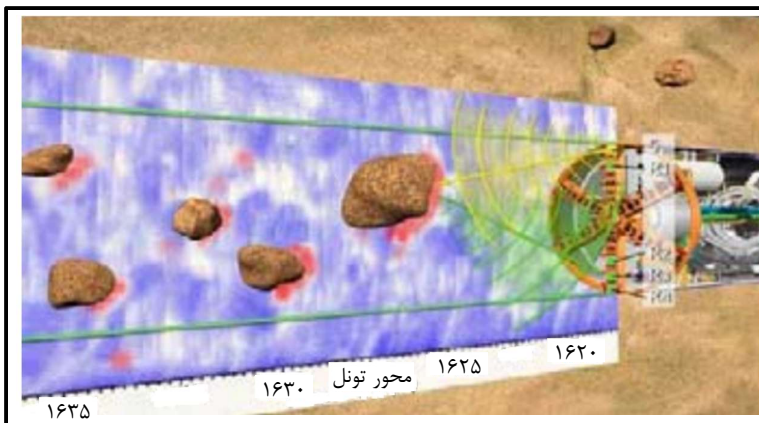
در این شرایط مسائل پایداری سینه کار به صورت زیر بروز پیدا می‌نماید:

- برای کنترل پایداری، کار در مود پایداری با دوغاب یا فشار تعادلی زمین نیاز بوده که باعث افزایش هزینه و کاهش بازده خواهد شد.
- تعیین وضعیت سفتی سینه کار مشکل می‌شود.
- فشار نگهدارنده سینه کار غیریکنواخت می‌شود.
- پتانسیل اضافه حفاری، ریزش سینه کار و ایجاد حفره‌ها افزایش می‌یابد.
- پتانسیل نشست سطحی موضعی افزایش می‌یابد.
- خردکردن بلوک‌های سنگی مشکل‌تر می‌شود.

مسائل تخلیه مصالح بلوکی و قطعات سنگی شامل موارد زیر است:

- صعوبت حمل بلوک‌های سنگی و قلوه سنگ‌ها روی تخلیه کننده مارپیچی و تسمه نقاله‌ها بیش‌تر است.
- حفظ فشار مناسب تخلیه در تخلیه کننده مارپیچی سخت‌تر شده که باعث پرتاب مصالح می‌شود.
- زمین بلوکی و قلوه سنگی باعث انسداد یا آسیب دیدن خطوط تخلیه دوغاب خصوصا در خم‌ها می‌گردد.
- در مورد آب زیرزمینی معمولا این نواحی محل تجمع و هجوم آب هستند و پایداری سینه کار را به خطر می‌اندازند.
- راهکارها و اقدامات متقابل در مواجهه با سینه کار مختلط (سخت و نرم) عبارتند از:
- استفاده از سنگ‌شکن در ماشین حفاری با دوغاب برای خرد کردن بلوک و قلوه سنگ،
- تحکیم جبهه کار در زمینی که شدت مختلط بودن و تغییرات آن کم‌تر است.

- استفاده از ماشین با قابلیت تغییر مود حفاری مثلا از مود باز به مود دوغابی،
- استفاده از تجهیزات شناسایی تغییرات قلوه سنگ‌ها برای انجام پیش‌بینی‌های لازم (شکل ۱۶-۲).



شکل ۱۶-۲- استفاده از تجهیزات شناسایی تغییرات قلوه سنگ‌ها

۱۲-۵-۲- خدمات مهندسی اجرا و بهینه‌سازی عملکرد دستگاه و رواداری‌های اجرایی مجاز

بهینه‌سازی عملکرد دستگاه بر اساس روند ارائه شده در بخش ۱-۲-۹ با ثبت و بررسی و تحلیل اطلاعات خروجی دستگاه و اطلاعات ژئوتکنیکی و بر اساس بازخوردهای برنامه اجرایی صورت می‌پذیرد. رواداری‌های حفاری و نصب پوشش مجاز نیز اصولا مشابه بخش زمین سخت می‌باشد که در قسمت ۱-۲-۱۰ ارائه گردید.

فصل ۳

روش‌های نگهداری و تحکیم اولیه

روش‌های نگهداری زمین در فرآیند اجرای تونل به سه دسته زیر تقسیم می‌شود:

دسته اول - پیش نگهداری، برای ایجاد شرایط مناسب قبل از ادامه حفاری و جهت نگهداری زمین نرم یا زمین‌ها و

نواحی سست که سینه کار یا سقف ناپایدار درحین حفاری پیدا می‌کنند،

دسته دوم - نگهداری موقت برای حفظ پایداری موقت تونل در زمان اجرا در صورت مشاهده علائمی از ناپایداری در

حین عملیات و قبل از اجرای کامل نگهداری اولیه،

دسته سوم - نگهداری اولیه برای پایدارسازی محیط تونل تا زمان نصب پوشش نهایی که گاهی ممکن است تاحدی

طولانی باشد. نگهداری اولیه می‌تواند شرایط باربری پوشش نهایی را تغییر دهد و در صورتی که در طراحی به عنوان

بخشی از پوشش نهایی محسوب گردیده باشد، باید دارای کیفیت و پایایی متناسب با نیازهای آن باشد.

روش‌های پیش نگهداری که قبل از انجام حفاری برای تثبیت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از:

۱- پیش تزریق و بهسازی زمین،

۲- فورپولینگ / فورپایلینگ (چتر لوله‌ای/ چتر شمعی)،

۳- پیش تحکیم با زهکشی،

۴- انجماد زمین،

۵- هوای فشرده،

روش‌های متداول نگهداری موقت که حین حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرند نیز عبارتند از:

۱- تزریق تحکیمی،

۲- میل مهار، پیچ سنگ و کابل تنیده،

روش‌های نگهداری اولیه هم می‌تواند شامل هر یک از موارد زیر یا ترکیبی از آن‌ها باشد:

۱- بتن‌پاشی (شاتکریت^۱) به صورت مسلح با مش، الیاف و شبکه‌های فروسیمان،

۲- قاب، لتیس^۲ و ورق‌گذاری (با ورق‌های موج‌دار یا تقویت شده)،

۳- میل مهار (انکر)، پیچ سنگ (راک بولت^۳) و کابل مهاری پیش تنیده یا پس کشیده.

از میان روش‌های گفته شده، بتن‌پاشی و میل مهار برای زمین سخت کاربرد مستقیم بیش‌تری دارند. کلیه روش‌ها یا

ترکیب آن‌ها برای زمین‌های سست یا نیمه سست قابل استفاده هستند.

طرح نگهداری معمولاً بر اساس شرایط زمین از قبل پیش‌بینی شده و توسط طراح به صورت نقشه ابلاغی یا پس از

تدقیق و تغییراتی در حین کار، بر اساس ارزیابی شرایط واقعی به صورت دستورکار به پیمانکار ارائه می‌شود.

۱- Shotcrete

۲- Lattice

۳- Rock Bolt

۳-۱- استفاده از بتن پاشی (شاتکریت^۱) و مش‌بندی

۳-۱-۱- کلیات و روش‌های اجرا

بتن‌پاشی (پاشیدن بتن) بدون درشت دانه با استفاده از فشار هوا و با سرعت بالا برای متراکم کردن آن است. کارکرد بتن‌پاشیده ایجاد فوری پوشش نیمه سخت بر روی سنگ یا خاک حفاری شده، برای جلوگیری از هوازدگی و مهار و متعادل کردن حرکت زمین و گوه‌های ناپایدار است. بتن‌پاشیده در دو نوع تر و خشک استفاده می‌گردد که در نوع خشک، آب و افزودنی در انتهای نازل به مخلوط مصالح و سیمان اضافه و با هم پاشیده می‌شوند و در نوع تر، همه مصالح غیر از افزودنی‌هایی نظیر زودگیرکننده‌ها، شیب بتن قبلاً مخلوط شده و با پمپ پاشیده می‌شوند. روش خشک معمولاً مقاومت اولیه کمی بیش‌تر و هزینه تجهیز کم‌تری داشته و نیاز به فضای کم‌تر و انعطاف‌پذیری اجرایی بیش‌تری دارد، ولی به علت هیدراتاسیون ناقص‌تر و وابستگی به مهارت بتن‌پاش برای تنظیم اختلاط، کیفیت نهایی آن پایین‌تر خواهد بود. در مقابل، روش تر کیفیت بالاتر با امکان کنترل کیفی بهتر بر طرح اختلاط، حجم اجرای بسیار بیش‌تر (حدود ۳ تا ۱۰ مترمکعب در ساعت در روش دستی و تا ۲۵ مترمکعب در ساعت در روش ماشینی؛ درمقایسه با ۱ تا ۵ مترمکعب در ساعت روش خشک) و نیروی انسانی مورد نیاز کم‌تر در صورت استفاده از ربات، ریزش کم‌تر (حدود ۱۵ درصد در مقابل محدوده ۲۰ تا ۴۰ درصدی روش خشک)، گرد و غبار کم‌تر و امکان مستندسازی بهتر احجام مصرفی را دارد. با توجه به این که امکان اجرای روش تر با پمپ‌های کوچک هم وجود دارد، از این رو، انعطاف‌پذیری این روش هم می‌تواند به میزان قابل توجهی افزایش یابد.

۳-۱-۲- ملاحظات و توصیه‌ها برای انتخاب طرح اختلاط بهینه

تفاوت مصالح بتن‌پاشیده با بتن معمولی، وجود سیمان بیش‌تر، اندازه بیشینه سنگدانه حدود ۱۲ میلی‌متر و یا ریزدانه بیش‌تر، نسبت آب به سیمان کم‌تر و مواد افزودنی پایدارکننده و زودگیرکننده است. روش انتخاب طرح اختلاط بهینه بتن‌پاشیده مانند بتن معمولی است، با این تفاوت که شاخص گیرش و مقاومت درسین اولیه به پارامترها اضافه می‌گردد. ملاحظات زیر برای مواد تشکیل دهنده بتن‌پاشیده جهت حصول طرح اختلاط مناسب ارائه می‌شود:

- سیمان: نوع سیمان مصرفی معمولاً سیمان پرتلند نوع یک یا دو یا سه یا سیمان اصلاح شده با محتوای گچ کم‌تر برای افزایش سرعت گیرش است. برای نوع دو باید دقت بیش‌تری در سازگاری زودگیرکننده به عمل آید. سایر انواع سیمان در شرایط خاصی قابل استفاده خواهند بود.
- سنگدانه: سنگدانه‌های مصرفی باید تمیز و عاری از مواد زائد باشند. سنگدانه رودخانه‌ای برای پاشش از لحاظ کاهش تخلخل و ریزش و استهلاک تجهیزات، مناسب‌تر از نوع شکسته هستند و در هر حال رطوبت آن‌ها باید

- با دقت کنترل و از نبود دانه‌های درشت در آن اطمینان حاصل شود. اندازه متداول مورد استفاده در محدوده صفر تا ۱۲ میلی‌متر می‌باشد.
- آب: آب مصرفی شرایط مشابه آب شرب داشته و محدودیت‌های آب مصرفی بتن برای آن در نظر گرفته می‌شود.
- افزودنی زودگیرکننده: زودگیرکننده‌های قلیایی نظیر آلومینات‌ها و سیلیکات‌های سدیم که گیرش اولیه‌ای کم‌تر از یک دقیقه و گیرش نهایی کم‌تر از ۴ دقیقه دارند، سوزاننده بوده و هنگام کار با آن باید دقت لازم به عمل آید. نوع جدیدتر زودگیرکننده که از ترکیبات نمک آلومینیم بوده و خاصیت قلیایی و سوزاننده ندارد، دارای گیرش اولیه کم‌تر از ۵ دقیقه و گیرش نهایی کم‌تر از ۱۰ دقیقه است. مقدار مصرف این مواد (حدود ۴٪) باید تحت کنترل باشد، چراکه اضافه یا کم شدن کنترل نشده آن باعث تغییر خواص مورد انتظار می‌گردد. افزودنی زودگیرکننده نباید محتوای قلیایی بیش از سیمان داشته باشد.
- افزودنی روان‌ساز: این مواد در قالب کاهنده آب و روان کننده لیگنوسولفات یا فوق روان کننده نفتالین، ملامین یا پلی کربوکسیلات بدون افزایش نسبت آب به سیمان، روانی و کارایی مخلوط را افزایش می‌دهند. البته زمان اثرگذاری این افزودنی‌ها در حین استفاده و اجرا باید مورد توجه قرار گیرد. با مصرف افزودنی روان کننده به مقدار حدود ۱/۶٪، نسبت آب به سیمان بهینه بتن‌پاشیده که از طرح اختلاط به دست آمده، ثابت خواهد ماند.
- افزودنی پایدارکننده: این مواد علاوه بر جلوگیری از هیدارتاسیون زودهنگام بتن قبل از پاشیدن، همگنی و یکنواختی مخلوط را تضمین نموده و اغلب با مقدار حدود ۰/۶٪، با ایجاد خاصیت ژل مانند و تک فازه نمودن بتن کیفیت آن را در حین پاشیدن بهتر حفظ می‌نمایند.
- سایر افزودنی‌ها نظیر مواد حباب زاء، آب‌بندکننده و بازدارنده خوردگی معدنی یا آلی، به منظور پایاسازی بتن‌پاشیده استفاده شده و باعث بهبود دوام آن پس از گیرش و جلوگیری از خوردگی مش فولادی داخل آن می‌شوند. افزودنی‌های بتن‌پاشی در صورت وجود فولاد و مش نباید حاوی کلراید باشد. مواد حباب زاء بین ۵ تا ۷ درصد وزنی سیمان و به صورت جامد برای حالت تر یا مایع برای حالت خشک استفاده می‌شوند.
- مواد مضاف: بعضاً در قالب میکروسیلیس به صورت ژل عمل‌آوری شده برای بتن‌پاشی تر و در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی سیمان برای بهبود خواص مقاومتی، آب‌بندی و کاهش ریزش استفاده می‌شوند. برای بتن‌پاشی خشک میکروسیلیس در شکل متراکم نشده و ترجیحاً با حداکثر اندازه ذرات ۰/۲ میلی‌متر استفاده می‌شود.
- در جدول (۳-۱) محدوده طرح اختلاط متداول بتن‌پاشیده تر و خشک برای کاربرد در تونل‌سازی ارائه شده است. به دست آوردن طرح اختلاط مناسب با انجام نمونه‌گیری و آزمایش صورت می‌پذیرد.

جدول ۳-۱- مقادیر متداول طرح اختلاط بتن پاشیده تر و خشک در تونل‌سازی

نوع بتن پاشیده	مقاومت مشخصه مگاپاسکال	سیمان کیلوگرم در مترمکعب	آب به سیمان درصد	ماسه کیلوگرم در مترمکعب	حباب‌زا درصد	افزودنی کاهنده آب و فوق روان کننده درصد	ژل میکروسیلیس کیلوگرم در مترمکعب	زودگیر درصد
تر	۴۵ تا ۲۵	۵۰۰ تا ۳۰۰	۴۵ تا ۳۵	۱۶۵۰ تا ۱۷۵۰	۱۵ تا ۷	۱/۲ تا ۱/۸	۵۰ تا ۳۰	۴-۳
خشک	۳۰ تا ۲۰	۵۵۰ تا ۳۵۰	۵۰ تا ۴۰	۱۶۰۰ تا ۱۷۰۰	۷ تا ۴	-	-	۴-۳

- تسلیح: در بتن پاشیده از سه نوع تسلیح می‌توان استفاده نمود:

- تسلیح با مش فولادی: استفاده از شبکه فولادی در شاتکریت ظرفیت باربری قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند. نصب پانل‌های مش با میل مهارها یا پیچ‌های موقت و با حداقل یک چشمه هم‌پوشانی انجام می‌شود. معمولاً یک لایه مش در مجاورت زمین برای تثبیت و یک لایه سطحی برای کنترل ترک خوردگی بتن و بسته به ضخامت بتن پاشی لایه‌های میانی هم استفاده می‌شود. شبکه فولادی معمولاً به صورت جوش یا بافته شده ارائه می‌شوند. یکی از معایب استفاده از شبکه‌های فولادی، عدم امکان نصب آن با فاصله نزدیک به سطح سنگ است، به خصوص در سنگ‌هایی که حفاری کنترل نشده در آن انجام گرفته و یا طبیعت سنگ باعث بروز ناهمواری‌های زیاد شده است که البته به وسیله شاتکریت لایه اول می‌توان تا حدودی از ناهمواری‌ها را کم کرد. بعضی از مش‌ها برای شاتکریت با کارکرد دائم مانند تثبیت پورتال‌های ورودی تونل‌ها، ممکن است با پوشش ضد خوردگی به کار روند.
- تسلیح با الیاف: در دو جنس فولادی و پلیمری و دو اندازه میکرو برای بهبود کیفیت و کاهش ترک خوردگی و افزایش آب‌بندی و پایداری و ماکرو برای بهبود خواص مقاومتی و شکل‌پذیری افزون بر خواص الیاف میکرو استفاده می‌شوند. جزئیات کاربرد الیاف در بتن پاشی در آیین‌نامه موسسه بتن آمریکا^۱ ارائه شده است.
- انواع خاص مش در بتن پاشی مانند مش‌های فولادی تقویت شده برای نواحی مستعد انفجار سنگ، پانل بافته شده سه بعدی از فولاد سرد نورد شده، مش ریز فروسیمان، مش پلیمری و نظایر آن است. شایان یادآوری است، انواع مش فولادی زنجیره‌ای که برای مهار ریزش سنگ در حفاری به کار می‌روند، برای بتن پاشی مناسب نمی‌باشند.

۳-۱-۳- نمونه‌گیری و آزمایش‌های حین اجرا برای کنترل کیفیت

آزمایش‌های کنترل کیفی بتن پاشیده در سه مرحله قبل، حین و بعد از اجرا دسته‌بندی می‌شوند. در مرحله قبل از اجرا، آزمایش‌ها شامل ارزیابی پرسنل و تجهیزات و طرح اختلاط هستند. در جدول‌های (۳-۲) و (۳-۳)، به ترتیب برای

آزمایش‌های قبل و حین اجرا، پیشنهادی آیین‌نامه اروپایی ارائه شده است.

جدول ۳-۲- آزمایش‌های قبل از اجرای پیشنهادی آیین‌نامه بتن اروپایی^۱

نوع آزمایش	کاربرد	موقت	دائم
سازگاری و یکپارچگی مخلوط اولیه تر	عمومی	بله	بله
افزایش مقاومت در سنین اولیه	عمومی	بله	بله
مقاومت فشاری	عمومی	بله	بله
مدول ارتجاعی	عمومی	اختیاری	اختیاری
پیوستگی به سطح اولیه	عمومی	اختیاری	اختیاری
حداکثر محتوای کلراید	عمومی	اختیاری	اختیاری
مقاومت پسماند یا ظرفیت جذب انرژی	بتن پاشیده الیافی	بله	بله
مقاومت خمشی نهایی	بتن پاشیده الیافی	خیر	بله
مقاومت خمشی پیک اول	بتن پاشیده الیافی	خیر	بله

جدول ۳-۳- آزمایش‌های حین اجرا پیشنهادی آیین‌نامه بتن اروپایی^۲

نوع آزمایش	روش	نگهداری موقت	نگهداری دائم
کنترل بتن پاشیده تازه			
نسبت آب به سیمان	محاسبه یا اندازه گیری	-	روزانه
زودگیرکننده	مقدار افزودنی	-	روزانه
مقدار الیاف (در حین اندازه گیری مقاومت پسماند هم قابل انجام است)	EN 14488-7	یک دویستم واحدحجم یا یک هزارم واحد سطح	یک صدم واحدحجم یا یک پانصدم واحد سطح
کنترل بتن پاشیده سخت شده			
مقاومت در سنین اولیه	EN 14488-2	یک دوهزارو پانصدم واحد سطح یا ماهی یکبار	یک هزارو دویست و پنجاهم واحد سطح یا ماهی دوبار
مقاومت فشاری	EN 12504-1	یک پانصدم واحدحجم یا یک دوهزارو پانصدم واحد سطح	یک دویست و پنجاهم واحد حجم یا یک هزارو دویست و پنجاهم واحد سطح
چگالی	EN 12390-7	در حین اندازه گیری مقاومت فشاری	
مقاومت پیوستگی	EN 14488-7	یک دوهزارو پانصدم واحد سطح	یک هزارو دویست و پنجاهم واحد سطح
کنترل بتن پاشیده الیافی			
مقاومت پسماند یا ظرفیت جذب انرژی	EN 14488-3 یا EN 14488-5	یک چهارصدم واحدحجم یا یک دوهزارم واحد سطح	یک صدم واحدحجم یا یک پانصدم واحد سطح
مقاومت خمشی نهایی	EN 14488-3	در حین اندازه گیری مقاومت پسماند	
مقاومت خمشی پیک اول	EN 14488-3	در حین اندازه گیری مقاومت پسماند	

پس از اجرا نیز کنترل و آزمایش با مغزه‌گیری یا آزمایش‌های برجا و پس از آن در قالب برنامه پایش انجام می‌پذیرد. برای انجام آزمایش جذب انرژی و سایر موارد در آزمایشگاه و نیز ارزیابی کیفیت کار بتن پاش، معمولاً نمونه‌گیری در جبهه‌ای با ابعاد تقریبی ۷۵ در ۷۵ در ۱۵ سانتی‌متر بر اساس استاندارد آزمایش در کارگاه تهیه و به آزمایشگاه منتقل می‌شود.

۱- EN-14487-2005

۲- EN-14487-2005

یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های کنترل کیفی بتن‌پاشی در حین اجرا و بعد از آن، کنترل چسبندگی لایه‌ها است، که با روش کشش جداکننده^۱ انجام می‌پذیرد و کفایت چسبندگی لایه‌های بتن‌پاشیده و عملکرد یکپارچه و دوام آن‌ها را به ویژه در نواحی آبدار مشخص می‌نماید. آزمایش‌های ارزیابی مقاومت در سنین اولیه، می‌تواند طبق جدول (۳-۴) انجام پذیرد.

جدول ۳-۴- روش‌های آزمایش‌های ارزیابی مقاومت در سنین اولیه

مقاومت بر حسب مگاپاسکال	روش آزمایش	مرجع
۰ تا ۱/۲	می‌کو (Meyco) یا سوزن نفوذ پروکتور	ASTM C403M-2006
۸/۰ تا ۱/۰	تفنگ نفوذ هیلتی	ITA Report No.24 - Permanent Sprayed Concrete Linings, 2020 (OBV-Austrian Guidelines 2013)
۱۶/۰ تا ۳/۰	بیرون کشیدن بولت	
۵۶/۰ تا ۱۶/۰	بیرون کشیدن بولت	
بیش‌تر از ۱۰/۰	حفاری مغزه	

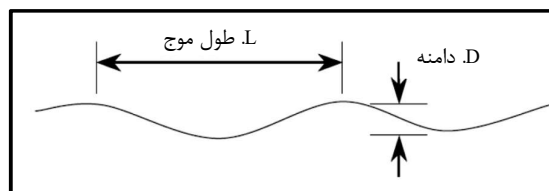
توصیه‌ها و شاخص‌های اصلی موثر در بهبود و کنترل کیفیت اجرای بتن‌پاشی عبارتند از:

- مهارت بتن‌پاش که در روش‌های دستی بسیار اثرگذار است و لازم است بتن‌پاش آموزش کافی دیده و دارای گواهینامه مهارت باشد. در استفاده از ربات بتن‌پاش نیز، تسلط لازم اپراتور ربات باید احراز گردد.
- تجهیزات مناسب اجرایی که حسب شرایط و نیازها، قابلیت تنظیم و کنترل مناسب پارامترهای اجرایی نظیر نسبت‌های اختلاط و کیفیت اجرا را فراهم نمایند.
- طرح اختلاط مناسب و کنترل انحراف از مشخصات. در شرایط عادی بسته به کیفیت اجرا معمولاً در بتن‌پاشیده خشک انحراف معیار ۵ و در بتن‌پاشیده تر ۳/۵ مگاپاسکال در نتایج مقاومت انتظار می‌رود.
- شرایط سطح که با دو شاخص فرم و سفتی بررسی می‌شود و نوع تسلیح، هرچه سفتی سطح بیش‌تر باشد، ریزش مصالح حین بتن‌پاشی بیش‌تر خواهد بود. در مورد فرم، بتن‌پاشیده تر در سطوح دارای فرورفتگی و بیرون‌زدگی بازده و عملکرد مناسب‌تری داشته و در صورت استفاده از الیاف به جای مش برای مسلح نمودن، حجم مصالح بسیار کم‌تری برای پایدارسازی مصرف خواهد شد.
- کیفیت سطح تمام شده بتن‌پاشیده بستگی به نیازهای طرح و طرح اختلاط و کیفیت اجرا دارد. از نظر کنترل کیفی سطح بتن‌پاشیده باید دارای زبری یکنواخت، بدون تخلخل، بدون لکه سفید قابل توجه و شوره‌زدگی باشد. برای داشتن سطح صیقلی می‌توان ضمن استفاده از ریزدانه بیش‌تر و کوچک‌تر در لایه آخر، در انتهای پاشش با ماله دستی یا برقی سطح را صاف نمود و یا با استفاده از شابلن، سطحی تقریباً مشابه بتن درجا ایجاد کرد. برای کنترل کیفی سطح تمام شده، معمولاً سطوح در چهار دسته ضعیف (متخلخل)، معمولی (زبر)، یکدست (تقریباً صیقلی شده با ماله دستی برای رفع نواقص موضعی) و صیقلی شده یکنواخت (با فشار با ماله فولادی برقی) دسته‌بندی می‌شوند. در جدول (۳-۵) معیارهای زبری سطح ارائه شده است. در شکل (۳-۱)

معیار زبری سطح بر مبنای نسبت D/L نشان داده شده است.

جدول ۳-۵- معیارهای زبری سطح

شاخص	کاربرد	حد قابل قبول
نسبت D/L مطابق شکل (۳-۱) برای طول مبنای سه متر	نگهداری موقت	کم‌تر از ۱:۵
	نگهداری دائم	کم‌تر از ۱:۲۰
تبدیل‌ها و تقاطع باید با شعاع داخلی حداقل برابر ضخامت پوشش نهایی انحنای داده شوند	نگهداری دائم	۵۰۰ میلی‌متر
شعاع انحنای بیرون‌زدگی پوشش در محل قطعات فولادی مدفون مانند پیچ سنگ در پوشش بتنی	نگهداری دائم	۲۵ میلی‌متر
تمام قطعات مدفون فولادی مانند پیچ سنگ باید کاملاً بریده یا در پوشش مدفون شوند	نگهداری دائم	۲ میلی‌متر



شکل ۳-۱- معیار زبری سطح بر مبنای نسبت D/L

۳-۱-۴- مراحل تکمیل پوشش و تجربیات بهبود بازده

۳-۱-۴-۱- چالش‌های متداول اجرای بتن‌پاشیده در تونل‌سازی

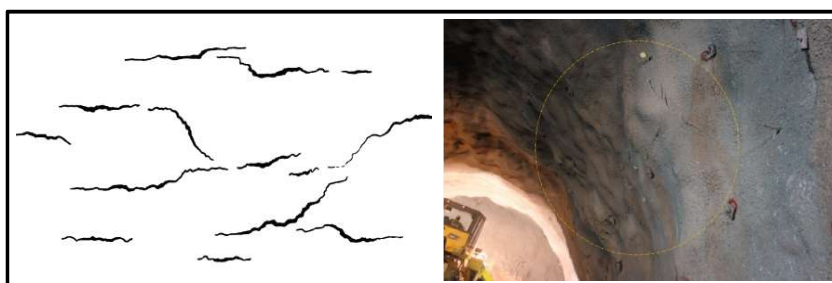
با توجه به سوابق و تجربیات اجرایی موجود در کشور، مشکلات، چالش‌ها و نواقص زیر در صورت اجرای ضعیف بتن‌پاشیده یا مسائل پیش‌بینی نشده زمین محتمل خواهند بود:

- ۱- تخلخل خصوصاً در سطوح دارای فرورفتگی و بیرون‌زدگی و با وجود موانعی نظیر پروفیل‌های قاب و میلگردها،
- ۲- سایه افتادن پشت قطعات فولادی و کاهش باربری و افزایش ریسک خوردگی فولاد،
- ۳- افتادگی در صورت ضخیم و سنگین بودن لایه بتن‌پاشی شده و کافی نبودن چسبندگی با سطح و لایه‌های قبلی،
- ۴- لایه لایه شدن در صورت کافی نبودن چسبندگی بین لایه‌ها در صورت مناسب نبودن طرح اختلاط یا تغییرات شدید در تراکم لایه‌های پاشیده شده یا ایجاد فاصله زمانی و آلوده یا هوازده شدن سطوح قبلی یا استفاده از زودگیرکننده نامناسب که باعث ایجاد لکه‌های سفید در سطح نیز می‌شود. این مساله باعث کاهش انسجام بتن‌پاشی و از بین رفتن آب‌بندی آن نیز می‌گردد و دوام آن به علت نفوذ آب به داخل بتن و تسریع خوردگی مش‌ها نیز کاهش می‌یابد. از طرف مقابل، در نواحی آبدار، فشار و تراوش آب در بین لایه‌های شاتکریت، به مرور باعث جدایش بیش‌تر لایه‌ها می‌گردد.
- ۵- ریزش مصالح که در صورت عدم زدودن از روی میلگرد و پاکسازی باعث ایجاد نواحی ضعیف در پوشش می‌گردد.
- ۶- کاهش مقاومت در صورت استفاده بیش از حد از زودگیرکننده‌ها و طرح اختلاط نامناسب، انجام انفجار و حفاری

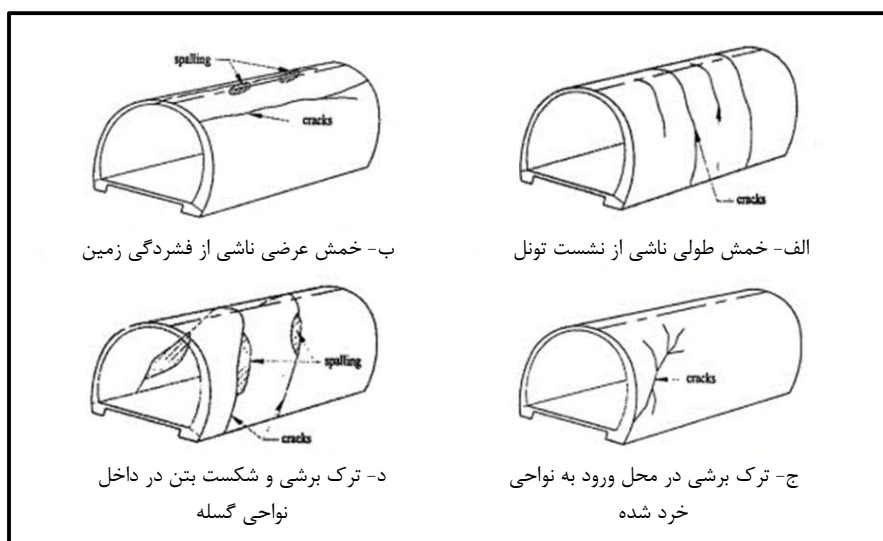
و ایجاد لرزش با فاصله زمانی نامناسب از گیرش بتن‌پاشیده و اجرای بتن‌پاشیده در وضعیت و زمان نامناسب و هم‌زمان با رخداد تغییرشکل زیاد زمین.

۷- ترک‌خوردگی در صورت تداوم افزایش تغییرشکل‌های زمین، طرح اختلاط نامناسب و آبرفتگی زیاد بتن‌پاشیده و بتن‌پاشی ممتد در ضخامت زیاد و تغییر شرایط زمین در نواحی خرد شده و گسله: انواع ترک‌خوردگی‌ها در شکل‌های (۲-۳)، (۳-۳) و (۴-۳) نشان داده شده‌اند.

۸- اصلاح و تقویت نواحی و نقاط دارای تغییرشکل زیاد و بیرون‌زدگی و شکستگی و ریزش شاتکریت و اصلاح فضای داخلی اجرای پوشش نهایی و بهره‌برداری تونل.



شکل ۳-۲- ترک‌خوردگی سطح بتن‌پاشیده ناشی از آبرفتگی پلاستیک حین خشک شدن در بتن‌پاشی ممتد در ضخامت زیاد



شکل ۳-۳- حالت‌های ترک‌خوردگی شاتکریت شامل الف) خمش طولی ناشی از نشست تونل، ب) خمش عرضی ناشی از فشردگی زمین، ج) ترک برشی در محل ورود به نواحی خرد شده و د) ترک برشی و شکست بتن در داخل نواحی گسله

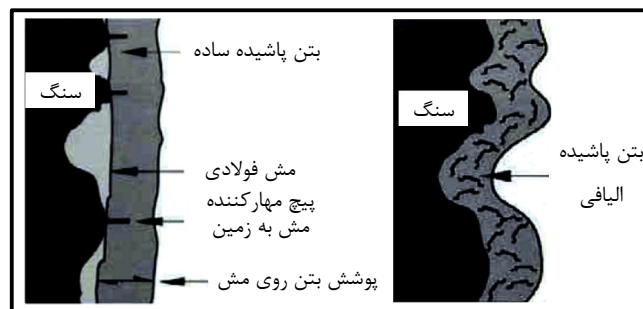


شکل ۳-۴- ترک خوردگی شاکریت تحت اثر ارتعاشات ناشی از انفجار در سنین اولیه

۳-۴-۱-۲- توصیه‌های اجرایی و تجربیات بهبود بازده و کیفیت بتن پاشی

بر اساس تجربیات تونل‌های انتقال آب در کشور و سایر نقاط جهان، ملاحظات و توصیه‌های زیر را می‌توان بیان نمود:

۱- میزان مصرف بتن پاشیده بستگی به نوع سیستم نگهداری دارد. معمولاً بتن پاشیده با قاب، لتیس، بولت، مش یا الیاف همراه است و در هر مورد نوع عملکرد و مقدار مصرف بتن پاشیده متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال، بتن پاشی الیافی به دلیل تطابق بهتر با فرم سطح حفاری مطابق شکل (۳-۵)، مقدار مصرف کم‌تری دارد.



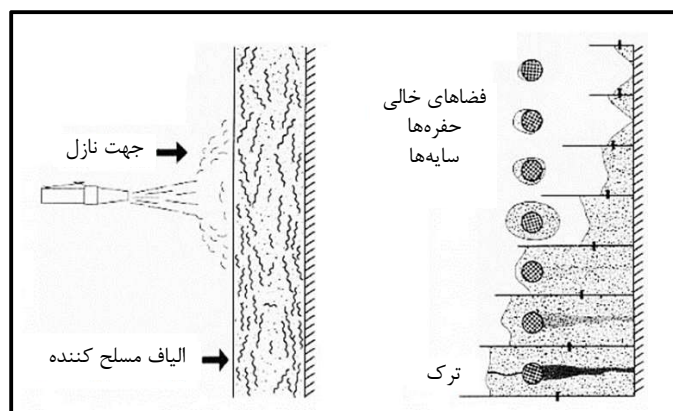
شکل ۳-۵- مقایسه میزان حجم و کیفیت بتن پاشی در حالت استفاده از مش و الیاف

۲- بتن الیافی ترک خوردگی کم‌تر، آب‌بندی بهتر و پایایی بهتری در برابر تغییر شکل زمین دارد. همچنین، سختی بیش‌تر (به دلیل فرم غیرمستوی) و تخلخل کم‌تری به دلیل عدم سایه انداختن مش خواهد داشت. نبود مش باعث کاهش ریزش بتن پاشیده هم می‌شود.

۳- روش بتن پاشی و زاویه نازل هم در ریزش و هم در کیفیت بتن پاشیده موثر است. بهترین روش بتن پاشی برای کاهش ریزش، به صورت عمود بر سطح است. برای رفع مشکل سایه‌اندازی بهتر است در مواقعی، زاویه حول محور نازل تغییر نموده و کمی حرکت چرخشی برای بهبود کیفیت به آن اعمال شود.

۴- ریزش بتن پاشیده بستگی به زاویه نازل، میزان زودگیرکننده، فاصله نازل تا سطح پاشش، موقعیت محل پاشش در تونل، کیفیت طرح اختلاط، وضعیت میلگردها و مش و سرعت پاشش دارد. ذرات درشت دانه مثلاً ۱۴ تا ۱۶ میلی‌متر به بالا و افزایش سرعت پاشش به ۲۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه باعث افزایش شدید ریزش می‌شود. بهتر است قطر سنگدانه‌ها از یک سوم ضخامت بتن پاشی بیش‌تر نشود. برای چسبندگی بهتر استفاده از سیلیکافوم یا همان

ژل میکروسیلیس هم متداول است (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶- مقایسه کیفیت عمومی اجرای بتن‌پاشی در تسلیح با میلگرد و الیاف و مشکل سایه‌اندازی

- ۵- رطوبت محتوای مجموعه سنگدانه‌ها قبل از اختلاط با سیمان، باید کنترل شود. در بتن‌پاشی به روش خشک بهتر است سنگدانه‌ها خشک نبوده و درصد رطوبت آن‌ها در محدوده ۳ تا ۶ درصد تنظیم شود. تنظیم نبودن میزان رطوبت، باعث کیفیت متغیر اجرا و اختلال در تنظیم کار اپراتور بتن‌پاش می‌گردد.
- ۶- قبل از بتن‌پاشی باید سطح مورد اجرا را آماده کرد. این سطح نباید خشک، آلوده و آغشته به گرد و خاک و یا یخ زده باشد. بدین منظور باید سطح مورد نظر با استفاده از جت هوا و آب، تمیز شود. مهم آن است که اولین لایه شاتکریت، به خوبی به سطح بچسبد.
- ۷- افزودنی پلیمری مانند اکریلیک^۱ و لاتکس^۲ (یا سیمان پلیمری یا ژل میکروسیلیس)، باعث افزایش چسبندگی به لایه قبل و انعطاف‌پذیری بیش‌تر بتن‌پاشیده و کاهش ترک‌خوردگی آن در اثر تغییر شکل زمین و آب‌بندی بهتر آن می‌گردد. البته، استفاده از میکروسیلیس باید هم‌زمان با کنترل آبرفتگی حین خشک شدن باشد.
- ۸- در صورت آسیب‌دیدگی و تغییر شکل موضعی شاتکریت با حفظ برنامه پایش، تقویت و اصلاح نواحی بیرون‌زده و متورم شده پوشش بتن‌پاشیده با مش و بولت بر اساس این مراحل صورت می‌پذیرد:
 - تخریب پوشش تغییر شکل یافته در قسمت‌هایی که وارد ناحیه پوشش نهایی شده،
 - مش‌گذاری (ترجیحاً مش‌های زنجیره‌ای مخصوص کنترل ریزش) و تثبیت آن با بولت،
 - نصب میل مهار یا راک بولت برای تثبیت زمین در ناحیه ضعیف شده بر اساس الگوی مورد نیاز،
 - استفاده از بتن‌پاشی نرم محتوی مواد چسباننده پلیمری لاتکس یا اپوکسی برای ترمیم بخش ریزشی.
- ۹- در مواردی که سطح مورد اجرا درزه‌های آبدار مشخصی داشته باشد، باید تمهیداتی را برای زهکشی آب از دورن

۱- Acrylic

۲- Latex

لایه بتن‌پاشی شده خصوصا برای بتن‌پاشی تر که به آبستگی حساس‌تر است، به کار بست. بدین منظور، معمولا تعدادی لوله پلاستیکی در بتن‌پاشیده کار گذاشته می‌شود تا آب از طریق آن‌ها خارج شود.

۱۰- در حین اجرا، فشار آب و هوا بهتر است در حد ثابتی حفظ و در صورت لزوم، رطوبت اضافی همراه با هوا حذف شود. فشار هوا بهتر است در حدود ۳ بار باشد و به ازای هر ۱۵ متر اضافه طولی که بیش از ۳۰ متر اولیه شلنگ باشد، حدود ۰/۷ بار به آن اضافه شود.

۱۱- در مورد کیفیت آب، استفاده از آب بازیافتی برای بتن‌پاشیده مجاز نمی‌باشد. آب مورد استفاده در شستشوی سطوح قبل از بتن‌پاشی نیز باید عاری از هر گونه مواد شیمیایی مضر و چربی و مواد نفتی باشد. در شرایطی که دمای سطح سنگ کم باشد، لازم است برای تنظیم دمای بتن‌پاشیده از آب گرم استفاده شود. کاهش دمای بتن‌پاشیده از حدود متعارف لازم برای گیرش بتن باعث کاهش کیفیت آن می‌گردد.

۱۲- بتن‌پاشی باید هر چه زودتر پس از خاتمه عملیات آتشباری و یا حفاری انجام گیرد و البته باید فاصله حداقلی با انفجار بعدی داشته باشد. زمان مجاز تاخیر بستگی به ضخامت بتن‌پاشی، فاصله از محل انفجار بعدی، مقدار خرج انفجاری و الگوی انفجار و شرایط محیطی و طرح اختلاط دارد. در مورد تونل‌هایی که زمان ایستایی طولانی دارند، می‌توان با بتن‌پاشی، نگهداری دائمی ایجاد نمود.

۱۳- بتن‌پاشی باید از نزدیکی جبهه کار آغاز شده و به قسمت عقب ادامه یابد تا به بتن‌پاشی قبلی، متصل شود. اگر مراحل کار به خوبی اجرا شود، می‌توان با فاصله کمی، مثلا ۲ ساعت، سیکل جدید آتشباری را اجرا کرد. در این موارد می‌توان عملیات تکمیلی بتن‌پاشی در قسمت‌های مورد نیاز را در طول مدت چالزنی، انجام داد.

۱۴- انتخاب نوع دستگاه بتن‌پاشی و تجهیزات آن نظیر ربات، بتن‌ساز، تراک حمل بتن یا مصالح خشک، کمپرسور و نازل بر اساس فضا و ظرفیت مورد نیاز پیشرفت کار بسیار مهم است. تجهیزات لازم برای این کار باید به دقت انتخاب و پیش‌بینی لازم برای خرابی دستگاه و توقف کاری خصوصا در زمین‌های سست‌تر در نظر گرفته شود.

۱۵- بتن‌پاشیده معمولا عمل‌آوری نمی‌شود و فرض می‌شود در تونل با رطوبت معمول حدود ۵۰ درصد و بالاتر این عمل تاحدی حاصل شود. البته در صورت کم بودن رطوبت یا نیاز به کیفیت بالاتر بتن‌پاشیده و یا استفاده از بتن‌پاشیده به عنوان پوشش نهایی، می‌توان از اسپری آب یا ترکیبات عمل‌آورنده نیز بهره جست.

۱۶- هندسه بتن‌پاشی در نگهداری موقت بستگی مستقیم به شرایط زمین دارد. در زمین‌های سخت ممکن است بتن‌پاشی به تاج تونل محدود شده و در زمین‌های نرم برای کنترل همگرایی و تغییر شکل‌ها، حلقه بتن‌پاشی بسته اجرا شود. در هر یک از حالات ممکن است ترکیب بتن‌پاشی با سیستم‌های دیگر نظیر بولت در نظر گرفته شود که توالی اجرای آن‌ها باید از پیش تعریف شده باشد. در هر صورت لازم است جزئیات طرح مورد نظر از قبل مشخص شده باشد و در حین اجرا پایش و تدقیق شود.

۱۷- برای بهینه‌سازی و پایداری بهتر بتن‌پاشی لازم است پروفیل بتن‌پاشی با شرایط تونل مطابقت داده شود. در شرایط اضافه حفاری لازم نیست تمام فضا با بتن‌پاشی پر شود. در شرایط کسر حفاری، با استفاده از بتن‌پاشیده

- پایا می‌توان بتن‌پاشیده را به عنوان بخشی از پوشش نهایی منظور نمود.
- ۱۸- از مسایل مهمی که ضمن اجرا باید مورد توجه قرار گیرد، ایجاد ضخامت لازم بتن‌پاشی در قسمت‌های مختلف سطح مورد اجرا است. برای کنترل این مساله معمولاً در هر مترمربع میخ‌های نشانه کار گذاشته می‌شود.
- ۱۹- ملاحظات اچ.اس.ای مربوط به بتن‌پاشی در حین اجرا را می‌توان به سه بخش زیر تقسیم نمود:
- مخاطرات فیزیکی (پرتاب سنگدانه تا حدود ۱۵ متری، دید، آلودگی غبار ذرات کوچک‌تر از ۵ میکرون سیمان و سیلیس در فضای ۲۰ تا ۱۷۰ متری پیرامون در بتن‌پاشی خشک و لیز خوردن روی واریزه خمیری)،
 - مشکلات شیمیایی (مواد و بخارهای قلیایی سیمان، جراثیم و سوختگی پوستی)،
 - مسایل مربوط به الکتریسیته ساکن (شارژ الکتریسیته ساکن در بین لوله لاستیکی و نازل فلزی در مخلوط خشک و رطوبت نسبی کمتر از ۵۰٪ ایجاد می‌شود و می‌تواند موجب انفجار در یک محیط قابل اشتعال گردد. از این رو، بهتر است از لوله‌های نیمه رسانا استفاده گردد)،
- ۲۰- ملاحظات اچ.اس.ای مربوط به بتن‌پاشی پس از اجرا نیز شامل مسائلی نظیر عدم پایداری در سنین کم و آلودگی آب هستند. عبور از نقاط ریزشی بتن‌پاشی شده در ۴ تا ۶ ساعت اول، بسیار خطرناک است. ممکن است سطح سنگ و یا هر سطحی که تحت بتن‌پاشی قرار می‌گیرد به حدی خشک و اسفنجی باشد که با مکیدن آب بتن‌پاشیده موجب کاهش چسبندگی و ریزش احتمالی آن گردد.

۲-۳- قاب‌گذاری یا لتیس‌گذاری

قاب، لتیس، ورق موج‌دار و پانل مشبک سه بعدی پیش‌ساخته فلزی، از قطعات صاف یا خم شده مطابق با قوس تونل تشکیل شده و هم‌زمان با پیشرفت مراحل حفاری، برای نگهداری زمین نصب می‌گردند. حسب شرایط زمین ممکن است تکیه‌گاه نگهدارنده قاب یا لتیس، به صورت نشیمن ساده در زمین سخت‌تر، به صورت بسته و دارای کف‌بند قوس‌دار یا افقی در زمین مستعد مچاله‌شوندگی و حتی در زمین بسیار سست، دارای جزء موقت سخت‌کننده در داخل مقطع تونل باشند. این روش نگهداری برای ورودی و تقاطع نیز کاربرد زیادی دارد؛ چراکه بر اساس هندسه آن ساخته و نصب می‌گردد. معمولاً، برای انتقال کامل بار از زمین به قاب، فاصله بین قاب با بتن‌پاشی یا مصالحی مشابه بتن‌پاشیده نظیر بتن با مصالح پیش‌ریخته^۱ پر می‌شود. تیرمشبک یا لتیس گیردر که به صورت خرپایی از میلگرد یا پروفیل مقطع کوچک ساخته می‌شود، نسبت به قاب فولادی وزن کمتری دارد و لذا حمل و نصب آن کمی آسان‌تر است، لکن نیاز بیشتری به افزایش سختی با پرکردن قسمت‌های میانی توسط بتن‌پاشی دارند.

۳-۲-۱- انتخاب سطح مقطع بهینه

طراحی سطح مقطع قاب و لتیس بر اساس اصول حاکم بر طراحی پوشش تونل و روش‌های تجربی صورت می‌پذیرد. معمولاً در تونل‌سازی، تیپ قاب یا لتیس در مرحله طراحی بر اساس انواع شرایط زمین ارائه شده و در اجرا با تشخیص نوع زمین، یکی از تیپ‌ها برای هر محدوده انتخاب و نصب می‌شوند. برای سهولت کار تهیه و اجرا، تا حد امکان مقطع قاب یا لتیس ثابت در نظر گرفته شده و با تغییر گام یا فواصل آن‌ها نسبت به یکدیگر، تغییر تیپ سامانه نگهداری حاصل می‌گردد. برای بهینه‌سازی این سامانه نگهداری یکی از روش‌ها هم، نصب مهاربند موقت داخل مقطع تا زمان تکمیل بتن‌پاشی و گیرش اولیه آن به منظور استفاده از ظرفیت باربری بتن‌پاشیده می‌باشد. البته این کار ممکن است باعث ایجاد صعوبت در دسترسی در مقاطع کوچک‌تر و وقفه در ادامه عملیات حفاری تونل گردد. با توجه به این که عموماً نصب قاب و لتیس بلافاصله پس از حفاری انجام می‌پذیرد، در زمین با پتانسیل هم‌گرایی بالا به منظور بهینه‌سازی مقاطع و کاهش بار وارده به سامانه نگهدارنده، می‌توان از قاب با اتصال کشویی به منظور آزادسازی بخشی از تغییرشکل زمین تا حصول شرایط تعادل مناسب استفاده نمود.

۳-۲-۲- روش‌های تهیه، حمل و نصب

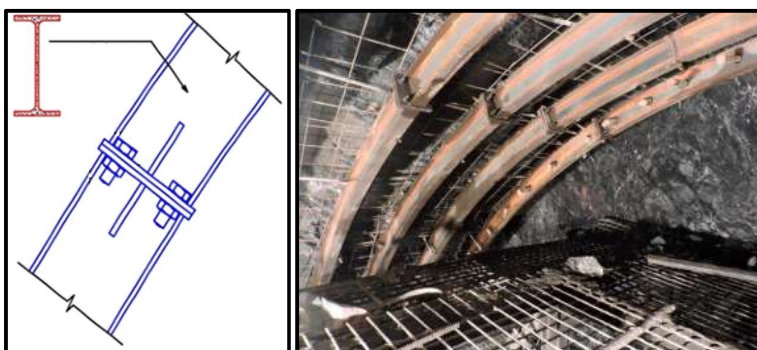
پروفیل‌های به کار رفته در قاب‌گذاری معمولاً از نوع تیر نظیر آی.پی.ای^۱ و در مقاطع کوچک‌تر سایر پروفیل‌ها مانند ناودانی با مقاومت مشخصه معمولی برای سهولت در خم کردن می‌باشند. استفاده از پروفیل با مقاومت بالا به علت صعوبت خم کاری و جوشکاری متداول نمی‌باشد.

در تهیه لتیس‌ها از شبکه میلگردی جوش شده به صورت حداقل سه میلگرد اصلی مستقیم طولی و میلگردهای خم شده عرضی با توپولوژی خرابایی استفاده می‌گردد. این پروفیل‌ها یا میلگردها در کارخانه یا کارگاه با دستگاه مخصوص، خم و برش و جوش داده می‌شوند.

اتصال قطعات حاصل شده، با پیچ، پین، کشو یا جوش با اتصالات صلب یا مفصلی در محل نصب امکان‌پذیر است. نوع متداول معمولاً پیچی است که در آن قبلاً با عملیات جوشکاری، صفحات اتصال سوراخ شده به دو سر قطعه وصل شده‌اند (شکل ۳-۷). تعداد و اندازه قطعات قاب یا لتیس طوری انتخاب می‌شود که علاوه بر تطبیق با شرایط و مراحل حفاری و فضای کاری داخل تونل، حداقل وزن ممکن را جهت حمل و نصب دارا باشند، ضمن این که تعداد قطعات برای افزایش سرعت نصب و کاهش تعداد اتصالات به حداقل ممکن برسد. محل اتصالات معمولاً در نواحی دارای حداقل خمش و برش تعبیه می‌شوند که بیش‌تر در محدوده ساعت ۲ و ۱۰ قرار می‌گیرند. اتصال پیچی نسبت به کشویی معمولاً دارای رواداری اجرایی بیش‌تری است. اتصالات کشویی معمولاً برای زمینی که حفاری با دقت بیش‌تر صورت گرفته و تغییرات پروفیل زمین‌شناسی و تغییرشکل آبی زمین قابل توجه نباشد، مناسب‌تر است (شکل ۳-۸). از نظر سهولت اصلاح و نصب در

۱- I Shape Profile (IPE)

کارگاه نیز اتصال پیچی با صفحه انتهایی مناسب‌تر می‌باشد، لکن از لحاظ کیفیت ساخت و عدم استفاده از جوش و نبود نقاط ضعیف درقاب، اتصال کشویی شرایط نسبی بهتری دارد. همچنین، در اتصال کشویی امکان آزادسازی تنش و تغییرشکل فراهم بوده و در صورت نیاز قابل اعمال می‌باشد. مقایسه و انتخاب نوع مناسب اتصال بسته به فناوری تولید و مسائل فنی و اجرایی ذکر شده و بررسی اقتصادی صورت می‌پذیرد.



شکل ۳-۷- روش متداول اتصال قطعات قاب با پیچ



شکل ۳-۸- قاب پیش‌ساخته با نصب نیمه ماشینی با مقطع U شکل و اتصال کشویی قابل تنظیم و آزادسازی تغییرشکل زمین

قطعات ساخته شده معمولاً در بیرون تونل دپو شده و ضمن حفاظت در برابر عوامل جوی، بر اساس نیاز برنامه اجرایی به جبهه حفاری حمل می‌شوند. محل نگهداری قطعات در جبهه حفاری باید طوری باشد که در حین بتن‌پاشی آلوده نشوند. همچنین این قطعات نباید در مسیر عبور ماشین‌آلات قرار گیرند تا گل آلوده و دچار آسیب نگردند. استفاده از صفحات موج‌دار به عنوان سیستم نگهداری تونل نیز در تونل‌ها با قطر کم توجیه‌پذیر است که در شکل (۳-۹) نشان داده شده است.

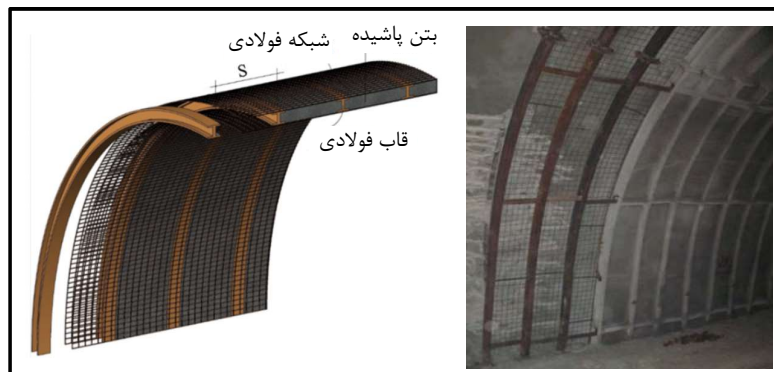


شکل ۳-۹- استفاده از ورق‌های موج‌دار به عنوان سیستم نگهداری تونل

۳-۲-۲-۱- مراحل قاب‌گذاری و نصب لتیس

مراحل قاب‌گذاری یا نصب لتیس به صورت زیر می‌باشد:

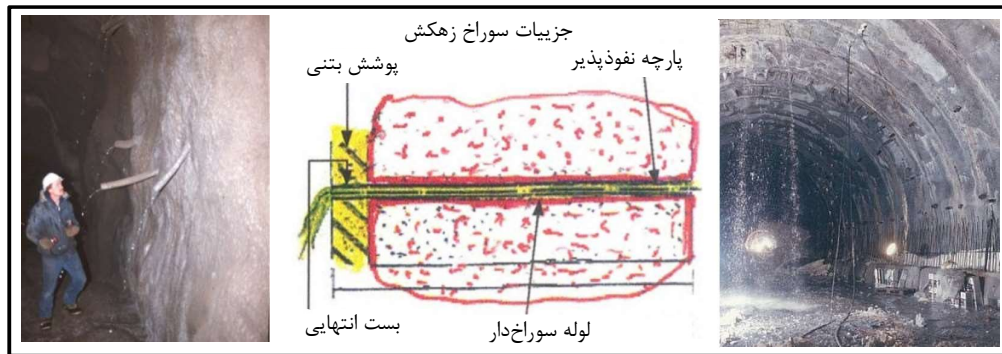
- ۱- تعبیه نشیمنگاه موقت قسمت تاج پس از حفاری آن. در صورت نیاز به ایجاد قاب پیوسته، این نشیمن با گوه و جزء موقت نظیر صفحات فولادی ایجاد و تثبیت شده و پس از پیش‌روی، با جوشکاری یا جایگزینی تیر نشیمن تکمیل می‌گردد. این نشیمن در صورت تکیه مستقیم بر زمین می‌تواند با بتن‌پاشی ایجاد گردد.
- ۲- نصب پروفیل‌های تاج و ثابت کردن آن روی نشیمن و پرکردن پشت قاب برای برقراری اتصال با زمین.
- ۳- اتصال قاب یا لتیس به قاب یا لتیس قبلی. برای حفظ پایداری جانبی قاب و لتیس معمولاً آن‌ها را با اجزای افقی یا مورب به طور متوالی در طول تونل به یکدیگر متصل می‌نمایند. معمولاً این کار با اجزای افقی نظیر نبشی یا ناودانی با جوشکاری انجام شده و این پیوستگی با نصب و هم‌پوشانی مش و بتن‌پاشی تکمیل می‌گردد. گاهی برای این کار از قطعات پیش‌ساخته یا الوار چوبی هم استفاده می‌شود.
- ۴- نصب مش و بتن‌پاشی و پرکردن فضاهای خالی و ایجاد مکانیزم انتقال بار کامل. در این مرحله نیازی به پرکردن کامل فضای داخلی بین قاب‌ها نمی‌باشد و این بخش بتن‌پاشی با توجه به فاصله قاب‌ها برای انتقال بار این فضا به قاب‌های طرفین آن به کار می‌رود. در شکل (۳-۱۰)، مراحل نصب و تکمیل پوشش نگهدارنده با قاب و بتن‌پاشی نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰- مراحل نصب و تکمیل پوشش نگهدارنده با قاب و بتن‌پاشی

- ۵- نصب بخش میانی یا تحتانی قاب پس از حفاری آن و تعبیه تیر نشیمن رابط یا تکمیل اتصالات قطعات فوقانی و تحتانی و پرکردن فضاهای پشت آن‌ها و نصب کف‌بند در صورت لزوم.
- ۶- تکمیل عملیات با نصب مش و بتن‌پاشی و پرکردن فضاهای خالی و ایجاد مکانیزم انتقال بار کامل. در صورت نیاز تمهیدات لازم برای زهکشی و تخلیه فشار آب از پشت پوشش با تعبیه سوراخ و لوله‌گذاری انجام می‌شود.
- ۷- ممکن است در مرحله آغازین به جای نصب مستقیم قاب، ابتدا اجزای افقی رابط بین قاب‌ها به صورت طره‌ای نصب شده و پایداری را تا زمان نصب قاب حفظ نمایند. همچنین در مقطع کوچک‌تر و زمین پایدارتر سامانه

نگهداری به صورت یک مرحله‌ای نصب و اجرا می‌گردد.



شکل ۳-۱۱- تیپ اجرایی تخلیه فشار آب پشت سامانه نگهداری با لوله‌های زهکش داخل بتن پاشیده

۳-۲-۳- روش کنترل کیفیت ساخت و نصب مطابق استاندارد

ملاحظات و روش‌های کنترل کیفی اجرای قاب و لتیس شامل موارد زیر است:

- ۱- کنترل کیفی مشخصات فولادها و ادوات اتصال با آزمایش،
- ۲- کنترل رواداری هندسه خم کاری و یکنواختی آن در طول ساخت قطعات با شابلن (حد متعارف رواداری پیشنهادی ۲ میلی‌متر در هر متر طول)،
- ۳- کنترل استفاده از روش استاندارد خم کاری و برش و سوراخ کاری‌ها با سرعت و دمای مناسب،
- ۴- کنترل کیفی جوشکاری برای ساخت خرپای لتیس، صفحات اتصال و وصله‌ها،
- ۵- ارزیابی روش نگهداری و بررسی میزان خوردگی (حد متعارف خوردگی گسترده یک میلی‌متر در کل ضخامت و خوردگی موضعی بر اساس موقعیت آن)،
- ۶- بررسی هندسه قطعات پس از حمل و دپو برای یافتن آسیب‌های احتمالی حین بارگیری، حمل و تخلیه (حد متعارف رواداری پیشنهادی انحراف از پروفیل اولیه ۲ میلی‌متر در هر متر طول)،
- ۷- کنترل رواداری‌های نصب با نقشه‌برداری (حد متعارف رواداری تجاوز به پوشش نهایی تونل ۵ میلی‌متر از قطر)،
- ۸- کنترل مراحل نصب و زمان مناسب نصب بر اساس مراحل و برنامه حفاری،
- ۹- کنترل کیفی ایجاد تکیه‌گاه‌ها و نشیمن‌گاه‌های موقت و دائم در طی مراحل حفاری،
- ۱۰- کنترل اتصال مناسب قطعات با زمین برای انتقال بار و پرشدن فضای پشت قاب‌ها و لتیس‌ها،
- ۱۱- کنترل تکمیل اتصالات و نصب پیچ‌ها یا پین‌ها یا جوشکاری،
- ۱۲- کنترل نصب قطعات اتصال قاب‌ها به یکدیگر در طول تونل،
- ۱۳- کنترل کیفی بتن‌پاشی بین و پشت قطعات و اطمینان از عدم سایه‌اندازی مفرط خصوصاً در روش قاب‌گذاری،
- ۱۴- کنترل تغییر شکل‌های پس از نصب و بارگیری و پیش‌روی حفاری و هم‌گرایی احتمالی.

۳-۲-۴- مشکلات و چالش‌های متداول اجرای قاب و لتیس در تونل

با توجه به تجربیات موجود، مشکلات، چالش‌ها، مسائل و نواقص زیر در صورت اجرای ضعیف قاب یا مسائل پیش‌بینی نشده و خاص زمین محتمل خواهند بود و لذا باید مورد توجه قرار گیرند:

- انتخاب مصالح مناسب و چگونگی پرکردن فضاهای ایجاد شده ناشی از اضافه حفاری زیاد یا ریزش سقف و جداره تونل. مشخصات فنی مصالح و اجرای این کار باید بر اساس دستورکار طراح و با رعایت ملاحظات عملکردی تونل باشد. به عنوان مثال، در تونل‌های تحت فشار پرکننده انعطاف‌پذیر قابل استفاده نمی‌باشد.
 - زوال و خوردگی قاب‌ها و فولادها و کاهش قابلیت اطمینان مشارکت در باربری آن‌ها در طول زمان، که البته بستگی به میزان رطوبت و سولفات موجود در خاک و اسیدهای کربنیک و سایر مواد خوردنده شیمیایی محیط دارد، و چگونگی پایاسازی و استفاده از ظرفیت قاب برای مشارکت در باربری دراز مدت.
 - کمأنش جانبی و اعوجاج قاب‌ها و لتیس‌ها و اجزای آن‌ها تحت فشار سربار و مچاله‌شوندگی.
 - کیفیت جوشکاری‌ها و اجرای اتصالات برای تحمل نیروهای متمرکز ناشی از عدم توازن و تقارن نیروها در اجزای قاب در حین اجرا که می‌تواند منجر به شکست آن‌ها شود.
 - کیفیت نشیمن قاب‌ها و لتیس‌ها و اتصال آن‌ها به زمین خصوصاً در حفاری‌های مرحله‌ای و مقاطع عبور از لایه‌های سست و آبدار که می‌تواند باعث افزایش تغییرشکل آن و لغزش احتمالی تحت فشارهای جانبی شود.
 - مشکلات چگونگی پرکردن پشت قاب‌ها و لتیس‌ها و میلگردها با شات ناشی از مساله سایه انداختن آن‌ها که هم باعث عدم انتقال بار صحیح از زمین به قاب شده و هم با ایجاد فضای متخلخل یا خالی باعث افزایش پتانسیل خوردگی موضعی در نقاط حساس می‌گردد.
 - مساله ریزش موضعی خاک روی سطح فوقانی قاب یا میلگرد در حین بتن‌پاشی در اثر فشار و ضربه پرتابه‌های بتن‌پاشیده یا سستی زمین و ایجاد ناپیوستگی بین بتن‌پاشیده و فولاد.
- در شکل (۳-۱۲) نمونه‌هایی از ریزش موضعی تونل نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۲- ریزش موضعی تونل، تغییر شکل مفرط و آسیب دیدگی سامانه نگهداری و نیاز به تقویت و ترمیم آن

- جزییات اجرایی مورد نیاز برای ایجاد امکان استفاده از ظرفیت قاب در باربری نهایی و بار ثانویه و درازمدت و مشکلات ناشی از آن در نصب قاب.
- مشکلات ناشی از اجرای قاب یا لتیس و بتن‌پاشی آن در زمین آبدار و لایه‌های دارای تراوایی و نشت و هجوم آب.
- صعوبت اصلاح و یا تعویض قاب‌ها و لتیس‌ها در زمین‌های مچاله شونده که باعث کاهش فضای داخلی مورد نیاز برای اجرای پوشش نهایی یا بهره‌برداری از تونل می‌شود.
- چگونگی تقویت قاب‌ها و لتیس‌ها در زمین‌های مچاله شونده قبل از تجاوز مقدار هم‌گرایی از حد مجاز و ورود به فضای لازم برای اجرای پوشش نهایی یا بهره‌برداری از تونل و نحوه متوقف کردن آن.
- چگونگی رفع عیوب قاب‌ها و لتیس‌های آسیب‌دیده یا اعوجاج یافته در حین ساخت و حمل و نصب در داخل تونل و فرآیند تعویض آن‌ها.
- تثبیت و ملاحظات نگهداری از قاب و لتیس در برابر شوک و ارتعاشات ناشی از انفجار در جبهه حفاری.

۳-۲-۵- توصیه‌های اجرایی و تجربیات بهبود بازده و کیفیت

بر اساس تجربیات اجرایی موفق در تونل‌های انتقال آب، ملاحظات و توصیه‌های اجرایی و تجربیات بهبود بازده برای نصب قاب‌ها و لتیس‌ها به صورت زیر می‌باشند:

- ۱- با توجه به شکل پیش‌ساخته قاب و لتیس از یک طرف و احتمال اضافه حفاری یا ریزش موضعی از طرف دیگر در زمین‌های سست، لازم است اطمینان کافی از اتصال آن با زمین برای انتقال بار در نقاط متعدد حاصل گردد. برای این کار در فضاهای محدود از بتن‌پاشی یا قطعات پروفیل یا الوار و در فضاهای خالی بیش‌تر، از بتن پیش ریخته با استفاده از کیسه‌هایی مملو از سنگدانه سبک از جنس کف یا پلاستیک که در اثر بتن‌پاشی پاره نشوند

و نهایتاً با تزریق پر شوند، استفاده می‌شود (برای تونل‌های تحت فشار استفاده از این روش‌ها مجاز نمی‌باشد و فضاهای خالی باید با تزریق بتن در جای خودتراکم پر شوند). در زمین نرم، قاب‌گذاری مستقیم به زمین متصل می‌باشد و در زمین سست شونده در اثر هوازدگی، می‌توان یک بتن‌پاشی اولیه در حد ۲ تا ۵ سانتی‌متر برای جلوگیری از هوازدگی انجام داده و سپس قاب یا لتیس را نصب نمود. برای افزایش ظرفیت باربری در نواحی سست و پرفشار باید فاصله تکیه‌گاه‌های جانبی اتصالی بین قاب‌ها کاهش یابد یا تعداد و مقطع آن‌ها افزایش پیدا کند.

۲- در زمین بسیار سست و ریزشی برای تامین پایداری می‌توان از پروفیل فولادی در طول تونل مطابق شکل (۱۳-۳) استفاده نمود. این کار با نصب شابلن اولیه و اتصال پروفیل طولی روی آن و سپس قراردادن آن‌ها روی زمین و ادامه حفاری با پیش راندن این پروفیل‌ها انجام می‌پذیرد.



شکل ۳-۱۳- نصب پروفیل در طول تونل برای کمک به سامانه نگهداری قاب در محل مستعد ریزش

۳- برای جلوگیری از بیرون‌زدگی در دیواره می‌توان قسمت مربوطه را در بتن یا شات مدفون نمود. همچنین می‌توان از کف بند در قاب استفاده نموده و پایداری کلی در برابر تغییر شکل‌های مفرط ناشی از هم‌گرایی و مچاله‌شوندگی را متعادل نمود. برای جلوگیری از کم‌انرژی زدودرس، معمولاً کف‌بندها به صورت قوسی ساخته و نصب می‌شوند. به عنوان نمونه، نصب کف‌بند قاب برای نواحی مستعد مچاله‌شوندگی و هم‌گرایی زیاد در حفاری یک مرحله‌ای در تونل انتقال آب سبزکوه در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۴- نصب کف‌بند قاب برای نواحی مستعد مچاله‌شوندگی و هم‌گرایی زیاد در تونل انتقال آب سبزکوه

۴- برای کاهش مشکلات ناشی از تراوش کنترل نشده آب و هجوم آن هنگام نصب قاب و بتن‌پاشی می‌توان مطابق شکل از زهکشی با حفاری و نصب لوله قبل از حفاری ناحیه آبدار در سینه‌کار استفاده نمود. در تثبیت و پیش نگهداری به روش فورپولینگ، زهکشی به طور خودکار رخ می‌دهد (شکل ۳-۱۵).



شکل ۳-۱۵- زهکشی پیش از حفاری برای کاهش هجوم و تراوش آب حین حفاری و نصب سیستم نگهداری

۵- برای کنترل تغییرشکل و بار زیاد پس از نصب قاب می‌توان با نصب مهار موقت برای جلوگیری از تغییرشکل و ریزش، از بولت و پیچ سنگ برای پایدارسازی زمین استفاده نمود. همچنین ممکن است مهار موقت تا اجرای بتن‌پاشی و گیرش آن در محل باقی بماند. برای تعویض یا تعمیر قاب آسیب‌دیده یا تغییرشکل یافته هم می‌توان با نصب مهار موقت یا بولت فضای ایمن را برای انجام عملیات اجرایی فراهم نمود.

۶- در صورت نیاز به استفاده از ظرفیت سامانه نگهداری در پوشش نهایی لازم است زائده برشی کافی روی سطوح قاب برای پیوستگی کافی با بتن‌پاشیده تعبیه گردد. در این صورت قاب و بتن‌پاشیده پایا به صورت مقطع مرکب عمل کرده و سختی و مقاومت بیشتری تامین خواهند نمود. معمولاً زائده برشی روی سطح جان تیرآهن نصب می‌شوند تا باعث ایجاد مشکلات نصب و افزایش حفاری مورد نیاز نگردند. در صورت نیاز روی سطح بال تیرآهن از میلگردهای قطر کوچک یا تسمه کوتاه برای این کار می‌توان استفاده نمود. این کار نسبت به بتن‌پاشی تنها، پروفیل مناسبی برای اجرای پوشش نهایی و کنترل حجم بتن آن ایجاد می‌نماید. استفاده از این سامانه برای امتداد ورودی و خروجی به بیرون و احداث گالری‌های حفاظتی نیز به شکل مقطع مرکب هم امکان‌پذیر است.

۷- برای پایاسازی قاب و لیس می‌توان از مواد بازدارنده مهاجر خوردگی استفاده نمود؛ که البته امکان استفاده از آن در بتن‌پاشیده در بر گیرنده قاب یا لیس هم وجود دارد. استفاده از پوشش رنگ با توجه به شرایط نصب و امکان خش‌دار شدن حین حمل و نصب چندان مطمئن نمی‌باشد.

۸- در روش قاب و لیس‌گذاری، پرکردن نواحی دارای ریزش یا اضافه حفاری زیاد با الوار یا کیسه سنگدانه یا بتن‌پاشیده مشکل است. یک روش متعارف در این حالت استفاده از پروفیل فولادی شعاعی برای اتصال زمین به قاب می‌باشد که معمولاً به صورت آرایش خربابی سه بعدی تکمیل می‌شوند و سپس فضای بین آن‌ها با مش و شاتکریت یا شاتکریت الیافی برای انتقال بار تکمیل می‌شود. این فضا هنگام اجرای پوشش نهایی با بتن

پرمی شود.

۹- روش مناسب دیگر برای مقاطع دارای اضافه حفاری و مقاطع ریزی، استفاده از پانل ساندویچی با فوم میانی بوده که بین قاب‌ها نصب گردیده و سمت داخل آن بتن‌پاشی شده و سپس فضای پشت آن با فوم بتن تزریق و پرمی شود (شکل ۳-۱۶).



شکل ۳-۱۶- استفاده از پانل ساندویچی مخصوص بافته شده با فوم میانی به عنوان سامانه نگهداری و قالب درجا

۱۰- این روش، برای اجرای پورتال تونل‌ها نیز بسیار مناسب است و در آن دو سمت پانل با شات اندود می‌شود. این سیستم با توجه به استفاده از پانل‌های پایا و ضدخوردگی قابلیت استفاده به عنوان بخشی از پوشش نهایی را نیز دارد. همچنین انعطاف‌پذیری سیستم سه بعدی آن، امکان تطابق با تغییر شکل‌های زمین حین گیرش شاتکریت را نیز فراهم می‌آورد. لایه فوم میانی این پوشش نیز می‌تواند به عنوان یک غشای زهکش برای جمع‌آوری آب‌های نفوذی به کار گرفته شود.

۱۱- مشکل سایه انداختن و تخلخل و ایجاد فضاهای خالی پشت قاب‌ها و میلگردها در بتن‌پاشی خشک نسبت به تر حادثر است. برای کاهش این مشکل روش‌های متداول عبارتند از تنظیم فاصله و جهت نازل بتن‌پاشی، استفاده از بالابر برای بتن‌پاشی این فضاها، اصلاح دستی و پرکردن دستی حین بتن‌پاشی توسط پرسنل اجرایی، پرکردن با شاتکریت از پایین به بالا برای پرشدن این فضاها به صورت ثقلی، پرکردن فضاها حین تزریق تحکیمی یا تماسی، استفاده از میلگرد با قطرپایین‌تر و سنگدانه‌های ریزتر و حاوی فیلر کافی برای بتن‌پاشی، عدم استفاده از تیرآهن بال پهن و تنظیم سرعت پاشش نازل برای جلوگیری از ریزش خاک هنگام بتن‌پاشی یا بتن‌پاشی اولیه برای پوشش سطح و پیش‌گیری از ریزش خاک حین پرکردن فضا با بتن‌پاشی.

۳-۳- میل مهار و پیچ سنگ‌گذاری

میل مهار و پیچ سنگ به منظور تسلیح و پایدارسازی توده خاک و گوه سنگی به صورت موضعی یا سیستماتیک یا در ترکیب با دیگر سامانه‌های نگهداری به کار می‌روند. پیچ سنگ در سه نوع زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱- مکانیکی، که در آن پیچ سنگ در ناحیه انتها بلافاصله گیردار شده و در طول خود به عنوان زهکش عمل می‌نماید.

- ۲- تزریقی، که در آن تزریق با رزین پلی استر یا دوغاب پایه سیمانی بدون انقباض انجام می‌شود و البته در مناطق با هد آب بالا به دلیل شسته شدن دوغاب قبل از گیرش نهایی، مشکلات اجرایی دارد. با توجه به امکان استفاده از مواد بازدارنده خوردگی در دوغاب یا رزین امکان افزایش عمر مفید و استفاده در باربری دراز مدت را دارد.
- ۳- اصطکاکی، که در دو نوع تیوب شیاردار و منبسط شونده استفاده می‌شود و به دلیل اثر بیش‌تر خوردگی در رفتار آن دارای عمر مفید کمتری نسبت به دو نوع بالا است.
- ۴- انواع خاص پیچ سنگ و میل مهار هم در تونل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل پیچ سنگ مکانیکی یا کابلی با تزریق برای پس‌کشیدگی، پیچ سنگ باکپسول تزریقی انتهایی و پیچ سنگ خودحفر می‌باشند. مهار تزریقی کامل و خودحفر و کابلی پس‌کشیده دارای ظرفیت باربری بالایی بوده و برای نواحی با تنش بالا که معیار مقاومت تعیین کننده است مناسب‌ترند. مهار دارای قابلیت پس‌کشیدگی که البته در مقاطع بزرگ‌تر قابل اجرا می‌باشد، باید دارای پیش‌بینی حفاظتی خوردگی به صورت پوشش تک یا دو لایه یا مواد تزریقی محتوی بازدارنده خوردگی باشد تا دچار گسیختگی ناگهانی نگردد.

۳-۳-۱- معرفی و انتخاب مهار یا پیچ سنگ مناسب

- محاسبه میل مهار در مرحله طراحی و بر اساس مدل‌های عددی یا تحلیلی - تجربی انجام می‌پذیرد. اما در مرحله اجرا ملاحظات اصلی در انتخاب میل مهار مناسب عبارتند از:
- ۱- توجه به ویژگی‌های ظرفیت شامل مقاومت و شکل‌پذیری.
 - ۲- محدودیت‌ها و شرایط اجرایی:
- از مسائل مهم در انتخاب نوع مهار، زمان مورد نیاز برای پایدارسازی است. در زمان‌های کوتاه امکان استفاده از روش‌های تزریقی خصوصاً با سیمان کمی کم‌تر می‌شود. از طرفی برای استفاده از رزین‌های زودگیر باید از نیروهای مجرب استفاده نمود تا بتوانند در زمان مناسب عملیات نصب مهار را با کیفیت مناسب تکمیل کنند.
 - وضعیت محل اتصال مهار به سنگ و ابعاد صفحه اتصال نیز در رفتار آن تاثیر می‌گذارد. در مهارهای مکانیکی اغلب مشاهده شده است که خرد شدن و ریزش موضعی سنگ در ناحیه زیر صفحه اتصال در صورت کوچک بودن صفحه باعث کاهش قابل توجه نیروی قابل تحمل آن می‌شود.
 - ۳- هزینه تهیه و اجرا و نگهداری:

از معیارهای انتخاب مهار، هزینه تهیه و اجرای آن است. امکان استفاده از مهار برای باربری دراز مدت هم بسیار حائز اهمیت است. در جدول (۳-۶) نمونه مقایسه‌ای از نسبت هزینه‌های انواع مهار ارائه گردیده است. البته این هزینه‌ها در شرایط و زمان‌های مختلف تغییر می‌کند و لازم است برای هر پروژه استعلام و برآورد گردد.

جدول ۳-۶- نمونه مقایسه‌ای از نسبت هزینه‌های انواع مهار با صفحه واشر ابتدایی

نوع بولت یا مهار	هزینه نسبی
مهار مکانیکی	۱۰۰
بولت تزریقی دوغاب سیمان	۱۲۸
بولت تزریقی با کارتریج	۲۱۴
بولت اصطکاکی قطعه‌ای	۲۲۰
بولت تزریقی رزینی	۲۳۲
بولت اصطکاکی (Swelllex)	۲۳۷

۳-۳-۲- روش‌های حفاری و نصب

۳-۳-۲-۱- روش‌های نصب

روش‌های نصب مهارها به صورت زیر می‌باشند:

- ۱- روش دستی: حفاری با دریل، نصب مهار به روش دستی در مهار مکانیکی و تزریق دوغاب سیمان با دستگاه پس از نصب مهار در مهار تزریقی و اصطکاکی یا نصب کپسول رزین به روش دستی و سپس جا زدن و نصب مهار.
- ۲- روش مکانیزه: حفاری و نصب کامل مهار با دستگاه مهارزن خشاب‌دار که بسیار ایمن و سریع است، ولی نیاز به فضای کافی برای کار ماشین دارد.
- ۳- حفاری و نصب هم‌زمان برای میل مهارهای خودحفر که در آن میل مهار نقش مته حفاری را هم ایفا می‌نماید و کار در یک مرحله انجام می‌پذیرد. البته این نوع مهار معمولاً گران‌تر است و در شرایطی که زمان‌بندی اجرا از نظر ایمنی و سرعت کار مهم باشد یا تعداد مهار مورد نیاز زیاد نباشد، توجیه بیش‌تری خواهد داشت.

۳-۳-۲-۲- ملاحظات حفاری و نصب

- قطر حفاری: قطر حفاری در انواع مختلف میل مهار تا حدی متفاوت است و بستگی به فناوری آن دارد. در مهارهای تزریقی قطر حفاری معمولاً برای کاهش مصرف رزین فقط تا حدود ۶/۵ میلی‌متر بیش‌تر از قطر میل مهار در نظر گرفته می‌شود. در جدول (۳-۷) قطرهای حفاری پیشنهادی برای مهارهای تزریقی با دوغاب پایه سیمانی نیز ارائه شده است. همچنین نمونه طرح اختلاط دوغاب تزریق پایه سیمانی نشان داده شده است.

جدول ۳-۷- قطرهای حفاری پیشنهادی برای مهارهای تزریقی با دوغاب پایه سیمانی (برحسب میلی‌متر)

لوله	سوراخ	میلگرد
۲۷	۳۲	۱۹
۳۲	۳۸	۲۵
۳۸	۴۴	۲۹
۴۴	۵۱	۳۲
۵۱	۵۷	۳۵

- **طول میل مهار:** طول میل مهار به صورت تجربی معادل نصف قطر تونل یا حداقل یک متر بیش‌تر از عمق ناحیه پلاستیک در نظر گرفته می‌شود. جزئیات شبکه میل مهار بر اساس مدل‌های محاسباتی در مرحله طراحی تعیین می‌گردد. حداقل طول بولت برای پایدارسازی بلوک‌ها برابر حاصل ضرب نصف دهانه در سه برابر عرض بلوک ناپایدار و فاصله بولت‌ها حداقل نصف طول بولت یا یک و نیم برابر عرض بلوک ناپایدار و در صورت استفاده در سامانه مش و بتن‌پاشی حداکثر دو متر توصیه می‌شود.
- **صفحه انتهایی:** ضخامت صفحات انتهایی بهتر است طوری باشد که با توجه به عمود نبودن احتمالی راستای مهار به سطح، قابلیت شکل‌پذیری کافی در آن برای ایجاد سطح تماس بیش‌تر فراهم گردد. ابعاد صفحه نیز باید طوری باشد که باعث تمرکز تنش و خردشدگی موضعی سنگ نگردد. همچنین در مهار پس‌کشیده لازم است گیرداری و تکیه‌گاه کامل در سرمهار برای انتقال بار فراهم شود. در صورت استفاده از مش باید تمهیدات لازم برای اتصال آن به صفحه سرمهار در نظر گرفته شود.
- **امتداد میل مهار:** انتخاب زاویه میل مهار با توجه به شرایط زمین و طرح اولیه و درزه‌نگاری سطحی حین اجرا صورت می‌پذیرد. دقت شود که سطح حفاری واقعی ممکن است با سطح پیش‌بینی شده در طرح متفاوت باشد. توصیه می‌شود که کنترل امتداد صحیح میل مهارها بر اساس درزه‌نگاری و شرایط واقعی حفاری، با کمک مهندس مکانیک سنگ یا زمین شناس انجام شود.
- **وصله مهار:** برای مهار با طول بلند لازم است وصله مکانیکی مناسب در فواصل لازم تعبیه شود. در پیش‌بینی قطر حفاری باید قطر وصله نیز در نظر گرفته شود. مقاومت وصله نباید کمتر از مقاومت کششی مهار باشد.
- **تزریق:** دوغاب پایه سیمانی تزریق مهارها باید دارای روانی کافی بوده و بدون انقباض و زودگیر باشد، لذا برای حصول این خواص از افزودنی‌های مناسب استفاده می‌شود. نمونه طرح اختلاط این نوع دوغاب در جدول (۳-۸) ارائه شده است. افزودن پلیمرهای چسباننده و افزاینده پیوستگی بین میل مهار و دوغاب و دوغاب و زمین سخت نظیر اپوکسی در مواردی که مهار با رفتار اصطکاکی در کل طول کار می‌کند، هم متداول می‌باشد.

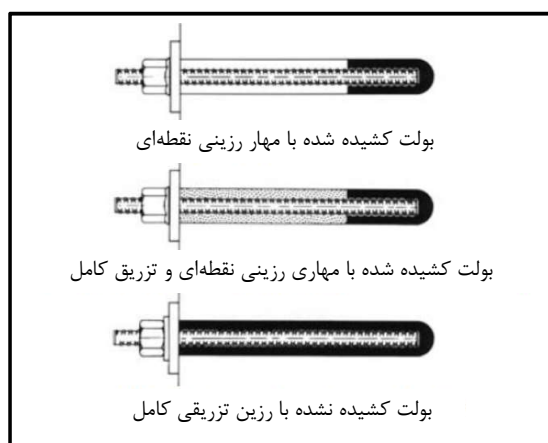
جدول ۳-۸- نمونه طرح اختلاط دوغاب تزریق پایه سیمانی

ماده	مقدار در واحد
سیمان	۱
ماسه	۱
آب	۰/۳
افزودنی روان کننده	۰/۰۰۷
افزودنی انبساطی	۰/۰۰۰۱۵ تا ۰/۰۰۰۷ (تا ۱۵ درصد انبساط)

دوغاب پایه سیمانی عموماً زمان گیرش طولانی‌تری نسبت به رزین پلی‌استر دارند. در مقابل دوغاب رزینی به تغییرات دمایی حساس‌ترند و معمولاً با افزایش دما سرعت گیرش آن‌ها به شدت افزایش می‌یابد.

برای مهارهایی که کارکرد بلند مدت دارند، باید در دوغاب تزریقی از روش‌های حفاظت در برابر خوردگی نظیر مواد

بازدارنده خوردگی یا بولت فایبرگلاس و غیر فولادی یا پوشش حفاظتی استفاده شود. مواد افزودنی بازدارنده خوردگی که از نوع مهاجر^۱ آلی یا معدنی هستند، دارای قابلیت اعتماد بیش‌تر و اقتصادی‌تر از استفاده از پوشش ضد خوردگی که ممکن است در حین نصب دچار خراش و آسیب شوند می‌باشند. این مواد معمولاً به میزان ۱ تا ۲ کیلوگرم بر مترمکعب در دوغاب تزریق مصرف می‌شوند. نوع پوششی این مواد هم می‌تواند مانند رنگ اپوکسی روی سطح میل مهار اسپری شود. مهارهای تزریقی پس کشیده مطابق شکل (۳-۱۷) ممکن است به صورت ترکیبی هم استفاده شوند که در مجموع سه حالت تزریق انتها با رزین، تزریق انتها با رزین و باقیمانده طول با دوغاب سیمانی و تزریق کامل با رزین را تشکیل می‌دهند.



شکل ۳-۱۷- انواع حالت‌های تزریق مهارهای پس کشیده و عادی

۳-۳-۳- آزمایش‌های کشش و کنترل کیفیت

۳-۳-۳-۱- آزمایش‌های کنترل کیفی و کشش

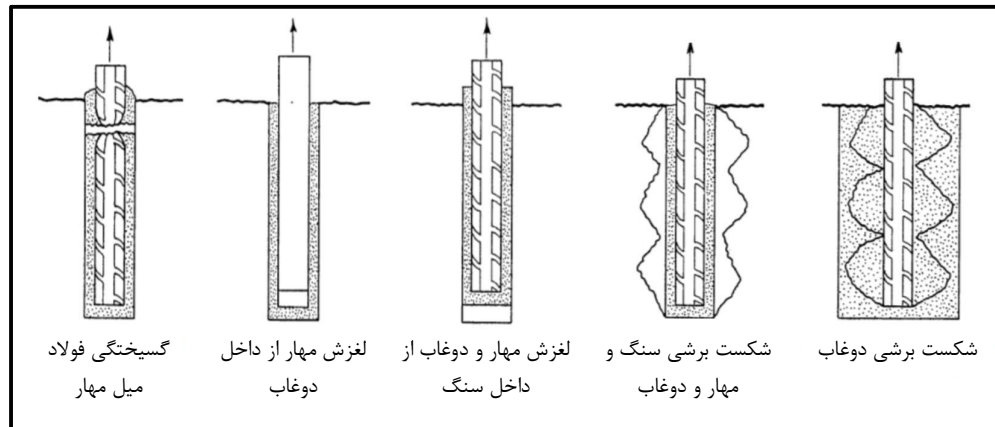
کنترل کیفی مهارها در دو شکل آزمایش کشش یا بیرون کشیدگی و آزمایش مصالح مصرفی انجام می‌شود. آزمایش بیرون کشیدن رفتار کلی مهار را نشان می‌دهد و از اهمیت زیادی برخوردار بوده و معمولاً به تعداد زیادی انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مودهای گسیختگی مختلفی ممکن است برای مهار رخ دهد که عبارتند از:

- ۱- گسیختگی فولاد میل مهار، که نشان دهنده طول گیرداری زیاد، مقاومت دوغاب و چسبندگی کافی دوغاب یا رزین به سنگ و مهار است و مناسب‌ترین مود ظرفیتی مهار محسوب می‌شود.
- ۲- لغزش مهار از داخل دوغاب، نشان دهنده کافی نبودن پیوستگی مهار و دوغاب یا رزین است و مناسب نیست.
- ۳- لغزش مهار و دوغاب از داخل سنگ، که نشان دهنده کافی نبودن چسبندگی مهار و دوغاب یا رزین با سنگ است و در سنگ‌های سخت محتمل‌تر است و مناسب تلقی نمی‌شود.

۴- شکست برشی سنگ و مهار و دوغاب، که نشان دهنده کافی نبودن مقاومت برشی سنگ برای تامین باربری مورد نیاز مهار است و در سنگ‌های سست محتمل‌تر است و مناسب تلقی نمی‌شود.

۵- شکست برشی دوغاب، که نشان دهنده کافی نبودن مقاومت برشی دوغاب یا رزین برای تامین باربری مورد نیاز مهار است و مناسب تلقی نمی‌شود.

حالت‌های گسیختگی محتمل مهار در سنگ در شکل (۳-۱۸) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۸- حالت‌های گسیختگی محتمل مهار در سنگ

تست بیرون کشیدن مهار در انواع مختلف نتایج متفاوتی دارد. روش‌های استاندارد این تست نیز در آزمایشگاه و سایت کمی متفاوت است (EN1537 و BS8081 و ASTM-D4435). در شرایطی که مقاومت نهایی مدنظر نباشد، رسیدن مقاومت به حد جاری شدن میلگرد هم می‌تواند مورد قبول واقع شود. کسب حدود ۲۵ تا ۳۳ درصد بار بیش‌تر از ظرفیت به عنوان معیار پذیرش بر اساس برخی استانداردها قابل قبول خواهد بود. کنترل کیفی مصالح رزین و دوغاب و مهار و سایر یراق آلات نیز جزئی از برنامه کنترل کیفی می‌باشد. از این میان دوغابی که در کارگاه ساخته می‌شود نیاز به بررسی دقیق‌تر و منظم‌تری دارد. تنظیم طرح اختلاط و مواد افزودنی آن برای حصول مقاومت و کارایی کافی اهمیت زیادی دارد. معمولاً برای یراق آلات گواهی تست کارخانه‌ای و برای دوغاب از نمونه فشاری مکعبی ۵ سانتی‌متری مشابه آزمایش ملات استفاده می‌شود.

۳-۳-۳-۲- پایش رفتار مهار

با توجه به این که مهار و پیچ سنگ به تدریج و در اثر تغییر شکل زمین بار گرفته و ممکن است برخی از آن‌ها به ظرفیت نهایی و گسیختگی برسند، لازم است میزان بار داخل آن‌ها در طول زمان تحت پایش قرار گیرد. برای این منظور معمولاً از تعدادی مهار ابزاربندی شده مجهز به بارسنج یا کرنش‌سنج استفاده می‌شود. سلول بارسنج یا کرنش‌سنج می‌تواند قبل از نصب مهار در داخل آن تعبیه و سپس اجرا شود. بسته به شرایط زمین و مکانیزم تغییر شکل در نواحی حساس، ممکن تا یک درصد میل مهارها هم تحت پایش قرار گیرند. حسگر پایش رفتار مهار می‌تواند به سامانه بیسیم

ارسال اطلاعات مجهز شده و از راه دور کنترل شود. از اطلاعات به‌دست آمده از پایش سامانه مهار برای اصلاح سامانه نگهداری، اضافه نمودن مهار و تحکیم مجدد و یا ترخیص تنش در مهارها و آزادسازی تغییر مکان استفاده می‌گردد.

۳-۳-۴- مشکلات و چالش‌های متداول اجرای پیچ سنگ و میل مهار در تونل

با توجه به تجربیات موجود، مشکلات، چالش‌ها، مسائل و نواقص زیر در صورت اجرای ضعیف پیچ سنگ و میل مهار یا مسائل پیش‌بینی نشده و خاص زمین محتمل خواهند بود:

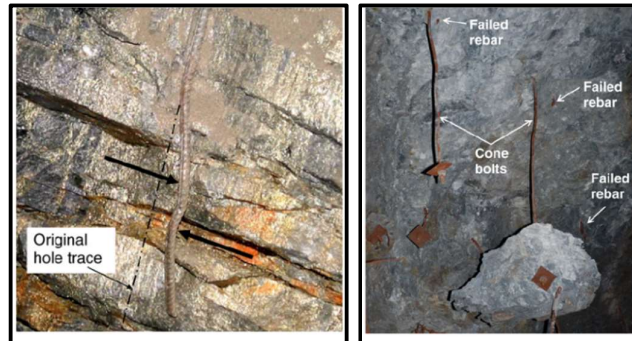
۱- نصب مهار تزریقی در زمین‌های آبدار با گرادیان قابل توجه، به دلیل شسته شدن یا رقیق شدن دوغاب تزریقی می‌تواند با افت کیفیت و ظرفیت باربری قابل توجهی مواجه شود. همچنین مطابق شکل (۳-۱۹)، در این شرایط ریزش آب باعث صعوبت حفاری و آسیب‌دیدگی ماشین‌آلات حفاری و آسیب‌دیدگی و تهدید ایمنی و سلامت پرسنل نصب هم می‌شود. معمولاً در این شرایط سعی می‌شود از سیستم مهار مکانیکی و نگهدارنده متناظر با آن استفاده شود. در صورتی که با حفر برخی چال‌ها امکان زهکشی یا انحراف آب یا کاهش شدت تراوش وجود داشته باشد، می‌توان از سیستم توام چال‌های زهکش و چال‌های نصب میل مهار استفاده نمود.



شکل ۳-۱۹- هجوم و نشت آب هنگام حفاری برای نصب مهار و پیچ سنگ

۲- در زمین متورم شونده و دارای استعداد مچاله‌شوندگی لازم است وضعیت مهار از نظر جاری‌شدن و گسیختگی تحت کنترل قرار داشته باشد. عدم توجه به این مساله می‌تواند با شکست مهارها و ریزش همراه شود. در صورتی که آزادسازی به موقع تنش از مهار یا تقویت ناحیه انجام نشود، شرایط ناپایداری و ریزش ناگهانی محتمل خواهد بود.

۳- تشخیص مهارهای ناکارآمد با توجه به شکل‌های (۳-۲۰) و (۳-۲۱) یکی از چالش‌های مهم کار با پیچ سنگ و میل مهار است. مهارهای ناکارآمد ممکن است به دلیل طول ناکافی، در داخل ناحیه پلاستیک قرار گیرند و نتوانند به پایداری آن کمک نمایند. همچنین مهارهایی که در زمین‌های سخت، در امتداد مناسب برای نگهداری گوه‌ها نصب نشوند و مهارهایی که هنگام حفاری و نصب دچار انحراف قابل توجهی شوند و نیز مهارهایی که در طول نصب خود وارد حفره‌ها یا عدسی‌های بسیار ضعیف شوند از جمله سایر موارد مهارهای ناکارآمد محسوب می‌شوند.



شکل ۳-۲۰- گسیختگی گوه مانند و برشی پیچ سنگ



شکل ۳-۲۱- گسیختگی کلی سیستم پیچ سنگ در زون پلاستیک

۴- خوردگی میل مهارها و ادوات آن‌ها یکی از چالش‌های مهم در این سیستم نگهداری محسوب می‌شود (شکل ۳-۲۲) وجود آب و مواد اسیدی و خورنده و گازهای شیمیایی و بالا بودن دما باعث تشدید خوردگی میل مهارها و پیچ سنگ‌ها در میان مدت و دراز مدت شده و ممکن است بارهای قابل توجهی را به پوشش تونل در صورت اجرا شدن وارد نماید. در صورت اجرا نشدن پوشش نهایی هم این مساله می‌تواند به فروریزش موضعی منتهی شود.



شکل ۳-۲۲- اثرات خوردگی بر کابل مهار و پیچ سنگ و ادوات آن در تونل

۳-۳-۵- توصیه‌های اجرایی و تجربیات بهبود بازده و کیفیت

- ۱- علاوه بر نصب سیستماتیک پیچ سنگ برای جلوگیری از ریزش موضعی سنگ و پایدارسازی بهتر، لازم است تنظیم موقعیت و امتداد و شرایط نصب بر اساس وضعیت واقعی و تحت نظارت مهندس مجرب صورت پذیرد.
- ۲- در زمین آبدار باید دقت شود که حفاری مهار تزریقی به عنوان مسیر زهکشی عمل نکند، چرا که باعث شسته شدن دوغاب و کاهش کارایی و سرعت اجرای مهارها می‌شود. برای کنترل مشکل آب در این شرایط، معمولاً از پیش زهکشی با سوراخ‌کاری پیشانی کار استفاده می‌شود. همچنین با انجام تعدادی سوراخ در سقف با کاهش حجم آب، شرایط برای نصب میل مهار مهیا می‌گردد. پس از کاهش میزان آب یا در شرایط شدت آب کم‌تر، با

نصب پکر، تزریق دوغاب برای آب‌بندی و تثبیت هم‌زمان میل مهار انجام می‌شود. این تزریق معمولاً تحت فشار قابل توجه مثلاً بین ۵ تا ۱۵ بار انجام می‌شود. همچنین می‌توان از مهار خودحفر و مهار مایل برای تثبیت نواحی پرآب استفاده نمود. روش دیگر برای کنترل آب نصب ورق هدایت کننده آب با میل مهار به سقف است که فضای ایمن‌تری برای ادامه کار فراهم آورد. این ورق‌ها معمولاً به شکل ایزودرین مورد استفاده قرار می‌گیرند که به دو حالت مدفون در شات یا با نصب مش روی آن و حالت نمایان با نصب مستقیم روی شات یا سنگ اجرا می‌شوند.

۳- استفاده از میل مهار تزریقی در سنگ لایه لایه بهتر است همراه با تزریق دوغاب با فشار مناسب برای پر کردن درزه‌ها همراه باشد تا با توزیع تنش مناسب‌تر بار کم‌تری به میل مهار وارد شود. این کار باعث تحکیم لایه‌های سنگی نیز می‌شود و پایداری توده سنگی را بهبود می‌بخشد. فشار این تزریق باید کنترل شده باشد تا در حین عملیات تحکیم باعث شکست هیدرولیکی یا گسیختگی گوه‌های سنگی نشود (شکل ۳-۲۳).



شکل ۳-۲۳- استفاده از میل مهار تزریقی در سنگ‌های درزه‌دار برای تقویت توده سنگ در محدوده مهار

۴- برای کنترل ریزش‌های موضعی در حین عملیات نصب پیچ سنگ بهتر است از مش‌های فولادی یا توری یا مش‌های پلیمری برای پیشگیری از ریزش سنگ و گوه‌ها و ایجاد فضای ایمن استفاده شود. پس از این کار امکان بتن‌پاشی و تکمیل عملیات هم وجود خواهد داشت (شکل ۳-۲۴).



شکل ۳-۲۴- استفاده از مش فولادی یا پلیمری برای جلوگیری از ریزش قطعات و سقوط گوه سنگ همراه با میل مهار یا پیچ سنگ

۵- برای ایجاد فضای ایمن اجرای سیستم نگهدارنده قاب یا لتیس می‌توان با استفاده از پیچ سنگ و مهار موقت برای تثبیت و نصب قاب و لتیس، امکان نصب مرحله‌ای قاب و عملیات حفاری و شاتکریت را فراهم نمود.

۶- برای جلوگیری از خوردگی و افزایش دوام میل مهارها می‌توان از روش‌های مختلف نظیر استفاده از فولادهای ضدخوردگی، پوشش‌های رنگ اپوکسی یا سایر پوشش‌های حفاظتی پلیمری نظیر پلی پروپیلن و مواد بازدارنده

- خوردگی محلول در دوغاب تزریق که در بخش فوق ذکر شد، استفاده نمود.
- ۷- پایش تغییرشکل کلی و اندازه‌گیری هم‌گرایی در تونل یا پایش نیروهای داخلی میل مهارها، دو روش متداول برای بررسی وضعیت میل مهارهای موجود جاری شده یا در حال گسیختگی برای جایگزینی به موقع یا اضافه نمودن میل مهار می‌باشد. برای انتخاب مناسب‌ترین وضعیت اجرای میل مهارهای اضافی و تقویتی لازم است وضعیت موجود میل مهارها شامل مختصات، نوع، طول و امتداد به طور کامل ثبت شده باشد.
- ۸- برای شناسایی بهتر وضعیت درزه‌ها و گوه‌های سنگی که با سیستم پیچ سنگ یا میل مهار تثبیت می‌شوند، بهتر است پس از حفاری چال و قبل از نصب میل مهار با حرکت دوربین چشم ماری در داخل آن اطلاعات کامل وضعیت لایه‌های قطع شده فیلم‌برداری و برداشت و مورد تحلیل و بررسی قرارگیرد. از این اطلاعات برای بهینه سازی تعداد میل مهار در طرح نصب سیستماتیک هم استفاده می‌شود.
- ۹- برای بررسی وضعیت میل مهارها و پیچ سنگ‌ها تحت اثر انفجارات حفاری پیشرو، باید توجه شود که اثرات انفجار روی سیستم‌های مکانیکی و تزریقی متفاوت است و در سیستم تزریقی باید فاصله زمانی بیش‌تری برای گیرش دوغاب قبل از انفجار ایجاد شود. به طور کلی اثرات انفجار روی میل مهار و پیچ سنگ بلندتر، کم‌تر از مهار کوتاه است. در صورتی که سیستم نگهداری صرفاً بر اساس میل مهار تزریقی باشد، باید ملاحظات لازم برای انفجار کنترل شده در نظر گرفته شود.
- ۱۰- در مهارهای با طول گیردار تزریقی دقت شود که در حین عملیات پکرگذاری و تزریق، طول گیرداری به اندازه پیش‌بینی شده اجرا شود و طول آزاد آن بیش از اندازه کاهش نیابد.
- ۱۱- برای اطمینان از ایجاد ضخامت یکنواخت دوغاب در اطراف مهار و قرارگرفتن مهار در محور مرکزی چال، لازم است از تعداد فاصله دهنده‌های کافی در طول میل مهار استفاده شود. معمولاً برای تامین پوشش مناسب حفاظت در برابر خوردگی حداکثر فاصله ۱/۵ متر و در سایر شرایط حداکثر تا ۳ متر توصیه می‌شود.

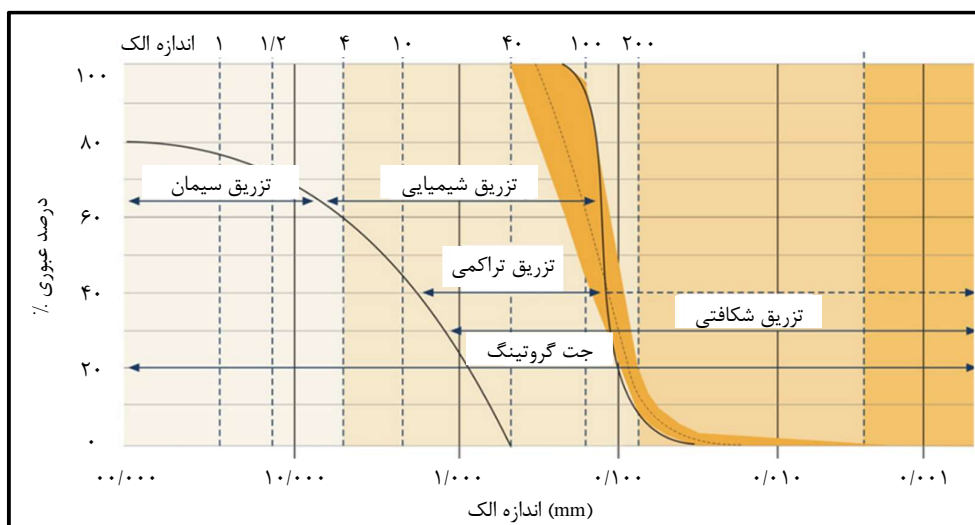
۳-۴- روش‌های تزریق، انجماد، فورپولینگ و پیش تحکیم برای نگهداری و پیشگیری از نفوذ آب

۳-۴-۱- روش‌های تزریق

۳-۴-۱-۱- معرفی و انتخاب تجهیزات

- تزریق در تونل‌سازی با اهداف بهسازی، پایدارسازی و تحکیم و آب‌بندی و به روش‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:
- ۱- تزریق شکافتی تحت فشار بالا که باعث شکست ساختار مصالح موجود و ورود دوغاب و ایجاد عدسی‌های دوغاب در توده خاک می‌شود و برای تثبیت در زمین‌های نرم کاربرد دارد.
- ۲- تزریق تراکمی یا تحکیمی که با فشار بالا در محیط، ایجاد تغییرشکل و تراکم می‌کند و در زمین نرم کاربرد دارد.

- ۳- تزریق نفوذی که با فشار متوسط دوغاب را وارد حفره‌های موجود می‌نماید که برای زمین دارای خلل و فرج زیاد استفاده می‌شود.
- ۴- جت گروتینگ^۱ که با فشار بالا تقریباً مصالح را با دوغاب مخلوط و جایگزین می‌نماید و در زمین نرم برای ایجاد یک ناحیه سخت، باربر و مقاوم استفاده می‌شود.
- ۵- تزریق درزه‌ها که در سنگ‌های درزه‌دار برای پرکردن آن‌ها استفاده می‌شود و ممکن است بسته به نوع و بازشدگی درزه‌ها با نرخ‌های مختلف و سیمان‌ها با نرمی مختلف و فشار متفاوت در چند مرحله انجام شود. محدوده موثر بودن انواع روش تزریق به اندازه ریزدانه‌ها بستگی دارد که به صورت تجربی به دست می‌آید (شکل ۳-۲۵).
- ۶- تزریق ترک‌ها و پرکردن آن‌ها معمولاً با مواد شیمیایی انجام می‌شود که در تونل‌های انتقال آب باید در انتخاب مواد شیمیایی ملاحظات زیست محیطی به دقت رعایت شود.



شکل ۳-۲۵- محدوده موثر بودن انواع روش تزریق برحسب اندازه ریزدانه

- ۷- نوع مصالح تزریق در تونل‌سازی به طور کلی شامل موارد زیر است:
- مواد پایه سیمانی، بنتونیت (۲ تا ۵ درصد سیمان)، خاکستر بادی و ژل میکروسیلیس (۵ تا ۱۰ درصد سیمان) با افزودنی‌های زودگیرکننده، سیال کننده، فوق روان کننده و اصلاح کننده لزجت دوغاب با سیمان دارای سطح مخصوص^۲ تا ۲۰۰۰ متر مربع در کیلوگرم بسته به نفوذپذیری زمین.
 - مواد شیمیایی از قبیل پلی اورتان، سدیم سیلیکات، پلیمر اکریلیک یا آکریلامیدها، فنوپلاست و آمینوپلاست، اپوکسی، قیری و سایر فوم‌ها. در تزریق‌های شیمیایی معمولاً به دو مخزن ذخیره و یک مخزن اختلاط متصل

1-Jet grouting

۲- Blaine

به پمپ نیاز است. بسیاری از این مواد دو جزئی هستند که باید در فاصله زمانی کمی قبل از تزریق با رعایت ملاحظات آزمایش شده (تولید کننده) مخلوط شوند.

تجهیزات متداول تزریق در تونل‌سازی عبارتند از:

- مخلوط کننده یا میکسر با انواع دستی^۱، پرسرعت کلئیدی^۲، تسمه‌ای^۳ و پیوسته^۴ با ظرفیت حداقل ۱۲۰ لیتر و قابلیت اختلاط دوغاب با نسبت آب به سیمان ۰/۶ به یک تا ۶ به یک.
 - پمپ تزریق برقی یا بادی یا هیدرولیکی با عملکرد در محدوده فشار مورد نیاز با شیرهای قطع و ایمنی آزادساز فشار، فشارسنج با دقت بالا تا حداقل ۱۰ کیلوپاسکال، شلنگ لاستیکی مسلح یا لوله فولادی سیاه با قطر حداکثر ۲۵ میلی‌متر و ادوات اتصال لازم. حداقل یک پمپ یدکی باید در کار تزریق تونل‌سازی پیش‌بینی شود.
 - مخزن ذخیره با ظرفیت حداقل ۳۵۰ لیتر برای کارهای متداول تزریق.
 - مخروط تست روانی دوغاب بر اساس ASTM-C939 یا استانداردهای مشابه.
 - وسائل ارتباطی رادیویی و بیسیم.
 - تجهیزات مورد نیاز برای تزریق شیمیایی بر اساس نوع ماده و ملاحظات ارائه شده توسط تولیدکننده.
- انتخاب نوع و تعداد دستگاه تزریق بر اساس پارامترهای زیر انجام می‌شود:
- نوع تزریق و روش حفاری
 - فشار تزریق مورد نیاز
 - سرعت تزریق مورد نیاز
 - حجم قابل تزریق در ساعت و نرخ بازده دستگاه
 - فضای کاری و حداکثر اندازه قابل قبول دستگاه تزریق
 - نوع ماده تزریق و نیازهای اختلاط
 - تعداد و موقعیت جبهه‌های کاری هم‌زمان تزریق

۳-۴-۱-۲- روش اجرایی و مراحل انجام تزریق

مراحل متعارف تزریق به صورت زیر است:

- ۱- آماده‌سازی و تمیز کاری لوله‌ها و شلنگ‌ها و اتصال آن‌ها
- ۲- حفاری چال‌های تزریق و چال‌های تخلیه هوا و لوله‌گذاری در صورت نیاز

۱- Paddle

۲- Colloidal

۳- Ribbon

۴- Continious

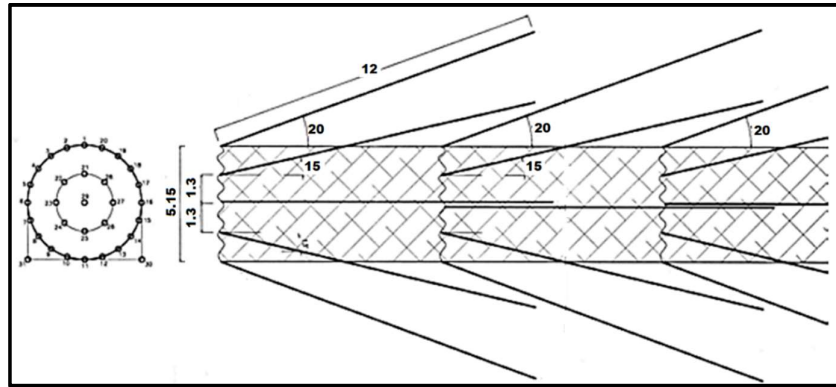
- ۳- حفاری چال‌های زهکش
- ۴- حفاری چال کنترلی برای بررسی وضعیت زمین قبل و بعد از تزریق و احراز کفایت و میزان موثر بودن تزریق
- ۵- شستشو و تست فشار چال‌های تزریق همراه با اندازه‌گیری فشار قابل تحمل
- ۶- انجام تزریق تا رسیدن به فشار تعریف شده. در صورتی که پس از تزریق حجم منطقی فشار مورد نیاز حاصل نشود، تزریق با افزودن ماسه انجام شده و پس از گیرش آن مجدداً تزریق دوغاب ادامه می‌یابد. در صورتی که خورند تزریق در ۳۰ دقیقه کمتر از ۱۵ لیتر باشد تزریق متوقف می‌شود.
- ۷- در صورت نشت دوغاب از لوله‌های تخلیه هوا باید عملیات متوقف شده و لوله‌ها شستشو داده شوند.
- ۸- در تزریقات چند مرحله‌ای با مواد پایه سیمانی باید حداقل ۲۴ ساعت فاصله بین تکمیل مرحله اول تزریق و حفاری چال‌های مرحله دوم فاصله در نظر گرفته شود.
- ۹- در طول عملیات تزریق اطلاعات لازم شامل تغییرات فشار در چال‌های مختلف، خورند دوغاب در چال‌های مختلف و سایر مشاهدات مهم عملیات تزریق باید به طور منظم ثبت و مستندسازی شوند.
- ۱۰- پاکسازی کارگاه

در روش تزریق پر فشار (جت گروتینگ) پس از حفر گمانه تا عمق موردنظر (حفاری به روش دورانی با قطر حدود ۷۵ تا ۱۱۰ میلی‌متر)، دوغاب سیمان به همراه آب و هوای فشرده تحت فشار بسیار بالا (مثلاً ۲۵۰ تا ۷۰۰ بار) و با سرعتی بالغ بر ۱۰۰ متر بر ثانیه تزریق می‌گردد. شار بالای تزریق در روش تزریق پر فشار (جت گروتینگ)، موجب تغییر ساختار خاک گردیده و ستون خاک - سیمان مقاومی ایجاد می‌گردد. شعاع تاثیر جت تزریق که می‌تواند به ۳ تا ۴ متر برسد، به عوامل مختلف شامل فشار تزریق، زمان تزریق، مقاومت برشی برجای خاک، اندازه نازل، وزن مخصوص دوغاب تزریق، نوع خاک، سرعت چرخش و سرعت حرکت رو به بالای میله حفاری بستگی دارد. در صورتی که علاوه بر بهسازی خاک، آب‌بندکردن آن نیز مورد نظر باشد، می‌توان به مخلوط تزریق بنتونیت اضافه نمود.

۱۱- کنترل کیفی عملیات تزریق

تزریق تحت دو فرآیند کنترل کیفی می‌شود. یکی انجام تزریق آزمایشی برای بررسی نفوذپذیری و خورند و امکان‌سنجی و تدقیق مشخصات تزریق نظیر فشار بهینه که قبل از شروع عملیات صورت می‌پذیرد و دیگری چال‌های کنترل برای بررسی کفایت تزریق پس از انجام هر مرحله از عملیات. در این روش، الگوی تزریق به صورت مرحله‌ای اجرا شده و در هر مرحله چال‌های میانی برای کنترل کفایت آن حفر می‌شود که در صورت عدم کفایت، مرحله بعدی تزریق در چال‌های میانی ادامه می‌یابد. نوع دیگر کنترل کفایت تزریق آب‌بندی، استفاده از روش ژئوفیزیکی یا ترموشیمیایی برای بررسی مسیرهای تراوش باقیمانده و میزان آن‌ها است. برای کنترل کفایت عملیات در زمین خاکی تعیین پارامترهای کنترلی نظیر چگالی و نفوذپذیری مورد نظر مصالح تزریق شده و نیز فشار نهایی معیار توقف تزریق، از اهمیت بالایی برخوردار است. برای کیفیت بهتر آب‌بندی و

افزایش بازده اجرا توصیه می‌شود، طول چال‌ها تا حد ممکن بیش‌تر در نظر گرفته شود و فاصله انتهای چال‌ها نسبت به محیط تونل مقدار کم‌تری انتخاب و هم‌پوشانی کافی بین ۳۰ تا ۵۰ درصد طول چال (حدود ۳ تا ۶ متر) برای ردیف‌های چال لحاظ گردد (شکل ۳-۲۶).



شکل ۳-۲۶- الگوی مورد استفاده تزریق آب‌بندی در دو ناحیه از تونل کوه‌رنگ (۳)

۳-۱-۴-۳- چالش‌ها و مسایل متداول عملیات تزریق در تونل‌سازی

- بر اساس تجربیات موجود ملی و بین‌المللی، چالش‌ها و مسائل متداول عملیات تزریق در تونل‌سازی عبارتند از:
- ۱- تغییر و افزایش احجام تزریق مورد نیاز برای آب‌بندی و تحکیم به دلیل عدم شناسایی دقیق و در نتیجه افزایش بی‌رویه زمان و هزینه این عملیات و ایجاد مشکلات متعدد اجرایی و قراردادی.
 - ۲- اختلاف نظر و نامعینی و ابهام زیاد در میزان تاثیر تزریقات انجام شده، خصوصا در موارد تحکیم و پایدارسازی دراز مدت و تشخیص نواحی که عملیات تزریق در آن‌ها تاثیر لازم را ندارد و نیازمند استفاده از روش‌های دیگر برای کنترل آب یا پایدارسازی و تحکیم می‌باشد.
 - ۳- تضعیف نواحی تزریق شده در اثر عملیات انفجار در سینه کار و کاهش عملکرد آن‌ها خصوصا در موارد تزریق آب بندی و پرده‌های تزریق و نحوه ترمیم و اصلاح آن‌ها.
 - ۴- صعوبت و نیاز به تمهیدات خاص در نواحی دارای فشار آرتزین، تزریق در محل تغییر نواحی سنگی به خاکی و تزریق در مواجهه با حفره‌های زیرزمینی و همچنین تزریق در زمین‌های محتوی مصالح ریزدانه و آبرفتی.
 - ۵- حرکت آب و جابجا شدن محل نشت در تونل با انجام تزریق آب‌بندی در یک ناحیه بدون توجه به رژیم جریان آب و وضعیت لایه‌ها و یا بدون انجام عملیات زهکشی و هدایت یا انحراف جریان آب سفره زیرزمینی.

۳-۱-۴-۴- بهینه‌سازی بازده و عملکرد

- با توجه به تجربیات موجود ثبت شده تزریق در اجرای تونل‌های انتقال آب نکات و توصیه‌های زیر می‌تواند به بهبود عملیات اجرایی تزریق کمک نماید:
- ۱- در محیط‌های سولفاتی برای افزایش دوام دوغاب تزریق خصوصا با اهداف آب‌بندی و تحکیم بلند مدت لازم

است سیمان ضد سولفات و افزودنی‌های مناسب برای این موضوع به کار برده شود. همچنین روش اجرایی مناسب برای شستشوی درزه‌های پر شده با رس یا لای و جایگزینی آن با دوغاب برای تحکیمات و آب‌بندی‌های دائمی در سنگ‌های درزه‌دار باید مد نظر قرار گیرد.

۲- برای پیش‌بینی بهتر حجم تزریقات مورد نیاز پیشنهاد می‌شود ارزیابی دقیقی از وضعیت ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژی محدوده‌های مورد نظر صورت پذیرد. ثبت و پایش احجام و زمان و کیفیت و کفایت تزریق در حین اجرا کمک زیادی به تدقیق برآوردها برای ادامه کار می‌نماید.

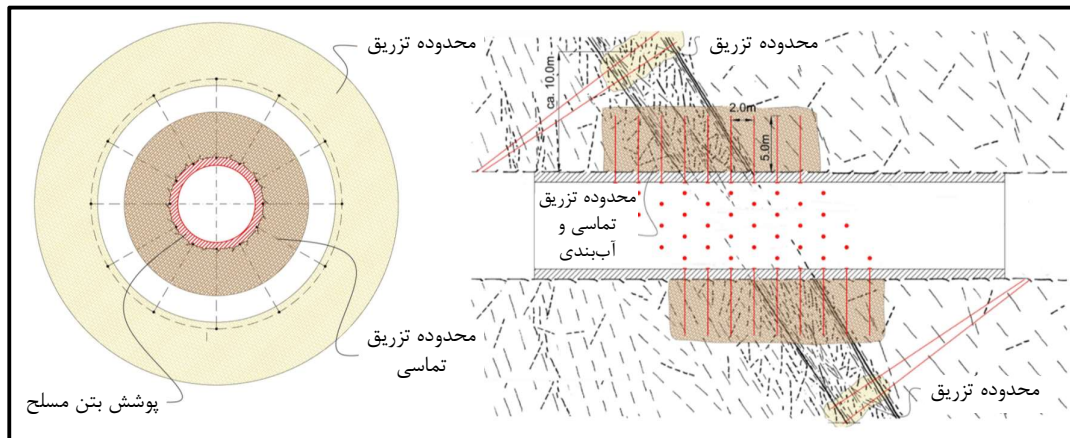
۳- در صورت آسیب‌دیدگی پرده‌های تزریق و تزریقات آب‌بندی در اثر عملیات انفجاری حین پیشروی حفاری، بهتر است از سیمان‌ها و مواد بسیار ریزدانه با بلین بالا برای تزریق مجدد و آب‌بندی استفاده شود. در صورت افزایش گرادیان نشت آب بهتر است برای کاهش هزینه‌ها، این عملیات با سرعت بیش‌تری انجام پذیرد.

۴- در سنگ‌های ضعیف‌تر (مثلاً آر.کیو.دی کم‌تر از ۴۰) و در زمین‌های کارستیک و حفره‌دار بهتر است از روش اجرای به سمت عمق^۱ برای تزریق تحکیمی و پایدارسازی استفاده شود. همچنین در شرایط نیاز به آب‌بندی در زمین‌های پرآب هم از همین روش تزریق همراه با به کارگیری پکر و حفاری مجدد برای هر مرحله تا حصول آب‌بندی مناسب استفاده می‌شود. توجه شود که کاربرد این روش با توجه به هزینه و زمان اجرایی بیش‌تر آن محدود به شرایط خاص نظیر موارد ذکر شده می‌باشد.

۵- در تزریق در هوای سرد باید با رعایت تمهیداتی نظیر استفاده از آب گرم و پوشش مخزن دوغاب، دمای آن در حین تزریق و قبل از گیرش به کم‌تر از حدود ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش نیابد.

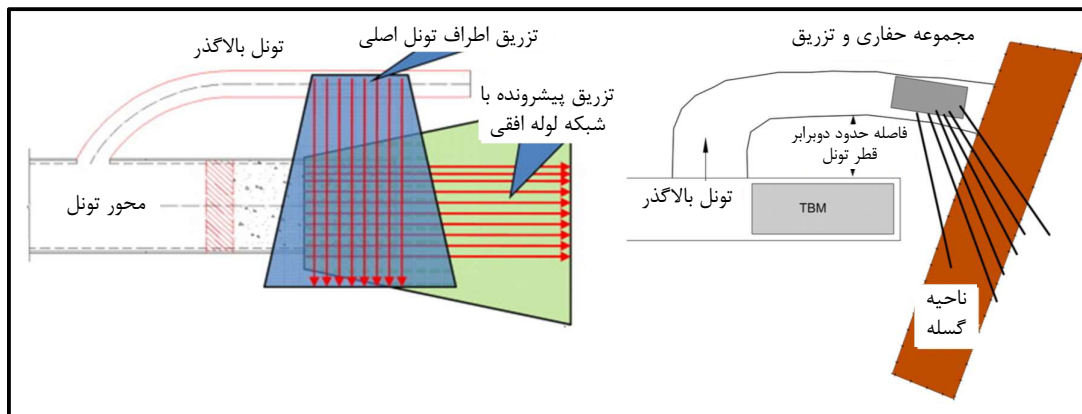
۶- برای بهبود بازده و حذف زمان انتظار برای گیرش دوغاب و بازکردن پکرها می‌توان از پکر یک‌بار مصرف استفاده نمود که هم‌زمان با تزریق چال با فشار دوغاب باز شده و تزریق در داخل چال ادامه می‌یابد.

۷- در محدوده گسله و صفحه گسل نیاز به اجرای الگوی خاصی از تزریق تحکیمی و تثبیت و آب‌بندی می‌باشد. در این شرایط ابتدا تزریق آب‌بندی به صورت پرده محیطی اجرا شده و سپس در صورت نیاز تزریق تحکیمی و نهایتاً تماسی با اجرای پوشش دائم یا بخشی از پوشش دائم انجام می‌گردد (شکل ۳-۲۷).



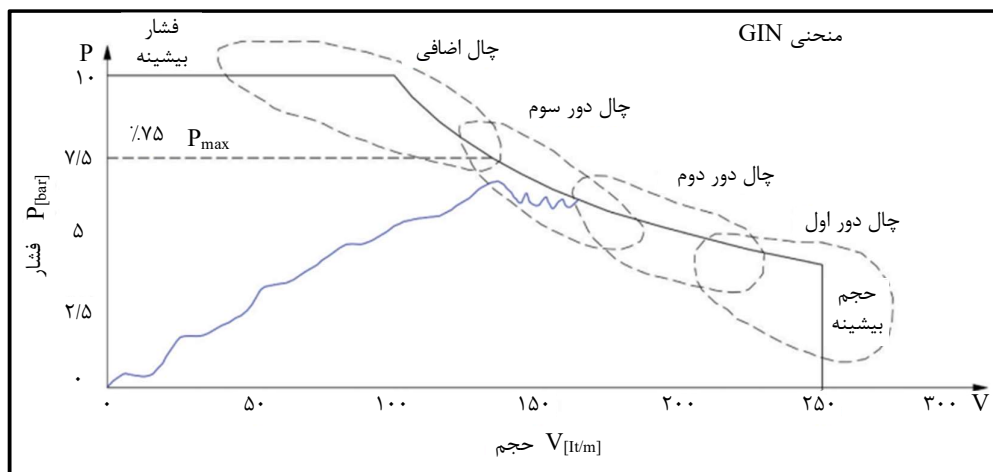
شکل ۳-۲۷- نمونه الگوی اجرای پرده تزریق آب‌بندی در تقاطع با صفحه گسل و تزریق تحکیمی و تماسی نهایی

۸- در برخی موارد با استفاده از تونل کنارگذر کمکی، اقدام به تثبیت زون گسله یا ناحیه ریزشی یا ایجاد پرده برای کنترل سفره آب زیرزمینی می‌گردد (شکل ۳-۲۸).



شکل ۳-۲۸- استفاده از تونل کنارگذر برای تثبیت زون گسله یا ناحیه ریزشی یا ایجاد پرده برای کنترل سفره آب زیرزمینی

برای بررسی و ارزیابی کفایت تزریق و برنامه‌ریزی اجرایی انجام تزریق موثر و به اندازه، معمولاً از پارامتری به نام عدد شدت تزریق^۱ (جی.آی.ان) که حاصل ضرب بیشینه مقدار فشار در بیشینه مقدار حجم مواد تزریق شده است استفاده می‌شود. مطابق شکل (۳-۲۹)، در مرحله طراحی مقدار و سطح جی.آی.ان تعیین و بر اساس آن روند عملیات تزریق برنامه‌ریزی می‌شود.



شکل ۳-۲۹- روند برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در مورد چگونگی ادامه عملیات تزریق

مراحل این کار به صورت زیر است:

- ۱- شروع عملیات بر اساس الگوی اولیه و ثبت مقادیر فشار و حجم،
- ۲- ثبت داده‌ها روی منحنی هدف و کنترل نحوه رسیدن به آن با تنظیم فشار،
- ۳- معمولاً در چال‌های اولیه فشار کم و حجم زیاد، در چال‌های ثانویه به تدریج افزایش فشار و کاهش حجم، در چال‌های سری سوم به تدریج افزایش فشار و کاهش حجم و نهایتاً در چال‌های نهایی فشار تا بیش از ۷۵ درصد فشار حداکثر و حجم خورند تقریباً ثابت می‌ماند.
- ۴- حالت بهینه: با یک الگوی تزریق فشار ۵۰ تا ۷۵ درصد فشار تعریف شده در منحنی جی.آی.ان حاصل گردد.

۳-۴-۲- انجماد زمین^۱

۳-۴-۲-۱- معرفی و انتخاب تجهیزات انجماد زمین

انجماد زمین به منظور افزایش سختی آن در یک مقطع مشخص برای حفاری صورت می‌پذیرد. دو روش کلی نیتروژن مایع LN₂ یا دی اکسیدکربن مایع LCO₂ و روش آب نمک یا شورآب^۲ برای انجماد وجود دارد که در هر دو با استفاده از لوله‌هایی در محدوده مورد نیاز عملیات انجماد با فواصل تقریبی یک متر صورت می‌پذیرد. در روش اول هزینه اجرا بالاتر و سرعت کار بیش‌تر است و اغلب برای کارهای کم حجم و حساس استفاده می‌شود. در روش دوم تلفات انرژی نسبتاً بیش‌تر و انجماد کندتر است ولی در مجموع اقتصادی‌تر بوده و برای حفاری‌های حجیم و زمان‌بر مناسب‌تر است. در جدول (۳-۹) مقایسه خصوصیات دو روش در مرحله تجهیز و اجرا ارائه شده است.

۱- Ground Freezing

۲- Brine

جدول ۳-۹- مقایسه خصوصیات دو روش نیتروژن مایع و شورآب برای انجماد زمین

شورآب	نیتروژن مایع	شاخص
تجهیز کارگاه		
لازم است	لازم نیست	برق
لازم است	لازم نیست	آب
لازم است	لازم نیست	یخچال
لازم است	لازم است	مخزن
لازم است	لازم نیست	پمپ‌های چرخش جریان
برای تغذیه و برگشت	فقط برای تغذیه	لوله کشی برای توزیع سرما
لازم نیست	لازم است	لوله و شیر در سطح از جنس مقاوم در سرما
عملیات اجرایی		
مایع	مایع یا بخار	شرایط فیزیکی ماده سرمازا
(MgCl ₂) ۳۴- درجه سانتی‌گراد (CaCl ₂) ۵۵- درجه سانتی‌گراد	منفی ۱۹۶ درجه سانتی‌گراد	کم‌ترین دمای قابل حصول
استاندارد است	عملی نیست	استفاده مجدد از ماده سرمازا
آسان	مشکل	کنترل سیستم
منظم	اغلب غیرمنظم	شکل دیواره منجمد
اختلاف کم	اختلاف زیاد	پروفیل دما در دیواره منجمد
کند	سریع	نفوذ یخ زدگی
ذوب شدن یخ	ندارد	تأثیرپذیری دیواره منجمد از آسیب‌دیدگی لوله‌ها
کم	ندارد	سر و صدا

تجهیزات انجماد باید قادر باشند در زمان کوتاهی دمای زمین را به حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد زیر صفر حتی در محیط‌های گرم و مرطوب کاهش دهند. بنابراین ظرفیت مکش آن‌ها چیزی در حدود ۱۰۰ تا ۲۳۰ وات به ازای هر متر لوله می‌باشد. به طور متوسط در داخل زمین رسیدن به دمای ۷- درجه سلسیوس ممکن است برای زمین ماسه‌ای کافی باشد، در حالی که برای رس نرم دمای کم‌تر از ۲۳- درجه سلسیوس ممکن است نیاز باشد.

۳-۴-۲- روش اجرایی و مراحل انجام انجماد زمین

مراحل اجرایی کلی در این روش پس از طراحی و تحلیل حرارتی و سازه‌ای عبارتند از نصب تجهیزات، زهکشی و حذف آب جاری، حفاری و نصب لوله، انجماد، حفاری، نگهداری، ذوب شدن. در صورتی که حفاری به روش انفجاری باشد، باید از لوله فولادی مسلح استفاده گردد که بر اساس ASTM-A120 شامل ۸ درصد نیکل هستند. الگوهای مختلف انجماد در تونل‌سازی ترکیبی از دیواره منجمد عمود بر محور تونل و غشای منجمد در محیط تونل می‌باشند.

نصب لوله‌های انجماد با حفاری چال و نصب آن‌ها صورت می‌پذیرد و الگویی شبیه فورپولینگ دارد. در تونل‌های کم عمق می‌توان نصب لوله‌های انجماد را با حفاری چال از سطح زمین انجام داد. همچنین می‌توان از تونل کوچک پایلوت برای حفاری و اجرای سیستم لوله‌کشی انجماد زمین استفاده نمود. این تونل پایلوت برای پایش و اندازه‌گیری دما در حین اجرا نیز به کار گرفته می‌شود. در روش کند و پوش نیز می‌توان برای احداث دیواره نگهدارنده منجمد از این روش استفاده نمود.

۳-۴-۲-۳- ملاحظات و چالش‌های متداول عملیات اجرایی انجماد زمین

خصوصیات هدایت حرارتی خاک، میزان آلودگی و مواد محلول آب زیرزمینی، دمای آب زیرزمینی و گرادیان هیدرولیکی آن در بازده سامانه انجماد موثرند. بر اساس تجربیات موجود در عملیات انجماد زمین در پروژه‌های تونل‌سازی برخی چالش‌های مهم در این زمینه که باید به آن‌ها توجه نمود عبارتند از:

- ۱- تغییرات خصوصیات زمین‌های سست پس از پایان انجماد و ذوب شدن و نشست آب و فشارهای وارده از زمین و نیاز به کنترل نشست و آمادگی کامل برای عملیات اصلاحی آب‌بندی.
- ۲- خارج کردن لوله‌های انجماد از داخل زمین خصوصاً در انجماد سینه‌کار و در مسیر حفاری تی.بی.ام در روش‌های مکانیزه که می‌توان برای رفع این مشکل از لوله‌های قابل بیرون کشیدن پس از انجماد استفاده نمود.
- ۳- مسائل محیطی انجماد در مناطق مسکونی، کشاورزی و طبیعی در نقاط کم‌عمق و سست و اثر انجماد بر آن‌ها.
- ۴- نیاز به فضای استقرار تجهیزات و تامین توان و برق و ایجاد دسترسی کوتاه به ناحیه مورد نظر برای انجماد خصوصاً در تونل‌های عمیق و طویل.
- ۵- ملاحظات ایمنی و خطرات سلامت و محیط زیستی نشست گاز نیتروژن در روش انجماد با گاز و نیاز به پیش‌بینی تمهیدات تسکینی و امدادی خاص برای حوادث احتمالی.
- ۶- کنترل‌های مورد نیاز تغییرات دما در عمق زمین در عملیات تزریق آب‌بندی در محیط‌های منجمد شده و پس از انجماد برای جلوگیری از یخ‌زدگی و کاهش کارایی تزریق.
- ۷- مدیریت و کاهش بخارات متصاعد شده از سایت انجماد و تولید سرما و مدیریت پساب آلوده و شیمیایی.
- ۸- مزاحمت سیستم لوله‌کشی انجماد برای عبور و مرور و عملیات اجرایی در داخل تونل و محدودیت‌های ایجاد شده برای استفاده از انواع روش‌های حفاری در حالت انجماد زمین.

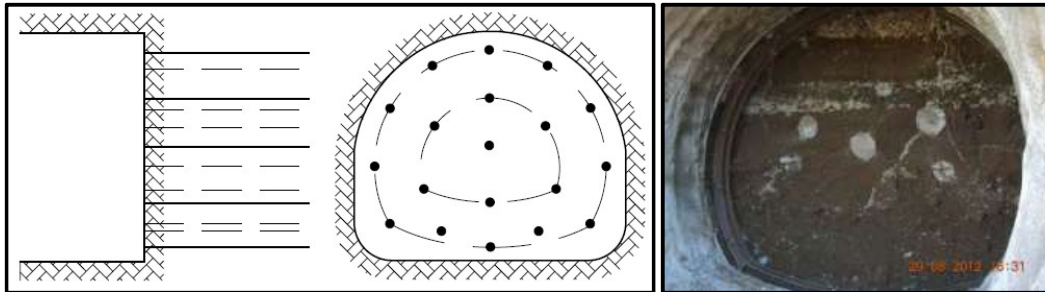
۳-۴-۳- فورپولینگ

۳-۴-۳-۱- کلیات و روش اجرا

فورپولینگ یک روش پیش نگهداری جبهه کاری برای انجام حفاری ایمن در انواع زمین‌های نرم و ریزشی است. روش‌های مختلف پیش نگهداری و پایدارسازی جبهه حفاری عبارتند از:

- ۱- فورپولینگ در تاج تونل با حفاری و قراردادن لوله‌های با قطر معمول بین ۷ تا ۱۵ سانتی‌متر در فواصل ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر و طول تا ۱۵ متر یا بیشتر و تزریق در داخل لوله‌ها. در صورت نیاز به هم‌پوشانی مقدار آن بین ۳ تا ۴ متر لحاظ می‌شود.

- ۲- میخ کوبی جبهه کار^۱ که می‌تواند در تاج یا سینه کار باشد با تسمه‌ها یا لوله‌های فایبرگلاس یا فولادی که بیش‌تر در روش حفاری با تی.بی.ام و ماشین حفر بازویی به کار می‌روند تا هنگام حفاری به آسانی توسط تیغه دستگاه حفر بریده شوند. این کار با تزریق پرفشار هم امکان‌پذیر است (شکل ۳-۳۰).
- ۳- تسمه کوبی^۲ که در خاک‌های ماسه‌ای و شنی برای جلوگیری از ریزش در فواصل نزدیک هم در تاج جبهه کار کوبیده می‌شوند.



شکل ۳-۳۰- میخ کوبی جبهه کار با تسمه یا لوله یا تزریق پرفشار

این روش‌ها عموماً برای احداث ورودی‌های تونل در نواحی سست نیز به کار می‌روند.

۳-۴-۳- معرفی و انتخاب تجهیزات

تجهیزات اجرای فورپولینگ شامل دستگاه حفاری و تزریق می‌باشند. با توجه به طول مورد نیاز حفاری و نصب لوله‌ها و تزریق، لازم است بازوی دستگاه قابلیت این کار را داشته باشد. برای کاهش اضافه حفاری، لوله‌ها با زاویه بسیار کم نسبت به محور تونل اجرا می‌شوند.

۳-۴-۳- روش‌ها اجرایی و مراحل انجام

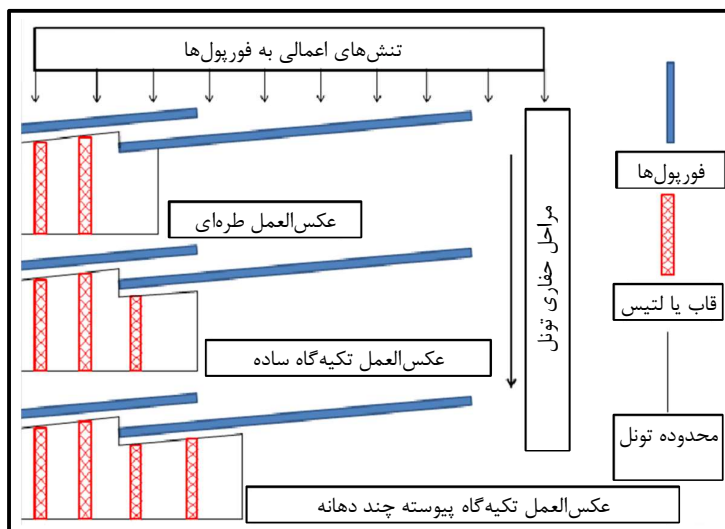
مراحل اجرای فورپولینگ عبارتند از:

- ۱- حفاری چال و قرار دادن لوله در داخل آن یا حفاری و لوله‌گذاری هم زمان با لوله‌های دارای کله حفاری خودحفر،
- ۲- تزریق داخل لوله‌ها،
- ۳- انجام عملیات حفاری و اجرای سامانه نگهدارنده تونل. معمولاً فورپولینگ و سایر پیش نگهدارنده‌ها جزئی از سامانه باربری دائمی تونل محسوب نمی‌شوند. در زمین‌های دارای پتانسیل هم‌گرایی و مچاله‌شوندگی این سیستم‌ها پس از پیشروی تونل به علت بسته نبودن قابلیت چندانی برای تحمل مچاله‌شوندگی ندارند.

۱- Face Dowel

۲- Spile Plate

اجرای حلقه‌های سامانه نگهدارنده تکیه‌گاه‌های لازم را برای فورپولینگ فراهم نموده و این سیستم باربر ابتدا به صورت طره‌ای، سپس تکیه‌گاه ساده و نهایتاً با اجرای چند تکیه‌گاه به صورت تکیه‌گاه پیوسته عمل می‌نماید. در برخی شرایط مطابق شکل زیر می‌توان مکانیزم باربری مشابهی با جت گروتینگ هم ایجاد نمود. در روش اتریشی ان‌ای.تی.ام معمولاً فورپولینگ برای حفاری تاج استفاده شده و پس از نصب نگهدارنده، مراحل حفاری قسمت میانی و تحتانی ادامه می‌یابد. در شکل (۳-۳۱)، فرآیند اجرا و عملکرد فورپولینگ با پیشرفت حفاری ارائه شده است.



شکل ۳-۳۱- فرآیند اجرا و عملکرد فورپولینگ با پیشروی حفاری

۳-۴-۳- بهینه‌سازی بازده عملکرد

با توجه به تجربیات اجرایی پایدارسازی با فورپولینگ، چالش‌های زیر معمولاً در این عملیات مورد توجه قرار می‌گیرد:

- ۱- انجام عملیات فورپولینگ در زمین‌های پرآب و نواحی که سینه‌کار با سفره‌های آب زیرزمینی تقاطع دارد، در مرحله حفاری لوله‌ها ممکن است با هجوم و تراوش قابل توجه آب همراه شود. در این حالت ممکن است زهکشی و ایجاد کمی تاخیر زمانی در عملیات تزریق لوله‌ها به انجام عملیات کمک نماید. در صورتی که این کار عملی نباشد، می‌توان از تزریق با پکر با دوغاب مناسب با کنترل این که شسته شدن آن اتفاق نیفتد استفاده نمود. روش مناسب دیگر در این شرایط استفاده از تزریق شیمیایی همراه با فورپولینگ است. در شرایط هجوم زیادتر آب می‌توان به جای فورپولینگ تزریقی از فورپایلینگ^۱ همراه با تزریق شیمیایی برای کنترل آب استفاده نمود. در صورتی که نیاز به آب‌بندی کامل در محیط کاری باشد، فورپولینگ یا فورپایلینگ به صورت تمام مقطع و به طور کامل با تزریق شیمیایی در دستورکار قرار می‌گیرد.

- ۲- اجرای عملیات فورپولینگ در نواحی تغییر خصوصیات زمین یا رخنمون‌های نامتقارن در جبهه حفاری باید با

- دقت و ملاحظه کافی برای پایدارسازی ناحیه ضعیف صورت پذیرد. برای این کار باید اطمینان کافی از ایجاد مکانیزم انتقال بار از ناحیه سست حاصل شود و پیشروی حفاری با سرعت کم‌تر برای کنترل این مساله همراه باشد. در این نواحی می‌توان از ترکیب مهار و پیچ سنگ برای تامین پایداری موقت برای حفاری بهره جست.
- ۳- کارایی سیستم فورپولینگ در نواحی سنگ‌های خرد شده موضعی بهره‌وری بالاتری دارد و در نواحی سست طولانی هزینه‌های آن بیش‌تر خواهد بود و بهتر است در ترکیب با سایر سیستم‌های نگهداری موقت به کار رود.
- ۴- اجرای سیستم فورپولینگ در نواحی با روباره کم معمولاً ریسک بالاتری دارد و معمولاً سعی می‌شود برای کنترل پایداری در این نواحی با استفاده از قاب‌گذاری، فورپولینگ را مهار و به ایستایی آن کمک نمود.
- ۵- ریزش سینه‌کار در نواحی اجرای فورپولینگ در سقف و جوانب یکی از چالش‌های این عملیات است. برای کنترل سینه‌کار بهتر است علاوه بر بتن‌پاشی فوری آن، برای جلوگیری از هوازدهی نواحی سست و خردشده، از تسمه یا شمع کوبی یا میل مهارهای موقت برای پایداری سینه‌کار استفاده نمود.
- ۶- در مقاطع بزرگ‌تر و سست برای کنترل پایداری در اجرای فورپولینگ، ابتدا لوله‌ها در سقف اجرا شده و سپس با نصب قاب یا سیستم نگهدارنده تاج، حفاری قسمت‌های پایین‌تر با پایدارسازی دیواره ادامه می‌یابد. سیستم فورپولینگ بهتر است کل محیط بخش فوقانی را در بر گیرد و مقداری هم تا بخش پایینی گسترش یابد.
- ۷- در پرتال ورودی تونل‌ها در روباره‌های کم و سست بهتر است از فورپایلینگ استفاده شود؛ چون ممکن است تزریق لوله‌ها با موفقیت و کیفیت قابل توجهی همراه نباشد. این کار برای شروع حفاری در هوای بسیار سرد هم به جای تزریق لوله‌ها توصیه می‌شود.
- ۸- بازده و بهینه‌سازی روش فورپولینگ علاوه بر شاخص‌های عملکردی نظیر میزان کاهش نشست سطحی و کاهش بار طراحی و در نتیجه حجم و صعوبت اجرای پوشش نگهدارنده با شاخص‌های اجرایی زیر بررسی می‌شود:
- نرخ یا سرعت پیشروی کلی تونل
 - هزینه اجرای کلی حفاری و نگهداری به ازای هر متر پیشروی
 - مقدار مصرف لوله، جنس و مقاومت محوری و خمشی لوله تاثیر مستقیم بر مقدار مصرف آن در اجرا دارد.
 - مقدار اضافه حفاری ناشی از جانمایی لوله‌ها و انحراف آن‌ها حین نصب که تابع طرح و دقت اجرا می‌باشد.
 - سرعت اجرای فورپولینگ که بستگی به تجهیزات حفاری و تزریق دارد. برخی لوله‌ها با روش خودحفر و با کله حفاری مخصوص نصب می‌شوند که سرعت اجرا را افزایش می‌دهد.

۳-۴-۴- پیش تحکیم

۳-۴-۴-۱- معرفی و انتخاب تجهیزات

روش‌های مختلفی برای پیش تحکیم زمین‌های سست و نرم وجود دارد که عبارتند از:

- ۱- پیش تحکیم با تزریق جبرانی برای پرکردن و تحکیم فضاهای خالی ایجاد کننده پتانسیل نشست در مسیر تونل،

- ۲- پیش تحکیم دینامیکی یا ارتعاشی، ارتعاش ناشی از انفجار یا دینامیکی در عمق،
- ۳- پیش تحکیم با تزریق شیمیایی،
- ۴- پیش تحکیم با زهکشی،
- ۵- پیش تحکیم با جت گروت،
- ۶- پیش تحکیم با اختلاط عمقی خاک،
- ۷- پیش تحکیم با تسلیح زمین،
- ۸- پیش تحکیم با بارگذاری،

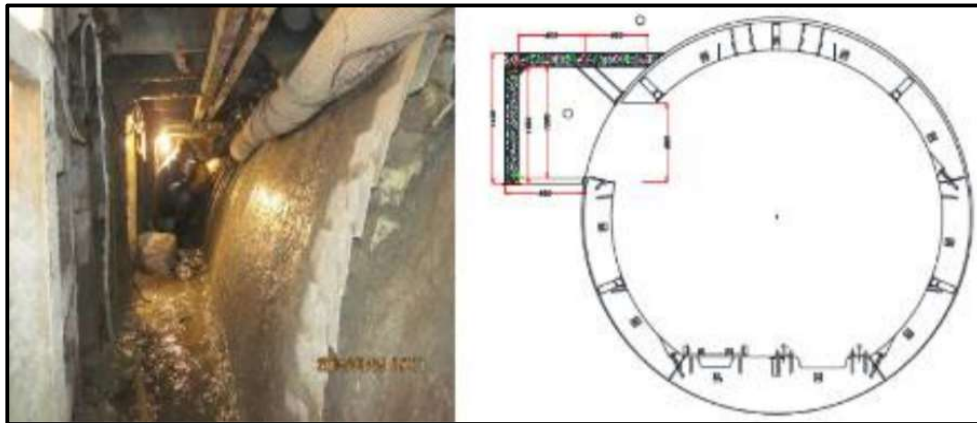
در شکل (۳-۳) محدوده مناسب کاربرد هر یک از این روش‌ها بر حسب درصد و اندازه ریزدانه و نوع زمین نرم متشکل از شن، ماسه، لای و رس پیشنهاد شده است.

۳-۴-۲- روش اجرایی و مراحل انجام

روش اجرایی و مراحل انجام هر یک از روش‌های فوق در مراجع مرتبط ژئوتکنیک و بهسازی زمین ارائه شده‌اند. در حفاری تونل یکی از نکات مهم اجرایی شناسایی حفرات و نواحی سست و نیازمند پیش تحکیم است که با هدف کاهش نشست و ناپایداری انجام می‌پذیرد. این کار با روش‌های ژئورادار از روی سطح و ژئوفیزیک با حفر گمانه شناسایی انجام می‌شود.

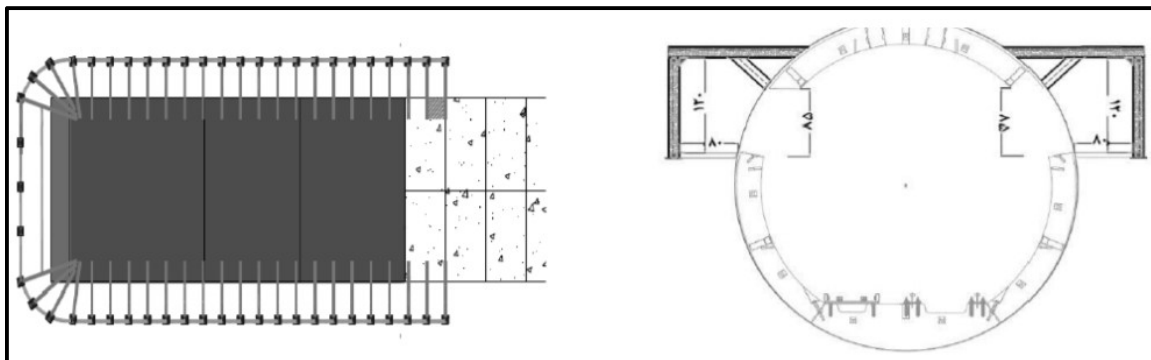
در روش حفاری مکانیزه، در زمانی که گسترش زون خرد شده بالا باشد و روش‌های ذکر شده بالا به هر دلیلی امکان استفاده نداشته باشد، یک راه دیگر، استفاده از تونل سرویس می‌باشد. حفر تونل کمکی با قطر کم و متناسب با نیاز طرح به عنوان یک سیستم تخلیه در محدوده تونل اصلی عمل کرده و موجب زهکشی آب‌های اطراف گردیده و در نتیجه امکان ادامه حفاری با دستگاه سهل‌تر می‌شود، ضمن این که دسترسی به محدوده ریزش مقابل دستگاه را نیز فراهم می‌آورد و بنابراین می‌توان فضای لازم برای انجام هر گونه عملیات پیش تحکیم را داشت.

در مواردی که تونل کمکی در سقف تونل اصلی طراحی می‌شود، در انتهای سپر از راک بولت یا پیچ سنگ برای نگهداری محل شروع تونل کمکی استفاده می‌شود، اشکال اصلی موقعیت تونل کمکی در سقف، ناپایداری محدوده و لزوم استفاده از نگهداری زیاد با توجه به محدودیت فضای این تونل‌ها می‌باشد. در مواردی که شرایط سقف تونل اصلی نامناسب باشد و یا به دلیل وجود تجهیزات نظیر پراب دریل و غیره نتوان از موقعیت تاج تونل استفاده کرد، از تونل کمکی در دیواره‌ها و در نیمه بالایی آن استفاده می‌شود (همانند تونل کمکی تونل سبزکوه در شکل‌های ۳-۳۲ و ۳-۳۳). ابعاد این تونل‌های کمکی بستگی کامل به شرایط زمین در محل احداث دارد. مخصوصاً این که خود تونل کمکی نیز از ناحیه مشکل‌دار عبور کند. لکن در مجموع ابعاد این تونل‌ها تا حد ممکن کوچک در نظر گرفته می‌شود تا حداقل سیستم نگهداری البته با امکان استفاده از ماشین‌آلات مورد نیاز فراهم باشد.



شکل ۳-۳۲- نمایشی از موقعیت گالری دسترسی و نحوه اجرای آن در تونل سبزکوه

در صورت هجوم بیش از حد آب در داخل گالری مورد نظر، باید گالری با همان ابعاد و مشخصات در سمت دیگری حفر نمود و هدف از حفر تونل دسترسی دیگر، انتقال آب ورودی به یکی از تونل‌های دسترسی و امکان پایدارسازی زون ریزش از طریق تونل دیگر و در نهایت آزادسازی کاترهد می‌باشد.



شکل ۳-۳۳- نمایشی از تونل‌های دسترسی نهایی و نحوه تحکیم آن‌ها به منظور عبور از ناحیه ریزشی تونل سبزکوه

۳-۴-۴-۳- بهینه‌سازی بازده عملکرد

بهینه‌سازی بازده عملکرد روش‌های اجرایی فوق در مراجع مرتبط با کارهای ژئوتکنیکی و بهسازی زمین ارائه شده‌اند.

فصل ۴

روش‌های پایش و اندازه‌گیری

کنترل و پایش قبل، حین و بعد از اجرا با اهداف مختلفی انجام می‌پذیرد. در زمان اجرا این فعالیت‌ها شامل سه نوع اندازه‌گیری، نصب ابزار و قرائت و ثبت در قالب برنامه پایش می‌باشد که با اهداف زیر صورت می‌پذیرد:

- ۱- تدقیق، بهینه‌سازی یا اصلاح طراحی، با کمک تحلیل برگشتی،
- ۲- کنترل رواداری اجرایی حفاری و نگهداری،
- ۳- کنترل پایداری حین اجرا و اصلاح سامانه نگهداری، با اندازه‌گیری یا ابزاربندی،
- ۴- کنترل شاخص‌های سلامت و ایمنی و محیط زیست (اچ.اس.ای)، شامل شرایط سلامت و ایمنی محیطی کار داخل و بیرون و زیست محیطی نظیر مسائل آب،
- ۵- پیش‌بینی و شناسایی مخاطرات حین اجرا در جبهه کاری پیش رو،
- ۶- محاسبه و کنترل احجام اجرایی و تدقیق روش اجرا،
- ۷- کارشناسی مسائل حقوقی، قانونی و ادعاها در شرایط بروز حوادث و خسارات،
- ۸- مستندسازی و مدیریت دانش.

اصول مهم مورد توجه در ابزاربندی و پایش عبارتند از دقت اندازه‌گیری نتایج، صحت و نزدیک به واقع بودن نتایج و مطابقت شاخص مورد اندازه‌گیری با روش یا ابزار اندازه‌گیری. برای هر شاخص مورد اندازه‌گیری یا قرائت باید مقدار مجاز و مرز هشدار و خطر مشخص شده باشد. معمولاً مرز هشدار و خطر به ترتیب به ازای تجاوز ۵۰ و ۱۰۰ درصدی^۱ از مقدار مجاز در نظر گرفته می‌شود. البته تصمیم‌گیری در این مورد با توجه به نامعینی‌های متعدد، همواره همراه با کنترل وضعیت به روش مشاهده و قضاوت مهندسی می‌باشد.

اندازه‌گیری و پایش دارای موارد مشترک در انواع روش تونل‌سازی و موارد غیر مشترک در روش مکانیزه، متعارف، تونل کم عمق و عمیق و زمین سخت و نرم می‌باشد، که در هر یک از موارد ابزار و روش خاص و فناوری اندازه‌گیری ممکن است تا حدی متفاوت باشد. مکانیزاسیون ثبت و پالایش، ارتباطات بیسیم، افزایش دقت، چندکاره بودن و بهبود توانایی کار در شرایط مختلف محیطی از شاخص‌های این فناوری‌ها هستند. انواع اندازه‌گیری و کنترل در تونل‌سازی عبارتند از:

- ۱- مسیریابی و شناسایی با نقشه‌برداری و دوربین لیزری و امواج و سامانه موقعیت مکانی.
- ۲- کنترل رواداری هندسی اجرایی شامل اضافه و کسر حفاری و نصب و اجرای پوشش که اغلب با برداشت هندسی یا نقشه‌برداری با تجهیزات مربوطه صورت می‌پذیرد.
- ۳- کنترل تغییرشکل، جابجایی و نشست، کرنش و تنش و دوران با اندازه‌گیری هندسی یا ابزاربندی.
- ۴- اندازه‌گیری شاخص‌های محیطی مانند دما، رطوبت، غلظت غبار و کیفیت هوا و میزان اکسیژن، گازها و مواد

^۱ Tunnel Operations, Maintenance, Inspection, and Evaluation Manual, FHWA-HIF-15-005, 2015.

شیمیایی و ارتعاشات و صوت.

- ۵- اندازه‌گیری نشت و تراوش و دبی آب و تراز آب زیرزمینی و سطحی.
- ۶- اندازه‌گیری و کنترل احجام اجرایی شامل حجم حفاری، تخلیه مصالح، احجام تزریق و غیره.

۴-۱- نصب، قرائت، تحلیل ابزار دقیق و رفتارسنجی تغییرشکل زمین

۴-۱-۱- روش‌های اندازه‌گیری هندسی تغییرشکل زمین

روش‌های اندازه‌گیری و کنترل هندسی در تونل‌سازی متعارف و مکانیزه تا حدی مشابه‌اند. اندازه‌گیری هندسی در تونل در حین اجرا به شکل‌های متنوع زیر صورت می‌پذیرد:

- ۱- برداشت توپوگرافی و هندسی ورودی و خروجی و راه‌های دسترسی و تجهیز کارگاه و موقعیت عملیات اکتشافی،
 - ۲- مسیریابی و کنترل حرکت ماشین و پیاده نمودن فراز و نشیب و قوس‌های تونل و تنظیم ریل‌ها و تسمه نقاله‌ها،
 - ۳- پیاده‌سازی موقعیت موانع مسیر و گسل‌های تعیین شده و درزه نگاری و ثبت عوارض،
 - ۴- کنترل نشست سطحی و تغییرشکل سازه‌های روسطحی،
 - ۵- کنترل تغییرشکل و هم‌گرایی داخل تونل شامل هم‌گرایی افقی و قائم و فشار وارد بر پوشش و نیروی میل مهار و پیچ سنگ و تنش داخل اجزای سامانه نگهداری.
- هر یک از این موارد را می‌توان با روش‌ها و تجهیزات مختلفی انجام داد.

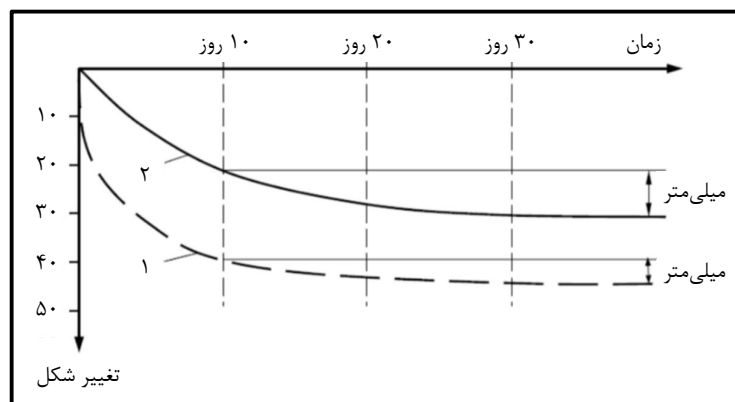
۴-۱-۲- پایش تغییرشکل

ابزار و تجهیزات مختلفی برای اندازه‌گیری و پایش تغییرشکل استفاده می‌شوند. در تونل‌سازی مکانیزه و نیمه مکانیزه ابزار اندازه‌گیری اغلب روی ماشین نصب می‌شوند. تغییرشکل داخلی تونل یا هم‌گرایی و واگرایی با نقشه‌برداری شاخص‌های نصب شده در نقاط مورد نظر یا استفاده از کشیدگی سنج اندازه‌گیری می‌شود. در روش اول موقعیت مکانی و در روش دوم جابجایی ثبت می‌شود. دقت این اندازه‌گیری ممکن است بسته به شرایط و وضوح دید در تونل بین یک تا سه میلی‌متر باشد. در حال حاضر، استفاده از تئودولیت لیزری یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای این منظور محسوب می‌گردد. افزون بر این، نقاط مشخصی از سقف و کف با استفاده از تئودولیت الکترونیکی با حسگرهایی که به جبهه حفاری متصل شده‌اند، از نظر ژئودزیکی کنترل می‌شوند. مقاطع ثانویه اندازه‌گیری در فواصلی که هم‌گرایی بین نقاط سقف و کف قرائت می‌شود، انتخاب می‌شوند. در تونل با مقطع بزرگتر و تعداد نقاط اندازه‌گیری بیش‌تر می‌توان از کوادکوپتر هم استفاده نمود.

تغییر شکل داخلی زمین و پوشش را می‌توان با انحراف‌سنج نیز اندازه‌گیری کرد. این ابزار برای کنترل امتداد و موقعیت شاقولی سطوح استفاده می‌شود. برخی از انواع انحراف‌سنج روی ماشین حفاری نصب شده و شیب و فراز مسیر

حفاری را کنترل می‌نمایند. پایش ترک در پوشش تونل نیز با انواع ترک‌سنج مکانیکی و الکتریکی محوری انجام می‌شود. برای اندازه‌گیری تغییرشکل داخلی زمین و هم‌گرایی حفره تونل، تعیین محل وقوع جابجایی در عمق لایه‌ها، تعیین میزان بازشدگی سطوح انفصال سنگ بر اساس لایه‌بندی و تعیین اندازه بلوک‌های ناپایدار در تونل‌ها و تعیین نشست نسبی زمین در اثر حفاری تونل از کشیدگی سنج استفاده می‌شود. به منظور سهولت و افزایش دقت قرائت ابزار می‌توان کشیدگی‌سنج‌ها را به هد الکتریکی مجهز نمود.

فرآیند تغییرشکل زمین تابعی از زمان‌بندی مراحل حفاری، فاصله از سینه‌کار و نصب پوشش موقت و دائم است. در مقاطع دارای فاصله از جبهه حفاری، قرائت در ابتدای هر روز انجام می‌شود، سپس با توجه به سرعت تغییرشکل و تغییرات تنش به یکبار در ماه کاهش می‌یابد. مشاهدات به صورت تابعی از زمان در یک نمودار ثبت می‌شود (شکل ۴-۱).



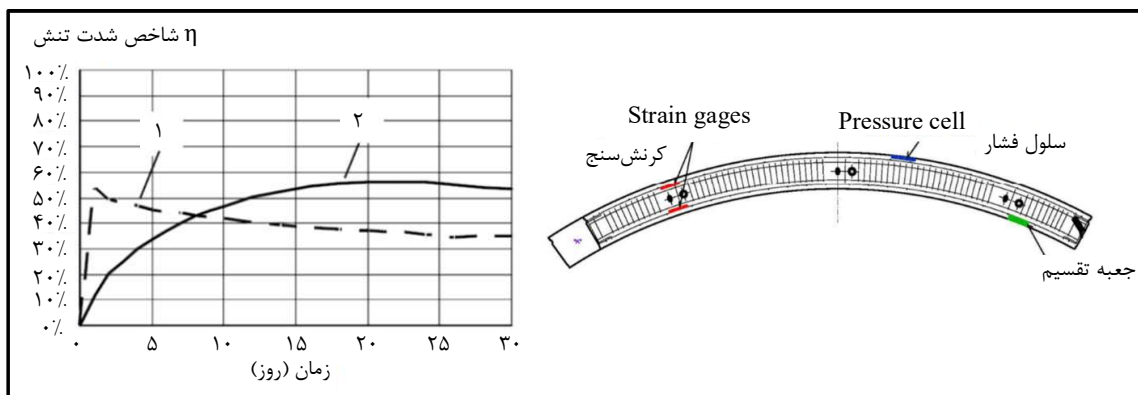
شکل ۴-۱- روند تغییرات تغییرشکل در طول زمان

پایداری سامانه نگهدارنده نشان دهنده پایداری یا عدم پایداری تونل با گذشت زمان است. استفاده از روش رسم نمودار تغییرشکل-زمان و کنترل روند آن بسیار مطمئن است، به طوری که امکان شناسایی هر موقعیت خطرناکی را مدت‌ها قبل از وقوع آن فراهم می‌آورد.

رژیم تغییرات تغییرشکل در طول زمان از شاخص‌های مهم در اندازه‌گیری تغییرشکل است. برای دستیابی به این مساله و بررسی آن لازم است که برداشت در فواصل زمانی ساعتی و روزانه بسته به منحنی رفتاری تغییرشکل زمین انجام شود. تغییرات تغییرشکل با توجه به منحنی رفتار زمین معمولاً در زمان‌های اولیه سریع و پس از گذشت زمان و نصب قطعات پیش ساخته یا قاب یا بتن‌پاشی و گیرش آن به سمت پایداری حرکت می‌کند. در صورتی که پایداری در مدت زمان معقولی حاصل نشود باید نسبت به تقویت سامانه نگهداری تونل اقدام نمود.

برای بررسی وضعیت سامانه نگهداری تونل نیز از شاخص شدت تنش (نسبت تنش موجود به ظرفیت تنش مجاز سامانه نگهداری) استفاده می‌شود که می‌تواند با نصب کرنش‌سنج در نقاط و اجزای حساس پوشش محقق گردد. کرنش سنج معمولاً از نوع الکتریکی بوده و اغلب روی میلگردهای لئیس یا پروفیل قاب در نقاط حداکثر تنش کششی قبل از بتن‌پاشی یا بتن‌ریزی نصب می‌گردند. با توجه به این که فرآیند تنظیم مجدد در کنترل و اندازه‌گیری بسیار زمان‌بر است و احتمالاً به طور موضعی تحت تأثیر تغییرات شرایط زمین‌شناسی قرار می‌گیرد (مثل افزایش رطوبت سنگ اطراف)، از

نظر عملی و تئوری، ضروری است که تنش و تغییرشکل در پوشش داخلی نیز اندازه‌گیری شود. این عملیات با جای گذاری مجموعه‌ای از صفحات فشارسنج مماسی یا کرنش‌سنج در داخل و خارج پوشش و ابزار اندازه‌گیری هم‌گرایی انجام می‌شود (شکل ۲-۴). البته توجه شود که کارکرد صحیح این ابزار داخلی بستگی زیادی به کیفیت ابزار و نصب آن‌ها دارد و در صورت عدم دقت کافی در این زمینه، نتایج قابل استفاده‌ای از آن به‌دست نخواهد آمد.



شکل ۲-۴- شاخص شدت تنش (نسبت تنش موجود به ظرفیت تنش) برای ارزیابی سامانه نگهداری با تنش‌سنج

در روش حفاری مکانیزه علاوه بر اطلاعات مسیر و پایش وضعیت تونل، اطلاعات ماشین حفاری نیز باید طبق جدول‌های (۱-۴) و (۲-۴) ثبت شوند. این اطلاعات مهم برای استخراج وضعیت تونل و ماشین حفاری و بهینه‌سازی روند اجرا مورد استفاده قرار می‌گیرند.

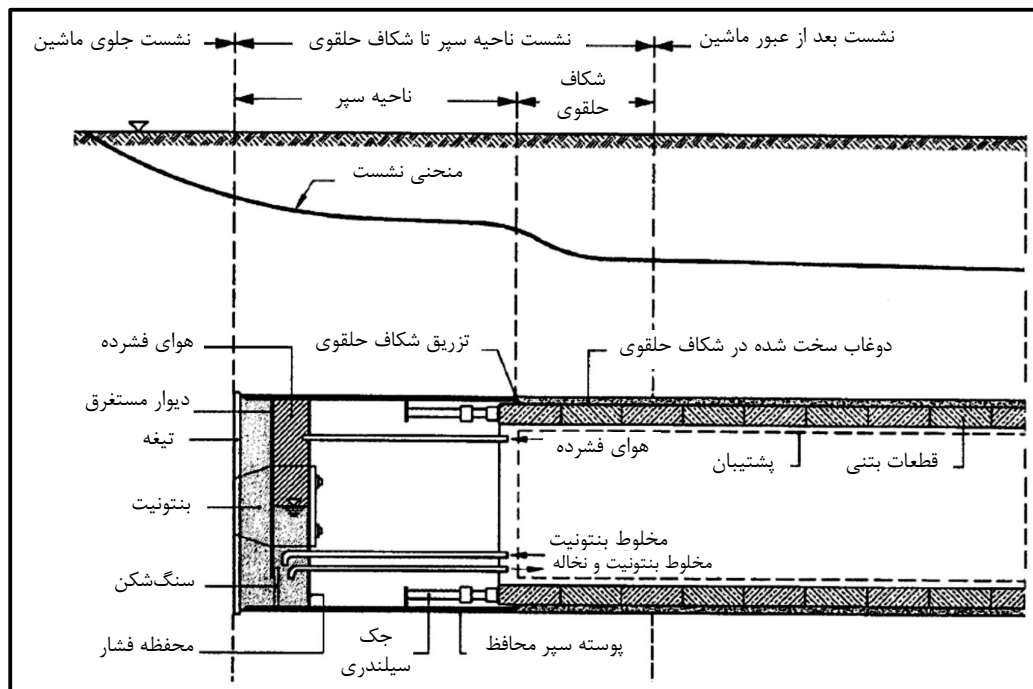
جدول ۱-۴- اطلاعات عملکردی مورد نیاز اندازه‌گیری و ثبت در حفاری مکانیزه برای ماشین حفاری

پیشرفت کار تونل‌سازی	نگهداری سینه‌کار	تخلیه مصالح	تزریق	وضعیت ماشین
نرخ پیشروی حفاری	فشار حباب‌های هوا و تراز بنتونیت	دور موتور، فشار و گشتاور	فشار تزریق	دما و فشار در چرخه های هیدرولیکی
میزان نفوذ کله حفاری	توزیع فشار زمین در محفظه و روی دیسک‌ها	تسمه نقاله تخلیه (سپر EPB)		
اضافه حفاری و مخروط شدگی				
نیروهای جک‌ها	مچاله‌شوندگی در محفظه حفاری	فشار، جریان و تراکم در لوله‌های تغذیه دوغاب (سپرهیدرولیکی)	مقدار دوغاب تزریقی	دما و فشار در چرخه های خنک کننده
دور موتور، گشتاور و جهت دیسک‌ها	فشار و جریان در لوله‌های سیال خنک کننده در سپر EPB			
مصارف ماشین و موتورهای				

جدول ۲-۴- اطلاعات هندسی مورد نیاز اندازه‌گیری و ثبت در حفاری مکانیزه برای ماشین حفاری

نقشه‌برداری در تونل	اطلاعات ژئودزی	سایر اطلاعات لازم مورد نیاز اندازه‌گیری و ثبت
موقعیت واقعی ماشین حفاری	اندازه‌گیری برخط نشست سطحی	خصوصیات محیط اطراف سینه‌کار (چگالی، دبی نفوذ آب، حد روانی) در سپر هیدرولیکی
موقعیت تئوری ماشین حفاری	قرائت کشیدگی سنج و انحراف سنج	خصوصیات سیال خنک‌کننده در سپر EPB
	قرائت سلول‌های فشار و پیژومترها	ترکیب و خصوصیات دوغاب پرکننده درزهای حلقوی
اطلاعات حرکت ماشین	پایش مقطع تونل و تغییرشکل داخلی	آسیب‌ها به قطعات پوشش بتنی
شیب و تمایل ماشین		موقعیت نصب قطعات شرایط و تشریفات تعویض قطعات

جزئیات اطلاعاتی که در جبهه کار، محدوده سپر و شکاف حلقه سگمنت و دنباله ماشین باید ثبت شود، در شکل (۳-۴) و جدول (۳-۴) نشان داده شده که منطبق با الگوی نشست زمین در هر محدوده بوده و اهمیت اندازه‌گیری را در هر ناحیه مشخص می‌نماید. تفسیر این اطلاعات برای پیشگیری از مخاطرات احتمالی کنترل شرایط حفاری و تغییر شکل زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم است که تیم مجرب و سیستم مستندسازی منظم و دقیق برای رصد و بررسی ارتباط داده‌ها مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۳-۴- فرآیند اندرکنش پیشروی حفاری مکانیزه و رژیم تغییر شکلی تونل و نشست سطحی

جدول ۳-۴- جزئیات اطلاعاتی که در جبهه کار، محدوده سپر و شکاف حلقه سگمنت و دنباله ماشین باید ثبت شود

دنباله ماشین	محدوده سپر و شکاف حلقه سگمنت‌ها	جبهه کاری تونل
نشست ناشی از فشرده شدن فزاینده زمین در حین پیشروی تونل	محدوده سپر	تغییر شکل و ناپایداری و اضافه حفاری در سینه‌کار
	اضافه حفاری و مخروطی شدن سپر	
	خردشدگی و لرزش ناشی از خم‌های مسیر حرکت	
	تنش‌های برشی در امتداد جداره سپر	
	تغییر شکل جداره سپر	
	فرونشست ماشین	
تغییر شکل حلقه قطعات پیش ساخته ناشی از اثرات بلند مدت مانند خزش	شکاف حلقه سگمنت‌ها	تغییر شرایط اولیه تنش در جهت طولی
	خصوصیات مصالح پرکننده	
	کمبود مقدار مصالح پرکننده	
	کمبود فشار تزریق	
	تغییر شکل حلقه قطعات پیش ساخته ناشی از بار چک‌ها و دنباله ماشین	

برای هر شاخص اندازه‌گیری شده در طول زمان، باید حد مجاز هشدار و حد مجاز نهایی تعریف شود. در صورتی که مقدار شاخص اندازه‌گیری شده از حد هشدار عبور کند، اقدامات اولیه متقابل و در صورتی که از حد مجاز نهایی عبور کند، اقدامات فوری و اضطراری در دستور کار قرار می‌گیرد. نوع اقدامات بر اساس شدت بحرانی بودن اوضاع از قبل تعیین شده و در زمان مشاهده علائم مربوطه در دستور کار قرار خواهد گرفت.

در جدول (۴-۴) معیارهای پیشنهادی تواتر و فواصل اندازه‌گیری در شرایط مختلف زمین سخت A، نیمه سخت B و نرم C برای انواع اندازه‌گیری و پایش ارائه شده است. در مورد بررسی بیرون‌زدگی باید یک قرائت قبل از حفاری، یک قرائت در روز در حین حفاری و یک قرائت قبل و بعد از پایدار شدن زمین صورت پذیرد.

جدول ۴-۴- معیارهای پیشنهادی تواتر و فواصل اندازه‌گیری در شرایط مختلف زمین سخت A، نیمه سخت B، نرم C

نوع اندازه‌گیری و پایش		سینه‌کار پایدار (A)		سینه‌کار نیمه پایدار (B)		سینه‌کار ناپایدار (C)	
		نرخ		نرخ		نرخ	
		قرائت		قرائت		قرائت	
پیمایش تحلیلی زمین		هر ۲۰۰ متر		هر ۱۵۰ متر		هر ۱۰۰ متر	
پیمایش با عکس برداری فوری		۲۰ تا ۲۴ متر		۱۰ تا ۱۲ متر		۱۰ تا ۱۲ متر	
بیرون‌زدگی		-		هر روز با فاصله ۲۴ تا ۴۸ متر		هر روز با فاصله ۲۴ تا ۲۰ متر	
هم‌گرایی		۵۰ تا ۶۰ متر		۲۴ تا ۳۶ متر		۱۰ تا ۱۲ متر	
اندازه‌گیری‌های پایه		۴۰۰ تا ۵۰۰ متر		۲۰۰ تا ۳۰۰ متر		۲۰۰ تا ۲۰۰ متر	
		هر هفته تا رسیدن به شرایط پایدار		هر هفته تا اجرای پوشش نهایی		سه بار در هفته تا اجرای پوشش نهایی	

۴-۱-۳- چالش‌های اندازه‌گیری هندسی و پایش تغییر شکل

اندازه‌گیری و پایش از مسائل حساس تونل‌سازی بوده و بسیاری از تصمیمات اجرایی و ایمنی بر اساس آن شکل می‌گیرد. باتوجه به تجربیات گذشته توصیه می‌شود مسائل زیر برای بهبود هر چه بهتر عملیات اجرایی مد نظر قرار گیرد:

- ۱- سالم بودن دستگاه‌ها و ابزار اندازه‌گیری و تنظیم بودن آن‌ها و اطمینان و آگاهی از دقت اندازه‌گیری آن‌ها اولین و مهم‌ترین مساله در این زمینه است. وجود خطا در دستگاه‌های مسیریابی و پیاده‌سازی مسیر ممکن است باعث انحراف تونل از خط پروژه و در برخی موارد تحمیل هزینه‌های زیاد برای جبران آن شود.
- ۲- جابجاشدن و ضربه خوردن و مخدوش شدن شاخص‌ها و نقاط نشان‌گر از چالش‌های مهم عملیات اندازه‌گیری و پایش است که می‌تواند نتایج برداشت را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. این مساله به محل نصب، علائم و هشدارهای لازم به پرسنل و ماشین‌آلات برای مراقبت از ابزار و نظارت و کنترل مستمر و دوره‌ای آن بستگی دارد.
- ۳- نصب ناصحیح و غیراصولی ابزار و ارتباطات وسیم‌کشی که باعث افزایش احتمال آسیب دیدن آن حین استفاده می‌شود، یکی از مشکلاتی است که باعث اختلال یا از کار افتادن قابلیت‌های اندازه‌گیری می‌شود. در ابزارهای مدفون مانند کشیدگی سنج‌هایی که برای اندازه‌گیری هم‌گرایی نصب می‌شوند، کرنش‌سنج و سلول فشار که داخل یا مابین پوشش و زمین نصب می‌گردند یا انحراف‌سنج و ابزار اندازه‌گیری تغییر شکل میل مهار و پیچ

- سنگ، این چالش از اهمیت بیش‌تری برخوردار است؛ چرا که تعویض و جایگزینی آن‌ها بعضاً غیرممکن است.
- ۴- عدم نصب ابزار کافی برای برداشت اطلاعات و تصمیم‌گیری صحیح یکی دیگر از مسائل و چالش‌های اندازه‌گیری است. در برخی موارد صعوبت اجرایی و شرایط سست زمین امکان نصب ابزار در برخی قسمت‌های تونل را کاهش می‌دهد در حالی که معمولاً در همین نواحی مساله‌دار نیاز به اندازه‌گیری بیش‌تر و دقیق‌تری می‌باشد. به عنوان مثال، انحراف‌سنج و نصب کشیدگی‌سنج در زمین‌های آبدار با مشکلاتی همراه است. در مواردی هم طراحی جانمایی نادرست و ناکارآمد و یا کمبود اعتبار یا عدم دسترسی برای تامین و نصب همه ابزار لازم با مشخصات مناسب، باعث کاهش کفایت ابزارگذاری می‌گردد.
- ۵- خطاهای قرائت و ثبت و محدودیت‌های انتقال و ذخیره اطلاعات در ثبت الکترونیکی، دیگر چالش مهم پایش و اندازه‌گیری محسوب می‌شود. به عنوان مثال، قرائت چشمی ترک‌سنج و درزه‌سنج یا مشکلات ناشی از خرابی باتری یا قطع برق و اختلال در ارسال اطلاعات این ابزار از جمله این موارد محسوب می‌گردد.
- ۶- نگهداری و تعمیر ابزار اندازه‌گیری در تونل‌سازی که در شرایط سخت و دشوار انجام می‌شود، دیگر چالش پایش است. نحوه شناسایی ابزار از کارافتاده و چگونگی جایگزینی آن‌ها نیز مساله بسیار مهمی خواهد بود. عدم تشخیص و جایگزینی به موقع ابزار از کار افتاده ممکن است باعث رخداد حوادث و مخاطرات غیر قابل جبران گردد. نصب نشانگر جایگزین برای اندازه‌گیری هندسی از جمله این موارد محسوب می‌شود.
- ۷- یکی از مسائل مهم در اندازه‌گیری و پایش، قابلیت پردازش صحیح و استفاده و قدرت تفسیر و پیش‌بینی مخاطرات خصوصاً در جبهه حفاری است. نبود نرم افزار و تیم مجرب برای این کار می‌تواند ارزش و تاثیر وجود ابزار را کمرنگ نماید. در این مقوله، کنترل تجاوز از حدود مجاز و اعلام به موقع هشدار و تغییرات لازم در طرح و اجرا بسیار حیاتی است. همچنین، در شرایط تغییرات سریع خاص، مثل برخورد با سفره آب تحت فشار یا مخزن گاز حبس شده یا لایه بسیار سست گلی و یا خرد شده ریزشی، باید سرعت مناسب در واکنش و انجام اقدامات متقابل ایمنی و اجرایی وجود داشته باشد. سرعت تغییرات تغییرشکل و هم‌گرایی یا نشست سطحی و تغییر تواتر اندازه‌گیری آن‌ها در این موارد بسیار مهم است.

۴-۱-۴- ملاحظات و توصیه‌های اجرایی برای اندازه‌گیری هندسی و پایش تغییرشکل

۴-۱-۴-۱- ملاحظات اجرایی

- پیشینه اجرایی و تجربیات به دست آمده از فعالیت‌های اندازه‌گیری و کنترل در پروژه‌های تونل‌سازی نشان داده است که توجه به برخی نکات می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی ابزار کمک نماید. برخی از این موارد عبارتند از:
- ۱- استفاده از ابزار دقیق با کیفیت، سالم و دارای کالیبراسیون مناسب قبل از استفاده و نصب در محیط تونل و اجتناب از استفاده از ابزار مستعمل.
- ۲- اطمینان از روش صحیح نصب ابزار دقیق و کنترل کارکرد اولیه آن و استفاده از تیم‌های مجرب نصب و راه

- اندازی ابزار و کنترل‌ها و اندازه‌گیری با توجه به حساسیت تصمیمات اتخاذ شده بر اساس نتایج آن.
- ۳- توجه به عوامل موثر در اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات و استفاده از کاربرگ‌های کامل اطلاعات محیطی نظیر رطوبت و دما و ثبت سایر اتفاقات موثر بر نتایج اندازه‌گیری و کنترل.
- ۴- رعایت افزونگی و نصب ابزار اضافی لازم در مورد ابزار مدفون و غیر قابل جایگزینی نظیر کرنش‌سنج و بارسنج پشت پوشش بتنی و استفاده از نتایج ابزار مختلف برای کنترل روش اندازه‌گیری و اطمینان از روند تغییرات.
- ۵- کنترل آسیب دیدگی یا جابجایی نشانگرها با مستندسازی و عکس‌برداری و کنترل منظم حین اندازه‌گیری خصوصاً نقاط مبنا و ترجیحاً نصب قاب یا محافظ برای ابزار برای پیشگیری از آسیب دیدگی و ضربه خوردن حین اجرا.
- ۶- تشخیص، خارج نمودن و تعمیر ابزار معیوب و جایگزینی آن و کنترل منظم کالیبراسیون دستگاه‌های اندازه‌گیری.
- ۷- وجود سامانه برق یا باتری پشتیبان برای دستگاه‌های اندازه‌گیری برای اطمینان از استمرار کارکرد در صورت قطع برق یا از کارافتادن باتری یا سامانه شارژ.
- ۸- دقت در نصب ابزار برای فراهم آمدن حداکثر سهولت ممکن در قرائت اطلاعات در حین اجرا یا کنترل در حال کار.
- ۹- توجه به تغییرات حاد زمین‌شناسی تونل و موقعیت نصب ابزار خصوصاً در محل تلاقی یا تقابل ساختارهای زمین‌شناسی و برای ابزار اندازه‌گیری تغییرشکل.
- ۱۰- توجه به نرخ تغییرات و رواداری‌های متفاوت در تغییر شکل‌ها در سینه‌کار و در طول تونل پس از اجرای سیستم نگهداری و نیز پس از اجرای پوشش تونل.
- ۱۱- ثبت اطلاعات دقیق پیشرفت سیستم نگهداری و تزریق و پوشش نهایی و حفاری برحسب زمان برای تطبیق با اطلاعات اندازه‌گیری و کنترل. به عنوان مثال، برای تنظیم و افزایش سرعت حرکت ماشین حفاری مکانیزه در زمین‌های سست و مستعد تغییرشکل و نشست ناشی از زهکشی برای جلوگیری از نشست دستگاه.
- ۱۲- برای انجام نقشه‌برداری موثر و کارآمد در پروژه تونل مکانیزه و متعارف ملاحظات زیر در نظر گرفته می‌شود:
- مستندسازی و گزارش موقعیت و امتداد ماشین در برابر موقعیت و امتداد پیش‌بینی شده اولیه در کله حفاری و دنباله،
 - پیاده‌سازی و نگهداری نقاط مبنا در موقعیت و شرایط مناسب،
 - استفاده از نشانگرهای سقفی و دیواری در ساختارهای سخت در نقاط مناسب،
 - استفاده از مدل ریاضی و روش مناسب برای انتقال نقاط مبنا برای حفظ دقت لازم و محاسبه و به حداقل رساندن خطاهای نقشه‌برداری،
 - استفاده از نقشه‌برداری با ربات یا نقشه‌برداری برخط با دوربین ثابت در شرایط خاص.

- ۱۳- ملاحظات اجرایی نصب، قرائت، تحلیل ابزار دقیق و رفتارسنجی تغییرشکل زمین عبارتند از:
- تعیین شاخص‌های مورد نیاز برای کنترل شامل هم‌گرایی، نشست سطحی، فشار وارد بر پوشش، کرنش و تنش داخل پوش و نیروی مهارها،
 - انتخاب روش و ابزار اندازه‌گیری و رفتارنگاری شامل نقشه‌برداری و نصب ابزار دقیق،
 - تعیین مشخصات فنی و دقت ابزار،
 - طراحی آرایش ابزار و طرح جانمایی،
 - کنترل کالیبراسیون ابزار و تعیین ملاحظات نصب ابزار دقیق،
 - تعیین روش‌های قرائت،
 - الگوریتم بررسی اولیه و فیلتر کردن اطلاعات و حذف اطلاعات زائد و اشتباه که با توجه به حجم بسیار زیاد اطلاعات ثبت شده، معمولاً با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و هوشمند یا فازی انجام می‌پذیرد.
 - تعیین روش انتقال، ثبت و ذخیره اطلاعات،
 - تعیین معیارهای کنترل و هشدار،
 - تعریف فرآیند سرویس و نگهداری از ابزار و شناسایی و بازیابی ابزار دقیق از کارافتاده،
 - ایمنی در کار با ابزار دقیق.

۴-۱-۲- ملاحظات تونل‌های عمیق و کم عمق و زمین‌های نرم و سخت

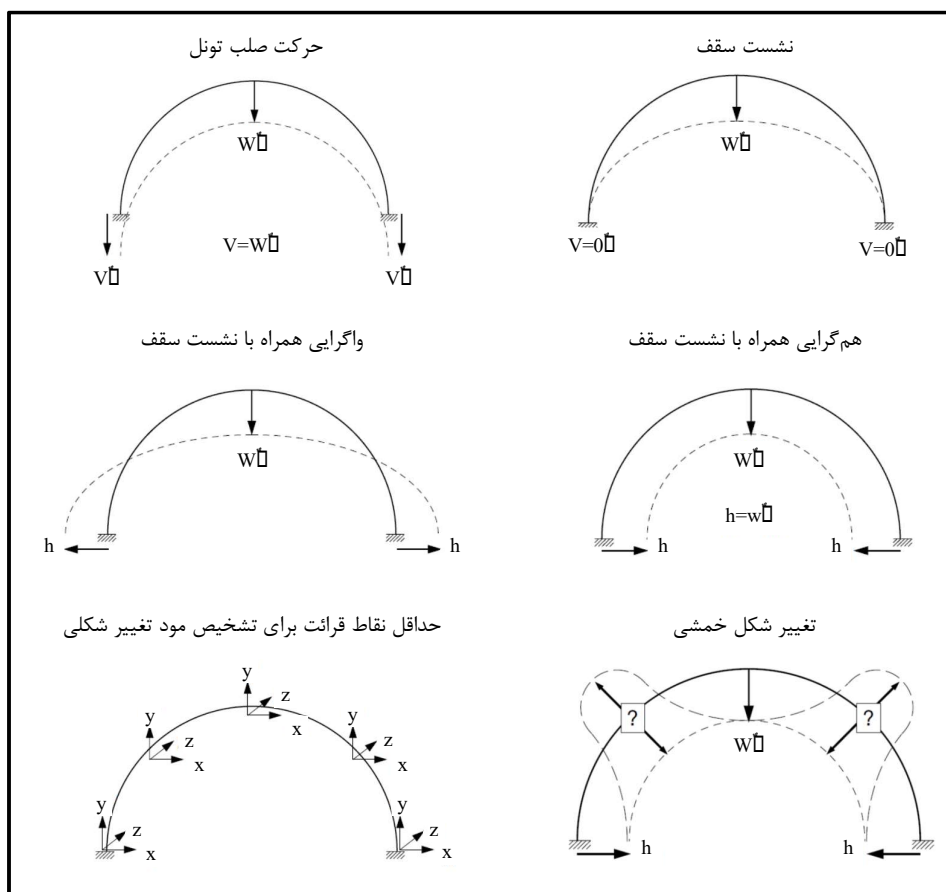
اندازه‌گیری در تونل عمیق و کم عمق کمی با یکدیگر متفاوتند:

- ۱- در زمین نرم برای اندازه‌گیری تغییرشکل سطحی علاوه بر کشیدگی‌سنج از نشست‌سنج هم استفاده می‌شود. البته برای استخراج مدل سه بعدی از تغییرشکل سطح زمین به صورت هم‌زمان از انحراف‌سنج در داخل گمانه نیز استفاده می‌گردد.
- ۲- در تونل عمیق کنترل نشست سطحی زمین برخلاف تونل کم عمق چندان حساس و مورد توجه نمی‌باشد. در تونل کم عمق از ابزار مختلفی برای کنترل نشست سطحی محیط، سازه و ساختمان‌های تحت تاثیر، مانند انواع انحراف‌سنج و شیب‌سنج و نشست‌سنج در ترکیب با روش نقشه‌برداری و کنترل در سطح زمین استفاده می‌شود. جزئیات بیش‌تر استفاده از این ابزار در ضابطه شماره ۶۹۵ سازمان برنامه و بودجه کشور تحت عنوان «راهنمای عملیات ابرابندی و رفتارنگاری در تونل‌سازی مکانیزه شهری» ارائه شده است.
- ۳- روند تغییرشکل در طول پیشروی عملیات در تونل کم عمق به علت تاثیر کم‌تر جنس لایه‌ها در نشست سطحی، معمولاً منظم بوده و از الگوی مشخصی تبعیت می‌نماید، اما در تونل عمیق با تغییر شرایط زمین و عبور از ساختارهای مختلف زمین‌شناسی ممکن است روندهای مختلفی مشاهده شده و تغییرات زیاد در حین

پیشروی در روند تغییر شکل اتفاق بیفتد.

۴-۴-۱-۳- کنترل مودهای تغییر شکل تونل

مساله مهم در کنترل تغییر شکل تونل، بررسی مود تغییر شکلی است. تغییر شکل در مقطع تونل و پوشش آن می‌تواند در پنج حالت کلی رخ دهد که شامل حرکت صلب، هم‌گرایی، واگرایی، نشست سقف و حالت خمشی هستند. در شکل (۴-۴) هر یک از این حالت‌ها را نشان می‌دهد که شرایط تغییر شکل‌های اصلی و مهم که باید با دقت اندازه‌گیری و پایش شوند در کدام ناحیه از تونل قرار دارند و چه روند احتمالی را طی می‌نمایند. در مواردی که پوشش تونل به طور کامل نصب شده است، بررسی این حالت‌ها می‌تواند به یافتن آسیب‌های احتمالی وارد آمده به پوشش برای مقاوم‌سازی و تقویت آن کمک نماید.



شکل ۴-۴- حالات‌های مختلف تغییر شکل تونل

۴-۲- نصب، اندازه‌گیری، تحلیل و کنترل گازهای نشتی به تونل

۴-۲-۱- روش‌ها و دستگاه‌های اندازه‌گیری و تشخیص

شاخص‌های محیطی از موارد مهم از نظر ایمنی، سلامت و محیط زیست محسوب می‌شوند و باید با ابزار و دقت مناسب مورد پایش و کنترل قرار گیرند. این شاخص‌ها عبارتند از:

۱- دما، رطوبت و فشار هوا با دماسنج و رطوبت‌سنج دیجیتال ثابت در ماشین حفاری یا سیار در روش متعارف اندازه‌گیری می‌شود. بسیاری از شاخص‌های دیگر مورد اندازه‌گیری و نیز جزییات اجرایی تونل تابع دما و رطوبت و عوامل محیطی هستند. به عنوان مثال می‌توان به جزییات مواد و عملیات انفجاری، میزان تغییر شکل تونل، بهره‌وری ماشین حفاری، نیازهای تهویه و خنک کردن ماشین‌آلات و نظایر آن اشاره نمود.

۲- گازها شامل متان، منواکسیدکربن، دی اکسیدکربن، اکسید نیتروژن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید سولفور و اکسیژن (از نظر کاهش). بخشی از این گازها به خاطر کارکرد ماشین‌آلات و عملیات انفجار خصوصاً در حفاری متعارف و بخشی مانند متان به صورت مدفون از داخل ساختارهای کربنی در زمین ناشی می‌شوند. گاز متان بدون رنگ و بو بوده و جزو گازهای سمی محسوب نمی‌شود، ولی در غلظت حدود ۵ تا ۱۵ درصد بسته به دمای محیط به شدت قابل انفجار است. این گاز با حسگر قابل حمل یا نصب شده قابل اندازه‌گیری و هشدار می‌باشد. اغلب حسگرهای جدید قابلیت تشخیص انواع گازها را دارند و در محیط کارگاهی بیش‌تر به صورت بیسیم به کار برده می‌شوند. برخی از این حسگرها به صورت شخصی برای هر نفر به کار برده می‌شوند یا در کلاه ایمنی تعبیه می‌گردند. حداکثر مقدار مجاز گاز منواکسیدکربن بر اساس توصیه سازمان بهداشت جهانی برای تونل کوتاه ۱۵ دقیقه قرارگرفتن در غلظت ۱۰۰ پی پی ام^۱ است. سایر گازها نیز در استانداردهای مختلف معیارهای متفاوتی دارند. این معیارها باید برای هر قرارداد از مراجع سلامت و ایمنی رسمی و به روز استعلام شوند.

۳- غلظت غبار و کیفیت هوا و میزان اکسیژن. مقدار توصیه شده اکسیژن بر اساس ماده ۵۲ قوانین سازمان بهداشت جهانی بین ۱۹/۵ تا ۲۳/۵ درصد می‌باشد و بسته به میزان فشار اتمسفر تغییر می‌کند و البته بدون توجه به حضور گازهای سمی است. اندازه‌گیری اکسیژن با دستگاه حسگر گاز قابل انجام می‌باشد. غلظت گرد و غبار به دو صورت تهدید سلامت ناشی از ذرات معلق و کاهش دید مطرح می‌شود. ارزیابی غلظت غبار با نمونه‌گیری و آزمایش هوا و ارزیابی میدان و عمق دید با دوربین نصب شده روی ماشین انجام می‌شود. غلظت غبار مجاز برای کل غبار، غبار قابل تحمل برای تنفس و غبارکوآرتز و سیلیس به‌عنوان نمونه طبق استاندارد نروژ به ترتیب ۱۰، ۵ و ۰/۱ میلی‌گرم در مترمکعب است. حادثه‌ترین شرایط غبار نیز برای گروه بتن‌پاشی خشک، تیم حفاری مکانیزه و تیم چالزنی و انفجار است.

۴- ارتعاشات و صوت از شاخص‌های محیطی سلامت و ایمنی مهم در تونل‌سازی محسوب می‌شوند. اندازه‌گیری ارتعاشات و صوت محیطی در تونل با استفاده از دستگاه قابل حمل دارای ژئوفون^۱ و ارتعاش‌سنج یا شتاب‌سنج صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری ارتعاشات با حسگر ثابت نیز قابل انجام می‌باشد که معمولاً در حین تونل‌سازی کم‌تر استفاده می‌شود و بیش‌تر در مراحل بهره‌برداری از تونل کاربرد دارد.

۴-۲-۲- چالش‌ها و ملاحظات اندازه‌گیری شاخص‌های محیطی

برخی از شاخص‌های محیطی دارای تغییرات تدریجی و قابل رصد هستند، نظیر دما، رطوبت، کیفیت هوا و ارتعاشات که هشدار و انجام اقدامات متقابل برای آن‌ها در قالب برنامه‌ریزی‌های قبلی و در فرصت معقول قابل انجام است. اما مواردی نظیر غبار ناشی از انفجار، هجوم و افزایش غلظت ناگهانی گاز نیاز به آمادگی برای تشخیص و انجام اقدامات فوری و واکنش سریع دارد. در این موارد علاوه بر اتکا به پیش‌بینی برای پیشگیری از غافلگیری، باید امکانات و تجهیزات لازم برای جلوگیری از حادثه ثانویه مانند انفجار و آتش‌سوزی یا مسمومیت پرسنل در اختیار قرار داشته باشد. همچنین آموزش پرسنل و انجام تمرین و مانور برای این نوع شرایط خاص از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

نکته مهم دیگر در مورد این اندازه‌گیری‌ها اطمینان از صحت کارکرد دستگاه اندازه‌گیری با کنترل و نگهداری مستمر و صحت‌سنجی یا کالیبراسیون با دستگاه ثانویه می‌باشد. همچنین نحوه قرائت و ثبت صحیح داده‌ها و بررسی و تحلیل فوری اولیه برای اطمینان از استناد به آن‌ها باید همواره تحت نظارت قرار داشته باشد.

۴-۳- اندازه‌گیری، تحلیل و کنترل نشت آب‌های ورودی به تونل

۴-۳-۱- روش‌ها و وسایل اندازه‌گیری و پایش آب

کنترل و اندازه‌گیری آب در تونل‌سازی در حین اجرا شامل دبی نشت آب‌های ورودی به تونل و کنترل وضعیت منابع آب نظیر ثبت دبی آب سطحی، چشمه‌ها، رودخانه‌ها، چاه‌ها و قنات و رژیم عمومی آب زیرزمینی است. این اندازه‌گیری‌ها در قالب معیارهای اجرایی برای مدیریت میزان آب تخلیه شده و کنترل حجم رسوب‌گذاری در سامانه تخلیه از تونل و محدودیت زیست محیطی همراه با کنترل PH و دما و هدایت الکتریکی^۲ و سختی^۳ می‌باشد. اندازه‌گیری دبی آب ورودی به تونل معمولاً با استفاده از دبی‌سنج کانال باز در مقاطع مختلف مهم یا با جریان‌سنج اولتراسونیک یا دبی‌سنج مغناطیسی برای جریان در لوله انجام می‌شود.

علاوه بر آب زیرزمینی ورودی به تونل، برای خنک کردن دستگاه و شستشو و تخلیه مصالح حفاری نیاز به حجم قابل

۱- Geophone

۲- Electrical Conductivity (EC)

۳- Total Dissolved Solids (TDS)

توجهی از آب می‌باشد که تبدیل به پساب و سپس تخلیه می‌شود. باید توجه شود که دبی آب اندازه‌گیری شده خروجی با پساب مصرفی در اجرا از یکدیگر تفکیک گردند.

۴-۳-۲- چالش‌ها و ملاحظات اندازه‌گیری و پایش آب

بررسی کیفیت آب نشتی به داخل تونل نیز ممکن است در مواردی چالش برانگیز باشد و لازم است بر اساس نوع ساختارهای زمین‌شناسی مورد بررسی و پایش قرار گیرد. همچنین نشت آب از رودخانه‌های مجاور یا سایر منابع آب با آلودگی احتمالی بیولوژیکی یا شیمیایی در این زمینه از اهمیت زیادی برخوردار است. تزریقات شیمیایی آب‌بندی هم می‌تواند در صورت انتخاب مواد نامناسب مانند پلی‌یورتان‌های شیمیایی حاوی ترکیبات سیانید، باعث آلوده شدن آب‌های نشتی ورودی شده و پس از تخلیه از تونل استفاده از آن را با محدودیت مواجه نماید یا باعث آلودگی محیط و رودخانه گردد.

تشخیص گرفتگی پیزومتر سطحی و عمقی و داخلی تونل بر اساس نرخ تغییرات آن یا مقایسه با رژیم تغییرات آب زیرزمینی بر اساس نتایج سایر اندازه‌گیری‌ها از ملاحظات مهمی است که یکپارچگی و صحت اطلاعات به‌دست آمده از اندازه‌گیری را تا حد زیادی تضمین می‌نماید. در اندازه‌گیری میزان آب خروجی از تونل باید میزان آب ورودی به تونل به تفکیک قطعات مختلف اندازه‌گیری شود. فواصل اندازه‌گیری افزون بر طول تونل به وضعیت نشت آب زیرزمینی و موقعیت سفره‌های آب بستگی دارد. کنترل کیفیت آب خروجی نیز در مواردی می‌تواند به تدقیق وضعیت زمین‌شناسی منطقه کمک نماید. همچنین استفاده از آب خروجی برای بازیافت و مصارف آبیاری و تخلیه آن داخل مسیل یا رودخانه مستلزم انجام این بررسی‌ها می‌باشد.

۴-۴- ثبت دبی آب‌های سطحی، چشمه‌ها، رودخانه‌ها، چاه‌ها و قنات‌ها و تحلیل و کنترل تغییرات

اندازه‌گیری وضعیت آب‌های زیرزمینی با چاه مشاهده‌ای، پیزومتر لوله قائم و پیزومتر الکتریکی تار مرتعش صورت می‌پذیرد. در شرایط آب زیرزمینی بسیار متغیر یا هوای سرد، معمولاً از پیزومتر دیافراگمی که داخل آن به طور کامل تزریق شده است استفاده می‌گردد.

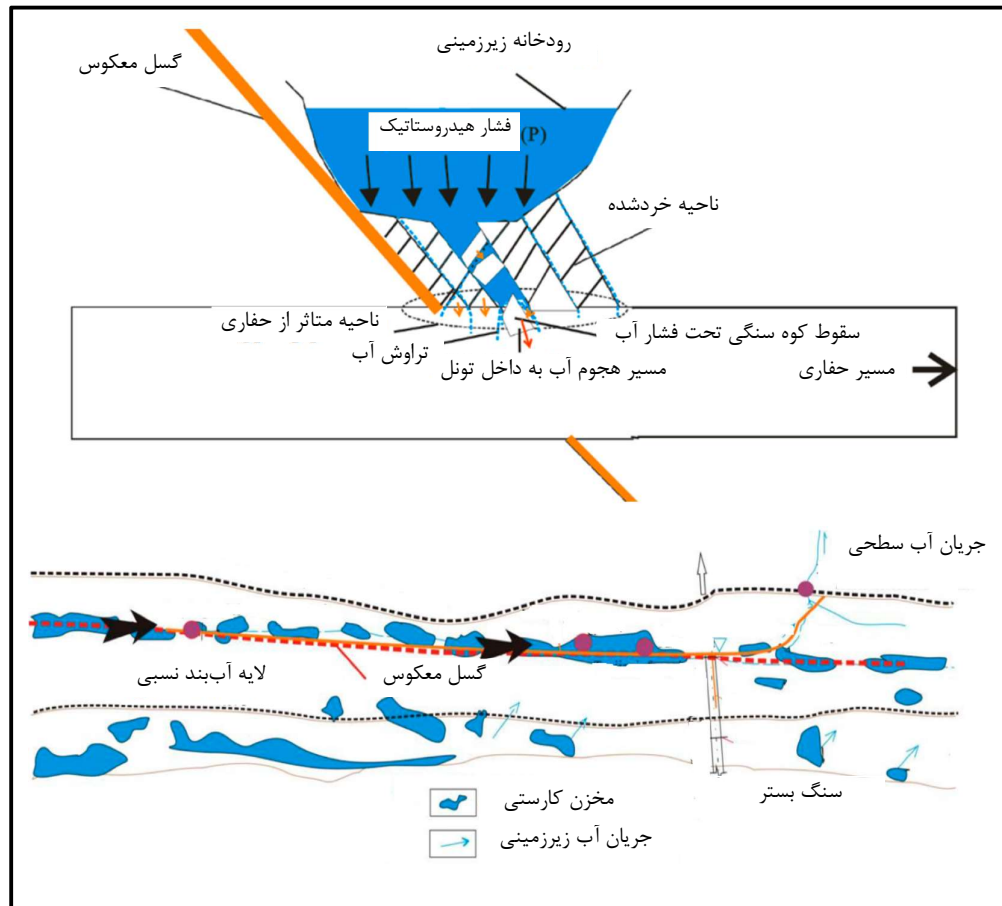
اندازه‌گیری فشار پیزومتری معمولاً کاربرد زیست محیطی دارد و برای کنترل رژیم آب زیرزمینی برای تغذیه چشمه، قنات، چاه آب و سایر منابع آب سطحی انجام می‌پذیرد که قبل و حین و بعد از حفاری برداشت و مقایسه می‌گردد. میزان همبستگی فشار ایستابی پیزومتری در ارتباط با دبی آب ورودی به تونل باید به دقت مورد پایش و کنترل قرار گیرد.

با توجه به اهمیت تخمین فشار نهایی وارد بر پوشش تونل، نکته بسیار مهم در مورد اندازه‌گیری آب زیرزمینی در تونل عمیق، این است که فشار آب موجود در تراز حفر تونل معمولاً همان فشار پیزومتری اندازه‌گیری شده از سطح نمی‌باشد و در بسیاری از موارد به دلیل کاهش نفوذپذیری زمین در عمق مقادیر آن بسیار کم‌تر از فشار ایستابی خواهد

بود. در این موارد لازم است برای پیش‌بینی مخاطرات اجرایی از روش‌های پیش‌شناسایی و گمانه‌های عمقی در حین اجرا و در سینه‌کار با کمک اطلاعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی و وضعیت نفوذپذیری لایه‌های زمین استفاده شود. همچنین گمانه‌های پیزومتری داخلی تونل می‌تواند در تدقیق تراز واقعی آب وارد به تونل تا حدی کمک نماید. این اطلاعات لازم است بر اساس شرایط فصلی متناسب برداشت شده در سطح مقایسه و تحلیل شوند.

علاوه بر آب‌ها با منشأ زیرزمینی، آب‌های سطحی بر فراز تونل یا مشرف یا متصل به آن نیز باید مورد اندازه‌گیری و پایش قرار گیرد. در اندازه‌گیری دبی این منابع آب باید تغییرات فصلی رژیم آن‌ها در دسترس بوده و دقت لازم برای تفکیک اثر حفاری تونل با سایر تغییرات محیطی و یا برداشت‌ها به عمل آید. نشست احتمالی زمین ناشی از تخلیه آب زیرزمینی از دیگر مسائلی است که در عبور تونل از نواحی آبدار باید مد نظر قرار داشته باشد.

در بسیاری از موارد به دلایل زیست محیطی اجازه تخلیه و زهکشی آب زیرزمینی داده نشده یا بسیار محدود می‌شود. در این موارد کنترل و پایش آب زیرزمینی با پایش پیزومترها، پایش دبی آب ورودی در مقاطع مختلف و در طول تونل انجام می‌پذیرد. مقدار مجاز این دبی بر اساس حجم تخمینی آب زیرزمینی تعیین می‌شود. به عنوان نمونه در تونل انتقال آب کرج به تهران محدودیت نشت آب به ازای کل تونل و دبی در واحد طول تونل (کیلومتر) تعریف شده بود که در اجرا هم رعایت گردید. همان‌طور که در شکل (۴-۵) نشان داده شده است در برخی موارد آب زیرزمینی به‌طور متمرکز و از یک سفره اصلی یا در یک ناحیه گسله وارد می‌شود و در برخی موارد مانند محیط‌های کارستی ممکن است تجمع آب به صورت غیرمتمرکز و پراکنده باشد.



شکل ۴-۵- تفاوت هجوم آب به داخل تونل از سفره‌های آب زیرزمینی متمرکز و غیرمتمرکز

۴-۵- اندازه‌گیری و کنترل احجام و رواداری‌ها و شاخص‌های اجرایی

۴-۵-۱- انواع اندازه‌گیری و کنترل احجام و رواداری‌ها و شاخص‌های اجرایی

اندازه‌گیری و کنترل در سه بخش احجام و رواداری‌ها و شاخص‌های اجرایی عمدتاً با هدف بهینه‌سازی اجرا و کنترل منابع و مصارف و دقت و کیفیت اجرا و افزایش سرعت کار و کنترل برنامه زمان‌بندی صورت می‌پذیرد. استفاده از اطلاعات ابزار دقیق کنترل شاخص‌های رفتاری نظیر تغییر شکل‌ها و نشست آب می‌تواند به طور موثر برای بهینه‌سازی روند اجرا و اصلاح روش اجرای سامانه نگهداری و پوشش نهایی مورد استفاده قرار گیرد. بسیاری از شاخص‌های اجرایی خصوصاً در روش حفاری مکانیزه هم برای بررسی وضعیت پیشرفت کار و هم برای بررسی وضعیت زمین و پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرد که در بخش‌های قبل دسته‌بندی و ارائه گردید.

۴-۵-۲- اندازه‌گیری‌ها در روش‌های متعارف

کنترل رواداری و دقت اجرا با عملیات نقشه‌برداری معمولی برای موقعیت چال‌ها و قطر آن‌ها و نقشه‌برداری لیزری یا

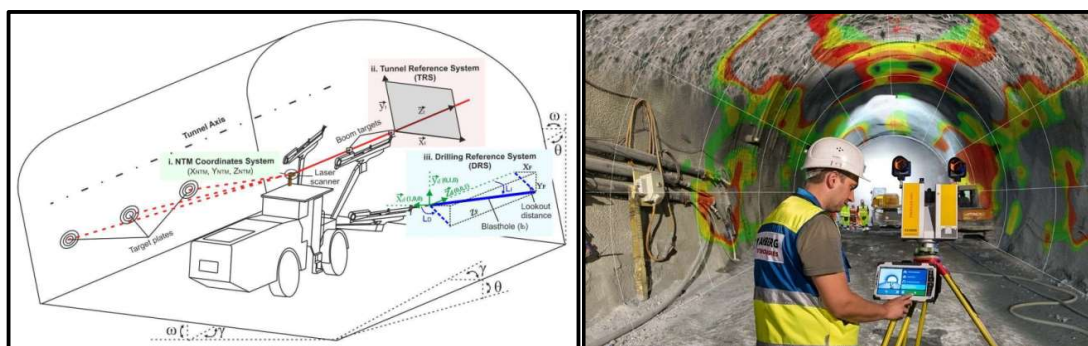
پروپ‌های میله‌ای مجهز به حسگر برای عمق و امتداد آن‌ها انجام می‌شود. دستگاه‌های جدید حفاری به طور خودکار هندسه حفاری را تنظیم و با دقت بالایی آن را پیاده می‌نمایند. کنترل کسر و اضافه حفاری نیز با عملیات نقشه‌برداری متداول انجام شده و بر اساس آن اصلاحات لازم در مراحل بعدی صورت می‌پذیرد.

برای کنترل نرم افزاری حفاری از راهکار اندازه‌گیری حین حفاری (ام.دبلیو.دی) و تحلیل رایانه‌ای آن استفاده می‌شود. این کار با استفاده از اسکن لیزری یا نقشه‌برداری یا میکروژئودزی یا فوتوگرامتری یا نگاشت سطوح حفاری قابل انجام می‌باشد. برخی از کنترل‌های رواداری‌های ساخت و اجرا در محل مربوطه انجام می‌شود. به عنوان مثال، کنترل رواداری ساخت قطعات پیش‌ساخته پوشش و نصب نوارهای آب‌بند در حفاری مکانیزه در کارخانه انجام می‌شود و رواداری‌های نصب با انجام نقشه برداری در داخل تونل و پس از عبور ماشین انجام می‌گردد. در روش حفاری متعارف و اجرای پوشش بتن‌پاشیده، کنترل‌ها با نصب شاخص‌های متعدد در نقاط مختلف برای کنترل ضخامت و هندسه بتن‌پاشی صورت می‌گیرد.

در پوشش‌های بتن درجا کنترل رواداری در هنگام نصب قالب و شبکه میلگردها با نقشه‌برداری انجام می‌گردد. در تونل‌ها باید پیش‌بینی لازم برای نصب نشانگرها و دستک‌های نصب دوربین برای کنترل رواداری‌های اجرا نیز در فواصل مختلف صورت پذیرد. کنترل دقت عملیات اجرایی و رواداری حفاری و اجرای پوشش موقت و دائم با استفاده از نصب سامانه‌های کنترلی مانند دوربین‌های لیزری و حسگرهای کنترل دامنه حرکت دستگاه بر روی ماشین‌های حفاری و یا با انجام عملیات نقشه‌برداری هم‌زمان و نیز پس از اجرا انجام می‌گردد (شکل ۴-۶).

کنترل رواداری در حین اجرا بسیار مهم‌تر از ثبت آن‌ها پس از اتمام عملیات است و عملاً پس از اجرا انجام اصلاحات بسیار مشکل بوده و داده‌های ثبت شده فقط برای برنامه‌ریزی ادامه کار کاربرد موثر خواهند داشت.

از آنجایی که مقاومت بتن با چگالی آن ارتباط مستقیم دارد و با کاهش چگالی مقاومت هم کم می‌شود می‌توان در کنترل کیفیت بتن برای سهولت و سرعت ارزیابی مقاومت از اندازه‌گیری چگالی هم کمک گرفت. البته لازم است برای تخمین مقاومت بر اساس چگالی، اطلاعات و روابط تجربی کافی برای این وابستگی در اختیار باشد.



شکل ۴-۶- دستگاه حفاری مجهز به لوازم اندازه‌گیری برای کنترل رواداری و لیزر اسکن برای کنترل رواداری و کیفیت سطح تمام شده هیدرولیکی

۴-۵-۳- اندازه‌گیری در روش‌های مکانیزه

در حفاری مکانیزه برای کنترل بازده عملیات اجرایی اندازه‌گیری‌های مختلفی از پارامترهای عملکردی دستگاه صورت می‌پذیرد که توسط سامانه راهبری ماشین ثبت می‌گردد. افزون بر این موارد، با استفاده از حسگرها و ابزار دقیق می‌توان برخی کنترل‌های غیر مستقیم و مشاهده‌ای را به صورت خودکار و برخط انجام داد. نصب حسگرهای تشخیص سایش و آسیب‌دیدگی تیغه‌ها برای انجام اقدام به موقع برای تعویض آن‌ها جزو این موارد می‌باشد. همچنین حسگرهای ثبت و کنترل فشار دوغاب و فوم در پیشانی کار یا ثبت فشار متعادل زمین بر کله حفاری از سایر مواد در حفاری مکانیزه هستند. با توجه به این که ممکن است این حسگرها دچار خرابی و آسیب شوند، کنترل سالم بودن حداقل درصدی از آن‌ها (مثلاً ۶۰ درصد) باید با روش‌های مناسب انجام پذیرد.

در حفاری مکانیزه کنترل دقیق حجم مصالح خروجی برای پایش اضافه حفاری‌ها با نصب دوربین لیزری در مسیر تسمه نقاله‌ها یا باسکول اندازه‌گیری وزن مصالح تخلیه شده در زیر تسمه نقاله یا جریان‌سنج در مسیر لوله تخلیه دوغاب و مصالح صورت می‌پذیرد. در حفاری متعارف این اندازه‌گیری‌ها به صورت پایش احجام خروجی با ماشین‌آلات انجام می‌گردد. ثبت آمار مواد و مصالح مصرفی ورودی و آب و برق و سوخت نیز به صورت دستی یا نیمه خودکار یا با استفاده از نرم افزارهای انبارداری عملی است. برخی از این کنترل‌ها با استفاده از دوربین‌های تردد شمار یا دوربین‌های مدار بسته با یا بدون اپراتور نیز امکان‌پذیر است.

استفاده تا حد ممکن از دستگاه‌های اندازه‌گیری کیفیت اجرا نظیر دستگاه‌های کنترل دوغاب برای ثبت هم‌زمان دبی و فشار و حجم و دما و دستگاه‌های کنترل مکانیزه طرح‌های اختلاط بتن و دوغاب از نکات و ملاحظات مهم اندازه‌گیری و کنترل در تونل‌سازی است.

فصل ۵

روش‌های تجهیز و پشتیبانی

در این فصل روش‌های تجهیز و پشتیبانی تونل‌سازی شامل تجهیز کارگاه و راه‌های دسترسی، تهویه حین اجرا، تامین توان، برق‌رسانی و روشنایی، آبکشی و آبرسانی، ترابری و انتقال مواد، مصالح و نفرات، انتقال داده‌ها و مخابرات، تهیه و تامین قطعات بتنی پیش‌ساخته و انتخاب نیروی انسانی متخصص و سازمان‌دهی مورد بحث قرار گرفته و چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده اجرایی مربوط به آن ارائه گردیده است. تجهیز و پشتیبانی اجرایی کارگاه تونل‌سازی در هر دو حالت مکانیزه و متعارف تاثیر مستقیم در کیفیت، ایمنی، بازده و سرعت پیشروی اجرا دارد. هزینه تجهیز کارگاه تونل‌سازی نسبت به سایر پروژه‌های عمرانی، خصوصا در روش مکانیزه، درصد بیش‌تری از هزینه اجرا را شامل می‌شود و بنابراین جریان نقدینگی مورد نیاز در این پروژه‌ها نیز تا حدی متفاوت است.

۵-۱- روش تجهیز کارگاه و راه‌های دسترسی

۵-۱-۱- مولفه‌ها، اجزا و فرآیند تجهیز کارگاه تونل‌سازی

- اجزای اصلی تجهیز کارگاه تونل‌سازی که در دو مرحله موقت برای آماده‌سازی و دائم برای اجرا انجام می‌شود عبارتند از:
- ۱- فضاهای عمومی مثل ساختمان اداری، کمپ مسکونی، خدمات (رستوران، نمازخانه، بهداشتی، تفریحی و ...)،
 - ۲- فضاهای پشتیبانی مانند انبارها، تعمیرگاه‌ها، مخازن سوخت، مخازن آب و ...،
 - ۳- ماشین‌آلات شامل خودروهای سبک، خودروهای سنگین و تجهیزات عمومی مانند لودر، کامیون، تراک میکسر، گریدر، غلطک، تانکر آب و سوخت، جرثقیل، وانت و دامپر، پمپ آب و لجن‌کش، دستگاه جوش، پیکور، چکش و سه پایه، دستگاه بتن‌پاشی تر و خشک و ...،
 - ۴- سامانه آب شامل آب مورد نیاز برای کار دستگاه و خنک نمودن آن (که بیش‌ترین حجم را دارد)، آب مورد نیاز برای ملات و دوغاب و بتن و آب آشامیدنی به‌علاوه لوله‌کشی، مخازن، پمپ‌ها و تانکرهای مربوط،
 - ۵- سامانه فاضلاب و جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی و خروجی از تونل،
 - ۶- سامانه برق شامل تامین برق دستگاه (که بیش‌ترین مقدار را دارد) و برق اضطراری خصوصا برای سامانه تهویه تونل، روشنایی و برق سایر بخش‌های کارگاه به‌علاوه شبکه، تابلوها و ترانسفورمرها،
 - ۷- ارتباطات و مخابرات تونل در تجهیز کارگاه و خارج کارگاه و خدمات اضطراری،
 - ۸- ایمنی، امنیت، سلامت و محیط زیست و خدمات فوری نظیر آمبولانس و درمانگاه، اطفاء حریق و دوربین مداربسته،
 - ۹- راه دسترسی خارج سایت و داخلی سایت شامل مسیر ریلی که با توجه به کوهستانی بودن بیش‌تر کارگاه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است و هزینه قابل توجهی برای احداث و نگهداری دارد،
 - ۱۰- دپوها و محل تخلیه مصالح حفاری.
 - ۱۱- فرآیند تجهیز کارگاه تونل‌سازی نیز شامل موارد زیر می‌باشد:

- بررسی کلی محدوده طرح و ورودی(های) تونل به منظور مکان‌یابی،
 - بررسی نیازهای دوران اجرا به منظور ارائه برنامه فیزیکی-کالبدی تجهیز،
 - بررسی توپوگرافی و زمین‌شناسی شامل طبقه‌بندی شیب‌ها و آبراهه‌ها و مسیل‌ها،
 - ارائه طرح ساختاری و لکه‌گذاری با رعایت فاصله ایمن از ورودی تونل،
 - بررسی ویژگی‌های اقلیمی منطقه شامل محدوده تغییرات دمایی، بارش، رطوبت و جهت و سرعت باد در
 - فصول مختلف و یخبندان به منظور ارائه راهکارهای طراحی معماری متناسب با اقلیم،
 - انتخاب ویژگی‌های فنی و مصالح ساختمانی مناسب،
 - حفاری اولیه ورودی تونل و تثبیت و تحکیم پرتال که معمولاً به موازات عملیات تجهیز کارگاه انجام می‌شود،
 - تهیه طرح و روش اجرایی مولفه‌های مختلف،
 - برآورد هزینه اجرایی تجهیز،
 - عملیات اجرایی.
- ۱۲- مولفه‌های تجهیز کارگاه تونل‌سازی هم عبارتند از:
- سکوهای نصب تاسیسات و تجهیزات،
 - مخزن آب و مخزن سوخت،
 - سیلوهای ذخیره سیمان،
 - سنگ شکن و بچینگ،
 - کارخانه سگمنت در روش مکانیزه،
 - دپوهای مصالح درشت‌دانه و ریزدانه بتن و پی گراول برای پرکردن پشت قطعات بتنی،
 - انبار مواد و مصالح،
 - آزمایشگاه بتن و مکانیک خاک و سنگ،
 - ساختمان نیروگاه (دیزل ژنراتورها)،
 - کمپرسورهای هوای فشرده،
 - خوابگاه کارگری، خوابگاه مهندسی و خوابگاه تکنسین‌ها،
 - ساختمان اداری پیمانکار، مشاور و کارفرما،
 - رستوران و درمانگاه و اماکن ورزشی، مسجد و مجموعه فرهنگی و رختشوی‌خانه و سرویس بهداشتی و ...،
 - ساختمان دیزل ژنراتور یا نیروگاه یا پست تغذیه از شبکه،
 - انبار مواد ناریه در روش حفاری متعارف که باید با فاصله ایمن از دهانه ورودی تونل و تجهیز کارگاه قرار گیرد.
 - تعمیرگاه‌ها،
 - آتش‌نشانی و ساختمان و انبار ایمنی، سلامت و محیط زیست،

- پارکینگ ماشین‌آلات سبک و سنگین.

نمونه جانمایی تجهیز کارگاه و راه‌های دسترسی تونل مکانیزه انتقال آب در پورتال ورودی در تونل بازی‌دراز و تونل انتقال آب آزاد به ترتیب در شکل‌های (۵-۱) و (۵-۲) نشان داده شده است.



شکل ۵-۱- نمونه جانمایی تجهیز کارگاه و راه‌های دسترسی تونل مکانیزه انتقال آب در پورتال ورودی در پروژه بازی‌دراز



شکل ۵-۲- نمونه جانمایی تجهیز کارگاه تونل انتقال آب آزاد شامل دپوی موقت سگمنت و تدارکات اجرایی در ورودی تونل

۵-۱-۲- چالش‌ها و توصیه‌های اجرایی تجهیز کارگاه تونل‌سازی

چالش‌ها و توصیه‌های اجرایی و ملاحظات تجهیز کارگاه تونل‌سازی بر اساس تجربیات موجود عبارتند از:

- ۱- مسائل امنیتی و حفاظتی در نواحی مختلف و خصوصاً مرزی که در این مورد پیشنهاد می‌شود، بررسی و مطالعه و رایزنی لازم با مقامات محلی و نیروهای نظامی و انتظامی و محلی انجام و تمهیدات مورد نیاز در نظر گرفته شود.
- ۲- مسائل اجتماعی استقرار و اسکان و تردد پرسنل در سایت و شهرها یا روستاهای اطراف آن و نحوه تعامل با مردم بومی و استفاده از ظرفیت آن‌ها و ایجاد امکانات و زیرساخت جهت کمک به رفاه عمومی و اجتماعی در منطقه.
- ۳- مسائل بهداشت عمومی و فردی و سلامت روحی و روانی افراد شاغل در سایت‌هایی که دورافتاده یا دارای فواصل زیاد از شهرها و امکانات رفاهی عمومی هستند. در این موارد لازم است که با ایجاد فضای ورزشی، تفریحی و مذهبی مناسب، حداقل استاندارد لازم برای تامین امکانات در این زمینه‌ها رعایت شود.

- ۴- نحوه اسکان افراد شاغل با توجه به سطح کار و فرهنگ و آداب و رسوم منطقه برای کارگران و پرسنل بومی.
- ۵- مسائل مجاورت در جانمایی محل استراحت با توجه به موقعیت کارگاه‌ها و محل تردد ماشین‌آلات و آلودگی صوتی و ارتعاشی سایت که باعث کاهش بازده کاری می‌شود.
- ۶- محدودیت‌های فضا و امکانات کاری و عدم توجه به زمان‌های نسبتاً طولانی مورد نیاز برای تونل‌سازی که توصیه می‌شود با ایجاد محیط‌های کاری متناسب با نیازهای کارگاهی و پروژه مدیریت شود.
- ۷- ایجاد شبکه ارتباطی و زیرساخت لازم برای برقراری ارتباط در بین کاربری‌های مختلف و همچنین امکانات ارتباطی مناسب برای پرسنل نظیر اینترنت و تلفن همراه و تلویزیون که باعث افزایش تمایل به ماندگاری افراد در کارگاه می‌شود. ماندگاری نیروی تخصصی بسته به تامین نیازهای این افراد جهت اقامت و کار دارد. در نتیجه فراهم کردن شرایط مناسب برای کار و زندگی، اولین گام در جهت اجرای طرح می‌باشد. هرچه شرایط اقلیمی سخت‌تر باشد، تجهیز کارگاه نقش مهم‌تری در پیشبرد طرح ایفا خواهد کرد.
- ۸- در تونل مکانیزه که بخش اول تونل و ورودی آن برای آماده‌سازی امکان حرکت دستگاه و ایجاد تکیه‌گاه پوشش بتنی و توده سنگ کافی برای اعمال فشار دستگاه به آن به صورت متعارف اجرا می‌شود، لازم است پیش‌بینی تجهیز برای این عملیات در نظر گرفته شود. (شکل ۵-۳)



شکل ۵-۳- نمونه جانمایی تجهیز کارگاه در ورودی تونل مکانیزه انتقال آب بلند زاگرس و تونل شماره ۴ پروژه گرمسیری

- ۹- در پروژه‌هایی که مختص انتقال آب نیستند و تونل آب بخشی از آن‌ها محسوب می‌شود، مانند پروژه‌های سدسازی، تجهیز کارگاه معمولاً به صورت کلی برای مجموعه پروژه در نظر گرفته می‌شود. برای تهیه برنامه تجهیز کارگاه لازم است، جدول ماشین‌آلات شامل فعالیت‌ها، نوع تجهیز یا ماشین، نوع عملیات، ظرفیت و تعداد مورد نیاز تدوین گردد. همچنین لازم است برای کار با هر یک از دستگاه‌ها و تجهیزات و ماشین‌آلات، پرسنل مربوطه مورد نیاز نظیر راننده و اپراتور و کنترل‌چی و کارگر فنی و تکنسین تعمیرات و نگهداری پیش‌بینی شود. تعداد این نفرات بر اساس شیفت کاری در پیک عملیات کنترل می‌گردد.
- ۱۰- تفکیک مولفه‌های ماندگار تجهیز مانند مواردی که برای استفاده افراد بومی منطقه باقی می‌ماند و قابلیت بازیافت و جمع‌آوری کامل ساختمان‌ها و ادوات و زیرساخت‌های تجهیز که به طور موقت در طول دوره اجرا

استفاده می‌شوند و پاکسازی کامل محوطه از هرگونه نخاله و باقیمانده سازه‌ها.

- ۱۱- بهتر است تجهیز کارگاه به صورت یکپارچه و نیز بر اساس نیازهای طرح و روش اجرایی پیمانکار اصلی تهیه شود و تا حد امکان از شکست و تفکیک و اجرای جداگانه بدون در نظر گرفتن ارتباط آن‌ها با یکدیگر خودداری نمود.

۵-۱-۳- راه‌های دسترسی

راه‌های دسترسی در تونل‌سازی شامل راه موقت و دائم می‌باشند که بخشی از آن‌ها ممکن است به صورت تونل هم باشد. زیرسازی و روسازی این راه‌ها بسته به میزان ترافیک، زمان استفاده و هزینه نگهداری مشخص می‌شود. راه موقت برای عملیات اجرایی موقت احداث شده و بعداً مسدود یا جمع‌آوری می‌شود و از این رو دارای روسازی خاکی یا شنی است و استانداردهای هندسی برای آن‌ها الزامی نیست و بستگی به شرایط کارگاه خواهد داشت. راه اصلی دسترسی به سایت تونل که معمولاً برای زمان بهره‌برداری نیز استفاده می‌شود و احتمالاً برای دسترسی به روستاها نیز مورد استفاده قرار خواهد گرفت، معمولاً با استانداردهای راه روستایی درجه یک تا سه با عرض ۴ تا ۶/۵ متر احداث می‌شود و دارای روسازی آسفالتی خواهد بود. حریم و اجزای فرعی این راه‌ها تابع محدودیت تملک و محدودیت‌ها و مجوزهای زیست محیطی و منابع طبیعی و عبور حیوانات هم می‌باشند. انواع راه دسترسی در کارگاه تونل‌سازی شامل موارد زیر می‌باشد:

- ۱- راه دسترسی اصلی به ورودی‌ها و خروجی‌های تونل و راه بهره‌برداری دائمی،
- ۲- راه موقت داخل سایت تجهیز که حسب نیازهای ا.ج.اس.ای دارای روکش شنی یا آسفالتی خواهد بود،
- ۳- راه کمکی برای عملیات اکتشافی، حفر گمانه‌ها و چاهک‌های پی‌زومتری، چاه‌های تهویه و تخلیه مصالح حفاری و ورودی‌های فرعی زمان اجرا در روش متعارف که معمولاً بدون روسازی می‌باشند.
- ۴- ریل یارد ورود دستگاه حفاری در روش مکانیزه شامل مسیر حمل قطعات بتنی از کارخانه تولید تا ورودی تونل، ریل قرارگیری و مونتاژ دستگاه و ریل‌های پارکینگ و تعمیرگاه واگن‌ها که دارای روسازی موقت می‌باشند.
- ۵- چالش‌ها و توصیه‌های مربوط به طراحی و احداث راه‌های دسترسی در تجهیز عبارتند از:
 - در مورد کلیه راه‌های موقت و دائم در حین اجرا لازم است، مباحث ایمنی بهره‌برداری و حوادث احتمالی حین اجرا تا حد معقول پیش‌بینی شده و ملاحظات عبور و مرور و بیمه حوادث احتمالی مانند سیلاب و ریزش کوه و سقوط سنگ و نظایر آن برای بهره‌برداری از آن‌ها در نظر گرفته شود.
 - تقاطع یا از بین بردن راه‌های محلی موجود که در این زمینه لازم است در احداث این راه‌ها توجه لازم به وضعیت موجود و استفاده‌کنندگان محلی و عبوری به عمل آید.
 - عدم توجه به شرایط اقلیمی و آب و هوایی در احداث راه‌های دسترسی نظیر بارندگی، یخبندان، سیلاب و آبشستگی و مسیل‌های طبیعی، که هزینه‌های نگهداری و حوادث تردد را افزایش می‌دهد.
 - حوادث و تصادف با افراد بومی و حیوانات اهلی و وحشی از چالش‌های مهم تردد در پروژه تونل‌سازی است که باید با رعایت موارد ایمنی در طرح هندسی و استفاده مناسب از علائم و سرعت‌گیرهای مناسب و نیز ایجاد

- گذرگاه تقاطع عبور و مرور افراد و حیوانات به صورت زیرگذر یا روگذر در محل‌های پرتردد از رخدادهای آن‌ها پیشگیری نمود.
- برای راه‌هایی که در منطقه برای استفاده دائم محلی باقی می‌مانند یا راه‌هایی که به طور دائم برای بهره‌برداری و نگهداری از تاسیسات تونل احداث می‌شوند، باید تمهیدات اجرایی و طراحی متناسب در نظر گرفته شود.
 - بازده تردد ماشین‌آلات سنگین در راه‌های دسترسی با توجه به این که حمل مصالح و ادوات اجرایی به طور مستمر از آن‌ها صورت می‌پذیرد از مسائل مهم در طرح شیب و فراز این راه‌ها می‌باشد.
 - برای راه‌ها و مکان‌های موقت استفاده شده برای تجهیز، بازگرداندن وضعیت محیط به حالت اولیه با رعایت ملاحظات زیست محیطی و منابع طبیعی دارای اهمیت زیادی است و باید در شرایط خصوصی قرارداد پیمانکار و در بخش جمع‌آوری کارگاه به طور شفاف بیان گردد.
 - بخشی از راه‌های دسترسی ممکن است به صورت اصلاح یا تعریض راه‌های موجود همراه با ارتقاء و تقویت ابنیه و پل‌های آن‌ها باشد که باید با برداشت وضع موجود در برنامه تجهیز لحاظ گردد.

۵-۲- تهویه حین اجرا

۵-۲-۱- الزامات و ملاحظات کلی تهویه

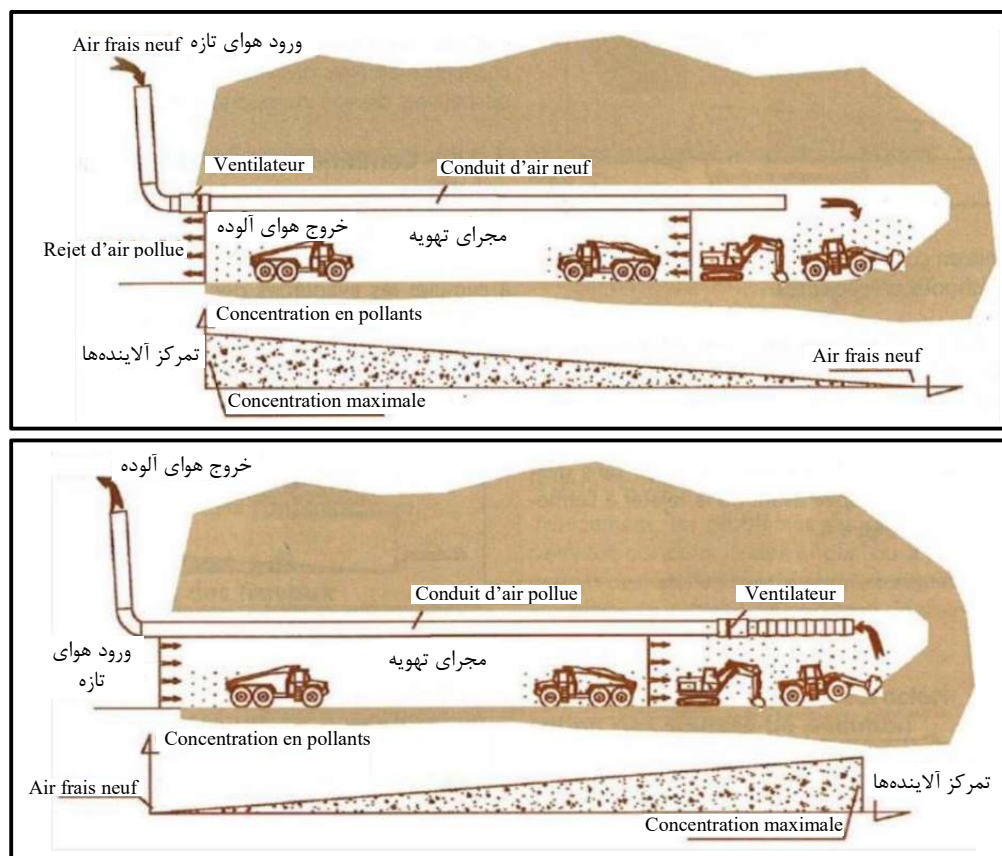
تهویه حین اجرا با هدف ایجاد شرایط ایمن و مناسب کاری با کنترل دما، رطوبت، گرد و غبار و دود، اکسیژن و گازهای سمی و همچنین وجود دید مناسب انجام می‌شود. میزان تهویه مورد نیاز تونل به روش حفاری و ماشین‌آلات، میزان دما و رطوبت، طول و ابعاد بستگی دارد. در شرایط متعارف میزان هوای دمیده شده در تونل در مقطع آن باید دارای سرعت متوسطی بین 0.3 تا 2 متر بر ثانیه باشد. حداقل هوای لازم برای هر نفر حدود $1/5$ مترمکعب در دقیقه یا 4 مترمکعب در دقیقه به ازای هر کیلو وات قدرت موتور دیزل مشغول به کار در نظر گرفته می‌شود.

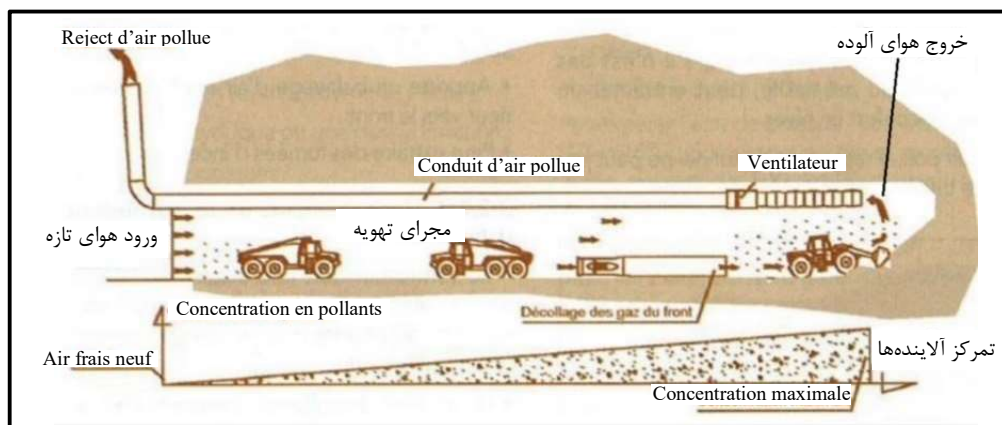
الزامات سامانه تهویه بر اساس تحلیل ریسک مرتبط با آن تعیین می‌گردد. آلودگی هوا در تونل ناشی از گرد و غبار حفاری و انفجار، نشت گازهای سمی مانند متان و دی اکسید سولفور و گازهای ناشی از کارکرد ماشین‌آلات مانند مونواکسید و دی اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن، گازهای ناشی از نشت مواد سوختی، بتن‌پاشی و تزریق سیمان و پساب‌ها ایجاد می‌شود و باید تحت پایش قرار گیرد. بر اساس معیارهای پیشنهادی آئین‌نامه‌ها مقدار استاندارد اکسیژن در تونل در فشار اتمسفر باید بین $19/5$ تا $23/5$ درصد باشد. در مقدار کم‌تر برای تامین سلامت و برای مقدار بیش‌تر برای کاهش پتانسیل آتش‌سوزی و انفجار باید سامانه تهویه به کار گرفته شود. همچنین مقدار بخار و گازهای سمی و گازهای قابل انفجار و اشتعال باید بر اساس نوع گاز و حداکثر به 5 درصد محدود شوند. شدت و تجهیزات تهویه مورد نیاز در مرحله حفاری و اجرای پوشش تاحدی متفاوت است. جزئیات و روش‌های طراحی و انتخاب سیستم تهویه مناسب در مراجع مرتبط ارائه شده است.

۵-۲-۲- روش‌ها و تجهیزات تهویه حین اجرا

انواع سامانه تهویه عبارتند از دمیدن هوا (دهش)، مکش هوا، ترکیب دمیدن و مکش و سامانه دارای هم پوشانی. انواع فن‌ها عبارتند از اصلی تولید کننده فشار و جریان اولیه هوا، کمکی برای تنظیم جریان در مسیر و سینه کار، تقویتی (بوستر) برای کاهش و تنظیم فشار هوا و تنظیف (اسکراپر) برای هدایت غبار به فیلترها. انواع آرایش فن‌ها نیز عبارتند از تکی، دوتایی یا چندتایی سری و موازی با الکتروموتور روی بدنه یا جداگانه. انواع خاص ضدانفجار و ضدحریق فن و نیز فن‌های دارای فیلتر تصفیه غبار نیز در مواردی استفاده می‌شوند.

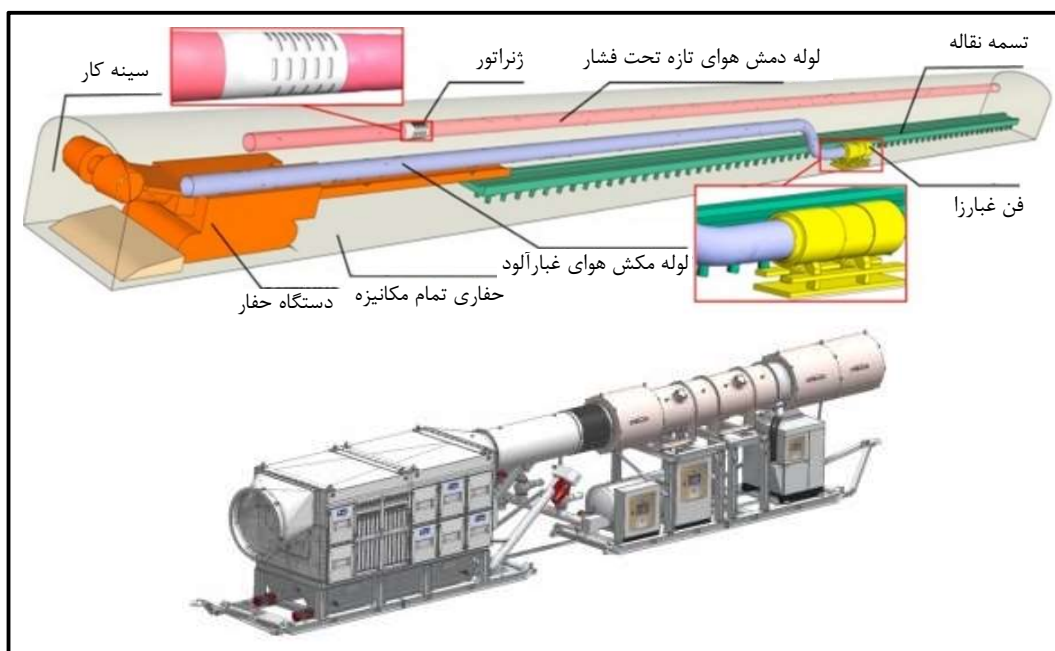
از لحاظ جانمایی، روش‌های مختلفی برای ورود هوای تازه به جبهه کار وجود دارد. به عنوان مثال، می‌توان هوای تازه را از طریق مجاری تهویه در امتداد تونل (معمولاً به قطر ۳۰۰ الی ۲۰۰۰ میلی‌متر) که ابتدای آن در نزدیکی ورودی تونل قرار دارد به داخل تونل هدایت نمود. هوای استفاده شده را می‌توان به راحتی در امتداد تونل به بیرون هدایت نمود تا از قسمت ورودی تونل خارج شود. همچنین، می‌توان از سیستم تهویه مکش و تزریق استفاده نمود که در آن با استفاده از مجاری تهویه، هوای استفاده شده، از جبهه کاری تونل خارج می‌شود و هوای تازه از فاصله حدوداً ۳۰ متری جبهه کاری به داخل پمپاژ می‌شود. این روش در شرایط هوایی سمی یا غبار آلود بسیار کارآمد است. برای تونل طویل، می‌توان چاه میانی برای تامین تهویه دائمی در نظر گرفت، که طول مجاری تهویه مورد نیاز و ابعاد فن‌های تهویه را هم کاهش می‌دهد. نمونه مکانیزم‌های تهویه در شکل ۴-۵ نشان داده شده که به صورت دمیدن و مکش انجام می‌شود.





شکل ۵-۴- انواع تهویه در حفاری متعارف و آتشکاری به روش دمیدن و مکش و ترکیبی و موقعیت تمرکز آلاینده‌ها در تونل

در تونل‌سازی مکانیزه تهویه معمولاً در جبهه کاری و به صورت سیستم دهش، مکش یا ترکیبی استفاده می‌شود که ورودی هوای آن در جبهه حفاری دستگاه قرار می‌گیرد. در صورتی که حفاری با دوغاب یا فوم یا در محیط مرطوب باشد، معمولاً سیستم دهش کفایت می‌نماید ولی در تونل بلند انتقال آب اغلب از سیستم ترکیبی استفاده می‌شود. در مواردی که حجم زیادی از دهش و مکش هوا در تونل بلند برای کاهش غلظت غبار مورد نیاز باشد یا میزان غلظت بسیار کمی از غبار مدنظر باشد، از سامانه غبارزا در دنباله ماشین حفاری استفاده می‌گردد. در شکل (۵-۵) نمونه جانمایی سامانه غبارزا در حفاری مکانیزه و نیمه مکانیزه نشان داده شده است.



شکل ۵-۵- نمونه جانمایی سامانه ضدغبار در حفاری مکانیزه و نیمه مکانیزه و جزییات عمومی این سامانه

۵-۲-۳- مراحل و ملاحظات نصب و بهره‌برداری از سامانه تهویه حین اجرا

مراحل نصب و بهره‌برداری از سامانه تهویه عبارتند از:

- تامین توان و برق‌رسانی به محل سامانه تهویه و تابلوی کنترل،
- نصب تابلوی برق و سیستم کنترل تهویه،
- آماده‌سازی سکو و نصب فن‌ها در محدوده ورودی تونل،
- نصب داکت‌های تهویه در موقعیت و اندازه مناسب با توجه به مقطع تونل،
- آماده‌سازی قطعات داکت و ابزار اتصال و وصله و انبار آن برای نصب در تونل هم‌زمان با پیشروی،
- آماده‌سازی ابزار پایش و بازرسی و تعمیر داکت و تجهیزات تهویه.

داکت‌های تهویه در دو نوع داکت فنری برای تهویه در حالت مکشی و یا فشار منفی و داکت معمولی صلب یا انعطاف‌پذیر برای تهویه در حالت دهشی یا فشار مثبت استفاده می‌شود و از جنس ورق فولادی، فایبرگلاس یا پارچه‌ای هستند. داکت فلزی اصطکاک کم‌تر و بازدهی بالاتری در هدایت هوا خصوصاً در سرعت بالاتر دارند. برای کاهش ضریب نشست و افزایش کارایی سامانه تهویه، اتصالات قطعات داکت باید به طور مناسب انجام و به طور مستمر نگهداری و بررسی شوند. ضریب نشست مجاز سامانه تهویه تونل حدود $0.5/0$ مترمکعب بر ثانیه در هر صد متر به ازای هر یک کیلوپاسکال فشار در نظر گرفته می‌شود.

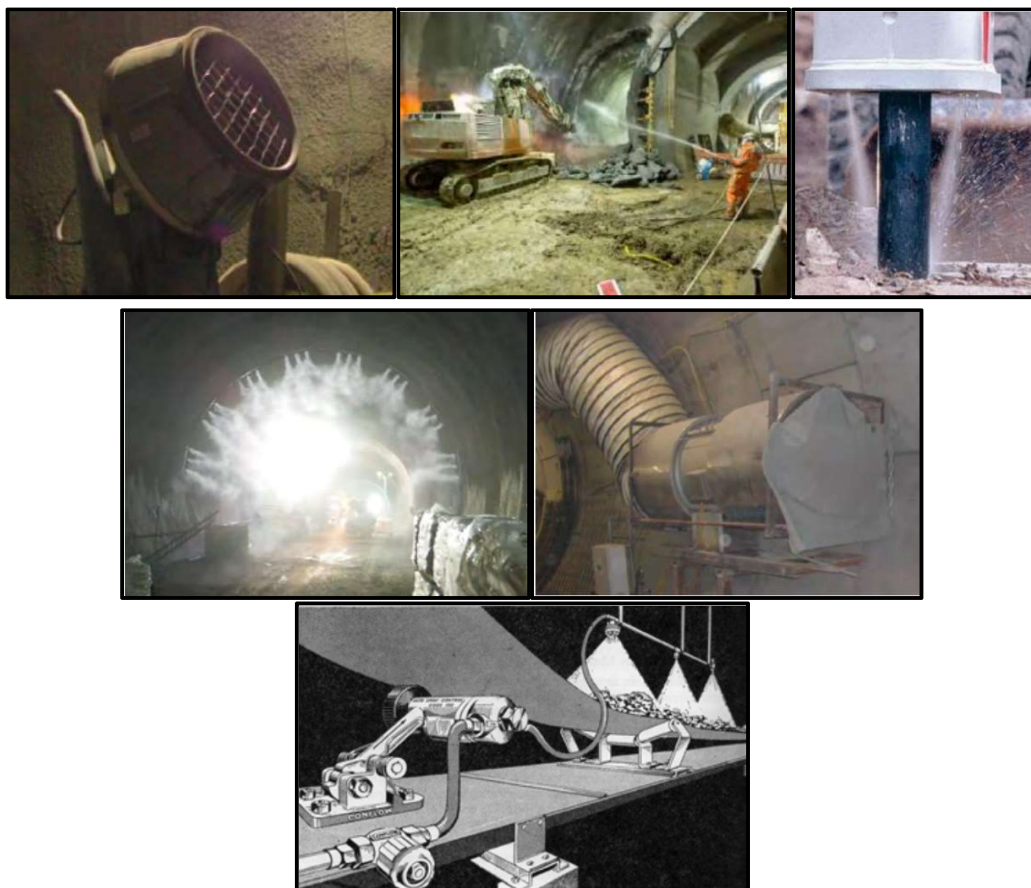
۵-۲-۴- چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده سامانه تهویه

چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده سامانه تهویه در اجرای تونل به صورت زیر است:

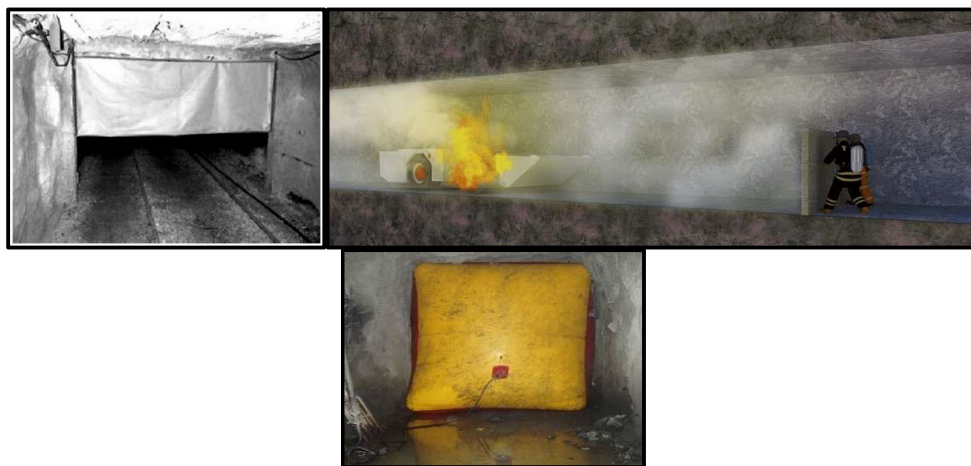
- در شرایط خاص و یا در زمان بروز مشکل در سامانه تهویه خصوصاً در تونل بلند ممکن است شرایط اضطراری برای پرسنل مستقر در جبهه کار به وجود آید. برای این منظور سامانه تهویه تونل باید دارای فن‌های پشتیبان برای مواقع اضطراری نیز باشد.
- سامانه هشدار و ارتباط لازم برای مواقع ایجاد اختلال یا توقف در کارکرد تهویه باید در نظر گرفته شود.
- برای بهبود شرایط کار در تونل، بهتر است فن‌ها مجهز به دیفیوزر جهت کاهش سطح صدا و افزایش راندمان و مجهز به حسگر لرزش و دما بوده و با استفاده از پشم سنگ با دانسیته بالا در صداگیرها و نیز کپسول صداگیر، آلودگی صوتی در آن‌ها به حداقل برسد.
- توجه به زمان مورد نیاز برای تهویه تونل بلافاصله پس از انفجار در حفاری متعارف بسیار مهم است. به عنوان یک قاعده کلی، حداقل ۱۵ دقیقه تهویه مصنوعی قبل از بازگشت مجدد به منطقه انفجار مورد نیاز است.
- برای جلوگیری از حوادث و اختلال در تهویه، سیستم کنترل و برق سامانه تهویه باید دور از دسترس افراد عادی بوده و توسط افراد غیر مسئول قابل روشن و خاموش کردن نباشد.
- برای بهبود کیفیت هوای تازه دهش در تونل و بهبود بازده آن، محل استقرار جت فن‌ها در ورودی تونل باید ایمن بوده و تحت تاثیر غبار و دود ناشی از تردد ماشین‌آلات نباشد. همچنین تمهیدات لازم برای ادامه کار آن

در شرایط مختلف جوی محتمل منطقه مانند بارش، طوفان یا باد شدید، مه غلیظ و یخ‌زدگی و گرد و غبار باید در نظر گرفته شود.

- داکت‌های انعطاف‌پذیر معمولاً نسبت به داکت‌های صلب آسیب بیشتری می‌بینند و هزینه نگهداری بالاتری دارند. در مقابل تعمیرات داکت‌های صلب مشکل‌تر و هزینه اولیه آن‌ها نیز بالاتر است.
- بازرسی مستمر از داکت‌ها در تونل بلند باید انجام و در صورت نیاز تعمیر و اصلاح لازم در آن اعمال گردد.
- برای بهبود کیفیت هوای داخل تونل در روش متعارف و استفاده از ماشین‌آلات سنگین و دیزلی، استفاده از فیلتر دود برای ماشین‌آلات و تجهیزات و لوکوموتیوهای دیزلی توصیه می‌شود.
- برای کاهش غبار و بهبود کیفیت هوا در تونل می‌توان از روش کمکی نیز برای تهویه استفاده نمود. به عنوان مثال، اسپری آب جبهه حفاری، محل بارگیری و تخلیه مصالح، مسیر تسمه نقاله تخلیه مصالح و سینه‌کار محل انفجار می‌تواند به بهبود کیفیت هوا کمک نماید، البته به شرطی که شرایط دما و رطوبت برای کار مناسب باشد. همچنین می‌توان از فیلتر در محل مکش هوا در ورودی تونل برای کاهش هوای تمیزتر به داخل استفاده نمود. روش‌های کمکی مختلف بهبود کیفیت هوا در تونل، در شکل‌های ۵-۶ و ۷-۵ ارائه شده است.



شکل ۵-۶- روش‌های کمکی مختلف بهبود کیفیت هوا در تونل



شکل ۵-۷- موانع و پرده‌های موقت برای محبوس نمودن غبار و دود

- در تونل بلند که هزینه تهویه در طول تونل افزایش چشمگیری می‌یابد معمولاً سعی می‌شود در فواصل مناسب و در نواحی با روباره کم نسبت به احداث چاه تهویه برای مکش یا دهنش هوا استفاده شود. این چاه‌ها معمولاً به روش حفاری دستی و از بالا به پایین حفاری می‌شوند. البته در چاه عمیق‌تر توجیه استفاده از دستگاه حفاری ریزبور هم حاصل می‌شود. در برخی شرایط که فاصله تونل از فضای باز در وجوه آن نیز کم باشد، با احداث بازشو یا تونل تهویه می‌توان نسبت به این کار اقدام نمود. ممکن است این چاه‌ها به صورت چند منظوره و برای تخلیه یا ورود نیز مورد استفاده قرار گیرند.
- توصیه می‌شود در شرایط خصوصی قرارداد پیمانکار علاوه بر این که مجوز ادامه کار منوط به برآورده نمودن الزامات حداقل اچ.اس.ای در داخل تونل برای پرسنل کاری باشد، در صورتی که قرار است هزینه تهویه در قالب فهرست بها و بر اساس پیشروی پرداخت شود، این پرداخت نیز مشروط به تامین الزامات ذکر شده گردد. تمهیدات و توصیه‌های مربوط به برخورد با گازها به شرح زیر می‌باشند:
- با توجه به مزایا و معایب روش دهشی و مکشی یا ترکیبی، شیوه مکشی در زمان برخورد با شرایط گازخیزی یا رطوبت بالا، کارایی مناسبی نخواهد داشت. این روش در شرایط عادی جهت تخلیه حرارت و آلاینده کم، مناسب است. بنابراین، چنانچه در تونلی حجم آلاینده‌ها بالا بوده یا با گاز سمی و آتش‌زا سر و کار داشته باشیم، بهتر است از روش دهشی یا ترکیبی استفاده گردد. در روش ترکیبی نیز توصیه می‌شود، بین ۶۰ تا ۷۰ درصد از شدت جریان کل هوا، به شیوه دهشی منتقل و در بخش‌های لازم و حساس توزیع شده و باقیمانده آن، به شکل مکش از بخش آلوده، قبل از اختلاط آلاینده با هوای تونل، آن‌ها را به خارج تونل منتقل نماید. در روش ترکیبی، کنترل مداوم شدت جریان هوا و در نتیجه سرعت خطی هوا، در تمامی مقاطع الزامی است، زیرا احتمال کاهش شدت جریان عبوری از مقطع تونل در اطراف دستگاه وجود دارد.
- در شرایطی که منشاء گازهای ورودی نظیر H_2S آب زیرزمینی باشد، علاوه بر استفاده از تهویه مناسب لازم است راه نفوذ آب حاوی سولفید هیدروژن به تونل تا حد امکان با تزریق یا آب‌بندی مسدود شود و زهکشی

مناسب و سریع صورت پذیرد. این کار می‌تواند با پیش تزریق آب‌بندی در جبهه کاری انجام پذیرد. در صورت امکان کنترل گاز SO_2 ، می‌توان با اضافه نمودن پراکسید هیدروژن نیز H_2S را زائل نمود که البته روش نسبتاً پرهزینه‌ای است. همچنین روش‌های دیگر نظیر استفاده از فیلترکربن فعال نیز قابل استفاده است.

- در برخی تونل‌ها وجود پیریت در لایه‌های شیلی و تجزیه آن‌ها باعث تولید گاز سولفید هیدروژن (H_2S) گشته که عمدتاً به صورت محلول در آب دیده می‌شود و با جاری شدن آب در تونل گاز آن به تدریج متصاعد می‌شود. راهکارهای کلی در این شرایط عبارتند از رقیق کردن گاز ورودی به تونل با تهویه مکانیکی، کنترل حجم آب ورودی محتوی گاز با انجام تزریق آب‌بندی در جبهه کار و پیرامون تونل، انتقال آب گازدار به بیرون تونل از طریق لوله برای پیشگیری از تصاعد گاز در طول مسیر و نهایتاً استفاده از هشدار دهنده‌های پیش‌بینی شده روی دستگاه است که در غلظت خاصی آژیر خواهند کشید و در شرایط غلظت بسیار بیش‌تر حتی ماشین را به طور اتوماتیک خاموش می‌کنند و سپس تونل تخلیه می‌شود.

۵-۳- روش تامین توان، برق‌رسانی و روشنایی

۵-۳-۱- برنامه‌ریزی و انتخاب روش

تامین توان، برق‌رسانی و روشنایی یکی از ارکان مهم پشتیبانی کارگاه تونل‌سازی خصوصاً تونل‌سازی مکانیزه است که توان بیش‌تری نسبت به روش حفاری متعارف نیاز دارد. برنامه‌ریزی این بخش از تجهیز شامل فعالیت‌های زیر می‌باشد:

- ۱- برآورد توان مورد نیاز کارگاه در زمان‌های مختلف، شامل برق بخش پشتیبانی و کارگاه‌ها، سامانه روشنایی، تهویه، پمپاژ آب و تخلیه، کنترل و ایمنی، دستگاه‌های حفاری، تحکیم، تزریق و اجرای پوشش،
- ۲- انتخاب روش تامین توان شامل تولید و انشعاب و برق اضطراری و تعیین میزان برق قابل استحصال از شبکه و میزان برق مورد نیاز برای تولید و برق سیستم کنترلی و تهویه و بخشی از روشنایی برای پشتیبان اضطراری. عموماً برای تونل مکانیزه انتقال آب نیاز به حدود ۴ تا ۷ مگاوات برق می‌باشد که معمولاً با دسترسی به شبکه حداقل ۲۰ کیلوولت تامین می‌شود. در صورت نبود دسترسی به شبکه مناسب برق، از نیروگاه یا ژنراتور دیزلی استفاده می‌شود. معمولاً برای تامین برق کارگاه از شبکه سراسری موجود ممکن است نیاز به گرفتن انشعاب از نزدیک‌ترین پست دارای فیدر آزاد خروجی ۲۰ کیلوولت و اجرای کابل‌کشی زیرزمینی یا خط هوایی با فاصله چند کیلومتری تا محل کارگاه تونل‌سازی باشد. با توجه به این فاصله و همچنین طول چند کیلومتری تونل، میزان افت توان و نیاز به ترانس تقویتی یا انتقال با ولتاژ بالاتر باید مورد بررسی قرار گیرد.

۳- دیاگرام توزیع و انتقال برق شامل سیم و کابل‌کشی محوطه کارگاه و داخل تونل و جبهه کاری،

۴- جانمایی ترانس‌های ولتاژ متوسط و سامانه کنترل برق‌رسانی و مصرف شامل تابلوها و کنتورها و فیوزها،

۵- سامانه روشنایی محوطه و ساختمان‌های کارگاه و داخل تونل و جبهه کار با لحاظ شدت نور و شدت روشنایی

- مورد نیاز که به ترتیب با فوتومتر و لوکس متر قابل کنترل و اندازه‌گیری هستند. بر اساس آیین‌نامه ایمنی در تونل‌سازی مصوب ۱۳۹۹، شدت روشنایی برای تونل در محل عبور و مرور حدود ۵۴ لوکس و برای جبهه حفاری حدود ۱۰۷ لوکس در نظر گرفته می‌شود که در حفاری مکانیزه مقادیر مورد نیاز تا حدی کم‌تر است.
- ۶- سامانه ایمنی نظیر هشدار آتش‌سوزی، حسگر و دوربین مدار بسته و سیستم زمین برای تخلیه بار الکتریکی،
 - ۷- برنامه بهینه‌سازی و ممیزی مصرف انرژی شامل تهیه نمودار مصرف بر حسب زمان،
 - ۸- ملاحظات زیست محیطی.

۵-۳-۲- تهیه، جانمایی و نصب تجهیزات مورد نیاز

- تجهیزات مورد نیاز برای برق‌رسانی در تونل‌سازی شامل موارد زیر می‌باشد. روش‌های طراحی و انتخاب تجهیزات و جانمایی زیرساخت‌های برق‌رسانی تونل در مراجع مربوطه ارائه شده و در دسترس می‌باشد:
- ۱- خط انشعاب برق از شبکه سراسری شامل خطوط هوایی و کانال‌های زیرزمینی،
 - ۲- پست داخلی و ترانس،
 - ۳- ژنراتور تولید برق (در صورت نیاز)،
 - ۴- تابلوها یا اتاق کنترل اصلی و دیزل برق اضطراری و تابلوی کنترل حسگرها و سامانه هشدار و سامانه امنیتی،
 - ۵- سیم و کابل کشی محوطه شامل خطوط هوایی و کانال‌های زیرزمینی،
 - ۶- تجهیزات روشنایی محوطه و ساختمان‌های اداری و پشتیبانی و کارگاه‌ها،
 - ۷- کابل کشی داخل تونل برای روشنایی و نصب روشنایی نقطه‌ای یا پیوسته LED. در روشنایی نقطه‌ای با چراغ رشته‌ای با جریان نور حدود ۷۲۰ لومن، فاصله بین چراغ‌ها در حالت حمل و نقل با نوار نقاله تا ۱۰ متر و در حالت حمل و نقل عادی با ماشین‌آلات تا ۲۰ متر هم می‌تواند لحاظ گردد. چراغ‌ها باید تمیز بوده و با حفاظ مناسب نصب شوند و ملاحظات لازم برای نور اضطراری در طرح روشنایی تونل در نظر گرفته شود.
 - ۸- کابل کشی تونل برای ماشین و دستگاه حفاری (در روش مکانیزه و نیمه مکانیزه) شامل کابل XLPE و معمولی،
 - ۹- تابلوی برق سامانه تهویه و تابلوی برق سامانه پمپاژ،
 - ۱۰- تابلوی برق سامانه تخلیه مصالح و حمل و نقل ریلی سامانه واگن برگردان،
 - ۱۱- تابلوی برق کمپرسور هوای فشرده و سامانه انجماد (در صورت نیاز)،

۵-۳-۳- ملاحظات تخمین میزان توان مورد نیاز

- توان مورد نیاز در انواع روش‌های تونل‌سازی بسته به نوع تجهیزات مورد استفاده متفاوت است و عموماً در تونل‌سازی مکانیزه بسیار بیش‌تر از روش متعارف می‌باشد. به طور کلی میزان توان مورد نیاز به پارامترهای زیر بستگی دارد:
- ۱- مشخصات تونل شامل طول و سطح مقطع و شیب مثبت یا منفی برای پمپاژ آب و تخلیه مصالح،

- ۲- مشخصات زمین و دستگاه حفاری یا روش حفاری و میزان برق مصرفی دستگاه و تجهیزات جانبی آن،
 - ۳- شرایط آب و هوایی و گازها و نیازهای تهویه و کنترل رطوبت،
 - ۴- برنامه زمان‌بندی اجرایی و شیفت‌های کاری و تغییرات برق مصرفی در طول زمان.
- در حفاری مکانیزه در تونل با طول متوسط با شیب خیلی کم، نسبت‌های تقریبی درصد سهم مصرف برق در کارگاه مکانیزه تونل‌سازی در جدول (۵-۱) ارائه شده است.

جدول ۵-۱- نسبت‌های تقریبی درصد سهم مصرف برق در کارگاه مکانیزه تونل‌سازی

ردیف	نوع مصرف	محدوده تقریبی درصد مصرف
۱	تی.بی.ام	۶۰-۵۰
۲	روشنایی تونل	۵-۳
۳	تهویه	۹-۶
۴	پمپاژ	۸-۴
۵	برق محوطه تجهیز و پشتیبانی	۷-۳
۶	تخلیه	۱۲-۹
۷	کمپرسور هوای فشرده	۶-۴
۸	سایر	۷-۴

۵-۳-۴- چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده تامین برق در تونل‌سازی

توقف یا اختلال در برق‌رسانی با ازکار انداختن سیستم تهویه و روشنایی و سیستم‌های کنترل اجرایی و ماشین حفاری در روش مکانیزه عملاً نبض حیاتی تجهیز کارگاه محسوب می‌شود. چالش‌ها و توصیه‌های زیر که بر اساس تجربیات تونل‌های انتقال آب در کشور و جهان به دست آمده می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر در این زمینه کمک نماید:

- ۱- توصیه می‌شود اتصال به پست به صورت اختصاصی با انشعاب مجزا یا با احداث پست اختصاصی صورت پذیرد. بهتر است در قرارداد تامین برق با شرکت‌های برق، شرایط عدم قطع برق و تامین پیوسته آن نیز ذکر گردد.
- ۲- بهتر است تامین برق تا حد امکان مستقل از برق شهری بوده و تداخلی با آن نداشته باشد تا در مواقعی مانند ورود دستگاه حفاری مکانیزه به زمین‌های فشرده شونده یا هر موقعیتی که نیاز به تامین توان بیش‌تر و افزایش کشش از شبکه برق دارد، اختلالی در برق‌رسانی شهری و یا کمبود توان برای تامین برق مورد نیاز کارگاه پیش نیاید.
- ۳- برای داشتن سامانه تولید برق با قابلیت اطمینان بالا در شرایط استفاده از شبکه برق‌رسانی سراسری لازم است از سامانه برق اضطراری مانند ژنراتور استفاده شود، به طوری که بتواند برای زمان معقولی بسته به قابلیت اطمینان شبکه، برق مورد نیاز را تامین نماید. در صورت استفاده از نیروگاه دیزلی هم وجود ژنراتور کمکی و اضطراری آماده به کار ضروری است.
- ۴- تجربه نشان داده که استفاده از سامانه مستعمل و معیوب برق‌رسانی در تونل‌سازی ریسک و هزینه اجرا را به شدت افزایش می‌دهد و بهتر است در این زمینه حتماً از سیستم و تجهیزات آماده به کار با کیفیت مناسب استفاده شود. ممیزی انرژی و بهینه‌سازی مصرف برق در تونل می‌تواند هزینه اجرا را کاهش دهد. در این زمینه

- استفاده از تجهیزات تابلوها و کلیدهای با کیفیت بالا از اهمیت زیادی برخوردار است.
- ۵- چالش ایمنی و برق گرفتگی خصوصا در محیط تونل که معمولا دارای رطوبت بالا نیز می‌باشد، در صورت عدم توجه می‌تواند باعث حوادث جانی و مالی شود. بنابراین لازم است که سیستم عایق‌بندی در مسیر کابل و در اتصالات تابلوها و تجهیزات با دقت اجرا شود. این سیستم‌ها و کابل‌های برق‌رسانی باید مرتب مورد بازدید و بازرسی قرار گرفته و کابل‌های آسیب دیده و زخمی شده ترمیم و اصلاح گردد.
- ۶- در شرایطی که احتمال آب‌گرفتگی تونل و برخورد به سفره‌های آب زیرزمینی وجود دارد، باید پیش‌بینی لازم برای سیستم‌های برقی مستغرق شده و سیستم قطع خودکار برق به عمل آید. همچنین، در شرایطی که احتمال نشت گازهای قابل انفجار وجود دارد، این سیستم قطع خودکار باید با سیستم تشخیص غلظت گاز مرتبط باشد تا در مواقع خطر، اقدام به قطع برق و جلوگیری از انفجار یا آتش‌سوزی نماید.
- ۷- برنامه‌ریزی اجرایی برای مصرف برق به بهبود عملکرد این سامانه کمک می‌نماید. کارکرد هم‌زمان دستگاه‌ها و تجهیزات برقی (به عنوان مثال جوشکاری برای ترمیم ریل‌ها یا نصب دستک‌ها، عملیات تزریق و پمپاژ موضعی و کمکی و سوراخ‌کاری یا برش و ...) در تونل باید در این برنامه مدیریت شود تا بار اضافی به سیستم تحمیل نگردد.
- ۸- در مکان‌یابی و جانمایی پست داخل کارگاه یا تابلوهای اصلی بهتر است با توجه به امکان آتش‌سوزی آن‌ها، فاصله ایمن از سایر مولفه‌ها خصوصا منابع سوخت و مواد اشتعال‌زا و کمپ اقامت و کار پرسنل در نظر گرفته شود.

۴-۵- روش آبرسانی و آبکشی

۴-۵-۱- برنامه‌ریزی و انتخاب روش

آبرسانی، آبکشی و تخلیه آب یکی از ارکان مهم دیگر در تجهیز و پشتیبانی کارگاه تونل‌سازی خصوصا تونل‌سازی مکانیزه محسوب می‌شود. برنامه‌ریزی این قسمت از تجهیز کارگاه شامل فعالیت‌هایی در دو بخش زیر می‌باشد:

بخش اول - آبرسانی شامل:

- ۱- برآورد آب مصرفی مورد نیاز کارگاه در زمان‌های مختلف شامل آب بخش‌های پشتیبانی و کارگاه‌ها از جمله کارخانه تولید قطعات بتنی و تولید بتن و بتن‌پاشیده و دوغاب تزریق، سامانه غبارزدایی در جبهه کاری در روش حفاری نیمه مکانیزه و انفجاری، خنک‌کردن ماشین حفاری مکانیزه و کله حفاری و دوغابی کردن مصالح حفاری جهت تسهیل و کاهش آلودگی در تخلیه،
- ۲- تعیین منابع تامین آب و کنترل کیفی آب برای ساخت بتن و دوغاب شامل گرفتن انشعاب آب و تعیین میزان آب قابل استحصال از شبکه و سایر منابع و سیستم تصفیه مورد نیاز احتمالی،
- ۳- دیاگرام لوله‌کشی و انتقال آب به محوطه کارگاه و داخل تونل و جبهه کاری و کنترل ایمنی آن در حین عملیات حفاری یا انفجار،

- ۴- جانمایی سامانه پمپاژ و حوضچه‌ها و مخازن،
- ۵- سیستم لوله‌کشی محوطه و ساختمان‌های کارگاه و داخل تونل و جبهه کاری با لحاظ حجم و فشار و دمای آب مورد نیاز و توجه به ملاحظات یخ‌زدگی در فصول سرد و شب‌ها،
- ۶- سامانه سلامت، ایمنی و محیط زیست نظیر اطفای حریق و بهداشت و حقایقه‌های زیست محیطی،
- ۷- برنامه بهینه‌سازی و ممیزی مصرف آب شامل تهیه نمودار مصرف بر حسب زمان.

بخش دوم- آبکشی شامل:

- ۱- تخلیه آب ورودی جبهه کار و آب نشی در طول تونل و ملاحظات هجوم آب و برآورد آن برای پیشگیری از غرقاب شدن دستگاه و تجهیزات حفاری،
 - ۲- دی‌گرام لوله‌کشی و انتقال آب به بیرون تونل و هدایت آن در طول تونل و اندازه‌گیری دبی خروجی مقاطع مختلف یا امکان استفاده از سیستم تخلیه ثقلی به علاوه سامانه جمع‌آوری آب‌های سطحی محوطه کارگاه هنگام بارندگی،
 - ۳- جانمایی سامانه پمپاژ و حوضچه ته نشینی و تصفیه و استحصال آب برای مصرف مجدد،
 - ۴- پیش‌بینی تمهیدات لازم برای جلوگیری از ورود آب بارندگی و سیلاب به داخل تونل،
 - ۵- پیش‌بینی حوضچه‌های موضعی برای تخلیه آب موضعی با پمپ‌های شناور در سینه‌کار.
- در روش مکانیزه، آبرسانی به جبهه کاری به دو روش باز و بسته انجام می‌شود. روش بسته زمانی استفاده می‌شود که با کمبود آب مواجه بوده و نیاز به برگرداندن آب و خنک کردن و استفاده مجدد در یک چرخه بسته باشد، و در سایر موارد از روش باز و تخلیه آب به کف تونل پس از مصرف استفاده گردد. در حفاری مکانیزه تونل انتقال آب با قطر حدود چهار متر تقریباً به میزان ۲۰ تا ۲۵ مترمکعب آب نیاز است. نزدیک ۸۰ درصد این آب برای خنک کردن دستگاه مصرف می‌شود که در روش باز که به کف تونل ریخته شده و خارج می‌گردد، به دلیل اختلاط با گل و لای و آلودگی بازیافت نمی‌گردد.
- آبکشی هم در تونل‌سازی مکانیزه به دو روش ثقلی و پمپاژ به ترتیب برای شیب مثبت و منفی صورت می‌پذیرد. با توجه به نیازهای زیست محیطی، بخشی از سامانه تخلیه و زهکشی آب داخل تونل مربوط به هدایت پساب و حوضچه ته نشینی و تصفیه آب خروجی از تونل خواهد بود که جزئیات آن در فصل زیست محیطی ارائه گردیده است.

۵-۴-۲- تهیه و نصب تجهیزات مورد نیاز

- تجهیزات مورد نیاز برای آبرسانی در تونل‌سازی شامل موارد زیر می‌باشد:
- ۱- خط لوله انشعاب آب از شبکه اصلی یا منبع آب پیش‌بینی شده تا کارگاه،
 - ۲- سیستم پمپاژ و مخزن و حفر چاه (در صورت نیاز). ظرفیت سیستم پمپاژ طوری در نظر گرفته می‌شود که بتواند در یک شیفت کاری کل دبی آب ۲۴ ساعته را تخلیه نماید. تلمبه‌ها می‌توانند به صورت متمرکز یا سری

و موازی در طول تونل برای تامین هد مورد نیاز مورد استفاده قرار گیرند.

۳- لوله‌کشی محوطه و ساختمان‌های اداری و پشتیبانی و کارگاه‌ها،

۴- لوله‌کشی داخل تونل و انشعابات مصرف و شیرها.

مناسب‌ترین جنس لوله برای عملیات تونل‌سازی لوله فولادی می‌باشد و لوله پلی اتیلن یا جی. آر. پی^۱ به دلیل جنس ترد و آسیب‌پذیر و سایش بیش‌تر برای تخلیه دوغاب مصالح معمولاً استفاده نمی‌شوند. در فواصل کوتاه و فشار کم می‌توان از لوله پلیمری قرقره‌ای استفاده نمود. تجهیزات مورد نیاز برای آبکشی در تونل‌سازی شامل موارد زیر می‌باشد:

۱- سیستم پمپاژ،

۲- لوله‌کشی یا کانال هدایت آب ثقلی داخل تونل یا تخلیه دوغاب مصالح حفاری که در حالت وجود شن و ماسه در داخل آن باید سرعت انتقال برای جلوگیری از ته‌نشینی مصالح داخل لوله به بیش از ۳ متر بر ثانیه برسد.

۳- حوضچه خروجی ته‌نشینی،

۴- کانال یا لوله هدایت آب به خارج کارگاه،

۵- دبی‌سنج در نقاط مختلف و خروجی تونل.

۵-۴-۳- تخمین میزان آب و حجم آبکشی مورد نیاز

میزان آب مورد نیاز در انواع روش‌های تونل‌سازی متفاوت و در تونل‌سازی مکانیزه بسیار بیش‌تر از روش متعارف می‌باشد. در روش مکانیزه، آب مورد نیاز برای خنک کردن کله حفاری و کاهش دمای دوغاب حفاری سینه‌کار، باید در مخازن ذخیره، توسط چیلرها خنک شده و با سامانه پمپ و لوله‌کشی مجزا به جبهه کاری منتقل شود. سپس، از طریق لوله تخلیه دوغاب و مصالح حفاری به بیرون تونل هدایت می‌شود. میزان آب مورد نیاز به پارامترهای زیر بستگی دارد:

۱- ویژگی‌های زمین و دستگاه حفاری یا روش حفاری و نوع کله حفاری،

۲- سطح و میزان آب زیرزمینی ورودی در سینه‌کار به تونل و مرطوب بودن زمین،

۳- برنامه اجرایی و شیفت‌های کاری و تغییرات آب مورد نیاز مصرفی در طول زمان و پیشروی.

میزان آبکشی مورد نیاز نیز به پارامترهای زیر بستگی دارد:

۱- ویژگی‌های هندسی تونل شامل طول و شیب،

۲- نوع پوشش و آب‌بندی آن و نوع درزها،

۳- سطح آب زیرزمینی و رژیم هیدروژئولوژی و فصل کاری،

۴- نوع روش حفاری. در روش متعارف عملاً آبکشی ناشی از آب مصرفی چندان قابل ملاحظه نبوده و صرفاً آب زیرزمینی ورودی به تونل باید هدایت و تخلیه شود.

۱- Glass Reinforced Plastic (GRP)

در حفاری مکانیزه در تونل با طول متوسط با شیب خیلی کم، نسبت‌های تقریبی درصد سهم مصرف آب در کارگاه مکانیزه تونل‌سازی، با جبهه‌کاری خشک در جدول (۵-۲) ارائه شده است. در صورت خشک بودن جبهه کار، حرارت تولیدی در کله حفاری افزایش یافته و نیاز به آب خنک برای خنک نمودن کله حفاری بیش‌تر خواهد شد. معمولاً در این شرایط نیاز به سیستم خنک کن آب در کارگاه می‌باشد.

جدول ۵-۲- نسبت‌های تقریبی درصد سهم مصرف آب در کارگاه مکانیزه تونل‌سازی با جبهه کاری خشک

ردیف	نوع مصرف	محدوده تقریبی درصد مصرف
۱	خنک کردن تجهیزات و کله حفاری	۵۰-۴۰
۲	شستشو، غبارزدایی و دوغابی کردن مصالح حفاری جهت تخلیه	۴۵-۳۵
۳	شستشو و سایر مصارف	۶-۴
۴	کارخانه تولید قطعات بتنی	۷-۵
۵	دوغاب	۵-۳
۶	بهداشت، تغذیه و آشامیدن	۴-۲

۵-۴-۴- چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده آبرسانی و آبکشی در تونل‌سازی

با توجه به تجربیات اجرایی موجود، چالش‌ها و توصیه‌های زیر برای بهبود بازده سامانه آبرسانی و تخلیه ارائه می‌شود:

- ۱- در تونل مکانیزه با شیب به سمت بیرون که بخشی از زهکشی از کف تونل به صورت ثقلی اتفاق می‌افتد، باید فضای مناسب زیر تراورس‌های ریل‌بندی در نظر گرفته شود. در صورت کم بودن این فضا و عدم تمیزکاری منظم، معمولاً با انباشت گل ولای و رسوبات و نخاله‌ها این فضا مسدود شده و آب و گل ولای ریل‌ها را در بر می‌گیرد و باعث اختلال و استهلاک در حمل و نقل می‌گردد.

- ۲- در روش متعارف و در حالت شیب به سمت خارج تونل با احداث کانیو در کنار تونل هدایت آب‌های زهکشی شده به سمت بیرون صورت می‌پذیرد. در این نوع حفاری حجم آب مورد تخلیه فقط مربوط به آب زیرزمینی و آب مصرفی برای غبارزدایی و شستشوی دستگاه‌ها است. در حالت شیب به سمت داخل با احداث حوضچه در فواصل مشخص، آب جمع شده از طریق پمپاژ و لوله‌کشی به سمت بیرون تخلیه می‌شود.

- ۳- در تونل بلند در مواردی ممکن است از گالری فرعی زهکش در بخش نزدیک به فضای بیرون و سطح زمین در مجاورت تونل استفاده شود. این کار می‌تواند با ایجاد حوضچه و پمپاژ آب از قسمت میانی تونل به فضای بیرون نیز صورت پذیرد.

- ۴- هجوم آب زیاد به داخل تونل خصوصاً در شرایط شیب به داخل یکی از چالش‌های مهم در طراحی سامانه آبکشی است. عدم شناسایی و پیش‌بینی سفره‌های آب زیرزمینی یا لایه‌های آبدار با حجم زیاد باعث افزایش ریسک این رخداد می‌شود. توصیه می‌شود در صورت احتمال برخورد با این شرایط، یا تمهیدات آب‌بندی و انحراف و ایجاد پرده و نظایر آن در نظر گرفته شده یا در صورت مجاز بودن و تصمیم به تخلیه آب، با پیش حفاری سوراخ‌های زهکش نسبت به تخلیه کنترل شده اقدام گردد. در صورت احتمال هجوم ناگهانی آب، علاوه

بر تمهیدات ایمنی پرسنل و ماشین‌آلات، باید سیستم پمپاژ کمکی و اضطراری با ظرفیت کافی در کارگاه پیش‌بینی گردد.

نمونه مشکلات و چالش‌های ناشی از انباشت آب در تونل در شکل (۵-۸) نشان داده شده است.



هجوم و انباشت آب در تونل با شیب منفی و عدم کفایت سیستم تخلیه

انباشت زهاب تخلیه نشده از تونل و اختلال در عبور و مرور در روش متعارف

شکل ۵-۸- مخاطرات و چالش‌های ناشی از انباشت آب در تونل

۵- ریزش آب از سقف تونل روی دستگاه‌ها و تجهیزات تونل‌سازی و پرسنل از دیگر چالش‌های کار در محیط آبدار است. در این شرایط توصیه می‌شود در طول تونل از چتر موقت با ورق و در جبهه کاری از چتر موقت روی تجهیزات و سامانه برقی و روشنایی استفاده شود. پرسنل نیز باید در این شرایط از لباس و کفش مناسب ضد آب استفاده نمایند.

۵-۵- روش ترابری و انتقال مواد، مصالح و نفرات

۵-۵-۱- برنامه‌ریزی حمل و نقل در کارگاه تونل‌سازی

حمل و نقل و ترابری در کارگاه تونل‌سازی شامل تردد پرسنل به کارگاه، در داخل کارگاه، در داخل تونل به صورت پیاده و ماشینی، حمل مصالح و مواد به کارگاه، حمل تجهیزات و ماشین‌آلات به کارگاه و به بیرون آن، حمل مواد و مصالح و ابزار و وسایل در داخل کارگاه و در داخل تونل، تخلیه مصالح حفاری و نخاله از داخل تونل به بیرون و حمل و نقل امدادی و اضطراری در کارگاه و داخل تونل می‌باشد. برنامه‌ریزی حمل و نقل در تونل‌سازی شامل ملاحظات و موارد زیر می‌باشد:

۱- برآورد نیازهای حمل و نقل کارگاه در زمان‌های مختلف. حجم مصالح تخلیه بسته به نوع زمین و روش حفاری و امکانات اجرایی متفاوت است و می‌تواند در زمین سخت تا نرم از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ تن بر ساعت متغیر باشد. البته در ترابری حجم مصالح بیش‌تر مورد استناد قرار می‌گیرد. برآورد نرخ پیشروی و حجم حفاری از مهم‌ترین مسائل در طراحی سامانه حمل و نقل و تخلیه مصالح و انتخاب نوع و تعداد و ظرفیت ماشین‌آلات می‌باشد. برای برآورد حجم حفاری معمولاً ضریب تورم مصالح باید با توجه به نوع سنگ یا خاک برآورد شود. این ضریب در

- شرایط معمول بین ۱/۳ تا ۱/۷ در خاک و سنگ می‌باشد.
- ۲- برای تخمین نیاز حمل و نقل لازم است نرخ پیشروی و حجم مواد و مصالح مورد نیاز و تخلیه و پرسنل مورد نیاز و تردد آن‌ها بر اساس شیفت‌های کاری برنامه‌ریزی شود. نرخ پیشروی شامل پیش‌بینی میانگین، حداقل و حداکثر و تغییرات زمانی آن می‌باشد. نرخ پیشروی در حفاری مکانیزه بر اساس زمان مورد نیاز برای عملیات مختلف حفاری، نصب قطعات و تزریق و کارهای تکمیلی برآورد می‌گردد که البته بسته به شرایط زمین تغییر می‌نماید.
- ۳- تامین سوخت و توان شامل مخازن سوخت و سیستم سوخت‌رسانی و تامین توان تجهیزات حمل و نقل برقی،
- ۴- پایش، تعمیرات و نگهداری سیستم حمل و نقل و ایجاد پایانه مجهز به جرثقیل مناسب برای تعمیرات و جایگزینی و تامین لوازم یدکی پرمصرف و مورد نیاز،
- ۵- بهینه‌سازی مصرف انرژی در حمل و نقل و ملاحظات زیست محیطی و تعبیه سیستم تهویه مناسب برای تخلیه دود ناشی از لوکوموتیو و ماشین‌آلات حمل و نقل،
- ۶- ملاحظات کنترل ترافیکی، ایمنی و علائم و امنیت حمل و نقل و ارتباطات لازم و استفاده از راننده و پرسنل مجرب و آموزش دیده برای کار با وسایل نقلیه.

۵-۵-۲- روش‌ها و ماشین‌آلات ترابری

ترابری بیرون از تونل به روش‌ها و با استفاده از ماشین‌آلات متداول صورت می‌پذیرد و عمده تفاوت و بخش مهم ترابری مربوط به داخل تونل می‌باشد. در حفاری متعارف و در تونل کوتاه، از ماشین‌آلات متداول بسته به ابعاد تونل استفاده می‌گردد و نکته مهم انتخاب ابعاد ماشین‌آلات حمل و نقل است. در تونل متوسط و بلند، بسته به روش حفاری و پوشش، ماشین‌آلات لازم انتخاب شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش حفاری مکانیزه روش‌های حمل و نقل داخل تونل برای حمل نفرت و قطعات بتنی و مصالح به داخل و تخلیه مصالح حفاری عبارتند از:

- ۱- سامانه ریلی با لوکوموتیو دیزلی، برقی، باتری‌دار و هوای فشرده. معمولاً لوکوموتیو دیزلی به علت قابلیت سوخت گیری برای فواصل طولانی و ایمنی بیش‌تر در حوادث برق‌گرفتگی در مقایسه با لوکوموتیو برقی و در دسترس بودن قدرت موتور مختلف و لوازم یدکی و تعمیرات آسان‌تر بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته آلودگی هوای داخل تونل از معایب اصلی آن محسوب می‌شود که برای کنترل آن از فیلتر و کاتالیزور سوخت برای احتراق کامل‌تر استفاده می‌شود. انتخاب قدرت لوکوموتیو بر اساس شیب تونل و تعداد واگن و وزن آن‌ها در هر رام قطار صورت می‌پذیرد. برای سیستم دبل استروک که در آن در هر مرحله دو گام پیشروی صورت می‌پذیرد، وزن کامل هر رام قطار حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ تن، سرعت کارکرد آن‌ها بین ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر بر ساعت، ارتفاع آن‌ها بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر و قدرت آن‌ها بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلووات می‌باشد. برای نصب ریل روی قطعات بتنی از تکیه‌گاه و تراورس فولادی موقت پیچ شده به سگمنت یا تکیه‌گاه بتنی تعبیه شده در سگمنت و تراورس فولادی در فواصل حداکثر یک متری استفاده می‌گردد و ریل‌های ۱۲ متری روی آن قرار می‌گیرد.

انتخاب ماشین‌آلات و روش حمل و نقل مواد و مصالح و نفرات با توجه به قطر و طول تونل و نوع زمین صورت می‌پذیرد. ابعاد لوکوموتیو و واگن‌ها باید به نحو مناسب انتخاب شود. حداقل ابعاد متداول واگن‌ها حدود ۱۵۰ در ۱۵۰ سانتی‌متر با طول حدود ۶ متر و از ارتفاع لوکوموتیو مقداری بیش‌تر است. واگن حمل مصالح معمولاً حداقل ۸ تا ۱۰ مترمکعب ظرفیت دارد و وزن آن با بار به بیش از ۲۰ تن بالغ می‌شود. واگن حمل مسافر معمولاً حدود ۱۰ نفر ظرفیت دارد. واگن حمل سگمنت حداقل ۳ قطعه را حمل می‌نماید. واگن‌های کفی ساده برای حمل سگمنت، لوله، داکت تهویه، پاکت سیمان، کابل، ریل، تراورس و لوازم یدکی و تجهیزات و ابزارکار استفاده می‌شوند و معمولاً طولی حدود دو برابر واگن‌های معمولی دارند. معمولاً در هر رام قطار یک لوکوموتیو، یک واگن نفربر، یک واگن کفی، ۲ تا ۳ واگن حمل قطعات بتنی، ۲ تا ۳ واگن حمل شن نخودی و ۱۰ تا ۱۲ واگن حمل و تخلیه مصالح حفاری بسته می‌شود.

۲- ماشین‌آلات لاستیکی که در تونل‌ها با طول کم‌تر قابلیت و توجیه استفاده دارند. البته در این حالت با توجه به طول کم‌تر سیستم حمل و نقل سرعت انتقال مواد و مصالح نیز کم‌تر خواهد بود.

۳- سیستم مونوریل که در زمین سخت و شرایطی که امکان هجوم آب و حجم قابل توجه آب زهکشی وجود دارد، کاربرد مناسبی خواهند داشت.

۴- تسمه نقاله برای تخلیه مصالح حفاری که اغلب برای تونل سنگی با حجم کم آب قابل استفاده مناسب می‌باشند. همچنین، در مقاطع کوچک‌تر تونل که امکان استفاده از لوکوموتیو مشکل است، می‌توان از این روش استفاده نمود. در مواقعی که شیب تونل هم نسبتاً زیاد است این روش نسبت به استفاده از لوکوموتیو با محدودیت کم‌تری مواجه می‌شود. که در تونل کنجانچم در غرب کشور تجربه شده است. البته برای مقاطع با سطح مقطع کم‌تر از حدود ۲۵ متر مربع استفاده از تسمه نقاله با محدودیت جانمایی مواجه می‌شود. در روش‌های حفاری نیمه مکانیزه هم که طول تونل نسبتاً زیاد است، این روش توجیه مناسبی خواهد داشت. در روش مکانیزه این سیستم تخلیه تا طول ۱۵ کیلومتر هم استفاده شده است ولی برای طول بیش‌تر مصرف انرژی و هزینه نگهداری قابل توجهی پیدا می‌کند. این روش نیاز به دسترسی برای تعمیرات و نگهداری در تمام مسیر داشته و در صورت ایجاد اشکال در یک نقطه از آن، سیستم به صورت خطی از کار می‌افتد. در صورتی که در روش متداول ریلی خرابی یک لوکوموتیو یا بخشی از مسیر آسان‌تر تعمیر و جبران می‌شود و وقفه کم‌تری در عملیات ایجاد می‌نماید. در این روش همچنین باید چسبندگی مصالح به نوار نقاله کم و به راحتی قابل شستشو بوده و باعث افزایش وزن و جرم آن نشود.

۵- لوله‌گذاری برای تخلیه مصالح حفاری دوغابی شده که در شرایطی که حجم آب مصرفی یا ورودی برای حفاری زیاد باشد توجیه مناسبی دارند. به عنوان نمونه، حمل و نقل قطعات دستگاه حفاری و مصالح به کارگاه تونل‌سازی در تونل‌های کرمان، بازی دراز و آزاد، در شکل (۵-۹) و حمل و نصب قطعات ریل در خارج و داخل تونل، در تونل انتقال آب سد آزاد، در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۵-۹- حمل و نقل قطعات دستگاه حفاری و مصالح به کارگاه تونل‌سازی در تونل‌های کرمان، بازی‌دراز و آزاد



شکل ۵-۱۰- حمل و نصب قطعات ریل در خارج و داخل تونل در تونل انتقال آب سد آزاد

۵-۵-۳- چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده ترابری و انتقال مواد و مصالح و نفرات

علاوه بر ملاحظات فوق، سایر نکات، چالش‌ها و توصیه‌های بهبود بازده سامانه حمل و نقل و جابجایی بر اساس

تجربیات و بررسی‌های موجود به شرح زیر می‌باشند:

۱- تدوین برنامه تعمیر و نگهداری مستمر واگن‌ها و لوکوموتیوها همراه با تامین قطعات یدکی پرمصرف و کنترل و

اصلاح و تعویض ریل‌ها در حین کار.

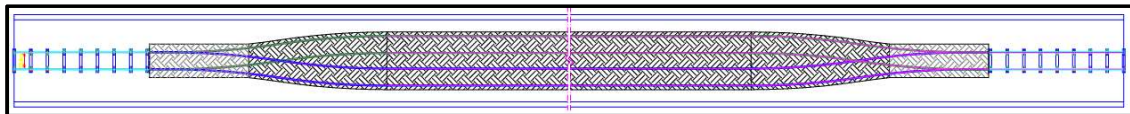
۲- آسیب‌دیدگی تجهیزات، قطعات بتنی و سایر ادوات و ماشین‌آلات در حین حمل و نقل از مسائلی است که باید

بر حسب نوع و مشخصات بار مورد توجه قرار گیرد. تعبیه نشیمن‌گاه جاذب ارتعاش چوبی و لاستیکی در حد

مورد نیاز و تکیه‌گاه‌ها و نگهدارنده و مهار کننده برای جلوگیری از جابجایی و سقوط بار، ایمنی حمل و نقل را

افزایش و آسیب‌های وارده را کاهش می‌دهد.

- ۳- عدم رعایت مسایل ایمنی در حین بارگیری و باراندازی برای ماشین‌آلات و پرسنل همواره به عنوان یکی از خطرات اصلی در اجرا محسوب می‌شود. استفاده از ادوات و روش‌های استاندارد و لباس ایمنی برای پرسنل و نیز علائم هشدار برای افراد عبوری از الزامات اصلی و تاثیرگذار در کاهش مخاطرات احتمالی هستند.
- ۴- شستشو و پاکسازی دوره‌ای ماشین‌آلات، واگن‌ها و تسمه نقاله‌های حمل و نقل بر بازده کلی آن‌ها تاثیرگذار است و لازم است در برنامه اجرایی نگهداری آن‌ها به این مساله توجه شود.
- ۵- مکانیزم حمل و نقل داخل تونل با توجه به قطر تونل و سیستم پوشش و فضای قابل استفاده. در روش مکانیزه، مسیر ریلی داخل تونل انتقال آب متداول معمولاً یک مسیر تک بانده می‌باشد، بنابراین جهت عبور دو قطار از کنار یکدیگر نیاز به استفاده از پذیرگاه یا سوزن یا سوئیچ مخصوص می‌باشد. معمول‌ترین روش مورد استفاده بدین منظور، استفاده از کالیفرنیا سوئیچ می‌باشد. طول سکوی انتظار این سوئیچ‌ها کمی بیش از طول قطار بوده و امکان عبور دو قطار از کنار یکدیگر را در داخل تونل فراهم می‌کند. با توجه به زمان‌بندی سیکل عملیات ترابری، استفاده از تعدادی کالیفرنیا سوئیچ ثابت و متحرک پیش‌بینی می‌گردد که در فواصل مورد نیاز در تونل قرار می‌گیرند. مدت زمان ورود و خروج قطارها در کالیفرنیا سوئیچ ثابت و متحرک تا ۵ دقیقه می‌باشد. تعداد سوئیچ‌های مورد نیاز با افزایش طول تونل و پیشروی عملیات حفاری افزایش می‌یابد. در حالت حفاری دبل استروک فواصل کالیفرنیا سوئیچ‌ها بیش‌تر در نظر گرفته می‌شود (شکل ۵-۱۱).



شکل ۵-۱۱- نمونه کالیفرنیا سوئیچ ثابت در حالت متقارن در داخل تونل

- ۶- در حمل و نقل ریلی در حفاری مکانیزه سیستم ترابری به گونه‌ای طراحی می‌شود که امکان بهره‌برداری از حداکثر توان دستگاه حفاری فراهم باشد. بدین منظور لازم است همواره یک قطار در بخش دنباله پشتیبان در حال بارگیری و تخلیه باشد و یک قطار دیگر در سوئیچ پشت دنباله پشتیبان آماده باشد تا به محض خروج قطار از محدوده دنباله پشتیبان، قطار دیگر توسط لوکوموتیو موجود در محل جایگزین و قطار حامل واگن‌های پر از خاک توسط آن لوکوموتیو به خارج منتقل شود. در چنین شرایطی اگر شرایط زمین و شرایط اجرایی کارگاه اجازه دهد، می‌توان در ساعت‌های متوالی کار حفاری و سگمنت‌گذاری را انجام داد. لازم به ذکر است، مجاورت کالیفرنیا سوئیچ متحرک با دنباله پشتیبان همچنین پیش‌بینی چیدمان مناسب برای دنباله پشتیبان به منظور تخلیه هم‌زمان سگمنت و گراول به موازات پرشدن واگن‌های حمل مواد حفاری شده امری مهم بوده و در صورت عدم رعایت این نکته، زمان پیش‌بینی شده جوابگوی سیکل حفاری نبوده و عملیات حفر تونل با تأخیر مواجه خواهد شد.
- ۷- معمولاً برای انتخاب بهینه‌ترین سناریوی حمل و نقل و تهیه گراف کارکرد قطارها، لازم است گزینه‌های مختلف

با موقعیت و تعداد سوئیچ مختلف بررسی شده و بهترین زمان و هزینه بدون ایجاد وقفه در عملکرد دستگاه حفاری، ملاک انتخاب گزینه برتر قرار گیرد. ممکن است در مقاطعی از مسیر سطح مقطع تونل برای اجرای سوئیچ به طور موضعی افزایش یابد. فاصله سوئیچ‌ها در حالت عادی به حدود ۲ کیلومتر بالغ می‌شود. در خارج تونل حمل و نقل مواد و مصالح نظیر سیمان و شن و ماسه و قطعات پیش‌ساخته معمولاً توسط ماشین‌آلات باربری سنگین نظیر بونکر، کامیون، تریلر و بوژی انجام می‌شود. سایر نیازهای حمل و نقل در خارج تونل شامل جابجایی پرسنل و تدارکات مربوطه می‌باشد.

۵-۶- روش انتقال داده‌ها و مخابرات

انتقال داده و ارتباطات خصوصاً در تونل‌های بلند از مسائل بسیار مهم محسوب می‌شود و اهداف آن عبارتند از:

- ۱- هماهنگی‌های اجرایی و تدارکات و پشتیبانی،
 - ۲- مکان‌یابی و مسیریابی با استفاده از سامانه‌های موقعیت مکانی،
 - ۳- سامانه‌های کنترل و فرمان از راه دور برای انفجار، دستگاه‌های حفاری، ربات‌های بتن‌پاشی و تهویه خودکار،
 - ۴- هشدارها و درخواست خدمات اضطراری و امدادی،
 - ۵- برداشت و انتقال اطلاعات پایش و بررسی آن از راه دور.
 - ۶- ملاحظات ارتباطات و انتقال اطلاعات عبارتند از:
- انتخاب روش مناسب ارتباطی باسیم، فیبرنوری و بیسیم رادیویی و وای فای^۱ برای هرکارکرد شامل ارتباطات با بیرون از سایت، ارتباط بخش‌های مختلف کارگاه، ارتباطات داخل تونل و ارتباطات برخط و کنترل از راه دور (شکل ۵-۱۲)،



شکل ۵-۱۲- اتاق کنترل ماشین حفاری مکانیزه مجهز به سامانه پایش، پردازش، ذخیره و انتقال اطلاعات و کنترل از راه دور ماشین

- تجهیزات مناسب و محل نصب آن‌ها با پوشش کامل و قدرت ارتباطی رادیویی در شرایط بد آب و هوایی و

- رطوبت و غبار غلیظ و مجهز به کنترل نویز و اغتشاشات محیطی،
- تنظیم حجم اطلاعات برای انتقال و ذخیره و پردازش و مرکز مدیریت و پشتیبانی ارتباطات کارگاه،
- سامانه‌های جایگزین ارتباطی در شرایط اضطراری،
- امنیت اطلاعات و بدافزارها،
- سامانه‌های برق اضطراری و باتری برای تجهیزات ارتباطی،
- نصب سامانه‌های تقویت در فواصل مناسب مثلاً ۳۰۰ تا ۵۰۰ متری بر حسب قدرت دستگاه،
- استفاده از سامانه‌های مکان‌یابی مناسب جی.پی.اس و گلوناس^۱ یا هم‌زمان برای افزایش دقت،
- استفاده از تجهیزات فردی مجهز به حسگر شتاب که در زمان برخورد یا سقوط درخواست کمک اضطراری ارسال می‌کند، مجهز به هشدار لرزشی در محیط پر صدا، مجهز به سیستم ارتباطی یو ایچ اف^۲ و وی ایچ اف^۳،
- قابلیت استفاده از باند رادیویی خاص در مواقع لزوم، باتری با دوام با قابلیت کارکرد بالا (بیش از ۲۰ ساعت) و
- قابلیت ارسال پیام در صورت نیاز.

۵-۷- تهیه و ساخت قطعات بتنی پیش‌ساخته

۵-۷-۱- کارخانه تولید قطعات بتنی پیش‌ساخته

در اغلب پروژه‌های تونل مکانیزه نیاز به کارخانه تولید قطعات بتنی پوشش می‌باشد. محاسبه ظرفیت تولید، مشخصات فنی انواع قطعات تولیدی شامل قطعات بتنی، درزبندها و یراق آلات، جانمایی کارخانه، ظرفیت ذخیره و روش نگهداری و دپوی قطعات و حمل آن‌ها از ملاحظات اصلی این بخش می‌باشند. محل کارخانه تولید قطعات بتنی بر اساس فضای مورد نیاز کارخانه و دپو و فاصله حمل حداقل و مناسب تا تونل انتخاب می‌شود. مولفه‌های تجهیز در این مورد عبارتند از:

- ۱- فضای سربسته و کنترل شده مورد نیاز کارخانه و سوله سالن تولید و تاسیسات جانبی و فضای دپو و انتخاب روش تولید شامل روش ایستا و روش متحرک و خودکار،
- ۲- تجهیزات ساخت شامل قالب، عمل‌آوری با بخار و تعمیرگاه. معمولاً در روش متحرک و خودکار از سیستم بخار کم فشار استفاده و در روش ایستا از کلاhek بخار کم فشار یا ترکیبی از روش‌های عمل‌آوری بهره گرفته می‌شود.
- ۳- کارگاه آرماتوربندی شامل دستگاه خم و برش و جوشکاری و شابلن سببندی،
- ۴- کارگاه تولید بتن شامل سنگ شکن و تجهیزات تولید سنگدانه، دپوی مصالح، سیلوهای سیمان، مخازن آب و

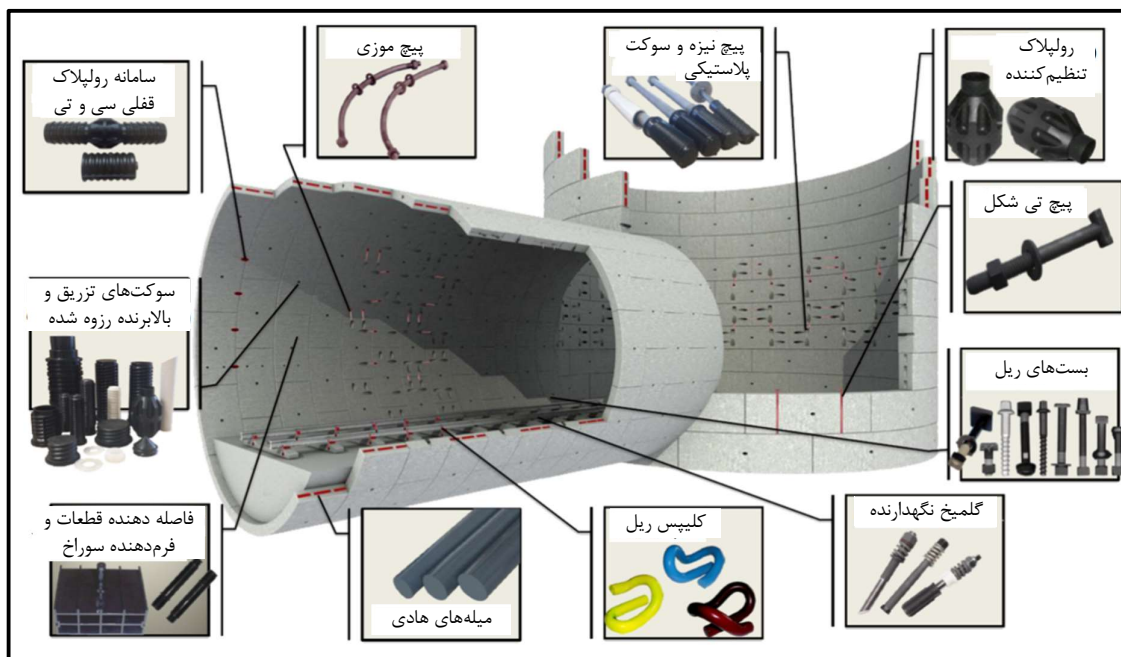
۱- Russian High Orbit Satellite Navigation System (GLONASS)

۲- Ultra High Frequency (UHF)

۳- Very High Frequency (VHF)

افزودنی و بچینگ ساخت بتن،

- ۵- ماشین‌آلات تولید شامل جرثقیل، لیفتراک، تریلر کفی، تراک میکسر بتن،
 - ۶- محل استقرار نیروی انسانی مورد نیاز شامل کارگر، تکنسین و اپراتور تجهیزات و راننده ماشین‌آلات،
 - ۷- سامانه و آزمایشگاه کنترل کیفی.
- ادوات و اجزای مختلف قطعات پیش‌ساخته که باید برای اجرای آن تامین شوند در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۵-۱۳- ادوات مختلف نصب قطعات بتنی در تونل و چاه

۵-۷-۲- برنامه‌ریزی تولید قطعات بتنی پیش‌ساخته

فرآیند تولید قطعات بتنی شامل مراحل زیر می‌باشد:

- ۱- تهیه، حمل و ذخیره مصالح اولیه شامل شن و ماسه، سیمان، آب و مواد مضاف و افزودنی مانند الیاف، فوق روان کننده و مواد آب بندکننده و تهیه طرح اختلاط،
- ۲- آماده‌سازی و روغن‌کاری قالب قسمت‌های مختلف هر رینگ،
- ۳- ساخت قفسه میلگرد و قرار دادن آن در قالب و جاسازی قطعات مدفون و فاصله دهنده‌ها و صفحات فلزی،
- ۴- بتن‌ریزی و ارتعاش و متراکم نمودن بتن و پرداخت سطوح نمایان (ارتعاش بتن در قالب از داخل و خارج امکان پذیر است ولی معمولاً از سمت بیرون قالب متداول‌تر است).
- ۵- عمل‌آوری در بخار پس از گیرش اولیه،
- ۶- بازکردن قالب، شماره‌گذاری، جابجایی و حمل نمونه‌ها (در خاک‌های خورنده قطعات بتنی قبل از انبار کردن ممکن است نیاز به پوشش ضد خوردگی خارجی داشته باشند و در تونل‌های انتقال فاضلاب پوشش داخلی)،

- ۷- تهیه و نصب نوار آب‌بند و چسب آن و اجزای الحاقی و بولت‌های اتصال (بولت فلزی یا پلیمری)،
- ۸- چیدن نمونه‌ها در فضای انبار و کنترل کیفیت و رواداری‌ها و انجام ترمیم‌های موردی،
- ۹- بارگیری و حمل قطعات و بولت‌ها به کارگاه و داخل تونل برای نصب،
- ۱۰- حمل، جابه‌جایی و نصب از عوامل مهم و تأثیرگذار برای قطعات پیش‌ساخته است که جزء معیارهای اولیه برای تعیین مشخصات آن محسوب می‌شوند. به دلایل اقتصادی، معمولاً بازکردن قالب‌ها و جابه‌جایی قطعات بتن پیش‌ساخته پس از گذشت حدود ۲ تا ۸ ساعت از بتن‌ریزی انجام می‌شود. برای انجام این کار، باید ملاحظات لازم در طرح اختلاط و نسبت ابعادی قطعه و فولادگذاری در آن در نظر گرفته شود.
- روش مناسب بلند کردن و نقاط اتکا باید در طراحی مشخص شود. جهت مناسب و ارتفاع مجاز روی هم گذاری قطعات باید با توجه به مقاومت بتن در زمان حمل و انبار کردن در فرایند طراحی تعیین شود. فشار ناشی از انبار کردن و جابه‌جایی باید مد نظر قرار گیرد و برای جلوگیری از ایجاد آسیب در حین این فعالیت‌ها باید از فاصله‌دهنده مناسب استفاده شود. نقاط مناسب اتکا باید برای زمان حمل در بیرون و داخل تونل یا چاه مشخص شود.
- معمولاً توصیه می‌شود حجم دپوی قطعات آماده شده معادل مصرف تقریباً سه ماه کار تونل‌سازی باشد. البته توجه شود که حمل قطعات به داخل بتن باید پس از اتمام ۲۸ روز از زمان ساخت آن صورت پذیرد.
- ابعاد قطعات باید طوری باشد که به راحتی در فضای تونل جابه‌جا و نصب شود و در صورت انبار شدن مسیر عبور کارکنان و تجهیزات را کاملاً مسدود نکند.
- سامانه کنترل دمای مصالح، پیش گرمایش و سرمایش مصالح و تنظیم دمای فضای داخل کارخانه از ملاحظات بسیار مهم در تولید قطعات بتنی است که بر کیفیت آن اثر می‌گذارد. نمودار فرآیند تولید قطعات پیش‌ساخته پوشش تونل در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است.

پلیمری برای شکستگی‌ها، روکش آب‌بندکننده اپوکسی یا پلیمری برای اصلاح تخلخل و حفرات و رزین اپوکسی برای پرکردن ترک‌ها می‌باشد (برای جزئیات بیشتر در این زمینه به راهنمای شماره ۵۳۳ انجمن بتن آمریکا^۱ مراجعه شود). این ترک‌ها ممکن است در تونل در اثر بار ناگهانی ناشی از جازدن نامناسب سگمنت و یا بار خزشی وابسته به زمان ایجاد شده باشند. خروج آب از این ترک‌ها می‌تواند نشانگر وجود ترک در تمام عمق بتن و ضخامت پوشش سگمنتی باشد. در یک دید کلی به لحاظ زمانی، عواملی که ممکن است از مرحله بتن ریزی در قالب تا مرحله بهره‌برداری منجر به وارد شدن صدمه به سگمنت بتنی شوند، را می‌توان به سه گروه تقسیم‌بندی نمود:

- عواملی که سبب خسارت سگمنت قبل از نصب می‌گردد، مانند آبرفتگی حین خشک شدن و آبرفتگی پلاستیک، بار حین خارج کردن سریع سگمنت از قالب، شوک حرارتی و بار وارده حین دپو و حمل قطعات مانند به کارگیری وسایل نامناسب برای جابجایی قطعات و به کارگیری روش نامناسب برای انبار قطعات بر روی هم.
 - عواملی که سبب ایجاد خسارت حین نصب سگمنت و پیشروی دستگاه می‌گردد مانند بار وارده حین نصب سگمنت، بار وارده از طرف جک‌های دستگاه، بار ناشی از تماس پوشش عقب دستگاه با سگمنت و بار حاصل در اثر نصب رینگ‌های سگمنتی با خروج از محوریت زیاد.
 - عواملی که سبب ایجاد خسارت پس از نصب سگمنت می‌گردد، مانند وجود بستر نامناسب پشت پوشش سگمنتی ناشی از تزریق نامناسب یا نامتقارن فضای خالی پشت سگمنت و بار بیش از حد وارد بر پوشش ناشی از شرایط زمین شناسی محیط در برگیرنده تونل.
- ۲- نوارهای آب‌بندکننده بین قطعات بتنی معمولاً در قالب تعبیه شده یا با چسب مخصوص و پس از تکمیل فرآیند گیرش بتن در کارخانه یا ورودی تونل در پیرامون قطعات بتنی در محل یا شیار پیش‌بینی شده نصب می‌شوند. نوعی از نوارها نیز تحت عنوان خودترمیم^۲ دارای نوار هیدروفیل^۳ یا آب دوست هستند که برای آب‌بندی بهتر پس از نصب سگمنت و در صورت نفوذ آب منبسط شده و با پرکردن فضاهای خالی آب‌بندی را تکمیل می‌کنند. نوارها نقش مهمی در آب‌بندی پوشش تونل داشته و کیفیت مواد، جزئیات و کیفیت اتصال، رواداری نصب نوار روی قطعه بتنی و رواداری نصب قطعات بتنی و روی هم قرار گرفتن آن‌ها بر عملکرد آن تاثیر مستقیم دارد.
- ۳- نوارهای آب‌بند باید تطابق هندسی مناسب با سگمنت برای نصب در گوشه‌های آن داشته باشند و دارای قوس یا شکستگی پیش‌بینی شده برای محکم شدن به گوشه‌های قطعه باشند، تا پس از اتصال دچار جدایی نگردند.

۱- ACI533.5R

۲- Self Heal

۳- Hydrophil

۴- در مواردی که نیاز به مقاومت بسیار بالا در رینگ پوشش وجود داشته باشد یا برای اجرای چاه و انشعاب یا اتاقک شیرخانه و تاسیسات دیگر نیاز به حفاری موضعی تونل در مقطعی خاص وجود داشته باشد، از قطعات پیش‌ساخته فولادی مشبک استفاده می‌شود. ابعاد و شرایط مرزی این قطعات مشابه قطعات بتنی مجاورشان می‌باشد.

– نکته دیگر در مورد نصب قطعات بتنی در تونل، محل‌های اتصال پوشش قطعه‌ای به پوشش بتن درجا می‌باشد. در این محل باید پیش‌بینی لازم در وجه تماس قطعات با بتن درجا برای تعبیه اتصال برشی و آب‌بندی لازم صورت پذیرد. معمولاً برای تامین اتصال برشی از زائده‌ها و کلید و برای تامین آب‌بندی از نوار آب‌بند نصب شده روی قطعه که داخل بتن درجا قرار می‌گیرد استفاده می‌شود.

۵-۸- انتخاب نیروی انسانی متخصص و سازمان‌دهی

۵-۸-۱- ملاحظات انتخاب نیروی انسانی

برای انجام عملیات تونل‌سازی مکانیزه دارای بازده بالا لازم است گروه‌های کاری، دارای قابلیت لازم و کافی باشند. افزایش بازده و سرعت کار و کاهش وقفه در عملیات، باعث کاهش هزینه نیروی انسانی که بخش قابل توجهی از هزینه پروژه تونل را تشکیل می‌دهند، می‌گردد. ملاحظات زیر که برای این گروه‌های کاری لازم است به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- آموزش، مهارت و تجربه کافی برای اجرا،
- ۲- توجیه بودن در مورد شرایط پروژه و کلیات و ریسک‌های طرح،
- ۳- رعایت پروتکل‌های مستندسازی، گزارش فعالیت‌ها و حوادث و ارتباطات،
- ۴- آمادگی و آشنایی کامل در مورد دستورالعمل‌های ایمنی، سلامت و محیط زیست کارگاه،
- ۵- آمادگی و دانش نشان دادن عکس‌العمل مناسب در شرایط خاص و فوق‌العاده،
- ۶- آشنایی کامل با کارکرد ماشین‌آلات و تجهیزات مرتبط با فعالیت هر گروه،
- ۷- آگاهی از شرایطی که باید به متخصص یا مدیر برای انجام اقدام متقابل مناسب مراجعه یا کسب تکلیف کرد.
- ۸- ملاحظات افزایش بهره‌وری کارکنان نیز به قرار زیرند:
 - تمرکز پرسنل و اعلام به موقع ماموریت‌های کاری،
 - قابلیت انجام فعالیت‌های متنوع خصوصاً توسط پرسنل رده پایین‌تر،
 - شرح دقیق و شفاف وظایف و نحوه همکاری و اتحاد،
 - آموزش و تمرین مستمر و به روزسانی مهارت‌ها،
 - اهمیت دادن به نوآوری و مهندسی ارزش و تشویق،
 - استفاده از ابزار، لباس و تجهیزات مناسب.

۵-۸-۲- نمودار سازمانی در تونل‌سازی مکانیزه

انواع گروه کاری مورد نیاز در تونل‌سازی مکانیزه شامل رده پرسنلی از جمله مدیر ارشد و میانی، مهندس، تکنسین، راننده و اپراتور، سرکارگر، کارگر فنی و پرسنل خدماتی هستند. در ابتدا گروه مدیریت شامل مدیر فنی و بازرگانی پروژه با زیرگروه‌های شامل منابع انسانی، مالی و تدارکات و پشتیبانی، قراردادی و پیمان، محیط زیست و امور اشخاص ثالث، سلامت و ایمنی و امنیت، مهندسی تجهیزات (برق، مکانیک، تهویه، هیدرولیک)، مهندسی ژئوتکنیک (مکانیک سنگ، زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، ژئوفیزیک)، دفتر فنی طراحی و نقشه‌های اجرایی، آب‌بندی و تزریق، مهندسی تونل (حفاری و پوشش)، ارزیابی و کنترل کیفی و آزمایشگاه (بتن، آب، مکانیک سنگ)، تجهیزات برقی و مکانیکی و ماشین‌آلات کارگاه، مدیریت اجرایی قرار دارد.

مدیریت اجرایی کارگاه نیز شامل زیرگروه‌های زیر می‌باشد:

۱- تونل (اپراتور ماشین، تکنسین برق، تکنسین مکانیک و تهویه، تیم تعویض قطعات دستگاه، مسئول جابجایی و کنترل جایگذاری قطعات بتنی و پرکردن پشت قطعات و تزریق دوغاب، مسئول کنترل تخلیه مصالح و آب و تسهیم نقله، تیم تعمیرات ریل و واگن و پاکسازی مسیر تردد و راننده لوکوموتیو، مسئول ثبت و گزارش اطلاعات و عملکرد دستگاه، تیم سلامت و ایمنی)،

۲- بتن و مصالح سنگی پرکننده و دوغاب تزریق (مسئول حمل و نقل و رانندگان لودر و کامیون، اپراتور سنگ شکن، مسئول انبار مصالح سنگی و سیمان و الیاف و مواد افزودنی، اپراتور بچینگ، مسئول حمل و نقل و رانندگان تراک میکسر، تیم آرماتوربندی، اپراتور قالب و بتن‌ریزی، مسئول نمونه‌گیری و کنترل کیفی، اپراتور دستگاه بخار و تخلیه قالب، مسئول حمل و نقل و رانندگان کفی و جرثقیل و لیفتراک، مسئول ترمیم، تیم سلامت و ایمنی)،

۳- نقشه‌برداری (مسئول نقشه‌برداری و کنترل مسیر حفاری و شیب و فراز تونل، مسئول آزمایش ژئوفیزیک و شناسایی جبهه حفاری، مسئول نگارش درزها و مستندسازی مغزه‌ها، مسئول پایش هم‌گرایی مقطع و قطعات بتنی و ترک)،

۴- ترمیم و تعمیر (تیم تعمیرات تجهیزات پشتیبانی برق و مکانیک و تهویه، تعمیرات قطعات ماشین حفاری، تیم تزریق تماسی، تعمیرات قطعات بتنی، تعمیرات آب‌بندی و اصلاح درزها، تیم تعمیرات ماشین‌آلات و ابزار)،

برای برنامه‌ریزی و کاهش هزینه و ریسک کارکرد نیروی انسانی و افزایش بهره‌وری ملاحظات زیر در نظر گرفته

می‌شود:

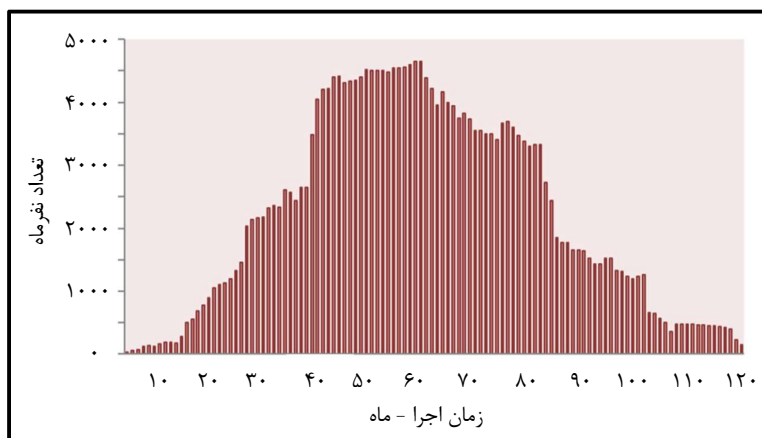
۱- تهیه نمودار زمانی تعداد نیروی انسانی مورد نیاز بر اساس برنامه زمان‌بندی اجرایی،

۲- استفاده از روش‌های مکانیزه و خودکار و کنترل از راه دور تا حد ممکن،

۳- کنترل کیفی و نظارت دقیق بر فرایندها برای پیشگیری از وقوع خطاها و اشتباهات انسانی و حوادث.

نمونه نمودار زمانی نیروی انسانی مورد نیاز در طول اجرای تونل و نمونه برنامه زمان‌بندی خطی تونل برای برآورد

نیروی انسانی و امکانات مورد نیاز بر حسب موقعیت و زمان در فصل اول در شکل ۵-۱ نشان داده شد. نمودار ارائه شده در شکل ۵-۱۵ توزیع زمانی تعداد نفرات مشغول به کار در پروژه در ابتدای تجهیز کارگاه تدوین شده و نیازهای تجهیز منابع انسانی و امکانات مورد نیاز که بر اساس آن به دست می‌آید را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، لازم نیست تمام امکانات در طول پروژه به صورت یکنواخت ارائه گردد. این نمودار در ارتباط با جریان نقدینگی مورد نیاز پشتیبانی و تجهیز خواهد بود. برنامه زمان‌بندی خطی تونل برای برآورد نیروی انسانی و امکانات مورد نیاز بر حسب موقعیت و زمان در بر گیرنده تمام اجزای مهم اجرایی و فعالیت‌های اصلی و موقعیت زمانی آن‌ها نشان داده می‌شود. در محور افقی زمان‌بندی و در محور قائم کیلومتر تراژ تونل نشان داده می‌شود که موقعیت زمانی و مکانی تمام فعالیت‌ها در آن منعکس می‌گردد.



شکل ۵-۱۵- نمونه نمودار زمانی نیروی انسانی مورد نیاز

فصل ۶

روش‌های اجرای پوشش نهایی

پوشش‌ها ملزومات ویژه‌ای هستند که برای نگهداری و پایداری‌سازی زمین اطراف تونل در طول عمر طراحی و کنترل ورود آب‌های زیرزمینی به داخل تونل و خروج آب از تونل به کار می‌روند. عمر مفید اولیه پوشش دائمی تونل انتقال آب حدود یکصد سال در نظر گرفته می‌شود و لذا ملاحظات لازم برای حصول آن علاوه بر طراحی باید در انتخاب مشخصات فنی مصالح و اجرا لحاظ گردد. در این فصل روش‌های اجرای پوشش نهایی تونل انتقال آب همراه ملاحظات مصالح و کنترل کیفی، مشکلات و چالش‌های متداول اجرای پوشش و ملاحظات و توصیه‌های بهبود کیفیت و بازده اجرا مورد بحث قرار گرفته است.

انواع مختلف پوشش‌های دائم تونل عبارت‌اند از بتن درجای مسلح و غیرمسلح، قطعات پیش‌ساخته، بتن‌پاشیده و پوشش مرکب بتن و فولاد. پوشش بتن درجا از نظر اجرایی روشی بسیار انعطاف‌پذیر است که بسته به نیاز می‌تواند مسلح یا غیرمسلح باشد. این پوشش معمولاً نیاز به نگهداری موقت زمین برای حفظ پایداری حفاری دارد و عملاً به عنوان لایه دوم پوشش در سامانه نگهدارنده دو مرحله‌ای محسوب می‌شود. قطعات پیش‌ساخته قوسی روشی موثر و اقتصادی در تونل‌سازی، به‌ویژه در خاک‌های نرم و سنگ‌های ضعیف محسوب می‌شود. این سامانه می‌تواند به صورت پوشش یک مرحله‌ای اجرا شود. استفاده از این روش در تونل‌سازی مکانیزه و در مسیرهای طولانی بسیار مفیدتر است و از طرفی در حین اجرا به حضور افراد و انجام عملیات در قسمت‌های محافظت‌نشده نیازی نیست. تاکنون صدها کیلومتر تونل در سرتاسر جهان به این روش اجرا شده است. پوشش‌های قطعات پیش‌ساخته برای آب‌بندی ممکن است یک یا دو لایه و اش‌آب‌بند داشته باشند که در وجوه پیرامونی قطعات و محل تماس بین آن‌ها قرار می‌گیرد و پس از نصب و فشردن قطعات به یکدیگر، درز بین آن‌ها را آب‌بند می‌کند. عملیات نهایی این پوشش، تزریق تماسی است که برای پرکردن فضای بین قطعات و زمین و برقراری سطح تماس همسان انجام می‌شود. عدم ایجاد سطح تماس یکنواخت پوشش با زمین، می‌تواند سبب بارگذاری نامتقارن و آسیب‌دیدگی پوشش شود.

در زمین‌های سنگی، خود سنگ به علاوه سامانه نگهدارنده تکمیلی، البته در صورت نیاز، وظیفه تامین پایداری را به عهده دارند. بتن‌پاشیده معمولاً به عنوان پوشش تکمیلی در شرایطی به کار می‌رود که نیاز به تغییر سامانه نگهدارنده هم موجود باشد. رفتار وابسته به زمان بتن‌پاشیده سازگاری خوبی با رفتار سنگ‌های پرتنش دارد. یک یا دو مرحله‌ای بودن این پوشش بستگی به جزئیات طراحی خواهد داشت. کاربرد بتن‌پاشیده در زمین‌های نرم نیز به دلیل قابلیت تطبیق با شکل حفاری و مراحل نگهداری در حال افزایش است. این پوشش برای تونل کوتاه و اتصال تونل‌ها بسیار اقتصادی است.

در زمین‌های ناپایدار، بتن‌پاشیده معمولاً به صورت دو یا چند مرحله‌ای اجرا می‌شود. مرحله اول برای حفظ پایداری سطح حفاری و مرحله دوم، برای برابری درازمدت کامل می‌شود. در زمین‌های سخت‌تر این پوشش با ترکیب میل مهار استفاده می‌شود که وظیفه پایداری گوه‌ها را به عهده دارند. این میل مهارها بخشی از پوشش دائم هستند و باید ملاحظات حفاظت در برابر خوردگی در آن‌ها رعایت شده باشد. در زمین‌های نرم، بتن‌پاشی یک مرحله‌ای به دلیل مسائل دوام کم‌تر به کار می‌رود. در این زمین‌ها، پوشش معمولاً حاوی تیرهای مشبک و شبکه‌های میلگرد برای کنترل تغییر شکل و یکپارچگی است. سایه‌ها یا فضاهای خالی پشت میلگردها احتمال خوردگی را تشدید می‌کند. با استفاده از بتن

الیافی بدون میلگرد یا تیر مشبک فلزی می‌توان از این مساله جلوگیری کرد؛ البته در این حالت باید تغییر شکل، ضخامت و کیفیت اجرا با دقت بیشتری کنترل شود. پوشش‌های بتن‌پاشیده معمولاً به دلیل اجرای مرحله‌ای به تعبیه درز نیاز ندارند. در صورت نیاز به آب‌بندی در این پوشش، باید از بتن‌پاشیده آب‌بند یا پوشش‌های آب‌بندی پاششی سطحی استفاده کرد.

در پوشش مرکب بتن و فولاد معمولاً نیاز به نگهداری موقت برای حفظ پایداری حفاری با تعبیه قاب یا خرپای ساخته شده با میلگرد (لتیس) برطرف می‌شود. بخش دوم پوشش در این سامانه‌های نگهدارنده، بتن‌پاشیده یا درجا خواهد بود که در صورت استفاده از هر کدام از آن‌ها ضوابط مذکور را می‌توان اعمال نمود. در این نوع پوشش، قاب‌ها باید زائده‌های کافی برشی برای ایجاد عملکرد مرکب بتن و فولاد مدفون داشته باشند و ملاحظات پیشگیری از خوردگی در آن‌ها رعایت شده باشد. معمولاً در این روش ابتدا لایه‌ای بتن‌پاشیده پایا اجرا و قاب روی آن نصب می‌شود و فضاهای خالی با بتن یا بتن‌پاشیده پایا و حاوی مواد بازدارنده خوردگی پر می‌شود. مزیت این روش بهره‌گیری از ظرفیت پوشش نگهدارنده اولیه برای تحمل بارهای نهایی است و به اقتصادی‌تر شدن طرح منجر می‌شود.

حضور فولاد در بتن مسلح به شکل‌های مختلفی اتفاق می‌افتد که شامل این موارد می‌شود: پروفیل که مقاطع مرکب را ایجاد می‌کند، میلگرد که مقاطع بتن مسلح را ایجاد می‌کند، مش که بتن‌پاشیده مسلح ایجاد می‌کند، شبکه‌های سیمی بافته‌شده که فروسیمان ایجاد می‌کند و الیاف که بتن یا بتن‌پاشیده الیافی ایجاد می‌کند. شبکه‌های سیمی بافته‌شده می‌تواند به صورت یک تا چند لایه باشد. معمولاً برای ایجاد فروسیمان از شبکه‌های دولایه یا پانل سه‌بعدی استفاده می‌شود. این نوع پوشش برای بارهای اولیه یا دائمی مانند لتیس پیوسته عمل می‌کند. در موارد لزوم می‌توان میلگرد تقویتی را در نقاط مدنظر روی این شبکه‌های سیمی اضافه کرد. در صورت تعبیه پلاستوفوم داخل این پانل‌ها پوشش فروسیمان ساندویچی ایجاد می‌شود. مزیت این سامانه این است که می‌تواند به عنوان قالب درجا عمل کند.

۶-۱- روش بتن‌ریزی درجا با استفاده از قالب‌های ثابت و لغزان

مراحل اجرای پوشش بتن درجا پس از نگهداری اولیه عبارتند از اجرای غشای آب‌بند در صورت لزوم، نقشه‌برداری و تنظیم مقطع تمام شده، آرماتوربندی، قالب‌بندی و تعبیه نوار آب‌بند در محل‌های قطع طولی و عرضی بتن، پمپاژ بتن برای کف، دیواره‌ها و تاج، انجام کنترل کیفی مصالح و اجرا و عمل‌آوری مناسب و نهایتاً تزریق تماسی بخش فوقانی.

بتن درجا در طول تونل به دلیل مساله انقباض بتن، نیاز به تعبیه درز اجرایی دارد که معمولاً فقط بتن در آن قطع می‌شود و به دلیل تغییرات حرارتی کم داخل تونل، به تعبیه درز انبساطی و قطع میلگرد طولی نیازی نیست. با تنظیم زمان بتن‌ریزی به منظور آزادسازی کرنش ناشی از آبرفتگی اولیه و تعبیه فولاد طولی کافی، می‌توان نیاز به درز انقباض را تا حد زیادی برطرف کرد. برای آب‌بندی در این روش به آب‌بندی درز اجرایی طولی و عرضی با نوار آب‌بند داخلی یا سطحی نیاز خواهد بود.

پرکردن فضاهای خالی ناشی از اضافه حفاری، به‌ویژه در تاج تونل، از مهم‌ترین بخش‌های کار محسوب می‌شود و

ممکن است در شرایط اضافه حفاری زیاد، بار ثقلی زیادی به پوشش تحمیل نماید. انجام تزریق تماسی در این روش بسیار مهم است و برای برقراری ارتباط کامل زمین با پوشش و انتقال بار یکنواخت این کار باید با دقت و در محل تماس پوشش با زمین با پرکردن فضاهای خالی باقی‌مانده، پرکردن درزه‌ها و سست‌شدگی‌های ناشی از حفاری و جبران آب‌رفتگی بتن انجام شود.

از نظر مشخصات مصالح، ترکیبات بتن درجا برای سازه‌های زیرزمینی معمولاً شامل حداقل مقاومت ۲۸ مگاپاسکال برای ارضای شرایط دوام (و مقادیر بیش‌تر در شرایطی که سرعت آب در داخل تونل زیاد باشد)، سیمان نوع II برای مقابله با سولفات احتمالی موجود در خاک، افزودنی فوق روان‌کننده برای کاهش نسبت آب به سیمان به حدود ۰/۴ و کم‌تر و افزایش اسلامپ به حدود ۱۲ تا ۱۴ برای قابلیت تراکم و ویبره شدن و زبری مناسب سطح تمام شده، آب بندکننده مانند پلیمرها یا ۵٪ مواد حباب‌زا (خصوصاً در شرایط مواجهه با یخ‌زدگی) یا افزودن ژل یا پودر میکروسیلیس یا فیلر مناسب برای کاهش نفوذپذیری در موارد لزوم می‌باشند. برای تنظیم و انتخاب مشخصات نهایی مصالح، رعایت ضوابط آئین‌نامه بتن ایران (آبا) ملاک عمل قرار می‌گیرد.

۶-۱-۱- آماده‌سازی قالب

برای شروع عملیات اجرایی پوشش بتنی ابتدا لازم است، اطمینان کافی از پایداری موقت محیط حاصل شود. ملاحظات عمومی آرماتوربندی، قالب‌بندی، بتن‌ریزی و عمل‌آوری بتن بر اساس آئین‌نامه‌ها و استانداردهای موجود سازه‌های بتنی می‌باشد. فرآیند اجرای پوشش پس از تثبیت اولیه زمین و پاکسازی و اجرای غشای آب‌بند (در صورت لزوم) آغاز می‌شود.

۶-۱-۱-۱- عملیات آرماتوربندی

عملیات آرماتوربندی شامل تنظیم و تفکیک قطعات اجرایی بر اساس نقشه‌های کارگاهی، برش و خم، اعمال پوشش ضدخوردگی در صورت نیاز، حمل و دپو در محل مناسب در تونل، نقشه‌برداری و تنظیم نشانگرها و نصب لقمه و خرک و فاصله‌دهنده و سایر مهارهای نگهدارنده به دیواره تونل، بستن قفسه آرماتور با رعایت ملاحظه عدم آسیب به غشای آب بند و کنترل کیفی قفسه و وضعیت آرماتورهای انتظار می‌باشد. آرماتوربندی در تونل بسته به مراحل بتن‌ریزی و ابعاد تونل، در یک یا چند مرحله انجام می‌شود. در مقاطع کوچک، کل آرماتوربندی در یک مرحله صورت می‌گیرد و برای مقاطع بزرگ‌تر ابتدا کف‌بندی و آرماتورهای انتظار دیواره و سپس آرماتوربندی دیواره و تاج اجرا می‌شود که متناظر با این فرآیند، قالب‌بندی و بتن‌ریزی هم صورت می‌پذیرد. از چالش‌های مهم عملیات آرماتوربندی و توصیه‌های تجربی برای بهبود بازده اجرایی آرماتوربندی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- عدم رعایت موقعیت آرماتور نسبت به قالب و افزایش یا کاهش پوشش بتن خصوصاً در مقاطع دارای اضافه و کسر حفاری. رواداری نصب آرماتور با عملیات نقشه‌برداری کنترل می‌گردد. بر اساس راهنماهای انجمن بین

المللی تونل، رواداری مجاز قرارگیری آرماتور و میزان پوشش بتن برای ضخامت‌های تا ۲۰ سانتی‌متر، ۵ میلی‌متر و برای ضخامت‌های بیش‌تر، ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. بر اساس آئین‌نامه بتن ایران و توصیه‌های نشریات انجمن بین‌المللی سدهای بزرگ، پوشش بتن روی میلگردها در سمت زمین برای بتن معمولی حداقل ۷۵ میلی‌متر و در سمت داخل در صورت عبور آب با سرعت بالا تا ۱۰۰ میلی‌متر و برای سرعت خیلی زیاد هم از پوشش فولادی استفاده می‌شود. موقعیت قرارگیری میلگرد باید با فاصله‌دهنده به قالب و با بست مناسب به زمین در موقعیت صحیح تثبیت شود.

۲- عدم رعایت فاصله مناسب بین آرماتورها و تراکم آرماتورها معمولاً باعث مشکلات و بیریه کردن بتن و کرموشدن و تخلخل آن خصوصاً در قسمت‌های پایینی قالب‌های دیوار تونل می‌گردد. فاصله بین آرماتورها بر اساس آئین‌نامه‌ها به طور معمول، حداقل ۱/۵ برابر اندازه حداکثر سنگدانه و با رعایت ملاحظات تراکم و بیریه در بتن‌های کف می‌باشد. فاصله بین آرماتورها با بستن محکم قفسه‌ها و استفاده از فاصله‌گذارها حفظ و تنظیم می‌شود.

۳- خوردگی و زنگ زدگی میلگردها یکی از چالش‌های مهم کاربرد آن‌ها محسوب می‌شود. میلگرد در حین آرماتوربندی نباید دچار زنگ زدگی مفرط در حد پوسته شدن باشد و در این صورت باید زنگ زدایی و پاک کردن سطح میلگرد صورت پذیرد. مناسب‌ترین راه حفاظت از خوردگی میلگرد در پوشش تونل، استفاده از بتن با نفوذپذیری کم و رعایت پوشش متناسب بتن روی میلگرد است. راهکارهای دیگر در شرایط خاص عبارتند از استفاده از مواد افزودنی بازدارنده مهاجر خوردگی در بتن، پوشش دادن سطح میلگردها با رزین اپوکسی و استفاده از میلگردهای غیرفلزی یا پلیمری.

۴- امکان کاهش یا حذف آرماتور می‌تواند کیفیت اجرای پوشش را بهبود بخشد. انواع مختلف تسلیح در بتن درجا برای تونل تحت فشار و انتقال آزاد آب مورد استفاده قرار می‌گیرند و هر یک ملاحظات اجرایی خاص خود را دارند. در مواردی در تونل با مقطع دایره‌ای یا غیر تحت فشار ممکن است نیازی به تسلیح نباشد و از بتن غیرمسلح استفاده گردد. در برخی موارد هم که بار نامتقارن و میزان لنگر خمشی در مقطع خیلی زیاد نباشد، می‌توان از بتن الیافی با الیاف سازه‌ای استفاده نمود. استفاده از الیاف به جای میلگرد باعث افزایش سرعت اجرای پوشش و سهولت و کیفیت اجرا نیز می‌شود.

۵- امکان استفاده از تسلیح با الیاف مزایای قابل توجهی در تونل‌سازی به همراه دارد. الیاف معمولاً در دو نوع ماکرو برای اهداف سازه‌ای و بهبود خواص مکانیکی و میکرو برای کنترل ترک خوردگی و آبرفتگی و افزایش دوام در برابر آتش‌سوزی به کار می‌روند. الیاف ماکرو معمولاً با طول بیش از ۳۵ میلی‌متر و نسبت طول به قطر حدود ۷۰ تا ۱۰۰ و به صورت آجدار یا قلابدار هستند. در تونل‌های انتقال آب استفاده از الیاف پلیمری^۱ به جای فولادی به

دلیل کنترل خوردگی و کیفیت سطح بهتر ترجیح داده می‌شود. استفاده توام از الیاف میکرو و ماکرو می‌تواند خواص فیزیکی و مکانیکی را بیش‌تر ارتقاء دهد. در تونل‌های انتقال آب استفاده از الیاف باعث بهبود آب‌بندی، مقاومت کششی و فرسایش سطحی در سرعت‌های زیاد آب و افزایش دوام می‌شود. در برخی موارد برای افزایش توام کیفیت بتن و استفاده از مزایای سازه‌ای و اجرایی بتن الیافی از ترکیب میلگرد و الیاف استفاده می‌گردد.

۶- برای جلوگیری از آسیب دیدن غشاهای آب‌بند و سوراخ یا پاره شدن آن‌ها حین آرماتوربندی بهتر است علاوه بر اجرای کنترل شده در نور و دید و فضای مناسب، از دو یا سه لایه پوشش حفاظتی نظیر ژئوتکستایل استفاده شود. استفاده از قفسه نیمه بافته شده برای دیواره و تاج و نیز استفاده از خم ۱۳۵ درجه در انتهای میلگردها یا کلاهک پلاستیکی می‌تواند به کاهش احتمال این آسیب‌ها کمک نماید.

۶-۱-۱-۲- چالش‌ها و تجربیات بهبود بازده اجرایی قالب‌بندی

قالب‌بندی تونل به صورت‌های مختلف چوبی و فلزی دستی، نیمه خودکار و لغزنده با کنترل از راه دور صورت می‌پذیرد. در طول کوتاه و مقاطع خاص، از قالب‌بندی متعارف با شمع‌بندی و مهار موضعی دستی استفاده می‌شود. برای طول بلند، اغلب قالب فلزی، دارای گنتری چرخ‌دار است که روی ریل حرکت می‌کند و پس از اجرای دال کف شروع به کار می‌نماید. این قالب به دو صورت ثابت و تلسکوپی است که نوع تلسکوپی قابل جمع شدن و بازشدن برای حرکت به سمت جلو است.

در مقاطع کوچک‌تر تونل انتقال آب، از قالب‌های ۳۶۰ درجه استفاده می‌شود که با پایه مدفون یا مهار دیواری به زمین متصل شده و بتن‌ریزی تمام مقطع در یک مرحله انجام می‌پذیرد. این قالب باید برای کنترل نیروی زیر فشار ناشی از بتن تازه طراحی شود که معمولاً حدود ۷۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال است. در بسیاری از موارد هم که ابعاد مقطع بزرگ‌تر بوده و فضای کافی برای جانمایی گنتری وجود دارد، یک گنتری با پایه تکیه‌گاهی ابتدا و انتهای قالب، قالب را در محل خود نگه می‌دارد.

در طول کوتاه و مقاطع خاص مانند تقاطع و قوس تند و انشعاب و ترانزیشن که شکل مقطع تغییر می‌نماید، استفاده از قالب فلزی بسیار مشکل بوده و در این موارد بیش‌تر از قالب چوبی استفاده می‌گردد. چالش‌ها و تجربیات بهبود بازده اجرایی قالب‌بندی در ادامه ارائه شده است.

۱- بر اساس تجربیات بهبود بازده اجرایی قالب‌بندی قبل از انجام بتن‌ریزی، کنترل‌های زیر باید انجام شوند:

- کنترل مجاری یا سوراخ‌های بتن‌ریزی در بدنه قالب و توالی استفاده از آن‌ها،
- کنترل موقعیت جک‌های تلسکوپی و رواداری‌های قالب،
- کنترل سیستم پمپ بتن و مفاصل و اتصالات آن،

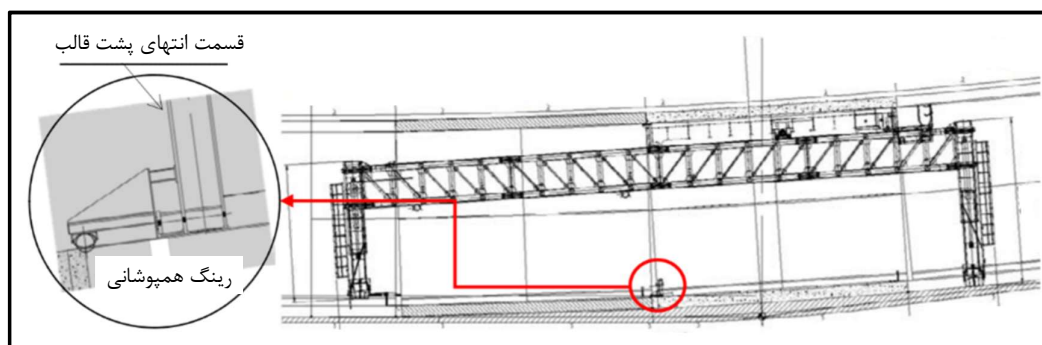
- کنترل کارکرد ویبراتورها و بدنه و جک‌های آن،
- کنترل آب‌بندی ابتدا و انتهای قالب در جهت طولی.
- ۲- از نکات مهم اجرایی، کنترل موقعیت قالب با عملیات نقشه‌برداری قبل از انجام بتن‌ریزی و نیز در حین بتن‌ریزی می‌باشد. در صورت جابجایی قالب بیش از رواداری‌های مجاز در حین بتن‌ریزی، باید بتن‌ریزی متوقف و پس از بررسی وضعیت و اعمال روند اصلاحی، عملیات ادامه یابد.
- ۳- کیفیت سطح تمام شده بتن‌ریزی و میزان زبری آن در تونل انتقال آب بر اساس کیفیت قالب‌بندی و کیفیت بتن و نحوه تراکم آن حاصل می‌شود. معمولاً در تونل انتقال آب حداقل زبری ممکن برای کاهش افت هیدرولیکی مورد نظر می‌باشد. کنترل سالم بودن تمام ویبراتورها و روی بدنه قالب برای پیشگیری از کرم‌شدن سطح بتن بسیار مهم است. استفاده از بتن خودتراکم در برخی موارد که تراکم آرماتور هم زیاد و ضخامت پوشش و حجم بتن‌ریزی کم است می‌تواند به بهبود کیفیت سطح تمام شده کمک نماید.
- ۴- بتن‌ریزی تمام مقطع می‌تواند به کیفیت بتن کمک شایانی نماید و باعث حذف درز سرد عرضی و نیاز به نوار آب‌بند و مشکلات مترتب ناشی از نصب آن شود. برای قالب‌بندی قطعات طویل‌تر معمولاً از قالب تلسکوپی استفاده می‌گردد که دارای گنتری نگهدارنده نیز هستند. در مقاطع قطر کم، بتن‌ریزی در قالب تمام مقطع و یا تلسکوپی با ایجاد انشعاب در لوله بتن‌ریزی و بتن‌ریزی هم‌زمان در پیرامون قالب صورت می‌پذیرد.
- ۵- زمان باز کردن قالب بستگی به شرایط محیطی و ابعاد و ضخامت مقطع و طرح اختلاط بتن دارد. باز کردن پیش از موعد مناسب قالب می‌تواند باعث افزایش ریزش و یا ایجاد ترک سازه‌ای در بتنی که هنوز به مقاومت قابل قبول نرسیده است، شود. در موارد خاص می‌توان زمان باز کردن قالب را با استفاده از افزودنی زودگیرکننده به کم‌تر از ۱۲ ساعت نیز کاهش داد. راهنمای قالب‌بندی شماره ۳۴۷ انجمن بتن آمریکا^۱ معمولاً رسیدن به ۷۰ درصد مقاومت نهایی را برای باز کردن قالب توصیه می‌نماید.
- ۶- فاصله طولانی بین زمان روغن زدن قالب تا زمان بتن‌ریزی منجر به آبله‌گونگی سطح و کیفیت پائین سطوح تمام شده بتنی می‌گردد. قبل از روغن زدن لازم است سطح قالب کاملاً تمیز شده و عاری از بتن خشک شده باشد.
- ۷- کارکرد بیش از حد ویبراتورها روی قالب یا تنظیم نبودن آن می‌تواند باعث جدایی دانه‌ها در بتن و ناهمگنی کیفیت آن شود. بدین منظور کنترل و تنظیم این ویبراتورها و پیش‌بینی ویبراتورها دستی در صورت خرابی آن‌ها و البته تعبیه دریچه و بیره کردن روی بدنه قالب برای شرایط خاص توصیه می‌شود. بهتر است از ضربه زدن به قالب در هر شرایطی خودداری شود.
- ۸- در محاسبه بار وارد به قالب‌بندی علاوه بر مشخصات بتن و بتن‌ریزی باید ضخامت ناشی از اضافه حفاری

خصوصاً در تاج تونل در نظر گرفته شود. فشار بتن تازه وارد بر قالب در تاج تونل معمولاً بین ۱۴۰ تا ۱۸۰ کیلوپاسکال است. در دیواره نیز این فشار بر اساس ارتفاع بتن و جنس قالب محاسبه می‌گردد. قالب تونل عموماً به علت نصب ویبراتور روی بدنه آن باید برای بار ارتعاشی نیز طراحی شود. هر ویبراتور معمولاً مساحتی حدود ۳ متر مربع را پوشش می‌دهد. برای جزئیات بیش‌تر به راهنمای قالب‌بندی شماره ۳۴۷ انجمن بتن آمریکا مراجعه شود.

۹- در قالب‌بندی قطعه‌ای چوبی یا فلزی برای جلوگیری از شیرزدگی و شیارزدگی بتن پوشش باید درز بین قالب بسیار محدود و بسته باشد. در صورت وجود درز پس از قالب‌بندی می‌توان با استفاده از قالب فیلر یا انواع درزبند این کار را تکمیل نمود.

۱۰- در استفاده از ادوات فاصله‌گذاری و تنظیم پوشش بتن در قالب‌بندی باید مساله آب‌بندی پوشش بتنی مد نظر قرار گیرد و فاصله دهنده‌ها از نظر جنس و تعداد کولار برای جلوگیری از نشت آب مناسب باشند.

۱۱- در محل تغییر شیب طولی تونل باید عملیات تنظیم قالب در محل تغییر شیب صورت پذیرد. در این موارد معمولاً قطعه شیب در ۳ یا ۴ قسمت تقسیم شده و بتن‌ریزی می‌شود. ناحیه هم‌پوشانی این قسمت‌ها به عنوان درز اجرایی تلقی شده و جزئیات آب‌بندی مربوطه برای آن در نظر گرفته می‌شود (شکل ۶-۱).



شکل ۶-۱- تنظیم قالب در محل تغییر شیب تونل

۶-۱-۲- مراحل بتن‌ریزی و نمونه‌گیری

بتن‌ریزی در تونل شامل ساخت، حمل، پمپاژ و بتن‌ریزی، تراکم بتن، عمل‌آوری و ترمیم سطوح می‌باشد. در صورتی که سطح خاک یا سنگ با بتن‌پاشی اندود نشده باشد، باید در کف با بتن مگر و در دیواره با پوشش پلاستیکی یا یک لایه بتن‌پاشی پوشش داده شود. ساخت بتن معمولاً در بچینگ واقع در محدوده ورودی تونل انجام شده و با تراک میکسر به محل پمپ حمل می‌شود و سپس بر اساس توالی از پیش تعیین‌شده بتن‌ریزی، داخل قالب ریخته می‌شود. ظرفیت تولید و حمل بتن باید به گونه‌ای باشد که کل زمان بتن‌ریزی یک قالب کامل با درزهای اجرایی پیش‌بینی شده بیش از ۶ الی ۸ ساعت نشده و در هیچ مقطعی درز سرد ایجاد نگردد. عملیات بتن‌ریزی در تونل معمولاً به طور یکسره انجام می‌شود. در تونل حفاری شده انفجاری معمولاً اضافه حفاری زیاد بوده و در نتیجه حجم بتن‌ریزی نیز افزایش می‌یابد.

- چالش‌ها و تجربیات بهبود بازده اجرایی بتن‌ریزی در پوشش تونل عبارتند از:
- ۱- پیمانکار باید پیش‌بینی لازم را در مورد میزان افت اسلامپ بتن از محل ساخت تا بتن‌ریزی بر اساس طرح اختلاط، دمای بتن و محیط و زمان‌بندی این فرآیند انجام داده و با استفاده از افزودنی مناسب روان‌کننده یا کندگیرکننده، اسلامپ مناسب برای بتن‌ریزی در قالب را تحویل دهد. میزان افت اسلامپ در بتن‌های پمپ شده با لوله کشی ممکن است به ۳ تا ۵ سانتی‌متر برسد.
 - ۲- کنترل سرعت بتن‌ریزی در هر قالب باید انجام شده و ارتفاع بتن‌ریزی بیش از یک و نیم متر نباشد. همچنین، فشار پمپاژ بتن‌ریزی برای تکمیل بتن قالب باید تحت کنترل باشد. کم بودن فشار باعث ایجاد فضاهای خالی و زیاد بودن فشار باعث کمانش یا آسیب‌دیدگی قالب می‌گردد.
 - ۳- بتن‌ریزی از سوراخ‌های ردیف پایین یک سمت و سپس ردیف پایین سمت مقابل و به همین ترتیب ردیف دوم و سوم انجام می‌شود. در قالب تمام مقطع در تونل با قطر کم ممکن است کل بتن‌ریزی در یک مرحله انجام شود.
 - ۴- ۱۵ تا ۲۰ ثانیه ارتعاش جهت تراکم بتن در هر بتن‌ریزی از هر سوراخ لازم است. در صورت استفاده از بتن خود تراکم در پوشش کم ضخامت ممکن است ارتعاش بسیار محدود شود.
 - ۵- ماندن قالب به میزان مناسب تا رسیدن مقاومت بتن به حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد مقاومت نهایی ۲۸ روزه که عموماً حداقل ۱۲ تا ۱۴ ساعت برای بتن معمولی در نظر گرفته می‌شود. معمولاً برای پیشگیری از ترک خوردگی، قبل از بازکردن قالب مقاومت مشخصه بتن باید به حدود ۷ تا ۱۵ مگاپاسکال برسد. البته این مقادیر تا حدی تابع شرایط محیطی و قطر تونل هم هست و برای قطرهای کوچک‌تر محدودیت کم‌تری اعمال می‌شود.
 - ۶- کاهش طول قطعه بتن‌ریزی برای کاهش اثرات آبرفتگی طولی و ترک خوردگی بتن که البته باعث افزایش تعداد درزهای اجرایی می‌شود و ممکن است مشکلات آب‌بندی را تشدید نماید. لذا انتخاب طول قطع بهینه بر اساس امکانات اجرایی بسیار مهم است.
 - ۷- کنترل اضافه حفاری‌ها و آگاهی از میزان بتن پرکننده مورد نیاز برای آن. گاهی ممکن است به علت اضافه حفاری‌های زیاد، حجم بتن‌ریزی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و علاوه بر مشکلات اجرایی تراکم بتن و اعمال فشار بیش از حد به قالب، افت و انقباض بیش‌تر و احتمالاً ترک خوردگی بیش‌تری نیز در بتن ایجاد شود. ممکن است اضافه حفاری که عمدتاً در تاج تونل اتفاق می‌افتد، به روش دیگری از جمله بتن با مصالح پیش ریخته یا فوم بتن یا بتن سبک پر شود. در این موارد قبل از بتن‌ریزی، این فضاها با بسته‌های سنگدانه سبک یا معمولی پر شده و پس از اتمام بتن‌ریزی با تزریق دوغاب یا فوم بتن در داخل فضاهای خالی اقدام به پرکردن آن‌ها می‌شود.
 - ۸- معمولاً پس از باز کردن قالب بلافاصله ترمیم سطحی بتن در نقاط متخلخل یا کرموشده انجام می‌پذیرد. می‌توان با تعبیه غشای پلیمری در سطح قالب برای ایجاد سطح بتن یکنواخت بدون حفره و کرموشدگی اقدام نمود.
 - ۹- عمل‌آوری بتن در تونل پس از باز کردن قالب آغاز می‌شود و حداقل ۶ تا ۷ روز ادامه می‌یابد. این کار معمولاً با

اسپری آب انجام می‌شود. توجه شود که استفاده از جت آب با سرعت، پوشش بتن را ممکن است دچار آسیب نماید. اگر رطوبت داخل تونل بیش از ۹۰ درصد بوده و سرعت باد کم‌تر از یک متر بر ثانیه باشد، در دمای معمولی نیازی به عمل‌آوری بیش‌تر نمی‌باشد.

۱۰- نمونه‌گیری و کنترل کیفی باید بر اساس دستورالعمل‌های موجود انجام شود. در تونل‌ها معمولاً مقاومت سنین اولیه بسیار مهم است و در موارد نیاز تست ۲۴ ساعته هم صورت می‌پذیرد.

۳-۱-۶- نکته‌ها و توصیه‌های اجرایی

۱-۳-۱-۶- مشخصات فنی اجرایی عمومی عملیات تزریق

تزریق در تونل با اهداف و اشکال مختلفی نظیر تزریقات ژئوتکنیکی شامل تحکیمی و آب‌بندی و تزریقات سازه‌ای شامل تماسی و فشاری (برای ایجاد پیش تنش فشاری در اطراف پوشش تونل انتقال آب تحت فشار داخلی) صورت می‌پذیرد. تزریق تحکیمی معمولاً در عمق بسیار بیش‌تر، تزریق آب‌بندی در عمق متوسط تا کم و تزریق تماسی در عمق کم یا زیرسطحی انجام می‌شوند. ممکن است در برخی شرایط اهداف مشترکی برای تزریق تعریف شود. تزریق تماسی در تونل دارای پوشش بتنی درجا یا پیش‌ساخته عمومیت دارد؛ ولی در پوشش بتن‌پاشیده مورد نیاز نمی‌باشد. یکی دیگر از کاربردهای تزریق تماسی، تزریق پلاگ انسداد تونل دسترسی است. تزریق آب‌بندی و تحکیمی حسب نیاز توسط طراح پیش‌بینی می‌شوند.

- مواد و مصالح تزریق

مواد و مصالح تزریق در دو کلاس مورد استفاده قرار می‌گیرند که عبارتند از تزریق با اهداف موقت مانند پیش تحکیمی و آب‌بندی موقت و تزریق دائمی مانند تزریق سازه‌ای. در تزریق دائمی باید ملاحظات دوام مواد و مصالح برای برابری دراز مدت تونل مدنظر قرار گیرد. دوغاب معمولاً پایه سیمانی و با افزودنی و مواد مضاف مختلف می‌باشد. انتخاب نوع سیمان مناسب برای ساخت دوغاب تزریق عمدتاً بستگی به شاخص‌های دوام نظیر عوامل مهاجم شیمیایی نظیر سولفات و کربنات و میزان نیاز به قلیایی بودن دوغاب دارد.

دوغاب‌هایی که صرفاً نقش پرکننده و تماسی دارند اغلب از مواد پوزولانی، دوغاب تزریق تماسی با نقش توام آب‌بندی و پرکننده از مواد سیمانی و افزودنی‌های کریستالیزه شونده یا تزریق مواد شیمیایی (با رعایت ملاحظات زیست محیطی در صورت وجود ترکیبات سیانید)، دوغاب‌هایی که در شرایط وجود آب دارای گرا دیان هیدرولیکی تزریق می‌شوند از مواد پایه سیمانی با افزودنی پایدارکننده یا تک‌فازکننده و افزودنی زودگیرکننده یا افزاینده ویسکوزیته، دوغاب‌هایی که با هدف تحکیم زمین تزریق می‌شوند دارای ریزی بالا برای قدرت نفوذ بیش‌تر و در صورت نیاز به پرکردن ترک‌ها دارای ریزی بسیار بالا و افزودنی‌های پلیمری می‌باشند.

- طرح اختلاط

نسبت‌های آب به سیمان دوغاب‌های تزریق می‌تواند بین محدوده تقریبی ۰/۵ تا ۱/۵ متغیر باشد. هر چه این مقدار افزایش یابد مقاومت دوغاب کمتر می‌شود و ممکن است مقاومت تسلیم اولیه دوغاب در محدوده‌ای بین ۳ تا ۰/۵ پاسکال تغییر نماید. مقاومت فشاری تک محوری دوغاب بسته به طرح اختلاط می‌تواند بین ۵ تا ۱۵ مگاپاسکال یا بیش‌تر قرار گیرد. زمان شروع گیرش و ژل‌تینی شدن در دوغاب‌های معمولی می‌تواند بین ۱ تا ۱۵ دقیقه و زمان اتمام آن بین ۳ تا ۶۰ دقیقه باشد. این موضوع به ویسکوزیته یا مقاومت اصطکاکی داخلی دوغاب بستگی داشته و با افزایش دما نیز کاهش می‌یابد. جزئیات طرح اختلاط در طراحی و با توجه به خصوصیات نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی زمین و سیستم درزه و تخلخل آن و سایر پارامترهای مرتبط پیشنهاد می‌شود. این طرح اختلاط اولیه در کارگاه و با انجام آزمایش‌های تزریق تدقیق می‌گردد. دوغاب تزریق بهتر است دارای میزان آب انداختن کمتر از ۵ درصد باشد؛ در غیر این صورت، به دلیل آبرفتگی و انقباض دوغاب، نیاز به تزریق تکمیلی با فشار بالاتر یا با سیمان با ریزی بالا خواهد بود.

۶-۱-۳-۲- ملاحظات تزریق تماسی پوشش بتنی تونل

در پوشش درجا برای اطمینان از تماس کامل پوشش با زمین و انتقال صحیح بار، تزریق مناسب باید در حد فاصل پوشش و زمین صورت پذیرد. بتن درجا مقداری افت و آبرفتگی حین خشک‌شدن دارد که در بهترین شرایط اجرا نیز مقداری فاصله بین پوشش و زمین، به‌ویژه در تاج تونل ایجاد می‌کند. آبرفتگی بتن‌های متداول بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ میکروکرنش است. برای پرکردن این فضا با بتن یا دوغاب، باید لوله یا سوراخ با فاصله کافی برای اطمینان از حبس‌نشدن هوا تعبیه شود.

۱- تزریق تماسی در هر نقطه فشاری را بر پوشش وارد می‌کند که باید در حد تحمل زمین و پوشش درجا باشد و بار آن در طراحی پوشش لحاظ شود.

۲- آرایش تزریق با لحاظ ملاحظات آب‌بندی به‌ویژه در درزها تعیین می‌شود. حداکثر فواصل جاگذاری لوله‌های تزریق تماسی در طول تونل حدود ۳ تا ۵ متر و حداکثر زاویه آن‌ها نسبت به تاج تونل ۱۵ درجه در نظر گرفته می‌شود. بیش‌ترین حجم تزریق تماسی به طور معمول در تاج تونل رخ می‌دهد.

۳- تزریق باید با دوغاب با روانی مناسب و در حجم محدود و آبرفتگی کنترل شده باشد و برای پرکردن اضافه حفاری‌ها به آن اطمینان نشود و به طور کامل و متقارن تماس پوشش و زمین را برقرار کند.

۴- تزریق تماسی معمولاً تحت فشار ۱ تا ۵ بار انجام شده و در هر سوراخ پس از ۱۰ دقیقه ثابت ماندن فشار متوقف می‌گردد. عمق سوراخ‌های تزریق تماسی معمولاً مقداری در حدود ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر فراتر از ضخامت پوشش تونل است. البته در صورت اضافه حفاری باید ضخامت آن نیز در نظر گرفته شود.

۵- در صورت وجود جریان آب زیرزمینی و احتمال شسته شده دوغاب تزریقی، معمولاً ابتدا از سیمان با بلین معمولی و ماده زودگیر کننده و سپس از سیمان با بلین بالا برای پرکردن خلل و فرج باقیمانده استفاده می‌شود.

۶- اگر بتوان از بتن بدون آب‌رفتگی یا خودتراکم استفاده کرد، نیاز به تزریق تماسی تقریباً برطرف می‌گردد.

۶-۱-۳-۳- تجربیات اجرایی بهینه‌سازی عملیات تزریق

بهینه‌سازی عملیات تزریق را می‌توان با بهینه‌سازی طراحی، طرح اختلاط و روش اجرا انجام داد. بهینه‌سازی طراحی شامل تنظیم آرایش، موقعیت، عمق، امتداد و قطر سوراخ‌ها و تشخیص صحیح نیازهای تزریق می‌باشد. طراح باید این موارد را بر اساس تزریق‌های آزمایشی و بازخوردهای اجرایی و امکانات و شرایط کارگاه تنظیم و بهینه و طرح اختلاط اولیه را نیز بر اساس آن ارائه نماید. پس از آن در کارگاه، تنظیم طرح اختلاط برای حصول مشخصات فنی طراحی صورت می‌پذیرد.

در طرح اختلاط راهکارهای عمومی بهینه‌سازی عبارتند از:

۱- کاهش نسبت آب به سیمان برای افزایش مقاومت و کاهش آب‌رفتگی تا حد ممکن و استفاده از افزودنی‌های کاهنده شدید آب یا فوق روان‌کننده (معمولاً ۱ تا ۲ درصد وزن سیمان).

۲- جایگزینی مواد مضاف و پوزولانی مانند روباره آهن‌گذاری و خاکستر بادی و میکروسیلیس (۵ تا ۱۰ درصد وزن سیمان)، بنتونیت (۲ تا ۵ درصد وزن سیمان) و ورمیکولیت در مواردی که مقاومت زیادی مورد نیاز نمی‌باشد.

۳- استفاده از مواد افزودنی مناسب (معمولاً ۱ تا ۳ درصد وزن سیمان) برای بهبود مقاومت، گیرش سریع یا کند، کاهش نفوذپذیری و جلوگیری از آب‌ستگی حین تزریق و گیرش.

۴- استفاده از ریزی یا بلین مناسب سیمان برای مقاصد و مراحل مختلف تزریق خصوصاً در آب‌بندی و تحکیمی. معمولاً برای تزریق تحکیمی ابتدا از سیمان با ریزی معمولی و فشار و زمان تزریق کم‌تر و برای تزریق آب‌بندی و پرکردن ترک و درز، از سیمان با ریزی بالا (بلین ۶۰۰۰ تا ۸۰۰۰) و با فشار و زمان تزریق بیش‌تر استفاده می‌شود.

۵- انتخاب مواد تزریقی کارآ و مناسب برای اهداف مصرف مختلف، مثلاً تزریق پلیمر یا فوم و مواد شیمیایی آب بندکننده سریع در موارد لزوم.

۶- تنظیم مواد کندگیرکننده مناسب در مخزن تزریق همراه با تنظیم میزان مصرف دوغاب در فرآیند اجرا و پیشگیری از گیرش دوغاب قبل از تزریق با توجه به طول تونل و فاصله حمل و وقفه‌های مترتب با عملیات اجرایی.

۷- استفاده از ماسه با دانه‌بندی متناسب در ابتدای تزریق، در مواردی که حجم تزریق در درزه‌های زمین یا فضاهای خالی پشت پوشش بتنی قابل توجه است.

۸- پرکردن فضاهای خالی قابل توجه مانند فضای پشت قطعات بتنی با ماسه با تمیزی مناسب قبل از تزریق.

۹- استفاده کنترل شده از مواد مضاف دارای آب‌رفتگی قابل توجه مانند میکروسیلیس در تزریق‌های آب‌بندی.

در مرحله اجرا راهکارهای عمومی بهینه‌سازی عبارتند از:

- ۱- استفاده از روش اختلاط مناسب دوغاب تزریق. برای اختلاط دو روش هم‌زدن و تکان دادن وجود دارد که بسته به نوع مواد و میزان مصرف مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای اختلاط مناسب مواد با ریزی بسیار زیاد از روش‌های تکان دادن استفاده می‌شود.
- ۲- شستشوی سوراخ پس از سوراخ‌کاری برای افزایش بهره‌وری عملیات تزریق به خصوص برای تزریقات آب‌بندی.
- ۳- بستن منافذ و سوراخ‌های خروجی غیر از سوراخ‌های کنترلی برای جلوگیری از بیرون زدن دوغاب و افت فشار.
- ۴- مدیریت اثر ارتعاشات انفجار یا ماشین حفاری بر کیفیت دوغاب در زمان گیرش. در روش انفجاری توصیه می‌شود تا سه روز پس از عملیات تزریق، انفجار صورت نپذیرد. در سایر ارتعاشات نظیر ارتعاشات ماشین حفار، حداکثر سرعت ارتعاش ذرات (پی پی وی)^۱ بر حسب میلی‌متر بر ثانیه نباید از حدود ۱۲ تا ۱۵ بیش‌تر شود.
- ۵- ثبت و مستندسازی عملیات تزریق شامل زمان‌ها و وقفه‌ها، احجام خورند، فشارها و پروفیل تغییرات بر حسب طول و مشکلات اجرایی نظیر اختلاط و هجوم گل به داخل دوغاب.
- ۶- پیش‌بینی قراردادی و روش مناسب اندازه‌گیری و پرداخت و جلوگیری از افزایش بی‌رویه هزینه‌های تزریق. یکی از مسائلی که در پروژه‌های تونل‌سازی درمورد عملیات تزریق مشکل ایجاد می‌نماید عدم پیش‌بینی مناسب میزان نیاز به تزریق و افزایش نیاز به آن در حین اجرا یا پس از اجرای پوشش خصوصاً در تزریق‌های آب‌بندی است. همچنین اثبات نیاز به تزریق تحکیمی و میزان کمک آن در کاهش تغییر شکل‌های زمین و بارهای وارد به پوشش تونل و میزان اثر آن در کاهش نفوذپذیری زمین باید با دقت مناسبی انجام شود.
- ۷- توجه به مدیریت ادعا در نظارت بر میزان عملکرد و نتیجه بخش بودن عملیات تزریق و قابلیت اعتماد کفایت آن توسط دستگاه نظارت.

۶-۳-۱-۴- توصیه‌های برنامه‌ریزی و بهبود روند اجرایی تزریق تماسی

- برای بهبود عملیات تزریق باید کنترل لازم در هر مرحله اجرایی از کار صورت پذیرد. عملیات تزریق به صورت فرآیند اجرایی زیر می‌باشد:
- ۱- ایجاد و آماده‌سازی سوراخ‌ها (برای کوتاه کردن و سهولت بیش‌تر عملیات تزریق می‌توان به جای سوراخ‌کاری، شلنگ‌های پلاستیکی را از قبل در پوشش بتنی تعبیه کرد و لوله‌های محیطی سوراخ‌دار در محل تماس پوشش و زمین نصب نمود و برای تزریق این لوله‌ها را به شلنگ تزریق متصل نمود. این روش خصوصاً برای مواردی که تونل دارای غشای لاستیکی آب‌بند است متداول می‌باشد. در پوشش فلزی این سوراخ‌ها بهتر است پس از قراردادن پکر با تعبیه درپوش پیچی فلزی مسدود گردد). سوراخ‌های تزریق تماسی معمولاً تا حدود ۳۰ سانتی‌متر در پشت پوشش وارد زمین می‌شوند و دارای قطرهایی بین ۳۵ تا ۷۰ میلی‌متر می‌باشند.

۲- آماده‌سازی دوغاب و پمپ و شلنگ‌ها و ادوات آن با کنترل نشتی‌ها و سالم بودن تجهیزات،

۳- نصب پکرها با توجه به محدوده عملیاتی تزریق،

۴- انجام تزریق همراه با کنترل کفایت با انجام کنترل فشار یا حفر سوراخ کنترلی،

۵- بستن پکرها و اتمام عملیات تزریق.

کنترل حجم تزریق یکی از شاخص‌های مهم و موثر در عملیات اجرایی است و زمان هر سیکل عملیات را مشخص می‌نماید. در شکل زیر فرآیند زمانی شماتیک تزریقات سازه‌ای پوشش تونل نمایش داده شده است.

توالی عملیات تزریق تماسی در تونل‌های انتقال آب با پوشش بتنی درجا، در نیم مقطع فوقانی و به ترتیب از ساعت ۱، ۲، ۳ و ۱۲ و هم‌زمان در طرف مقابل است. در پوشش‌های بتن پیش‌ساخته در روش حفاری مکانیزه تزریق تماسی معمولاً به جای ۳ ساعت از ۴ انجام شده و به همان ترتیب ادامه می‌یابد.

نمایش شماتیک فرآیند زمانی تزریقات سازه‌ای پوشش تونل در شکل (۶-۲) نشان داده شده است.



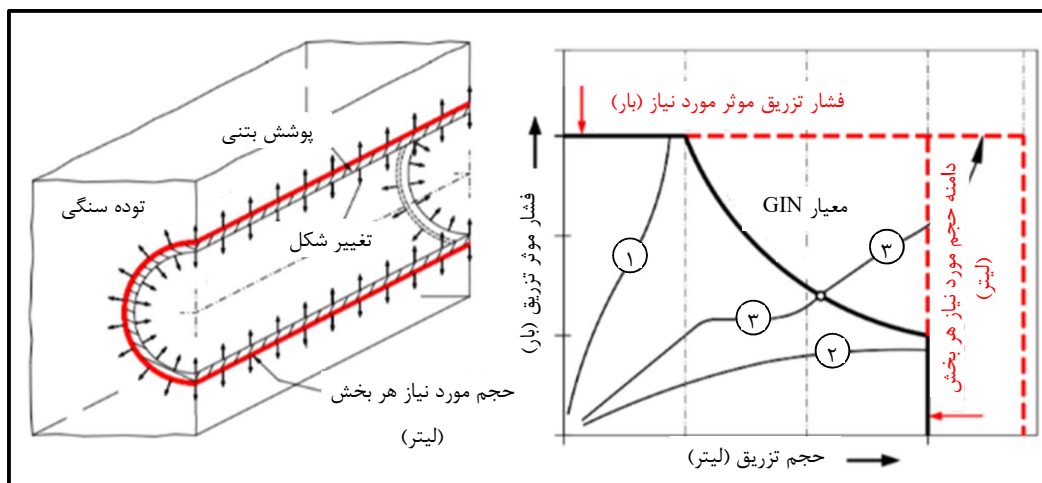
شکل ۶-۲- نمایش شماتیک فرآیند زمانی تزریقات سازه‌ای پوشش تونل

۶-۱-۳-۵- کنترل کیفی و کمی عملیات با انتخاب معیارهای کفایت تزریق و شاخص‌های کنترلی

به طور کلی معیار عمومی برای اتمام عملیات تزریق تعریف نمی‌شود، ولی بر اساس کنترل طراحی وضعیت زمین و میزان فشار قابل تحمل پوشش بتنی یا فولادی، معیاری چون حداکثر زمان تزریق (مثلاً ۳۰ دقیقه)، زمان عدم افزایش تقریبی حجم تزریق در فشار ثابت (به عنوان مثال ۱۰ دقیقه)، حداکثر فشار دوغاب بلافاصله پشت پوشش (به عنوان نمونه یک تا پنج بار)، استفاده از سوراخ کنترلی خروج دوغاب و نظایر آن تعریف می‌شود. همچنین کنترل کفایت تزریق

پس از اتمام گیرش دوغاب با مغزه‌گیری و مشاهده چشمی یا سوراخ‌کاری و کنترل با دوربین چشم ماری یا استروسکوپ قابل انجام می‌باشد.

در مواردی از حاصل ضرب حداکثر فشار در حداکثر حجم تزریق به عنوان پارامتر کنترل شکست هیدرولیکی زمین استفاده می‌شود که به صورت منحنی تجربی معیار توقف تزریق می‌باشد و در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.



شکل ۳-۶- معیار کفایت تزریق تماسی یا تحت فشار بر حسب فشار و حجم تزریق

۶-۳-۱-۶- آب‌بندی و درزهای پوشش بتنی

به طور کلی نشت آب از بتن از سه طریق جسم بتن، درزها و ترک‌ها اتفاق می‌افتد. ملاحظات، چالش‌ها و تجربیات بهبود بازده آب‌بندی در هر یک از این موارد در ادامه ارائه گردیده است. بعضاً برای آب‌بندی پوشش تونل از غشای آب‌بند چتری در وجه خارجی پوشش استفاده می‌شود که این روش در تونل‌های انتقال آب مرسوم و مقرون به صرفه نمی‌باشد.

۶-۳-۱-۷- توصیه‌های اجرایی آب‌بندی جسم بتن

آب‌بندی جسم بتن برای تونل بهره‌برداری تحت فشار از داخل و انتقال آزاد و یا تحت فشار آب از خارج انجام می‌شود. برای کاهش نفوذپذیری بتن ملاحظات اجرایی و تجربیات بهبود بازده زیر می‌تواند مد نظر قرار گیرد:

- ۱- کاهش سیمان و نسبت آب به سیمان تا حد ممکن و استفاده کنترل شده از ژل میکروسیلیس عمل‌آوری شده،
- ۲- استفاده از مواد حباب‌زا بین ۳ تا ۵ درصد وزن سیمان،
- ۳- استفاده از افزودنی‌های پلیمری و یا کریستالیزه شونده در مخلوط بتن،
- ۴- استفاده از مواد پاششی آب‌بند کننده نفوذگر،
- ۵- استفاده از الیاف میکرو پلیمری مانند PP^۱ برای کنترل ترک‌های ناشی از آبرفتگی و آب‌بند شدن بهتر بتن.

۱- PolyPropylene (PP)

دانسیته و تخلخل بتن نیز با نفوذپذیری و مشخصات مکانیکی آن ارتباط دارند و با افزایش دانسیته نفوذپذیری کاهش می‌یابد. البته این تغییرات در بتن‌های معمولی با دانسیته حدود ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به بالا نسبتاً کم است.

۶-۱-۳-۸- توصیه‌های اجرایی آب‌بندی درزها

درزهای قطع بتن منشا مهم نشت آب در پوشش بتنی هستند. درز اجرایی، درز سرد و درز انقباضی سه نوع متداول درز در پوشش تونل هستند. در درز اجرایی برای آب‌بندی عموماً از نوار آب‌بند پلیمری استفاده می‌شود. نوع دیگر نوار آب‌بند، نوار آب‌دوست است که معمولاً به دلیل صعوبت کنترل کیفی و عملکردی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوار آب‌بند پلیمری باید برای حفظ کیفیت در محل مناسب و دور از تابش آفتاب نگهداری شود. نکته مهم دیگر در مورد این نوارها، جوش و اتصال آن‌ها در محل وصله می‌باشد که باید با دقت و کیفیت مناسب صورت پذیرد تا از تردشدگی و ترک خوردگی آن پیشگیری به عمل آید. نوار آب‌بند باید با جزئیات اجرایی مناسب به شبکه میلگرد مهار شود تا در زمان بتن‌ریزی در محل اولیه خود باقی بماند. سطح نیمه دیگر نوار باید قبل از بتن‌ریزی بعدی کاملاً تمیز شود و هرگونه روغن یا آلودگی یا بتن خشک شده از آن زدوده گردد.

درز انقباضی معمولاً با همین نوار آب‌بندی می‌شود. درز انقباضی و اجرایی بهتر است دارای مقطع کلی عمودی و در صورت امکان دارای کلید برشی یا سطح مضرس باشند. تعداد این درزها در تونل باید به حداقل ممکن کاهش یابد. در تونل انتقال آب سعی می‌شود با تعبیه میلگرد انقباضی لازم طولی و یا استفاده از بتن الیافی و رعایت پیوستگی بتن‌ریزی، از تعبیه درز انقباضی اجتناب گردد. در محل درز اجرایی و انقباضی باید سطح بتن کاملاً صیقلی و یکنواخت بماند و از پله‌شدگی پیشگیری شود. پله‌شدگی و زبری بیش از حد بتن می‌تواند باعث خرابی تدریجی آن در اثر کاویتاسیون خصوصاً در سرعت نسبتاً بالای آب در تونل گردد.

درزهای سرد که به معنی ناپیوستگی بتن و گیرش آن در حین اجرا هستند، گاهی اوقات به دلیل تاخیر در بتن‌ریزی یا توقف نسبتاً طولانی ناخواسته این عملیات به علت خرابی پمپ، بچینگ، سیستم حمل یا قالب یا لرزاننده‌ها ایجاد می‌شوند. این نوع درزها در صورت ایجاد گرچه از نظر سازه‌ای چندان مشکل‌ساز نیستند، اما اصلاح آن از لحاظ آب‌بندی با صعوبت و قابلیت اطمینان کمی همراه خواهد بود. در حین اجرا در صورت افقی بودن صفحه درز، می‌توان با استفاده از دوغاب غلیظ محتوی پلیمر لاتکس یا اپوکسی سطح موجود را کاملاً اشباع و اندود نموده و پس از دقایقی بتن‌ریزی را ادامه داد. در صورت عدم امکان اصلاح حین اجرا، پس از باز کردن قالب می‌توان با انجام عملیات تزریق پلیمر آب‌بند نظیر اپوکسی، درز سرد را پر و ترمیم نمود. کنترل پرشدگی کامل درز با ایجاد سوراخ کنترلی و مشاهده با دوربین چشم ماری ضروری است.

۶-۲- روش نصب قطعات پیش‌ساخته بتنی و چدنی

۶-۲-۱- روش تولید و حمل

۶-۱-۲- خصوصیات فنی قطعات پیش‌ساخته

پوشش قطعه‌ای یا سگمنتی در خاک نرم و مسیر طولانی که با دستگاه تی.بی.ام حفاری می‌شود، بسیار اقتصادی و مناسب است. این پوشش جزو سیستم تک پوسته‌ای تونل محسوب شده و عموماً هم‌زمان با حفاری اجرا می‌شود. مزایای متعدد این سیستم شامل کیفیت و سرعت اجرا و اثرات مثبت محیط زیستی است و در مقابل نیاز به مکانیزاسیون مناسب و دقت کافی در فرآیند تولید و حمل و نصب دارد. در تونل انتقال آب رواداری‌های اجرا به دلیل محدودیت‌های هیدرولیکی بسیار سخت‌گیرانه است.

انواع سگمنت‌ها از نظر هندسی و خصوصیات کاربردی آن‌ها عبارتند از:

- ۱- مستطیلی^۱ با قطعه کلید و کلید معکوس که متداول‌ترین نوع می‌باشد. عملیات حفاری در هر مرحله پس از کامل شدن سگمنت و نصب کلید ادامه می‌یابد. قطعات بتنی در طول با استفاده از بولتهایی به یکدیگر متصل می‌گردند و در درزها با گسکت قابل آب‌بندی هستند.
- ۲- دوزنقه‌ای^۲ که در آن تمام درزهای طولی زاویه‌دار هستند و در درزها با گسکت قابل آب‌بندی هستند. این قطعات امکان اجرا در قوس‌های تونل را نیز دارند، ولی نصب آن‌ها نسبتاً سخت‌تر است.
- ۳- متوازی‌الاضلاع^۳ این قطعات امکان اجرا در قوس‌های تونل را نیز دارند و در درزها با گسکت قابل آب‌بندی هستند، ولی نسبت به قطعات مستطیلی طول بیشتری از گسکت نیاز دارند.
- ۴- شش ضلعی^۴ که معمولاً برای لایه اول پوشش دو لایه، و برای تامین سختی طولی بیش‌تر و در قطر نسبتاً کم (کم‌تر از ۵ متر) به کار می‌رود؛ چرا که به دلیل شعاعی بودن اتصالات آن امکان استفاده مناسب از گسکت یا نوار آب‌بند وجود ندارد.

بتن مورد استفاده در ساخت سگمنت از نوع مقاومت بالا (معمولاً بیش از ۴۰ مگاپاسکال) و نفوذپذیری پایین (معمولاً کمتر از 10^{-13} سانتی‌متر بر ثانیه) و مقاومت الکتریکی بالا (بیش از ۲۰ کیلو اهم سانتی‌متر) است. فولاد مورد استفاده هم از نوع پر مقاومت (مقاومت جاری شدن بیش از ۴۰۰ مگاپاسکال) هستند. پوشش بتن در قطعات بین ۲ تا ۳/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. استفاده از الیاف سازه‌ای ماکرو (طول بیش از ۴۵ میلی‌متر) فولادی (ترجیحاً با روکش ضد

۱- Rectangular

۲- Trapezoidal

۳- Rhomboidal

۴- Hexagonal

خوردگی) و پلیمری مقاومت بالا (بیش از ۵۰۰ مگاپاسکال) با نسبت طول به قطر بالا (حدود ۱۰۰) با یا بدون قفسه میلگرد در ساخت سگمنت‌ها متداول است. در شرایطی که تونل از محیط خورنده عبور می‌کند ممکن است برای احراز شرایط دوام نیاز به استفاده از پوشش‌های رنگ اپوکسی در سطح سگمنت باشد.

تجربیات و توصیه‌های اجرایی کاربرد بتن الیافی در قطعات پیش‌ساخته تونل عبارتند از:

- ۱- استفاده از الیاف به تنهایی خصوصاً الیاف پلیمری باعث افزایش انعطاف‌پذیری و جذب انرژی سگمنت شده و در مقاطع بزرگ با تعداد بیش‌تر قطعه عملکرد بهتری دارند.
- ۲- الیاف میکرو در قطعه پیش‌ساخته که با روش مناسب مانند بخار عمل‌آوری می‌شود چندان کمکی نمی‌کند.
- ۳- الیاف پلیمری ماکرو نیاز به افزودنی تک قطبی کننده دارند تا الیاف دچار پدیده چسبیدگی نشده و به طور یکنواخت در مخلوط توزیع شوند.
- ۴- الیاف فولادی بدون روکش ضدخوردگی زمانی که در نزدیکی سطوح بتن قرار می‌گیرند با سرعت بیش‌تری دچار خوردگی می‌شوند و بهتر است کم‌تر استفاده شوند.
- ۵- افزودن الیاف به مخلوط بتن کارایی آن را کاهش می‌دهد که باید در طرح اختلاط و تراکم بتن مدنظر قرار گیرد.

قطعات پوشش، تحت بار وارده از زمین و نیز بار ناشی از پیستون دستگاه از یک طرف و ملاحظات مربوط به ساخت، انبار کردن، حمل و نصب و فشار ناشی از عملیات آب‌بندی و درزبندی و میل مهار از طرف دیگر قرار دارند. در ساخت قالب قطعات پیش‌ساخته باید تمهیدات لازم برای تعبیه سوراخ‌های لازم برای تزریق و نیز سوراخ‌های تزریق مصالح دانه ای پرکننده پشت سگمنت‌ها که معمولاً یک یا دو عدد در وسط هر سگمنت است و سوراخ‌های نصب بولت و شیار نصب نوار آب‌بند در جوه جانبی و شماره تیپ قطعه در نظر گرفته شود.

۶-۲-۱-۲- حمل و نصب قطعات پیش‌ساخته

سازگاری و قابلیت جفت‌شدن قطعات پیش‌ساخته از ضروری‌ترین شاخص‌های آن‌ها به شمار می‌رود. این قطعات باید به سهولت و با ایمنی کافی در جای خود قرار گیرند و با قطعات الحاقی لازم در محل درزها به یکدیگر متصل شوند. در روش نصب مکانیزه باید ملاحظات مربوط به نقطه میانی اتکای دستگاه به قطعه در نظر گرفته شود. نقطه اتکای قطعه به دستگاه باید برای نیروهای بیرون‌کشیدگی و لنگر و برش ناشی از وزن قطعه و بارهای اعمالی از دستگاه کنترل شود. شتاب ناشی از حرکت پیستون‌های دستگاه سبب افزایش نیروها به دلیل آثار دینامیکی و ضربه می‌شوند؛ به همین دلیل، در طراحی ضریب اطمینانی حدود ۳، برای بارهای وارده در نظر گرفته می‌شود. برای نصب قطعات باید نقشه نصب هماهنگ با سیستم شماره‌گذاری سگمنت‌ها تهیه شود. بر اساس این نقشه موقعیت نصب تمامی قطعات مشخص شده و محل کلید و محل نصب قطعات پرمقاومت تعیین گردیده و با درج شماره روی قطعات آدرس دهی‌های بعدی برای کارهای ترمیمی و تکمیلی تونل با سهولت بیش‌تری انجام می‌پذیرد.

۶-۲-۱-۳- ملاحظات اجرایی اتصالات و درزهای قطعات بتنی

مشخصات اتصالات باید به نحوی باشد که علاوه بر امکان نصب سریع، مقاومت و دوام لازم را نیز در زمان نصب، آب‌بندی و بهره‌برداری داشته باشند. در اتصالات طولی ممکن است به دلیل تنش‌های تماسی زیاد، طراحی نامناسب به ایجاد ترک‌های محیطی به دلیل تنش زیاد کششی در اتصال منجر شود. استفاده از بالشتک ضربه‌گیر می‌تواند به این مسئله کمک کند.

در لبه قطعات نیز باید مقادیر بارهای وارده به دلیل فشار پیستون‌های دستگاه در حین نصب، برای جلوگیری از شکستگی کنترل شود. در هنگام تکمیل پوشش، اندازه‌ها و زوایا باید طوری باشد که حرکت دستگاه را دچار مشکل نکنند. برای قطعات نهایی ممکن است ملاحظات مربوط به فشار زیاد پیستون با در نظر گرفتن بالشتک فلزی ضروری باشد. بالشتک می‌تواند از نوع پلیمری، قیری یا چوبی هم باشد که نقش مهمی در جبران آسیب ناشی از تمرکز تنش جک‌ها ناشی از بار نامتقارن به وجود آمده از رواداری غیرمجاز ساخت و نصب ایفا می‌نمایند. در تونل انتقال آب نوعی از واشر آب بند می‌تواند نقش دوگانه آب‌بندی و بالشتک‌ها را ایفا نماید.

واشرها نیز باید به‌دقت تعبیه شوند، زیرا برای بستن اتصالات و نگه‌داشتن قطعات به یکدیگر به نیروی زیادی نیاز دارند. واشرهای آب‌بندی ممکن است سبب کاهش شدید سطح تماس قطعات برای انتقال نیروی فشاری تماسی شوند. تسکین نیروها در ناحیه پشت واشرها در قطعات می‌تواند سبب کاهش آسیب‌های ناشی از فشار شود. در مجموع، مقاومت، موقعیت و تعداد اتصالات باید طوری باشد که فشار ناشی از واشرها را به راحتی تحمل کند. در تونل انتقال آب معمولاً واشرها در شیارهایی داخل سگمنت قرار گرفته یا ریشه‌های آن هنگام بتن‌ریزی در قالب قرار می‌گیرند.

معمولاً برای جلوگیری از حرکت طولی و یا عرضی رینگ و قطعات از بولت برای اتصال آن‌ها استفاده می‌شود. این بولت‌ها پس از این که قطعات در جای صحیح خود قرار گرفتند بسته و محکم شده و ممکن است پس از عملیات تزریق نیاز به سفت کردن مجدد داشته باشند. این بولت‌ها خصوصاً در مواقعی که تونل تحت فشار آب داخلی قرار می‌گیرد، نقش مهم‌تری ایفا می‌نمایند. انواع این بولت‌ها شامل بولت پاکتی فولادی، زبانه‌ای (فولادی یا پلاستیک پر مقاومت و با کیفیت)، مورب و موزی شکل هستند. بولت مکانیکی معمولاً از نوع مقاومت بالا بوده و دارای پوشش ضد خوردگی یا از نوع فولاد ضد خوردگی است.

در تونل انتقال با سرعت بالای آب معمولاً فضای سوراخ قرارگیری بولت باید با ملات با قدرت چسبندگی مناسب کاملاً پر شود. در برخی موارد هم بولت‌ها صرفاً تا پس از انجام تزریقات تکمیلی مورد نیاز بوده و می‌توان آن را پس از این کار باز نموده و مجدداً استفاده نمود. در مورد واشر فشاری^۱ (ای.پی.دی.ام) یا آب‌بند آب‌دوست، این واشرها در سه حالت درز باز، بسته و نیمه بسته استفاده می‌شوند.

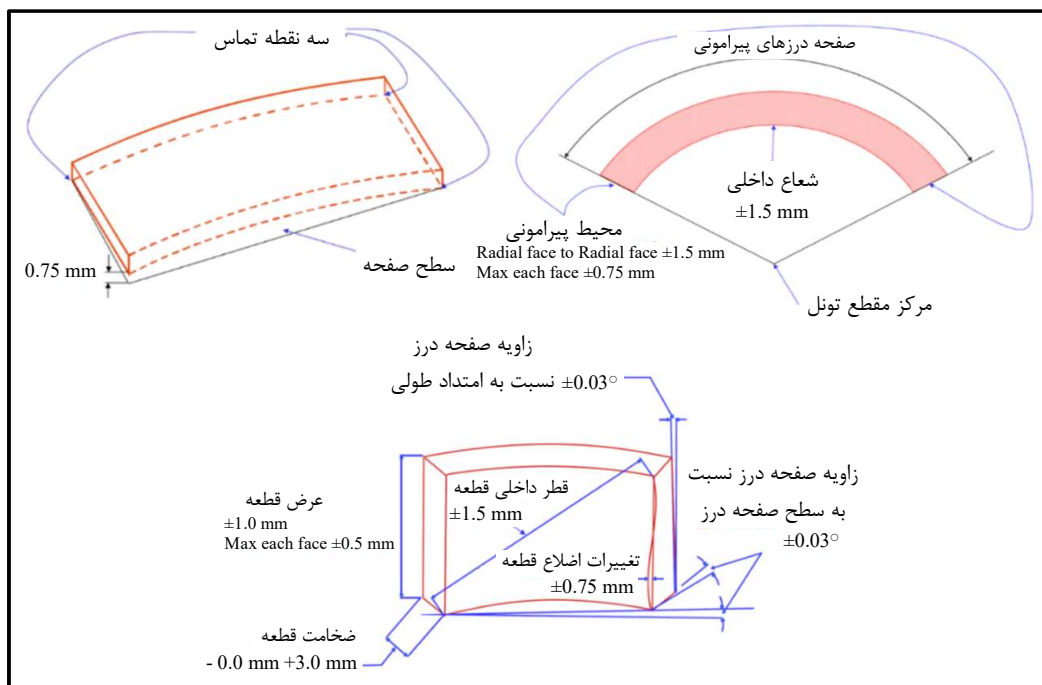
۱- Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM)

۴-۱-۲-۶- رواداری اجرایی قطعات پیش ساخته

رواداری‌ها در روش مکانیزه شامل رواداری ساخت و نصب سگمنت هستند. معمولاً رواداری ساخت سگمنت به دلیل امکان کنترل کیفی در کارخانه سخت‌گیرانه است. رواداری نصب سگمنت نیز در تونل انتقال آب به دلیل مسائل فرسایش هیدرولیکی ناشی از کاویتاسیون نسبت به سایر انواع تونل مکانیزه محدودتر می‌باشد. پله‌شدگی در سگمنت‌ها علاوه بر کاویتاسیون باعث کاهش عملکرد مناسب نوار آب‌بند و افزایش نشت آب به داخل یا خارج تحت فشار زیاد آب می‌گردد. در جدول (۱-۶) و شکل (۴-۶) رواداری‌های عمومی سگمنت‌ها ارائه شده است. برای اطلاعات بیشتر به راهنمای شماره ۵۳۳ موسسه بتن آمریکا^۱ مراجعه شود.

جدول ۱-۶- رواداری‌های عمومی ساخت سگمنت بر اساس آئین‌نامه‌های اروپایی و راهنمای شماره ۵۳۳ موسسه بتن آمریکا

ردیف	عنوان	حداکثر مثبت (میلی‌متر)	حداقل منفی (میلی‌متر)
۱	محیط پیرامونی	۳	۰
۲	ضخامت	۳	۱
۳	عرض	۱	۱
۴	قطر داخلی تونل	۰/۱۵ درصد	۰
۵	قطر سوراخ بولت‌ها	۱	۰
۶	موقعیت سوراخ بولت‌ها و زائده‌ها	۱	۱
۷	عمق شیار گسکت‌ها	۰/۵	۰/۵
۸	عرض شیار گسکت‌ها	۰/۵	۰/۵
۹	خروج از محور درزهای طولی در امتداد تونل	۰/۳	۰/۶ میلی‌متر بر متر از صفحه اولیه
۱۰	خروج از محور درزهای طولی در مقطع تونل	۰/۱	۰/۶ میلی‌متر بر متر از صفحه اولیه
۱۱	خروج از محور سطوح پیرامونی تونل	۰/۵	۱ میلی‌متر بر متر از صفحه اولیه
۱۲	زبری سطوح پشتی	۱/۵	۱/۵
۱۳	زبری سطوح داخلی	۱	۱



شکل ۶-۴- رواداری‌های ساخت و نصب سگمنت

۶-۲-۱-۵- تزریق پرکننده قطعات پیش ساخته

در زمان نصب قطعات بتنی توسط دستگاه حفاری یک فاصله حدود ۱۰ سانتی‌متری با زمین باقی می‌ماند، که این فاصله باید خصوصاً در زمین مستعد جمع شوندگی و مچاله‌شوندگی به سرعت با دوغاب پر شود تا مانع اعمال بار غیریکنواخت و ترک خوردگی قطعات بتنی و همچنین تشدید نشست سطحی زمین گردد. این کار به عنوان بخش پیوسته با عملیات نصب محسوب می‌شود و باید با دقت کافی و مصالح مناسب با حجم و فشار کنترل شده انجام پذیرد. در زمین‌هایی که نیاز به دادن زمان برای آزادسازی بخشی از تنش سنگ می‌باشد، عملیات تزریق با فاصله زمانی مناسب انجام می‌شود. هدف از این تزریق، پرکردن فضاهای خالی پشت قطعات به منظور حفظ شکل هندسی مقطع تونل، توزیع یکنواخت‌تر فشار زمین روی پوشش، کاهش تراوش و نفوذ آب زیرزمینی و محدود کردن نشست سطحی می‌باشد و به دو روش زیر انجام می‌شود.

۱- تزریق از طریق دنباله تی.بی.ام

در این روش، دنباله ماشین تزریق را انجام می‌دهد و برای شرایطی که نشست سطحی قابل توجه است، بسیار مناسب است. در ماشین کوچک‌تر، مثلاً قطر ۳ متر، نصب دستگاه تزریق به دلیل حجم زیاد لوله‌ها معمولاً مشکلات جدیدی ایجاد می‌کند. با افزایش ابعاد و وزن دستگاه ضخامت پوشش هم بیش‌تر و تزریق کامل آن مشکل‌تر می‌شود و ممکن است در نهایت به افزایش نشست سطحی منجر شود. در صورت وجود برس گریس‌کاری در پشت تی.بی.ام، هنگام تزریق هم‌زمان در درزها برس به دوغاب سخت‌شده آلوده می‌شود و در نهایت باید مقدار بسیار بیش‌تری از گریس برای حرکت دستگاه استفاده شود.

۲- تزریق در داخل پوشش تمام شده

تزریق را می‌توان از طریق سوراخ‌های پیش‌بینی شده در پوشش تونل نیز انجام داد. این روش عموماً در زمین‌های نسبتاً پایدار به کار می‌رود که کنترل نشست سطحی در آن‌ها بحرانی نیست. موقعیت و آرایش سوراخ‌های تزریق باید در مراحل اولیه مشخص شود. سرپیچ حفره‌های تزریق قبل از بتن‌ریزی در آن کار گذاشته می‌شوند. در قطعات پیش‌ساخته معمولاً سوراخ‌ها نزدیک لبه‌ها کار گذاشته می‌شوند تا بتوان بلافاصله پس از کارگذاشتن قطعه توسط دستگاه و حرکت آن به سمت جلو، عملیات تزریق را آغاز کرد. همچنین جهت سوراخ‌ها باید طوری باشد که دستگاه تزریق به راحتی به آن دسترسی پیدا کند. در محل تقاطع با چاه‌ها باید در تعداد و آرایش سوراخ‌های تزریق برای پرشدن مناسب، دقت بیش‌تری شود.

فشار تزریق باید از فشار هیدرواستاتیک خارجی در زمان تزریق بیش‌تر باشد. در تونل با قطر زیاد، اختلاف فشار آب در تاج و کف تونل نیز قابل توجه است. باید توجه کرد که فشار بیش از حد تزریق، سبب تورم خاک و نیز نیروی بیش‌تر به پوشش است و ممکن است آسیب‌هایی در پوشش ایجاد کند. تزریق در تونل مکانیزه در خاک نرم معمولاً بلافاصله و برای جلوگیری از تغییر شکل زمین و از داخل سوراخ‌های کوچک تزریق صورت می‌گیرد ولی در زمین‌های سخت می‌تواند با تزریق پیگراول و بسته به سختی سنگ با کمی تاخیر و از داخل سوراخ‌های بزرگ‌تر تعبیه شده در بدنه سگمنت هم انجام شود. در هر حالت میزان تزریق تماسی انجام شده پشت سگمنت‌ها باید به دقت تحت اندازه‌گیری و کنترل قرار گیرد.

۳- مصالح تزریق معمولاً به شکل‌های زیر هستند:

- ماسه و فیلر خاکستر بادی
 - سیمان و کندگیرکننده بنتونیتی یا شیمیایی
 - دوغاب دوجزئی با روانی ماندگار که جزء تندگیرکننده آن در نقطه تزریق اضافه می‌شود
- در تونل‌هایی که در مواجهه با جریان آب روان ورودی قرار دارند، معمولاً از دوغاب‌های انبساطی شیمیایی یا از کیسه‌های متخلخل مصالح خشک دوغاب برای پرکردن فضاها استفاده می‌شود.
- مراحل تزریق بعد از نصب سگمنت را می‌توان به سه مرحله تزریق ملات کف تونل، تزریق شن نخودی (پیگراول) و تزریق دوغاب تقسیم‌بندی کرد. پس از خارج شدن رینگ سگمنت از داخل شیلد انتهایی و قرار گرفتن روی جداره تونل باید کف تونل با ملات پر شود. حداقل فاصله تزریق ملات کف با شیلد انتهایی یک تا دو رینگ می‌باشد. بعد از تزریق ملات کف، برای پرکردن فضای خالی بین سگمنت و سنگ درون گیر، مصالح پیگراول توسط سیستم پمپ پیگراول مستقر در سیستم پشتیبانی از طریق لوله‌های مخصوص به محل سوراخ‌های تعبیه شده بر روی سگمنت و از آنجا به فضای خالی پشت سگمنت تزریق می‌شود. تزریق پیگراول سبب می‌شود تا پایداری اولیه قبل از تزریق دوغاب ایجاد گردد. با توجه به این که در حین تزریق پیگراول گرد و غبار زیادی ایجاد می‌شود، توصیه می‌شود از مخلوط پیگراول با حداقل ریزدانه استفاده شود تا در حین عملیات اجرایی گرد و غبار زیادی ایجاد نشود. همچنین با شستن پیگراول قبل از

انتقال به داخل تونل یا نمدار کردن آن داخل تونل قبل از تزریق، می‌توان به مقدار قابل توجهی از تولید گرد و خاک جلوگیری نمود.

از نکات مهم در تزریق پیگراول، پرشدن فضای خالی پشت سگمنت سقف می‌باشد که باید به آن توجه شود. تزریق دوغاب معمولاً چندین رینگ عقب‌تر از تزریق پیگراول انجام می‌شود. جهت پیوستگی و افزایش باربری پیگراول تزریق شده، دوغاب با نسبت آب به سیمان طراحی شده تزریق می‌شود. جهت تزریق دوغاب مصالح مورد نیاز پس از اختلاط توسط پمپ تزریق از طریق سوراخ‌هایی که در سگمنت تعبیه شده است به پشت سگمنت پمپ می‌شوند. عملیات تزریق از یک سوراخ با ارتفاع پایین تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که دوغاب از سوراخ فوقانی آن تراوش کند. برای جلوگیری از تراوش دوغاب از محل درز و سوراخ‌های سگمنت از خمیر سیمان می‌توان استفاده کرد. به طور کلی می‌توان گفت تزریق پشت سگمنت‌های نصب شده به منظور نیل به اهداف زیر صورت می‌گیرد:

- ۱- پرشدن فضاهای خالی موجود بین پوشش بتنی و زمین و تامین ناتراوایی و تکمیل آب‌بندی سیستم نگهداری،
- ۲- تحکیم و تثبیت رینگ پوشش بتنی و جلوگیری از خروج آن‌ها از امتداد واقعی خود،
- ۳- اعمال همگن بارسنگ روی پوشش بتنی و به حداقل رسیدن اعمال بار متمرکز در اثر همگرایی زمین،
- ۴- تبدیل کردن قطعات پوشش تونل و محیط پیرامونی آن به یک مجموعه واحد،
- ۵- جلوگیری از نشست زمین به خصوص در مناطق با روباره کم و سنگ ضعیف.

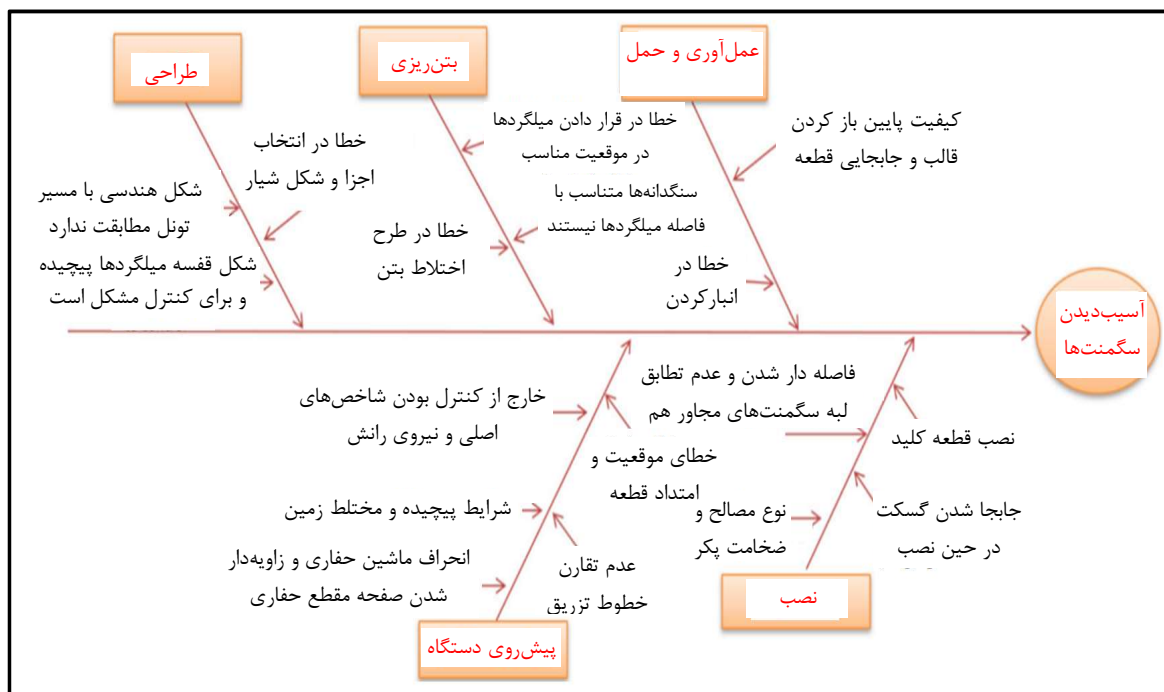
۶-۱-۲-۶ چالش‌ها و تجربیات اجرایی کاهش آسیب‌دیدگی سگمنت

یکی از ملاحظات کار با قطعات پیش‌ساخته در فرآیند تولید و انبار کردن و حمل و نصب، کاهش آسیب‌دیدگی آن‌ها می‌باشد. انواع منشا عیب‌ها با توجه به شکل ۶-۵ به صورت زیر دسته‌بندی و شناسایی می‌شوند که با در نظر گرفتن آن‌ها می‌توان تمهیدات و پیشگیری‌های لازم برای کاهش آسیب‌ها را انجام داد. عیوب ظاهری قطعات بتنی عموماً به صورت ترک، شکستگی و کیفیت نامناسب سطح بتن و اتصال اجزای الحاقی و واشرهای آب‌بند کننده دیده می‌شود:

- ۱- طراحی، شامل عدم تناسب هندسه قطعات با شرایط تونل، تعبیه سوراخ‌ها و قطعات مدفون با ابعاد و محل نامناسب در سگمنت و وضعیت نامتناسب قفسه میلگرد و استفاده از قطرهای بالا و پوشش کم و توزیع نامناسب در نقاط تمرکز تنش،
- ۲- تولید، شامل عدم رعایت رواداری‌های ساخت قالب و میلگرد و بتن‌ریزی، طرح اختلاط نامناسب بتن نظیر اندازه سنگدانه‌ها و مقاومت و دوام، کیفیت سطوح تمام شده بتن و لبه‌ها و محل‌های نصب واشرها، عمل‌آوری ناکافی و نامناسب و غیریکنواخت تمام وجوه سگمنت و کرم‌شدن ناشی از عدم ارتعاش کافی قالب یا عدم استفاده از بتن خودتراکم و ترمیم نامناسب اشکالات سطحی برخی سگمنت‌ها،
- ۳- انبار کردن و حمل، شامل آسیب‌های حین برخورد در جابجایی و چیدن و انبار کردن قطعات و بارگیری مجدد نظیر بلند کردن از نقاط نامناسب، تعبیه تکیه‌گاه‌های نامناسب در چینش، وزن بیش از حد قطعات چیده شده

روی هم، عدم استفاده از تکیه‌گاه‌های انعطاف‌پذیر حین حمل با واگن در مسیر و اعمال شوک و ضربه به قطعات، قراردادن قطعات در محیط باز با دمای متناوب بسیار بالا یا پایین، قرارگیری واشرهای سگمنت در معرض تابش شدید آفتاب یا رطوبت همراه با دمای پایین در مدت قابل توجه،

۴- نصب و بارگذاری شامل ضربه یا برخورد حین قرار دادن قطعات در رینگ و جا زدن قطعه کلید، امتداد نامناسب رینگ و فشار نامتقارن جک‌ها و ایجاد تمرکز تنش در لبه‌ها برای جای‌گذاری قطعات بعدی، تغییر موقعیت قرارگیری مرکز حلقه یا جای‌گذاری نامناسب و پله‌شدگی سگمنت‌ها و در نتیجه لب‌پریدگی قطعات، ایجاد فشار نامتقارن به لبه قطعات در قوس‌ها، تغییر شدید خصوصیات خاک و تغییرات متناظر فشار نیروی رانش دستگاه، نشست دستگاه در زمین نرم یا نواحی سنگ خرد شده و تغییرات به وجود آمده در امتداد حرکت و نیروی جک‌ها، فشار نامتقارن به رینگ ناشی از نشست سریع زمین در نواحی ضعیف، فشار نامتقارن ناشی از رواداری غیرمجاز در هندسه سگمنت، پرنشستن کامل فضای پشت سگمنت و ایجاد فشار و عکس‌العمل‌های نامتقارن به رینگ، تجاوز رواداری‌های واشرها یا نوارهای آب‌بند و اختلال در عملکرد آب‌بندی آن‌ها و خرابی‌های ناشی از حمل و نقل و تردد داخل تونل در پوشش، سفت کردن یا بستن نادرست بولت‌های اتصال سگمنت‌ها. غالب خسارات در حین نصب حلقه سگمنت‌ها، هنگام افزودن قطعه کلید، اتفاق می‌افتد. علل مختلف آسیب دیدگی قطعات بتنی در فرآیند تونل‌سازی مکانیزه از تولید تا نصب در شکل (۵-۶) ارائه شده است.



شکل ۵-۶- علل مختلف آسیب دیدگی قطعات بتنی در فرآیند تونل‌سازی مکانیزه از تولید تا نصب

۵- در هنگام کامل شدن حلقه با قطعه کلید، به اندازه ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر فضای محیطی باقی مانده از حلقه، کم‌تر از ابعاد قطعه کلید است. با وجود این واقعیت، این حلقه باید منبسط شود تا اجازه نصب قطعه کلید داده شود.

اگر شیار درزه طولی به طور کامل در زبانه قرار نگیرد اما تماس اولیه در جناح زبانه صورت گیرد، آن گاه زبانه، محل درگیری را قطع می‌کند. اعمال فشار از طرف جک‌های دستگاه هنگام پیشروی گاهی باعث ایجاد خسارت در سگمنت و تشکیل ترک‌هایی که بیش‌تر از نوع مورب هستند می‌شود. به طور کلی، در هنگام اعمال نیروی فشاری جک‌ها سه حالت نامناسب رخ می‌دهد که عبارتند از اعمال نیروهای نامتقارن، اعمال نیروهای خارج از مرکز و اعمال نیروهای موضعی. در تونل‌ها با پیچ‌های با شعاع کم این مسئله تشدید می‌گردد. حتی مسلح‌سازی قوی در مقابل خمش و کشش نمی‌تواند در مقابل نیروی بالای جک‌ها دوام بیاورد. راهکار جلوگیری از ایجاد چنین حالت‌هایی کنترل مناسب فشار جک‌های دستگاه می‌باشد.

انواع آسیب سگمنت و علل آن‌ها در شکل (۶-۶) نشان داده شده است.

بر اساس تجربیات پروژه‌های موجود در کشور:

- ۱- بیش‌ترین ترک‌های مشاهده شده در سگمنت‌ها از نوع ترک عرضی بوده است.
- ۲- مشکلات کیفیتی ناشی از روند ساخت سگمنت در کارخانه بیش‌ترین سهم را در دلایل ایجاد ترک و شکستگی داشته است.
- ۳- پس از مورد فوق بارگذاری نامتقارن ناشی از پرنشیدن متقارن و به موقع پشت سگمنت‌ها بیش‌ترین سهم را در ایجاد ترک‌های سازه‌ای داشته است.
- ۴- افزایش حجم و تراکم آرماتور در طرح سبد سگمنت، تاثیر چندانی در عدم ایجاد ترک‌های ناشی از مشکلات کیفیت ساخت نداشته است.



جدا شدگی نوار آب‌بند سگمنت



خردشدگی سگمنت در هنگام جا زدن



شکستگی سگمنت ناشی از تمرکز تنش بار نامتقارن جک



ترک طولی وجوه ناشی از بار متمرکز جک‌ها



شکستگی گوشه سگمنت کلید حین جا زدن



ترک خوردگی ناشی از سفت کردن بیش از حد بولت

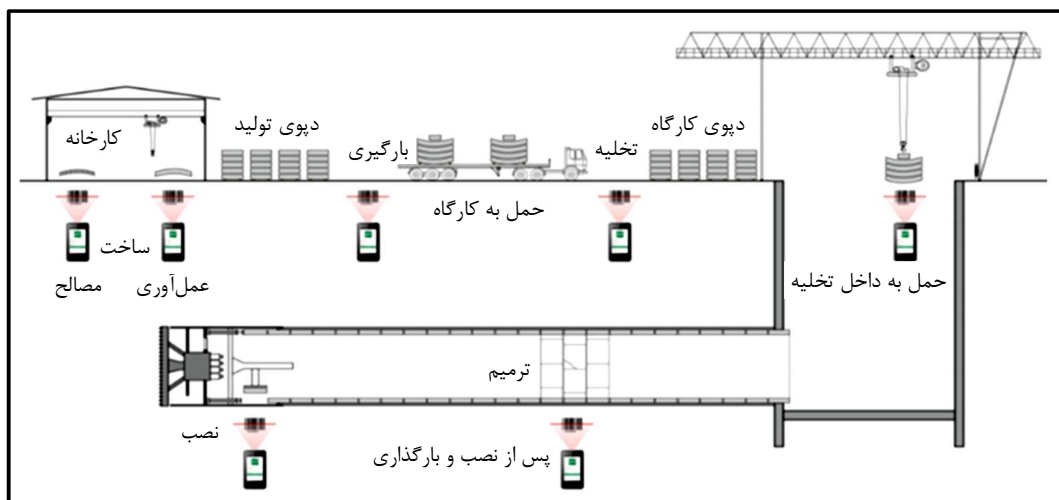


شکل ۶-۶- انواع آسیب سگمنت و علل آن

۵- اقدامات کنترل کیفیت جهت کاهش ترک سگمنت از زمان تولید تا نصب و اعمال تدابیر فنی و کنترلی ویژه در این زمینه، کاهش چشمگیر ترک‌ها در سگمنت‌ها به دنبال داشته است.

۶-۲-۲- روش کنترل کیفیت

به منظور کنترل و اصلاح آسیب‌های قطعات بتنی برنامه جامع کنترل کیفی و پایش سلامت قطعات بتنی از مرحله تولید تا نصب و بارگذاری تدوین و اجرا می‌شود. در هر مرحله، در صورت مشاهده آسیب‌های مختلف باید نسبت به تعویض یا اصلاح یا ترمیم قطعات و اجزای آن‌ها اقدام نمود. عملیات پایش و بررسی سگمنت‌ها از ابتدای تولید و تهیه مصالح آغاز شده و تا مراحل حمل و انبار کردن و نصب و بارگذاری و بهره‌برداری و ترمیم در داخل تونل ادامه می‌یابد (شکل ۶-۷). در تونل‌های بلند، حمل قطعات به صورت غیراصولی در مسیر تونل می‌تواند باعث آسیب‌دیدگی شدید آن‌ها شود و لذا نحوه بارگیری و نوع واگن حمل باید به طور مناسب انجام شود. شرایط سگمنت‌ها در حین نصب و اعمال نیروی جک باید تحت پایش دقیق قرار داشته و قطعات آسیب‌دیده حین اعمال نیروی جک شناسایی، ترمیم یا تعویض شوند و از استفاده از قطعات معیوب و نصب آن‌ها خودداری شود.



شکل ۶-۷- مراحل کنترل کیفی و پایش سلامت قطعات بتنی از مرحله تولید تا نصب و بارگذاری

از نظر اهمیت و فراوانی و احتمال بیش‌تر آسیب به قطعات، پس از کیفیت مصالح و ساخت به عنوان شاخص پایه، مرحله بارگیری، تخلیه و نصب بیش‌ترین اهمیت را دارا هستند. کنترل کیفیت در این مراحل علاوه بر قطعات بتنی به عنوان جزء اصلی، کلیه اجزای معرفی شده در شکل (۵-۱۴) را نیز در بر می‌گیرد. ابزار و روش‌های کنترل کیفی در هر مرحله حسب نوع اجزا متفاوت است و بر اساس استانداردهای مرتبط هر یک انجام می‌شود. در عین حال بازرسی عینی از مهم‌ترین این روش‌ها محسوب می‌گردد و بر اساس نتایج آن ممکن است ارزیابی دقیق‌تر با دستگاه‌های غیرمخرب در دستورکار قرار گیرد. توصیه می‌شود برای کنترل کیفی اجزا و مراحل مختلف، کاربرگ‌های مخصوص تهیه و مستندسازی مستمر برای آن صورت پذیرد.

۶-۲-۳- مراحل نصب و کلیدگذاری

نصب سگمنت‌ها شامل مراحل زیر است. شکل (۶-۸) برخی از این مراحل را نشان می‌دهد:

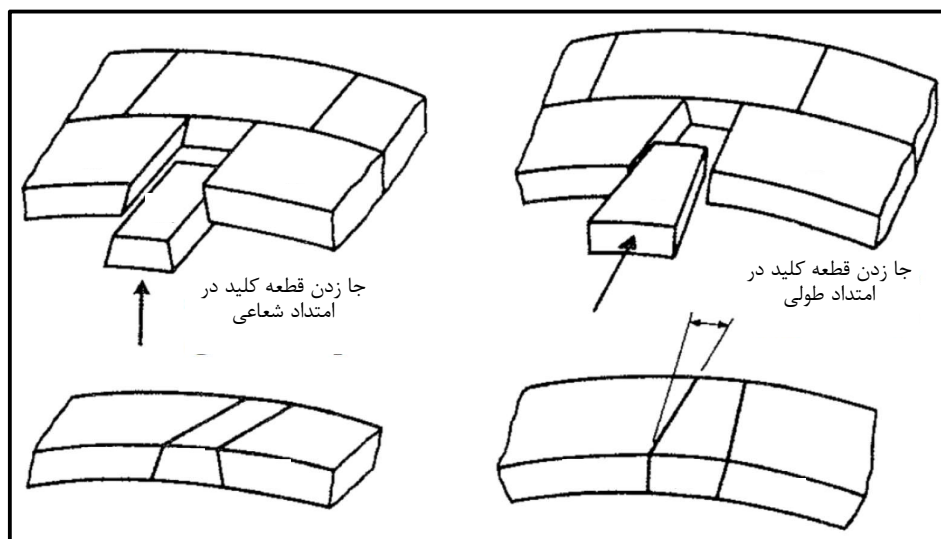
- ۱- جاگذاری قلاب برداشتن سگمنت،
- ۲- جازدن سگمنت توسط بازوی دستگاه بر اساس نقشه نصب،
- ۳- فشاردادن سگمنت توسط جک‌ها و قراردادن در محل خود،
- ۴- نصب سگمنت کلید در دو حالت شعاعی یا طولی (شکل ۶-۹)،
- ۵- بستن بولت‌های اتصال سگمنت‌ها،
- ۶- تزریق پیگراول در فضای پشت سگمنت‌ها،
- ۷- تزریق دوغاب در پیگراول توسط دنباله دستگاه.

نصب سگمنت‌های مختلف مطابق شکل (۶-۱۰)^۱ شامل شش ضلعی، مستطیلی با قطعه کلید، دوزنقه‌ای کلید مانند و متوازی الاضلاع با قطعه کلید به ترتیب نشان داده شده صورت می‌پذیرد. هر سگمنت نصب شده توسط فشار جک‌های دستگاه نگه داشته می‌شود تا سگمنت بعدی نصب شود و نهایتاً آخرین سگمنت یا کلید جازده شود که در صورت نیاز با جابجا کردن سایر قطعات جا برای آن باز می‌شود. کلیه سگمنت‌ها باید دارای شماره رینگ و قطعه باشند (شکل ۶-۸).

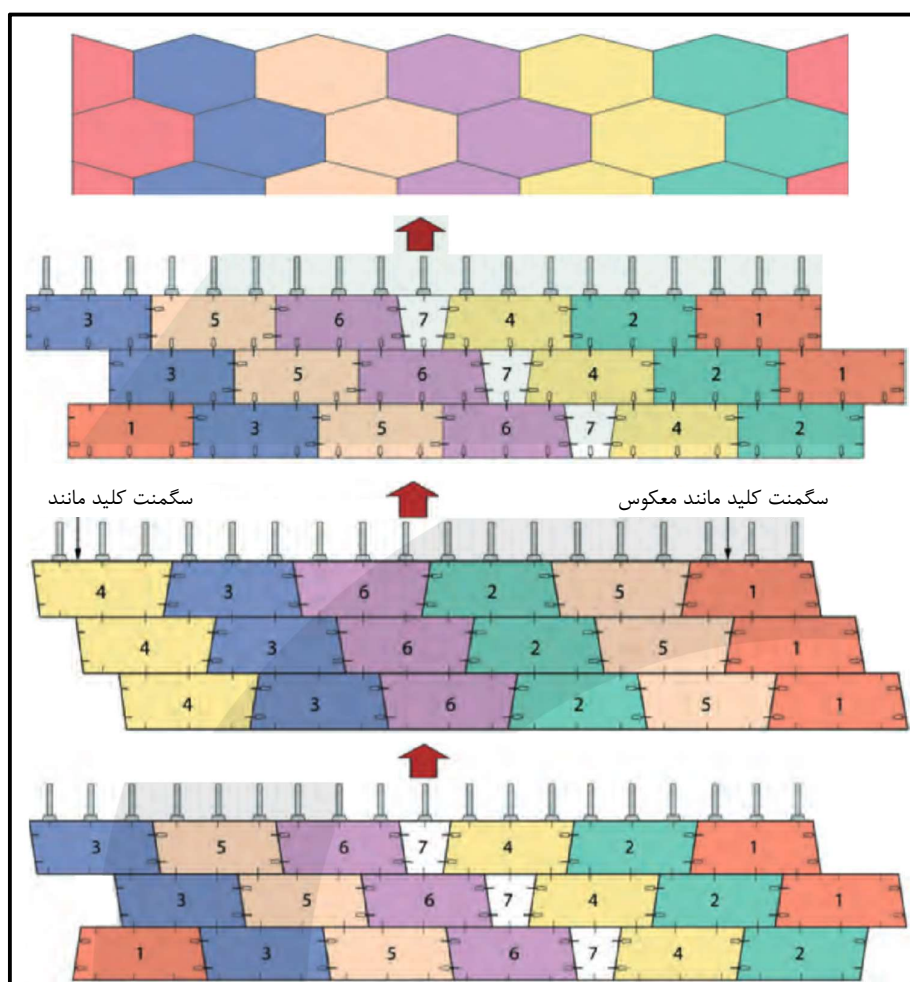


شکل ۶-۸- فرآیند نصب و جاذدن سگمنت

۱- ITA Report No. 22, Guidelines for The Design of Segmental Tunnel Linings, 2019.



شکل ۶-۹- حالت‌های جازدن قطعه کلید به صورت شعاعی و طولی



شکل ۶-۱۰- نقشه نصب انواع سگمنت شش ضلعی، مستطیلی با قطعه کلید، دوزنقه‌ای کلید مانند، متوازی‌الاضلاع با قطعه کلید

۶-۳- روش نصب و اجرای پوشش فولادی

۶-۳-۱- روش‌های ساخت و انتقال

پوشش فولادی در تونل انتقال آب به دلایلی نظیر کنترل فرسایش هیدرولیکی در سرعت‌های بالا، کنترل فشار داخلی استاتیکی و دینامیکی آب در فشارهای بالا، کنترل اندازه حرکت جریان در انشعاب‌ها و قوس‌ها و نیز چاه‌ها به کار می‌رود. در تونل‌های آب، پوشش‌های فولادی در قوس‌ها، انشعاب‌ها، نقاط اتصال به شیرخانه یا اتاقک دریچه کنترل، نقاط انتهایی اتصال و تبدیل یا ترانزیشن و به طور کلی نقاط حساس دارای سخت‌کننده محیطی نیز پیش‌بینی می‌شوند. ساخت بخش‌های عمده پوشش فولادی بسته به قطر تونل به روش‌های مارپیچی در اقطار پایین‌تر و مونتاژ و جوشکاری ورق‌های خم شده در اقطار بالاتر در کارخانه و تحت کنترل کیفی بالا انجام می‌پذیرد. این کنترل کیفی عمدتاً بر کیفیت و روش جوشکاری و کنترل تنش‌های پسماند آن متمرکز است.

جنس ورق‌های فولادی بر اساس نیازهای پروژه در مرحله طراحی مشخص شده ولی معمولاً ملاحظات کاهش وزن، افزایش دوام و مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت سایشی، جوش‌پذیری و جلوگیری از کمانش موضعی که تابعی از نسبت قطر به ضخامت ورق است، در انتخاب آن در نظر گرفته می‌شود و معمولاً از نوع ST37 تا ST60 را شامل می‌شود. ضخامت پوشش‌های فولادی ممکن است از ۱۰ تا ۶۰ میلی‌متر باشد. البته در موارد خاص از مقاومت‌ها و ضخامت‌های بالاتر هم استفاده شده است. در محیط‌های خورنده مانند خاک‌های حاوی مواد شیمیایی، فاضلاب و تونل‌های انتقال آب از دریا، سطح فولاد با پوشش‌های حفاظتی پایه قیری، پایه پلیمری، پایه سیمانی، رنگ اپوکسی، مواد آلی بازدارنده خوردگی و یا رزین‌های وینیل پوشش داده می‌شود. در این موارد، ممکن است روش‌های کمکی حفاظت در برابر خوردگی نظیر حفاظت کاتدیک، آندهای فداشونده^۱، اضافه ضخامت و سایر تمهیدات هم مورد نیاز باشد.

در ساخت قطعات فولادی پوشش باید شماره‌گذاری مناسب برای نصب و کارهای تکمیلی در داخل تونل به دقت انجام شود. سوراخ‌های مورد نیاز برای تزریق‌های تماسی باید در نقاط مناسب تعبیه شده باشند و نحوه انسداد آن‌ها در این نقاط پیش‌بینی شده باشد. همچنین نشیمن و پایه نگهدارنده، مهار و گوه موقت یا دائم برای نصب پوشش و نقاط قرارگیری آن‌ها باید به دقت مشخص شده باشد و قطعات پایه‌ها ساخته و همراه قطعات پوشش به کارگاه حمل شوند. از آنجایی که پوشش فولادی قطعات جدار نازک مستعد کمانش، تغییر شکل و آسیب‌دیدگی حین انبار کردن، حمل و نصب و نیز فشار بتن‌ریزی و تزریق هستند، لازم است با توجه به نسبت قطر به ضخامت آن با مهار داخلی تقویت شوند. این مهارها با آرایش‌های مختلفی نظیر منفرد، صلیبی، عنکبوتی، شعاعی، قطری، مشبک و ترکیبی بسته به نسبت قطر به ضخامت پوشش فولادی تعبیه می‌گردند. برای بارگیری قطعات باید قلاب کافی در نقاط مناسب تعبیه گردد.

۶-۳-۲- جوشکاری و کنترل‌های کیفی

با توجه به محدودیت ابعاد قطعات برای حمل و نصب، عملاً بخش‌های تکمیلی جوشکاری در داخل تونل انجام می‌شود. جوشکاری قطعات پوشش فولادی باید با رعایت ملاحظات کیفی آن همراه باشد. معمولاً برای پوشش نیاز به پیش گرمایش حدود ۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و پس گرمایش ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ تا ۳ ساعت نیاز خواهد بود و لذا تمهیدات لازم برای این کار باید در نظر گرفته شود. سایر تمهیدات جوشکاری نظیر آماده‌سازی و کنترل وضعیت لبه‌های ورق‌ها و انتخاب روش جوشکاری و مراحل جوشکاری بر اساس توصیه‌های اتحادیه کارهای آبی^۱ و انجمن جوش آمریکا^۲ قابل بررسی می‌باشد. یکی از چالش‌های مهم نصب پوشش فولادی دمای نصب است. دمای نصب و جوشکاری باید بر اساس سناریوهای دمای پیش‌بینی شده در طراحی باشد. همچنین جوشکاری‌ها نباید در زیر تابش شدید آفتاب و دمای بالای محیط انجام پذیرد. در بررسی اثرات دما، افزایش دمای بتن در حین گیرش نیز باید مد نظر قرار گیرد. در صورت وجود پوشش حفاظتی روی ورق، این پوشش در محل جوشکاری باید به دقت ترمیم و تکمیل گردد. برای اطمینان از کیفیت جوشکاری باید علاوه بر بازرسی چشمی تخصصی از تست‌های غیرمخرب مناسب نظیر تست فراصوت و رادیوگرافی استفاده نمود. این تست‌ها معمولاً حدود ۲۴ ساعت پس از اتمام جوشکاری انجام می‌شوند.

۶-۳-۳- آزمون‌های پذیرش کیفیت

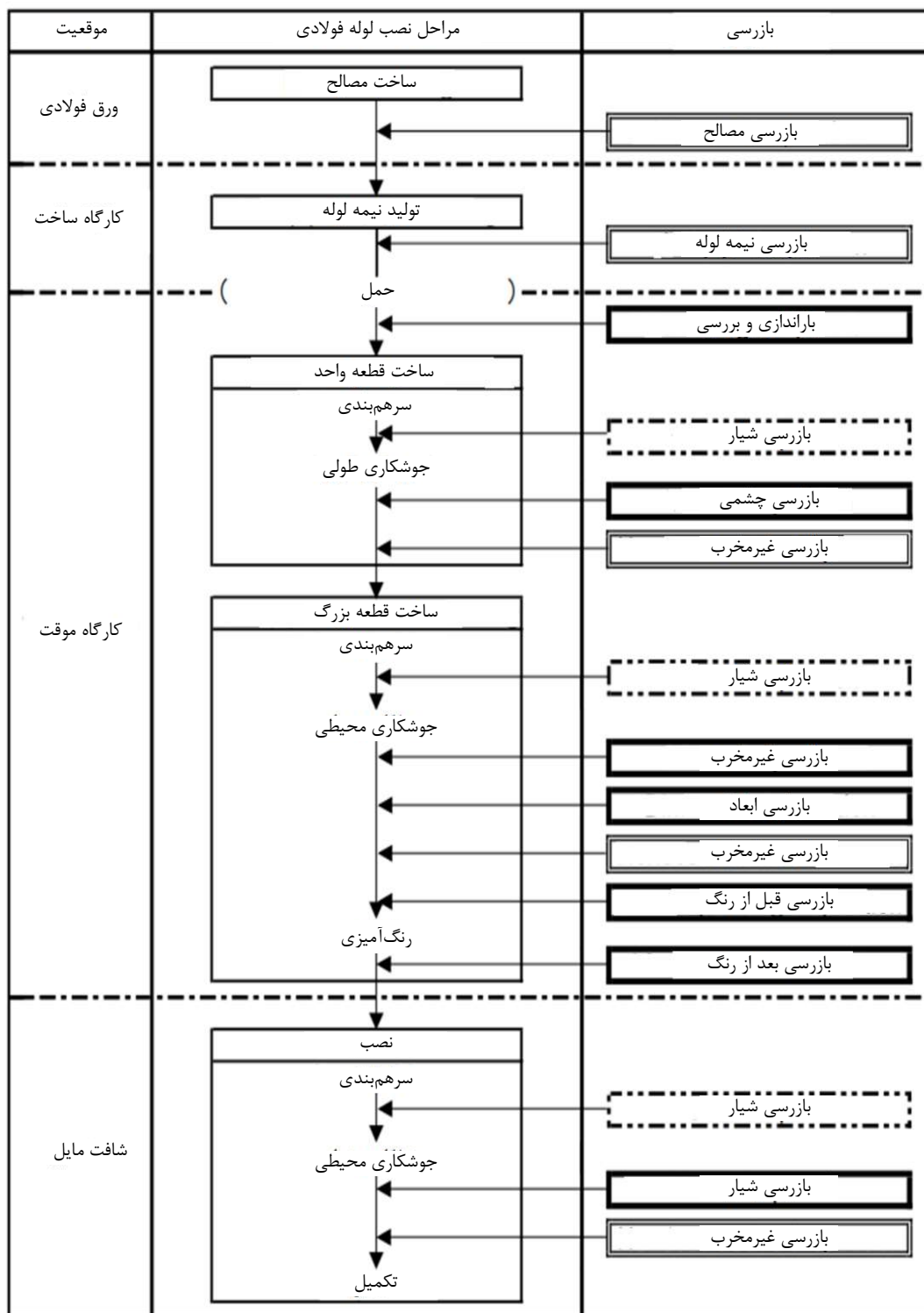
با تکمیل جوشکاری، پوشش فولادی باید در موقعیت تعیین شده قرار گرفته و توسط نشمین و مهار مناسب تثبیت شود. این مهارهای مدفون و سایر مهارهای موقت داخلی باید بتوانند پایداری پوشش فولادی را در زمان بتن‌ریزی و تحت زیر فشار بتن، فشار جانبی آن و وزن بتن تازه تامین نمایند. بتن مورد استفاده در پوشش تونل در این روش معمولاً با مقاومت حداقل مشخصه ۲۸ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود. در صورت نبود فشار خارجی آب در درزهای طولی و عرضی بتن‌ریزی معمولاً نیازی به استفاده از نوار آب‌بند نیست ولی با وجود فشار آب خارجی باید از نفوذ آب از درزها و به طور مستقیم پشت ورق فولادی جلوگیری به عمل آید. این کار البته با انجام تزریق با سیمان با بلین بالا و افزودنی آب بند کننده یا کریستالیزه شونده هم امکان‌پذیر خواهد بود.

معمولاً در تونل با پوشش ورق فولادی، بتن پوشش تونل، غیرمسلح است؛ ولی در برخی موارد هم ممکن است نیاز به استفاده از بتن مسلح باشد. فضای حفاری بیرون پوشش باید برای انجام عملیات جوشکاری و نصب کافی باشد و البته به حداقل ممکن کاهش یابد؛ چراکه افزایش حجم بتن پرکننده صعوبت کار اجرایی را افزایش می‌دهد. این فضا معمولاً حداقل ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. برای انجام عملیات بتن‌ریزی باید سوراخ‌هایی در بدنه پوشش فولادی متناسب با لوله‌های بتن تعبیه شود. این سوراخ‌ها معمولاً در محدوده ساعت‌های ۹ و ۱۲ و ۳ قرار می‌گیرند که به ترتیب

۱- American Water Work Association (AWWA)

۲- American Welding Society (AWS)

از ۹ و ۳ آغاز و با ۱۲ تکمیل می‌گردد. بتن پرکننده بهتر است از نوع خودتراکم و بدون افت باشد تا نیاز به عملیات تراکم نداشته و فضاهای خالی ناشی از آبرفتگی آن به حداقل برسد. به منظور کنترل جریان آب حین بتن‌ریزی معمولاً از لوله زهکش در مجاورت پوشش فولادی در وجه خارجی استفاده می‌شود. برای کاهش فشار آب اطراف تونل و پشت شاتکریت و پوشش بتنی هم از لوله‌های زهکش با سوراخ‌های جمع‌آوری آب به داخل پوشش اولیه تونل استفاده می‌گردد. روند نمای عمومی کنترل کیفی ساخت و نصب پوشش فولادی تونل آبرسان با چاه در شکل (۶-۱۱) ارائه شده است.



شکل ۶-۱۱- روند نمای عمومی کنترل کیفی ساخت و نصب پوشش فولادی تونل آبرسان با چاه

۴-۶- روش انجام تزریق تماسی و تزریق تحکیمی

پوشش فولادی معمولاً روی پایه‌ها و به بدنه تونل تثبیت شده و بتن‌ریزی پشت آن از سوراخ‌های تعبیه شده در آن انجام می‌پذیرد. عموماً به دلیل انقباض بتن نیاز به تزریق تماسی و پرکردن فضاهای خالی می‌باشد. عملیات تزریق تماسی در پوشش فولادی در دو قسمت انجام می‌گیرد که عبارتند از:

۱- حذف‌اصل بتن پرکننده و پوشش موقت یا سنگ،

۲- حذف‌اصل ورق و بتن.

علاوه بر مسائل عمومی تزریق تماسی، در پوشش‌های فولادی پرکردن پشت ورق فولادی برای جلوگیری از اعمال بارهای نامتقارن به ورق و اعوجاج آن تحت فشار داخلی و جلوگیری از نفوذ آب در پشت ورق و تمرکز فشار خارجی بسیار مهم می‌باشد. این عملیات معمولاً برای ۱۸۰ درجه یا نیمه فوقانی مقطع تونل مورد نیاز است؛ ولی حسب روش اجرا ممکن است در قسمت‌های بیش‌تر یا کم‌تری از مقطع انجام پذیرد. معمولاً برای انجام تزریق پشت ورق، سوراخ‌ها و لوله‌هایی با قطر ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر تعبیه می‌شود. این تزریق تحت فشار حداکثر حدود ۲ بار انجام می‌شود.

برای تزریق تماسی، لوله‌های تزریق بین بتن و سنگ تعبیه می‌شوند و البته می‌توانند با عملیات سوراخ‌کاری هم ایجاد شوند که بعضاً قطر بیش‌تری برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. برای تخلیه هوای اضافی و کنترل فشار تزریق و اطمینان از کفایت آن، لوله‌های هوا نیز برای تزریق پشت ورق پیش‌بینی می‌شود. برای تزریق تماسی پشت بتن از روش‌های متداول کنترل تزریق تماسی استفاده می‌گردد. سوراخ‌های تزریق معمولاً در طول تونل در گام حدود ۳ متر قرار می‌گیرند. توصیه می‌شود تزریق تماسی پشت ورق با فاصله زمانی مناسب مثلاً چند هفته‌ای انجام شود تا کفایت بهتری داشته باشد. برای اطلاعات بیش‌تر می‌توان به مرجع مربوط^۱ مراجعه نمود.

۱- AISI & SPFA Inc., Steel Penstocks and Tunnel Liners, 1982.

فصل ۷

روش‌های تامین ایمنی، سلامت و

جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی

۷-۱- کلیات

برنامه سلامت، ایمنی و محیط زیست (اچ.اس.ای) در قالب نظام‌نامه الزامی باید در سه جنبه سلامت و ایمنی افراد شامل کارکنان و مردم، ایمنی خود سازه و محیط و مستحذات پیرامون آن و حفاظت از محیط زیست در پروژه تونل‌سازی مورد توجه قرار گیرد. یک نکته بسیار مهم در این زمینه، وجود قوانین و مقررات بالادستی و سازمان‌های مختلف و متعدد مرتبط با این موضوع است که باید در برنامه اچ.اس.ای به دقت دیده شود. این قوانین شامل موضوعات بهداشت، کار و تامین اجتماعی، ایمنی کار با ماشین‌آلات و تجهیزات، کار در معادن، کار با مواد انفجاری، آتش‌نشانی و نظایر آن می‌باشد. همچنین، ملاحظات و مقررات مربوط به انواع بیمه مرتبط و مورد نیاز از دیگر مسائل مهم در این برنامه می‌باشد. رعایت مفاد قانون کار برای ایمنی فردی در این زمینه بسیار مهم است. با توجه به اهمیت مساله اچ.اس.ای، توصیه می‌شود در ساختار سازمانی پروژه، مسئول اچ.اس.ای مستقیماً زیر نظر مدیر پروژه بوده و دارای اختیارات و کافی باشد.

برای ارزیابی و کنترل سامانه ایمنی و سلامت می‌توان از روش کنترل اجزا استفاده نمود که نمونه آن در جدول (۷-۱) ارائه شده است که شامل تعریف اهداف، برنامه مدیریت، دریافت بازخورد، فرهنگ ایمنی، مستندسازی و نشانگرهای لازم برای کنترل نتایج است. این جداول فعالیت‌های اصلی برنامه اچ.اس.ای را به صورت مرحله‌ای مورد ارزیابی قرار می‌دهند.

جدول ۷-۱- نمونه جدول ارزیابی سامانه اچ.اس.ای (ایمنی و سلامت) در پروژه تونل‌سازی

مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم	مرحله پنجم
(۱) اهداف □ اهداف محقق نمی‌شوند	□ امیدواری به برآورده نمودن حداقلی قوانین	□ اهداف و آرمان‌ها فراتر از قوانین برآورده می‌شوند	□ شرکت در برآورده نمودن اهداف و آرمان‌ها برگزیده و برتر می‌شود	□ فعالیت‌ها به سمت اثرگذاری و ارتقای قوانین می‌روند
(۲) مدیریت □ موانع مدیریتی محدودی برای اچ.اس.ای وجود دارد	□ پیگیری حوادث □ مدیریت ضعیف اچ.اس.ای مقداری عواقب در پی دارد □ علاج موردی و اساسی برای برخی ریسک‌ها	□ مدیریت به طور فعال درگیر اچ.اس.ای می‌شود □ عدم رعایت ملاحظات اچ.اس.ای □ عکس‌العمل همگانی بر می‌انگیزد □ ملاحظات اچ.اس.ای به طور سیستماتیک انجام می‌شود □ تمرکز بر مشکلات فنی و انسانی وجود دارد	□ اچ.اس.ای در اجرا و کیفیت آن اولویت یکسانی دارد □ جامع‌نگری و رویکرد سیستماتیک بر اچ.اس.ای حاکم است □ تمرکز قوی بر عوامل سازمانی و مدیریتی وجود دارد	□ تعهد و التزام جدی مدیریتی برای بهبود فرهنگ ایمنی وجود دارد و فقط بر رضایت از خود مبتنی نیست □ مدیریت اجرای تونل مدل بسیار خوبی دارد
(۳) بازخورد و یادگیری □ انتقال تجربیات غیر سیستماتیک	□ آمارگیری ساده □ اغلب با اصلاحات کوتاه‌مدت و	□ آمارگیری جامع □ کنترل انحرافات □ دارابودن برنامه عملیاتی و اقدامات	□ فعالیت پیش‌گیرانه و پویا و اقدامات مستمر □ فرآیند جامع در تدوین برنامه عملیاتی	□ تبادل سیستماتیک و گسترده تجربیات با سایر شرکت‌ها

			موردی		
--	--	--	-------	--	--

ادامه جدول ۷-۱- نمونه جدول ارزیابی سامانه ا.چ.اس.ای ۱ (ایمنی و سلامت) در پروژه تونل‌سازی

مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم	مرحله پنجم
(۴) فرهنگ ایمنی	□ تمرکز اساسی بر سرعت اجرا و اتمام کار و تمرکز کم‌تر بر ایمنی	□ تلاش شایان برای رفتار ایمن و شانس حصول آن در برخی موارد	□ رفتار ایمن جزو خط‌مشی اصلی است □ کارکنان به صورت فعال به دنبال تجربیات یکدیگر در زمینه ا.چ.اس.ای هستند	□ استفاده همیشگی از روش‌های ایمن و عدم خدشه دارکردن این روال‌ها □ تمام کارکنان به طور جدی درصدد حصول یک محیط کار ایمن بدون هرگونه خسارت و آسیب هستند
(۵) مستندسازی	□ برآورده نمودن حداقل نیازها	□ مستندسازی جامع □ اصلاح و ویرایش مستمر	□ مستندسازی ساده و کاربردی □ پذیرش و تبعیت اکثر کارکنان از روش‌ها	□ مستندسازی نهادینه و همواره به روز انجام می‌شود
(۶) نشانگر نتایج برای کنترل	□ آمار غیابی و تصادفی به عنوان تنها نشانگرهای نتایج کار	□ کاربرد گسترده نتایج ا.چ.اس.ای به عنوان نشانگرهای کنترلی	□ حصول اهداف هماهنگ و یکپارچه با رصد ارتباط بین آسیب کارکنان و سایر خسارات با استفاده از نشانگرهای نتایج	□ دریافت جوایز ملی و بین‌المللی برای مدیریت کیفیت و ا.چ.اس.ای

۷-۱-۱- خطرات و ریسک‌های حین اجرای تونل

۷-۱-۱-۱- چارچوب ارزیابی خطرات و ریسک‌ها

ارزیابی خطر و ریسک از مهم‌ترین بخش‌های برنامه مدیریت ا.چ.اس.ای تونل است که شامل بخش‌های اصلی زیر می‌باشد:

- ۱- شناسایی خطرات در طول زمان اجرا و اولویت‌بندی خطرات با هماهنگی دفتر فنی پروژه.
- ۲- مشخص نمودن علائم و نشانه‌های رخداد و روش پایش و پیش‌بینی آن و ارائه آموزش لازم به پرسنل.
- ۳- ارزیابی آسیب و ریسک هر مخاطره در هر مقطع اجرایی از نظر شدت و وسعت و موقعیت مکانی و زمانی.

۷-۱-۱-۲- شناسایی و دسته‌بندی مخاطرات

در شناسایی خطرات و تهدیدها فرض می‌شود، حداقل تمهیدات در برابر مسائل معمول در عملیات اجرایی، پیش‌بینی و به کار گرفته شده باشد و خطرات مورد بحث، مربوط به اتفاقات با احتمال نسبتاً کم‌تر یا موارد پیش‌بینی نشده باشند. سناریوهای خطرات مختلف محتمل در اجرای تونل انتقال آب عبارتند از:

- ۱- تاسیسات تجهیز کارگاه
- تاسیسات ترافیکی و حمل و نقل زیرزمینی،

- حوادث طبیعی نظیر سقوط سنگ و ریزش کوه و لغزش شیب، سیلاب و بارش شدید، زلزله و سقوط بهمن و یخبندان،
- افزایش سر و صدا در محیط کاری و تشدید آن به دلایلی نظیر فرسوده بودن ماشین‌آلات و تجهیزات،
- ۲- تهویه
 - افزایش شدید غلظت گاز و غبار ناشی از عملیات انفجار خصوصا غبار حاوی کوارتز،
 - توقف تهویه به دلیل قطع برق یا خرابی فن‌ها و تجهیزات مرتبط آن،
 - عدم تناسب و کفایت ظرفیت تهویه با شرایط خاص انفجار یا افزایش موردی غلظت غبار،
 - نشت گازهای سمی داخل زمین و افزایش غلظت آن به دلیل اختلال یا توقف کار سیستم تهویه،
 - آسیب‌دیدگی کانال‌ها و داکت‌ها و نشت و خروج هوای آلوده یا عدم انتقال هوای تازه به جبهه کاری،
 - تجمع یا تمرکز مواد خطرناک و شیمیایی یا اختلال موضعی سامانه تهویه.
- ۳- آتش‌سوزی
 - آتش‌سوزی ناشی از ایجاد مشکل در ماشین‌آلات یا تصادف وسایل نقلیه ناشی از کمبود دید در تونل،
 - انفجار و یا آتش‌سوزی ناشی از اشتعال سوخت یا مواد شیمیایی یا گازهای انباشته شده در فضای کاری،
 - آتش‌سوزی پس از اتمام حفاری و خروج از تونل.
- ۴- حمل و نقل
 - حوادث و تصادفات در سیستم حمل و نقل تونل‌سازی نظیر تصادف با افراد،
 - برخورد وسایل نقلیه با قالب و ادوات اجرایی،
 - حوادث سیستم حمل و نقل ریلی مانند خروج از ریل و مشکلات نظیر آن،
 - حوادث ناشی از تصادفات در مسیرها و جاده‌های منتهی به کارگاه،
 - سقوط و افتادن افراد به دلیل ایمنی نامناسب مسیرهای عبور یا علائم ناکافی هشدار،
 - یخ‌زدگی مسیرها و سقوط قندیل و قطعات در اثر زوال ناشی از یخ‌زدن و ذوب شدن.
- ۵- برق و روشنایی
 - مجروح شدن افراد به دلیل ناکافی بودن یا نبودن روشنایی، مسیر تردد و عبور و مرور و مبادی خارج از سایت،
 - حوادث ناشی از نقص در نصب تاسیسات فشار قوی برق، نظیر نشت از کابل و تابلو و جریان القایی،
 - جرقه و آتش‌سوزی یا انفجار ناشی از آن،
 - برق‌گرفتگی و سوختگی پرسنل تعمیرات برق به دلیل عدم رعایت نکات ایمنی یا مهارت ناکافی و برق‌گرفتگی و سوختگی ناشی از ولتاژ بالای برق،
 - عواقب ناشی از قطع برق مانند ایجاد حادثه برای پرسنل در حال کار، از کار افتادن پمپ‌ها و سیستم زهکشی،
 - تهویه، ابزار دقیق و اندازه‌گیری و پایش،
 - انتشار گازهای سمی در حین شارژ باتری‌ها.

۶- حفاری و نگهداری

- هجوم ناگهانی آب یا گل به داخل تونل،
- برخورد با ناحیه آب تحت فشار،
- فروریزش در حین حفاری یا سنین اولیه شاتکریت در نواحی سست و دارای محصورشدگی کم،
- انفجار سنگ در نواحی دارای تنش بالا،
- افتادن سنگ و قطعات پوشش موقت و سیستم نگهداری،
- افزایش بیش از حد غلظت غبار ناشی از شاتکریت خشک،
- حوادث ناشی از انفجار ناگهانی مواد منفجره در حین حمل و جاسازی،
- برخورد بدن پرسنل با قطعات و اجزای سیستم نگهداری و میلگرد و قالب،
- حوادث و مسمومیت‌های احتمالی در حین عملیات تزریق تحت فشار یا با مواد شیمیایی،
- غرق شدگی و حوادث ناشی از هجوم ناگهانی آب و آب‌گرفتگی،
- فرونشست زمین ناشی از کم بودن سرباره و عدم کفایت سیستم نگهداری موقت،
- لغزش شیب‌های اطراف ناشی از نشست‌های کنترل نشده زمین در شیب‌های مجاور تونل.

۷- نشست گاز

- انفجار گازهای ناشی به داخل تونل نظیر گاز متان،
- مسمومیت ناشی از افزایش غلظت گازهای سمی.

۸- هوای فشرده

- انتشار و اشتعال گاز سیستم هوای فشرده و حادثه ناشی از داغ شدن کابل جوشکاری یا سایر فعالیت‌ها،
- حادثه ناشی از استفاده از گازهای نامناسب نظیر استیلن، که در فشار بالا امکان انفجار دارند،
- حوادث برای پرسنل ناشی از عدم استفاده از تجهیزات شخصی مانند ماسک مناسب برای فشارهای بالا،
- افزایش غلظت اکسیژن از حدود ۲۳٪ و افزایش احتمال آتش‌سوزی.

۹- پوشش تونل و تزریق

- سموم ناشی از حلال‌های مواد افزودنی و شیمیایی در بتن و تزریق با اثرات مستقیم و دراز مدت. مثلاً ان-متیلول-آکریلامید^۱ ناشی از محلول تزریق، دارای اثرات منفی دراز مدت روی سیستم عصبی،
- سوختگی پوست و حرارت زیاد ناشی از کار با ملات‌های ترمیم یا تزریق،
- حوادث ناشی از عملیات آرماتوربندی،

- سقوط افراد از داریست و بالاير و بلندی.

۷-۱-۱-۳- یایش نشانه‌ها و ارزیابی ریسک

جدول ۷-۲- خطرات دارای ریسک آسیب و جراحت فردی

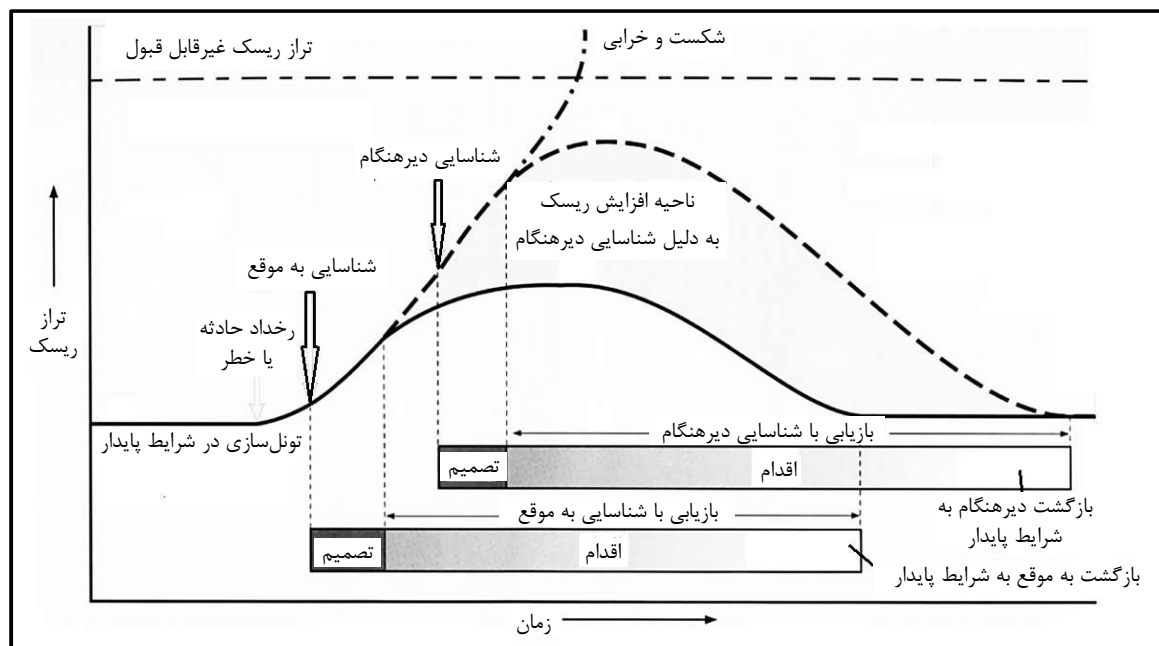
[illegible]

جدول ۷-۳- فهرست خطرات ژئوتکنیکی، عواقب، علائم و اقدامات پیشگیرانه

خطر	آب تحت فشار	نواحی تحکیم نیافته	سنگ‌های پر تنش	محصور شونده گی ضعیف	توده سنگ خرد شده یا بلوکی	گاز متان *
احتمالی اثر با عواقب	- سیلاب - فروریزش - تعویض مخاطره آمیز مته	- فروریزش ناگهانی - سینه کار غیر قابل کنترل	- انفجار یا کنده شدن سنگ - سقوط بلوک یا سنگ	- سقوط بلوک سنگی	- سقوط بلوک سنگی - فروریزش	- انفجار - تاخیر در عملیات اجرایی
علامت هشدار	- آب در سوراخ‌های آزمایشی یا انفجاری - خروج آب از درزهای سینه کار - ساختارهای کارستی	- ورود آب، گل یا ماسه در سوراخ‌های آزمایشی یا انفجاری	- مشکلات سوراخ کاری در ترک‌های آزادکننده تنش - صدای ترک خوردگی - تغییر شکل‌های قابل مشاهده - بدون علامت	- مشکلات سوراخ کاری در درزهای باز شده - بدون علامت	- مشکلات سوراخ کاری خرد شده - ادامه نهم‌زدگی و ظهور قطرات آب - بدون علامت در توده سنگ بلوکی	- وجود حباب در آب نشتی - بوی فاسدشدگی
اقدامات پیشگیرانه	- سوراخ کاری آزمایشی برای متمرکز کردن آب نشتی - پیش تزریق یا زهکشی - توقف عملیات انفجار تا انجام تمهیدات پیشگیرانه	- مشابه آب تحت فشار - انجماد زمین در جبهه حفاری	- لق گیری، بولت زنی، بتن پاشی - حفاری سوراخ‌های آزادکننده تنش	- پیش بولت گذاری یا تسمه گذاری - لق گیری، بولت زنی، بتن پاشی	- بتن پاشی برای نواحی نخورده - پوشش بتنی برای نواحی دست خورده یا آبدار	- سوراخ کاری آزمایشی - افزایش تهویه برای رقیق کردن غلظت گاز و گردش هوا - اندازه گیری و پایش

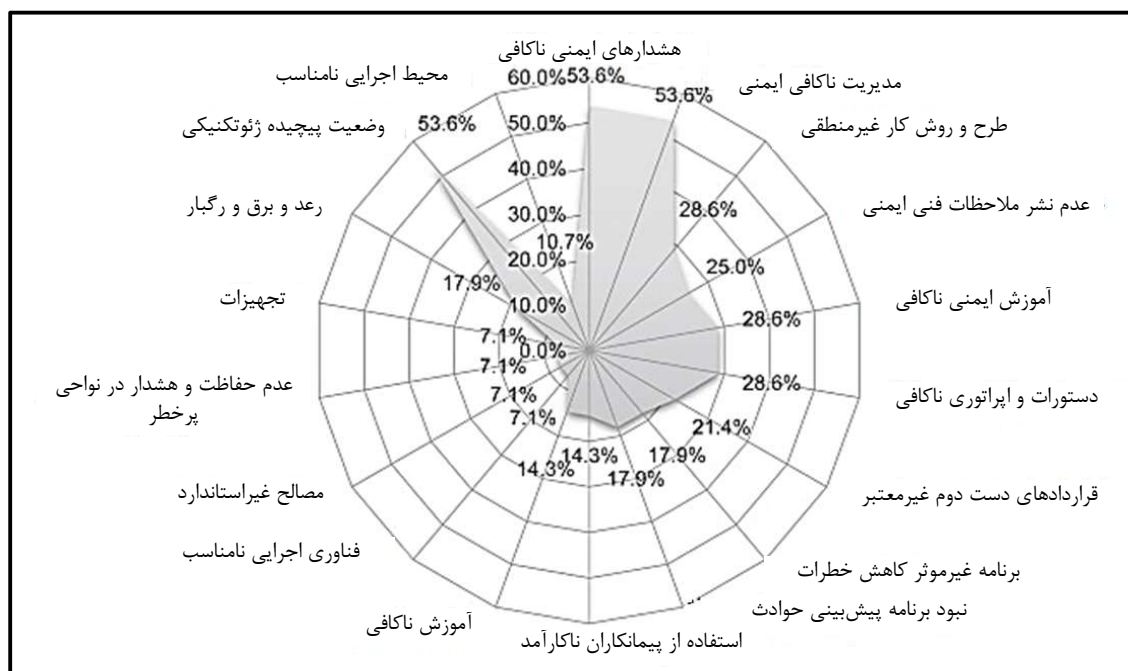
* دمای زیاد نزدیک توده‌های گرمایی، گازهای ناشی از ترکیبات سولفور، مواد پرتوزا، غبارهای کشنده ناشی از کانی‌های حاوی فلزات سمی مانند آرسن، آنتی موان و جیوه و کانی آزبست و سایر موارد نیز حسب مورد باید در نظر گرفته شوند.

در ارزیابی ریسک، زمان تشخیص و اقدام متقابل بسیار مهم است. هر چه این کار زودتر انجام پذیرد، میزان ریسک ناشی از رخداد احتمالی کم‌تر خواهد بود. همان‌طور که در شکل (۷-۱) ملاحظه می‌شود، تراز ریسک در طول زمان وابسته به این فرآیند تشخیص و اقدام می‌باشد. در تدوین برنامه مدیریت ریسک ایمنی و سلامت و آمادگی برای اقدامات متقابل، اولویت‌بندی و تواتر رخداد حوادث بسیار مهم است.



شکل ۷-۱- وابستگی تراز ریسک به فرآیند تشخیص خطرات و اقدام متقابل در طول زمان

بر اساس سوابق موجود بیش‌ترین سهم در تهدید ایمنی و سلامت ناشی از عدم آگاهی و آمادگی کافی و نداشتن برنامه مناسب است. در شکل (۷-۲) نمونه آماری حوادث تونل‌سازی در یک بازه ۱۰ ساله در چین طبق آمار تعداد زیادی از پروژه‌ها ارائه شده است که به عنوان راهنما می‌تواند اولویت موارد را در این زمینه مشخص نماید.



شکل ۷-۲- نمونه آماری تاثیر عوامل مختلف در تهدید سلامت و ایمنی در تونل‌سازی بر اساس پروژه‌های تونل‌سازی در چین

۷-۲- نقشه راه ایمنی کارکنان در حین اجرای تونل

۷-۲-۱- دستورهای حفاظت فردی

حفظ سلامت و جان افراد از مهم‌ترین اجزای برنامه سلامت و ایمنی در تونل‌سازی است و لذا اولین و مهم‌ترین گام در برنامه ایمنی، پیش‌بینی تمهیدات و امکانات و تجهیزات حفاظت فردی کارکنان پروژه می‌باشد. ملاحظات مهم کاهش آسیب‌های انسانی و فردی در تونل‌سازی به شرح زیر است:

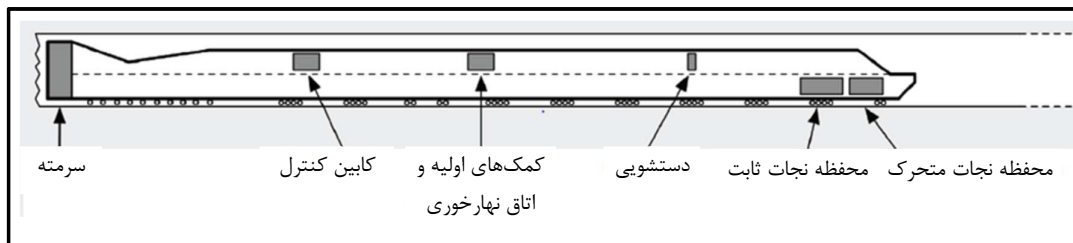
- ۱- استفاده از وسائل ایمنی فردی اولیه شامل لباس با درخشندگی مناسب در فضای کم نور، ماسک، عینک، چراغ قوه یا شارژی، گوشی (برای محیط با نویز بالا)، کلاه، دستکش و کفش ایمنی از الزامات اولیه کار در تونل است.
- ۲- تعداد پرسنل اجرایی در تونل همواره باید به حداقل ممکن کاهش یابد. در عین حال هیچ فعالیتی در جبهه کاری بهتر است با حضور تنها یک نفر انجام نشود.
- ۳- آمار و مشخصات افرادی که وارد تونل یا از آن خارج می‌شوند باید به دقت ثبت شود. این افراد باید از لحاظ سلامت و آمادگی به طور مرتب معاینه شده و در شرایط مناسب باشند.
- ۴- آموزش نکات ایمنی و روش‌های صحیح کار و استفاده از ابزار و ماشین‌آلات و نحوه عمل در شرایط اضطراری و آگاهی از مسیرهای خروج اضطراری و فعالیت‌های امدادی اولیه در شرایط بحرانی باید برای کلیه پرسنل صورت گرفته و با انجام آزمون و ارائه گواهی، اطمینان لازم از توجیه و آمادگی پرسنل در این خصوص به عمل آید.
- ۵- در شرایطی که ممکن است امکان آب‌گرفتگی و استغراق ناگهانی در کارگاه یا داخل تونل وجود داشته باشد، باید از جلیقه نجات هم استفاده شود. این جلیقه‌ها حسب شرایط همراه افراد یا در دسترس آن‌ها قرار می‌گیرد.
- ۶- برای هر گروه کاری یا تیم مستقر در تونل باید وسایل ارتباطی برای شرایط اضطراری در دسترس یا همراه باشد.
- ۷- در جبهه کاری یا در قسمت‌هایی که امکان نشت گاز یا کاهش اکسیژن و شرایط حاد تنفسی پیش‌بینی می‌شود، باید هر گروه یا تیم یا هر جبهه کاری، حسگر سنجش گازهای سمی و اکسیژن نیز همراه داشته باشد.
- ۸- کنترل شرایط دما و رطوبت برای امکان فعالیت مناسب پرسنل در داخل تونل باید مرتب انجام پذیرد. در صورت نیاز، دوره‌های استراحت یا طول شیفت‌ها برای افزایش بازده باید تنظیم گردد.
- ۹- شرایط فیزیکی کار مانند فضای محدود، نشستن، خم شدن، ایستادن و جابجایی اجسام سنگین بیش از حد باید در برنامه کاری افراد کنترل شود. در شرایط سخت کاری ممکن است نیاز به استفاده و همراه داشتن حسگر حرکتی باشد تا در صورت عدم حرکت فرد برای مدت زمان معینی اعلام هشدار برای امداد رسانی نماید.
- ۱۰- در شرایطی که امکان خطرات ناشی از هجوم ناگهانی گازهای سمی وجود داشته باشد، پرسنل باید مجهز به ماسک‌های مخصوص تنفسی برای زمان فرار باشند.

۷-۲-۲- شناسایی مخاطرات و آسیب‌های کاری

۷-۲-۳- تعبیه محدوده‌های امن

یکی از ملاحظات مهم برنامه شرایط اضطراری در تونل‌سازی پیش‌بینی محدوده امن برای عبور و مرور و پناه گرفتن در زمان وقوع حوادث است. نوع و مشخصات محدوده‌های امن بستگی مستقیم به نوع حادثه و احتمال وقوع آن دارد و طراحی ظرفیت و مشخصات اتاق امن بر اساس آن صورت می‌پذیرد. از جمله حوادث مهمی که معمولاً به طور ناگهانی باعث ایجاد تلفات می‌شوند می‌توان به انفجار، نشت گاز سمی، کمبود شدید اکسیژن در اثر توقف سیستم تهویه و گرد و غبار بیش از حد ناشی از انفجار اشاره نمود. در تونل‌سازی مکانیزه اتاق امن و محدوده‌های امن در داخل ماشین حفاری تعبیه می‌شوند. این فضاها شامل بخش کمک‌های اولیه، اتاق کنترل و محفظه‌های ثابت و متحرک امن هستند. محفظه متحرک می‌تواند قابلیت حرکت داشته و از دستگاه جدا شود. در تونل‌سازی متعارف در صورت تکرر و احتمال بالای وقوع معمولاً از محفظه ایمنی استفاده می‌شود که محتوی ذخیره اکسیژن کافی بوده و معمولاً در فاصله حداکثر ۵۰۰ متری جبهه کاری قرار می‌گیرد.

جانمایی اتاق امن و نجات، در انتهای حفاری مکانیزه تونل در شکل (۷-۳) و نیز محفظه ایمنی ثابت با اکسیژن و تجهیزات نجات فردی که در فاصله حداکثر ۵۰۰ متری جبهه کاری قرار می‌گیرد، در شکل (۷-۴) نشان داده شده است.



شکل ۷-۳- جانمایی اتاق امن و نجات در انتهای ماشین حفاری مکانیزه تونل



شکل ۷-۴- محفظه ایمنی ثابت با اکسیژن و تجهیزات نجات فردی که در فاصله حداکثر ۵۰۰ متری جبهه کاری قرار می‌گیرد

مسیر عبور و مرور امن و فرار در تونل انتقال آب باید دارای نرده ایمنی مناسب و سیستم روشنایی اضطراری باشد. تراز این مسیر بهتر است بالاتر از کف تونل قرار گیرد. این مسیرها باید همواره باز بوده و مسدود یا معیوب یا غیرایمن نگردند.

۷-۳- نقشه راه نجات کارکنان در شرایط اضطراری

۷-۳-۱- تعریف شرایط اضطراری

هر یک از خطرات احتمالی ایجاد شده در تونل دارای طیف شدت یا سطح خطر هستند و میزان ریسک آن‌ها در شرایطی منجر به وضعیت اضطراری می‌گردد. معمولاً نحوه اقدام در شرایط مختلف به صورت زیر تعریف می‌شود:

- اگر شاخص اندازه‌گیری شده کمتر از یک چهارم مقدار مجاز باشد، معمولاً اقدام خاصی صورت نمی‌گیرد.
- اگر شاخص اندازه‌گیری شده بیش از یک چهارم تا کمتر از مقدار مجاز باشد معمولاً عوارض ظاهری ایجاد شده و اندازه‌گیری‌ها به طور مجدد و مرتب کنترل می‌شوند.
- اگر شاخص اندازه‌گیری شده بیش از مقدار مجاز باشد شرایط غیرعادی یا اضطراری ایجاد شده و اقدامات فوری طبق برنامه و زمان‌بندی مشخص در دستور کار قرار گرفته و شرایط تا رفع حالت اضطراری و بحرانی، تحت پایش دقیق قرار می‌گیرد.

در مراجع ایمنی، میزان غلظت مجاز گازها که مقادیر بیش از آن منجر به شرایط غیرعادی و اضطراری می‌گردد، ارائه شده است. مقدار مجاز مه ذرات روغن و مواد نفتی ناشی از موتورهای و یا سیستم هوای فشرده و سوختی یک میلی گرم در مترمکعب و مقدار مجاز بخار آن ۵۰ میلی گرم در مترمکعب و مقدار مجاز غبار کوارتز برای تنفس یک دهم میلی گرم در مترمکعب در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر برای میانگین یک شیفت ۸ ساعته می‌باشد. البته برای دی‌اکسید نیتروژن مقدار لحظه‌ای معیار کنترل می‌باشد. نصب دستگاه ثابت سنجش غلظت گازهای مختلف در نقاط حساس تونل و جبهه کاری همراه با محافظ برای جلوگیری از ضربه و آسیب دیدن آن صورت می‌پذیرد.

علاوه بر اندازه‌گیری غلظت گازها و اکسیژن در تونل، لازم است در مسیر تونل در هنگام کارکرد سیستم تهویه، سرعت باد یا خروج هوای آلوده و غبار نیز اندازه‌گیری شود. این کار با دستگاه قابل حمل انومتر انجام می‌شود که اغلب رطوبت و دما را نیز اندازه می‌گیرد. همچنین برای سنجش میزان نور برای عبور و مرور و عملیات اجرایی از دستگاه لوکس متر استفاده می‌شود. مقادیر حدی و مجاز شیمیایی، گازها و عوامل فیزیکی، به ترتیب در جدول‌های (۷-۴)، (۷-۵) و (۷-۶) ارائه شده است.

جدول ۷-۴- مقادیر حدی یا مجاز عوامل شیمیایی^۱

عوامل محیطی شیمیایی		مقادیر حدی مجاز
آلوده کننده‌ها در شکل‌های مختلف: گاز (گ) ذرات معلق (ذ)	گازها (گ)	بستگی به نوع گاز دارد
	غبار و بخارات (ذ)	غبار آزار دهنده: ۱۰ میلی گرم در مترمکعب غبار ملایم: ۵ میلی گرم در مترمکعب
	غبار معدنی و الیاف (ذ)	بستگی به نوع غبار دارد
	آزبست	۰/۱ فیبر در میلی لیتر

۱- Handbook of Tunnel Engineering II, Basics & Additional Services for Design and Construction. Ernst & Sohn (2014)

ادامه جدول ۷-۴- مقادیر حدی یا مجاز عوامل شیمیایی

عوامل محیطی شیمیایی	مقادیر حدی مجاز
آلوده کننده‌ها در شکل‌های مختلف:	کل غبار: ۰/۳ میلی گرم در مترمکعب غبار ملایم: ۰/۱ میلی گرم در مترمکعب
گاز (گ)	غبار سیمان (ذ)
ذرات معلق (ذ)	بخار روغن (ذ)
	دود سوخت دیزل (گ، ذ)
	دود و گاز جوشکاری (گ، ذ)

جدول ۷-۵- مقادیر حدی یا مجاز گازها

گاز	منبع	خصوصیات	مقدار حدی PPM
دی اکسیدنیترژن NO ₂	دود دیزل و گاز انفجار مواد نیتروژنی	قهوه‌ای مایل به قرمز بایوی تندآزاددهنده	۰/۶
مونواکسید کربن CO	دود دیزل و گاز انفجار	گاز بی رنگ و بی بو	۲۵
آمونیا NH ₃	دود دیزل و هنگام مواجهه مواد انفجاری نیتروژنی با سیمان	گاز بی رنگ با بوی تند و آزاردهنده	۱۵ ۵۰ (کوتاه مدت)
رادون Ra	بستر سنگی	گاز بی رنگ و بی بو و سنگین	۱۰۰ Bq/m ³ (متوسط روزانه محیط داخلی)
دی اکسید سولفور SO ₂	گاز انفجار، جوشکاری و هوا برش	گاز بی رنگ با بوی تیز	۰/۸

جدول ۷-۶- مقادیر حدی یا مجاز عوامل فیزیکی

عوامل فیزیکی	مقدار حدی یا مجاز
آب و هوا	توصیه‌ای: ۶۰٪ < رطوبت هوا < ۲۰٪
	توصیه‌ای: < ۱۵٪ متر بر ثانیه بسته به دما و نوع فعالیت
	بسته به میزان فعالیت (حداقل ۱۰ درجه سانتی‌گراد)
	لباس ضد آب، لباس شنا
نویز	مقدار متوسط حداقل ۸۰ و حداکثر ۸۵ دسی بل
ارتعاش	مقدار متوسط ۰/۵ متر بر مجذور ثانیه حد بالا ۱/۱ متر بر مجذور ثانیه
	مقدار متوسط ۲/۵ متر بر مجذور ثانیه حد بالا ۵ متر بر مجذور ثانیه
روشنایی	مقادیر متداول برای مکان‌های مختلف
تشعشع	20mSv میانگین سالیانه
	مقدار حدی 200Bq/m ³
	مقدار متوسط میانگین سالیانه 100Bq/m ³

۷-۳-۲- تمهیدات و الزامات استاندارد

برنامه اقدامات استاندارد در شرایط اضطراری در نظام‌نامه ا.ج.اس.ای شامل سه بخش عمده به صورت زیر می‌باشد:

بخش اول - اقدامات زیرساختی:

- سامانه ارتباطاتی،
- سامانه هشدار نظیر آژیر نصب سگمنت در دستگاه حفاری مکانیزه،

- سامانه اطفای حریق،
- مسیرهای فرار اضطراری، وسایل حمل و نقل در شرایط اضطراری شامل پیش‌بینی آمبولانس و بهداری در کارگاه با امکانات کافی و در صورت نیاز پیش‌بینی واگن آمبولانس با امکانات لازم امداد اولیه در تونل‌سازی مکانیزه، پد فرود هلیکوپتر و نظایر آن،
- استفاده از محفظه متحرک برای تخلیه اضطراری.

بخش دوم- اقدامات تامین مواد:

- حسگرها و ابزار اندازه‌گیری ثابت و همراه تعیین غلظت گاز و غبار و اکسیژن،
- مواد امداد و نجات نظیر ابزار تنفسی و ماسک، تجهیزات احیا و کمک‌های اولیه،
- مواد اطفای حریق نظیر شلنگ، کپسول اطفای دستی و موارد مشابه.

بخش سوم- اقدامات شخصی:

- آموزش کمک‌های اولیه،
 - داشتن گواهی آموزش حفاظت و ایمنی فردی برای کار در شرایط مختلف و اختصاصی برای فضای بسته و محصور،
 - داشتن گواهی سلامت کارکنان برای کار در شرایط مختلف و اختصاصی برای فضای بسته و محصور نظیر کنترل بیماری‌های تنفسی و قلبی و نظایر آن مرتبط با کار در فضای بسته تونل،
 - آموزش استفاده از ابزار تنفسی اضطراری،
 - آموزش پرسنل امداد و نجات برای استفاده سریع از ابزار احیا، تنفس و حسگر گاز و اکسیژن،
 - اجرای مانورهای سنجش آمادگی دوره‌ای فرار و نجات و امداد برای پرسنل،
 - انتقال افراد دچار برق‌گرفتگی و سوختگی شدید به مراکز درمانی،
 - فرآیند زمانی و تصمیم‌گیری برای انتقال افراد آسیب‌دیده به مراکز درمانی خارج از کارگاه،
 - حضور ناظر یا نماینده اچ.اس.ای در مقاطع و جبهه‌های حساس کاری و مقاطع خطر احتمالی.
- پایش و ارزیابی. شاخص‌های بررسی حوادث طبق نظر سازمان ایمنی و بهداشت حرفه‌ای آمریکا^۱ با محاسبه بازخوردها و کنترل ضریب تکرار حادثه ای.اف.آر^۲ به صورت زیر می‌باشد:
- ضریب تکرار حادثه ای.اف.آر: شاخصی برای بررسی وضعیت از نظر تعداد حوادث با دامنه قابل قبول ۱ تا ۱۰،
 - ضریب شدت حادثه ای.اس.آر^۳: شاخصی برای بررسی وضعیت از لحاظ وخیم بودن حوادث رخ داده در یک

۱- Occupational Safety and Health Administration (OSHA)

۲- Accident Frequency Rate (AFR)

۳- Accident Severity Rate (ASR)

مدت معین با دامنه قابل قبول ۱ <،

- نشانگر تکرار شدت حادثه اف.اس.آی^۱: شاخصی برای قضاوت صحیح‌تر از وضعیت ایمنی، ترکیبی از ضریب

تکرار و ضریب شدت حوادث با دامنه قابل قبول ۰/۱ <.

۷-۳-۳- علائم و ارتباطات خروج اضطراری

برای هر یک از شرایط اضطراری باید سناریوی تخلیه و فرار پیش‌بینی شود. این سناریو بستگی به نوع و شدت حادثه و سرعت انتشار، موقعیت پرسنل در حین حادثه و موقعیت و وضعیت مسیرها و نقاط امن و زمان تردد بین آن‌ها دارد. مسیر خروج اضطراری باید در معرض دید بوده، با علائم مناسب راهنمایی شده باشد و به راحتی و با ایمنی کافی قابل عبور باشد. ملاحظات پیش‌بینی خروج اضطراری از تونل در شرایط بحرانی عبارتند از:

- تعیین مسیرهای خروج اضطراری برای شرایط و خطرات مختلف با ظرفیت و عرض کافی،

- آموزش پرسنل برای استفاده از این مسیرها و تمرین فرار در سناریوهای مختلف محتمل،

- استفاده از علائم و نشانگرهای مناسب برای مسیرها که در شرایط غبار و دود هم قابل رویت باشند،

- پیش‌بینی امکانات ارتباطی برای درخواست کمک در شرایط خروج اضطراری.

حتی‌الامکان در شرایطی که احتمال وقوع خطرات بیش‌تر بوده و نامعینی بیش‌تری وجود دارد، بهتر است بیش از یک راه فرار اضطراری تعبیه شود. مسیرهای فرار اضطراری باید دارای نور کافی و در شرایط مختلف، غیرلغزنده بوده و حداقل عرض ۶۰ سانتی‌متر برای عبور افراد داشته باشد. در صورت استفاده از چاه یا مسیر عمودی خروج اضطراری باید نردبان یا پلکان ایمنی با کمربند مناسب برای آن تعبیه گردد.

۷-۴- شناسایی و پیشگیری از آسیب‌های زیست محیطی

۷-۴-۱- ارزیابی محیط زیست منطقه

کلیه طرح‌های عمرانی و توسعه‌ای بر اساس قوانین ابلاغی برنامه‌های توسعه و قوانین بین‌المللی و نیز بانک جهانی در پروژه‌های سرمایه‌گذاری، ملزم به دریافت مجوز زیست محیطی قبل از اجرایی شدن، با ارائه گزارشات ارزیابی زیست محیطی ای.آی.ای^۲ و برنامه مدیریت اثرات زیست محیطی ای.ام.پی^۳ هستند. بر اساس این قوانین، در مرحله اجرا باید علاوه بر بروزرسانی و انطباق اثرات و ملاحظات زیست محیطی گزارش ای.ام.پی با شرایط واقعی حین اجرا، ارائه روش و نحوه اجرای برنامه مدیریت و کاهش اثرات صورت گرفته، گزارش خود اظهاری پایش اثرات زیست محیطی به

۱- Frequency Severity Indicator (FSI)

۲- Environmental Impact Assessment (EIA)

۳- Environmental Management Plan (EMP)

طور منظم تهیه و ارائه گردد.

قبل از شروع عملیات اجرایی و پایش لازم است وضعیت موجود محدوده تحت تاثیر، بررسی و مستندسازی شود تا بتواند به عنوان مرجع مقایسه تغییرات، مورد استفاده قرار گیرد. برای ارزیابی محیط زیست منطقه در مرحله اجرا، اطلاعات و شاخص‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند که معمولاً جزئیات آن‌ها در گزارش ارزیابی زیست محیطی پروژه ارائه می‌شوند:

- آب و هوا و هواشناسی و نور و تابش محیطی، شامل بررسی وضعیت باد، رطوبت، بارش، دما و شناسایی موقعیت‌های حساس به تابش،
- زمین‌شناسی و زمین ریخت شناسی، شامل مشخص نمودن نوع مصالح تخلیه شونده و نخاله و محل مناسب دپوی آن‌ها و لرزه‌خیزی و تکتونیک لرزه‌ای شامل بررسی گسل‌ها و شیب‌ها و توپوگرافی و شیب‌های طبیعی،
- هیدروژئولوژی و وضعیت آب زیرزمینی، شامل موقعیت و کاربری چشمه، چاه و قنات و رژیم جریان و نفوذپذیری لایه‌های مختلف زمین مسیر تونل و پیش‌بینی دبی زهکشی خروجی در مقاطع مختلف و کل تونل،
- هیدرولوژی و آب سطحی، شامل وضعیت آبراهه و رودخانه و مسیل و دبی فصلی آن‌ها و کاربرد آب آن در پایین‌دست و محدودیت تخلیه انواع پساب و گل‌ولای و رسوبات در آن و ملاحظات کیفیت آب برای استفاده،
- خاک، شامل بررسی کیفیت و حاصل‌خیزی خاک سطحی و عمقی در دپوها و قرضه‌ها و فضای سبز و مراتع،
- گیاهان و جانوران با توجه به شرایط و فصل کاری و حساسیت نوع آن‌ها به تبعات تونل‌سازی و وضعیت جنگل‌ها و شناسایی انواع درختان و گیاهان قابل کاشت در منطقه،
- سر و صدا شامل بررسی میدانی جمعیت و موجودات زنده و کاربری‌های حساس و تواتر و موقعیت کار انفجار و همچنین امواج مخابراتی،
- هوای موضعی محیط کار و جریان طبیعی آن در کارگاه و داخل تونل و ورودی آن و اثرات متقابل آن با سامانه تهویه،
- تعیین موقعیت راه‌ها و مسیرهای حمل و نقل و جاده‌های دسترسی به سایت و میزان طبعات زیست‌محیطی دسترسی‌های موقت و دائم،
- تهیه جزئیات آلودگی زیست‌محیطی و حجم پسماند و فاضلاب تجهیز کارگاه برای انتخاب اجزای آن بر اساس الزامات و محدودیت‌های زیست‌محیطی،
- تعیین میزان آلودگی تولیدی ماشین‌آلات و تجهیزات اجرایی برای بررسی الزامات مورد نیاز برای کاهش اثرات زیست‌محیطی در کارکرد آن‌ها.

۷-۴-۲- شناخت آسیب‌های احتمالی

برای تهیه برنامه کاهش اثرات زیست‌محیطی لازم است آسیب‌های احتمالی حین اجرا بر اساس برنامه و روش کار

پیمانکار شناسایی و به روز شده و میزان و شدت و گستره آن برآورد شود. اثرات و آلودگی‌های زیست‌محیطی در اجرای پروژه‌های تونل‌سازی در شکل‌های زیر بروز پیدا می‌نمایند:

- آلودگی هوا ناشی از انتشار گازها در اثر کارکرد ماشین‌آلات و تجهیزات اجرایی حفاری و حمل و نقل در داخل و خارج تونل و ژنراتورهای تولید برق خصوصاً در تونل‌های مکانیزه و سیستم‌های گرمایش در کارگاه و تجهیزات کارخانه ساخت قطعات بتنی،
- آلودگی در اثر غبار و گرد ناشی از حفاری و انفجار و حمل و دیوی مصالح تخلیه شده و عبور و مرور ماشین‌آلات اجرایی و کارکرد بچینگ و سنگ شکن و تخلیه سیمان در سیلوها و حمل مصالح مصرفی و تخلیه آن در واگن‌ها یا در تونل و همچنین اختلاط مصالح برای شاتکریت خشک،
- پساب خروجی ناشی از آب استفاده شده در حفاری شامل پساب‌های با سختی بالا مثلاً در محل برخورد با لنزها و لایه‌های انیدریتی، رسوبات محتوی ریزدانه‌های مختلف و پساب‌های محتوی مواد هیدروکربنی و لایه های زغال سنگ و آب زهکشی شده آلوده شده به مصالح ساختمانی مانند دوغاب سیمان و فوم‌ها و مواد تزریقی پلیمری و روغن و گریس مورد استفاده در ماشین حفاری،
- انباشت و مدفون شدن قطعات بتن و سنگ و نخاله‌های تخلیه شده از تونل در عملیات پاکسازی و سایر نخاله های ساختمانی مانند بقایای ریزش شاتکریت،
- اثرات منابع قرضه و دیوی موقت مواد مصرفی و مصالح تخلیه شده و نخاله‌ها روی خاک طبیعی و فضای سبز بیرون تونل و مراتع طبیعی،
- زباله‌ها و پساب غیررسمی کمپ اسکان پرسنل اجرایی تونل‌سازی و محوطه تجهیز کارگاه و سایر تاسیسات مرتبط نظیر کارخانه ساخت قطعات بتنی یا سایت تامین بتن،
- پساب و زباله‌های شیمیایی ناشی از تعمیرگاه‌ها و مخازن سوخت و محل‌ها و پمپ‌های سوخت‌گیری در کارگاه و مخازن فوم و مواد تزریقی و مواد افزودنی بتن و دوغاب و شاتکریت،
- پساب ناشی از شستشوی ماشین‌آلات و تجهیزات و کارخانه تولید قطعات بتنی و بچینگ،
- سر و صدا و موج و ارتعاش ناشی از کارکرد ماشین‌آلات و تجهیزات و عملیات حفاری و تحکیم و بتن‌ریزی و پمپ‌ها و بارگیری و تخلیه مواد و مصالح ساختمانی،
- زهکشی آب‌های زیرزمینی و خشک شدن چشمه‌ها و چاه‌ها و تخلیه سفره‌های آب زیرزمینی،
- عواقب ناشی از آتش‌سوزی احتمالی در تونل و محوطه کارگاه و انبار ناریه و انفجار احتمالی ناشی از آن.

۷-۴-۳- تعیین سطوح استاندارد قانونی

قوانین مرتبط با مباحث زیست‌محیطی تونل‌های انتقال آب شامل قوانین حفاظت از منابع بومی و طبیعی و جنگل و حیات وحش، قوانین حفاظت از محیط زیست، قوانین مدیریت پسماند و فاضلاب، قوانین آلودگی آب و هوا، قوانین سلامت و

بهداشت، قوانین منابع آب و حق‌آبه و آب مرزی، محدودیت نشست زمین و موارد مربوط به حریم محیط زیستی می‌باشد که ملاحظات مرتبط با این قوانین در هر پروژه در گزارش ای.ام.پی ارائه می‌شود. به عنوان نمونه، فهرست قوانین عمومی مرتبط با اجرای تونل انتقال آب که در سه بخش آب و هوا، خاک و محیط‌زیست انسانی می‌باشد، به شرح زیر است:

- آیین‌نامه اجرایی بند (الف) ماده (۱۸۹) قانون برنامه توسعه جمهوری اسلامی ایران،
 - قانون مدیریت پسماند و آیین‌نامه اجرایی مربوطه،
 - آیین‌نامه تصویب پروژه‌های ساز و کار توسعه پاک در چارچوب پروتکل کیوتو توسط مرجع صلاحیت‌دار ملی در جمهوری اسلامی ایران،
 - استاندارد حد مجاز ارائه شده سطح صوت خودروها در ایران،
 - استاندارد آلودگی صوت و ارتعاش و آیین‌نامه اجرایی نحوه جلوگیری از آلودگی صوتی،
 - استاندارد کیفیت هوا و استاندارد گاز خروجی از اگزوز خودروهای بنزینی سواری و وانت تولید داخل (مصوب ۲۹/۲/۱۳۷۸ هیات وزیران)،
 - آیین‌نامه بستر و حریم رودخانه‌ها و برکه‌ها و شبکه‌های آبرسانی و زهکشی (شماره ۵۸۹۷۷/ت/۲۹۱۰۱ مصوب ۸۲/۱۲/۱۸ هیات وزیران)،
 - قوانین، مقررات، ضوابط و استانداردهای محیط‌زیست انسانی.
- سایر موارد در کتاب قوانین، مقررات، ضوابط و استانداردهای محیط‌زیست انسانی توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ارائه شده است. علاوه بر محدودیت قانونی، ممکن است کارفرما ملاحظات سخت‌گیرانه‌تری را نیز در نظر گرفته و در قرارداد پیمانکار پیش‌بینی نماید. این ملاحظات بر اساس شرایط اجتماعی و خاص هر منطقه می‌تواند پیش‌بینی گردد.

۷-۴-۴- ارزیابی ریسک

ارزیابی ریسک زیست‌محیطی از فهرست ریسک‌های شناسایی شده در گزارش EIA که در هنگام انجام مطالعات تونل تهیه شده و بر اساس آن مجوزهای زیست‌محیطی احداث تونل اخذ می‌شود، استخراج شده و برای اجرای تمهیدات تسکینی یا پیش‌گیرانه و با اضافه نمودن موارد احتمالی تکمیلی بر اساس برنامه اجرایی پیمانکار به وی ابلاغ می‌شود. پس از آغاز اجرای این موارد، پایش لازم برای بررسی اثربخشی و احتمالاً انجام اقدامات اصلاحی یا مکمل نیز حسب نیاز در دستورکار قرار می‌گیرد. فهرست ریسک‌های مترتب در اجرای تونل انتقال آب و روش ارزیابی آن‌ها در جدول (۷-۷) ارائه شده است.

جدول ۷-۷- فهرست و روش‌ها و شاخص‌های ارزیابی ریسک‌های زیست محیطی در اجرای تونل‌های انتقال آب

ردیف	نوع ریسک	روش ارزیابی ریسک	شاخص‌های ارزیابی
۱	آلودگی هوا ناشی از انتشار گازهای آلاینده گلخانه‌ای	اندازه‌گیری غلظت دود و آلاینده‌ها	O ₂ , NO ₂ , CO, CO ₂
۲	آلودگی در اثر غبار و گرد	اندازه‌گیری غلظت غبار و دید	اکسیژن و میدان دید
۳	پساب خروجی از تونل	اندازه‌گیری مواد شیمیایی و رسوبات	سختی و هدایت الکتریکی و غلظت مواد

ردیف	نوع ریسک	روش ارزیابی ریسک	شاخص‌های ارزیابی
			شیمیایی و فلزات سنگین

ادامه جدول ۷-۷- فهرست و روش‌ها و شاخص‌های ارزیابی ریسک‌های زیست محیطی در اجرای تونل‌های انتقال آب

ردیف	نوع ریسک	روش ارزیابی ریسک	شاخص‌های ارزیابی
۴	انباشت و مدفون شدن نخاله	اندازه‌گیری حجم، قابلیت سازگاری و تجزیه و قابلیت بازیافت	حجم و نوع
۵	اثرات منابع قرضه و دپوهای موقت	اندازه‌گیری سطح اشغال و وضعیت پوشش گیاهی و خاک محل با بازدید	تراکم و کیفیت خاک و نوع و حجم پوشش گیاهی
۶	زباله‌ها و پساب غیرسمی کمپ	اندازه‌گیری حجم و روش دپو و حمل یا بازیافت یا امحا	حجم
۷	پساب و زباله‌های شیمیایی	تعیین نوع و حجم و روش حمل، نگهداری و امحا	حجم و نوع
۸	پساب ناشی از شستشو و کارهای صنعتی	اندازه‌گیری مواد شیمیایی و رسوبات	هدایت الکتریکی و سختی و محتوای مواد شیمیایی
۹	سر و صدا و موج و ارتعاش	اندازه‌گیری نویز و ارتعاش در نقاط حساس و زمان‌های ایجاد تحریک	شدت صوت و شتاب حداکثر ذرات
۱۰	زهکشی و تخلیه آب‌های زیرزمینی	اندازه‌گیری تغییرات دبی زهکشی و خروجی در مقاطع مختلف تونل و سطح آب زیرزمینی در گمانه‌ها و دبی خروجی چشمه‌ها و کیفیت آب خروجی در طول زمان	دبی و نفوذپذیری و تراز آب در گمانه‌ها و چاه‌ها و دبی چشمه‌ها
۱۱	آب‌های سطحی	اندازه‌گیری تغییرات کیفیت آب و حجم رواناب و کنترل حقابه‌های زیست محیطی	هدایت الکتریکی و سختی و دبی و دما
۱۲	عواقب ناشی از آتش‌سوزی‌های احتمالی	اندازه‌گیری زمان و میزان آلاینده‌ها و اثرات حرارتی و تغییرات دما در محدوده آتش‌سوزی و مولفه‌های تحت تاثیر آن	O_2, NO_2, CO, CO_2 و دما
۱۳	نشست و تحکیم زمین	اندازه‌گیری نشست سطحی ناشی از حفاری و تحکیم زمین ناشی از زهکشی	جابجایی زمین
۱۴	آسیب‌دیدگی درختان و گیاهان و حیوانات	شناسایی محدوده‌های قرارگیری درختان و نواحی عبور حیوانات	پایش و مراقبت چشمی و مشاهده‌ای

ریسک‌های زیست‌محیطی به دو شکل گسسته و پیوسته تابع زمان هستند. ارزیابی ریسک ایستا با اندازه‌گیری مقطعی شاخص‌های مربوط به آن و مقایسه با مقادیر مجاز استاندارد که در گزارشات ای.ام.پی قید می‌شود، انجام می‌شود. ارزیابی ریسک پیوسته تابع زمان مانند زهکشی آب زیرزمینی با اندازه‌گیری منظم و پایش روند آن بر اساس پارامترهای جدول صورت می‌پذیرد. تغییرات مجاز زمانی این متغیرها در قالب یک منحنی حد بالا و حد پایین بر اساس رژیم آب زیرزمینی و حق‌آبه‌های چاه‌ها و چشمه‌ها ترسیم و کنترل می‌شود. گزارشات پایش زیست‌محیطی به صورت منظم و معمولاً حداکثر ماهیانه، نتایج ثبت و تغییرات شاخص‌های مختلف و میزان اثر تمهیدات و اقدامات به کار گرفته شده را ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج این گزارش اقدامات اصلاحی و بازایی به روز شده یا اقدامات جبرانی در دستورکار قرار می‌گیرد. ارزیابی ریسک زیست‌محیطی در برنامه کلی مدیریت ریسک اجرای تونل باید گنجانده شود.

۷-۴-۵- تمهیدات پیش‌گیرانه و اصلاحی

تمهیدات پیش‌گیرانه و تسکینی برای کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، متناسب با آسیب‌های احتمالی پیش‌بینی

شده در نظر گرفته می‌شوند. اجرای این تمهیدات معمولاً بر تمام اجزای پروژه شامل ماشین‌آلات و تجهیزات، جانمایی، روش اجرا و زمان‌بندی و مصالح مصرفی تاثیر مستقیم می‌گذارد. بخش قابل توجهی از این تمهیدات مستلزم مصرف آب می‌باشد که باید میزان آن برآورد و تامین گردد. تمهیدات پیش‌گیرانه و تسکینی در تونل‌سازی عبارتند از:

– تمهیدات کاهش آلودگی هوا شامل:

- کنترل گازهای تولیدی و سرویس ماشین‌آلات برای تنظیم و کاهش آن شامل تعویض فیلتر هوا و تامین اکسیژن کافی برای احتراق مناسب،
- هدایت و دورکردن دود ناشی از کارکرد تجهیزات ثابت با توجه به شرایط محیطی و جهت وزش باد و ترجیحاً به ارتفاع بالاتر،
- برنامه‌ریزی مناسب برای پیش‌گیری از ایجاد ترافیک و معطلی ماشین‌آلات حمل و بارگیری مصالح،
- استفاده از فیلترهای تصفیه دود برای دستگاه‌ها و ماشین‌آلات،
- استفاده از سوخت مناسب برای گرمایش و تولید انرژی با آلاینده‌گی پایین،
- عدم استفاده از ماشین‌آلات معیوب و فرسوده،
- استفاده از تجهیزات و ماشین‌آلات برقی تا حد امکان،
- استفاده از فیلترهای دود و گاز در سامانه تهویه تونل و هوای خروجی آن،
- رعایت فاصله و حریم مناسب مسیرهای عبور و مرور و مکان‌های تولید آلاینده از منابع طبیعی و بومی حساس با توجه به وضعیت باد محل،
- استفاده پرسنل از ماسک‌های مناسب و فیلتردار در مکان‌های دارای غلظت قابل توجه آلاینده‌ها،
- ممنوعیت مطلق سوزاندن زباله‌ها بدون دستگاه زباله‌سوز دارای فیلتر مناسب،
- رعایت ملاحظات لازم در کارهای رنگ‌آمیزی قاب‌ها و ماسه پاشی،
- پایش مرتب غلظت آلاینده‌ها برای تنظیم اقدامات متقابل و اضطراری در صورت نیاز.

– تمهیدات کاهش غبار:

- آب‌پاشی مسیرهای عبور و مرور حداقل دو بار در روز بسته به شرایط محیطی نظیر باد و دما و آفتاب،
- استفاده از فیلترهای غبارگیر در سیستم تهویه،
- استفاده از آب‌پاش‌های غبارزدا در زمان انفجار و در خروجی تهویه غبار و در سنگ شکن و بچینگ و کامیون‌ها و واگن‌های حمل مصالح و نخاله‌ها و دیوها و نظایر آن،
- توجه به شرایط آب و هوایی و باد و بارش برای انجام عملیات انفجاری و فعالیت‌های تولید کننده غبار،
- استفاده از پوشش پارچه‌ای عایق روی بار ماشین‌آلات حمل و نقل برای جلوگیری از برخاستن غبار و همچنین عدم بارگیری بیش از حد در آن‌ها،

- استفاده از دیواره‌های بلند یا محفظه‌های سر پوشیده در محل دپوی مصالحی که در صورت وزش باد غبار تولید می‌کنند،
- رعایت فاصله مناسب منابع تولید غبار مثل سنگ شکن یا بچینگ با توجه به جهت باد، از مناطق مسکونی و زمین‌های کشاورزی و سایر موقعیت‌های حساس به غبار حداقل تا حدود یک کیلومتر.
- **تمهیدات مربوط به آب** شامل حفاظت از کیفیت و کمیت منابع آب سطحی و زیرزمینی و حق‌آبه‌ها، شامل موارد زیر است. به طور کلی، دقت و کیفیت مطالعات و عملیات شناسایی در انتخاب مسیر مناسب تونل و عدم عبور از منابع آب زیرزمینی راهبردی منطقه، یک اصل اساسی و مهم در پروژه‌های تونل انتقال آب محسوب می‌شود و می‌تواند عمده مسائل مربوط به حفظ منابع آب و حق‌آبه‌ها را پیش‌بینی و مرتفع نماید. برای موارد باقیمانده می‌توان از روش‌های زیر در حین اجرا استفاده نموده و تبعات این مساله را به حداقل ممکن کاهش داد:
 - آب‌بندی پوشش تونل برای جلوگیری از زهکشی بیش از حد آب زیرزمینی و تخلیه آن در داخل تونل و پایین آمدن سطح آب زیرزمینی. در تونل‌های مکانیزه قطعات بتنی با واشرهای آب‌بند نصب شده و با انجام تزریق کامل می‌شوند و به سرعت می‌توانند آب‌های زیرزمینی تحت فشار را هم مهار نمایند.
 - پیش‌حفاری گمانه شناسایی در جبهه کاری در نقاط محتمل سفره‌های آب زیرزمینی برای به دست آوردن اطلاعات دقیق‌تر و اعمال تمهیدات مناسب مانند پرده تزریق قبل از حفاری تمام مقطع.
 - ایجاد پرده آب‌بند تزریقی در جبهه حفاری در روش متعارف برای کنترل و انحراف سفره‌های آب زیرزمینی و لایه‌های گسله و آبدار برای جلوگیری از تخلیه سفره آب به داخل تونل.
 - اجرای سریع‌تر پوشش بتنی آب‌بند در روش متعارف با پوشش بتن درجا برای کاهش حجم کلی آب ورودی به تونل و تخلیه کم‌تر آب‌های زیرزمینی و کاهش درزهای اجرایی تا حد ممکن و استفاده از نوار آب‌بند با اتصالات و کیفیت مناسب برای حصول بهتر آب‌بندی.
 - استفاده از سایر روش‌های کنترل موقت آب زیرزمینی مانند انجماد برای عبور از نواحی آبدار و سفره‌های آب زیرزمینی.
 - ایزوله کردن و هدایت و حفظ منابع آب زیرزمینی از سطح زمین، مانند انحراف و انسداد مسیرهای گرادیان هیدرولیکی به عمق مثلاً با روش‌هایی مانند سدهای زیرزمینی و پوشش دادن قنات‌ها و چشمه‌ها و سفره‌های سطحی و برکه‌های طبیعی.
 - تنظیم عملیات اجرایی برای عبور از نواحی آبدار با قابلیت زهکشی بالا در فصول خشک و فصولی که حداقل حق‌آبه‌های زیست‌محیطی و شرب و کشاورزی مورد نیاز است.
 - تامین منابع آب جایگزین برای مدیریت موقت منابع آب و استفاده از روش‌های مکمل، مانند ذخیره و انتقال موقت آب خروجی از تونل و آبیاری موقت برای برخی از مصارف زیست‌محیطی.

- پیش‌گیری از مسائل اجتماعی احتمالی با پیش‌بینی و تامین منابع جبران خسارت‌های احتمالی در دوره احداث تونل.

– مدیریت پساب‌های خروجی از تونل شامل:

- جداسازی مجرای زهکشی و هدایت آب‌های زیرزمینی و تمیز نشستی به داخل تونل از آب‌های استفاده شده در اجرا و جاری شده در کف تونل و مسیر عبور ماشین‌آلات،
- جلوگیری از ریزش و سقوط مصالح و نخاله‌ها و زباله‌ها در مسیرها و رودخانه‌ها و گرفتگی آن‌ها و عدم نشست آلاینده‌ها به داخل آب و مراقبت و پاکسازی منظم آن‌ها،
- اندازه‌گیری و پایش منظم سختی و هدایت الکتریکی EC و کیفیت پساب با توجه به سازندهای زمین‌شناسی در حال حفاری در نقاطی در داخل تونل، خروجی‌ها، چشمه‌ها و جوی‌ها و رودخانه‌های پایین‌دست و چاه‌های آب محدوده،
- استفاده از فوم و گریس پایه گیاهی و تجزیه‌پذیر در روش حفاری مکانیزه برای کاهش آلودگی زیست محیطی پساب خروجی.
- عدم استفاده از مواد شیمیایی سمی آب‌بند کننده مانند پلی یورتان‌های حاوی ترکیبات سیانید برای تزیینات آب‌بندی پوشش تونل،
- احداث حوضچه‌های ته نشینی مدولار بتنی و خاکی پساب با حجم کافی با توجه به کیفیت آب خروجی در حفاری در هر سازند و به کارگیری کامیون و بیل مکانیکی به صورت مداوم جهت تخلیه رسوب و لای و رسوب‌گیری و انحراف و هدایت پساب‌های مختلف به حوضچه‌های مجزا برای افزایش سهولت بازیافت و امحای آن‌ها و پیش‌بینی استفاده از حوضچه‌های جداسازی مواد روغنی و نفتی شناور روی پساب و جداسازی آن‌ها قبل از رهاسازی آب و استفاده از فیلترهای مناسب برای جداسازی و تصفیه پساب.
- پیش‌بینی تمهیدات لازم برای کنترل دمای پساب در مسیرها و حوضچه‌ها برای جلوگیری از یخ‌زدگی و انسداد مسیرها در فصل سرما،
- رعایت ملاحظات پیشگیری از فرسایش هیدرولیکی در مسیرهای هدایت پساب به حوضچه‌های ته‌نشینی و خروجی آب به مسیرها و نیز مسیرهای در معرض فرسایش در بارندگی‌های شدید احتمالی در سایت مانند استفاده از پوشش و شاتکریت روی شیب‌های مستعد فرسایش و ایجاد مسیرهای هدایت سیلاب و کنترل سرعت جریان آب و پساب.

– زباله‌ها و فاضلاب شامل:

- بازیافت و استفاده مجدد از نخاله‌ها و مصالح حفاری شده برای مصارف مجاز،
- طراحی سپتیک غیر جذبی استاندارد برای سرویس‌های بهداشتی غیرمتمرکز مانند موارد مستقر در پرتال

تونل و سایر نقاط،

- جمع‌آوری زباله‌های تجزیه‌پذیر سطح کارگاه به صورت روزانه و امحای بهداشتی آن،
- استفاده از مخازن ذخیره مناسب مواد شیمیایی و نفتی و مایعات آلوده به مواد شیمیایی و مراقبت برای جلوگیری از نشت احتمالی آن‌ها در محیط،
- دور نگهداشتن محل‌های سوخت‌گیری و تخلیه مواد شیمیایی و سایر مواد آلوده کننده محیط، مانند آسفالت از منابع آب،

- جمع‌آوری روغن‌های سوخته و سایر زباله‌های صنعتی و غیرتجزیه‌پذیر و حمل آن‌ها به مراکز بازیافت و امحا.

- تمهیدات کاهش ارتعاش و صوت (و غبار ناشی از انفجار) شامل:

- نگهداری و سرویس منظم ماشین‌آلات و ابزار و تجهیزات سنگین و عدم استفاده از دستگاه مستعمل و فرسوده،
- تنظیم ساعات کاری برای عملیات انفجار و نظایر آن، مثلاً محدود کردن ساعات کاری به روز برای کاهش آسیب حیات وحش،
- استفاده از سپرها و موانع جذب و انکسار امواج صوتی و ارتعاشی در محدوده‌های انفجار و نواحی حساس و اطراف تجهیزات پر سر و صدا مانند ژنراتورها و پمپ‌ها و همچنین در ساعات استراحت شیفت کاری و استفاده از پنجره دو جداره در کمپ‌ها،
- نصب فیلترهای جذب ارتعاش و صوت در تجهیزات تولید کننده این امواج،
- استفاده از مواد منفجره مناسب با چاشنی الکترونیکی برای تدقیق و بهینه‌سازی عملیات انفجار و بهینه سازی جانمایی چال‌های انفجاری،
- پیش‌آگاهی و هشدار به ساکنین اطراف قبل از انجام عملیات انفجاری یا تخریب ناگهانی یا ایجاد غبار شدید در عملیات اجرایی،
- طراحی انفجار بر اساس تاخیرهای زمانی مناسب با بهره‌گیری از قابلیت چاشنی‌های الکترونیکی برای حصول انفجارهای کنترل شده در مناطق حساس زیست‌محیطی و مجاور سکونت‌گاه‌ها،
- کاهش حجم انفجار و طول گام انفجاری در هر مرحله که البته این کار معمولاً باعث افزایش نسبی هزینه و زمان اجرا و همچنین تکرار ایجاد ارتعاش و صوت می‌شود و فقط در موارد خاص در دستورکار قرار می‌گیرد.

- تمهیدات حفاظت از درختان، گیاهان و حیوانات شامل:

- جانمایی مناسب یا جابجایی موقعیت پرتال تونل برای حفظ شیب‌ها و گیاهان و درختان، خصوصاً گونه های کمیاب گیاهی منطقه و پایدارسازی شیب‌های متاثر از عملیات اجرایی برای حفظ محیط‌زیست و

منابع طبیعی،

- استفاده از راه‌های دسترسی موجود منطقه برای مداخله کم‌تر در محیط‌زیست،
- کاهش یا مراقبت از عملیات اجرایی در فصول خشک و کم آب برای جلوگیری از آلودگی منابع محدود آب،
- درختکاری و ایجاد فضای سبز و توسعه آن در محدوده و محوطه کارگاه به طور منظم و هدفمند،
- بازیابی درختکاری و احیای منابع طبیعی و فضای سبز محدوده تجهیز و دپوها و راه‌های دسترسی موقت و سایر نواحی تحت تاثیر،
- داشتن ارتباط و هماهنگی با مسئولین محیط‌زیست و منابع طبیعی و محیط بانان برای اطلاع‌رسانی در صورت ورود حیوانات وحشی به محوطه کارگاه یا گیر افتادن یا آسیب دیدن آن‌ها،
- تعبیه حفاظ برای حفاظت از درختان و گیاهان و ورود حیات وحش و یا ایجاد دالان یا مسیرهای حفاظت شده برای عبور حیوانات وحشی و اهلی،
- بازیابی، لایه‌برداری و اصلاح و باروری خاک‌های آسیب‌دیده با خاک حاصل‌خیز،
- ارائه آموزش و هشدارهای لازم به کارکنان پروژه برای حفظ محیط‌زیست و ممنوعیت شکار و صید و نحوه عمل هنگام برخورد احتمالی با حیوانات (خصوصاً خطرناک، مانند مار یا حیوانات وحشی) در محوطه کارگاه.

– سایر تمهیدات اجرایی برای حفاظت از محیط پیرامون شامل:

- پیش‌بینی مسائل ایمنی لازم برای جلوگیری از ایجاد آتش‌سوزی و رعایت فاصله ایمن و مناسب پتانسیل های آتش، مانند مخازن سوخت و تاسیسات برقی از درختان و پوشش گیاهی سایت و اطراف آن،
- پیش‌بینی تمهیدات اطفای حریق در حد متعارف و انجام هماهنگی‌های قبلی با آتش‌نشانی و محیط (جنگل) بانی و سازمان‌های امدادی منطقه برای کمک‌رسانی به موقع در هنگام رخداد احتمالی حوادث،
- استفاده از علائم و نشانگرهای محدوده‌ها و هشدار زیست‌محیطی برای فعالیت‌های روزانه اجرایی،
- پیش‌بینی تمهیدات لازم در روش و سرعت و عملیات اصلاح زمین برای کاهش و کنترل نشست سطحی در مناطق حساس به نشست همراه با پایش منظم آن،
- پیش‌بینی تونل یا چاه کمکی دسترسی و تخلیه مصالح حفاری در مناطقی که در پرتال ورودی تونل مسائل حساس زیست‌محیطی وجود دارد،
- تغییر روش اجرای تونل و ماشین‌آلات مورد استفاده در مقاطع مورد نیاز بر اساس ملاحظات زیست‌محیطی و اجرای مقاطع سر پوشیده در قسمت‌های ممکن که تونل انتقال آب به کانال تبدیل می‌شود.

منابع و مراجع

- ۱- ضابطه شماره ۱۱۳ - سازمان برنامه و بودجه کشور - کتابنامه تونل - ۱۳۶۸
- ۲- ضابطه شماره ۶۸۴ - سازمان برنامه و بودجه کشور - راهنمای طراحی و اجرای پوشش داخلی تونل‌های راه و راه آهن - ۱۳۹۴
- ۳- ضابطه شماره ۵۳۷ - سازمان برنامه و بودجه کشور - دستورالعمل طراحی و اجرای سیستم های نگهداری تونل‌های معدنی - ۱۳۹۰
- ۴- ضابطه شماره ۳۰۹ - سازمان برنامه و بودجه کشور - راهنمای طراحی سازه‌ای تونل‌های آب بر - ۱۳۸۴
- ۵- ضابطه شماره ۳۶۹ - سازمان برنامه و بودجه کشور - ضوابط احداث تونل مشترک تاسیسات شهری - ۱۳۸۵
- ۶- نشریه تونل - انجمن تونل ایران IRTA - شماره یک تا ۳۷ - تا سال ۱۴۰۰
- 7- The Norwegian Tunnelling Society, NFF, Publication No.1 to No. 31 - until 2023
- 8- International Tunneling and Underground Association – ITA (AITES) - Guidelines and Working Groups Publications - #1187 - Until 2023
- 9- USACE, EM 1110-2-2901, Tunnels and Shafts in Rock, 1997.
- 10- FHWA-NHI-10-034, Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels, 2009.
- 11- BSI, Safety of Unshielded Tunnel Boring Machines and Rodless Shaft Boring Machines for Rock, BS EN 815:1996 + A2:2008, British Standards Institution, London, 1997.
- 12- BSI, Code of Practice for Safety in Tunnelling in the Construction Industry, BS 6164: 2001, British Standards Institution, London.
- 13- BSI, Geotechnical Investigations and Tests – Identification and Description, BS EN ISO 14685–1:2002. British Standards Institution, London.
- 14- BSI, Tunnelling Machines. Shield Machine, Thrust Boring Machines, Auger Boring Machines, Lining Erection Equipment. Safety Requirements, BS EN 12336:2005 + A1:2008, British Standards Institution, London.
- 15- BSI, Tunnelling Machines. Roadheaders, Continuous Miners and Impact Rippers. Safety Requirements, BS EN 12111:2002 + A1:2009, British Standards Institution, London.
- 16- BSI, Tunnelling Machines. Air Locks. Safety Requirements, BS EN 12110:2002 + A1:2008, British Standards Institution, London.
- 17- Safe Work Australia, Guide for Tunnelling Work, 2013.
- 18- Dtfh61-07-D-00004, Tunnel Operations, Maintenance, Inspection And Evaluation (Tomie) Manual, Task Order 006 / Technical Directive 003, 2007.
- 19- BTS, Occupational Exposure to Nitrogen Monoxide in a Tunnel Environment: Best Practice Guide, British Tunnelling Society, London, 2008.
- 20- BTS/ICE, Tunnel Lining Design Guide, Thomas Telford, London, 2004.
- 21- BTS/ICE, Closed-face Tunnelling Machines and Ground Stability: A Guideline for Best Practice, Thomas Telford, London, 2005.
- 22- HSE, Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels: A Review of Sprayed Concrete Lined Tunnels with Particular Reference to London Clay, HSE Books, Sudbury, UK, 1996.

- 23- HSE, A Guide to the Work in Compressed Air Regulations 1996, HSE Books, Sudbury, UK.
- 24- HSE, The Collapse of NATM Tunnels at Heathrow Airport, HSE Books, Sudbury, UK, 2000.
- 25- HSE, Tunnelling and Pipejacking: Guidance for Designers. Internal Dimensions for Pipejacks and Tunnels Below 3m Diameter and Indicative Drive Lengths, The Health and Safety Executive and the Pipe Jacking Association. www.hse.gov.uk/construction/information.htm#other, 2006.
- 26- ICE, Sprayed Concrete Linings (NATM) for Tunnels in Soft Ground, ICE Design and Practice Guides, Thomas Telford, London, 1996.
- 27- ITIG, A Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works, The International Tunnelling Insurance Group (in association with the Munich ReGroup). www.munichre.com/publications/tunnel_code_of_practice_en.pdf, 2006.
- 28- JICA, Guideline for Design of Road Tunnel, Japan, 2018.
- 29- Norwegian Public Roads Administration Handbooks, Road Tunnels, 2004.
- 30- Wulf Schubert, Andreas Goricki and Gunter Riedmüller, The Guideline for the Geomechanical Design of Underground Structures with Conventional Excavation, Austrian Standards, 2003.
- 31- NSW, Tunnel urban design guideline Design guideline to improve the customer and community experience of road tunnels, 2017.
- 32- Nick Barton, TBM Tunneling in Jointed and Fault Rock, Balkema, 2000.
- 33- Shuying Wang, Jinyang Fu, Cong Zhang, Junsheng Yang, Shield Tunnel Engineering From Theory to Practice, 1st Edition, 2021
- 34- Thomas W. Pennington, Tunneling Beneath Open Water, A Practical Guide for Risk Management and Site Investigations, 2011.
- 35- Pietro Lunardi, Design and Construction of Tunnels, Analysis of controlled deformation in rocks and soils (ADECO-RS), Springer, 2008.
- 36- Guohou Cao, Hao Liu, Three-Dimensional Exploration Technology of Tunnel Geology, Springer Singapore, 2023
- 37- G.P. Daw and C.A. Pollard, Grouting for Ground Water Control, Int. J. of Mine Water, 1986.
- 38- Chapman, David N., Metje, Nicole, Stark, Alfred, Introduction to Tunnel Construction, Second Edition-Taylor and Francis, 2017.
- 39- David Chapman, Nicole Metje and Alfred Stärk, Introduction to Tunnel Construction, Spon Press, 2010.
- 40- Alun Thomas, Sprayed Concrete Lined Tunnels; An introduction, Tatlor & Francis, 2009.
- 41- E. Hoek, Rk. Kaiser, W.E Bawden, Support of Underground Excavations and Rock, A.A. Balkema, 1998.
- 42- Bhawani Singh, Rajnish K. Goel, Tunnelling in Weak Rocks, Elsevier Geo-Engineering Book Series, 2006.
- 43- Attewell P.B., Tunnelling Contracts and Site Investigation, E & FN Spon, London, 1995.
- 44- William W. Edgerton, Recommended Contract Practices for Underground Construction, SME, 2008.
- 45- J. Johansen & C.F. Mathiesen, Modern Trends in Tunnelling and Blast Design, Taylor & Francis, 2000.
- 46- Frederick Walter Simms, Daniel Kinnear Clark, Practical Tunnelling, Legare Street Press, 2022
- 47- Gary B. Hemphill, Practical tunnel construction-Wiley, 2013.
- 48- Karol R.H., Chemical Grouting, 2nd edition, Marcel Dekker, New York, 1990.
- 49- Kuesel T.R. and King E.H. (eds), Tunnel Engineering Handbook, 2nd edition, Chapman and

- Hall, Boca Raton, FL, 1996.
- 50- Bernhard Maidl, Markus Thewes, Ulrich Maidl, David S. Sturge (Translator) - Handbook of Tunnel Engineering II_ Basics and Additional Services for Design and Construction. 2-Ernst & Sohn, 2014.
- 51- Ratan Tatiya, Civil Excavations And Tunneling; A Practical Guide, Thomas Telford, 2005.
- 52- Vittorio Guglielmetti, Shulin Xu, Gianni Alberto Arrigoni, Piergiorgio Grasso, Long and Deep Tunnels: Integrated Design and Construction Approach 1st Edition, Kindle Edition, 2017.
- 53- Maidl B., Schmid L., Ritz W. and Herrenknecht M., Hardrock Tunnel Boring Machines, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2008.
- 54- Megaw T.M. and Bartlett J.V., Tunnels: Planning, Design and Construction. Vol. 1 & 2, Ellis Horwood, Chichester, UK, 1981. & 1982
- 55- Muir Wood A., Tunnelling: Management by Design, Spon, London and New York, 2000.
- 56- Preene M., Roberts T.O.L., Powrie W. & Dyer, M.D., Groundwater Control: Design and Practice, Construction Industry Research & Information Association (CIRIA) C515, London, 2000.
- 57- Thomas A.H., Sprayed Concrete Lined Tunnels, Taylor & Francis, London, 2009.
- 58- Whittaker B.N. and Frith R.C., Tunnelling: Design Stability and Construction, Institution of Mining and Metallurgy, London, 1990.
- 59- Zixin Zhang, Scott Kieffer, Fundamentals of Shield Tunnelling: Design and Construction, Taylor & Francis, 2015.
- 60- Francesco Jusufi, Optimization of construction time in tunnel construction: Linz motorway A26, Our Knowledge Publishing, 2021.

خواننده گرامی

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

Abstract:

Water transmission tunnels are among the critical lifelines and infrastructures that play an important role of connection between water resources and distribution systems as well as collecting surface water and wastewater. The huge amount of construction investment and significant time required to execute these systems on one hand and the need to optimize the maintenance costs and required long service life for them on the other hand, explains the importance of quality and durability construction in this field. Also, the existence of many uncertainties and challenges in the design and implementation of these structures in different ground types raises the need to address the issue of risk management and control the risks of construction and attention to the unforeseen issues and events. Considering the above necessity, preparation of guidelines for construction of water transmission tunnels based on the existing knowledge and execution experiences in the country and international records and guidelines, was put on the agenda by the beurea of technical and operation systems development and hydro-power dispatching of Warter Resources Management Company, with the aim of collecting and sharing the best and the most successful experiences that have reduced the problems and challenges related to the constrction of water transmission tunnels, which is considered as a basic need of the country for increasing the quality and improvement in the timing and construction costs. For this purpose, this guideline has been presented in seven chapters including excavation in hard ground and soft ground, initial support, instrumentation and monitoring, final lining, mobilization and procurement and health, safety and environment.

Guidelines for Construction of Water Transmission Tunnels

[IR-Code 887]

Chief Author: Mohammad Safi

Authors & Contributors Committee:

Ali Noorzad	Shahid Beheshti University	Ph.D. in Geotechnical Engineering.
Bahmad Ahadi Manafi	Farab Company	MSc. in Rock Mechanics
Manouchehr Hamidian	Shahid Beheshti University	Ph.D. in Hydraulic Engineering.
Hamed Sahebi	Moshanir Company	MSc. in Mining Eng.
Seyed Hassan Sahranavard	Betonpash Company	Ph.D. in Concrete Tecnology
Mostafa Zamanian	Shahid Beheshti University	Ph.D. in Geotechnical Engineering.
Hassan Abbasi	Zistab Company	MSc. in Geological Eng.
Seyed Saeed Beheshti	Shahid Beheshti University	Ph.D. in Mechanical Engineering.
Houshang Korkorian	Moshanir Company	MSc. in Structural Engineering.
Behzad Hosein Zadeh	Zistab Company	MSc. in Hydraulic Engineering.
Mohammad Reza Poursaber	Shahid Beheshti University	Ph.D. in Remote Sensing
Mohammad Javad Mahmoudi	Shahid Beheshti University	Ph.D. in Mechanical Engineering.
Farshad Vazinram	Shahid Beheshti University	Ph.D. in Construction Management
Majid Hallaji Bidgoli	Jahan Abzar Tunnel Company	B.S. in Civil Engineering.

Supervisory Committee:

Ali Yousefi	ZAPCE (Zamin Ab Pey Consulting Engineers)	MSc. in Mining Engineering and Geology Engineering
Gholamreza Shamsi	Iranian Tunnelling Association (IRTA)	MSc. in Mining Engineering
Bijan Yazdani	Armanshahr Consulting Engineers Company	M. Sc. in Civil Engineering

Confirmation Committee:

Farhad Imanshoar	Iran Water Resources Management	Ph.D. in Civil Engineering
AliMohammad Hoseinnejad	Evyol Construction Company	M. Sc. in Construction Engineering and Management
Reza Rasti Ardakani	Shahid Beheshti University	Ph.D. in Civil Engineering
Gholamreza Rostami	Iran Water Resources	MSc. in Geology

Mohammad Reza Askari	Management	PhD in Civil Engineering
Amir Farid Mojtahedi	Bandab Consulting Engineers Iran water and power resources development company	M. Sc. in Civil Engineering
Najmeh Fooladi	Iran Water Resources Management	M. Sc. in Civil Engineering (Water Engineering)
Abbas Mohammadian	Abfan Consulting Engineering Company	M. Sc. in Civil Engineering
Ali Yousefi	ZAPCE (Zamin Ab Pey Consulting Engineers)	MSc. in Mining Engineering and Geology Engineering

Steering Committee: (Plan and Budget Organization)

Alireza Toutounchi	Deputy of Department of Technical and Executive Affairs Department
Sajjad Heidari Hasanaklou	Expert of Department of Technical and Executive Affairs Department

**Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization**

Guidelines for Construction of Water Transmission Tunnels

IR-Code 887

Last Edition:01-01-2026

Deputy of Technical, Infrastructure and
Production Affairs
Department of Technical & Executive Affairs

nezamfanni.ir

Ministry of Energy

Beurea of Technical & Operation Systems
Development and Hydro-power Dispatching

waterstandard.wrm.ir

2026

این ضابطه

با عنوان «راهنمای اجرای تونل‌های انتقال آب» با هدف ارتقا و بهبود کیفیت و کاهش ریسک‌های اجرای تونل‌های انتقال آب و بهینه‌سازی زمان و هزینه ساخت آن‌ها تدوین گردیده و با توجه به جنبه‌های مختلف اجرایی این سازه‌ها و با استناد به آخرین منابع علمی و فنی و تجربیات مستند داخلی و بین‌المللی و با مشورت با کارشناسان و متخصصان دست‌اندرکار این صنعت به ارائه مسایل و چالش‌های مختلف اجرایی و راهکارهای مناسب برای آن‌ها پرداخته است.