

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه و بودجه کشور

آیین نامه راه‌های ایران (آرا) آیین نامه تونل های برون شهری

ضابطه شماره ۱۴-۸۰۰

آخرین ویرایش: ۲۸-۰۹-۱۴۰۳

معاونت فنی، زیربنائی و تولیدی

امور نظام فنی و اجرایی

Nezamfanni.ir

۱۴۰۳



شماره : ۱۴۰۳/۵۷۸۱۱۸	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ : ۱۴۰۳/۱۱/۰۸	

به استناد ماده (۳۴) قانون احکام دائمی برنامه‌های توسعه کشور، ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و تبصره (۲) ماده (۴) «نظام فنی‌اجرایی یکپارچه کشور» موضوع مصوبه شماره ۲۵۲۵۴/ت/۵۷۶۹۷ مورخ ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ هیئت وزیران، دستورالعمل پیوست با مشخصات زیر ابلاغ و برای اجرا در «سامانه نظام فنی‌اجرایی کشور» به نشانی Nezamfanni.ir منتشر می‌شود.

عنوان:	آیین‌نامه راه‌های ایران (آرا) – آیین‌نامه تونل‌های برون شهری
شماره ضابطه:	۸۰۰-۱۴
نوع ابلاغ:	لازم الاجرا
حوزه شمول:	همه قراردادهای جدیدی که از محل وجوه عمومی و یا به صورت مشارکت عمومی-خصوصی منعقد می‌شوند
تاریخ اجرا:	۱۴۰۴/۰۱/۰۱
متولی تهیه، اخذ بازخورد و اصلاح:	دبیرخانه «آیین‌نامه راه‌های ایران – آرا» مستقر در امور نظام فنی‌اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور
مرجع اعلام اصلاحات:	امور نظام فنی‌اجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور

سیدحمید پورمحمدی

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی و اجرایی معاونت فنی، زیربنائی و تولیدی سازمان برنامه و بودجه کشور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این ضابطه کرده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

۱- در سامانه مدیریت دانش اسناد فنی و اجرایی (سما) ثبت نام فرمایید: sama.nezamfanni.ir

۲- پس از ورود به سامانه سما و برای تماس احتمالی، نشانی خود را در بخش پروفایل کاربری تکمیل فرمایید.

۳- به بخش نظرخواهی این ضابطه مراجعه فرمایید.

۴- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۵- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.

۶- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

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

سازمان برنامه و بودجه کشور، امور نظام فنی و اجرایی

Email: nezamfanni@chmail.ir

web: nezamfanni.ir

باسمه تعالی

پیشگفتار

سازمان برنامه و بودجه کشور به عنوان متولی توسعه پایدار کشور و نظام فنی و اجرایی یکپارچه، به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و 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، مطالعه (مطالعات امکانسنجی)، طراحی (پایه و تفصیلی)، اجرا، راه‌اندازی و تحویل و بهره‌برداری طرح‌های عمرانی به لحاظ فنی و اقتصادی، کیفیت طراحی و اجرا (عمر مفید) و هزینه‌های بهره‌برداری 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 بالا دستی و اولویت‌دار است. البته این نکته نیز حائز اهمیت است که نتایج حاصل از پژوهش‌های علمی و تخصصی باید بلندمدت و فراگیر باشد تا امکان انتقال و کسب تجربه فراهم و موجب تقویت و تعالی شاخص‌های توسعه گردد. آیین‌نامه راه‌های ایران (آرا) به منظور تکمیل و یکپارچه سازی ضوابط فنی حوزه راه، مشتمل بر تدوین و بازنگری تمام ضوابط مورد نیاز مطالعات توجیهی، تهیه طرح، احداث، بهره‌برداری و نگهداری و بهسازی، با همکاری جامعه فنی و مهندسی کشور در دست تهیه بوده و به مرور نهایی و ابلاغ می‌شود.

مجموعه حاضر تحت عنوان «آیین‌نامه راه‌های ایران» با عنوان «آیین‌نامه تونل‌های برون شهری» و شماره ضابطه ۸۰۰-۱۴ است که در دو بخش «مقررات طرح تونل‌های برون شهری» و «ضوابط و معیارهای فنی تونل‌های برون شهری» تدوین شده‌است.

با وجود تلاش، دقت و وقت فراوانی که برای تهیه این آیین‌نامه صرف شده است، این مجموعه مصون از وجود اشکال و ابهام نیست. بنابراین در راستای تکمیل و پربار شدن این آیین‌نامه، از کاربران محترم درخواست می‌شود موارد اصلاحی را به امور نظام فنی و اجرایی سازمان ارسال کنند. پیشنهادهای دریافت شده بررسی و در صورت نیاز، با همفکری نمایندگان جامعه فنی کشور و کارشناسان مجرب این حوزه، نسبت به تهیه متن اصلاحی، اقدام و از طریق نشانی Nezamfanni.ir برای بهره‌برداری عموم، اعلام خواهد شد. به همین منظور و برای تسهیل در پیدا کردن آخرین ضوابط ابلاغی معتبر، در بالای صفحات، تاریخ تدوین مطالب آن صفحه درج شده‌است که در صورت

هرگونه تغییر در مطالب هر یک از صفحات، تاریخ آن نیز اصلاح خواهد شد. از این رو همواره مطالب صفحات، دارای

تاریخ جدید و معتبر خواهد بود.

حمید امانی همدانی

معاون فنی، زیربنائی و تولیدی

زمستان ۱۴۰۳

تهیه و کنترل «آیین نامه راه های ایران (آرا) - آیین نامه تونل های برون شهری»

[ضابطه شماره ۱۴-۸۰۰]

مدیر طرح و مشاور پروژه: مهندسین مشاور راه یاب ملل

مهندس عمران (مدیر طرح)	برهان رستمی
مهندس عمران	ربابه قدیری
مهندس عمران	مظفر بیگلر
کارشناس ارشد زمین شناسی - تکتونیک	شیلان حسینی
کارشناسی ارشد معدن - مکانیک سنگ	بابک رحیمی
کارشناسی ارشد معدن - مکانیک سنگ	مهران میرزایی
کارشناسی ارشد معدن - مکانیک سنگ	مهدی ظهرابی
کارشناسی ارشد معدن - مکانیک سنگ	میلاد آفتابی
کارشناسی ارشد معدن - مکانیک سنگ	وحید مرادی
مهندس عمران	یاسر رستمی

اعضای گروه هدایت و راهبری:

معاون امور نظام فنی و اجرایی، سازمان برنامه و بودجه کشور	علیرضا توتونچی
رئیس گروه امور نظام فنی و اجرایی، سازمان برنامه و بودجه کشور	طاهر فتح اللهی مرنی
کارشناس امور نظام فنی و اجرایی، سازمان برنامه و بودجه کشور	سجاد حیدری حسنکلو
کارشناس امور نظام فنی و اجرایی، سازمان برنامه و بودجه کشور	فاطمه بابالو
رئیس هیئت مدیره مهندسین مشاور راه یاب ملل	برهان رستمی

با همکاری و پشتیبانی:

مدیرعامل آزادراه تهران - شمال	سعید شاهسواری
معاون فنی و اجرایی آزادراه تهران - شمال	وحید فلسفی دیوبند

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه و بودجه کشور

آیین نامه راه‌های ایران (آرا)

تونل‌های برون شهری

بخش اول:

مقررات تونل‌های برون شهری

ضابطه شماره ۱۴-۸۰۰

آخرین ویرایش: ۱۴۰۳-۰۹-۲۸

معاونت فنی، زیربنائی و تولیدی

امور نظام فنی و اجرایی

Nezamfanni.ir

۱۴۰۳

۱- مطالعه و طراحی تونل

۱-۱ کلیات

در مطالعه و طراحی تونل، رعایت موارد زیر الزامی است:

- شناسایی مخاطرات احتمالی (ازجمله زون‌های خردشده، وجود گاز، حفرات کارستی و ...) و در نظرگرفتن تمهیدات متناسب
- انجام مطالعات صحرایی تونل از نظر زمین شناسی مهندسی و هیدروژئولوژی
- شناسایی گسل‌های فعال منطقه و بررسی نوع گسل‌های شناسایی شده
- تهیه گزارش کامل لرزه زمین ساخت و تحلیل خطر زمین لرزه
- تهیه پروفیل طولی زمین‌شناسی تونل شامل مشخصات سنگ دربرگیرنده، ساختارهای زمین‌شناسی، رده‌بندی سنگ، پارامترهای مقاومتی و مکانیکی و ...
- تحلیل پایداری ترانشه‌های مجاور پرتال تونل و نواحی تحت تاثیر پرتال در شرایط استاتیکی و دینامیکی با نگرش به مکانیسم‌های لغزش توده‌ای، بلوکی و واژگونی و تهیه طرح پایداری
- بهره‌گیری از نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیک و مطالعات زمین‌شناسی جهت تعیین پارامترهای مقاومتی و مکانیکی توده-سنگ یا خاک دربرگیرنده تونل
- بررسی اندرکش بین تونل‌های دوقلو و یا بین تونل و سازه‌های مجاور و تعیین فاصله بهینه بین آن‌ها
- انجام مدلسازی در مقاطعی که فرض کرنش صفحه‌ای صادق نباشد (مانند محل تقاطع‌ها)
- اقدامات متناسب جهت بررسی مقاطعی که کرنشی صفحه‌ای صادق نیست از جمله محل تقاطع‌ها و پرتال‌های تونل
- انجام مطالعات زمین ساخت و تعیین پارامتر K (نسبت تنش افقی به قائم)
- تعیین تحکیمات اولیه با انجام مطالعات به روشهای تجربی، تحلیلی، عددی و مشاهده‌ای
- بررسی تاثیر نسبی سیستم نگهداری اولیه در طراحی لاینینگ در نواحی که فرض زوال سیستم نگهداری اولیه مطرح نباشد.
- تعیین بارسنگ جهت طراحی لاینینگ از طریق روش‌های مختلف با تاکید بر زون پلاستیک برآورد شده از مدلسازی عددی
- تهیه طرح رفتارنگاری جهت پایش جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها در حین حفاری و بهره‌برداری و لزوم تدقیق مطالعات بر مبنای نتایج قرائت‌ها
- مراجع استفاده شده در مطالعه و طراحی پروژه در پایان گزارش مطالعه و یا طراحی ارائه شوند.

۲-۱ دامنه کاربرد

دامنه کاربرد تونل‌های راه‌های برون‌شهری، از مراحل مطالعات اولیه تا بهره‌برداری، شامل مجموعه‌ای از فرآیندهای دقیق و نظام‌مند است. این فرآیند با مطالعات توجیهی اولیه و نهایی آغاز می‌شود که امکان‌سنجی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی پروژه را بررسی کرده و بهترین گزینه طراحی را تعیین می‌کند. در ادامه، طراحی تفصیلی انجام می‌شود که در آن نقشه‌های اجرایی، محاسبات فنی، روش‌های ساخت، و ساختار شکست پروژه (WBS) برای مدیریت بهتر منابع و زمان تدوین می‌گردد.

از جمله مباحث کلیدی در این فرآیند، استفاده از تیپ‌های هندسی و سازه‌ای توصیه‌شده در نشریه‌های راهنما است. این تیپ‌ها شامل مشخصات مقاطع تونل، الزامات هندسی (مانند عرض، ارتفاع و شیب) و معیارهای طراحی سازه‌ای (مانند ضخامت پوشش، مصالح استفاده‌شده و سیستم‌های پایدارسازی) می‌باشد. این راهنماها تضمین می‌کنند که طراحی تونل با شرایط زمین‌شناسی، نوع ترافیک و الزامات ایمنی سازگار باشد. در مرحله ساخت، اجرای حفاری، پایدارسازی، نصب پوشش نهایی و تأسیسات داخلی بر اساس طراحی‌های مصوب انجام می‌شود. در نهایت، بهره‌برداری شامل آزمایش‌های نهایی، راه‌اندازی سیستم‌های ایمنی و برنامه‌ریزی برای نگهداری دوره‌ای است. استفاده از این رویکرد نظام‌مند، همراه با رعایت تیپ‌های هندسی و سازه‌ای، منجر به افزایش کارایی، ایمنی و پایداری تونل در طول عمر مفید آن می‌شود.

۳-۱ مشخصات هندسه تونل

در طراحی پلان، پروفیل و مقطع تونل، رعایت موارد زیر الزامی است:

- طراحی هندسه تونل مطابق با نشریه شماره ۸۰۰-۱
- حداکثر شیب طولی تونل‌های ماریج (اسپیرال) ۲/۵ درصد می‌باشد بدیهی است رعایت الزامات ایمنی و تهویه در طراحی پارامترهای هندسی تونل الزامی است.
- شناسایی شیب و امتداد لایه‌ها نسبت به محور تونل
- ترجیحاً جانمایی محور تونل به صورت عمود بر خطوط توپوگرافی و پرهیز از دامنه‌های با روباره کم
- شناسایی تراز آب زیرزمینی و جانمایی مناسب محور تونل نسبت به آن
- امکان‌سنجی بازگشایی جبهه‌های کاری جدید به وسیله تونل دسترسی جهت کاهش زمان و هزینه
- در تونل‌های آزادراهی که به روش مکانیزه انجام می‌شود، در صورت وجود محدودیت در طراحی و به کارگیری دستگاه TBM می‌توان به نحوی عمل کرد که مجموع شانه و پیاده‌رو از عرض شانه مطابق نشریه ۸۰۰-۱ جدول ۲ (مشخصات نیم‌رخ عرضی آزادراه‌های با دو کف راه (با یک میانه) و با سه کف راه (با دو میانه) کمتر نباشد، در اینصورت لازم است سیستم نگهداری، بررسی پارامترهای ایمنی و روش بهره‌برداری توسط مهندس مشاور مطالعه و بررسی شود و به تایید و تصویب کارفرما برسد.

۴-۱ جانمایی پرتال‌ها

در جانمایی پرتال‌ها به عنوان نقاط خاص و حساس تونل، رعایت موارد زیر الزامی است:

- شناخت کامل مشخصات زمین‌شناسی مهندسی محل پرتال و تلاش در جهت کاهش آشفته‌گی این ناحیه
- بررسی تراز آب زیرزمینی و راه‌های مقابله با آن
- جانمایی پرتال تونل در دامنه‌های آفتابگیر در صورت امکان
- شناسایی خط‌القعرها و مسیل‌های روی تونل (نواحی با پتانسیل بالای ناپایداری) نسبت به محور تونل و به خصوص پرتال تونل (به عنوان معابر ایجاد سیلاب) و در نظر گرفتن تمهیدات لازم
- شناسایی سازه‌ها و مستحدهات مجاور پرتال و میزان اثرگذاری متقابل آنها با پرتال
- شناسایی مخاطرات احتمالی محل احداث پرتال از جمله رانش، ریزش، سیل، بهمن و ... و در نظر گرفتن تمهیدات لازم

۵-۱ جانمایی تجهیز کارگاه

در انتخاب محل تجهیز کارگاه رعایت موارد زیر الزامی است:

- پیش‌بینی مساحت مورد نیاز تجهیز
- پیش‌بینی راه‌های دسترسی به محل تجهیز
- امکان‌سنجی جانمایی به لحاظ اخذ مجوزهای مربوطه از جمله منابع طبیعی و ...
- امکان‌سنجی تامین برق، آب، اینترنت و سایر زیرساخت‌های مورد نیاز تجهیز

۶-۱ محل دپوی مصالح مازاد تونل

در جانمایی محل دپوی مصالح مازاد تونل رعایت موارد زیر الزامی است:

- پیش‌بینی حجم مصالح مازاد
- شناسایی محل مصرف بهینه مصالح مازاد به عنوان مصالح خاکریزی، سنگریزی، مصالح خام سنگ‌شکن و ...
- پیش‌بینی راه‌های دسترسی به محل دپو
- امکان‌سنجی جانمایی محل دپو به لحاظ اخذ مجوزهای مربوطه از جمله منابع طبیعی، محیط زیست و
- ارائه طرح پایدارسازی دپو (خصوصاً در محل‌هایی که دپو مصالح روی سطوح شیبدار یا خط‌القعرها جانمایی می‌شود)
- ارائه طرح منظر‌آرایی محل دپو
- ارائه طرح زهکشی و هدایت آب‌های سطحی در محدوده دپو جهت افزایش

۲- ساخت تونل

۱-۲ پرتال

در احداث پرتال‌ها، رعایت موارد زیر الزامی است:

- جلوگیری از دستخوردگی زیاد زمین در محل پرتال
- پایداری کامل پرتال مطابق با نقشه‌ها و مشخصات اجرایی
- شناسایی تراز آب زیرزمینی و اجرای روش‌های مقابله با آن

۲-۲ حفاری و سیستم نگهداری اولیه

در مرحله اجرای حفاری و سیستم نگهداری اولیه، رعایت موارد زیر الزامی است:

- انجام مپینگ و اتخاذ تمهیدات مناسب باتوجه به نتایج مپینگ
 - رعایت فاصله زمانی حداقل بین جبهه کار و نصب تحکیمات (در صورت نیاز به شاتکریت لایه اول، حتما بلافاصله بعد از حفاری اجرا شود. همچنین در صورت اجرا شاتکریت لایه دوم و مش‌بندی باید حداکثر فاصله از جبهه کار ۱۰ متر باشد. راکبوت سیستماتیک نیز باید حداکثر فاصله ۱۵ متر از جبهه کار داشته باشد. (این فواصل دقیقا با کنترل و مشاهدات میدانی بسته به کیفیت سنگ تعیین می گردد).
 - بروزسانی الگوی انفجار و میزان مواد منفجره متناسب با شرایط سنگ دربرگیرنده جهت کاهش اضافه حفاری
 - انتخاب روش مناسب در طراحی آرایش چالها (موازی، V cut، بادبزی و...) با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و میزان پایدار مانی تشکیلات سنگی با هدف optimaization میزان پیشروی در هر گام حفاری و به حداقل رساندن کسری یا اضافه حفاریهای ناخواسته
 - پیاده‌سازی چال‌های انفجار مطابق با الگوی طراحی شده
 - پیش‌بینی تمهیدات لازم جهت به حداقل رساندن اضافه حفاری از جمله طول گل‌گذاری، زمان تاخیر و سایر پارامترها به ویژه در چال‌های محیطی، مقدار ماده منفجره (خرج ویژه) و ...
 - رعایت موارد ایمنی مطابق با نشریه‌های مربوطه
۱. تهیه برنامه ایمنی و بهداشت حرفه‌ای
 ۲. تهیه تمامی تجهیزات حفاظت فردی و آموزش افراد
 ۳. تهیه تمهیدات لازم کمک‌های اولیه
 ۴. مقررات ایمنی حمل، نگهداری و کاربرد مواد ناریه: تهیه، حمل، نگهداری و کاربرد مواد ناریه در کارهای عمرانی باید مطابق با آیین‌نامه و مقررات حفاظت و ایمنی باشد.
 ۵. شناسایی عوامل آسیب رسان داخل تونل
 ۶. ملاحظات زیست محیطی شامل مراقبت حداکثری نسبت به حراست از اکوسیستم و زیست بوم منطقه و شناخت و مراقبت از معابر و آبشخورهای حیات وحش، فیلتراسیون فیزیکی و حتی الامکان شیمیایی پساب‌هایی که وارد چرخه آبهای زیرزمینی می شوند و مواردی نظیر آن.

۷. برنامه ریزی و اتخاذ تمهیدات لازم جهت مدیریت بحران حین حوادث بخصوص موارد منجر به تلفات و کنترل تاثیرات روانی آن، جهت ایجاد وضعیت عادی برای ادامه انجام عملیات اجرایی

۲-۳ سیستم نگهداری ثانویه

در مرحله اجرای سیستم نگهداری ثانویه، رعایت موارد زیر الزامی است:

انجام آزمایشات کنترل کیفی بر روی تمام مصالح (میلگرد، واترستاپ، روان کننده و مصالح سنگی بتن و ...) قبل از عملیات اجرایی

- رده بندی بتن بر پایه آنالیز شیمایی آب و آزمایش‌های تعیین درصد کانی‌های واکنش‌زا (پتروگرافی)
- پرکردن اضافه حفاری‌های قسمت کف پاتاق لاینینگ با مصالح مناسب یا بتن (با تشخیص دستگاه نظارت) تا کد مورد نظر
- انجام دقت کافی در خم و برش آرماتوربندی پاتاق (خم و بازخم میلگردی که یک سر آن در بتن سخت شده قرار دارد مجاز نیست).
- در نظر گرفتن تمهیدات خاصی برای عدم مسدود شدن لوله‌های بارباکان و جلوگیری از ترک در بتن، در صورت عبور آنها از قسمت پاتاق به صورت عمود بر مقطع
- شناسایی و اصلاح مقاطع با کسر حفاری، قبل از شروع آرماتوربندی لاینینگ طاق
- روغن کاری قالب لاینینگ قبل از بتن ریزی (از آغشته کردن میلگردها به روغن اجتناب شود).
- اطمینان از سالم بودن ویبره‌های قالب یکپارچه
- به حداقل رساندن زمان شروع و خاتمه بتن‌ریزی جهت جلوگیری از ایجاد درزهای سرد اجرایی بتن
- سربندی صحیح قالب یکپارچه جهت جلوگیری از هدر رفت شیره بتن
- اطمینان از پرشدن بتن در قسمت هد لاینینگ

۲-۴ تاسیسات حین اجرا

- حفظ روشنایی و تهویه در تمام طول تونل تا اتمام کلیه عملیات اجرایی تونل
- تامین هوای تازه در سینه کار تونل متناسب با نیاز
- رعایت تناسب میزان تهویه و روشنایی به نسبت سطح مقطع، تعداد جبهات کاری، نوع فعالیت و ...
- تخلیه مرتب آب موجود در سینه کار (پمپاژ یا ثقلی).

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه و بودجه کشور

آیین نامه راه‌های ایران (آرا)

تونل‌های برون شهری

بخش دوم:

ضوابط و معیارهای فنی تونل‌های برون شهری

ضابطه شماره ۱۴-۸۰۰

آخرین ویرایش: ۱۴۰۳-۰۹-۲۸

معاونت فنی، زیربنایی و تولیدی

امور نظام فنی و اجرایی

Nezamfanni.ir

۱۴۰۳

فهرست مطالب

۱- کلیات

۱-۱- مقدمه.....	۵
۲-۱- هدف.....	۵
۳-۱- انواع تونل و روش های ساخت.....	۵
۴-۱- تعاریف.....	۶

۲- مطالعات تونل

۱-۲- مقدمه.....	۱۳
۲-۲- طراحی.....	۲۱
۱-۲-۲- طراحی تونل.....	۲۱
۱-۲-۲-۱- پلان.....	۲۱
۲-۲-۲-۱- پروفیل.....	۲۲
۳-۲-۲-۱- مقطع عرضی.....	۲۲
۴-۲-۲-۱- امکانات کمکی تونلها.....	۲۲
۲-۲-۲-۲- برنامه ریزی احداث تونل.....	۲۲
۱-۲-۲-۲- روش اجرا و برنامه زمان بندی.....	۲۳
۲-۲-۲-۲- راه های دسترسی، تجهیز و محل های دپوی مصالح مازاد.....	۲۳
۳-۲-۲-۲- حفاظت از محیط زیست.....	۲۴
۳-۲- بررسی ها.....	۲۵
۱-۳-۲- بررسی شرایط زمین.....	۲۵
۱-۳-۲-۱- کلیات.....	۲۵
۲-۳-۲-۱- بررسی توپوگرافی برای مطالعه و اجرا.....	۲۷
۳-۳-۲-۱- بررسی زمین شناسی برای مطالعه و اجرا.....	۲۷
۴-۳-۲-۱- بررسی های زمین شناسی حین ساخت.....	۳۱
۵-۳-۲-۱- بررسی های هیدرولوژیکی.....	۳۲
۲-۳-۲- بررسی موقعیت تونل.....	۳۴

۳۴	۲-۳-۱- کلیات
۳۴	۲-۳-۲- بررسی زیست محیطی
۳۸	۲-۳-۳- بررسی قوانین و مقررات تأثیرگذار بر پروژه
۳۸	۲-۳-۴- الزامات جبران خسارت
۳۸	۲-۳-۳- نتایج بررسی ها
۳۸	۲-۳-۱- کلیات
۳۸	۲-۳-۲- طبقه بندی و استفاده از نتایج بررسی های شرایط زمین
۴۳	۲-۴- جایگاه مطالعه و طراحی تونل در مطالعات طرح های احداث راه
۴۴	۲-۴-۱- مطالعات توجیه اولیه طرح احداث راه
۴۴	۲-۴-۲- مطالعات توجیه نهایی طرح احداث راه
۴۵	۲-۴-۳- مطالعات طراحی تفصیلی طرح احداث راه
۴۶	۲-۴-۴- مطالعات توجیه نهایی احداث تونل
۴۷	۲-۴-۵- مطالعات طراحی تفصیلی احداث تونل
۴۸	۲-۴-۱- مشخصات فنی خصوصی شامل مشخصات مصالح و مشخصات فنی عملیات
۴۸	۲-۴-۲- متره و برآورد احداث تونل
۴۹	۲-۴-۳- برنامه زمان بندی
۵۰	۲-۵- هندسه تونل
۵۰	۲-۵-۱- مقدمه
۵۰	۲-۵-۱-۱- گروه بندی تونل ها
۵۰	۲-۵-۲- مقطع عرضی
۵۱	۲-۵-۲-۱- سواره رو
۵۱	۲-۵-۲-۲- شانه ها
۵۲	۲-۵-۳- توقفگاه اضطراری
۵۲	۲-۵-۴- پیاده روها
۵۳	۲-۵-۵- ارتفاع
۵۴	۲-۵-۶- شیب عرضی

۵۴..... ۲-۵-۷- سرعت طرح

۵۴..... ۲-۵-۸- پیاده رو

۵۴..... ۲-۵-۳- نقشه مسطحه

۳- بررسی های زمین شناسی ۵۹

۵۹..... ۳-۱- بررسی شرایط زمین

۵۹..... ۳-۱-۱- زمین شناسی عمومی

۶۰..... ۳-۱-۲- چینه شناسی

۶۰..... ۳-۱-۳- مخاطرات زمین شناسی

۶۳..... ۳-۱-۴- آب زمین شناسی

۶۴..... ۳-۱-۵- شرایط زیست محیطی

۶۵..... ۳-۲- زمین شناسی مهندسی

۶۵..... ۳-۲-۱- مقدمه

۶۶..... ۳-۲-۲- تفکیک واحدهای زمین شناسی مهندسی

۶۶..... ۳-۲-۳- طبقه بندی مهندسی توده سنگ

۶۷..... ۳-۲-۴- برآورد خصوصیات ژئومکانیکی

۶۷..... ۳-۲-۴-۱- آزمون های آزمایشگاهی

۷۲..... ۳-۲-۴-۲- آزمایشهای برجا

۷۲..... ۳-۲-۴-۲-۱- آزمایش بارگذاری صفحه های (جکینگ)

۷۳..... ۳-۲-۴-۲-۲- آزمایش مقاومت برشی مستقیم برجا در سنگ

۷۳..... ۳-۲-۴-۲-۳- آزمایش دیلاتومتری

۷۳..... ۳-۲-۴-۲-۴- آزمایش شکاف دیواره گمانه (اسلاتر)

۷۴..... ۳-۲-۴-۲-۵- روش شکست هیدرولیکی

۷۴..... ۳-۲-۴-۲-۶- روش بیش مغزگیری

۷۵..... ۳-۲-۴-۲-۷- آزمایش لوژان

۷۶..... ۳-۲-۵- اکتشافات ژئوتکنیکی خاکها

۷۷..... ۳-۲-۵-۱- آزمونهای آزمایشگاهی بر روی خاکها

۸۰	 ۳-۲-۵-۲- آزمایشهای برجا بر روی خاکها.
۸۲	 ۳-۳- لرزه‌خیزی و تحلیل خطر زمین‌لرزه.
۸۳	 ۳-۳-۱- رفتار سنگ در برابر زمین‌لرزه.
۸۵	 ۳-۳-۲- رفتار خاک در برابر زمین‌لرزه.
۸۵	 ۳-۴- مطالعات ژئوفیزیکی.

۴- ساختار شکست تونل

۹۱	 ۴-۱- مقدمه.
۹۱	 ۴-۲- ماهیت و اصول کلی تدوین ساختار شکست کار.
۹۱	 ۴-۲-۱- کاربران ساختار شکست کار.
۹۲	 ۴-۲-۲- داده‌های اولیه برای تهیه ساختار شکست کار.
۹۳	 ۴-۲-۳- تحویل‌شدنی.
۹۳	 ۴-۲-۴- الزامات ساختار شکست کار.
۹۴	 ۴-۲-۵- محل قرارگیری فعالیت‌ها.
۹۵	 ۴-۲-۶- شیوه نام‌گذاری عناصر بر اساس مبنا بودن تحویل‌شدنی‌ها.
۹۷	 ۴-۲-۷- سطوح استاندارد ساختار شکست کار.
۹۸	 ۴-۲-۸- شماره‌گذاری عناصر ساختار شکست کار.

۵- طراحی تونل

۱۰۱	 ۵-۱- انتخاب روش و مقطع حفاری.
۱۰۱	 ۵-۱-۱- انتخاب مقطع حفاری.
۱۰۲	 ۵-۱-۲- روش حفاری.
۱۰۲	 ۵-۱-۲-۱- حفر تونل با ماشین‌های تمام مقطع (TBM).
۱۰۳	 ۵-۱-۲-۲- حفر تونل به کمک ماشین‌های بازویی (رودهدر، درام کاتر و غیره).
۱۰۴	 ۵-۱-۲-۳- حفر تونل به روش آتشکاری.
۱۰۵	 ۵-۱-۲-۴- احداث تونل به روش کند و پوش.
۱۰۵	 ۵-۱-۳- مقطع حفاری.
۱۰۸	 ۵-۲- طراحی سیستم پیش تحکیم.

- ۱-۲-۵- کلیات..... ۱۰۸
- ۲-۲-۵- فورپولینگ..... ۱۰۸
- ۳-۲-۵- تزریق..... ۱۰۹
- ۴-۲-۵- انجماد..... ۱۰۹
- ۳-۵- طراحی سیستم نگهداری اولیه..... ۱۰۹
- ۱-۳-۵- کلیات..... ۱۰۹
- ۲-۳-۵- بارهای وارده بر تونل..... ۱۱۱
- ۱-۲-۳-۵- استفاده از رده‌بندی بار سنگ ترزاقی..... ۱۱۲
- ۱-۱-۲-۳-۵- تئوری ترزاقی اصلاح شده توسط دیر و همکاران..... ۱۱۴
- ۲-۱-۲-۳-۵- تئوری ترزاقی اصلاح شده برای تونل‌ها و مغارها توسط سینگ و همکاران (۱۹۹۵)..... ۱۱۶
- ۲-۲-۳-۵- تخمین فشار وارد بر نگهداری بر اساس RMR..... ۱۱۶
- ۳-۲-۳-۵- تخمین فشار وارد بر نگهداری بر اساس سیستم Q..... ۱۱۷
- ۱-۳-۲-۳-۵- استفاده از روش بارتون و همکاران (۱۹۷۴)..... ۱۱۷
- ۲-۳-۲-۳-۵- رابطه سینگ و همکاران (۱۹۹۲)..... ۱۱۹
- ۳-۳-۵- انواع سیستم نگهداری..... ۱۲۲
- ۱-۳-۳-۵- شاتکریت..... ۱۲۲
- ۱-۱-۳-۳-۵- کلیات..... ۱۲۲
- ۲-۱-۳-۳-۵- ترکیب شاتکریت..... ۱۲۴
- ۳-۱-۳-۳-۵- شاتکریت تقویت‌شده..... ۱۲۴
- ۴-۱-۳-۳-۵- زمان انجام شاتکریت..... ۱۲۵
- ۲-۳-۳-۵- راکبولت..... ۱۲۶
- ۱-۲-۳-۳-۵- کلیات..... ۱۲۶
- ۲-۲-۳-۳-۵- توزیع راکبولت‌ها..... ۱۲۷
- ۳-۲-۳-۳-۵- ابعاد راکبولت‌ها..... ۱۲۸
- ۴-۲-۳-۳-۵- صفحه بولت..... ۱۲۹
- ۵-۲-۳-۳-۵- سیستم مهاری و تزریق راکبولت..... ۱۲۹

- تزریق ۱۳۱
- ۳-۳-۳-۵- قاب‌های فولادی..... ۱۳۲
- ۱-۳-۳-۳-۵- کلیات..... ۱۳۲
- ۲-۳-۳-۳-۵- شکل قاب‌های فولادی..... ۱۳۴
- ۳-۳-۳-۳-۵- فاصله‌داری قاب‌های فولادی..... ۱۳۵
- ۴-۳-۳-۳-۵- تودلی قاب‌های فولادی..... ۱۳۵
- ۴-۳-۵- مفهوم طراحی سیستم نگهداری اولیه..... ۱۳۵
- ۵-۳-۵- روش‌های تجربی طراحی..... ۱۳۷
- ۱-۵-۳-۵- کلیات..... ۱۳۷
- ۲-۵-۳-۵- استفاده از رده‌بندی بار سنگ ترزاقی..... ۱۳۷
- ۳-۵-۳-۵- استفاده از رده‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR)..... ۱۳۸
- ۱-۳-۵-۳-۵- زمان خود نگهداری تونل..... ۱۳۸
- ۲-۳-۵-۳-۵- انتخاب سیستم نگهداری اولیه تونل..... ۱۳۹
- ۴-۵-۳-۵- استفاده از شاخص کیفیت سنگ (RQD)..... ۱۴۳
- ۵-۵-۳-۵- استفاده از سیستم رده‌بندی Q..... ۱۴۴
- ۶-۵-۳-۵- استفاده از رده‌بندی بر اساس ساختار سنگ (RSR)..... ۱۴۴
- ۶-۳-۵- روش‌های مشاهده‌ای طراحی..... ۱۴۵
- ۱-۶-۳-۵- کلیات..... ۱۴۵
- ۲-۶-۳-۵- اهداف رفتار سنجی توده سنگ..... ۱۴۶
- ۳-۶-۳-۵- پارامترهای مورد سنجش در رفتار سنجی..... ۱۴۷
- ۴-۶-۳-۵- تعبیر و تفسیر داده‌های رفتار سنجی..... ۱۴۷
- ۵-۶-۳-۵- روش تونل سازی اتریشی جدید (NATM)..... ۱۴۸
- ۶-۶-۳-۵- روش محدودسازی همگرایی..... ۱۵۱
- ۷-۳-۵- روش‌های تحلیلی طراحی..... ۱۵۲
- ۱-۷-۳-۵- کلیات..... ۱۵۲
- ۲-۷-۳-۵- تحلیل اندرکنش سنگ و سیستم نگهداری اولیه..... ۱۵۴

۱۵۵.....	۵-۳-۷-۳- مدل سازی عددی.....
۱۵۶.....	۵-۳-۸- تغییر سیستم نگهداری.....
۱۵۶.....	۵-۳-۸-۱- تغییر سیستم نگهداری اولیه در محل حفاری نشده.....
۱۵۶.....	۵-۳-۸-۲- تغییر سیستم نگهداری اولیه در محل حفاری شده.....
۱۵۷.....	۵-۴- طراحی لاینینگ.....
۱۵۸.....	۵-۴-۱- فلسفه طراحی لاینینگ.....
۱۵۹.....	۵-۴-۲- طراحی ضخامت لاینینگ.....
۱۵۹.....	۵-۴-۳- اختلاط و مقاومت بتن لاینینگ.....
۱۶۰.....	۵-۴-۴- اقدامات متقابل در برابر ترک خوردگی در بتن لاینینگ.....
۱۶۱.....	۵-۵- طراحی کفبند
۱۶۱.....	۵-۵-۱- عملکرد کفبند.....
۱۶۱.....	۵-۵-۱- عملکرد کفبند به قابلیت سرویس دهی و مکانیکی طبقه بندی می شود.....
۱۶۲.....	۵-۵-۲- شرایط تونل برای نصب کفبند.....
۱۶۳.....	۵-۵-۳- زمان بندی نصب کفبند.....
۱۶۳.....	۵-۵-۴- کف بند اولیه و موقت.....
۱۶۳.....	۵-۵-۵- شکل و ضخامت کفبند.....
۱۶۵.....	۵-۵-۶- طرح اختلاط و مقاومت بتن کفبند.....
۱۶۵.....	۵-۵-۷- نصب کفبند بلافاصله بعد از حفاری.....
۱۶۶.....	۵-۶- طراحی سیستم های عایق بندی و زهکش.....
۱۶۶.....	۵-۶-۱- مبانی.....
۱۶۷.....	۵-۶-۲- عایق بندی.....
۱۶۹.....	۵-۶-۳- زهکشی.....
۱۷۱.....	۵-۷- طراحی پرتال ها و زون های پرتالی.....
۱۷۱.....	۵-۷-۱- مبانی.....
۱۷۲.....	۵-۷-۲- (گالری) تونل (پرتال ها).....

- ۱۷۷ ۳-۷-۵- زون پرتالی
- ۱۷۹ ۸-۵- طراحی سیستم روشنایی و تهویه
- ۱۷۹ ۱-۸-۵- طراحی سیستم تهویه
- ۱۸۰ ۱-۱-۸-۵- روش‌های تهویه
- ۱۸۰ ۱-۱-۸-۵- تهویه دهشی
- ۱۸۰ ۲-۱-۸-۵- تهویه مکشی
- ۱۸۰ ۳-۱-۸-۵- تهویه مختلط
- ۱۸۱ ۲-۸-۵- طراحی سیستم روشنایی
- ۱۸۲ ۹-۵- طراحی تونل در شرایط خاص
- ۱۸۲ ۱-۹-۵- کلیات
- ۱۸۲ ۲-۹-۵- زمین‌های خاص
- ۱۸۴ ۳-۹-۵- شرایط خاص
- ۱۸۶ ۱-۳-۹-۵- سازه‌های مجاور
- ۱۸۷ ۲-۳-۹-۵- هندسه و ابعاد خاص
- ۱۸۸ ۱-۲-۳-۹-۵- نقاط انشعاب، بزرگ شدن‌ها و مقاطع بزرگ
- ۱۹۰ ۳-۳-۹-۵- بارهای خارجی
- ۱۹۰ ۱-۳-۳-۹-۵- فشار زمین
- ۱۹۱ ۲-۳-۳-۹-۵- فشار آب
- ۱۹۱ ۳-۳-۳-۹-۵- زلزله
- ۱۹۲ ۴-۳-۳-۹-۵- سایر بارهای خارجی

۱۹۵ -۶- ساخت تونل

- ۱۹۵ ۱-۶- تدارکات عمومی
- ۱۹۵ ۲-۶- بررسی و نظارت در حین ساخت
- ۱۹۵ ۱-۲-۶- تغییرات در روش‌های ساخت
- ۱۹۵ ۳-۶- نقشه‌برداری
- ۱۹۵ ۱-۳-۶- فاز اول نقشه‌برداری

۱۹۶	۶-۳-۲- فاز دوم نقشه برداری.....
۱۹۸	۶-۳-۳- فاز سوم نقشه برداری.....
۱۹۹	۶-۴- برنامه ریزی تاسیسات موقت.....
۱۹۹	۶-۵- پرتال ها و زون های پرتالی.....
۲۰۰	۶-۵-۱- ساخت نواحی پرتال.....
۲۰۲	۶-۶- حفاری.....
۲۰۳	۶-۶-۱- آرایش چال ها در روش آتشفکری.....
۲۰۵	۶-۶-۲- حفر چال.....
۲۰۵	۶-۶-۳- خرج گذاری.....
۲۰۵	۶-۶-۴- عملیات انفجار.....
۲۰۶	۶-۶-۵- اضافه حفاری.....
۲۰۸	۶-۶-۶- اقدامات برای پایداری جبهه کار.....
۲۰۹	۶-۶-۷- اضافه حفاری.....
۲۰۹	۶-۶-۸- زهکشی.....
۲۰۹	۶-۷- حمل.....
۲۰۹	۶-۷-۱- برنامه حمل.....
۲۱۰	۶-۷-۲- ماشین های حمل.....
۲۱۲	۶-۸- تأسیسات حین ساخت.....
۲۱۲	۶-۸-۱- روشنایی.....
۲۱۲	۶-۸-۲- تهویه.....
۲۱۴	۶-۹- سیستم نگهداری اولیه.....
۲۱۵	۶-۹-۱- شاتکریت.....
۲۱۷	۶-۹-۲- مخلوط بتن شاتکریت.....
۲۱۹	۶-۹-۳- خواص مکانیکی شاتکریت.....
۲۱۹	۶-۹-۴- ماشین های شاتکریت.....

۲۲۰	۶-۹-۵- پاشش شاتکریت.....
۲۲۰	۶-۱۰-۱- راک بولت.....
۲۲۰	۶-۱۰-۱- تجهیزات.....
۲۲۱	۶-۱۰-۲- چال زنی و تمیز کردن چال‌ها برای راک بولت.....
۲۲۲	۶-۱۰-۳- نصب و تزریق راک بولت‌ها.....
۲۲۲	۶-۱۱-۱- قاب‌های فولادی.....
۲۲۳	۶-۱۲-۱- ابزار دقیق.....
۲۲۳	۶-۱۲-۱- اهداف رفتارسنجی.....
۲۲۳	۶-۱۲-۱-۱- ارزیابی و تأیید صحت پارامترهای طراحی.....
۲۲۴	۶-۱۲-۲- کنترل و بهینه سازی مراحل اجرا.....
۲۲۴	۶-۱۲-۳- علت یابی مسائل.....
۲۲۴	۶-۱۲-۴- کاهش هزینه اجرا.....
۲۲۵	۶-۱۲-۲- انواع ابزار دقیق.....
۲۲۶	۶-۱۲-۳- نصب و قرائت ابزار دقیق.....
۲۲۷	۶-۱۲-۴- تحلیل قرائت‌ها.....
۲۲۹	۶-۱۳- سیستم نگهداری ثانویه (لاینینگ).....
۲۳۱	۶-۱۳-۱- آرماتوربندی.....
۲۳۱	۶-۱۳-۱-۱- آماده نمودن آرماتورها.....
۲۳۲	۶-۱۳-۲- نگهداری آرماتورها در قالب‌ها.....
۲۳۲	۶-۱۳-۳- رواداری.....
۲۳۲	۶-۱۳-۴- نقشه‌های اجرائی.....
۲۳۲	۶-۱۳-۵- وصله کردن آرماتور.....
۲۳۳	۶-۱۳-۶- حداقل پوشش محافظ بتنی روی آرماتور.....
۲۳۳	۶-۱۳-۲- قالب‌ها.....
۲۳۴	۶-۱۳-۱-۲- ساخت قالب‌ها.....
۲۳۴	۶-۱۳-۲-۲- سربندی.....

۲۳۴.....	۳-۲-۱۳-۶- جابه جایی و نصب قالب ها.....	
۲۳۵.....	۴-۲-۱۳-۶- جداسازی قالب ها.....	
۲۳۵.....	۳-۱۳-۶- بتن لاینینگ.....	
۲۳۵.....	۱-۳-۱۳-۶- شرح کلی ساخت بتن لاینینگ.....	
۲۳۶.....	۲-۳-۱۳-۶- طرح اختلاط بتن.....	
۲۳۶.....	۳-۳-۱۳-۶- الزامات اجرایی بتن.....	
۲۳۶.....	۱-۳-۳-۱۳-۶- نیروی انسانی.....	☐
۲۳۶.....	۲-۳-۳-۱۳-۶- آماده سازی محل بتن ریزی.....	☐
۲۳۷.....	۳-۳-۳-۱۳-۶- ساخت و تولید بتن.....	☐
۲۴۰.....	۴-۳-۳-۱۳-۶- انتقال بتن و بتن ریزی.....	☐
۲۴۱.....	۵-۳-۳-۱۳-۶- عملیات بتن ریزی.....	☐
۲۴۳.....	۶-۳-۳-۱۳-۶- تراکم بتن.....	☐
۲۴۳.....	۷-۳-۳-۱۳-۶- عمل آوری بتن.....	☐
۲۴۴.....	۸-۳-۳-۱۳-۶- تراکم بتن لاینینگ.....	☐
۲۴۴.....	۹-۳-۳-۱۳-۶- نمونه گیری.....	☐
۲۴۶.....	۱۰-۳-۳-۱۳-۶- بتن ریزی در هوای سرد.....	☐
۲۴۶.....	۴-۳-۱۳-۶- بتن خود تراکم.....	
۲۴۶.....	۱-۴-۳-۱۳-۶- مصالح.....	☐
۲۴۷.....	۲-۴-۳-۱۳-۶- طرح اختلاط.....	☐
۲۴۸.....	۳-۴-۳-۱۳-۶- اجرا.....	☐
۲۴۹.....	۵-۳-۱۳-۶- مواد افزودنی.....	
۲۵۰.....	۱-۵-۳-۱۳-۶- افزودنی های تسریع کننده (زودگیر کننده).....	☐
۲۵۱.....	۲-۵-۳-۱۳-۶- افزودنی های دیر گیر کننده.....	☐
۲۵۱.....	۳-۵-۳-۱۳-۶- افزودنی های کاهنده آب (یا روان کننده).....	☐
۲۵۲.....	۴-۵-۳-۱۳-۶- افزودنی های کاهنده آب در حد بالا (یا فوق روان کننده).....	☐
۲۵۲.....	۵-۵-۳-۱۳-۶- افزودنی های حبابزا (هوازا).....	☐

۲۵۳	 ۶-۱۳-۳-۵-۶- افزودنی های معدنی	□
۲۵۴	 ۶-۱۴- کفبند	
۲۵۴	 ۶-۱۴-۱- زمان بندی و روش های ساخت کفبند	
۲۵۶	 ۶-۱۵- عایق بندی و زهکشی (آب بند کردن سازه های زیرزمینی)	
۲۵۶	 ۶-۱۵-۱- مصالح آب بندی ژئوممبران PVC	
۲۵۷	 ۶-۱۵-۱-۱- لایه بندی سیستم آب بندی ژئوممبران PVC	
۲۵۸	 ۶-۱۵-۲- مصالح آب بند پاششی	
۲۵۸	 ۶-۱۵-۳- مواد افزودنی در بتن	
۲۵۸	 ۶-۱۶- روسازی	
۲۶۰	 ۶-۱۶- تأسیسات حین بهره برداری	
۲۶۰	 ۶-۱۶-۱- روشنایی	□
۲۶۰	 ۶-۱۶-۲- نور روز	□
۲۶۱	 ۶-۱۶-۳- نور شب	
۲۶۲	 ۶-۱۶-۴- روشنایی روز تونل های کوتاه	
۲۶۲	 ۶-۱۶-۵- طراحی روشنایی تونل	
۲۶۴	 ۶-۱۶-۶- تهویه	
۲۶۴	 ۶-۱۶-۱- لزوم اجرای تهویه	
۲۶۵	 ۶-۱۶-۲- تهویه تونل در حالت اضطراری و آتش سوزی	
۲۶۵	 ۶-۱۶-۳- روال مطالعات تهویه	
۲۶۷	 ۶-۱۶-۴- انتخاب روش تهویه	
۲۶۷	 ۶-۱۶-۱-۴- تهویه طولی	□
۲۶۸	 ۶-۱۶-۲-۴- تهویه نیمه عرضی	□
۲۶۸	 ۶-۱۶-۳-۴- تهویه عرضی (کاملاً عرضی)	□
۲۶۸	 ۶-۱۷- ایمنی	
۲۶۹	 ۶-۱۷-۱- مقررات ایمنی حمل، نگهداری و کاربرد مواد ناریه	
۲۷۰	 ۶-۱۷-۲- عوامل آسیب رسان و بیماریزای محیط کار و بهداشت حرفه ای	

۲۷۰.....	۶-۱۷-۲-۱- صدا.....
۲۷۲.....	۶-۱۷-۲-۲- گازها، بخارات، دود و گرد و غبار.....
۲۷۲.....	۶-۱۷-۲-۳- تنش گرمایی.....
۲۷۲.....	۶-۱۷-۲-۴- سایر عوامل.....
۲۷۲.....	۶-۱۸- ملاحظات زیست محیطی.....
۲۷۳.....	۶-۱۹- روش های کمکی.....
۲۷۴.....	۶-۱۹-۱- کاربرد روش های کمکی.....
۲۷۷.....	۶-۱۹-۲- روش های کمکی برای ایمنی در ساخت تونل.....
۲۷۷.....	۶-۱۹-۲-۱- روش کمکی برای پایداری جبهه کار.....
۲۸۲.....	۶-۱۹-۲-۲- روش کمکی برای کنترل جریان آب.....
۲۸۵.....	۶-۱۹-۳- روش های کمکی برای محافظت از محیط اطراف.....
۲۸۵.....	۶-۱۹-۳-۱- روش های کمکی برای جلوگیری از نشست سطح زمین.....
۲۸۹.....	۶-۱۹-۴- روش های کمکی برای محافظت از سازه های مجاور.....

۷- مدیریت ساخت تونل ۲۹۳

۲۹۳.....	۷-۱- برنامه زمان بندی.....
۲۹۵.....	۷-۱-۱- مراحل برنامه ریزی.....
۲۹۵.....	۷-۱-۱-۱- گام اول: تحلیل پروژه، شناخت فعالیت ها و روابط آن ها و تهیه ساختار شکست کار (WBS).....
۲۹۵.....	۷-۱-۱-۲- گام دوم: برآورد مدت، منابع مورد نیاز و هزینه اجرای هریک از فعالیت های پروژه.....
۲۹۶.....	۷-۱-۱-۳- گام سوم: زمان بندی پروژه، برنامه ریزی منابع، بررسی رابطه زمان و هزینه و بررسی مشکلات احتمالی.....
۲۹۶.....	۷-۱-۲- کنترل پروژه.....
۲۹۷.....	۷-۱-۳- تجزیه و تحلیل، ارزشیابی و ذخیره سازی اطلاعات پروژه.....
۲۹۷.....	۷-۱-۴- تسطیح منابع.....
۲۹۷.....	۷-۱-۴-۱- نیروی انسانی.....
۲۹۸.....	۷-۱-۴-۲- ماشین آلات عمرانی.....
۲۹۸.....	۷-۱-۴-۲-۱- برنامه ریزی استفاده از ماشین آلات ☐
۲۹۸.....	۷-۱-۴-۲-۲- کارایی ماشین آلات ☐

۲۹۹.....	۳-۲-۴-۱-۷- برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری.....	□
۲۹۹.....	۴-۲-۴-۱-۷- تعیین ماشین‌آلات موردنیاز.....	□
۲۹۹.....	۲-۷- کنترل کیفیت.....	
۲۹۹.....	۱-۲-۷- کلیات.....	
۳۰۰.....	۲-۲-۷- شاتکریت.....	
۳۰۰.....	۱-۲-۲-۷- مواد، مصالح و اختلاط شاتکریت.....	
۳۰۰.....	۲-۲-۲-۷- طرح اختلاط.....	
۳۰۱.....	۳-۲-۲-۷- ارزیابی قبل از ساخت.....	
۳۰۱.....	۴-۲-۲-۷- ارزیابی و پذیرش در حین ساخت.....	
۳۰۲.....	۵-۲-۲-۷- ضخامت و مقاومت شاتکریت.....	
۳۰۳.....	۳-۲-۷- راکبوت.....	
۳۰۳.....	۱-۳-۲-۷- اجزاء راکبوت.....	
۳۰۳.....	۲-۳-۲-۷- دوغاب ریزی.....	
۳۰۴.....	۳-۳-۲-۷- آرایش و اتصال راکبوت.....	
۳۰۴.....	۴-۳-۲-۷- آزمایش بیرون کشیدگی راک بولت.....	
۳۰۶.....	۴-۲-۷- قاب فولادی.....	
۳۰۶.....	۱-۴-۲-۷- مواد قاب فولادی.....	
۳۰۶.....	۲-۴-۲-۷- نصب قاب فولادی.....	
۳۰۶.....	۵-۲-۷- لتیس گریدر (تیرهای مشبک).....	
۳۰۷.....	۶-۲-۷- لاینینگ و کفبند.....	
۳۰۷.....	۱-۶-۲-۷- کنترل کیفیت مصالح بتن.....	
۳۱۰.....	۲-۶-۲-۷- کنترل و بازرسی.....	
۳۱۲.....	۳-۶-۲-۷- آزمایش میلگردها.....	
۳۱۲.....	۴-۶-۲-۷- انبار کردن، نگهداری و کنترل فولاد.....	
۳۱۲.....	۵-۶-۲-۷- پوشش بتنی روی میلگردها.....	
۳۱۴.....	۶-۶-۲-۷- ارزیابی و پذیرش بتن.....	

- ۳۱۴..... ۱-۶-۶-۲-۷ پذیرش بتن، تواتر نمونه برداری و آزمایش مقاومت
- ۳۱۴..... ۲-۶-۶-۲-۷ ضوابط پذیرش بتن- نمونه های عمل آمده در آزمایشگاه
- ۳۱۴..... ۳-۶-۶-۲-۷ ضوابط کنترل روش عمل آوردن و محافظت بتن
- ۳۱۵..... ۴-۶-۶-۲-۷ آزمون های آگاهی
- ۳۱۵..... ۷-۶-۲-۷ بررسی بتن های با مقاومت کم
- ۳۱۶..... ۸-۶-۲-۷ کنترل و بازرسی
- ۳۱۸..... ۹-۶-۲-۷ کنترل و بازرسی تجهیزات ساخت بتن
- ۳۱۹..... ۱۰-۶-۲-۷ ضخامت و ابعاد
- ۳۲۰..... ۷-۲-۷ عایق بندی
- ۳۲۰..... ۱-۷-۲-۷ ژئوممبرین
- ۳۲۰..... ۲-۷-۲-۷ ملاحظات کلی در ژئوسنتتیک ها
- ۳۲۰..... ۱-۲-۷-۲-۷ گواهی نامه تایید محصول
- ۳۲۰..... ۲-۲-۷-۲-۷ نمونه برداری، آزمایش و تایید
- ۳۲۱..... ۳-۲-۷-۲-۷ حمل و انبار
- ۳۲۱..... ۴-۲-۷-۲-۷ درزها
- ۳۲۱..... ۸-۲-۷ زهکشی
- ۳۲۱..... ۱-۸-۲-۷ مصالح زهکشی عمیق
- ۳۲۲..... ۲-۸-۲-۷ مصالح دانه ای
- ۳۲۲..... ۳-۸-۲-۷ ژئوتکستایل
- ۳۲۳..... ۴-۸-۲-۷ لوله های زهکشی زیرزمینی

۳۲۷

۸- تیپ بندی و مقادیر

- ۳۲۷..... ۱-۸- مقدمه

۹- منابع

- ۳۴۷..... ۱-۹- منابع فارسی
- ۳۴۸..... ۲-۹- منابع انگلیسی

فهرست اشکال

- شکل ۲-۱- نمونه‌ای از برنامه‌ریزی پیشرفت ساخت ۲۳
- شکل ۲-۲- نمونه‌ای از مشخصات زمین‌شناسی طولی ۴۰
- شکل ۲-۳- اجزاء مقطع عرضی تونل ۵۱
- شکل ۲-۴- مقطع تونل به همراه پیاده‌روها، شانه‌ها، زهکش و فضای ویژه توقف‌گاه (پارکینگ) اضطراری ۵۲
- شکل ۲-۵- مشخصات هندسی توقف‌گاه اضطراری در تونل‌ها ۵۳
- شکل ۳-۱- دستگاه MTS (سمت راست)، دستگاه آزمایش بار نقطه‌ای (سمت چپ) ۶۹
- شکل ۳-۲- چکش اشمیت ۶۹
- شکل ۳-۳- سلول هوک جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوری ۷۰
- شکل ۳-۴- آزمایش برزیلی جهت تعیین مقاومت کششی ۷۱
- شکل ۳-۵- نمای کلی تجهیزات موردنیاز برای آزمایش مقاومت برشی درزه ۷۱
- شکل ۳-۶- دستگاه اندازه‌گیری شاخص دوام ۷۲
- شکل ۳-۷- نحوه انجام آزمایش بیش مغزه‌گیری ۷۵
- شکل ۳-۸- تجهیزات و نحوه اجرای آزمایش لوژان ۷۵
- شکل ۳-۹- اندازه‌گیری قابلیت نفوذپذیری خاک با روش‌های آزمایشگاه ۸۰
- شکل ۳-۱۰- آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد S.P.T در داخل چاه اکتشافی ۸۱
- شکل ۴-۱- میزان اهمیت جنبه‌های فنی و مدیریتی در سطوح مختلف ساختار شکست ۹۳
- شکل ۴-۲- قواعد اجباری در تنظیم ساختار شکست ۹۴
- شکل ۴-۳- محل قرارگیری فعالیت‌ها در ساختار شکست کار ۹۵
- شکل ۴-۴- محل قرارگیری بسته‌های کاری در ساختار شکست کار ۹۷
- شکل ۴-۵- شماره‌گذاری عناصر ساختار شکست ۹۸
- شکل ۵-۱- ماشین‌های TBM، باز (سمت راست) و سپردار (سمت چپ) ۱۰۳
- شکل ۵-۲: شمای سه‌بعدی از اجرای روش فورپلینگ ۱۰۸
- شکل ۵-۳: نمودار منحنی مشخصه زمین و سیستم نگهداری اولیه (منحنی Fenner-Pacher) ۱۱۰
- شکل ۵-۴- مفهوم بار سنگ در تونل‌ها (رده‌بندی ترزاقی) ۱۱۲
- شکل ۵-۵- رابطه بین فشار وارد بر نگهداری و Q ۱۱۸
- شکل ۵-۶- فاکتور تصحیح f برای عمق تونل ۱۲۰
- شکل ۵-۷- نمونه‌ای از راکبوت تزریقی ۱۳۰

- شکل ۵-۸- نمونه‌ای از راکبوت اصطکاکی ۱۳۱
- شکل ۵-۹- a (هدینگ)، b (نیمه بالا و پایین (نعل اسبی))، c (پیرامونی (نعل اسبی کفبنددار) و d (پیرامونی (دایروی)) ۱۳۴
- شکل ۵-۱۰- تودلی مدل غلافی (سمت چپ) و مدل تایراد ۱۳۵
- شکل ۵-۱۱- زمان خود نگهداری تونل به‌صورت تابعی از RMR ۱۳۸
- شکل ۵-۱۲- سیستم نگهداری اولیه پیشنهادی به‌صورت تابعی از دهانه تونل و کیفیت توده سنگ ۱۳۹
- شکل ۵-۱۳- استفاده از RQD برای انتخاب سیستم نگهداری اولیه تونل ۱۴۴
- شکل ۵-۱۴- تعیین سیستم نگهداری اولیه بر اساس سیستم Q ۱۴۴
- شکل ۵-۱۵- تخمین نگهداری اولیه برای تونل به قطر ۷.۳ متر با روش RSR ۱۴۵
- شکل ۵-۱۶- طبقه‌بندی زمین: (الف) پیوسته، (ب) ناپیوسته و (ج) شبه پیوسته ۱۵۳
- شکل ۵-۱۷- منحنی فشار-تغییر شکل شعاعی سنگ‌ها و سیستم نگهداری تونل ۱۵۴
- شکل ۵-۱۸- تأثیر صلبیت و زمان نصب سیستم نگهداری بر عملکرد آن ۱۵۵
- شکل ۵-۱۹- مثالی از کف بند استاندارد ۱۶۴
- شکل ۵-۲۰- مثالی از نصب کفبند اصلی ۱۶۵
- شکل ۵-۲۱- نمونه‌هایی از عایق‌بندی و زهکشی ۱۶۷
- شکل ۵-۲۲- تست فشار هوا برای عایق‌بندی تونل ۱۶۹
- شکل ۵-۲۳- نمونه‌هایی از سیستم زهکشی ۱۷۰
- شکل ۵-۲۴- ناحیه یک زون پرتالی استاندارد ۱۷۱
- شکل ۵-۲۵- موقعیت عایق ۱۷۹
- شکل ۵-۲۶- انواع انشعاب‌ها و بزرگ شدن مقطع تونل‌ها ۱۸۸
- شکل ۵-۲۷- نمونه‌ای از تونل با سطح مقطع بزرگ (Shin Takeoka tunnel) ۱۹۰
- شکل ۶-۱- مثالی از چگونگی توزیع نقاط شبکه ژئودتیک مرجع، نقاط شبکه پرتال و نقاط شبکه داخل تونل نسبت به یکدیگر ۱۹۷
- شکل ۶-۲- نمونه‌ای از روش‌های قرائت طول و زوایا برای انتقال مختصات در طول شبکه داخل تونل (روش زیگزآگ) ۱۹۷
- شکل ۶-۳- ترتیب رایج ساخت نواحی پرتال ۲۰۱
- شکل ۶-۴- ساخت پرتال در شرایط مختلف (الف) بدون انجام تحکیمات در ناحیه پرتال (ب) انجام تحکیمات مختلف (راکبوت، مش و شاتکریت) ۲۰۱
- شکل ۶-۵- (الف) اجرای تونل به روش طاق و پاتاق (پلکانی)، (ب) روش دیافراگم میانی (ج) روش دریافت‌های جانبی، (د) روش برش هسته مرکزی ۲۰۳
- شکل ۶-۶- حفر تونل با چال موازی و غیرموازی ۲۰۴
- شکل ۶-۷- بخش‌های مختلف مقطع تونل براساس حفاری و انفجار ۲۰۴
- شکل ۶-۸- زاویه انحراف چال‌ها ۲۰۴
- شکل ۶-۹- نواحی آسیب و اضافه حفاری اطراف چال انفجاری ۲۰۷
- شکل ۶-۱۰- نمودار مقدار ماده منفجره مورد نیاز در چال انفجاری ۲۰۸
- شکل ۶-۱۱- دیاگرام روش‌های شاتکریت ۲۱۵

- شکل ۶- ۱۲- ابزار مناسب جهت رفتار سنجی در فضاهای زیرزمینی ۲۲۶
- شکل ۶- ۱۳- آرایش پین‌های اندازه‌گیری در روش متر همگرایی سه (چپ) و پنج نقطه‌ای (راست) ۲۲۶
- شکل ۶- ۱۴- نمونه ای از قالب متحرک ۲۳۴
- شکل ۶- ۱۵- نمونه ای از درز سرد در بتن لاینینگ ۲۴۳
- شکل ۶- ۱۶- درزهای اجرایی در بتن لاینینگ ۲۴۳
- شکل ۶- ۱۷- تهیه نمونه‌های مکعبی از بتن و انجام آزمایشات مقاومتی ۲۴۶
- شکل ۶- ۱۸- نمونه‌هایی از درزهای ساخت ۲۵۵
- شکل ۶- ۱۹- پارگی ژئوممبرین ۲۵۷
- شکل ۶- ۲۰- اجرای عایق بندی ۲۵۷
- شکل ۶- ۲۱- شماتیک لایه‌بندی سیستم نگهداری و آب‌بندی تونل ۲۵۸
- شکل ۶- ۲۲- فلوجارت مطالعات، طراحی و ساخت تونل با تمرکز بر روش کمکی ۲۷۳
- شکل ۶- ۲۳- نمونه از فورپولینگ نوع پرکننده ۲۷۸
- شکل ۶- ۲۴- نمونه از فورپولینگ نوع تزریقی ۲۷۸
- شکل ۶- ۲۵- نمونه از Pipe forepiling ۲۷۹
- شکل ۶- ۲۶- نمونه از شاتکریت جبهه کار ۲۸۰
- شکل ۶- ۲۷- نمونه‌ای از بولت جبهه کار ۲۸۰
- شکل ۶- ۲۸- نمونه ای تزریق ۲۸۰
- شکل ۶- ۲۹- نمونه از قوس کفبند موقتی در طاق ۲۸۱
- شکل ۶- ۳۰- نمونه ای از شمع‌های تقویتی ۲۸۱
- شکل ۶- ۳۱- نمونه‌ای استفاده ترکیبی از دریافت زهکشی و حفاری زهکشی ۲۸۳
- شکل ۶- ۳۲- نمونه از چاه نفوذی (well point) غرق‌شده در تونل ۲۸۳
- شکل ۶- ۳۳- نمونه ای از یک سیستم چاه عمیق ۲۸۳
- شکل ۶- ۳۴- نمونه ای از تزریق از داخل تونل ۲۸۵
- شکل ۶- ۳۵- نمونه ای از pipe forepiling تونل (Orandazka) ۲۸۶
- شکل ۶- ۳۶- نمونه ای از لوله محافظ سقف با قطر زیاد ۲۸۶
- شکل ۶- ۳۷- نمونه ای از تزریق جت افقی ۲۸۷
- شکل ۶- ۳۸- نمونه ای از slit concrete ۲۸۸
- شکل ۶- ۳۹- نمونه ای از slit concrete ۲۸۸
- شکل ۶- ۴۰- نمونه ای از ترکیب روش پیش تقویت قائم و تزریق شیمیایی ۲۸۸
- شکل ۶- ۴۱- نمونه ای از دیوارهای حال برای آب‌بندی ۲۹۰
- شکل ۷- ۱- نمونه‌ای از جدول نظارت ضخامت شاتکریت ۳۰۲
- شکل ۷- ۲- تصویر آزمایش کشش راکبولت ۳۰۵
- شکل ۷- ۳- جزئیات آزمایش کشش راکبولت ۳۰۵

- شکل ۷-۴- لیس گریدر و نصب آن ۳۰۶
- شکل ۷-۵- نمونه‌ای از فرم اندازه‌گیری مقطع داخلی تونل ۳۱۹

فهرست جداول

- جدول ۲-۱- تأثیر بر هزینه‌های عملیاتی تونل ۱۳
- جدول ۲-۲- مراحل اصلی برنامه اکتشافی برای پروژه تونل سازی ۱۴
- جدول ۲-۳- مشکلات ناشی از شرایط خاص زمین و اطلاعات ضروری و مورد نیاز جهت حل آن‌ها ۱۹
- جدول ۲-۴- اهداف و مقیاس تحقیق ۲۶
- جدول ۲-۵- موارد بررسی محیطی برای محیط اطراف تونل ۳۵
- جدول ۲-۶- موارد در هر مرحله از بررسی وضعیت زمین ۳۹
- جدول ۲-۷- نمونه‌ای از شاخص‌های نشان دهنده احتمال سیال شدن زمین ۴۱
- جدول ۲-۸- نمونه‌ای از شاخص‌های نشان دهنده ماهیت آماسی یا مچاله شوندگی زمین ۴۲
- جدول ۳-۱- متداول‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگی ۶۷
- جدول ۳-۲- روش‌های متداول آزمایش برجا ۷۲
- جدول ۳-۳- آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا به منظور تعیین پارامترهای خاک در ساختگاه تونل ۷۶
- جدول ۳-۴- کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی ۸۷
- جدول ۵-۱: طبقه‌بندی و ویژگی‌های روش‌های استاندارد حفاری ۱۰۵
- جدول ۵-۲- طبقه‌بندی کلاس‌های سنگی مختلف بر اساس تئوری بارسنگ ترزاقی ۱۱۲
- جدول ۵-۳- بار سنگ تونل‌ها موجود در کلاس‌های سنگ مختلف ۱۱۳
- جدول ۵-۴- بار سنگ ترزاقی اصلاح شده توسط دیر و همکاران ۱۱۵
- جدول ۵-۵- فاکتور تصحیح f' برای همگرایی تونل ۱۲۰
- جدول ۵-۶- روش‌های مختلف پیش‌بینی بارسنگ ۱۲۱
- جدول ۵-۷- مفاهیم خواص و اثرات شاکتیریت ۱۲۳
- جدول ۵-۸- مفاهیم عملکرد و اثرات راکبوت ۱۲۶
- جدول ۵-۹- خلاصه‌ای از سیستم کامل انکراژ ۱۳۱
- جدول ۵-۱۰- عملکرد و اثر قاب‌های فولادی ۱۳۲
- جدول ۵-۱۱- زمان خود نگهداری توده سنگ با توجه به طبقه‌بندی آن ۱۳۸
- جدول ۵-۱۲- تیپ‌بندی استاندارد سیستم نگهداری اولیه زون غیر پرتالی تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (دوخطه) ۱۳۹
- جدول ۵-۱۳- تیپ‌بندی استاندارد سیستم نگهداری اولیه زون غیر پرتالی تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (سه خطه) ۱۴۰
- جدول ۵-۱۴- تیپ‌بندی استاندارد سیستم نگهداری اولیه زون پرتالی تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (دوخطه) ۱۴۲
- جدول ۵-۱۵- تیپ‌بندی استاندارد سیستم نگهداری اولیه زون پرتالی تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (سه خطه) ۱۴۳

جدول ۵-۱۶- تغییرات معمول سیستم نگهداری در حین اجرا.....	۱۵۷
جدول ۵-۱۷- کفبند اولیه و کفبند.....	۱۶۶
جدول ۵-۱۸- مشکلات محتمل زون پرتالی و راه حل ها.....	۱۷۲
جدول ۵-۱۹- نوع و ویژگی های پرتال های تونل.....	۱۷۵
جدول ۵-۲۰- میزان گازهای مضر در تونل و معدن بر اساس استاندارد مصوب وزارت بهداشت.....	۱۷۹
جدول ۶-۱- مخاطرات احتمالی در پرتال به همراه ملاحظات طراحی آن.....	۲۰۰
جدول ۶-۲- طراحی الگوی انفجاری برای چال های محیطی.....	۲۰۷
جدول ۶-۳- خرج و اضافه حفاری در چهار تونل مختلف.....	۲۰۸
جدول ۶-۴- مقایسه روش های حمل در تونل.....	۲۱۱
جدول ۶-۵- نرخ انتشار گازهای سمی در هر کیلوگرم ماده منفجره.....	۲۱۳
جدول ۶-۶- نمونه هایی از تقویت سیستم نگهداری ها، ماشین آلات و مواد برای تقویت.....	۲۱۴
جدول ۶-۷- ویژگی های روش های شاتکریت.....	۲۱۵
جدول ۶-۸- نمونه هایی از طرح اختلاط شاتکریت در تونل های جاده ای.....	۲۱۹
جدول ۶-۹- مشکلات حین چال زنی برای راکبوت ها.....	۲۲۱
جدول ۶-۱۰- نوع و تعداد نمونه هایی که باید از هر قسمت کار برای انواع بتن تهیه گردد.....	۲۴۴
جدول ۶-۱۱- مقدار مجاز آلاینده ها برای ۱۵ دقیقه تنفس بر حسب طول تونل.....	۲۶۵
جدول ۶-۱۲- جدول ضریب K برای حالت های مختلف دید راننده در تونل.....	۲۶۶
جدول ۶-۱۳- مقادیر قابل قبول حداکثر تماس شغلی با صدا.....	۲۷۱
جدول ۶-۱۴- حد تماس شغلی با صدای ضربه ای یا کوبه ای.....	۲۷۱
جدول ۶-۱۵- طبقه بندی روش های کمکی.....	۲۷۴
جدول ۷-۱- کنترل اتصال راکبوت.....	۳۰۴
جدول ۷-۲- حداکثر مقادیر مجاز برای مواد زیان آور در آب مصرفی بتن و روش های آزمایش.....	۳۰۹
جدول ۷-۳- بازرسی و کنترل کیفیت مصالح بتن.....	۳۱۰
جدول ۷-۴- کنترل و بازرسی مشخصه های بتن.....	۳۱۶
جدول ۷-۵- کنترل و بازرسی تجهیزات ساخت بتن.....	۳۱۸
جدول ۸-۱- مشخصات سیستم نگهداری تونل برای آزادراه تیپ F1.....	۳۲۸
جدول ۸-۲- مشخصات سیستم نگهداری برای آزادراه تیپ F۲.....	۳۲۹
جدول ۸-۳- مشخصات سیستم نگهداری برای آزادراه تیپ F۳.....	۳۳۰
جدول ۸-۴- مشخصات سیستم نگهداری برای آزادراه تیپ F4.....	۳۳۰
جدول ۸-۵- مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی چندخطه تیپ A1.....	۳۳۲
جدول ۸-۶- مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی چندخطه تیپ A2.....	۳۳۲

جدول ۸-۷	مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی دو خطه تیپ A3	۳۳۴
جدول ۸-۸	مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی دو خطه تیپ A4	۳۳۴
جدول ۸-۹	مشخصات سیستم نگهداری برای راه جمع کننده/توزیع کننده تیپ C1	۳۳۵
جدول ۸-۱۰	مشخصات سیستم نگهداری برای راه جمع کننده/توزیع کننده تیپ C2	۳۳۶
جدول ۸-۱۱	جمع کننده/توزیع کننده تیپ C3	۳۳۷
جدول ۸-۱۲	مشخصات سیستم نگهداری برای راه جمع کننده/توزیع کننده تیپ C4	۳۳۸
جدول ۸-۱۳	مشخصات سیستم نگهداری برای راه محلی/روستایی تیپ L1	۳۴۰
جدول ۸-۱۴	مشخصات سیستم نگهداری برای راه محلی/روستایی تیپ L2	۳۴۰
جدول ۸-۱۵	مشخصات سیستم نگهداری برای راه محلی / روستایی تیپ L3	۳۴۱
جدول ۸-۱۶	مشخصات سیستم نگهداری اولیه برای راه محلی/روستایی تیپ L4	۳۴۲

فصل اول

کلیات

۱- کلیات

۱-۱- مقدمه

از دیرباز تاکنون حفر فضاهای زیرزمینی به منظور با رفع نیازهای گوناگون زندگی انسان‌ها مورد توجه بوده است و روزبه‌روز نیز بر اهمیت این موضوع افزوده می‌شود. امروزه فضاهای زیرزمینی با ابعاد متفاوت، برای کاربردهای گوناگون ساخته می‌شوند و به‌مرور محدودیت‌های فنی موجود برای ساخت از بین می‌رود. در قرن حاضر، پیشرفت تکنولوژی و دستاوردهای آن از یک‌سو، افزایش روزافزون جمعیت و نیاز آنان به تکنولوژی برتر از سوی دیگر، محیطی وسیعی را می‌طلبد. برخورداری از راه‌های ارتباطی مناسب و کارآمد از جمله عواملی است که توانایی کشورها را در زمینه حمل‌ونقل کالا و مسافر نشان می‌دهد. از طرفی با توجه به مورفولوژی متفاوت زمین و ناهمواری‌ها و موانع موجود در ایجاد ارتباط، حفر تونل در دل کوه‌ها و یا در اعماق دریاها از اهمیت فراوانی برخوردار شده است. تونل‌ها با ایجاد امکان حمل‌ونقل سریع، مراکز صنعتی را که نیازمند شاه راه‌های حمل‌ونقل برای توجیه اقتصادی فعالیت‌هایشان هستند، بدون هیچ اختلال و مشکلی به یکدیگر متصل می‌کنند. با توجه به موارد اشاره‌شده، امروزه ساخت تونل‌های راه و راه‌آهن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخه‌های رشد اقتصادی کشورها محسوب می‌شود.

۱-۲- هدف

تونل‌ها سازه‌های زیرزمینی هستند که برای مقاصد مختلف از جمله ارتباطات زیرزمینی، اهداف صنعتی، معدنی و حمل‌ونقل آسان در شرایطی که موانع طبیعی یا مخاطرات خاصی در مسیر وجود دارد، احداث می‌شوند. تونل‌ها باید به‌گونه‌ای ساخته شوند که هدف احداث سازه‌ای ایمن و اقتصادی را برآورده کنند. این استاندارد الزامات فنی کلی را برای تونل‌های کوهستانی مانند تونل‌های جاده‌ای فراهم می‌کند. همچنین شامل دستورالعمل کلی برای برنامه‌ریزی، تحقیق، طراحی و مدیریت ساخت و ساز تونل‌های کوهستانی است.

۱-۳- انواع تونل و روش‌های ساخت

تونل‌ها بر اساس روش ساخت به انواع زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- روش کند و پوش^۱
- روش چالزنی و انفجار
- روش تونل‌زنی مکانیزه (TBM)

^۱ Cut and Cover

- روشهای نیمه مکانیزه
- همچنین تونل ها بر اساس کاربری به موارد زیر تقسیم می شوند:
- تونل های ترافیکی مانند راه، راه آهن و پیاده رو
- تونل های انتقال آب
- تونل های نظامی
- تونل های معدنی
- نوع دیگری از تقسیم بندی تونل ها به شرح زیر می باشد:
- تونل های کوهستانی (راه و راه آهن)
- تونل های شهری
- تونل های انتقال آب

یکی از پارامترهای مهم در طراحی پوشش داخلی تونل ها، مشخصات هندسی تونل ها شامل شکل، اندازه مقطع و شیب تونل می باشد. از طرفی شکل مقطع و ابعاد تونل تابع هدف احداث تونل، روش حفر و سیستم نگهداری دائمی آن است. در مواردی که استفاده از شکل های مختلف امکان پذیر باشد، باید شکلی را انتخاب کرد که هزینه های کلی احداث تونل به حداقل برسد. سطح مقطع در تونل ها می تواند به اشکال زیر باشد:

- دایره ای
- چهار گوش
- نعل اسبی
- D شکل

۱-۴- تعاریف

- **ASTM^۱**: سازمانی فنی که برای توسعه استانداردهای خصوصیات و رفتار مصالح، محصولات، سیستم ها و خدمات و ارتقاء علوم وابسته به آن ها شکل گرفته است.
- **تحويل شدنی**: تحويل شدنی محصول، نتیجه یا قابلیتی منحصر به فرد و قابل ارزیابی است که وجود آن برای تکمیل یک فرآیند، فاز یا پروژه الزامی است. معمولاً تحويل شدنی در مفهومی خاص تر به معنای تحويل شدنی های کلی کار استفاده می شود، یعنی تحويل شدنی هایی که باید به تأیید کارفرما برسند. تحويل شدنی به محصول هایی میانی گفته می شود که دو شرط داشته باشند:
- ۱. منحصر به فرد باشند.

¹ American Society of Testing and Materials

۲. قابل ارزیابی باشند.

- **ساختار^۱:** هر آنچه که با توجه به یک الگوی ویژه و مشخص سازمانی آرایش یافته باشد.
- **کار^۲:** تلاشی پیوسته به شکل فیزیکی یا ذهنی به منظور غلبه بر مشکلات و رسیدن به هدف یا نتیجه.
- **فعالیت (کار):** کوچک‌ترین جزء عملیاتی تشکیل‌دهنده یک پروژه را گویند. به عبارتی دیگر جزء مستقل و برنامه‌ریزی شده کارهای انجام شونده در طول دوره پروژه، فعالیت می‌باشد. به عنوان مثال جوش کاری، اجرای آسفالت و اجرای فونداسیون در یک پروژه سازه‌ای.
- **بسته کاری:** کار مشخص شده در پایین‌ترین سطح ساختار شکست کار به طوری که هزینه و مدت زمان آن قابل تخمین و مدیریت باشد.
- **مدت فعالیت:** مدت زمان انجام یک فعالیت در پروژه را مدت فعالیت گویند. این زمان می‌تواند کم یا زیاد باشد اما نمی‌تواند صفر یا بی‌نهایت باشد.
- **تحويل شدنی اصلی:** معمولاً اجزای فیزیکی کلان زیر پروژه و به عبارتی موضوع‌های اصلی و کلی عملیات در زیر پروژه می‌باشد که در سطح پایین‌تر توسعه داده شده است.
- **تحويل شدنی کلی:** تحويل شدنی‌های کلی معمولاً بر اساس نوع، ویژگی و اجزای مختلف تحويل شدنی‌های اصلی شکسته می‌شوند.
- **تحويل شدنی فرعی:** آن عناصری از ساختار شکست که به اجزا و قطعات دیگری تفکیک نشده‌اند، تحويل شدنی فرعی نامیده می‌شود. مبنای تفکیک کلی هر بخش از ساختار شکست‌ها، قابلیت تحويل، کارکرد مستقل، موضوع، زمان و هزینه می‌باشد. تحويل شدنی فرعی معمولاً بر اساس نوع مصالح و یا روش اجرای مختلف تحويل شدنی‌های تفصیلی شکسته می‌شوند که برای ساخت تحويل شدنی تفصیلی این عملیات باید صورت گیرد.
- **بسته کاری:** آخرین سطح یک ساختار شکست کار را بسته‌های کاری تشکیل می‌دهند. بسته کاری قسمتی از پروژه است که می‌تواند به یک سازمان، دیسپلین عملکردی، یا یک فرد محول گردد.
- **پاطاق:** نقطه تلاقی دیوار و سقف در تونل پاطاق نامیده می‌شود. املاي پاطاق و طاق در بالا متفاوت هست.
- **ابزار دقیق:** ابزاری که جهت اندازه‌گیری جابجایی‌ها و تغییر شکل استفاده می‌شود.
- **آتشکاری:** انفجار یک فعل و انفعال گرمازا است که به صورت آبی و در زمانی بسیار کوتاه صورت می‌گیرد و باعث می‌شود که ماده منفجره از حالت مولکولی ناپایدار به وضعیت پایدار برسد. به مجموعه عملیاتی که منجر به شکسته شدن سنگ به وسیله ماده منفجره می‌شود، آتشکاری گفته می‌شود.
- **چال زنی و آتشکاری:** روشی برای خرد کردن سنگ که توسط حفر چال‌هایی با قطر کوچک در الگوی طراحی شده انجام می‌گیرد. در ابتدا چال‌ها با مواد منفجره پر شده و پس از انسداد، انفجار انجام می‌گیرد.

¹ Structure

² Work

- **آتشکاری کنترل شده:** استفاده از الگوی حفاری، مقادیر بهینه مواد منفجره و چاشنی انفجاری جهت کنترل آتشکاری.
- **پترن انفجار:** منظور الگوی آتشکاری است.
- **چاشنی انفجار:** برخی مواد منفجره که به عنوان خرج اصلی داخل چال ها قرار داده می شوند، باید با محرکی قوی تر از شعله منفجر گردند، این کار به عهده چاشنی ها است.
- **چال های انفجاری:** چال هایی که روی جبهه کار حفر و به وسیله ماده منفجره پر شده و انفجار در آن صورت می گیرد.
- **خرج ویژه:** بیان گر نسبت مقدار حجمی که یک ماده منفجره می تواند خرد کند و مقدار ماده منفجره مصرفی (خرج مصرفی برای واحد سنگ در جا).
- **خرج گذاری چال:** به مجموعه عملیات قراردادن ماده منفجره و پر کردن فضای خالی با موادی مانند شن، خاک یا گل خرج گذاری می گویند. روش خرج گذاری تابع قطر چال، نوع ماده منفجره و ابعاد منطقه مورد عمل است.
- **مدار انفجار:** به مجموعه سیم های رابط چاشنی های برقی دارای مقاومت الکتریکی متصل به یک منبع برق که برای آتشکاری به کار می روند، مدار انفجار گفته می شود.
- **پیشروی:** طول حفاری شده در زمان مشخص (یک راند انفجار، یک شیف یا یک روز) هنگام حفر تونل
- **تزریق تحکیمی:** تزریق دوغاب سیمان از طریق چال های حفاری جهت پر کردن درزه ها، شکستگی ها و غیره به منظور تحکیم توده سنگ دربرگیرنده تونل.
- **تزریق تماسی:** پر کردن فضای خالی بین سیستم نگهداری ثانویه (لاینینگ) و سیستم نگهداری اولیه (در صورت عدم اجرای سیستم نگهداری اولیه، فضای خالی بین لاینینگ و سطح حفاری مدنظر است) بلافاصله پس از اجرای پوشش لاینینگ به وسیله دوغاب سیمان.
- **تهویه:** جهت تأمین اکسیژن لازم جهت تنفس کارگران داخل تونل، رقیق کردن گازهای حاصل از آتشکاری و گازهای قابل اشتعال، لازم است که هوای درون تونل به صورت مداوم جایگزین شود. به جریان انداختن هوا در قسمت های مختلف تونل را تهویه گویند.
- **جبهه کار:** به هر بخشی از تونل که در آن فعالیتی در حال انجام است، جبهه کار گویند. موقعیت جبهه کار به صورت پیوسته با حفاری تونل (زمین) تغییر می کند.
- **جت فن:** بادبزنی سقفی (یا گاه دیواری) که به منظور تهویه، علی الخصوص تهویه طولی مورد استفاده قرار می گیرد.
- **راکبوت (پیچ سنگ):** راکبوت درواقع همان بولت ها و میلگردهای مخصوص اتصال لایه های سنگی به هم و استحکام توده سنگ هستند.
- **رفتارنگاری:** به مشاهده و اندازه گیری مکرر یا پیوسته جابجایی ها، رفتارنگاری گویند. سیستم های سنجش رفتار سنگ شامل اندازه گیری هم گرایی، اندازه گیری تغییر تنش، انبساط سنج چند نقطه ای و غیره می باشند.
- **زمان خودایستایی:** مدت زمانی که تونل بدون نصب سیستم نگهداری اولیه پایدار می ماند.

- **ژئوتکستایل:** منسوجاتی نفوذپذیر هستند که توانایی جداسازی، فیلتراسیون، تقویت، حفاظت یا تخلیه را دارند. در تونل بیشتر به عنوان محافظ ژئوممبرین استفاده می‌شوند.
- **ژئوممبرین:** گونه‌ای از مصالح ژئوسنتتیک است که برای عایق‌بندی از آن استفاده می‌شود.
- **سنگ بستر:** سنگی که به عنوان سنگ اصلی در زیر سنگ‌های هوازه سطح زمین قرار دارد.
- **سیستم نگهداری اولیه:** وظیفه این سیستم، نگهداری تونل بلافاصله بعد از حفاری جهت جلوگیری از رخداد ناپایداری است. این سیستم متناسب با وضعیت توده سنگ شامل شاتکریت، راکبوت، قاب فولادی و غیره است.
- **سیستم نگهداری ثانویه (لاینینگ):** پوششی از جنس بتن، بتن مسلح یا بتن پاشیده است که به منظور پایداری یا مقاصد دیگر (مثلاً در تونل‌های انتقال آب به دلیل کاهش افت) اجرا می‌شود.
- **شاتکریت (بتن پاششی):** عمل پاشیدن ترکیب سیمان، آب و سنگدانه با سرعت زیاد بر سطح سنگ یا خاک را بتن پاششی یا شاتکریت گویند.
- **لق‌گیری:** عملیاتی که پس از هر بار آتشکاری به صورت دستی یا با استفاده از ماشین‌آلات خاص جهت جداسازی قطعات سنگ که فقط قسمتی از آن به دیواره یا سقف تونل متصل است، انجام می‌پذیرد.
- **ناپیوستگی:** گسست در سنگ‌ها که در اثر وجود صفحات تورق، عدم سیمانی شدن و غیره ایجاد می‌شود. تغییر در خصوصیات فیزیکی یا شیمیایی خاک یا توده سنگ در محل این صفحات یا سطوح قابل شناسایی است. ناپیوستگی می‌تواند شامل لایه‌بندی، شیب‌توزیته و درز باشد.
- **نرخ پیشروی:** این شاخص به صورت میزان پیشروی تونل در مدت معین تعریف می‌شود.
- **روباره:** ارتفاع مصالح بالای تونل تا سطح زمین روباره نامیده می‌شود.
- **وزن روباره:** نیرویی که بر اثر وزن لایه‌های روباره به یک سازه زیرزمینی وارد می‌شود.
- **تونل مارپیچ:** تونل مارپیچ (اسپیرال)، نوع خاصی از تونل است که مسیر آن به صورت دایره‌ای یا نیم‌دایره‌ای طراحی شده است تا بتواند به تدریج از ارتفاع بالایی به ارتفاع پایین‌تر (برعکس) برسد. این نوع تونل‌ها معمولاً در مناطق کوهستانی، پرشیب و با توپوگرافی پیچیده استفاده می‌شوند که در آنها طراحی مسیر مستقیم و عادی ممکن است با شیب‌های بسیار تند همراه باشد.

فصل دوم

مطالعات تونل

۲- مطالعات تونل

۱-۲- مقدمه

انجمن جهانی راه^۱ اهمیت حیاتی مرحله مطالعه، برنامه‌ریزی و طراحی را در هزینه‌های تمام‌شده تونل در بلند مدت بررسی کرده و تأکید می‌کند که این قسمت از فرآیند احداث تونل‌ها، تأثیر زیادی بر هزینه‌های تمام‌شده دارد (جدول ۲-۱).

جدول ۲-۱- تأثیر بر هزینه‌های عملیاتی تونل

مراحل پروژه	تأثیر نسبی بر هزینه تمام‌شده (%)	دوره فعالیت (سال)
مطالعه/طراحی	۶۰-۸۰	۳-۱۰
ساخت	۱۰-۳۰	۲-۳
بهره‌برداری/طول عمر تونل	۱۰-۳۰	۵-۲۰ برای تأسیسات/تجهیزات
		۸۰-۱۰۰ برای سازه تونل

از آنجاکه در طراحی تونل‌ها، شفت‌ها و سازه‌های زیرزمینی، عامل تعیین‌کننده شرایط محیط میزبان می‌باشد و به دلیل آنکه میزان شناخت از محیط میزبان و ویژگی‌های آن در مقایسه با دیگر سازه‌های مهندسی محدودتر است، محاسبات و طراحی‌ها ضمن اختلاف با پروژه‌های دیگر، اساساً محاسبات ویژه‌ای نیاز دارند؛ به همین دلیل در طراحی یک تونل باید موارد زیر در نظر گرفته شود:

- کاربرد تونل
- زمین‌شناسی ساختگاه
- شرایط محیطی
- دستورالعمل‌های ایمنی
- تأثیر بر محیط اطراف
- کارایی اقتصادی (بهره‌وری اقتصادی نه‌تنها در حین ساخت، بلکه در حین بهره‌برداری نیز باید تأمین شود) و غیره.

به دلیل عدم امکان درک کامل شرایط زمین‌شناسی و آب‌های زیرزمینی از مطالعات اولیه، طراحی اولیه ممکن است در حین ساخت دچار تغییرات قابل‌توجهی شود؛ بنابراین بررسی دقیق و مستمر نه‌تنها در مرحله مطالعه و طراحی، بلکه در حین ساخت و بهره‌برداری نیز ضروری است. جهت جلوگیری از تغییرات قابل‌توجه حین ساخت که

¹ World Road Association

افزایش زمان و هزینه را نسبت به مقادیر پیش بینی شده اولیه به دنبال خواهد داشت، مطالعات جامع و دقیق ضرورت پیدا می کند، برای این مهم در جدول ۲-۲ مراحل اصلی یک برنامه اکتشافی پروژه های تونل سازی ارائه شده است.

جدول ۲-۲- مراحل اصلی برنامه اکتشافی برای پروژه تونل سازی

عناصر اصلی	توضیحات
۱- بررسی و کاوش متون	۱- مطالعه منابع و اطلاعات موجود در مورد منطقه پروژه ۲- مطالعه تاریخچه عمومی محلی که قرار است تونل در آن حفر شود. ۳- بررسی اجمالی کارهای ساختمانی و طرح های مهم قبلی مرتبط با محل پروژه
۲- مطالعه عکس های هوایی	۱- عکس های هوایی دید کلی از منطقه پروژه را ارائه می دهند. ۲- خصوصیات ژئومورفولوژیکی شناسایی می شود. ۳- کسب آگاهی در خصوص توپوگرافی، آرایش آبراهه ها، پوشش گیاهی، کاربرد زمین و کاوش منابع بالقوه مصالح ساختمانی ۴- عوارض دیگر مانند زمین لغزش، گسل های اصلی، تاقدیس، ناودیس و ساختارهای گنبدی شناسایی می شوند. ۵- عکس برداری مادون قرمز قادر به شناسایی مسیر آب و چشمه ها می باشد. ۶- جست و جوی راداری^۱ می تواند در شناسایی جنبه هایی از سطح زمین که به دلیل شرایط جوی و آب و هوایی امکان بررسی با سایر روش ها میسر نشده است، کمک کند.
۳- بازدید میدانی اولیه	۱- نقشه های زمین شناسی موجود از منطقه مطالعه می شوند. ۲- داده های به دست آمده از متون و عکس های هوایی در این مرحله مدنظر قرار می گیرد. ۳- سازندها و ویژگی های ساختاری آن ها، انواع سنگ ها و جنبه های ژئومورفولوژیکی و هوازگی بررسی کلی می شوند.
۴- مطالعات و بررسی های ژئوفیزیکی	۱- این بررسی ها علیرغم دقت پایین مزایایی از جمله غیر مخرب بودن، سرعت نسبی و به طور کلی هزینه تمام شده پایینی دارند. ۲- با این روش محل ناهنجاری ها که مستلزم شناسایی و بررسی های تفصیلی با روش های مستقیم می باشد مشخص می شود. ۳- روش های لرزه ای انعکاسی و انکساری، الکتریکی مقاومت سنجی، ثقلی و مغناطیسی مورد استفاده قرار می گیرند.

¹ Radar Scanning

عناصر اصلی	توضیحات
	۴- کاربرد مطالعات لرزه‌ای عبارت است از: الف) شناسایی مصالح و مواد زیر سطحی ب) تعیین محل ناهنجاری‌های زمین‌شناسی (گسل‌ها و ...) ج) تعیین محل گمانه حفاری ۵- روش‌های ژئوفیزیکی درون گمانه‌ای یا چاه پیمایی شامل چگالی نوترونی^۱، تعیین سرعت امواج صوتی و لرزه‌ای، روش‌های گاما-گاما و مقاومت الکتریکی. این روش‌های در مطالعه لایه‌بندی، ساختارهای زمین‌شناسی، نوع سنگ‌ها و شناسایی حفرات کاربرد دارند. همچنین از مزایای دوربین‌های درون گمانه نیز می‌توان در موارد خاص بهره برد.
۵- حفاری اکتشافی	۱- حفاری معمول‌ترین روش اکتشافی مورد استفاده در کارهای عمرانی است و اطلاعات زمین‌شناسی را بخصوص از منطقه و محدوده حفاری گمانه نشان می‌دهد. ۲- تعیین موقعیت گمانه‌های حفاری مستلزم ملاحظات دقیق به منظور کسب اطلاعات کامل می‌باشد و محل آن‌ها نمی‌تواند به‌طور دلخواه انتخاب شود. ۳- گمانه‌ها و موقعیت آن‌ها باید به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که امکان اکتشافات تفصیلی را فراهم کند. ۴- حفاری گمانه در محل احداث تونل‌های با روباره زیاد می‌تواند اطلاعات جامعی از جنس سنگ، شرایط زمین‌شناسی و سایر داده‌های مورد نیاز جهت ترسیم مقاطع زمین‌شناسی در اختیار متخصصین قرار دهد. ۵- حفاری اکتشافی در خاک و زمین‌های نرم به‌منظور تعیین ضخامت، نوع و خواص مربوط محل حفر تونل انجام می‌شود. ۶- در برنامه حفاری اطلاعات مورد نیاز باید به روشنی مشخص شود اما عموماً هدف از حفاری می‌تواند موارد زیر باشد: الف) شناسایی جنس سنگ، لایه‌بندی و ساختار زمین‌شناسی در تراز تونل ب) تعیین خواص فیزیکی سنگ‌ها ج) اطلاعات مربوط به آرایش درزه‌ها د) تعیین نفوذپذیری و شرایط آب‌های زمین

¹ neutron density

عناصر اصلی	توضیحات
	ه) جمع آوری اطلاعات در مورد سطوح تنش برجا و) ارزیابی مشخصات مقاومتی سنگ در ارتباط با آتشکاری با حفاری مکانیزه ز) کسب اطلاعات به منظور ارزیابی سیستم نگهداری احتمالی ۷- مهم ترین روش برای مطالعه محل ساختگاه تونل، تهیه نمودارهای (لاگ های) صحرایی از اطلاعات زمین شناسی است. اطلاعاتی که همراه با نمودارها یا لاگ های حفاری بایستی ارائه شوند عبارتند از: الف) داده های مربوط به زمین شناسی و جنس سنگ ها ب) اطلاعات مربوط به هر گونه آزمایش صحرایی انجام شده ج) جزئیات گرافیکی مغزه ها مانند لیتولوژی (لایه بندی یا خواص ماکروسکوپی سنگ ها) و ساختار د) جزئیات مربوط به طول مغزه بازیابی شده برای هر گمانه ه) نحوه اجرای حفاری و عملکرد کلی در عمق های مختلف و) کنترل میدانی آب برگشتی از گمانه ز) تعیین محل هایی که گل حفاری (سیال حفاری) و مغزه افت داشته یا بازیابی نشده است. ح) شرایط آب زیرزمینی ط) هر گونه لوازم مرتبط با لوله گذاری جداری^۱ یا سیمان کاری^۲ ی) توضیحات و جزئیات مربوط به محل مغزه در جعبه ها
۶- حفاریات و تونل های آزمایشی یا پیشگام	۱- با حفاریات و تونل های آزمایشی امکان بازرسی، رؤیت شرایط سنگ و هر گونه آزمایش در مناطقی که تونل می خواهد حفر شود امکان پذیر می شود. ۲- پیمانکاران با وجود این حفاریات یا تونل های آزمایشی، تصویر ملموسی از شرایط مورد انتظار تونل سازی به دست می آورند.
۷- آزمایش های برجا	۱- آزمایش های مکانیک سنگی موارد زیر را میسر می سازد:

¹ Casing² Cementation

توضیحات	عناصر اصلی
الف) ارزیابی سیستم نگهداری و تقویت سنگ در مراحل نگهداری موقت و دائم ب) ارزیابی پایداری سنگ ج) بررسی و ارزیابی مناسب بودن روش‌های مختلف حفاری ۲- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، ارزیابی رفتار تغییر شکل برجای سنگ‌هایی که تونل در آن حفر می‌شود را میسر ساخته و راهنمایی‌هایی در مورد بارگذاری مورد انتظار و توزیع بار بر روی سیستم نگهداری را ارائه می‌دهد. ۳- اندازه‌گیری‌های تنش‌های برجا، مقدار و جهت تنش‌هایی که در مرحله طراحی تونل باید منظور شوند را مشخص می‌کند؛ روش‌های جک تخت^۱ و آزادسازی تنش، آزمایش‌های مناسبی برای بررسی‌های اولیه تونل می‌باشند. ۴- الگوهای تغییر شکل اطراف تونل را می‌توان با استفاده از ابزاربندی در داخل حفره یا مانیتورینگ کرنش گمانه‌های واقع در سنگ‌های پیرامون تونل ارزیابی کرد. ارزیابی تغییر شکل سنگ در بررسی سیستم نگهداری و ارزیابی کارایی سیستم‌های مختلف نگهداری مفید هستند. ۵- ارزیابی بارگذاری بر سیستم‌های نگهداری با استفاده از سلول بار^۲ و دیگر روش‌های ابزاربندی	
۱- تعیین مقادیر مقاومتی سنگ و تغییر شکل آن در شرایط تنش یک و سه محوره برای موقعیت‌های قبل و بعد از گسیختگی^۳ ۲- تعیین ضریب الاستیک سنگ‌ها ۳- بررسی مشخصات رفتاری خزش ۴- تعیین مقادیر مقاومتی درزه سنگ‌ها و تأثیر پرشدگی درزه‌ها (در صورت وجود) ۵- تعیین مقادیر نفوذپذیری و تخلخل ۶- تعیین چگالی و بررسی افت مقاومت در رابطه با هوازدگی و سایر عوامل ۷- سختی و مقاومت در برابر سایش سنگ	۸- عملیات آزمایشگاهی

^۱ flat jack^۲ load cell^۳ failure

توضیحات	عناصر اصلی
۱- مدل های بزرگ مقیاس در بعضی مواقع جهت ارزیابی و بررسی وضعیت های خاص در مرحله مطالعات تفصیلی مورد استفاده قرار می گیرد. ۲- مدل های کوچک مقیاس که یک ابزار و روش نسبتاً کم هزینه هستند برای آزمایش جنبه های خاصی از طرح مفید هستند. ۳- مدل ها در ایجاد یک تصویر واضح از وضعیت کلی زمین شناسی در طول مسیر تونل مفید هستند. ۴- یک طرح منطقی بر مبنای اطلاعات حاصل از مراحل قبل می توان ارائه کرد: الف) ارزیابی مسیر تونل ب) بررسی و ارزیابی روش حفاری و خرد کردن سنگ ج) ارزیابی سیستم نگهداری تونل و جنبه های کنترل زمین د) بررسی شرایط خاص مانند زهکشی، بهسازی زمین، مخاطرات ناشی از گازها و ... ۵- روش های مدل سازی خاصی جهت کمک در ارزیابی طرح ها وجود دارند که عبارت اند از: الف) مدل های تجربی ب) مدل های فیزیکی ج) مدل های ریاضی د) مدل های عددی ۶- مدل های تجربی که بر اساس اندازه گیری یا تجارت قبلی حاصل شده اند، ابزار مفیدی هستند که جواب را به سؤال مرتبط می سازند. ۷- مدل های فیزیکی چه مدل های کامل یا مدل های خلاصه شده می توانند جهت بررسی جنبه های مختلف طرح مورد نظر به کار گرفته شوند. چنین مدل هایی اغلب نتایج کیفی به دست می دهند. ۸- مدل های ریاضی بر مبنای فرضیاتی ساخته می شوند که طراح بایستی با این فرضیات آشنا باشد. چنین مدل هایی می توانند جهت بررسی دامنه گسترده ای از شرایط محتمل مورد استفاده قرار گیرند، ولی به طور کلی محدودیت هایی بر حسب دقت کلی نتایجشان دارند.	۹- آزمایش مدل

عناصر اصلی	توضیحات
	۹- در مسائل ژئومکانیک، به تمام انواع محاسباتی که بر اساس حل عددی معادلات دیفرانسیل پیچیده به کار می‌رود، روش عددی اطلاق می‌شود. در خیلی از روش‌های عددی با تقسیم توده سنگ به تعداد زیادی المان کوچک و بررسی رفتاری آن‌ها، رفتار کل توده برآورد می‌شود. این روش‌ها اغلب برای تحلیل تنش و جابه‌جایی به کار می‌رود.
۱۰- حفر تونل	۱- بررسی تفصیلی ویژگی‌های زمین‌شناسی در حین حفاری باید انجام و ثبت گردیده و در بروز کردن اطلاعات و سوابق موجود از آن‌ها استفاده شود. این امر مستلزم بازرسی منظم و سیستماتیک جبهه کار تونل توسط نیروی متخصص و تفسیر نتایج است.
۱۱- رفتار سنجی ^۱ پس از احداث و اجرا	۱- رفتار سنجی باهدف کنترل شرایط موجود و کارایی طراحی‌ها

انتخاب مسیر، طراحی، ساخت، نگهداری و مدیریت تونل‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط زمین، موقعیت محل احداث تونل و غیره است. اساساً بررسی شرایط زمین شامل توپوگرافی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی تونل و محیط اطراف آن می‌باشد. انتخاب موقعیت احداث تونل نیز شامل بررسی شرایط محیط‌زیستی و قوانین و مقرراتی است که ممکن است اجرای تونل را محدود نماید. گردآوری داده‌های اولیه به منظور تعیین دشواری‌های اجرا، زمان و هزینه لازم برای ساخت، انتخاب روش اجرا، تضمین ایمنی و تعمیر و نگهداری در آینده، از اهمیت زیادی برخوردار است. در جدول ۲-۳ محدودیت‌های ناشی از شرایط خاص زمین و اطلاعات ضروری و موردنیاز جهت حل آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۲-۳- مشکلات ناشی از شرایط خاص زمین و اطلاعات ضروری و موردنیاز جهت حل آن‌ها

شرایط زمین	پدیده مشکل ساز	اطلاعات موردنیاز جهت حل مشکل
زمین‌های با استعداد رانش و ناپایداری شیروانی	افزایش فشار زمین، فشار نامتقارن زمین، شکست شیب، رانش و ریزش سنگ ناشی از جابجایی‌های زمین	توپوگرافی، زمین‌شناسی، مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، سطح آب زیرزمینی
زون‌های خردشده گسلی و چین‌خورده	ریزش جبهه‌کار، ورود تصادفی جریان آب زیرزمینی به داخل تونل، خشک شدن جریان آب سطحی به دلیل ورود آب زیرزمینی به داخل تونل	مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، سرعت موج الاستیک، سطح آب زیرزمینی، توزیع و ویژگی‌های مناطق خردشده
زمین‌های تحکیم نشده	ریزش جبهه‌کار، ناپایداری کف تونل، خشک شدن جریان آب سطحی	مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، چگالی نسبی، اندازه و نحوه توزیع، سطح آب زیرزمینی، فشار آب، هدایت هیدرولیکی

¹ Monitoring

شرایط زمین	پدیده مشکل ساز	اطلاعات مورد نیاز جهت حل مشکل
زمین های مجاله شونده	اعمال فشار زیاد بر روی سیستم نگهداری اولیه و لاینینگ، کاهش فضای داخلی تونل به دلیل جمع شدگی دیواره ها	مشخصه های مقاومت و تغییر شکل، آب
زمین مستعد انفجار سنگ	ریزش جبهه کار	مشخصه های مقاومت و تغییر شکل، شکندگی، انتشار امواج صوتی
زمین با گرمای زمین گرمایی، چشمه های آب گرم، گاز سمی و ...	فوران آب با فشار و دمای بالا، گاز سمی، تولید آب اسیدی	دما، غلظت گاز، غلظت اکسیژن، غلظت املاح سنگین در چشمه آب گرم و ...
زمینی که جریان آب زیرزمینی با فشار و حجم بالا پیش بینی می شود	افزایش فشار زمین، فشار نامتقارن زمین، ریزش جبهه کار، خشک شدن جریان آب سطحی و آلودگی آب در نتیجه ورود تصادفی آب زیرزمینی و ضعیف شدن زمین	سطح آب زیرزمینی، حجم و فشار جریان آب زیرزمینی
شرایط خاص	حالتی که تونل در محیط شهری احداث می شود	مشخصه های مقاومت و تغییر شکل، نفوذپذیری، موقعیت تونل، موقعیت مکانی سازه های مجاور
	روباره کم	شرایط توپوگرافی مانند رانش زمین، مشخصه های مقاومت و تغییر شکل، نفوذپذیری، شرایط موقعیت تونل
	روباره زیاد	جریان آب های زیرزمینی با فشار بالا، افزایش فشار زمین
	مواردی که تونل زیر سطح آب زیرزمینی واقع شده است	مشخصه های مقاومت و تغییر شکل، مقدار ورودی آب های زیرزمینی، نفوذپذیری و توپوگرافی
مجاورت با ساخت و ساز		فشار نامتقارن زمین، تغییر شکل سازه های مجاور، ترک و تغییر شکل لاینینگ و کفبند
هندسه و ابعاد اشکال خاص	محل انشعاب، بزرگ شدن سطح مقطع تونل در این نقاط	ریزش سینه کار، تغییر شکل
عملکرد نیروهای خارجی بعد از ساخت تونل	فشار زمین، فشار آب و زمین لرزه	ترک و تغییر شکل لاینینگ و کفبند
پرتال ها		زمین لغزش، شکست شیب، فشار نامتقارن زمین، نشست سطحی زمین
شف و شفت مایل		جریان آب زیرزمینی، ورود آب سطحی و خاک از طریق پرتال

۲-۲- طراحی

یک تونل باید به نحوی طراحی شود که خود نگهداری آن حداکثر بوده و کاربرد و سایر الزامات موجود را برآورده کند. این فرآیند نیازمند بررسی مناسب نتایج تحقیقات، ارزیابی جامع کارایی اقتصادی، ایمنی، تأثیر بر محیط اطراف، سهولت ساخت و بازده اقتصادی پس از بهره‌برداری از تونل و همچنین نگهداری (خدمات تعمیر و نگهداری) است.

۲-۲-۱- طراحی تونل

طراحی کلی تونل شامل طراحی پلان، پروفیل، مقطع عرضی و امکانات کمکی تونل است که در ادامه توضیح داده شده‌اند.

۲-۲-۱-۱- پلان

حتی‌الامکان در طراحی تونل سعی شود پلان مسیر به‌صورت خط مستقیم باشد تا در زمان اجرا با مشکلات و محدودیت‌های هندسی مواجه نشود. هرچه پلان تونل مستقیم‌تر باشد، اجرای آن نیز راحت‌تر خواهد بود. اگر تونل به‌صورت قوس‌دار طراحی می‌شود، بسته به نوع و طبقه‌بندی راه و راه‌آهن، شعاع قوس باید تا حد امکان بزرگ باشد. در تونل‌های راه، یک قوس ملایم در خروجی تونل به چشم رانندگان فرصت تطبیق با شرایط روشنایی و نور را می‌دهد. تونل‌ها باید دارای شرایط مناسب زمین‌شناسی، توپوگرافی و روباره کافی باشند. همچنین در انتخاب مسیر تونل لازم است به مواردی از جمله وضعیت تهویه حین اجرا، شرایط اضطراری و راه‌های کمکی، دسترسی به محل دیوی مصالح و غیره نیز توجه داشت.

پرتال تونل‌ها معمولاً به دلیل واقع شدن در محلی با روباره کم و اثرپذیری از شرایط جوی و غیره احتمال ناپایداری بالایی دارند. بهترین موقعیت برای پرتال تونل در لبه خط‌الرأس کوه و تقریباً عمود بر حداکثر زاویه شیب زمین بوده و در زمین‌های خاکی ترجیحاً، در محلی فاقد احتمال رانش می‌باشد. گاهی اوقات ممکن است پرتال در موقعیتی با فشار نامتقارن زمین، ریزش سنگ، سیل، بهمن، و غیره واقع شود. در این شرایط لازم است تدابیر لازم جهت به حداقل رساندن اثرات آن‌ها اندیشیده شود.

در شرایطی که دو تونل به موازات یکدیگر یا عمود بر هم احداث شوند، تأثیر آن‌ها بر یکدیگر باید بررسی شود. این دو تونل بسته به شرایط زمین و روش اجرا، تأثیر متفاوتی بر یکدیگر خواهند داشت. حداقل فاصله مجاز تونل‌ها از دو برابر مجموع شعاع دو تونل در زمین سخت و تا پنج برابر در زمین نرم، متغیر است. در زمین با شرایط متوسط نیز این فاصله حدود سه برابر این عرض می‌باشد. اگر تونل‌های نزدیک به هم در زمین نرم واقع شده باشند، تأثیر متقابل آن‌ها را نمی‌توان روی هم نادیده گرفت.

۲-۲-۱-۲-۲ یروفیل

شیب حداقل ۰.۲٪ کمک می‌کند که آب‌های سطحی به راحتی در طول تونل جریان پیدا کرده و به کانال‌های زهکشی منتقل گردند. با این حال زمانی که حجم آب کم باشد، شیب ۰.۳٪ و اگر حجم ورودی آب زیاد باشد، شیب ۰.۵٪ ضروری است. از آنجایی که شیب مذکور بر عملکرد حمل مصالح باطله تونل تأثیرگذار است، لازم است مقدار بهینه انتخاب شود.

در تونل‌های جاده‌ای که نیاز به تهویه مکانیکی دارند، به‌منظور کاهش گاز خروجی از ماشین‌آلات، حداکثر شیب ۳٪ حفظ شود. در تونل‌های راه‌آهن نیز به‌منظور غلبه بر نیروی مقاومتی در برابر حرکت قطار، حتی‌الامکان شیب مطلوب در نظر گرفته شود.

۲-۲-۱-۳- مقطع عرضی

معیار اجرای تونل‌های راه و راه‌آهن بر اساس نوع و طبقه‌بندی آن‌ها تعیین می‌شود. در طراحی مقطع داخلی تونل باید فضای لازم جهت تجهیزات تهویه و روشنایی، تسهیلات اورژانسی و اضطراری، علائم راهنمایی و خطاهای مجاز حین اجرا، در نظر گرفته شود.

۲-۲-۱-۴- امکانات کمکی تونل‌ها

در تونل‌های جاده‌ای، بسته به میزان ترافیک و طول تونل، امکانات کمکی مانند تهویه، روشنایی و امکانات اضطراری تعبیه می‌شود. از این رو، هنگام تصمیم‌گیری در مورد موقعیت پرتال‌ها و یا طول تونل، لازم است علاوه بر طراحی اولیه جت فن‌ها، جانمایی کانال‌های تهویه و سایر امکانات کمکی، موارد دیگری مانند هزینه و سهولت اجرا، هزینه نگهداری، سهولت بازرسی و غیره در نظر گرفته شود. در تونل‌های بلند و با توجه به هزینه بالای سیستم تهویه در این تونل‌ها، اقتصادی بودن روش تهویه، تأثیر زیادی بر طول و شیب طولی تونل دارد.

۲-۲-۲- برنامه ریزی احداث تونل

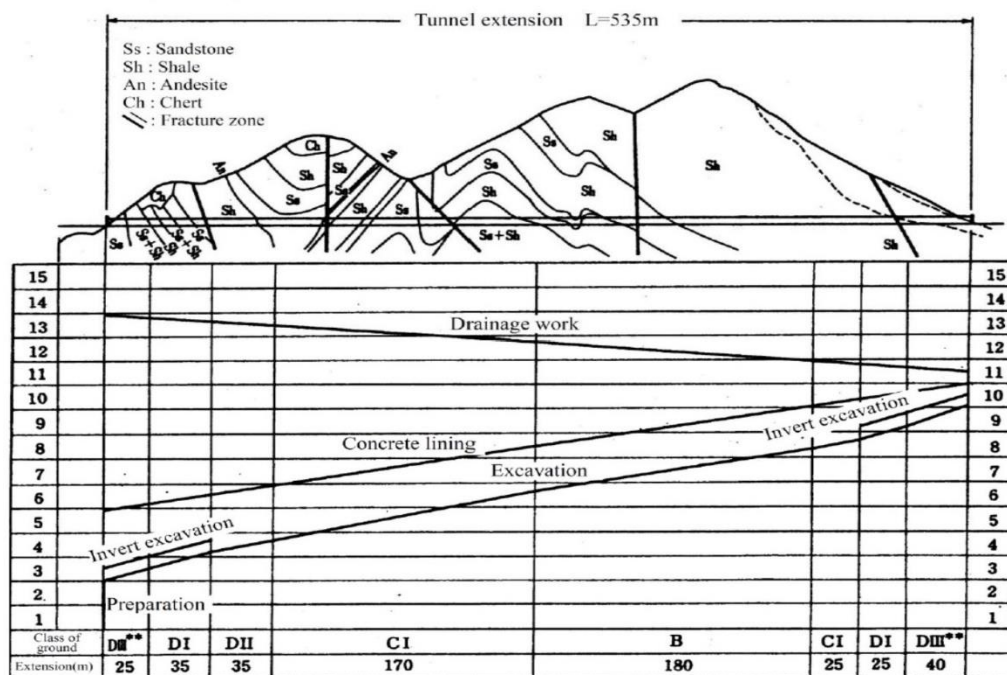
طرح یک تونل باید متناسب با هدفی که برای آن در نظر گرفته شده است صورت پذیرد و تحقیق در مورد شرایط زمین، شرایط ساختگاه، ضرورت و ترتیب دریف های کاری^۱ برای حفظ ایمنی در مرحله ساخت و به حداقل رساندن تأثیر بر محیط اطراف ضروری است. بهره‌وری اقتصادی نه تنها در طول ساخت بلکه پس از تکمیل تونل نیز باید در نظر گرفته شود.

¹ working drifts

درک کامل وضعیت ساختگاه از جمله توپوگرافی، زمین‌شناسی و آب‌های زیرزمینی از نتایج مطالعات اولیه ممکن است بسیار دشوار باشد و حتی احتمال دارد طرح اولیه باتوجه به تغییر شرایط زمین در مرحله حفر تونل تغییر کند؛ بنابراین نه‌تنها در طول برنامه‌ریزی بلکه در حین ساخت و نگهداری بررسی دقیق‌تر و مستمر لازم است. با این وجود، تغییرات گسترده در مرحله ساخت ممکن است زمان و هزینه موردنیاز برای ساخت را افزایش دهد، پس انجام مطالعات اولیه جامع ضرورت دارد.

۲-۲-۲-۱- روش اجرا و برنامه زمان‌بندی

در برنامه‌ریزی برای ساخت باید با در نظر گرفتن سطح مقطع و طول تونل، تاریخ اتمام پروژه، وضعیت زمین و محل ساختگاه^۱ و غیره، روش‌های ساخت مناسب تعیین و بر اساس آن برنامه زمان‌بندی ارائه شود. به‌طور کلی، مراحل یک پروژه تونل‌سازی با کنارهم قراردادن دوره‌های زمانی آماده‌سازی، حفاری، کارهای تکمیلی و برچیدن تعیین می‌شود. شکل ۲-۱ نمونه‌ای از مراحل ساخت را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱- نمونه‌ای از برنامه‌ریزی پیشرفت ساخت

۲-۲-۲-۲- راه‌های دسترسی، تجهیز و محل‌های دیوی مصالح مازاد

به دلیل تاثیر زیاد برنامه‌ریزی در برنامه زمان‌بندی و کاهش زمان ساخت، باتوجه به تعداد راه‌ها، مسیرها، عرض آن‌ها و سایر جنبه‌های ساختار راه، مطالعه جامعی انجام می‌شود که باید شرایط محل، اقتصاد و تأثیر بر محیط اطراف

¹ location condition

در نظر گرفته شود. اگر از جاده های موجود به عنوان مسیرهای حمل و نقل استفاده می شود باید با مدیریت راه، پلیس و ساکنان کنار جاده توافق صورت گیرد. راهکارهای تکمیلی مختلفی در صورت نیاز باید مورد مطالعه و اجرا قرار گیرد که از جمله آن می توان به روسازی جدید، تعریض جاده ها، احداث مسیرهای انشعاب و دسترسی، تأمین گذرگاه ها و جاده های مدارس اشاره کرد.

اگر در مجاورت محل انباشت باطله جاده ای موجود یا در دسترس نباشد، ساخت یک جاده جدید برنامه ریزی می شود. برای این منظور باید با توجه به کاربرد راه، حجم ترافیک تخمینی، انواع وسایل نقلیه مورد استفاده، شیب عرضی و طولی راه^۱ مشخص شود.

در برنامه ریزی تجهیز برای دستیابی به امکان پیشروی ایمن و روان به هنگام ساخت، باید ظرفیت تجهیزات، تأثیر بر محیط اطراف و غیره مورد مطالعه قرار گیرد. تجهیز اصلی که در خارج از تونل قرار دارند شامل تجهیزات حفاری، ساختمان های مختلف (ساختمان اداری، اقامتگاه ها، انبارها، نیروگاه و تعمیرگاه) و تجهیزات الکتریکی است. در برخی موارد برای محافظت از محیط زیست نیاز به موارد خاصی مانند احداث تاسیسات تصفیه فاضلاب وجود دارد. برای پیش بینی محل انباشت باطله، باید میزان باطله تولیدی، مسیر حمل و نقل، کارهای کمکی مورد نیاز و اثرات آن بر محیط اطراف در نظر گرفته شود.

در برنامه ریزی تجهیزات بیرونی تونل و محل انباشت باطله، محل دفن پس از اتمام ساخت نیز باید بر اساس طرح های پیشگیری از مشکلات آتی، طرحی های بهره برداری از محل و غیره مورد مطالعه قرار گیرد.

۲-۲-۳- حفاظت از محیط زیست

در برنامه ریزی برای حفظ محیط زیست، عوامل تأثیرگذار بر محیط اطراف تعیین و اقدامات و کنترل های لازم در صورت نیاز در نظر گرفته می شود.

با رعایت تمامی قوانین و مقررات مربوطه، تمامی تلاش ها باید در جهت کاهش صدا، لرزش، لرزش هوا با فرکانس پایین، کاهش و کمبود آب، نشست سطح زمین، تغییر شکل سازه های موجود، تخلیه آب آلوده، مشکلات ترافیک به دلیل حمل و نقل خارج از تونل و جلوگیری از آلودگی آب با خاک، سنگ و فلزات سنگین و همچنین حفظ وضعیت طبیعی به کار گرفته شود. اگر در پروژه امکان استفاده از راه حل های فوق وجود ندارد باید استفاده از روش های جایگزین از جمله جابه جایی تاسیسات مورد بررسی قرار گرفته و امکان سنجی شود.

¹ horizontal and longitudinal alignment

۳-۲- بررسی‌ها

۱-۳-۲- بررسی شرایط زمین

۱-۱-۳-۲- کلیات

شرایط توپوگرافی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی محدوده پیرامون تونل که ممکن است تحت تاثیر احداث تونل قرار گیرند، باتوجه به مرحله و هدف ساخت بررسی شود.

شرایط زمین در هر مرحله از ساخت، از برنامه‌ریزی تا دوره بهره‌برداری بررسی می‌شود. در طول برنامه‌ریزی، توپوگرافی و زمین‌شناسی مقاطع تونل و در طی طراحی و احداث، زمین‌شناسی و هیدرولوژی به‌طور جامع مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

از آنجایی که ویژگی‌های زمین، آب‌های زیرزمینی و محیط اطراف ارتباط نزدیکی دارند، اطلاعات جمع‌آوری شده از مطالعه توپوگرافی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی باید با شرایط محل مطابقت داشته باشد. بنابراین تمام تحقیقات باید در مراحل اولیه قبل از ساخت و با دید بلند مدت به‌دقت انجام و از نتایج هر مرحله بررسی به‌طور کامل استفاده شود. ممکن است به دست آوردن اطلاعات کافی از وضعیت زمین قبل از ساخت، برای تونل‌های طولانی یا تونل‌های با روباره زیاد دشوار باشد؛ بنابراین زمین‌شناسی باید به‌طور مداوم در حین ساخت نیز مورد بررسی قرار گیرد. جدول ۲-۴ هدف و محتوی تحقیق را نشان می‌دهد. شرایط خاص زمین مانند زمین‌لغزش، مناطق گسله یا طراحی خاص و شرایط ساخت مانند روباره پایین محدوده پرتال ممکن است تأثیر زیادی بر ساخت تونل داشته باشند؛ بنابراین در مرحله اولیه انتخاب مسیر، توزیع و ویژگی‌های شرایط ویژه زمین و اطلاعات دقیق از شرایط طراحی و ساخت باید به‌طور کامل بررسی و راه‌حل‌ها برنامه‌ریزی شوند.

جدول ۲-۴- اهداف و مقیاس تحقیق

مرحله	هدف	محتوی تحقیق	محدوده و مقیاس تحقیق
انتخاب مسیر	- مقایسه مسیرهای احتمالی - انتخاب طیف گسترده‌ای شامل مقطع‌های باز^۱ و محیط اطراف پرتال	- شرایط زمین اطراف - شرایط خاص محل احداث احتمالی - یادداشت برای کنترل در مرحله طراحی و احداث	- ۱/۲۵۰۰۰ تا ۱/۵۰۰۰ - محدوده وسیع
	- انتخاب مسیر تونل - تراز (افقی و عمودی) - جانمایی پرتال‌ها	- شرایط کلی زمین - احتمال برخورد با شرایط خاص زمین شناسی - مروری بر نکات قابل توجه در طراحی و ساخت	- ۱/۱۰۰۰۰ تا ۱/۱۰۰۰ - مسیرهای اطراف و سایت جایگزین احتمالی
طراحی و نقشه ساخت	- طراحی اولیه - مقطع تونل	- شرایط زمین شناسی کلی - توزیع دقیق و ویژگی‌های زمین خاص - یادداشت جزئیات برای بازرسی در طراحی و ساخت	- ۱/۲۵۰۰ تا ۱/۵۰۰ - مسیر و اطراف مسیر
	- طراحی دقیق و با جزئیات - بررسی سطح مقطع تونل، نگهداری و لاینینگ - طرح ساخت	- شرایط زمین برای طراحی سیستم نگهداری و تحکیم - گردآوری اطلاعات برای برنامه‌ریزی ساخت و برآورد هزینه - تعیین نقاط متأثر از ساخت تونل	- ۱/۵۰۰ تا ۱/۱۰۰ - مسیر
ساخت	- مدیریت ساخت - تغییر طراحی - جبران خسارت^۲	- مشاهده سطح و زمین و پایش سیستم تحکیم و نگهداری - گمانه پیشرو^۳ - اثرات محیطی اطراف - سازمان‌دهی نتایج آزمایشات و شرایط زمین‌شناسی	- داخل تونل و محدوده متأثر از ساخت
تعمیر، نگهداری و مدیریت	- جبران خسارت - تعمیر و نگهداری و بازسازی	- اثرات محیطی اطراف	- داخل تونل و محدوده متأثر از ساخت

^۱ open sections^۲ compensation^۳ Probing ahead of face

۲-۳-۱-۲- بررسی توپوگرافی برای مطالعه و اجرا

در انتخاب مسیر، باید شرایط زمین‌شناسی ساختگاه تونل به‌طور اجمالی بررسی شود. انتخاب مسیر به‌صورت گام‌به‌گام و پس از مرحله مقایسه مسیرها^۱ و مرحله انتخاب مسیر نهایی باهدف به دست آوردن پیش‌نیاز لازم برای انتخاب مسیر و تهیه پیش‌نویس نقشه‌برداری بعدی انجام می‌شود. در مرحله بررسی تطبیقی مسیرها، توپوگرافی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی در یک مقیاس وسیع و در مرحله انتخاب مسیر نهایی، شرایط زمین‌هایی که برای بررسی و ارزیابی تراز تونل ضروری می‌باشند باید مورد مطالعه قرار گیرند. این مطالعات باید با استفاده از روش مناسب، مطابق با شرایط زمین و محل حفر تونل صورت گیرند.

مطالعه تعیین مسیر معمولاً شامل بررسی اسناد، توپوگرافی و زمین‌شناسی سطحی، اکتشافات ژئوفیزیک، روش حفاری، تعادل آب و نقشه محیطی هیدرولوژیکی و غیره است که در صورت نیاز باید انجام شود. همان‌طور که اشاره شد در مرحله مقایسه مسیرها، هدف اصلی درک تقریبی توپوگرافی، زمین‌شناسی و شرایط هیدرولوژیکی برای محدوده وسیع و مقایسه مسیرها است. بررسی نقاط مشکل‌ساز و مسائل آتی موارد ذکر شده با استفاده از مطالعه اسناد و توپوگرافی از اهمیت بالایی برخوردار است. مرحله تعیین مسیر نهایی می‌تواند شامل مسائل توپوگرافی، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی باشد که ممکن است مشکلاتی را در تعیین تراز تونل ایجاد کنند. با توجه به اینکه توپوگرافی و زمین‌شناسی اطراف پرتال تونل ممکن است تأثیر زیادی در انتخاب مسیر داشته باشد در مواردی که توپوگرافی و زمین پایدار نیستند توصیه می‌شود توزیع و ویژگی‌های آن‌ها با جزئیات بررسی شود.

۲-۳-۱-۳- بررسی زمین‌شناسی برای مطالعه و اجرا

زمین‌شناسی باید به‌تدریج در مرحله طراحی و ساخت به‌منظور درک شرایط کلی زمینی که تونل در آن حفر می‌شود همچنین تحقق هدف دستیابی به داده‌های اساسی برای طراحی و حفر با دقت مناسب بررسی شود. بررسی‌های زمین‌شناسی برای طراحی و طرح ساخت ممکن است چالش‌های زمین‌شناسی یا توپوگرافی را پیش‌بینی کند. برای آشکار کردن و ارزیابی این مشکلات زمین‌شناسی، موارد ذیل بررسی می‌شود:

- ۱- زمین‌شناسی کلی، توزیع و ویژگی‌های مقطع تونل
- ۲- طبقه‌بندی زمین با ملاحظات فنی بر اساس نتایج بررسی
- ۳- تعیین توزیع، ویژگی‌های زمین‌های خاص و پیش‌بینی پتانسیل پدیده‌های مشکل‌ساز
- ۴- توپوگرافی و زمین‌شناسی محل‌های پرتال، ارجاعات دقیق به مشکلات و اقدامات
- ۵- ارزیابی پایداری سطح، سیستم نگهداری مورد نیاز، ارجاعات اساسی به انتخاب روش حفاری و هدایت تونل^۲.

^۱ comparatively examining routes

^۲ tunnel driving

۶- پیش بینی اثرات ساخت تونل بر محیط اطراف از جمله کاهش آب، فرونشست زمین و غیره.

الف) نکات قابل توجه برای طراحی و ساخت در شرایط خاص زمین:

۱- شرایط خاص زمین

الف) زمینی که زمین لغزش یا لغزش شیروانی پیش بینی می شود: پرتال ها یا تونل هایی که دارای روباره کمی می باشند باید از نظر احتمال زمین لغزش یا لغزش شیروانی و پایداری تونل ارزیابی شوند. همچنین برای ضرورت و نحوه انجام اقدامات متقابل^۱ باید مطالعات کاملی صورت گیرد. هنگامی که پتانسیل زمین لغزش زیاد است، ممکن است لازم باشد که مسیر جایگزین احتمالی که از منطقه لغزش دوری کند در نظر گرفته شود. اکثر مناطق با پتانسیل زمین لغزش دارای ویژگی های توپوگرافی خاصی هستند، بنابراین مطالعه عکس های هوایی، نقشه های دقیق توپوگرافی و کار میدانی در مرحله انتخاب مسیر مؤثر است. همچنین شناسایی تاریخچه زمین لغزش و یا حرکت های گذشته از مصاحبه با ساکنان محلی، سازمان های مرتبط و مطالعه اسناد نیز ممکن است مفید واقع شود.

۲- نواحی شکسته گسله یا چین خورده^۲: گسل با ناحیه شکستگی گسترده می تواند با بررسی در طول مسیر تشخیص داده شود. ویژگی های یک ناحیه شکستگی^۳ را می توان با اکتشافات لرزه ای، بررسی گمانه ها و سایر روش ها تخمین زد. ممکن است مقدار زیادی آب زیرزمینی در یک ناحیه شکستگی گسلی^۴ وجود داشته باشد؛ بنابراین تعیین مشخصات و توزیع^۵ این نواحی مهم است.

اگر علاوه بر فشار روباره، نیروهای تکتونیکی قابل توجهی بر محور چین وارد شوند بررسی احتمال مچاله شوندگی زمین که در ادامه توضیح داده می شود ممکن است ضروری باشد.

۳- زمین تحکیم نشده^۶: خاک ماسه ای ضعیف یا تحکیم نشده، ماسه شن دار^۷، خاک چسبنده^۸ و همچنین مواد آتش فشانی تحکیم نشده مانند خاکستر آتش فشان یا سنگ ریزه و سنگ پومیس^۹ را زمین تحکیم نشده می نامند. هنگامی که چنین زمینی با آب تماس پیدا کند، در صورت کم بودن عمق ممکن است شسته شدن، ریزش یا نشست زمین رخ دهد؛ به خصوص در مورد ماسه های ریز با اندازه ذره همگن، آزمایش آزمایشگاهی که شاخص جریان زمین^{۱۰} را تعیین کند مهم است.

¹ countermeasures

² Fault fracture zone or folded disturbance zone

³ fracture zone

⁴ Fault fracture zone

⁵ distribution

⁶ Unconsolidated ground

⁷ gravelly soil

⁸ cohesive soil

⁹ pumice stone

¹⁰ index of ground flow

۴- زمین‌های جمع شونده^۱: زمین‌های جمع شونده به دو دسته تقسیم می‌شود، زمین مچاله شونده کلی و زمین آماسی^۲. پدیده اول، زمین مچاله شونده، ناشی از جریان پلاستیک به دلیل تنش زیاد است و دومی، زمین آماسی، ناشی از انبساط حجم زمین در اثر تماس با آب‌های زیرزمینی است. گاهی اوقات حجم انبساط را نمی‌توان بر اساس یک استاندارد واحد، بسته به نوع سنگ یا خصوصیات سنگ و تنش ساختاری زمین‌شناسی با عمق زمین^۳ یا چین‌خوردگی تعیین کرد. سنگ‌های پلاستیک و نیمه پلاستیک که به تغییر شکل و گسیختگی تحت تأثیر تنش‌های نسبتاً پائین حساس می‌باشند، احتمالاً رفتار مچاله شوندگی از خود نشان دهند. مواد خردشده بین گسلی، سنگ‌های رسی، گل‌سنگ‌ها و سنگ‌های به شدت دگرسان شده پیروکلاستیک و انواع میکاها نیز به‌طور کلی انتظار می‌رود که خواص آماسی از خود نشان دهند.

۵- زمینی که انفجار سنگ^۴ پیش‌بینی می‌شود: انفجار سنگ، شکستن^۵ یا پخش شدن^۶ ناگهانی توده سنگ است که عمدتاً در زمین با عمق و تنش برجا زیاد رخ می‌دهد. انفجار سنگ پدیده‌ای است که در آن تنش در توده سنگ در اثر حفاری به حد تنش تسلیم می‌رسد و انرژی کرنش الاستیک ذخیره‌شده در توده سنگ به‌طور ناگهانی آزاد می‌شود. ۶- زمین با ژئوترمی گرم^۷، چشمه‌های آب گرم، گازهای سمی و غیره: این نوع زمین شامل مناطق دگرسانی آب‌گرمایی^۸، نواحی شکستگی^۹، سنگ نفوذی^{۱۰} و لایه‌های حاوی نفت یا زغال‌سنگ است. هنگام برنامه‌ریزی یک تونل باید ساختار زمین‌شناسی انباشته‌شده^{۱۱} ژئوترمی گرم، چشمه‌های آب گرم و گازها باید با بررسی گمانه‌ها یا اکتشافات ژئوفیزیکی به‌دقت شناسایی شوند. دمای زمین برای پیش‌بینی مکان و دمای منابع گرمایی زیرزمینی بررسی و از طرفی برای شناسایی وجود گاز زیرزمینی تجزیه و تحلیل مربوطه انجام شود.

۷- زمینی که فشار آب بالا یا آب زیرزمینی زیاد پیش‌بینی می‌شود: گاهی اوقات در زمان حفاری، آب‌های زیرزمینی جداشده توسط گسل‌ها، آب زیاد موجود در زمین تحکیم نشده مانند مواد آذرآواری، آب در شکاف درزه‌ها یا شکاف‌های توده سنگ و سایر منابع به مقدار زیاد خارج می‌شود. بررسی گمانه و بررسی هیدرولوژیکی باید با اشاره به مناطق شکستگی گسل یا مناطق درهم چین‌خورده^{۱۲} و زمین تحکیم نشده انجام شود. از اکتشافات ژئوفیزیکی مانند اکتشافات لرزه‌ای یا الکتریکی نیز با توجه به شرایط زمین‌شناسی می‌توان بهره برد.

¹ squeezing ground

² swelling ground

³ geology structural stress by ground depth

⁴ rock burst

⁵ outbreak

⁶ scattering

⁷ hot geothermy

⁸ hydrothermal alteration zone

⁹ fracture zone

¹⁰ intrusive rock

¹¹ accumulated geological structure

¹² folded disturbance zones

۸- فلزات سنگین و غیره: فلزات سنگین در ذخایر سنگ فلزی، لایه های حاوی نفت یا زغال سنگ، مناطق دگرسانی آب گرمایی و ذخایر گلی دریایی^۱ وجود دارند. هنگام برنامه ریزی عبور تونل از این مناطق، بررسی های زمین شناسی با دقت انجام شود و در صورت لزوم، تجزیه و تحلیل بر روی سنگ های معدنی و فلزات سنگین انجام تا توزیع زمین های حاوی چنین موادی شناسایی شود.

(ب) مواردی که در طراحی و ساخت باید مورد توجه قرار گیرد:

۱- هنگام عبور تونل از یک منطقه شهری: بررسی وضعیت محیط اطراف برای تعیین و شناسایی سازه های سطحی و زیرزمینی که مانع حفر تونل می شوند از اهمیت بالایی برخوردار است. از آنجایی که معمولاً در مناطق شهری عمق کم و خاک تحکیم نشده غالب هستند، روش های مناسب بررسی باید انتخاب و انجام شود.

۲- روباره کم: در زمین با روباره کم، ایجاد قوس تونل مشکل و فرونشست سطحی به آسانی رخ می دهد. به ویژه در صورت وجود سازه هایی در سطح زمین، اطلاعاتی برای تخمین مقدار و محدوده نشست باید استخراج شود. اگر نشست سطحی نیاز است که مهار شود، اقدامات متقابل باید انتخاب شده و طرح مناسب مورد تحقیق و بررسی قرار گیرد. از آنجایی که خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل زمین برای پیش بینی نشست سطحی لازم است، آزمایش های نفوذ استاندارد و برجا با استفاده از گمانه یا آزمایش های آزمایشگاهی باید انجام شود.

۳- روباره خیلی زیاد: زمین با روباره خیلی زیاد مستعد انفجار سنگ، مچاله شوندگی و جریان آب تحت فشار زیاد است. در چنین سایتی، انجام آزمایش مناسب برجا با استفاده از حفاری سطحی^۲، بررسی موج الاستیک، اکتشافات الکتریکی^۳، بررسی گمانه ها و غیره دشوار است.

با توجه به موارد فوق، بررسی توپوگرافی، نقشه برداری سطحی، گمانه افقی، بررسی هیدرولوژی برای شناسایی شرایط زمین و ارائه راه حل هایی برای مشکلات احتمالی در مرحله طراحی/ ساخت ضروری است.

۴- هنگام عبور تونل از زیر آب: هنگامی که تونلی از زیر آب عبور می کند (به عنوان مثال کف دریا)، این خطر وجود دارد که تونل به دلیل ورود حجم زیاد آب، دچار آب گرفتگی شود. بنابراین، تحقیقات بنیادی در مورد آب های زیرزمینی ضروری است. روش اصلی برای اکتشاف ژئوفیزیکی بستر دریا شامل مشاهده کف و نمونه برداری یا اکتشاف صوتی^۴ است.

¹ marine muddy deposit

² surface boring

³ electrical prospecting

⁴ Sonic prospecting

۵- مقاطع بزرگ تونل: در سال‌های اخیر، تونل بزرگ مقطع (مقطع بزرگ‌تر از محدوده طرح استاندارد) ساخته شده است. در این تونل‌ها نیز باید به‌مانند تونل‌های با مقطع معمولی شرایط زمین و شرایط محیطی مورد بررسی قرار گیرند. انجام مطالعات برای به دست آوردن داده‌ها جهت پیش‌بینی اقدامات متقابل مورد نیاز مانند حفر گمانه‌ها جلوتر از جبهه کار پیشنهاد می‌شود.

۶- سازه‌های مجاور: زمانی که یک تونل در مجاورت سازه‌های موجود حفر می‌شود باید جهت جلوگیری از وارد شدن آسیب به این سازه‌ها ویژگی‌هایی مانند شرایط ساخت، محیط و شرایط زمین در زمان احداث مطالعه شود. در مورد تونل‌های دوقلو، رفتار زمین به دلیل تداخل متقابل تونل‌ها مهم می‌باشد؛ بنابراین، اثر جابه‌جایی زمین اطراف، لرزش ناشی از ساخت و تغییر سطح آب زیرزمینی به‌مانند تونل‌های مجاور بررسی می‌شود.

۷- فشار زمین، آب و زلزله: در مواردی که در نظر گرفتن فشار زیاد زمین، آب و زلزله ضروری باشد باید از زمین‌شناسی منطقه، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها، شرایط آب‌های زیرزمینی و غیره مطالعه کافی صورت گیرد؛ به‌ویژه، زمانی که محل تونل در مجاورت یک گسل فعال قرار دارد، موارد زیر باید ارزیابی شود: وجود گسل فعال، توزیع و خصوصیات نواحی شکستگی گسل، موقعیت گسل با تونل و همچنین در صورت نیاز بررسی‌های دقیقی برای ارائه یک طرح مقاوم در برابر زلزله صورت گیرد.

۸- پرتال‌ها^۱: هنگام طراحی و ساخت پرتال‌ها باید دقت زیادی شود و از آنجا که شرایط پرتال‌ها هرگز یکسان نیست لازم است تا هرکدام به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شود؛ به‌ویژه در مورد پرتال‌هایی که زمین لغزش یا لغزش شیروانی پیش‌بینی می‌شود بررسی متناظر که معمولاً به‌صورت گمانه افقی یا عمودی می‌باشد باید بر اساس مشکلات پیش‌بینی شده انجام شود.

۹- چاه‌های عمودی و شیب‌دار: مطالعات برای چاه‌های شیب‌دار تقریباً مشابه تونل‌ها می‌باشد. اگرچه در صورت حفاری به سمت پایین، بررسی‌های اساسی برای تخمین مقدار ورودی آب، شرایط زهکشی و انتقال آب انجام شود. روش‌های اصلی برای بررسی چاه‌های عمودی شامل بررسی گمانه‌ها، از جمله آزمایش‌های برجا و بررسی آب‌های زیرزمینی برای انتخاب مناسب‌ترین مکان چاه می‌باشد.

۲-۳-۱-۴- بررسی‌های زمین‌شناسی حین ساخت

تحقیقات زمین‌شناسی در حین ساخت جهت دستیابی به حفاری ایمن و اقتصادی باید بنا به مقتضی انجام شود. در مرحله انتخاب مسیر تونل یا طراحی و برنامه‌ریزی ساخت، اغلب نمی‌توان زمین‌شناسی مسیر را به‌طور کامل

¹ Portals

شناسایی کرد و گاهی اوقات با شرایط زمین شناسی پیش بینی نشده یا مشکلاتی غیرمنتظره ای برخورد می شود. در این صورت حتی باید در مرحله ساخت تونل نیز تحقیقات زمین شناسی لازم انجام شود.

۱- بررسی ها از خارج از تونل:

الف) بررسی زمین شناسی سطحی: بر اساس اطلاعات زمین شناسی حاصل از مشاهدات سطح، زمین شناسی پیش روی تونل را می توان پیش بینی کرد.

ب) بررسی های گمانه ای: هنگامی که شرایط دقیق تر زمین شناسی یا توزیع آبخوان^۱ و فشار آب پس از مطالعه زمین شناسی با حفاری تونل آشکار شود، مطالعات گمانه ای یا برداشت از سطح زمین باید اضافه شود.

۲- بررسی ها از داخل تونل:

الف) مشاهدات زمین شناسی: برداشت زمین شناسی^۲ در شکل های طولی و عرضی تونل^۳ همراه با مشاهدات ممکن است تغییر زمین شناسی در جلو جبهه کار را مشخص کند.

ب) حفاری (افقی) پیشرو^۴: حفاری افقی پیشرو تونل می تواند به طور مستقیم وضعیت زمین شناسی یا تراوش آب در جلوی جبهه کار را شناسایی کند و به عنوان چال زهکش نیز استفاده شود.

ج) بررسی چال زنی^۵: در حفاری پیشرو توسط جامبودریل، انرژی حفاری که به عنوان شاخص داده می شود از نیروی رانش، سرعت چرخش، تعداد ضربات مته جامبو محاسبه می شود و به عنوان یک داده فنی در ارزیابی زمین استفاده می شود. از این رو اپراتور جامبو می تواند نقش تعیین کننده ای در انتقال اطلاعات شرایط جبهه کار پیشرو به تیم فنی داشته باشد.

د) اکتشافات ژئوفیزیکی: اکتشافات ژئوفیزیکی برای کاوش در جلوی جبهه کار به دو نوع تقسیم می شود، یکی با استفاده از امواج الاستیک و دیگری با استفاده از امواج الکترومغناطیسی. روش انعکاس زیرزمینی برای گرفتن موج منعکس شده از زمین^۶ با سرعت موج الاستیک متفاوت، موجب تعیین موقعیت ناپیوستگی یا ناحیه شکست گسل می شود.

۲-۳-۱-۵- بررسی های هیدرولوژیکی

نشت آب در داخل تونل در اثر حفاری بر درجه سختی حفر تونل تأثیر می گذارد و حتی گاهی سبب کمبود آب های سطحی می شود. بنابراین تحقیقات هیدرولوژیکی برای پیش بینی حجم جریان آب ورودی، بررسی مشکلات

¹ Distribution of aquifer

² Geological mapping

³ tunnel longitudinal and plane figures

⁴ advancing (horizontal) boring

⁵ Drilling survey

⁶ the plane between ground

طراحی و حفر ناشی از نشت آب، ارزیابی تأثیر بر محیط اطراف و بررسی مشکلات مربوط به نگهداری و مدیریت تونل پس از اتمام حفر مفید خواهد بود.

۱- پیش‌بینی نشت آب در تونل‌ها: نشت آب به تونل به دو دسته تقسیم می‌شود. جریان آب متمرکز در مرحله ساخت و جریان ثابت پس از حفر تونل. نوع و حجم تراوش آب و حوضه آبریز آن عمدتاً به ساختار آبخوان^۱ (سفره آب زیرزمینی) حاوی آب زیرزمینی و ویژگی‌های آن یعنی هدایت هیدرولیکی یا ضریب ذخیره‌سازی بستگی دارد که جریان آب زیرزمینی را در آبخوان کنترل می‌کند. روش‌های پیش‌بینی میزان نشت و حوضه آبریز^۲ به شرح زیر می‌باشد:

الف) مطالعه موردی حفر تونل در مناطق اطراف یا در زمین‌شناسی مشابه

ب) روش استفاده از شرایط توپوگرافی یا هیدرولوژیکی

ج) روش استفاده از فرمول هیدرولیک

د) تحلیل عددی با مدل هیدرولوژیکی

۲- مشکلات طراحی و ساخت: نشت آب یکی از موارد مهمی است که ایمنی و هزینه ساخت را تحت تأثیر قرار می‌دهد و ممکن است باعث ناپایداری جبهه کار شود. برنامه‌ریزی روش حفاری یا تاسیسات تصفیه آب زیرزمینی و راهکارها برای ساخت ایمن با پیش‌بینی محل یا میزان جریان متمرکز در مرحله انتخاب مسیر یا مرحله برنامه‌ریزی ساخت موردبررسی قرار می‌گیرد، زیرا مشکلات طراحی و ساخت به تراوش آب متمرکزی که در حین حفاری با آن مواجه می‌شود بستگی دارد. اندازه‌گیری میزان جریان ورودی و مقایسه با مقدار پیش‌بینی‌شده اولیه برای پیشبرد حفاری ضروری است. حتی گاهی اندازه‌گیری باید در مرحله نگهداری و مدیریت پس از اتمام تونل نیز لازم است ادامه یابد.

۳- تأثیر بر محیط اطراف: تأثیر آب‌های نشتی بر آب‌های سطحی یا تاسیسات آب زیرزمینی اطراف تونل، مشکل بسیار مهمی در جامعه با توجه به اهمیت حفظ محیط‌زیست است که عمدتاً به‌جز نشت موقت متمرکز آب در حین ساخت بیشتر به دلیل نشت مداوم پس از اتمام تونل است؛ بنابراین در هنگام انتخاب مسیر یا طراحی و برنامه‌ریزی ساخت، اقدامات لازم برای کمبود آب‌های سطحی یا زیرزمینی، پیش‌بینی و ارزیابی میزان تأثیر و در بدترین حالت اصلاح مسیر تونل باید بررسی شود.

۴- اجرای گام‌به‌گام بررسی هیدرولوژیکی: تحقیقات هیدرولوژیکی باید به بررسی هیدرولوژیکی، بررسی بیلان آب^۳ و بررسی محیطی هیدرولوژیکی طبقه‌بندی شود. نتایج این تحقیق و نتایج اضافه حاصل از تحقیقات اسنادی یا تحقیق موردی باید به‌طورکلی بررسی و پیش‌بینی‌ها و ارزیابی‌های مختلفی انجام شود.

¹ aquifer

² catchment area

³ water balance

شرایط هیدرولوژیکی باید در هر مرحله از مطالعات با توجه به شرایط در یک سری از تحقیقات از مرحله انتخاب مسیر تا مرحله نگهداری و مدیریت پس از تکمیل بررسی شود. دقت باید با تکرار پیش‌بینی‌ها، ارزیابی‌ها و اصلاحات بهبود یابد. بررسی هیدرولوژیکی در مرحله انتخاب مسیر تا مرحله طراحی و ساخت، بسیار حائز اهمیت است، زیرا گاهی اوقات پس از تعیین مسیر تونل، هیچ راه‌حل اساسی برای حل مشکلات آب وجود ندارد.

۲-۳-۲- بررسی موقعیت تونل

۲-۳-۲-۱- کلیات

فرآیند بررسی مکان‌یابی یک تونل باید شامل کسب اطلاعات در مورد محیط طبیعی، محیط اجتماعی و زندگی انسان و همچنین قوانین و مقررات محدود کننده پروژه‌های عمرانی باشد. لازم است اثرات نامطلوب حفر تونل بر محیط طبیعی (آب‌های سطحی و زیرزمینی، گیاهان و جانوران، منابع معدنی، گاز طبیعی و غیره)، محیط اجتماعی (استفاده از زمین، میراث فرهنگی، سازه‌های موجود و غیره) و محیط زندگی انسان (صدا، لرزش، آلودگی هوا، ترافیک و غیره) به حداقل برسد. مواردی که برای حفظ محیط‌زیست مورد بررسی قرار می‌گیرند باید شامل موارد مربوطه از مرحله انتخاب مسیر تا موارد تعمیر و نگهداری باشد و از طرفی مناطق اطراف مسیر تونل را نیز پوشش دهد.

۲-۳-۲-۲- بررسی زیست‌محیطی

به منظور حفظ محیط‌زیست و کنترل آلودگی، اقدامات لازم برای جلوگیری از اثرات جدی ساخت بر محیط زندگی اطراف تونل باید به اندازه کافی مورد مطالعه قرار گیرد.

در برنامه‌ریزی یک پروژه بزرگ مقیاس خاص که برای آن ارزیابی زیست‌محیطی طبق قانون یا مقررات الزامی است، تأثیر آن بر محیط‌زیست باید پیش‌بینی و ارزیابی شود.

عمده‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در ساخت تونل شامل صدا، لرزش و خشک شدن چاه‌ها، کدر شدن آب و آسیب به ساختمان‌ها است. قبل از شروع حفاری محیط باید به دقت مطالعه شود و اثرات احتمالی در طول ساخت پیش‌بینی و در صورت وجود هرگونه مشکل اقدامات مناسب اتخاذ شود. همچنین باید مشکلات محیطی بالقوه‌ای که ممکن است در طول ساخت و بهره‌برداری به وجود آید مطالعه شود تا درک کاملی از اثر تونل بر محیط اطراف حاصل شود. جدول ۲-۵ موارد بررسی محیطی و مناطق بررسی را نشان می‌دهد.

هنگامی که نتایج بررسی‌ها احتمال سروصدا، لرزش، نشست زمین، آب گل‌آلود، آلودگی هوا و مشکلات ترافیکی را نشان می‌دهد باید اقدامات مناسب مانند پیش‌بینی و ارزیابی تأثیر، برنامه‌ریزی اقدامات متقابل و شناسایی اثرات متقابل انجام شود.

محدوده احتمالی هرکدام از عوارض اشاره شده قبل از شروع حفر تونل باید بررسی شود. در طول این بررسی‌ها، مطلوب است که بررسی تا زمانی ادامه یابد که مشکلات احتمالی پس از حفر تونل حداقل باشد.

جدول ۲-۵- موارد بررسی محیطی برای محیط اطراف تونل

مراحل کاربردی تحقیق	ملاحظات	موضوع بررسی	موارد	مهمی محیطی	مهمی اجتماعی
برنامه ریزی مسیر	پیوستگی و وجود گسل‌ها	وضعیت فعلی شکل زمین، استراتژی، جبهه کارها، ساختار زمین‌شناسی، سن لایه‌بندی‌ها، ضخامت لایه‌ها، نفوذپذیری	ویژگی‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و شرایط زمین		
طراحی، برنامه ریزی ساخت	گازهای خطرناک	توزیع منابع معدنی، گاز طبیعی و غیره	منابع زیرزمینی		
ساخت	- بررسی اولیه مناسب ضروری است - بررسی چاه‌ها	توزیع و نفوذپذیری آبخوان محصور نشده، فشار آب زیرزمینی و کیفیت آب، جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی، توزیع و مقدار چشمه آب	شرایط آب زیرزمینی		
نظارت و تعمیر	درک میزان جریان در ناحیه تأثیر	آب سطحی، چشمه آب گرم، دریاچه‌ها و مرداب‌ها، پراکندگی باتلاق‌ها	شرایط آب سطحی		
	منابع محیط طبیعی که حفاظت از آن‌ها ضروری است.	توزیع گیاهان و جانوران (به‌ویژه گونه‌های کمیاب)، مطالعه اکوسیستم	گیاهان و جانوران		
	وسعت، مالک و مدیریت سازه	الگوهای کاربری زمین مانند ساختمان‌ها، پارک‌ها و موارد مدفون مانند آب یا گاز، دریافت‌ها، توزیع میراث فرهنگی، بقایا و آثار طبیعی و ...	کاربری زمین، سازه‌های ساخته‌شده، میراث فرهنگی، بناهای تاریخی.		
	- بررسی وضعیت قبل از ساخت ضروری است - بررسی‌ها با توجه به مناطق روباره کم، زمین‌لغزش‌ها و گسل‌ها انجام می‌شود.	سازه‌ها و وضعیت آن‌ها (نوع، کاربرد، موقعیت و...)، شکل زمین (شرایط، ناپایداری و ویژگی‌های فیزیکی زمین و ...)، وضعیت کاربری، سازه‌های مجاور با احتمال تغییر شکل	شرایط زمین و سازه‌ها		

مراحل کاربردی تحقیق	ملاحظات	موضوع بررسی	موارد	محیط طبیعی
برنامه ریزی مسیر	طراحی، برنامه ریزی ساخت	ساخت	نظارت و نگهداری	
⊙	⊙	△	△	
⊙	⊙	△	△	
⊙	⊙	△	△	
⊙	⊙	△	△	
⊙	⊙	△	△	محیط زندگی انسان
⊙	⊙	△	△	
⊙	⊙	△	△	
⊙	⊙	△	△	
⊙	⊙	△	△	
⊙	⊙	△	△	
△	△	○	○	محیط زندگی انسان
△	△	○	○	
△	△	○	○	
△	△	○	○	
△	△	○	○	محیط زندگی انسان
△	△	○	○	
△	△	○	○	
△	△	○	○	

ملاحظات	مرحله کاربرد تحقیق			
	برنامه ریزی مسیر	طراحی، برنامه ریزی ساخت	ساخت	تعمیر و نگهداری
ویژگی‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و شرایط زمین	وضعیت فعلی شکل زمین، استراتژی، جبهه کارها، ساختار زمین‌شناسی، سن لایه‌بندی‌ها، ضخامت لایه‌ها، نفوذپذیری	⊙	⊙	△
منابع زیرزمینی	توزیع منابع معدنی، گاز طبیعی و غیره	⊙	⊙	△
شرایط آب زیرزمینی	توزیع و نفوذپذیری آبخوان محصور نشده، فشار آب زیرزمینی و کیفیت آب، جهت و سرعت جریان آب زیرزمینی، توزیع و مقدار چشمه آب	⊙	⊙	△
شرایط آب سطحی	آب سطحی، چشمه آب گرم، دریاچه‌ها و مرداب‌ها، پراکندگی باتلاق‌ها	⊙	⊙	△
گیاهان و جانوران	توزیع گیاهان و جانوران (به‌ویژه گونه‌های کمیاب)، مطالعه اکوسیستم	⊙	⊙	△
ارزایی اثرات بررسی وضعیت بهره‌برداری)	ارزایی اثرات بررسی			
وقفه در ترافیک	بررسی شرایط جاده، حجم ترافیک، مسیر مدرسه، گذرگاه، طول، حداقل عرض، مساحت منطقه، گذرگاه عابر پیاده	△	△	⊙
انتشار، آلودگی فلزات سنگین	pH، هدایت الکتریکی، بررسی آب، آزمایش محتوا و تست انحلال O_2 , H_2O_2 آب چشمه	△	○	⊙
آلودگی هوا	آلاینده‌های هوا (غلظت به‌ویژه CO ، NO_2)، گردوغبار، وضعیت پدیده‌های هواشناسی	△	○	⊙

© بررسی بسیار مهم است

○ بررسی انجام شود

Δ بررسی درجایی که لازم است انجام می‌شود

۲-۳-۳-۲- بررسی قوانین و مقررات تأثیرگذار بر پروژه

در برنامه ریزی یک پروژه، تحقیقات پیشرفته با توجه به وجود هرگونه قوانین و مقررات قابل اجرا^۱، محتوا، رویه و راهکارها باید انجام شود.

۲-۳-۳-۲- الزامات جبران خسارت

الزامات تملک زمین لازم برای پروژه و همچنین موارد مربوط به غرامت از جمله تملک^۲ و فسخ حقوق متعاقب پروژه^۳ باید بررسی شود.

۲-۳-۳-۲- نتایج بررسی ها

۲-۳-۳-۲- کلیات

نتایج بررسی باید به گونه ای مناسب با درک کامل هدف پروژه سازمان دهی شود و به نحوی تنظیم و ثبت شود که در مراحل مختلف پروژه از انتخاب مسیر تا نگهداری و مدیریت قابل استفاده باشد. در نتایج تحقیق باید شرح، حقایق و تفاسیر^۴ به صورت صریح متمایز شوند و از طرفی مسائل حل نشده باید مرتب شوند تا از نظر اهمیت، مورد ارزیابی قرار گیرند. در بسیاری از موارد شرایط زمین و مکان با استفاده از وسایلی که برای اهداف مربوطه مناسب هستند بررسی می شوند. از آنجایی که نتایج رابطه مشخصی با یکدیگر دارند، باید از منظری جامع و با در نظر گرفتن صحت مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند.

۲-۳-۳-۲- طبقه بندی و استفاده از نتایج بررسی های شرایط زمین

نتایج بررسی شرایط زمین باید به طور جامع ارزیابی و به ترتیب اهمیت برای طبقه بندی درست زمین دسته بندی شود. هنگام ارزیابی زمین، خصوصیات زمین باید با استفاده از نتایج بررسی ها به درستی از نقطه نظر ژئوتکنیکی برای امکان طراحی و برنامه ریزی ساخت مناسب بررسی شود. نتایج بررسی شرایط زمین باید با توجه به مراحل و اهداف نشان داده در جدول ۲-۶ به شیوه ای مناسب سازمان دهی و برای تسهیل استفاده از داده ها مرتب شوند. به ویژه، هرگونه تغییر در سطح مقطع تونل، روش حفاری و روش های کمکی که قبلاً در طرح اولیه تعیین شده است ممکن است تأثیر نامطلوب قابل توجهی بر مدت، هزینه ساخت و همچنین ایمنی داشته باشد. برای از بین بردن این عوارض، باید نتایج بررسی شرایط زمین به صورت مؤثر از نظر مهندسی مرتب و ثبت شوند به طوری که بتوان از آن ها به عنوان

¹ existence of any applicable laws and regulations

² acquisition

³ termination of rights subsequent to the project

⁴ facts and interpretations

اصولی برای ارزیابی برنامه‌های کاری خاص^۱، طرح‌ها و ساخت‌وسازها و همچنین منابع مرجع برای نگهداری، مدیریت و پروژه‌های تونل سازی آینده تحت شرایط مشابه استفاده شوند.

جدول ۲-۶- موارد در هر مرحله از بررسی وضعیت زمین

مرحله بررسی	مورد
برنامه‌ریزی برای تنظیم ^۲	شناسایی موانعی که ممکن است برای پروژه، برنامه‌ریزی و انتخاب روش، مشکل ایجاد کنند.
برنامه‌ریزی طراحی و ساخت	شرایط مختلف مانند توپوگرافی و زمین‌شناسی، طبقه‌بندی زمین، شرایط خاص و روش‌های کمکی ^۳
ساخت	تثبیت سطح زمین، مقدار آب ورودی، مقدار جابه‌جایی، پیش‌بینی‌ها و نتایج مانند وضعیت زمین، بررسی روش‌های حفاری و کمکی و ...
تعمیر و نگهداری ^۴	فشار زمین، بدتر شدن زمین و مصالح ^۵ ، نشت آب، تغییر شکل در اثر آسیب دیدن جنگل، نشست زمین، صدا و لرزش پس از استفاده عمومی

توزیع و ویژگی‌های زمین‌شناسی که اغلب مشکل‌ساز است باید در قالب نقشه‌های زمین‌شناسی و نیمرخ‌های طولی زمین‌شناسی ترسیم شوند.

نتایج بررسی وضعیت زمین باید در بخش‌های زیر سازمان‌دهی شوند تا به راحتی در مطالعات مربوط به طراحی و روش‌های ساخت مورد استفاده قرار گیرند:

۱- هدف، محل، محدوده، روش تحقیق و نام مسئول مطالعات

۲- شرح مختصری از توپوگرافی و زمین‌شناسی، همراه با ساختار زمین‌شناسی

۳- نقشه‌های زمین‌شناسی

۴- مقاطع زمین‌شناسی

¹ specific work plans

² Planning for alignment

³ Auxiliary methods

⁴ Maintenance

⁵ deterioration of ground and materials

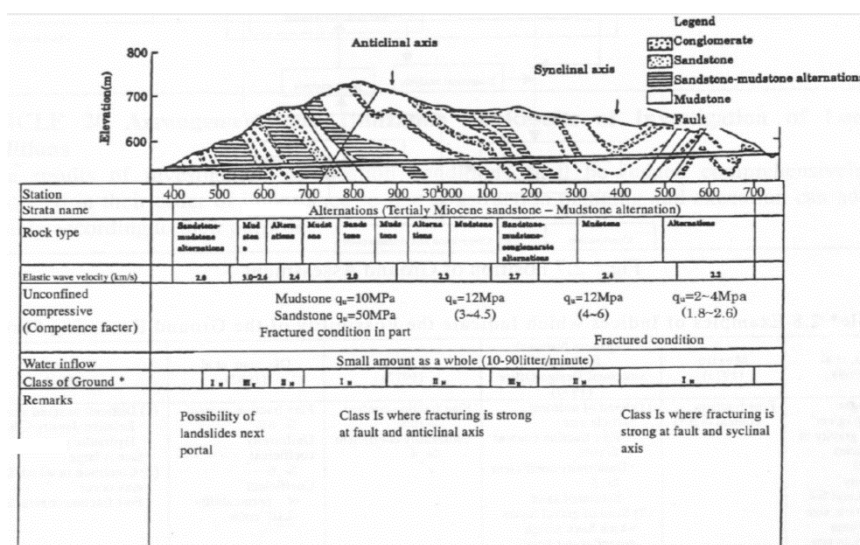
۵- نیمرخ زمین‌شناسی

نیمرخ زمین‌شناسی باید نتایج بررسی شامل نوع سنگ، پارمترهای مقاومتی و مکانیکی، وضعیت درزه داری، طبقه بندی توده سنگ، شرایط آب، محل گسل‌ها و مخاطرات زمین‌شناسی را ثبت کند. توجه ویژه‌ای نیز باید به شرایط زمین خاص برای طراحی و ساخت شود.

هر شرایطی که ممکن است مشکلی ایجاد کند باید به صورت جداگانه و بر اساس احتمال وقوع و اهمیت و همچنین راه‌حل‌ها طبقه‌بندی شود.

در شکل ۲-۲ نمونه از یک نیمرخ زمین‌شناسی نشان داده شده است.

ارزیابی زمین^۱ به معنای ارزیابی زمین با شاخص‌های ژئوتکنیکی، زمین‌شناسی و تجربی مربوط به مقاومت و پایداری زمین و سهولت ساخت بر اساس نتایج بررسی‌ها می‌باشد که به دو دسته تقسیم می‌شوند. اولین روش طبقه‌بندی زمین با استفاده از عوامل کمی و شاخص‌های تجربی باهدف ارزیابی جامع زمین انجام می‌شود. دومین روش که یک روش تحلیلی وابسته به یک مدل ژئوتکنیکی است با استفاده از خواص فیزیکی زمین انجام می‌شود.



*(Reference Data see Annex Table)

شکل ۲-۲ - نمونه‌ای از مشخصات زمین‌شناسی طولی

۱- طبقه‌بندی زمین بر اساس معیارهای طبقه‌بندی:

برای ارزیابی خصوصیات فیزیکی معمولی یک زمین، باید نتایج تحقیقات مختلف به طور جامع بررسی شده و با توجه به تجربیات گذشته و نمونه‌های قبلی مورد ارزیابی قرار گیرد.

i) معیارهای طبقه‌بندی زمین: این معیارها، زمین را بر اساس شاخص‌های کمی طبقه‌بندی می‌کنند. طبقه‌بندی زمین بر اساس معیارهای طبقه‌بندی به طور مؤثر برای اهدافی مانند تعریف شاخص با هدف تعیین شرایط زمین برای

¹ Ground assessment

مناقصه و عقد قراردادها استفاده می‌شود. معیارهای طبقه‌بندی زمین که معمولاً به صورت یک کلاس بیان می‌شود باید شرایط ذیل را داشته باشد:

- ۱- فاکتور طبقه‌بندی باید عینی^۱ و کمی باشد.
 - ۲- فاکتور طبقه‌بندی باید باهدف و طراحی تونل مرتبط باشد.
 - ۳- فاکتور طبقه‌بندی باید در طول کل تونل موردنظر استاندارد^۲ شود.
 - ۴- فاکتور طبقه‌بندی باید از طریق روش بررسی معمولی و آزمایش^۳ به دست آید.
 - ۵- معیار مورد استفاده در طبقه‌بندی باید با طراحی و اجرا مطابقت داشته باشد.
- ii) روش تجربی: موارد (الف) تا (و) که در زیر ارائه شده است ازجمله شرایط زمینی مؤثر بر میزان سختی حفاری تونل‌ها هستند که در دسته‌بندی طبقه زمین و خواص فیزیکی که تعریف دقیق آن‌ها دشوار است قرار می‌گیرند. هنگام تعریف چنین شرایط زمینی، ارزیابی کیفی بر اساس تجربیات گذشته و اسناد مرجع از محل‌های تونل‌سازی قبلی بسیار مهم است.

الف) پایداری جبهه کار

- ب) جریان‌های شدید آب غیرمنتظره
 - ج) توپوگرافی با ریسک فشار موضعی^۴
 - د) ریزش و لغزش زمین در مجاورت پرتال
 - ه) اثرات بر پروژه‌های ساخت مجاور
 - و) زمین با خطر نواحی شکستگی گسلی، آماسی و انفجار سنگ
- زمین بدون سیمان (بدون چسبندگی)^۵ و زمین در یک ناحیه شکستگی گسلی نیاز به مطالعه دقیق با توجه به احتمال ناپایدار شدن یا ریزش به دلیل جریان شدید آب غیرمنتظره دارند. جدول ۲-۷ نمونه‌هایی از شاخص‌ها را در مورد سیال شدن یا نشدن نشان می‌دهد.
- قضاوت در مورد احتمال یا عدم احتمال آماسی شدن زمین گامی مهم در تعیین هندسه تونل، روش حفاری، روش‌های کمکی و مطالعه پس از اعمال تنش‌ها است.
- جدول ۲-۸ نمونه‌هایی از شاخص‌های آماس را نشان می‌دهد.
- جدول ۲-۷- نمونه‌ای از شاخص‌های نشان دهنده احتمال سیال شدن زمین

¹ Objective

² Standardized

³ ordinary investigation and test

⁴ localized pressure

⁵ uncemented ground

Kiya, et al (1993)	Okuzono, et al (1982)	JSCE (1977)	Japanese National Railroads structural Design Office (1977)	Morito (1973)	Yabe, et al (1969)	شاخص ها
۱- پایداری به تنهایی دشوار است - چگالی نسبی $> 80\%$ - گرادیان هیدرولیک در نزدیکی جبهه کار بزرگ است. ۲- شریطی که جریان احتمال رخ دهد - محتوای ریزدانه $\geq 10\%$	- محتوای ریزدانه $\geq 8\%$ - ضریب یکنواختی ≥ 6 - ضریب نفوذپذیری $\leq 10^{-3}$	- محتوای ریزدانه $\geq 10\%$ - ضریب یکنواختی $\geq 4-5$	۱- ماسه با دانه بندی یکنواخت - محتوای ریزدانه $\geq 10\%$ - ضریب یکنواختی ≥ 5 - خاک اشباع ۲- ماسه ی لایه های گراولی که سطح بالایی از آب زیرزمینی را دارند ۳- آبخوان ماسه ای بین لایه های نفوذناپذیر	- محتوای ریزدانه $\geq 10\%$	- واحد وزن $\geq 2/65 \text{ g/cm}^3$ - وزن مخصوص ذرات خاک $\geq 1/7$ - ضریب یکنواختی ≥ 4 ۵۰٪ اندازه ذرات $\geq 1/5 \text{ mm}$ ۱۰٪ اندازه ذرات $\geq 0/15 \text{ mm}$	

جدول ۲-۸- نمونه ای از شاخص های نشان دهنده ماهیت آماسی یا مچاله شوندگی زمین

Yoshikawa, et al (1988)	Sato, et al (1980)	Otsuka, et al (1980)	Japan Railroad Construction Public Corporation (1977)	Nakano (1975)	شاخص هایی که طبیعت مچاله شوندگی یا آماسی را نشان می دهد.
زمین با طبیعت مچاله شوندگی ۱- در طول حفاری - حفاری بدون آب ضروری است - تورم نمونه های گرفته شده زیاد است ۲- $G_n \leq 1.5$ (marked if < 0.5) ۳- محتوی مونتموریلونیت $\leq 20\%$ و محتوی آب ≤ 20 ۴- درجه سست شدگی D زمین با طبیعت مچاله شوندگی ۱- در طول حفاری - نرخ نمونه گیری ^{۱۲} پایین است	۱- محتوای آب $< 20\%$ ۲- وزن مخصوص (خشک) $> 1.8 \text{ gf/cm}^3$ ۳- جذب در تست اول/محتوای آب < 2 ۴- درجه سست شدن C-D ۵- محتوی مونتموریلونیت $< 30\%$ ۶- $RQD < 20\%$	۱- مدول تغییر شکل پذیری $\leq 8000 \text{ kgf/cm}^2$ ۲- مقاومت فشاری غیرمحصور $\geq 40 \text{ kgf/cm}^2$ ۳- وزن مخصوص $\geq 2.05 \text{ gf/cm}^3$ ۴- محتوای آب $\leq 20\%$ ۵- حد سمایع ^۸ $\leq 100\%$ ۶- حد پلاستیک ^۹ ≤ 70 ۷- حد جریان ^{۱۰} ≤ 20 ۸- محتوای ذرات با سایز ۲ میکرومتر یا کمتر، ۳۰ درصد یا بیشتر است. ۹- ظرفیت تبادل یونی ^{۱۱} $\leq 35 \text{ meq/100g}$	شریطی که احتمال خیلی بالای مچاله شوندگی را نشان می دهد. ۱- کانی رسی اصلی در سنگ مونتموریلونیت است. ۲- محتوای ذرات با سایز ۲ میکرومتر یا کمتر، ۳۰ درصد یا بیشتر است. ۳- شاخص پلاستیک ≤ 70 ۴- ظرفیت تبادل یونی ^۶ $\leq 35 \text{ meq/100g}$ ۵- درجه سست شدن ^۷ D ۶- مواد شکسته گسترده در نمونه حفاری نشان از احتمال فشار بالای تورم می باشد.	Competence Factor (G_n) = $\sigma_c / \gamma H$ σ_c : مقاومت فشاری غیر محصور γ : وزن مخصوص H : عمق پوشش ^۵ ۱- $G_n \leq 2$ مچاله شوندگی یا آماسی ۲- $2 < G_n \leq 4$ مچاله شوندگی پایین یا فشار زیاد زمین فرض می شود. ۳- $4 < G_n \leq 6$ فشار بالای زمین فرض می شود. ۴- $6 < G_n \leq 10$ مقداری فشار زمین فرض می شود ۵- $10 < G_n$ تقریباً فشاری از زمین فرض نمی شود	

1 Unit weight

2 Uniformity coefficient

3 Fine fraction content

4 Coefficient of permeability

5 Depth of cover

6 Cation exchange capacity

7 Degree of slaking

8 Liquid limit

9 Plastic index

10 Flow index

11 Cation exchange capacity

12 Core sampling rate

۱-۵ ≤ Gn < ۲-۲ ۳- محتوی مونتموریلونیت ≤ ۲۰% یا محتوی آب ≤ ۲۰%		۱۰- نسبت تورم ≤ ۲٪	- کانی رسی اصلی در سنگ مونتموریلونیت است. شرایطی که احتمال آماس را نشان می‌دهد: ۱- کانی رسی اصلی در سنگ مونتموریلونیت است. ۲- محتوای ذرات با سایز ۲ میکرومتر یا کمتر، ۱۵ درصد یا بیشتر است. ۳- شاخص پلاستیک ≤ ۲۵ ۴- ظرفیت تبادل یونی ≤ 20meq/100g		

$$1 \text{ MPa} = 1 \text{ kgf/cm}^2$$

۲- ارزیابی زمین با مدل ژئوتکنیکی: اگر طراحی یکی تونل با توجه به رفتار زمینی که تونل در آن حفر می‌شود نیاز به رویکرد محافظه‌کارانه داشته باشد آنالیز تئوری و عددی پایداری زمین با ارائه یک مدل ژئوتکنیکی برای آن اجرا می‌شود. به‌منظور تعیین خواص فیزیکی به‌عنوان پارامتر ورودی، آزمایش بار گمانه^۱ یا آزمایش آزمایشگاهی استفاده می‌شود. با این وجود، مقادیر خصوصیات فیزیکی که در محل یا در آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین شده‌اند در بسیاری از موارد به دلیل عدم یکنواختی زمین^۲، وجود ناپیوستگی‌ها و اثرات ناهمسانگردی واقعی نیستند. اگر این مقادیر بدون هیچ اصلاحی استفاده شوند، نتایج آنالیزها با مقادیر اندازه‌گیری شده در طول ساخت برابر نمی‌شوند. با در نظر گرفتن این موضوع، بهتر است مقادیر خصوصیات فیزیکی برای تجزیه و تحلیل با استفاده از هر یک از رویکردهای ذیل تعیین شوند:

الف) خصوصیات فیزیکی که بر اساس آزمایش به دست می‌آیند متناسب با اهمیت درزه^۳ کاهش می‌یابند
ب) نتایجی که از طریق روش مبتنی بر اندازه‌گیری تحلیل برگشتی به دست می‌آیند به‌عنوان مرجع استفاده می‌شوند.
ج) از آنجایی که هر مرجع و سازمان دارای ویژگی‌های فیزیکی استاندارد^۴ خاص خود است، توصیه می‌شود از مقادیری که ارائه می‌کنند استفاده شود.

۲-۴- جایگاه مطالعه و طراحی تونل در مطالعات طرح‌های احداث راه

به‌منظور درک بهتر جایگاه مطالعه تونل در مطالعات طرح‌های احداث و بهسازی راه، خلاصه‌ای از مراحل مطالعات طرح ارائه می‌گردد. مراحل این مطالعات شامل پیدایش (شناسایی)، توجیه اولیه، توجیه نهایی و طراحی تفصیلی

¹ borehole load test

² non-uniformity

³ Fissure

⁴ Standard physical properties

است که باید به ترتیب انجام شود. با توجه به این که شرح خدمات مرحله پیدایش (شناسایی) تهیه نشده است، دستگاه اجرایی می تواند در صورت نیاز، نسبت به تهیه آن اقدام نموده و متناسب با آن فهرست عناوین مطالعات را مشخص کند. به طور اصولی، بهتر است که مطالعات طرح از مرحله پیدایش (شناسایی) شروع گردد ولی شروع آن از مرحله توجیه اولیه نیز بلامانع است.

۲-۴-۱- مطالعات توجیه اولیه طرح احداث راه

هدف از مطالعات توجیه اولیه طرح احداث راه، انجام مطالعات توجیه فنی، مالی، اقتصادی و اجتماعی مقدماتی طرح احداث یک راه جدید است که در برنامه اجرایی بخش حمل و نقل، به عنوان بخشی از شبکه راه های کشور معرفی شده یا بر پایه نتایج مطالعات پیدایش (شناسایی) طرح، ادامه مطالعات آن به صورت راه جدید توجیه گردیده است. در پایان این مطالعات، کریدورهای محتمل اجرای طرح مقایسه می شود و مناسب ترین کریدور راه مورد نظر برای ادامه مطالعات و یا ادامه وضعیت موجود^۱، از سوی مشاور پیشنهاد می گردد.

نکته: فهرست عناوین کلی گزارش مطالعات توجیه اولیه در دو بخش تهیه شده است و به تبع آن نتایج مطالعات در دو بخش جهت تصویب و اظهار نظر به دستگاه اجرایی تسلیم می شود. به این ترتیب که با انجام مطالعات مطابق فهرست عناوین کلی بخش اول مطالعات توجیه اولیه، کریدورهای برتر انتخاب و پیشنهاد می شود و در بخش دوم ارزیابی های مالی و اقتصادی برای کریدورهای برتر انجام و کریدور بهینه انتخاب و به دستگاه اجرایی پیشنهاد می شود.

۲-۴-۲- مطالعات توجیه نهایی طرح احداث راه

پس از پایان مطالعات توجیه اولیه، پذیرش طرح، انتخاب یک کریدور برای ادامه مطالعات، طراحی راه به عنوان کریدور مصوب و در راستای هدف تعیین شده در مطالعات توجیه اولیه انجام می شود. در این مرحله از مطالعات، با جمع آوری اطلاعات لازم و انجام بازدیدها و بررسی های محلی و مطالعات دفتری، کلیات طرح و اجزای آن تعیین و گزینه های مسیر در کریدور مصوب مشخص می گردد و با مقایسه این گزینه ها بر پایه ارزیابی فنی و اقتصادی، گزینه بهینه مسیر انتخاب و نسبت به اجرای آن تصمیم گیری می شود. از این رو مطالعات توجیه نهایی طرح باید دارای دقت کافی برای تصمیم به اجرا یا عدم اجرای طرح و تعیین جذابیت آن برای سرمایه گذاری باشد و تمام اجزای طرح را توصیف نموده و برآورد هزینه ها و زمان بندی آن، دقت کافی برای تنظیم موافقت نامه اجرایی طرح را داشته باشد.

نکته: فهرست عناوین کلی گزارش مطالعات توجیه نهایی در دو بخش تهیه شده است و به تبع آن نتایج مطالعات در دو بخش جهت تصویب و اظهار نظر به دستگاه اجرایی تسلیم می شود. به این ترتیب که با انجام مطالعات مطابق فهرست عناوین کلی بخش اول مطالعات توجیه نهایی، گزینه بهینه در کریدور بهینه، انتخاب می شود و در بخش دوم با

¹ Do Nothing

تصویب گزینه بهینه، مطالعات تکمیلی روی این گزینه انجام می‌شود. در این مرحله گزارش توجیهی لزوم احداث پل، تقاطع یا تونل به‌عنوان کم‌هزینه‌ترین انتخاب، که در اثر پیشنهاد گزینه بهینه پدیدار شده است، نیاز به تهیه خواهد داشت تا با تصویب از سوی دستگاه اجرایی نتایج تکمیلی فنی مطالعات این سازه‌ها در بخش دوم مطالعات توجیه نهایی طرح منعکس شود.

بنابراین در صورتی که احداث گزینه پیشنهادی نیاز به احداث سازه‌های پل، تقاطع و تونل داشته باشد، بعد از تکمیل مشخصات فنی گزینه بهینه و انجام مطالعات تکمیلی زمین‌شناسی، گزارش توجیهی لزوم احداث هر یک از این سازه‌ها تهیه و جهت تصویب به دستگاه اجرایی تسلیم خواهد شد (گزارش توجیهی لزوم احداث به این جهت تهیه می‌شود که دستگاه اجرایی علاوه بر تعیین مشخصات اولیه آن‌ها، از احداث گزینه بهینه با کم‌ترین هزینه در عین فنی بودن آن اطمینان حاصل کند). و نتایج مطالعات آن‌ها که در تعامل با دستگاه اجرایی نهایی شده است، برای تکمیل مطالعات روی گزینه بهینه در بخش دوم مطالعات توجیه نهایی طرح منعکس و استفاده خواهد شد.

۲-۴-۳- مطالعات طراحی تفصیلی طرح احداث راه

پس از پایان مطالعات توجیه نهایی، تصویب گزارش آن انجام می‌شود. در این مطالعات، جزئیات فنی و مهندسی اجرای زیرسازی و روسازی و سایر ارکان طرح تهیه و اسناد مناقصه به‌گونه‌ای آماده می‌گردد که تغییرات احتمالی افزایش و یا کاهش مقادیر کار و برآورد هزینه‌ها به قیمت ثابت به حداکثر ۱۰ درصد در هنگام عملیات ساخت محدود شود.

نکته: فهرست عناوین کلی گزارش مطالعات طراحی تفصیلی همانند مطالعات توجیه نهایی در دو بخش تهیه‌شده است و به‌تبع آن نتایج مطالعات در دو بخش جهت تصویب و اظهارنظر به دستگاه اجرایی تسلیم می‌شود. به‌این ترتیب که با انجام مطالعات مطابق فهرست عناوین کلی گزارش بخش اول مطالعات طراحی تفصیلی که بعد از عملیات تهیه نقشه‌های توپوگرافی تهیه می‌شود، گزینه بهینه به لحاظ طرح هندسی افقی نهایی می‌شود و در بخش دوم مطالعات که بعد از عملیات پیاده کردن و میخ‌کوبی محور طرح انجام می‌شود، جزئیات فنی و مهندسی اجرای زیرسازی و روسازی و سایر ارکان طرح تهیه و اسناد مناقصه آماده می‌گردد.

بعد از تصویب بخش اول مطالعات که اغلب شامل مطالعات موردنیاز جهت نهایی کردن پلان مسیر در تعامل با محدودیت‌های نیم‌رخ طولی و عرضی راه است، عملیات پیاده‌کردن و میخ‌کوبی طرح آغاز می‌شود که پس از دریافت اطلاعات موردنیاز حاصل از این عملیات، طرح به لحاظ نیم‌رخ طولی و عرضی تثبیت و اجرایی می‌شود و در ادامه تمامی گزارش‌های تفصیلی و جداول و نقشه‌های اجرایی موردنیاز احداث راه (جزئیات فنی و مهندسی اجرای زیرسازی و روسازی و سایر ارکان طرح) تهیه و سپس برآورد هزینه اجرای طرح و اسناد مناقصه و مشخصات فنی آماده می‌گردد. به‌طور کلی روال انجام مطالعات در این بخش به شرح ذیل است:



۲-۴-۴- مطالعات توجیه نهایی احداث تونل

مطالعات توجیه نهایی تونل بعد از تصویب مطالعات بخش اول توجیه نهایی راه و بعد از تصویب احداث سازه تونل در گزارش توجیهی لزوم احداث این سازه، در بخش دوم مطالعات توجیه نهایی طرح انجام می‌شود. مطالعات توجیه نهایی تونل شامل مطالعات صحرایی (شناخت نظری ساختگاه و جنس زمین، بررسی وضعیت ناپیوستگی‌ها، مطالعه آب‌های سطحی و زیرسطحی و غیره) و محاسبات و مطالعات دفتری (تهیه نیمرخ‌های عرضی زمین‌شناسی مهندسی، تهیه جدول خواص ژئوتکنیک و ژئومکانیک تونل، تحلیل پایداری استاتیکی و دینامیکی و بررسی فنی مالی و زیست‌محیطی گزینه‌ها، انتخاب و معرفی گزینه مناسب) است. بعد از انجام مطالعات صحرایی و محاسبات و مطالعات دفتری، اگر تونل به‌عنوان گزینه برتر و پیشنهادی معرفی شود، در بخش دوم مطالعات توجیه نهایی، موارد زیر انجام می‌شود:

- شناسایی تمامی جوانب مختلف گزینه‌ها و متمایز ساختن هزینه‌های ساخت آن‌ها.
- انتخاب روش اجرا و بررسی صعوبت‌ها.
- مطالعات تهویه.
- مطالعات زیست‌محیطی.
- تحلیل و طراحی اولیه پوشش موقت و دائم تونل و تهیه نقشه‌های اولیه.
- تحلیل اولیه اثر اعوجاج‌های رویداد زمین‌لرزه بر تونل، بر اساس انجام مطالعات تحلیل خطر و برآورد پارامترهای طراحی لرزه‌ای.
- طراحی سیستم روسازی و زهکشی در تونل‌های راه با مقایسه فنی و مالی و پیشنهاد سیستم روسازی و زهکشی مناسب.
- تهیه نقشه کروکی محل گمانه‌های موردنیاز برای استفاده در مطالعات طراحی تفصیلی تونل.

۲-۴-۵- مطالعات طراحی تفصیلی احداث تونل

تهیه نقشه‌های توپوگرافی تونل، بعد از تصویب مطالعات بخش اول طراحی تفصیلی طرح و موازی با عملیات پیاده کردن و میخ‌کوبی طرح انجام می‌شود و مطالعات طراحی تفصیلی تونل زمانی شروع خواهد شد که طرح به لحاظ نیم‌رخ طولی و عرضی تثبیت شده باشد تا از انجام دوباره‌کاری‌های احتمالی به دلیل تغییرات در مشخصات طرح جلوگیری شود.

• مطالعه و تکمیل مدارک موجود

- مطالعه گزارش توجیهی تونل در مطالعات توجیه نهایی.
- تهیه نقشه‌های طرح هندسی تونل و توپوگرافی آن.
- مطالعه صحرایی تونل از نظر زمین‌شناسی مهندسی و آب زمین‌شناسی^۱.
- اکتشافات میدانی محل تونل و دهانه‌ها.

• مطالعات تکمیلی برای طراحی جزئیات تونل

- شناسایی دسته‌درزه‌های معرف منطقه
- تشریح وضعیت توده‌های سنگی در مناطق مختلف تونل
- تشریح وضعیت زمین در دهانه‌های ورودی و خروجی تونل و تعیین طبقه‌بندی توده سنگی
- تعیین اطلاعات ژئوهیدرولوژیک تونل و توصیف رفتار مصالح جداره تونل در حضور آب
- مطالعات تحلیل خطر زمین‌لرزه و برآورد پارامترهای طرح لرزه برتاب.
- مطالعه پایداری دهانه‌های تونل و ترانشه‌های مجاور.

• مطالعات سازه‌ای

- تحلیل سازه‌ای تونل به صورت استاتیکی و دینامیکی
- تعیین تنش‌های ناشی از سایر عوامل طبیعی از جمله تغییرات، درجه حرارت، یخبندان، رطوبت، نشست و غیره.
- تعیین مشخصات کلی طراحی، فرضیات محاسبات، تنش‌های مجاز و غیره.
- تعیین مشخصات کلی اجزاء سازه‌ای که به دلیل اجرایی مورد نیاز است
- بررسی پوشش سازه‌ای و غیر سازه‌ای در برابر حرکات زمین‌لرزه
- تعیین بارگذاری‌های مربوط به طراحی سازه تونل.
- بررسی اندرکنش بین تونل‌های دوقلو و یا بین تونل و سازه مهم مجاور آن و تعیین فاصله بهینه بین آن‌ها.
- طرح و محاسبه اجزاء اصلی بدنه تونل
- محاسبات رادیه، پی و پاتاق.

¹ hydrogeological

- مطالعه درزه های انبساط و اجرایی
- بررسی و پیشنهاد طرح نحوه حفاری با توجه به نوع خاک و سنگ
- بررسی لزوم عملیات پیش تحکیمی خاک برای حفاری
- بررسی نوع سازه بتنی مورد استفاده در پوشش

• طرح پوشش

- طرح پوشش اولیه تونل
- طرح پوشش نهایی تونل
- مطالعه مدل های رویداد آتش سوزی در مجاورت داخل تونل

• تعیین محل گشودن جبهه های حفاری

• تهیه دستورالعمل رفتار نگاری

• مطالعات تهویه و روشنایی

• مطالعات زیست محیطی

• مطالعات ایمنی و تجهیزات تونل

• مطالعات زیرسازی و روسازی تونل

• برآورد هزینه

۲-۴-۵-۱ مشخصات فنی خصوصی شامل مشخصات مصالح و مشخصات فنی عملیات

با توجه به اینکه مشخصات هندسی تونل، جنس سنگ های دربرگیرنده، اجزای تونل (پارکینگ، راه دسترسی ماشین رو، راه دسترسی نفر رو و سایر موارد)، وضعیت ناپیوستگی ها و غیره در تونل می تواند متفاوت باشد در نتیجه روش حفاری، سیستم نگهداری اولیه، سیستم نگهداری ثانویه، تهویه و روشنایی و ... نیز می تواند متفاوت باشد. لذا لازم است که بعد از انجام مطالعات طراحی تفصیلی، مشخصات فنی خصوصی مختص پروژه تهیه شده و به عنوان یکی از مدارک مهم اسناد مناقصه، ارائه گردد.

۲-۴-۵-۲ متره و برآورد احداث تونل

متره و برآورد، یکی از زیرمجموعه های مدیریت پروژه است که جهت پیش بینی قیمت اجرای پروژه های عمرانی به کار می رود. متره و برآورد، به فرایند اندازه گیری و محاسبه مقدار مصالح، نیروی انسانی و ماشین آلات مورد نیاز برای اجرای یک پروژه ساختمانی و عمرانی گفته می شود. از آنجاکه معیار تصمیم گیری درباره انجام و یا عدم انجام یک پروژه در مطالعات اولیه، به سه فاکتور اصلی هزینه، زمان و کیفیت وابسته است، در هر پروژه عمرانی (تونل، راه، ابنیه و ...) انجام متره و برآورد دقیق، جزء جدانشدنی تصمیم گیری و مدیریت پروژه است.

در ابتدا مشخص شدن دو بعد از مسئله برای مجریان پروژه نقش اساسی دارد:

- مقدار مصالح موردنیاز، در طول پروژه چقدر است تا در طول پروژه با توجه به زمان‌بندی نسبت به تهیه آن‌ها یا سفارش مصالح اقدام نمایند،
 - هزینه مالی پروژه چقدر خواهد بود؟
- متره عبارت است از «محاسبه و اندازه‌گیری مقادیر مصالح موردنیاز، برای اجرای یک پروژه یا محاسبه مقادیر مصالح به‌کاررفته و مصرف‌شده در یک پروژه اجرا شده». برآورد عبارت است از «قیمت‌گذاری مقادیری که با توجه به واحدهای موردنیاز در قسمت متره به‌دست‌آمده».
- در کارهای عمرانی، پس از انجام متره، برآورد ریالی پروژه بر اساس فهرست‌بها، تعیین می‌شود. فهرست‌بها، فهرستی از قیمت‌های مختلف از حجم واحد مصالح یا خدمات قابل‌ارائه پیمانکاران عمرانی است. برای محاسبه هزینه کلی یک پروژه، بر اساس یک فهرست‌بهای پایه، کافی است حجم‌های مربوط به آن پروژه را، در میزان قیمت مشخص‌شده آن‌ها در فهرست‌بها ضرب نمود و مجموع آن‌ها، قیمت پروژه بر اساس فهرست‌بهای آن سال خواهد بود.
- هرچقدر مطالعات با دقت بیشتری انجام‌شده و شناخت بیشتری از تونل کسب شود، قیمت تمام‌شده تونل به برآورد اولیه نزدیک‌تر بوده و در طول ساخت تونل، تغییرات کمتر خواهد بود.

۲-۴-۵-۳- برنامه زمان‌بندی

پس از انجام مطالعات طراحی تفصیلی و تهیه نقشه‌های اجرایی، طی طرح جامع^۱، چارچوب کلی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اجرایی پروژه همراه با مستندات و منابع آن تهیه می‌شود.

همچنین در برنامه زمان‌بندی کلی اولیه^۲ فعالیت‌های اجرایی یک پروژه تا سطح پروژه و محدوده‌های کاری، با در نظر گرفتن شرایط قراردادی، مدت‌زمان و تاریخ شروع و پایان هر فعالیت مشخص‌شده و به همراه گانت چارت توسط نرم‌افزارهای مربوطه تهیه می‌شود.

به‌علاوه، برنامه زمان‌بندی تفصیلی^۳ اجرایی اولیه تهیه می‌شود. طی این برنامه زمان‌بندی، فعالیت‌ها بر اساس روش اجرا و ساختار شکست پروژه تا سطح فعالیت ریز شده و منابع و هزینه مربوط به هر فعالیت به همراه اوزان زمانی، ریالی و فیزیکی در آن مشخص می‌شود.

در این مرحله همچنین نیروی انسانی موردنیاز برای اجرای پروژه به‌طور واضح و دقیق مشخص می‌شود.

¹ Master Plan

² Overall Schedule

³ Baseline Schedule

۲-۵- هندسه تونل

۲-۵-۱- مقدمه

تونل های راه، معمولاً دو خطه یا سه خطه هستند. در راه های مجزا، معمولاً هر یک از جهت های رفت و برگشت، دارای تونل مجزا می باشد. این امر به لحاظ تهویه هوای داخلی تونل نیز مناسب تر است. تونل ها عموماً بر اساس روش اجرا به دو دسته اصلی تقسیم می شوند: تونل های ساخته شده با روش های معدنی و روش های کند و پوش؛ که بر اساس نوع محل حفاری سنگ سخت و یا زمین نرم متفاوت است.

۲-۵-۱-۱- گروه بندی تونل ها

تونل ها را می توان به دو صورت زیر دسته بندی کرد:

الف) براساس نوع مسیر راه

ب) براساس شکل مقطع.

• دسته بندی تونل ها بر حسب نوع مسیر راه

۱- تونل های یک طرفه (که معمولاً در آزادراه ها و راه های شریانی جدا شده ساخته می شود).

۲- تونل های دوطرفه (که معمولاً در راه های شریانی جدا نشده و جمع کننده ساخته می شود).

• دسته بندی تونل ها براساس شکل مقطع تونل

۱- تونل های طاقی شکل (با یک یا چند شعاع قوس مثل تونل های نعل اسبی، بیضی، و غیره)،

۲- تونل های با مقطع دایره ای کامل

۳- تونل های با مقطع مستطیلی.

در این آیین نامه، از گروه بندی بر اساس نوع مسیر راه استفاده شده است.

۲-۵-۲- مقطع عرضی

ابعاد مقطع عرضی تونل، تابع حجم و نوع ترافیک، تجهیزات نصب شده تونل و شرایط زمین شناسی مسیر تونل است. علاوه بر این، طول و محل قرار گرفتن تونل و تعداد تونل های پشت سر هم نیز از عوامل مؤثر است. اجزای مقطع عرضی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. با توجه به این که در مقایسه با راه های واقع در هوای آزاد امکان توسعه تونل ها حین بهره برداری وجود ندارد، لذا بهتر است نکات ذیل مدنظر قرار گیرد:

۱- پیش بینی فضای لازم جهت تأمین نیاز ترافیک آینده (حداقل بیست سال پس از افتتاح تونل).

۲- در راه های دوطرفه با بیش از سه خط عبور، به جای یک تونل با قطر بزرگ، احداث دو تونل با قطر کوچک، به دلایل

زیر توصیه می شود:

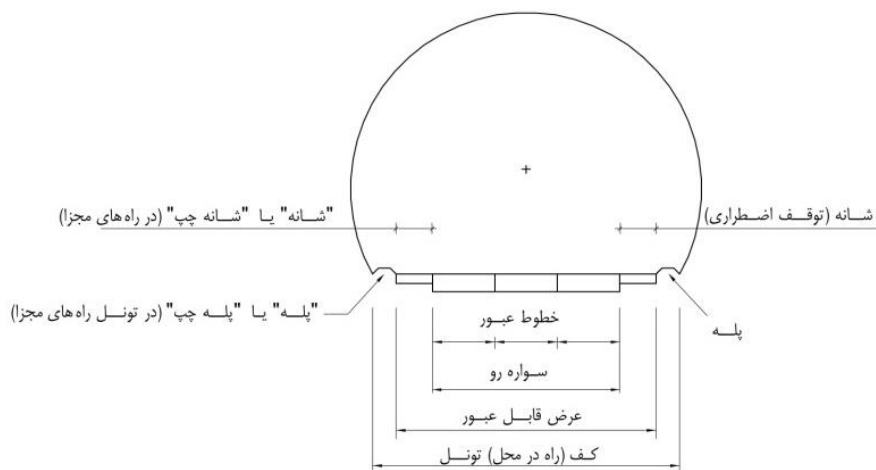
الف) با ساختن تونل اول می توان از آن به صورت دوطرفه استفاده کرد.

ب) با ساختن تونل دوم، از هر تونل می توان در یک جهت استفاده کرد.

پ) هزینه ساخت و نگهداری دو تونل با قطر کوچک، از یک تونل با قطر بزرگ کمتر است.

ت) در آینده دور می‌توان تونل سوم را ساخت و از یکی از تونل‌ها برای یک‌جهت و از تونل دیگر برای جهت مخالف ولی از تونل سوم (که معمولاً تونل وسط خواهد بود) برای جهت ترافیک زیاد استفاده کرد. به این ترتیب جهت عبور از تونل وسط، بسته به جهت ترافیک زیاد، در ساعت‌های اوج تغییر می‌کند.

۳- پیش‌بینی فضای مناسب برای روشنایی و تهویه تونل‌ها در صورت نیاز.



شکل ۲-۳- اجزاء مقطع عرضی تونل

۲-۵-۲-۱- سواره رو

الف - تعداد خط‌های عبور

تعداد خط‌های عبور داخل تونل همانند قسمت‌های عمومی راه است. چنانچه در توسعه آتی راه، افزایش خط‌های عبور منظور شده باشد، وضع نهایی خط‌ها را ملاک عمل قرار داده و تونل را طبق وضع نهایی می‌سازند یا احداث تونل دیگری را برای آینده در نظر می‌گیرند.

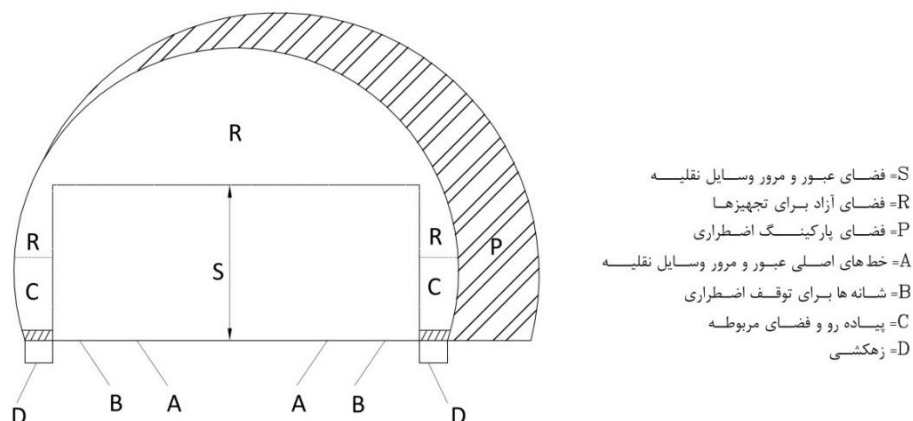
ب - عرض خط‌های عبور

معمولاً عرض معمولی خط‌های اصلی در داخل تونل برابر با عرض سواره رو در خارج تونل است. البته بهتر است عرض هر خط عبور تونل در راه اصلی و راه فرعی در بلند مدت، ۳/۶۰ متر در نظر گرفته شود.

۲-۵-۲-۲- شانه‌ها

شانه‌های راه در تونل بدون وجود اختلاف تراز به سواره‌رو متصل می‌شود (شکل ۲-۴). کاهش عرض سواره‌رو و شانه‌ها در تونل پیشنهاد نمی‌شود و لازم است برابر با عرض راه منتهی به تونل باشد. کاهش عرض سواره‌رو مستلزم کسب مجوز مربوطه است. با افزایش سرعت طرح، عرض شانه تونل باید متناسب با آن و حداکثر تا عرض شانه راه منتهی به تونل افزایش یابد. در تونل‌های موجود، تبدیل عرض شانه‌های راه در بیرون تونل به شانه‌های کاهش یافته داخل تونل، به‌طور تدریجی و قبل از ابتدا و پس از انتهای تونل اعمال می‌شود.

شانه‌های راست و چپ در داخل تونل فاقد هرگونه مانعی هستند و برای پیشگیری از برخورد خودروهای عبوری با دیوارهای تونل در نظر گرفته می‌شوند. در ضمن از شانه سمت راست برای توقف اضطراری نیز استفاده می‌شود.



شکل ۲-۴- مقطع تونل به همراه پیاده‌روها، شانه‌ها، زهکش و فضای ویژه توقف‌گاه (پارکینگ) اضطراری

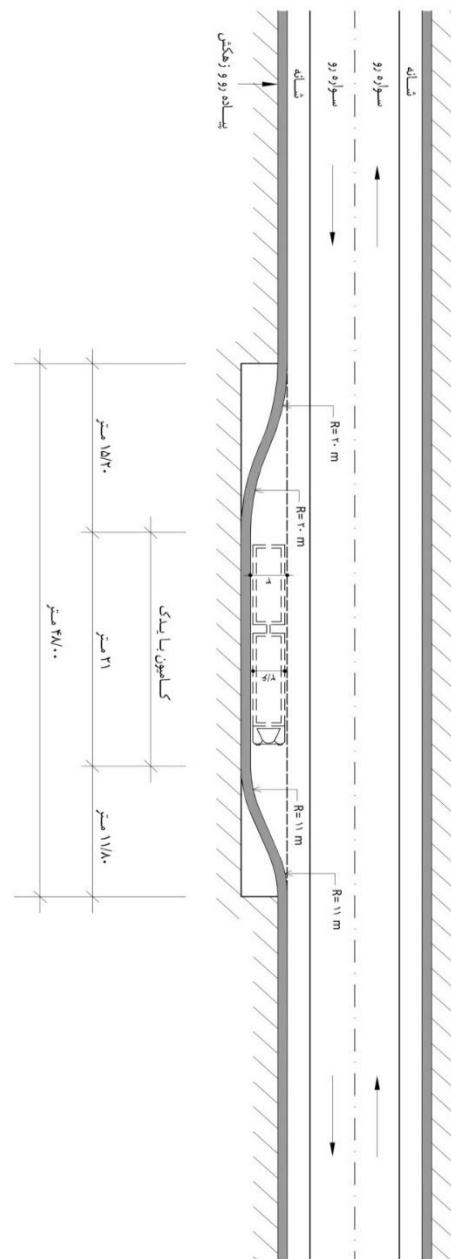
۲-۵-۲-۳- توقف‌گاه اضطراری

در تونل‌های با طول بیش از ۱۰۰۰ متر، باید در هر ۵۰۰ متر یک توقف‌گاه اضطراری با مشخصاتی احداث شود که در شکل ۲-۳ و شکل ۲-۴ و شکل ۲-۵ نشان داده شده است. در تونل‌های دوطرفه بهتر است که توقف‌گاه‌های دوطرف در مقابل هم قرار نگیرد.

۲-۵-۲-۴- پیاده‌روها

معمولاً ورود عابران پیاده به داخل تونل‌های آزادراه‌ها مجاز نیست و پیاده‌روهای غیر همسطح در تونل‌های غیرآزاد راهی فقط برای استفاده ماموران بهره‌برداری و تخلیه اضطراری احداث می‌شود.

حداقل ارتفاع پیاده‌رو از لبه راه ۲۰ سانتی‌متر و حداکثر آن ۴۰ سانتی‌متر باشد. توضیح این که هر چه ارتفاع پیاده‌رو بیشتر باشد، ایمنی عابر پیاده در مقابل تصادف، بیشتر و دسترسی به آن نیز مشکل‌تر است. برخورد به این پیاده‌روها که مثل جدول عمل می‌کنند، از نظر ایمنی وسایل نقلیه نیاز به حفاظ کناری و میانه دارد و بهتر است از حفاظ ایمنی مناسب استفاده شود.



شکل ۲-۵- مشخصات هندسی توقفگاه اضطراری در تونلها

۲-۵-۲- ارتفاع

حداقل (گاباری) ارتفاع آزاد تونل از سطح سواره رو تا تاسیسات تونل مانند روشنایی و سیستمهای تهویه، ۵/۲۰ متر (۵/۱۰ متر مجاز + ۱۰ سانتی متر روکش آسفالت آتی) است.

تبصره ۱. با توجه به ۱۰ سانتی متر ضخامت روکش آسفالت آتی، برای ضخامت بیشتر از ۱۰ سانتی متر، روکش قبلی تراشیده و روکش جدید جایگزین می شود.

تبصره ۲. در صورتی که تونل نیاز به روشنایی یا تهویه داشته باشد و نتوان از فضاهای موجود در مقطع تونل برای تأمین نیازمندی های فوق استفاده کرد، ناچار فضای اضافی مناسب برای روشنایی و یا سیستم تهویه با توجه به رعایت معیارهای حداقل فضای آزاد در نظر گرفته می شود.

۲-۵-۲-۶- شیب عرضی

تخلیه آب ناشی از نزولات جوی در تونل مطرح نیست ولی برای تخلیه سریع آب هایی که به هر دلیل دیگر بر کف آن جاری می شود، سواره رو و شانه باید دارای شیب عرضی و طولی مناسب باشد. شیب عرضی سواره رو و شانه در داخل تونل، برای قسمت های مستقیم و قوس های باز مشابه سایر قسمت های راه است و معمولاً ۱ تا ۱/۵ درصد در نظر گرفته می شود. برای محاسبه شیب عرضی سواره رو در قوس های افقی در تونل، می توان ضوابط مربوط به راه ها را ملاک عمل قرار داد.

۲-۵-۲-۷- سرعت طرح

سرعت طرح برای تونل اغلب از مسیر راهی که تونل در آن قرار گرفته، کمتر است. مقدار سرعت طرح انتخاب شده نه تنها در تعیین مشخصات هندسی تونل تأثیر دارد، بلکه در موارد زیر نیز مؤثر است:

- ♦ طول مربوط به روشنایی اضافی ورودی
- ♦ آغاز روشنایی کمتر در جایی که فاصله دید از فاصله دید توقف، بیشتر باشد.
- ♦ فشرده شدن هوای تونل توسط وسایل نقلیه عبوری (اثر پیستونی وسایل نقلیه در امر تهویه)
- ♦ آلودگی هوای تونل

۲-۵-۲-۸- پیاده رو

پله های طرفین، مرز بخش قابل عبور تونل را مشخص کرده و مانع برخورد خودروهای عبوری با دیوارها می شوند. پله به صورت جدول، از کف بلندتر و برای استفاده اضطراری پیاده است. تخلیه آب و عبور کابل، معمولاً از طریق فضای خالی داخل پیاده رو صورت می گیرد. در تونل با مقطع منحنی، حداقل عرض پیاده رو ۶۰ سانتیمتر و در تونل با دیواره قائم، حداقل عرض پیاده رو ۷۵ سانتیمتر می باشد.

۲-۵-۳- نقشه مسطحه

پارامترهایی که لازم است در طراحی نقشه مسطحه تونل به آن دقت شود عبارت اند از:

- فاصله دید توقف
- در تعیین فاصله دید توقف در تونل ها، چند نکته زیر مدنظر قرار می گیرد:
- دود وسایل نقلیه، که باعث کاهش دید می شود.
- خیس و تر بودن سطح راه، که باعث کاهش قدرت ترمز می شود.
- شعاع های خیلی کم، مسائل ساختمانی و اجرایی دشواری را از نظر هدایت دستگاه های حفاری یا انطباق قالب های طاقی شکل مطرح می سازد. به این دلیل، پیش بینی شعاع های بالاتر از ۵۰۰ متر الزامی است.

با توجه به عوامل بالا، حداقل فاصله دید در تونل‌های واقع در آزادراه‌ها، بزرگراه‌ها و راه اصلی جداشده، ۱۲۰ متر و در سایر راه‌های اصلی و راه‌های فرعی، ۸۰ متر است. در قوس‌های افقی، باید دیواره تونل را به‌عنوان مانع دید در نظر گرفته و فاصله آزاد جانبی را برای تأمین فاصله دید توقف محاسبه کرد.

- **راه در بخش‌های ابتدایی و انتهایی تونل**

در بخش ابتدایی تونل یک‌طرفه بهتر است که از پیش‌بینی قوس افقی تا صد متر قبل از محل شروع آن اجتناب شود. در بخش انتهایی نیز در صورت امکان، پیش‌بینی قوس با شعاع بزرگ به‌منظور اجتناب از هدایت محور خروجی تونل در جهت طلوع و یا غروب آفتاب، جهت ممانعت از خیرگی چشم توصیه می‌شود. البته در مورد تونل‌های دوطرفه سعی می‌شود در صورت امکان، هر دهانه تونل واجد شرایط بالا باشد.

- **تقاطع‌ها و دسترسی‌ها در نزدیکی ورودی و خروجی تونل**

برای ممانعت از کاهش سرعت، باید از پیش‌بینی تقاطع یا دسترسی بلافاصله در نزدیکی دهانه‌های تونل اجتناب شود. حداقل یک‌فاصله ۳۰۰ متری بین ورودی‌ها و خروجی‌ها و دهانه‌های تونل رعایت شود.

- **راه در حوالی ورودی تونل**

در نواحی نزدیک به ورودی تونل در هوای آزاد، نباید هیچ نوع مانع مزاحم از نظر قابلیت دید وجود داشته باشد و دهانه تونل باید حداقل ۱۵ ثانیه قبل از ورود به آن قابل‌رؤیت باشد. این فاصله برای سرعت ۶۰ و ۸۰ کیلومتر در ساعت به ترتیب برابر ۲۵۰ و ۳۳۰ متر است.

فصل سوم

بررسی‌های زمین‌شناسی

۳- بررسی های زمین شناسی

۳-۱- بررسی شرایط زمین

۳-۱-۱- زمین شناسی عمومی

در سال های اخیر و به دنبال افزایش نیاز به ایجاد فضاهای زیرزمینی با ابعاد بزرگ تر و در اعماق بیشتر یا حفر آن ها در زمین های با شرایط نامناسب، از جمله در زیر آب، ضرورت شناسایی هرچه کامل تر شرایط زمین ضرورت یافته است. تجربه نشان داده است که اگر این گونه بررسی ها نادیده گرفته شود یا به نحو صحیح انجام نشود عواقب ناگوار یا حداقل طولانی تر شدن زمان اجرای پروژه و افزایش هزینه ها را به دنبال خواهد داشت.

مطالعات زمین شناسی معمولاً توسط یک یا تلفیقی از روش های زیر صورت می گیرد:

گردآوری اطلاعات موجود، پرس و جوهای محلی، استفاده از عکس های هوایی، نقشه ها و نیمرخ های توپوگرافی، زمین شناسی و ژئوتکنیک، ترانسه، گمانه و تونل اکتشافی و سرانجام روش های ژئوفیزیک و سایر موارد. هر یک از این روش ها کارایی و نواقص خاص خود را دارند. در این گونه بررسی ها تنها پس از آن که روش ساده تر و کم هزینه تر نتوانست اطلاعات مورد نیاز را ارائه دهد از روش پیچیده تر، هزینه و زمان برتر استفاده می شود. نتیجه بررسی های زمین شناسی مسیر یک تونل یا محدوده یک فضای زیرزمینی معمولاً به صورت گزارشی که همراه با نقشه ها، نیمرخ ها و نمودارهای مربوطه است به مهندس طراح ارائه می شود. در برخی موارد بررسی های زمین شناسی باید در تمام طول اجرای پروژه و حتی در زمان بهره برداری از آن نیز ادامه یابد.

همان طور که در فصل قبل اشاره شد تونل ها و فضاهای زیرزمینی برای مقاصد متنوعی حفر می شوند که می توان موارد زیر را نام برد:

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

(ب) تونل های هدایت آب (تونل های انحراف آب، تونل های آبگیر، تونل های آبرسانی شهری و تونل های تخلیه آب و فاضلاب)

(ج) فضاهای زیرزمینی بزرگ (ایستگاه های مترو، نیروگاه ها، انبارهای زیرزمینی و کارگاه های استخراج مواد معدنی) طراحی هریک از فضاهای فوق مستلزم دسترسی به داده های مناسب و به کارگیری تمهیدات ویژه است. در هر مورد طراح باید ضمن آگاهی دقیق از شرایط زمین، ابتدا در جهت بهبود کیفیت مصالحی که قرار است تونل در آن حفر شود اقدام نماید. در بسیاری از زمین ها تونل های حفر شده نمی توانند خودنگهدار باشند و برای پایداری آن ها باید از سیستم نگهداری مناسب استفاده کرد.

به نظر می رسد که مهم ترین عامل در طراحی تونل، یا هر فضای زیرزمینی دیگر، تأمین پایداری آن است. قرارگیری این گونه سازه ها در میان مصالح طبیعی، یعنی سنگ و خاک، باعث شده است که شرایط زمین شناسی نقش اصلی را

در پایداری ایفا نماید. متأسفانه بسیاری از داده‌های زمین‌شناسی را نمی‌توان به‌طور مستقیم در طراحی سازه‌های زیرزمینی به کار گرفت. از این‌رو، در سال‌های اخیر کوشش‌های بسیاری برای طبقه‌بندی ژئوتکنیکی سنگ‌ها، یعنی ارائه ویژگی‌های آن‌ها به زبان مهندسی صورت گرفته است. این طبقه‌بندی‌ها امروزه به‌طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند و تجربه نشان داده است که به‌کارگیری این طبقه‌بندی‌ها بدون آگاهی از محدودیت‌های آن‌ها و شرایط پیچیده‌ای که زمین می‌توان داشته باشد، ممکن است مخاطره‌آمیز باشد.

۳-۱-۲- چینه‌شناسی

چینه‌شناسی شاخه‌ای از علم زمین‌شناسی است که درباره نحوه تشکیل، توالی و ارتباط بین سنگ‌های لایه‌لایه، یعنی چینه‌های پوسته زمین بحث می‌کند. بررسی سه گروه سنگ‌های سازنده پوسته زمین اطلاعات با ارزشی را در مورد نحوه تشکیل سنگ‌ها، محیط تشکیل آن‌ها و بالاخره تغییرات ثانویه که بعد از تشکیل در سنگ‌ها به وقوع پیوسته، ارائه می‌دهند. از میان گروه‌های سه‌گانه رسوبی، آذرین و دگرگونی، بیشترین اطلاعات را می‌توان از سنگ‌های رسوبی لایه‌لایه، مخصوصاً نمونه‌های فسیل دار آن‌ها به دست آورد. زمین‌شناسان توانسته‌اند با تحلیل این‌گونه داده‌ها مقیاس دقیقی برای زمان زمین‌شناسی تدارک ببینند و بر مبنای آن رخدادهای تاریخی زمین را دسته‌بندی نمایند.

۳-۱-۳- مخاطرات زمین‌شناسی

یکی از اهداف اصلی مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، شناسایی و پیش‌بینی مخاطرات زمین‌شناسی و بررسی اثر آن‌ها بر پروژه است. شناسایی مخاطرات زمین‌شناسی محتمل در مسیر تونل یکی از اصلی‌ترین مطالعات مورد نیاز برای انتخاب مسیر، طراحی روش اجرای تونل‌ها و انتخاب نوع و ویژگی‌های ماشین حفار مورد نیاز است. چنانچه در طی مطالعات زمین‌شناسی، مخاطرات زمین‌شناسی به‌درستی شناسایی و پیش‌بینی نشود طراحی و انتخاب روش مناسب برای غلبه بر آثار آن‌ها مشکل خواهد بود. پدیده‌های مخاطره‌آمیز زمین‌شناسی بسته به شرایط زمین، آب زیرزمینی، تنش‌های برجا و غیره در مسیر تونل‌ها می‌توانند بسیار متنوع بوده و مکانیسم‌های مختلفی داشته باشند. برای شناسایی مخاطرات زمین‌شناسی لازم است ویژگی‌های مختلف زمین‌شناسی و پارامترهای مهندسی توده سنگی و خاکی مسیر تونل مورد بررسی و شناسایی قرار گیرد.

الف) نشت و هجوم آب زیرزمینی به داخل تونل

وجود آب در تونل می‌تواند بر روند فعالیت‌های تونل‌سازی بسیار مؤثر باشد. در حفاری مکانیزه حضور آب هم بر نرخ نفوذ و هم بر ضریب بهره‌وری دستگاه تأثیرگذار است. مقاومت برخی سنگ‌ها به‌ویژه سنگ‌های رسوبی، به حضور آب حساس است. در حقیقت حضور آب زیرزمینی با افزایش درجه دگرسانی توده سنگ و کاهش مقاومت ماده سنگ و مواد پرکننده درزه‌ها نقش مهمی در وقوع ریزش‌ها و ناپایداری دیواره‌های تونل دارد. از سوی دیگر حضور آب می‌تواند باعث افزایش تولید گل و ایجاد مشکل در بارگیری مواد حفرشده، گل‌گرفتگی بخش‌های مختلف کله حفاری و

دیسک کاترها و در نتیجه کاهش نرخ نفوذ ماشین شود که در مجموع کاهش ضریب بهره‌وری را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر این هجوم آب قابل توجه به داخل تونل می‌تواند با ایجاد مزاحمت برای کارکنان و فعالیت‌های مختلف در داخل تونل و نیاز به پمپاژ آب به خارج از فضای حفاری شده، ضمن افزایش هزینه اجرای پروژه، کاهش بهره‌وری و نرخ پیشروی را به دلیل افزایش سختی کار برای کارکنان داخل تونل به دنبال داشته باشد.

ب) نشت گازهای سمی

نشت گازهای سمی و خطرناک مانند سولفید هیدروژن و متان به داخل تونل به دلیل کاهش توان کارکنان، کاهش شیفت‌های کاری، تعطیلی مکرر فعالیت در تونل و سایر آثار جانبی می‌تواند نقش مهمی در کاهش راندمان حفر تونل داشته باشد. در مجموع تجربه حفاری در محیط‌های گازدار کم بوده و این نشانه نادر بودن شرایط فوق در پروژه‌های تونلی است اما خطرات ناشی از ورود گاز نسبت به سایر چالش‌ها بحرانی‌تر بوده و می‌تواند منجر به مرگ یا انفجار در تونل شود.

در مناطق نفت‌خیز مانند نواحی جنوبی و غربی ایران، به هنگام حفاری گمانه‌های اکتشافی در مطالعات مرحله مقدماتی و تفصیلی وجود گاز در گمانه‌ها باید مورد توجه قرار گیرد و در صورت احتمال وجود گازهای سمی و یا متان باید ایستگاه‌های نظارتی مناسب در چال‌های حفاری نصب شود. این مسئله در تونل‌هایی که بر روی مخازن نفتی یا در سازندها و ساختارهای مستعد تشکیل تله‌های نفتی و گازی، حفر می‌شوند، از اهمیت بیشتری برخوردار است. در زمان ساخت تونل هم لازم است تمهیدات لازم برای هشدار بر روی ماشین فراهم باشد. همچنین لازم است نقاط حساس با چال زنی پیشرو تحت نظارت قرار گیرند. مهم‌ترین راهکار اجرایی برای کاهش آثار زیان‌بار حفاری در محیط‌های گازدار استفاده از سیستم تهویه مناسب برای تونل است.

ج) گسیختگی ساختاری در سینه‌کار تونل

یکی از مشکلاتی که در برخی توده سنگ‌های درزه‌دار و بلوکی می‌تواند بر عملکرد ماشین‌های حفر تونل تأثیر منفی داشته باشد، جدا شدن بلوک‌های سنگی از سینه‌کار تونل و ایجاد مزاحمت برای کاترهد و دیسک کاترها است. در چنین زمین‌هایی به هنگام توقف نباید کاترهد به عقب کشیده شود و لازم است با حفظ تماس کاترهد با سینه‌کار تونل مانع از جدا شدن بلوک‌ها و افتادن آن‌ها به فضای جلوی کاترهد شد.

د) پتانسیل مچاله شوندگی زمین

رفتار مچاله شوندگی یا لهیدگی، مرتبط با خواص تغییر شکل‌پذیری و مقاومتی توده سنگ ضعیف است. ضعیف بودن مقاومت ژئومکانیکی سنگ‌ها و ضخامت زیاد روباره از شرایط لازم برای وقوع پدیده لهیدگی هستند. طبق تعریف ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، مچاله شوندگی سنگ، تغییر شکل‌های بزرگ مقیاس وابسته به زمان است که به خواص خزشی ایجاد شده توسط تنش‌های برشی، مرتبط می‌شود. وجود عواملی همانند تنش‌های بالا و خواص مقاومتی ضعیف توده سنگ موجب افزایش تنش‌های برشی در محدوده سنگ اطراف تونل می‌شود که این

تنش های برشی در ایجاد رفتار خزشی توده سنگ نقش اساسی دارند. تغییر شکل های مذکور ممکن است فقط به زمان اجرای تونل محدود شوند یا اینکه برای مدت زمان طولانی ادامه پیدا کنند. توده سنگ های ضعیف مانند اسلیت ها، شلیست های گرافیتی، شیل ها، سنگ های رسی، آهک های رس دار از جمله سنگ هایی هستند که در صورت مهیا بودن شرایط تنش می توانند این رفتار را از خود بروز دهند.

ه) تورم سنگ های رسی

پدیده تورم یا آماس ترکیبی از واکنش های فیزیکوشیمیایی سنگ با آب و رها شدن تنش است. واکنش فیزیکوشیمیایی با آب معمولاً سهم اصلی این پدیده را دارا است، ولی در بعضی مواقع این پدیده در نتیجه رها شدن تنش نیز رخ می دهد. دو مکانیسم عمده در پدیده آماس شامل:

- مکانیکی

- فیزیکوشیمیایی

مکانیسم اول که در رس ها، رس های سیلتی و سیلت های رسی و سنگ های مرتبط با آن ها رخ می دهد عکس پدیده تحکیم است و در نتیجه ایجاد فشار آب منفذی منفی رخ می دهد. این نوع آماس به وجود کانی های خاصی در زمین بستگی دارد. آماس و برآمدگی معمولاً منجر به مشکلاتی می شوند که می توان به موارد زیر اشاره شود:

همگرایی فضای حفر شده و ناکارآمدی عملیات حفاری می شود. برآمدگی یا بالا آمدن سنگ های اطراف فضای حفر شده، اعوجاج کلی سیستم نگهداری را موجب می شود و اغلب باعث وارد آمدن خسارت به سیستم نگهداری در نقاط خاصی از تونل می شود. همچنین زمانی که لایه حساس به تنش و آب در بین لایه های دیگری که تونل در آن ها حفر شده است، قرار می گیرد، جذب آب موجب همگرایی زیاد تونل و وارد آمدن خسارت موضعی به سیستم نگهداری می شود. پدیده تورم در حالت بحرانی باعث افزایش خطر ریزش و اعمال بار اضافی بر سیستم نگهداری و سپرهای دستگاه می شود.

و) ساینده گی سنگ و خاک

ساینده گی معمولاً به عنوان یک ویژگی مهم سنگ و خاک که علت اصلی سایش ابزار برش و بخش های مختلف ماشین محسوب می شود، شناخته می شود که ساینده گی زیاد سنگ ها و خاک ها و در نتیجه فرسودگی سریع و بیش از حد ابزار برش سبب کاهش قابل توجه در رانندگی فرایند حفاری می شود. همچنین تاخیرات زمان ناشی از توقف که برای تعویض ابزارها و قطعات سایش یافته صرف می شود، غیرقابل اجتناب است.

در مصالح خاکی عوامل مهمی که بر روی میزان سایش مؤثر هستند، عبارت است از نوع کانی های تشکیل دهنده دانه های خاک، توزیع دانه بندی و گرد شدگی ذرات خاک است. در مصالح سنگی مهم ترین عامل مؤثر در سایش ابزار برش ترکیب کانی شناسی سنگ و مقاومت ماده سنگ است.

۳-۱-۴- آب زمین شناسی^۱

جریان و فشار آب زیرزمینی از عوامل مهم ناپایدار کننده تونل ها و دیگر فضاهای زیرزمینی است که باید از قبل مورد شناسایی قرار گیرد. متأسفانه در همه موارد تخمین دقیق مقدار آب ورودی به تونل ساده نیست و حتی دسترسی به اعداد تقریبی نیز نیاز به بررسی های همه جانبه و شناسایی آب های سطحی و زیرزمینی دارد. علاوه بر این ها، حتی اگر این بررسی ها مقدار دقیق آب را نیز محاسبه کنند اغلب مشخص نیست که این حجم آب در کل تونل تراوش خواهد کرد یا اینکه به صورت متمرکز و تنها از یک یا دو نقطه خارج می شود. حالت دوم که معمولاً کنترل آن مشکل تر و تأثیر منفی آن بر پایداری تونل بیشتر است، اغلب در سنگ های درزه دار، مخصوصاً در سنگ های آهکی، حفره دار و کارستی دیده می شود.

به طور کلی تونل هایی که در بالای سطح ایستابی قرار می گیرند، از پایداری بیشتری برخوردارند. در این حالت تنها تراوش موقتی و فصلی ناشی از بارش و آب های سطحی ممکن است وجود داشته باشد. در شرایطی که تونل در زیر سطح ایستابی قرار گیرد، تراوش دائمی آب، که بسته به نفوذپذیری زمین، مقدار آن می تواند کم یا زیاد باشد، وجود خواهد داشت.

نشت آب زیرزمینی اثرات منفی متعددی می تواند داشته باشد:

الف) ایجاد مزاحمت در زمان حفر تونل

ب) اعمال فشار هیدروستاتیک به پوشش و ناپایدار کردن آن

ج) شستن و حل کردن تدریجی مواد در امتداد درزه ها و سطوح ضعیف که منجر به افزایش بازشدگی درزه ها و در نتیجه افزایش نشت آب را به همراه خواهد داشت.

د) ته نشین شدن مواد محلول موجود در آب در محل تراوش و ایجاد رسوبات آهکی

ه) یخ زدن در فصول سرد و ایجاد قندیل

تونل هایی که قرار است از زیر رودخانه ها بگذرند در صورت امکان بهتر است به اعماق بیشتر و به زیر لایه های غیرقابل نفوذ منتقل شوند. وظیفه طراح در این موارد یافتن عمق بهینه است که مطالعات نشان داده است در اغلب موارد پوشش چندمتری از زمین نفوذناپذیر رسی کافی است. در جاهایی که امکان رسیدن به لایه های غیرقابل نفوذ وجود ندارند، حفاری اجباراً به روش سپررانی انجام می شود.

تجربه نشان داده است که نفوذناپذیر کردن صد درصد تونل اغلب امکان پذیر نبوده یا به علت هزینه های زیاد به صرفه نیست. در رابطه با جلوگیری از نشت آب به تونل به کارگیری همه یا برخی از روش های زیر ممکن است مؤثر واقع شود:

¹ hydrogeological

- ۱- نصب پیزومترهای متعدد و انجام آزمایش های پمپاژ و دیگر آزمایش های لازم برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی سفره آب و دیگر مشخصات زمین به منظور طراحی پوشش مناسب.
- ۲- بررسی کیفیت آب و تأثیر آن بر پوشش تونل و دوغاب تزریق شده
- ۳- استفاده از تونل و گمانه پیشرو برای آگاهی قبلی از شرایط واقعی آب زیرزمینی.
- ۴- بررسی امکان زهکشی طبیعی آب از تونل
- ۵- درجهایی که تونل پوشش بتنی دارد، نشت آب معمولاً از خلال درزه های انبساط و ساختمانی بتن صورت می گیرد. در چنین شرایطی با آب بندی این درزه ها یا با قراردادن کانال های هدایت آب در امتداد آن ها مشکل آب تا حدی بهبود می یابد.
- ۶- در رابطه با تونل های دارای پوشش بتنی، روش دیگر، زهکشی آب از پشت دیواره و هدایت آن به کانال هایی است که وظیفه تخلیه آب را بر عهده دارند.
- ۷- نشت آب از دیواره را تا حدی می توان با تزریق سیمان یا مواد شیمیایی کاهش داد. البته باید توجه داشت که آبی که به این نحو از یک محل رانده می شود اغلب ممکن است از محلی دیگر و از میان شکاف خشک خارج شود.
- ۸- روش هایی که بیشتر در زمان انجام عملیات اجرائی به کار گرفته می شود، مانند پایین آوردن سطح ایستابی به زیر سطح تونل، پمپاژ آب یا روش پرهزینه تر مانند منجمد نمودن آب های اطراف تونل.
- ۹- نصب دستگاه های کنترل دائم مقدار و محل نشت آب برای آگاهی از ثمربخش بودن تدابیر زهکشی.

۳-۱-۵- شرایط زیست محیطی

- شرایط زیست محیطی یک پروژه تونل سازی می تواند به عوامل مختلفی از جمله مکان، ویژگی های زمین شناسی و روش حفاری بستگی داشته باشد. در ادامه برخی از ملاحظات اصلی مربوط به جنبه زیست محیطی اشاره شده است:
- (الف) کیفیت هوا: فعالیت حفر و ساخت تونل می تواند منجر به پخش گرد و غبار، ذرات معلق و گازهای خروجی از ماشین آلات شود؛ بنابراین سیستم های تهویه و اقدامات کنترلی گرد و غبار در داخل و بیرون تونل ضروری است.
 - (ب) لرزش و سر و صدا: فعالیت های مختلف تونل سازی از جمله انفجار می تواند سر و صدا و لرزش زیادی را ایجاد کند. استفاده از عایق های صوتی و روش های کنترل شده برای انفجار می تواند این عوارض را کاهش دهد.
 - (ج) مدیریت آب: اغلب پروژه های حفر تونل با چالش ورود آب برخورد می کنند. بنابراین تعبیه سیستم زهکشی برای کنترل جریان آب ضروری است.
 - (د) ملاحظات زمین شناسی: شرایط زمین شناسی محل ساخت تونل به طور قابل توجهی بر پروژه تأثیر گذار است. ارزیابی پایداری، برداشت زمین شناسی تکنیک های مهندسی برای اطمینان از حفاری ایمن و کاهش ریسک ضروری است.

ه) حفاظت از تنوع زیستی و محیط زیستی: یک پروژه تونلی ممکن است بر زیستگاه گیاهان و جانوران محلی تاثیرگذار باشد. ارزیابی تاثیرات زیست محیطی برای شناسایی و کاهش آسیب به گونه‌های در خطر، مناطق حفاظت شده یا اکوسیستم‌های حساس باید انجام شود.

و) مدیریت باطله: در پروژه‌های تونلی مقدار قابل توجهی باطله شامل مصالح حفاری شده تولید می‌شود. استفاده حداکثری از شیوه‌های مدیریت باطله مانند بازیافت و دمپ مناسب جهت کاهش اثرات زیست محیطی ضروری است.

۳-۲- زمین‌شناسی مهندسی

۳-۲-۱- مقدمه

برای ساخت سازه‌های فنی مانند پی‌ها، تونل‌ها، سدها، دیوارهای حائل و غیره باید از شرایط زمین‌شناسی منطقه و نیروهای که وارد می‌شوند اطلاع داشت. آگاهی از مشخصات زمین‌شناختی (جنس، شیب و ضخامت)، تکتونیکی (درزه‌ها، گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها) و زمین‌شناسی مهندسی (مقاومت و رفتارشناسی) سنگ‌ها و خاک‌هایی که در مسیر تونل قرار دارند یکی از مراحل اساسی در تحلیل و پایداری تونل‌ها است. در ادامه به بررسی تأثیر شرایط زمین‌شناختی و تکتونیکی که در وضعیت تنش‌های وارد بر تونل موثرند، پرداخته می‌شود.

الف) لایه‌بندی

طبق نظر بیناوسکی مناسب‌ترین حالت در حفاری یک تونل زمانی است که پیشروی تونل در جهت شیب لایه‌بندی و امتداد لایه‌بندی عمود بر محور تونل باشد.

ب) چین‌خوردگی زمین

گاهی تونل از چین‌خوردگی‌های درون زمین عبور می‌کند. درحالتی که تونل از یک تاقدیس عبور می‌کند باید به تنش‌های کششی ناشی از خمش در لایه‌ها توجه کرد و اگر در مسیر تونل یک ناودیس واقع باشد، به دلیل هجوم آب و افزایش تنش در جداره تونل باید تا حد امکان از آن دوری کرد و اگر تونل از یال‌های چین‌خورده عبور کند، در این حالت بسته به شیب لایه‌ها افزایش تنش در یک‌طرف تونل خواهد بود.

طبق نظر بیناوسکی مناسب‌ترین حالت در حفاری تونل در مناطق چین‌خورده زمانی است که پیشروی تونل در جهت شیب لایه‌بندی و عمود بر امتداد آن باشد و نامناسب‌ترین حالت در حفاری یک تونل در یک منطقه چین‌خورده زمانی است که امتداد لایه‌بندی در جهت محور تونل و دارای شیبی بین ۹۰-۴۵ درجه باشد. حالتی که تونل در منطقه چین‌خورده به‌صورت عمود بر امتداد لایه‌بندی حفر می‌شود در صورت برخورد با یک تاقدیس یا گوه‌های سنگی روبه‌رو احتمال دارد به دلیل سقوط قطعه‌سنگ‌ها حفاری متوقف شود و درحالتی که با یک ناودیس برخورد شود وجود جریان آب و تجمع آن در تونل مانع اصلی در ادامه حفاری می‌شود.

ج) وجود شیب های تند در مسیر تونل

در مواقعی که تونل در نزدیکی دریاچه یا رودخانه حفر شود، شیب کوه یا تپه در این مکان ها بسیار تند است. در این موارد برای کاهش هزینه، تونل ها را به شیب نزدیک تر می کنند. در این مناطق به علت کاهش تنش های جانبی احتمال وقوع لغزش در این شیب های تند افزایش می یابد؛ بنابراین در این مسیر پایداری شیب ها نیز حتماً باید بررسی شود.

د) مناطق گسلیده

در مناطق گسلیده که تونل ممکن است از یک گسل عبور کند احتمال دارد نیروهای برشی در سطح گسل ناگهان باعث ریزش شود و بی اطلاعی از وجود گسل های فعال ممکن است خطرات جانی و مالی زیادی به همراه داشته باشد.

ه) سطح آب زیرزمینی

همان طور که قبلاً اشاره شد اگر حفاری تونل در زیر سطح آب زیرزمینی انجام شود، احتمال برخورد با آب همیشه وجود دارد. برای تخلیه این آب ها معمولاً با شیب دار کردن تونل آن را خارج می کنند. همچنین تزریق مواد غیرقابل نفوذ درزها و شکاف های سنگ، باعث بسته شدن مجاری نفوذ آب و در نتیجه کاهش نفوذ آن به درون تونل می شود.

۳-۲-۲- تفکیک واحدهای زمین شناسی مهندسی

تفکیک واحدهای زمین شناسی به فرآیند شناسایی و دسته بندی واحدهای زمین شناسی مختلف براساس خصوصیات و ویژگی های مهندسی آن ها اطلاق می شود. از آنجا که این تفکیک به درک رفتار خاک و سنگ زیر سطحی می شود ضروری است و ممکن است شامل مراحل زیر باشد:

الف) بررسی سایت^۱

ب) مپینگ زمین شناسی

ج) تست های آزمایشگاهی

۳-۲-۳- طبقه بندی مهندسی توده سنگ

بر طبق یک تعریف کلی، طبقه بندی، قرار دادن اشیاء یا داده ها بر طبق ویژگی های مشترکشان در گروه های مختلف است. واضح است که مجموعه ای از داده ها را می توان با توجه به نیاز به صورت های گوناگونی طبقه بندی کرد. به عنوان مثال سنگ که موضوع مورد بحث است توسط زمین شناسان به سه گروه اصلی آذرین، دگرگونی و رسوبی تقسیم می شود. طبقه بندی زمین شناسی سنگ ها بیشتر توصیفی است و اطلاعات کافی درباره خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ ارائه نمی دهد، لذا نمی تواند در شرایطی که سنگ به عنوان مصالح ساختمانی یا اینک سازهای در داخل یا روی آن بنا می شود استفاده شود.

¹ Site Investigation

طبقه‌بندی توده سنگ، کیفیت و رفتار مورد انتظار توده سنگ‌ها را بر اساس مهم‌ترین پارامترهایی که کیفیت آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، ارزیابی می‌کند. طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها و شیروانی‌های سنگی از نمونه‌های کاربرد طبقه‌بندی می‌باشد. محققان زیادی سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ را توسعه داده‌اند که در بسیاری از موارد سیستم‌های طبقه‌بندی RMR، Q و GSI مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۲-۴- برآورد خصوصیات ژئومکانیکی

۳-۲-۴-۱- آزمون های آزمایشگاهی

به کمک آزمون‌های آزمایشگاهی می‌توان یک برآورد کمی از خواص نمونه‌های سنگ بکر به دست آورد. آزمون‌های آزمایشگاهی لزوماً معرف خواص توده سنگ برجا نیستند چراکه درزه‌ها، صفحات ضعیف و دیگر نواقص موجود در سنگ برجا در نمونه‌های آزمایشگاهی دیده نمی‌شوند. علاوه براین، مکانیسم رفتار سنگ در آزمایشگاه همواره مشابه مکانیسم رفتار سنگ برجا نمی‌باشد. بااین‌وجود آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعیین رفتار برجای سنگ‌ها، راهنمای خوبی محسوب می‌شوند. برای تعیین خواص معرف شرایط برجا لازم است تا آزمایش‌های برجا انجام گیرند. استانداردها و روش‌های آزمایش‌های مکانیک سنگ در استانداردهای ASTM، توصیه‌های ISRM و هندبوک Rock Testing موجود هستند. برخی از این آزمایش‌ها را می‌توان به‌عنوان آزمایش‌های شاخص برشمرد که معمولاً برای مقایسه استفاده می‌شوند. در حالیکه دیگر آزمایش‌ها مستقیماً خصوصیتی از سنگ را اندازه می‌گیرند. متداول‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگی که برای سازه‌های زیرزمینی استفاده می‌شوند در جدول ۳-۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۳-۱- متداول‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگی

پارامتر / مشخصات	خصوصیات سنگ
دانسیته	خصوصیات شاخص
تخلخل	
درصد رطوبت	
دوام در برابر تورق	
شاخص تورم	
شاخص بار نقطه ای	
سختی و ساینده‌گی	مقاومت
مقاومت فشاری تک محوری	
مقاومت فشاری سه محوری	
مقاومت کششی برزیلی	
مقاومت برشی درزه‌ها	تغییر شکل پذیری
مدول یانگ	
ضریب پواسون	وابسته به زمان
مشخصات خزش	
ضریب نفوذ پذیری	نفوذ پذیری

موارد زیر برخی از کاربردهای خاص آزمایش‌ها و داده‌های حاصل از آن‌ها را نشان می‌دهد:

به طور کلی پارامترهای سنگ را می توان به دودسته کلی پارامترهای مقاومتی^۱ و تغییر شکل پذیری^۲ (سختی^۳) دسته بندی کرد. پارامترهای مقاومتی شامل چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و مقاومت کششی می باشد. پارامترهای تغییر شکل پذیری نیز شامل مدول یانگ (E) و ضریب پواسون (ν) می باشد.

• ۳-۲-۴-۱-۱- روش محاسبه مقاومت فشاری تک محوری سنگ (UCS4)

مقاومت فشاری تک محوری سنگ را می توان با استفاده از سه روش مقاومت سنجی مختلف نظیر مقاومت فشاری تک محوری، بارنقطه ای و چکش اشمیت به دست آورد.

الف) آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (نامحصور)

این آزمایش متداول ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیک سنگی بر روی ماده سنگ می باشد. در این آزمایش نمونه سنگ در داخل یک فریم قرار داده شده و توسط یک جک با ظرفیت مناسب بارگذاری می گردد. برای نمونه های با قطر مختلف از جک های با ظرفیت مختلف (تا ۴۵۰ تن) استفاده می شود. برای اینکه بارگذاری کاملاً غیر نقطه ای باشد از یک مفصل کروی بر روی نمونه استفاده می شود. بارگذاری تحت سرعت کنترل شده تا زمان وقوع شکست در سنگ ادامه می یابد. در صورتیکه از فریم های غیر صلب برای بارگذاری نمونه ها استفاده گردد، تنها می توان مقدار مقاومت نهایی سنگ را ثبت نمود و اطلاعی از رفتار پس از شکست در اختیار قرار نمی گیرد. در صورتیکه آگاهی از رفتار پس از شکست سنگ^۵ ضروری باشد باید از فریم های صلب استفاده کرد. با استفاده از این آزمایش همچنین می توان مدول یانگ و ضریب پواسون را نیز به دست آورد.

ب) آزمایش فشاری تک محوری با استفاده از دستگاه (MTS^۶)

دستگاه پرس صلب کنترل اتوماتیک MTS، دارای بدنه ای کاملاً صلب بوده که آن را قادر می سازد رفتار سنگ های با مقاومت بالا را در شرایط بارگذاری تک محوری و سه محوری تعیین نماید. بدین ترتیب می توان سازه هایی را که در آن سنگ تا سرحد مقاومت نهایی اش بارگذاری شده را نیز طراحی نمود. شرایط مختلف بارگذاری در این دستگاه به صورت کاملاً کامپیوتری برنامه ریزی شده و قابل تعریف می باشد. دستگاه مذکور دارای ظرفیت ۴۵۰ تن در فشار و ۲۴۰ تن در کشش می باشد. با استفاده از سنسورهای مختلفی که همراه دستگاه وجود دارد می توان کرنش های طولی، عرضی و نیروهای قائم را به دقت تعیین و در حین آزمایش به صورت دیجیتالی ثبت کرد. در این دستگاه می توان بارگذاری ثابت، جابه جایی ثابت، کرنش طولی و یا عرضی ثابت و بارگذاری دینامیکی را تعریف و با دقت اعمال کرد.

¹ Strength parameters

² Deformation Parameters

³ Stiffness

⁴ Uniaxial Compressive Strength

⁵ Post failure behavior

⁶ Material Testing System

شکل ۳- ۱ دستگاه MTS را نشان می‌دهد که علاوه بر تعیین مقاومت سنگ‌های بسیار مقاوم، به سهولت می‌تواند رفتار پس از شکست آن‌ها را نیز تعیین کند.

(ج) آزمایش شاخص بار نقطه‌ای

در این آزمایش، نمونه سنگ (که می‌تواند به شکل مغزه و یا کلوخه‌ای نامنظم باشد) توسط اعمال بار نقطه‌ای از طریق یک جفت فک مخروطی شکل با نوک کرووی شکسته می‌شود (شکل ۳- ۱). در هنگام شکست نمونه، مقدار بار اعمالی بر روی گیج‌های موجود ثبت شده و سپس اندیس بار نقطه‌ای و مقاومت تک‌محوری سنگ تعیین می‌شود. این دستگاه قابل حمل بوده و وسیله مناسبی برای مطالعات اولیه و صحرایی می‌باشد.

(د) آزمایش چکش اشمیت

این آزمایش برای تعیین سختی و مقاومت سنگ در صحرای یا در آزمایشگاه طراحی شده و عمدتاً در مورد سنگ‌های با سختی متوسط کاربرد دارد. به کمک این آزمایش می‌توان سختی سطوح درزه سنگی را نیز برآورد نمود. برای انجام این آزمایش، میله چکش روی نمونه قرار گرفته و با فشار دادن چکش به سنگ، فنر داخل چکش فشرده می‌شود. در اثر انرژی ذخیره شده، ضامن فنر در سطح انرژی تراکمی مشخصی آزاد شده و به وزنه‌ای که روی میله چکش قرار گرفته ضربه می‌زند. ارتفاع و جهش وزنه‌ای از روی خط کش دستگاه قرائت شده و به‌عنوان مقیاسی برای تعیین سختی سنگ استفاده می‌شود (شکل ۳- ۲).



شکل ۳- ۱- دستگاه MTS (سمت راست)، دستگاه آزمایش بار نقطه‌ای (سمت چپ)



شکل ۳- ۲- چکش اشمیت

• ۳-۲-۴-۱-۲- روش محاسبه پارامترهای مقاومتی چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)

با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوری می‌توان مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را به دست آورد.

الف) آزمایش مقاومت فشاری سه محوری^۱

از این آزمایش برای شبیه‌سازی شرایط تنش سه محوری که در اعماق زمین به سنگ‌ها وارد می‌گردد، استفاده می‌شود. ساده‌ترین روش اعمال تنش سه محوری به نمونه سنگ در آزمایشگاه، استفاده از سلول هوک می‌باشد که توسط آن ضمن اعمال یک فشار جانبی هیدرولیکی، نمونه تحت تنش قائم نیز قرار می‌گیرد. با انجام این آزمایش تحت مقادیر مختلف تنش جانبی، پوش گسیختگی سنگ ترسیم‌شده و بر اساس آن پارامترهای مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تعیین می‌گردند (شکل ۳-۳).



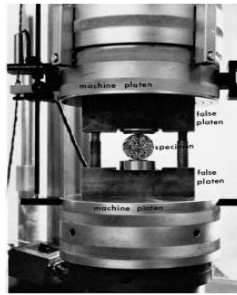
شکل ۳-۳- سلول هوک جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوری

• ۳-۲-۴-۱-۳- روش محاسبه مقاومت کششی سنگ (UTS)

به دلیل مشکلات اندازه‌گیری مستقیم مقاومت کششی سنگ معمولاً آزمایش برزیلی^۲ برای این منظور استفاده می‌شود. در این آزمایش نمونه‌هایی به شکل دیسکی بین دو فک به صورت قطری تحت بارگذاری قرار گرفته تا با گسترش یک ترک قائم کششی گسیخته شود. با توجه به روابطی که در این زمینه موجود است مقاومت کششی سنگ برآورد می‌شود. نمونه‌ای از شکست کششی ماسه‌سنگ با استفاده از آزمایش برزیلی در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.

^۱ Triaxial compressive test

^۲ Brazilian Test



شکل ۳-۴- آزمایش برزبلی جهت تعیین مقاومت کششی

• ۳-۲-۴-۱- روش محاسبه پارامترهای مقاومت برشی درزه‌ها

جهت به دست آوردن پارامترهای برشی درزه‌ها آزمایش مقاومت برشی درزه^۱ استفاده می‌شود. در این آزمایش مقاومت برشی نمونه در امتداد یک ناپیوستگی و یا سطح ضعیف از پیش تعیین شده اندازه‌گیری می‌شود. نمونه سنگ در پلاستر یا سیمان تثبیت شده، سپس بین دو فک (که یکی ثابت و دیگری متحرک می‌باشد) قرار می‌گیرد و در حالیکه تحت اثر نیروی قائم قرار دارد، توسط نیروی افقی تحت برش قرار می‌گیرد. در اثنای انجام آزمایش، نیروهای قائم و برشی و همچنین جابه‌جایی قائم و برشی اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۳-۵ نمای کلی این آزمایش نشان داده شده است.



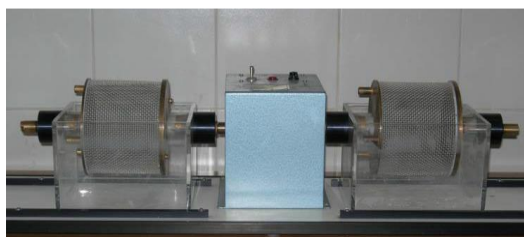
شکل ۳-۵- نمای کلی تجهیزات مورد نیاز برای آزمایش مقاومت برشی درزه

• ۳-۲-۴-۱-۵- روش به دست آوردن شاخص دوام^۲ سنگ‌ها

این آزمایش برای تعیین میزان دوام یک نمونه سنگ تحت تأثیر مراحل متوالی تر و خشک شدن طراحی شده است. شاخص دوام برابر با درصد وزن مواد باقی مانده از نمونه سنگی پس از تر و خشک شدن متوالی به وزن اولیه تعریف شده که نشانگر میزان پایداری سنگ در برابر هوازدگی طبیعی است. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، میزان فرسایش، انحلال و خرد شدن در برابر هوازدگی کمتر است. نمایی از دستگاه اندازه‌گیری شاخص دوام در شکل ۳-۶ نشان داده شده است.

¹ Direct shear test on joints

² Slake-Durability



شکل ۳-۶- دستگاه اندازه گیری شاخص دوام

۳-۲-۴- آزمایش های برجا

متداول ترین آزمایش های برجای موجود در کارهای زیرزمینی در

جدول ۳-۲ ارائه شده اند. برای آگاهی از نحوه انجام این آزمایش ها و جزئیات آنها می توان به استانداردهای ASTM و همین طور توصیه های ISRM و هندبوک Rock Testing مراجعه کرد. صرفاً در این قسمت در مورد روش به دست آوردن مهم ترین پارامترهای لازم برای طراحی تونل ها توضیحاتی داده می شود.

• ۳-۲-۴-۱- آزمایش بارگذاری صفحه ای (جکینگ)

آزمایش بارگذاری صفحه ای یکی از آزمایش های برجا مکانیک سنگ است که برای تعیین مدول های تغییر شکل و الاستیک توده سنگ به کار می رود. در این روش مدول تغییر شکل الاستیک توده سنگ با استفاده از نتایج جابه جایی توده سنگ، ناشی از بار نرمال اعمال شده، محاسبه می گردد. محل آزمایش معمولاً یک تونل اکتشافی می باشد که در آن دیواره های تونل، نیروی عکس العمل باری را که توسط جک ها اعمال شده است و هم جهت با بار ناشی از سازه می باشد را ایجاد می کند. انجام این آزمایش در سطح زمین نیز میسر می باشد که در این صورت نیروی عکس العمل توسط کابل های میخ شده در عمق زمین مهیا می شود.

جدول ۳-۲- روش های متداول آزمایش برجا

پارامتر	روش آزمایش
تنشهای برجا	شکست هیدرولیکی
	آزمایش بیش مغزه گیری
	آزمایش USBM ^{۲۶}
	اندازه گیری تنشهای سه محوری برجا
مدول تغییر شکل	آزمایش بارگذاری صفحه ای
	آزمایش دیلاتومتری
	آزمایش جک تخت
	آزمایش جک شعاعی
	آزمایش جک گودمن ^{۲۷}
	فشارسنج (سنگ نرم)
مقاومت برشی	آزمایش برش یا پیچش
	آزمایش برش مستقیم
	فشار سنج (سنگ نرم)
نفوذپذیری	آزمایش لوزان
	روش فشار ضربه ای (بالسی)
	آزمایشهای پیمائز

• ۳-۲-۴-۲- آزمایش مقاومت برشی مستقیم برجا در سنگ

هنگامی که سازه‌ای در شیب تندی قرار گرفته باشد و یا بارهای جانبی قابل ملاحظه‌ای وجود داشته باشند، ممکن است پی سازه در اثر شکست برشی، حتی در تنش‌های بسیار کمتر از حد مجاز باربری سنگ، دچار گسیختگی و مشکل شود. سطح شکستگی برشی می‌تواند سطح یک شکستگی تقریباً موازی با جهت بار اعمالی باشد و یا تلفیقی از سطوح شکست و شکستگی در سنگ یکپارچه باشد. مورد اول می‌تواند در سنگ بشدت درزه‌دار اتفاق بیفتد، در حالیکه مورد دوم در سنگ‌های با درزه‌داری کم مشاهده می‌شود. پارامترهای مقاومتی سطح برش را می‌توان هم توسط آزمایش مقاومت برشی مستقیم آزمایشگاهی و هم توسط آزمایش مقاومت برشی مستقیم برجا محاسبه نمود. در جاهایی که به دست آوردن نمونه دست‌نخورده ممکن نباشد و یا نمونه به‌اندازه کافی برای آزمون آزمایشگاهی نباشد، آزمایش‌های برجا موضوعیت پیدا می‌کنند. با این آزمایش مقاومت برشی مستقیم نهایی و ماندگار سنگ به‌صورت تابعی از تنش عمودی اعمال شده بر صفحه برش تعیین می‌گردد. صفحه برش معمولاً سطح یک ناپیوستگی مثل درزه و ترک، لایه‌بندی، تورق، گسل و یا فصل مشترک سنگ با بتن یا خاک می‌باشد.

• ۳-۲-۴-۳- آزمایش دیلاتومتری

آزمایش دیلاتومتری جهت تعیین مدول تغییر شکل توده سنگ می‌باشد. در این آزمایش، بار یکنواختی به‌صورت شعاعی به دیواره‌های گمانه وارد می‌شود و جابه‌جایی‌های ناشی از آن توسط تعدادی LVDT تعبیه‌شده در غشای لاستیکی دیلاتومتر اندازه‌گیری می‌شوند. ابزارهای اندازه‌گیری نسبت به هم زاویه‌دار می‌باشند و از این‌رو می‌توان میزان آنروپی را در توده سنگ تعیین کرد.

• ۳-۲-۴-۴- آزمایش شکاف دیواره گمانه (اسلاتر)

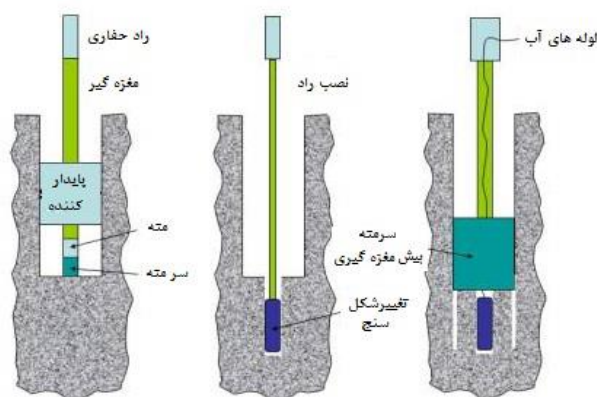
آزمایش شکاف دیواره گمانه یکی از تکنیک‌های قابل اطمینان برای اندازه‌گیری دقیق تنش برجا است. این تکنیک برای عملیات سریع و تعداد زیاد اندازه‌گیری در گمانه طراحی شده است. روش شکاف دیواره گمانه جزء دسته روش‌های آزادسازی تنش می‌باشد. در این روش یک شکاف قوسی شکل به‌طور شعاعی در دیواره چال ایجاد می‌شود و تغییرات کرنش مماسی در دیواره گمانه و در مجاورت شکاف یعنی جایی که رهاسازی تنش صورت گرفته است، توسط یک سنسور مخصوص با حساسیت بالا اندازه‌گیری می‌شود. برای تعیین تنش‌های برجا در دو بعد باید شش شکاف در دیواره گمانه ایجاد گردد، که این شش شکاف بافاصله ۱۲۰ درجه نسبت به هم، در هر دسته سه‌تایی و هر دسته در مجاورت هم به فاصله ۱۰ سانتیمتر و با اختلاف شعاعی ۳۰ درجه، در دیواره گمانه ایجاد می‌شود. مجموعه این شش شکاف و رهاسازی کرنش مربوط به آن‌ها مجموعاً تشکیل یک آزمایش را می‌دهند. با استفاده از نتایج چنین آزمایشی می‌توان دامنه و جهت تنش‌های حداکثر و حداقل را در صفحه عمود بر محور گمانه محاسبه نمود. با انجام آزمایش در سه جهت مختلف می‌توان تنش‌های اصلی برجا را در سه بعد تعیین کرد.

• ۳-۲-۴-۵- روش شکست هیدرولیکی

این روش برای اندازه گیری میدان تنش بر جای توده سنگ در عمق زمین به کار می رود و با استفاده از آن می توان مقدار و جهت تنش های اصلی بزرگ تر و کوچک تر را در صفحه ای عمود بر امتداد گمانه تعیین نمود. در این روش، اعمال فشار هیدرولیکی به قسمتی از یک گمانه که توسط پکر جدا شده است باعث ایجاد ترک، گسترش شکستگی و یا باز شدن مجدد ترک های موجود می گردد. میزان این فشار به میدان تنش برجا بستگی دارد و جهت گسترش ترک ها نشان دهنده جهت تنش های اصلی می باشد. برای تعیین تنش برجا در اعماق بیشتر از ۵۰ متر، شکست هیدرولیکی تنها روش ممکن و نسبتاً موفق است. این روش در گمانه هایی با قطرهای مختلف و نیز چال های کوتاه قابل اجرا می باشد. عدم نیاز به اطلاعات کامل در مورد ویژگی های الاستیک سنگ و همچنین امکان اجرای آن در زیر سطح آب زیرزمینی از مزایای این روش است. دقت این روش در مورد سنگ های شکننده، همگن، الاستیک، همسانگرد و غیرمتخلخل به حداکثر می رسد.

• ۳-۲-۴-۶- روش بیش مغزه گیری

در این روش در کف گمانه ای که قبلاً حفار شده، سوراخ باریکی حفر می کنند و در آن دستگاه کرنش سنج قرار می دهند و بدین ترتیب تغییر شکل حاصله را اندازه گیری می کنند. سپس با مغزه گیری از کف گمانه، بخشی را که کرنش سنج در آن نصب شده است، از بقیه سنگ ها جدا می سازد. با مقایسه کرنش اولیه و آنچه که پس از مغزه گیری مجدد برجا می ماند، وضعیت تنش های برجا محاسبه می شود. این روش شامل تکنیک های اندازه گیری تنش و کرنش آزاد شده می باشد. این روش شامل یک اندازه گیری سه بعدی کرنش آزاد شده که در بدنه سنگ های اطراف احاطه شده است، می باشد. تانسور تنش سه بعدی متعاقباً می تواند با اطلاعات تانسور تسلیم شده سنگ به صورت کامل محاسبه شود. دو مانع جهت اندازه گیری تنش وجود دارد که مزیت های این روش را محدود می کند. اولاً اندازه گیری باید در نزدیکی سطح زمین باشد و کرنش آزاد شده در یک محدوده خیلی کوچک (میلی متر مربع تا سانتیمتر مربع) تعیین می شود. همچنین نشان داده شده است که اندازه گیری های نزدیک سطح زمین (نزدیک تر از حد معمول) متأثر از توپوگرافی محلی، آنیزوتروپی سنگ و شکست طبیعی می باشد. شکل ۳-۷ نحوه انجام آزمایش بیش مغزه گیری را نشان می دهد.



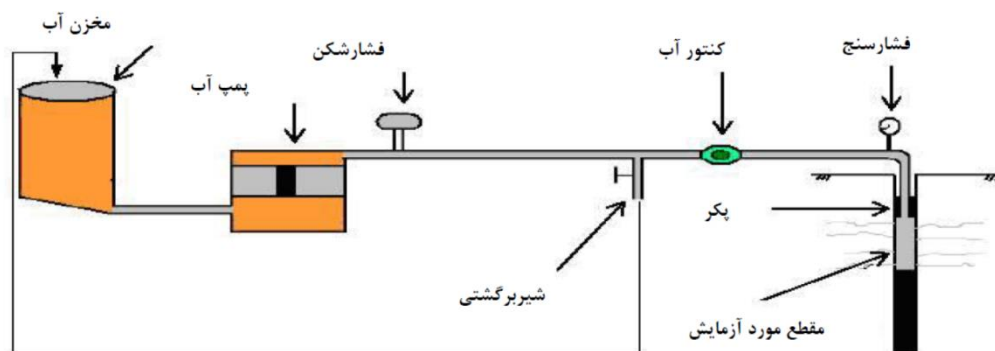
شکل ۳-۷- نحوه انجام آزمایش بیش مغزه گیری

• ۳-۲-۴-۷- آزمایش لوژان

بررسی و شناخت خاصیت نفوذپذیری محیط های سنگی به منظور ارزیابی و محاسبه پوشش داخلی تونل ها از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. نفوذپذیری عبارت است از قابلیت سنگ برای عبور دادن مایعات از داخل خود بدون اینکه تغییری در ساختمان آن ایجاد شود.

تعیین تراوایی سنگ های درزه دار معمولاً به وسیله آزمایش فشار آب معروف به آزمایش لوژان صورت می گیرد. در این آزمایش قسمتی از طول گمانه با پکر مسدود شده و آب با فشار به آن تزریق می شود. نفوذپذیری توده سنگ با توجه به نرخ خوردن آب، فشار آزمایش و طول مقطع آزمایش تعیین می شود. شکل ۳-۸ نحوه انجام آزمایش لوژان را نشان می دهد.

فشارهای آزمایش به صورت پله ای تا فشار ماکزیمم و سپس به فشار اولیه کاهش می یابند. با مقایسه نتایج به دست آمده در این پله های فشار، رفتار جریان درزه ها تعیین گردیده و مقدار آب که طی آزمایش با فشار به درون درزه رانده می شود، در یکای زمان و فشار ثبت می گردد و با توجه به آن، مقدار نفوذپذیری معرف برای مقطع مورد آزمایش انتخاب می شود.



شکل ۳-۸- تجهیزات و نحوه اجرای آزمایش لوژان

۳-۲-۵- اکتشافات ژئوتکنیکی خاک‌ها

خاک از یک طرف به عنوان مصالح مانند خاک‌ریزها، سدهای خاکی و غیره و از طرف دیگر به عنوان یک محیط طبیعی مانند محل حفر تونل‌ها مورد توجه مهندسين و طراحان قرار می‌گیرد که در تمام موارد، شناخت خواص فیزیکی و مکانیکی خاک ضرورت غیرقابل اجتناب دارد. بررسی صحرایی خاک‌ها منجر به نمونه‌هایی می‌شود که ممکن است مستقیماً و به طور برج‌ا در محل آزمایش شده یا برای بررسی به آزمایشگاه ارسال شوند. در مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی می‌توان به اهداف ذیل دست یافت:

- تعیین نوع و ضخامت قشرهای خاک
 - ارزیابی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک
 - بررسی مقاومت مجاز لایه‌های خاک بر اساس گسیختگی برشی خاک
 - تعیین پروفیل خاک زیرسطحی محدوده مورد بررسی
 - تعیین عمق آب زیرزمینی در محدوده مورد بررسی
 - تعیین پارامترهای مؤثر در پایداری و تغییر شکل‌پذیری لایه‌های خاک
 - تعیین پارامترهای مورد نیاز جهت طراحی بخش‌های مدفون سازه
 - تعیین مشخصه‌های خاک جهت تعیین نیروی زلزله
 - بررسی امکان بروز ناپهنجاری‌های ژئوتکنیکی
 - انجام آزمایش‌های شیمیایی جهت تعیین نوع سیمان مورد استفاده در پوشش نگهداری تونل
- آزمون‌های آزمایشگاهی و برج‌ا که به منظور تعیین پارامترهای فوق در خاک انجام می‌شوند، مطابق جدول ۳-۳ می‌باشند.

جدول ۳-۳- آزمون‌های آزمایشگاهی و برج‌ا به منظور تعیین پارامترهای خاک در ساختگاه تونل

آزمونهای آزمایشگاهی	آزمونهای برج‌ا
آزمایش دانه بندی	آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد (SPT)
آزمایش هیدرومتری	آزمایش بارگذاری صفحه ای
آزمایش تعیین حدود اتزبرگ	آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک
آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی	آزمایش دانسیته برج‌ا و رطوبت طبیعی
آزمایشهای شیمیایی	آزمایش پرسیومتر
آزمایش مقاومت فشاری تک محوری	آزمایش برش مستقیم برج‌ا
آزمایش مقاومت فشاری سه محوری	-
آزمایش برش مستقیم	-
آزمایش نفوذپذیری	-

۳-۲-۵-۱- آزمون های آزمایشگاهی بر روی خاک ها

• آزمایش دانه بندی مکانیکی خاک (مطابق با استاندارد ASTM D 6913)

دانه بندی به نحوه توزیع دانه های خاک با اندازه مختلف در نمونه خاک اطلاق می شود. منظور از دانه بندی مکانیکی جداسازی دانه های خاک در اندازه های مختلف است که هر قسمت به صورت درصدی از ذرات نسبت به کل نمونه خاک بیان می شود. تعیین منحنی دانه بندی خاک برای طبقه بندی خاک، تعیین ظرفیت باربری خاک و احداث انواع سازه های زیرزمینی در خاک مورد استفاده قرار می گیرد.

• آزمایش دانه بندی هیدرومتری (مطابق با استاندارد ASTM D 7928)

در قسمت دانه ریز خاک مثل لای، رس و ماسه خیلی ریزدانه برای اندازه گیری قطر دانه ها از روش هیدرومتری استفاده می شود. این آزمایش بر اساس اندازه گیری وزن مخصوص یا گرم در لیتر دانه های خاک معلق در آب می باشد که با گذشت زمان به تدریج که دانه رسوب می کند وزن مخصوص مایع کاسته می شود. لذا میزان کاهش وزن مخصوص مبنای محاسبه مقدار و اندازه ذرات معلق در آب می باشد.

• آزمایش تعیین حدود اتربرگ^۱ در خاک ها

رفتار تمام خاک ها به خصوص رس ها به نحو قابل توجهی در اثر وجود آب تغییر می کند. یک نمونه خاک رسی با توجه به درصد آب خود می تواند تقریباً شبیه به یک مایع عمل کند و جاری شود و یا اینکه کاملاً سخت گردد. حدود روانی و خمیری خاک ها به مقدار و نوع رس در خاک بستگی دارد و همین فاکتور که به حدود اتربرگ معروف می باشد، اساس طبقه بندی خاک های چسبنده را تشکیل می دهد.

○ آزمایش تعیین حد روانی (Liquid limit) (مطابق با استانداردهای ASTM D 4318، AASHTO T 89)

حد روانی عبارت است از مقدار رطوبتی که خاک مقاومت برشی کوچکی دارد، به نحوی که هرگاه یک شیار با عرض استاندارد در میان خاک ایجاد گردد با تکان دادن نمونه در شرایط معین، لبه های شیار بسته می شود (مقدار رطوبتی که نمونه خاک تحت ۲۵ ضربه فاصله ۱۳ میلی متری تحتانی در شیار به هم وصل گردد). هدف از این آزمایش تعیین درصد رطوبتی است که در آن مخلوط آب و خاک به صورت مایع جریان پیدا می کند.

○ آزمایش تعیین حد خمیری (Plastic limit) (مطابق با استانداردهای ASTM D 4318، AASHTO T 90)

حد خمیری عبارت است از مقدار رطوبتی که نمونه خاک در آن شرایط وقتی به صورت رشته ای به ضخامت مشخص، لوله شود آغاز به ترک دار شدن می کند. حد خمیری در واقع مرز بین حالت های مایع و خمیری است. هدف از این

¹ Atterberg limit

آزمایش تعیین درصد رطوبتی است که در آن خاک به حالت خمیر شکل پذیر باشد و کمتر از این حد خاک ترک برمی دارد.

- آزمایش تعیین حد چروکیدگی (Shrinkage limit) (مطابق با استانداردهای ASTM D 61-427، AASHTO 68-92، BS 1377-1990)

حد انقباض عبارت از حداکثر رطوبتی می باشد که کاهش آن در نمونه خاک موجب کاهش در حجم خاک نگردد. حد انقباض درواقع مرز بین حالت های نیمه جامد و جامد خاک است. هدف از این آزمایش تعیین درصد رطوبتی است که کمتر از آن حد، خاک تغییر حجم ندهد. به وسیله این آزمایش اطلاعاتی به دست می آید که می توان حد انقباض، نسبت انقباض، انقباض حجمی و انقباض یک جهتی را به دست آورد.

- آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی خاک (مطابق با استانداردهای ASTM D 2216)

درصد رطوبت خاک عبارت از نسبت جرم آب موجود به جرم خاک خشک در یک نمونه خاک موردنظر است و معمولاً برحسب درصد بیان می شود. این آزمایش برای تعیین درصد وزنی رطوبت خاک با چهار روش استفاده از اون، روش حمام ماسه، روش کربید کلسیم و روش پیکنومتر انجام می شود.

- آزمایش های شیمیایی (مطابق با استانداردهای BS 1377-1990)

وجود برخی از مواد شیمیایی مازاد بر محدوده مجاز در خاک ها مانند سولفات، کلراید و مقدار اسیدیت (PH) می تواند موجب تاثیرات مضر جدی روی مواد پوشش نگهداری تونل گردد. بنابراین پس از تعیین مواد شیمیایی در خاک در شرایطی که مقدار این مواد بیش از حد مجاز باشد، باید تمهیدات لازم برای مقابله با آن ها اندیشیده شود.

- آزمایش برش مستقیم (مطابق با استاندارد BS 7-1377، ASTM D 3080)

مقاومت برشی یک توده خاک را در قبال لغزش در امتداد صفحات داخلی آن تعریف می کنند. با استفاده از این آزمایش می توان خصوصیات تنش- کرنش خاک ها و همچنین پارامترهای برشی مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک ها را تعیین کرد. پارامترهای برشی برای محاسبه ظرفیت ایمن باربری خاک ها، مقاومت برشی خاک، چسبندگی، تنش نرمال و زاویه مقاومت برشی می باشند.

انواع آزمایشات آزمایشگاهی برش مستقیم به شرح ذیل می باشد:

الف) آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU) یا آزمایش سریع

در این آزمایش نمونه در حالت طبیعی خود و بدون اعمال هرگونه فشار از خارج مورد آزمایش قرار می گیرد و بعلاوه اجازه داده نمی شود که آب منفذی در حین آزمایش از نمونه خارج گردد. این آزمایش را روی هر دو نمونه دست خورده و دست نخورده می توان انجام داد.

ب) آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده یا سریع تحکیم یافته (CU)

در این آزمایش فشار نرمال اولیه پس از استقرار نمونه در جعبه برش روی نمونه وارد می شود و بنابراین نمونه مزبور تحکیم می گردد. این آزمایش را روی هر دو نمونه دست خورده و دست نخورده می توان انجام داد.

(ج) آزمایش زهکشی شده (CD)

در این آزمایش اجازه داده می شود که هرگاه آب منفذی در نمونه وجود داشته باشد، در حین اعمال تنش های نرمال و برشی در طول آزمایش از آن خارج شود. نمونه مورد آزمایش با سرعت تغییر شکل کم و به گونه ای برش داده می شود که فشار منفذی درون نمونه در تمام مدت آزمایش پیدا نکند. این آزمایش را روی هر دو نمونه دست خورده و دست نخورده می توان انجام داد.

• **آزمایشگاه تعیین مقاومت فشاری تک محوری خاک های چسبنده (مطابق با استاندارد ASTM D 6621-66)**

مقاومت فشاری تک محوری نمونه خاک عبارت است از نسبت بار گسیختگی به سطح مقطع نمونه در شرایطی که هیچ گونه فشار محصورکننده بر آن وارد نشده باشد. هدف از این آزمایش تعیین تقریبی و سریع مقاومت فشاری تک محوری خاکی است که دارای چسبندگی کافی و مناسب جهت انجام این آزمایش می باشد. کاربرد آن برای خاک های دانه ریز چسبنده-اصطکاکی به تنهایی کافی نیست، زیرا با استفاده از این آزمایش مقاومت اصطکاکی نمونه قابل اندازه گیری نیست.

• **آزمایشگاه تعیین مقاومت فشاری سه محوری (مطابق با استاندارد ASTM D 2850)**

روش آزمایش فشاری سه محوری متنوع ترین و بهترین روش موجود برای آزمایش برش در خاک ها می باشد. در این روش نمونه خاک استوانه ای شکل تحت تنش های سه جانبه قرار می گیرد. با این آزمایش می توان پارامترهای برشی خاک را تعیین کرد.

انواع آزمایشات سه محوری که به شرایط زهکشی بستگی دارند را می توان آزمایش تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU) یا آزمایش سریع، آزمایش تحکیم یافته زهکشی نشده یا سریع تحکیم یافته (CU) و آزمایش زهکشی شده (CD) نام برد.

• **آزمایش نفوذپذیری (مطابق با استاندارد ASTM D 2434)**

منظور از تعیین نفوذپذیری، تعیین سرعت حرکت آب در محیط خاکی می باشد. ضریب نفوذپذیری تابع اندازه دانه ها، تراکم، نوع کانی های تشکیل دهنده خاک و درجه حرارت آب می باشد. نفوذپذیری خاک ها را در آزمایشگاه با یکی از روش های بار ثابت و یا بار افتان می توان اندازه گیری کرد.

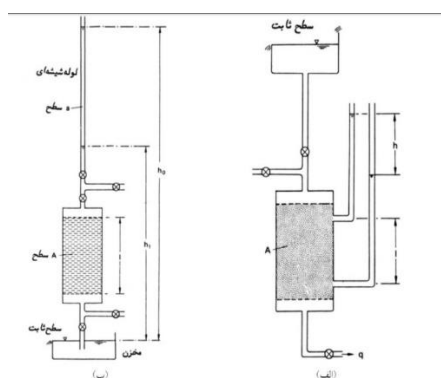
در روش بار ثابت با ثابت نگه داشتن سطح ارتفاع آب در داخل لوله ورودی به سطح فوقانی نمونه و جمع آوری مقدار آب خروجی از انتهای سطح تحتانی آن در مدت زمان معین، می توان ضریب نفوذپذیری را طبق قانون داری محاسبه نمود.

در روش بار افتان ورود آب در داخل لوله ورودی متصل به نمونه خاک را در یک‌زمان معینی قطع نموده و ارتفاع آن را در همان موقع اندازه‌گیری می‌کنند. ارتفاع آب لوله در اثر نفوذپذیری نمونه افت می‌نماید. لذا با فواصل کوتاه زمانی اندازه‌گیری ارتفاع آب در داخل لوله تکرار می‌شود. افت حاصل بین دو زمان متوالی مبین مقدار آب ازدست‌رفته در اثر نفوذپذیری نمونه خاک می‌باشد. شکل ۳-۹ تعیین نفوذپذیری خاک را در آزمایشگاه نشان می‌دهد.

۳-۲-۵-۲- آزمایش‌های برجا بر روی خاک‌ها

• آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد S.P.T (مطابق با استانداردهای ASTM D 11-1586)

این آزمایش به‌منظور تعیین مقاومت خاک در برابر نفوذ یک نمونه‌گیر فولادی به شکل استوانه و تهیه نمونه دست‌خورده خاک برای شناسایی آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاومت نفوذ را می‌توان به خصوصیات خاک و تغییرات آن ارتباط داد. آزمایش با استفاده از سقوط یک چکش به وزن $۶۳/۵$ کیلوگرم و از ارتفاع ۷۶ سانتیمتر که روی یک کلاهک قرار دارد انجام‌شده و تعداد ضربات لازم (N) برای ۳۰ سانتیمتر نفوذ نمونه‌گیر فولادی به‌عنوان مقاومت نفوذ در نظر گرفته می‌شود. توسط این آزمون می‌توان ویژگی‌هایی مانند اندازه زاویه داخلی در خاک‌های دانه‌ای و میزان سفتی در خاک‌های چسبنده را برآورد نمود. شکل ۳-۱۰ نحوه انجام آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد S.P.T را نشان می‌دهد.



الف- روش پتانسیل ثابت ب- روش افت پتانسیل
 ۱: سطح مقطع لوله برای ورود آب به داخل نمونه خاک، ۲: سطح مقطع نمونه خاک، ۳: طول نمونه خاک، ۴: مدت زمان بین دو اندازه‌گیری متوالی ارتفاع آب در داخل لوله، ۵: ارتفاع آب اندازه‌گیری شده در داخل لوله در زمان اولیه، ۶: ارتفاع آب اندازه‌گیری شده در داخل لوله در زمان ثانویه، ۷: حجم آب خروجی در واحد زمان (متر مکعب)

شکل ۳-۹- اندازه‌گیری قابلیت نفوذپذیری خاک با روش‌های آزمایشگاهی



شکل ۳- ۱۰- آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد S.P.T در داخل چاه اکتشافی

• آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

جهت دستیابی به خصوصیات نشست پذیری لایه‌های خاک و مدول تغییر شکل، این آزمایش در چاهک‌های دستی و در ارتفاع‌های مشخص به صورت قائم و افقی انجام می‌گردد. با استفاده از نتایج این آزمایش می‌توان ظرفیت مجاز باربری، میزان تراکم نسبی و مدول واکنش بستر خاک را تعیین نمود. اساس این آزمایش که بارگذاری ورقه‌ای نیز نامیده می‌شود، این است که روی ورقه‌ای صلب و محکم (با قطر ۳۰ سانتیمتر یا عرض مربع معادل ۲۶/۷ سانتیمتر) که روی زمین موردنظر قرار می‌گیرد، مستقیماً بارگذاری (در هر مرحله آزمایش حدود یک‌تن) می‌شود و تغییر مکان قائم (نشست) آن ورقه اندازه‌گیری می‌گردد.

• آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک در محل

این آزمایش به دو روش مخروط ماسه طبق استانداردهای AASHTO T 61-191، ASTM D 64-1556 و بالون لاستیکی طبق استانداردهای AASHTO T 64-205، ASTM D 66-216 برای به دست آوردن وزن مخصوص خاک در حالت طبیعی یا یک‌لایه خاک کوبیده شده با استفاده از ماسه کالیبره شده انجام می‌گیرد. دستگاه بالون لاستیکی برای اندازه‌گیری وزن مخصوص خاک‌های نرم که تحت فشار کم تغییر شکل می‌دهند، مناسب نمی‌باشد. به عبارت دیگر چاله دانسیته حفر شده در خاک نرم در اثر فشار بالون تغییر شکل داده و اندازه حجم واقعی آن مشخص نمی‌شود.

• آزمایش پرسیمتر (مطابق با استاندارد ASTM D 4719)

پرسیومتر سوندی استوانه شکل و دارای غشای انعطاف‌پذیر و منبسط شونده است که برای اعمال فشار یکنواخت به دیواره گمانه طراحی شده است. در آزمایش پرسیمتری، ابتدا سوند پرسیمتر داخل زمین و در عمق موردنظر قرار گرفته و سپس توسط فشار گاز، آب یا روغن منبسط می‌گردد. منحنی فشار-جابه‌جایی (حجم) و سپس منحنی تنش-کرنش ترسیم و با استفاده از آن مقاومت خاک و مدول الاستیک آن در اعماق مختلف تعیین می‌شود.

• آزمایش برش مستقیم برجا

این آزمایش جهت تعیین پارامترهای مقاومتی خاک مورد استفاده قرار می گیرد و به علت هزینه های بالای آزمایشات آزمایشگاهی تعیین مقاومت خاک، از همه متداول تر و همچنین دقیق تر می باشد. در آزمایش برجا روال کار به این صورت می باشد که ابتدا نمونه را در چندین مرحله تحت بارهای مختلف تحکیم می نمایند و پس از آن بارهای برشی در بارهای نرمال متفاوت، به تدریج اعمال می شود تا نمونه دچار گسیختگی گردد. بدین ترتیب در هر بار نرمال، یک نیروی برشی حداکثر وجود دارد که با توجه به معیار گسیختگی موهر-کلمب می توان پارامترهای مقاومت برشی شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را تعیین کرد.

۳-۳- لرزه خیزی و تحلیل خطر زمین لرزه

زمین لرزه عبارت است از لرزش های قابل اندازه گیری سطح زمین است که از رها شدن ناگهانی امواج درون زمین به وجود می آید. آثار سطحی زمین لرزه ممکن است به صورت صدمه به سازه ها، گسلش و حرکت پوسته زمین، نشست زمین گسیختگی دامنه در خشکی و دریا و سرانجام ایجاد امواج در محیط های آبی باشد. هدف از مطالعه مهندسی زلزله، ایجاد امکان طراحی سازه های مقاوم در برابر نیروهای ناشی از زمین لرزه است. در ادامه وجوه اصلی مطالعات مربوط به لرزه خیزی ارائه شده است.

الف) توزیع جغرافیایی و تکرار رخداد زمین لرزه ها

ب) تشخیص موقعیت زمین لرزه ها توسط تعیین محل کانون و مرکز (سطحی) آنها

ج) اندازه گیری نیروی زمین لرزه ها، برحسب بزرگی و شدت زلزله

د) تعیین استهلاک نیروی زمین لرزه برحسب افزایش فاصله از کانون

ه) طول مدت اعمال نیرو

و) ویژگی های نیرو که به دو صورت اندازه گیری می شود، یکی دامنه جابه جایی برحسب شتاب گرانش افقی و قائم و دیگری مؤلفه فرکانس آن، یعنی حرکت زمین

ز) ویژگی های مربوط به واکنش سازه طراحی شده و زمین در مقابل زمین لرزه

خطرات ناشی از زمین لرزه نیز به عوامل زیر بستگی دارد:

الف) بزرگی، فرکانس و مدت زمین لرزه

ب) شرایط زمین شناسی منطقه

ج) وضعیت سازه های منطقه

د) نزدیکی با نواحی پرجمعیت

حرکت و عملکرد امواج زمین لرزه بسته به اینکه از چه محیطی بگذرد متفاوت خواهد بود. جنس و ساختمان زمین در بزرگی ایجاد شده و فراوانی رخداد آن نیز نقش دارد. زمین بر اثر گذر امواج دچار لرزش می شود و در نهایت ممکن

است بخش‌هایی از آن گسیخته شده و جابه‌جائی‌ها و گسل‌هایی به وجود آید. بر اثر زمین‌لرزه همچنین ممکن است دامنه‌ها ناپایدار شده یا خاک‌های ریزدانه بدون چسبندگی با از دست دادن مقاومت برشی، روان شوند. پیش‌بینی محل، بزرگی و زمان وقوع زمین‌لرزه برای طراحی سازه‌ها بر مبنای لرزه‌خیزی و همچنین آگاهی قبلی از یک حادثه محتمل ضروری است. برای پیش‌بینی وقوع زمین‌لرزه عوامل زیر باید موردتوجه قرار گیرد:

الف) تحلیل آماری داده‌های تاریخی (تحلیل رخداد مجدد زمین‌لرزه)

ب) اندازه‌گیری حرکت گسل‌ها، خم شدن و تغییر شکل زمین و افزایش تنش در آن

ج) تغییر در سرعت امواج لرزه‌ای

د) تغییر در میدان مغناطیسی و دیگر مشخصات ژئوفیزیکی زمین

تحلیل ریسک رخداد زمین‌لرزه بر روش‌های آماری و احتمالی استوار است و می‌تواند محل، بزرگی و فرکانس رخداد زمین‌لرزه‌های محتمل را تعیین کند. استفاده از این روش نیازمند ارزیابی اطلاعات تاریخی و زمین‌شناسی ناحیه‌ای و محلی، مخصوصاً در ارتباط با گسل‌ها و فعالیت آن‌ها است. بدین منظور رخداد مجدد وقایع دارای بزرگی‌های متفاوت موردبررسی قرار گرفته و سپس نحوه استهلاک زمین‌لرزه ارزیابی می‌شود. به این ترتیب احتمال حرکت زمین در ساختگاه و بزرگی آن برحسب شرایط زمین‌شناسی به دست می‌آید.

۳-۳-۱- رفتار سنگ در برابر زمین‌لرزه

در محیط سنگی زمین‌لرزه بیشترین تأثیر را بر روی ناپیوستگی‌های سنگ به‌ویژه گسل‌ها دارد. در ارتباط با اهمیت گسل‌ها در مهندسی زمین‌لرزه می‌توان گفت که زمین‌لرزه‌های با عمق کانونی کم، که معمولاً مخرب‌ترین زمین‌لرزه‌ها هستند، اغلب در ارتباط با گسل‌ها می‌باشند. گسل ممکن است یک شکستگی منفرد یا مشتمل بر سیستمی متشکل از شاخه‌های فرعی باشد. بنابراین شناسایی گسل عاملی مهم در مطالعات مربوط به ارزیابی احتمال وقوع و بزرگی زمین‌لرزه است.

در بررسی‌های مربوط به طراحی بر مبنای لرزه‌خیزی، معمولاً نقشه‌های لرزه‌خیزی به روی نقشه‌های زمین‌شناسی قرار داده می‌شوند تا با این وسیله رابطه زمین‌لرزه با ساختهای تکتونیکی مشخص شود. در صورتی که زمین‌لرزه‌های ایران روی نقشه زمین‌شناسی ایران (گسل‌ها) قرار گیرد، رابطه نزدیکی بین این دو در اغلب نقاط مشاهده می‌شود. در زمان بررسی‌های مهندسی برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زمین‌لرزه، موارد زیر باید در ارتباط با گسل موردتوجه قرار گیرد:

۱- تأیید وجود گسل (یا گسل‌ها)

۲- تعیین میزان فعالیت گسل مستعد (فعال، غیرفعال)

۳- تخمین بزرگی زمین‌لرزه‌ای که بر اثر گسیختگی ایجاد خواهد شد (عموماً به طول گسیختگی بستگی دارد).

۴- تخمین بزرگی زمین‌لرزه‌ای که بر اثر گسیختگی ایجاد خواهد شد (عموماً به طول گسیختگی بستگی دارد).

۵- برآورد شتاب زمین لرزه در ساختگاه با توجه به تضعیف و استهلاکی که در فاصله بین گسل عامل تا ساختگاه وجود خواهد داشت.

در نقاط مختلف دنیا، مخصوصاً در ایالات متحده و ژاپن، با توجه به داده های لرزه خیزی فراوانی که در دست است، چندین رابطه در مورد رابطه گسل و زمین لرزه ارائه شده است که از آن میان می توان موارد زیر را نام برد:

(الف) رابطه طولی گسیختگی گسل با بزرگی زمین لرزه حاصل

(ب) رابطه فاصله از گسل ایجادکننده زمین لرزه (گسل عامل) با شتاب ثقل

(ج) رابطه میزان جابه جایی گسل با بزرگی زمین لرزه

• توان لرزه زایی گسل ها

بزرگی زمین لرزه ای که به سبب جنبش دوباره پاره ای از درازای گسل روی می دهد را توان لرزه زایی گسل می گویند که با درازای بخش جابه جاشده آن در ارتباط است. در زمین لرزه های بزرگ طول مدت لرزش نیز تا حد زیادی به طول گسیختگی وابسته است. به این ترتیب که هرچه طول بخش گسل خورده بیشتر باشد، طول مدت زمان دریافت امواج زمین لرزه در یک محل خاص بیشتر می شود.

مطالعات زیادی در رابطه با بزرگی زمین لرزه و درازای گسل انجام شده و روابط تجربی زیادی هم در این ارتباط ارائه گردیده است. در ذیل تعدادی از این روابط ارائه شده است:

$M_s = \log(L_1) + 5.4$	رابطه ۱-۳	نوروزی (۱۹۸۵)
$M_s = 4.629 + 1.429 \log(L_1)$	رابطه ۲-۳	آمبرسیز (۱۹۹۸)
$M_w = 5.16 + 1.12 \log(L_1)$	رابطه ۳-۳	کاپراسمیت-ولز (۱۹۹۰)
$M_s = 5.17 + 1.237 \log(L)$	رابطه ۴-۳	بونیللا (۱۹۸۴)
$M_w = 3.66 + 0.91 \ln(L_2)$	رابطه ۵-۳	زارع (۱۳۷۴)
$M_s = 6.03 + 0.76 \log(L)$	رابطه ۶-۳	

که در این روابط: L طول گسل، L_1 طول ۵۰ درصد از L ، L_2 طول ۳۷ درصد از L برحسب کیلومتر و M_s و M_w بزرگی زمین لرزه می باشند.

• جابه جایی گسل

در سال های اخیر بررسی های متعددی برای تعیین رابطه بین مقدار جابه جایی و طولی از گسل که در آن جابه جایی رخ داده و همچنین بزرگی زمین لرزه حاصله، صورت گرفته است. میزان جابه جایی در طول گسل ممکن است از نقطه ای به نقطه دیگر متفاوت باشد، تا حدی که برخی از گسل ها ممکن است اصلاً جابه جایی نشان ندهند. با این حال میزان جابه جایی گسل را به طور کلی می توان با بزرگی زمین لرزه طبق رابطه ذیل محاسبه کرد:

$$M_s = 6.95 + 0.723 \log(D) \quad \text{رابطه ۷-۳}$$

که در آن، D میزان جابه جاشدگی گسل برحسب متر می باشد.

با احتساب توان لرزه زایی هر گسل با استفاده از رابطه ۳-۱ تا رابطه ۳-۶ و قراردادن آنها در رابطه ۳-۷ میزان جابه جاشدگی گسل ها بر اساس توان لرزه زایی محاسبه می شود.

۳-۳-۲- رفتار خاک در برابر زمین لرزه

بر اثر اعمال تنش برشی به خاک، که ناشی از امواج زمین لرزه رسیده از سنگ بستر است، خاک تحریک می شود. خاک ها را می توان با توجه به پاسخی که حرکات سنگ بستر می دهند، به دو گروه تقسیم کرد.

- خاک های پایداری که با تغییر شکل کشسان و خمیرسان باعث میرایی حرکت لرزه ای می شوند، باین حال هنوز تا حدی مقاومت خود را حفظ می کنند.
- خاک های ناپایدار که به طور ناگهانی متراکم شده یا بر اثر آب گونگی به طور کامل مقاومتشان را از دست می دهند. لرزش های ناشی از زمین لرزه می تواند چند پدیده مهم را در خاک باعث شود که عبارت اند از:
 - تراکم خاک های دانه ای که منجر به نشست سطح زمین می شود و می تواند در محدوده وسیعی اتفاق بیافتد.
 - آب گونه شدن ماسه های ریز و ماسه های لای دار که منجر به از بین رفتن کامل مقاومت خاک شده و باعث نشست و حتی برگشتن سازه ها و گسیخته شدن دامنه ها می شود.
 - کاهش مقاومت در خاک های چسبنده نرم که منجر به نشست سازه ها شده و می توان برای سال ها ادامه داشته باشد. این پدیده بر اثر نوعی آب گونی نیز حاصل می شود.
 - پدیده روانگرایی: روانگرایی به واکنش خاک در برابر بارهای دینامیکی یا تحریک ناشی از امواج برشی زودگذر اطلاق می شود که در نتیجه آن مقاومت خاک به طور کامل از بین رفته و خاک حالتی آب گونه به خود می گیرد.

۳-۴- مطالعات ژئوفیزیکی

ژئوفیزیک پدیده های فیزیکی زمین را شامل پدیده های مغناطیسی، الکتریکی، ثقل زمین، زمین لرزه و انتشار امواج در داخل زمین را مورد مطالعه قرار می دهد. روش های ژئوفیزیک اکتشافی را به دو طریق مختلف می توان طبقه بندی کرد:

- ۱- طبقه بندی بر اساس خصوصیات فیزیکی از جمله وزن مخصوص، خصوصیات مغناطیسی، سرعت انتشار امواج در سنگ های مختلف، خصوصیات الکتریکی و خصوصیات رادیواکتیو.
 - ۲- طبقه بندی بر اساس طبیعی یا مصنوعی بودن پدیده ها، که بر اساس روش های ژئوفیزیکی به دودسته تقسیم می شوند:
- الف) روش های مستقیم: در این روش از وجود میدان های طبیعی در زمین نظیر مغناطیس زمین و میدان ثقل استفاده می شود.

ب) روش های غیرمستقیم: در این روش ها یک تحریک مصنوعی در زمین ایجاد شده و واکنش آن ثبت می شود. مانند روش های الکتریکی و لرزه نگاری.

در مورد پروژه های مهندسی بزرگ، مطالعات ژئوفیزیکی ممکن است به منظور به دست آوردن داده های زیرزمینی در یک ناحیه وسیع و با هزینه معقول، جزئی از بررسی های صحرایی باشد. داده های به دست آمده ممکن است باعث کمک به حذف گزینه های نامساعد، تعیین موقعیت گمان های اکتشافی در نواحی حساس و جلوگیری از تکرار حفاری های غیرضروری در زمین های نسبتاً یکنواخت جلوگیری کند. برداشت های ژئوفیزیکی نه تنها به موقعیت گمانه ها کمک می کند، بلکه تغییرات وضعیت زیرزمینی بین گمانه ها را نیز آشکار می سازد. در مکانی که گمانه ها حفر شده اند داده هایی در مورد لایه ها به دست می دهند ولی در مورد زمین مابین آن ها اطلاعات کافی ارائه نمی دهند. در زمینه تعبیر و تفسیر و انطباق نتایج ژئوفیزیکی، گمانه ها نقش اساسی را بر عهده دارند و ترکیب مناسبی از روش های مستقیم و غیر مستقیم اغلب منجر به نتایج با کیفیت خوبی می شود.

هدف از اکتشافات ژئوفیزیکی کشف پدیده های زمین شناسی از روش های غیرمستقیم است. در روش های مختلف ژئوفیزیکی، یکی از ویژگی های زمین در نقاط مختلف اندازه گیری می شود و هرگاه بین مشخصه فیزیکی طبقات مورد بررسی و زمین اطراف تفاوت چشمگیری وجود داشته باشد با تجزیه و تحلیل داده های حاصل، می توان به وجود طبقات مورد نظر پی برد. از مزایای روش های ژئوفیزیکی می توان به مقرون به صرفه بودن، سرعت و عدم نیاز به حفاری را نام برد. البته اطلاعات حاصل از روش های ژئوفیزیکی قطعی نیست و در بسیاری موارد باید نتایج حاصله را با استفاده از روش های دیگر تأیید کرد. در واقع مهم ترین کاربرد ژئوفیزیک در اکتشاف ساختگاه تونل ها، تعیین موقعیت های غیرعادی است که باید به وسیله روش های مستقیم و دقیق تر بررسی شوند. برنامه ریزی و انجام دادن بررسی های ژئوفیزیکی در مراحل مختلف طرح باید متناسب با اهداف هر مرحله و ابعاد منطقه مورد مطالعه باشد. جدول ۳-۴ کاربرد روش های ژئوفیزیکی در اکتشاف تونل ها و فضاهای زیرزمینی را نشان می دهد. از میان این روش ها برداشت های مقاومت ویژه الکتریکی، برداشت های گرانی سنجی، برداشت های لرزه ای و برداشت های الکتریکی GPR^۱ که در مطالعه ساختگاه تونل کاربرد بیشتری دارند.

¹ Ground Penetrating Radar

جدول ۳-۴- کاربرد روش های ژئوفیزیکی در اکتشاف تونل ها و فضاهای زیرزمینی

روش آزمایش	کاربرد
گرانی سنجی	جگالی زمین را اندازه گیری می کند و توسط آن می توان از تغییرات جانی زمین مورد نظر آگاه شد. این روش در هر نوع زمین تا عمق ۱۰۰۰ متری قابل اجراست. با این تذکر که شدت علائم بازیافتی با مجذور عمق کاهش می یابد.
مغناطیس سنجی	شدت جریان مغناطیسی را اندازه گیری می کند. در هر نوع زمین و مخصوصاً سنگهای آذرین قابل اجراست. کاربرد آن عمدتاً در تعیین محل اجسام فلزی (مثل لوله های فلزی) و نیز نشان دادن محل گسلهاست.
مقاومت مخصوص	هدایت الکتریکی سنگها را اندازه گیری می کند. در هر نوع زمین و تا عمق موثر ۱۰۰۰ متر قابل استفاده است. از این روش در اکتشاف مواد معدنی، منابع شن و ماسه، محل لایه های آب دار و تعیین سطح ایستایی سفره آب و همچنین سنگ بستر استفاده می شود.
الکترومغناطیسی	از این روش در بخشهای نزدیک به سطح و در هر نوع زمین می توان استفاده کرد. با این تذکر که این روش کاربرد محدودی دارد و بیشتر برای تعیین محل لایه های آبدار بکار می رود.
لرزه نگاری	زمان حرکت امواج ناشی از انفجار یا ضربه را تعیین می کند. در هر نوع زمین و تا عمق حداکثر ۳۰۰ متر موثر است. از آن در شناسایی عمق سنگ بستر، تعیین سرعت امواج P و S که در تعیین مشخصات فیزیکی و ساختمانی زمین به کار می آیند و تشخیص محل گسستگیهای مانند گسل استفاده می شود. برای لایه های پر شیب نامناسب و در کارهای کوچک غیراقتصادی است. به طور کلی روشی پر هزینه است ولی می تواند محدوده وسیعی را بپوشاند.
چاه نگاری ژئوفیزیکی	با استفاده از انواع روشهای ژئوفیزیکی، مخصوصاً روشهای رادیواکتیو، اطلاعات با ارزشی در مورد جنس و مشخصات فیزیکی و ساختمانی سنگ در امتداد گمانه به دست می دهد.
بررسی تلویزیونی	از تازه ترین و کاراترین روشها است و توسط آن زمین شناس و مهندس طراح می تواند به طور مستقیم از شرایط زمین در امتداد گمانه آگاهی یابند.
رادارهای GPR	مانند روش لرزه نگاری است، با این تفاوت که به جای امواج لرزه ای از امواج الکتریکی استفاده می شود ولی در اعماق بیش از ۵۰ متر کاربرد ندارد.

فصل چهارم

ساختار شکست تونل

۴-۴- ساختار شکست تونل

۴-۱- مقدمه

ساختار شکست کار (WBS) در مدیریت پروژه، ابزاری جهت تعیین و طبقه‌بندی اجزای کاری است که به سامان‌دهی و تعیین وسعت کلی کار در پروژه کمک می‌کند.

ساختار شکست کار، درواقع یک ساختار شبکه‌ای یا درختی به‌صورت گرافیکی است. این ساختار برای نشان‌دادن روش تولید محصول یا خدمت شامل بخش‌های مختلف خدمات و سایر وظایفی است که سازمان یا شرکتی انجام می‌دهد، مانند کارهایی که برای ارائه یا تولید یک محصول یا خدمت مشخص باید انجام شود. در این تعریف، منظور از «کارهایی که باید انجام شود»، انجام و اتمام یک پروژه با بودجه و زمان مشخص است. تدوین ساختار شکست کار، به‌عنوان یک نظام کاری، جهت حصول اطمینان از مشارکت‌کنندگان و عوامل مختلف در اجرای پروژه، اعم از کارفرما، پیمانکاران، مشاوران و غیره است تا بدانند چه عملیاتی برای تکمیل پروژه موردنیاز است. ساختار شکست کار به‌عنوان یک شالوده اطلاعاتی، برقراری ارتباط صحیح در رابطه با پروژه را برای گروه‌های کاری و سازمان‌های حکومتی ناظر بر پروژه و سایر فرآیندهای قانونی، از طریق کاربرد یک مبنای مشترک، تسهیل می‌کند. این فصل به موضوع و عناصر ساختار شکست کار و شرح ماهیت آن‌ها می‌پردازد.

۴-۲- ماهیت و اصول کلی تدوین ساختار شکست کار

۴-۲-۱- کاربران ساختار شکست کار

در اجرای پروژه‌های بزرگ، علاوه بر کارکنان پروژه، عاملانی چون سرمایه‌گذاران، بهره‌برداران، تأمین‌کنندگان مالی و پیمانکاران، و در بعضی موارد، سازمان‌های دولتی و مؤسسات با دانش تکنولوژیکی پیچیده، دخالت و مشارکت دارند. این عاملان بیش از گذشته به اطلاعات چندگانه و متمرکز نیاز دارند. رعایت الزامات و مقررات قانونی و مسئولیت نظارتی سازمان‌ها، نیازمند اطلاعات و زبان مشترک است. در حقیقت در اجرای پروژه، ساختار شکست کار، یک داده و زبان مشترک است و ابزاری مؤثر برای برقراری ارتباط بین کاربران مختلف در پروژه است. در تأمین داده‌های موردنیاز برای تدوین ساختار شکست کار، دو گروه شامل گروه عملیاتی پروژه و گروه‌های حاکمیتی و مسئول دخالت دارند. گروه‌های عملیاتی شامل طراحی و مهندسی، ساخت و اجرا، مدیریت مالی، اداری و تأمین تجهیزات و گروه‌های حاکمیتی و مسئول، مانند کارفرما/صاحب‌کار، سازمان‌های دولتی، سرمایه‌گذاران و تأمین‌کنندگان هستند. یک ساختار شکست کار، به‌خوبی طراحی و تدوین‌شده و گروه‌های عملیاتی و مسئول را قادر می‌سازد که ارتباطات دقیق و منظمی باهم داشته باشند.

۴-۲-۲- داده‌های اولیه برای تهیه ساختار شکست کار

داده‌های اولیه برای تهیه ساختار شکست کار باید کامل و بدون نقص، گردآوری شود. این داده‌ها در زمینه‌های مختلف به شرح زیر هستند:

بودجه: نحوه و مقدار تأمین مالی و جریان نقدینگی^۱ سالانه را مشخص می‌کند.

برآورد هزینه: میزان هزینه‌های پروژه را بر مبنای تأمین خدمات فنی و مهندسی، تأمین کالا و تجهیزات و هزینه‌های ساخت، اجرا، نصب و راه‌اندازی تعیین می‌کند.

بهره‌وری: نرخ بهره‌وری مورد انتظار برای عوامل درگیر در اجرای پروژه، عامل مهمی در تدوین ساختار شکست کار است.

زمان‌بندی: جدول و برنامه زمان‌بندی و ترتیب انجام فعالیت‌های پروژه از ابتدای کار تا خاتمه پروژه، عامل مهمی در تعیین روش کار است.

منابع: برای اجرای پروژه منابعی مانند سرمایه، ماشین‌آلات، تجهیزات، نیروی انسانی و مواد مصرفی بکار می‌رود که اطلاعات آن‌ها برای تدوین ساختار شکست کار ضرورت دارد.

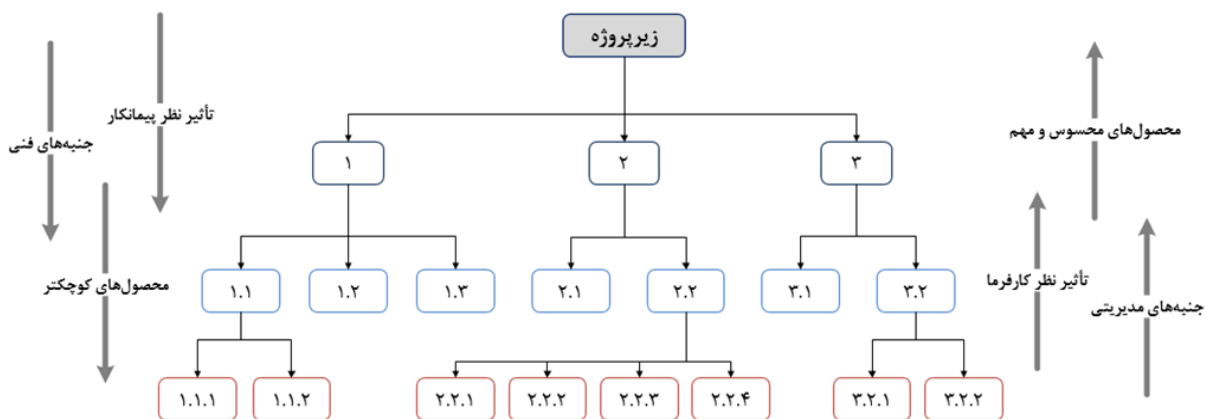
پس‌ازآنکه تمام داده‌های ذکرشده فراهم شد، کارشناسان تنظیم‌کننده ساختار شکست کار، تمام ردیف‌ها و رده‌های عملیاتی را تعریف و تدوین می‌کنند. این تعاریف علاوه بر آنکه تمام عوامل را قادر می‌سازد که حول یک شالوده مشترک اقدام و حرکت کنند، موجب ارتباط سه‌جانبه هزینه، زمان‌بندی و بهره‌وری بر محور ثابت و درنهایت باعث اندازه‌گیری مناسب پیشرفت کار و کنترل پروژه می‌شود. اطلاعات حاصل از گروه‌های مختلف، علاوه بر آنکه در تهیه بودجه، زمان‌بندی و برآورد هزینه‌ها کاربرد دارد، در تدوین خطوط مبنای برآورد هزینه و زمان‌بندی ساخت و اجرا نیز مؤثر است. بنابراین ساختار شکست کار از مرحله شروع تا انتهای پروژه در برنامه‌ریزی، اجرا، کنترل و اصلاح بکار می‌رود. ساختار شکست کار، ابزاری برای تمام کاربران پروژه است تا بر تأمین خدمات و تجهیزات، اجرا و اتمام موفقیت‌آمیز پروژه نظارت و کنترل داشته باشند.

نکته مهم در نظر گرفتن ساختار شکست براساس تحویل‌شدنی‌ها است. این مسئله، مفهومی گسترده و الزاماتی فراوان دارد که عملاً کل مطالب این فصل در این حوزه خواهد بود. تمامی مطالب ذکرشده در این فصل، عملاً توضیحی برای این موضوع است که چگونه می‌توان ساختار شکست کار را به نحوی تهیه کرد که واقعاً مبتنی بر تحویل‌شدنی‌ها باشد. ساختار شکست کار، یک تقسیم‌بندی سلسله‌مراتبی برای کارهایی است که گروه پروژه جهت دستیابی به اهداف پروژه و تحقق تحویل‌شدنی‌های آن را انجام خواهد داد.

^۱ Cash Flow

۴-۲-۳- تحویل شدنی^۱

همان‌طور که ذکر شد، تحویل شدنی محصول، نتیجه یا قابلیتی منحصربه‌فرد و قابل ارزیابی است که وجودش برای تکمیل یک فرآیند، فاز یا پروژه الزامی است. معمولاً تحویل شدنی در مفهومی خاص‌تر به معنای تحویل شدنی‌های خارجی، یعنی تحویل شدنی‌هایی که باید به تأیید کارفرما یا حامی برسند، به کار می‌رود. تحویل شدنی‌هایی که باید به تأیید کارفرما برسند، معمولاً اهمیت مدیریتی بالاتری دارند و به این خاطر، بهتر است در سطوح بالای ساختار شکست کار قرار بگیرند. در مرحله بعد، تحویل شدنی‌هایی قرار می‌گیرند که به تأیید رسمی کارفرما نمی‌رسند. این تحویل شدنی‌ها معمولاً در سطوح میانی ساختار شکست کار قرار می‌گیرند. در نهایت، تحویل شدنی‌هایی در سطوح پایین قرار می‌گیرند که عمدتاً اهمیت فنی دارند و نه مدیریتی. بسیاری از این تحویل شدنی‌ها برای کارفرما معنای خاصی ندارد و توجه وی عمدتاً معطوف به تحویل شدنی‌های عمده‌ای است که در سطوح بالای ساختار قرار می‌گیرند. سطوح بالای ساختار شکست کار، نه تنها اهمیت فراوانی در مدیریت پروژه دارند، بلکه زبان مشترک ارکان پروژه نیز به شمار می‌روند (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱- میزان اهمیت جنبه‌های فنی و مدیریتی در سطوح مختلف ساختار شکست

۴-۲-۴- الزامات ساختار شکست کار

برای تهیه ساختار شکست کار، دو قاعده وجود دارد که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است

¹ Deliverable

۲ قاعده مبتنی بودن ساختار بر تحویل شدنی‌ها عناصر ساختار شکست کار تحویل‌شدنی‌های پروژه را نشان می‌دهند و در پایین‌ترین سطح به فعالیت‌ها (کارها) ختم خواهد شد. ساختار درباره کارهای پروژه است، ولی عناصر آن از جنس کار نیستند، بلکه از جنس تحویل‌شدنی‌ها (محصول‌ها) هستند. هرچه عنصری در ساختار شکست کار بالاتر قرار داشته باشد، باید تحویل‌شدنی مهم‌تر و کلان‌تری در پروژه باشد.	۱ قاعده ۱۰۰ درصد ساختار شکست باید جامع و کامل باشد؛ یعنی تمام کارهای پروژه را در خود جای دهد (کاری از قلم نیفتاده باشد) و کار اضافه‌ای نیز نداشته باشد. این قاعده باید علاوه بر کل ساختار شکست کار، در تمام سطوح و زیر مجموعه‌های آن نیز برقرار باشد.

شکل ۴-۲- قواعد اجباری در تنظیم ساختار شکست

اگر ساختار شکست کاری یکی از این دو قاعده را رعایت نکرده باشد، ساختاری نادرست است. اگر هر دو قاعده را رعایت کرده باشد، ساختاری درست خواهد بود. معمولاً درست بودن ساختار شکست کار کافی نیست و باید علاوه بر آن مناسب نیز باشد. مناسب بودن ساختار شکست کار با رعایت توصیه‌های غیراجباری محقق می‌شود.

قاعده ۱۰۰ درصد: هر مجموعه عنصر در ساختار شکست کار یا فعالیت‌های زیرمجموعه آن باید دقیقاً ۱۰۰ درصد کارهای عنصر مادر خود را شامل شوند؛ نه کمتر و نه بیشتر.

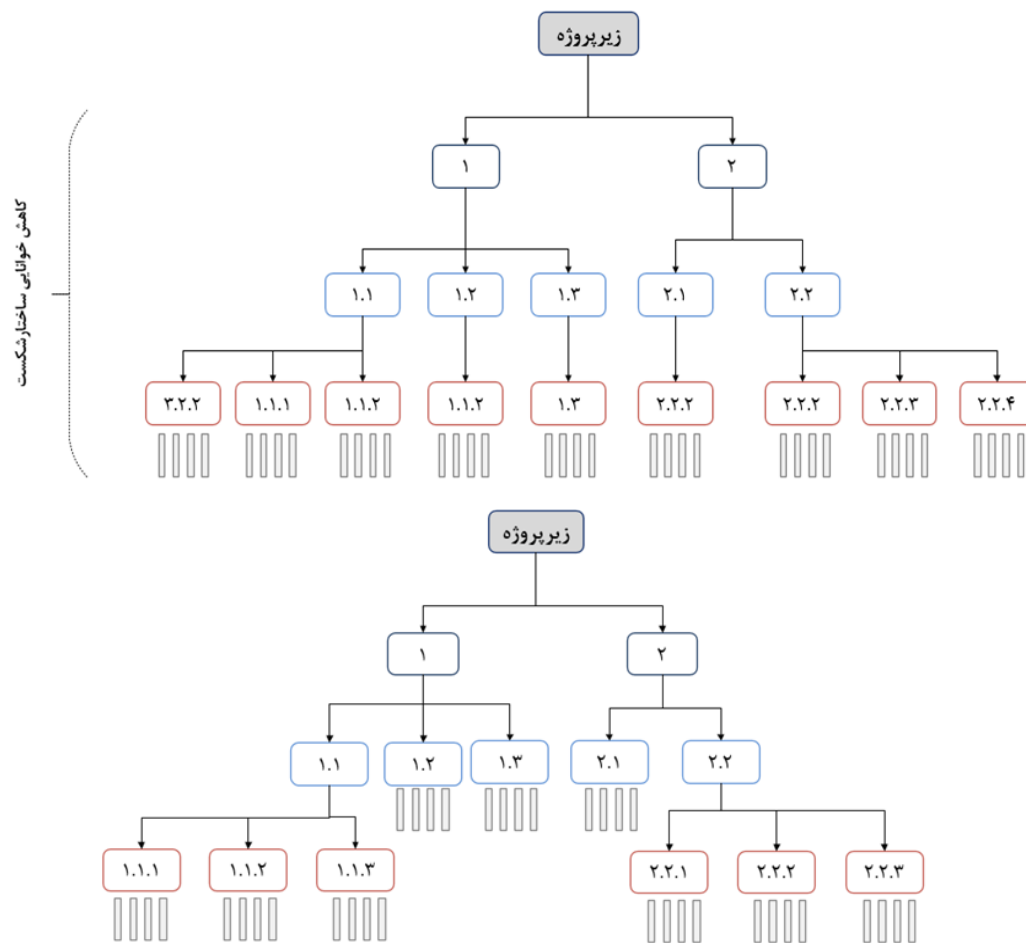
چگونه می‌توان ساختار شکست کار را مبتنی بر تحویل‌شدنی‌ها طراحی کرد؟

پاسخ در این است که نباید به عناصر ساختار شکست کار به چشم کار نگاه کرد؛ هیچ‌کدام از این عناصر کار نیستند، بلکه محصول (تحویل‌شدنی) هستند.

هر عنصر از ساختار شکست کار باید یکی از تحویل‌شدنی‌های پروژه باشد. درواقع با تهیه ساختار شکست کار مشخص می‌کنیم که محصول نهایی پروژه مشتمل بر چه محصول‌های میانی یا به عبارت دیگر چه تحویل‌شدنی‌هایی است؛ تحویل‌شدنی‌هایی که وقتی بطور کامل محقق شوند، عملاً پروژه نیز محقق شده است. حال، این تحویل‌شدنی‌ها چگونه محقق می‌شوند؟ با کارهای پروژه؛ با فعالیت‌هایی که بعداً زیرمجموعه آن‌ها قرار می‌گیرد.

۴-۲-۵- محل قرارگیری فعالیت‌ها

نیازی نیست که تمام فعالیت‌های پروژه در سطح یکسانی قرار داشته باشند و به عبارت دیگر لازم نیست که ساختار شکست کار در تمام شاخه‌هایش به یک اندازه پیش رفته باشد. اگر سعی شود تمام قسمت‌های ساختار شکست کار هم‌سطح گردند، عملاً خوانایی ساختار کاهش می‌یابد و صدمه‌ای که به کار می‌زند، بیشتر از نظم ظاهری است که بر اساس یکدستی به وجود می‌آید (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳- محل قرارگیری فعالیت‌ها در ساختار شکست کار

۴-۲-۶- شیوه نام‌گذاری عناصر بر اساس مبنا بودن تحویل‌شدنی‌ها

مبنا بودن تحویل‌شدنی‌ها نیز الزاماتی در حوزه نام‌گذاری عناصر به وجود می‌آورد و رعایت این موارد نیز الزامی است. به دو عبارت زیر توجه کنید:

دیوارهای داخلی طبقه سوم اجرای دیوارهای داخلی طبقه سوم

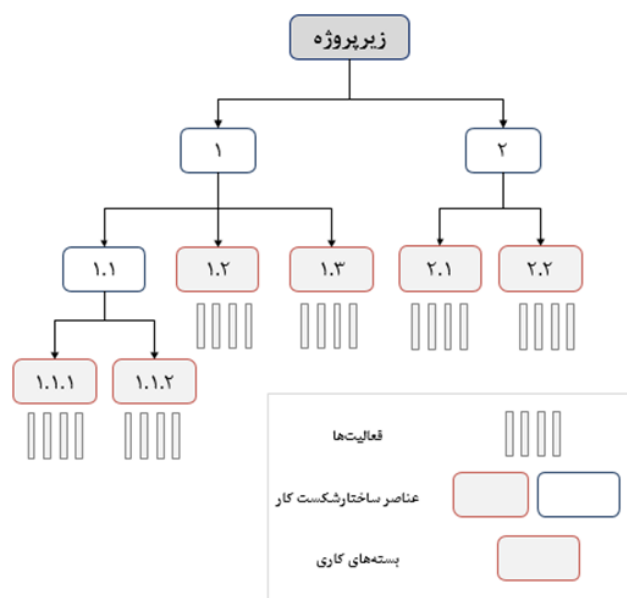
عملاً هر دو درنهایت به یک واقعیت اشاره می‌کنند؛ اما دو دیدگاه مختلف هستند. عبارت "اجرای دیوارهای داخلی طبقه سوم" به یک کار اشاره می‌کند، کاری که برای پدید آمدن دیوارها لازم است. عبارت "دیوارهای داخلی طبقه سوم" به یک محصول اشاره می‌کند. کار و محصولی که به وجود می‌آورد با هم ارتباط دارند، اما یک چیز نیستند؛ به همین خاطر این دو عبارت نیز با هم فرق می‌کنند.

به عبارت سمت راست، عبارت اسمی و به عبارت سمت چپ، عبارت فعلی گفته می‌شود. فعالیت‌ها از نوع کار هستند، پس حتماً باید با عبارت‌های فعلی بیان شوند. عناصر ساختار شکست کار از نوع محصول (تحویل‌شدنی) هستند، درنتیجه حتماً باید با عبارت‌های اسمی زیر بیان شوند.

عبارت اسمی
دیوارهای داخلی طبقه سوم
نشان دهنده محصول
مناسب برای عناصر ساختار شکست کار
عبارت فعلی
اجرای دیوارهای داخلی طبقه سوم
نشان دهنده کار
مناسب برای فعالیت ها

اهمیتی ندارد که پروژه را چگونه انجام می دهیم (با انجام چه کارهایی)، مهم این است که خروجی ها (تحويل شدنی ها) را بر اساس مشخصات اولیه (از جمله کیفیت) تحويل دهیم. باید تمرکزمان بر خروجی ها باشد تا موفق شویم، نه بر کارها. درواقع کارها دائماً تغییر می کنند و خروجی ها ثابت هستند. به عبارتی دیگر کارها ابزار و خروجی ها هدف هستند. بدیهی است که با چنین دیدگاهی، برنامه ریزی نیز باید کاملاً محصول محور باشد و در این میان تهیه ساختار شکست کار بیشترین سهم را از این دیدگاه می برد.

تقریباً تمام مشخصات هر عنصر ساختار شکست کار بر اساس زیرمجموعه هایش تعریف می شود. به عنوان مثال، گستره آن برابر با مجموع گستره زیرمجموعه هایش است (قاعده ۱۰۰ درصد)، ریسک هایش ترکیب ریسک های زیرمجموعه هایش است، الزام هایش ترکیب الزام های زیرمجموعه هایش و غیره بر این اساس اکثر عناصر ساختار شکست کار نیاز خیلی زیادی به راهنما ندارند، مگر عناصر آخرین سطح ساختار شکست کار که زیرمجموعه ای به جز فعالیت ها ندارند. به عناصر آخرین سطح ساختار شکست کار که میزبان فعالیت ها خواهند شد، بسته کاری گفته می شود (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۴- محل قرار گیری بسته‌های کاری در ساختار شکست کار

شاید فرض شود که بسته‌های کاری هم نیاز به راهنما ندارند، زیرا مشخصات آن‌ها ترکیبی از مشخصات فعالیت‌ها خواهد بود؛ اما این‌طور نیست. قاعده ۱۰۰ درصد در مورد فعالیت‌ها نیز برقرار است، یعنی مجموعه فعالیت‌های هر بسته کاری نیز باید تمام کار آن را پوشش دهند و کار اضافه‌ای نداشته باشند. باین‌حال تفاوت عمده‌ای بین عناصر ساختار شکست کار، یعنی تحویل‌شدنی‌ها و فعالیت‌ها وجود دارد. خیلی اوقات کارها تغییر می‌کنند (به‌عنوان مثال تکنولوژی کار تغییر می‌کند)، تفصیلی‌تر می‌شوند یا با کامل شدن تصویر پروژه اضافه و کم می‌شوند؛ اما تحویل‌شدنی‌ها با بسامد بسیار کمتری تغییر می‌کنند. به همین خاطر ترکیب مشخصات فعالیت‌ها برای تعریف تحویل‌شدنی‌ها به‌اندازه کافی دقیق نخواهد بود. از سوی دیگر، دیدگاه حاکم بر ساختار شکست کار معمولاً کل به‌جزء است، نه جزء به‌کل. ساختار شکست کار مبتنی بر تحویل‌شدنی‌هاست، اما این مسئله به این معنا نیست که هر نوع تحویل‌شدنی را در هر سطحی از ساختار شکست کار می‌توان قرار داد. تحویل‌شدنی‌های سطوح بالاتر باید کلان‌تر و مهم‌تر از سطوح پایین باشند. این مسئله معمولاً به‌طور خودکار برقرار می‌شود، اما اگر آن را خودآگاهانه نیز در نظر گرفته باشیم، ساختارهای شکست کار بهتری پدید خواهید آورد. ساختار شکست کار بسته‌های مختلفی با ارزش‌های متفاوت پدید می‌آورد و مشخص می‌شود که توجه هر گروهی از ذینفعان به کدام بسته خواهد بود.

۴-۲-۷- سطوح استاندارد ساختار شکست کار

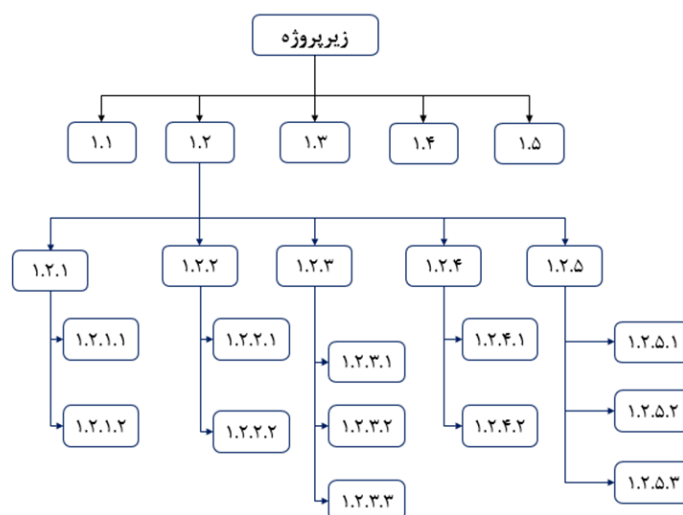
ساختار شکست کار تا سطح چندم تنظیم شده است؟

فرض شود "سطح پنجم". مخاطب چه چیزی می تواند از پاسخ متوجه شود؟ اصلاً چرا از ابتدا چنین سؤالی پرسیده شده است؟ این سؤال چه معنایی دارد؟ آیا دو ساختار شکست کار که هر دو پنج سطح داشته باشند، به یک اندازه تفصیلی هستند یا قالب بندی مشابهی دارند؟ قطعاً اینطور نیست. این نوع سؤال ها با این فرض پرسیده می شوند که ساختاری استاندارد وجود دارد. اما چنین استاندارد وجود ندارد و نمی تواند هم وجود داشته باشد، چون پروژه ماهیتاً منحصر به فرد است و نمی توان قالب مشابهی برای تمام پروژه ها در نظر گرفت.

۴-۲-۸- شماره گذاری عناصر ساختار شکست کار

رسم بر این است که آیتم های ساختار شکست کار با شماره های سلسله مراتبی مشخص شوند. بنابراین طراحی صحیح و توسعه ساختار شکست کار، با سیستم کدگذاری و اصطلاحات یکسان، مبنای مشترکی برای مدیریت پروژه و شالوده ای برای نظارت و کنترل هزینه، زمان بندی و مشخصات کاری بوجود می آورد. کد یک روش مختصرگویی اطلاعات یک آیتم می باشد. این آیتم می تواند از کل پروژه تا یک بخش کوچک پروژه (فیزیکی و غیر فیزیکی) را شامل گردد. برای کد بندی عناصر ساختار شکست استاندارد خاصی وجود ندارد. معمولاً برای سطوح مختلف از اعداد استفاده می گردد. برای مثال کد "۱.۲.۳" به معنای این است که این عنصر ساختار شکست در سومین سطح ساختار شکست قرار دارد، چون دارای سه شماره می باشد و شماره اعداد هم نشان دهنده روند توسعه درختی برای کدامین شاخه می باشد که از سطوح بالاتر به ارث برده است (شکل ۴-۵).

در این نشریه شماره گذاری ساختار شکست بر اساس سلسله مراتبی از اعداد می باشد، که این شماره از بالاترین سطح و از شماره ۱ شروع می شود و با پایین آمدن در هر سطح شماره آن تغییر می کند. شکل ۷ فرآیند شماره گذاری ساختار شکست را نشان داده است.



شکل ۴-۵- شماره گذاری عناصر ساختار شکست

فصل پنجم

طراحی تونل

۵- طراحی تونل

۵-۱- انتخاب روش و مقطع حفاری

۵-۱-۱- انتخاب مقطع حفاری

در طراحی سطح مقطع حفاری نه تنها باید سطح مقطع داخلی مورد نیاز، نگهداری ها، لاینینگ، زهکشی، عایق بندی و همگرایی پس از حفاری بلکه باید پایداری طولانی مدت تونل هم در نظر گرفته شود. همچنین در شرایط زمین با همگرایی زیاد، در سطح مقطع حفاری باید تغییر شکل مجاز لحاظ گردد.

۱- پایداری تونل و مقطع حفاری

پایداری جبهه کار وابسته به تقسیم بندی حفاری هدینگ (طاق) و گام حفاری^۱ دارد. بنابراین تقسیم بندی حفاری هدینگ، مقطع حفاری و گام حفاری باید بر اساس پایداری جبهه کار و با در نظر گرفتن روش های کمکی انتخاب شود.

توزیع تنش در اطراف تونل، تحت تأثیر مقطع حفاری و تنش اولیه در زمین است. بنابراین در طراحی شکل تونل باید از نقاط تیز که باعث تمرکز تنش می شوند پرهیز شود. سطح مقطع حفاری زمانی اهمیت ویژه ای می یابد که لاینینگ برای نگهداری بارها طراحی می شود زیرا هنگامی که بارهای بسیار بزرگی به آن وارد می شود نصب کفبند بتنی^۲ و یا طراحی مقطع دایره ای باید مورد مطالعه قرار گیرد. هنگام قرارداد کفبندها^۳، قسمت انتقالی^۴ بین دیوار جانبی و کفبند باید تا حد امکان دارای انحنا بزرگ باشد.

۲- سطح مقطع حفاری با توجه به روش حفاری

به هنگام طراحی سطح مقطع حفاری علاوه بر پایداری پس از اتمام حفر، پایداری حین حفر نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

۳- شرایط محل و مقطع حفاری

در طراحی مقطع حفاری باید شرایط زمین و محل حفاری مانند وجود سازه های مجاور مورد مطالعه قرار بگیرد. در زمین نرم (سست) لازم است پایداری زمین اطراف و نشست سطحی بررسی شود.

¹ Division of heading and round length

² Invert concrete

³ placing inverts

⁴ Transitional part

۵-۱-۲- روش حفاری

یک روش حفاری مناسب با در نظر گرفتن شرایط زمین، شکل و اندازه سطح مقطع حفاری و تأثیر برسازه‌های اطراف و محیط‌زیست انتخاب می‌شود.

۱- روش حفاری و وضعیت زمین

تقسیم حفاری هد و گام حفاری به شرایط زمین بستگی دارد. بر این اساس، هنگام انتخاب روش حفاری، پایداری جبهه کار مساله اصلی می‌باشد. برای حفاری در زمین‌های نرم، تقویت کف تونل و یکپارچه کردن سطح مقطع تونل با نصب کفبند موقت باید مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- روش حفاری و حفاری سطح مقطع

در تونل‌های کوچک مقطع، معمولاً روش تمام مقطع به دلیل محدودیت در تجهیزات حفاری و ارتفاع ماشین‌آلات انتخاب می‌شود. در تونل‌های با مقطع بزرگ، معمولاً حفاری بخشی^۱ (مقطعی) مانند روش بنج برای اطمینان از پایداری جبهه کار و به دلیل سازگاری بیشتر با تغییرات شرایط زمین انتخاب می‌شود.

۳- روش حفاری و تأثیر بر سازه‌ها و سطح مقطع

در پروژه‌هایی که حفر تونل در مجاورت دیگر سازه‌ها می‌باشد، بررسی نشست سطحی، جابه‌جایی در سازه‌های مجاور و حد مجاز آن‌ها ضروری است. در پروژه‌های با زمین نرم و روباره کم، روش‌های قابل اجرا شامل الف) روش پیشروی دریف جانبی ب) روش برش بنج و روش برش بنج با استفاده از روش‌های کمکی برای حفظ سطح مقطع حفاری می‌باشند.

۵-۱-۲-۱- حفر تونل با ماشین‌های تمام مقطع (TBM)

انتخاب ماشین‌های حفاری باید با شرایط محیطی و زمین، اندازه و شکل مقطع تونل، طول تونل، روش حفاری و مدت‌زمان ساخت سازگار باشد. ماشین انتخاب شده باید از کیفیت مناسبی برخوردار باشد تا ایجاد مناطق آسیب اطراف زمین به حداقل برسد و سطح حفاری یکنواخت باشد.

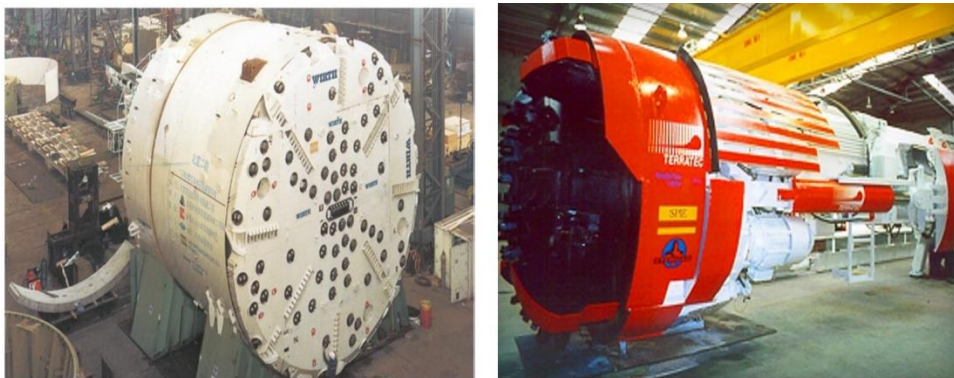
در مقایسه با حفاری با روش آتشکاری، استفاده از روش مکانیزه منطقه آسیب کمتری ایجاد می‌کند و در صورت سازگاری ماشین با شرایط زمین می‌توان به حفاری کارآمد دست یافت. علاوه بر این، به دلیل سروصدا و لرزش نسبتاً کم، حفاری مکانیزه اغلب برای تونل‌های مناطق شهری که آتشکاری کاربردی نیست استفاده می‌شود.

¹ Partial excavation

در روش حفر تمام مقطع از ماشینی استفاده می‌شود که تمام مقطع تونل‌های دایره‌ای را یک جا حفر کند که آن را TBM^۱ می‌نامند، تکامل و گسترش این دستگاه‌ها سبب شده است که نرخ پیشروی تونل‌ها در حد قابل توجهی افزایش یابد.

به‌طور کلی مراحل حفاری به کمک این ماشین را می‌توان به چهار مرحله استقرار دستگاه، انجام چرخه حفاری، استقرار مجدد دستگاه و جلو رفتن ماشین تقسیم کرد.

دو نوع اصلی TBM شامل ماشین‌های باز^۲ و ماشین‌های سپردار^۳ در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱- ماشین‌های TBM، باز (سمت راست) و سپردار (سمت چپ)

۵-۱-۲-۲- حفر تونل به کمک ماشین‌های بازویی (رودهدر، درام کاتر و غیره)

ماشین‌های حفاری بازویی همان‌گونه که از اسمشان مشخص است جبهه‌کار را به‌صورت مرحله‌ای و مقطعی حفر می‌کنند و در ابعاد، اشکال و با اهداف مختلف برای حفاری در تونل‌ها و فضاها زیرزمینی به کار گرفته می‌شود. این ماشین‌ها برای حفاری در خاک، سنگ با مقاومت پایین، شروع تونل‌های TBM، گالری‌های کمکی و دسترسی با هر شکل و ابعادی استفاده می‌شوند. قسمت‌های اصلی ماشین‌های بازویی به شرح زیر است:

- بازوی هیدرولیکی که کلاهک در انتهای آن نصب می‌شود (Boom)

- تارت^۴ برای جلو-عقب رفتن کلاهک و بازو

- ناو زنجیری و یا نوار نقاله برای حمل باطله

- بدنه ماشین که در بعضی موارد با جک‌های تثبیت تجهیز شده است.

- سیستم حرکت

ابعاد کلاهک برشی آن‌ها در مقایسه با مقطع تونل، بسیار کوچک و به شکل‌های مختلف می‌باشد. در مقایسه با ماشین‌های تمام مقطع، ماشین‌های بازویی مزایایی همچون سبک بودن، حمل آسان و سهولت مونتاژ و دیمونتاژ را دارند.

¹ Tunnel Boring Machine

² Open machine

³ Shielded machine

⁴ Turret

بنابراین حداقل طول تونلی که با این ماشین‌ها می‌توان حفر کرد به نسبت کمتر می‌باشد و این ماشین‌ها برای حفاری انتخابی^۱ مناسب می‌باشند. حفاری با این ماشین‌ها مستقل از شکل مقطع بوده و هر مقطعی را می‌توانند حفاری و حتی از پیچ‌های بسیار تند براحتی عبور کنند. علاوه بر این دسترسی به جبهه کار، مشاهده و کنترل آن در این ماشین‌ها راحت‌تر است. از طرفی قابلیت حفاری و کارائی آن‌ها با سختی و افزایش مقاومت سنگ کاهش می‌یابد.

۵-۱-۲-۳- حفر تونل به روش آتشکاری

با توجه به اینکه در حفر تونل‌ها تنها یک سطح آزاد وجود دارد، عملیات آتشکاری در آن‌ها با معادن روباز کاملاً متفاوت است. قاعده اصلی در آتشکاری تونل‌ها، ایجاد یک فضای باز یا سطح آزاد دوم است که توسط مجموعه‌ای از چال‌ها که چال‌های برش نامیده می‌شوند به وجود می‌آید. این چال‌ها بر طبق آرایش‌های خاصی با توجه به نوع سنگ، سطح مقطع تونل و دیگر عوامل طراحی می‌شوند تا در سینه کار تونل حفره‌ای را ایجاد کنند. پس از این مرحله چال‌های پیشروی منفجر می‌شوند و حفره ایجادشده را تا دیواره نهایی تونل گسترش می‌دهند. در آخرین مرحله نیز چال‌های محیطی که دیواره انتهایی مقطع تونل را ایجاد می‌کند منفجر می‌شوند.

در طراحی الگوی انفجار باید شرایط زمین، اندازه و شکل مقطع تونل، روش و طول حفاری را در نظر گرفته و بر همین اساس طول و قطر چال انفجاری، آرایش چال‌های برش، الگوی حفاری، نوع و مقدار ماده منفجره و چاشنی مورد استفاده به نحوی که کمترین تأثیر را بر محیط اطراف داشته باشند طراحی شوند؛ بنابراین باید موقعیت، جهت و عمق چال‌های انفجاری برای دستیابی به یک الگوی حفاری سازگار با شرایط زمین به دقت طراحی شود و ایمنی کار قبل و حین حفاری چال‌های انفجاری در نظر گرفته شود.

در مناطق نزدیک به محل حفر تونل، لرزش انفجار ممکن است بر سازه‌های سطحی یا زیرزمینی تأثیر منفی داشته باشد. این موضوع به‌ویژه در مناطق مسکونی که ممکن است تحت تأثیر لرزش زمین، سروصدای انفجار و ارتعاش هوا با فرکانس پایین باشد صادق است. در مواردی که نگرانی بابت ایجاد مشکلات زیست‌محیطی ناشی از عملیات آتشکاری وجود دارد باید تأثیرات زیست‌محیطی به‌عنوان بخشی از برنامه انفجار بررسی شود و در صورت نیاز اقدامات متقابل مانند محدود کردن دوره زمانی عملیات انفجار، انفجار کنترل‌شده، نصب تجهیزات عایق صوتی و در برخی موارد تغییر به روش حفاری مکانیزه انجام شود.

به‌منظور کاهش لرزش انفجار اغلب از انفجار کنترل‌شده استفاده می‌شود. در انفجار کنترل‌شده تعداد چاشنی‌ها بیشتر اما میزان خرج در هر تأخیر کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان از چاشنی‌های تاخیری الکتریکی استفاده کرد. برای کاهش صدای انفجار و ارتعاش هوا با فرکانس پایین می‌توان از انفجار پیش شکافی و نصب درها و دیوارهای عایق صدا استفاده کرد.

¹ Selective cutting

ماشین حفاری چال انفجاری با در نظر گرفتن ویژگی سنگ شناسی، اندازه و شکل مقطع تونل، وضعیت زمین و غیره انتخاب می‌شود. همچنین خرج گذاری باید به‌طور ایمن مطابق با برنامه انفجار و نوع ماده منفجره متناسب با وضعیت جبهه کار و تجهیزات موجود انتخاب شود. در نهایت انفجار باید دقیق و ایمن انجام شود و تا زمانی که انفجار به کلی پایان نیافته از ورود نیروی انسانی به داخل جلوگیری شود. پس از انفجار نیز وضعیت محل و محیط مجاور انفجار بررسی و در صورت نیاز اقدامات لازم انجام شود.

۵-۱-۲-۴- احداث تونل به روش کند و پوش

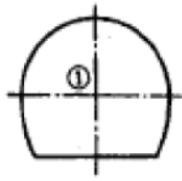
مبنای این روش این‌گونه است که ترانشه‌ای از سطح زمین با عمق و عرض موردنظر حفر می‌کنند تا کف ترانشه در تراز کف تونل قرار گیرد. سپس تاسیسات موردنظر را در تونل نصب و آن را با وسایل نگهداری، دیوارسازی کرده و روی آن را تا سطح اولیه زمین خاک ریزی می‌کنند. بدیهی است این روش در مواردی امکان‌پذیر است که در محل موردنظر، سازه‌های سطحی وجود نداشته و یا تخریب آن‌ها امکان‌پذیر باشد. از سوی دیگر در مناطق شهری وجود شبکه زیرزمینی مشکلاتی را برای اجرای این روش تحمیل می‌کند.

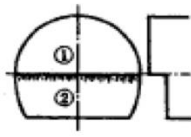
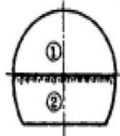
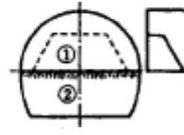
یکی از مهم‌ترین کاربردهای این روش احداث تونل‌ها و ایستگاه‌های مترو است. همچنین برای احداث گذرگاه‌های زیرزمینی، کانال‌های لوله آب، فاضلاب و کابل‌های برق نیز از این شیوه استفاده می‌شود.

۵-۱-۳- مقطع حفاری

در جدول ۵-۱ انواع مقاطع حفاری، شرایط کاربرد، مزایا و معایب ارائه شده است.

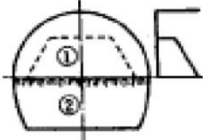
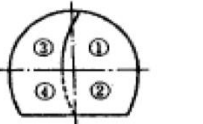
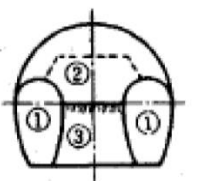
جدول ۵-۱: طبقه‌بندی و ویژگی‌های روش‌های استاندارد حفاری

روش حفاری	شکل	شرایط زمین قابل اجرا	مزایا	معایب
روش تمام مقطع		- روش متداول حفاری برای مقاطع کوچک - زمین بسیار پایدار برای تونل مقطع بزرگ - زمین نسبتاً پایدار برای تونل مقطع متوسط $A > 60m^2$ $A > 30m^2$	- تعداد کارگر کم در روش حفاری مکانیزه - مدیریت ساخت ازجمله کنترل ایمنی به دلیل حفاری تک مقطعی آسان است.	- طول کامل تونل را لزوماً نمی‌توان به‌تنهایی با روش تمام قطع حفاری کرد. - روش برش بـنچ کمکی در صورت نیاز استفاده می‌شود.

روش حفاری	شکل	شرایط زمین قابل اجرا	مزایا	معایب
روش تمام مقطع با بنج کمکی	 Bench length = 2~4m	- نامناسب برای زمین‌های خوب و در هم آمیخته با زمین‌های ضعیف که ممکن است نیاز به تغییر روش حفاری داشته باشد.	- به کارگیری تعداد کارگر کمتر در صورت مکانیزه کردن و حفاری موازی هد و بنج	- سنگ‌های خردشده ممکن است از بالای تونل سقوط کنند و اقدامات ایمنی بیشتری لازم است.
روش برش بنج	 Bench length > 50m	- زمین نسبتاً پایدار که استفاده از روش تمام مقطع دشوار باشد. - حفاری تمام مقطع در طول حفر دشوار شود. - وجود زمین ضعیف^۱ در زمین نسبتاً خوب	- حفاری یک در میان^۲ هد و بنج نیاز به تجهیزات و نیروی انسانی را کاهش می‌دهد.	- حفاری موازی میان طول مدت ساخت را افزایش می‌دهد.
روش برش کوتاه	 $D < \text{Bench length} \leq 50m$	- قابل استفاده برای زمین‌های مختلف مانند زمین‌های نرم، آماسی و سنگ متوسط تا مقاوم (اساسی‌ترین و محبوب‌ترین روش)	- قابل تطبیق با تغییر شرایط زمین	- حفاری موازی تعادل زمان سیکل را برای هد و بنج دشوار می‌کند.

¹ Poor ground

² Alternate

معایب	مزایا	شرایط زمین قابل اجرا	شکل	روش حفاری
- برای حفاری هد داربست مورد نیاز است. - انتخاب ماشین های حفاری برای هد محدود می شود.	- نصب زود هنگام کفیند آسان است.	- کنترل تغییر شکل مقطع داخلی حفاری شده به فوریت بیشتری نسبت به برش بنچ کوتاه مورد نیاز است. - در زمین های مچاله شونده که نیاز به کنترل زود هنگام سطح مقطع است.	 Bench length $< D$.	برش بنچ مینی^۱
- جابه جایی یا نشست در حین برداشتن دیافراگم باید بررسی شود. - زمان حذف دیافراگم به دوره ساخت اضافه می شود. - به کارگیری یک روش کمکی خاص در تونل دشوار است.	- پایداری جبهه کار با تقسیم بر مقطع های کوچک حاصل می شود. - نشست سطح زمین را می توان به میزان قابل توجهی کاهش داد. - مقطع های تقسیم هد به نسبت هد استفاده شده در روش جانبی بزرگ تر هستند می توان از ماشین های بزرگ تر استفاده کرد.	- زمین با روباره کم که نیاز است نشست حداقل باشد. - وضعیت نسبتاً ضعیف زمین برای تونل با سطح مقطع بزرگ	 One method is to provide a diaphragm only to	روش دیافراگم میانی
- برای حفاری دریف ها باید از ماشین های کوچک استفاده شود.	- نشست سطح زمین را می توان کاهش داد. - دیافراگم های موقت را می توان راحت تر از دیافراگم های مرکزی برداشت.	- ظرفیت باربری زمین برای به کارگیری روش برش بنچ کافی نیست. - زمین با روباره کم که نیاز است نشست حداقل باشد.		روش دریف جانبی

¹ Mini bench cut

۵-۲- طراحی سیستم پیش تحکیم

۵-۲-۱- کلیات

بهسازی یا تقویت زمین برای تونل‌سازی در زمین‌های نرم و شرایط ژئوتکنیکی مشکل ضروری است. در زمین‌های رانشی^۱ همچون ماسه‌ها با لایه‌های آبدار، سنگ‌های مچاله شونده^۲ یا خردشده و جاهایی که بدون حفاظ ماندن ناحیه‌ای کوچک برای زمانی کوتاه خطرناک باشد و در حقیقت زمان خود نگهداری به‌اندازه‌ای کم باشد که نصب نگهداری باید جلوتر از حفاری صورت گیرد، انجام پیش تحکیم ضرورت خواهد یافت.

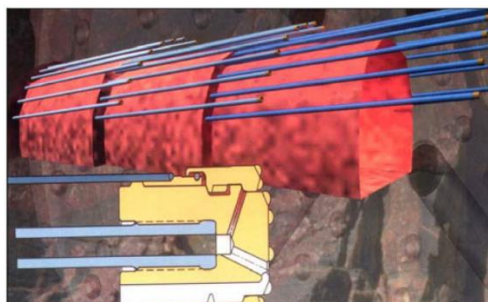
برای حل مشکلات حفر تونل در سنگ‌های ضعیف و زمین‌های ریزشی قبل و حین حفاری راه‌حل عمومی وجود ندارد بلکه بسته به شرایط خاص پروژه روش اجرایی متناسب به آن ارائه می‌گردد. روش‌های مختلف بهسازی زمین جهت تسهیل در حفاری تونل و جلوگیری از ریزش شامل موارد ذیل می‌باشند:

۵-۲-۲- فورپولینگ

در روش‌های فورپولینگ عمدتاً چال‌هایی به موازات محور تونل از بالای سینه‌کار حفر می‌شود و تثبیت سینه‌کار و زمین اطراف با نصب لوله‌های فولادی، پلی‌اتیلن و فایبرگلاس و انجام تزریق در این چال‌ها و اطراف آن صورت می‌گیرد به بیان دیگر در این روش چتر حفاظتی بر روی تونل تشکیل می‌گردد.

مزایای استفاده از روش فورپولینگ به شرح ذیل می‌باشد:

- ۱- این روش از نظر اجرا بسیار ساده است و نیاز به ماشین‌آلات خاص که خارج از محدوده تونل‌سازی به صورت متعارف می‌باشد ندارد و یک روش انعطاف‌پذیر و قابل ترکیب با دیگر تکنیک‌ها و روش‌های تحکیمی می‌باشد.
 - ۲- با اجرای این روش پایداری جبهه کار افزایش یافته و از نشست‌های سطحی ناشی از تونل‌های حفرشده به مقدار زیادی جلوگیری می‌شود. همچنین ایمنی حین اجرای عملیات حفاری تونل با تحکیم سقف افزایش می‌یابد.
- شکل ۵-۲ روش اجرای فورپولینگ را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲: شمای سه‌بعدی از اجرای روش فورپولینگ

¹ Running ground

² Squeezing rock

۵-۲-۳- تزریق

تزریق روشی است که به وسیله آن مخلوطی از سیمان و آب و یا تلفیقی از چند ماده مختلف با فشار مناسب به داخل خلل و فرج و درزه و شکاف و یا حفره‌های تشکیلات سنگی و خاکی رانده می‌شود تا موجب بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها گردد. در حقیقت این عمل باعث کاهش نفوذپذیری، افزایش مدول تغییر شکل و افزایش مقاومت و ظرفیت باربری محیط می‌شود.

معمولاً انواع روش‌های تزریق را به دو صورت می‌توان به کاربرد: به عنوان روش‌های حفاظتی^۱ قبل از حفر تونل که به آن پیش تزریق^۲ می‌گویند یا به عنوان روش‌های بهسازی^۳ پس از حفر تونل که به آن پسا تزریق^۴ می‌گویند.

۵-۲-۴- انجماد

در این روش هدف پایین آوردن دمای آب موجود در فضاها یا خالی توده خاکی و سنگی به زیر نقطه انجماد آن است. آب‌های منجمد شده به عنوان یک سیمان عمل کرده لذا زمان خود ایستایی زمین افزایش می‌یابد. عموماً مواد مورد استفاده برای انجماد، شورآب یا نیتروژن مایع است. فرآیند انجماد آب باعث افزایش حجم آب موجود در محیط می‌شود که ممکن است مشکلات زیادی برای پروژه به دنبال داشته باشد. نشست سطح زمین پس از انجام عملیات حفاری زیرزمینی از جمله مشکلات اصلی این روش بشمار می‌رود. انجماد روش پرهزینه بوده و فقط در شرایط خاص و استثنایی کاربرد دارد.

۵-۳- طراحی سیستم نگهداری اولیه

۵-۳-۱- کلیات

اولین قدم بعد از انتخاب روش حفاری تونل، کنترل پایداری تونل‌ها جهت تأمین ایمنی لازم در زمان حفاری و همین‌طور پایداری بلندمدت آن‌ها است. سیستم نگهداری اولیه معمولاً همراه با حفاری تونل نصب و اجرا می‌شود و هدف از اجرای آن تثبیت و حفظ تونل پس از حفاری و تأمین ایمنی کارگران و تجهیزات می‌باشد. سیستم نگهداری اولیه می‌تواند شامل موارد ذیل باشد که یا به تنهایی یا به صورت ترکیبی استفاده می‌شوند:

- راکبوت
- شاتکریت
- قاب‌های فولادی
- تیرهای مشبک (لتیس گریدر)

^۱ Preserving intervention method

^۲ pre-grouting

^۳ Improvement methods

^۴ Post-grouting

بطور کلی زمین در شرایط طبیعی، تحت نیروی ثقل و نیروهای تکتونیکی قرار دارد. در اثر حفر تونل تعادل میان این نیروها به هم خورده و وضعیت تنش جدیدی بوجود می‌آید که ممکن است زمین اطراف تونل را به مرحله گسیختگی ببرد. بطور مثال در توده سنگ‌ها، درزه‌های طبیعی و درزه‌های ایجادشده در اثر حفاری تونل می‌توانند موجب ناپایداری زمین اطراف تونل شده و ممکن است که این ناپایداری به سقوط چند بلوک تا ریزش کامل زمین اطراف تونل بیانجامد. نصب سیستم نگهداری به سه طریق ذیل باعث جلوگیری از ناپایداری تونل‌ها خواهد شد:

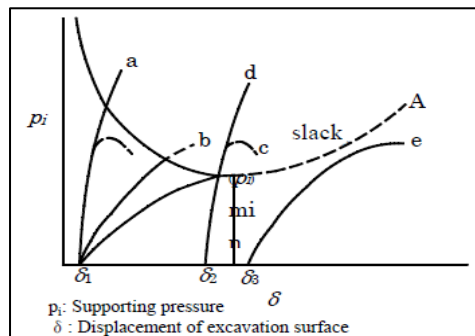
- اعمال فشار محصور به زمین اطراف دیواره تونل
- نگهداری بلوک‌های رها شده
- بهسازی و تحکیم زمین

توجه روزافزون به هزینه تونل‌سازی منجر به تحقیقات بیشتر برای بهینه‌سازی اقتصادی نگهداری شده است و برای ترکیب‌های مختلف نگهداری با نتایج تکنیکی یکسان و هزینه‌های کمتر در توده سنگ‌های ناپایدار، درک مفهوم اندرکنش نگهداری و توده سنگ امری اجتناب‌ناپذیر است.

وقتی سیستم نگهداری در نزدیکی جبهه کار نصب می‌شود، همه بار روی این سیستم منتقل نمی‌شود، بلکه قسمتی از بار که در اطراف فضای حفاری توزیع مجدد یافته، توسط خود سینه کار تحمل می‌شود. با پیشروی تونل تأثیر سینه کار کاهش یافته و سیستم نگهداری باید مقدار بیشتری از بار را تحمل کند.

در طراحی سیستم نگهداری اولیه توجه به موارد زیر ضروریست:

۱. سیستم نگهداری اولیه باید به گونه‌ای طراحی شود که تونل و زمین دربرگیرنده پایدار باشند بنابراین باید به صورت یکپارچه با تنش‌ها و جابجایی‌های ایجادشده زمین هماهنگ باشد. مصالح اصلی سازه زیرزمینی، محیط سنگی اطراف است به عبارتی حمل‌کننده اصلی بار، توده سنگ دربرگیرنده فضای زیرزمینی می‌باشد. منحنی اندرکنش زمین، یکی از روش‌ها برای فهم مکانیسم تغییر شکل تونل است که رابطه بین کاهش فشار داخلی و افزایش جابجایی شعاعی دیواره تونل را نشان می‌دهد (شکل ۵-۳). در این نمودار منحنی a-e مشخصه سیستم نگهداری تونل است.



شکل ۵-۳: نمودار منحنی مشخصه زمین و سیستم نگهداری اولیه (منحنی Fenner-Pacher)

هنگامی که فشار زمین (Pi) حداقل باشد، سیستم نگهداری بهینه می‌باشد اما همیشه یافتن چنین نقطه‌ای آسان نیست. گاهی با اعمال تنش‌های زیاد از طرف زمین و مقاومت زمین در مقابل تنش‌های وارده، زمین و سیستم نگهداری به طرز پیچیده‌ای با یکدیگر درگیر می‌شوند در چنین شرایطی لازم است که زمین تقویت شود. در پروژه‌های با روباره کم یا زمین ناپایدار، رفتار زمین ناشی از حفاری تونل ممکن است بر پایداری سنگ دربرگیرنده، سطح زمین و سازه‌های مجاور، تأثیر منفی بگذارد. در چنین شرایطی در سیستم نگهداری باید دیگر مشخصه‌های مکانیکی از جمله مقاومت، سختی و غیره را نیز در نظر گرفته و جهت جلوگیری از اثرات نامطلوب پیش‌بینی شده، معیارهای کنترلی تعیین شوند.

۲. سیستم نگهداری به گونه‌ای طراحی شود که تمام فعالیت‌های تونل به روشی کارآمد و ایمن، حاصل شود. زمانی که جبهه کار تونل به دلیل شرایط خاص زمین یا بزرگی مقطع، ناپایدار باشد، ضروری است سیستم نگهداری با روش‌های کمکی مانند تثبیت جبهه کار، طراحی شود. همچنین در صورت نیاز و جهت بهینه‌سازی هزینه احداث تونل، لازم است نسبت به تغییر سیستم نگهداری بر اساس مشاهدات و پایش‌های ابزار دقیق، اقدام شود.

۵-۳-۲- بارهای وارده بر تونل

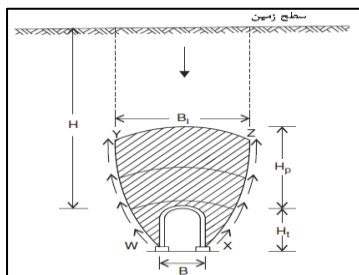
عمده بارهای وارده بر ساختمان تونل‌ها، فشار آب زیرزمینی و فشار توده سنگ دربرگیرنده است. بارهای زنده ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه را بدون این که خدشه‌ای به پایداری تونل وارد شود، می‌توان نادیده گرفت. البته به جز در مواردی که تونل در عمق بسیار کم و به روش کند و پوش حفر می‌شود.

اندازه‌گیری بار وارده بر تونل از طرف توده سنگ کار بسیار پیچیده‌ای است. این پیچیدگی از دشواری محاسبه تنش‌های اولیه توده سنگ ناشی نمی‌شود بلکه عامل اصلی این پیچیدگی توزیع تنش‌های القایی است که پس از حفر تونل در توده سنگ ایجاد می‌شوند زیرا مقدار و راستای این تنش‌ها تحت تأثیر عوامل متعددی از قبیل جنس سنگ، ابعاد فضای حفاری، روش حفاری، صلبیت نگهداری، مدت زمانی که تونل بدون نگهداری پایدار می‌ماند و غیره قرار دارد. طبق نظر ترزاقی بار وارده بر تونل برابر با وزن مرده ارتفاع مشخصی از مصالح روی تونل است که اگر نگهداری نصب نشود، به داخل تونل ریزش می‌کنند. این مصالح خردشده خود به خود قوسی در بالای تونل ایجاد می‌کنند و توده سنگ بالای آن پایدار است.

اغلب همه دستورالعمل‌هایی که تاکنون برای برآورد بار وارده بر سیستم نگهداری تونل‌ها ارائه شده، مبتنی بر سیستم‌های رده‌بندی مهندسی توده سنگ است. برآورد بار وارده بر یک سیستم نگهداری، مهم‌ترین جزء طراحی آن است که می‌توان آن را با روش‌های تحلیلی، عددی، مشاهده‌ای و تجربی برآورد کرد.

۵-۳-۲-۱- استفاده از رده بندی بار سنگ ترزاقی

این تئوری احتمالاً اولین طبقه بندی موفق توده سنگ در فضاهای زیرزمینی می باشد. بنابر نظر ترزاقی (۱۹۴۶)، بار سنگ (H_p) ارتفاع ناحیه سست شده در بالای سقف تونل است (شکل ۵-۴). این ارتفاع معادل مضربی از عرض یا مجموع عرض و ارتفاع تونل می باشد. ترزاقی با در نظر گرفتن ناپیوستگی های ساختاری توده سنگ، آن ها را به طور کیفی به ۹ کلاس مطابق جدول ۵-۲ طبقه بندی کرد.



شکل ۵-۴- مفهوم بار سنگ در تونل ها (رده بندی ترزاقی)

ترزاقی با استفاده از نتایج به دست آمده از یک تونل راه به عرض ۵.۵ متر که توسط قاب های فولادی نگهداری می شد، مقدار بار سنگ (H_p) را برحسب عرض تونل (B) و ارتفاع تونل (H_t) مطابق جدول ۵-۳ در ۹ کلاس پیشنهاد کرد. ترزاقی رابطه زیر را بمنظور محاسبه فشار وارد بر نگهداری قائم با استفاده از مقدار بار سنگ پیشنهاد داد:

$$P_v = \gamma \cdot H_p$$

رابطه ۵-۱

در این رابطه:

P_v : فشار قائم وارد بر نگهداری

γ : دانسیته توده سنگ

H_p : ارتفاع روباره سست شده در بالای سقف تونل (جدول ۵-۳)

جدول ۵-۲- طبقه بندی کلاس های سنگی مختلف بر اساس تئوری بار سنگ ترزاقی

کلاس سنگ	وضعیت سنگ	توضیحات
I	سخت و یکپارچه	سنگ بدون هوازدگی بوده و درزه و ترک های مویی در آن مشاهده نمی شود. در صورت خرابی، شکست سنگ در سنگ بکر به وجود می آید. پس از حفاری، ممکن است سنگ دچار گسیختگی ناشی از پوسته پوسته شدن سقف گردد. در تنش های بالا، پوسته پوسته شدن شدید و ناگهانی در سنگ های سقف و دیواره روی می دهد. مقاومت فشاری تک محوره بزرگتری یا مساوی ۱۰۰ مگاپاسکال می باشد.
II	سخت، لایه ای با شیبستوز	سنگ سخت و لایه ای می باشد. فاصله لایه ها معمولاً زیاد است. ممکن است سنگ دارای صفحات ضعیف باشد یا نباشد. در چنین سنگ هایی، پوسته پوسته شدن کاملاً متداول است.
III	توده ای و نسبتاً درزه دار	یک توده سنگ درزه دار که فاصله درزه ها زیاد می باشد. درزه ها می توانند سیمانه شده یا نشده باشند. همچنین سنگ می تواند دارای ترک های مویی بوده ولی بلوک های بزرگ بین درزه ها شدیداً قفل شده اند به طوری که دیواره های قائم نیازی به نگهداری جانبی ندارند. ممکن است پوسته پوسته شدن نیز رخ دهد.

کلاس سنگ	وضعیت سنگ	توضیحات
IV	نسبتاً بلوکی و رگه‌ای	درزه‌ها فاصله کمتری دارند. ابعاد بلوک‌ها در حدود ۱ متر می‌باشند. سنگ ممکن است سخت یا نرم باشد. درزه‌ها ممکن است جوش خورده باشند یا نباشند ولی قفل‌شدگی شدید بوده به‌طوری‌که فشار جانبی وارد نمی‌کنند.
V	بسیار بلوکی و رگه‌ای	درزه‌ها فاصله بسیار کمی دارند. ابعاد بلوک کمتر از ۱ متر می‌باشد. چنین توده سنگ غالباً حاوی قطعه‌سنگ‌هایی با ترکیب شیمیایی ثابت می‌باشد که کاملاً از هم جدا بوده و قفل‌شدگی ناقصی دارند. انتظار می‌رود فشار جانبی کمی داشته باشیم. ممکن است دیواره‌های قائم نیاز به نگهداری داشته باشند.
VI	کاملاً خردشده اما از نظر شیمیایی یکپارچه	شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های خردشده که از نظر شیمیایی یکپارچه می‌باشند. هیچ قفل‌شدگی وجود ندارد. انتظار می‌رود که فشار جانبی قابل‌ملاحظه‌ای بر نگهداری تونل وارد گردد. ابعاد بلوک‌های از چند تا ۳۰ سانتیمتر است.
VII	سنگ مچاله شونده-عمق متوسط	مچاله شوندگی فرآیندی مکانیکی است که در آن سنگ بدون افزایش حجم محسوسی به داخل تونل پیشروی می‌کند. عمق متوسط واژه‌ای نسبی بوده که می‌تواند از ۱۵۰ تا ۱۰۰۰ متر متغیر باشد.
VIII	سنگ مچاله شونده-عمق زیاد	عمق می‌تواند بیش از ۱۵۰ متر باشد. حداکثر عمق توصیه شده برای تونل ۱۰۰۰ متر می‌باشد (۲۰۰۰ متر برای سنگ‌های بسیار خوب).
IX	سنگ تورمی	تورم به‌صورت افزایش حجم در اثر تغییر شیمیایی سنگ بوده که معمولاً در حضور رطوبت و آب ایجاد می‌گردد. برخی از شیل‌ها رطوبت را از هوا جذب کرده و دچار تورم می‌گردند. سنگ‌هایی که حاوی کانی‌های تورمی مانند منتموریلونیت، ایلیت، کائولینیت و دیگر کانی‌های تورمی هستند می‌توانند دچار تورم شده و فشار بسیار زیادی بر سیستم نگهداری تونل اعمال کنند.

جدول ۵-۳- بار سنگ تونل‌ها موجود در کلاس‌های سنگ مختلف

کلاس سنگ	وضعیت سنگ	فاکتور بار سنگ H_p	ملاحظات
I	سخت و یکپارچه	.	اگر پوسته پوسته شدن و یا ترکیدن اتفاق می افتد پوشش سبک لازم می باشد
II	سخت، لایه ای با شیبستوز	$B (0.5-1.0)$	نگهداری سبک فقط برای محافظت در برابر پوسته پوسته شدن است. بار وارده از نقطه ای به نقطه دیگر به طور غیر قابل پیش بینی تغییر می کند.
III	توده ای و نسبتاً درزه دار	$B (0.25-1.0)$	بدون فشار جانبی
IV	نسبتاً بلوکی و رگه ای	$(B+H_t) 0.35-0.25B$	بدون فشار جانبی
V	بسیار بلوکی و رگه ای	$(B+H_t) (0.1-0.35)$	بدون فشار جانبی و یا فشار جانبی کم
VI	کاملاً خرد شده اما از نظر شیمیایی یکپارچه	$(B+H_t) 1/10$	فشار جانبی قابل ملاحظه. به علت نرم شدگی ناشی از نشت آب به طرف کف تونل، لازم است که انتهای قاب ها به طور پیوسته نگهداری شود و یا از قاب های حلقوی استفاده گردد.
VII	سنگ فشارنده-عمق متوسط	$(B+H_t) (2/10-1/10)$	فشار جانبی زیاد، تیرهایی با قوس معکوس لازم می باشد. قاب های حلقوی توصیه می شود.
VIII	سنگ فشارنده-عمق زیاد	$(B+H_t) (4/50-2/10)$	فشار جانبی زیاد، تیرهایی با قوس معکوس لازم می باشد. قاب های حلقوی توصیه می شود.
IX	سنگ تورمی	تا ۲۵۰ فوت (۸۰ متر)، بدون توجه به مقدار $(B+H_t)$	قاب های حلقوی لازم است، در موارد دشوار استفاده از نگهداری تسلیم شونده توصیه می شود.

*** B دهانه تونل (m)، H_t ارتفاع حفاری (m)، H_p ارتفاع توده سنگ سست شده روی تاج (m)

• ۵-۳-۲-۱-۱- تئوری ترزاقی اصلاح شده توسط دیر و همکاران

دیر و همکارانش (۱۹۷۰) سیستم طبقه بندی ترزاقی را با وارد کردن RQD به عنوان ابزار سنجش کیفیت سنگ اصلاح کردند (جدول ۵-۴). آن ها بین روش های تونل سازی سنتی و مکانیزه تفاوت قائل شده و جداولی برای نگهداری تونل های سنگی ۶ و ۱۲ متری، توسط قاب فولادی، راکبوت و شاتکریت ارائه دادند. بنابر نظر آن ها، بار سنگ در تونل هایی که به صورت مکانیزه حفر می شوند ۲۰ تا ۲۵ درصد کاهش می یابد.

• محدودیت های روش ترزاقی

الف) این روش برای تونل های با عرض بیش از ۶ متر کاربرد ندارد.

ب) در این روش فرض بر این است که سقف تونل در زیر سطح ایستایی قرار گرفته است. اگر سقف تونل به طور دائم در بالای سطح ایستایی باشد مقادیر ارائه شده برای کلاس های IV تا VI در جدول بالا می توانند تا ۵۰ درصد کاهش داده شوند.

ج) بهترین راندمان این روش در تونل هایی است که روش اجرای آن چال زنی و آتشکاری و نگهداری آن، قاب فولادی می باشد. استفاده از حفاری مکانیزه، روش های حفاری چند مرحله نظیر NATM، آتشکاری های کنترل شده و همچنین سیستم های نگهداری نظیر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی و راکبوت سبب می شود تا مقاومت اولیه توده سنگ

حفظ شده و در نتیجه همگرایی سقف کمینه گردد که در اثر ارتفاع زون سست در بالای تاج محدود می‌گردد. دیر و همکاران اعتقاد داشتند که بار سنگ در تونل‌هایی که به صورت مکانیزه حفاری می‌شوند ۲۰ تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

(د) طبقه‌بندی ترزاقی هیچ‌گونه اطلاعات کمی درباره خواص توده سنگ به دست نمی‌دهد.

(ه) بر اساس تئوری ترزاقی، مقدار بار سنگ با افزایش عرض مقطع حفاری، زیاد می‌شود. این در حالیست که بارتون و همکاران (۱۹۷۴) اعتقاد داشتند که فشار وارد بر نگهداری در تونل‌های سنگی، مستقل از عرض تونل می‌باشد. آنالیز اندرکنش توده سنگ-سیستم نگهداری تونل که توسط ورمن (۱۹۹۳) انجام گرفت نیز تأکیدی بر این نکته بود که فشار وارد بر نگهداری عملاً مستقل از عرض تونل است با فرض اینکه سفتی یا سختی نگهداری کم نشود. گول و همکاران (۱۹۹۶) نیز مطالعاتی در خصوص تأثیر ابعاد تونل بر فشار وارد بر نگهداری انجام دادند و دریافتند که در زمین‌های غیر مچاله شونده، ابعاد تونل تأثیر ناچیزی بر فشار وارد بر نگهداری دارد ولی در زمین‌های مچاله شونده، این تأثیر نقش بسزایی ایفا خواهد کرد.

به‌طور کلی با مقایسه فشار وارد بر نگهداری تخمین زده‌شده از جدول ۵-۳ با مقادیر اندازه‌گیری شده، می‌توان جمع بندی کرد که:

الف) روش ترزاقی فشار وارده منطقی و قابل قبولی بر نگهداری تونل‌های کوچک (عرض کمتر از ۶ متر) پیش‌بینی می‌کند.

ب) فشار وارد بر نگهداری پیش‌بینی شده توسط این روش برای تونل‌های بزرگ و مغارها (دهانه ۶ تا ۱۴ متر)، محافظه‌کارانه و دست بالا خواهد بود.

ج) مقادیر فشار وارد بر نگهداری تخمین زده‌شده برای شرایط زمین‌های مچاله شونده و تورمی، در بازه بسیار وسیعی قرار می‌گیرند.

البته علیرغم تمام این محدودیت‌ها، روش ترزاقی کماکان کاربردهای خود را در شرایطی که برای آن توسعه یافته است حفظ کرده است.

جدول ۵-۴- بار سنگ ترزاقی اصلاح شده توسط دیر و همکاران

کلاس سنگ	شرایط سنگ	RQD (%)	بار سنگ (Hp)	ملاحظات
I	سخت و یکپارچه	۹۵-۱۰۰	صفر	مانند جدول ۵-۳
II	سخت، متورق و شیبستوز	۹۰-۹۹	$(0-0.5) B$	مانند جدول ۵-۳
III	توده‌ای و نسبتاً درزه‌دار	۸۵-۹۵	$(0-0.25) B$	مانند جدول ۵-۳
IV	نسبتاً بلوکی و رگه‌ای	۷۵-۸۵	$0.25 B - 0.35 (B + H_i)$	در مورد کلاس‌های IV، V و VI تا حدود ۵۰ درصد از مقادیر بار ترزاقی کاسته شود

زیرا سطح آب تأثیر ناچیزی بر بار سنگ دارد.				
مانند بالا	$(0/2-0/6)(B+H_t)$	۳۰-۷۵	بسیار بلوکی و رگه‌ای	V
مانند بالا	$(0/6-1/10)(B+H_t)$	۳-۳۰	کاملاً خردشده	VI
مانند بالا	$(1/10-1/4)(B+H_t)$	۰-۳	ماسه و گراول	VIa
مانند جدول ۳-۵	$(1/10-2/10)(B+H_t)$	N/A	سنگ مچاله شونده-عمق متوسط	VII
مانند جدول ۳-۵	$(2/10-4/50)(B+H_t)$	N/A	سنگ مچاله شونده-عمق زیاد	VIII
مانند جدول ۳-۵	تا ۸۰ متر صرف نظر از مقدار $(B+H_t)$	N/A	سنگ تورمی	IX

• ۵-۳-۲-۱-۲- تئوری ترزاقی اصلاح شده برای تونل‌ها و مغارها توسط سینگ و همکاران (۱۹۹۵)

سینگ و همکاران (۱۹۹۵)، فشار وارد بر نگهداری اندازه‌گیری شده در تونل‌ها و مغارها را با مقادیر به‌دست‌آمده از تئوری ترزاقی مقایسه کرده و مشاهده کردند که برخلاف نظریه ترزاقی، فشار وارد بر نگهداری در تونل‌ها و مغارهای سنگی، مستقیماً با افزایش ابعاد فضای حفاری افزایش نمی‌یابد. از دلایل این موضوع می‌توان به جلوگیری از سست شدن توده سنگ در اثر پیشرفت تکنولوژی تونل‌سازی با استفاده از روش‌های حفاری مکانیزه، انفجارهای کنترل‌شده، ابداع روش‌های حفاری چند مرحله‌ای همچون NATM و NMT^۱، رفتار اتساعی توده سنگ‌ها و زبری درزه‌ها اشاره کرد.

۵-۳-۲- تخمین فشار وارد بر نگهداری بر اساس RMR

اونال (۱۹۸۳) بر اساس مطالعاتی که در معادن زغال‌سنگ انجام داد رابطه ۲-۵ را برای تخمین فشار وارد بر نگهداری در فضاهای حفاری دارای سقف تخت با استفاده از RMR پیشنهاد کرد:

رابطه ۲-۵

$$P_V = \left[\frac{100 - RMR}{100} \right] \gamma B$$

P_V : فشار وارد بر نگهداری

γ وزن واحد حجم سنگ

B عرض تونل

گول و جتوا (۱۹۹۱) با مقایسه فشارهای نگهداری اندازه‌گیری شده و مقادیر تخمین زده‌شده از رابطه ۲-۵، رابطه مزبور را برای استفاده در تونل‌های سنگی با سقف قوس دارد بررسی کردند. نتایج مقایسات نشان داد که این رابطه برای تونل‌های سنگی مناسب نیست. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فشارهای نگهداری تخمین زده‌شده در شرایط زمین‌های مچاله شونده برای تمام ابعاد تونل‌ها مطمئن نمی‌باشد. ضمناً در خصوص زمین‌های غیر مچاله شونده، تخمین‌ها برای

¹ Norwegian Method of Tunnelling (NMT)

تونل‌های کوچک (قطر کمتر از ۶ متر) نامطمئن و دست پایین و برای تونل‌های بزرگ (قطر بیش از ۹ متر) محافظه کارانه و دست بالا خواهد بود. این مسئله نشان‌دهنده این موضوع است که در تونل‌های قوس دار، اندازه تونل اهمیت فراوانی در فشار وارد بر نگهداری دارد که منطقی هم به نظر می‌رسد چراکه ممان‌های خمشی در یک سقف تخت برخلاف سقف‌های قوسی با افزایش ابعاد زیاد می‌شود.

گول و جتوا بر اساس مقادیر فشارهای نگهداری به دست آمده از ۳۰ تونل ابزاربندی شده در هند، رابطه ۳-۵ را برای تخمین فشار وارد بر نگهداری کوتاه مدت فضاهای زیرزمینی در هردو شرایط زمین‌های مچاله و غیر مچاله شونده و در صورتیکه تونل سازی به روش آتشکاری و استفاده از قاب‌های فولادی انجام شود ارائه دادند (به شرط عدم وجود انفجار سنگ):

$$P_v = \frac{7.5B^{0.1}H^{0.5}-RMR}{20RMR} \quad \text{رابطه ۳-۵}$$

B: دهانه حفاری (متر)

H: عمق تونل (۵۰ تا ۶۰۰ متر)

P_v: فشار وارد بر نگهداری کوتاه مدت سقف (MPa)

RMR: امتیاز توده سنگ پس از حفاری و درست پیش از نگهداری

توجه شود که طبقه‌بندی RMR در توده سنگ‌های ضعیف و بسیار ضعیف قابل اتکا نبوده و باید در استفاده از روش RMR در چنین توده سنگ‌هایی دقت شود. در توده سنگ‌های ضعیف استفاده از طبقه‌بندی Q مطمئن تر است. ضمناً طبقه‌بندی RMR بر اساس تجارب حاصل از حفر تونل‌های نسبتاً بزرگ مقطع به روش چال زنی و آتشکاری بنا شده است. مؤلفه‌های نگهداری در این سیستم شامل راکبوت، شاتکریت، مش و قاب فولادی می‌باشد. این روش طبقه‌بندی برای شرایط فوق الذکر بسیار مناسب است ولی برای تونل‌هایی که با TBM حفاری شده و به سنگ آسیب کمی می‌رسد و نیازی به کاربرد شاتکریت بلافاصله پس از حفاری نیست، مناسب نمی‌باشد.

۳-۲-۳-۵- تخمین فشار وارد بر نگهداری بر اساس سیستم Q

• ۳-۲-۳-۵-۱- استفاده از روش بارتون و همکاران (۱۹۷۴)

بارتون و همکاران (۱۹۷۴ و ۱۹۷۵) ظرفیت نگهداری ۲۰۰ فضای زیرزمینی را برحسب کیفیت توده سنگ (Q) مطابق شکل ۵-۵ رسم کردند. آن‌ها روابط تجربی زیر را برای تعیین فشار وارد بر نگهداری نهایی پیشنهاد دادند:

$$P_v = \left(\frac{0.2}{J_r}\right) Q^{\frac{-1}{3}} \quad \text{رابطه ۴-۵}$$

$$P_h = \left(\frac{0.2}{J_r}\right) Q_w^{\frac{-1}{3}} \quad \text{رابطه ۵-۵}$$

که در این روابط:

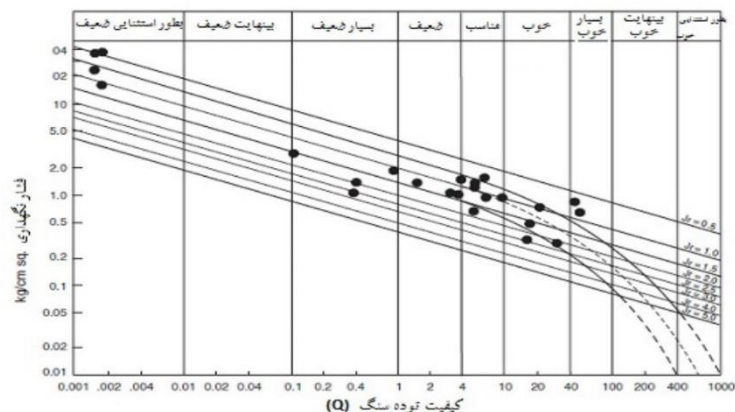
P_v: فشار وارد بر نگهداری نهایی سقف (MPa)

P_h: فشار وارد بر نگهداری دیواره (MPa)

Q_w : فاکتور دیواره

فاکتور دیواره (Q_w) از حاصلضرب مقادیر کیفیت توده سنگ‌های مختلف (Q) در فاکتوری که وابسته به مقدار کیفیت توده سنگ (Q) می‌باشد به صورت زیر تعیین می‌گردد:

فاکتور دیواره (Q_w)	محدوده Q
Q_5	> 10
$Q_{2.5}$	$10 \text{ تا } 0.1$
Q_1	< 0.1



شکل ۵-۵- رابطه بین فشار وارد بر نگهداری و Q

همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اساس روابط بارتون و همکاران (۱۹۷۴)، ظرفیت نگهداری مستقل از اندازه حفاری است (برعکس ترزاقی (۱۹۴۶)). همچنین بارتون و همکاران (۱۹۷۴) پیشنهاد دادند که اگر تعداد دسته‌درزه‌ها کمتر از ۳ بود رابطه ۵-۴ و رابطه ۵-۵ به صورت زیر بیان شوند:

$$P_v = \frac{0.2J_n^{1/2}}{3J_r} Q^{-1/3} \quad \text{رابطه ۵-۶}$$

$$P_h = \frac{0.2J_n^{1/2}}{3J_r} Q_w^{-1/3} \quad \text{رابطه ۵-۷}$$

آن‌ها چنین فرض کردند که فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت را می‌توان با جایگذاری Q_5 به جای Q در رابطه ۵-۴ تعیین کرد. بنابراین فشار وارد بر نگهداری نهایی به صورت $1/7$ برابر فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت تعیین می‌گردد. گول و همکاران (۱۹۹۵) با مقایسه مقادیر به دست آمده از روابط بارتون و همکاران (۱۹۷۴) و مقادیر اندازه‌گیری شده از تونل‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که سیستم Q در زمین‌های بسیار مجاله شونده برای تونل‌های با عرض بزرگ‌تر از ۹ متر نامطمئن است.

یاسین و گریمستاد (۱۹۹۶) رابطه زیر را برای پیش‌بینی فشار وارد بر نگهداری تونل‌های واقع در توده سنگ‌های ضعیف ($Q < 4$) ارائه دادند.

$$P_v(KPa) = \frac{40B}{J_r} Q^{-1/3} \quad \text{رابطه ۵-۸}$$

که در آن، B قطر یا دهانه تونل برحسب متر می‌باشد. رابطه ۵-۸ نشان می‌دهد که در توده سنگ‌های ضعیف، فشار وارد بر نگهداری با اندازه دهانه تونل (B) افزایش می‌یابد.

• ۵-۳-۲-۳-۲- رابطه سینگ و همکاران (۱۹۹۲)

باید در نظر داشت که Q موجود در روابط فوق در واقع کیفیت پس از حفاری توده سنگ است چراکه در تونل‌ها، زمین‌شناسی توده سنگ معمولاً پس از آتشکاری مطالعه شده و بلافاصله در خصوص میزان نگهداری تصمیم‌گیری می‌شود.

الف- فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت

فشار وارد بر نگهداری قائم (سقف): مطابق مشاهدات حاصل از ۳۰ تونل ابزار بندی شده، فشار وارد بر نگهداری سقف با کیفیت کوتاه‌مدت توده سنگ (Q_i) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_v(MPa) = \frac{0.2}{J_r} Q_i^{-0.33} \cdot f \cdot f' \cdot f'' \quad \text{رابطه ۵-۹}$$

رابطه ۵-۱۰

$$f = 1 + (H - 320)/800 \geq 1$$

که در آن:

$Q_i = Q = \Delta Q$ کیفیت کوتاه‌مدت توده سنگ بلافاصله پس از حفاری

P_v = فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت سقف بر حسب MPa

f : فاکتور تصحیح روباره یا عمق تونل (شکل ۵-۶)

f' : فاکتور تصحیح همگرایی تونل (جدول ۵-۵)

f'' : فاکتور تصحیح برای زمان پس از حفاری و نصب نگهداری

H = روباره یا عمق تونل بر حسب متر

هنگام استفاده از رابطه ۵-۹ فاکتورهای تصحیح قدم به قدم اعمال می‌شوند. ابتدا فاکتور تصحیح عمق تونل، سپس تصحیح همگرایی تونل و در نهایت تصحیح زمان پس از نصب نگهداری اعمال می‌شود. گریمستاد و بارتون (۱۹۹۳) توافق کردند که از رابطه ۵-۱۰ به منظور فاکتور تصحیح روباره استفاده کنند.

فاکتور تصحیح همگرایی تونل (f') را می‌توان بر اساس مقدار همگرایی تونل از روی جدول ۵-۵ به دست آورد. فاکتور تصحیح " f " برای زمان به صورت رابطه زیر است:

$$f'' = \log(9.5t^{0.25}) \quad \text{رابطه ۵-۱۱}$$

که t زمان بر حسب ماه پس از نصب سیستم نگهداری می‌باشد.

گول و همکارانش (۱۹۹۵) فاکتورهای تصحیح f و f' را برای تونل مانری-اوتارکاشی^۱ در اعماق ۷۰۰ تا ۹۰۰ متر تأیید کردند. کومار (۲۰۰۲) نیز هر سه فاکتور تصحیح را از مطالعه رفتار تونل ۲۷ کیلومتری NJPC در هندوستان با

¹ Maneri-Uttarkashi

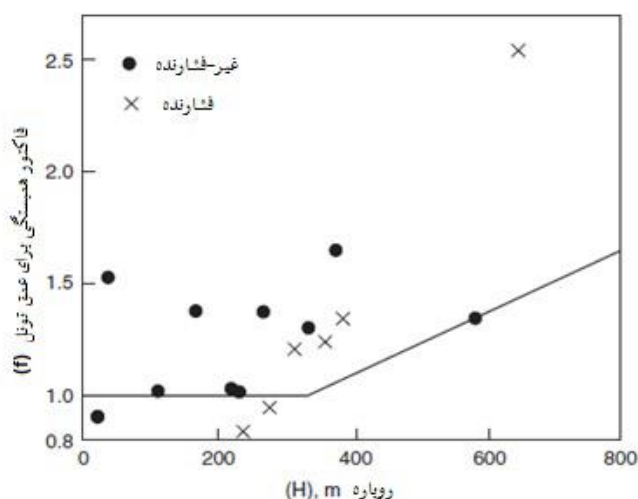
عمق کمتر از ۱۴۰۰ متر تأیید کرد. سینگ و همکاران (۱۹۹۲) با ترکیب سه فاکتور تصحیح مزبور، رابطه زیر را برای فشار وارد بر نگهداری نهایی تونل (P_{ult}) پس از گذشت حدود ۱۰۰ سال ارائه کردند:

$$f'' = 5^{1/3} = 1.7$$

رابطه ۵-۱۲

$$P_{ult} (MPa) = \frac{0.2}{f_r} Q^{-1/3} \cdot f \cdot f'$$

رابطه ۵-۱۳



شکل ۵-۶- فاکتور تصحیح f برای عمق تونل

جدول ۵-۵- فاکتور تصحیح f' برای همگرایی تونل

شماره	شرایط سنگ	سیستم نگهداری	همگرایی تونل (%) (U_o/a)	فاکتور تصحیح (f')
۱	غیر مجاله شونده ($H < 350 \cdot Q^{1/3}$)	----	< ۱	۱/۱
۲	مجاله شونده ($H > 350 \cdot Q^{1/3}$, $J_o/J_a < 0.5$)	بسیار سخت	< ۲	> ۱/۸
۳	مانند بالا	سخت	۲ تا ۴	۰/۸۵
۴	مانند بالا	انعطاف پذیر	۴ تا ۶	۰/۷
۵	مانند بالا	بسیار انعطاف پذیر	۶ تا ۸	۱/۱۵
۶	مانند بالا	بی نهایت انعطاف پذیر	> ۸	۱/۸

توجه:

الف- همگرایی تونل تا حدود زیادی به روش حفاری بستگی دارد. در زمینهای بسیار مجاله شونده، روش فوقانی (هدینگ) و تحتانی (بنچینگ) می تواند منجر به همگرایی تونل بزرگتر از ۸٪ گردد. ب- همگرایی بیشتر از ۴٪ دهانه تونل مجاز نیست چرا که ممکن است در اثر شکست قوس سنگ منجر به افزایش ناگهانی فشار وارد بر نگهداری شود. در چنین مواقعی بلافاصله مهارهای اضافه نصب شده تا مقدار همگرایی در محدوده تا ۴٪ دهانه تونل حفظ شود. پ- قابهای فولادی همراه با شمعها بیش از ۲٪ همگرایی تونل را جذب نمی کنند. بنابراین زمانی که با همگرایی بیش از حدی مواجه هستیم پیشنهاد می گردد که از SFRS برای نگهداری فوری سینه کار به همراه قاب فولادی برای نگهداری پشت جبهه کار استفاده شود. ت- حداقل فاصله داری بین تونلهای موازی در زمینهای مجاله شونده، فاصله ۵B از مرکز به مرکز تونلها است (B عرض تونل است).

- فشار وارد بر نگهداری افقی (دیواره): برای تخمین فشار وارد بر نگهداری دیواره، می توان از رابطه ۵-۹ استفاده کرد فقط به جای Q_i ، کیفیت کوتاه مدت توده سنگ دیواره (Q_{wi}) جایگزین می گردد. کیفیت کوتاه مدت توده سنگ دیواره (Q_{wi}) از حاصل ضرب Q_i در فاکتوری که به مقدار Q بستگی دارد مطابق روابط ذیل به دست می آید:

$$Q_{wi} = 5Q_i = 25Q \quad \text{الف) برای } Q > 10$$

$$Q_{wi} = 2.5Q_i = 12.5Q \quad \text{ب) برای } 1 < Q < 10$$

$$Q_{wi} = 1Q_i = 5Q \quad \text{ج) برای } Q < 0.1$$

- فشار وارد بر نگهداری نهایی

رفتارنگاری بلندمدت مغار چیبرو^۱ در هندوستان، محققان را قادر ساخت تا روند فشار وارد بر نگهداری را نسبت به زمان و درجه اشباع مطالعه کنند. بر اساس مطالعات مبتنی بر ۱۰ سال رفتارنگاری، در توده سنگ‌های آبدار با درزه‌های پرشده از مواد قابل فرسایش، فشار وارد بر نگهداری نهایی تا ۶ برابر فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت افزایش می‌یابد. همچنین رفتارنگاریها نشان می‌دهند که در تونل‌هایی که در نواحی لرزه خیز در نزدیکی گسل‌ها قرار دارند فشار وارد بر نگهداری می‌تواند به دلیل کرنش‌های تجمعی در توده سنگ اطراف گسل، حدوداً ۲۵٪ بیشتر باشد. مطالعه سینگ و همکارانش (۱۹۹۲) نشان داد که در زمین‌های غیر مچاله شونده، فشار وارد بر نگهداری حدود ۱/۷۵ برابر فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت است. در حالیکه در زمین‌های مچاله شونده، فشار وارد بر نگهداری نهایی ۲ تا ۳ برابر فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت می‌باشد.

در جدول ۵-۶ روش‌های تعیین بارسنگ و شرایط استفاده آن‌ها به‌طور خلاصه بیان شده است. نکته مهم این است که برای تعیین بار سنگ نهایی وارد بر یک تونل، الزاماً میانگین مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف بهترین جواب نبوده بلکه باید با یک قضاوت مهندسی حساب شده و با کنار گذاشتن جواب‌های خارج از نرم، مقدار بارسنگ نهایی وارد بر سیستم نگهداری را تعیین کرد. همچنین با توجه به پیشرفت روش‌های عددی، استفاده از این روش‌ها برای تعیین بار سنگ پیشنهاد می‌شود.

جدول ۵-۶- روش‌های مختلف پیش‌بینی بارسنگ

روش	پارامترهای ورودی	بارسنگ (خاک)	توضیحات
تئوری ترزاقی در محیط‌های سنگی (۱۹۴۶)	H_p فاکتور بار سنگ $B =$ عرض تونل (متر) $H_t =$ ارتفاع تونل (متر) γ دانسیته سنگ	$P_v = \gamma \cdot H_p$	• کاربرد: در تونل‌های با عرض کمتر از ۶ متر • در تونل‌های با عرض ۶ تا ۱۴ متر منجر به جواب‌های محافظه‌کارانه می‌شود • بهترین شرایط استفاده: حفاری انفجاری و نگهداری‌های فولادی • در صورت حفاری مکانیزه، بار سنگ ۲۰ تا ۲۵ درصد کم شود. • مقدار بار سنگ متناسب با ابعاد تونل • نامناسب برای زمین‌های مچاله شونده و تورمی
روش ترزاقی اصلاح شده توسط دیر و همکاران (۱۹۷۰)	H_p فاکتور بار سنگ $B =$ عرض تونل (متر) $H_t =$ ارتفاع تونل (متر) γ دانسیته سنگ RQD		
روش ترزاقی اصلاح شده توسط سینگ و همکاران (۱۹۹۵)	شرایط کیفی ژئومکانیکی		• فشار نگهداری مستقل از عرض تونل است مگر در زون‌های برشی، زمین‌های رانشی و آبدار و شیل‌های رسی
اونال (۱۹۸۳)	RMR $B =$ عرض تونل (متر)	$P_v = \left[\frac{100 - RMR}{100} \right] \cdot \gamma \cdot B$	• توسعه داده‌شده برای معادن زغال سنگ با فضاهای حفاری دارای سقف مسطح

¹ Chhibro

روش	پارامترهای ورودی	بارسنگ (خاک)	توضیحات
	γ دانسته سنگ		- نامناسب برای زمین‌های مچاله شونده صرفنظر از ابعاد فضای حفاری - در زمین‌های غیر مچاله شونده برای تونل‌های به قطر تا ۶ متر نامطمئن و برای تونل‌های بزرگ‌تر از ۹ متر محافظه کارانه
گول و جتوا (۱۹۹۱)	RMR B عرض تونل (متر) γ دانسته سنگ	$P_V = \frac{\gamma \cdot 5B^{0.1} H^{0.5} - RMR}{2 \cdot RMR}$	- کاربرد هم در زمین‌های مچاله شونده و هم غیر مچاله شونده - بهترین حالت استفاده از حفاری‌های انفجاری و نگهداری‌های فولادی - نامناسب برای شرایط پدیده انفجار سنگ
بارتون و همکاران (۱۹۷۴ و ۱۹۷۵)	Q J_r عدد زبری درزه‌ها Q_w فاکتور دیواره	$P_v = \left(\frac{0.2}{J_r} \right) Q^{-1/3}$ $P_h = \left(\frac{0.2}{J_r} \right) Q_w^{-1/3}$	ظرفیت نگهداری مستقل از ابعاد تونل
بارتون و همکاران (۱۹۷۴)	Q J_r عدد زبری درزه‌ها J_n عدد دسته‌درزه	$P_v = \frac{0.2 J_n^{1/2}}{3 J_r} Q^{-1/3}$ $P_h = \frac{0.2 J_n^{1/2}}{3 J_r} Q_w^{-1/3}$	کاربرد: تعداد دسته‌درزه‌ها کمتر از ۳
یاسین و گریمستاد (۱۹۹۶)	Q J_r عدد زبری درزه‌ها B عرض تونل (متر)	$P_v (KPa) = \frac{4 \cdot B}{J_r} Q^{-1/3}$	کاربرد: برای توده سنگ‌های ضعیف ($Q < 4$)
استاندارد مهندسیین ارتش آمریکا	H_t ارتفاع تونل (متر) γ دانسته سنگ	$P_v = 0.3 \times H_t \times \gamma$ تونل‌های دایره‌ای $P_v = 0.3 \times 1.5 \times H_t \times \gamma$ تونل‌های نعل اسبی $P_v = 0.6 \times H_t \times \gamma$ زون‌های ریزشی (خردشده) $P_v = (1 - 2) \times H_t \times \gamma$ زمین‌های مچاله شونده	- در تونل‌زنی به کمک آتشکاری، مقادیر مذکور تا ۳۰٪ افزایش داده شود $P_v = 0.5 P_h$
آنالیز ساختاری	با استفاده از تخمین بزرگ‌ترین گوه ممکن ایجادشده توسط نرم افزارهای UDEC, Unwedge		
روش‌های عددی	با استفاده از نرم افزارهایی همچون UDEC, Phase2, PLAXIS, FLAC		

۵-۳-۳- انواع سیستم نگهداری

۵-۳-۳-۱- شاتکریت

• ۵-۳-۳-۱-۱- کلیات

مهمترین مواردی که در برنامه‌ریزی تونل باید موردنظر قرار گیرند ویژگی‌های سیستم نگهداری، شرایط بستر و روش اجرایی ساخت تونل می‌باشد.

بتن یا ملاتی که توسط هوای فشرده بر روی سطح پاشیده می‌شود را شاتکریت می‌نامند. شاتکریت به‌عنوان جزئی از سیستم نگهداری به دیواره‌ها و سقف تونل می‌چسبد. از آنجائیکه شاتکریت می‌تواند بلافاصله بعد از حفاری بر روی دیواره‌های تونل پاشیده شود و همچنین تحت تأثیر اندازه یا شکل مقطع نیست، یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین اجزای سیستم نگهداری اولیه است. عملکرد شاتکریت به‌صورت مقاومت در برابر تغییر شکل‌های سنگ حفاری شده می‌باشد و

همچنین در برابر نیروهای برشی و فشاری که در تونل ایجاد می‌شود، مقاومت می‌کند. این عملکرد شاتکریت نقش مفیدی در پایداری سنگ بستر ایفا می‌کند. مفاهیم مختلف این عملکردها و تأثیرات آن در نگهداری تونل در جدول ۵-۷ ارائه شده است.

جدول ۵-۷- مفاهیم خواص و اثرات شاتکریت

دسته‌بندی		خلاصه
عملکرد	I	مقاومت فشاری تک‌محوره شاتکریت
	II	مقاومت برشی شاتکریت
	III	مقاومت خمشی شاتکریت
	IV	مقاومت برشی، مقاومت چسبندگی بین شاتکریت و سنگ بستر
اثرات	۱	جلوگیری از سقوط سنگ، حفظ توده سنگ‌های کوچک
	۲	اعمال فشار داخلی به سنگ بستر
	۳	تقویت لایه‌های ضعیف و حفظ شکل کلی
	۴	تسطیح توزیع تنش

خلاصه	دسته بندی		
شاتکریت به عنوان پوشش محافظ سنگ بستر حفاری شده عمل می کند و از تضعیف سنگ در مقابل هوازدگی جلوگیری به عمل می آورد	پوشش حفاظتی، پیشگیری از تخریب سنگ بستر	۵	

ضروریست ضخامت، مقاومت و سایر مشخصات شاتکریت با توجه به شرایط سنگ بستر، هدف احداث تونل و ...، تعیین گردد تا اطمینان از پایداری تونل بعد از حفاری حاصل شود. شاتکریت همزمان با تحکیمات مختلفی مانند راکبوت و قاب فولادی استفاده می شود.

• ۵-۳-۱-۲- ترکیب شاتکریت

شاتکریت به دو روش تر و خشک اجرا می شود و مقاومت نهایی شاتکریت اجرا شده با هر دو روش تحت تأثیر روال اجرا قرار دارد. بنابراین در انتخاب طرح اختلاط شاتکریت، علاوه بر مشخصاتی مانند مقاومت، در نظر گرفتن محدودیت های اجرایی از اهمیت خیلی زیادی برخوردار است؛ بنابراین در ترکیب شاتکریت، موارد زیر باید در نظر گرفته شود:

۱. مقاومت (مقاومت اولیه، مقاومت زودرس و مقاومت دراز مدت)
۲. چسبندگی
۳. نرخ برگشت مصالح
۴. حجم گردوغبار تولید شده
- در شرایطی که شاتکریت به عنوان پوشش نهایی استفاده شده و لاینینگ اجرا نشود، موارد زیر نیز اهمیت پیدا می کند:
۵. تراکم (جذب رطوبت، حجم فضای خالی، نفوذپذیری و ...)
۶. دوام (مقاومت در برابر یخ زدگی/ذوب شدن، مقاومت شیمیایی و مقاومت در برابر کربناتاسیون)
- در طرح اختلاط شاتکریت، مقاومت شاتکریت به روش پاشش، شرایط جریان آب سطح شاتکریت پاشی شده، رطوبت، نسبت آب به سیمان، نسبت آب به ملات، نسبت سنگدانه، حداکثر ابعاد سنگدانه درشت، نوع مواد افزودنی و ... بستگی دارد.

• ۵-۳-۱-۳- شاتکریت تقویت شده

در مواردیکه تقویت شاتکریت ضروری باشد، باید ویژگی های مقاومتی مخلوط شاتکریت بهبود یا ضخامت بتن پاشیده شده افزایش یابد. از این دو روش، ویژگی های مقاومتی شاتکریت را می توان با توری سیمی (وایرمش) یا شاتکریت الیافی تقویت نمود و علاوه بر مقاومت فشاری، مقاومت برشی، مقاومت کششی و چقرمگی را نیز بهبود بخشید.

♦ توری سیمی

توری سیمی برای تقویت مقاومت برشی، جلوگیری از پوسته پوسته شدن شاتکریت در زمان اجرا و بعد از آن و بهبود سختی شاتکریت بعد از ظهور ترک، استفاده می شود. توری سیمی در شرایط مختلف سنگ دربرگیرنده اعم از ضعیف تا محکم، کاربرد دارد بنابراین بسته به شرایط سنگ، هدف اصلی از تقویت ممکن است متفاوت باشد. در سنگ هایی که تغییر شکل زیادی دارند، مانند سنگ های منبسط شونده، امکان دارد ترک های متعددی در شاتکریت ایجاد شده و

شاتکریت پوسته پوسته شود. در این شرایط از توری سیمی جهت جلوگیری از پوسته پوسته شدن و بهبود سختی استفاده می شود. از سوی دیگر، سنگ هایی که دارای درزها و شکاف های زیادی هستند و این نگرانی وجود دارد که توده ای سنگ به طور ناگهانی ریزش کند، توری سیمی معمولاً برای تقویت مقاومت برشی و بهبود استحکام شاتکریت استفاده می شود. به علاوه در زمین های غیرمتراکم که چسبندگی بین شاتکریت و سنگ بستر ضعیف است، می توان انتظار داشت که توری سیمی مانع از پوسته پوسته شدن شاتکریت در حین اجرا شود. توری سیمی معمولاً با ابعاد چشمه های ۱۰×۱۰ و ۱۵×۱۵ سانتیمتر و قطر ۶ تا ۸ میلی متر یافت می شود.

♦ شاتکریت الیافی

شاتکریت تقویت شده با الیاف به طور مؤثر در شرایط زیر استفاده می شود:

- در جاهایی که به دلیل تغییر شکل زیاد، مقاومت بالا مورد نیاز باشد.
 - در شرایطی که مقاومت خمشی و استحکام به دلیل توزیع پیچیده تنش در سیستم نگهداری، ضروری باشد.
- مثال هایی از این شرایط عبارتند از: سنگ های منبسط شونده، پرتال ها، محل هایی که به راحتی تحت تأثیر نیروهای عمودی و تنش های جانبی قرار می گیرند مانند جایی که به علت ضخامت کم روباره، قوس زمین به راحتی تشکیل نمی شود، اتصالات و تقاطع های داخل تونل که مقطع تونل بزرگ تر بوده و نسبت به دیگر جاهای تونل دارای اشکال پیچیده تری است.

در مقایسه با شاتکریت معمولی، شاخص های مقاومت حداکثر که مقاومت کششی و مقاومت خمشی می باشد، افزایش می یابد. اما مقاومت باقیمانده بعد از نقطه پیک افزایش می یابد و همچنین باعث بهبود قابل توجهی در چقرمگی و شکل پذیری شاتکریت در هنگام ظهور ترک ها می باشد. پوسته پوسته شدن شاتکریت ناشی از وجود ترک ها، کمتر اتفاق می افتد لذا شاتکریت الیافی از دیدگاه مدیریت ایمنی یک سیستم نگهداری مؤثر است. به علاوه از آنجایی که نفوذ ترک ها به سطح مقطع مواد دشوار بوده و حفظ عایق بندی رطوبتی نیز آسان تر است، جهت بهبود دوام سازه در تونل هایی که با شاتکریت معمولی تحکیم شده اند، ممکن است از شاتکریت الیافی استفاده شود. همچنین در مواردی که تونل های موجود نیاز به بازسازی یا تعمیر داشته و افزایش ضخامت بتن پاشی نیز ممکن نباشد، شاتکریت الیافی به عنوان دیوار پوششی نازکی استفاده می شود. مقاومت طراحی شده شاتکریت تقویت شده با الیاف، علاوه بر مشخصه های شاتکریت معمولی، مقاومت خمشی و سختی خمشی را نیز تأمین می کند. الیاف فولادی و غیرفولادی هر دو در شاتکریت الیافی قابل استفاده هستند.

• ۵-۳-۱-۴- زمان انجام شاتکریت

اگر در زمان طراحی تونل شاتکریت به عنوان یکی از سیستم های نگهداری اولیه تونل تعیین شود باید به زمان انجام آن نیز توجه شود چراکه عملکرد شاتکریت تحت تأثیر زمان انجام آن است. به طور مثال هدف از شاتکریت لایه اول جلوگیری از هوازگی سنگ پس از حفاری و ریزش اولیه قطعات سنگ است در این شرایط باید شاتکریت بلافاصله پس

از اتمام گام حفاری انجام شود در غیر اینصورت عملاً عملکرد خود را از دست می‌دهد. همچنین برای شاتکریت لایه دوم توجه به فاصله از سینه کار ضروری می‌باشد. در تونل‌ها معمولاً با افزایش فاصله از سینه کار جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد بنابراین شاتکریت لایه دوم باید در فاصله مناسب از سینه کار که از قبل تعیین شده است انجام شود تا هم از تنش‌های القایی کاسته شود و بار کمتری به سیستم‌های نگهداری وارد شود و هم همگرایی تونل را تا حد ممکن کنترل کند.

۵-۳-۲- راکبوت

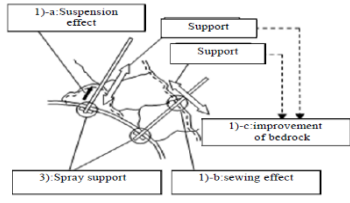
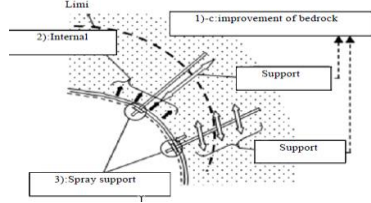
• ۵-۳-۳-۱- کلیات

راکبوت شامل میله فولادی (که هسته راکبوت را تشکیل می‌دهد) که در مرکز چال حفاری شده در سنگ دربرگیرنده قرار می‌گیرد، دوغاب که میله فولادی را به سنگ متصل می‌کند و یک سیستم یکپارچه را تشکیل می‌دهد و مهره و صفحه بولت که هسته راکبوت را به شاتکریت متصل می‌کند می‌باشد. برخلاف شاتکریت و قاب فولادی، راکبوت به‌طور فعال عمل نموده و جسم سنگ بستر را از درون محافظت کرده و از ناپایداری جلوگیری می‌کند. سیستم دوغابی تکنیکی است که در آن فولادهای روکش‌دار در زمین ثابت می‌مانند. تصور می‌شود که عملکرد نگهداری راکبوت در سنگ‌های سخت و نیمه سخت، عمدتاً برای توقف جابه‌جایی نسبی موازی یا عمود بر صفحه گسیختگی‌هایی است که شکاف ایجاد کرده است و همچنین در سنگ‌های ضعیف و غیرمتراکم، توقف جابه‌جایی نسبی شعاعی تونل بین دیواره تونل و سنگ بستر است.

جهت اطمینان از پایداری تونل بعد از حفاری لازم است در طراحی راکبوت به مواردی مانند سیستم مهار، مواد مهار، ابعاد و توزیع راکبوت‌ها، شکل و جنس، در نظر گرفتن ساختارهای زمین‌شناسی، ارتباط بین عملکرد و اثرات راکبوت‌ها، شرایط سنگ بستر، هدف احداث تونل و محدودیت‌های اجرایی توجه شود. همچنین در شرایطی که عملکرد راکبوت برای بلندمدت پیش‌بینی شده است، علاوه بر موارد گفته‌شده، توجه به کاهش مقاومت فولاد با خوردگی الزامی است. به علاوه چون راکبوت‌ها معمولاً با دیگر اجزای سیستم نگهداری مانند شاتکریت و تکیه‌گاه فولادی به کاربرده می‌شوند طراحی راکبوت باید شامل ارزیابی کل سیستم نگهداری و همچنین اثرات نگهداری هر یک از اجزا نیز باشد. عملکرد و اثر راکبوت به‌عنوان جزئی از سیستم نگهداری، در جدول ۵-۸ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۸- مفاهیم عملکرد و اثرات راکبوت

دسته بندی		خلاصه
عملکرد	I	عملکرد توقف جابه‌جایی نسبت به سنگ بستر در جهت محوری، توسط مقاومت کششی راکبوت
		مقاومت کششی راکبوت در آن جهت

دسته بندی		خلاصه
II	مقاومت برشی راکبوت	عملکرد توقف جابجایی نسبت به سنگ بستر با زاویه بر جهت محوری، توسط مقاومت برشی راکبوت در آن جهت
(۱) تقویت سنگ بستر	(a) اثر تعلیق	در سنگ بسترهای نیمه متوسط و سخت که شکافها گسترش پیدا کرده اند، قسمت های ناپایدار جدا شده از سنگ اصلی در شکافها، به توده سنگ اصلی متصل شده و از پوسته پوسته شدن این توده ها جلوگیری می کند
	(b) اثر دوخت	
	(c) اثر بهبود ماهیت سنگ بستر	در سنگ بسترهای نیمه متوسط و سخت، اگر راکبوتها در محل تلاقی با شکافها قرار گیرند، مقاومت برشی شکاف افزایش می یابد و اثر آشکار بهبود در ماهیت سنگ بستر را می توان انتظار داشت. همچنین در مورد سنگ های ضعیف یا سنگ های رسوبی با مقاومت کم، بسته به قرارگیری راکبوتها، تقویت مقاومت برشی سنگ بستر و مقاومت باقیمانده بعد از تسلیم، بهبود ماهیت سنگ بستر را می توان انتظار داشت
(۲)	فشار داخلی	در مورد سنگ های ضعیف یا سنگ های رسوبی با مقاومت کم، نیروهای محوری ایجاد شده توسط راکبوت، روی دیوار تونل، در میانه شاتکریت عمل می کند و یک فشار داخلی ظاهری نشان داده و کاهش زون پلاستیک شدگی سنگ دربرگیرنده تونل را به همراه داشته و کشش قابل انتظار خواهد بود.
(۳)	محافظت شاتکریت	قطعات سنگی کوچک تر از فاصله داری راکبوتها، که از سنگ بستر جدا شده اند، توسط شاتکریت محافظت می شوند. شاتکریت نیروها را با چسبیدن به سنگ بستر، تحمل می کند. بنابراین اما درجاییکه چسبندگی بین شاتکریت و سنگ بستر از بین می رود، با دوختن شاتکریت به سنگ بستر، می توان انتظار داشت که راکبوتها آن بار را تحمل کنند
		
		
(b) سنگ بستر ضعیف، سنگ بستر رسوبی		(a) سنگ بستر متوسط تا سخت

علاوه بر اثرات گفته شده در فوق، سنگ بستر دارای لایه بندی را می توان با راکبوت به هم دوخت و می توان انتظار داشت که یک ناحیه قوسی تقویت شده در اطراف سطح حفاری تونل ایجاد شود.

• ۵-۳-۲-۲- توزیع راکبوتها

در مورد توزیع راکبوتها و ابعاد آنها مواردی مانند شرایط توده سنگ بستر، اندازه مقطع تونل، شکل مقطع، روش حفاری و محدودیت های اجرایی و ...، تأثیرگذار هستند. بهتر است توزیع راکبوتها به گونه ای انجام شود که مناطق

حفاری شده تونل، به‌طور کامل تقویت شود. شبکه‌بندی راکبوت‌ها معمولاً با استفاده از تیپ‌بندی‌های استاندارد تعیین شده بر اساس کلاس زمین تعیین می‌شود البته روش‌های دیگری نیز جهت تعیین شبکه راکبوت‌ها وجود دارد.

در جائیکه هدف نگهداری ناحیه سست ایجادشده ناشی از حفاری باشد، تعداد راکبوت‌ها و فاصله‌داری آن‌ها بر اساس روابط بین باری که هر راکبوت می‌تواند تحمل کند و باری که هر راکبوت باید نگهداری کند، باید تعیین گردد. باین‌حال معمولاً توزیع راکبوت‌ها با استفاده از چیدمان سیستماتیک بولت‌ها، که با استفاده از الگوی نگهداری استاندارد آزمایش شده بر پایه طبقه‌بندی سنگ بستر تعیین شده با در نظر گرفتن ملاحظات شرایط سنگ بستر تعیین شده است، طرح‌ریزی می‌شود. به این ترتیب، روش انتخاب یک الگوی استاندارد عمومی توزیع، معمولاً مؤثر است. از طرف دیگر در شرایطی که هدف از نصب راکبوت، نگهداری سنگ‌های نیمه سخت و سختی باشد که شکاف در آن‌ها ایجاد شده است، در تعیین تعداد و موقعیت قرارگیری راکبوت‌ها، بر اساس فاصله‌داری بین شکاف‌های سنگ، طول و اندازه آن‌ها تصمیم‌گیری می‌شود.

• ۵-۳-۳-۲-۳- ابعاد , اکولتھا

در اصل طول راکبوت‌ها باید طوری باشد که ناحیه تحت تأثیر حفاری را تقویت کند با این حال امکان دارد بسته به عوامل پیش‌بینی‌شده نیز تغییر کند. در جاهایی که از راکبوت‌ها اثر دوخت یا اثر تعلیق انتظار می‌رود، ضروری است از راکبوت‌هایی استفاده شود که طول آن‌ها از توده سنگ‌های جدا شده از سنگ اصلی در محل شکاف‌ها یا ناحیه سست، بیشتر باشد. در موارد وجود فشار داخلی یا بهبود سنگ بستر، عبور راکبوت از ناحیه سست معمولاً ضروری نیست زیرا در این شرایط هدف از نصب راکبوت، تشکیل یک قوس زمین یکپارچه از راکبوت و سنگ دربرگیرنده است. با این حال، لازم است طولی در نظر گرفته شود که بتواند در حین تشکیل قوس زمینی در سنگ بستر، با ایجاد لنگر کافی جهت کاهش تغییر شکل سنگ بستر اطراف تونل، اطمینان کافی حاصل کند. دامنه استفاده از فرمول ارائه‌شده در زیر محدود به سیستم راکبوت‌های مناسب برای سنگ بستر نیمه سخت تا نرم است.

$$L = \frac{w}{3} \cup L = \frac{w}{5} \quad L \geq t$$

رابطه ۵-۱۴

$P = 0.2L$ و $P = 0.5L$ ابطه ۵-۱۵

$L = \text{طول، راکبوت}$

$W = \text{عرض حفاری تونل}$

T = طول بخشی از سطح تونل که قبلاً نگهداری شده است

$P =$ فاصله‌داری راکبولت‌ها در جهت عرضی تونل

علاوه بر این مانند تونل‌های انتقال آب می‌توان طول راکبوت‌ها را از 0.4De تا 0.6De که در آن قطر حفاری است، تعیین نمود. در همین حال، قطر راکبوت‌ها بر اساس نیروی مقاومت برشی سنگ بستر و حجم توده سنگی که توسط هر راکبوت نگهداری می‌شود، تعیین می‌شود. به‌طور کلی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های اجرا، قطر معمول راکبوت‌های مورد استفاده در تونل، ۲۲ تا ۲۵ میلیمتر است. علاوه بر این سنگ بستر با تغییر شکل‌های گسترده می‌تواند

نیروی محوری بزرگی در برابر راکبوت ایجاد نماید که باعث شکستگی راکبوت در سنگ بستر می‌شود. در این موارد لازم است افزایش تعداد، افزایش طول راکبوت‌ها، جایگزینی هسته راکبوت با فولاد مقاوم‌تر از حالت معمول، مدنظر قرار گیرد. فولاد سازنده پیچ‌ها تنش تسلیمی بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ مگاپاسکال دارد. علاوه بر این در مواردی که با وجود تغییر شکل‌های گسترده، نیروی محوری بزرگی در راکبوت ایجاد شود، و باعث شکست راکبوت در سنگ بستر شود لازم است که تعداد راکبوت‌ها اضافه شود یا طول آن‌ها زیاد شود و یا راکبوت با جنس مقاوم‌تری جایگزین شود. درجایی که با ایجاد تغییر شکل زیاد، نیروی محوری در راکبوت اضافه نمی‌شود، امکان دارد که این تغییر شکل‌ها در اعماق زیادی رخ دهد در نتیجه افزایش طول راکبوت می‌تواند مؤثر باشد.

• ۵-۳-۳-۲-۴- صفحه بولت

صفحات بولت و پیچ و مهره‌ها، علاوه بر اینکه راکبوت و شاتریت را به هم می‌دوزند، به‌عنوان جزئی از سیستم نگهداری وظیفه جلوگیری از ریزش‌های احتمالی که بین راکبوت‌ها اتفاق می‌افتد، را بر عهده‌دارند. همچنین صفحات بولت و پیچ و مهره‌ها باید مقاومت کافی در برابر نیروهای وارده را داشته باشند. ابعاد صفحه راکبوت به‌طور معمول ۱*۱۵*۱۵ سانتیمتر می‌باشد. باین‌حال در سنگ‌های با تغییر شکل گسترده، شکل و جنس صفحه با درنظرگرفتن مشخصات مکانیکی راکبوت، انتخاب می‌شود. علاوه بر این لازم است مشخصات پیچ و مهره را با در نظر گرفتن خواص مکانیکی راکبوت انتخاب شود.

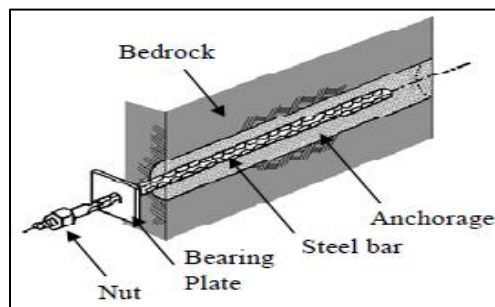
• ۵-۳-۳-۲-۵- سیستم مهار و تزریق راکبوت

• سیستم مهار

معمولاً راکبوت‌ها را برحسب نوع عملکرد و روش نصب به دو نوع تقسیم می‌کنند:

♦ انکراژ تزریقی

در روش انکراژ تزریقی، از تزریق موادی مانند ملات و رزین، جهت فیکس کردن بولت در سنگ بستر استفاده می‌شود (شکل ۵-۷). در لایه‌هایی که راکبوت‌ها با مهار نقطه‌ای کارایی لازم را ندارند و یا از جابجایی‌های مختصر به‌موازات لایه‌ها باید ممانعت به عمل آید، از راکبوت‌های با مهار تمام طول استفاده می‌شود. کاربرد این نوع راکبوت‌ها در سال‌های اخیر که رزین‌های سریعاً سفت شونده توسعه یافته‌اند، بشدت افزایش یافته بطوریکه حتی در محل‌هایی که کارهای عمرانی در آن قبلاً بسیار مشکل و یا غیر ممکن بوده، امروز با استفاده از این نوع راکبوت‌ها به‌آسانی انجام می‌گیرد. عموماً راکبوت‌ها با مهار تمام طول از سه قسمت ذیل تشکیل شده‌اند: قسمت میله فولادی (بدنه)، پلیت باربر و تزریقی که ممکن است سیمان یا رزین باشد و جدار میله راکبوت که به‌صورت آجدار است و انتهایی به شکل مخروطی یا تبری دارد که به سهولت وارد مواد تزریقی داخل چال می‌گردد.

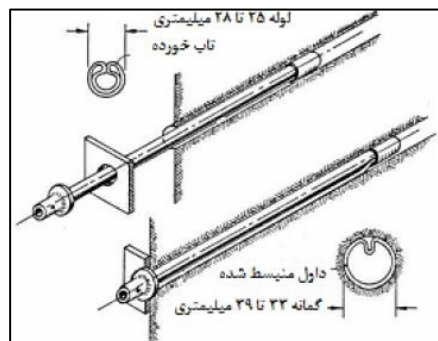


شکل ۵-۷- نمونه‌ای از راکبوت تزریقی

♦ راکبوت با مهار نقطه‌ای (پیچ تحت کشش)

در روش اصطکاکی، اصطکاک به‌دست آمده بین سنگ بستر و میل مهار باعث تثبیت میل مهار در داخل چال می‌شود (شکل ۵-۸- نمونه‌ای از راکبوت اصطکاکی). میل مهار لوله فولادی انبساطی در این گروه جای می‌گیرد. در این روش به‌وسیله تزریق با فشار بالا، لوله فولادی در داخل چال منبسط می‌شود. سطح راکبوت نیز با فشار بالا، به دیواره چال مستقیماً فشار وارد می‌کند و اصطکاک در حدفاصل چال و راکبوت، در کل دیواره چال، وارد عمل می‌شود. روش اصطکاکی بیشتر در مواردی استفاده می‌شود که:

- به دلیل شدت جریان آب و باوجود اقدامات مقابله با این جریان، همچنان نگرانی خروج مواد تزریق از داخل چال مطرح باشد
 - در مواردی که از عملکرد مورد انتظار ملات، اطمینانی وجود ندارد
 - در جاییکه عملکرد مناسب و سریع راکبوت به محض نصب در داخل چال، مورد انتظار است.
- توجه داشته باشید که در سنگ بسترهای ضعیف و زمین‌های غیر متراکم، امکان فراهم ساختن نیروی مهار لازم، دشوار است به علاوه ذکر این نکته الزامی است به دلیل تماس مستقیم راکبوت‌ها با زمین و جهت مقابله با خوردگی، آبکاری نیاز دارند.
- راکبوت‌ها بعد از مهارشدن در سنگ بستر، اثر مقاومتی خود را در جهت عمود بر نیروهای کششی و برشی، نشان می‌دهند. بنابراین در طراحی راکبوت‌ها لازم است تنش تسلیم در رابطه با نیروهای کششی و برشی، نیروی مهار و ...، با توجه به مقاومت و تغییر شکل‌ها بولت‌های استفاده‌شده و تجربیات طراحی‌های قبلی، مدنظر قرار گیرد. مقاومت کششی راکبوت باید با تست‌های کشش سنجیده شود تا مشخص گردد نیروی مهار راکبوت کافی است یا نه؟ مقاومت کششی معمولاً توسط نیروی مهار ایجادشده بین سنگ بستر و اجزای مهار، حاصل می‌شود باین‌حال باید دقت شود که بسته به شرایط سنگ بستر، جنس و شکل راکبوت، شبکه توزیع و ابعاد راکبوت، سیستم انکراژ و ...، می‌تواند متفاوت باشد.
- قطر بدنه راکبوت‌ها متفاوت می‌باشد و معمولاً حدود ۱۶ تا ۲۵ میلی‌متر ساخته می‌شود. سطح میله راکبوت ممکن است صاف یا آجدار باشد. تنش تسلیم پیچ‌های فولادی عامل اصلی طراحی و انتخاب تعداد و ابعاد آن‌ها در یک پروژه می‌باشند.



شکل ۵-۸- نمونه‌ای از راکبوت اصطکاکی

مشخصات و محدودیت‌های استفاده از هر نوع مهار نیز در جدول ۵-۹ نمایش داده شده است.

جدول ۵-۹- خلاصه‌ای از سیستم کامل انکراژ

نوع انکراژ	روش انکراژ	مشخصات	محدودیت‌های اجرا
انکر تزریقی	در روش پیش تزریق شده، چال تزریق شده و سپس میل مهار نصب و فیکس می‌شود. در روش همزمانی تزریق و انکراژ، ابتدا اطراف چال با ملات یا رزین پوشانده شده و به جای پر کردن چال با ملات، سفت کننده‌ای مانند رزین وارد چال می‌شود. در روش تزریق بعد از انکراژ، تزریق بعد از نصب و فیکس میل مهار انجام می‌شود.	در روش انکر تزریقی، تمام طول میل مهار به سنگ بستر مهار می‌شود.	برای تمامی سنگ‌ها اعم از سخت، نیمه سخت، نرم، سنگ رسوبی و سنگ‌های با تغییر شکل‌های گسترده
انکر اصطکاکی	انکراژ از اصطکاک بدنه بولت با سطح داخلی دیواره چال به دست می‌آید. لوله فولادی انبساطی جزو این دسته محسوب می‌شود.	در لوله فولادی انبساطی، یک لوله فولادی که انتهای آن گیردار است، وارد چال می‌شود. نگهداری آنی به وسیله تزریق با فشار بالا و انبساط لوله فولادی حاصل می‌شود.	در شرایطی که جریان آب زیاد باشد، این نوع انکراژ ممکن است استفاده شود. این روش را می‌توان در محدوده وسیعی از سنگ‌های بستر استفاده نمود، به شرطی که دیوار چال سالم باشد

• تزریق

در هر نوع سیستمی لازم است از وجود نیروی مهار کافی بین میل مهار، مواد تزریقی و سنگ بستر اطمینان حاصل نمود. مواد انتخابی جهت تزریق، ضمن در نظر گرفتن شرایط سنگ بستر، محدودیت‌های اجرا و ...، باید در کل طول چال تزریق شود. شرایط ضروری مواد تزریق، نیروی مهار مراحل اولیه و طولانی مدت، دوام و اتصال مناسب است. باید در نظر گرفت که در بررسی نیروی مهار در انواع تزریقی، هم چسبندگی بین راکبوت و مواد تزریق و هم چسبندگی بین مواد تزریق و سنگ بستر دارای اهمیت است. علیرغم اینکه جهت تأمین چسبندگی بین راکبوت و مواد تزریق شده مشکل خاصی وجود ندارد با توجه به شرایط سنگ بستر امکان دارد چسبندگی مابین مواد تزریق شده و سنگ بستر به آسانی تأمین نشود. علی‌الخصوص در شرایطی که سنگ بستر فاقد استحکام کافی باشد و نتوان به نیروی مهار بین سنگ بستر و مواد تزریق اعتماد کامل نمود یا باید سیستم انکراژ یا مواد تزریق

تعیین شده با مشخصات بالا انتخاب شوند یا مقاومت کششی مورد انتظار راکبوت را از محاسبه برگشتی نیروی مهاری قابل دستیابی از راکبوت تعیین نمود. در شرایطی که مقاومت کششی مورد انتظار راکبوت و اثرات آن بازنگری شود لازم است نیست به بازنگری سایر اجزای سیستم نگهداری اقدام شود.

مالات (معمولاً ملات نیمه آماده) و رزین به عنوان مواد تزریق استفاده می‌شوند. مواد تزریق ممکن است در هر سه روش تزریق پیش از نصب انکر، تزریق هم‌زمان با نصب انکر و تزریق بعد از نصب انکر استفاده شود. انتخاب هر یک از این روش‌ها وابسته به شرایط سنگ، جریان آب و غیره است. در شرایطی که لازم باشد در زمین‌های غیرمترکم مانند زمین‌های خردشده، میل مهارهای بلند در مجاورت تاج تونل نصب شوند چال حفاری شده جهت نصب راکبوت دچار ریزش شود. در این موارد لازم است در انتخاب نوع ماده تزریق دقت کافی به عمل آید. به این ترتیب در انتخاب نوع ماده تزریق باید به محدودیت‌های اجرایی مانند قابلیت حفاری و تزریق مواد، شرایط سنگ بستر مانند سالم بودن دیواره چال، خروج مواد تزریق از چال به دلیل جریان آب و نشت مواد از شکاف‌های باز توجه کافی به عمل آید تا سیستم انکراژ و مواد تزریق مناسب جهت دستیابی به نیروی مهاری کافی و مورد نیاز انتخاب گردد.

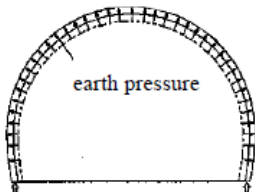
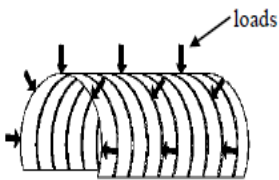
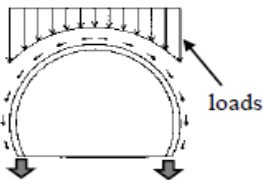
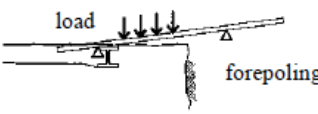
۵-۳-۳-۳- قاب‌های فولادی

• ۵-۳-۳-۳-۱- کلیات

از آنجایی که قاب‌های فولادی به صورت قوسی شکل هستند و جهت پایداری سطح تونل حفاری شده نصب می‌شوند باید به محض نصب سطح خاصی از تأثیر را داشته و تا زمانی که شاتکریت به طور کامل استحکام کافی پیدا می‌کند به تثبیت سطح تونل حفاری شده کمک کنند. قاب‌های فولادی همچنین با ایجاد یک پیوستگی محکم با شاتکریت، پایداری تونل را تسهیل می‌کنند. در جدول ۵-۱۰ عملکرد و اثر قاب‌های فولادی نمایش داده شده است.

جدول ۵-۱۰ عملکرد و اثر قاب‌های فولادی

طبقه‌بندی		خلاصه	
اثر	عملکرد	I	مقاومت فشاری مقاومت برشی مقاومت خمشی
	(۱)	نگهداری سنگ	همانند شاتکریت، قاب‌های فولادی می‌توانند در برابر نیروهای خارجی با مقاومت فشاری، برشی و خمشی، مقابله کنند.
	(۲)	تقویت زمین ضعیف	جهت جلوگیری از ریزش جزئی بلوک‌های سنگی به دلیل مقاومت خمشی یا برشی، می‌توان قاب‌های فولادی را محکم به دیواره تونل متصل کرد
			قاب‌های فولادی می‌توانند در مقیاس کوچک، اثر ناپیوستگی‌ها و لایه‌های ضعیف را با نگهداری ترک‌ها و بازشدگی‌ها، کاهش دهند.

طبقه‌بندی		خلاصه
	۳	استفاده از فشار درونی به سمت زمین 
	۴	نگهداری شاتکریت قاب‌های فولادی می‌توانند از طریق یکپارچه‌شدن با شاتکریت، بهبود سختی و صلیبیت شاتکریت علی‌الخصوص در زمان اولیه گیرش شاتکریت با مدول الاستیک و استحکام کم، کمک می‌کند. علاوه بر این، پس از رسیدن به استحکام کافی در شاتکریت، قاب فولادی با شاتکریت ادغام شده و با چسبیدن به دیواره تونل، تشکیل یک ساختار پوسته قوسی شکل می‌دهد و تونل و محیط اطراف را تقویت می‌کند. 
	۵	انتقال بارها به زمین (پایه) قاب‌های فولادی می‌توانند از طریق پایه قابها، بارها را از محیط اطراف به پی منتقل کنند 
	۶	نگهداری برای فورپولینگ قاب‌های فولادی می‌توانند به‌عنوان ابزاری برای فورپولینگ، زمین جلوتر از سینه‌کار را نگهداری می‌کنند و شکست را مهار کرده و یا از سست‌شدن زمین جلوگیری کنند. 

در طراحی ابعاد، جنس، شکل و فاصله‌داری قاب‌های فولادی، در نظر گرفتن شکل و اندازه مقطع عرضی تونل، روش حفاری، پایداری سینه‌کار تونل، بارهای وارده از زمین اطراف و مقادیر مجاز نشست سطح زمین برای حفظ پایداری تونل از اهمیت زیادی برخوردار است. جهت طراحی کارآمد و مناسب قابها باید تخمین قابلیت نگهداری آنها مدنظر قرار گیرد و با توجه به اینکه معمولاً قاب‌های فولادی به‌صورت ترکیبی با شاتکریت و راکبوت اجرا می‌شوند تخمین قابلیت نگهداری این مجموعه با هم از اهمیت زیادی برخوردار است.

از آنجایی که میزان اثرگذاری قاب‌های فولادی بسته به شرایط زمین متفاوت است، کارایی آنها به توجه به شرایط زمین‌شناسی اشاره شده در ذیل ارزیابی می‌شود:

- قاب‌های فولادی در سنگ‌های سخت و زمین‌های نرم

در سنگ‌های سخت تا نیمه سخت با ناپیوستگی‌های متعدد و همچنین زمین‌های نرم و به‌منظور جلوگیری از پوسته پوسته شدن سنگ‌های اطراف، تا زمانی که شاتکریت و راکبولت‌ها عمل کنند قاب‌های فولادی را می‌توان بکار برد.

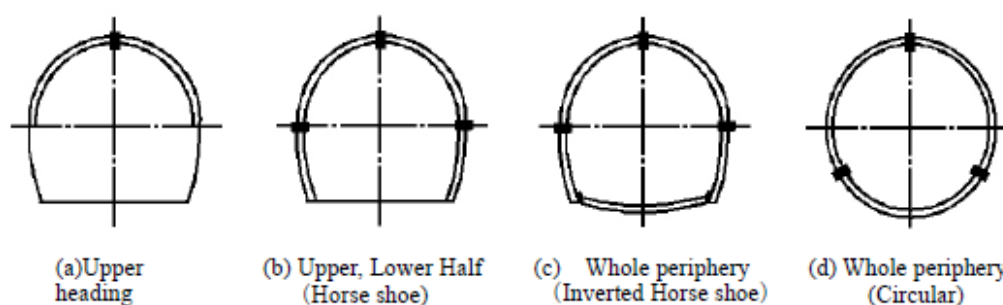
- زمین‌های غیرمتراکم و خاک‌های مچاله شونده

در سنگ‌های با فاکتور مقاومتی پایین که احتمال بالای وقوع گسیختگی در بخش‌های حفاری شده را دارند، زمین نرم مستعد پلاستیک‌شدگی، زمین‌های غیرمتراکمی که سریعاً ریزش می‌کنند و سنگ‌های مچاله‌شونده‌ای که منجر به ایجاد فشارهای بیش‌ازحد زمین و تغییرشکل‌های گسترده می‌شوند، قاب‌های فولادی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که از طریق ایجاد یکپارچگی با شاتکریتی که نگهداری کلی توده سنگ را تسهیل نموده و با فراهم‌سازی نیروهای داخلی در طول دیواره تونل، مقاومت کلی سیستم نگهداری را بهبود بخشند، همچنین بارهای وارده بر سیستم نگهداری را از طریق پایه‌های تکیه‌گاه به زمین منتقل کنند. به‌عنوان مثال استفاده از قاب‌های فولادی در ترکیب با شاتکریت و وایر مش می‌تواند صلبیت و چقرمگی سیستم نگهداری را تقویت نموده و حفاری ایمنی را در توده سنگ‌هایی که احتمال ریزش و تورم دارد را فراهم کند. علاوه بر این قاب‌های فولادی در جهت بهبود کنترل تغییر شکل‌های تونل و نشست سطحی زمین در محل پرتال با روباره کم و زمین‌های نرمی که تشکیل قوس زمین بالای تونل دشوار است مفید واقع خواهند شد.

در زمین‌های غیرمتراکمی که سینه‌کار تونل ناپایدار است با بکار بردن فورپولینگ با بولت یا لوله‌های به طول ۵ متر و کمتر یا فورپولینگ با استفاده از قاب‌های فولادی بلند، زمین جلوتر از سینه‌کار تقویت می‌شود. علاوه بر این هنگام طراحی قاب‌های فولادی ضروریست کمانش اعضای فولادی یا شکست در اتصالات به‌دقت بررسی شود.

- ۵-۳-۳-۲- شکل قاب‌های فولادی

قاب‌های فولادی باید طوری طراحی شوند که بارهای منتقل‌شده از میان شاتکریت با ممان خمشی تسلیم را به‌درستی تحمل نمایند. شکل قاب‌های فولادی به‌صورت بخش هدینگ، بخش هد و بنج، و محیطی کامل می‌باشد و بر اساس طبیعت زمین و توده سنگ دربرگیرنده، شدت و راستای نیروهای وارده و روش نصب طراحی خواهند شد (شکل ۵-۹)



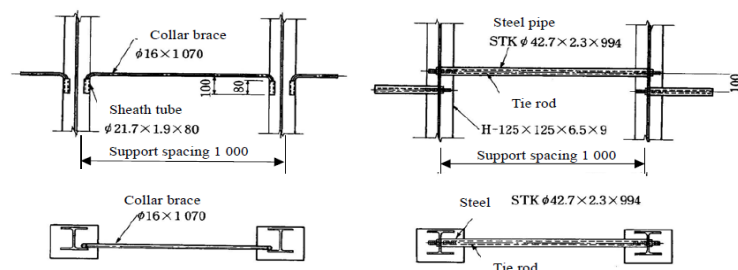
شکل ۵-۹- a (هدینگ)، b (نیمه بالا و پایین (نعل اسبی))، c (پیرامونی (نعل اسبی کفبنددار)) و d (پیرامونی (دایروی))

• ۵-۳-۳-۳-۳- فاصله‌داری قاب‌های فولادی

فاصله‌داری قاب‌های فولادی با توجه به پایداری سینه‌کار، شدت فشار زمین، اندازه مقطع عرضی، هدف موردنظر، روش حفاری و ...، تعیین می‌شود.

• ۵-۳-۳-۳-۴- تودلی قاب‌های فولادی

به‌وسیله تودلی‌ها می‌توان قاب‌های فولادی را در کنار یکدیگر ثابت نگهداشت. تودلی‌ها باید به‌درستی بر روی تکیه‌گاه‌های فولادی تازه نصب‌شده، نصب شوند و تا زمانی که تکیه‌گاه توسط شاتکریت در جای خود ثابت شود، مانع از سقوط آن‌ها شوند. دو مدل تودلی در شکل ۵-۱۰ نمایش داده شده است. مدل غلافی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و مدل تایراد، بیشتر در مقاطع پرتال، جایی که نیروی خارجی در جهت محور تونل پیش‌بینی می‌شود قابل کاربرد است.



شکل ۵-۱۰- تودلی مدل غلافی (سمت چپ) و مدل تایراد

• ۵-۳-۴- مفهوم طراحی سیستم نگهداری اولیه

از آنجایی که تونل یک سازه خطی زیرزمینی است که مسافت معینی را در بر می‌گیرد، شناخت و درک درست شرایط زمین قبل از حفاری به‌طور کلی دشوار است و نیاز به صرف هزینه و زمان زیادی دارد، بنابراین ضروری است که برنامه‌ریزی انجام مطالعات زمین‌شناسی به صورت کامل و جامع که تضمین‌کننده مقرون‌به‌صرفه بودن احداث تونل باشد، انجام شود و روش‌های نظارتی را نیز در طول دوره ساخت معرفی نمود.

جهت طراحی سیستم نگهداری تونل، در نظر گرفتن ملاحظات لازم برای مشخصات هر یک از اجزای سیستم نگهداری، شرایط زمین و روش‌های ساخت ضروری است. اجزای سیستم نگهداری باید بر اساس کلاس زمین (طبقه‌بندی سنگ از جمله RMR) انتخاب‌شده و تیپ یا الگوی سیستم نگهداری نیز باید بر اساس ترکیب اجزای انتخاب‌شده تعیین شود.

سیستم نگهداری باید به‌طور مؤثر از عملکرد ذاتی زمین دربرگیرنده استفاده نماید. به‌منظور طراحی سیستم نگهداری مؤثر، ارزیابی کلیه شرایط طراحی از جمله توپوگرافی، زمین‌شناسی، مشخصات زمین دربرگیرنده، روباره، احتمال حضور جریان آب، مقطع حفاری، محدودیت‌های نشست سطحی، روش‌های ساخت و ...، ضروری است.

رفتار سنگ در هر نقطه می‌تواند متفاوت باشد و متناسب با تغییرات رفتار سنگ، سیستم نگهداری می‌تواند در بازه عدم نیاز یا محدوده نیاز به نصب سیستم نگهداری اولیه مثل شاتکریت، نصب راکبولت، نصب لتیس‌گریدر یا قاب

فولادی و یا ترکیبی از همه این‌ها باشد. تغییرات رفتار سنگ یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل زمین‌شناسی مهندسی در تونل‌سازی است.

همان‌طور که گفته شد سیستم نگهداری اولیه با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سنگ دربرگیرنده تونل تعیین می‌شود بدین‌صورت که بعد از برداشت زمین‌شناسی مهندسی^۱ که شامل مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ، ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها از جمله فاصله‌داری، میزان ضخامت و نوع مواد پرکننده و ...، وضعیت آب زیرزمینی، جهت‌گیری فضایی درزه‌ها و ... است، طبقه‌بندی مهندسی سنگ انجام‌شده و متناسب با آن سیستم نگهداری اولیه تعیین می‌گردد.

فاکتورهای زیادی در تعیین سیستم نگهداری اولیه تونل تاثیر گذارند. این فاکتورها به دو دسته فاکتورهای دخیل در مرحله انجام مطالعات و فاکتورهای دخیل حین اجرا قابل تقسیم‌اند:

در فاز مطالعه و طراحی تونل موارد زیر در تعیین سیستم نگهداری اولیه تاثیر قابل توجهی دارند:

- انجام یا عدم انجام اکتشافات میدانی (مطالعات ژئوتکنیک و ژئوفیزیک) تونل
- صحت و دقت اطلاعات ورودی نرم‌افزارهای طراحی تونل از جمله اطلاعات توده سنگ دربرگیرنده تونل، داده‌های لرزه‌ای و ...
- میزان تجربه کاری طراح تونل و گروه مشاور پروژه
- فاکتور ایمنی قابل قبول طراح تونل
- انجام یا عدم انجام مطالعات تحلیل خطر زمین‌لرزه و برآورد پارامترهای طرح لرزه برتاب
- مقدار بار وارده به سیستم نگهداری اولیه و ...
- در مرحله اجرای تونل نیز همانند مرحله مطالعه و طراحی، موارد زیادی در تعیین تیپ سیستم نگهداری اولیه مؤثر هستند. از جمله:
- دقت و صحت برداشت زمین‌شناسی حین اجرا (مپینگ) و متناسب با آن تیپ سیستم نگهداری اولیه پیشنهادی.
- میزان تجربه کاری مهندس ناظر تونل و گروه نظارت پروژه
- مصالح پای کار موجود در کارگاه
- فاکتور ایمنی مدنظر مهندس ناظر تونل در پیشنهاد تیپ سیستم نگهداری اولیه و ...
- تعیین تیپ سیستم نگهداری با سه روش زیر قابل انجام است:
- به کارگیری طراحی استاندارد
- به کارگیری طراحی بر اساس شرایط مشابه
- به کارگیری طراحی بر اساس روش‌های تحلیلی و

¹ Mapping

قضاوت مهندسی نقش تعیین کننده‌ای در تعیین روش طراحی تیپ سیستم نگهداری دارد و روشی باید انتخاب شود که بیشترین تطابق را با شرایط و آیتم‌های موردنیاز طراحی داشته باشد. روش‌های طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها به سه دسته روش‌های تجربی، مشاهده‌ای و تحلیلی و تقسیم‌بندی می‌شوند که در ادامه بررسی شده است:

۵-۳-۵- روش‌های تجربی طراحی

۵-۳-۵-۱- کلیات

روش‌های طراحی تجربی بر اساس تجربیات عملی بر روی پروژه‌های مشابه با پروژه موردنظر بنا شده است. روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ، ستون فقرات نگرش‌های تجربی را تشکیل می‌دهد و به‌طور وسیع در مطالعات مهندسی سنگ بکار می‌رود. در بسیاری از پروژه‌ها طبقه‌بندی سنگ‌ها به‌عنوان تنها مبنای عملی برای طراحی سازه‌های پیچیده زیرزمینی تلقی می‌شود. مشهورترین و متداول‌ترین روش مورد استفاده، طبقه‌بندی ترزاقی^۱ بر اساس بار سنگ است که در سال ۱۹۴۶ میلادی توسط وی ارائه شد. از آن زمان به بعد این طبقه‌بندی توسط دیر^۲ و همکارانش (۱۹۷۰ میلادی) اصلاح و سیستم‌های طبقه‌بندی جدید سنگ پیشنهاد شد. این سیستم‌ها رهنمودهای نوینی را در تکنولوژی نگهداری مثل شاکریت و راکبوت، در پروژه‌های مختلف مهندسی مانند تونل‌ها، فضاها، بزرگ زیرزمینی، معادن، شیب‌های سنگی و نظایر آن‌ها ارائه کرده است.

۵-۳-۵-۲- استفاده از رده‌بندی بار سنگ ترزاقی

قدیمی‌ترین مرجع رده‌بندی توده سنگ توسط ترزاقی در سال ۱۹۴۶ ارائه شده است که ایشان بار وارده بر سیستم نگهداری تونل را توسط طبقه‌بندی توصیفی سنگ‌ها برآورد کرده است. هدف این رده‌بندی برآورد بار وارده بر قاب‌های فولادی از طرف زمین است. این امر پیشرفت بسیار مهمی بود زیرا سیستم نگهداری با استفاده قاب‌های فولادی در تونل‌های سنگی طی مدت ۵۰ سال پیش از آن تاریخ، به طرز وسیعی مورد استفاده قرار می‌گرفت. بایستی توجه داشت که اگرچه این سیستم برای هدف اولیه خود یعنی تخمین بارهای مؤثر بر قاب‌های فولادی مناسب است، اما در مورد روش‌های جدید تونل سازی و از آن جمله استفاده از شاکریت و راکبوت، مناسب نیست. در سال ۱۹۷۰ میلادی، سسیل^۳ پس از بررسی‌های بسیار به این نتیجه رسید که طبقه‌بندی ترزاقی برای دستیابی به یک ارزیابی واقعی از کیفیت سنگ بسیار کلی است و اطلاعات کمی در مورد خصوصیات توده سنگ به دست نمی‌دهد. رده‌بندی ترزاقی بارها اصلاح شده و آخرین اصلاح آن در سال ۱۹۸۲ میلادی توسط رز^۴ انجام گرفته است.

¹ Terzaghi

² Deere

³ Cecil

⁴ Rose

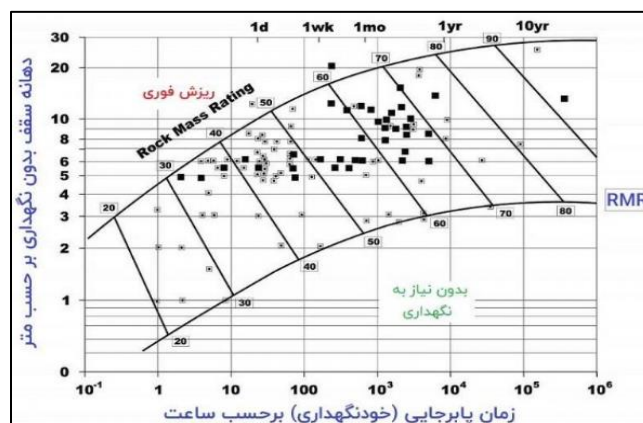
این روش زمینه پیدایش سایر روش‌های رده‌بندی را فراهم کرد.

۵-۳-۳- استفاده از رده‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR)

سیستم رده‌بندی توده سنگ^۱ یا اصطلاحاً «RMR»، یک سیستم ژئومکانیکی رایج برای طبقه‌بندی سنگ‌ها است. این سیستم در بین سال‌های ۱۹۷۲ تا ۱۹۷۳ توسط بیناوسکی^۲ توسعه یافت. RMR مهم‌ترین پارامترهای زمین‌شناسی را با هم ترکیب می‌کند و یک شاخص کلی و جامع را برای بیان کیفیت توده سنگ ارائه می‌دهد. این شاخص به منظور طراحی و ساخت حفاریات سنگی نظیر تونل‌ها، معادن، شیب‌ها و پی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. پارامترهای مؤثر در این رده‌بندی و جداول مربوطه در فصل طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ در فصل سوم به تفصیل آمده است و در اینجا مقصود نحوه استفاده از این رده‌بندی در طراحی و برآورد زمان خود نگهداری تونل‌ها و همچنین انتخاب سیستم نگهداری اولیه است. بدین منظور جداول و نمودارهایی عرضه شده است که در هر مورد می‌توان از آن‌ها استفاده کرد.

• ۵-۳-۳-۱- زمان خود نگهداری تونل

طبقه‌بندی توده سنگ، در تخمین زمان پابرجایی (خود نگهداری) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۵-۱۱ و جدول ۵-۱ مقادیر تقریبی هر یک از این موارد با توجه به طبقه‌بندی توده سنگ آورده شده است.



شکل ۵-۱۱- زمان خود نگهداری تونل به صورت تابعی از RMR

جدول ۵-۱۱- زمان خود نگهداری توده سنگ با توجه به طبقه‌بندی آن

طبقه‌بندی	I	II	III	IV	V
میانگین زمان پابرجایی	۲۰ سال برای دهانه ۱۵ متری	۱ سال برای دهانه ۱۰ متری	۱ هفته برای دهانه ۵ متری	۱۰ ساعت برای دهانه ۲.۵ متری	۳۰ دقیقه برای دهانه ۱ متری

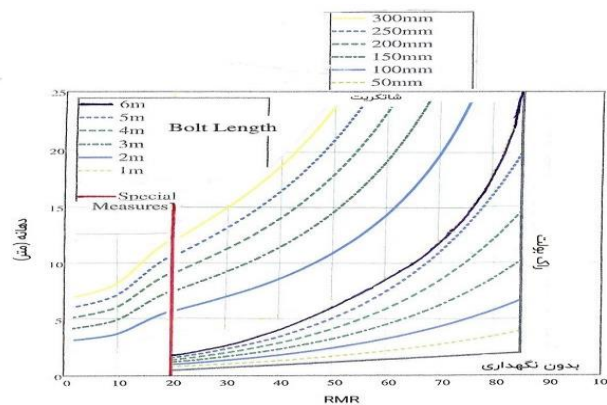
¹ Rock Mass Rating

² Bieniawski

• ۵-۳-۲- انتخاب سیستم نگهداری اولیه تونل

دستورالعمل‌های طراحی نگهداری تونل بر اساس مقدار RMR، در ابتدا به صورت جداولی بودند که نوع نگهداری مناسب برای تونلی با دهانه/قطر ۱۰ متر را پیشنهاد می‌دادند.

با پیشرفت تکنولوژی در زمینه به کارگیری راکبوت، شاتکریت و قاب‌های فولادی، طراحان این دستورالعمل‌ها را برای ابعاد دیگر تونل نیز تعدیل کردند. امروزه، طراحان تونل به منظور تسهیل کار طراحی از نمودارهای مخصوص برای انتخاب نوع نگهداری استفاده می‌کنند. این نمودارها، نگهداری‌های مختلف را به صورت تابعی از اندازه و کیفیت توده سنگ در نظر می‌گیرند (شکل ۵-۱).



شکل ۵-۱۲- سیستم نگهداری اولیه پیشنهادی به صورت تابعی از دهانه تونل و کیفیت توده سنگ

مطابق با روش تجربی طراحی سیستم نگهداری اولیه، خلاصه‌ای از تیپ‌های معمول در زون غیرپرتالی و زون پرتالی برای تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (دوخطه و سه خطه) مطابق زیر می‌باشد:

• زون غیرپرتالی

خلاصه‌ای از تیپ‌های استاندارد سیستم نگهداری اولیه در زون غیرپرتالی تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (دوخطه و سه خطه) به ترتیب در جدول ۵-۱۲ و جدول ۵-۱۳ نمایش داده شده است. قابل ذکر است که تیپ‌های مذکور با توجه به مطالعات و نظارت‌های حین اجرای تونل‌های با جنس و شرایط متفاوت پیشنهاد شده است و امکان دارد که برای پروژه‌های متفاوت نیاز به روزآوری داشته باشد. قابل یادآوری است که تیپ‌های مذکور با تلورانس قابل قبول، قابلیت تغییر مقادیر را دارند.

جدول ۵-۱۲- تیپ‌بندی استاندارد سیستم نگهداری اولیه زون غیر پرتالی تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (دوخطه)

نمپ	I	II	III	IV	V	VI	VII
RMR	۸۰-۱۰۰	۶۰-۸۰	۵۰-۶۰	۴۰-۵۰	۳۰-۴۰	۲۰-۳۰	۰-۲۰
	۳	۵	۵	۵	۵	۵	۵
ضخامت (cm)	-	-	-	۵	۲۰	۲۰	۲۲
لایه های بعدی							
تعداد لایه	-	-	-	۱	۲	۲	۲
قطر (mm)	-	-	-	۶	۶	۶	۶
چشمه (cm)	-	-	-	۱۰*۱۰	۱۰*۱۰	۱۰*۱۰	۱۰*۱۰
همپوشانی (cm)	-	-	-	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
نوع	-	-	-	-	IPE۱۶	IPE۱۶	IPE۱۸
فاصله داری (m)	-	-	-	-	>۱	<۱	<۱
طول	۳	۳	۳	۴	۴	۴	۴
طول	موضعی	موضعی	۲.۵	۲	۱.۵	۱	۱
عرض			۲.۵	۲	۳	۳	۲

جدول ۵- ۱۳- تیپ‌بندی استاندارد سیستم نگهداری اولیه زون غیر پرتالی تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (سه خطه)

نوع	RMR	شاکریت		واپرمش				قاب فولادی		راکبوت (m)	
		لایه اول	لایه های بعدی	تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	نوع	فاصله داری (m)	طول	آرایش
											عرضی
I	۸۰-۱۰۰	۳	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی
II	۶۰-۸۰	۵	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی
III	۵۰-۶۰	۵	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲.۵
IV	۴۰-۵۰	۵	۱۰	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	-	-	۴	۲
V	۲۰-۴۰	۵	۲۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	>۱	۴	۱.۵
VI	۲۰-۳۰	۵	۲۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	<۱	۴	۱
VII	۰-۲۰	۵	۲۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	<۱	۴	۱

* تیپ بندی های جدول ۵-۱۲ و ۵-۱۳ برای حالت نرمال و معمول در سنگ می باشد و برای شرایطی مانند مچاله شوندگی، انفجار سنگ و آماس و تونل های با جریان شدید آب کاربرد ندارد. همچنین برای محدوده پرتالی قابل استفاده نیست.

خلاصه ای از تیپ های کاربردی سیستم نگهداری اولیه در زون پرتالی تونل های راه شریانی درجه ۱ و درجه (دو خطه و سه خطه)، به ترتیب در جدول ۵-۱۴ و جدول ۵-۱۵ نمایش داده شده است.

جدول ۵- ۱۴- تیپ بندی استاندارد سیستم نگهداری اولیه زون پرتالی تونل های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (دو خطه)

تیپ	RMR	شاتکریت		وایر مش						قاب فولادی		راکبوت (m)	
		لایه اول	لایه های بعدی	ضخامت (cm)	تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	نوع	فاصله داری (m)	طول	آرایش	
												طولی	عرضی
I	۸۰-۱۰۰	۲	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
II	۶۰-۸۰	۵	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
III	۴۰-۶۰	۵	۵	۵	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	-	-	۴	۱.۵	۲
IV	۲۰-۴۰	۵	۲۰	۲۰	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۶	>۱	۳	۱	۲
V	۰-۲۰	۵	۲۲	۲۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	<۱	۳	۱	۱

جدول ۵-۱۵- تیپ‌بندی استاندارد سیستم نگهداری اولیه زون پرتالی تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (سه خطه)

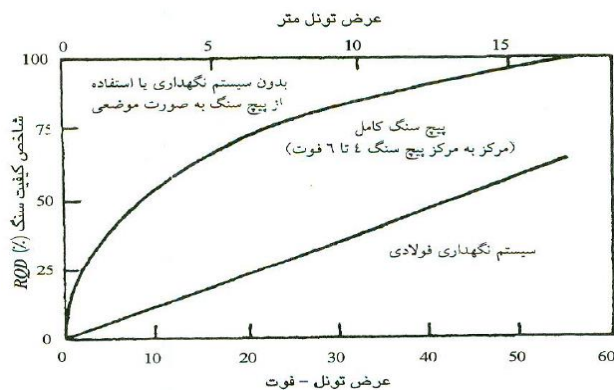
تیپ	RMR	شاکریت		واپرمش				قاب فولادی		راکبوت (m)	
		ضخامت (cm)	تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	نوع	فاصله‌داری (m)	طول	آرایش	
										طولی	عرضی
I	۸۰-۱۰۰	۲	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
II	۶۰-۸۰	۵	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
III	۴۰-۶۰	۵	۱۰	۶	۱۰*۱۰	۱۵	-	-	۴	۱.۵	۲
IV	۲۰-۴۰	۵	۲۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	>۱	۳	۱	۲
VI	۰-۲۰	۵	۲۵	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	>۱	۳	۱	۱

* تیپ‌بندی‌های جدول ۵-۱۴ و جدول ۵-۱۵ برای حالت نرمال و معمول در سنگ و فقط در زون پرتالی (زون تحت تأثیر پرتال)، قابل استفاده می‌باشد و برای شرایطی مانند مچاله‌شوندگی، انفجار سنگ و آماس و تونل‌های با جریان شدید آب کاربرد ندارد.

۵-۳-۵- استفاده از شاخص کیفیت سنگ (RQD)

در رده‌بندی سنگ بر اساس شاخص RQD سنگ‌ها به انواع خیلی ضعیف تا خیلی خوب تقسیم‌بندی می‌شوند و به کمک این رده‌بندی نیز می‌توان سیستم نگهداری تونل را پیش‌بینی کرد. اگرچه RQD شاخص ارزان و سریعی است ولی به دلیل عدم در نظر گرفتن تأثیر عواملی همچون جهت‌یافتگی درزه‌ها و مشخصات پرکننده‌ها، کاستی‌هایی نیز دارد.

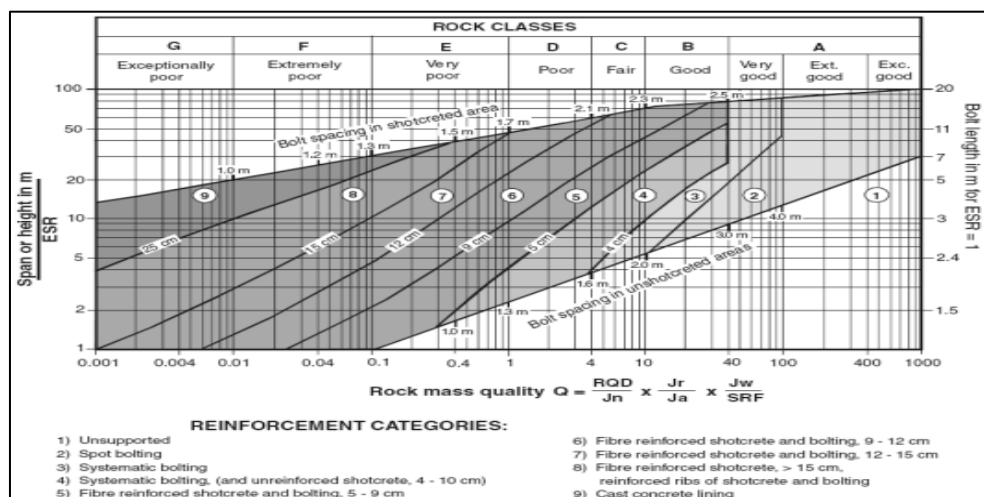
بنابراین با اینکه RQD یک پارامتر عملی تخمین کیفیت مغزه است، اما به تنهایی برای تشریح سنگ کافی نیست. با استفاده از شاخص RQD (شکل ۵-۱۳) می‌توان تا حدودی سیستم نگهداری اولیه را تخمین زد.



شکل ۵-۱۳- استفاده از RQD برای انتخاب سیستم نگهداری اولیه تونل

۵-۳-۵- استفاده از سیستم رده‌بندی Q

سیستم Q برای طبقه‌بندی توده سنگ در سال ۱۹۷۴ توسط نیک بارتون و همکاران او در انستیتوی ژئوتکنیک نروژ (NGI) گسترش یافت. این سیستم طبقه‌بندی بر اساس آنالیزهای انجام گرفته بر روی ۲۱۲ تونل حفاری شده در اسکاندیناوی ابداع شد. طبقه‌بندی سیستم Q بر اساس مقادیر کمی بوده و برپایه سیستم مهندسی خود باعث سهولت طراحی سیستم نگهداری اولیه تونل‌ها می‌شود (شکل ۵-۱۴).



شکل ۵-۱۴- تعیین سیستم نگهداری اولیه بر اساس سیستم Q

۵-۳-۶- استفاده از رده‌بندی بر اساس ساختار سنگ (RSR)

این رده‌بندی که در سال ۱۹۷۲ میلادی توسط ویکهام و همکارانش ارائه شد، برای طراحی سیستم نگهداری تونل‌ها کارایی خوبی دارد. امتیاز سنگ‌های مختلف در این سیستم بین صفر (ضعیف‌ترین سنگ‌ها) تا ۱۰۰ (مستحکم‌ترین

سنگ‌ها) متغیر است. اگرچه این روش در ابتدا برای طراحی شاتکریت ارائه شد، ولی بعدها برای طراحی قاب فولادی تونل‌های کوچک نیز مورد استفاده قرار گرفت. شاخص RSR به صورت رابطه زیر تعریف شد:

$$RSR = A + B + C$$

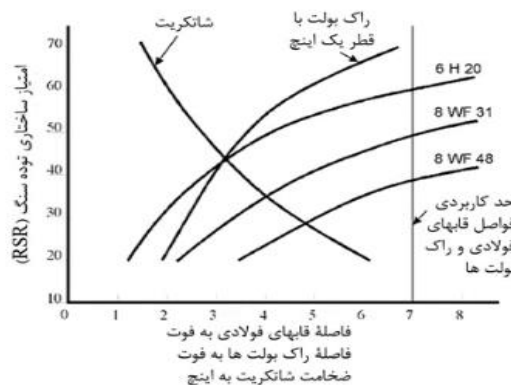
رابطه ۵-۱۶

A: مربوط به زمین‌شناسی توده سنگ بوده و به نوع سنگ، مقاومت سنگ و ساختار توده سنگ بستگی دارد.

B: با توجه به وضعیت ناپیوستگی‌ها نسبت به امتداد تونل از قبیل فاصله‌داری درزه‌ها، امتداد و شیب درزه‌ها تعیین می‌شود.

C: اولاً بستگی به A و B داشته و دوم اینکه مشخص‌کننده وضعیت جریان آب‌های زیرزمینی است (حجم آب به ازای طول معینی از تونل)

مقدار RSR به کمک جداول تعیین ضرایب A و B و C به دست آمده و به کمک نمودار شکل ۵-۱۵، مقدار نگهداری مورد نیاز برای تونل با عرض مشخص ارائه می‌شود.



شکل ۵-۱۵- تخمین نگهداری اولیه برای تونل به قطر ۷.۳ متر با روش RSR

۵-۳-۶- روش‌های مشاهده‌ای طراحی

۵-۳-۶-۱- کلیات

اگرچه قبل از حفر یک سازه زیرزمینی اطلاعات مناسبی برای طراحی روش اجرا و سیستم نگهداری در دست است اما معمولاً این اطلاعات کافی نیست؛ بنابراین با استفاده از روش‌های مشاهده‌ای می‌توان سیستم نگهداری پیش‌بینی شده را ارزیابی کرد و پس از انجام اصلاحات لازم، آن را برای کل سازه زیرزمینی تعمیم داد. اجرای این عملیات را معمولاً رفتار سنجی^۱ می‌گویند.

¹ monitoring

به کمک ابزاربندی و پایش حرکات زمین حین حفاری و همچنین تحلیل اندرکنش زمین-سیستم نگهداری اقدام به نگهداری تونل می‌نمایند. این روش در حفر تونل به روش جدید اتریشی (NATM) و محدود سازی همگرایی^۱ کاربرد دارد.

در بسیاری از طرح‌ها با انجام رفتار سنجی مناسب، می‌توان از وقوع مشکلات احتمالی جلوگیری کرد. به‌عنوان مثال به هنگام احداث فضای زیرزمینی در سنگ، تصمیم‌گیری درباره تقویت سیستم نگهداری و یا تغییر در شیوه و یا زمان‌بندی اجرای آن به عواملی همچون میزان و آهنگ همگرایی دیوار فضای زیرزمینی بستگی دارد. بنابراین بررسی تغییرات در وضعیت توده سنگ با استفاده از ابزار دقیق، اطلاعات لازم را در این مورد فراهم می‌سازد. از سوی دیگر در مواردی که اجرای یک طرح زیرزمینی با مشکلات پیش‌بینی نشده‌ای مثل ناپایداری مواجه می‌شود، با رفتار سنجی می‌توان به علت آن پی برد. ازجمله مزایای دیگر رفتار سنجی، صرفه‌جویی قابل ملاحظه در هزینه اجرای طرح است. هزینه اجرای رفتار سنجی معمولاً در حدود نیم الی یک درصد هزینه کلی اجراست در صورتیکه با انجام آن ممکن است چندین برابر آن صرفه‌جویی کرد.

۵-۳-۶-۲- اهداف رفتار سنجی توده سنگ

- رفتار سنجی فضاهای زیرزمینی جهت تأمین چهار منظور اساسی زیر انجام می‌گیرد:
- (۱) ثبت مقادیر طبیعی و نیز تغییرات ایجادشده در پارامترهای ژئوتکنیکی مثل اتفاقات زمین لرزشی قبل از اجرای یک پروژه مهندسی، سطح آب زیرزمینی و ...
 - (۲) بهبود شرایط ایمنی حین اجرا و بهره‌برداری طرح با دادن اخطار بموقع مثل تشدید غیرعادی جابه‌جایی‌های زمین، فشار آب زیرزمینی و بارهای اعمال شده بر اجزای سیستم نگهداری.
 - (۳) کنترل انجام امور اصلاحی و تقویتی در زمین مانند تونل سازی در زمین‌های حاوی آب، منجمد کردن زمین حین حفر تونل، تقویت زمین با عملیات تزریقی و زهکشی.
 - (۴) کنترل صحت فرضیات، مدل‌های انتخابی و مشخصات توده سنگ که در محاسبات مربوط به طراحی به کار می‌روند.
 - (۵) علت‌یابی مسائل
 - (۶) کاهش هزینه اجرا و ...
- هدف اصلی بررسی‌های رفتار سنجی برجا، تعیین شرایط پایداری حفاریات زیرزمینی با ارائه داده‌های کیفی در مورد رفتار توده سنگ و سیستم نگهداری است. از میان روش‌های متفاوت رفتار سنجی، اندازه‌گیری‌های جابجایی حفاریات زیرزمینی از همه مفیدتر است.

¹ Convergence Confinement

از نقطه نظر زمان رفتار سنجی نیز می توان هدفها را به شرح زیر تقسیم بندی کرد:

(۱) قبل از اجرای تونل

هدف از اقدامات این مرحله، تعیین اطلاعات مورد نیاز برای طراحی فضای زیرزمینی است که از جمله می توان به ویژگی هایی همچون مدول تغییر شکل توده سنگ، مقاومت بر جای توده سنگ و وضعیت تنش های برجا اشاره کرد.

(۲) حین اجرای تونل

هدف از این مرحله از رفتار سنجی، بررسی اعتبار سیستم نگهداری طراحی شده و انجام تغییرات احتمالی لازم در آن است. همچنین در این مرحله، اندازی گیری ها و نظارت تغییر مکان ها، اهمیت زیادی دارد که با استفاده از آن می توان اصلاحات لازم را در سیستم نگهداری انجام داد و وضعیت ایمنی را بهتر کرد.

(۳) بعد از اجرای تونل

این مرحله برای کنترل رفتار حفريات زیرزمینی در طول بهره برداری انجام می گیرد.

۵-۳-۶-۳- پارامترهای مورد سنجش در رفتار سنجی

با اجرای یک برنامه رفتار سنجی مناسب می توان هریک از پارامترهای زیر و یا ترکیب آن ها را بررسی کرد:

(۱) پارامترهای مربوط به توده سنگ

- جابجایی های افقی، قائم و یا مایل
- همگرایی
- تغییر تنش در سنگ

(۲) پارامترهای مربوط به سیستم نگهداری

- همگرایی
- خیز
- بار وارده
- تنش وارده

(۳) جابجایی درزه و ناپیوستگی ها

- جابجایی رخ داده درزه ها

۵-۳-۶-۴- تعبیر و تفسیر داده های رفتار سنجی

به طور کلی هدف از تحلیل داده های پردازش شده ابزار دقیق، شناخت رفتار و یا واکنش توده سنگ درون گیر حفره

زیرزمینی در شرایط مختلف است که نتایج این تحلیل، اطلاعات ارزشمندی را در زمینه های زیر فراهم می سازد:

- ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی
- تعیین بهنه های مختلف در توده سنگ تغییر شکل یافته در اطراف فضای زیرزمینی

- تخمین جهت و نسبت تنش‌های موجود در محل
 - بهبود روش‌های اجرای حفاری
 - تخمین پارامترهای رفتاری توده سنگ در شرایط واقعی ساختگاه با استفاده از روش تحلیل برگشتی
 - ارزیابی تأثیر سیستم نگهداری فضای زیرزمینی در کل ایستگاه اندازه‌گیری بر میزان جابجایی سنگ
- در روش‌های نوین حفاری فضاهای زیرزمینی، استفاده از نتایج تحلیل داده‌های ابزار دقیق با رعایت موارد زیر ضروری است:

- نصب درست و به‌موقع ابزار دقیق پیشنهادی
- استفاده از ابزار دقیق تکمیلی در صورت لزوم
- قرائت دقیق و مداوم ابزار دقیق نصب‌شده و پردازش اطلاعات حاصله
- تحلیل داده‌های پردازش‌شده ابزار دقیق و ارائه پیشنهاد برای بهبود روش اجرا و یا سیستم نگهداری
- اجرای درست حفاری فضای زیرزمینی و نصب سیستم نگهداری مطابق روش اصلاح‌شده
- ارزیابی روش اصلاح‌شده با ادامه رفتار سنجی و تحلیل‌های مستقیم و برگشتی

۵-۳-۶-۵- روش تونل سازی اتریشی جدید (NATM)

روش تونل سازی جدید اتریشی را می‌توان به عنوان رویکردی نوین در تونل سازی به حساب آورد که منجر به بهبود فعالیت‌های تونل سازی با کاهش هزینه‌های غیرضروری و در عین حال تامین ایمنی مورد نیاز می‌شود. از آنجایی که پارامترهای مؤثر در حفر و ایجاد یک سازه زیرزمینی بسیار زیاد هستند لذا تنها راه کاهش هزینه‌ها و نیز تأمین ایمنی، استفاده از روشی است که انعطاف‌پذیری‌های لازم را برای تغییر در طراحی و اجرا داشته باشد. NATM روشی است که این انعطاف‌پذیری را در امر حفاری، نگهداری و ابزاربندی میسر ساخته است.

ناتم روشی مبتنی بر تابع نگاری رفتار توده‌های سنگ تحت بار و مانیتورینگ عملیات ساختمان زیرزمینی سنگ است. واقعیت اینست که ناتم به‌عنوان یک مرحله از حفاری و نیز تکنیک‌های نگهداری مطرح نیست.

• اصول کلی NATM:

تونل‌زنی به روش جدید اتریشی در خاک‌های سست تا سنگ‌های سخت و مقاوم و در اعماق کم (در جهت به حداقل رساندن نشست سطح) تا اعماق زیاد و بیش از ۱۰۰۰ متر تحت میدان‌های تنش ناشی از عملیات معدنکاری انجام گرفته است بنابراین اصول زیر به‌طور کلی قابل اعمال می‌باشند:

- عنصر اصلی باربری یک تونل، توده سنگ پیرامونی آن می‌باشد بنابراین یکی از اصول عبارت است از حفظ مقاومت اولیه سنگ تا آنجایی که امکان داشته باشد.
- اتساع یا جابجایی‌ها باید به حداقل رسانده شود زیرا موجب پایین آوردن مقاومت می‌گردد.
- وضعیت تنش تک‌محوری یا دو محوری، شرایط نامناسب برای تونل بوده و باید از آن اجتناب گردد.

- دگرشکلی‌ها باید به طرزی تحت کنترل درآید که توده سنگ پیرامون تشکیل یک حلقه باربر حول تونل را بدهد به گونه‌ای که از دست رفتن مقاومت به وسیله اتساع در سطحی قابل قبول نگه داشته شود. با اجرای مناسب این کنترل، ایمنی و اقتصاد افزایش می‌یابد. برای رسیدن به این منظور، سیستم نگهداری اولیه می‌بایست در زمان درست نصب گردد.
- عامل زمان ویژه سیستم ترکیبی سنگ به اضافه نگهداری اولیه، باید به صحت کافی تخمین زده شود. تخمین عامل زمان بستگی به آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمون‌های برجا و رده‌بندی توده سنگ دارد. از این سه نرخ، دگرشکلی و زمان پابرجایی می‌تواند استنتاج شده و با رفتار واقعی تونل در حین ساختمان تطبیق و کنترل گردد.
- هر جا که دگرشکلی‌ها زیاد و یا سست شدن توده سنگ انتظار می‌رود، می‌بایست از تماس کامل سیستم نگهداری اولیه با جدار تونل در محل برخورد اطمینان حاصل آید. این امر با بکار گرفتن شاکریت به بهترین نحو حاصل می‌گردد.
- نگهداری اولیه باید نازک و دارای صلبیت خمشی پایین باشد، از این رو گشتاورهای خمشی را پایین آورده و وقوع شکستگی‌ها در اثر خمش به حداقل می‌رسد.
- افزایش نگهداری با شبکه توری اضافی، قاب‌های فولادی و میل مهارها حاصل می‌آید نه با لاینینگ ضخیم‌تر. نوع و مقدار نگهداری و زمان نصب، از نتایج اندازه‌گیری دگرشکلی‌ها تعیین می‌گردد.
- از نظر استاتیکی تونل را می‌توان لوله‌ای ضخیم (یا حلقه‌ای دوبعدی) که از توده، سنگ و لاینینگ تشکیل یافته در نظر گرفت. از آنجا که یک لوله مساعدترین ویژگی پایداری را بدون آنکه درز داشته باشد داراست، بستن هم‌زمان کف تونل در هنگامی که سنگ دارای مقاومت کافی نباشد، دارای اهمیت است. رفتار توده سنگ با بستن به موقع کف تونل تعیین می‌گردد. پیشروی‌های زیاد در طاق منجر به دیر بسته شدن کف و آنهم منجر به تشکیل لوله نیمه آسترگیری اولیه گردیده که نتیجه آن بروز گشتاورهای بزرگ خمشی در جهت محور تونل می‌باشد که منجر به ایجاد تمرکز تنش زیاد در سنگ، در پای دیواره‌های جانبی می‌گردد.
- حفاری کامل هد، بهترین روش برای دستیابی یک توزیع یکنواخت تنش است. هر چند که در سنگ‌های سست، حفاری بخش بخش، برای پایداری در حین ساختمان ممکن است لزوم پیدا کند.
- روند حفاری و نگهداری برای پایداری مهم می‌باشد. زیرا آن‌ها عامل زمان توده سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تغییر در طول دوره حفاری، زمان بستن کف، طول پیشروی طاق، مقاومت و زمان نصب سیستم نگهداری تماماً به‌طور سیستماتیک برای کنترل فرایند توزیع مجدد تنش و پایداری به کار گرفته می‌شوند.
- در موارد لاینینگ مضاعف، لاینینگ نهایی باید همچنان نازک باشد. تنش عمود می‌باید بر روی تمام سطح تماس بین لاینینگ منتقل گردیده و تنش برشی در سطح برخورد می‌باید پایین باشد.
- کل سیستم، توده سنگ به اضافه پوشش می‌بایست با نگهداری اولیه پایدار گردند. در صورت خورنده بودن آب‌های زیرزمینی لاینینگ نهایی می‌بایست قادر به پایداری توده سنگ به تنهایی باشد. میل مهارها تنها می‌توانند به عنوان یک نگه‌دارنده دائمی تلقی گردند، البته در صورتی که از گزند خوردگی در محیط‌های خاص در امان باشند.
- برای کنترل ایمنی سازه تونل، اندازه‌گیری تنش بتن و تنش در مرز بین سنگ و لاینینگ ضرورت دارد. اندازه‌گیری

دگرشکلی‌ها همچنان ادامه پیدا می‌کند.

فشار ایستایی آب بر روی پوشش و فشار جریان در توده سنگ با زهکشی مناسب پایین آورده می‌شود. به‌طوری که از این اصول دریافت می‌شود، ناتم روند و دستورکاری نیست که با دنبال کردن آن به نتیجه موردنظر رسید بلکه عبارت است از مجموعه‌ای از ایده‌ها که به ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه توجه ویژه‌ای دارد. این روش در نتیجه تجربیات متعدد در کار تونل‌زنی به‌دست آمده است و برای به دست آوردن هر یک از این ایده‌ها و نیز جمع‌بندی آن‌ها به‌عنوان یک روش سال‌های زیادی وقت صرف شده است.

• روش اجرای تونل سازی اتریشی جدید (NATM)

با اینکه هنوز هیچ پشتوانه نظری حقیقی برای ناتم وجود ندارد اما عواملی وجود دارند که منجر به موفقیت این روش می‌گردند که عبارت‌اند از:

(۱) شاتکریت به‌عنوان سازنده سازه ترکیبی قوس سنگ که به حلقه باربر سنگ موسوم بوده و حفره را احاطه می‌کند. شاتکریت به‌مراتب قدیمی‌تر از ناتم می‌باشد اما ویژگی‌های عالی آن از نظر مقاومت و لغزش، این روش را به‌عنوان یکی از ابزارهای غالب نگهداری در تونل سازی به روش ناتم کرده است. بیشترین اهمیت آن امکان اجرای سریع برای پوشانیدن سطح تازه حفاری شده سنگ می‌باشد. مزیت دیگر آن دستیابی به یک مقاومت نسبی بالا در مدت‌زمان کوتاه، حدود ۵ نیوتن بر میلی‌مترمربع (مگاپاسکال) در ۶ ساعت می‌باشد. شاتکریت در تونل سازی دارای اثر مضاعف است.

(۲) وسیله دیگر برای ساختن طاق بیرونی، قاب‌های فولادی می‌باشد. این قاب‌ها در توده‌های سنگ فشرده شده و بسیار خردشونده به کار گرفته شده و تکیه‌گاهی سریع و مؤثر برای سنگ به شمار می‌آیند. در چند سال اخیر کاربرد قوس‌های پروفیلی به میزان زیاد افزایش یافته است. این قوس‌ها نسبت به قاب‌های فولادی مزایای بیشتری دارند و نیز به دلیل سبک وزن بودن، نصب آن‌ها آسان‌تر می‌باشد.

(۳) در تونل سازی همراه با مفاهیم ناتم، نصب میل مهارها جایگاه ویژه‌ای دارد و اهمیت آن‌ها به همان اندازه اهمیت شاتکریت می‌باشد. این میل مهارها نیز مثل شاتکریت در صورت نصب، موجب تشکیل حلقه باربر در اطراف توده سنگ می‌گردند. میل مهارها در برابر دگرشکلی شعاعی مقاومت کرده از این رو ایجاد دگرشکلی کنترل شده می‌نماید که شکل ژئومتریکی تونل را حفظ می‌نماید. همچنین میل مهارها که تأثیر ناهمسانی و ناهمگونی را کاهش می‌دهند، تشکیل صفحات برشی و لغزشی را مشکل‌تر ساخته و سبب ایجاد مقاومت ماندگار بالا حتی در توده‌های سنگ به‌شدت دستخورده می‌گردد که این نیز به نوبه خود سبب بهسازی کیفیت سنگ می‌گردد. تنش مماسی در حلقه سنگ حمال موجب افزایش چسبندگی مهارها می‌گردد. طاق‌های ثانویه ایجادشده بین تکیه‌گاه‌ها، در برابر تمایل توده سنگ نسبت به جابجایی به داخل تونل مقاومت ایجاد می‌نماید که این مقاومت به نزدیکی مهارها بستگی دارد. در صورتیکه طاق تونل تحت تنش زیاد در اثر فرایندهای تجدید آرایش دوباره قرار گیرد، یا اگر سیستم سنگ در معرض شکستگی قرار داشته باشد، تونل نیاز به بهسازی با شاتکریت خواهد داشت.

بنابراین به طور خلاصه سیستم نگهداری در ناتم عبارتست از: شاتکریت، میل مهارها، قوس‌های فولادی یا پروفیلی، صفحات فولادی و غیره. هدف اصلی ناتم ایجاد یک قوس نیمه صلب خارجی بلافاصله پس از حفاری با وسایل نگهداری از قبیل شاتکریت، راکبوت و غیره می‌باشد. این امر موجب تنظیم تنش در محدوده اطراف تونل گردیده و از سست‌شدگی مخرب جلوگیری به عمل می‌آورد و این همان چیزی است که ناتم را از روش‌های حفر تونل محافظه‌کارانه تمیز می‌دهد. زیرا اصولاً در شیوه‌های سنتی حفر تونل، بار سنگ می‌بایست تماماً به وسیله تجهیزات نگهداری تحمل شود که این کار نیز مستلزم صرف هزینه‌های زیاد می‌باشد.

۵-۳-۶- روش محدودسازی همگرایی

روش محدودسازی همگرایی تلاشی در جهت ارزیابی پایداری تونل به کمک مدل‌های ریاضی و هدف آن محاسبه فشار سیستم نگهداری است. بدین منظور باید منحنی واکنش زمین مدنظر قرار گیرد. در این نمودار، نقطه تقاطع دو منحنی مشخصه تغییرات تنش شعاعی به عنوان تابعی از تغییر شکل شعاعی تونل، یکی در مورد پوشش بتنی و دیگری زمین، اهمیت ویژه‌ای دارد. اساساً این روش شبیه روش‌های الاستو-پلاستیک است که در مکانیک جامدات بکار می‌رود. این روش در سال ۱۹۷۷ میلادی طی اجلاس تخصصی تونل در کشور فرانسه و توسط AFTES^۱ ارائه شد. نام محدودسازی همگرایی از این جهت برای این روش انتخاب شد که تصویری از رفتار فیزیکی ترکیب نگهداری-زمین در یک تونل را ارائه می‌کند. زمین همواره به تغییر شکل تمایل دارد، این یعنی همگرایی، در حالیکه پوشش تونل (سیستم نگهداری) با اعمال فشار در مقابل این همگرایی قرار دارد و این به معنی محدودسازی است.

طراحان تونل همیشه سعی دارند تا با استناد به مشاهدات و اندازه‌گیری‌های به عمل آمده، سیستم‌های نگهداری را مطالعه کنند و کمتر به بررسی‌های تئوری و نظری بپردازند. به هر حال اصل حاکم بر روش محدودسازی همگرایی که در آن رفتار توده سنگ و سیستم نگهداری در قالب منحنی‌های مشخصه خودنمایی می‌کند، به طراحان این امکان را می‌دهد که رفتار واقعی لایه‌های سنگی را در حین حفاری فضای زیرزمینی بررسی کنند. در این روش، مراحل حفاری زیرزمینی و تا حدی عامل زمان‌بندی مورد توجه قرار می‌گیرد؛ بنابراین نیازهای مهندسی طراحی تونل را به خوبی تأمین می‌کند و درک بهتری از مسائل ساخت تونل را ارائه می‌دهد و بدین ترتیب امکان طراحی بهتر پروژه‌های تونل را فراهم می‌سازد.

^۱ French Association of Tunnels and Underground Space.

۵-۳-۷- روش‌های تحلیلی طراحی

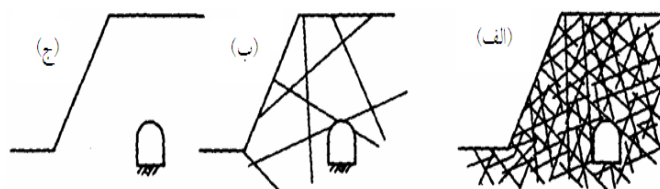
۵-۳-۷-۱- کلیات

در روش‌های تحلیلی، طراحی سیستم نگهداری بر اساس فرمول‌بندی و کاربرد بعضی از مدل‌های تئوری انجام می‌گیرد. این روش‌ها شامل مدل‌های نظری به‌عنوان چهارچوبی برای تحقیقات، مدل‌های فیزیکی، مدل‌های ریاضی و روش‌های عددی (مانند روش‌های اجزای محدود^۱ و نظایر آن‌ها) هستند. گرچه در بعضی موارد روش‌های ریاضی و عددی را همراه با هم و تحت عنوان روش‌های تحلیلی تئوریک در نظر می‌گیرند، اما بهتر است آن‌ها را به حالت مجزا از هم در نظر گرفت. از آنجاکه کاربرد روش‌های ریاضی در مکانیک سنگ و نگهداری مشکل و گاه غیرممکن است، لذا روش‌های عددی در این مورد اهمیت بیشتری دارند.

تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی به علت تغییر در نوع سنگ و خاک، ساختار زمین‌شناسی، شرایط تنش‌های منطقه، مراحل حفاری و ایجاد فضای زیرزمینی از محلی به محل دیگر، امری پیچیده و مشکل است لذا لازم است با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل پایداری، مقایسه بین نتایج حاصل از آن‌ها و همچنین با قضاوت مهندسی مناسب، وضعیت پایداری در سازه موردنظر بررسی شود.

به‌واسطه پیشرفت سریع فناوری و سهولت دسترسی به آن، به‌کارگیری روش‌های عددی عمومیت یافته‌اند. اساس این روش‌ها، شبیه‌سازی یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی (مانند توده‌سنگ) توسط محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط می‌باشد. چنانچه اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط بررسی شده و پس‌از آن میزان تغییر شکل در این نقاط تعیین شود، برای سایر نقاط تغییر شکل با روش‌های درونیابی محاسبه می‌گردد. در اغلب این مسائل محیط دارای شکل دلخواه می‌باشد که تحت بارگذاری ثقیلی، نیروهای خارجی، تنش‌های برجا، تغییرات درجه حرارت، فشار سیال، پیش‌تنیدگی و نیروهای دینامیکی قرار گرفته و برای پیدا کردن تغییر شکل‌ها از روابط تنش-کرنش در توده‌سنگ استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر به‌منظور طراحی فضاهای بزرگ مقطع، بیشتر از تحلیل‌های عددی استفاده شده است.

محیط‌هایی که یک سازه در آن‌ها و یا بر روی آن‌ها ساخته می‌شود به سه دسته پیوسته^۲، ناپیوسته^۳ و شبه پیوسته^۴ قابل تقسیم هستند. شکل ۵-۱۶ طبقه‌بندی زمین را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.



¹ Finite elements

² Continuous

³ Discontinuous

⁴ Pseudo- Continuous

شکل ۵- ۱۶- طبقه‌بندی زمین: (الف) پیوسته، (ب) ناپیوسته و (ج) شبه پیوسته

نوع اول ممکن است برای زمین‌هایی که از سنگ بکر بدون درزه و شکاف تشکیل شده‌اند بکار رود. نوع دوم نماینده سنگ‌های درزه‌دار است و نوع سوم برای سنگ‌هایی است که شدیداً خردشده و یا هوازده هستند. به دلیل آنکه رفتار نهایی زمین‌های نوع سوم می‌تواند شبیه به رفتار زمین‌های نوع اول باشد، رفتار این زمین‌ها را شبه پیوسته می‌نامند. رفتار مکانیکی نوع اول به کمک تئوری مکانیک محیط پیوسته قابل تحلیل است، در حالیکه برای تحلیل رفتار زمین‌های نوع دوم باید از تئوری‌های مربوط به محیط‌های ناپیوسته استفاده شود. برای تحلیل رفتار نوع سوم می‌توان از تئوری‌های محیط‌های ناپیوسته استفاده کرد. ولی از آنجاکه تعیین موقعیت، ابعاد و خواص مکانیکی همه سیستم‌های درزه غیرممکن به نظر می‌رسد، بر این اساس، در عمل روش تحلیل محیط‌های ناپیوسته برای تحلیل رفتار این نوع محیط‌ها کاربرد عملی نخواهند داشت. با توجه به اینکه این زمین‌ها تا حدی شبیه به محیط‌های پیوسته رفتار می‌کنند، می‌توان از تئوری محیط‌های پیوسته برای تحلیل رفتار آن‌ها استفاده کرد. باید در نظر داشت که تأثیر ناپیوستگی‌ها به صورت مناسبی در مدل‌سازی زمین‌های نوع سوم به عنوان یک محیط پیوسته منظور شود. این فرآیند باعث ایجاد مدل پیوسته‌ای معادل با توده سنگ ناپیوسته و درزه‌دار خواهد شد. با در نظر گرفتن مطالب بالا، زمین‌های پیوسته و شبه پیوسته را می‌توان به عنوان اجسام پیوسته در نظر گرفت، در حالی که زمین‌های ناپیوسته بایستی با نهایت دقت ممکن و با در نظر گرفتن همه درزه‌ها به طور جداگانه، در یک مدل ناپیوسته مدل شوند. بعد از مدل‌سازی زمین، همه مقادیر ثابت‌های مکانیکی و هندسه درزه‌ها را می‌توان با استفاده از تحلیل برگشتی تعیین نمود. به دلایل زیر روش‌های عددی بر سایر روش‌ها برتری دارند:

- ✓ با استفاده از روش‌های عددی، هر سازه با هر شکل سطح مقطعی را می‌توان تحلیل نمود.
- ✓ با استفاده از روش‌های عددی می‌توان تنش و جابجایی را به راحتی در تمام نقاط سیستم و در هر زمان که لازم باشد به دست آورد.
- ✓ در روش عددی می‌توان روند حفاری، نصب، نگهداری و سایر فعالیت‌های تونل‌سازی را در نظر گرفت.
- ✓ در روش‌های عددی می‌توان ناهمگنی‌ها، مناطق درزه‌دار، گسل‌ها و لایه‌های مختلف زمین را در مدل لحاظ نمود.
- ✓ همچنین می‌توان خواص مصالح را به صورت غیرخطی در نظر گرفت و یا حتی جریان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی کرد.

اغلب محیط‌های سنگی که در آن‌ها فضای زیرزمینی احداث می‌شود دارای محیطی پیوسته نبوده و به دلیل وجود دسته‌درزه‌ها محیطی ناپیوسته محسوب می‌شوند. با وجود مزایای بسیار، تکنیک‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای محدودیت‌های قابل توجهی نیز دارند. چنانچه خواص فیزیکی و مکانیکی توده سنگ برجا به طور دقیق مشخص نباشد، شبیه‌سازی کامپیوتری نمی‌تواند نتایج معتبری ارائه دهد. بعد از حفر تونل، خواص فیزیکی و مکانیکی توده سنگ

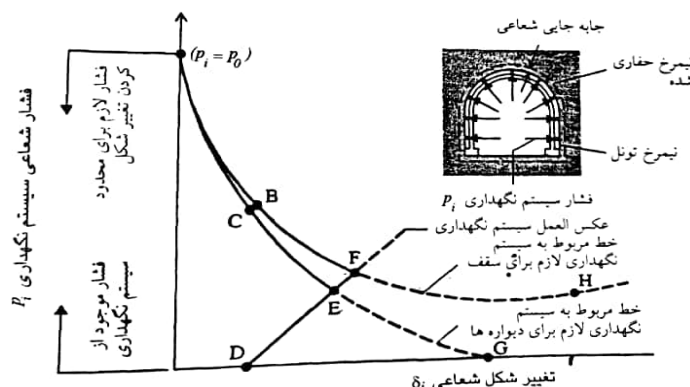
تغییر می‌کند، بنابراین با به‌کارگیری پارامترهای به‌دست‌آمده از برآوردهای آزمایشگاهی نمی‌توان رفتار توده‌سنگ را به‌خوبی پیش‌بینی کرد. به‌دلیل عدم توانایی در شبیه‌سازی تمام زمین و یا حتی تمام یک مجموعه حفاری، تنها بخشی از زمین مدل‌سازی شده و با توجه به مدل مفروض، شرایط مرزی برای مدل موردنظر تعریف می‌شود. به‌منظور از بین بردن این مرزها در تحلیل تنش، کرنش و تغییر شکل در اطراف یا در امتداد تونل، مرزها به‌قدر کافی دور از تونل در نظر گرفته می‌شوند که در نتیجه باعث افزایش تعداد المان‌ها می‌شود.

در حال حاضر در حل مسائل ژئوتکنیک کاربرد پنج روش عددی زیر بسیار رایج است:

- ۱- روش المان محدود^۱ (FEM)
- ۲- روش تفاضل محدود^۲ (FDM)
- ۳- روش المان مرزی^۳ (BEM)
- ۴- روش المان مجزا^۴ (DEM)
- ۵- روش تغییر شکل نایبسته^۵ (DDA)

۵-۳-۷-۲- تحلیل اندرکنش سنگ و سیستم نگهداری اولیه

با رسم منحنی‌های تغییرات فشار شعاعی سیستم نگهداری نسبت به تغییر شکل شعاعی و نیز منحنی عکس‌العمل سیستم نگهداری، می‌توان پی برد که آیا تونل در شرایط موجود بدون نصب سیستم نگهداری پایدار است یا اینکه به سیستم نگهداری نیاز دارد. نمونه‌ای از این منحنی‌ها در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است. مطابق شکل، سیستم نگهداری در طول خط DEF بار وارد می‌کند که خط عکس‌العمل سیستم نگهداری نامیده می‌شود. منحنی‌های ABFH و ACEG را نیز منحنی مشخصه زمین و یا منحنی سیستم نگهداری موردنیاز می‌گویند.



شکل ۵- ۱۷- منحنی فشار- تغییر شکل شعاعی سنگ‌ها و سیستم نگهداری تونل

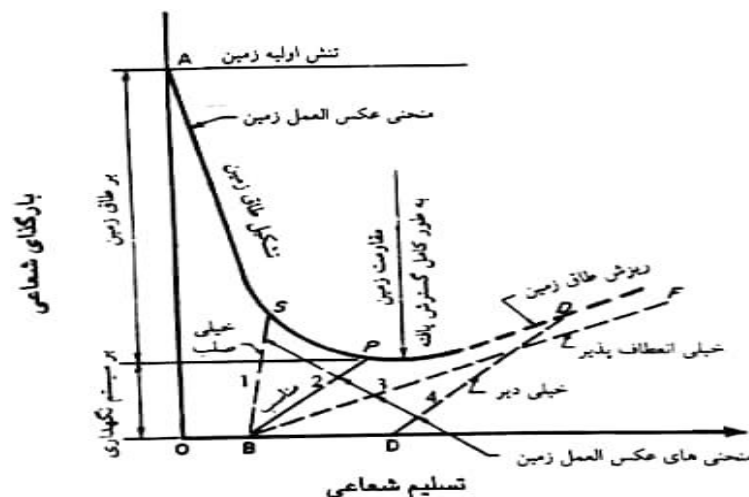
¹ Finite Element Method² Finite Difference Method³ Boundary Element Method

4 Distinct Element Method

5 Discontinuous Deformation Analysis

تعادل بین سنگ و سیستم نگهداری که در این مثال قاب‌های فولادی است، برای دیواره‌های جانبی تونل در نقطه E و برای سقف تونل در نقطه F رخ می‌دهد. قابل ذکر است که بیشترین تنش ایجاد شده در اثر حفاری، به وسیله سنگ تحمل می‌شود نه قاب‌های فولادی. اگر در پایان مرحله حفاری، قاب‌های فولادی نصب نشده بود، جابجایی شعاعی در طول منحنی‌های نقطه چین EG و FH افزایش می‌یافت. در این حالت، در مورد دیواره‌های تونل، در نقطه G اتفاق می‌افتاد. با این وجود، فشار سیستم نگهداری لازم برای کنترل جابجایی سقف ممکن است به مقدار مینیمم خود نزول کند و پس از سست شدن سنگ، دوباره سیر صعودی به خود بگیرد.

در طراحی منطقی سیستم‌های نگهداری، اندرکنش اجزای نگهدارنده یا تقویت کننده باید منظور شود. واضح است که کنترل جابجایی سنگ، وظیفه عمده سیستم‌های نگهداری است. مطابق شکل ۵-۱۸ به منظور استفاده از مقاومت توده سنگ در امر نگهداری، باید به سنگ اجازه جابجایی کافی داده شود. اما در عین حال، از جابجایی‌های زیاد که منجر به سست شدن و کاهش ظرفیت باربری توده سنگ می‌شود، باید اجتناب کرد.



شکل ۵-۱۸- تأثیر صلبیت و زمان نصب سیستم نگهداری بر عملکرد آن

صلبیت و زمان نصب سیستم نگهداری تأثیر بسزایی در کنترل جابجایی دارد. یک نمودار اندرکنش سنگ-سیستم نگهداری را در مورد مسئله‌ای شبیه به آنچه که در شکل ۵-۱۸ مشاهده شد، نشان می‌دهد. در این شکل، منحنی مشخصه زمین یا نگهداری مورد نیاز به وسیله منحنی ASPDF نشان داده شده است. اولین زمان ممکن که طی آن می‌توان سیستم نگهداری را نصب کرد، پس از بروز جابجایی شعاعی به میزان OB است.

۵-۳-۷-۳- مدل سازی عددی

در مسائل ژئومکانیک، به تمام انواع محاسباتی که بر اساس حل عددی معادلات دیفرانسیل پیچیده در مکانیک سنگ به کار می‌رود، روش عددی اطلاق می‌شود. در خیلی از روش‌های عددی با تقسیم توده سنگ به تعداد زیادی المان کوچک و بررسی رفتاری آن‌ها، رفتار کل توده برآورد می‌شود. این روش‌ها اغلب برای تحلیل تنش و جابه‌جایی به کار می‌روند. پیش‌نیاز اصلی برای تحلیل عددی، تقسیم توده دربرگیرنده به بخش‌های متعدد با خواص مشابه و عوارض

شاخص بر اساس نتایج بررسی‌های زمین‌شناسی و رده‌بندی مهندسی است. از قابلیت‌های منحصربه‌فرد این روش، ساخت مدل‌های پیوسته یا ناپیوسته متشکل از عوارض ساختاری و بلوک‌های سنگی است که امکان تحلیل دقیق‌تر را فراهم می‌آورد. تحلیل عددی یک ابزار قوی است که می‌توان از آن در فرآیند طراحی به‌ویژه برای تحلیل پارامتری و حساسیت استفاده کرد. این ابزار تصویر مناسب‌تری از مکانیسم حاکم بر مساله با در نظر گرفتن حداکثر پارامترهای تأثیرگذار ارائه می‌کند.

۵-۳-۸- تغییر سیستم نگهداری

ارزیابی نتایج مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها و بالتبع استفاده از آن‌ها در تغییر سیستم نگهداری تونل، از نقطه‌نظر ایمنی و اثربخشی هزینه، از اهمیت زیادی برخوردار است. هم‌زمان با تغییرات سیستم نگهداری، نتایج مشاهدات و اندازه‌گیری‌های موجود باید ارزیابی شوند به‌طوری‌که پس از تغییرات، سیستم نگهداری با شرایط واقعی سایت انطباق داشته باشد. همچنین متناسب با تغییرات سیستم نگهداری و در صورت لزوم، تغییر مقاطع حفاری و سایر متدهای کمکی ضروری است.

در مواردی که سیستم نگهداری اولیه تونل در نتیجه مشاهدات، اندازه‌گیری‌ها و بررسی‌های زمین‌شناسی در طول تونل‌زنی نامناسب تشخیص داده شود، سیستم نگهداری اولیه باید بدون معطلی تغییر کند. این تغییرات در دو حالت کلی اتفاق می‌افتد:

۵-۳-۸-۱- تغییر سیستم نگهداری اولیه در محل حفاری نشده

در به‌کارگیری روش طراحی استاندارد، سیستم نگهداری تعیین‌شده بر پایه مشاهدات زمین‌شناسی فقط یک تیپ و الگوی استاندارد است و لازم است بر اساس نتایج مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها در بازه حفاری‌شده، آن را به یک تیپ منطقی‌تر و مناسب‌تر با شرایط واقعی زمین تبدیل نمود. تغییر سیستم نگهداری می‌تواند هم شامل کاهش آن باشد و هم افزایش. میزان تغییرات سیستم نگهداری، وابسته به میزان تفاوت شرایط واقعی زمین نسبت به فرضیات اولیه است. بر این اساس و با بازنگری کلاس زمین، تغییر سیستم نگهداری می‌تواند از بازه تغییرات کوچک مانند تغییر مقادیر و مواد یک عضو از سیستم تا بازه تغییرات کل تیپ سیستم نگهداری را شامل شود.

۵-۳-۸-۲- تغییر سیستم نگهداری اولیه در محل حفاری شده

اگر بعد از حفاری، میزان جابجایی تونل بیشتر از مقدار پیش‌بینی‌شده در طراحی اولیه باشد و یا جابجایی همگرا نباشد، میزان همگرایی یا نشست زمین فراتر از رواداری‌های مجاز خواهد رفت، نیاز به تغییر سیستم نگهداری متناسب با شرایط جدید، محرز خواهد بود. این تغییرات می‌تواند شامل راکبولت‌های اضافی، شاتکریت اضافی یا بتن کف‌بند به‌منظور تقویت سیستم نگهداری موجود باشد (جدول ۵-۱۶).

در این موارد جهت جلوگیری از تغییر شکل بیش از حد سیستم نگهداری، ضروری است که بدون اتلاف وقت نسبت به بررسی شکل، مصالح و چیدمان سیستم نگهداری اضافه شده اقدام شده و تغییرات متناسب اعمال شود.

جدول ۵-۱۶- تغییرات معمول سیستم نگهداری در حین اجرا

موارد	تغییرات معمول
شاتکریت	تغییر ضخامت، مقاومت، نوع مصالح، الیاف تقویت کننده و ...
راکبوت	تغییر طول، تعداد، مقاومت، مواد تزریقی، نوع تزریق و ...
قاب فولادی/لتیس	رد یا پذیرش قاب فولادی/لتیس تغییر سایز، نوع، فاصله‌داری، مقاومت قاب فولادی/لتیس و ...
کفبند	تغییر ضخامت، شکل، مقاومت، نوع مصالح، زمان اجرای کفبند و ...
سایر	استفاده از روش‌های کمکی بررسی سازه لاینینگ و ...

۵-۴- طراحی لاینینگ

با توجه به اینکه تعمیر لاینینگ در حین بهره‌برداری از تونل بسیار دشوار است باید لاینینگ باتوجه به دوام طولانی مدت طراحی شود تا در حد امکان نیاز به تعمیرات نداشته باشد. از آنجایی که لاینینگ تونل یک سازه بتنی نازک قوسی شکل است که در فضای باریک بین قالب لاینینگ و سطح داخلی تونل ساخته می‌شود شرایط کاری برای بتن‌ریزی و متراکم کردن آن مشکل است، از این رو لاینینگ مستعد ترک خوردگی، جداشدگی، حفره‌های پشت لاینینگ، آسیب به عایق‌بندی، سطح ناهموار و غیره می‌باشد؛ بنابراین لاینینگ باید به نحوی طراحی شود که دچار چنین مشکلاتی نشود و مواردی مانند شرایط زمین و بارگذاری، اهمیت تأسیسات و سایر شرایط را در نظر بگیرد. باید در نظر داشت که لاینینگ برای اهداف زیر طراحی می‌شود:

۱- برای قابلیت سرویس‌دهی^۱

۲- برای کاهش نشت آب (مانند آب‌های زیرزمینی) و بهبود آب‌بندی

۳- برای بهبود کارایی بازرسی

۴- استفاده مؤثر از تونل‌های انتقال آب با کنترل بهتر ضریب زبری

۵- برای تأمین تأسیسات ضروری مانند سیم‌کشی سقفی، روشنایی و تهویه.

برای ویژگی‌های مقاومتی:

۱- برای بهبود ایمنی کل سازه برای عوامل غیرقطعی مانند ناهمگنی زمین و کیفیت غیریکنواخت نگهداری‌های تونل. سیستم نگهداری‌های تونل به کاهش جابه‌جایی کمک می‌کنند.

¹ Serviceability

- ۲- برای ایجاد نیروی مقاوم موردنیاز در تونل هایی که جابه جایی هنوز متوقف نشده است.
- ۳- برای نگهداری نیروهای خارجی پس از تکمیل تونل که می تواند توسط فشار آب یا بارهای اضافی^۱ ایجاد شوند.
- ۴- برای بهبود دوام سازه در برابر تغییرات بارهای خارجی، تضعیف سیستم نگهداری تونل یا زمین اطراف پس از بهره برداری از تونل.
- کفبندهای تونل در سیستم نگهداری تونل ادغام و ساختار حلقه ماندی را تشکیل می دهد که به پایداری زمین اطراف کمک می کند؛ بنابراین کفبند و لاینینگ برای پایداری طولانی مدت تونل باهم یکپارچه می شوند. کفبندهای تونل و لاینینگ برای شرایط زیر به طور مؤثر باهم ادغام می شوند:
- ۱- برای تونل ها در مناطق شهری، زمین ضعیف و زمین هایی که احتمالاً در طول زمان ظرفیت باربری خود را به دلیل فرسایش یا هوازگی از دست می دهند.
- ۲- برای تونل هایی که ممکن است شرایط بارگذاری در آینده تغییر کند.
- ۳- برای تونل ها در مناطق شکسته گسل که نیاز به مقاومت در برابر بار زلزله دارند.
- ۴- برای تونل ها در نواحی پرتال که در معرض بارهای نامتقارن و زلزله هستند.
- ۵- در تونل های راه آهن با احتمال زیاد ورود گل
- همچنین از آنجایی که تعمیر کفبندها در حین بهره برداری دشوار است باید سازگار با لاینینگ تونل طراحی شوند.

۵-۴-۱- فلسفه طراحی لاینینگ

دو فلسفه مختلف برای طراحی لاینینگ وجود دارد، اینکه آیا عملکرد مکانیکی روی لاینینگ اعمال می شود یا خیر. برای بیشتر تونل های کوهستانی، لاینینگ پس از اتمام کامل جابه جایی زمین به کمک سیستم نگهداری اولیه تونل نصب می شود؛ بنابراین یک رویکرد آن است که فرض می شود هیچ بار خارجی به لاینینگ وارد نمی شود و لاینینگ معمولاً بدون عملکرد مکانیکی در نظر گرفته می شود. اگر لاینینگ بر اساس ضخامت طراحی تعیین شده و با دقت مناسب نصب شود می توان برای دستیابی به عملکرد کلی به عنوان پوشش تونل از جمله قابلیت سرویس دهی و دوام طولانی مدت به آن اعتماد شود.

در تونل های کوهستانی موارد زیر شامل عملکرد مکانیکی در طراحی لاینینگ می شود:

- ۱- برای تغییرات شرایط تونل مانند خاک ریزی یا برش، بارهای اضافی وارد بر لاینینگ به دلیل تونل های موازی یا سازه های در مجاورت تونل
- ۲- برای لاینینگ در زمین های ضعیف یا سنگ های متورمی که در معرض جابه جایی های مداوم قرار دارد.
- ۳- برای لاینینگ تحت فشار هیدرولیک خارجی

¹ Extra loads

۴- برای لاینینگ در شرایط بد زمین که در آینده ممکن است در معرض فشار زمین سست یا فشارهای نامتقارن قرار گیرد.

۵- برای لاینیگی که نیاز است اثرات زلزله، روباره کم و وجود یک ناحیه شکستگی گسل در نظر گرفته شود. در جایی که لاینینگ برای انجام عملکردهای مکانیکی طراحی شده است، لازم است ظرفیت باربری آن از طریق استفاده از بتن مسلح یا بتن مسلح با الیاف فولادی و در صورت نیاز نصب کفبند افزایش یابد. برخی از روشهای تحلیل تعیین ضخامت، استحکام و مقدار آرماتور فولادی را ممکن می‌سازد. اگرچه برآورد دقیق بار وارده بر لاینینگ می‌تواند تحلیل مناسب لاینینگ به‌عنوان یک عضو مکانیکی در ارتباط با ایمنی، هدف تونل و شرایط اطراف را فراهم کند هیچ داده نظارتی قابل‌اعتمادی برای باری (فشار زمین) که روی لاینینگ تونل‌های کوهستانی اعمال می‌شود تاکنون جمع‌آوری نشده است که نشان از قابلیت اطمینان بسیار پایین داده‌های جاری مربوط به بار طراحی برای لاینینگ هست.

۵-۴-۲- طراحی ضخامت لاینینگ

طراح باید ضخامت طراحی را با در نظر گرفتن ضخامت موردنیاز عملکرد لاینینگ، روش ساخت و سایر عوامل تعیین کند.

در شرایط زمین ضعیف یا روباره کم ممکن است بار قابل‌توجهی به لاینینگ وارد شود. در چنین مواردی افزایش ضخامت باعث افزایش سطح مقطع حفاری و در نتیجه بیشتر شدن فشار زمین می‌شود. علاوه بر این با افزایش ضخامت بتن ساده^۱ با مقاومت کششی پایین، تنها می‌توان ترک‌های ناشی از خمش را تا حد محدودی مهار کرد؛ بنابراین انتخاب شکل مکانیکی مناسب برای لاینینگ و استفاده از بتن مسلح و یا افزایش میلگرد، بتن مسلح با الیاف فولادی یا بتن با مقاومت بالا برای بهبود صلبیت به نسبت افزایش ضخامت لاینینگ ارجحیت دارند. علاوه بر این، لاینینگ باید با در نظر گرفتن اثرات تونل‌های با سطح مقطع بزرگ، تونل‌های شهری و تونل‌های نزدیک به دیگر تونل‌ها طراحی شود.

۵-۴-۳- اختلاط و مقاومت بتن لاینینگ

طرح اختلاط بتن مورد استفاده برای لاینینگ باید مقاومت، دوام کافی و همچنین کار آیی لازم را داشته باشد. مهندس طراح علاوه بر موارد بالا باید محتوای سیمان در واحد، نسبت محتوای آب، اسلامپ و سایر عوامل را با در نظر گرفتن مصالح مورد استفاده و شرایط ساخت طراحی کند.

¹ Plain concrete

با توجه به اینکه لاینینگ با استفاده از پمپ بتن، بتن ریزی می شود اختلاط بتن باقابلیت پمپاژ^۱ برای کارایی عالی مورد نیاز است. از آنجایی که قابلیت پمپاژ توسط کارایی و قوام^۲ بتن تعیین می شود اختلاط بتن لاینینگ باید با در نظر گرفتن دبی تعیین شده از نسبت سیمان آب تعیین شده از مقاومت و با به حداقل رساندن گرمای هیدراسیون طراحی شود. همچنین شرایط ساخت مانند زمان انتقال بتن در طرح اختلاط برای لاینینگ ضروری است. در مواردی که عناصر مضرى مانند نمک و ... در آب چشمه و زمین وجود دارند که ممکن است بر مخلوط بتن تأثیر نامطلوب بگذارد اقدامات متقابل باید انجام شود.

۵-۴-۴- اقدامات متقابل در برابر ترک خوردگی در بتن لاینینگ

اگرچه پوشش بتنی مستعد ترک های ناشی از مصالح، شرایط ساخت و ساز است اما اقدامات متقابل برای از بین بردن عوامل ایجاد کننده ترک می تواند ترک خوردگی را کاهش دهد. از طرفی همه ترک ها برای بتن لاینینگ مضر نیستند. برخی از ترک ها به دلیل عرض و توزیع آن ها بر لاینینگ تأثیری ندارند.

ترک ها در بتن لاینینگ به طور قابل توجهی مقاومت و آب بند بودن را کاهش می دهند و به دلیل نشت آب، یخ زدگی و ذوب بر دوام، ایمنی و عملکرد اصلی لاینینگ تأثیر منفی می گذارند. همچنین برخی از بتن های احاطه شده توسط ترک های متعددی که در یک فضای سه بعدی باهم متقاطع شده اند ممکن است جدا شده و ریزش کنند؛ بنابراین لازم است با در نظر گرفتن عملکرد لاینینگ ترک های مضر شناسایی شوند.

جدای از ترک های لاینینگ که از تغییر شکل زیاد ناشی از بارهای زیاد ایجاد می شوند از نظر هندسی و شرایط مرزی لاینینگ می توان گفت که ترک ها به راحتی توسط تنش های کششی ناشی از تنش انقباضی^۳ کنترل شده توسط بتن لاینینگ ایجاد می شوند.

عوامل اصلی ایجاد تنش ناشی از انقباض در بتن لاینینگ به شرح زیر است:

۱- انقباض به دلیل کاهش دمای سخت شدن بتن

۲- انقباض به دلیل کاهش دمای تونل

۳- انقباض خشک شدن به دلیل رطوبت کم در تونل

۴- انقباض در طول سخت شدن

با این وجود همه انواع تنش انقباضی لزوماً مضر نیستند.

¹ Pumpability

² Consistency

³ Shrinkage stress

جداسازی شاتکریت و بتن لاینینگ مؤثرترین روش برای کاهش تنش بین شاتکریت و سطح بیرونی بتن لاینینگ است. روش قرار دادن ورقه‌های ایزوله^۱ یا ورقه‌های ضدآب^۲ رایج‌ترین روش‌ها می‌باشند. در برخی موارد روش جدیدی به‌عنوان استاندارد انتخاب می‌شود که می‌تواند ضخامت ثابتی از لاینینگ را فراهم کند، در حالیکه با تزریق مواد پرکننده بین شاتکریت و ورق ضدآب، سطح روی ورق ضدآب را صاف می‌کند. در مواردی که ترک‌های گسترده وجود دارد کیفیت بتن و کارایی مصالح باید بررسی شود. برای کنترل ترک‌های ناشی از انقباض بتن، استفاده از افزودنی‌های انبساطی^۳ کافی یا عوامل کاهنده انقباض به‌شدت توصیه می‌شود.

۵-۵- طراحی کفبند^۴

کفبندها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که تونل و لاینینگ را یکپارچه^۵ کنند. با توجه به اینکه تعمیر کفبندها پس از بهره‌برداری از تونل بسیار دشوار است لازم است به‌گونه‌ای طراحی شوند که با ادغام در سیستم نگهداری تونل، زمین اطراف را پایدار کند سپس با توجه به شرایط زمین و هدف استفاده، عملکرد لازم را به‌عنوان یک سازه دائمی داشته باشد.

۵-۵-۱- عملکرد کفبند

عملکرد کفبند به قابلیت سرویس‌دهی^۶ و مکانیکی^۷ طبقه‌بندی می‌شود.

برای قابلیت سرویس‌دهی:

- ۱- حفظ مقطع داخلی لازم به همراه لاینینگ (حفظ مقطع داخلی)
 - ۲- برای کاهش نشت آب (به‌عنوان مثال آب زیرزمینی) و بهبود آب‌بندی^۸ (جلوگیری از نشت آب)
 - ۳- برای نگهداری تاسیساتی مانند تاسیسات زهکشی در تونل (نگهداری تاسیسات)
 - ۴- برای اطمینان از صافی سطح جاده^۹ و رانندگی ایمن وسایل نقلیه در تونل‌های راه و راه‌آهن
 - ۵- برای ایجاد مسیر جریان آرام (آب) به همراه لاینینگ (حفظ نفوذپذیری آب^{۱۰})
- عملکرد مکانیکی به دو عملکرد کنترل جابه‌جایی در طول ساخت و بهبود پایداری طولانی‌مدت پس از بهره‌برداری از تونل تقسیم می‌شود.
- کنترل جابه‌جایی در طول ساخت:

¹ Isolation sheets

² Waterproof sheets

³ Expansive admixture

⁴ DESIGN OF INVERTS

⁵ uniting

⁶ Serviceability performance

⁷ mechanical performance

⁸ water tightness

⁹ the flatness of road surface

¹⁰ maintenance of water permeability

۱- برای جلوگیری از نشست کف به دلیل ظرفیت باربری پایین در زمین‌های ضعیف یا جابه‌جایی دیواره جانبی تونل به دلیل فشار پلاستیکی زمین^۱

۲- بهبود پایداری در برابر تغییر شکل سازه‌ای تونل با تشکیل اولیه یک ساختار حلقه مانند که با سیستم نگهداری تونل جهت کنترل همگرایی ترکیب می‌شود.

• پایداری بلندمدت پس از استفاده از تونل

۱- برای افزایش پایداری سازه‌ای با تشکیل یک سازه حلقه‌ای شکل^۲ که با سیستم نگهداری تونل و لاینینگ برای ایجاد ظرفیت باربری کافی در برابر بارهایی مانند فشار زمین و آب که ممکن است به صورت طولانی مدت عمل کنند ادغام می‌شود.

۲- بهبود دوام تونل‌ها در برابر تغییر شکل ناشی از بالا آمدن^۳ سطح زمین که احتمال دارد دچار فرسودگی^۴، تورم یا در اثر اعمال بارهای مکرر پس از ساخت دچار مشکل شود.

۵-۵-۲- شرایط تونل برای نصب کفبند

کفبندها می‌توانند در پرتال‌ها، زمین‌های ضعیف از جمله زمین‌های تحکیم نشده و مناطقی که پس از حفاری دچار آسیب می‌شوند، قرار گیرند.

برای تونل با شرایط توده سنگ ضعیف که مقاومت در مقایسه با بار وارده مورد انتظار کم است و در جبهه کار ممکن است تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ رخ دهد و از طرفی اگر کفبند در مراحل اولیه نصب نشود همگرایی می‌تواند به ۳۰ میلی‌متر برسد و حتی با فاصله گرفتن جبهه کار به اندازه 2D (D قطر تونل) متوقف نشود توصیه می‌شود نصب کفبند به عنوان یکی از راهکارهای کنترل همگرایی مورد بررسی قرار گیرد.

اگر تغییر شکل پس از بهره‌برداری از تونل رخ دهد پس از آن تلاش زیادی برای نصب کفبند لازم است؛ بنابراین برای زمینی که در معرض ضعیف شدن^۵ به دلیل آسیب احتمالی ناشی از جریان آب است و زمینی که مقاومت آن در برابر بارهای وارده کم یا ممکن است کاهش یابد نصب کفبند می‌تواند بررسی شود. از دیگر موارد کاربرد کفبند می‌توان به جلوگیری از ناهمواری کف تونل در صورت استفاده از تجهیزات سنگین برای حفاری و خاک‌برداری اشاره کرد. در تونل‌های شهری که نزدیک به دیگر تونل‌ها هستند و در معرض آسیب ناشی از بارهای لرزه‌ای به دلیل وجود ناحیه شکستگی گسل و تغییر شرایط بارگذاری به دلیل روباره کم و پروژه‌های ساخت سطح زمین هستند باید به کار گرفته شوند.

¹ Plastic earth pressure

² ring-shaped

³ heaving

⁴ deterioration

⁵ Deteriorate

۵-۵-۳ زمان بندی نصب کفبند

به منظور اطمینان از دوام طولانی مدت کفبند، اصولاً ترجیح داده می شود که پس از همگرایی مشابه لاینینگ، کفبند نصب شود. در شرایط حفاری در زمین ضعیف، کفبند ممکن است در لحظات اولیه پس از حفاری نصب شود تا با حفظ سطح مقطع موجب پایداری شود. اگر کفبند در لحظات اولیه پس از حفاری برای کنترل جابه جایی نصب شود بررسی مکانیکی ضروری خواهد بود.

۵-۵-۴ کف بند اولیه و موقت^۱

به منظور کنترل جابه جایی ناشی از حفاری، می توان شاتکریت یا ترکیب آن با نگهداری فولادی را در اولین لحظات پس از حفاری در قسمت کف جهت حفظ سطح مقطع قرار داد. در این مورد به این کفبند، کفبند اولیه گفته می شود و بتن ریزی پس از مرحله شاتکریت مذکور به عنوان کفبند اصلی در نظر گرفته می شود. همچنین، کفبند موقتی کفبندی است که به طور موقت جهت کنترل جابه جایی قرار می گیرد و در نقطه ای از حفاری برداشته می شود.

۵-۵-۵ شکل و ضخامت کفبند

شکل و ضخامت کفبند باید بر اساس شرایط زمین و سایر عوامل به درستی طراحی شود. کفبند در ترکیب با لاینینگ و سایر سیستم های نگهداری کل تونل را پایدار می کند. هنگامی که تنش های نامطلوب وارده بر کفبند در نتیجه بارهای فعال زیاد یا فشار نامتقارن زمین و غیره پیش بینی شود، باید را در نظر گرفت که لازم است علاوه بر نصب کفبند یا نصب کفبند اولیه، بتن مصلح یا بتن مصلح فولادی نیز مورد توجه قرار گیرد. شکل و ضخامت کفبند معمولاً بر اساس تجربه ساخت قبلی طراحی می شود. اگرچه در موارد سطح مقطع بزرگ، فشار زمین وارده بر تونل یا زمین تحکیم نشده با روباره کم ترجیح داده می شود که هر عامل به طور جداگانه ای تعیین شود.

ساختار تقاطع کفبند و لاینینگ باید به نحوی منحنی باشد تا تنش و انتقال آرام تنش را به نحوی که تقاطع مذکور بتواند بر فشار پلاستیک زمین غلبه کند فراهم کند. همچنین نصب اتصالات ساخت عمود بر دیواره لاینینگ^۲ ترجیح داده می شود. به ویژه زمانی که بارهای وارده بر کفبند و لاینینگ زیاد باشد ممکن است یک لنگر خمشی یا مقاومت برشی بزرگ در مجاورت تقاطع کفبند و لاینینگ ایجاد شود. بنابراین، شکل تقاطع کفبند و لاینینگ باید به دقت در نظر گرفته شود. علاوه بر این، به هنگام نصب کفبند، انتهای زیرین لاینینگ توسط کفبند گرفته می شود در نتیجه به دلیل خشک شدن انقباض^۳ احتمال ایجاد ترک در دیواره جانبی لاینینگ وجود دارد. به همین دلیل تراز کردن اتصالات ساخت^۴

¹ Primary Invert and Temporary Invert

² the construction joints perpendicular to the lining wall

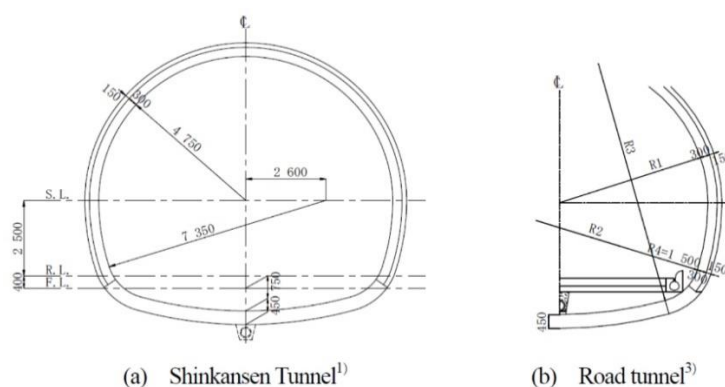
³ drying shrinkage

⁴ construction joints

لاینینگ و کفبند ترجیح داده می‌شود. همچنین در بعضی شرایط زمین، مچاله شوندگی دیواره جانبی تونل و نشست در کف ممکن است به دلیل حفاری بخش کفبند رخ دهد، در اینصورت باید کوتاه کردن طول حفاری و ... در نظر گرفته شود.

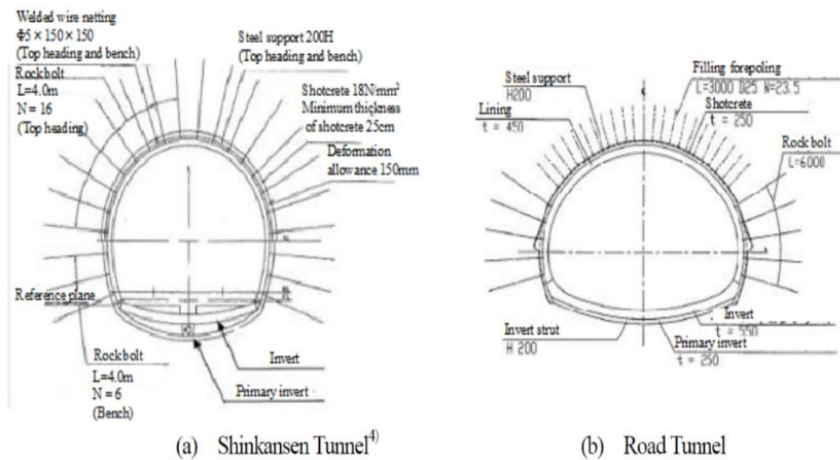
برای تونل‌های جاده‌ای، ضخامت کفبندها به‌عنوان بخشی از الگوی نگهداری استاندارد با توجه به وضعیت زمین پیشنهاد می‌شود. اگرچه، هنگامی که یک کفبند در ترکیب با لاینینگ نیاز به ظرفیت باربری در برابر فشار زمین یا فشار آب دارد، ضخامت طراحی باید بر اساس مقاومت، شکل و موارد مشابه، تحلیل عددی و ... تعیین شود.

شکل ۵- ۱۹ نمونه‌ای از ساختار کفبند را نشان می‌دهد. هنگامی که کفبند برای کنترل همگرایی و جابه‌جایی در حین حفاری استفاده می‌شود، شکل کفبند اولیه اساساً مطابق با کفبند است. در بسیاری از موارد ضخامت کفبند اولیه تقریباً مشابه ضخامت نگهداری نیمه پایینی^۱ است. با توجه به محل نصب، کفبند اولیه ممکن است در سطح مقطع کفبند نصب شود و ضخامت کفبند اولیه در ضخامت طراحی کفبند طراحی شده باشد. یا درحالتی دیگر، کفبند اولیه در خارج از سطح مقطع کفبند نصب شود و ضخامت آن در ضخامت طراحی کفبند لحاظ نشود. چون کفبند اولیه در زمان بهره‌برداری از تونل باقی می‌ماند باید محل نصب به‌دقت تعیین شود. شکل ۵- ۲۰ نمونه‌ای از ساختار کفبند اولیه را نشان می‌دهد. ضخامت کفبند موقت نیز با ضخامت نگهدارنده‌های نیمه پایین یا بالایی^۲ برابر است.



شکل ۵- ۱۹- مثالی از کف بند استاندارد

¹ lower half support² thickness of either upper or lower half supports



شکل ۵-۲۰- مثالی از نصب کفبند اصلی

۵-۵-۶- طرح اختلاط و مقاومت بتن کفبند

طرح اختلاط بتن کفبند باید برای دستیابی به مقاومت، کارایی و دوام مطلوب تعیین شود.

۵-۵-۷- نصب کفبند بلافاصله بعد از حفاری^۱

اگر برنامه‌ریزی شده است که کفبند در لحظات اولیه نصب شود تا تغییر شکل هنگام ساخت کنترل شود مشخصات و زمان نصب کفبند باید تعیین شود تا اثرات کفبند به‌طور کامل به‌عنوان نگهداری تونل و اطمینان از پایداری طولانی‌مدت به‌عنوان یک ساختار حلقه‌ای شکل که با لاینینگ و سیستم نگهداری یکپارچه شده است توسعه یابد.

هدف از نصب زودهنگام کفبند کنترل تغییر شکل زمین است. در مواردی که نگرانی در مورد تغییر شکل زیاد در زمین مجاله شونده، زمین تحکیم نشده و ناحیه شکستگی گسل وجود داشته باشد یا در مواقعی که کنترل نشست سطحی، برای جلوگیری از زمین‌لغزش یا به حداقل رساندن تأثیرات بر زمین مانند حفاری در مجاورت سازه‌های مهم ضروری باشد کفبند در لحظات اولیه بسته می‌شود و در این شرایط کفبند در فاصله حدودی 1D از نیمه بالایی جبهه کار نصب می‌شود (D قطر حفاری تونل).

در بسیار از موارد کفبند با استفاده از شاتکریت یا در ترکیب با نگه‌دارنده‌های فولادی در لحظات اولیه نصب می‌شود (جدول ۵-۱۷).

برای اطمینان از دوام طولانی‌مدت، کفبند و کفبند اولیه^۲ استفاده شود. اما در صورت نیاز فقط به کفبند، باید به زمان سخت شدن بتن^۳ و استحکام مصالح با سن کم^۴ و همچنین به دوام طولانی‌مدت و سلامت بعد از بهره‌برداری از تونل توجه شود.

^۱ Early Closure of Invert

^۲ Primary invert

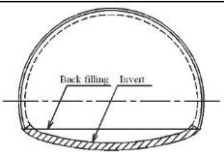
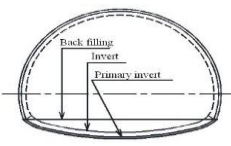
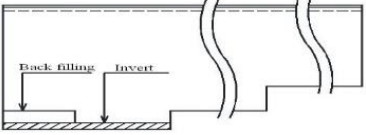
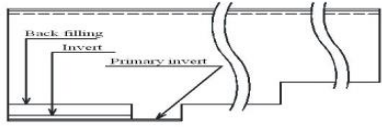
^۳ hardening time of concrete

^۴ strength of materials of young age

پس از نصب زودهنگام کفبند باید به موارد زیر توجه شود:

- ۱- هنگام بررسی فاصله بین کفبند و جبهه کار و زمان نصب به دلیل نزدیکی کفبند به جبهه کار باید به کنترل جابه‌جایی و پایداری جبهه کار توجه شود. جبهه کار در صورت لزوم باید با شاتکریت و بولت تقویت شود.
- ۲- تقاطع کفبند اولیه و نیمه پایین نگهداری‌ها می‌تواند از نظر ساختاری آسیب پذیر باشد، بنابراین باید احتیاط کرد.
- ۳- هنگامی که کفبند اولیه در مقطع طراحی کفبند قرار می‌گیرد به دوام طولانی مدت بتن کفبند از جمله کفبند اصلی توجه شود.
- ۴- هنگام پر کردن پس از نصب زودهنگام یا اگر ماشین‌آلات سنگین روی کفبند باشند باید احتیاط کرد در زمانی که مصالح هنوز به مقاومت خود نرسیده‌اند. اثرات کفبند به‌عنوان نگهداری از بین نرود.
- ۵- نصب زود هنگام کفبند برای کنترل جابه‌جایی بسیار مؤثر است اما در عوض بارهای بزرگ روی نگهداری‌ها اعمال می‌شود. بنابراین هنگام طراحی لازم است که سالم بودن نیمه بالایی و پایین نگهداری‌ها و سالم بودن کفبند اولیه به‌عنوان نگهدارنده با استفاده از بحث‌های تحلیلی و غیره بررسی شود. زمانی که کفبند اولیه فقط با استفاده از شاتکریت نصب می‌شود باید توجه ویژه‌ای شود.

جدول ۵-۱۷- کفبند اولیه و کفبند

طبقه‌بندی	کفبند	کفبند اولیه و کفبند
موقعیت ساخت		
		
اجزا	بتن ریخته شده در محل ^۱	کفبند اولیه: شاتکریت یا شاتکریت با استفاده از نگهداری‌های فولادی کفبند: بتن ریخته شده در محل
خلاصه	ساخته شده در کف باهدف یکپارچه‌سازی لاینینگ	کفبند اولیه معمولاً برای کاهش جابه‌جایی و کفبند در مرحله‌ای که جابه‌جایی به‌صورت همگرایی باشد نصب می‌شوند.

۵-۶- طراحی سیستم‌های عایق‌بندی و زهکش

۵-۶-۱- مبانی

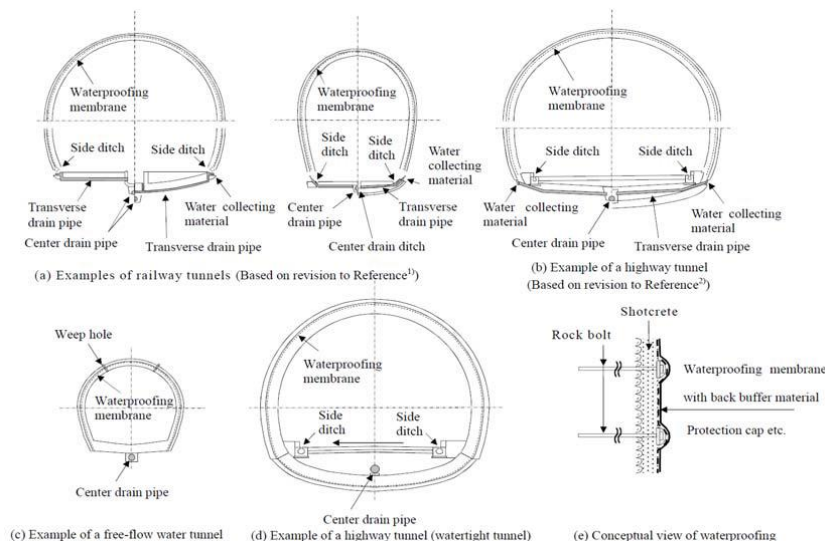
سیستم‌های عایق‌بندی و زهکشی برای حفظ عملکرد تونل و جلوگیری از آسیب دیدن لاینینگ و سایر تاسیسات طراحی می‌شوند.

¹ Cast-in-place concrete

نشت آب در تونل‌ها نه تنها عملکرد و دوام لاینینگ و تاسیسات داخل تونل را کاهش می‌دهد بلکه به دلیل یخ‌زدگی سطح جاده تأثیر نامطلوبی بر عبور از تونل‌ها می‌گذارد؛ بنابراین باید سیستم‌های عایق‌بندی و زهکشی مناسب طراحی شوند.

اقدامات کنترلی برای چنین نشت آبی در تونل (۱) عایق‌بندی با استفاده از ممبرهای ضد آب پس از انجام اقدامات مناسب در پشت لاینینگ برای جلوگیری از نشت آب در داخل تونل، (۲) سیستم‌های زهکشی مانند زهکشی پشت دیوار و زهکشی‌های جانبی برای تخلیه آب‌های ورودی (شکل ۵-۲۱).

در حین حفاری تونل‌های کوهستانی برای جلوگیری از ایجاد فشار بسیار بالای آب زیرزمینی و نشت آب از لاینینگ، زهکش می‌شوند. در مواقعی که خطرات زیست‌محیطی چه در منطقه کوهستانی و چه در ناحیه شهری بر مناطق اطراف تأثیر داشته باشد باید برای طراحی و ساخت تونل‌های به اصطلاح آب‌بند^۱ که باعث جمع شدن آب‌های زیرزمینی پس از ساخت می‌شود، برنامه‌ریزی کرد؛ بنابراین باید سیستم‌های عایق‌بندی و زهکشی به‌طور جداگانه برای تونل‌های معمولی و آب‌بند طراحی شوند.



شکل ۵-۲۱- نمونه‌هایی از عایق‌بندی و زهکشی

۵-۶-۲- عایق‌بندی

سیستم عایق‌بندی مناسب بر اساس شرایط زمین و کاربری تونل طراحی می‌شود چراکه یخ‌زدگی سطح جاده و یخ‌زدن آب در زمستان تردد در جاده را با مشکل مواجه می‌کند. در بسیاری از موارد نشتی، دوام لاینینگ را کاهش داده و بر تاسیسات تونل اثر نامطلوبی می‌گذارد. از طرفی منطقه حفر تونل باید با دقت تعیین شود چراکه ناحیه بدون جریان ظاهری آب پس از اتمام لاینینگ ممکن است به دلیل تغییر در وضعیت آب زیرزمینی دچار نشتی شود.

¹ watertight tunnels

سه روش رایج عایق‌بندی در تونل‌های کوهستانی عبارت‌اند از استفاده از ممبرین عایق‌بندی^۱، پاشش مواد عایق^۲ و پوشش با استفاده از نوارهای عایق می‌باشد. در حال حاضر، ممبرین عایق‌بندی بیشتر از هر روش دیگری استفاده می‌شوند زیرا می‌توانند یک‌لایه ضد آب مطمئن را ایجاد کند. پاشش^۳ مواد عایق و پوشش^۴ نوارهای عایق می‌توانند به راحتی سطح موردنظر را به طور رضایت‌بخشی عایق‌بندی کند. با این وجود ایجاد یک‌لایه عایق‌بندی با ضخامت ثابت با این دو روش دشوار است.

عوامل زیادی بر عایق‌بندی و طراحی اجزای آن تأثیرگذار می‌باشند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تراز تونل نسبت به سطح ایستابی، وضعیت گسل‌ها و ناپیوستگی‌ها در مسیر تونل، وضعیت توده سنگ و نفوذپذیری آن، میزان بارش در منطقه، ارتفاع روباره تونل، حساسیت پروژه و ... اشاره کرد. از طرفی باید به نواحی پرتال تونل که معمولاً روباره پایین و اثرپذیری بالایی از شرایط جوی دارند توجه ویژه‌ای شود.

مواد استفاده‌شده برای سیستم عایق‌بندی باید دارای استحکام کافی در برابر ضربه هنگام نصب سیستم عایق‌بندی، انجام لاینینگ، فشار بتن تازه و آب باشد. همچنین باید ساختار و کیفیت مناسبی داشته باشند تا در برابر اجزای بتن و جریان آب دوام داشته باشند. به‌ویژه در تونل‌های آب‌بند^۵ فشار زیاد آب که ممکن است بر سیستم عایق‌بندی تأثیر داشته باشد باید در مورد نوع، جنس، مشخصات عایق و محل حفر تونل مطالعه دقیقی صورت بگیرد. از آنجاکه تشکیل یک‌لایه عایق‌بندی پیوسته موردنیاز است اتصالات ممبرین عایق‌بندی^۶ به‌طور خاص نیز باید از استحکام و ضدآب بودن تعیین‌شده برخوردار باشند. همچنین مواد مورداستفاده باید در هنگام آتش‌سوزی بسیار ایمن و از نظر سهولت ساخت و کارایی اقتصادی توجیه‌پذیر باشد. از دیگر موارد مهم در کارایی سیستم عایق‌بندی، کیفیت و دقت اجرا می‌باشد که روش‌های مختلفی جهت بررسی آن وجود دارد. از مهمترین موارد می‌توان به تست فشار هوا برای ژئوممبرین نصب شده در تونل اشاره کرد. این روش در جهت شناسایی نقاط نشت آب از ژئوممبرین بسیار کمک کننده است و در پروژه‌های با حساسیت بالا نسبت به نشت آب انجام آن ضروری می‌باشد (شکل ۵- ۲۲).

¹ waterproofing membrane

² Spraying waterproofing

³ Spraying

⁴ coating

⁵ watertight tunnels

⁶ waterproofing membranes



شکل ۵-۲۲- تست فشار هوا برای عایق بندی تونل

۵-۶-۳- زهکشی

سیستم زهکشی مناسب که بتواند آب را به آرامی انتقال و تخلیه کند باید طراحی شود. در طراحی سیستم‌های زهکشی، باید موقعیت نصب، شکل سازه، مقطع و سایر جنبه‌ها با توجه به کاربری، محل، میزان آب ورودی، شیب‌های طولی و عرضی تونل، نیاز به کفبند و عوامل دیگر تعیین شود. به عنوان یک قاعده، سیستم‌های زهکشی باید دارای شیب یکسانی با بستر راه باشند و در صورت امکان باید ساختاری داشته باشند که بتواند جریان آبی را که در کف و بستر جاده جمع می‌شود را جذب و تخلیه کند.

لوله‌های پلی‌اتیلن با چگالی بالا و لوله‌های وینیل کلرید^۱ به عنوان مواد برای لوله‌های تخلیه مرکزی و عرضی استفاده می‌شوند. مواد پرکننده هنگامی که از لوله‌های سوراخ‌دار استفاده می‌شود باید با اندازه مناسب انتخاب شوند تا از انسداد لوله تخلیه در آینده جلوگیری شود.

جریان آبی که در پشت لاینینگ جمع می‌شود، در پایین‌ترین نقطه مقطع تونل جریان می‌یابد. هنگامی که محل سیستم زهکشی نامناسب باشد آب در کف تونل جمع می‌شود. این روند و در نتیجه افزایش فشار آب درزه‌ها و سایر اقدامات ناشی از بارهای مکرر وسایل نقلیه باعث آسیب به بستر جاده می‌شوند. از آنجایی که معمولاً پایین‌ترین نقطه در مقطع یک تونل در مرکز قرار دارد در بسیاری از موارد لوله زهکشی و یا سایر اقدامات در مرکز تونل نصب می‌شود. برای زهکشی، از تشک‌های فیلتر^۲ یا لوله‌های مشبک^۳ در پایین دیواره جانبی بین شاتکریت و لاینینگ یا یک لوله سوراخ‌دار در زمین استفاده می‌شود. لوله‌های زهکش عرضی، گودال‌های^۴ عرضی یا سایر اقدامات در فواصل مناسب بسته به جریان آب برای انتقال آب به لوله زهکشی مرکزی، گودال زهکشی مرکزی یا جانبی نصب می‌شوند.

¹ vinyl chloride

² filter mats

³ mesh tubes

⁴ ditches

هنگامی که کفبند وجود داشته باشد، در بسیاری از موارد موقعیت نصب لوله زهکشی مرکزی برای یک تونل بزرگراه در داخل مقطع تونل (سطح بالایی کفبند) و برای یک تونل راه‌آهن خارج از مقطع تونل (سطح پایینی کفبند) خواهد بود.

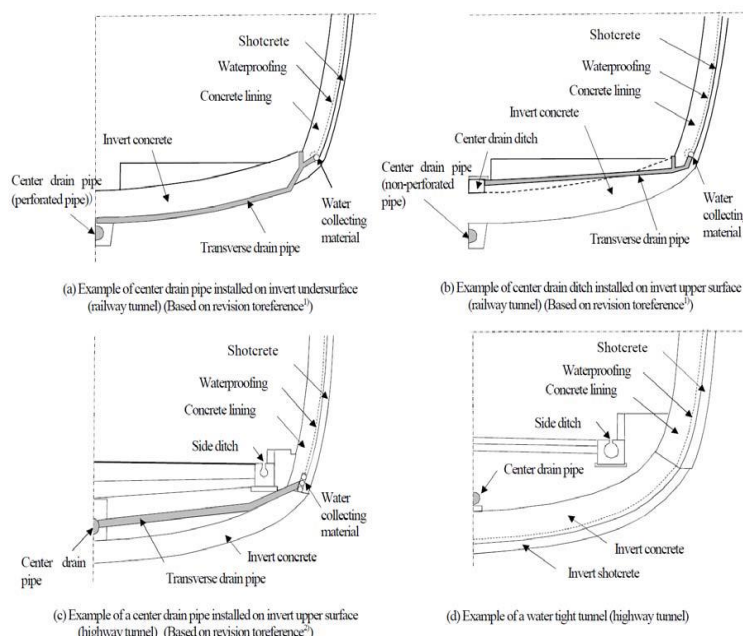
در موارد زیر، مطلوب است که یک لوله زهکشی در سطح بالایی کفبند نصب شود:

۱- زمانی که ذرات ریز با جریان آب در زمین تحکیم نشده به سمت لوله زهکش جریان می‌یابد و احتمال ایجاد حفره در سطح زیرین کفبند وجود دارد.

۲- در مواردی که نصب لوله زهکش (لوله سوراخ‌دار) در سطح زیرین کفبند خطر ایجاد اختلال در زمین متورم^۱ را خواهد داشت.

همچنین هنگامی که یک لوله زهکش بر روی سطح زیرین کفبند نصب می‌شود، ممکن است موادی برای جلوگیری از جاری شدن ذرات ریز قرار داده شود یا ممکن است از لوله‌های بدون حفره با لاینینگ برای جلوگیری از تغییر شکل لوله زهکش در زمین‌های مچاله شونده استفاده شود (شکل ۵-۲۳).

هنگامی که ارتفاع یک کانال بسته به وجود یا عدم وجود کفبند تغییر می‌کند، یک جعبه اتصال^۲ باید در محل تغییر ساختار برای امکان زهکشی آرام نصب شود. برای تونل‌های راه‌آهن، در برخی موارد جعبه‌های بازرسی^۳ در فواصل مناسب برای اهدافی مانند بازرسی و تمیز کردن لوله زهکش پس از استفاده نصب می‌شود.



شکل ۵-۲۳- نمونه‌هایی از سیستم زهکشی

¹ risk of disturbing the swelling ground

² connecting box

³ Check boxes

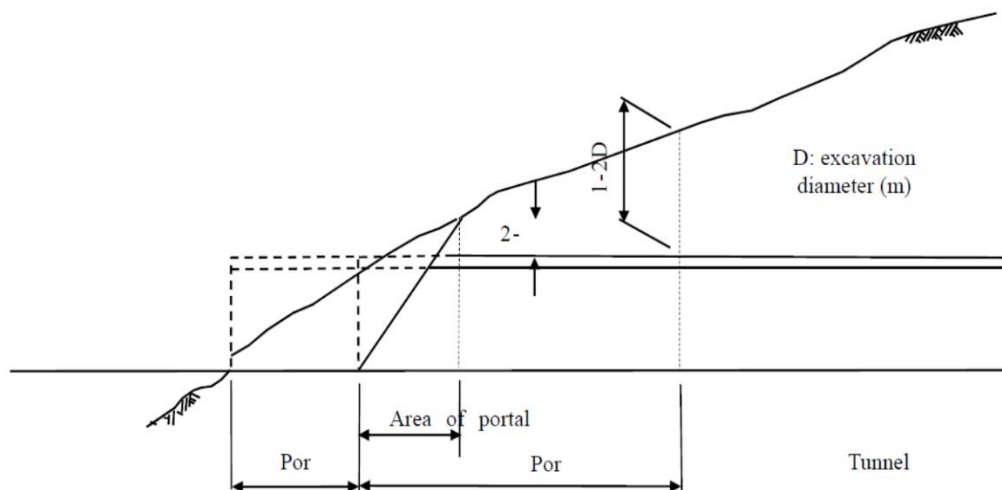
۷-۵- طراحی پرتال‌ها و زون‌های پرتالی

۷-۵-۱- مبانی

پرتال‌ها و زون‌های پرتالی باید با در نظر گرفتن عواملی مانند شرایط زمین، اندازه مقطع، شرایط محل، تأثیر بر محیط اطراف، ظاهر و روش ساخت طراحی شوند. زون پرتال به‌طور کلی به‌عنوان منطقه‌ای تعریف می‌شود که در آن ارتفاع روباره ۱ تا ۲ برابر قطر حفاری است و همان‌طور که در شکل ۵-۲۴ نشان داده شده است در آن ایجاد قوس تونل دشوار است.

زون‌های پرتالی، نواحی نزدیک به ورودی و خروجی تونل هستند که معمولاً روباره کمی دارند و تشکیل قوس تونل مشکل می‌باشد. ناحیه پرتال نزدیک به سطح شیب قرار دارد و می‌تواند شامل خاک سطحی رسوبات یا زمین هوازده و غیره باشد.

فرسایش، شکست و رسوب‌گذاری اغلب یک توپوگرافی پیچیده ایجاد می‌کند؛ بنابراین حفر تونل یا ساخت پرتال ممکن است باعث زمین‌لغزش و شکست شیب^۱ شود. بنابراین به هنگام طراحی پرتال‌ها مهندس طراحی باید روش ساخت، شکل پرتال، اندازه مقطع، توپوگرافی، زمین‌شناسی، آب‌های زیرزمینی، آب‌وهوای اطراف پرتال و شرایط محدوده کننده اجتماعی از جمله وجود یا عدم وجود خانه‌ها و سازه‌ها را در نظر بگیرد. طراح همچنین باید عواملی مانند پایداری شیب، احتمال وقوع بلایای طبیعی، هماهنگی با منظره، چشم‌انداز و محیط اطراف را مورد توجه قرار دهد. در جدول ۵-۱۸ مشکلات محتمل زون‌های پرتالی و راه‌حل‌های آن ارائه شده است.



شکل ۵-۲۴- ناحیه یک زون پرتالی استاندارد

¹ slope failure

جدول ۵- ۱۸- مشکلات محتمل زون پرتالی و راه حل ها

مشکلات	شکست شیب	فشار نامتقارن	ظرفیت باربری ناکافی	شکست پرتال	نشست سطحی زمین	ریزش سنگ، بهمن و ...
شیب پایدار (مصنوعی)	✓					✓
شیب پایدار (طبیعی)	✓					✓
دیوار حائل	✓	✓	✓			
خاکبرداری و خاکریزی	✓	✓				✓
بولت تقویتی عمودی	✓	✓		✓	✓	
انکراژ	✓			✓		✓
زهکشی	✓			✓		
تزریق شیمیایی	✓		✓	✓	✓	
پیش تحکیم				✓	✓	
تقویت جبهه خاکبرداری شده				✓	✓	
تقویت کف			✓	✓	✓	

۵-۷-۲- گالری (تونل پرتال ها)

- ۱- گالری تونل که از زون پرتالی محافظت می کند باید با در نظر گرفتن شرایط زمین، شرایط آب و هوایی، اندازه و عملکرد تونل و هماهنگی با محیط اطراف بر اساس کاربری تونل طراحی شود.
- ۲- محل و شکل پرتال (گالری) باید با توجه به در نظر گرفتن رابطه عواملی مانند توپوگرافی و زمین شناسی پشت پرتال، ظرفیت باربری زمین، پایداری شیب، سازه های مجاور، روش ساخت و شکل مقاطع باز^۱ انتخاب شود.
- ۳- هنگام طراحی گالری پرتال، اندازه، شکل و آرایش میلگردهای تقویت کننده باید پس از مطالعه بارهای عمل کننده متناسب با نوع پرتال تعیین شود.

گالری پرتال از زون پرتالی (ناحیه پرتال^۲) در برابر لغزش زمین، ریزش سنگ و بهمن تا حد زیادی محافظت می کند و به طراحی مکانیکی پایدار نیاز دارد. ظاهر خارجی و شکل گالری پرتال باید با توجه به کاربری تونل و به منظور حفظ

¹ form of open sections

² portal zone

سازگاری با محیط زیست و چشم انداز تعیین شود. هنگام تعیین محل و نوع پرتال، شرایط زیر باید به طور جامع مطالعه شود.

- شرایط توپوگرافی و زمین شناسی (ظرفیت باربری قسمت پایینی پرتال، پایداری شیب، وجود فشار نامتقارن زمین، احتمال لغزش یا ریزش سنگ، موقعیت نسبت به باتلاق ها و دره ها)
- شرایط آب و هوایی (برف، بهمن و قرنیزهای برفی)^۱
- موقعیت پرتال در حین ساخت
- شرایط محیط زیست (شرایط کاربری اراضی، میزان تغییرات محیط اطراف و چشم انداز منطقه اطراف)
- هماهنگی با طرح های اطراف (اتصال با بخش های باز مانند پل ها، ارتباط با جاده ها، کانال ها، مکان یابی تسهیلات مدیریت تعمیر و نگهداری برنامه ریزی شده در نزدیکی پرتال)
- بازدهی اقتصادی
- سایر (جهت تابش نور خورشید و غیره)

به طور ویژه، هنگام انتخاب محل پرتال باید مراقب بود که زمین بیش از حد لازم قطع نشود تا از پایداری شیب و حفظ محیط زیست اطمینان حاصل شود.

شکل های پرتال به دو نوع دیواری^۲ یا بیرون زده^۳ طبقه بندی می شوند که مشخصات انواع عمومی پرتال ها در جدول ۵- ۱۹ نشان داده شده است.

پرتال باید به نحوی طراحی شود که پس از تکمیل در برابر بارهای مرده مانند بار خاک پس ریز یا بار برف، بار فشرده سازی در حین پر کردن، بار چرخ ماشین زمانی که جاده از بالای پرتال عبور می کند و یا اثرات زلزله ایمن باشد لازم است این بارها با توجه به نوع پرتال به درستی ترکیب شوند.

در میان پرتال های دیواری^۴، پرتال های نوع بال^۵ معمولاً به صورت دال کنسولی^۶ طراحی می شوند که به طور صلب به بدنه اصلی تونل متصل می شوند. هنگام طراحی دیوار به عنوان دیوار حائل برای نگهداری فشار زمین پشت پرتال، تنش بال^۷ حاصل را می توان با فرض اینکه بدنه اصلی تونل یک انتهای ثابت است و فشار زمین در حالت سکون یا فشار زمین فعال کلمب^۸ است را با در نظر گرفتن تأثیر خاک پرکننده محاسبه کرد. بارهای دیگر که اغلب مورد توجه قرار می گیرند

¹ snow cornices

² wall

³ Protruding

⁴ wall portals

⁵ wing portals

⁶ cantilever slab

⁷ wing stress

⁸ Coulomb's active earth pressure

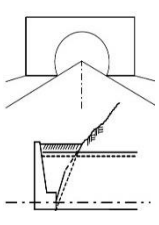
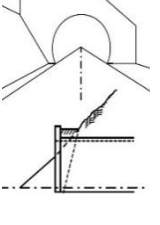
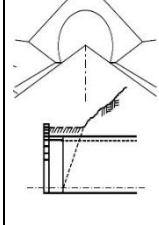
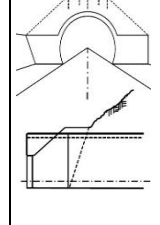
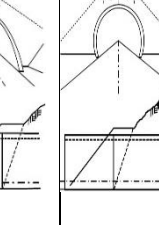
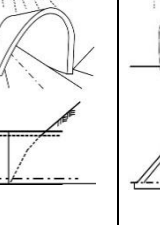
شامل بار تراکم و فشرده‌سازی و بارندگی برف است. ضخامت دیوار باید حداقل ضخامتی باشد که می‌توان با استفاده از آرایش میلگردهای تقویت‌کننده در برابر بار فعال^۱ ساخت که در بسیاری از موارد معمولاً ضخامتی حدود ۵۰ تا ۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که وقتی سطح دیوار بزرگ باشد فشار پرکننده افزایش می‌یابد، گاهی اوقات از مواد پرکننده سبک برای بخشی از خاک پرکننده برای کنترل ضخامت استفاده می‌شود. روش دیگر این است که قسمت پشتی دیوار با استفاده پرکننده‌های تقویت‌شده مستقل شود.

برای طراحی یک پرتال از نوع بیرون زده، نیروی مقطع^۲ و ظرفیت باربری زمین باید با در نظر گرفتن عواملی مانند وزن مرده خود پرتال، اضافه‌بار ناشی از پر شدن، بار افقی، بار چرخ و برف محاسبه شود. هنگامی که بخشی از لاینینگ بیرون باشد برای مثال اثرات ناشی از فشار زمین، نیروی اینرسی در هنگام زلزله، تغییرات دما و انقباض خشک شدن بتن باید در نظر گرفته شود. به‌طور معمول، نیروی مقطع با استفاده از تحلیل تغییر شکل که فنر الاستیک را برای ترکیبی از بزرگ‌ترین بارها در نظر می‌گیرد، محاسبه می‌شود.

¹ acting load

² Section force

جدول ۵- ۱۹- نوع و ویژگی‌های پرتال‌های تونل

ردیف	دیوار ^۱	بیرون زده ^۲
	گرانشی-نیمه گرانشی^۳ نوع بال^۴ نوع بال قوسی^۵	نوع نیمه بیرون زده^۶ نوع جان پناه^۷ نوع بیرون زده^۸ نوع بامبو نصف شده^۹ نوع دهانه زنگوله^{۱۰} نوع بامبو نصف شده معکوس^{۱۱} نوع دهانه زنگوله معکوس^{۱۲}
	  	  
بررسی اجمالی	دیوار حائل^{۱۳} از نوع گرانشی حدود ۱۰ متر جلوتر از موقعیت پرتال قرار گرفته است. اخیراً با نوع بال جایگزین شده و به ندرت استفاده می‌شود. با برش زمین به عنوان دیوار حائل زمین عمل می‌کند. از آنجاکه می‌توان طول تونل را کوتاه کرد مقرون به صرفه است. برای اکثر تونل‌های راه‌آهن کاربردی است.	فرمی که عمدتاً برای بهبود چشم‌انداز با استفاده تونل باز و ساخت پرتال استفاده می‌شود تا قسمت داخلی که با تونل ادغام شده است بیرون زده باشد. بخش قوس به عنوان یک نوع بیرون زده ایجاد شده و یک دیوار حائل زمین برای جلوگیری از ریزش اضافه شده است. یک ساختار معقول به عنوان یک پرتال این نوع بخش بتن در معرض را در پرتال بیرون زده حذف می‌کند و یک پرتال دهانه زنگوله با دهانه ترومپت مانند ایجاد می‌کند. پرتال را می‌توان بزرگ‌تر نشان داد زیرا برخلاف نوع بامبوی نصف شده یا دهانه زنگوله، این نوع باعث افزایش در معرض بودن بتن در بخش فوقانی می‌شود.

1 Wall type

2 Protruding type

3 Gravity/Semi-gravity type

4 Wing type

5 Arch wing type

6 Half protruding type

7 Parapet type

8 Protruding type

9 Split bamboo type

10 Bell mouth type

11 Inverted Split bamboo type

12 Inverted bell mouth type

13 Retaining wall

[illegible]¹ Oblique² Ridge-like³ Counterweight fill

نکات مورد توجه به هنگام طراحی و ساخت	بسته به شرایط زمین شناسی ممکن است نیاز به شمع یا یک پایه جایگزین در مقیاس بزرگ داشته باشد.	ادغام (یکپارچه سازی) پرتال در تونل مورد نیاز است.	- بسته به توپوگرافی ممکن است نیاز به باز کردن تونل باشد (به ویژه در بخش های قوسی) - مقدار مشخصی از پر کردن برای حفاظت از شیب مورد نیاز است.	- تونل باز چند متری در تونل اصلی مورد نیاز است و برای جلوگیری از ریزش به دیواره های حائل نیاز است.	طول تونل گسترش خواهد یافت. - پر کردن محافظ معمولاً مورد نیاز است.	- قالب بندی و آرایش میلگردهای تقویت کننده نیازمند تلاش و هزینه زیادی است. - پر کردن محافظ معمولاً مورد نیاز است.	- مطالعه کافی ظرفیت باربری فونداسیون به دلیل ارتباط با مرکز ثقل مورد نیاز است. - قالب بندی و آرایش میلگردهای تقویت کننده نیازمند تلاش و هزینه زیادی است.
نکات	- از آنجایی که دیوار مساحت زیادی دارد، روشنائی باید کاهش یابد (مثلاً با بریدگی سطح دیوار) - از آنجایی که پرتال بزرگ به نظر می رسد ممکن است باعث شود رانندگان دچار استرس شوند.	- از آنجایی که دیوار مساحت زیادی دارد، روشنائی باید کاهش یابد (مثلاً با بریدگی سطح دیوار) - از آنجایی که پرتال بزرگ به نظر می رسد ممکن است باعث شود رانندگان دچار استرس شوند.	- اعمال وزن و فشار را می توان با منحنی بخش قوسی کاهش داد. - باید سازگاری با ویژگی های توپوگرافی اطراف را در نظر گرفت.	- اثر وزن و فشار به دلیل مساحت کم دیوار نسبتاً پایین است. - سازگار با توپوگرافی اطراف پرتال	اثر وزن و فشار به دلیل کوچکی بودن سطح دیوار کم است - سازگار با توپوگرافی اطراف تونل	- نوع دهانه زنگوله با ورودی پهن برای ورود آسان است. - پرتال را می توان با محوطه سازی با ویژگی های توپوگرافی اطراف هماهنگ کرد.	- تأثیر کمی بر وسایل نقلیه عبوری دارد - سازگاری زیاد با توپوگرافی اطراف پرتال

۵-۷-۳- زون پرتالی

۱- تأثیر بر شیب پرتال، هماهنگی با چشم انداز اطراف، روش ساخت و تغییرات آتی در کاربری زمین باید در هنگام طراحی زون های پرتالی در نظر گرفته شود.

۲- طراحی نگهداری و لاینینگ در زون های پرتالی باید هرگونه شرایط زمینی خاص را در این ناحیه در نظر بگیرد.

۳- اقدامات اصلاحی مناسب برای مشکلات مورد انتظار در حین حفر تونل باید انتخاب و طراحی شوند.

نکات:

¹ Protective fill

- ۱- یک زون پرتالی تونل به یک بخش برای ساخت پرتال که در آن شیب قبل از شروع حفاری تونل قطع می شود و بخشی دیگر برای بخش انتقالی تونل^۱ تقسیم می شود.
- از موارد بسیار مهم در مناطق پرتالی، شروع حفاری تونل می باشد که در بسیاری از موارد باتوجه به آسیب پذیری این ناحیه ریزش های جزئی و بزرگ اتفاق افتاده است. به هنگام شروع حفاری تونل در نواحی پرتال باید تلاش شود از برهم زدن وضعیت تنش ها و دست خوردگی زیاد زمین جلوگیری شود.
- در انتخاب محل یک پرتال باید پایداری شیروانی، ظرفیت باربری زمین، رابطه بین محور تونل و شیب، برش و پر کردن برای ساخت تونل^۲، روش های حفاری پرتال و تونل و سازگاری با چشم انداز اطراف در نظر گرفته شود. هنگامی که شیب پرتال ناپایدار است، قرار دادن پرتال کمی روبه جلو در ترکیب با پر کردن وزنه تعادلی^۳ اغلب شرایط مطلوبی را ایجاد می کند. برش عمیق یک شیب برای کوتاه کردن طول تونل ممکن است باعث لغزش یا شکست شیب شود و باید از آن اجتناب شود.
- ۲- به دلیل وجود شیب گسترده^۴ زمین تحکیم نشده و روباره کم در زون های پرتالی، تشکیل قوس تونل دشوار است. در نتیجه بار روباره بدون وجود قوس تونل ممکن است به طور کامل بر روی تونل وارد شود و در چنین شرایطی طراحی سیستم نگهداری بادوام که قادر به مقاومت در برابر بار اعمالی باشد نیاز است.
- لاینینگ و کفبند در صورت به کارگیری در نواحی پرتال باید با میلگردهای تقویت کننده و غیره تقویت شوند. با این وجود زمانی که زمین بسیار ضعیف است باید بارها محاسبه و مشخصات بر اساس محاسبات سازه ای تعیین شود. علاوه بر این، ساختار لاینینگ اطراف زون پرتال ممکن است باتوجه به شرایط بارگذاری، روش ساخت بر اساس ارتفاع روباره و با توجه به شرایط توپوگرافی مانند شیب ملایم سطح زمین به مقاطع مختلفی تقسیم بندی شود. همچنین از آنجایی که یک زلزله به راحتی می تواند اثر نامطلوبی بر پرتال داشته باشد باید تأثیر آن به ویژه در زمین های ضعیف بررسی شود.
- آسیب دیدن^۵ مصالح لاینینگ در نتیجه یخ زدگی و ذوب شدن یخ ناشی از اثرات هوای بیرون در ناحیه پرتال باعث ایجاد مشکلاتی می شود که در صورت لزوم باید از عایق بندی^۶ و زهکشی برای مدیریت نگهداری استفاده شود. در مناطق سرد، یخ زدن و ذوب شدن آب پشت لاینینگ ممکن است تا حد زیادی بر بدنه لاینینگ تأثیر بگذارد. شکل ۵- ۲۵ موقعیت نصب مواد آدیاباتیک را نشان می دهد.

¹ transition section for the tunnel

² cutting and filling for portal construction

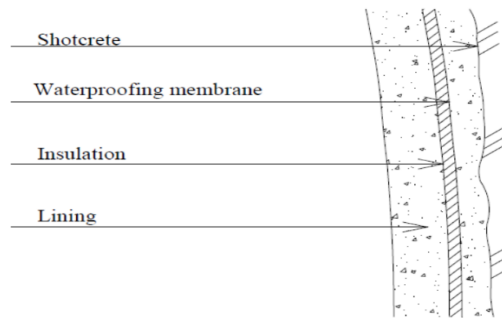
³ counter-weight fill

⁴ extensive talus

⁵ deterioration

⁶ waterproofing

۳- مشکلات مورد انتظار در حین ساخت تونل‌ها از جمله زمین‌لغزش، ظرفیت باربری پایین زمین، فشار نامتقارن، نشست سطح زمین و آسیب‌های وارده بر محیط‌زیست باید از نظر ایمنی، سهولت ساخت، کارایی و صرفه اقتصادی بررسی شوند و در صورت نیاز اقدامات اصلاحی مناسب طراحی شود.



شکل ۵- ۲۵- موقعیت عایق

۸-۵- طراحی سیستم روشنایی و تهویه

تهویه و روشنایی در تونل‌ها به‌عنوان دو مبحث مهم در تأمین ایمنی در تونل‌ها مطرح هستند. در هنگام ساخت تونل‌ها به دلیل اینکه گردوغبار، گازهای ناشی از انفجار مواد منفجره و همچنین دود منتشرشده از آگروز ماشین‌آلات سنگین به نفرات داخل تونل آزار می‌رساند و سلامتی آن‌ها را به خطر می‌اندازد، استفاده از سیستم تهویه مناسب از ضروریات ادامه عملیات تونل‌سازی خواهد بود.

۸-۵-۱- طراحی سیستم تهویه

هوای کافی در محل کار باعث سلامتی، قدرت، توانایی و نهایتاً سرعت در پیشرفت عملیات می‌شود. اگر مقدار اکسیژن از ۲۱ درصد به کمتر از ۲۰ درصد کاهش یابد، سردرد و سستی ظاهرشده و توقف طولانی در هوای با اکسیژن کمتر از ۱۷ درصد، منجر به بیهوشی می‌شود. بنابراین هدف اصلی تهویه در تونل‌ها، ثبات میزان اکسیژن محیط به میزان ۲۱ درصد و رقیق کردن آلودگی‌ها به میزان استاندارد است. همچنین میزان گازهای مضر در هوای تونل نباید از مقادیر جدول ۵- ۲۰ مصوب وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی بیشتر باشد.

جدول ۵- ۲۰- میزان گازهای مضر در تونل و معدن بر اساس استاندارد مصوب وزارت بهداشت

گازهای مضر	تماس کوتاه مدت (ppm)	متوسط سنجش زمانی (ppm)
منو اکسید کربن (CO)	۲۰۰	۳۵
سولفور هیدروژن (H ₂ S)	۱۵	۱۰
گاز دی اکسید گوگرد (SO ₂)	۵	۲
گاز دی اکسید کربن (CO ₂)	۳۰۰۰	۵۰۰۰
گاز اکسید ازت (NO _x)	۵۰	۱

یکی از مهم ترین مراحل تهویه، محاسبه میزان هوای لازم جهت تهویه کامل است. به طور کلی محاسبه شدت جریان هوا بایستی با توجه به مسائل و اهداف زیر صورت گیرد:

- تأمین هوای تمیز جهت تنفس کارکنان داخل تونل
- رقیق کردن و بیرون راندن گازهای حاصل از آتشکاری و سایر گازهای مضر موجود
- رقیق کردن و بیرون راندن گردوغبار موجود در تونل
- تأمین شرایط مناسب برای محیط کار در داخل تونل

۵-۸-۱-۱- روش های تهویه

تهویه در تونل به صورت طبیعی یا مصنوعی انجام می شود. سیستم تهویه مصنوعی در حین ساخت به سه دسته اصلی سیستم تهویه دهشی، تهویه مکشی و تهویه مختلط قابل تقسیم است.

• ۵-۸-۱-۱-۱- تهویه دهشی

در این روش، بادبزن فرعی را در ابتدای لوله تهویه و دور از محلی که بایستی تهویه شود نصب می کنند و به کمک آن، هوا را به قسمت های مورد نظر می رسانند. بدین ترتیب، هوای تمیز با گازها و دودهای حاصله مخلوط و باعث رقیق شدن آنها می شود. سپس هوای مزبور در داخل تونل به جریان افتاده و پس از رسیدن به دهانه تونل، خارج می شود. باید توجه داشت که در این روش ممکن است هوای تازه به انتها نرسد و طولی از تونل بدون تهویه بماند. طولی که هوا در اثر سرعت خود به پیش می رود تابع شدت جریان هوا (سرعت) است. مثلاً اگر شدت جریان هوا در خارج لوله یک مترمکعب بر ثانیه باشد، طول پیشروی هوا تحت اثر سرعت خود، برابر ۱۵ تا ۱۸ متر خواهد بود.

• ۵-۸-۱-۱-۲- تهویه مکشی

در روش تهویه مکشی بادبزن را طوری نصب می کنند که هوای کثیف موجود در انتهای بن بست به داخل لوله مکیده شود. اگر لوله تهویه از جنس مواد سخت باشد، می توان بادبزن فرعی را در ابتدا یا انتهای لوله نصب کرد. ولی اگر لوله از مواد نرم باشد، اجباراً آن را در انتهای لوله قرار می دهند. با مکیده شدن هوای کثیف به داخل لوله تهویه، خلاء نسبی در محل مزبور ایجاد می شود. در تهویه مکشی نیز همانند روش دهشی طولی از سینه کار بدون تهویه می ماند.

• ۵-۸-۱-۱-۳- تهویه مختلط

در این روش یک بادبزن فرعی دهشی را طوری نصب می کنند که انتهای لوله آن تا نزدیکی جبهه کار برسد و توام با آن یک بادبزن مکشی نیز نصب می نمایند. بدین ترتیب هوای آلوده از انتهای بن بست به طرف بادبزن مکشی رانده شده و از آن خارج می شود. گاهی نیز برای انجام این کار، ابتدا از یک بادبزن واحد به صورت مکشی استفاده می کنند و دودهای

موجود در جلوی جبهه کار به داخل مکیده شده و پس از مدتی، بادبزن را به حالت دهشی بکار می‌اندازند و هوای تمیز را به جبهه کار می‌رسانند.

در مقایسه روش دهکشی و مکشی می‌توان گفت که در روش دهشی سرعت تهویه بیشتر است، زیرا هوای تازه از دهانه لوله خارج می‌شود و در صورتی که فاصله آن تا انتهای بن‌بست درست انتخاب شده باشد، باعث رقیق شدن گازها می‌شود. از جمله امتیازات دیگر این روش، آن است که بادبزن را می‌توان در محل ثابتی نصب کرد و با افزایش طول کار معدنی، لوله‌های تهویه را نیز اضافه کرد. در صورتیکه در روش مکشی، بعد از هرچند متر پیشروی باید بادبزن را باز و مجدداً آن را در ابتدای لوله نصب کرد.

روش ترکیبی تمام امتیازات دو روش مذکور را داشته و فاقد معایب آن‌ها است. بنابراین در مواقعی که دودها و گازها زیاد باشد، بهتر است که از روش ترکیبی استفاده شود.

میزان هوای لازم جهت تهویه را باید بر اساس عوامل زیر محاسبه نمود:

- ۱- بیشترین تعداد افرادی که در یک‌زمان در داخل تونل مشغول به کار هستند
- ۲- بیشترین میزان گازی که متصاعد می‌شود
- ۳- حداکثر ماده منفجره‌ای که در داخل تونل مصرف می‌شود
- ۴- میزان گردوغبار تولیدشده
- ۵- دود ناشی از سوخت فسیلی ماشین‌آلات موجود در تونل

پس از آن که میزان هوای لازم جهت تهویه هر پارامتر محاسبه شد، بزرگ‌ترین آن‌ها به‌عنوان شدت جریان لازم هوا انتخاب می‌شود، زیرا این مقدار می‌تواند از هر نظر تونل را تهویه نماید. جهت محاسبه شدت جریان موردنیاز برای سیستم تهویه دهشی، مکشی و حتی مختلط، در ابتدا باید میزان حجم هوای موردنیاز جهت تهویه جبهه کار محاسبه شده و پس از آن میزان احتمالی نشت مسیر تهویه از محل بادبزن یا بادبزن‌ها تا جبهه کار تعیین شود. با رعایت ترتیب ذکر شده و از حاصل جمع حجم هوای موردنیاز و میزان نشتی مسیر، می‌توان شدت جریان موردنیاز سیستم‌های تهویه را محاسبه نمود.

۵-۸-۲- طراحی سیستم روشنایی

از آنجایی که تونل‌های فضاهای بسته‌ای هستند که در طول شبانه‌روز هیچ‌گونه نور طبیعی امکان نفوذ به آن‌ها را مگر از طریق ورودی و خروجی تونل ندارد، بنابراین نیاز به نصب سیستم مصنوعی روشنایی در آن‌ها همواره وجود دارد. تفاوت میزان روشنایی در داخل تونل‌ها در زمان ساخت و بهره‌برداری در این است که در زمان ساخت، ترافیک و سرعت عبور خودروها، تأثیری بر میزان روشنایی ندارد و میزان روشنایی وابسته به میزان دقت اجرای فعالیت‌هایی است که در داخل

تونل ها انجام می شود. همچنین روشنایی مورد نیاز در داخل تونل های در حال ساخت به جز در ورودی های آن ها در طول روز، در کل ثابت است.

از آنجایی که تأمین روشنایی تونل های راه در حین ساخت همانند روشنایی تونل های پیشرو در معادن زیرزمینی است، میزان حداقل روشنایی مورد نیاز برای پیشروی در طول تونل برابر با ۲۰ لوکس و در جبهه کارها به دلیل حضور افراد و انجام فعالیت هایی که به دقت بیشتری نیازمند است ۳۰ لوکس در نظر گرفته می شود. نوع چراغ با توجه به شرایط ایمنی و اقتصادی انتخاب می شود سپس با توجه به استاندارد روشنایی برای محل مورد نظر، شدت روشنایی متوسط در سطح آن محل انتخاب شده و با توجه به ضرایب تصحیحی فاصله چراغ ها محاسبه می گردد. تاسیسات مورد نیاز تأمین روشنایی حین ساخت تونل عبارتند از:

- وسیله تأمین برق (ژنراتور یا برق شهری)
- چراغ ها و لامپ ها (لامپ و چراغ فلورسنت یا گازی)
- نوع کابل یا کابل های مورد نظر و طول آن ها
- تابلو برق های مناسب (دارای قطعاتی که شامل کنتاکتور، بی متال، رله ها و ...)
- ساپورت مناسب جهت نگهداری چراغ ها در سقف و دیواره

۵-۹- طراحی تونل در شرایط خاص

۵-۹-۱- کلیات

شرایط خاص به شرایطی گفته می شود که در آن باید امکان کاربرد طرح استاندارد در طراحی نگهداری تونل، لاینینگ، کفبند و غیره بررسی شود. اطلاعات لازم برای کاربرد هر کدام از شرایط باید از طریق بررسی به دست آید سپس نگهداری های تونل، لاینینگ، کفبند، عایق بندی و زهکشی با توجه به شرایط مخصوص به خود طراحی شوند.

۵-۹-۲- زمین های خاص

برای زمین های خاص زیر، طراحی باید با توجه به ماهیت هر زمین انجام شود:

(۱) زمینی که در آن رانش و مشکلات ناپایداری پیش بینی می شود

(۲) ناحیه شکستگی گسل و چین خورده

(۳) زمین تحکیم نشده^۱

(۴) زمین مچاله شونده

¹ Unconsolidated ground

(۵) زمین با خطر انفجار سنگ

(۶) زمین با سطح بالا از ژئوترمال گرمایی، چشمه آب گرم و گازهای سمی

(۷) زمین با خطر فشار آب بالا یا جریان آب زیاد

در زمین خاص، پدیده‌های مشکل‌ساز شامل نیروهای خارجی، سیلاب و تغییر شکل فراتر از مقدار پیش‌بینی شده در حین ساخت یا پس از بهره‌برداری از مسیر ممکن است رخ دهد که منجر به تأخیر در زمان و افزایش هزینه ساخت و تخریب محیط اطراف می‌شود همچنین تعمیر و نگهداری پس از باز شدن مسیر برای عموم تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، نتایج بررسی‌ها باید به‌دقت مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد تا پدیده‌های مشکل‌ساز شناسایی و با توجه به ماهیت هر زمین اقدامات جبرانی طراحی شود.

۱- زمینی که در آن رانش و ناپایداری ترانشه پیش‌بینی می‌شود: در این نوع زمین، سست شدن اطراف به همراه حفاری تونل ممکن است باعث رانش زمین و شکست شیب^۱، افزایش فشار زمین بر روی تونل و ایجاد فشار نامتقارن زمین شود. بنابراین، پایداری شیب باید به‌عنوان اولویت اصلی برای جلوگیری از زمین‌لغزش و شکست توده سنگ مورد بررسی قرار گیرد. پایداری تونل در حین حفاری و پس از باز کردن مسیر برای عموم باید با در نظر گرفتن اطلاعات و رابطه موقعیتی سطح لغزش ارزیابی شود.

۲- ناحیه شکستگی گسل و چین‌خورده، ناپایداری جبهه کار، بالآمدگی کف و همگرایی دیواره‌های جانبی و غیره ممکن است در هنگام حفر تونل در ناحیه شکستگی گسل و کمر بند چین‌خورده ایجاد شود. همچنین حتی در زمینی که هیچ رفتار غیرعادی در طول حفر مشاهده نمی‌شود، نگهداری‌های تونل یا لاینینگ پس از بهره‌برداری از مسیر ممکن است تغییر شکل دهند. در این حالت افزودن عملکردهای مکانیکی به لاینینگ و کفبند باید با توجه به پایداری طولانی‌مدت تونل بررسی شود.

۳- زمین تحکیم نشده: در این نوع زمین، پایداری جبهه کار تحت تأثیر روباره یا زاویه اصطکاک داخلی^۲، چسبندگی، توزیع دانه‌بندی، محتوای آب، مقدار آب ورودی و فشار آب ورودی و غیره است. به‌ویژه در زمین تحکیم نشده با محتوای کم ریزدانه (بیش از ۷۵ میکرون) و ضریب یکنواختی پایین^۳ پایداری جبهه کار پایین و ممکن است منجر به ریزش، جریان‌یابی زمین^۴ و کف شکننده شود. همچنین، درحالی‌که محتوای بالای آب باعث سیال شدن خاک زمین می‌شود، محتوای بسیار کم آب به دلیل سطح پایین آب زیرزمینی باعث کاهش چسبندگی و منجر به شن روان^۵ شود.

¹ slope failure

² Angle of internal friction

³ small uniformity coefficient

⁴ outflow of ground

⁵ quicksand

در مورد لاینینگ و کفبند، علاوه بر وجود یا عدم وجود اثرات منفی زلزله باید اثرات آب های زیرزمینی و پایداری طولانی مدت در زمانی که تونل در نزدیکی مرز لایه با زمین نرم یا توپوگرافی با فشار نامتقارن قرار دارد، بررسی شود. ۴- زمین مچاله شونده: در زمین مچاله شونده، فشار شدید زمین بر سیستم نگهداری و لاینینگ ممکن است باعث ایجاد مشکلاتی مانند کاهش سطح مقطع داخلی به دلیل همگرایی دیوارهای جانبی، تغییر شکل سیستم نگهداری و تونل در طولانی مدت شود که بر عملکرد تونل اثر منفی دارد. از دلایل بروز چنین مشکلاتی می توان به آماس کانی های رسی متورمی، جریان پلاستیک و افزایش فشار منفذی به همراه کاهش مقاومت سنگ و اثر فشار گاز تولید شده در زمین اشاره کرد.

از نظر اطمینان از ایمنی طولانی مدت تونل، ضرورت اضافه کردن عملکردهای مکانیکی به لاینینگ و کفبند بررسی می شود. تخمین مناسب بارهایی که پس از اتمام حفاری با توجه به ماهیت روباره ویژگی های زمین شناسی عمل می کنند برای آماده سازی و نصب ابزار دقیق مانند اکستنسومتر^۱ دارای اهمیت می باشد. تغییر شکل حتی ممکن است اگر زمین قبل از حفاری یا در ابتدای آن خاصیت آماسی نشان نداده باشد پس از تکمیل لاینینگ یا پس از باز شدن مسیر بر روی عموم همراه با تغییرات تنش و وضعیت آب زیرزمینی رخ دهد.

۵- زمین با خطر انفجار سنگ (فصل دوم بحث شده است)

۶- زمین با سطح بالا از ژئوترمال گرمایی، چشمه آب گرم و گازهای سمی (فصل دوم بحث شده است)

۷- زمین با خطر فشار آب بالا یا جریان آب زیاد: فشار زیاد آب یا حجم زیاد آب ورودی در زمین های تحکیم نشده ممکن است تأثیر زیادی بر پایداری جبهه کار و زمین اطراف داشته باشد. بنابراین هنگام حفاری لایه غیرقابل نفوذ در سنگ سخت یا نیمه سخت^۲ باید احتمال هجوم ناگهانی آب در نظر گرفته شود.

۵-۹-۳- شرایط خاص

هنگامی که یک تونل در شرایط زیر حفر شود باید ویژگی های هر محل در طراحی لحاظ شود:

۱- عبور از محدوده شهری

۲- روباره کم ارتفاع

۳- روباره با ارتفاع خیلی زیاد

۴- عبور از زیر آب

هنگامی که یک تونل در محل های خاصی حفر می شود ممکن است مشکلاتی مانند نشست سطحی، کاهش سطح آب زیرزمینی، جابه جایی و تغییر شکل سازه های مجاور، تغییر شکل های بزرگ تونل، لرزش و سروصدا و پایداری تونل در

¹ extensometer

² semi-hard or hard rock

حین ساخت ایجاد شود. بنابراین لازم است درجه و دامنه تاثیرات ناشی از ساخت تونل برآورد و روش حفاری و پیشروی، پایداری جبهه کار، عملکرد سیستم‌های نگهداری، دوام لاینینگ و کفبند و عملکرد زهکشی ارزیابی شوند.

(۱) عبور از منطقه شهری (فصل دوم بحث شده است)

(۲) روباره کم‌عمق: در یک تونل زمانی که روباره تقریباً کمتر از 2D (D قطر حفاری) است تشکیل قوس تونل به‌مانند نواحی پرتال دشوار است. این مورد در زمین‌های تحکیم نشده رایج می‌باشد. همچنین ممکن است اثرات قابل توجهی بر زندگی و ایمنی ساکنان منطقه به دلیل مشکلاتی مانند نشست سطحی در هنگام حفر تونل داشته باشد. گاهی کل بار روباره به سیستم نگهداری وارد می‌شود. بنابراین پدیده‌های پیش‌بینی شده در هنگام حفاری و محدوده تأثیر آن‌ها و افزودن عملکردهای مکانیکی به لاینینگ و کفبند باید موردبازنگری قرار گیرد و شرایط طراحی ازجمله ساختمان‌های مجاور، کاربری و شرایط زمین موردتوجه قرار گیرد.

(۳) روباره با ارتفاع خیلی زیاد: در یک تونل با ارتفاع روباره خیلی زیاد، فشار زمین زیاد و Competence factor کاهش و در نتیجه تغییر شکل افزایش می‌یابد و ممکن است در اثر فشار بالای آب و انفجار سنگ ناپایداری جبهه کار رخ دهد؛ بنابراین به هنگام حفر تونل در زمین با روباره بیش از ۵۰۰ متر باید توجه ویژه‌ای شود. از آنجایی که بررسی دقیق ماهیت زمین در عمق مسیر تونل از طریق اکتشاف ژئوفیزیک از سطح زمین دشوار است باید بررسی‌های لازم در مورد تغییر شکل از داخل تونل در حین حفاری انجام شود و در صورت لزوم طراحی موردبازنگری قرار گیرد.

(۴) عبور از زیرآب: تونلی که از زیرآب می‌گذرد ممکن است باعث تغییر شکل و نشست بستر رودخانه و جریان آب زیاد همراه با حفاری شود. همچنین اگر زمین نتواند فشار آب را تحمل کند ممکن است آب به داخل تونل سرازیر و موجب ریزش تونل شود. سازمان‌دهی اهداف، خط‌مشی و شرایط اقدامات متقابل بر اساس نتایج تحقیقات و طراحی دقیق با استفاده از نمونه‌های موردی در شرایط مشابه یا روش تحلیلی ضروری است. به‌خصوص زمانی که یک تونل در کف دریا قرار دارد، مشکل نحوه برخورد با فشار بالای آب معادل عمق آب است. همچنین علاوه بر پایداری جبهه کار حین حفر تونل، مشکلی مانند هزینه برداشت آب ورودی به تونل پس اتمام تونل وجود دارد. یکی از اقدامات متقابل^۱ تزریق در زمین مجاور است.

اهداف تزریق شامل آب‌بندی، بهبود زمین یا هردو است. توجه به ماندگاری طولانی مدت بدنه بهسازی زمین^۲ ضروری است.

¹ countermeasures

² the ground improvement body

۵-۹-۳-۱- سازه های مجاور

بسته به شرایط طراحی پس از مطالعه موارد زیر، باید سیستم نگهداری، لاینینگ و تقویت کننده مناسب طراحی شود:

(۱) تاثیر تونل بر سازه های مجاور (۲) تاثیرات متقابل تونل های مجاور و (۳) تاثیرات بر تونل از سازه های مجاور.

۱- تاثیر تونل بر سازه های مجاور:

سازه های مجاور، سازه های سطحی و زیرزمینی مانند جاده ها، راه آهن، کانال های آب و ساختمان ها در مجاورت یک تونل و سازه های مدفون مانند خطوط گاز و کانال های آب و فاضلاب خدماتی هستند. اثرات تونل بر سازه های مجاور شامل تغییر شکل زمین اطراف ناشی از حفاری تونل و پایین آمدن سطح آب زیرزمینی، ترک خوردگی و ریزش بر روی سازه های مجاور توسط لرزش انفجار است.

هنگامی که انتظار می رود یک تونل در حین یا پس از حفاری بر سازه های مجاور اثر می گذارد، باید در مرحله طراحی اثرات آن به دقت بررسی و اقدامات کنترلی با توجه به نتایج بررسی ها در نظر گرفته شود. از آنجایی که میزان تاثیر بر سازه های مجاور با توجه به شرایط زمین، اندازه ها، روش ها و ترتیبات ساخت متفاوت است باید توجه دقیقی به آن شود.

۲- تاثیرات متقابل تونل های مجاور:

تونل های مجاور دو یا چند تونل هستند که به طور هم زمان یا در فازهای متفاوت ساخته می شوند و بر یکدیگر تاثیر می گذارند.

تونل های مجاور به شرح زیر طبقه بندی می شوند:

(الف) تونل های موازی (زمانی که دو یا چند تونل در کنار هم یا بالا و پایین هم به طور هم زمان یا در فازهای مختلف ساخته می شوند. به دو تونل، تونل دوقلو گفته می شود.)

(ب) تونل های مقطع دوچشمی^۱: این نوع از تونل زمانی ارائه می شود که تونل های جمعی^۲ در یک مکان ساخته می شوند، جایی که دو تونل باید در مجاورت یکدیگر باشند تا دیوار مرکزی^۳ (پایه مرکزی) مشترک باشد.

(ج) تونل های متقاطع

تونل های مجاور در معرض اثرات متقابل توزیع مجدد تنش ناشی از ساخت تونل های متعدد قرار دارند. بنابراین وضعیت تنشی که رخ می دهد با شرایطی که در طول ساخت یک تونل رخ می دهد متفاوت است. بسته به شرایط زمین شناسی، تونل های موازی که با فاصله دو (در زمین مقاوم) تا پنج (در زمین نرم) برابر قطر حفاری از مراکز تونل ها از یکدیگر جدا شده اند، تاثیر متقابل بسیار کمی دارند.

¹ Tunnels of binocular cross-section

² plural tunnels

³ center pillar

همچنین به هنگام طراحی، باید مطالعات کافی در باره ترک خوردگی و آسیب شاتکریت و لاینینگ تونل اول از لرزش انفجار تونل دوم انجام شود.

۳- اثرات ساخت سازه‌های مجاور بر تونل:

در مرحله طراحی، باید اثرات ساخت سازه‌های مجاور بر تونل در حین و بعد از حفاری بررسی شود. از آنجایی که میزان تأثیرات حاصل از ساخت‌وساز مجاور بسته به عواملی مانند وضعیت زمین‌شناسی، نوع و اندازه پروژه ساخت‌وساز مجاور، روش و توالی ساخت متفاوت خواهد بود، مطالعات کامل پیش از اجرای پروژه ضروری است. می‌توان انتظار داشت که در نتیجه ساخت‌وساز در مجاورت تونل، تنش بر روی سیستم نگهداری و زمین اطراف که پایداری تونل را حفظ می‌کنند تغییر کند در این شرایط ممکن است بارهای جدید به تونل وارد شود که منجر به جابه‌جایی یا تغییر شکل در حین و پس از ساخت سازه مجاور می‌شود. در برخی موارد، تونل و عملکرد آن بارهای جدید و جابه‌جایی و تغییر شکل ناشی از آن دچار مشکل می‌شود.

۵-۹-۳-۲- هندسه و ابعاد خاص

تونل‌ها با شکل یا ابعاد خاص باید به گونه‌ای طراحی شوند که از پایداری تونل و زمین اطراف با توجه به اهداف و شرایط زمین کاملاً اطمینان حاصل شود.

مقطع حفاری یک تونل با هندسه و ابعاد خاص عموماً بزرگ‌تر از مقاطع معمولی و از نظر ساختاری پیچیده‌تر می‌باشد. در نتیجه زمین در معرض تنش پیچیده‌تری قرار دارد که تمایل به ناپایداری بیشتر می‌باشد.

برای تونل با اشکال و ابعاد خاص، روش ساخت، نگهداری، لاینینگ و تقویت‌کننده‌های تونل باید مورد مطالعه قرار گیرد تا به صرفه‌ترین روش حفاری انتخاب شود و از پایداری دینامیکی تونل و زمین اطراف آن اطمینان حاصل شود. به‌ویژه زمانی که شرایط زمین نامناسب یا ابعاد خیلی بزرگ است بررسی دقیق زمین و مطالعه کامل پایداری تونل ضروری است. معمولاً در چنین شرایطی تقویت‌کننده مناسب نیاز است.

برخی از نمونه‌های رایج به شرح زیر است:

۱- نقاط انشعاب^۱

۲- بزرگ شدن مقطع

۳- سطح مقطع بزرگ

۴- سایر اشکال

¹ Bifurcation points

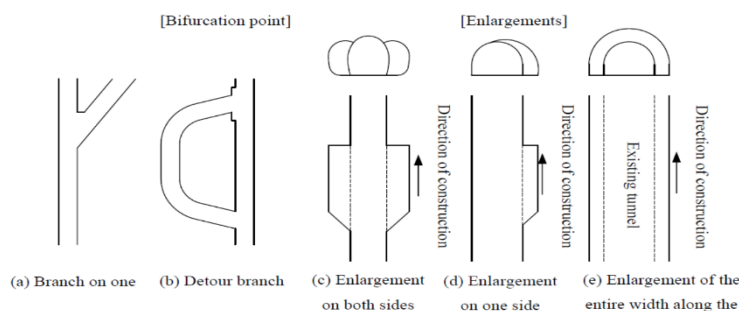
• ۵-۹-۳-۲-۱- نقاط انشعاب، بزرگ شدن‌ها و مقاطع بزرگ

• نقاط انشعاب و بزرگ شدن

از آنجاکه تغییرات در شکل مقطع می‌تواند در طول فرآیند حفاری و ساخت رخ دهد، انشعاب‌ها^۱ و بزرگ شدن‌ها ممکن است به سازه‌های ناپایدار تبدیل شوند. هنگام طراحی یک نقطه انشعاب یا سطح مقطع بزرگ طراح باید پایداری تونل و زمین اطراف را در طول حفاری تأیید کند.

(۱) نوع و خصوصیات نقاط انشعاب و بزرگ شدن مقطع: نوع‌های مختلف شاخه‌ها و بزرگ شدن در شکل ۵-۲۶ ارائه شده است.

(الف) نقاط انشعاب: در نقطه انشعاب (a) عرض سطح مقطع منبسط می‌شود. در این حالت تقویت مورد نیاز است چراکه تونل و زمین اطراف به راحتی ناپایدار می‌شوند. از آنجایی که گفته می‌شود فاصله مرکز به مرکز تونل‌های مجاور که اندرکنش متقابل آن‌ها از بین می‌رود ۲ تا ۵ برابر قطر حفاری است فاصله استفاده شده به عنوان استاندارد منطقه تقویت کننده بین دیواره‌های تونل بعد از انشعاب‌ها حدود ۴ برابر عرض حفاری است.



شکل ۵-۲۶- انواع انشعاب‌ها و بزرگ شدن مقطع تونل‌ها

در نقطه انشعاب (b)، اتاق‌های رسوب‌دهنده الکترواستاتیک^۲ و محل نصب داکت‌های تهویه برنامه‌ریزی می‌شوند. در طراحی تونل‌های انشعاب به دلیل پایداری زمین ترجیحاً زاویه انشعاب باید تا حد امکان به زاویه قائم^۳ نزدیک باشد. (ب) بزرگ شدن مقطع: تونل بزرگ شده (c) برای ساخت ایستگاه در تونل راه‌آهن استفاده می‌شود. بزرگ شدن تمام جبهه کار در زمین با شرایط خوب امکان پذیر است. از آنجایی که تونل‌های بزرگ سطح مقطع بزرگی دارند اغلب روش حفاری شامل مجموعاً سه تونل است، یکی در مرکز و دو تونل در طرفین حفاری می‌شوند و بعدها دیواره‌ها نیز برداشته می‌شوند. تونل بزرگ (d) برای سازه‌هایی مانند محل پارک اضطراری برنامه‌ریزی شده است. از آنجایی که ناحیه افزایش سطح مقطع خیلی بزرگ نیست فقط اصلاح الگوی نگهداری ضروری است. تونل بزرگ (e) برای بازسازی تونل موجود استفاده می‌شود.

¹ Branches

² electrostatic precipitator

³ Right angle

۲- روش طراحی انشعاب‌ها و بزرگ شدن مقطع: روش‌های زیر برای طراحی انشعاب‌ها یا بزرگ کردن سطح مقطع مؤثر هستند.

الف) طراحی بر اساس شرایط مشابه: نمونه‌هایی از طرح‌ها و ساخت انشعاب و بزرگ کردن سطح مقطع به تفصیل مورد مطالعه قرار می‌گیرد. پارامترهای طراحی مانند شکل مقطع، شرایط زمین، روش حفاری، ناحیه تقویت^۱ همراه با رفتار تونل در حین و پس از حفاری باید به‌طور هم‌زمان و کامل مورد مطالعه قرار گیرند تا ارزیابی ترکیبی از طراحی و نتایج ساخت ارائه شود.

ب) طراحی با روش تحلیلی: تجزیه و تحلیل عددی در مواردی که سطح مقطع یا شرایط زمین خاص است و مطالعه طراحی به اندازه کافی توسعه نیافته است مفید است. از آنجایی که شکل و ساختار انشعابات و بزرگ‌شدگی‌ها پیچیده است و قوس زمین با مقاطع معمولی متفاوت است، روش‌های تحلیل پیوسته مانند روش المان محدود توصیه می‌شود.

۳- ملاحظات طراحی

روش‌های تقویت‌کننده نگهداری و روش‌های کمکی که عموماً در حین حفاری تونل استفاده می‌شوند، اغلب برای حفاری انشعاب‌ها و بزرگ‌شدگی‌ها استفاده می‌شوند. بدین معنا که روش‌های تقویت نگهداری اولیه، روش‌های مختلفی برای افزایش سختی^۲ هستند مانند افزایش تعداد و طول راکبوت (شامل راکبوت‌های فایبرگلاس)، افزایش ضخامت شاتکریت و تغییر اندازه قاب‌های فولادی. بسته به شرایط زمین از فورپولینگ و تزریق نیز استفاده می‌شود.

• تونل با مقاطع خیلی بزرگ

منظور از مقطع بزرگ مقطعی است که از محدوده توصیف‌شده در طرح استاندارد فراتر می‌رود (شکل ۵- ۲۷).

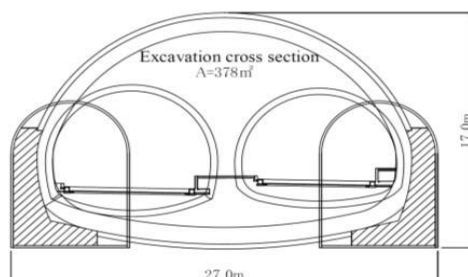
الف) حفاری: به‌طور کلی زمانی که سطح مقطع حفاری بزرگ باشد پایداری جبهه کار کاهش و همگرایی تونل افزایش می‌یابد. بنابراین لازم است اقداماتی مانند تقسیم مقطع حفاری یا اتخاذ روش‌های کمکی انجام شود. از آنجایی که تعداد کمی از تونل‌های قبلی سطح مقطعی بزرگ‌تر از سطح استاندارد داشته‌اند برآورد رفتار زمین و تنش وارد شده بر سیستم نگهداری تونل دشوار است؛ بنابراین انجام مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها برای اطمینان از ایمنی و بازدهی اقتصادی بسیار مهم است.

ب) نگهداری تونل: از آنجایی که بارهای وارده بر سیستم نگهداری یک تونل با سطح مقطع بزرگ در مقایسه با تونل استاندارد بیشتر است مقاومت سیستم نگهداری باید بیشتر از حالت استاندارد باشد. در انتخاب نگهداری تونل، طراحی و روش‌های تحلیلی مورد استفاده در شرایط مشابه و بررسی کارایی سیستم نگهداری ضروری است.

¹ area of reinforcement

² stiffness

ج) لاینینگ و کفبند: ضخامت لاینینگ و کفبند تونل با سطح مقطع خیلی بزرگ معمولاً افزایش می‌یابد بنابراین باید بتن‌ریزی بیشتری انجام شود. در این صورت بررسی اثرات تنش حرارتی و زمان برداشتن قالب^۱ با توجه به وزن مرده زیاد ضروری است.



شکل ۵- ۲۷- نمونه‌ای از تونل با سطح مقطع بزرگ (Shin Takeoka tunnel)

۵-۹-۳-۳- بارهای خارجی

زمانیکه تونل تحت تأثیر بارهای خارجی زیر قرار می‌گیرد لاینینگ و کفبند باید بر اساس روش‌های تحلیلی و مطالعه نمونه‌های موردی مشابه طراحی شود تا عملکردهای مکانیکی اضافی برای لاینینگ و کفبند ارائه شود.

هنگام اضافه کردن عملکرد مکانیکی به لاینینگ و کفبند برای غلبه بر بارهای اشاره شده در پایین، ظرفیت باربری زیادی مورد نیاز است؛ بنابراین لازم است ظرفیت باربری با روش‌های مختلف تقویت شامل بتن مسلح^۲ یا یاف کوتاه افزایش یابد. همچنین در برخی موارد به جای افزایش ظرفیت باربری از تقویت‌کننده‌های یافی^۳ برای جلوگیری از پوسته پوسته شدن استفاده می‌شود. بارهای خارجی شامل:

- ۱) هنگامی که فشار زمین عمل می‌کند
- ۲) هنگامی که فشار آب عمل می‌کند
- ۳) هنگامی که تحت تأثیر زلزله قرار می‌گیرند
- ۴) هنگامی که تحت تأثیر سایر بارهای خارجی قرار می‌گیرد

• ۵-۹-۳-۳-۱- فشار زمین

فشار زمین ممکن است در شرایط زیر عمل کند. در چنین مواردی، بارها باید تخمین زده شوند و در صورت نیاز چنین برآوردی در طراحی منعکس شود.

۱) زمین‌های مچاله شونده: هنگامی که تغییر شکل به طور قابل توجهی بزرگ است، مانند زمین مچاله شونده، لاینینگ ممکن است قبل از همگرایی نصب شود تا بارها توسط لاینینگ تحمل شود. در چنین شرایطی لاینینگ عمدتاً با

¹ form

² reinforced concrete

³ fiber reinforcement

استفاده از تحلیل قاب^۱ یا تحلیل اجزا محدود (FEM) با در نظر گرفتن فاصله زمانی بین حفاری و نصب لاینینگ و تخمین بارهای فشار زمین پلاستیکی که پس از نصب لاینینگ ایجاد می‌شوند طراحی شود.

(۲) زمین‌های تحکیم نشده: در زمین تحکیم نشده فشار زمین ممکن است با کاهش مقاومت زمین پس از اتمام تونل عمل کند. لاینینگ و کفبند باید در روباره سبک، شرایط و توزیع زمین تثبیت نشده و در صورت لزوم با در نظر گرفتن فشار زمین طراحی شوند. در این مورد فشار زمین سست یا بار کل روباره اغلب به‌عنوان عامل بار عمودی استفاده می‌شود. بار افقی از ضرب بار عمودی در ضریب فشار جانبی^۲ به دست می‌آید.

(۳) هنگامی که تونل تحت تأثیر فشار نامتقارن زمین قرار می‌گیرد: در مناطقی مانند پرتال‌ها که تحت تأثیر فشار نامتقارن هستند تغییر شکل ممکن است به دلیل فشار زمین در حین و پس از اتمام حفاری رخ دهد.

• ۵-۹-۳-۲- فشار آب

هنگامی که آب زیرزمینی اطراف به داخل تونل زهکش نمی‌شود (وارد نمی‌شود) تونل باید ضد آب^۳ باشد. در یک تونل ضد آب، فشار آب بر روی لاینینگ و کفبند عمل می‌کند. ممبران‌های ضد آب^۴ باید در اطراف تونل از جمله کفبند نصب شوند. این ممبران‌ها در تونل‌های ضد آب معمولاً ضخیم‌تر از دیگر تونل‌ها هستند. در این حالت فشار آب با توجه به سطح آب زیرزمینی که بر روی لاینینگ و کفبند عمل می‌کند تنظیم می‌شود. هنگامی که هد هیدرولیکی به‌طور قابل توجهی بزرگ باشد لاینینگ آنقدر ضخیم می‌شود که ساخت آن دشوار می‌شود. بنابراین بررسی دقیق هنگام به‌کارگیری تونل ضد آب ضروری است.

• ۵-۹-۳-۳- زلزله

تونل‌ها به‌عنوان بخشی از زمین اطراف رفتار می‌کنند. بنابراین در مقایسه با سازه‌های روی سطح زمین، کمتر تحت تأثیر لرزه قرار می‌گیرند و می‌توان گفت تونل‌ها سازه‌هایی بسیار مقاوم در برابر زلزله هستند.

تقویت‌کننده‌های معمولی با استفاده از میلگردهای تقویت‌شده^۵ می‌توانند آسیب‌های ناشی از زلزله‌های بزرگ را حتی در نواحی پرتال تا حدودی کاهش دهند. با این وجود حتی تونل‌های کوهستانی نیز ممکن است در شرایط زیر در اثر زلزله آسیب ببینند.

(۱) تونل با روباره کم در زمین تحکیم نشده: کرنش برشی ایجادشده به‌وسیله زلزله در زمین تحکیم نشده با روباره کم زیاد است. هنگامی که روباره کم عمق باشد قوس زمین به‌احتمال زیاد تشکیل نمی‌شود. بنابراین جابه‌جایی زمین

¹ frame analysis

² coefficient of lateral pressure

³ watertight

⁴ Waterproofing membrane

⁵ reinforcing bars

در هنگام زلزله و عمل ناگهانی فشار زمین سست ممکن است رخ دهد. همچنین، منطقه نزدیک پرتال با روباره کم مستعد شکست شیب^۱ است.

(۲) تونل در منطقه ای با شرایط بد زمین:

در شرایط نامناسب زمین شناسی مانند ناحیه شکستگی گسل، فشار زمین پلاستیکی و فشار زمین در حال سست شدن ممکن است پس از تکمیل تونل عمل کنند. همچنین اگر بارها در هنگام زلزله افزایش یابد احتمال بروز آسیب وجود دارد. علاوه بر این، هنگامی که یک تونل در مرزهای لایه هایی قرار دارد که در آن ویژگی های تغییر شکل به سرعت تغییر می کنند مانند مرز بین زمین تحکیم نشده و توده سنگ، آسیب با توجه به تفاوت های کرنش برشی ممکن است رخ دهد.

• ۵-۹-۳-۴- سایر بارهای خارجی

زمانی که در طراحی مشخص می شود که شرایط محیطی اطراف تونل در آینده تغییر خواهد کرد و یا زمانی که در آینده احتمال تغییر چنین شرایط محیطی در مناطق شهری وجود دارد، باید قابلیت تحمل بار مناسب به لاینینگ و کفبند اضافه شود.

در برخی موارد، بارهای داخلی مانند بارهای زنده و بارهای مرده یا اضافه بار در هنگام عبور جاده از روی تونل در شرایط طراحی لحاظ می شود. در این موارد ساختار لاینینگ باید با استفاده از تحلیل قاب^۲ و تحلیل روش اجزای محدود (FEM) تعیین شود.

¹ slope failure

² frame analysis

فصل ششم

ساخت تونل

۶- ساخت تونل

۶-۱- تدارکات عمومی

ساخت تونل باید با در نظر گرفتن مدارک و منابع طراحی برای تطبیق با شرایط زمین، پیشروی ایمن و شرایط زیست محیطی انجام شود. علاوه بر این، قبل از ساخت، روش‌های حفاری، ماشین‌آلات و تاسیسات مناسب برای ساخت ایمن و اقتصادی با در نظر گرفتن مقیاس پروژه، دوره ساخت، شرایط زمین و محیط اطراف باید مورد بررسی قرار گیرد.

۶-۲- بررسی و نظارت در حین ساخت

بررسی و نظارت به منظور فراهم کردن پیشروی ایمن متناسب با تغییرات وضعیت و رفتارهای زمین ضروری است.

۶-۲-۱- تغییرات در روش‌های ساخت

یکی از ویژگی‌های خاص پروژه‌های تونل‌سازی عدم تطابق کامل نتایج بررسی‌های قبلی زمین‌شناسی و سایر جنبه‌ها با شرایط واقعی در طول حفاری می‌باشد؛ بنابراین باید شرایط زمین‌شناسی در طول ساخت نیز مورد توجه قرار گیرد. نتایج این بررسی‌ها به منظور بررسی لزوم تغییر احتمالی در روش‌های طراحی و ساخت، تأثیر بر محیط اطراف و اقدامات متقابل مورد نیاز جمع‌آوری و ثبت شود.

موارد زیر نیز باید در حین ساخت، بررسی و ارزیابی شود: زمین‌شناسی، جریان و فشار آب در ورودی جبهه کار، رفتار زمین اطراف، رفتار سطح زمین و ساختمان‌ها روی سطح، وضعیت پرتال‌ها، محیط کار در تونل، آب‌وهوا، زلزله، آب‌های سطحی و زیرزمینی و غیره.

۶-۳- نقشه‌برداری

مهندسی نقشه‌برداری از علوم کاربردی و حائز اهمیت در احداث تمامی پروژه‌های عمرانی است که میزان توجه به جایگاه آن در پروژه احداث تونل بسیار تأثیرگذار و تعیین‌کننده می‌باشد؛ زیرا هدایت و کنترل سازه‌ای به اهمیت و حساسیت تونل، نیازمند بهره‌گیری از علم، تجربه، ابزار و تکنولوژی به‌روز نقشه‌برداری است که اگر نسبت به این امر کم‌توجهی رخ دهد موجب وارد شدن خسارات بسیاری در مراحل احداث و همچنین بهره‌برداری به پروژه خواهد شد.

۶-۳-۱- فاز اول نقشه‌برداری

در مراحل اولیه برای تهیه نقشه مورد نیاز جهت طراحی و جانمایی تونل معمولاً از نقشه‌هایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰ و کوچک‌تر استفاده می‌شود. این دست نقشه‌ها در بیشتر مناطق کشور توسط سازمان نقشه‌برداری یا سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح به روش فتوگرامتری تهیه شده و امکان دریافت آن‌ها از ارگان‌های مذکور وجود دارد. در این مرحله معمولاً

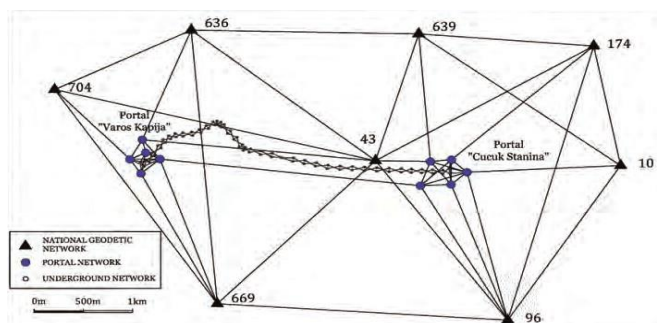
این مقیاس پاسخگوی نیاز مطالعات و طراحی است؛ اما قابلیت تهیه این نقشه به روش فتوگرامتری با پهنای بنا به نیاز کارفرما وجود دارد.

۶-۳-۲- فاز دوم نقشه برداری

پس از تصویب طرح و مشخص شدن محل دقیق تونل و پرتال های ورودی و خروجی آن، لازم است در مرحله اول به احداث شبکه ژئودزی ماندگار در محل پروژه اقدام گردد. این عمل با هدف دستیابی به دقت بالایی که در پروژه احداث تونل نیاز است انجام می شود. ممکن است با توجه به طول تونل، توپوگرافی و شرایط محل پرتال ها (که در محوطه باز و وسیع قرار دارند یا محوطه محدود)، ابعاد مقطع حفاری و طرح هندسی تونل در انتخاب تعداد و محل ایستگاه ها حالات متفاوتی به وجود بیاید اما کلیات این مرحله به شرح زیر است:

- بررسی و برآورد مشخصات لازم برای احداث شبکه ژئودزی در محل پروژه
- پس از مراجعه به محل پرتال های ورودی و خروجی و جانمایی اولیه، تیم نقشه برداری بنا به نیاز پروژه طرح اولیه ای از دقت شبکه، تعداد ایستگاه ها، نوع ساختمان ایستگاه ها و روش تعیین موقعیت این شبکه را در نظر می گیرد. سپس به تهیه ملزومات مورد نیاز برای احداث شبکه مدنظر خود اقدام می کند.
- جانمایی و احداث ساختمان ایستگاه (احداث پیلارهای نقشه برداری)
- در این مرحله پس از در نظر گرفتن موقعیتی که از دید مناسب به دهانه تونل و ماندگاری کافی در برابر عوامل محیطی و انسانی برخوردار باشد، (برای مثال درجایی که دچار تخریب در مراحل احداث پروژه یا در محل وقوع سیلاب یا بهمن نباشد) ساختمان ایستگاه را با توجه به استانداردهای نشریه شماره ۱-۱۱۹ (دستورالعمل های همسان نقشه برداری) در آن محل احداث می شوند.
- تعیین موقعیت مسطحاتی و ارتفاعی ایستگاه های شبکه و سرشکنی خطاها
- به صورت خلاصه شبکه ژئودزی شامل نقاطی است که دارای موقعیت جغرافیایی دقیق نسبت به یکدیگر و شبکه مختصاتی مرجع هستند (شکل ۶-۱). این موقعیت جغرافیایی یا مختصات با روش هایی همچون مشاهدات با دستگاه های گیرنده ماهواره ای (GPS/GNSS) یا مشاهدات طول و زاویه با دوربین های نقشه برداری نسبت به نقاط مرجع سازمان نقشه برداری (هر شبکه مختصاتی مرجع در منطقه کاری) محاسبه می شود. برای احداث پروژه های عمرانی نیاز به شبکه دقیق و ماندگار در محوطه پروژه می باشد. به نحوی که اگر قسمتی یا تعدادی از ایستگاه های پروژه بنا به هر دلیلی دچار نقص شد یا از بین رفت، بتوان مجدداً در آن محل شبکه را احیا کرد. معمولاً شبکه ایستگاه های مرجع سازمان نقشه برداری در نقاطی ساخته شده اند که از ماندگاری بالایی برخوردار بوده و در صورت نیاز به ایستگاه جدید، می توان با انتقال مختصات از نقاط این شبکه، به موقعیت مورد نیاز خود دست پیدا کرد. لذا بهتر است تا جای ممکن، شبکه مرجع پروژه، شبکه سازمان نقشه برداری قرار داده شود.

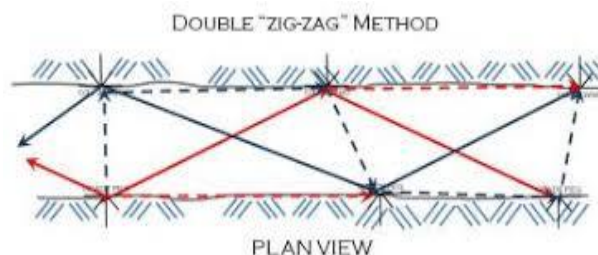
در هر حال پس از احداث ساختمان ایستگاه‌ها در دهانه‌های ورودی و خروجی (ادیت و چاه دسترسی به تونل)، با استفاده از روش تعیین موقعیت ماهواره‌ای GNSS مشاهدات لازم به روش Static در شبکه صورت پذیرفته و سپس در نرم‌افزارهای پس پردازش محاسبه و برآورد خطا می‌شود. لازمه این مرحله برخورداری از دانش و تجربه کار با دستگاه‌های گیرنده ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای پس پردازش (همچون Leica Geo Office) می‌باشد.



شکل ۶-۱- مثالی از چگونگی توزیع نقاط شبکه ژئودتیک مرجع، نقاط شبکه پرتال و نقاط شبکه داخل تونل نسبت به یکدیگر

• انتقال مختصات از شبکه ایستگاه‌های پیلار به داخل تونل و انتقال آن در طول تونل

اگر به لحاظ اهمیت و حساسیت، مراحل مختلف عملیات نقشه‌برداری در پروژه تونل رتبه‌بندی شود، این مرحله از مهم‌ترین مراحل کار است (شکل ۶-۲). چراکه انتقال مختصات مناسب در طول شبکه داخل تونل، نیازمند انجام عملیات‌های مشاهداتی دقیق و محاسبات صحیح برای برآورد درست از خطاها و سرشکنی آن در شبکه می‌باشد. برای حصول این مهم از پارامترهای مهمی همچون قرائت‌های صحیح و با تعداد کوپل کافی (قرائت طول‌ها و زوایای شبکه به‌نحوی که بتوان در تشکیل شبکه‌ای که به لحاظ هندسی مستحکم است از آن‌ها استفاده کرد)، تسلط کافی بر روش‌ها و روند محاسبات مختصات، برنامه‌نویسی‌های لازم برای محاسبات و همچنین نرم‌افزارهای برآورد ضرایب مقیاس، خطا و سرشکنی آن‌ها، تجربه و تخصص لازم برای کار با ابزارهای مشاهده، استفاده از ابزارهایی با دقت کافی (برای مثال توتال استیشن Leica TS09 با دقت زاویه ۱") لوازم جانبی مناسب و سالم که به جلوگیری از ورود خطا به مشاهدات کمک بیشتری کنند و همچنین کالیبراسیون و سرویس دوره‌ای تجهیزات نقشه‌برداری (هر ۳ یا ۶ ماه یک‌بار)، ساخت پیلارهای تونل در موقعیتی که دستخوش تغییر و آسیب نشوند و در پایان انجام مشاهدات دوره‌ای از مختصات ایستگاه‌ها در طول شبکه جهت کنترل خطا در اثر تغییرات و آسیب به ایستگاه‌ها، می‌توان نام برد.



شکل ۶-۲- نمونه‌ای از روش‌های قرائت طول و زوایا برای انتقال مختصات در طول شبکه داخل تونل (روش زیگزآگ)

دلیل تاکید بسیار بر مراحل انتقال مختصات به این جهت است که حساس‌ترین مرحله عملیات نقشه‌برداری تونل این مرحله بوده و باقی عملیات‌های اجرایی نقشه‌برداری نسبت به آن، از روند ساده‌تر و قابلیت کنترل بیشتری برخوردار هستند.

۶-۳-۳- فاز سوم نقشه‌برداری

فاز سوم به عملیات اجرایی نقشه‌برداری در طول احداث تونل شرح زیر اختصاص داده می‌شود:

- پیاده‌سازی محل حفاری پرتال‌ها و خط کنتور سینه‌کار تونل
در این مرحله با توجه به موقعیت پلان مسیر و مقاطع عرضی طرح اقدام به پیاده‌سازی ترانسه‌های پرتال و مقاطع حفاری تونل می‌گردد. خط کنتور و الگوی چال‌های آتشکاری معمولاً توسط تیم دفتر فنی تهیه‌شده و مهندسین نقشه‌بردار آن را پیاده‌سازی می‌کنند که ابزار برداشت و پیاده‌سازی دوربین توتال استیشن است. در مواقعی که حفاری به روش مکانیزه (TBM) انجام می‌شود، عملیات هدایت ماشین حفار به‌صورت ترکیبی توسط مشاهدات دوربین توتال استیشن موتورایز و مرکز کنترل ماشین حفار صورت می‌پذیرد.
- برداشت مقاطع حفاری‌شده و کنترل میزان اضافه یا کسر حفاری با توجه به تیپ حفاری
پس از انجام عملیات آتشکاری تیم نقشه‌برداری برای برداشت وضع موجود به محل مراجعه می‌کند و با برداشت مقاطع حفاری‌شده به دیتای موردنیاز برای تهیه نقشه‌های ازبیل و محاسبات احجام دست می‌یابند. از دیگر عملیات اجرایی پس از عملیات حفاری، کنترل مقاطع و مقایسه با تیپ طرح است که با توجه به اختلاف وضع موجود و تیپ طرح، تیم نقشه‌برداری این مقدار را در محل محاسبه و علامت‌گذاری کرده و به مباشر اکیپ اجرای حفاری، مقدار کسر یا اضافه حفاری را اعلام می‌کند تا اصلاح شوند.
- پیاده‌سازی لاینینگ و تاسیسات تونل
پس از اتمام حفاری هنگام احداث سازه لاینینگ، برای پیاده‌سازی و کنترل سازه نیاز است تیم نقشه‌برداری طبق نقشه مقطع لاینینگ، موقعیت شبکه آرماتوربندی و قالب‌بندی را در محل احداث پیاده‌سازی و کنترل نماید. همچنین تاسیساتی که در تونل احداث می‌شوند نیز به همین ترتیب دارای نقشه‌ای هستند که طبق آن به احداث تاسیسات اقدام می‌شود.
- ترسیم مقاطع و تهیه ازبیل
اطلاعات برداشتی با توتال استیشن شامل نقاطی است که با ورود آن‌ها در محیط نرم‌افزارهای مربوطه مانند AutoCAD Civil 3D قابلیت ترسیم و محاسبات موردنیاز را پیدا می‌کند.
- پایش و مانیتورینگ تونل پس از احداث برای رفتار سنجی
یکی از عملیات‌های دقیقی که در هنگام یا پس از احداث تونل بنا به درخواست کارفرما قابل انجام است، عملیات رفتار سنجی یا پایش سازه است که با هدف بررسی و برآورد حرکات سازه انجام می‌شود. بدین صورت که تارگت‌های

استانداردی (که معمولاً به صورت پیش ساخته در طرح‌ها و انواع مختلف در فروشگاه‌های تجهیزات نقشه‌برداری وجود دارد)، در مقاطع موردنظر نصب شده و با انجام قرائت‌های دوره‌ای و مقایسه موقعیت جدید با موقعیت قبلی تارگت در شبکه مختصاتی تونل، در صورت تغییر موقعیت، جهت و مقدار آن برآورد شده و به مراتب بعدی اعلام می‌گردد. لازمه ایجاد این سیستم حفظ شبکه مختصاتی داخل تونل و قرائت‌های دوره‌ای روی شبکه و کنترل مختصات آن با ایستگاه‌های مرجع موجود در منطقه کاری است تا بتوان موقعیت خود ایستگاه‌ها را هم پایش کرد و برآورد درست و دقیقی از نتایج مشاهدات به دست آید.

۶-۴- برنامه‌ریزی تاسیسات موقت

- ۱) تاسیسات موقت احداث تونل باید با در نظر گرفتن مقیاس پروژه، روش‌های ساخت، شرایط زمین، دوره ساخت و سایر پارامترها، ایمن و دارای کارکرد و ظرفیت مناسب باشد تا برنامه زمان‌بندی به‌درستی اجرا شود.
- ۲) تاسیسات موقت برای ساخت تونل باید سلامت و ایمنی کارگران مربوطه را تضمین و محیط کاری مناسبی را فراهم کند و از طرفی قوانین و مقررات مربوطه را رعایت و محیط‌زیست را حفظ کند.

۶-۵- پرتال‌ها و زون‌های پرتالی

برای زون‌های پرتالی و ساخت پرتال‌ها باتوجه به مطالب بحث شده در فصل قبل باید شرایط طراحی، وضعیت زمین و محیط اطراف در نظر گرفته شود تا در نهایت روش ساخت مناسبی انتخاب شود که زمین اطراف پرتال تونل را تضعیف نکند.

پدیده‌هایی که ممکن است در حین ساخت پرتال رخ دهند شامل زمین لغزش، شکست شیب^۱، فشار نامتقارن زمین، ریزش تاج و نشست سطح زمین است؛ بنابراین پیش از ساخت پرتال باید شرایط توپوگرافی، زمین شناسی و محیط اطراف به طور کامل بررسی شود و در صورت هرگونه مغایرت با شرایط طراحی، بررسی‌های تکمیلی، مطالعات دقیق برای یافتن روش ساخت مناسب و اقدامات اصلاحی لازم قبل از ساخت انجام شود. در جدول ۶-۱ مخاطرات احتمالی در پرتال به همراه ملاحظات طراحی آن ارائه شده است.

¹ Slope failure

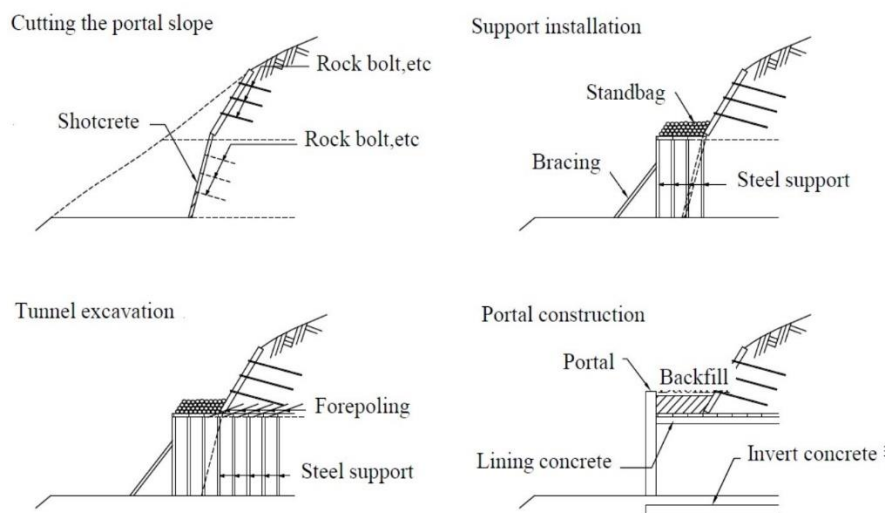
جدول ۶-۱- مخاطرات احتمالی در پرتال به همراه ملاحظات طراحی آن

مسئله	توضیحات
ناپایداری شیب یا زمین لغزش	اجرای تونل در محدوده پرتال در برخی مواقع با ناپایداری شیب و یا زمین لغزش همراه می شود. این امر می تواند در اثر سست شدگی ناشی از حفاری تونل و یا حفر ترانشه پرتال باشد. در صورت وجود پتانسیل ناپایداری شیب و یا زمین لغزش ناشی از حفاری تونل، باید تمهیداتی را جهت نگهداری شیب به هنگام پیشروی تونل بکار برد.
فشار نامتقارن	بسته به موقعیت و ارتباط تونل و ترانشه ممکن است یک فشار نامتقارن بر مقطع تونل وارد شده و در نتیجه تنش زیادی در سازه تونل ایجاد شود. تا زمانی که تونل ناپایدار است، تمهیداتی باید به منظور ایجاد توازن در فشار زمین با استفاده از پر کردن و یا حفاری ترانشه صورت گیرد.
کافی نبودن ظرفیت باربری زمین	در محدوده پرتال، در جاییکه عمق روباره کم است برخی مواقع ممکن است کل بار روباره بر تونل وارد شود. از آنجاییکه مصالح پرتال متشکل از نهشته های تحکیم نیافته و یا زون هوازده می باشد، میزان تغییر شکل ها و نشست ها به دلیل ظرفیت باربری کم زمین زیاد خواهد بود. بنابراین طراحی پرتال و روش اجرای تونل باید بر اساس ظرفیت باربری مورد نیاز زمین انجام شود.
ریزش جبهه کار حفاری	در محدوده پرتال، زمین اغلب ضعیف و سست می باشد. حتی در شرایطی که زمین متشکل از سنگ سخت باشد، وجود گسل ها و یا زون های خرد شده ممکن است منجر به توسعه شکستگی ها و ناپایداری جبهه کار حفار شود. بنابراین در شرایطی که جبهه کار در زمان حفاری پایدار نیست، باید از روش حفاری خاص و یا روش های کمکی جهت پیشگیری از ریزش جبهه کار حفاری بهره جست.
نشست سطحی زمین	در محدوده پرتال، روباره کم، ظرفیت باربری ناکافی زمین و زمان ایستایی ناکافی جبهه کار حفاری ممکن است منجر به اثرات نامطلوبی در اثر نشست های ایجاد شده در سطح زمین شود. در صورت وجود سازه های دیگر در سطح زمین و اهمیت کنترل نشست سطحی، به کارگیری تمهیدات مناسب و روش های کمکی جهت پیشگیری از مشکلات بعدی ضروری است.
سقوط سنگ، جریان آوار و بهمین	موقعیت پرتال باید به نحوی انتخاب گردد تا از وقوع احتمالی سقوط سنگ، جریان آوار و یا بهمین در امان باشد. در صورت عدم امکان چنین جانمایی، باید تمهیدات مناسبی در برابر این مشکلات اتخاذ گردد.
سازه های مجاور	اثر حفاری تونل بر سازه های مجاور نظیر منازل مسکونی، برج های فولادی، جاده ها و ریل های راه آهن و نیز سر و صدا و گازهای خروجی از تونل به هنگام بهره برداری باید مورد بررسی قرار گیرد.

۶-۵-۱- ساخت نواحی پرتال

در شکل ۶-۳ یکی از روش های رایج شروع حفاری در نواحی پرتال تونل ارائه شده است که برش شیب با انجام تحکیمات در بالای پرتال همراه است. همانطور که در فصل طراحی بحث شد در شروع حفاری پرتال ها باید حداقل امکان از برش شیب ها جهت جلوگیری از سست شدن زمین پرهیز شود تا شیب پرتال تثبیت و ساخت و ساز تسهیل شود. از این رو در صورت امکان بدون برش شیب، قاب گذاری قبل از شیب شروع شده و با پیشروی و قاب گذاری گام به گام ساخت تونل شروع شود. در این شرایط از آنجا که کمترین دست خوردگی در زمین ایجاد شده نیاز به تحکیمات در بالای پرتال به حداقل می رسد. در صورت نیاز، شیب می تواند با شاتکریت و راکبوتل تقویت شود. در شکل ۶-۴ روش های مختلف ساخت پرتال با انجام تحکیمات در ناحیه پرتال و بدون تحکیمات نشان داده شده است.

بارهایی که در جهت محوری تونل عمل می‌کنند تمایل دارند تا سیستم نگهداری را دچار پیچش یا شکست کنند برای جلوگیری از چنین مشکلاتی باید اقدامات موثری انجام شود. جریان آب سطحی و نفوذ آب در اطراف پرتال باید تا حد امکان حذف و ترجیحا از ساخت در فصل بارندگی و هنگام ذوب شدن برف خودداری شود.



شکل ۶-۳- ترتیب رایج ساخت نواحی پرتال



(ب)



(الف)

شکل ۶-۴- ساخت پرتال در شرایط مختلف (الف) بدون انجام تحکیمات در ناحیه پرتال (ب) انجام تحکیمات مختلف (راکبوت، مش و شاتکریت)

در صورت بروز حادثه در نواحی پرتال باید اقدامات لازم بلافاصله انجام و در حین ساخت پرتال رفتار زمین اطراف و شرایط غیرعادی سازه‌های مجاور نظارت و ارزیابی شود. شرایط غیرعادی باید در اسرع وقت با نصب سیستم‌های هشدار شناسایی شوند.

زمانی که لغزش زمین، شکست شیب یا ریزش سنگ پیش بینی می‌شود مشاهدات و اندازه‌گیری‌های زیر علاوه بر مشاهدات معمولی پرتال ضروری است.

- در سطح: مشاهده سطح، اندازه گیری میزان بارندگی، اندازه گیری جابه جایی سطحی، اندازه گیری نشست سطح و غیره.
 - در تونل: اندازه گیری جابه جایی مطلق مانند همگرایی و غیره.
 - در زمین: اندازه گیری نشست و جابه جایی زمین، مشاهده سطح آب زیرزمینی، اندازه گیری جابه جایی صفحه لغزش زمین و غیره.
- باید از قبل یک سیستم اقدامات اضطراری در برابر ناهنجاری ها و رفتارهای غیرعادی نواحی اطراف ایجاد شود. هنگامی که یک حادثه غیرعادی رخ می دهد پایداری تونل و زمین باید به سرعت با بررسی سیستم نگهداری و لاینینگ، جبهه کار، جریان آب و تغییرات زمین ارزیابی شود تا بلافاصله اقدامات اضطراری برای بهبود شرایط انجام شود. همچنین رابطه بین اقدامات اضطراری و اقدامات دائمی باید به دقت مطالعه شود.
- اقدامات اضطراری انجام شده در داخل تونل عبارتند از:
- شاتکریت و راکبولت در جبهه کار و ایجاد تکیه گاه برای جبهه کار^۱
 - شاتکریت تقویت شده و راکبولت اضافی
 - بسته شدن موقت هدینگ^۲ (کفبند موقت)، نگهداری موقت با پایه و غیره.
- اقدامات اضطراری در خارج از تونل عبارتند از:
- هدایت آب باران و آب های سطحی به خارج از تونل برای حذف آب های زیرزمینی
 - ایجاد تکیه گاه^۳، خاک ریزی اضطراری^۴ (برش خاک)
- زمانی که لغزش زمین پیش بینی می شود خارج کردن کارگران، جلوگیری از وقوع فاجعه ثانویه و فاجعه ای که اشخاص ثالث را درگیر می کند با استفاده از کنترل ترافیک و غیره ضروری است.

۶-۶- حفاری

مقاطع مختلف حفاری شامل حفر تمام مقطع، حفر تمام مقطع با بنچ کمکی، روش برش بنچ، روش دیاگرام مرکزی و پیشروی دریافت جانبی می باشد (شکل ۶-۵). در صورتی که بعد از حفاری تغییر شکل یا نشست زمین محتمل باشد باید بسته شدن زودهنگام سطح مقطع^۵ با روش برش مینی بنچ و کفبند موقتی و اولیه در نظر گرفته شود.

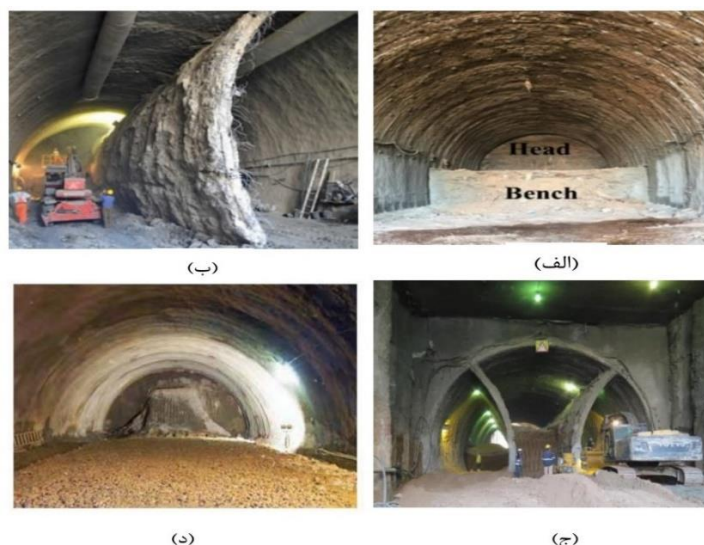
¹ face counterweight fill

² Temporary closure of top heading

³ counterweight fill

⁴ emergency soil disposal

⁵ early closure of excavation cross section



شکل ۶-۵- الف) اجرای تونل به روش طاق و پاتاق (پلکانی)، ب) روش دیافراگم میانی ج) روش دریافت های جانبی، د) روش برش هسته مرکزی

روش های مختلف حفاری در تونل شامل چال زنی آتشکاری، حفاری مکانیزه و حفاری دستی است. روش چال زنی آتشکاری معمولاً برای سنگ های سخت تا متوسط به کار برده می شود و از رایج ترین روش های حفاری در تونل های راه می باشد. در جاهایی که تاسیسات مهم یا سازه ها در همسایگی تونل وجود دارند تا حد امکان باید از روش های آتشکاری کنترل شده مانند پیش شکافی و انفجار آرام استفاده شود تا لرزش، آسیب و سروصدا به حداقل برسد. عوامل موثر بر حفر تونل با روش چال زنی و آتشکاری به شرح ذیل هستند:

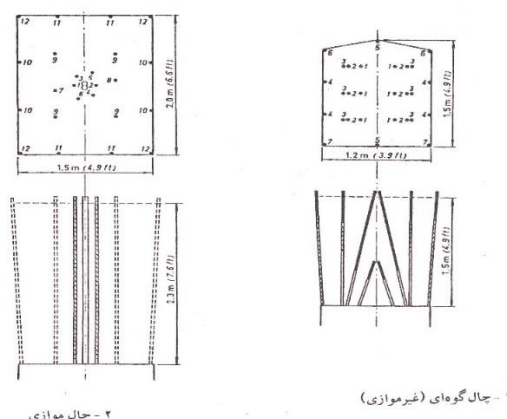
۶-۶-۱- آرایش چال ها در روش آتشکاری

الگوی انفجاری در تونل ها به ابعاد تونل، مقاومت سنگ ها، ضخامت فشنگ های مواد منفجره، قدرت مواد منفجره و عواملی نظیر آن ها بستگی دارد. همانگونه که در شکل ۶-۶ مشاهده می شود چال ها در مرکز مقطع به شکل گوه ای (V) یا موازی و در اطراف محیط تونل به صورت موازی حفر می گردند. چال های انفجاری عملاً به چند گروه تقسیم می شوند (شکل ۶-۷):

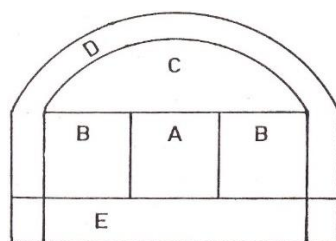
- A- بخش مرکزی یا برش^۱ که مهمترین نقش را در عملکرد سایر چال ها و پیشروی تونل دارد.
- B- بخش پیشروی که افقی هستند و سطح آزاد طرف راست یا چپ آن ها قرار دارد.
- C- بخش پیشروی که سطح آزاد در پایین چال قرار دارد.
- D- بخش دیوار و سقف تونل

^۱ Cut

E- بخش کف تونل

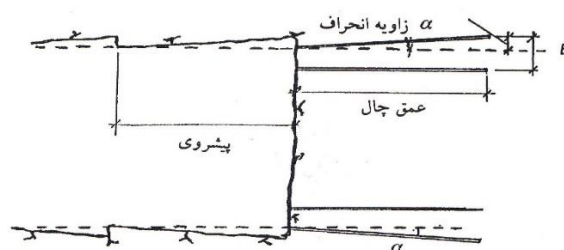


شکل ۶-۶- حفر تونل با چال موازی و غیرموازی



شکل ۶-۷- بخش های مختلف مقطع تونل براساس حفاری و انفجار

باتوجه به اینکه دستگاه حفاری نمی‌تواند چال‌های کف، کناری و سقف را درست از منتهی الیه تونل حفاری کند، نقطه شروع حفر این چال‌ها کمی از جدار تونل فاصله دارد و برای اینکه سطح مقطع تونل هر بار کوچکتر نشود راستای چال مقداری به سمت اطراف جدار منحرف می‌شود و مقدار این انحراف تابع نوع دستگاه چال‌زنی و برابر ۳ تا ۱۲ سانتی متر در هر نوبت چال‌زنی می‌باشد، لذا مقطع تونل‌ها عملاً مطابق شکل ۶-۸ می‌باشد. زاویه‌ای که بین راستای چال کناری و محور تونل وجود دارد زاویه انحراف چال‌های کناری نامیده می‌شود و مقدار آن به طور متوسط سه درجه می‌باشد.



شکل ۶-۸- زاویه انحراف چال‌ها

۶-۶-۲- حفر چال

حفر چال با روش‌های چالزنی دورانی یا ضربه‌ای و با استفاده از نیروی محرکه هوای فشرده یا الکتریسته انجام می‌گیرد. مصرف انرژی در چال‌زن‌های هیدرولیکی که با موتور برقی کار می‌کنند $\frac{1}{3}$ مصرف انرژی چال‌زن‌های هوای فشرده است اما ایمنی چال‌زن هوای فشرده بیش از چال‌زنی برقی می‌باشد. برای جلوگیری از ایجاد گرد و خاک می‌توان به کمک آب، خرده ریزه‌های حفاری را در حین حفر چال از آن خارج کرد.

برای حفر چال، بسته به مساحت مقطع تونل می‌توان از پرفوراتور دستی، پرفراتور مجهز به پایه و یا جامبوه‌های چالزنی استفاده کرد. جامبوها قادرند تعدادی چال را همزمان حفر کنند، لذا برای حفر چال در تونل‌های بزرگ مقطع مقرون به صرفه هستند.

صحت چالزنی نقش مهمی در بهبود کیفیت حفر تونل و کاهش اضافه حفاری دارد. دستگاه‌های چالزنی جدید به وسیله کامپیوتر کنترل و هدایت می‌شوند و این امر موجب حذف خطاهای انسانی در آرایش و حفظ امتداد چال‌ها می‌گردد. در چالزنی دستی صحت عمل بستگی به مهارت حفار دارد اما در چال‌زنی اتوماتیک طرح چال شامل آرایش، طول، شیب و جهت هر چال در برنامه نرم افزار محاسبه و توسط کنترل کامپیوتری به جامبوها ابلاغ می‌شود و حفار در صورت نیاز در عملیات دخالت می‌کند. در چال‌زنی اتوماتیک دستگاه حفر چال به کمک اشعه لیزر در وضعیت صحیح قرار می‌گیرد و چال‌ها در امتداد مورد نظر حفر می‌شوند.

۶-۶-۳- خرج گذاری

عملیات خرج گذاری به معنی قرار دادن مواد منفجره در داخل چال‌های حفر شده می‌باشد. این عملیات طی مراحل زیر انجام می‌شود:

- اتصال چاشنی به اولین یا آخرین خرج ورودی به چال
- قرار دادن خرج در داخل چال
- سمبه زدن به وسیله چوب باریک‌تر از قطر چال برای اطمینان از تراکم خرج‌ها و یا خرج گذاری با دستگاه‌های خرج گذار هوای فشرده
- بستن در چال با مخلوطی از گل رس مرطوب با ماسه که در داخل یک لفافه کاغذی پیچیده شده و کوبیدن و سمبه زدن تا حصول اطمینان از بسته شدن کامل دهانه چال

۶-۶-۴- عملیات انفجار

انفجار شامل اتصال سیم‌های چاشنی به صورت متوالی و اتصال دو سر سیم انتهایی به ماشین آتش‌کن می‌باشد. البته قبل از عمل انفجار مقدار مقاومت اتصالات سیم‌ها باید به وسیله اهم‌متر اندازه‌گیری شود و چنانچه مقاومت خوانده

شده از مقدار مقاومت محاسبه گردیده خیلی بیشتر یا خیلی کمتر باشد و یا مقدار مقاومت برابر بینهایت نشان داده شود باید کلیه سیم‌های رابط مجدداً بازدید گردند، چراکه احتمال پارگی سیم‌ها وجود دارد سپس با رعایت کلیه نکات ایمنی عمل انفجار توسط آشکار صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که معمولاً بعد از انفجار ورود بلافاصله به داخل تونل به علت گازها و گرد و غبار ناشی از انفجار مجاز نیست و باید حداقل ۱۰ تا ۳۰ دقیقه تهویه صورت گیرد. همچنین قبل از شروع عملیات مرحله بعد، کنترل ته چال‌های مانده به وسیله آشکار از ضروریات و در زمره نکات ایمنی می‌باشد.

مصرف مواد منفجره در حفر تونل از 0.9 Kg/m^3 در تونل‌های با مقاطع بزرگ تا $3/6 \text{ Kg/m}^3$ در تونل‌های با مقاطع کوچک، تغییر می‌کند. در حفر تونل با مواد منفجره سه نکته اساسی مورد نظر است:

۱- پیشروی

۲- کاهش اضافه حفاری و شکستگی توده سنگ برجا

۳- تنظیم انفجار به نحوی که لرزش زمین کمتر از میزان مجاز باشد.

مقدار پیشروی تابع ابعاد تونل، نوع سنگ، ابزارهای حفر چال و دقت در حفر چال می‌باشد. در تونل‌های کوچک مقطع پیشروی 0.6 تا 1.2 متر و در تونل‌های بزرگ مقطع تا ۵ متر می‌رسد.

اضافه حفاری را می‌توان با انفجارهای کنترل شده نظیر پیش‌شکافی و انفجار آرام کنترل کرد اما روش انفجار آرام مناسب‌تر از روش پیش‌شکافی است.

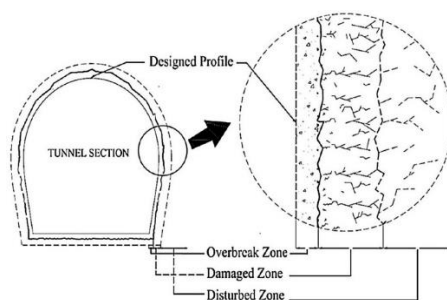
بیشتر لرزش زمین در انفجار تونلی ناشی از انفجار چال‌های برش است، زیرا در چال‌های برش خرج ویژه بیشتر از سایر چال‌های تونل است و تنها یک سطح آزاد وجود دارد.

۶-۵-۶- اضافه حفاری

اضافه حفاری^۱ (بیش شکافی) به عنوان درصد افزایش حجم واقعی نسبت به مشخصات طراحی شده در هر گام حفاری مطرح می‌شود که در بعضی موارد هزینه پروژه را تا ۱۵ درصد افزایش داده است (شکل ۶-۹). عوامل تاثیرگذار بر بیش شکافی و کم شکافی به دو گروه تقسیم بندی می‌شوند:

گروه اول عوامل زمین شناسی شامل جهت داری و فاصله داری درزه‌ها، پرشدگی، هوازدگی، مقاومت سنگ و وضعیت تنش های زمین می‌باشد. گروه دوم عوامل انفجار شامل نوع ماده منفجره، خرج ویژه، زمان تاخیر، الگوی چال‌های محیطی، انحراف حفاری، طول و قطر چال انفجاری و قطر چال‌های برش است.

¹ Overbreak



شکل ۶-۹- نواحی آسیب و اضافه حفاری اطراف چال انفجاری

طراحی درست انفجار برای کنترل اضافه حفاری و کاهش نیاز به سیستم نگهداری ضروری است. یکی از پارامترهای مهم، خرج ویژه چال‌های محیطی است. مثال‌هایی از الگوی انفجار چال‌های محیطی برای توده سنگ‌های مختلف باتوجه به مطالعات انجام شده در جدول ۶-۲ ارائه شده است.

جدول ۶-۲- طراحی الگوی انفجاری برای چال‌های محیطی

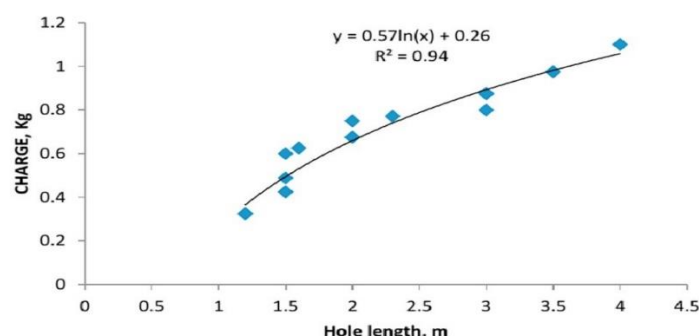
نوع چال	RMR	<۲۰	۴۰-۲۰	۶۰-۴۱	۸۰-۶۱	۱۰۰-۸۱
چال‌های محیطی	فاصله داری ^۱ (متر)	۰/۵ - ۰/۵۵	۰/۵۵ - ۰/۶	۰/۶ - ۰/۶۵	۰/۶۵ - ۰/۷	ماکزیمم ۰/۷۵
	بارسنگ ^۲ (متر)	۰/۶۵	۰/۷	۰/۷۵	۰/۸۵	ماکزیمم ۰/۹
	نوع سنگ	نرم		متوسط		سخت
	فاصله داری (متر)	$۱۴\varphi_h$		$۱۵\varphi_h$		$۱۶\varphi_h$
	بارسنگ (متر)	فاصله داری × ۱/۲		فاصله داری × ۱/۲		فاصله داری × ۱/۲

— φ_h قطر چال انفجاری بر حسب (متر)

خرج گذاری چال‌های محیطی نیز از دیگر پارامترهای تاثیر گذار بر اضافه حفاری می‌باشد. خرج گذاری بیش از اندازه چال‌های محیطی به سنگ‌های خارج از مقطع طراحی شده تونل آسیب وارد کرده و پایداری را دچار مشکل و منجر به افزایش زمان سیکل حفاری می‌شود. مثالی از مقدار ماده منفجره در برابر طول چال در شکل ۶-۱۰ نشان داده شده است.

¹ Spacing

² Burden



شکل ۶-۱۰- نمودار مقدار ماده منفجره مورد نیاز در چال انفجاری

میانگین اضافه حفاری و اطلاعات خرج گذاری جمع آوری شده از چهار تونل مختلف حفر شده در سنگ گرانیت با طبقه‌بندی مختلف در جدول ۶-۳ ارائه شده است.

جدول ۶-۳- خرج و اضافه حفاری در چهار تونل مختلف

اضافه حفاری (cm)	خرج (کیلوگرم)	طول چال (متر)	طبقه بندی RMR	Q
۱۴/۴	۰/۸۷۵	۳	۱۰۰-۸۱	۷۰
۱۴	۰/۹۷۵	۳/۵	۸۰-۶۱	۵۴
۱۴/۵	۰/۶۷۵	۲	۶۰-۴۰	۵/۹
۱۷/۳	۰/۴۲۵	۱/۵	۴۰-۲۱	۰/۶
۲۱/۳	۰/۳۲۵	۱/۲	< ۲۰	۰/۰۷

روش حفاری مکانیزه برای سنگ‌های متوسط تا نرم و زمین‌های خاکی استفاده می‌شود. از آنجایی که این روش نیاز به مواد منفجره ندارد صدا و لرزش بسیار کمتری ایجاد می‌کند و برای مناطقی که حفظ محیط زیست دغدغه اصلی است مناسب می‌باشد. هنگام انتخاب حفاری مکانیکی، مطالعه کامل سهولت کار و صرفه اقتصادی ضروری است. از آنجایی که حفاری دستی از نظر کارایی و ایمنی پایین‌تر است استفاده از آن به موارد خاص محدود می‌شود.

۶-۶-۶- اقدامات برای پایداری جبهه کار

- لق گیری سنگ سست بخش ضروری حفاری زیرزمینی ایمن است، اما کار چالش برانگیزی است. پس از مرحله حفاری و انفجار، برای جدا کردن سنگ‌های سست از سطح سنگ ناپایدار، برای ایمن ساختن تونل یا معدن برای کار در آن، پوسته ریزی لازم است.

- لق گیری می‌تواند به صورت دستی یا مکانیکی انجام شود، اما لق گیری دستی نا امن، غیرمولد و غیراقتصادی است. ثابت شده است که مکانیزاسیون کیفیت لق گیری و سطح ایمنی، بهره‌وری و اثربخشی را در کل فرآیند حفاری بهبود می‌بخشد.

- بسته به نوع و شرایط سنگ، انواع مختلفی از روش های پوسته ریزی باید اجرا شود. در روشهای مدرن از چکش های ضربه ای هیدرولیک، چنگک ها و چنگال های خراش دهنده و برش دهنده ها و در روش سنتی با استفاده از بالابر و دیلم لق گیری، توسط کارگر استفاده میگردد

پیش شرط حفاری تونل، پایداری جبهه کار تا زمان نصب سیستم نگهداری اولیه است. اگر جبهه کار تا زمان تکمیل نصب سیستم نگهداری اولیه پایدار نباشد اقدامات پایدارسازی جبهه کار مانند کوتاه کردن گام حفاری، شاتکریت جبهه کار، راکبوت تاج، کف و جبهه کار و در مواردی فورپولینگ لازم است.

۶-۷- اضافه حفاری

در زمین هایی که ناپایداری جبهه کار و در نتیجه اضافه حفاری پیش بینی می شود ممکن است از روش های کمکی مانند فورپولینگ استفاده شود.

برای به حداقل رساندن بیش شکافی در روش چال زنی آشکاری همانطور که اشاره شد باید از تجهیزات حفاری که بتواند دقت حفاری را تضمین کند استفاده کرد همچنین روش های مناسبی مانند انفجار آرام را نیز می توان به کاربرد. در حفاری مکانیزه، کارکنان باید به اندازه کافی مهارت داشته باشند تا از اضافه حفاری جلوگیری کنند. اخیراً از تکنیک های پیشرفته ای برای نقشه برداری و مدیریت بیش شکافی مانند سیستم علامت گذاری مقطع^۱ و ابزارهای اندازه گیری مقطع غیر منشوری^۲ استفاده شده است.

۶-۸- زهکشی

از مرحله اول حفاری تجهیزات زهکشی باید در صورت نیاز نصب شوند. اگر زهکشی داخل تونل نیاز به پمپاژ دارد باید پمپ با ظرفیت و هد مناسب انتخاب شود.

۶-۷- حمل

۶-۷-۱- برنامه حمل

(۱) برنامه حمل باید باتوجه به شرایط زمین، اندازه سطح مقطع، طول و شیب تونل، روش حفاری، روش پیشروی و غیره برنامه ریزی شود. این طرح همچنین باید برای فاصله از محل دمپ، شرایط مسیر و سیستم دریافت در محل دمپ مناسب باشد.

(۲) اگر مصالح حفر شده حاوی فلزات سنگین باشد باید اقدامات مناسب در نظر گرفته شود.

¹ cross section marking systems

² non-prism section measuring instruments

۶-۷-۲- ماشین‌های حمل

- (۱) ماشین‌های حمل: بسیاری از ماشین‌ها از موتور دیزلی یا اخیراً الکتریکی استفاده می‌کنند. در صورت استفاده از ماشین دیزلی باید تهویه مناسب برای رقیق کردن گازهای خروجی در نظر گرفته شود.
- همچنین سه روش حمل‌ونقل شامل جاده‌ای، ریلی و زنجیری وجود دارد. در صورت حمل‌ونقل ریلی، گاهی اوقات از لودر ریلی یا نوار نقاله به‌عنوان وسایل کمکی بارگیری استفاده می‌شود. از لودرهای دمپ کناری^۱ با توجه به محدودیت فضا در تونل‌ها برای بارگیری می‌توان استفاده کرد.
- (۲) حمل مصالح: روش‌های انتقال مصالح حفاری در بی

جدول ۶-۴ ارائه شده است. در حمل‌ونقل جاده‌ای از کامیون‌های کمپرسی باربری و کامیون‌های کمپرسی بزرگ و در حمل‌ونقل ریلی از ماشین‌های شاتل^۲ استفاده می‌شود. از انواع دیگر روش‌ها می‌توان به روش کانتینری^۳، روش نوار نقاله و روش کپسول^۴ اشاره کرد. هنگام انتخاب ماشین حمل، اندازه و تعداد آن‌ها باید متناسب با سطح مقطع تونل و ظرفیت بارگیری باشد.

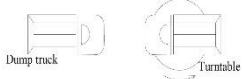
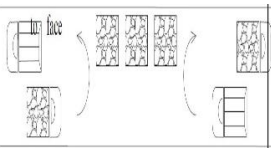
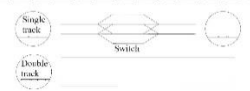
¹ Side dump

² Shuttle cars

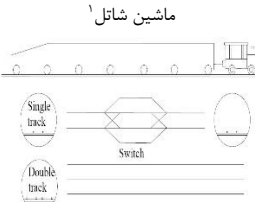
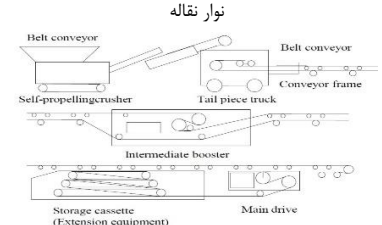
³ container method

⁴ (capsule method)

جدول ۶-۴- مقایسه روش‌های حمل در تونل

تجهیزات	محیط زیست در تونل ^۱	سهولت کار	نگاه کلی	سیستم	
ممکن است برای تغییر جهت و چرخش کمپرسی ها به یک صفحه گردان ^۳ نیاز باشد.	از آنجایی که از موتور احتراق ^۲ داخلی استفاده می شود باید تهویه کافی در تونل فراهم شود.	نوع کانتینرهای باربری	جهت انتقال مصالح حفاری دامپ تراک توسط لودر حفاری در بارگیری و ... بارگیری	دامپ تراک 	حمل و نقل جاده ای
ممکن است به صفحه گردان برای تغییر جهت نیاز باشد.	مشابه بالا	مصالح به طور موقت در پشت جبهه کار قرار می‌گیرد و به زمان کمتری برای مدیریت در جبهه کار نیاز است.	به جای دامپ ترک ها کانتینرهای متعدد از نوع جداسدنی به طور موقت با هدف بازشدن زود هنگام جبهه کار استفاده می شود.	نوع کانتینر ^۴ 	
- تجهیزات راه آهن - بخش تغییر مسیر ^۵	استفاده از موتور های الکتریکی محیط داخل تونل را پاک نگه می دارد.	هنگامی که قطارها و تعداد زیادی ماشین استفاده می شوند باید به دقت مدیریت شوند.	مصالح حفاری توسط لودر بر روی واگن‌ها بارگیری و به خارج از تونل منتقل می شوند.	واگن 	حمل و نقل ریلی

¹ Environment in the tunnel² Internal combustion³ Turntable⁴ Container type⁵ Shunting

تجهیزات	محیط زیست در تونل ^۱	سهولت کار	نگاه کلی	سیستم
به مانند بالا	به مانند بالا	- به مانند بالا - بر خلاف واگن‌ها از آنجا که ماشین شاتل ظرفیت بالایی دارد بارگیری به ندرت متوقف می‌شود.	از ماشین شاتل به جای کامیون استفاده می‌شود. مصالح حفاری در انتهای ماشین شاتل بارگیری و توسط نوار نقاله زنجیری در کف ماشین به عقب منتقل می‌شود.	
- نوار نقاله - قاب نقاله - موتور - تجهیزات گسترش - طول - نوار نقاله - سنگ شکن	از آنجایی که از هیچ موتور احتراق داخلی استفاده نمی‌شود محیط داخل تونل می‌تواند پاک نگه داشته شود.	به همراه پیشروی جبهه کار، نوار نقاله اضافی، قاب نقاله ^۲ و محرکه تقویتی ^۳ لازم است.	پس از آنکه مصالح حفاری به موقعیت از پیش تعیین شده پش جبهه کار منتقل شد، با استفاده از یک نوار نقاله قابل گسترش به طور مستقیم و پیوسته به خارج از تونل منتقل می‌شود.	

۶-۸- تأسیسات حین ساخت

۶-۸-۱- روشنایی

برای ایمنی محل‌های کار مانند جبهه کار نیاز به نور کافی بیش از هفتاد لوکس است. همچنین برای عبور و مرور ایمن کارگران و کارکرد ایمن وسایل نقلیه لازم است مناطق پیاده‌رو روشن باشد. اگرچه تأمین نور یکنواخت در کل منطقه پیاده‌رو ممکن است دشوار باشد اما نور حداقل ۱۰ و متوسط ۲۰ لوکس در تاریک‌ترین مکان مناسب است.

۶-۸-۲- تهویه

به‌منظور اطمینان از محل کار ایمن و بهداشتی، باید تهویه مناسب در تونل‌ها جهت خارج کردن دود انفجار، گردوغبار و گازهای خروجی از موتورهای دیزلی فراهم شود. همچنین باید گازهای ساطع‌شده از زمین و کمبود اکسیژن کنترل شود تا در صورت لزوم تهویه و سایر اقدامات مناسب انجام شود. عواملی که باعث بدتر شدن شرایط کار در تونل می‌شوند به شرح زیر است:

^۱ Shuttle car

^۲ Conveyor frame

^۳ Booster drive

- گردوغبار یا دود انفجار تولیدشده در حین حفاری، انفجار، حمل و نقل و ...
- گازها و دود خروجی از موتورهای دیزلی
- گاز سمی از حلال‌های آلی^۱
- متان (CH_4) گاز سمی (مونوکسید کربن (CO) ، اکسید نیتروژن (NO_x) و کمبود اکسیژن
- دمای بالا، رطوبت بالا

در طرح تهویه باید با در نظر گرفتن کامل نتایج بررسی‌های اولیه، مقطع و طول تونل، نگهداری و لاینینگ، ماشین‌های مورد استفاده و برنامه کاری، تجهیزات مناسب انتخاب شود.

جدول ۶-۵ نرخ استاندارد انتشار گازهای سمی ناشی از انفجار را نشان می‌دهد.

جدول ۶-۵- نرخ انتشار گازهای سمی در هر کیلوگرم ماده منفجره

نرخ انتشار گازهای سمی*		ماده منفجره
اکسید نیتروژن (NO_x) (kg/m^3)	کربن مونو اکسید (CO) (kg/m^3)	
1.5×10^{-3}	8×10^{-3}	دینامیت
1.5×10^{-3}	5×10^{-3}	ماده منفجره اسلاری
2.5×10^{-3}	11×10^{-3}	دینامیت‌های دیگر
20×10^{-3}	30×10^{-3}	آنفو

* هنگامی که تنها یک ماده منفجره وجود دارد، غلظت مجاز روی $\text{CO} = 50 \text{ ppm}$ و $\text{NO}_x = 25 \text{ ppm}$ تنظیم می‌شود

میزان تهویه موردنیاز برای رقیق کردن گازهای خروجی ناشی از انفجار یا موتورهای دیزلی ماشین‌ها و گردوغبار تولیدشده در حین شاتکریت باید محاسبه شود. علاوه بر محاسبه میزان تهویه، تعیین قطر لوله و ظرفیت فن‌ها با در نظر گرفتن راندمان تهویه نیز در نظر گرفته شود.

در مناطق با شرایط تهویه ضعیف، کارگران ممکن است دچار مشکل شوند. کارکنان غیرضروری از ورود به مکان‌هایی که غلظت دی‌اکسید کربن بیش از $1/5\%$ یا غلظت اکسیژن کمتر از 18% یا غلظت سولفید هیدروژن بیش از 10 ppm است منع شوند. همچنین برای جلوگیری از اختلالات بهداشتی ناشی از گرما و رطوبت، دمای تونل باید زیر 37°C درجه سانتی‌گراد نگه داشته شود.

¹ organic solvents

۶-۹- سیستم نگهداری اولیه

سیستم نگهداری اولیه باید بلافاصله پس از حفاری جهت نگهداری زمین اطراف نصب شود. برای پایداری زمین، سیستم نگهداری باید تا حد امکان با زمین ترکیب^۱ یا با آن تماس مستقیم داشته باشد. همچنین توالی نصب سیستم نگهداری با توجه به شرایط زمین از اهمیت زیادی برخوردار است.

(۱) هنگام استفاده از شاتکریت همراه با سیستم نگهداری فولادی به عنوان نگهداری اولیه باید دقت شود تا تمام فضای پشت قاب فولادی با شاتکریت پر شود.

(۲) هنگام نصب سیستم نگهداری‌ها، توالی نصب باید به گونه‌ای باشد که عملکرد هر سیستم نگهداری به تنهایی مورد استفاده عملی قرار گیرد و درعین حال سیستم نگهداری کلی نیز با در نظر گرفتن شرایط زمین کارایی لازم را داشته باشد. به طور کلی سیستم نگهداری باید به ترتیب زیر نصب شوند:

- اگر شرایط زمین خوب باشد: (۱) شاتکریت (۲) راکبالت

- اگر شرایط زمین ضعیف باشد: (۱) شاتکریت اولیه (۲) نگهداری فولادی (۳) شاتکریت ثانویه (۴) راکبالت به ویژه برای به حداقل رساندن احتمال ریزش جبهه کار و کاهش ناحیه آسیب ناشی از حفاری در زمین ضعیف، شاتکریت لایه اول باید بلافاصله پس از حفاری پاشیده شود.

شرایط غیرعادی باید به سرعت با تقویت سیستم نگهداری همراه باشد. شاتکریت یا راکبالت اضافی برای مقابله با شرایط غیرعادی استفاده می‌شوند. با این وجود نگهداری فولادی نیز باید با توجه به شرایط تقویت شود. در صورتیکه تغییر شکل پیش‌بینی می‌شود، اقدامات متقابل باید از قبل در نظر گرفته شود و ماشین‌آلات و مواد برای تقویت آماده شوند (جدول ۶-۶).

در طول زمان لازم برای تعویض^۲ سیستم‌های نگهداری باید علل جابه‌جایی، شرایط زمین، ایمنی عملیات و جابه‌جایی پس از تعویض سیستم نگهداری در نظر گرفته شود. همچنین جایگزینی بهتر است پس از اتمام جابه‌جایی انجام شود. تعویض سیستم نگهداری باید با دقت و تا حد امکان در عرض‌های باریک انجام شود تا جبهه کار را در مراحل اولیه پایدار کند.

جدول ۶-۶- نمونه‌هایی از تقویت سیستم نگهداری‌ها، ماشین‌آلات و مواد برای تقویت

سیستم نگهداری	نمونه های تقویت
میل مهار	- راکبالت مکمل با همان طول معین
	- راکبالت‌های طویل
	- راکبالت‌های با اصطکاک (در صورت ورود حجم غیرعادی آب)

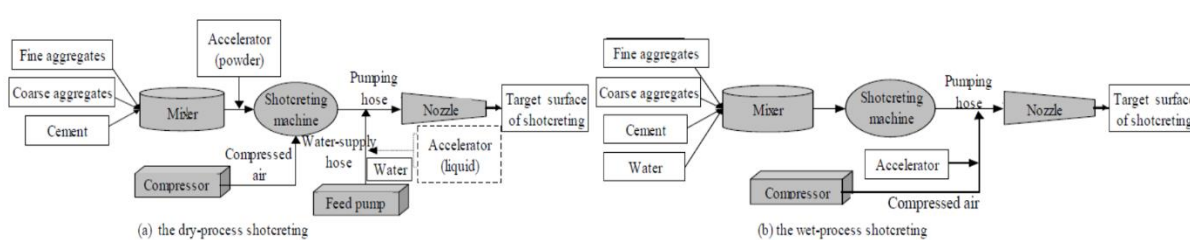
¹ fuse

² replacement

- راکبوت های خود حفار^۱ (به ویژه در چال های با زبری زیاد)	
- شاتکریت اضافی - سیم اضافی - شاتکریت الیافی - بتن پاشیده شده با مقاومت بالا	شاتکریت
- نگهداری فولادی اضافی - تغییر شکل مقطع نگهداری فولادی - نگهداری فولادی با پایه قاب^۲ (در صورت نشست شدید پایه های قاب) - استفاده از wall beam - کفبند فولادی^۳	نگهداری فولادی
- بهسازی زمین - بتن محافظ کف^۴ - پایه کناری^۵	سایر تقویت کننده ها
- میلگردهای تقویت کننده - داربست^۶ - Pillar support, sleeper saddle, etc -	تجهیزات دیگر

۶-۹-۱- شاتکریت

با توجه به روش های اختلاط دو نوع شاتکریت وجود دارد: شاتکریت تر و خشک. روش انتخاب شده به مزایا و معایب، مقیاس کار، حجم شاتکریت و غیره بستگی دارد. نمودار سیستماتیک شاتکریت تر و خشک در شکل ۶-۱ و ویژگی هر کدام از روش ها در جدول ۶-۷ ارائه شده است.



شکل ۶-۱۱- دیاگرام روش های شاتکریت

جدول ۶-۷- ویژگی های روش های شاتکریت

- ¹ Self drilling rock bolts
- ² wing ribs
- ³ Steel invert support
- ⁴ Foot protection concrete
- ⁵ Side pile
- ⁶ Scaffolding

فرآیند تر	فرآیند خشک	نوع فرآیند شاتکریت	
		نوع	
با بتن پایه^۱ تولید شده در کارخانه، مدیریتی معادل بتن معمولی امکان پذیر است.	- بسته به شرایط (خشک یا مرطوب) سطح هدف شاتکریت، نسبت آب به سیمان را می توان در قسمت نازل تغییر داد. - از آنجایی که نسبت آب به سیمان به مهارت اپراتور بستگی دارد اختلاف در طرح اختلاط ممکن است در برخی موارد بسیار متفاوت باشد. نرخ جریان آب را می توان برای محدود کردن نوسانات نسبت آب به سیمان کنترل کرد.	ویژگی های مربوط به برنامه ریزی طرح اختلاط	خصوصیات بتن
		خصوصیات مقاومتی (مقاومت اولیه)	
		طرز کار	
مقاومت اولیه کندتر از فرآیند خشک ایجاد می شود زیرا معمولاً نسبت آب به سیمان به دلیل اطمینان از قابلیت پمپاژ بیشتر است.	مقاومت اولیه سریعتر از فرآیند تر ایجاد می شود زیرا نسبت آب به سیمان معمولاً نسبت به فرآیند تر کمتر است.	فاصله پمپاژ	عملیات شاتکریت
احتمالاً به دلیل اینکه توسعه مقاومت بلافاصله پس از شاتکریت نسبتاً کند است سطحی که بتن به آن پاشیده می شود بسته به نوع سنگدانه ها تمایل به ناهمواری دارد.	از آنجا که توسعه مقاومت بلافاصله پس از شاتکریت بسیار زیاد است، سطحی که شاتکریت اعمال شده نسبتاً آسان صاف می شود.	ظرفیت	
افقی: ۱۰۰ متر قائم: ۳۰-۵۰ متر	افقی: ۱۵۰-۳۰۰ متر (حداکثر ۱۰۰۰ متر) قائم: ۱۵۰-۱۰۰ متر	حداکثر ۱۲ m ³ /h	سایر
به مانند روش خشک می توان تعیین روش های مناسب میزان گرد و غبار را کاهش داد. اگرچه در مقایسه با روش خشک گرد و غبار کمتری تولید می کند.	می توان با تعیین روش مناسب پمپاژ، روش پاشش، اختلاط بتن خشک و غیره تا حدودی تولید گرد و غبار را کاهش داد. به طور معمول، این فرآیند در مقایسه با فرآیند تر، سطح بیشتری از گرد و غبار را تولید می کند.	گرد و خاک	
می توان با تعریف مناسب روش پمپاژ، طرح اختلاط بتن پایه و ... میزان برگشت را کاهش داد.	می توان با تعیین مناسب روش پمپاژ، اختلاط بتن و ... میزان برگشت را کاهش داد.	برگشت ^۲	

¹ Base concrete² Rebound

فرآیند خشک	فرآیند تر	نوع فرآیند شاتکریت	
		نوع	
تنظیم طرح اختلاط دشوار است بنابراین غلبه بر ورود آب مشکل است.	از آنجایی که تنظیم طرح اختلاط آسان است می‌توان بر این شرایط غلبه کرد.	اقدامات در برابر ورود آب	
-در عرض ۱/۵ ساعت (در دمای بیش از ۲۵ درجه سانتیگراد) -در عرض ۲ ساعت (در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد یا کمتر)	بسته به حجم رطوبت سنگدانه‌ها در این روش انعطاف پذیری بیشتری وجود دارد.	فاصله زمانی اختلاط تا پاشش	
تجهیزات شاتکریت معمولاً در مقایس بزرگ هستند و اغلب نیاز به یک کارخانه در محل کارگاه می‌باشد. تجهیزات تولید به تجهیزات تصفیه آب کدر نیاز دارند.	در حالیکه برخی تجهیزات شاتکریت در مقیاس بزرگ وجود دارد، می‌توان از تجهیزات ساده و با قابلیت جابه‌جایی آسان تر استفاده کرد. تجهیزات تولید نیازی به تجهیزات تصفیه آب کدر ندارند.	تجهیزات تولید و پاشش	
شست و شوی کامل دستگاه شاتکریت، تجهیزات تولید و شلنگ مورد نیاز است.	می‌توان ماشین آلات و شلنگ را فقط با هوا تمیز کرد.	تمیز کردن	

۶-۹-۲- مخلوط بتن شاتکریت

مخلوط بتن شاتکریت باید براساس مقاومت مورد نیاز و روش‌های اجرایی تعیین گردد. از طرفی مقاومت شاتکریت با در نظر گرفتن مقاومت استاندارد طراحی در سایت تعیین می‌شود.

مقاومت نهایی شاتکریت اجرا شده با هر دو روش تر و خشک، به راحتی تحت تاثیر روال اجرا قرار می‌گیرد؛ بنابراین در انتخاب طرح اختلاط شاتکریت، علاوه بر مشخصاتی مانند مقاومت، در نظر گرفتن محدودیت‌های اجرایی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. در مخلوط شاتکریت موارد زیر باید در نظر گرفته شود:

۱- مقاومت (مقاومت اولیه، مقاومت زودرس و مقاومت دراز مدت)

۲- چسبندگی

۳- نرخ برگشت مصالح

۴- حجم گردوغبار تولید شده

در شرایطی که شاتکریت به عنوان پوشش نهایی استفاده شده و لاینینگ اجرا نشود، موارد زیر نیز اهمیت پیدا می‌کند:

۵- تراکم (جذب رطوبت، حجم فضای خالی، نفوذپذیری و ...)

۶- دوام (مقاومت در برابر یخ زدگی/ذوب شدن، مقاومت شیمیایی و مقاومت در برابر کربناسیون)

در طرح اختلاط شاتکریت، مقاومت شاتکریت به روش پاشش، شرایط آب در سطح شاتکریت پاشیده شده، رطوبت، نسبت آب به سیمان، نسبت آب به ملات، نسبت سنگدانه، حداکثر ابعاد سنگدانه درشت، نوع مواد افزودنی و غیره بستگی دارد.

♦ نسبت آب به سیمان

نسبت آب به سیمان به روش پاشش شاتکریت بستگی دارد و به طور کلی برای شاتکریت تر در محدوده ۵۰ تا ۶۵٪، و برای شاتکریت خشک ۴۵ تا ۵۵٪ و شاتکریت با مقاومت بالا در محدوده کمتر از ۴۰ تا ۵۰٪ (شرایطی که در آن میکروگرانول‌ها به منظور کاهش برگشت و کاهش گرد و غبار استفاده می‌شوند) می‌باشد. در این شرایط نسبت آب به ملات برابر با ۳۰ تا ۴۰٪ است. عیار سیمان نیز برای مقاومت معمولی برابر با ۳۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و برای مقاومت بالا برابر با ۴۰۰ الی ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب (یا در حالتیکه که افزودنی مایع استفاده شود)، می‌باشد. بر اساس تجارب تا به امروز، جهت غلبه بر محدودیت‌های اجرا، حصول اطمینان از مقاومت و چسبندگی اولیه، کاهش نرخ برگشت، کاهش حجم گردوغبار تولیدشده و همچنین بهبود قابلیت پمپاژ، میزان سیمان در مقایسه با بتن معمولی، در مقدار بالایی استفاده می‌شود.

♦ سنگدانه

استفاده از مقدار مناسب سنگدانه جهت تولید شاتکریت بادوام و فشرده مهم است. ریزدانه‌ها به نسبت، بیشترین حجم مواد شاتکریت را تشکیل می‌دهد و تأثیر خیلی زیادی بر محدودیت‌های اجرایی مانند توانایی پمپاژ دارد. در مورد شاتکریت، با بزرگتر شدن قطر سنگدانه‌ها، نرخ برگشت افزایش و قابلیت پمپاژ کاهش خواهد یافت. حداکثر ابعاد درشت دانه‌ها، معمولاً مابین ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر است. نسبت ریزدانه به شدت بر روی کارایی شاتکریت مانند توانایی پمپاژ تأثیرگذار است. نسبت مناسب ریزدانه بسته به شرایط اجرا، متفاوت خواهد بود ولی در کل برابر با ۵۵ تا ۷۰٪ است.

♦ مواد افزودنی

ماده افزودنی ماده‌ای است به غیر از سیمان پرتلند، سنگدانه و آب که به صورت گرد یا مایع، پس از اضافه شدن به شاتکریت منجر به بهبود مقاومت فشاری، چسبندگی، پیوستگی، مقاومت در برابر یخ‌زدگی بتن و کاهش نرخ برگشت شاتکریت می‌شود. استفاده از افزودنی متناسب با شرایط سنگ دربرگیرنده تونل بسیار مهم است. از آنجاییکه مقدار مصرف مواد افزودنی با روش پاشش، مخلوط پاشش، موقعیت پاشش، شرایط آب و غیره متفاوت خواهد بود لازم است نوع و مقدار مواد افزودنی، تنها با تصویب قبلی دستگاه نظارت تعیین شود.

توجه شود که اگر مقدار ماده افزودنی بیش از حد مجاز باشد، مقاومت دراز مدت تعیین شده ممکن است تأمین نشود. نمونه‌هایی از طرح اختلاط شاتکریت در تونل‌های جاده‌ای در جدول ۶-۸ نمایش داده شده است.

جدول ۶-۸- نمونه‌هایی از طرح اختلاط شاتکریت در تونل‌های جاده‌ای

نوع راه	نوع مخلوط	حداکثر ابعاد درشت دانه (mm)	اسلامپ (cm)	عیار سیمان (kg)	افزودنی‌ها (%)
راه اصلی	مخلوط معمولی (روش خشک)	۱۵	-	۳۶۰	۵.۵
	مخلوط معمولی (روش تر)	۱۵	۸	۳۶۰	۵.۵
آزادراه	مخلوط با مقاومت بالا	۱۰	۱۸±۲	۴۵۰	۱۰
	مخلوط استاندارد	۱۵	۸±۲	۳۶۰	۷

۶-۹-۳- خواص مکانیکی شاتکریت

در حالت کلی معمولاً در تونل‌ها، مقاومت فشاری اولیه نسبتاً بالایی مورد نیاز است. مقاومت یک روزه برای کاربردهای مختلف در تونل‌های جاده‌ای $10-5 \text{ N/mm}^2$ ، تونل راه‌آهن 8 N/mm^2 و در تونل‌های آزاد راهی مثال‌هایی از مقاومت ۳ ساعته در منابع مختلف در دسترس می‌باشد. سن شاتکریت شامل سه مرحله مقاومت یک روزه، کوتاه مدت یا ۷ روزه و بلند مدت یا ۲۸ روزه تقسیم می‌شود. بر اساس استاندارد ژاپن مقاومت طراحی استاندارد معمولاً براساس مقاومت فشاری ۲۸ روزه یا بلند مدت تعریف می‌شود که برای تونل‌های جاده‌ای و راه‌آهن 18 N/mm^2 و در تونل‌های آزاد راهی دو خطه برای کاهش ضخامت شاتکریت $25-21 \text{ N/mm}^2$ تعیین شده است.

۶-۹-۴- ماشین‌های شاتکریت

به هنگام انتخاب ماشین‌های شاتکریت، لازم است حجم پاشش در یک‌زمان، فشار تخلیه و شرایط زمین برای اطمینان از توانایی پاشش اختلاط موردنیاز بتن در نظر گرفته شود. دستگاه شاتکریت باید بتواند مواد را به‌طور پیوسته و یکنواخت جهت حفظ کیفیت و بازدهی بتن انتقال دهد. اخیراً در بسیاری از سایت‌ها از یک واحد شاتکریت یکپارچه مجهز به دستگاه‌های لازم برای شاتکریت مانند کمپرسور، ربات شاتکریت، شتاب دهنده^۱ و پمپ فشار آب استفاده می‌شود. دو نوع دستگاه شاتکریت شامل انواع پمپاژ و هوا^۲ می‌باشد. ماشین‌آلات مناسب باید با توجه به سوابق قبلی و انجام آزمایشات اولیه جهت تأیید کیفیت و کارایی بتن تعریف‌شده انتخاب شوند. هنگامی که از هوای فشرده برای پاشش شاتکریت استفاده می‌شود باید دقت شود که قسمت‌های مختلف دستگاه مانند اتصالات شلنگ و دیگر اتصالات استحکام لازم را داشته باشند چراکه به دلیل گیرکردن مواد ممکن است فشار به‌طور ناگهانی افزایش یابد.

¹ manipulator

² Pumping and air types

به کارگیری نازل برای شاتکریت تقریباً به دو روش تقسیم می‌شود استفاده از ربات شاتکریت با قابلیت کنترل از راه دور و عملیات دستی. ربات شاتکریت معمولاً نیازی به داربست ندارد و می‌تواند با سرعت بالا پاشش انجام دهد. با این وجود زمانی که تونل کوچک یا فضا محدود باشد و حجم شاتکریت کم است از روش دستی استفاده می‌شود.

۶-۹-۵- پاشش شاتکریت

در جایی که مواد خارج شده از نازل با سرعت مناسب و عمود بر سطح حفاری پاشیده می‌شود تراکم و چسبندگی در بهترین حالت است. همچنین فاصله بین نازل و سطحی که شاتکریت باید پاشیده شود باید به گونه‌ای باشد که سرعت برخورد و چسبندگی در شرایط بهینه باشد.

ضخامت شاتکریت در هر زمان باید به گونه‌ای باشد که شاتکریت آویزان نشود. همچنین باید پس از خشک شدن لایه اول، لایه بعدی پاشیده شود و به همین ترتیب تا رسیدن به ضخامت تعیین شده ادامه داده شود. از طرفی شاتکریت باید به گونه‌ای اعمال شود که علاوه بر پوشش ناهمواری‌ها، فشار وارد بر دیواره تونل به آرامی منتقل شود. سطح شاتکریت باید تا حد ممکن صاف باشد تا از وارد کردن آسیب به عایق‌بندی و ترک در لاینینگ جلوگیری شود. شاتکریت در قسمت مرزی بین هد و بنج باید به دقت پاشیده شود چراکه در طول فرآیند ساخت این قسمت می‌تواند به راحتی تضعیف شود. از آنجاکه شرایط آب ورودی از حالت مرطوب تا فوران متغیر است و جریان آب زمین باعث شسته شدن بتن و در نتیجه تضعیف بتن و کاهش کیفیت و اثربخشی می‌شود باید اقدامات مناسب اتخاذ شود.

برای شاتکریت با فرآیند خشک، شاتکریت باید در مخلوط خشک بدون آب، بروی محل جریان آب ورودی به تونل پاشیده شود. پس از جذب آب در مخلوط، آب خروجی از نازل باید به تدریج افزایش یابد تا به واحد حجم مشخص شده برای طرح اختلاط برسد. از طرفی برای شاتکریت تر، ویسکوزیته شاتکریت افزایش یابد تا کمتر در معرض شسته شدن توسط جریان آب باشد.

۶-۱۰-۱- راک بولت

۶-۱۰-۱-۱- تجهیزات

ماشین‌های حفاری باید با توجه به شرایط زمین، اندازه و شکل مقطع تونل، روش حفاری، طول و تعداد راک‌بولت‌ها انتخاب شوند. به طور کلی از جامبو چرخ‌دار مجهز به دريفترهای هیدرولیکی^۱ و برای قرار دادن راک‌بولت‌ها در چال‌های حفر شده، معمولاً از دريفترهایی با اتصالات نصب شده استفاده می‌شود.

¹ hydraulic drifters

۶-۱۰-۲- چال زنی و تمیز کردن چال‌ها برای راک بولت

چال‌های راک بولت باید با میله‌ها و مته‌های حفاری مناسب مطابق با موقعیت، جهت، عمق و قطر طراحی شده حفاری شوند. پودر گردوغبار موجود در چال‌های قبل از نصب راک بولت پاک شوند.

برای حفاری قطر چال باید میله‌ها و مته‌های مناسب با توجه به شرایط زمین انتخاب شوند. در شرایط زمین نرم یا خاک به دلیل استفاده از آب برای حفاری یا انحراف میله و غیره در حین حفاری ممکن قطر چال از میزان تعیین شده بیشتر شود و در نهایت منجر به مصرف میزان بیشتری از مواد چسبنده یا اتصال نامناسب می‌شود. برای راک بولت‌های نوع اصطکاکی باید توجه ویژه‌ای به قطر چال شود چراکه اتصال مستقیماً به نیروی اصطکاک بین راک بولت و زمین اطراف بدون دوغاب در چال بستگی دارد.

برخی از شرایط زمین‌شناسی مانند زمین تحکیم نشده، توده سنگ و زون شکسته شده ممکن است منجر به مشکلاتی از جمله شکست چال حفاری شده، گیرکردن میله حفاری و از دست دادن آب حفاری شوند (جدول ۶-۹). در مواردی که آب حفاری یا آب تمیز ممکن است به دیواره چال آسیب برسانند حفاری به جای آب با استفاده از محلول حباب یا پلیمر^۱ و غیره انجام می‌شود.

جدول ۶-۹- مشکلات حین چال زنی برای راک بولت‌ها

مشکلات	علت	پدیده
- پاک کردن پودر سنگ دشوار است - بیرون کشیدن راد حفاری مشکل است - حفاری مورد مجدد نیاز است - مقاومت اتصال مناسب نیست - نصب بولت دشوار است	- شرایط زمین شناسی: - توده سنگ خرد شده - زون خرد شده - خاک ماسه‌ای - خاک چسبنده - سنگریزه	پر شدن یا شکست چال حفاری
مقاومت اتصال مناسب نیست	- شرایط زمین شناسی: - توده سنگ خرد شده - زون خرد شده - خاک ماسه‌ای - خاک چسبنده - سنگریزه	بزرگ شدن قطر چال
پاک کردن پودر سنگ دشوار است.	- شرایط زمین شناسی: - توده سنگ خرد شده	گرفتگی

¹ bubble or polymer solution

مشکلات	علت	پدیده
	- زون خرد شده - خاک ماسه‌ای - خاک چسبنده - سنگریزه - راکبوت طویل - راکبوت روبه پایین	
- بیرون کشیدن راد حفاری مشکل است - نصب بولت مشکل است	شرایط زمین شناسی: - توده سنگ خرد شده - زون خرد شده - سنگریزه - راکبوت طویل	انحراف چال
- پاک کردن پودر سنگ دشوار است.	شرایط زمین شناسی: - توده سنگ خرد شده - زون خرد شده	از دست دادن آب حفاری

۶-۱۰-۳- نصب و تزریق راک بولت ها

راکبولت ها باید در عمق تعیین شده نصب شده و برای رسیدن به مقاومت اتصال تعریف شده تزریق شوند. پس از تزریق، مهره‌ها باید روی راکبولت ها نصب شوند و از تماس صفحه^۱ بولت با سطح حفاری شده اطمینان حاصل شود.

۶-۱۱- قاب‌های فولادی

ماشین‌آلات برای نصب قاب‌های فولادی باید با توجه به شرایط زمین، روش حفاری، اندازه و شکل مقطع انتخاب شوند. همچنین نگهداری‌های فولادی باید به دقت در محل از پیش تعیین شده نصب و با شاتکریت در یک سیستم ادغام شوند.

قاب‌های فولادی در مواقعی که شرایط زمین مناسب نیست استفاده می‌شود و درصد زیادی از بار اولیه را تحمل می‌کند؛ بنابراین باید بلافاصله پس از حفاری یا شاتکریت اولیه نصب شود. در حین نصب، سنگ‌های ناپایدار باید به‌طور کامل برداشته شود و محل نصب پایه‌های نگهداری فولادی به‌طور کامل برای دستیابی به ظرفیت باربری کافی تمیز شود. همچنین باید از پیچ خوردن و افتادن نگهداری‌های فولادی در حین نصب جلوگیری شود و پس از نصب به دیگر

¹ plate

نگهداری‌های فولادی متصل شود. بسته به شرایط کاری و نتایج اندازه‌گیری‌ها، می‌توان از پایه‌هایی که از فرورفتن قاب در زمین سست جلوگیری می‌کنند^۱ در مواردی که باید نشست فوراً کنترل شود استفاده کرد. همان‌طور که اشاره شده برای دستیابی به یک سیستم نگهداری رضایت‌بخش، نگهداری فولادی و شاتکریت باید در یک سیستم ادغام شوند؛ بنابراین عملیات شاتکریت باید به‌دقت انجام شود تا هیچ خللی در پشت قاب باقی نماند.

۶-۱۲- ابزار دقیق

به دلیل وجود پیچیدگی و تغییرات ناگهانی در مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی لایه‌های زمین، در مراحل اولیه شناسایی، تعیین مقادیر دقیق پارامترهای زمین شامل ساختارهای زمین‌شناسی، مشخصات ژئومکانیکی سنگ، حالت اولیه تنش، وضعیت آب زیرزمینی، نفوذپذیری و غیره با صحت بالا بسیار دشوار و پرهزینه خواهد بود. شرایط گوناگون زمین‌شناسی و طبیعت پیچیده توده سنگ‌ها، پیش‌بینی و مدل‌سازی رفتار توده سنگ در طرح‌های ژئومکانیکی به‌ویژه پیرامون فضاها و زیرزمینی را از دیدگاه علمی و نظری مشکل می‌سازد. تعدد عوامل مؤثر بر رفتار توده سنگ و عدم شناخت قطعی آن‌ها، لزوم ارزیابی رفتار واقعی آن‌ها را ایجاد می‌کند. با ارزیابی رفتار توده سنگ در محل ساختگاه می‌توان پیش‌بینی‌های نظری طراحی را با واقعیت مقایسه و پارامترهای توده سنگ را اصلاح و یا تأیید کرد. به عبارت دیگر سنجش رفتار توده سنگ در محل، مکمل و تصحیح کننده طراحی نظری است. به مشاهده، اندازه‌گیری و ثبت پارامترهای رفتاری توده سنگ، رفتار سنجی^۲ و به هر وسیله‌ای که بدین منظور استفاده شود، ابزار^۳ و به عمل استفاده از ابزار برای رفتار سنجی، ابزاربندی^۴ گفته می‌شود. یک برنامه رفتارسنجی شامل انتخاب ابزار مناسب، آرایش ایستگاه‌های ابزار دقیق، نصب و به کارگیری ابزار دقیق، قرائت، پردازش و تفسیر داده‌ها است. بر اساس نتایج اجرای یک برنامه رفتار سنجی، می‌توان پایداری و ایمنی فضاها و زیرزمینی را تحلیل و ارزیابی کرد.

۶-۱۲-۱- اهداف رفتارسنجی

اهداف رفتار سنجی در فضاها و زیرزمینی به شرح زیر است:

۶-۱۲-۱-۱- ارزیابی و تأیید صحت پارامترهای طراحی

در مرحله طراحی، به طور معمول اطلاعات کاملاً دقیقی از وضعیت زمین و پارامترهای لازم در دسترس مهندس طراح نیست. در زمان اجرا، ابزارگذاری و رفتار سنجی، ابزاری مناسب جهت تأیید پارامترها و شرایط فرض شده برای

¹ Detachable or pipe-type wing ribs

² Monitoring

³ Instrument

⁴ Instrumentation

طراحی عملکرد سازه ها و توده سنگ خواهد بود. اگر شرایط واقعی زمین با شرایط پیش بینی شده اختلاف چشمگیری داشته باشد براساس مشاهدات و نتایج ابزار دقیق، تغییرات و اصلاحات در طرح و یا در روش اجرا صورت می گیرد.

۶-۱۲-۱-۲- کنترل و بهینه سازی مراحل اجرا

کنترل مراحل اجرا در برخورد با مسائلی نظیر توزیع بارهای زمین، آب زیرزمینی، نشست ساختمان های مجاور (به ویژه در تونل های شهری) با استفاده از ابزار دقیق بهتر می شود. در بسیاری از طرح ها با رفتارسنجی مناسب از وقوع مشکلات محتمل جلوگیری شده است. به عنوان مثال در اجرای فضای زیرزمینی در سنگ تصمیم گیری در رابطه با تقویت سیستم نگهدارنده و یا تغییر در زمان بندی اجرای آن به عواملی مانند اندازه و آهنگ همگرایی دیواره فضای زیرزمینی بستگی دارد. سنجش تغییر در وضعیت توده سنگ با استفاده از ابزار دقیق اطلاعات لازم را فراهم می کند. همچنین از آنجا که ایمنی در اجرای کارهای زیرزمینی از ضروریات اساسی است با رفتار سنجی توده سنگ و کنترل رفتار آن می توان مشکلات ایمنی را تشخیص داده و در جلوگیری و رفع آن اقدام کرد. وضعیت ایمنی فضاهای زیرزمینی با رفتارسنجی مداوم و مستمر بررسی می شود این کار به ویژه در ساخت فضاهای بزرگ و یا چندگانه زیرزمینی از اهمیت بیشتری برخوردار است. در چند دهه اخیر با به کارگیری رفتارسنجی در اجرا، ایمنی در کارهای زیرزمینی به طور چشمگیری افزایش یافته است.

۶-۱۲-۱-۳- علت یابی مسائل

زمانی که اجرای طرح با مشکلات پیش بینی نشده مانند ناپایداری روبرو می شود با رفتار سنجی می توان به علت آن پی برد. به عنوان مثال حرکت بیش از حد دیواره تونل ممکن است به واسطه فشار زیاد آب در سنگ یا جابه جایی بلوک های سنگی باشد که با استفاده از ابزار دقیق می توان فشار آب و یا اندازه، محل و عمق بلوک جابجا شده را مشخص و طرح سیستم نگهداری را اصلاح و اجرا کرد.

۶-۱۲-۱-۴- کاهش هزینه اجرا

ساخت فضاهای زیرزمینی هزینه ای سنگین دارد و احتمال بروز خطر در آن بالا است. آگاهی از تغییر مکان ها، توزیع تنش ها و بارهای وارد بر سیستم نگهدارنده آن از طریق رفتارسنجی، باعث صرفه جویی قابل ملاحظه ای در هزینه اجرای طرح خواهد شد. هزینه متعارف رفتار سنجی در سطح بین المللی در حدود نیم تا یک درصد کل هزینه اجرا است. در صورت عدم اجرای برنامه رفتارسنجی مناسب بنا به دلایل زیر هزینه طرح ممکن است افزایش چشمگیری یابد:

- احتمال طراحی محافظه کارانه
- تأخیر در اجرا و در نتیجه برخورد با ناپایداری و سایر مسائل و مشکلات ژئوتکنیکی

بر پایه داده‌های به دست آمده از رفتارسنجی درک متخصصان از ماهیت اندرکنش زمین - سازه افزایش یافته است. پیشرفت روش‌های طراحی و اجرای فضاهاى زیرزمینی و بهبود سیستم نگهدارنده آن‌ها از جمله نتایج رفتارسنجی دقیق و مناسب است. برای مثال در تدوین و تکمیل روش جدید تونل سازی اتریشی (NATM) رفتارسنجی یکی از ارکان اساسی است.

در توجیه اقتصادی برنامه‌های رفتارسنجی اگرچه افزایش ایمنی، سرعت اجرا و کاهش هزینه موردنظر است اما حتی در مواردی که رفتارسنجی ظاهراً هزینه‌های اجرایی را افزایش می‌دهد، باید توجه داشت که این افزایش در ازای بالا بردن درجه ایمنی در طول اجرا و دوره بهره برداری است.

پارامترهایی که در رفتارسنجی به دست می‌آیند عبارتند از:

- جابه جایی‌های افقی با انحراف سنج
- جابه جایی قائم و یا مایل، کشیدگی سنج‌های گمانه‌ای یک نقطه‌ای^۱ و چند نقطه‌ای^۲
- همگرایی^۳ (متر نواری دقیق)
- فشار آب در حفره یا درزه (پیزومتر^۴)
- خیز (انحراف سنج)
- بار وارده (سلول بارسنج^۵)
- تنش وارده (کرنش سنج و سلول فشار سنج^۶)
- و سایر موارد.

۶-۱۲-۲- انواع ابزار دقیق

در شکل ۶-۱۲ نمایی از انواع ابزارهای مناسب جهت رفتار سنجی تونل نشان داده شده که شامل موارد زیر است:

۱- پین‌های همگرایی سنجی^۷ (نواری و پیمایشی)

۲- کشیدگی سنج

۳a- سلول تعیین بار میل مهار

۳b- میل مهار ابزاربندی شده^۸

۴- سلول فشار و کرنش سنج داخلی بتن

¹ Single Point Borehole Extensometer

² Multiple Point Borehole Extensometer

³ Convergence Meter

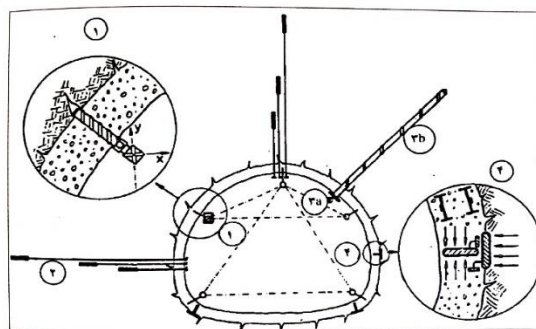
⁴ Piezometer

⁵ Load Cell

⁶ Strain Gauge and Pressure Cell

⁷ Pins

⁸ Instrumented Bolt

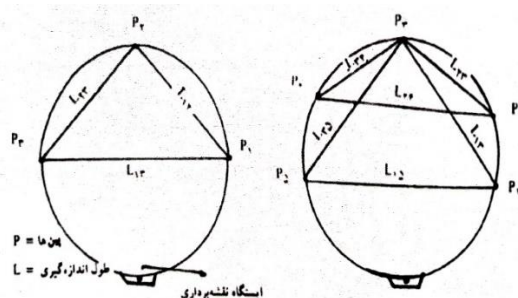


شکل ۶-۱۲- ابزار مناسب جهت رفتار سنجی در فضاهای زیرزمینی

۶-۱۲-۳- نصب و قرائت ابزار دقیق

به منظور اندازه گیری تغییر شکل مقطع هندسی تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی از همگرایی سنج‌ها استفاده می‌شود. در این روش پین‌هایی با آرایش مناسب بر روی تاج و دیواره‌های تونل نصب و فاصله بین این نقاط در مقاطع زمانی مشخص اندازه گیری می‌شود (شکل ۶-۱۳). انتخاب ایستگاه‌های همگرایی سنجی براساس ویژگی‌هایی نظیر نوع سنگ، درجه شکستگی، ناپیوستگی، میزان هوازدگی، وجود آب، ضخامت روباره و نیز عواملی چون شکل هندسی مقطع و ابعاد، دقت موردنیاز و اهمیت پروژه انجام می‌شود. محل نصب پین‌ها باید به گونه‌ای انتخاب شود که جابه جایی آن‌ها تا حد امکان نشان دهنده رفتار توده سنگ در محدوده موردنظر باشد. پین‌ها نباید در مسیر جریان آب، خردشدگی‌های موضعی و یا داخل درزه‌ها نصب شوند.

تعداد و آرایش پین‌ها، تابع هندسه فضای زیرزمینی، ویژگی‌های ژئوتکنیکی زمین و توده‌سنگ و شرایط اجرایی رفتارسنجی است. در سنجش همگرایی معمولاً از آرایش سه یا پنج نقطه‌ای استفاده می‌شود. در مواردی که تغییر شکل در کف فضای زیرزمینی دارای اهمیت باشد، باتوجه به شرایط اجرایی و ساخت، نصب پین اندازه گیری در کف نیز توصیه می‌شود.



شکل ۶-۱۳- آرایش پین‌های اندازه گیری در روش متر همگرایی سه (چپ) و پنج نقطه‌ای (راست)

جهت نصب پین‌های همگرایی سنجی، چال‌هایی متناسب با ابعاد آن‌ها (به قطر معمولاً ۳۲ میلی متر و طول ۴۰ تا ۵۰ سانتی متر) حفر و پس از جاگذاری پین‌ها، محل نصب تزریق می‌شود؛ به طوریکه اتصال پین با توده سنگ به طور کامل برقرار شود. انتخاب پین‌های با طول بیشتر، بستگی به نوع سنگ و میزان دست‌خوردگی دیواره تونل دارد. پین‌های

همگرایی سنجی، معمولاً از میله‌های فولادی به طول ۲۵-۳۰ سانتی متر و قطر ۱۶-۲۲ میلی متر ساخته می‌شود. طول آزاد آن‌ها بستگی به نوع ابزار اندازه گیری دارد. در زمان نصب پین‌ها، ایستگاه اندازه گیری باید تا حد امکان به جبهه کار نزدیک باشد.

از آنجا که کمیت‌های اندازه گیری شده در مقطع فضای زیرزمینی تابع فاصله مقطع اندازه‌گیری از جبهه کار، سرعت پیشروی و زمان است مادامی که اثر فاصله از جبهه کار بر اندازه‌گیری‌ها وجود دارد حداقل یکبار در شبانه روز و ترجیحاً توسط یک نفر (به لحاظ به حداقل رساندن خطا) قرائت انجام شود و با کاهش این اثر، فواصل زمانی بین قرائت‌ها به تدریج افزایش می‌یابد.

به طور کلی در برنامه زمان بندی قرائت ابزار دقیق، عوامل زیر باید مدنظر قرار گیرد:

- فاصله مقطع اندازه گیری از جبهه کار حفاری
- سیستم نگهدارنده و زمان نصب یا اجرای آن‌ها
- سرعت پیشروی حفاری
- روند تغییر کمیت‌ها اندازه گیری شده
- تغییر غیرعادی کمیت‌های اندازه گیری شده
- تا زمانی که تغییر در کمیت‌های اندازه گیری شده به طور محسوس وجود دارد، قرائت بعد از هر مرحله آتشکاری انجام می‌شود.
- در صورتی که در طول شبانه روز آتشکاری انجام نشود و یا روش اجرا غیر از آتشکاری باشد، حداقل یکبار قرائت در روز ضروری است.
- پس از اینکه اندازه گیری نشان داد که تغییر کمیت‌های مربوط تقریباً متوقف شده‌اند، قرائت‌ها در فواصل زمانی مناسب انجام می‌شود.
- تحت هر شرایطی چنانچه تغییر رفتار و یا رفتار غیر منتظره مشاهده شود باید بلافاصله تناوب قرائت‌ها را افزایش داد.

۶-۱۲-۴- تحلیل قرائت‌ها

در روش‌های نوین اجرای فضاهای زیرزمینی استفاده از نتایج تحلیل داده‌ای ابزار دقیق با رعایت موارد زیر ضروری است:

- اجرای درست حفاری فضای زیرزمینی و نصب سیستم نگهدارنده مطابق روش پیشنهادی طراح
- نصب درست و به موقع ابزار دقیق پیشنهادی
- استفاده از ابزار دقیق تکمیلی در صورت لزوم
- قرائت دقیق و مداوم ابزار دقیق نصب شده و پردازش داده‌های به دست آمده

- تحلیل داده‌های پردازش شده ابزار دقیق و ارائه پیشنهاد برای بهبود روش اجرا و یا سیستم نگهدارنده
- اجرای درست حفاری فضای زیرزمینی و نصب سیستم نگهداری مطابق روش اصلاح شده
- ارزیابی روش اصلاح شده با ادامه رفتارسنجی و تحلیل‌های مستقیم و برگشتی
- با ترکیب داده‌های کشیدگی سنج و همگرایی سنج، می‌توان وضعیت واقعی تغییر شکل فضای زیرزمینی و یا جابه‌جایی توده سنگ پیرامون آن را تعیین و پهنه‌های مختلف توده سنگ تغییر شکل یافته را تعیین و تفکیک کرد.
- با ترسیم منحنی مشخصه نیرو-جابه‌جایی در توده سنگ (منحنی اندرکنش سیستم نگهدارنده و توده سنگ) می‌توان تنش وارد بر سیستم نگهدارنده میل‌مهری و بتن پاشیده را تعیین نمود و تنش اولیه (قبل از حفر) در توده سنگ موجود فضای زیرزمینی و زمان نصب را برآورد کرد.
- می‌توان وضعیت پایداری فضای زیرزمینی را ارزیابی کرده و جابه‌جایی احتمالی در فضای زیرزمینی در شرایط استفاده از گزینه‌های مختلف سیستم‌های نگهداری را پیش‌بینی کرد و در نهایت نوع سیستم نگهدارنده و زمان نصب آن را برای وضعیت موجود فضای زیرزمینی بهینه نمود.
- پیشنهاد می‌شود در تونل‌ها بیشتر از ابزار همگرایی سنج، کشیدگی سنج و بارسنج استفاده شود. همچنین بهتر است از همگرایی سنج نواری سه نقطه‌ای و ۵ نقطه‌ای به فواصل ۴۵ متر از یکدیگر استفاده شود. البته در مکان‌هایی که امکان تغییر شکل سنگ اطراف تونل بیشتر است مانند نواحی اطراف گسل، درزه‌های اصلی و نواحی تکتونیزه می‌توان در فواصل کمتر از پهن‌های همگرایی استفاده نمود و یا می‌توان زمان بین قرائت‌ها را باتوجه به میزان تغییر شکل کاهش داد.
- از کشیدگی سنج‌ها نیز در نواحی که تغییر شکل زیاد است با صلاحدید دستگاه نظارت استفاده شود.
- باتوجه به پیش‌بینی نصب راک‌بالت و میل‌مهر در تونل‌ها پیشنهاد می‌شود که امکانات مربوط به بارسنج میل‌مهری نیز جهت نصب فراهم شده و به صلاحدید دستگاه نظارت از این امکانات در مناطق با تغییر شکل زیاد استفاده شود.
- برای کنترل تنش‌های لاینینگ نیز می‌توان پس از اتمام عملیات اجرایی در تونل از فشار سنج استفاده کرد و برای به دست آوردن تانسور تنش، این فشار سنج‌ها از نقطه نظر جابه‌جایی نشان داده‌اند، می‌توان از فشار سنج‌ها استفاده نمود.
- از آنجایی که همگرایی سنج و کشیدگی سنج معمولاً در نزدیکی جبهه کار و در زمان اجرا نصب می‌شوند قرائت‌ها با فواصل زمانی کمتر و حداقل روزی یک بار انجام شود و در صورتی که جبهه کار به دلیل پیشروی از این نقاط فاصله بگیرد و میزان تغییرات کاهش یابد می‌توان قرائت‌ها را طبق برنامه زمان بندی انجام داد.
- نتایج حاصل از همگرایی سنج و کشیدگی سنج بایستی در زمان اجرا با یکدیگر مقایسه و ترکیب شوند تا وضعیت واقعی جابه‌جایی توده سنگ پیرامون تونل مشخص شود و توسط آنالیز برگشتی پارامترهای طراحی

تونل و پایداری تونل را تصحیح کرد باتوجه به اجرای این عملیات ممکن است حتی هزینه‌های تحکیم نهایی تونل نیز کاهش یابد.

۶-۱۳- سیستم نگهداری ثانویه (لاینینگ)

به‌طور کلی اجرای پوشش داخلی بتن برجا (لاینینگ) تونل شامل عملیات اجرایی زیر می‌باشد:

- عایق‌بندی
- آرماتوربندی
- قالب‌بندی
- بتن‌ریزی
- جمع‌آوری قالب‌ها

برای هر مرحله اجرای لاینینگ به ترتیب عملیات زیر اجرا می‌گردد:

۱- بتن‌ریزی مگر در کف تونل

قبل از اجرای بتن اصلی یک‌لایه نازک بتن مگر روی بستر کف ریخته می‌شود. برای اجرای بتن مگر ابتدا باید بستر کف تونل تمیز شده سپس عملیات نقشه‌برداری برای تعیین ارتفاع لازم و رگلاژ انجام شود. بتن مگر عموماً به بتن کم سیمان معروف می‌باشد که برای بتن‌های فونداسیون و کف که مستقیماً در تماس با خاک و سنگ قرار دارند استفاده می‌شود. ضخامت بتن مگر حداقل ۵ سانتیمتر و عیار آن حداقل ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب باید باشد.

۲- عایق‌بندی کف تونل

پس از اجرای بتن مگر، در صورت نیاز عایق‌بندی کف تونل روی آن انجام می‌گیرد.

۳- آرماتوربندی کف تونل

پس از اجرای بتن مگر و عایق‌بندی، آرماتوربندی کف انجام‌شده و آرماتور انتظار جهت اتصال کف به دیواره تونل کار گذاشته می‌شود. این عملیات شامل حمل و نصب و بستن آرماتورها می‌باشد. جهت بستن دقیق آرماتورها در جای خود، ابتدا یک سری نگه‌دارنده توسط عملیات نقشه‌برداری، با دقت روی کف نصب می‌شود و آرماتوربندی با تکیه بر این نگه‌دارنده‌ها انجام می‌گیرد.

۴- قالب‌بندی کف تونل

۵- بتن‌ریزی کف تونل

پس از آماده شدن قالب کف، بتن‌ریزی انجام می‌شود. حمل بتن موردنیاز به‌وسیله تراک میکسر انجام‌شده و در پای کار، بتن به پمپ بتن منتقل و از آنجا پمپ می‌شود.

۶- جمع‌آوری قالب‌های کف تونل

۷- عایق بندی دیواره و سقف در صورت نیاز

پس از گیرش بتن کف عایق بندی دیواره و سقف با استفاده از مصالح آب بندی اجرا می گردد.

۸- آرماتوربندی دیواره و سقف

پس از اتمام عملیات عایق بندی، آرماتوربندی دیواره و سقف با حمل آرماتور به پای کار، برس زدن و تمیزکاری آرماتور انتظار گام قبلی و بستن آرماتور اجرا می گردد. برای نگهداری آرماتورها در جای خود و جاگذاری دقیق آن ها، یک سری نگه دارنده به صورت میله ای در دیواره و سقف کاشته نصب می شود و موقعیت دقیق آن توسط نقشه بردار مشخص می شود. آرماتوربندی بر مبنای این نگه دارنده ها انجام می گیرد.

۹- قالب بندی دیواره و سقف

قالب توسط جک های هیدرولیکی روی آرماتورهای بسته شده، ثابت گردیده و توسط نقشه بردار تنظیم می گردد.

۱۰- بتن ریزی دیواره و سقف

پس از قالب بندی، بتن ریزی دیواره و سقف که یکی از مهم ترین عملیات اجرای پوشش داخلی بتن برجا (لاینینگ) تونل است آغاز می شود.

۱۱- جمع آوری قالب های سقف و دیواره

پس از بتن ریزی و گیرش بتن، قالب جمع شده و از بتن جدا می شود.

خصوصیات پوشش داخلی بتن برجا (لاینینگ) را می توان به صورت زیر نام برد:

- مناسب برای استفاده با هر نوع روش حفاری و روش نصب سیستم نگهداری اولیه
- اختلاف موجود در مقطع حفاری مثل اضافه حفاری را تصحیح می کند.
- به هر شکل می تواند ساخته شود
- یک فونداسیون سالم و دقیق را برای اتمام تونل آماده می کند.
- یک سازه پایدار و مطمئن را ایجاد می کند

معایبی که در لاینینگ وجود دارد شامل موارد زیر است:

- بتن ریزی، مخصوصاً در کنار آرماتورها مشکل می باشد. خصوصیات ذاتی سیستم نگهداری با بتن برجا این است که امکان ویریه کردن بتن در داخل قالب محدود می باشد. این پدیده باعث می شود که بتن در اطراف آرماتور به صورت کامل تحکیم نشود.
- آرماتورهایی که مورد استفاده قرار می گیرند، عمدتاً تحت خوردگی قرار دارند که این عامل باعث از بین رفتن مقاومت بتن می شود. این مشکل یک مشکل معمول در تمامی سیستم نگهداری بتنی می باشد. به هر حال این مسئله در سازه های زیرزمینی بیشتر اتفاق می افتد چون نفوذ آب زیرزمینی باعث افزایش سرعت تخریب آرماتور می شود.

- ایجاد ترک در سیستم نگهداری باعث نفوذ آب به داخل آن می‌شود و این امر باعث کاهش عمر سیستم نگهداری می‌شود.
- حملات شیمیایی در بعضی از زمین‌ها باعث کاش عمر سیستم نگهداری می‌شود.
- این نوع سیستم نگهداری نیاز به یک عملیات ثانویه بعد از حفر تونل، برای ساخت دارد.

۶-۱۳-۱- آرماتوربندی

آرماتورها باید براساس نقشه‌های آرماتوربندی تأیید شده با دقت و ثبات در جای خود نصب شوند. آرماتورهایی که بیرون از کار باقی مانده و یا برای مراحل بعدی بتن ریزی کار گذاشته می‌شوند (آرماتور انتظار) باید با روش‌های مورد تأیید برای حفاظت در برابر زنگ زدگی و دیگر ضایعات پوشش داده شوند. آرماتورهای مصرفی در بتن مسلح باید بدون خم شدگی تحویل کارگاه شوند و نباید به صورت کلافی باشند بجز آرماتورهای به قطر ۸ میلیمتر و کمتر از آن که معمولاً به صورت کلاف می‌باشند. آرماتورها را باید برحسب نوع و قطر آن‌ها از یکدیگر تفکیک نمود و با ذکر قطر آن‌ها برروی تابلویی در محل کارگاه انبار کرد.

۶-۱۳-۱-۱- آماده نمودن آرماتورها

الف) بریدن: آرماتورها باید به طریق سرد و با دستگاه برش برقی بریده شوند.

ب) خم کردن: خم کردن آرماتورها باید به صورت سرد انجام گیرد. وسایل خم کردن آرماتورها مجهز به مجموعه‌ای از فلکه‌هایی است که انحنای خم‌ها را ممکن می‌سازد، اما توصیه می‌شود که حتی الامکان از دستگاه‌های آرماتور خم کن برقی استفاده شود که ترک خوردگی در آرماتورهای با قطر ۱۶ میلیمتر حاصل نشود.

برای خم کردن آرماتورها بخصوص قلاب‌های دوسر، آرماتورهای دو سر فلکه باید حداقل ۵ برابر قطر آرماتور باشد. خم کردن آرماتورها در داخل قالب جز برای آرماتورهای تا قطر ۱۲ میلیمتر و یا مواردی که در نقشه‌ها آمده است، مجاز نیست. آرماتورهایی که در فاصله دو مرحله بتن ریزی به عنوان آرماتورهای انتظار کار گذاشته می‌شوند باید در برابر خم شدن‌های اتفاقی محافظت شوند، خم کردن و بازکردن آرماتورهای انتظار، مجاز نیست.

خم کردن آرماتورهایی به قطر بیش از ۱۲ میلیمتر بهتر است با وسایل مکانیکی انجام شوند تا عملیات خم کردن به طور یکنواخت و بدون ضربه و متناسب با درجه حرارت محیط و به آرامی صورت گیرد. سرعت خم کردن را باید از طریق تجربی بدست آورد و وقتی درجه حرارت محیط پایین‌تر از ۵- درجه سانتیگراد است، باید از خم کردن آرماتورها اجتناب ورزید. معمولاً بازکردن خم آرماتورها مجاز نمی‌باشد و آرماتورهایی که زیادی خم شده‌اند، غیرقابل استفاده می‌باشند.

۶-۱۳-۲- نگهداری آرماتورها در قالب‌ها

تمامی آرماتورها باید به کمک خرک‌های فولادی و یا بتنی، میله‌ها و یا خاموت‌ها به طور محکم در جای خود نگهداری شوند. مقاومت این تکیه‌گاه‌ها باید به قدری باشد که بتوانند آرماتورها را در طول عملیات بتن ریزی محکم در جای خود نگه دارند.

تحت هیچ شرایطی نباید برای نگهداری آرماتورها از قلوه سنگ، قطعه سنگ، قطعات چوبی و مصالح نامناسب مشابه استفاده شود و تمامی آرماتورها باید توسط مفتول‌های سیاه به یکدیگر گره زده شوند.

۶-۱۳-۳- رواداری

میزان رواداری آرماتورهای جاگذاری باید در حد زیر باشد:

میزان رواداری بتن پوششی روی آرماتورها برای حالتی که ضخامت سازه کمتر از ۲۰ سانتیمتر است $\pm 0/5$ سانتیمتر و برای سازه‌هایی با ضخامت بیش از ۲۰ سانتی متر، ± 1 سانتیمتر است میزان رواداری موقعیت آرماتورها به شرط امکانپذیری، $\pm 1/5$ سانتیمتر می‌تواند مدنظر قرار گیرد.

۶-۱۳-۴- نقشه‌های اجرایی

باتوجه به پیچیدگی سازه لاینینگ تونل علی‌الخصوص در قسمت تقاطع‌ها، باید برای سهولت اجرا اقدام به تهیه نقشه‌های اجرایی کارگاهی نمود. این نقشه‌ها براساس نقشه‌های اصلی تهیه شده و شامل جزئیات بیشتری در ارتباط با نحوه اجرا، خم کردن، محل دقیق و تعداد آرماتورها، نوع آرماتورها و سایر اطلاعات لازم که به نحوی در درک بهتر جزئیات موثرند، می‌باشند.

۶-۱۳-۵- وصله کردن آرماتور

حتی‌الامکان باید آرماتورهای مصرفی بصورت یکپارچه باشند. در صورتی که وجود اتصال اجتناب ناپذیر باشد، وصله کردن آرماتورها باید به روش‌های پوشش اتکائی و یا جوشی، مطابق آئین نامه بتن ایران انجام شود. در صورتی که محل وصله‌ها در نقشه‌های اجرایی و دستورالعمل‌ها منعکس نباشد رعایت نکات زیر الزامی است:

- در قطعات تحت خمشی و خمشی توام با فشار نباید بیش از نصف آرماتورها در یک مقطع وصله شوند.
- وصله کردن آرماتورهای تحتانی قطعات خمشی در وسط دهانه یا نزدیک به آن و یا آرماتورهای بالایی قطعه خمشی روی تکیه‌گاه یا نزدیک آن مجاز نیست.
- به طور کلی هر وصله باید ۴۰ برابر قطر آرماتور، با وصله مجاور فاصله داشته و در یک مقطع قرار نگیرد.

۶-۱۳-۱-۶- حداقل پوشش محافظ بتنی روی آرماتور

پوشش بتنی آرماتورها حداقل فاصله رویه آرماتور اعم از طولی و عرضی تا نزدیکترین سطح بتن می‌باشند. باتوجه به اهمیت این پوشش در حفظ و نگهداری آرماتورها و نهایتاً عمر مفید سازه بتنی، باید نهایت دقت را در نصب آرماتور و نیز ریختن و متراکم نمود بتن به عمل آورد تا باعث جابه جایی و تغییر محل آرماتورها نگردد.

۶-۱۳-۲- قالب ها^۱

قالب‌ها باید مقاومت و ایمنی کافی را در برابر بارهای وارده به هنگام بتن ریزی ایجاد کنند به نحوی که کیفیت مطلوب بتن و سهولت کار تضمین شود. قالب‌هایی که در اینجا مدنظر هستند شامل مجموعه ای از پانل‌های فولادی (قالب فلزی) یا صفحات پوستی^۲، سازه قاب، گانتری^۳ یا متحرک و لوازم جانبی می‌باشد. قالب‌های مورد استفاده برای لاینینگ تونل به دو دسته قالب های متحرک^۴ و مونتاژی^۵ تقسیم بندی می‌شوند. قالب متحرک به گونه‌ای ساخته شده است که می‌تواند به عنوان یک واحد با ترکیب سازه قاب با صفحات فولادی یا صفحات پوستی حرکت کند. قالب مونتاژ شده به گونه‌ای طراحی می‌شود که سازه قاب و پانل‌های فولادی هر بار هنگام بتن ریزی مونتاژ و دهمونتاژ می‌شوند. قالب‌های مونتاژ شده تنها زمانی استفاده می‌شوند که محدودیتی در استفاده از قالبهای متحرک وجود داشته باشد در غیر این صورت معمولاً از قالب های متحرک استفاده می‌شود (شکل ۶-۱۴)

طول قالب متحرک باتوجه به برنامه کاری، انحنا در مسیر تونل و ظرفیت سیستم بچینگ تعیین می‌شود. معمولاً از طول ۶ تا ۱۲ متر (بجز در نواحی پارکینگ که به دلیل سطح مقطع بزرگتر حجم بتن ریزی بیشتر است و در نتیجه طول قالب کوتاه‌تر انتخاب می‌شود) استفاده می‌شود زیرا قالب‌های طولی‌تر ممکن است باعث ایجاد ترک در بتن به دلیل انقباض حرارتی یا خشک شدن^۶ شود.

¹ Forms

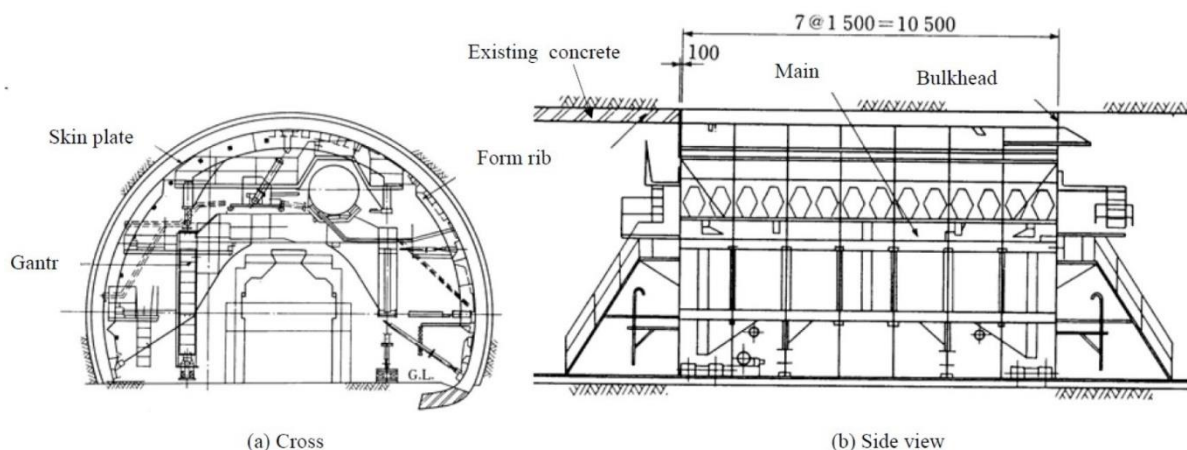
² Skin plates

³ gantry

⁴ traveling

⁵ Assembled forms

⁶ Thermal or drying shrinkage



شکل ۶-۱۴- نمونه ای از قالب متحرک

۶-۱۳-۲-۱- ساخت قالب ها

قالب های متحرک برای دستیابی به تحرک و دوام بالا باید مقاومت بالایی داشته باشند و بتوانند در برابر حرکت، نصب و بتن ریزی مقاومت کنند. قالب های مونتاژ شده باید به گونه ای طراحی شوند که مونتاژ و دیمونتاژ به سهولت انجام گیرد و از نظر ساختاری مقاوم باشند. قالب های متحرک و مونتاژی باید مجهز به امکاناتی مانند دهانه های بتن ریزی و پنجره های بازرسی^۱ باشند همچنین باید به نحوی طراحی شوند که عبور و مرور ایمن وسایل نقلیه در حین کار در داخل آنها ممکن باشد.

۶-۱۳-۲-۲- سربندی^۲

سربندی باید به گونه ای طراحی شوند که در برابر فشار بتن مقاومت کرده و به گونه ای نصب شوند که از نشت ملات جلوگیری کنند و به ورقه های ژئوممبرین آسیب نرسانند.

۶-۱۳-۲-۳- جابه جایی و نصب قالب ها

قالب ها باید بر اساس طرح دقیق بدست آمده از نتایج نقشه برداری در یک موقعیت نصب و در جای خود ثابت شوند تا از تغییر شکل، جابه جایی و نشست به هنگام بتن ریزی جلوگیری شود و از طرفی ریل ها باید امکان حرکت آرام قالب ها را فراهم کنند. همچنین سطح قالب نیاز است به خوبی آماده شود تا از چسبندگی بتن جلوگیری شود. اگر سطح قالب زبر باشد در صافی لاینینگ تاثیر خواهد گذاشت بنابراین سطح قالب لازم است قبل از بتن ریزی به دقت تمیز شود و با مواد مناسب (مانند روغن ها) پوشانید تا جداسازی قالب ها به آسانی انجام گیرد.

هنگام تنظیم قالب ها اعمال بارهای بیش از حد بر روی بخش همپوشانی لاینینگ موجود ممکن است باعث ایجاد ترک و مشکلات دیگر شود در نتیجه باید دقت شود که نصب قالب ها به لاینینگ از پیش موجود آسیب وارد نکند.

^۱ Inspection windows

^۲ Bulkheads

در نهایت باید به هنگام بتن ریزی وضعیت قالب‌ها و اتصالات آن‌ها بررسی شود چراکه پیچ‌های مونتاژ قالب‌ها گاهی ممکن است به دلیل لرزش یا دلایل دیگر شل شوند.

۶-۱۳-۲-۴- جداسازی قالب‌ها

باید زمانی قالب‌ها جدا شوند که بتن بتواند وزن خود را تحمل کند از این رو با تعیین مقاومت نمونه‌های گرفته شده از بتن و براساس فصل‌های سال (دما) زمان قالب برداری متفاوت می‌باشد. از طرفی زمان برداشتن قالب به نوع بتن، اندازه و شکل تونل، عرض لاینینگ و شرایط ساخت بستگی دارد اما به طور معمول قالب‌ها ۱۲ تا ۲۰ ساعت پس از بتن ریزی برداشته می‌شوند. برای یک تونل قوس گرد^۱ مقاومت بتن در زمان برداشتن قالب‌ها اغلب با مقدار مرجع مقاومت فشاری بتن حدود $2-3 \text{ N/mm}^2$ کنترل می‌شود.

از دیگر موارد مهم در رابطه با قالب‌ها تمیزکاری و روغن‌کاری می‌باشد. پس از چند پارت اجرای بتن لاینینگ باید نسبت به تمیزکاری و ساب زنی قالب لاینینگ اقدام شود در حالیکه روغن‌کاری بعد از هر پارت ضروری می‌باشد.

۶-۱۳-۳- بتن لاینینگ

۶-۱۳-۳-۱- شرح کلی ساخت بتن لاینینگ

روش بتن‌ریزی لاینینگ باتوجه به روش حفاری و سایر عوامل تعیین می‌شود. بتن لاینینگ معمولاً پس از اتمام حفاری در قسمت‌های قوس و دیوار کناری، بتن ریزی می‌شود. در روش رانش جانبی^۲، بتن ریزی دیوارهای جانبی و قسمت‌های قوس به طور همزمان انجام می‌شود یا قسمت بالای دیوار جانبی قبل از بتن ریزی قوس به عنوان پایه برای آن عمل می‌کند که البته روش اول رایج‌تر است.

بتن کفبند باتوجه به زمان بتن‌ریزی طبقه‌بندی می‌شود. براساس این طبقه‌بندی می‌تواند اول کفبند نصب شود، کفبند دیرتر نصب شود یا کفبند و لاینینگ به طور همزمان نصب شوند. در روشی که کفبند دیرتر نصب می‌شود کفبند پس از اتمام لاینینگ در محل نصب می‌شود. این روش در زمینی که انتظار می‌رود کفبند پس از اتمام بتن ریزی لاینینگ برای جلوگیری از تغییر شکل زمین تاثیر قابل توجهی داشته باشد یا در تونل‌هایی با مقطع کوچک استفاده می‌شود. روشی که کفبند در ابتدا نصب می‌شود برای زمین‌هایی که نیاز به پایداری زود هنگام (بسته شدن زودهنگام)^۳ دارند یا تونل‌هایی با سطح مقطع بزرگ به کار گرفته می‌شود. روش بتن ریزی کامل (دیواره، سقف و کف) یعنی ساخت همزمان لاینینگ و کفبند در تونل‌های تحت فشار استفاده می‌شود.

¹ Round arch tunnel

² Side drift method

³ Early closure

زمان بندی بتن ریزی لاینینگ باید باتوجه به رفتار زمین و سیستم نگهداری، هدف لاینینگ و سایر موارد تعیین شود. در هنگام بتن ریزی لاینینگ باید تلاش شود تا از ایجاد ترک، درزهای سرد^۱، پوسته شدن، جدا شدن، باز شدن پشت دیوار لاینینگ و غیره جلوگیری شود و پس از بهره برداری از تونل مانع تعمیرات نشود.

۶-۱۳-۳-۲- طرح اختلاط بتن

طرح اختلاط بتن با در نظر گرفتن مصالح، روش بتن ریزی و عوامل دیگر تعیین می شود.

۶-۱۳-۳-۳- الزامات اجرایی بتن

• ۶-۱۳-۳-۳-۱- نیروی انسانی

حتی هنگامی که تجهیزات تولید بتن مطابق الزامات عملکردی تأمین و روش های تولید مناسب استفاده شود، اگر پرسنل تولید توانایی کنترل تجهیزات تولید، کیفیت مصالح و بتن به صورت پایدار را نداشته باشند، دستیابی به بتن یکنواخت و باکیفیت مناسب دشوار است. از آنجایی که کیفیت بتن به راحتی تحت تأثیر عوامل مختلف قرار می گیرد، برای متخصصانی که بتن را تولید می کنند داشتن دانش کارشناسی و تجربه مرتبط باکیفیت تولید بتن اهمیت دارد؛ بنابراین نیروی انسانی که در بخش های مختلف تولید و اجرا شامل: کنترل تجهیزات تولید، کیفیت مصالح، بتن ریزی و عمل آوری و مسئولیت انجام کار را به عهده دارند باید دارای مدرک تحصیلی مرتبط، پروانه مهارت فنی یا گواهینامه معتبر از مراجع ذیصلاح باشند.

• ۶-۱۳-۳-۳-۲- آماده سازی محل بتن ریزی

باید همه مواد زائد درون قالب یا محل بتن ریزی، مانند گل ولای، برف و یخ، مواد سست و کم مقاومت، مواد و قطعات اضافی ناشی از آرماتوربندی و قالب بندی از محل بتن ریزی با استفاده از فشار هوا، جارو یا هر روش دیگری که مورد پذیرش دستگاه نظارت است جمع آوری و برداشته شود.

قالب ها باید به شیوه مناسب تمیز شده و با روغن قالب (ماده رهاساز) مناسب پوشش داده و درز بندی شوند. برای روغن کاری، قالب با روغن (ماده رهاساز) مناسب و طبق دستورالعمل های تولیدکنندگان روغن قالب و قالب ساز روغن کاری می شود. باید دقت شود که ضخامت لایه روغن طبق دستورالعمل تولیدکننده روغن قالب باشد و از طرفی روغن روی سطح قالب شره نکند.

به منظور تماس بهتر بتن جدید با بتن قدیمی، همچنین جلوگیری از جذب آب بتن که منجر به جمع شدگی بتن می شود، باید بتن قدیمی که در تماس با بتن جدید است به اندازه ای مرطوب باشد که باعث مکش آب مخلوط بتن نشود و از طرفی آب اضافی هم نداشته باشد.

¹ Cold joints

همه آرماتورها باید قبل از بتن‌ریزی کاملاً تمیز و عاری از زنگ‌سست پوخته شده و مواد آلاینده مانند گل‌ولای، یخ، روغن، گریس و سایر عواملی که باعث کاهش چسبندگی آرماتورها به بتن می‌شود باشند. از به کارگیری آرماتورهای دارای زنگ‌حفره‌ای یا آن‌هایی که آج خود را ازدست داده‌اند باید خودداری شود.

قبل از ریختن بتن روی سطح بتن قبلی، لایه‌های ضعیف روی آن باید به نحو مناسبی زدوده شود. لایه‌های ضعیف سطح بتن قبلی را می‌توان با استفاده از فشار آب (به میزان ۲۰۰ تا ۳۰۰ بار) ماسه پاشی یا برس سیمی زدود. بدین ترتیب امکان اتصال بهتری بین بتن قدیم و جدید فراهم می‌شود.

• ۶-۱۳-۳-۳-۳- ساخت و تولید بتن

بتن باید باکیفیت موردنیاز و به صورت یکنواخت و همگن تولید شود. به منظور تولید بتن باکیفیت موردنیاز، استفاده از تجهیزات با عملکرد مناسب، روش‌های تولید مناسب و داشتن متخصصانی که قادر به تضمین کیفیت پایدار بتن باشند، اهمیت دارد. برای بررسی یکنواختی و همگنی در اختلاط بتن، ویژگی‌هایی مانند وزن مخصوص، اسلامپ، مقدار حباب هوا، مقدار ملات و مقاومت، در ابتدا و انتهای پیمانه آزمایشی اندازه‌گیری و کنترل شود.

تجهیزات و روش‌های مورد استفاده برای ذخیره‌سازی، پیمانه کردن و اختلاط مصالح باید با توجه به عملکرد موردنیاز، انتخاب و تأمین گردند. این تجهیزات و روش‌ها باید به تأیید دستگاه نظارت برسد. استفاده از تجهیزات با عملکرد مناسب از اهمیت زیادی برخوردار است، حتی اگر از مصالح منطبق با الزامات کیفی استفاده شود به دلیل نوسانات در نسبت اجزاء مخلوط ناشی از خطاهای سامانه پیمانه کردن و اختلاط بتن، کیفیت مخلوط بتن می‌تواند دستخوش تغییرات قابل ملاحظه‌ای شود.

عوامل مؤثر در انتخاب ایستگاه مرکزی بتن‌سازی شامل حجم کار، سرعت موردنیاز برای تولید بتن و الزامات استانداردهایی که با استفاده از آن‌ها کارآمدی سامانه بتن‌سازی تعیین می‌شود. ظرفیت تولید مجموعه بتن‌سازی به سامانه انتقال مصالح، اندازه محفظه ذخیره و توزین مصالح، حجم وسایل پیمانه کردن، تعداد و اندازه مخلوط‌کن‌ها بستگی دارد.

• تجهیزات ذخیره‌سازی

اجزاء تشکیل دهنده بتن باید به گونه‌ای ذخیره و جابه‌جا شوند که مشخصات آن‌ها به مقدار قابل توجهی تغییر نکند و انطباق آن‌ها با مشخصات آیین‌نامه‌ای حفظ شود. در مواردی که ارائه دستورالعمل‌های ویژه‌ای از سوی تأمین‌کننده اجزای بتن در مورد ذخیره‌سازی و نگهداری آن ارائه شده باشد، رعایت آن‌ها الزامی است. تجهیزات ذخیره‌سازی سیمان و افزودنی‌های معدنی باید مطابق استاندارد ملی ۲۷۶۱ بوده و به گونه‌ای ساخته شده باشد که رطوبت داخل محفظه ذخیره نفوذ نکند. همچنین انواع سیمان‌ها و افزودنی‌های معدنی به‌طور جداگانه ذخیره شوند و حجم سیلو باید حداقل از سه برابر متوسط حجم مصرف روزانه بیشتر باشد.

یک سیلوی ذخیره سیمان و افزودنی‌های معدنی باید به گونه‌ای ساخته شده باشد که سیمان به هیچ وجه در کف یا گوشه‌های سیلو به صورت ساکن باقی نماند. توصیه می‌شود سیلو مجهز به لرزاننده، ضربه زن یا یک سیستم هوادهی (یا ترکیبی از آن‌ها) در خروجی سیلو برای جلوگیری از طاق زدن ذرات پودر باشد و از تخلیه یکنواخت مصالح اطمینان حاصل شود. اگر سیمان نتواند به طور مستقیم از سیلو به دیگ مخلوط‌کن فرستاده شود، لازم است به سیلوی ذخیره‌ای که در بالای دیگ مخلوط‌کن قرار داده می‌شود، منتقل شود. همچنین حداقل از دو سیلوی ذخیره سیمان در ایستگاه مرکزی بتن ساز، استفاده شود. در مواردی که یک نوع سیمان از کارخانه‌های متفاوتی تهیه می‌شود باید آن‌ها را در سیلوهای جداگانه‌ای انبار کرد. گاه به دلیل داغ بودن سیمان‌های ورودی به کارگاه و لزوم کاهش دمای آن قبل از مصرف، توصیه می‌شود از تعداد سیلوهای بیشتر و با حجم اضافی استفاده شود.

تجهیزات ذخیره‌سازی سنگدانه‌ها باید دارای ساختاری باشند که مصالح به صورت جداگانه، بسته به نوع، اندازه و دانه‌بندی طوری ذخیره گردند که دچار جداسازی نشوند. همچنین تجهیزات ذخیره‌سازی باید دارای یک زهکش مناسب باشد که رطوبت سنگدانه بتواند در یک محدوده قابل قبول و به صورت یکنواخت درآید. همچنین لازم است تجهیزات ذخیره‌سازی دارای ظرفیت کافی باشند.

• تجهیزات توزین و پیمانه کردن

تجهیزات موردنیاز برای توزین هریک از مصالح باید سازگار با فرآیند تولید بتن و قادر به پیمانه کردن هریک از مصالح با دقت موردنیاز باشد. توصیه می‌شود با توجه به حجم بتن، ابعاد و اهمیت سازه، تجهیزات توزین مناسب برای تولید بتن انتخاب شود. علاوه بر این تجهیزات مورد استفاده برای توزین هریک از مصالح باید قادر به پیمانه کردن در محدوده دقت موردنیاز باشد. نوع الکتریکی تجهیزات توزین به دیگر انواع آن برتری دارد.

تجهیزات موردنیاز برای توزین هر یک از مصالح باید به طور دوره‌ای، قبل و در طی بهره‌برداری مورد بازرسی قرار گیرند و به طور مناسب واسنجی شوند.

دقت باسکول مورد استفاده تحت بار آزمایشی استاتیکی باید برابر با بزرگ‌ترین مقدار حاصله از ± 0.15 درصد کل ظرفیت باسکول یا ± 0.4 درصد وزن مواد باشد. دقت باسکول باید به صورت ادواری واریسی شده و به تأیید دستگاه نظارت برسد.

مصالح باید مطابق طرح اختلاط بتن پیمانه شود. بدین منظور لازم است اطلاعاتی مانند نوع و مقدار اجزای بتن به صورت مکتوب در محل پیمانه کردن بتن در دسترس اپراتور قرار گیرد. تغییر رطوبت سنگدانه‌ها باید در تواتر مناسب و تغییرات شدید رطوبتی اندازه‌گیری شده و از آن‌ها در تعیین مقادیر سنگدانه و آب مصرفی اختلاط استفاده شود.

• مخلوط‌کن‌ها و اختلاط بتن

مصالح تشکیل‌دهنده بتن باید مطابق نسبت‌های اختلاط به طور کامل مخلوط شوند تا بتن یکنواخت و همگنی به دست آید. برای تولید بتن سازه‌ای مخلوط کردن بتن به صورت دستی مجاز نیست. عملکرد مخلوط‌کن باید به نحوی

باشد که در مدت زمان اختلاط موردنظر، حداکثر تغییرات در چگالی بتن، مقدار درشت‌دانه، مقاومت فشاری، حباب هوا و اسلامپ بتن در قسمت‌های مختلف بتن مطابق الزامات استاندارد ملی ۶۰۴۴ باشد.

- حجم بتنی که در کامیون مخلوط‌کن ساخته می‌شود نباید بیش از دوسوم ظرفیت اسمی دیگ آن باشد. همچنین حجم بتن مخلوط شده که با کامیون مخلوط‌کن حمل می‌شود به دلیل حرکت در سربالایی‌ها و امکان بیرون ریختن نباید از ۸۰ درصد ظرفیت اسمی دیگ آن تجاوز کند.

حداقل زمان اختلاط بتن باید به گونه‌ای باشد که مخلوط همگن حاصل شود و این زمان پس از ورود همه اجزا بتن به درون دیگ مخلوط‌کن محاسبه می‌شود. در مواردی که از کامیون مخلوط‌کن برای مخلوط کردن استفاده می‌شود از آنجاکه معمولاً سرعت دوران بیش از ۱۲ دور در دقیقه را سرعت تند و کمتر از ۶ دور در دقیقه را سرعت کند می‌نامند باید ۷۰ الی ۱۰۰ دور مطابق سرعت تعیین شده (سرعت تند) توسط کارخانه سازنده بچرخد تا الزامات یکنواختی بتن حاصل شود. همچنین حداکثر مدت زمان اختلاط باید به دلیل خرد شدن سنگدانه، افزایش مقدار پودر سنگ و افزایش دما به دلیل سایش مصالح با بدنه مخلوط‌کن و کاهش حباب هوای عمده محدود شود. در کامیون مخلوط‌کن حداکثر تعداد چرخش دیگ (مجموع دوران کند و تند) توصیه می‌شود به ۳۰۰ دور محدود شود. تعداد چرخش توصیه شده با دور تند محدود به ۱۰۰ دور می‌شود.

- از آنجاکه در پیمان اول نمی‌توان به دلیل چسبیدن بخشی از ملات به سطح دیواره مخلوط‌کن، به بتن با نسبت‌های اختلاط موردنظر دست‌یافت سطح داخلی مخلوط‌کن باید قبل از آغاز به کار فرآیند اختلاط و در اولین پیمانه، آغشته به ملات شود و یا ۵ درصد به وزن آب و مواد سیمانی و ماسه اضافه شود. از طرفی مخلوط‌کن‌ها باید بعد از اتمام هر نوبت‌کاری و یا ایجاد وقفه طولانی بین نوبت‌های بتن‌سازی شسته شوند.

- پرونده کار روزانه همه مخلوط‌های ساخته شده در کارگاه باید به‌طور تفصیلی و مشتمل بر مشخصات بتن از جمله موارد زیر ثبت و نگهداری شود:

- ۱- تاریخ و زمان اختلاط و بتن‌ریزی؛
- ۲- مقادیر به کاررفته برای اختلاط مصالح و نوع اجزای بتن؛
- ۳- نتایج آزمایش‌های بتن تازه؛
- ۴- دمای بتن و دمای محیط در هنگام بتن‌ریزی؛
- ۵- محل نهایی و حجم تقریبی بتن‌های ریخته شده در سازه.

• بازرسی و کنترل تجهیزات تولید

بازرسی و کنترل تجهیزات باید به‌صورت دوره‌ای طبق استاندارد ملی ۹۶۰۱ انجام شود و طی آن باید اطمینان ایجاد نماید که تجهیزات ذخیره‌سازی، توزین و اندازه‌گیری مخلوط‌کن و ابزار کنترلی، مانند اندازه‌گیری مقدار رطوبت

موجود در سنگدانه ها در شرایط کارکرد خوبی قرار دارند. همچنین تواتر بازرسی ها و آزمایش ها برای تجهیزات بر اساس آبا (آیین نامه بتن ایران) باشد.

• ۶-۱۳-۳-۴- انتقال بتن و بتن ریزی

برای حصول بتن باکیفیت موردنظر، باید به جزئیات برنامه انتقال بتن و بتن ریزی قبل از شروع کار مشخص شده و به تأیید دستگاه نظارت رسیده باشد. ملاحظات اصلی که باید قبل از شروع بتن ریزی در نظر گرفته شود شامل:

الف) برنامه زمان بندی بتن ریزی

برنامه زمان بندی بتن ریزی باید با در نظر گرفتن عوامل مختلفی تهیه شود از جمله نوع و شکل سازه، ارتباط بتن ریزی با سایر عملیات اجرایی پروژه و برنامه زمان بندی کلی پروژه، حجم کل بتن ریزی، روش تأمین، فاصله حمل، صعوبت اجرایی هر بخش و حجم بتن که در هر مقطع زمانی باید تأمین شود.

ب) تجهیزات و نیروی انسانی

نوع، ظرفیت و تعداد ماشین آلات لازم برای انتقال بتن، بتن ریزی، تراکم و همچنین نیروی انسانی باید با در نظر گرفتن مواردی مانند وضعیت کارگاه، نوع و شکل سازه، فاصله حمل بتن، ابعاد مقطعی که باید بتن ریزی شود، حجم بتن ریزی مقطع، دستورالعمل های بتن ریزی، آهنگ بتن ریزی، حجم بتن قابل تأمین، ظرفیت و تعداد لرزاننده ها، نوع مصالح و نسبت های مخلوط بتن تعیین شود.

ج) مسیرهای انتقال:

مسیرهای انتقال بتن باید به نحوی تعیین و انتخاب شود که امکان انتقال ساده تر و سریع تر بتن به وجود آید و زمان و فاصله حمل به حداقل ممکن برسد.

د) مقطع بتن ریزی، محل درزهای اجرایی و روش آماده سازی درزها

مقطع بتن ریزی باید بر اساس حجم بتن ریزی در هر نوبت تعیین شود. این حجم بر اساس حجم بتن قابل تأمین، برنامه زمان بندی اجرا، شکل مقطع، ظرفیت بتن ریزی، زمان مجاز توقف ها حین بتن ریزی و موقعیت درزهای اجرایی تعیین می شود.

چنانچه به دلیل ملاحظات اجرایی، درز اجرائی لازم در نقشه ها مشخص نشده باشد، محل آن باید با در نظر گرفتن تنش ها در مقطع، ملاحظات دوام و نحوه آرماتور گذاری در محل درز و با تأیید دستگاه نظارت انتخاب شود و از انتخاب آن به صورت تصادفی و بر اساس پیشرفت کار اجتناب شود.

ه) ترتیب و نرخ بتن ریزی

ترتیب و نرخ بتن ریزی در هر مقطع باید با در نظر گرفتن شکل سازه، وضعیت تولید بتن، ظرفیت بتن ریزی، توقف های مجاز، تجهیزات موجود و همچنین ملاحظات مربوط به رانش بتن در بدنه قالب ها و سیستم نگهداری قالب انتخاب

شود. در برخی سازه‌ها عدم توجه به بارگذاری ناشی از بار بتن تازه می‌تواند منجر به ناپایداری قالب و یا خرابی سیستم نگهدارنده قالب‌ها شود.

• زمان مجاز بتن‌ریزی

با توجه به تغییر کیفیت بتن تازه در طول زمان و پس از تولید آن، بهتر است زمان انتقال بتن، بتن‌ریزی و تراکم به حداقل ممکن برسد. در اغلب کارهای اجرایی به دلیل محدودیت‌های مختلف، امکان اتمام بتن‌ریزی در یک‌زمان کوتاه وجود ندارد. این محدودیت‌ها شامل محدودیت در تولید و انتقال بتن، مسیرهای انتقال، موقعیت سازه و محدودیت در تراکم، انبوهی و درهمی آرماتورها و محدودیت در تجهیزات و نیروی انسانی است. بنابراین ضروری است که برنامه بتن‌ریزی با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها تهیه شود.

حداکثر زمان مجاز، برای عملیات بتن‌ریزی، شامل انتقال، بتن‌ریزی و تراکم، در دمای محیطی کمتر از ۲۵ درجه سلسیوس، ۲ ساعت پس از ساخت بتن می‌باشد. در دمای بالاتر از ۲۵ درجه این زمان باید به ۱/۵ ساعت محدود شود. در صورت استفاده از وسایل حمل بتن بدون دیگ چرخان از محل تولید تا محل بتن‌ریزی زمان‌های فوق نیم ساعت کاهش می‌یابد و با به‌کارگیری مواد دیرگیرکننده می‌توان زمان‌های فوق را افزایش داد.

• انتقال بتن

جداشدگی بتن و ایجاد درز سرد، دو پدیده نامطلوب در انتقال بتن و بتن‌ریزی هستند که توجه به آن‌ها ضروری است.

انتقال بتن به دو بخش انتقال از محل تولید تا محل بتن‌ریزی، و انتقال از محل بتن‌ریزی به درون قالب تقسیم می‌شود. روش انتقال باید امکان تحویل بتن در محل نهایی با حفظ کیفیت که شامل نسبت آب به سیمان، اسلامپ، درصد حباب هوا و یکنواختی است را فراهم نماید. پارامترهای مختلفی باید برای انتخاب روش و تجهیزات مناسب انتقال بتن مدنظر قرار گیرد از جمله نسبت‌های مخلوط بتن، دسترسی‌ها، نرخ تحویل بتن در محل، محل ایستگاه تولید بتن و شرایط آب و هوایی. این پارامترها تعیین‌کننده نوع مناسب و درعین‌حال هزینه‌های روش انتقال بتن هستند. تجهیزات حمل بتن باید طبق استاندارد ملی ۹۶۰۲ مورد کنترل و بازرسی قرار گیرد.

• ۶-۱۳-۳-۵- عملیات بتن‌ریزی

الزامات زیر باید در عملیات بتن‌ریزی رعایت شود:

الف) بتن‌ریزی باید تا حد امکان به‌طور پیوسته و در شرایط بدون آب انجام شود.

داخل قالب‌ها قبل از بتن‌ریزی جهت جلوگیری از افت کیفیت بتن لاینینگ، باید تمیز شود. همچنین آب باقیمانده در قالب باید به روش مناسب تخلیه شود. در صورتی که محل حفر تونل دارای مشکل ورود آب از سطح حفاری شده

و سطح بتن باشد بسته به میزان ورودی آب باید عایق بندی و آب تخلیه شود تا آب به داخل بتن نفوذ نکند. آب پرایمینگ و ملات^۱ که قبل از بتن ریزی لاینینگ از پمپ به لوله منقل می شود نباید وارد قالب شود.

ب) بتن ریزی باید به نحوی انجام شود که موجب جابه جایی قالب و شبکه آرماتور از محل اولیه خود نشود.

ج) بتن باید تا حد امکان در محل نهایی خود ریخته شود تا نیاز به جابه جایی آن به حداقل برسد. در صورت نیاز به جابه جایی باید از عدم جداشدگی بتن اطمینان حاصل شود. در مواردی که جداشدگی مشاهده شود، باید بتن ریزی متوقف و روش‌های مناسب برای حذف یا کاهش جداشدگی بتن به کار گرفته شود.

د) بتن ریزی باید به نحوی اجرا شود که سطح بتن تازه ریخته شده تا حد امکان هموار باشد.

ه) برای بتن ریزی در لایه‌های مختلف، ضخامت لایه‌ها باید تقریباً مساوی و بتن لایه جدید با بتن لایه قبل از طریق لرزاننده پیوستگی کامل پیدا کند.

و) محدوده بتن ریزی، ظرفیت بتن ریزی و فاصله زمانی بین بتن ریزی لایه‌ها باید به نحوی تعیین شود که درز سرد ایجاد نشود.

محدودیت فاصله زمانی بین لایه‌ها به دلیل اطمینان از عدم ایجاد درز سرد بین لایه‌ها باید رعایت شود. برای جلوگیری از ایجاد این نوع درز باید فاصله زمانی بین لایه‌ها با در نظر گرفتن ملاحظات شامل نوع بتن، کارایی بتن، فاصله زمانی بین ساخت تا اتمام بتن ریزی، دمای بتن و روش تراکم مشخص شود. در شکل ۶-۱۵ نمونه ای از ایجاد درز سرد در بتن لاینینگ به دلیل ویبره نامناسب و همچنین زیاد شدن فاصله بتن ریزی بین لایه‌ها نشان داده شده است. همچنین درزهای اجرایی که در اکثر مواقع یک نقطه ضعف در سازه محسوب می شوند باید با برنامه ریزی مناسب در محل‌های از پیش تعیین شده قرار گیرد و به جز در محل‌هایی که درز اجرایی پیش‌بینی شده است بتن ریزی باید تا اتمام آن مقطع به‌طور پیوسته ادامه یابد (شکل ۶-۱۶).

جهت اجرای بتن لاینینگ در مدت زمان مناسب می‌بایست حجم بتن، تعداد میکسرها و زمان دقیق اجرا بتن بررسی و این امر ملاک قرار گیرد. همچنین قبل از اجرا، پمپ بتن و تراک میکسرها کنترل شوند تا توقفی به هنگام بتن ریزی به وجود نیاید چرا که در چنین شرایطی ممکن است درز سرد ایجاد شود.

سرعت بیش از حد هنگام بتن ریزی می‌تواند منجر به تراکم ناکافی بتن و فشار زیاد روی قالب شود. برای بتن ریزی باید از نرخ مناسب بتن ریزی برای سیستم ساخت و سختی قالب‌ها استفاده شود. بتن لاینینگ باید به صورت یکنواخت، پیوسته و تا حد امکان به صورت افقی و متقارن بتن ریزی شود تا از فشار موضعی بر روی قالب‌ها جلوگیری شود.

¹ Priming water and mortar



شکل ۶-۱۵- نمونه ای از درز سرد در بتن لاینینگ



شکل ۶-۱۶- درزهای اجرایی در بتن لاینینگ

• ۶-۱۳-۳-۳-۶- تراکم بتن

منظور از تراکم بتن کاهش یا حذف حباب هوای غیرعمدی یا ناخواسته در بتن است. این عمل به کمک لرزش یا فشار و ضربه و یا ترکیبی از آن‌ها انجام می‌شود به‌طوری‌که پس از باز کردن قالب، سطح بتن دارای کمترین حفرات سطحی و سایر نواقص و کاستی‌ها باشد.

• ۶-۱۳-۳-۳-۷- عمل‌آوری بتن

از آنجا که لازم است بتن لاینینگ در دما و رطوبت لازم برای سخت شدن نگهداری و از افت کیفیت آن جلوگیری شود باید برای مدت زمان مناسبی عمل‌آوری شود. برای اینکه بتن ریخته شده مقاومت، دوام کافی، آب بند و کیفیت مطلوب از خود نشان دهد باید در سطح معینی از دما و رطوبت، عاری از لرزش، تغییر شکل و اثرات نامطلوب نگهداری شود. به جز محیط اطراف پرتال، در تونل، دما و رطوبت لازم است در یک سطح ثابت باشد تا بتن نیاز به عمل‌آوری اضافی نداشته باشد. با این وجود باید اثر تهویه تونل و بادهای بیرون پس از ورود به تونل در نظر گرفته شود. از آنجایی که بتن لاینینگ مخصوصاً در فصل تابستان در معرض محیطی منحصر به فرد قرار می‌گیرد برای جلوگیری از افت رطوبت لازم است محافظت انجام شود. در زمستان برای جلوگیری از افت دما استفاده از ورقه‌های محافظ^۱ و

¹ Protection sheets

جت‌های گرمایی یا ترکیبی از هردو ممکن است لازم باشد. اگرچه این راه حل باید از خشک شدن سریع و تغییرات ناگهانی دما جلوگیری کند. در مواردی که دما و رطوبت کمتر از حد مطلوب باشد ممکن است برای عمل آوری بتن نیاز به مسدود کردن ورودی‌ها با ورق، عایق حرارتی و گرمایش با جت گرمایی باشد. به عنوان مثال عمل‌آوری ممبرینی^۱ با پوشاندن سطح بتن با ورق و غیره پس از گیرش یا رها شدن قالب‌ها انجام می‌شود. یا مواردی وجود دارد که از عوامل شیمیایی بر روی سطح بتن اسپری می‌شوند تا یک لایه محافظ ایجاد شود.

با در نظر گرفتن اثرات جوی، بتن لاینینگ در پرتال تونل باید به همان روش سازه‌های باز محافظت شود.

• ۶-۱۳-۳-۳-۸- تراکم بتن لاینینگ

پس از بتن‌ریزی در داخل قالب‌ها باید بتن به اندازه کافی متراکم شود تا از جدا شدن مواد جلوگیری و تمام گوشه‌ها پر شود و هیچ فضای خالی باقی نماند. برای پرکردن همه فضاهای خالی باید میزان بتن مورد نیاز به دقت محاسبه و به همان مقدار بتن‌ریزی شود. به عنوان یک قاعده برای تراکم بتن لاینینگ تازه از ویراتور داخلی استفاده می‌شود. تعداد کافی ویراتور باید با در نظر گرفتن حداکثر حجم بتن‌ریزی در ساعت در نظر گرفته شود. از طرفی استفاده بیش از حد از ویراتورهای داخلی ممکن است منجر به جداسازی مصالح بتن شود؛ بنابراین هنگام تنظیم زمان لرزش باید دقت شود. همچنین از به کارگیری ویراتور داخلی برای جابه جایی بتن تازه به صورت جانبی اجتناب شود.

موارد زیادی وجود داشته که از ویربره‌های کششی^۲ یا ویربره‌های الاستیک^۳ برای تراکم بتن تاج که تراکم آن دشوار است استفاده می‌شود. در صورت استفاده از بتن لاینینگ با عملکرد متوسط که سیالیت بالاتری دارد اساساً به جای ویراتورهای داخلی از ویراتورهای قالب^۴ استفاده می‌شود تا از تفکیک مصالح جلوگیری شود.

در متراکم کردن نیاز است جهت عدم آسیب به سیستم عایق بندی، ترک خوردگی و زهکشی توجه ویژه‌ای شود.

• ۶-۱۳-۳-۳-۹- نمونه‌گیری

بلافاصله بعد از تهیه بتن تازه، نمونه‌برداری از بتن انجام و آزمایشات مربوط به اسلامپ و مقاومت فشاری انجام می‌گیرد. شکل ۶-۱۷ تهیه نمونه‌های مکعبی از بتن و انجام آزمایشات مقاومتی را نشان می‌دهد. نوع و تعداد نمونه‌هایی که باید از هر قسمت کار برای انواع بتن تهیه گردد، به شرح جدول ۶-۱۰ می‌باشد.

جدول ۶-۱۰- نوع و تعداد نمونه‌هایی که باید از هر قسمت کار برای انواع بتن تهیه گردد.

زمان آزمایش			نوع آزمایش
۹۰ روزه	۲۸ (۴۲) روزه	۷ (۱۱) روزه	
به ازاء هر ۲۰ مترمکعب ۱ نمونه	به ازاء هر ۲۰ مترمکعب ۳ نمونه	به ازاء هر ۲۰ مترمکعب ۲ نمونه	فشاری
-----	به ازاء هر ۳۰ مترمکعب ۲ نمونه	-----	کششی

¹ Membrane curing

² Pulling out vibrators

³ Elastic vibrator

⁴ Form vibrators

- اگر حجم بتن‌ریزی در هر نوبت بیشتر از ۳۰ مترمکعب باشد به ازاء حجم مازاد باید نمونه‌های اضافی آزمایش گردد.
 - حداقل ۴ نمونه اضافی جهت نگهداری در نزدیکی (مدل سازه) با شرایط مشابه جهت انجام آزمایشات ۳ و ۲۸ روزه تهیه می‌گردد.

برای تعیین مقاومت فشاری بتن در هر نوبت باید ۶ نمونه تهیه گردد. ۲ نمونه در سن ۷ (۱۱) روزه، ۳ نمونه در سن ۲۸ (۴۲) روزه و ۱ نمونه در سن ۹۰ روزه آزمایش می‌شود. آزمایش نمونه‌ها در سن ۷ (۱۱) روزه تنها برای پیش‌بینی مقاومت ۲۸ (۴۲) روزه بتن می‌باشد.

آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ (۱۱) روزه در مراحل اولیه بتن‌ریزی از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا می‌تواند به تثبیت طرح اختلاط صحیح بیانجامد. پس‌ازاینکه بتن‌ریزی با طرح اختلاط تثبیت‌شده و به‌طور یکنواخت به‌صورت روزانه تولید گردید، مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ (۱۱) روزه دیگر اهمیت فوق‌الذکر را نخواهد داشت.

مشخصات بتن در صورتی قابل‌قبول تلقی می‌شود که موارد ذیل رعایت گردد:

۱- در آزمایش فشاری ۳ نمونه متوالی، مقاومت هیچ‌کدام کمتر از مقاومت مشخصه نباشد.

۲- متوسط مقاومت نمونه‌ها بیش از مقاومت مشخص و کوچک‌ترین مقاومت نمونه‌ها از مقاومت مشخصه منهای ۳/۵ مگاپاسکال کمتر نباشد.

۳- مقاومت فشاری مشخصه بتن (f_c)، مقاومتی است که حداکثر ۵ درصد کلیه مقاومت‌های اندازه‌گیری شده برای رده بتن موردنظر ممکن است کمتر از آن باشد.

۴- مقاومت فشاری متوسط (f_{cm}) میانگین مجموع مقاومت‌های فشاری اندازه‌گیری شده در طول پروژه می‌باشد. در صورتیکه نتایجی برای تعیین یک انحراف استاندارد در دسترس نباشد، می‌توان مقاومت فشاری متوسط لازم را با استفاده از مقاومت مشخصه به‌علاوه حاشیه ایمنی لازم برای این نوع مقاومت بدست آورد.

۵- بتنی که در ساخت و نگهداری آن تمامی مشخصات فنی رعایت شود، دارای پایایی زیاد در برابر شرایط محیطی می‌باشد. عوامل مهمی که باید برای دستیابی به بتن پایا به آن توجه شود عبارت است از: نسبت آب به سیمان، حداقل مقدار سیمان، تراکم کافی، عمل آوردن مناسب، استفاده از ویبره، انتخاب نوع سیمان برای مقابله با سولفات‌ها و سایر عوامل محیطی مضر، مقاومت فشاری، دانه‌بندی مصالح و پرداخت سطح بتن می‌باشند.



عمل آوری نمونه ها



تهیه نمونه مکعبی برای انجام آزمایش مقاومتی بر روی بتن



انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره بر روی نمونه های مکعبی

شکل ۶- ۱۷- تهیه نمونه‌های مکعبی از بتن و انجام آزمایشات مقاومتی

• ۶-۱۳-۳-۱۰- بتن ریزی در هوای سرد

در مواردی که دمای هوا کمتر از $+5$ درجه سلسیوس باشد و یا احتمال برود که در مدت حفاظت از بتن دمای هوا به کمتر از این مقدار برسد شرایط هوای سرد به وجود می‌آید و باید الزامات مربوط به بتن ریزی در شرایط هوای سرد رعایت شود. در تونل‌ها شرایط هوای سرد معمولاً با توجه به شرایط آب و هوایی محدوده حفر تونل و در محدوده پرتال‌ها اتفاق می‌افتد.

دمای یخ‌زدگی بتن حدود 1°C تا 2°C در فشار یک اتمسفر (در سطح دریا) است که به نسبت آب به مواد سیمانی و مواد افزودنی بستگی دارد. وقتی بتن در معرض دمای حدود 5°C یا کمتر قرار می‌گیرد، واکنش‌های مرتبط با گیرش و سخت شدن بتن در حد قابل توجهی کند می‌شود؛ بنابراین وقتی بتن تحت بارهای دوره ساخت قرار می‌گیرد مشکلاتی مانند ترک خوردگی و تغییر شکل رخ می‌دهد. هرگاه در سنین اولیه به دلیل یخ‌زدگی آسیبی به بتن وارد شود، هرگز مقاومت و دوام موردنظر را کسب نمی‌کند، حتی اگر پس از آسیب دیدگی، حفاظت و عمل آوری مطلوب اعمال شود.

• ۶-۱۳-۳-۴- بتن خود تراکم

در مواردی که به مخلوط بتن باقابلیت زیاد جاری شدن، خود پخش‌زدگی در تمام نقاط قالب، پوشش دادن آرماتور با تراکم زیاد، بدون جداسدگی ذرات و بدون لرزاندن مکانیکی نیاز باشد، بتن خود تراکم استفاده می‌شود.

• ۶-۱۳-۳-۴-۱- مصالح

- استفاده از انواع سیمان‌های پرتلند در ساخت بتن خود تراکم مجاز است مگر آنکه شرایط محیطی و دوام، محدودیت در انتخاب نوع سیمان را ایجاد کند.

- پودر سنگ‌های خنثی مانند آهک، بازالت و کوارتز حاصل از آسیاب کردن سنگ‌ها و سیمان پرتلند آهکی برای تأمین گرانیروی مخلوط بتن مجاز می‌باشند. اما هیچ نوع ترکیب زیان‌آور در ترکیبات پودرها نباید وجود داشته باشد. دانه‌بندی پودر سنگ می‌تواند ریزدانه‌تر یا درشت‌تر و یا مشابه دانه‌بندی سیمان پرتلند باشد.

- مواد افزودنی معدنی مانند دوده سیلیس، کائولین و سرباره به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان و یا به‌عنوان پرکننده در مخلوط بتن مجاز می‌باشند.

- برای تأمین مخلوط بتن استفاده از ماده افزودنی شیمیایی اصلاح‌کننده گرانیروی مجاز است. همچنین برای ساخت مخلوط بتن با گرانیروی مناسب حاصل از ترکیب پودر سنگ و پودرهای فعال و ماده اصلاح‌کننده گرانیروی امکان‌پذیر است.

- تأمین روانی مخلوط بتن باید توسط مواد افزودنی فوق روان‌کننده ممتاز مانند پلی‌کربوکسیلات فراهم گردد.

- استفاده از هراندازه حداکثر سنگدانه در ساخت بتن خود تراکم مجاز است، اما توصیه می‌شود برای حفظ پایداری مخلوط، اندازه حداکثر به ۲۰ میلی‌متر محدود شود.

• ۶-۱۳-۳-۴-۲- طرح اختلاط

- تعیین نسبت‌های مخلوط بتن خود تراکم باید به نحوی انجام شود که خصوصیات موردنظر شامل قابلیت پرمکندگی، قابلیت عبور و پایداری موردنظر را تأمین کند. درجه موردنیاز این خصوصیات تابع تراکم میلگردها، شکل و اندازه قالب و روش بتن‌ریزی است. بنابراین در هنگام طرح اختلاط باید خصوصیات موردنظر بررسی شوند.

- مقادیر مصالح باید با موارد زیر مطابقت داشته باشند، مگر آن‌که بررسی آزمایشگاهی نشان دهد که خارج از محدوده‌های ذکرشده تأثیر نامطلوبی بر خواص بتن تازه و سخت شده ندارد.

- نسبت حجمی آب به کل پودر (شامل سیمان، پودر سنگ و مواد افزودنی معدنی)، باید بین ۰/۸ تا ۱/۱۰ و حجم خمیر باید بین ۳۴ تا ۴۰ درصد کل حجم مخلوط باشد.
- مقدار سنگدانه درشت باید بین ۲۸ تا ۳۵ درصد حجم مخلوط باشد.
- کل مقدار پودر باید ۳۸۰ تا ۶۰۰ کیلو بر مترمکعب باشد.

- در تعیین نسبت مخلوط باید ابقا پذیری که ظرفیت مخلوط بتن در حفظ الزامات عملکرد در حالت تازه و سخت شده است بررسی شود و با تغییرات ناچیز در کمیت مصالح و مواد مصرفی و روش اجرا در خصوصیات بتن تازه و خواص بتن سخت شده، تغییرات عمده ایجاد نشود. برای بررسی ابقا پذیری باید روش زیر اتخاذ گردد:

مخلوط بتن طبق نسبت‌های تعیین‌شده همراه با دو مخلوط دیگر که در یکی مقدار آب ۸ لیتر در مترمکعب بیشتر از طرح اختلاط موردنظر و در مخلوط دیگر مقدار آب ۸ لیتر در مترمکعب کمتر از طرح ساخته شوند. مقادیر آزمایش اسلامپ جاری و آزمایش T50 هریک از دو مخلوط (با افزایش و کاهش آب مخلوط) نباید بیشتر از ۱۵ درصد با مخلوط

اصلی تفاوت داشته باشند. انحراف استاندارد مقاومت فشاری ۲۸ روزه این دو مخلوط نباید بیشتر از ۴ مگاپاسکال از بتن اصلی در نمونه های آزمایشگاهی و بیشتر از ۵ مگاپاسکال در نمونه های کارگاهی تفاوت داشته باشند.

• ۶-۱۳-۳-۴-۳- اجرا

- استفاده از هر نوع مخلوط کن برای ساخت بتن خود تراکم بلامانع است، اما شرایط و وضعیت مکانیکی دستگاه باید در حد مطلوب باشد تا از مخلوط شدن یکنواخت مصالح اطمینان حاصل شود.

- زمان مورد نیاز برای مخلوط کردن بتن خود تراکم معمولاً طولانی تر از بتن معمولی است، اما مدت مورد نیاز و ترتیب ریختن مصالح به درون مخلوط کن باید با آزمایش بر مبنای آزمون و خطا تعیین شود. اما در ساخت مخلوط های آزمون آزمایشگاهی تا حد امکان باید از مخلوط کن مشابه مخلوط کن کارگاه استفاده شود و ترتیب ریختن مصالح و مواد در جام مخلوط کن با ترتیب ریختن مصالح در مخلوط کن کارگاه مطابقت داشته باشد.

- در صورت مصرف پودر سنگ فله ای، برای انبار کردن آن در کارگاه باید از سیلوی فلزی استفاده شود تا دچار تغییرات رطوبت و کلوخه شدگی نشود.

- مواد افزودنی شیمیایی باید همراه با بخشی از آب مخلوط به عنوان آخرین جزء به مخلوط بتن افزوده شوند. در مواردی که ماده اصلاح کننده گرانروی استفاده می شود، باید پس از فوق روان کننده به مخلوط افزوده شود.

- در طراحی قالب های عمودی، باید فشار بتن بر روی قالب برابر با فشار هیدرواستاتیک در نظر گرفته شود. مگر آن که با انجام آزمایش و یا مستندات مشخص شود که فشار بر روی قالب کمتر و یا بیشتر از فشار هیدرواستاتیک است. در صورت عدم وجود اطلاعات کافی، سرعت بتن ریزی باید ۵ متر بر ساعت و یا کمتر در نظر گرفته شود و فشار هیدرواستاتیک از رابطه ۶-۱ محاسبه شود:

$$P = \rho gh \quad \text{رابطه ۶-۱}$$

- تمام اجزای قالب مانند ورق رویه، اعضای افقی مانند کمرکش ها، اعضای عمودی و بست ها باید قادر باشند که فشار ناشی از بتن را تحمل کنند.

- ارتفاع مجاز بتن ریزی در سقوط آزاد ۳ متر است. برای ارتفاع بیشتر از این مقدار، باید با آزمایش اثر ارتفاع در جداسدگی ذرات بررسی شود و سپس بتن ریزی انجام گیرد. اما توصیه می شود که برای سقوط آزاد بیش از ۲ متر، قیف و لوله (ترمی) استفاده شود.

- حداکثر طول جریان آزاد مخلوط بتن ۱۰ متر است. در طول بیشتر احتمال جداسدگی دینامیکی ذرات وجود دارد. - بسیاری از مخلوط های بتن خود تراکم خاصیت تغلیظ پذیری دارند، بنابراین عملیات بتن ریزی باید استمرار داشته باشد تا از امکان بروز درز سرد ناشی از تغلیظ پذیری اجتناب گردد.

- لرزاندن بتن خود تراکم مجاز نیست، زیرا منجر به نشست سنگدانه های درشت می شود.

- در پرداخت سطح بتن باید از ابزار فلزی مانند فولادی یا فولادی با آلیاژ منیزیومی استفاده شود، زیرا ابزار چوبی سبب کنده شدن سطح بتن چسبنده می‌شوند.
- بلافاصله پس از اتمام عملیات پرداخت سطح بتن، باید با پوشش پلاستیک بر روی سطح بتن از تبخیر آب جلوگیری شود تا منجر به ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک نشود.
- برای جلوگیری از خود خشک‌شدگی بتن باید از عمل‌آوری با روش آبرسانی انجام شود از عمل‌آوری عایقی اجتناب گردد.
- در هنگام بتن‌ریزی در کارگاه، باید نمونه‌برداری برای مقاومت فشاری طبق بتن معمولی انجام شود، اما قبل از بتن‌ریزی باید خصوصیات مخلوط بتن تازه با آزمایش‌های مربوط مانند حلقه J، جعبه L و جریان اسلامپ موردبررسی قرار بگیرند.

۶-۱۳-۳-۵- مواد افزودنی

هرگونه ماده مصرف شده در بتن به‌جز سیمان، دانه‌ها، آب و الیاف به نام «مواد افزودنی»^۱ و یا «مواد مضاف»^۱ خوانده می‌شود. اصولاً افزودنی‌ها به‌منظور فراهم شدن خصوصیات مطلوب در بتن تازه و یا بتن سخت شده به بتن اضافه می‌شوند. این خصوصیات شامل افزایش کارایی بتن تازه، و کنترل زمان گیرش و دوره کسب مقاومت (تسریع یا تأخیر)، امکان کاهش میزان آب و نسبت آب به سیمان و در نتیجه افزایش مقاومت بتن، ایجاد حباب‌های بسیار ریز هوا در بتن و افزایش دوام آن، و موارد مشابه می‌باشد.

افزودنی‌های بتن به دو دسته کلی «مواد مضاف شیمیایی»^۲ و «مواد مضاف معدنی»^۳ تقسیم می‌شوند. مواد مضاف شیمیایی آن دسته از افزودنی‌ها هستند که با یک ترکیب شیمیایی ویژه تنظیم‌شده، به مقدار جزئی و احتمالاً در حد چند دهم درصد (تا حداکثر ۲ درصد) وزنی سیمان به بتن اضافه می‌شوند و خصوصیات قابل‌توجهی در آن ایجاد می‌کنند. در مقابل، مواد مضاف معدنی پودرهای معدنی هستند که به مقدار بسیار بیش‌تر مثلاً در محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی سیمان و یا حتی بیش از ۲۰ درصد، به بتن افزوده می‌شوند تا مقاومت، دوام و یا کارایی بتن را بهبود بخشند. ازجمله آن می‌توان به پوزولان‌ها و سرباره اشاره کرد.

مواد مضاف شیمیایی در انواع مختلفی تولید و استفاده می‌شوند که معروف‌ترین آن‌ها به شرح ذیل است:

¹ Admixtures

² Chemical Admixtures

³ Mineral Admixtures

• ۶-۱۳-۳-۵-۱- افزودنی های تسریع کننده (زودگیر کننده)

مواد مضاف تسریع کننده یا زودگیر کننده^۱، افزودنی هایی هستند که باعث تسریع در گیرش سیمان شده و کسب مقاومت بتن را سرعت می بخشند. این مواد در استاندارد ASTM C494، تحت عنوان ماده مضاف نوع C مورد اشاره قرار گرفته اند. تسریع کننده ها باید ملزومات استاندارد ASTM D98 را برآورد کرده و منطبق بر استاندارد ASTM D494 نمونه برداری شده و مورد آزمایش قرار گیرند. به عنوان مشهورترین و بهترین تسریع کننده می توان به کلرور کلسیم، CaCl_2 اشاره نمود که اساس غالب زودگیر کننده ها را تشکیل می دهد. مواد دیگری از جمله کلرور سدیم و کلرور باریم نیز به عنوان تسریع کننده محسوب می شوند.

استفاده از کلرور کلسیم ضمن سرعت بخشیدن به کسب مقاومت بتن، مقاومت بتن را در مقابل فرسایش و سایش نیز تا حدی افزایش می دهد. کلرور کلسیم همچنین نیاز به آب را برای رسیدن بتن به روانی مشخص را کمی کاهش داده و تأثیر مواد حباب زای را افزایش می دهد؛ اگرچه در بتن هوا ایجاد نمی کند. در مقابل، مصرف کلرور کلسیم در بتن بعضی از عوارض جانبی را نیز به همراه دارد؛ از جمله این که:

۱- خطر خوردگی میلگردها و قطعات فولادی مدفون را به خصوص برای بتن در معرض رطوبت و هوا مخصوصاً در دمای بالا، افزایش می دهد؛

۲- مقاومت بتن را در مقابل حمله سولفات ها کاهش می دهد؛

۳- افت خشک شدگی بتن را افزایش می دهد؛

۴- خطر واکنش های قلیایی دانه ها را افزایش می دهد؛

۵- مقاومت بتن هوا دار را در مقابل سیکل های یخ زدن و ذوب شدن از حد مورد انتظار پایین می آورد؛

۶- با تیر کردن رنگ بتن، در آن تغییر رنگ ایجاد می کند؛

۷- خطر پوسته شدن و تورق^۲ بتن را افزایش می دهد.

باید توجه نمود که اگرچه وظیفه مواد مضاف زودگیر کننده، تسریع در سخت شدن و توسعه مقاومت کوتاه مدت بتن است، ولی آن ها در عمل بر زمان گیرش اولیه نیز اثر گذاشته و کمی آن را کوتاه می کنند. در همین ارتباط گروه دیگری از افزودنی ها به نام «مواد مضاف با گیرش سریع»^۳ وجود دارند که به طور مشخص زمان گیرش اولیه سیمان و بتن را کاهش می دهند. نمونه ای از این مواد کربنات سدیم است که برای ایجاد گیرش سریع در عملیات شاتکریت مورد استفاده قرار می گیرد.

¹ Accelerating Admixtures

² Scaling

³ Set-Accelerating or Quick-Setting Admixtures

• ۶-۱۳-۳-۵-۲- افزودنی‌های دیر گیر کننده

مواد مضاف دیر گیر کننده یا کند گیر کننده^۱، افزودنی‌هایی هستند که باعث تأخیر در گیرش سیمان شده و زمان گیرش و سخت شدن بتن را به تعویق می‌اندازند. این مواد در استاندارد ASTM C494، به‌عنوان ماده مضاف نوع B مورد اشاره قرار گرفته‌اند.

مواد دیر گیر کننده در هوای گرم از تشکیل اتصال سرد بتن دو بتن‌ریزی متوالی جلوگیری می‌کند. دیر گیر کننده‌ها با تأخیر در گیرش، تا حدی مقاومت اولیه ۱ تا ۳ روزه بتن را کاهش می‌دهند. عوارض جانبی مواد مضاف دیر گیر کننده، ایجاد و یا افزایش میزان آب انداختگی، و همچنین افزایش افت پلاستیک در بتن به دلیل طولانی‌تر کردن مرحله پلاستیک بودن بتن است. از انواع کند گیر کننده‌ها می‌توان به شکر، مشتقات کربوهیدرات‌ها، نمک‌های محلول روی و بُرات‌های محلول اشاره نمود.

• ۶-۱۳-۳-۵-۳- افزودنی‌های کاهنده آب (یا روان کننده)

مواد مضاف کاهنده آب^۲ که به نام روان کننده^۳ نیز خوانده می‌شوند، موادی هستند که اگر به بتن اضافه شوند، بدون این‌که نیازی به افزایش آب باشد، روانی و کارایی (اسلامپ) بتن را افزایش می‌دهند. این مواد در استاندارد ASTM C494، به‌عنوان ماده مضاف نوع A مورد اشاره قرار گرفته‌اند. استاندارد ASTM C494 این مواد را در حالتی که علاوه بر کاهش آب و روان کنندگی، خاصیت کند گیر کنندگی نیز داشته باشند به‌عنوان ماده مضاف نوع D، و اگر خاصیت زودگیر کنندگی نیز داشته باشند به‌عنوان ماده مضاف نوع E طبقه بندی می‌کند.

مواد مضاف کاهنده آب را می‌توان بر اساس یکی از اهداف زیر به کار گرفت:

- الف) رسیدن به مقاومت بالاتر در بتن با کاهش نسبت آب به سیمان، ضمن حفظ روانی و کارایی بتن،
 - ب) کاهش مصرف سیمان همراه با کاهش مقدار آب، با حفظ نسبت آب به سیمان و حفظ مقاومت، و ضمن حفظ روانی و کارایی بتن،
 - ج) افزایش روانی و کارایی بتن با حفظ میزان آب و سیمان.
- استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب در شاتکریت جهت کاهش گردوغبار و تولید بتن با مقاومت بالا، در حال افزایش است.

این مواد بر خصوصیات رفتاری بتن در دراز مدت اثر منفی ندارند و اگر به‌طور صحیح به کار گرفته شده و به خوبی توزیع شوند، مقاومت و دوام بتن را بهبود می‌بخشند. در مقابل و به‌عنوان عوارض جانبی مصرف مواد مضاف کاهنده

¹ Retarding Admixtures or Set-Retarders

² Water-Reducing Admixtures

³ Plasticizers

آب، به‌خصوص اگر به مقدار زیاد مصرف شوند، می‌توان به امکان وقوع مواردی مانند تأخیر در گیرش، آب انداختن بتن، جدا شدن دانه‌ها و احتمالاً افت خشک‌شدگی در بتن اشاره نمود. به علاوه غالب مواد مضاف کاهنده آب، مقداری هوای ناخواسته نیز به بتن می‌افزایند.

• ۶-۱۳-۳-۵-۴- افزودنی‌های کاهنده آب در حد بالا (یا فوق روان کننده)

مواد مضاف کاهنده آب در حد بالا ($HRWR^1$) که به نام فوق روان کننده^۲ نیز خوانده می‌شوند، موادی هستند که اگر به بتن اضافه شوند، بدون نیاز به افزایش آب، به مقدار قابل توجهی روانی و کارایی (اسلامپ) بتن را افزایش می‌دهند. این مواد در استاندارد ASTM C494، به‌عنوان ماده مضاف نوع F شناخته می‌شوند. استاندارد ASTM از این مواد در حالتی که علاوه بر کاهش آب و روان کننده قوی، خاصیت کند گیر کنندگی نیز داشته باشند، به‌عنوان ماده مضاف نوع G نام می‌برد.

قابلیت کاهش در میزان آب در اثر استفاده از مواد مضاف کاهنده آب در حد بالا، بسیار بیش‌تر از مورد قبلی بوده و از ۱۵ تا ۳۵ درصد است. در بعضی از مراجع توانایی فوق روان کننده‌ها در کاهش میزان آب بتن، تا ۴۰ درصد نیز ذکر شده است؛ اما بهتر است فرض شود که این مواد می‌توانند ضمن حفظ روانی بتن، تا یک‌سوم از میزان آب بکاهند. فوق روان کننده‌ها عمدتاً برای تهیه "بتن روان"^۳ به کار می‌روند. بتن روان بر اساس تعریفی که در ASTM C1017 ارائه شده است، بتنی است که اسلامپ بیش از ۱۹۰ میلی‌متر داشته باشد؛ ولی خصوصیات چسبندگی خود را کاملاً حفظ کرده باشد. مصرف بتن روان شامل بتن‌ریزی در موارد زیر است: (۱) در مقاطع نازک؛ (۲) در جایی که میلگردهای فولادی به‌صورت متراکم و با فواصل نزدیک قرار گرفته باشند؛ (۳) در لوله ترمی (مثلاً برای بتن‌ریزی در زیرآب)؛ (۴) در پمپ بتن برای کاهش فشار پمپ و افزایش ظرفیت آن؛ (۵) در هر جا که روش‌های متداول تراکم بتن غیرعملی باشد؛ (۶) در شرایط هوای گرم؛ (۷) در هر جا که کاهش هزینه‌های ریختن و جای دادن بتن موردنظر باشد.

• ۶-۱۳-۳-۵-۵- افزودنی‌های حباب‌زا (هوازا)

مواد مضاف هوازا سبب می‌شوند میلیاردها حباب بسیار ریز هوا در بتن ایجاد شود؛ حباب‌های ریزتر از ۰/۰۵ میلی‌متر که اصولاً با چشم قابل‌رؤیت نبوده و در فواصل بسیار نزدیک و در حدود ۰/۱ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند و به‌طور همگن در سراسر بتن توزیع شده‌اند. این مواد معمولاً در مقادیر بسیار اندک، یعنی حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱۰ وزنی سیمان به بتن اضافه شده و در محدوده ۰/۴ تا ۰/۸ حجمی، حباب هوا در بتن ایجاد می‌کنند.

• مزیت‌های بتن هوادار

¹ Hydroxylated Carboxylic and their Salts

² Overdosage

³ Flowing Concrete

بتن هوا دار که به کمک افزودنی‌های حباب‌زا تولید می‌شود، از خصوصیات و مزایای متعدد و ویژه‌ای به‌صورت زیر برخوردار است.

- ۱- افزایش پایداری در مقابل یخبندان
 - ۲- افزایش میزان روانی و کارایی بتن
 - ۳- افزایش قابلیت آب‌بندی
 - ۴- افزایش شکل‌پذیری
 - ۵- افزایش مقاومت ضربه‌ای
 - ۶- کاهش امکان تورق
 - ۷- کاهش میزان جذب آب
 - ۸- افزایش مقاومت در مقابل حمله سولفات‌ها
 - ۹- کاهش امکان جدا شدن دانه‌ها
 - ۱۰- افزایش پایداری در مقابل تر و خشک شدن‌های متوالی
 - ۱۱- کاهش میزان آب انداختن بتن
 - ۱۲- کاهش میزان افت و خزش
 - ۱۳- بهبود چسبندگی بین لایه‌های متوالی بتن و نیز بین بتن و میلگرد
 - ۱۴- پرداخت سطحی بیشتر
 - ۱۵- پمپ‌پذیری بهتر بتن در مسافت کوتاه؛ اگرچه میزان زیاد حباب هوا در بتن، پمپ‌پذیری را کاهش می‌دهد.
- در مقابل مزیت‌های فوق در بتن هوا دار، کاهش مقاومت فشاری آن در مقایسه با بتن بدون هوا نیز باید موردتوجه قرار گیرد؛ به‌طوری‌که به ازای هر ۱ درصد حباب هوا، مقاومت فشاری بتن در حدود ۵ درصد کاهش می‌یابد.

• ۶-۱۳-۳-۵-۶- افزودنی‌های معدنی

افزودنی‌های معدنی غالباً مواد سیلیسی و سیلیکاتی نرم و با ذرات بسیار ریز هستند که در زمان اختلاط به میزان نسبتاً زیاد به مخلوط بتن اضافه می‌شوند. محصولات فرعی صنعتی به‌عنوان منبع اصلی و اولیه افزودنی‌های معدنی محسوب می‌شوند.

چهار افزودنی معدنی که به‌طور متداول و وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ عبارت‌اند از:

۱- میکرو سیلیس (دوده سیلیسی)،

۲- سرباره گرانوله،

۳- خاکستر بادی، و

۴- متاکائولین.

علاوه بر این موارد، افزودنی‌های معدنی دیگری از قبیل پوزولان‌های طبیعی و پودر سنگ آهک نیز در عمل در مرحله ساخت به بتن اضافه می‌شوند.

در تکنولوژی بتن نوین، انواع متنوعی از افزودنی‌های معدنی به‌طور وسیع در ساخت و ساز بتنی به کار می‌روند. اهدافی که از استفاده از این افزودنی‌ها در بتن دنبال می‌شوند، عبارت‌اند از:

- استفاده‌های اقتصادی،

- حفظ محیط زیست،

- بهبود کارایی در بتن تازه،

- بالا بردن مقاومت، به‌خصوص دوام بتن سخت شده، و

- کاهش حرارت هیدراسیون.

- در شاکریت ترکیب اصلی عامل کاهش گردوغبار، ترکیب مولکولی مانند سلولز یا اکریلامید است که با اثر انعقادی یا اثر تغلیظ، تولید گردوغبار را سرکوب می‌کند. علاوه بر این کاهش حجم گردوغبار تولیدشده در منبع به‌عنوان یک معیار مؤثرتر از گردوغبار تولیدشده در حین پاشیدن بتن است.

۶-۱۴- کفبند

۶-۱۴-۱- زمان‌بندی و روش‌های ساخت کفبند

بتن کفبند باید در زمان و روش مناسب و با در نظر گرفتن شرایط و رفتار زمین و سهولت جایگذاری نصب یا بتن‌ریزی شود. به‌طور کلی کفبند قبل از قسمت بالایی لاینینگ قرار می‌گیرد. در صورتی که بتن لاینینگ به‌منظور جلوگیری از بالآمدگی یا ورود گل به‌جای پایداری زود هنگام زمین حفاری شده قرار داده شود، روش نصب یا قراردادن کفبند دیر هنگام^۱ اعمال می‌شود.

در روش نصب کفبند دیر هنگام^۲، کفبند پس از بتن‌ریزی لاینینگ نصب می‌شود. سطح مقطع در یک زمین آماسی و غیره باید در مراحل اولیه حفظ و بسته شود تا آسیب و شل شدن زمین اطراف به حداقل برسد. در چنین شرایطی باید

¹ The late invert

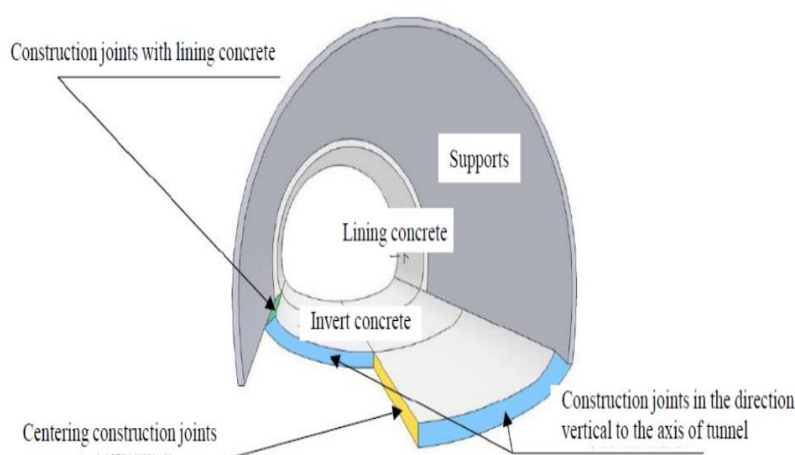
² The late placing invert

بنچ و قسمت کفبند تقریباً به طور هم زمان در نزدیکی هد^۱ حفر شود، سپس کفبند اولیه با بتن پاشیده شده به تنهایی یا با ترکیبی از آن و نگهداری های فولادی ساخته شود. پس از بررسی نتیجه جابه جایی تونل، شروع نصب کفبند اصلی^۲ پیشنهاد می شود.

درزهای ساخت (اتصال کفبند با لاینینگ^۳) با بتن لاینینگ و آن هایی که در اطراف قسمت مرکزی بتن کفبند هستند اصولاً باید به منظور انتقال مؤثر نیروی محوری، عمود بر محور کفبند باشند (شکل ۶-۱۸). همچنین معمولاً گردوخاک از محل اتصالات لاینینگ شسته می شود تا کفبند با لاینینگ یکپارچه شود.

اگر جریان آب ورودی زیاد باشد، برای جلوگیری از نشت آب، باید صفحات قطع کننده^۴ در محل های اتصال نصب شوند. همچنین معمولاً در محل های اتصال که در نزدیکی مرکز بتن کفبند وجود دارند از میله های اتصال^۵ مقعر و محدب، تراشه و قفس پارچه مشبک سیمی^۶ استفاده می شود تا مقاومت برشی به آرامی منتقل شود.

میلگردهای تقویت کننده^۷ باید به گونه ای مناسب نصب شوند که پوشش بتنی مطلوبی داشته باشند و تحت وزن مرده خود یا بتن ریخته شده تغییر شکل ندهند و اقدامات لازم برای جلوگیری از آلودگی و خوردگی انجام شود.



شکل ۶-۱۸- نمونه هایی از درزهای ساخت^۸

- ¹ Top heading
- ² Main invert
- ³ The construction joints
- ⁴ Cut-off
- ⁵ Joint bars
- ⁶ Cage of wire mesh fabric
- ⁷ Reinforcing bars
- ⁸ Construction joints

۶-۱۵- عایق بندی و زهکشی (آب بند کردن سازه های زیرزمینی)

در شرایط قرارگیری تونل در زیر سطح آب زیرزمینی دائمی و یا گذرا و در شرایطی که به منظور بهره برداری مناسب از فضای زیرزمینی، عایق بندی و یا آب بندی تونل ضروری باشد این هدف به طرق مختلف امکان پذیر خواهد بود. استفاده از سیستم چاه های زهکشی روشی متداول برای سازه های کم عمق و نیمه عمیق می باشد، لازم به یادآوری است که روش مذکور عمدتاً به منظور مهار سفره آب زیرزمینی بوده و بیشتر باهدف دور کردن آب از محیط، خارج کردن آن توده سنگ و خاک و تحت کنترل درآوردن و هدایت آن به خارج از محدوده پروژه، انجام می گیرد. لذا در پروژه هایی که جلوگیری از هرگونه رطوبت در دوران بهره برداری مورد نیاز است، این روش چندان مناسب نمی باشد. معمولاً سه روش عایق بندی و آب بندی در تونل ها مورد استفاده قرار می گیرد:

- استفاده از مصالح ژئوممبران PVC
- به کارگیری مصالح آب بندی که به صورت پاشیدن اجرا می شود که اجرایی مشابه شاتکریت دارد.
- استفاده از مواد افزودنی بتن

۶-۱۵-۱- مصالح آب بندی ژئوممبران PVC

پیش از ساخت سیستم عایق بندی سطح ناصاف شاتکریت و برجستگی راک بولت ها باید جهت جلوگیری از وارد کردن آسیب به سیستم عایق بندی اصلاح شود. همچنین اقدامات زهکشی مناسب در نواحی با جریان متمرکز آب انجام شود.

ورقه های عایق بندی باید به نحوی نصب شوند که تماس نزدیک با سطح حفاری شده داشته باشند. برای این منظور ورق ها در جهت طولی و عرضی ثابت می شوند تا به هنگام بتن ریزی فضای خالی در تاج تونل ایجاد نشود. علاوه بر این از آنجایی که ورق های عایق بندی در صورت نصب با حاشیه ناکافی^۱، مستعد کشیده شدن و آسیب دیدن تحت کشش هستند لازم است با حاشیه مناسب نصب شوند تا دچار پارگی نشوند (شکل ۶-۱۹). همچنین اتصال ورقه ها، نصب و ثابت کردن آن ها در جای خود دقت بالایی نیاز دارد.

انعطاف بسیار زیاد، نصب آسان و جوش پذیری ایده آل ورق های نرم PVC باعث شده است این نوع ژئوممبران در فضاهای بسته با محدودیت های عایق کاری، مصرف بسیار زیادی داشته باشد.

برخی کاربردهای ژئوممبران PVC شامل:

- عایق تونل ها، سازه های بتنی زیرزمینی
- ایزولاسیون ساختمان، سقف، سرویس ها
- ایزولاسیون استخرها

¹ Insufficient margin

در شکل ۶-۲۰ نمونه‌هایی از عایق‌بندی توسط ورق‌های PVC را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱۹- پارگی ژئوممبرین



شکل ۶-۲۰- اجرای عایق بندی

۶-۱۵-۱- لایه‌بندی سیستم آب‌بندی ژئوممبران PVC

لایه‌بندی سیستم آب‌بندی ژئوممبران PVC به ترتیب از سنگ، خاک بلاواسطه تا پوشش داخلی تونل به صورت ذیل

می‌باشد:

- سنگ و خاک
- سیستم نگهداری اولیه
- ژئوتکستایل زهکش و محافظ
- دیسک‌های اتصال
- ژئوممبران PVC
- پوشش داخلی ساخته‌شده از بتن مسلح

در شکل ۶-۲۱ نمای شماتیک لایه‌بندی سیستم مذکور نمایش داده شده است.



شکل ۶-۲۱- شماتیک لایه بندی سیستم نگهداری و آب بندی تونل

۶-۱۵-۱-۲- مصالح آب بند پاششی

علیرغم استفاده از ورق های ژئوممبرین PVC و کاربرد وسیع این مصالح در آب بندی سازه های زیرزمینی، استفاده از این روش دارای معایبی نیز می باشد. مهم ترین عیب این روش، تخصصی بودن آن می باشد که در نتیجه آن نیاز به به کارگیری افراد متخصص برای نصب علاوه بر خرید محصولات می باشد. همچنین در اشکال پیچیده هندسی نظیر تقاطع تونل ها اجرا دشوار بوده و نیز در زمان نصب غشاء آب بند اجرای سایر عملیات تونل دچار مشکل می شود و ممکن است تداخل کاری به وجود آید. مصالح آب بند پاششی این نواقص را نداشته و اجرای آن سرعت و سهولت بیشتری نسبت به ورق های آب بند دارد. اجرای لایه آب بند پاششی مشابه اجرای شاتکریت می باشد. این لایه ها در دو مرحله و به ضخامت حدود یک سانتی متر اجرا می شود.

۶-۱۵-۱-۳- مواد افزودنی در بتن

انواع مواد افزودنی جهت آب بند نمودن بتن موجود می باشد. لازم به ذکر است که تجارب موفق استفاده از این مواد در سطح کشور پایین بوده، لذا این محصولات به عنوان مکمل و حصول اطمینان مضاعف در مواردی که آب بندی اهمیت خاص دارد، مورد استفاده قرار می گیرد.

۶-۱۶- روسازی

روسازی از نظر مصالح مصرفی در قشر رویه، به سه دسته آسفالتی، بتنی و یا مختلط (بتن و آسفالت) تقسیم می شوند. روسازی آسفالتی از سه لایه زیراساس، اساس و آسفالت تشکیل می شود که مقاومت و کیفیت بستر، نقش تعیین کننده ای در کیفیت روسازی دارد. این نوع روسازی دارای مقاومت برشی مناسب و مقاومت کششی کم است.

روسازی بتنی بر روی بستر (سابگرید) و یا بر روی زیراساس (به جای زیراساس می‌توان از بتن مگر استفاده نمود) اجرا می‌شود. این نوع روسازی از مقاومت فشاری و کششی بالایی برخوردار است. انواع اصلی روسازی‌های بتنی عبارت‌اند از:

۱- روسازی‌های بتنی ساده درزدار (JPCP)

تمام روسازی‌های بتنی ساده با درزهای بسته ساخته می‌شوند. میلگردهای شاخک و قفل و بست سنگدانه‌ها می‌تواند برای انتقال بار استفاده شود. درز یک خاصیت مهم در این نوع روسازی است که به صورت درز اجرایی و انبساط وجود دارد. فاصله درزهای انبساط بین ۳ تا ۵ متر است که اجازه انبساط و انقباض را به دال داده و موقعیت ترک را کنترل می‌کند. استفاده کردن و یا نکردن از میلگرد شاخک بستگی به نوع سنگدانه، شرایط آب و هوایی و تجربیات گذشته دارد. فاصله دو درز عرضی در این روسازی می‌توان بین ۴/۵ تا ۹ متر باشد اما با افزایش فاصله درزها، قفل و بست سنگدانه‌ها کمتر می‌شود و به طبع آن ریسک ترک خوردگی بیشتر می‌شود.

۲- روسازی‌های بتنی مسلح درزدار (JRCP)

فولادهای مسلح کننده در انواع مش‌های سیمی و میلگردهای تغییر شکل دهنده باعث افزایش ظرفیت مقاومت روسازی نمی‌شوند اما باعث می‌شوند که فاصله درزها بیشتر باشد یعنی از ترک خوردن بتن جلوگیری نمی‌کنند اما در کنترل عرض ترک مؤثر هستند. فاصله درزها در این نوع روسازی بین ۳ تا ۹ متر است که این فاصله زیاد بین درزها سبب می‌شود که از میلگرد شاخک برای انتقال بار در این نوع روسازی استفاده شود. افزایش توزیع میلگردها در روسازی بتنی مسلح درزدار با افزایش فاصله درزها رابطه مستقیم دارد که برای نگه‌داشتن دال‌ها کنار هم پس از ترک خوردن استفاده می‌شوند. اگرچه با افزایش فاصله درزها هزینه استفاده از میلگردهای شاخک و تعداد درزها کاهش می‌یابد.

۳- روسازی‌های بتنی مسلح پیوسته (CRCP)

در این نوع روسازی درزها کلاً حذف شده‌اند و نقطه‌ضعف روسازی‌های بتنی که همان درزها است را برطرف کرده و ضخامت روسازی نیز نسبت به دیگر انواع روسازی بتنی کمتر و تا ۵ سانتی‌متر است که ۸۰ درصد کمتر از دیگر روسازی‌ها است. ترک‌های عرضی با عرض کنترل شده جزء مشخصات روسازی‌های بتنی پیوسته مسلح می‌باشد. این ترک‌ها به وسیله مسلح کننده‌ها نگهداری شده و بزرگ‌تر نمی‌شوند.

۴- روسازی‌های بتنی از نوع پیش‌تنیده (PCP)

بتن در کشش ضعیف و در فشار قوی است. ضخامت لازم برای روسازی بتنی بر اساس مدول گسیختگی و مقاومت کششی بتن تعیین می‌شود. اعمال یک تنش فشاری قبلی به بتن، تنش کششی به وجود آمده در بتن به وسیله بارهای ترافیک را بسیار کاهش داده بنابراین باعث کاهش ضخامت بتن مورد نیاز می‌شود. کاهش احتمال ایجاد ترک و پیدایش درزهای عرضی در روسازی‌های بتن پیش‌تنیده، منجر به کاهش هزینه نگهداری و افزایش عمر روسازی می‌گردد.

۵- روسازی بتن غلتکی (RCC)

طبق تعریف بتن غلتکی روسازی راه عبارت است از مخلوط سفت و نسبتاً خشکی از سنگ‌دانه‌ها با اندازه حداکثر ۱۹ میلی‌متر، مواد سیمانی و آب که توسط دستگاه‌های متداول روسازی آسفالتی یا همان فینیشر آسفالت پخش و پس از آن توسط غلتک و بیرهای و غلتک‌های چرخ لاستیکی آسفالت کوبیده و متراکم می‌گردد. اساس مکانیسم طراحی ضخامت و درزها و عدم مسلح بودن در این رویه دقیقاً همانند روسازی بتنی ساده‌ی درزدار JPCP می‌باشد و از این رو می‌توان این دو نوع روسازی را با تقریب اجرایی و عملکردی مناسبی با یکدیگر مقایسه کرد چراکه اصول طراحی این دو دقیقاً یکسان می‌باشد.

۱۶-۶- تأسیسات حین بهره‌برداری

• ۱۶-۶-۱- روشنایی

هدف از نصب سیستم روشنایی در تونل این است که رانندگان وسایل نقلیه بتوانند سرعت، درجه ایمنی و آسایشی را که قبل از ورود به تونل داشته‌اند، در داخل تونل نیز حفظ کنند. این امر در صورتی محقق می‌شود که رانندگان، دید کاملی نسبت به مسیر جلوی خود داشته باشند و بتوانند از وجود وسایل نقلیه دیگر و یا احتمالاً موانع موجود در مسیر آگاه شوند.

رانندگی با آسودگی خاطر در تونل در گرو کیفیت روشنایی تونل می‌باشد، چون در غیر این صورت تشویش رانندگان، باعث کم کردن سرعت وسیله نقلیه در نزدیک ورودی تونل شده و این افت ناگهانی سرعت از حجم عبور خودروها کاسته و احتمال ترافیک و حتی تصادف را افزایش می‌دهد. وجود یک سیستم روشنایی که به رانندگان کمک کند تا بر تشویش خود فائق آیند، ایمنی ترافیک را بهبود بخشیده، حجم عبور خودروها را افزایش داده و رانندگی راحتی را برای رانندگان فراهم می‌آورد.

سطوح روشنایی تونل تحت تاثیر حجم، نوع و ترکیب ترافیک می‌باشد و باید طبق ضوابط بند ۳-۵- مشخصات فنی عمومی و اجرایی روشنایی راه‌ها (نشریه ۶۱۴-۸۰۰) تعیین شود.

• ۱۶-۶-۲- نور روز

تفاوت عمده در تامین روشنایی تونل‌ها با روشنایی سایر راه‌ها، نیاز تونل‌ها به تامین روشنایی در طول روز می‌باشد. به طور کلی راننده باید بتواند در صورت مواجه شدن با هر خطر غیرمنتظره، عکس‌العمل مناسب نشان داده و در فاصله مطمئن توقف نماید. زمانی که این مسافت در داخل تونل باشد، باید سطح روشنایی تونل برای تضمین رویت راننده در داخل تونل کافی باشد. اگر میزان روشنایی در داخل تونل به اندازه کافی نباشد، مسلماً راننده در داخل تونل قادر به دید صحیح نمی‌باشد، به این حالت "اثر حفره سیاه"^۱ گفته می‌شود.

در هنگام نزدیک شدن و ورود به تونل، چشمان راننده سعی در تطابق با محیط تاریک اطراف دارد. تطابق عمل پیوسته‌ای است که در نتیجه آن، می‌توان در داخل تونل و در طول مشخصی از آن، نسبت به کاهش سطح روشنایی به صورت تدریجی فائق آمد، به‌طوری‌که به یک حد ثابت از روشنایی در ناحیه داخلی تونل عادت کرد. به هنگام خروج از تونل در روز، عمل تطابق چشم به صورت معکوس می‌باشد و در این حالت چشم باید از یک سطح درخشندگی پایین‌تر به سطح درخشندگی بالاتری (واقع در محیط بیرون از تونل) عادت کند. این عمل به مراتب سریع‌تر صورت می‌گیرد. به‌طور مشابه به هنگام خروج از تونل، راننده باید به منظور داشتن امکان مانور ناگهانی و سریع در ناحیه خروج تونل، دید کافی از پشت سر خود نیز داشته باشد.

تاثیر روشنایی تونل‌ها بر محیط اطراف آن، هیچگاه نباید فراموش شود. محیط اطراف می‌تواند یک محیط باز و یا محیطی با ساختمان‌های زیاد و متراکم و یا ساختمان‌های تاریخی و مهم باشد. بنابراین باید اثرات نوع لامپ انتخابی، نحوه پخش نور و نوع چراغ‌ها در طراحی روشنایی تونل‌ها در نظر گرفته شود.

بنابراین روشنایی یک تونل بنا به دلایل زیر باید مناسب باشد:

الف- اجتناب از ایجاد اثر "حفره سیاه" زمانی که راننده در داخل تونل، قادر به دیدن نیست؛

ب- کاهش احتمال برخورد با وسایل نقلیه دیگر (عابر پیاده یا دوچرخه سوار)؛

ج- در صورت بروز یک خطر غیر منتظره، راننده باید قادر باشد تا عکس‌العمل مناسبی نشان داده و در فاصله توقف (SSD) اتومبیل را متوقف نماید؛

د- ایجاد قابلیت رویت تابلوهای راهنما.

برای تونل‌های بلندتر از ۲۰۰ متر، طراحی روشنایی باید مطابق با بند ۳-۵- از مشخصات فنی عمومی و اجرایی روشنایی راه‌ها (نشریه ۶۱۴-۸۰۰) انجام شود. برای تونل‌های کوتاه‌تر، توصیه‌های بند ۳-۲-۵- از آیین نامه مذکور الزامی می‌باشد.

یک سیستم روشنایی خطی یا چشم‌گربه‌ای می‌تواند راهنمایی بصری را تقویت نماید. با این حال، سطح روشنایی نباید کاهش یابد.

۶-۱۶-۳- نور شب

در طول شب مقدار درخشندگی بیرون تونل کم است، بنابراین اثر حفره سیاه وجود ندارد. به همین دلیل در شب برای همه نواحی تونل حالت مشابه برقرار بوده و راننده مقدار روشنایی کمتری را نسبت به هنگام روز نیاز دارد.

۶-۱۶-۴- روشنایی روز تونل های کوتاه

طراحی روشنایی برای تونل های کوتاه بر این اساس است که راننده ای که به تونل نزدیک می شود، بتواند در فاصله ای کمتر یا برابر با فاصله توقف از دهانه ورودی تونل، سایر وسایل نقلیه یا موانع موجود را ببیند. توانایی راننده برای دید در تونل در درجه اول به طول تونل بستگی دارد، اگرچه سایر پارامترهای طراحی مانند عرض، ارتفاع، انحناهای افقی و عمودی و غیره نیز تاثیر دارند.

مهمترین پارامتر در طراحی روشنایی تونل ها این است که راننده ای که به تونل نزدیک می شود، بتواند در فاصله ای کمتر و یا برابر با فاصله توقف (SSD) از دهانه ورودی تونل، سایر وسایل نقلیه و موانع موجود در آن را ببیند. زمانی که دهانه خروجی تونل بخش اعظمی از منظره قابل رویت از دهانه ورودی تونل باشد، وسایل نقلیه و موانع موجود به راحتی به شکل تصویر سیاه یکدست در مقابل منظره روشن پشت آن قابل رویت می باشند. از سوی دیگر، وسایل نقلیه و موانع موجود در تونل با قرار گرفتن در یک زمینه تاریک، قابل تفکیک نمی باشند. این اتفاق در صورتی رخ می دهد که طول تونل در مقایسه با عرض آن بلند بوده و یا تونل در یک پیچ، به گونه ای واقع شده باشد که تنها قسمتی از خروجی آن از دهانه ورودی قابل رویت باشد، یا به طور کل هیچ قسمتی از خروجی تونل از دهانه ورودی آن قابل رویت نباشد.

تونل هایی با طول کمتر از ۲۵ متر، معمولاً در هنگام روز نیازی به سیستم روشنایی ندارند. تعیین نیاز یا عدم نیاز تونل به سیستم روشنایی در هنگام روز برای تونل هایی با طول بین ۲۵ تا ۲۰۰ متر باید با روشی که در پیوست ۳ شرح داده شده است، انجام گیرد. در صورت نیاز به روشنایی کامل در طول روز، روشنایی تونل باید مطابق با بند ۵-۳ نشریه ۶۱۴-۸۰۰ باشد.

نکته: تونل های با طول کمتر از ۲۰۰ متر تونل های کوتاه نامیده می شوند.

۶-۱۶-۵- طراحی روشنایی تونل

رانندگی در یک تونل، متفاوت با رانندگی در یک راه روباز است، زیرا درک راننده نسبت به محیط اطراف محدود شده و همه نشانه های مرجع آشنا، از دید راننده دور می شوند. دیوارهای تونل می توانند "اثر ترس از دیواره" را برای رانندگان ایجاد کنند که موجب می شود رانندگان از دیوارهای تونل دوری جویند. قدرت دید رانندگان در یک تونل به طور قابل توجهی کمتر از یک راه روباز است. همچنین هنگام رانندگی در تونل، سرعت عکس العمل راننده، درک او از کنتراست و فاصله، دید محیطی او و قابلیت تشخیص رنگ ها کم می شود. به همین دلایل درک راننده از زمان سپری شده تغییر می نماید. یعنی برای راننده مدت زمانی که در داخل تونل سپری شده است حدوداً دو برابر مدت زمان واقعی به نظر می رسد. بنابراین برخی رانندگان تحت تاثیر احساساتی از قبیل ترس از محیط های محصور قرار می گیرند.

با توجه به موارد فوق، طراحی سیستم روشنایی مناسب در تونل علاوه بر تامین مقدار درخشندگی مورد نیاز، می‌تواند به رانندگان کمک کند تا افزون بر سهولت انطباق دید و درک اشیا در راه، بر چنین آثار محیطی نیز غلبه کنند.

ویژگی‌های طراحی تونل از لحاظ ساختمانی بر طراحی سیستم روشنایی از لحاظ پیچیدگی، الزامات نگهداری و مصرف انرژی تأثیر اساسی می‌گذارند. این ویژگی‌ها بر مقدار درخشندگی سطح قابل رویت در ناحیه دسترسی نیز تأثیرگذار می‌باشند. میزان تطابق دید راننده با کاهش مقدار درخشندگی سطح قابل رویت در ناحیه دسترسی، کاهش می‌یابد. هماهنگی بین طراح تونل و طراح روشنایی بهترین راه حل ممکن می‌باشد. به این منظور به نکات خاصی باید توجه کرد که عبارتند از:

الف) دسترسی به تونل

اگر سطح راه ورودی و خروجی تونل از مواد تیره ساخته شده باشد، درخشندگی ناحیه دسترسی کاهش می‌یابد و در نتیجه سطح روشنایی در ناحیه دسترسی و ناحیه انتقال کم می‌شود. طراحی نمای تونل موجب اصلاح تغییر آبی محیط تونل برای راننده می‌گردد و می‌تواند اثر تابش نور خورشید را بر روی چشم راننده محدود کند تا به خصوص در تونل‌های شرقی - غربی میزان تأثیر آسمان بر حوزه دید راننده حداقل گردد و درخشندگی ناحیه دسترسی کاهش یابد. برای مثال، درختان و مناظر دیگر بالای ورودی تونل، می‌توانند خیرگی مستقیم ناشی از خورشید را کم کنند. فراهم نمودن سرندهای نور روز برای بخشی از ناحیه آستانه می‌تواند میزان نور مصنوعی موردنیاز را کاهش دهد. چنین سرندهایی معمولاً از نوع ضدآفتاب می‌باشند.

ب) داخل تونل

قرارگرفتن هر کدام از عوارض راه، از جمله تقاطع و سطوح شیب‌دار در داخل تونل، نیاز به ملاحظات عملی در طرح روشنایی سراسر تونل دارد.

همچنین استفاده از رویه روشن در سطح راه و دیواره‌های تونل، کارایی کلی سیستم روشنایی را افزایش می‌دهد. راهنمایی لازم برای دید رانندگان در داخل تونل نیز باید به وسیله سیستم روشنایی در ترکیب با نشانه‌ها و علائم راه، تامین گردد.

ج) خروجی تونل

هر تقاطع و یا هر راه شیب‌داری که بلافاصله بعد از خروجی تونل باشد باید در طراحی روشنایی تونل مدنظر قرار گیرد تا راننده‌ای که از تونل خارج می‌شود بتواند در آینه، تصویر وسایل نقلیه‌ای که هنوز در تونل هستند را ببیند.

در بخش طراحی، با در نظر گرفتن نکات فوق و به منظور طراحی دقیق تر با تکیه بر الزامات و پارامترهای لازم ضروری است به فصل ۵ از نشریه ۶۱۴-۸۰۰ و بخش ۳-۵ طراحی روشنایی تونل رجوع شود.

۶-۱۶-۶- تهویه

تهویه تونل ها حین بهره برداری مجموعه تمهیداتی است که به منظور رقیق سازی و خروج ذرات معلق تولیدی و گازهای حاصل از آگزوز خودروهای سبک و سنگین عبوری از داخل تونل و همچنین ملاحظات آتش سوزی در داخل تونل ها انجام می گیرد. اولین گام در اجرای تهویه تونل ها، بررسی لزوم آن است که آیا در تونل مورد نظر در حالت ترافیکی و یا اضطراری (آتش سوزی) با توجه به استانداردهای موجود تهویه نیاز است یا خیر سپس در صورت نیاز به اجرای تهویه، طراحی بر اساس آن انجام می شود.

۶-۱۶-۶-۱- لزوم اجرای تهویه

با توجه به استانداردها و مشخصات هندسی و ترافیکی، لزوم اجرای تهویه مکانیکی در هردو حالت ترافیکی و اضطراری در تونل بررسی می شود.

- تهویه در حالت ترافیکی

جهت بررسی ضرورت تهویه مکانیکی در تونل ها، استانداردهای مختلفی وجود دارد که بر اساس آنها می توان در این خصوص تصمیم گیری نمود. برخی استانداردهای مورد استفاده عبارتند از:

- استاندارد فرانسه

بر اساس استاندارد فرانسه، تونل هایی که طول آنها بیش از ۱۰۰۰ متر باشد، حتی برای چند ساعت کار در سال بایستی به سیستم تهویه مکانیکی مجهز باشند.

- استاندارد نروژ

بر اساس این استاندارد، اگر حداکثر طول محاسبه شده تونل بیشتر از طول واقعی تونل باشد، تونل نیازی به تهویه مکانیکی ندارد و در غیر این صورت، تهویه مکانیکی در داخل تونل ضرورت دارد. به عبارت دیگر این رابطه حداکثر طولی از تونل را که با توجه به حجم ترافیک عبوری نیاز به تهویه ندارد، محاسبه می کند. این طول را باید برای هر دو حالت ترافیک روان و متراکم محاسبه نمود و عدد هر کدام که کمتر باشد را مبنای ادامه محاسبات قرارداد.

- استاندارد ژاپن

بر اساس این استاندارد، اگر حاصل ضرب ترافیک ساعتی وسایل نقلیه در طول تونل از عدد ۶۰۰ تجاوز کند، جهت تهویه تونل باید از تهویه مکانیکی استفاده کرد. در غیر این صورت تونل به تهویه مکانیکی نیاز ندارد.

۶-۱۶-۲- تهویه تونل در حالت اضطراری و آتش‌سوزی

همانند بررسی لزوم تهویه در حالت ترافیکی باید در حالت اضطراری و آتش‌سوزی نیز لزوم تهویه مکانیکی را بررسی نمود علت این امر آن است که ممکن است بر اساس استانداردهای مختلف در حالت ترافیکی یک تونل به تهویه نیاز نداشته باشد ولی همان تونل بر اساس استانداردهای مختلف در شرایط اضطراری به تهویه مکانیکی نیاز داشته باشد. بنابراین یک تونل تنها در صورتی نیاز به تهویه نخواهد داشت که در هر دو حالت ترافیکی و اضطراری طبق استانداردهای موجود به تهویه مکانیکی نیاز نداشته باشد.

- استاندارد آلمان

مطابق استاندارد آلمان، تونل‌های بیشتر از ۷۰۰ متر به تهویه اضطراری نیاز دارند.

- استاندارد انگلستان

مطابق استاندارد انگلستان حداکثر طول تونل برای تهویه طبیعی ۴۰۰ متر است که با توجه علمی قابل اجرا می‌باشد. با افزایش طول تونل بیش از ۴۰۰ متر بایستی یک سیستم تهویه اضطراری در داخل تونل به کاربرد.

- استاندارد فرانسه

در تونل‌های برون‌شهری در صورتی که طول تونل بیشتر از ۵۰۰ متر و میزان ترافیک بیشتر از ۲۰۰۰ وسیله نقلیه باشد آنگاه به تهویه اضطراری در زمان آتش‌سوزی نیاز است.

۶-۱۶-۳- روال مطالعات تهویه

یکی از مهم‌ترین پارامترهای ایمنی در داخل تونل داشتن سیستم تهویه مناسب (طبیعی یا مصنوعی) است که با رقیق‌سازی و کاهش آلاینده‌های موجود در داخل تونل که بر اثر تردد خودروها انتشار یافته‌اند، موجب افزایش سطح ایمنی استفاده‌کنندگان داخل تونل می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که میزان آلاینده‌ها را تعیین می‌کند، ترافیک عبوری است. در واقع مبدا و مبنای مطالعات تهویه، اطلاعات ترافیکی مسیر است.

اولین قدم در طراحی تهویه تونل‌هایی که نیاز به تهویه مکانیکی دارند، محاسبه میزان هوای مورد نیاز برای رقیق‌سازی آلاینده‌های حاصل از تردد خودروها می‌باشد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از گاز مونواکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن (جدول ۶-۱۱) و ذرات معلق بر اساس ضریب K (جدول ۶-۱۲).

جدول ۶-۱۱- مقدار مجاز آلاینده‌ها برای ۱۵ دقیقه تنفس برحسب طول تونل

نوع آلاینده	حد مجاز (ppm)	مقدار قابل تحمل قبل از بستن تونل (ppm)
مونواکسید کربن (CO)	۷۰	۲۰۰
مونواکسید نیتروژن (NO)	۵	۳۵
دی‌اکسید نیتروژن (NO ₂)	۱	۵

جدول ۶-۱۲- جدول ضریب K برای حالت‌های مختلف دید راننده در تونل

وضعیت دود	ضریب K
فضای تونل تمیز است	$10^{-3} \times (0-5)$
دود را می‌توان مشاهده کرد	$10^{-3} \times (5-8)$
شرایط نامطلوب داخل تونل	$10^{-3} \times (8-12)$
شرایط بسیار نامطلوب (دید پایین‌تر از ۳۰ تا ۵۰ متر)	$10^{-3} \times (12-15)$
تونل باید بسته شود	$K > 18 \times 10^{-3}$

بر اساس استانداردهای مختلف، از جمله استاندارد بین‌المللی مجمع جهانی راه (P.I.A.R.C) سال ۲۰۱۲، با توجه به ترافیک عبوری از مسیر موردنظر و انواع خودروها (به لحاظ میزان آلاینده‌گی EU۱, EU۲, EU۳, EU۴, EU۵, EU۶, Pre EU۱) میزان کلی آلاینده‌ها در سه حالت ترافیک روان (سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت)، ترافیک سنگین (سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت) راه‌بندان (سرعت صفر کیلومتر) محاسبه می‌شود و بیشترین میزان آلاینده‌ها در این بین تعیین شده و پس از آن، میزان هوای موردنیاز برای رقیق‌سازی هر یکی از آلاینده‌های فوق محاسبه می‌شود و در نهایت از بین آن‌ها ماکزیمم‌های موردنیاز انتخاب می‌شود و به عبارت دیگر، سیستم تهویه مکانیکی باید این حجم هوا را جهت تامین ایمنی لازم داخل تولید نماید.

خودروها از لحاظ ترافیکی شامل سه دسته کلی زیر می‌باشند:

PC: خودروهای سواری

LDV: خودروهای سبک مانند وانت و مینی بوس

HGV: شامل خودروهای سنگین مانند اتوبوس، تریلی، کمپرسی و ...

برای محاسبات میزان آلاینده‌گی، همان‌طور که اشاره شد با در نظر گرفتن تعداد خودرو و انواع آن‌ها در داخل تونل در حالت‌های مختلف ترافیکی، میزان آلاینده‌گی هر کدام از آن‌ها از جداول بر اساس سرعت، شیب مسیر، ارتفاع از سطح دریا، و تکنولوژی مورد استفاده در آن محاسبه شده و نسبت به بیشترین مقدار محاسبه شده برای آن آلاینده‌ها حجم هوایی که باعث رقیق شدن آن‌ها شود، محاسبه می‌شود.

همراه با محاسبه میزان هوای موردنیاز برای رقیق‌سازی آلاینده‌های خروجی از آگزوز خودروها، باید میزان هوای موردنیاز در حالت اضطراری آتش‌سوزی نیز محاسبه شده و نسبت به آن سرعت بحرانی^۱ هوای موردنیاز در داخل تونل تعیین شود.

۶-۱۶-۶-۴- انتخاب روش تهویه

روش‌های تهویه در دوران بهره‌برداری به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

• ۶-۱۶-۶-۴-۱- تهویه طولی

در تهویه طولی، هوا به داخل تونل دمیده و یا از آن به خارج مکیده می‌شود. خود تهویه طولی هم به چندین دسته تهویه طولی با دویل میانی، تهویه طولی با دو دویل میانی، تهویه طولی با جت فن، تهویه طولی با نازل ساکاردو و تهویه طولی با جت فن و دویل میانی تقسیم‌بندی می‌شود. یکی از شروط انتخاب نوع سیستم تهویه در تونل‌ها، طول آن‌ها است که طبق آیین‌نامه ایمنی راه‌های کشور، باید از تهویه طولی در تونل‌های با طول ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر استفاده شود. زیرا در تونل‌های بیشتر از ۲۰۰۰ متر از آنجایی که بایستی سیستم‌های قدرتمند با توان بالاتری نصب گردند، باعث می‌شوند که سرعت هوا در داخل تونل‌ها بیش‌ازحد استاندارد ۸ متر بر ثانیه برسد و به همین دلیل باعث تراکم گازهای سمی در خروجی تونل می‌گردند و همچنین خود باعث به حرکت درآمدن ذرات معلق ته‌نشین شده و افزایش آلودگی می‌شود. مشخصات کلی روش‌های تهویه طولی به شرح زیر است:

- در این حالت، باید فضای لازم در سطح مقطع تونل جهت نصب تاسیسات تهویه در نظر گرفته شود.
- با نصب تعدادی جت فن در سقف تونل تهویه تونل انجام می‌پذیرد.
- با احداث چاه میانی در تونل، تهویه طبیعی صورت گرفته و ممکن است به تهویه مکانیکی نیاز نباشد.
- از مزایایی این روش سهولت نصب تجهیزات آن است.
- کم بودن راندمان بادبزن، به جهت دوطرفه عمل نمودن بادبزن‌ها را می‌توان به‌عنوان عیب این روش در نظر گرفت.
- در این روش نیازی به احداث ساختمان تهویه نمی‌باشد.
- این روش در تونل‌های یک‌طرفه کارایی بیشتری داشته و جهت حرکت هوا در تونل‌های یک‌طرفه در جهت ترافیک خواهد بود.
- اثر پیستونی و تهویه طبیعی به تهویه هوا کمک می‌کند.
- تراکم آلودگی‌ها از صفر در دهانه ورودی آغاز و تا ماکزیمم در دهانه خروجی تغییر می‌کند.
- یکی از امتیازهای تهویه طولی آن است که در آن از تمام مقطع تونل برای عبور هوا استفاده می‌شود و به کاهش مقاومت آیرودینامیکی مسیر و در نتیجه انرژی مصرفی کمتری منجر می‌شود.

¹ Critical Velocity

- مهم‌ترین مشکل تهویه طولی با استفاده از جت فن این است که به علت تغییر شرایط جوی، ممکن است جهت جریان تهویه طبیعی در مقابل با جریان تهویه مکانیکی قرار گیرد.

• ۶-۱۶-۶-۲- تهویه نیمه عرضی

توزیع یکنواخت یا جمع‌آوری هوای آلوده یکنواخت در طول تونل، از مشخصه‌های این سیستم است. در نشریه «طراحی سیستم‌های تهویه تونل‌های راه» پژوهشکده حمل‌ونقل وزارت راه و ترابری، بیان شده است که سیستم تهویه نیمه عرضی تا تونل‌هایی به طول ۲۷۵۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

• ۶-۱۶-۶-۳- تهویه عرضی (کاملاً عرضی)

در تونل‌های بیشتر از ۲۷۵۰ متر، می‌توان از این نوع سیستم تهویه استفاده نمود. در تهویه عرضی، هوای تازه از شبکه‌های کانال تامین هوای تازه، به داخل تونل دمیده شده و هوای آلوده از شبکه‌های کانال تخلیه، به خارج مکیده می‌شود. به جز اثر پیستونی در این سیستم فشار هوای یکنواختی در داخل تونل وجود دارد که سبب کاهش سطح آلودگی می‌شود. هزینه این نوع تهویه بسیار بالا است و بهتر است در صورتی که تهویه طولی و نیمه عرضی به هیچ‌عنوان پاسخگو نباشند از این نوع سیستم تهویه استفاده نمود.

۶-۱۷- ایمنی

برای تامین ایمنی کامل در تونل‌سازی رعایت موارد زیر الزامی است:

الف) کلیه کارکنان باید در مورد خطرات کار در فضای محصور و پیامدهای احتمالی آن، ضرورت صدور مجوز ورود، مقررات ایمنی، اطفای حریق، کمک‌های اولیه، کاربرد صحیح وسایل حفاظتی، عملیات نجات و خروج اضطراری آگاهی کافی داشته باشند. همچنین باید وسایل و تجهیزات حفاظتی و امدادی موردنیاز در اختیار کارکنان قرار گیرد. در عین حال این امکانات نباید جایگزین روش‌های ایمن کار و سیستم‌های تهویه مکانیکی شوند.

ب) در هر نوبت قبل از ورود کارکنان به داخل تونل باید مجوز این کار بعد از بازرسی دقیق محل و تایید مسئول ایمنی و بهداشت حرفه‌ای صادر گردد. ورود کارکنان به داخل تونل و محل اجرای عملیات بدون مجوز ممنوع است. اطلاعات مندرج در فرم صدور مجوز باید شامل محل اجرای عملیات، توصیف کار، تعداد و مشخصات کارکنان، تاریخ و زمان ورود، خطرات احتمالی، تدابیر ایمنی، وسایل حفاظت فردی و مدت اجرای عملیات باشد.

ج) فعالیت کارکنان در حین حفاری، حمل‌ونقل مواد و سایر مراحل تونل‌سازی باید به صورت گروهی انجام گیرد و وظایف و مسئولیت‌های هریک از افراد مشخص گردد. یک نفر از اعضای تعلیم‌دیده و باتجربه گروه باید به سیستم‌های هشداردهنده صوتی و نوری و وسایل ارتباطی مناسب مجهز گردد و دور از ناحیه خطر در یک محل امن مستقر شود تا شرایط کار را زیر نظر داشته باشد. این فرد نباید مسئولیت دیگری بر عهده داشته باشد تا در صورت احساس خطر بتواند به موقع اعضای دیگر گروه و مسئولین را مطلع کند. در شرایط اضطراری تنها کسانی مجاز به ورود به ناحیه

خطر و شرکت در عملیات نجات هستند که آگاهی و توانایی‌های لازم را داشته باشند و به وسایل حفاظت فردی مناسب مجهز شوند.

د) باید با استفاده از وسایل سنجش مناسب و افراد صلاحیت‌دار در شروع کار و در طول اجرای عملیات میزان گردوغبار، گازها و بخارات خطرناک اندازه‌گیری شود تا اطمینان حاصل شود که آلاینده‌ها پایین‌تر از حد مجاز قرار دارند. هرگاه مقدار اکسیژن هوا به کمتر از ۱۹ درصد برسد کارکنان در صورتی مجاز به ادامه کار هستند که به وسایل حفاظت تنفسی مناسب مجهز شوند.

ه) باید متناسب با تعداد و نوع فعالیت کارکنان، تعداد و نوع ماشین‌آلات و مقدار گازها و گردوغبار حاصل از عملیات آتشکاری، حفاری و حمل مواد، سیستم‌های تهویه مکانیکی مناسب در محل نصب و از کارایی آن‌ها اطمینان حاصل شود. کاربرد تجهیزات بنزینی در صورتی مجاز است که تهویه کافی وجود داشته باشد.

۶-۱۷-۱- مقررات ایمنی حمل، نگهداری و کاربرد مواد ناریه

تهیه، حمل، نگهداری و کاربرد مواد ناریه در کارهای عمرانی باید مطابق با آیین‌نامه و مقررات حفاظت و ایمنی در معادن وزارت کار و امور اجتماعی باشد.

عملیات آتشکاری باید توسط افراد صلاحیت‌دار انجام گیرد. آتشبار و افراد دیگری که با مواد ناریه در ارتباط هستند با توجه به وظایفی که بر عهده‌دارند باید آموزش کافی دیده باشند. علاوه بر این کارکنانی که در نزدیکی محل اجرای آتشکاری کار می‌کنند باید آگاهی لازم از خطرات احتمالی و مقررات ایمنی داشته باشند.

نوع، مقدار و نحوه کاربرد مواد ناریه باید متناسب با شرایط کار و اهداف مورد انتظار باشد. استفاده از باروت و مواد مشابه در داخل تونل و سایر فضاهای سرپوشیده به دلیل تولید و انتشار گازهای سمی و خطرناک ممنوع است. روش کردن سیگار، استفاده از چراغ‌ها و بخاری‌های نفتی و منابع گرمای دیگر، نگهداری مایعات قابل اشتعال و سایر عواملی که احتمال آتش‌سوزی و انفجار را افزایش می‌دهند، در نزدیکی جایگاه موقت نگهداری مواد ناریه ممنوع است. جایگاه موقت نباید در مسیر رفت‌وآمد قرار داشته باشد، این محل باید به نحوی محافظت شود که افراد غیرمجاز به مواد ناریه دسترسی نداشته باشند.

حمل چاشنی و فیتیله همراه با مواد ناریه مجاز نیست. همچنین محل نگهداری موقت مواد ناریه باید حداقل ۱۵ متر با چاشنی و فیتیله فاصله داشته باشد.

قبل از آتشکاری باید ناحیه خطر یا محدوده‌ای که احتمال پرتاب سنگ وجود دارد با علائم هشداردهنده مشخص گردد. در این مورد با رعایت اصول ایمنی می‌توان از نیروی انسانی آموزش‌دیده استفاده کرد.

در هنگام آتشکاری کلیه کارکنان و ماشین آلات باید به اندازه کافی از محدوده خطر دور شوند. برای اطمینان از این امر علاوه بر بازرسی کامل اجرای عملیات باید زمان شروع و پایان آتشکاری به وسیله علائم صوتی و نوری مناسب اعلام گردد.

استفاده از منابع انرژی فرکانس رادیویی در فاصله ۳۰۰ متری در محل آتشکاری به دلیل احتمال تولید جرقه انفجاری در چاشنی های الکتریکی مواد ناریه ممنوع است.

در مواردی که آتشکاری به وسیله فیتیله اطمینان انجام می شود، انفجار بیش از ۱۰ چال در یک نوبت ممنوع است.

آتشبار باید بعد از اجرای عملیات و سپری شدن حداقل ۱۵ دقیقه با رعایت دقت و احتیاط کامل محل را از نظر احتمال ریزش، انفجارهای ناخواسته، وجود گردوغبار و گازهای سمی و خطرات دیگر بازدید کند و تنها در صورتی که ایمنی عملیات مورد تایید قرار گیرد اجازه ادامه کار صادر گردد.

بعد از آتشکاری، هرگاه تعدادی از چال ها منفجر نشوند باید از نقطه ای به فاصله حداقل ۴۰ سانتیمتر از دهانه چال موردنظر و به موازات آن چال جدیدی حفر نمود و پس از خرج گذاری آن را منفجر کرد. خالی کردن چال پر شده به هر علت مجاز نیست.

۶-۱۷-۲- عوامل آسیب رسان و بیماری زای محیط کار و بهداشت حرفه ای

۶-۱۷-۲-۱- صدا

تماس مداوم با صدای بیش از حد مجاز، ناراحتی های جسمی و روانی به ویژه افت شنوایی کارکنان را به همراه دارد. هرگاه تراز فشار صوت، صدای کوبه ای^۱ و صدای ضربه ای^۲ از مقادیر جدول ۶-۱۳ و جدول ۶-۱۴ فراتر رود، تدابیر حفاظتی مناسب برای کاهش اثرات زیان آور صدا باید به کار گرفته شود.

برای کاهش تراز صوت به پایین تر از حدود تماس مجاز باید روش های کنترل مهندسی مانند کنترل صدا در منبع یا به کارگیری موانع یا جاذب های صدا در مسیر انتقال صوت و همچنین روش های کنترل مدیریتی مانند انتخاب درست کارکنان و کاهش زمان مواجهه افراد با صدا مورد استفاده قرار گیرد. هرگاه روش های فوق به اندازه کافی موثر نباشند پیمانکار موظف است گوشی های حفاظتی مناسب در اختیار کارکنان قرار دهد. به علاوه برنامه معاینات پزشکی، به خصوص آزمایش شنوایی سنجی برای راننده بولدوزر و کارکنان دیگری که ممکن است در اثر تماس مداوم با صدا دچار افت شنوایی شوند، در نظر بگیرد.

^۱ Impulsive Noise

^۲ Impact Noise

جدول ۶-۱۳- مقادیر قابل قبول حداکثر تماس شغلی با صدا

تراز فشار صوت بر حسب دسیبل*	طول مدت تماس بدون گوشی حفاظتی در روز بر حسب ساعت
۸۰	۱۶**
۸۵	۸
۹۰	۴
۹۵	۲
۱۰۰	۱
۱۰۵	۱ ۲
۱۱۰	۱ ۴
۱۱۵***	۱ ۸

* واحد اندازه‌گیری صدا

** حداکثر اضافه کاری مجاز در نظر گرفته شود.

*** تماس صوتی (صوت مداوم و متناوب بدون گوشی حفاظتی) در مواردی که تراز فشار صوت از ۱۱۵ دسیبل بیشتر است، مجاز نمی‌باشد.

جدول ۶-۱۴- حد تماس شغلی با صدای ضربه‌ای یا کوبه‌ای

تراز فشار صوت بر حسب دسیبل	تعداد مجاز صدای ضربه‌ای یا صدای کوبه‌ای در روز
۱۴۰*	۱۰۰
۱۳۰	۱۰۰۰
۱۲۰	۱۰۰۰۰

* تراز فشار صوتی نباید از ۱۴۰ دسیبل تجاوز کند.

۶-۱۷-۲-۲- گازها، بخارات، دود و گرد و غبار

کارکنانی که بر حسب نوع کار و شرایط محیطی در معرض عوامل زیان‌آور شیمیایی قرار دارند باتوجه به نوع آلاینده، نحوه انتشار، راه ورود و میزان تماس ممکن است دچار عوارض و بیماری‌های حاد و مزمن شوند و توانایی‌های آن‌ها در دراز مدت کاهش یابد. هرگاه میزان مواجهه شغلی کارکنان با گازها، بخارات، دود و گرد و غبار بیش از حد مجاز باشد باید با استفاده از کنترل‌های مهندسی مانند تعمیر دستگاه‌ها و ماشین‌آلات معیوب یا نصب سیستم‌های تهویه مناسب و کنترل‌های مدیریتی مانند کاهش زمان مواجهه کارکنان با آلاینده‌های محیطی، نظارت دقیق بر فعالیت‌های کارکنان برای اطمینان از رعایت اصول ایمنی در حین جابه‌جایی و کار با مواد شیمیایی خطرناک، سلامتی کارکنان را در حین اجرای مراحل مختلف پیمان تامین نماید. در صورتی که تدابیر فوق کافی نباشد باید بر حسب مورد، لباس کار، دستکش ایمنی، ماسک تنفسی و سایر وسایل حفاظتی مناسب را در اختیار کارکنان قرار دهد. باید برای انجام معاینات پزشکی از کارکنانی که به طور مداوم در معرض گرد و غبار حاوی ذرات سیلیس، ذرات آزبست، دود ناشی از گرم کردن قیر، دود و دمه جوشکاری، بخارات اسیدی و سایر عوامل زیان‌آور شیمیایی قرار دارند تمهیدات لازم در نظر گرفته شود.

۶-۱۷-۲-۳- تنش گرمایی^۱

گرمای دستگاه‌ها و ماشین‌آلات، جابه‌جایی و پخش مواد و مصالح گرم، انجام کارهایی که مستلزم شعله و حرارت است و فعالیت بدنی مداوم در کارهای عمرانی تعادل گرمایی بدن را مختل می‌کند و عوارضی نظیر: شوک حرارتی، خستگی، گرفتگی عضلات، ناراحتی‌های پوستی و گرم‌زدگی را ایجاد می‌نماید.

۶-۱۷-۲-۴- سایر عوامل

در مورد سایر عوامل زیان‌آور و بیماری‌زا مانند سرما و فشار استانداردهای کمیته فنی بهداشت حرفه‌ای کشور معتبر می‌باشند.

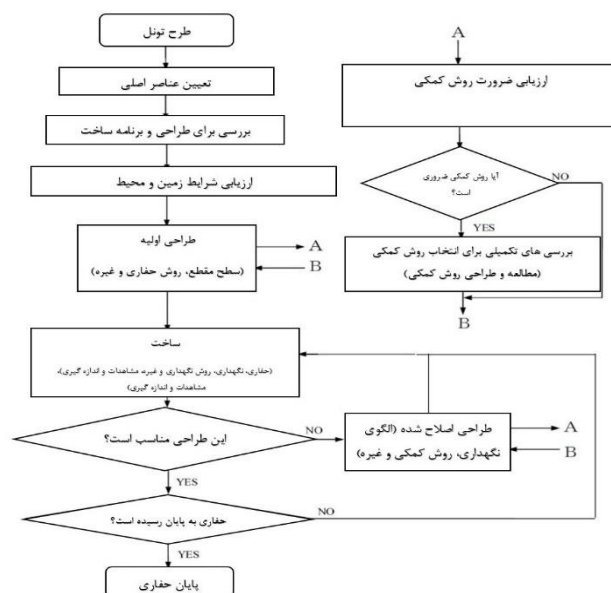
۶-۱۸- ملاحظات زیست‌محیطی

با رعایت قوانین و مقررات مربوطه باید تمام تلاش ممکن برای سرکوب صدا، لرزش، ارتعاش هوا با فرکانس پایین، کاهش و کمبود آب، نشست سطح زمین، تغییر شکل سازه‌های موجود، تخلیه آب‌های آلوده و مشکلات ناشی از ترافیک، جلوگیری از آلودگی‌هایی مانند گل شدن آب، خاک و سنگ با فلزات سنگین و همچنین حفظ محیط زیست انجام شود.

¹ (Heat Stress)

۶-۱۹- روش‌های کمکی^۱

روش‌های کمکی اصطلاح جامعی است از اقداماتی که هدف آن تضمین ایمنی حفاری تونل (شامل پایداری جبهه کار و جلوگیری از ورود آب) و همچنین حفظ محیط اطراف (شامل آب‌های زیرزمینی، کنترل نشست زمین و جلوگیری از آسیب به سازه‌های مجاور) در مواردی که الگوهای رایج نگهداری یا تقسیم سطح مقطع راه‌حل موثری ارائه نمی‌دهد یا مقرون به صرفه نیستند. کاربرد روش‌های کمکی باید با در نظر گرفتن اهداف، شرایط زمین و محل تعیین شود زیرا این روش‌ها ارتباط نزدیکی با طراحی تونل و روش‌های ساخت دارند. علاوه بر این، از آنجایی که برخی روش‌های کمکی ممکن است نیازمند امکانات و تجهیزات مخصوص به خود باشند و از طرفی بر چرخه‌های ساخت تونل تأثیر مستقیم داشته باشند باید کاربرد ماشین‌ها و مصالح معمولی از قبل بررسی شوند. شکل ۶-۲۲ فلوچارت خلاصه شده مطالعات طراحی و ساخت تونل را از دیدگاه روش کمکی نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۲- فلوچارت مطالعات، طراحی و ساخت تونل با تمرکز بر روش کمکی

۱- در مواردی که روش‌های کمکی در طرح اصلی گنجانده شده‌اند: برای دستیابی به ایمنی و بهره‌وری اقتصادی در پروژه تونل‌سازی روش‌های کمکی منطقی باید بر اساس شرایط زمین، سطح مقطع حفاری و شرایط محل شامل محدودیت‌های نشست سطح زمین در نظر گرفته شوند. از آنجایی که طرح اولیه بر اساس نتایج مطالعات محدود تهیه شده است باید بدون توجه به مشخصات طرح اولیه و منطقه ساخت و با در نظر گرفتن نتایج مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها به روش‌های کمکی منطقی حین ساخت اصلاح شود.

¹ Auxiliary methods

۲- در مواردی که در حین ساخت تونل از روش های کمکی استفاده می شود: این روش ها باید با در نظر گرفتن عوامل زیر اعمال شود:

اثرات، بهره وری اقتصادی، دوره ساخت، مطالعه سازگاری روش های کمکی با الگوی نگهداری و روش حفاری و با توجه به وضعیت ساخت و نتایج اندازه گیری ها و غیره.

۶-۱۹-۱- کاربرد روش های کمکی

در مواردی که از روش های کمکی استفاده می شود خصوصیات و ویژگی های هر روش باید به خوبی شناخته شوند. با این شناخت، شرایط زمین و محل مورد بررسی قرار می گیرد و جزئیاتی مانند برنامه زمان بندی و روش ساخت به طور کامل در نظر گرفته می شود. جدول ۶-۱۵ طبقه بندی روش های کمکی را نشان می دهد. همان طور که در جدول نشان داده شده است روش های کمکی با توجه به اهدافشان به انواع گسترده ای طبقه بندی می شوند: پایداری جبهه کار، کنترل آب های زیرزمینی، کنترل نشست سطحی و جلوگیری از آسیب به سازه های مجاور.

جدول ۶-۱۵- طبقه بندی روش های کمکی

ملاحظات	شرایط زمین			هدف						روش	
				حفاظت از محیط			ایمنی ساخت				
	خاک	سنگ نرم	سنگ سخت	حفاظت از سازه های اطراف	کنترل نشست سطح زمین	کنترل آب زمین	پایداری جبهه کار				
							پایداری جبهه کار	پایداری جبهه کار	پایداری جبهه کار		
۱*	**	*								فورپولینگ	تقویت سقف (تاج)
۳*	*	*		*	*					Steel pipe forepiling	
۳*	*			*	*		*	*		روش جت گروتینگ افقی	
۳*	*			*	*					روش Slit concrete method	
۳*	*	*		*	*					لوله گذاری در سقف	
۱*	*	*	*					*		شاتکریت جبهه کار	تقویت جبهه کار
۱*	*	*	*		*			*		بولت جبهه کار	

موقعیت	نگهداری فولادی با پایه ^۱									
	شاتکریت کف									
	کفبند موقتی									
	بولت تقویت کننده کف									
	شمع تقویت کننده کف									
	شمع های کناری تقویت کننده کف									
	تزریق تقویت کننده کف									
کنترل جریان آب	زهکشی	چال زهکشی								
		Well point								
		چاه عمیق								
		تونل زهکشی								
	آبند کردن	روش تزریق آببند								
		انجماد								
		پنوماتیک ^۲								
		دیوار حائل								
		پیش تقویت قائم								

¹ wing rib² Pneumatic method

توزیع			*		*		*		*	۳*
دیواره حائل					*				*	۳*

۱- پایداری جبهه کار: حفر تونل (کوهستانی) بر پایه پایداری جبهه کار و تاج تونل تا زمان نصب سیستم نگهداری استوار است.

تکنیک های مختلفی مانند تقسیم سطح مقطع به مقاطع کوچک تر، کوتاه کردن گام حفاری و نگهداری های فولادی قوی تر برای اطمینان از پایداری جبهه کار وجود دارد. باین حال در برخی موارد حفاری یک مقطع بزرگ و اعمال روش های کمکی به جای تکنیک های فوق از نظر محدودیت استفاده از تجهیزات و بهره وری اقتصادی و غیره کارآمدتر خواهد بود. در مطالعه انتخاب روش های کمکی پایداری جبهه کار، با توجه به آسیب پذیری جبهه کار نسبت به ورود آب، باید وضعیت آب های زیرزمینی حتماً مدنظر قرار گیرد. در مرحله بعد روش های کمکی برای تثبیت بخش های مختلف تاج، جبهه کار و کف تونل انتخاب می شوند. مشکلات مربوط به این نواحی گاهی به یکدیگر مربوط می شوند. به عنوان مثال پایداری تاج و جبهه کار با یکدیگر مرتبط هستند و نشست کف باعث سستی ناحیه تاج می شود که پایداری آن را دچار مشکل می کند. بنابراین باید ناپایداری جبهه کار را پیش بینی و اقدامات لازم را برای چنین رویدادی از قبل آماده کرد و بر اساس مشاهده جبهه کار و نتایج اندازه گیری ها اقدامات لازم را در مراحل اولیه انجام داد.

۲- کنترل آب زیرزمینی: در صورت حفر تونل در عمق پایین تر از سطح آب زیرزمینی، آب روان در محل حفاری ظاهر می شود که ممکن است سبب مشکلاتی مانند تضعیف پایداری جبهه کار، کف گل آلود و همچنین کاهش کیفیت نگهداری فولادی شود. علاوه بر این مشکلاتی برای محیط زیست اطراف از جمله فرونشست زمین به دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی در اطراف و تخلیه چاه ها وجود خواهد داشت. اقدامات متقابل در برابر چنین مشکلاتی شامل روش های زهکشی و آب بندی می شود.

زهکشی می تواند باعث نشست سطحی یا ایجاد اثرات مخرب بر سازه های مجاور تونل شود؛ بنابراین لازم است اثراتی که ممکن است بر محیط اطراف داشته باشد مطالعه و اقدامات متقابل پیش از رخداد انجام شود. در صورت نگرانی در مورد اثراتی مانند کاهش سطح آب زیرزمینی، نشست سطحی غیرمجاز ناشی از زهکشی، روش آب بندی دیگر گزینه ممکن است. تزریق که یکی از روش های آب بندی است می تواند میزان ورود آب را کاهش داده و باعث بهبود زمین شود. علاوه بر این به عنوان معیاری برای پایداری جبهه کار و لایه های ناپیوسته (پر شده با ماسه) می باشد. روش های دیگر مانند انجماد در برخی موارد استفاده می شود.

۳- کنترل نشست زمین: نشست سطح زمین در حین حفاری تونل ارتباط پیچیده ای با شرایط و موقعیت زمین، آب زیرزمینی، روش ساخت و عوامل دیگر دارد. علل عمده نشست سطحی را می توان در سست شدن زمین اطراف به دلیل حفاری تونل و کاهش سطح آب زیرزمینی (کاهش فشار آب منفذی) طبقه بندی کرد.

در موارد زمین تحکیم نشده یا زمین با روباره پایین، برای کنترل نشست از روش‌های کمکی پایداری جبهه کار استفاده می‌شود. نشست ایجادشده به دلیل کاهش سطح آب زیرزمینی شامل نشست تحکیم خاک رسی^۱ به دلیل افت فشار بین بافتی^۲ و نشست فوری خاک شنی است. از این رو در چنین شرایطی باید اقداماتی برای آب‌های زیرزمینی (روش‌های آب‌بندی) که هدف آن محدود کردن ورودی آب‌های زیرزمینی به داخل تونل است اعمال شود. در مواردی که نشست هم به سست شدن زمین و هم به کاهش سطح آب زیرزمینی مربوط می‌شود این اقدامات باید باهم اعمال شوند. همچنین تزریق از سطح زمین، روش‌های ترکیبی^۳ و پیش تقویت قائم^۴ که هدف آن تقویت زمین است نیز مؤثر است.

۴- مراقبت از سازه‌های مجاور: گاهی اوقات مواردی پیش می‌آید که حفر تونل در مجاورت سازه‌های سطحی موجود مانند ساختمان‌ها و پل‌ها اجتناب‌ناپذیر است. در چنین مواردی لازم است اقداماتی برای حفاظت از این سازه‌ها انجام شود که شامل: ۱- روش کنترل رفتار حین حفاری از سمت تونل، ۲- روش کنترل رفتار حین حفاری با بهبود زمین، ۳- روش تقویت سازه‌های موجود. در موارد ۱ و ۲، روش تزریق و روش ترکیبی که موجب پایداری سطح و تقویت زمین می‌شوند استفاده می‌شوند. در مورد ۳ از زیرسازی و غیره استفاده می‌شود.

هنگامی که یک تونل مستقیماً در زیر یا مجاورت یک جاده، راه‌آهن، کانال آب، ساختمان یا سازه زیرزمینی حفاری می‌شود حد مجاز یا معیار کنترل باید از طریق مشورت با مدیران تعیین و اقدامات متقابل در طول ساخت در نظر گرفته شود.

۶-۱۹-۲ روش‌های کمکی برای ایمنی در ساخت تونل

۶-۱۹-۲-۱ روش کمکی برای پایداری جبهه کار

روش‌های پایداری جبهه کار را می‌توان با توجه به محلی که در آن اعمال می‌شود به سه دسته طبقه‌بندی کرد: ۱- پایداری تاج، ۲- پایداری جبهه کار و ۳- پایداری کف. برای پایداری جبهه کار، برنامه‌ریزی اقدامات متقابل (از قبل) در برابر ناپایداری احتمالی، ارزیابی مستمر پایداری با مشاهده جبهه کار و غیره و اقدامات معقول در مراحل اولیه مهم است. در صورت حفاری در زمین‌های ناپایدار مانند نواحی شکستگی گسلی، سنگریزه‌ها و رسوبات، روش‌های کمکی مناسب باید با توجه به ایمنی ساخت، قطعیت و تأثیر بر محیط اطراف و غیره انتخاب شود.

۱- روش‌های پایداری تاج^۵

¹ Consolidation settlement of clayey soil

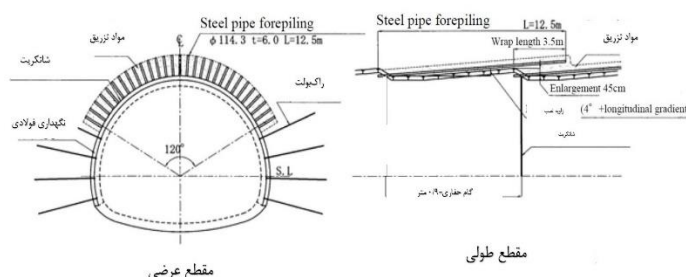
² Interstitial pressure

³ Mixing methods

⁴ Vertical pre-reinforcement

⁵ Crown

لوله‌ها قبل از حفاری تونل در امتداد محیط فوقانی مقطع حفاری برنامه‌ریزی شده به زمین وارد می‌شوند اما آرایش دقیق آن‌ها بسته به شرایط زمین و موقعیت ساختمان‌های مجاور متفاوت است. این روش که می‌تواند برای بهبود پایداری زمین نیز استفاده شود با پر کردن فضای خالی بین لوله‌های فولادی و زمین با دوغاب، تماس محکمی بین لوله‌های فولادی و زمین ایجاد می‌کند. نمونه دیگر، روش forepiling نوع تزریقی است که تقویت‌کننده‌های ترکیبی (متشکل از لوله‌های فولادی و مواد دوغاب) با تزریق خمیر سیمان یا دوغاب شیمیایی باعث تقویت زمین می‌شوند (شکل ۶-۲۵).



شکل ۶-۲۵- نمونه از Pipe forepiling

۲- پایداری جبهه‌کار: روش‌های پایداری جبهه‌کار شامل شاتکریت، بولت جبهه‌کار یا تزریق است. در برخی موارد پایداری جبهه‌کار را می‌توان با حفاری بخشی (بخش به بخش) و استفاده از شاتکریت بهبود بخشید چراکه مقیاس و شکل جبهه‌کار تأثیر زیادی بر زمان ایستایی (پایداری) جبهه‌کار دارد.

الف) شاتکریت جبهه‌کار: همان‌طور که در شکل ۶-۲۶ نشان داده شده است به محض حفاری، شاتکریت جبهه‌کار با ضخامت ۳ تا ۱۰ سانتی‌متر روی جبهه‌کار پاشیده می‌شود.

ب) بولت جبهه‌کار: بولت‌های جبهه‌کار شامل دو نوع کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از ۵ متر هستند. هدف از بولت جبهه‌کار پایداری جبهه‌کار و کاهش نشست سطح زمین با نگهداری قسمتی یا کل جبهه‌کار با راکبوت است. بولت جبهه‌کار زمانی مؤثر است که همراه با شاتکریت استفاده شود (شکل ۶-۲۷).

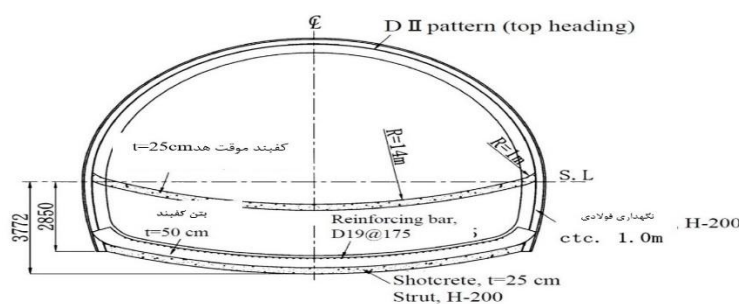
برای افزایش اثر تقویت می‌توان از بولت‌های تزریقی استفاده کرد. بولت‌های پلاستیکی تقویت‌شده با الیاف و راکبوت-های فولادی شکاف‌دار که برش آن‌ها آسان‌تر است اغلب استفاده می‌شوند.

ج) تزریق: تزریق روشی برای پایداری جبهه‌کار است که در آن مواد سیمانی یا شیمیایی (مانند water-glass grout) برای تقویت خاک در زمین تزریق می‌شوند. از اهداف دوغاب کاهش ورودی آب به داخل تونل با کاهش نفوذپذیری خاک و پایداری زمین با شکستگی زیاد که مستعد ریزش هستند می‌باشد. پس از بررسی محل ورود آب و یا طول زمین ناپایدار (مانند ناحیه شکست گسلی)، ترجیحاً بهترین مواد تزریق و روش ساخت انتخاب می‌شود. شکل ۶-۲۸ نمونه‌ای از تزریق را نشان می‌دهد.

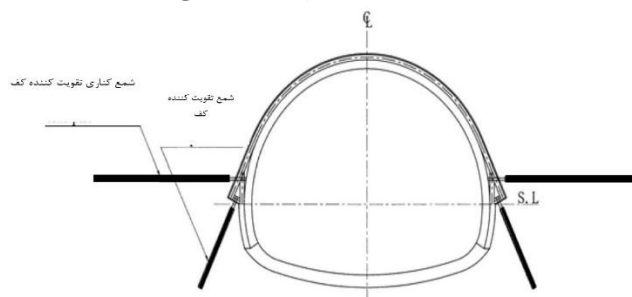
الف) قوس کفبند موقتی^۱: به طور کلی، قوس کفبند موقتی به طور موقت تونل را با شاتکریت یا به طور همزمان با استفاده از نگهداری فولادی تقویت می کند که روش بسیار کارآمدی است. با این حال سهولت حفاری و راندمان کار با تخریب بخش کفبند موقتی کاهش می یابد. از آنجایی که ممکن است در هنگام تخریب کفبند موقتی جابه جایی بزرگ اتفاق بیفتد باید رفتار کف نگهداری^۲ به دقت بررسی شود (شکل ۶-۲۹).

ب) پایه و بولت تقویت کننده کف: بولت ها و پایه های تقویت کننده کف (نصب راک بولت به سمت پایین در پایه نگهداری ها یا لوله های فولادی با قطر کم و تزریق) باهدف کاهش تنش در محل تماس نگهداری و زمین و جلوگیری از ریزش در حین حفاری انجام می شوند. اگر مقاومت زمین در اطراف کف خیلی کم باشد نصب بولت ها و همزمان تزریق تحت فشار خمیر سیمان یا دوغاب شیمیایی سبب افزایش مقاومت زمین می شود. اگر آب حفاری هنگام نصب بولت یا لوله فولادی با قطر کم باعث آسیب به کف شود این روش می تواند اثر معکوس داشته باشد؛ بنابراین برای انتخاب روش حفاری اتخاذ روش حفاری بدون آب نیز باید در نظر گرفته شود. شکل ۶-۳۰ نمونه ای از شمع تقویت کننده کف باهدف کاهش تغییر شکل تونل و دستیابی به ظرفیت باربری مورد نیاز زمین را نشان می دهد.

ج) نگهداری فولادی با پایه^۳: نگهداری های فولادی با پایه به عنوان یک اقدامات متقابل در برابر ظرفیت باربری ناکافی زمین در پای نگهداری ها استفاده می شود. فولادهای H شکل و غیره به پایه نگهداری فولادی متصل می شوند تا باعث افزایش مساحت و در نتیجه کاهش فشار وارده شوند.



شکل ۶-۲۹- نمونه از قوس کفبند موقتی در طاق



شکل ۶-۳۰- نمونه ای از شمع های تقویتی

¹ Temporary inverted arch

² The foot of the support

³ wing ribs

۶-۱۹-۲ روش کمکی برای کنترل جریان آب

روش‌های کمکی برای کنترل آب‌های زیرزمینی باید با در نظر گرفتن برنامه زمان‌بندی، روش‌های ساخت و نتایج بررسی شرایط زمین محل حفاری انتخاب شوند.

اگر میزان آب زیرزمینی به هنگام حفاری زیاد باشد مشکلاتی مانند کاهش پایداری جبهه کار (در نتیجه مشکل شدن حفاری تونل)، چسبندگی ناکافی شاتکریت و راک‌بالت و کاهش راندمان کاری در تونل را به همراه خواهد داشت. اقدامات لازم برای کنترل آب زیرزمینی را می‌توان به دو دسته روش‌های زهکشی و روش‌های آب‌بندی^۱ تقسیم‌بندی کرد.

۱- روش‌های زهکشی: روش‌های زهکشی بیشتر از روش‌های آب‌بندی استفاده می‌شوند. از آنجایی که ممکن است مواردی وجود داشته باشد که کاهش سطح آب زیرزمینی کافی نباشد (به دلیل شرایط سطح زمین و یا فراوانی آب زیرزمینی در محیط‌های اطراف) روش‌های زهکشی باید به دقت انتخاب شوند.

الف) حفاری زهکشی^۲: حفاری زهکشی روشی پرکاربرد است که در آن آب از طریق گمانه‌های حفاری شده توسط دستگاه حفاری یا جامبو به منظور کاهش فشار و سطح آب زیرزمینی خارج می‌شود. در شرایط خاک تحکیم نشده باید مراقب بود که ذرات خاک همراه با آب خارج نشوند.

ب) دریافت زهکشی^۳: این روش رویکردی برای حفر تونل پایلوت با قطر کوچک همراه با حفاری زهکشی برای تونل‌هایی با مقدار زیاد آب زیرزمینی است (شکل ۶-۳۱). هنگامی که یک سفره آب با حجم و فشار زیاد بالای تونل باشد ممکن است تونل‌های زهکشی زیادی نیاز باشد.

ج) چاه زهکشی^۴: این روش برای حذف آب زیرزمینی تحت فشار منفی است که در آن لوله‌های جمع‌آوری آب زیرزمینی به نام "well points" داخل زمین جا داده می‌شود (شکل ۶-۳۲).

د) چاه عمیق^۵: در این روش یک چاه عمیق معمولاً با قطر ۳۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متری حفر و یک پمپ شناور برای برداشت آب استفاده می‌شود (شکل ۶-۳۳).

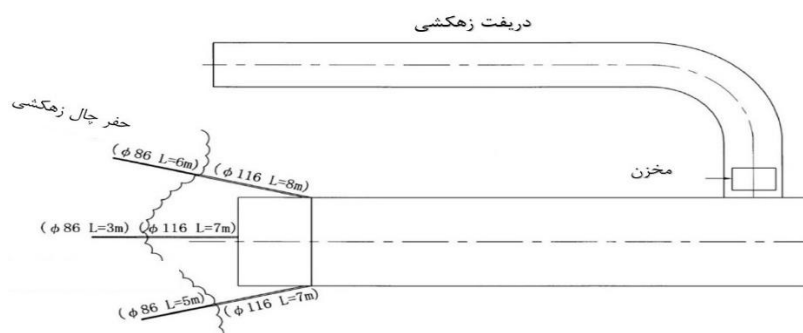
¹ Water sealing

² Drainage boring

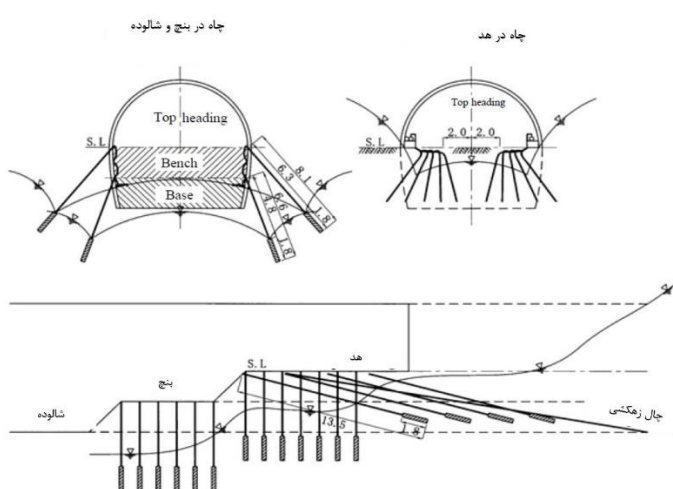
³ Drainage drift

⁴ Well point drainage

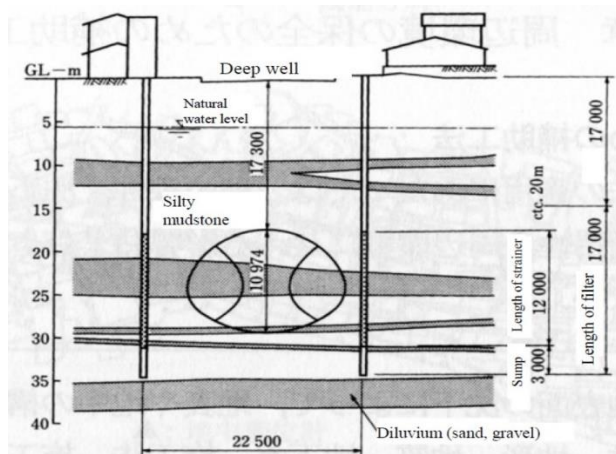
⁵ Deep well



شکل ۶-۳۱- نمونه‌ای استفاده ترکیبی از دریفت زهکشی و حفاری زهکشی



شکل ۶-۳۲- نمونه از چاه نفوذی (well point) غرق شده در تونل



شکل ۶-۳۳- نمونه‌ای از یک سیستم چاه عمیق

۲- روش‌های آب‌بندی: شرایط خاصی وجود دارد که روش‌های آب‌بندی به‌جای (یا علاوه بر) روش‌های زهکشی می‌توانند مفید واقع شوند. به‌عنوان مثال در مواردی که مقدار آب ورودی را با روش‌های زهکشی نمی‌توان کاهش داد، روش زهکشی را نمی‌توان به دلیل خطر نشست سطح زمین استفاده کرد یا ملاحظات محیط خارجی اجازه کاهش یا تخلیه آب زیرزمینی را نمی‌دهد.

روش های مختلفی برای آب بندی وجود دارند که شامل روش های تزریق آب بندی و روش های دیوار حائل^۱ هستند. الف) روش تزریق آب بندی^۲: هدف از استفاده از این روش کاهش نفوذپذیری زمین است. مواد سیمانی (مانند خمیر سیمان) یا مواد تزریقی شیمیایی (مانند water glass grout) به منظور پر کردن فضاهای خالی و درزه ها در جلو یا اطراف جبهه کار تزریق می شوند. این روش هم برای کاهش جریان آب و هم برای پایداری جبهه کار (با توجه به بهبود شرایط زمین) مؤثر است. در صورت استفاده از روش تزریق آب بندی باید از مصالح و روش های متناسب با شرایط ساخت مانند منطقه تزریق، ماهیت زمین، فشار و میزان آب ورودی استفاده شود. همچنین باید تأثیر تزریق بر تونل و نواحی اطراف بررسی شود.

به طور کلی دوغاب شیمیایی نفوذپذیری بیشتری از دوغاب نوع سیمانی دارد و در زمان کوتاه تری جامد می شود؛ بنابراین دوغاب شیمیایی برای کنترل ورود آب به تونل مناسب تر است.

دو روش مختلف تزریق شامل تزریق از سطح زمین و دومی تزریق از داخل تونل است. مزیت روش اول عدم اختلال در چرخه حفاری تونل است اما زمانی که روباره ضخیم باشد مقرون به صرفه نیست. به کارگیری این روش مستلزم در نظر گرفتن شرایط عملکرد، برنامه زمان بندی ساخت تونل و هزینه است. در روش دوم برای دستیابی به تزریق مناسب باید سربندی^۳ یا لاینینگ موقتی^۴ ساخته شود.

در این روش توجه به فشار دوغاب ضروری است، در فشار کم، تزریق ضعیف و در فشار خیلی زیاد هزینه ها افزایش می یابد (به دلیل حجم بیشتر دوغاب استفاده شده) و همچنین ممکن است اثرات نامطلوبی بر زمین یا سازه های اطراف داشته باشد. فشار دوغاب باید با در نظر گرفتن شرایط زمین شناسی، فشار آب زیرزمینی و تأثیر بر سازه های مجاور، آب های زیرزمینی و رودخانه مجاور کنترل شود. در پایان تزریق باید تغییر مقدار آب ورودی، حجم، فشار و عملکرد تزریق با آزمایش چال ها بررسی شود (شکل ۶-۳۴).

روش دیوار قطع جریان: روش دیوار قطع جریان تکنیکی برای قطع جریان آب زیرزمینی ورودی به داخل تونل از زمین های اطراف با نصب دیوارهای دیافراگمی زیرزمینی^۵ یا شمع های ورق فولادی^۶ در دو طرف تونل است. این روش برای زمین های با نفوذپذیری بالا و مقدار زیاد آب مناسب است. در صورت استفاده از این روش، باید روش های ساخت با در نظر گرفتن ماهیت زمین، محیط اطراف و عمق حفاری باشد. در استفاده از این روش باید اطمینان حاصل کرد که دیوار از راکبولت ها فاصله کافی را داشته باشد.

¹ Cutoff wall

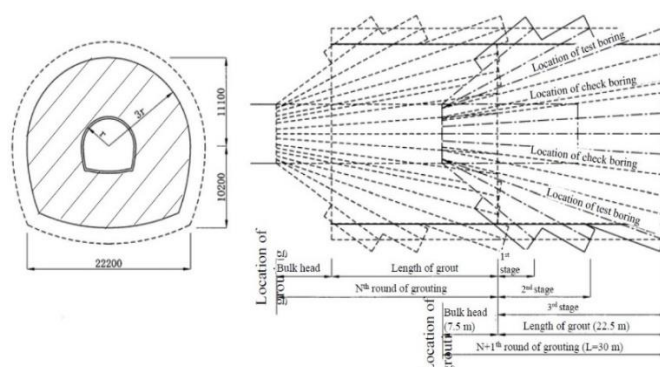
² Water sealing grouting method

³ bulkhead

⁴ Temporary lining

⁵ Underground diaphragm walls

⁶ Steel sheet piles



شکل ۶-۳۴- نمونه ای از تزریق از داخل تونل

۶-۱۹-۳- روش‌های کمکی برای محافظت از محیط اطراف

۶-۱۹-۳-۱- روش‌های کمکی برای جلوگیری از نشست سطح زمین

روش‌های کمکی برای جلوگیری از نشست سطح زمین تنها باید پس از بررسی شرایط زمین و شناسایی سازه‌های سطحی و زیرزمینی که احتمالاً تحت تأثیر نشست قرار می‌گیرند انتخاب شوند. همچنین باید اثر بخشی و کاربرد تأثیر آن‌ها بر محیط، برنامه زمان‌بندی و روش ساخت نیز در نظر گرفته شوند.

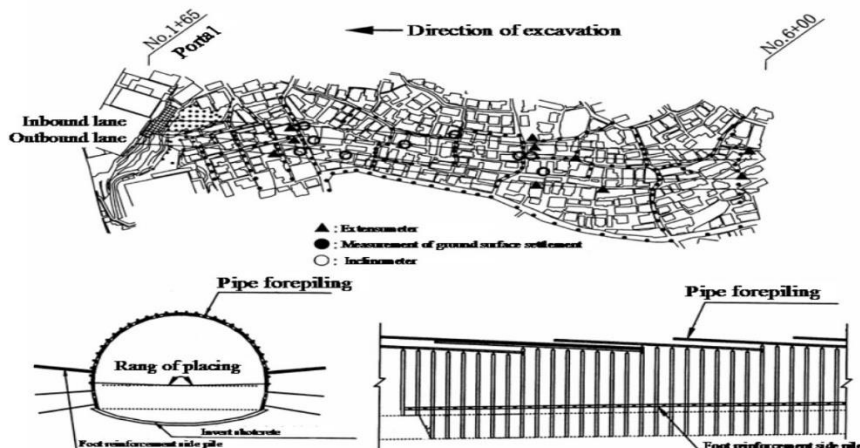
برای جلوگیری از نشست سطح زمین ناشی از سست شدن محیط اطراف به دلیل حفاری تونل اقداماتی مانند pipe forepiling، لوله محافظت سقف^۱، تزریق افقی^۲، "slit concrete" و پیش تقویت قائم^۳ استفاده می‌شود. همچنین برای جلوگیری از نشست سطح زمین ناشی از زهکشی، روش‌هایی مانند تزریق آب‌بندی یا انجماد به کار گرفته می‌شود. با این وجود روش‌های پیشگیری از نشست سطح زمین معمولاً با روش‌های کمکی پایداری جبهه کار استفاده می‌شوند. ممکن است با به کارگیری روش‌های پیش تحکیمی و محدود کردن جابه‌جایی در جلوی جبهه کار، بار اعمال شده بر سیستم نگهداری افزایش یابد؛ بنابراین نیاز است در صورت لزوم ظرفیت باربری سیستم نگهداری تقویت شود. علاوه بر روش‌های ذکر شده نصب زود هنگام کفبند نیز برای کاهش نشست بسیار کارآمد است.

۱- Pipe forepiling: شکل ۶-۳۵ نمونه‌ای از pipe forepiling را نشان می‌دهد که توسط یک ماشین مخصوص به منظور جلوگیری از تغییر شکل ساختمان‌های بالای یک تونل دوقلو انجام شده است.

¹ Pipe-roof protection

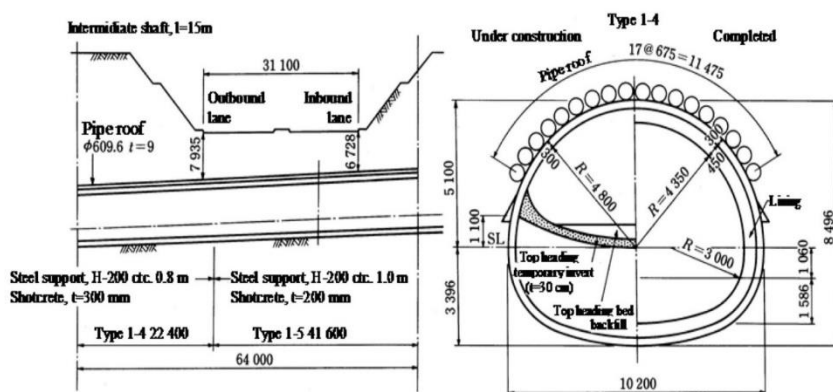
² Horizontal jet grouting

³ Vertical pre-reinforcement



شکل ۶-۳۵- نمونه ای از pipe forepiling تونل (Orandazka)

۲- لوله محافظت سقف: این روش نشست سطح زمین را با تقویت زمین اطراف تونل با لوله‌های فولادی، کاهش می‌دهد. از آنجاکه این روش نیازمند تجهیزات نسبتاً بزرگ مانند دیوار واکنش^۱ و سرعت پیشروی پایین است باید شرایط و برنامه زمان‌بندی ساخت در نظر گرفته شود. شکل ۶-۳۶ نمونه‌ای از این لوله محافظ سقف با قطر بزرگ را نشان می‌دهد که برای جلوگیری از نشست جاده اصلی پرترافیک که در بالای تونل قرار دارد استفاده می‌شود.

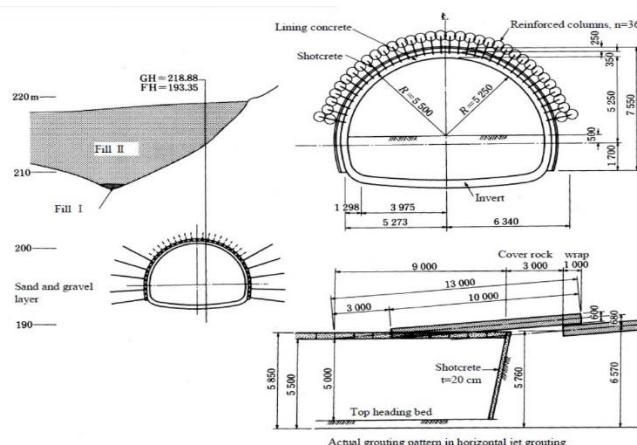


شکل ۶-۳۶- نمونه ای از لوله محافظ سقف با قطر زیاد

۳- روش تزریق جت افقی: در این روش برای کاهش نشست سطحی، یک زون تقویت‌شده قوسی پوسته مانند در زمین جلوی جبهه کار تشکیل می‌شود. به‌طور کلی چال دوغاب با طول ۱۰ تا ۱۵ متر با ماشین مخصوص حفاری می‌شوند. همان‌طور که میله مته چرخشی حفاری می‌کند مواد مقاوم‌سازی نوع سیمانی از انتهای میله مته حفاری با فشار بالا تزریق و ستونی از مخلوط خاک و مواد تقویت‌کننده تشکیل می‌شود. منطقه تقویت‌شده را می‌توان با قرار دادن تعداد موردنیاز از این نوع ستون‌ها در امتداد محیط تونل تشکیل داد. نوع دیگری از این روش وجود دارد که

¹ Reaction wall

لوله‌های فولادی را در ستون‌ها به منظور افزایش سختی طولی نصب می‌کنند. این روش علاوه بر تقویت دیوارهای جانبی (شمع‌های کناری) برای تقویت جبهه کار نیز استفاده می‌شود. شکل ۶-۳۷ نمونه‌ای از تزریق جت افقی برای یک تونل کم‌عمق را نشان می‌دهد.



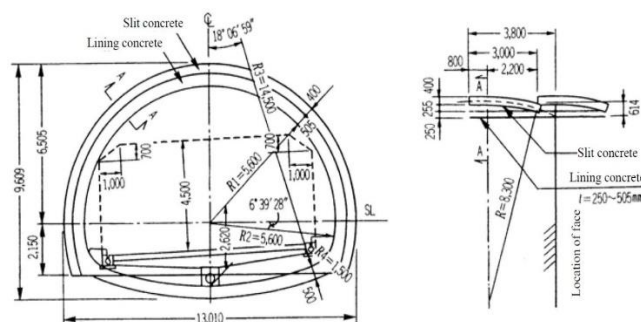
شکل ۶-۳۷- نمونه‌ای از تزریق جت افقی

۴- روش Slit concrete: این روش شامل ایجاد خندق قوسی^۱ با طول ۳ تا ۵ متر و ضخامت ۱۵ تا ۵۰ سانتی‌متر است که توسط ماشین مخصوص در زمین جلوتر از جبهه کار در امتداد محیط تونل ایجاد می‌شود. خندق حفر شده بلافاصله پس از برش با بتن یا مواد دیگر پر می‌شود تا لاینینگ به شکل پوسته قوسی تشکیل شود. از آنجایی که یک ساختار صلب در امتداد عرضی تونل تشکیل می‌شود می‌توان از جابه‌جایی جلوتر از جبهه کار جلوگیری کرد. این روش برای تونل در مناطق شهری (که نشست سطحی بسیار اندکی مجاز است) و یا تونلی که از نزدیکی تأسیسات مهم عبور می‌کند مناسب است.

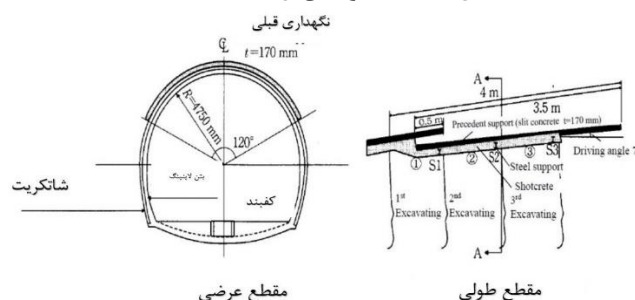
در این روش فشار به هنگام آزادسازی تنش بر روی slit concrete و یا پایه نگهداری‌های فولادی متمرکز خواهد بود. بنابراین باید از ظرفیت باربری پایه نگهداری فولادی و slit concrete اطمینان حاصل شود. یک روش برش استفاده از اره زنجیری^۲ و دیگری multiple auger screws است. شکل ۶-۳۸ نمونه‌ای از روش slit concrete برای بزرگ‌تر کردن تونل موجود و شکل ۶-۳۹ جهت جلوگیری از نشست سطح زمین استفاده می‌شود را نشان می‌دهند.

^۱ Arched ditch

^۲ Chain saw



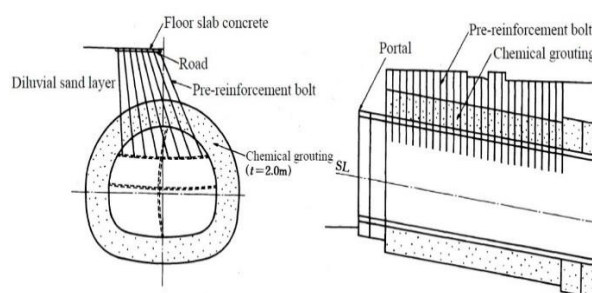
شکل ۶-۳۸- نمونه ای از slit concrete



شکل ۶-۳۹- نمونه ای از slit concrete

۵- روش پیش تقویت قائم: در این روش پیش از حفاری تونل گمانه‌هایی تقریباً قائم از سطح زمین حفر سپس بولت‌های تقویت‌کننده در این چال‌ها قرار داده شده و با پرکننده‌ای مانند ملات، کاملاً چسبانده می‌شوند؛ بنابراین این روش می‌تواند شرایط زمین را بهبود بخشد و باید در کاهش نشست جلوتر از جبهه کار یا جلوگیری از سست شدن زمین از ابتدای حفاری تا زمان اعمال شاتکریت یا مقاوم شدن اتصال راکبولت‌ها مؤثر باشد. از مزایای این روش عدم تداخل با حفاری تونل هست اما ممکن است با توجه به کاربری زمین امکان‌پذیر نباشد.

۶- تزریق: این روش ممکن است برای جلوگیری از نشست سطح زمین استفاده شود. مواد تزریق و روش استفاده باید مطابق باهدفی که برای آن استفاده می‌شود انتخاب شود. شکل ۶-۴۰ نمونه ای از استفاده ترکیبی از پیش تقویت قائم و تزریق شیمیایی را به منظور جلوگیری از نشست سطح زمین در زمین تحکیم نشده واقع در زیر ساختمان‌ها و جاده‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۴۰- نمونه ای از ترکیب روش پیش تقویت قائم و تزریق شیمیایی

۶-۱۹-۴- روش‌های کمکی برای محافظت از سازه‌های مجاور

پس از بررسی شرایط زمین و سازه‌های مجاور که ممکن است تحت تأثیر حفاری تونل قرار گیرند روش‌های کمکی برای حفاظت از این سازه‌ها با در نظر گرفتن اثربخشی، قابلیت اجرا، تأثیر بر محیط اطراف، برنامه و روش ساخت تونل انتخاب می‌شوند.

روش‌های کمکی برای حفاظت از سازه‌های مجاور به تکنیک‌های کنترل رفتار حفاری از سمت تونل، تکنیکی برای کنترل گسترش رفتار حفاری با بهبود زمین متوسط و تکنیکی برای تقویت سازه‌های موجود طبقه‌بندی می‌شوند:

۱- کنترل رفتار حفاری از طرف تونل: روش تزریق یا ترکیبی که باهدف پایداری جبهه کار و تقویت زمین به‌طور مداوم استفاده می‌شوند.

۲- کنترل گسترش تاثیرات در میان سازه‌های مجاور: این روش شامل تقویت زمین، بهسازی و روش دیوار حائل است. هدف تقویت و بهسازی زمین کنترل جابه‌جایی است (مانند روش تزریق). با این وجود تحت این روش، زمین اطراف تونل نه تنها بسته به شرایط خاک، توالی ساخت و فاصله ممکن است آسیب ببیند بلکه سازه‌های مجاور نیز ممکن است در اثر فشار یا نشت مواد دوغاب آسیب ببینند. همچنین اقدامات لازم برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی منطقه نیز باید انجام شود.

روش دیوار حائل^۱ روشی برای جلوگیری از انتشار جابه‌جایی یا کاهش سطح آب زیرزمینی با جداسازی سازه موجود از تونل است. با توجه به نوع دیوار برش، این روش را می‌توان به صفحه شمع فولادی^۲، صفحه لوله‌ای^۳، دوغاب اختلاط جت^۴ و شمع لوله فولادی^۵ تقسیم‌بندی کرد. اگر جریان آب زیرزمینی با این روش قطع شود باید مراقبت‌های لازم جهت حفاظت از محیط‌های آب زیرزمینی انجام شود. در صورت استفاده از این روش این نگرانی وجود دارد که باعث ناپیوستگی جابه‌جایی زمین شود و باید مراقب بود که اثرات نامطلوبی بر پایداری جبهه کار در حین حفر تونل و افزایش جابه‌جایی در تونل در حال ساخت نداشته باشد.

۳- تقویت سازه‌های موجود: این تکنیک شامل یک روش تقویت مستقیم سازه‌ها و روش‌های زیرسازی است. شکل ۴۱-۶ نمونه ای از دیوار حائل را نشان می‌دهد که یک سپر آب را در دو طرف ایجاد می‌کند و برای جلوگیری از کاهش سطح آب زیرزمینی در بخش بالایی یک تونل که از زیر یک پل از قبل موجود عبور می‌کند طراحی شده است.

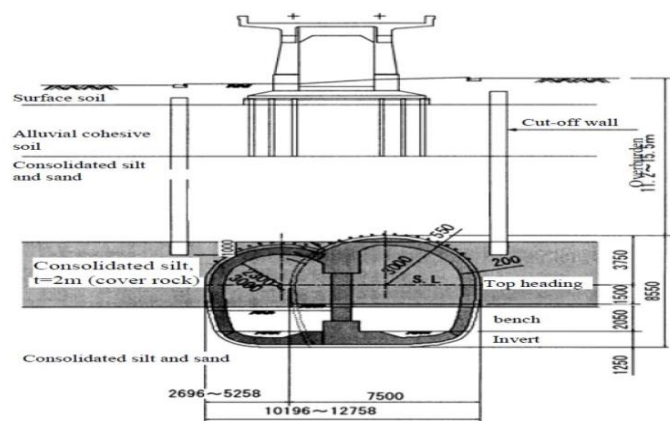
¹ Cut off wall

² Steel pile sheeting

³ Pipe sheeting

⁴ jet mixing grout

⁵ Steel pipe piling



شکل ۶-۴۱- نمونه ای از دیوارهای حال برای آب بندی

فصل هفتم

مدیریت ساخت تونل

۷- مدیریت ساخت تونل

در حفاری تونل اطمینان از پایداری آن با به کارگیری سیستم نگهداری اولیه و لاینینگ، در نظر داشتن شرایط زمین و استفاده فعالانه از ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل ذاتی زمین ضروری است. به منظور مدیریت مجموعه‌ای از عملیات‌ها برای دستیابی به اجرای مناسب با هزینه منطقی، رفتار زمین و سیستم نگهداری باید از طریق مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها بررسی شود. زمانی که طراحی و/یا ساخت نامناسب ارزیابی شود باید در اسرع وقت اصلاح شوند. سوابق مربوط به مدیریت ساخت باید سازمان‌دهی و به‌طور ایمن حفظ شود تا در زمان لازم جهت تعمیر، تقویت و سایر موارد به‌عنوان اسناد اولیه مورد استفاده قرار گیرند. اسناد مدیریت ساخت می‌تواند شامل داده‌های بررسی زمین‌شناسی، سوابق کنترل کیفیت، سیستم نگهداری، روش‌های ساخت کمکی^۱ و سوابق مشاهده/اندازه‌گیری، ناپایداری جبهه کار و جریان‌های نامنظم آب و غیره باشد. نمونه سوابق پس از تکمیل تونل شامل بازرسی لاینینگ است. اسناد نتایج بازرسی لاینینگ در پایان تونل‌سازی باید به‌گونه‌ای سازمان‌دهی شود که بتواند به‌عنوان ضمیمه به اسناد اضافه شود و نیاز به ردیابی و به‌روزرسانی تاریخچه تعمیر پس از اتمام پروژه را برآورده کند.

۷-۱- برنامه زمان‌بندی

پروژه‌ها عموماً فعالیت‌های پیچیده‌ای هستند. به همین جهت، وجود برنامه زمان‌بندی جامع برای هدایت اجرای پروژه الزامی است. همان‌گونه که ثبت پیشرفت کار در پروژه انجام می‌شود، کارهای باقی‌مانده در پروژه نیز با توجه به اطلاعات جدید، نیاز به سنجش دوباره دارند. پیشرفت پروژه طبق برنامه‌ریزی انجام‌شده به‌ندرت اتفاق می‌افتد. در وضعیت عادی، فرآیند تعریف‌شده و شفاف برای زمان‌بندی الزامی است تا بتوان عوامل و موضوعاتی را که به‌صورت بالقوه روی عملکرد پروژه تأثیر می‌گذارند پیش‌بینی کرده، تشخیص داده و به آن‌ها رسیدگی شود. هدف از ارائه برنامه زمان‌بندی پروژه، تهیه نقشه راهی است که نشان دهد پروژه در چه زمانی و چگونه قادر است دستاوردها را با همان محدوده تعریف‌شده پروژه تحویل دهد.

موفقیت اجرای پروژه‌های بزرگ عمرانی نیازمند رویکرد سیستماتیک جهت برنامه‌ریزی و کنترل نحوه اجرای فعالیت‌ها از نظر زمان اجرا و هزینه است. کار اصلی سیستم برنامه‌ریزی و کنترل پروژه، تهیه، گردآوری، ثبت و نگهداری اطلاعات مراحل مختلف دوره پروژه و پردازش، طبقه‌بندی و تحلیل آن‌ها و تهیه گزارشات لازم برای مدیریت پروژه است. هدف این سیستم، هدایت پروژه بر اساس زمان‌بندی و بودجه تعیین‌شده، تأمین اهداف، محصولات نهایی پروژه و ذخیره اطلاعات حاصله جهت استفاده در پروژه‌های بعدی است. این سیستم باید توانایی یاری گروه مدیریت پروژه

¹ auxiliary construction

را در بهینه سازی سه عامل زمان، هزینه و کیفیت اجرای پروژه داشته باشد. یک سیستم برنامه ریزی و کنترل پروژه خوب باید دارای توانایی ها و قابلیت های زیر باشد:

- تعیین تاریخ اتمام پروژه در مرحله برنامه ریزی و زمان بندی اولیه
 - تعیین ساختار شکست کار (WBS) جهت اجرای صحیح و عدم تداخل فعالیت ها و منابع آن ها
 - ارائه راه حل با صرفه جهت جبران تأخیرها در اجرای برخی فعالیت های پروژه در زمان اجرا
 - ارائه راه حل با صرفه جهت تسریع مدت اجرای پروژه در صورت تغییر در شرایط اقتصادی و اجتماعی کشور یا سازمان مولد پروژه و تغییر اولویت های پروژه و الزام به اجرای سریع تر آن
 - زمان بندی و برنامه ریزی در جهت استفاده از نیروی انسانی، ماشین آلات و تجهیزات به منظور استفاده مطلوب از آن ها و گریز از بروز تنگنا و محدودیت در این زمینه
 - چگونگی توزیع مواد و مصالح مصرفی میان پروژه ها و فعالیت های مختلف آن ها
 - زمان بندی سفارش های خرید مواد، مصالح، ماشین آلات و تجهیزات جهت کاهش هزینه های انبارداری و ضایعات و همچنین زیان های ناشی از راکد ماندن منابع مالی پروژه
 - تعیین میزان نقدینگی پروژه در هر واحد زمانی جهت پرداخت به موقع صورت حساب ها و پیش پرداخت ها
 - ثبت و تجزیه و تحلیل نتایج حاصله و در مواقع لزوم تغییر در برنامه ریزی پروژه، نگهداری نتایج جهت استفاده در پروژه های آتی و جلوگیری از بروز مشکلات مشابه.
- زمان بندی جدول زمانی یا برنامه زمانی در مدیریت پروژه، فهرستی از نقاط عطف پروژه، فعالیت ها و اقلام تحویلی است که اغلب با تاریخ آغاز و پایان فعالیت ها در نظر گرفته و درج می شوند. در اغلب موارد، این آیتم ها را بر اساس تخصیص منابع، بودجه و مدت زمان، با اتصال به وابستگی ها و رویدادهای برنامه ریزی شده در جدول مورد نظر وارد می کنند. جدول و برنامه زمان بندی، همچنین ترتیب انجام فعالیت های پروژه از ابتدای کار تا خاتمه پروژه را تعیین می کند.

در مفهوم کلی، برنامه زمان بندی، ساختار شکست پروژه (WBS) را در طول زمان اجرای پروژه با کمک نمودار گانت به تصویر می کشد. اهمیت ساختار شکست کار و برنامه زمان بندی تا حدی است که به عنوان یکی از مدارک بسیار مهم و اولیه، از همان ابتدای پروژه تهیه و تحویل مهندس مشاور می شود. موفقیت یک پروژه، به وجود برنامه زمان بندی تفصیلی جامع و قابل اتکا (و مصوب) بستگی دارد. برنامه ای که به خوبی نشان دهنده ارتباط هر کار با سایر فعالیت های پروژه و زمان انجام آن باشد. برنامه زمان بندی با نرم افزارهایی مانند MSP^۲ تهیه می شود. نرم افزار مدیریت پروژه میکروسافت، به رسم نمودار شبکه ای بر اساس زمان بندی پروژه کمک کرده و باعث دقت بیشتر در مدت زمان

² Microsoft Project Management

انجام کارها می‌شود. تعیین وزن فیزیکی و ریالی در زمان‌بندی کار نیز از مسائل مهمی است که با امکانات موجود در نرم‌افزار MSP برای مسئولین پروژه انجام‌پذیر است.

۷-۱-۱- مراحل برنامه‌ریزی

برنامه‌ریزی پروژه شامل کارهایی است که با انجام آن‌ها می‌توان فعالیت‌های پروژه و روابط میان آن‌ها را شناسایی و مدت، منابع موردنیاز و هزینه اجرای آن‌ها را بر اساس معیارهای موجود در سازمان مولد پروژه برآورد نمود. مراحل مختلف برنامه‌ریزی را می‌توان به گام‌های زیر تقسیم‌بندی کرد:

۷-۱-۱-۱- گام اول: تحلیل پروژه، شناخت فعالیت‌ها و روابط آن‌ها و تهیه ساختار شکست کار (WBS)

- مشخص نمودن فازبندی اجرای پروژه بر اساس سازمان‌دهی اجزاء فعالیت‌های آن و تعیین فعالیت‌های عمده هریک از فازهای پروژه یا به عبارت دیگر تقسیم پروژه به زیر پروژه‌های آن
- شکستن هر زیر پروژه به جزئیات آن و تعیین تمام فعالیت‌های پروژه بر اساس نحوه اجرای آن
- طراحی ساختار شکست کار (WBS) به صورت منظم و سیستماتیک با روش از بالا به پایین^۳ که با توجه به نوع، شکل و سازمان‌دهی وسعت پروژه می‌تواند بر اساس فازهای اجرا پروژه، کارهای عمده پروژه، محصول نهایی و اجزای آن، واحدهای سهیم در اجرای پروژه و یا ترکیبی از آن‌ها انجام گیرد.
- تعیین تمام وقایع و رخداد‌های اجرایی پروژه جهت تسهیل در کنترل‌های بعدی و تاکید بر پایان بعضی از فعالیت‌های حیاتی در زمان معین
- شناخت و تعریف روابط تقدم و تأخر بین فعالیت‌ها به طور صحیح و واقعی

۷-۱-۱-۲- گام دوم: برآورد مدت، منابع موردنیاز و هزینه اجرای هریک از فعالیت‌های پروژه

- برآورد و تخمین مدت اجرای هریک از فعالیت‌های تعیین‌شده در گام اول با توجه به نظریات کارشناسان و تجربیات قبلی در زمینه اجرای پروژه‌های مشابه
- ترسیم شبکه پروژه با استفاده از روش CPM^۴ و بهره‌گیری از برنامه‌های نرم‌افزاری تخصصی در امر برنامه‌ریزی و کنترل پروژه
- برآورد منابع انسانی، تجهیزات و ماشین‌آلات موردنیاز جهت اجرای هریک از فعالیت‌های پروژه
- برآورد مواد و مصالح موردنیاز جهت اجرای پروژه
- تعیین و شناخت منابع موجود و قابل‌دسترس و امکان به کارگیری آن‌ها

^۳ TOP-DOWN

^۴ Critical Path Method

- برآورد هزینه اجرایی هریک از فعالیت ها با توجه به هزینه های ثابت و متغیر آن ها
- تجزیه و تحلیل هزینه های پروژه و مقایسه نتایج حاصله با بودجه تعیین شده

۷-۱-۱-۳- گام سوم: زمان بندی پروژه، برنامه ریزی منابع، بررسی رابطه زمان و هزینه و بررسی مشکلات

احتمالی

- آنالیز زمانی شبکه، تعیین مسیر بحرانی و شناسایی فعالیت های با شناوری کم (فعالیت های بحرانی)
- تخصیص منابع موجود به فعالیت های پروژه با توجه به محدودیت های موجود منابع
- آنالیز منابع پروژه و تغییر در برنامه زمان بندی اولیه با توجه به محدودیت منابع در دسترس
- تسطیح منابع در صورت لزوم و تغییر در برنامه زمان بندی اولیه با توجه به تسطیح انجام شده
- تجزیه و تحلیل رابطه زمان و هزینه^۵ و زمان بندی پروژه با حداقل هزینه به کمک روش های موجود و جدید ارائه شده در این زمینه
- بررسی شرایط نامناسب جوی و سایر مشکلات قابل پیش بینی که بر نحوه و زمان اجرا فعالیت های پروژه تأثیر گذار هستند.

۷-۱-۲- کنترل پروژه

برابری مدت زمان و هزینه واقعی اجرای پروژه با مدت زمان و هزینه پیش بینی شده، به ندرت رخ می دهد. همچنین در مراحل مختلف اجرای یک پروژه ممکن است فعالیت هایی به پروژه افزوده یا کاسته شود. بنابراین کنترل و نظارت از مراحل اساسی در مدیریت پروژه محسوب می شود و به هنگام نمودن برنامه زمان بندی در پروژه های معین، می تواند باعث بالا رفتن کیفیت نحوه انجام فعالیت ها گردیده و از تاخیرهای احتمالی جلوگیری کند. به هنگام نمودن پروژه به معنی به هنگام کردن فعالیت های پروژه و روابط میان آن ها، اطلاعات زمانی فعالیت ها، اطلاعات هزینه و منابع اجرایی فعالیت ها است. در مرحله نظارت و کنترل، وضعیت کنونی پروژه در دوره زمانی تعیین شده، میزان انحرافات از برنامه زمان بندی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و راهکارهایی جهت انجام پروژه حتی المقدور در تاریخ پایان پیش بینی شده آن و یا حداقل نزدیک به زمان مورد انتظار با کمترین مقدار افزایش هزینه، ارائه می شود. در این مرحله گزارش هایی از قبیل زمان بندی به هنگام شده، منحنی های تحلیل هزینه، هیستوگرام های مربوط به هزینه های مصرف شده و منابع مورد نیاز پروژه و نمودارهای پیشرفت تهیه می شوند. این گزارش ها و تحلیل های آن به گروه مدیریت جهت تصمیم گیری صحیح و به موقع کمک می کند.

⁵ Cost-Time Trade-Off

۷-۱-۳- تجزیه و تحلیل، ارزشیابی و ذخیره سازی اطلاعات پروژه

برنامه ریزی و کنترل پروژه وقتی می تواند مؤثر، مفید و تسهیل کننده عملیات اجرایی باشد که به صورت نظام مند و با نگرش سیستمی اجرا شود. یکی از توانایی های سیستم کنترل پروژه، ثبت و تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از اجرای پروژه و تأثیر آن بر روند پیشرفت پروژه است. کنترل پروژه علاوه بر اینکه نحوه پیشرفت مالی پروژه را مورد بررسی قرار می دهد، در مقاطعی که مشکلاتی از قبیل افزایش بی مورد هزینه های اجرایی، کمبود منابع و مواد مورد نیاز، عدم اجرای فعالیت های کلیدی پروژه در تاریخ تعیین شده و غیره بروز کند، مدیر پروژه را در تشخیص راه حل مشکل یاری می کند. در بسیاری از مواقع راه حل این مشکلات، زمان بندی و برنامه ریزی مجدد پروژه خواهد بود. ایجاد یک بانک اطلاعاتی و سیستم پشتیبان تصمیم در مرحله ارزشیابی پروژه می تواند بسیار مفید واقع شود. این سیستم باید شامل موارد زیر باشد:

- سیستم تدارکات و کنترل موجودی برای مواد مورد نیاز پروژه
- سیستم بودجه بندی و مالی پروژه
- سیستم بایگانی فنی اسناد و مدارک پروژه
- سیستم مقایسه کیفی و تهیه و تأیید صورت وضعیت ها
- سیستم اطلاعاتی انبار جهت کنترل صحیح و کاهش هزینه ها
- سیستم ذخیره و تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصله در مرحله کنترل پروژه

۷-۱-۴- تسطیح منابع

۷-۱-۴-۱- نیروی انسانی

به طور کلی نیروی انسانی مورد نیاز در پروژه های عمرانی از سه قسمت زیر تشکیل می گردد:

- ۱- نیروی اجرایی
- ۲- نیروی مدیریت کارگاهی
- ۳- نیروی پشتیبانی (دفتر مرکزی)

۱- نیروی اجرایی

مدت و تعداد نیروی مورد نیاز از روی فعالیت های پروژه با توجه به حجم عملیات و بر اساس برآورد فعالیت هایی که می بایست انجام پذیرد مشخص می شود. با مشخص شدن نوع شغل و تعداد کارگران مورد نیاز در پروژه، می توان بر اساس منحنی برداری شبکه و فعالیت های پروژه، مدت و زمان مورد نیاز به کارگران مختلف را تعیین کرد.

۲- نیروی مدیریتی کارگاهی

نیروی انسانی ثابت کارگاه شامل رئیس کارگاه، مهندس کارگاه، نقشه بردار، تکنسین های مختلف، حسابدار، کارکنان اداری و کارگران خدماتی چون راننده و آبدارچی و غیره می باشد.

عملیات اجرایی هر پروژه در چهار دوره زمانی مختلف، شامل مدت تجهیز کارگاه، مدت اجرای پیمان، مدت رفع نقص و مدت برچیدن کارگاه می باشد. نیاز به نیروی انسانی در دوره های فوق با توجه به نوع شغل متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال در زمان برچیدن کارگاه، نیازی به حضور رئیس کارگاه، نقشه بردار و تکنسین ها نخواهد بود ولی در همین زمان وجود انباردار، کارگر انبار، اتومبیل با راننده و مسئول حمل و نقل کارگاه ضروری است.

۳- نیروی پشتیبانی (دفتر مرکزی)

نیروی انسانی دفتر مرکزی شامل مدیرعامل، مدیر امور مالی، مدیر فنی، مدیر پروژه مترو و مهندس فنی و غیره می گردد.

۷-۱-۴-۲- ماشین آلات عمرانی

امروزه ماشین آلات نقش مهمی در چگونگی اجرا، هزینه ها و سرعت تکمیل طرح های عمرانی ایفا می نمایند. حضور ماشین آلات پیشرفته و باقابلیت های بالا در صنعت، زمینه را برای طراحی و اجرای طرح های بزرگ فراهم می سازد. چگونگی تملک و بهره برداری از ماشین آلات سهم عمده ای در افزایش یا کاهش هزینه های تمام شده یک طرح دارد. بهره برداری از ماشین آلات صنعتی در اجرای طرح های عمرانی به روش های گوناگون امکان پذیر می باشد.

• ۷-۱-۴-۲-۱- برنامه ریزی استفاده از ماشین آلات

از مهم ترین عوامل در افزایش کارایی ماشین آلات و کاهش هزینه ها، برنامه ریزی صحیح استفاده از ماشین آلات است. صرف وجود ماشین، هزینه های تمام شده را کاهش نمی دهد بلکه نحوه استفاده از آن در این کاهش مؤثر است. معمولاً ماشین آلات عمرانی به صورت متوالی و پیوسته با یکدیگر کار می کنند و برآورد صحیح از میزان کارایی هر یک به تنظیم برنامه بهینه کمک می کند. باید برنامه ریزی ماشین آلات به نحوی صورت گیرد که ماشین آلات بیکار و یا با فشار کار بیش از اندازه وجود نداشته باشند. عدم استفاده از کارایی بهینه یک ماشین و یا برنامه ریزی ناصحیح در استفاده مفید از وقت ماشین آلات از دو جهت زیان آور است، از طرفی مدت کار را طولانی می سازد و از طرف دیگر سرمایه گذاری سنگین انجام شده معطل و بلااستفاده می ماند.

• ۷-۱-۴-۲-۲- کارایی ماشین آلات

همراه با ماشین آلات عمرانی معمولاً کارخانه سازنده، جداول و منحنی های قدرت، حجم و سرعت کار دستگاه در شرایط مختلف طبیعی را ارائه می کند. با توجه به این جداول و همچنین شرایط محیطی و وضعیت طبیعی کار، باید برنامه استفاده از ماشین آلات تنظیم گردد. باید کاهش کارایی ماشین آلات در طول زمان در طرح های بزرگ مورد توجه قرار گیرد.

• ۷-۱-۴-۳- برنامه ریزی تعمیر و نگهداری

چگونگی تعمیر و نگهداری ماشین آلات سهم عمده‌ای در افزایش یا کاهش کارایی و عمر مفید ماشین آلات دارد. به دلیل قیمت بالای این گونه دستگاه‌ها تنظیم برنامه صحیح تعمیر و نگهداری طبق دستورالعمل‌های کارخانه سازنده ضروری می‌باشد. برای هر دستگاه سنگین باید شناسنامه و کارت سرویس و نگهداری تنظیم و کلیه اقدامات انجام شده روی دستگاه برحسب نوع، مقدار و زمان درج گردد. عملکرد و عمر ماشین آلات را معمولاً با ساعت کار مفید می‌سنجند.

• ۷-۱-۴-۴- تعیین ماشین آلات مورد نیاز

ماشین آلات مورد نیاز در مراحل اجرایی پروژه از روی فعالیت‌های پروژه، حجم و نوع عملیات و بر اساس تجزیه و تحلیل فعالیت‌هایی که می‌بایست انجام پذیرد، مشخص می‌گردد. با مشخص شدن تعداد و نوع ماشین آلات مورد استفاده در اجرای پروژه، می‌توان بر اساس منحنی برداری، شبکه خدماتی و فعالیت‌های پروژه، مدت زمان نیاز به هر نوع ماشین را تعیین نمود.

۷-۲- کنترل کیفیت

۷-۲-۱- کلیات

تجربه پروژه‌های تونل‌سازی قبلی نشان می‌دهد که رویدادهای کنترل نشده به‌طور مکرر به ویژه در مگا پروژه‌ها اتفاق می‌افتد و اگر کنترل کیفیت مناسب انجام نشود پروژه در معرض آسیب و خسارت و جانی و مالی قرار می‌گیرد. عوامل فنی و غیر فنی ممکن است تأثیر زیادی بر کیفیت تونل داشته باشند؛ بنابراین یک الگوی مناسب تصمیم‌گیری با توجه به ویژگی‌های ساخت تونل مورد نیاز است و به همین دلیل مدیریت کیفیت^۶ برای تحقق کیفیت ساخت و ساز به‌طور فزاینده‌ای اهمیت می‌یابد. کنترل کیفیت ساخت تونل با هدف بهبود مداوم عملکرد فعالیت‌های ساخت انجام می‌شود.

کیفیت مواد و سنجش واقعی سیستم نگهداری نصب شده و لاینینگ باید از طریق یکی سری آزمایشات و بازرسی‌های پیشنهاد شده مدیریت شود.

^۶ Quality management

۷-۲-۲- شاتکریت

۷-۲-۲-۱- مواد، مصالح و اختلاط شاتکریت

کنترل کیفیت شاتکریت شامل کیفیت مصالح مصرفی، دانه بندی سنگدانه، میزان آب مورد نیاز، اطمینان از عدم واکنش های مضر بین سیمان و مواد زود گیر، کنترل پیمان و تهیه مخلوط بتن در مقایسه با مقادیر طرح اختلاط شاتکریت، اخذ نمونه های آزمایشی و تعیین مقاومت فشاری نمونه ها می باشد. کنترل مقاومت فشاری به ازای هر ۲۰ مترمکعب بتن پاشی از طریق اخذ ۶ نمونه انجام می گیرد و با مقاومت مشخصات مقایسه می شود. در تعیین نسبت های مخلوط بتن پاشیده باید توجه داشت که قسمتی از مخلوط در اثر کمانه کردن سنگدانه ها به هنگام پاشیدن از دست می رود، بنابراین ترکیب بتن پاشیده شده با ترکیب اولیه آن متفاوت است، لذا باید بین ترکیب مخلوط اولیه، مخلوط در حال خروج از نول (سرشیلنگی) و مخلوط پاشیده شده بر روی سطح، تفاوت قائل شد. به دلیل همین تفاوت، کنترل دقیق و انجام آزمایش در مراحل مختلف بتن پاشی ضروری است.

شاتکریت باید از نظر مقاومت فشاری و چسبندگی بین بتن و سطح زیر کار آن از طریق مغزه گیری کنترل شود. نمونه برداری آزمایشی باید قبل از شروع عملیات اصلی بتن پاشی انجام شود و بتن مصرفی حداقل ۷ روزه باشد. مغزه ها باید از تمام ضخامت شاتکریت و سطح تماس زیر کار آن گرفته شود.

چنانچه در جریان مغزه مشخص شود که بین سنگ زیر کار و بتن چسبندگی کافی وجود ندارد و یا مقاومت نمونه کمتر از حد مشخصات است، نمونه گیری باید تجدید و نهایتاً چنانچه در مرحله دوم نیز معایب و نواقص مرحله اول تأیید شود، نسبت به اصلاح و بهینه سازی طرح اختلاط اقدام گردد.

۷-۲-۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط شاتکریت جهت دستیابی به مقاومت مورد نظر یا مشخصات مورد نیاز دیگر، باید توسط پیمانکار تهیه شود. مشخصات دیگری که ممکن است توسط مهندس مشاور تعیین شوند عبارتند از:

(الف) حداقل و حداکثر مقدار مواد سیمانی

(ب) حداکثر نسبت آب به مواد سیمانی

(ج) مقاومت خمشی

(د) طاقت

(ه) مقاومت اولیه کوتاه مدت

(و) نفوذپذیری

(ز) جذب آب

(ر) چسبندگی به بستر

(ک) میزان هدر رفت مجاز.

۷-۲-۲-۳- ارزیابی قبل از ساخت

قبل از اجرای پروژه باید مطالعات و آزمایش‌های کافی در خصوص مشخصات مواد و مصالح، طرح اختلاط بتن، کیفیت بتن، روش اجرا و عملکرد اپراتور، توسط پیمانکار انجام شود و به تایید دستگاه نظارت برسد. در این مرحله لازم است مصالح، نسبت‌های مخلوط، تجهیزات، فرآیند ساخت و اپراتور پاشش، ارزیابی و انتخاب شوند. این پارامترها باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که ضمن دستیابی به مشخصات مکانیکی، دوام و سایر خواسته‌های موردنظر، مقدار مصالح هدررفته در شاتکریت، به حداقل برسد.

بخشی از بتن در هنگام پاشش به دلیل برگشت و ریزش مصالح هدر می‌رود. اتلاف مصالح به دلیل مسائل اقتصادی و زیست‌محیطی، مطلوب نیست و از طرفی مجدداً نباید از این مصالح برای عملیات پاشش استفاده شود.

- برای ارزیابی کیفیت شاتکریت، باید پانل‌های آزمایش طبق استاندارد ملی ۱۸۷۱۷-۱ تهیه شوند. این پانل‌ها جداگانه برای هر طرح اختلاط بتن، هر جهت پاشش و هر اپراتور تهیه شود. به عبارت دیگر ساخت پانل‌های آزمایشی باید منطبق با شرایط واقعی در پروژه باشد. این پانل‌ها باید طبق استاندارد ذکرشده، در شرایط کارگاهی عمل‌آوری شده و برای انجام آزمایش‌های لازم به آزمایشگاه منتقل گردند.

- آزمون‌های مربوط به شاتکریت سخت شده باید به‌صورت مغزه‌ها یا منشورهای برش خورده از پانل‌های آزمایشی مطابق با استاندارد ملی ۱۲۳۰۶ تهیه و آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و غیره، برحسب الزامات فنی پروژه، بر روی آن انجام شود. در رابطه با قطر و سایر ابعاد آزمون‌ها، به استاندارد ذکرشده، مراجعه شود. در موارد استفاده از الیاف در شاتکریت باید ضوابط مربوط به بتن الیافی نیز رعایت شود.

۷-۲-۲-۴- ارزیابی و پذیرش در حین ساخت

برای بخش بتن و بتن پاششی لازم است به آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، نشریه شماره ۱۲۰، تجدید نظر دوم، مصوب ۱۴۰۲/۰۵/۲۵ مراجعه شود. رعایت این ضوابط و مقررات متناسب با موضوع کار، الزامی است.

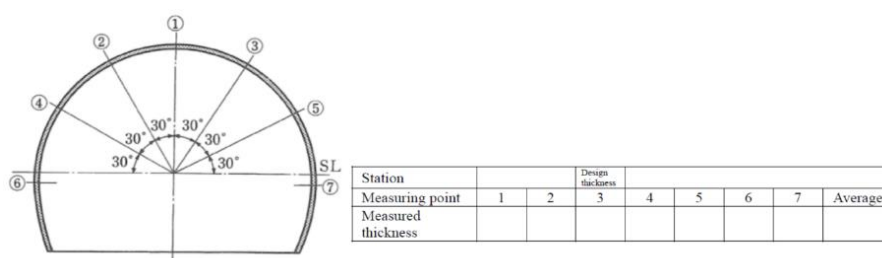
در هر نوبت کاری باید حداقل یک نوبت نمونه‌برداری از هر رده و هر نوع، برای آزمایش مقاومت فشاری انجام شود. نمونه‌برداری را می‌توان از محل بتن اجراشده یا از پانل‌های آزمایشی، تهیه و نگهداری شده مطابق با استاندارد ملی ۱۸۷۱۷-۱ انجام داد. این پانل‌ها باید مطابق استاندارد در شرایط کارگاهی عمل‌آوری شوند و برای انجام آزمایش‌های لازم به آزمایشگاه منتقل گردند. توصیه می‌شود جهت جلوگیری از آسیب‌رسانی به سازه اصلی، از پانل‌های آزمایشی نمونه‌برداری به‌صورت مغزه یا تیر بریده‌شده استفاده شود.

آزمون‌ها باید به‌صورت مغزه یا منشور مطابق با استاندارد ملی ۱۲۳۰۶ تهیه و آزمایش شوند. در مواردی که نمونه‌برداری از محل بتن اجراشده انجام می‌شود، محل مغزه یا منشور برش خورده نباید با بتن پاششی پر شود. این محل باید با بتن معمولی با مشخصات مشابه بتن پاششی اجراشده، پر شود و عمل‌آوری محل پرشده نیز طبق ضوابط بخش عمل‌آوری باشد.

- معیار پذیرش مقاومت فشاری در شاتکریت برآورده کردن هر دو ضابطه زیر است:
- الف) میانگین مقاومت فشاری یک مجموعه سه تایی مغزه که از هر پانل آزمایشی یا محل اجرای بتن به دست آمده، باید بیشتر یا مساوی ۸۵ درصد مقاومت مشخصه باشد.
- ب) مقاومت هیچ مغزه ای نباید کمتر از ۷۵ درصد مقاومت مشخصه باشد.
- دوام مغزه شاتکریت در صورت برآورده شدن ضوابط «الف» و «ب» زیر قابل پذیرش است، مگر آن که در مشخصات فنی پروژه ضابطه دیگری ارائه شده باشد:
- الف: میانگین نتایج مغزه ها نباید از $0/8$ معیار حداقل آزمایش دوام مشخصه کمتر یا از $1/25$ برابر معیار حداکثر آزمایش دوام مشخصه بیشتر شود.
- ب: نتیجه هیچ یک از مغزه ها نباید از $0/67$ معیار حداقل آزمایش دوام مشخصه کمتر یا از $1/5$ برابر معیار حداکثر آزمایش دوام مشخصه بیشتر شود.
- مهندس مشاور می تواند معیارهای پذیرش دیگری از غیر مقاومت فشاری مانند: ضخامت، مقاومت خمشی و چسبندگی به بستر را برای بتن تعیین کند. همچنین در مواردی که بتن پاششی به صورت تر اجرا می شود، مهندس مشاور می تواند الزاماتی برای نمونه گیری و ارزیابی بتن مانند: درصد حباب هوا، اسلامپ و دمای بتن تازه و مقاومت بتن سخت شده و غیره، قبل از پاشش آن را مشخص کند.

۷-۲-۵- ضخامت و مقاومت شاتکریت

مدیریت ضخامت شاتکریت باید طبق روال تعیین شده در محل ها و روش های نظارت انجام شود. نمونه ای از جدول بررسی ضخامت شاتکریت در شکل ۷-۱ نشان داده شده است.



شکل ۷-۱- نمونه ای از جدول نظارت ضخامت شاتکریت

مقاومت شاتکریت تحت تأثیر مهارت اپراتور^۷ و شرایط زمین در زمان پاشش (جریان آب و غیره) است و بر این اساس کیفیت آن ممکن است نوسانات زیادی داشته باشد. همچنین به دلیل بازگشت مواد^۸ نسبت مخلوط شاتکریت استفاده شده ممکن است متفاوت از آن در زمان اختلاط باشد که باید مورد توجه قرار گیرد. آزمایشات مقاومت شاتکریت به گروه های زیر تقسیم می شوند:

⁷ nozzleman

⁸ rebound

(۱) آزمایش تعیین مقاومت اولیه^۹

(۲) آزمایش مقاومت اولیه^{۱۰} و مقاومت طولانی مدت

(۳) آزمایش تعیین مقاومت خمشی شاتکریت تقویت شده با الیاف فولادی

از آنجایی که هدف آزمایش های مقاومت، مقاومت شاتکریت پاشیده شده است بهتر است در صورت امکان آزمایشات در محل انجام شود. چون اکثر آزمایش ها بر اساس مقاومت ۲۸ روزه انجام می شوند، مقاومت اولیه^{۱۱} به ویژه برای شاتکریت مهم است.

۷-۲-۳- راکبولت

۷-۲-۳-۱- اجزاء راکبولت

قبل از استفاده از راکبولت، صفحات باربر^{۱۲} و سایر موارد، آزمایشات و بازرسی های مشخص شده باید انجام شود تا اطمینان حاصل شود که مواد، شکل، ابعاد و غیره بر اساس طراحی باشد. در صورت اخذ گواهی بازرسی از کارخانه تولیدکننده، آزمایش لازم نیست.

قبل از استفاده از مواد تزریق^{۱۳}، باید از نظر کیفیت بررسی شوند. در صورت اخذ گواهی بازرسی از کارخانه سازنده، بازرسی لازم نیست.

۷-۲-۳-۲- دوغاب ریزی

باید برای هریک از چال ها که دوغاب ریزی می شود گزارشی شامل تعیین محل چال، ارتفاع، عمق، درجه انحراف، جهت چال و هرگونه اطلاعات دیگری در مورد کیفیت چینه ها و رقوم آب هایی که با آن مواجه گردیده و نحوه برخورد با این رقوم، نتایج آزمایش آب، تاریخ حفر چال و تزریق آن در هر مرحله نشست دوغاب، تهیه شود. برای این منظور کلیه چال ها باید به نحو قابل قبولی شماره گذاری شوند. باید برنامه روزانه کار در مورد چال ها، دوغاب ریزی، آزمایش آب و گزارش هر قسمت از عملیات تکمیل شده به دستگاه نظارت تسلیم شود.

چال دوغاب ریزی اعم از عمودی یا مورب، قطر این چال ها و فرم و عمق آن ها باید به تایید دستگاه نظارت برسد.

⁹ initial strength

¹⁰ early strength

¹¹ initial strength

¹² bearing plates

¹³ bonding material

۷-۲-۳-۳- آرایش و اتصال راکبولت

راکبولت ها باید در آرایش (موقعیت و جهت) و طول مشخص شده در طراحی قرار گیرند. در صورت ایجاد هرگونه تغییر لازم است از طریق مشاهده و اندازه گیری اطمینان حاصل شود که راکبولت ها اثری معادل اثر طراحی را نشان می دهند.

در شرایط سنگ نرم و زمین تحکیم نشده، اگر سطحی ناصاف^{۱۴} یا فرویخته باشد نصب راکبولت ها و پر کردن مواد چسبنده دشوار است؛ بنابراین باید از قبل در دسترس بودن چال های راکبولت تأیید شود. به طور کلی، مقاومت بیرون کشیدگی^{۱۵} در سطحی معادل قدرت تسلیم راکبولت (معمولاً مقاومت تسلیم قسمت رزوه دار) تنظیم می شود. هنگامی که کارخانه تولیدی یا مشخصات مواد تغییر کند، مقاومت راکبولت باید بررسی شود. در آزمایش بیرون کشیدگی در حین ساخت^{۱۶} در صورتی که حدود ۸۰ درصد از مقاومت بیرون کشیدگی تعیین شده را نشان دهد کافی است. نمونه ای از مدیریت اتصال راکبولت^{۱۷} در جدول ۷-۱ نشان داده شده است.

جدول ۷-۱- کنترل اتصال راکبولت

ملاحظات	فرکانس کنترل	روش کنترل	موارد
اگر حدود ۸۰ درصد از قدرت کشش تعیین شده توسط آزمایش اولیه بدست آید کافی است.	هر ۲۰ متر در مراحل اولیه حفاری، سپس هر ۵۰ متر به ترتیب حدود سه بولت در هر مقطع (یک بولت در تاج، طاق و دیوار کناری)	تست بیرون کشیدگی ^{۱۹}	نیروی اتصال ^{۱۸}
پس از نصب راکبولت باید اطمینان حاصل شود که کاملاً با مواد چسبنده پر شده است.	هر باری که کار انجام می شود.	چشمی	پرکردن مواد چسبنده

تماس صفحه باربر^{۲۰} با سطح شاتکریت یا مقطع حفاری از ملزومات نصب راکبولت است. بازرسی معمولاً به صورت چشمی یا با ضربه ملایم با چکش انجام می شود. نظارت چشمی تغییر شکل یا سایر ناهنجاری های صفحات باربری تا قبل از لاینینگ ضروری است.

۷-۲-۳-۴- آزمایش بیرون کشیدگی راک بولت

هدف از این تست اندازه گیری کارایی و توان نهایی راکبولت است و برای بولت های مکانیکی، تزریقی، رزینی یا سایر سیستم های مشابه کاربرد دارد. در این آزمایش راکبولت به صورت هیدرولیکی کشیده و جابه جایی سر بولت

¹⁴ rough surface

¹⁵ pull-out strength

¹⁶ the pull-test during construction

¹⁷ rock bolt bonding management

¹⁸ Bonding force

¹⁹ Pull-out test

²⁰ bearing plate

به طور همزمان اندازه‌گیری می‌شود. کشش تا زمانی که سیستم انکر یا سنگ دچار شکست^{۲۱} شود ادامه می‌یابد. ظرفیت نهایی و کاری راک‌بولت از نمودار بار در مقابل جابه‌جایی محاسبه می‌شود (استاندارد (ASTM D4435)). در این آزمایش عوامل زیر باید در نظر گرفته شود:

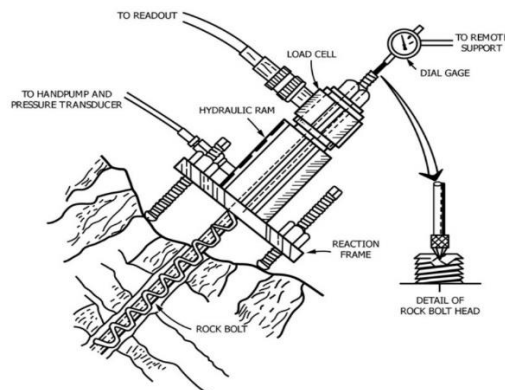
- آزمایش کشش باید در انواع سنگ‌هایی که در پروژه، راک‌بولت نصب می‌شود انجام می‌شود. اگر سنگ ناهمسانگرد^{۲۲} است، به عنوان مثال لایه لایه یا شیبستوز، آزمایش‌ها باید در جهت‌های مختلف نسبت به ناهمسانگردی، شامل جهت‌هایی که راک‌بولت در پروژه نصب می‌شود انجام شود.

- در هر نوع سنگ، در هر جهت و برای هر سیستم انکر و برای تعیین ظرفیت میانگین بولت باید تعداد کافی آزمایش انجام شود.

شکل ۷-۲ و شکل ۷-۳ تصویر واقعی و شماتیک این آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲- تصویر آزمایش کشش راک‌بولت



شکل ۷-۳- جزئیات آزمایش کشش راک‌بولت

²¹ fail

²² Anisotropic

۷-۲-۴- قاب فولادی

۷-۲-۴-۱- مواد قاب فولادی

لازم است مواد قاب فولادی مطابق آنچه در طراحی مشخص شده است با مراجعه به نتایج بازرسی کارخانه تولیدی تأیید شود. همچنین باید تأیید شود که اشکال، ابعاد و سایر موارد قاب های فولادی مانند خمش، برش و جوشکاری مطابق طراحی ارائه شده است.

۷-۲-۴-۲- نصب قاب فولادی

برای دستیابی به عملکرد کافی سیستم نگهداری، هر مجموعه ای از قاب های فولادی باید در یک صفحه و بدون پیچش باشد. علاوه بر این باید تأیید شود که هیچ بی نظمی قابل توجهی بین قاب های فولادی مجاور وجود ندارد و آن ها در یک بازه، موقعیت و تعداد صحیح نصب می شوند.

۷-۲-۵- لتیس گریدر (تیرهای مشبک)

تیرهای مشبک یا لتیس گریدرها با ظرفیت تحمل یکسان با قاب های فولادی، از وزن کمتری نسبت به آن ها برخوردارند و حمل و نصب آن ها نیز آسان تر است. فضاهای باز بین خرپای آن ها به شاتکریت اجازه می دهد که همه جا را بپوشاند و فضایی خالی پشت آن ها باقی نگذارند، لذا یک سازه مرکب به وجود می آید. آن ها همچنین به صورت ترکیبی همراه با انواع مهارها، و توری های سیمی به عنوان سیستم نگهداری ترکیبی به کار می روند. شکل ۷-۴ تیرهای مشبک و نصب آن ها را نشان می دهد.



شکل ۷-۴- لتیس گریدر و نصب آن

۷-۲-۶- لاینینگ و کفبند

۷-۲-۶-۱- کنترل کیفیت مصالح بتن

هریک از اجزای تشکیل دهنده بتن شامل سیمان، مصالح سنگی، آب و مواد افزودنی باید با مشخصات زیر برابری داشته باشد.

• سیمان

- انواع سیمان

سیمان مصرفی در ساخت قطعات باربر باید با یکی از استانداردهای زیر و یا هر استاندارد دیگری که به تأیید دستگاه نظارت رسیده مطابقت داشته باشد.

(الف) مشخصات انواع سیمان پرتلند ASTM C150

(ب) مشخصات سیمان‌های پرتلند آمیخته روباره‌ای ASTM C595

(ج) مشخصات سیمان‌های پرتلند آمیخته پوزولانی ASTM C595

(د) مشخصات سیمان‌های پرتلند آمیخته آهکی استاندارد ایران ۴۲۲۰

در هر پروژه نوع سیمان باید در مشخصات فنی خصوصی قیدشده و انتخاب آن با توجه به ضوابط زیر انجام شود:

- زمانی که ویژگی‌های سیمان‌های نوع ۲، ۳، ۴ و ۵ در تهیه بتن موردنیاز نباشد سیمان نوع ۱ در عملیات بتنی مصرف می‌شود.

- برای مصرف در بتن‌هایی که به‌طور ملایم در معرض تأثیر سولفات‌ها قرار می‌گیرند یا وقتی که به هر دلیل به گرمزایی کمتر در حین گیرش نیاز باشد از سیمان دو به‌جای نوع یک می‌توان استفاده کرد.

- برای تهیه بتن‌های زود گیر باید سیمان نوع ۳ مصرف کرد.

- برای بتن‌ریزی در سازه‌های حجیم باید سیمان نوع ۴ مصرف شود. تشخیص این‌که بتن‌ریزی حجیم یا معمولی است با دستگاه نظارت می‌باشد.

- برای بتن‌هایی که در معرض تأثیر شدید سولفات‌ها باشند باید از سیمان نوع ۵ استفاده شود.

- برای بتن‌ریزی‌های معمولی و حجیم و مواردی که بتن در معرض حمله سولفات‌ها قرار می‌گیرد می‌توان با تأیید دستگاه نظارت از سیمان‌های پرتلند آمیخته روباره‌ای و یا پوزولانی مطابق با استانداردها استفاده کرد.

• آزمایش‌ها

حداقل ماهی یک‌بار و یا به ازای هر ۱۰۰ تن سیمان (هرکدام زودتر اتفاق افتاد) و برای هر نوع سیمان، باید نمونه‌گیری شده و مورد آزمایش قرار گیرد. در ضمن به ازای هر محموله سیمان تحویل‌شده به کارگاه لازم است

حداقل ۳ کیلوگرم نمونه تهیه و به نحو مناسب علامت گذاری و به مدت حداکثر ۴ ماه نگهداری شود تا در صورت لزوم مطابق نظر دستگاه نظارت مورد آزمایش قرار گیرد.

هرگاه دستگاه نظارت ضروری تشخیص دهد و یا کیفیت سیمانی مشکوک باشد باید از سیمان های موجود در کارگاه و یا از هر محموله سیمان تحویلی به کارگاه نمونه برداری شود تا مورد آزمایش قرار گیرد. مصرف سیمان هایی که در آزمایش های فوق مردود شناخته شود مجاز نبوده و باید از کارگاه خارج شود.

• سنگدانه ها

سنگدانه های مصرفی در بتن باید به طور کلی دارای آن چنان کیفیتی باشند که بتوان از آن ها بتنی مرغوب، مقاوم و بادوام تهیه کرد. قبل از شروع عملیات بتنی، از منابع مصالح سنگی باید نمونه برداری شده و این نمونه ها مورد آزمایش قرار گیرد و چنانچه محل منابع تغییر کند و یا هرگاه دستگاه نظارت ضروری تشخیص دهد باید نمونه برداری و آزمایش تجدید گردد. حمل مصالح به کارگاه قبل از آزمایش و تصویب دستگاه نظارت، مجاز نیست. مصالح بعد از تصویب باید از طریق سرنده کردن، جدا کردن، شستن و در صورت لزوم شکستن، آماده مصرف شود. مصالح سنگی باید به طریقی انبار و نگهداری شود که از آلودگی و اختلاط آن با مواد غیر قابل قبول و همچنین از یخ زدگی و جمع شدن برف و یخ بین دانه های آن جلوگیری به عمل آید و از طرفی امکان زهکشی هم فراهم باشد.

• آب

آب مصرفی برای شستشوی سنگدانه ها، ساخت و عمل آوری بتن باید تمیز و صاف باشد. همچنین از مصرف آب حاوی مقادیر زیاد از هر نوع ماده از قبیل روغن ها، اسیدها، قلیایی ها، املاح، مواد قندی، مواد آلی که قادر به صدمه زدن به بتن یا آرماتور باشد خودداری شود. به طور کلی آب آشامیدنی برای مصرف در ساخت و عمل آوری بتن رضایت بخش تلقی می شود.

آب غیر آشامیدنی در شرایطی می تواند در ساختمان بتن به کار رود که با ضوابط بندهای زیر و نیز جدول ۷-۲ مطابقت داشته باشد.

- انتخاب نسبت های اختلاط بتن باید بر اساس آبی باشد که در کارگاه مورد استفاده قرار می گیرد.
- مقاومت های ۷ و ۲۸ روزه نمونه های آزمایشی ملات ساخته شده با آب غیر آشامیدنی مطابق ASTM C109 باید حداقل ۹۰ درصد مقاومت های نظیر نمونه های مشابه ساخته شده با آب مقطر باشند.
- تعیین زمان گیرش سیمان با آب غیر آشامیدنی باید مطابق آزمایش ASTM C191 باشد. نتیجه آزمایش باید یک ساعت زودتر تا ۱/۵ ساعت دیرتر از نتیجه به دست آمده با آب مقطر باشد.
- آزمایش سلامت سیمان با آب غیر آشامیدنی باید مطابق ASTM C151 اندازه گیری شود و نتیجه نباید بیش از میزان مجاز برای آب مقطر باشد.
- آزمایش های مربوط به این مقایسه ها باید در شرایط یکسان، به غیر از نوع آب مصرفی انجام شود.

- مقدار PH آب مصرفی در بتن نباید از ۵ کمتر و از ۸/۵ بیشتر باشد. آزمایش تعیین PH آب باید مطابق آشتو T26 باشد.

جدول ۷-۲- حداکثر مقادیر مجاز برای مواد زیان آور در آب مصرفی بتن و روش‌های آزمایش

نوع ماده زیان آور	نوع بتن و شرایط محیطی	روش آزمایش	حداکثر غلظت مجاز (قسمت در میلیون)
ذرات جامد معلق	- بتن آرمه در شرایط محیطی شدید و بتن پیش‌تنیده	ASTM D1888	۱۰۰۰ ۲۰۰۰
مواد محلول	- بتن آرمه در شرایط محیطی شدید و بتن پیش‌تنیده - بتن آرمه در شرایط محیطی ملایم - بتن بدون آرماتور و بدون اقلام فلزی مدفون	ASTM D1881	۱۰۰۰ ۲۰۰۰ ۳۵۰۰۰
کلرید (Cl^-)	- بتن آرمه در شرایط محیطی شدید، بتن پیش‌تنیده و بتن عرضه پل‌ها - سایر موارد بتن آرمه، در شرایط مرطوب، یا دارای مواد آلومینیومی یا فلزات غیر مشابه، یا دارای قالب-های گالوانیزه دائمی - بتن بدون آرماتور و بدون اقلام فلزی مدفون	ASTM D512	*۵۰ ۱۰۰۰* ۱۰۰۰*
یون سولفات SO_4^{--}	- بتن آرمه و بتن پیش‌تنیده - بتن بدون آرماتور و بدون اقلام فلزی مدفون	ASTM D514	۱۰۰۰* ۳۰۰۰**
قلیائینها	$Na_2O+0.658 K_2O$	ASTM D1067	۶۰۰

* مقدار کل یون کلرید قابل حل در آب در مخلوط بتن، بر حسب درصد وزن سیمان، نباید از مقادیر حداکثر مجاز داده شده تجاوز کند

** مقدار کل سولفات قابل حل در آب بر حسب SO_3^{--} در مخلوط بتن و با احتساب SO_3^{--} موجود در سیمان، نباید از ۴ درصد بیشتر باشد و به هر حال مقدار کل سولفات موجود نباید از ۵ درصد وزن سیمان تجاوز کند.

• مواد افزودنی

- استفاده از مواد افزودنی در بتن تنها با تصویب قبلی دستگاه نظارت مجاز است.

- عملکرد یا مؤثر بودن مواد افزودنی باید قبل از مصرف و به کمک نمونه‌های آزمایشی مخلوط بتن مورد تأیید قرار گیرد.

- هریک از مواد افزودنی باید با مشخصات تعیین شده در استانداردها مطابقت داشته باشند.

- ماده افزودنی باید با سیمان مصرفی سازگار باشد. اگر بیشتر از یک نوع ماده افزودنی به کار رود، باید سازگاری مواد مصرفی با یکدیگر موردبررسی قرار گیرد.

- اندازه‌گیری مواد افزودنی باید به دقت انجام پذیرد. اگر بیش از یک نوع ماده افزودنی به کار رود، اندازه‌گیری هریک از آنها باید به طور جداگانه صورت گیرد.

- مواد افزودنی باید در شرایط مناسب و با رعایت دستورالعمل های اعلام شده از سوی سازنده، نگهداری شود. برخی از مواد افزودنی به دلیل از دست دادن کیفیت خود نباید به مدت طولانی نگهداری شوند. در صورت تردید باید آزمایش مطابق مشخصات مربوطه انجام شود.

- باید ثابت شود که هر ماده افزودنی همان ترکیب و عملکردی را که در تعیین نسبت های اختلاط بتن فرض شده است در تمام مدت اجرای کار حفظ می کند.

۷-۲-۶-۲- کنترل و بازرسی

به منظور اطمینان از انطباق ویژگی های مصالح مصرفی با استانداردها و ضوابط، حداقل تواتر بازرسی ها و آزمایش ها باید مطابق جدول ۷-۳ انجام شود.

جدول ۷-۳- بازرسی و کنترل کیفیت مصالح بتن

ردیف	نوع مصالح	بازرسی-آزمایش	هدف	دوره بازرسی و آزمایش
۱	سیمان (۱)	بازرسی اسناد تحویل سیمان به کارگاه	انطباق محموله سیمان با سفارش خرید و کنترل مشخصات کارخانه سیمان (۲)	به ازای هر محموله تحویل به کارگاه
۲	سنگدانه (۳)	بازرسی وضعیت ظاهری سنگدانه ها به کارگاه	انطباق محموله مصالح با سفارش خرید و کنترل مشخصات کارخانه تولید کننده	به ازای هر محموله تحویل به کارگاه
۳		بازرسی وضعیت ظاهری سنگدانه ها	بررسی وضعیت ظاهری از لحاظ اندازه و شکل دانه ها و ناخالصی های آنها	به ازای هر محموله تحویل به کارگاه
۴		آزمایش دانه بندی	مقایسه نتایج آزمایش با ضوابط، استاندارد و الزامات مربوط به دانه بندی	۱- اولین محموله از منبع یا معدن جدید ۲- در صورت مشکوک بودن پس از هر بازرسی عینی ۳- روزانه یکبار
۵		آزمایش تعیین ارزش ماسه ای	مقایسه نتایج آزمایش با ضوابط، استانداردها و الزامات مربوطه	مطابق موارد ۱ و ۲ بالا در همین ستون و حداقل هفته ای یکبار
۶		آزمایش تعیین مواد زیان آور	ردیابی مقدار مواد زیان آور در سنگدانه ها و نوع آنها	مطابق موارد ۱ و ۲ بالا در همین ستون
۷		آزمایش تعیین درصد رطوبت	تعیین میزان آب در مخلوط بتن	روزانه یکبار و در موارد لازم (۴)
۸		آزمایش وزن مخصوص	اندازه گیری وزن واحد حجم	مطابق موارد ۱ و ۲ در همین ستون

ردیف	نوع مصالح	بازرسی-آزمایش	هدف	دوره بازرسی و آزمایش
۹	افزودنی‌های شیمیایی (۵)	بازرسی اسناد تحویل مواد به کارگاه و برچسب روی بسته بندی‌ها و انجام آزمایش‌های استاندارد	اطمینان از انطباق مواد با سفارش خرید و همچنین کنترل علائم و نشانه‌های روی بسته‌بندی‌ها و مقایسه نتایج آزمایش‌های سازنده با ویژگی‌های درج شده در استاندارد مربوطه	به ازای هر محموله وارد شده به کارگاه
۱۰		بازرسی و مشاهده وضعیت ظاهری افزودنی‌ها	مقایسه با شرایط ظاهری	برای هر محموله و در موارد لازم به تشخیص دستگاه نظارت
۱۱		آزمایش وزن واحد حجم و عدد PH	برای مقایسه با ویژگی اعلام شده توسط تولید کننده	حداقل هفته‌ای یکبار و در صورت نیاز به تشخیص دستگاه نظارت
۱۲	افزودنی‌های امولسیون (۵)	بازرسی اسناد تحویل مواد به کارگاه	اطمینان از انطباق مواد با سفارش خرید و نام کارخانه تولیدکننده مواد به شرح ثبت شده در سفارش	به ازای هر محموله وارد شده به کارگاه
۱۳		آزمایش واحد حجم	اطمینان از یکنواختی مواد	به ازای هر محموله وارد شده به کارگاه
۱۴	افزودنی‌ها (به صورت پودر) (۵)	بازرسی اسناد تحویل مواد به کارگاه	اطمینان از انطباق مواد با سفارش خرید از نظر نوع و کیفیت و نام کارخانه تولید کننده در ثبت سفارش	به ازای هر محموله وارد شده به کارگاه
۱۵	آب	آزمایش شیمیایی براساس استاندارد مربوطه	اطمینان از عدم وجود ناخالصی‌های زیان آور	فقط وقتی که آب از منابع آب شرب عمومی نبوده و یا وقتی که آب از منابع جدیدی تهیه شده و مورد تردید باشد.
۱۶		آزمایش ملات براساس استاندارد مربوطه	برای مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های استاندارد با آب مصرفی و آب مقطر	به شرح مورد بالا در همین ستون

۱- برای هر محموله وارد شده به کارگاه، مشخصات کارخانه و نوع سیمان باید در برگ تحویل ثبت شده باشد.

۲- برای هر تغییر معدن یا منبع سنگدانه وارده به کارگاه باید اطلاعاتی در مورد حداکثر میزان کلر Cl^- و SO_4^{2-} سولفات قابل حل در آب موجود در مصالح همچنین قابلیت و حساسیت احتمالی سنگدانه نسبت به واکنش‌زایی قلیائی مشخص شود.

۳- این آزمایش از سنگدانه‌های انباشته شده در محل تولید بتن و در زمان تهیه بتن انجام می شود.

۴- از هر محموله ماده افزودنی وارده به کارگاه باید نمونه‌گیری شده و ضمن نگهداری نمونه‌ها در صورت لزوم روی آن‌ها آزمایش‌های لازم به عمل آید.

۷-۲-۳- آزمایش میلگردها

مقاومت و سایر مشخصه های میلگردها بر اساس نتایج آزمایش نمونه های بریده شده از آنها تعیین می شوند. در هر نمونه برداری باید یک قطعه به طول یک متر بریده شود و نمونه های آزمایشی از این قطعه جدا شوند. تعداد و تواتر نمونه ها باید طوری باشد که ارزیابی کیفیت کل میلگردهای مصرفی امکان پذیر گردد. برای این منظور باید از هر پنجاه تن و کسر آن، از هر قطر و هر نوع فولاد حداقل ۵ نمونه برداشته شود. در صورت موافقت دستگاه نظارت از هر دسته پنج تنی میلگردهای مشابه، می توان یک نمونه انتخاب کرد.

۷-۲-۴- انبار کردن، نگهداری و کنترل فولاد

میلگردهای فولادی باید در محل های تمیز و عاری از رطوبت انبار شود تا از زنگ زدگی و کثیف شدن سطح آنها جلوگیری شود.

میلگردهایی که تا حد پوسته شدن زنگ زده باشند، به ویژه میلگردهایی که به طور موضعی و عمیق دچار خوردگی شده اند، بدون انجام آزمایش و حصول اطمینان از انطباق مشخصه های آنها با مشخصه های مورد نظر و در نظر گرفتن کاهش احتمالی سطح مقطع قابل مصرف در بتن آرمه نمی باشند.

در فاصله زمانی ورود میلگردها به کارگاه تا جاگذاری آنها در سازه، ضوابط زیر باید در جابه جایی آنها نیز رعایت شود.

الف: از هر نوع صدمه مکانیکی یا تغییر شکل پلاستیکی نظیر بریدگی و ضربه حاصل از سقوط از ارتفاع باید جلوگیری شود.

ب: باید از گسیختگی جوش ها در شبکه های جوش شده جلوگیری شود.

ج: نشانه های مشخص کننده نوع آرماتور نباید از بین برود.

۷-۲-۵- پوشش بتنی روی میلگردها

- پوشش بتنی روی میلگردها با حداقل فاصله بین رویه میلگردها، اعم از طولی یا عرضی، تا نزدیک ترین سطح آزاد بتن تعریف می شود.

- مراعات ضخامت پوشش بتنی مطابق بند زیر در مورد انتهای میلگردهای مستقیم در کف ها و سقف هایی که در معرض شرایط جوی یا تعریق نباشند، الزامی نیست.

- ضخامت پوشش بتنی روی میلگردها:

ضخامت پوشش بتنی روی میلگردها نباید کمتر از مقادیر زیر باشد.

۱- قطر میلگردها (در مواردی نظیر تعیین محدودیت های فاصله و حداقل ضخامت پوشش بتن محافظ، که قطر میلگردها مبنای محاسبه قرار می گیرند، قطر گروه میلگردهای در تماس معادل قطر میلگردی فرض می شود که سطح

مقطع آن با سطح مقطع کل گروه مساوی باشد. ملاک اندازه‌گیری فاصله آزاد و حداقل ضخامت پوشش در این گونه موارد خارجی‌ترین سطح گروه میلگرد در امتداد موردنظر خواهد بود)

۲- بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌های تا ۳۲ میلی‌متر، یا ۵ میلی‌متر بیشتر از بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگدانه‌های بزرگ‌تر از ۳۲ میلی‌متر

ب: ضخامت پوشش بتنی محافظ میلگردها باید متناسب با شرایط محیطی، کیفیت بتن و نوع قطعه موردنظر باشد. انواع شرایط محیطی ذکر شده به شرح زیر طبقه بندی می‌شود:

۱- شرایط محیطی ملایم: به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن هیچ نوع عامل مهاجم از قبیل رطوبت، تعریق، تر و خشک شدن متناوب، یخ زدن و آب شدن، سرد و گرم شدن متناوب، تماس با خاک مهاجم یا غیرمهاجم، مواد خورنده، فرسایش شدید، عبور وسایل نقلیه یا ضربه موجود نباشد، یا قطعه در مقابل اینگونه عوامل مهاجم به نحوی مطلوب محافظت شده باشد.

۲- شرایط محیطی متوسط: به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن قطعات بتنی، در معرض رطوبت و گاهی تعریق قرار می‌گیرند.

قطعاتی که به‌طور دائم با خاک‌های غیر مهاجم یا آب تماس دارند یا زیر آب با PH بیشتر از ۵ قرار می‌گیرند دارای شرایط محیطی متوسط تلقی می‌شوند.

۳- شرایط محیطی شدید: به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن قطعات بتنی در معرض رطوبت یا تعریق شدید یا تر و خشک شدن متناوب یا یخ زدن و آب شدن و سرد و گرم شدن متناوب نه‌چندان شدید قرار می‌گیرند. قطعاتی که در معرض ترشح آب دریا باشند یا در آب غوطه‌ور شوند طوری که یک وجه آن‌ها در تماس با هوا قرار گیرد، قطعات واقع در هوای دارای نمک و نیز قطعاتی که سطح آن‌ها در معرض خوردگی ناشی از مصرف مواد یخ‌زا قرار می‌گیرد دارای شرایط محیطی شدید محسوب می‌شوند.

۴- شرایط محیطی بسیار شدید: به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن قطعات بتنی در معرض گازها، آب و فاضلاب ساکن با PH حداکثر ۵، مواد خورنده یا رطوبت همراه با یخ زدن و آب شدن شدید قرار می‌گیرند.

۵- شرایط محیطی فوق‌العاده شدید: به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن قطعات بتنی در معرض فرسایش شدید عبور وسایل نقلیه، یا آب و فاضلاب جاری با PH حداکثر ۵ قرار می‌گیرند.

۷-۲-۶-۶- پذیرش بتن

• ۷-۲-۶-۶-۱- پذیرش بتن، تواتر نمونه برداری و آزمایش مقاومت

پذیرش بتن در کارگاه بر اساس نتایج آزمایش فشاری نمونه های برداشته شده از بتن مصرفی صورت می پذیرد. دفعات نمونه برداری از بتن باید به نحوی یکنواخت در طول مدت تهیه و مصرف بتن توزیع شوند. نمونه ها باید از محل نهایی مصرف برداشته شود.

• ۷-۲-۶-۶-۲- ضوابط پذیرش بتن - نمونه های عمل آمده در آزمایشگاه

الف: مشخصات بتن در صورتی منطبق بر رده موردنظر و قابل قبول تلقی می شود که یکی از شرایط زیر برقرار باشد:
۱- در آزمایش سه نمونه برداری متوالی، مقاومت هیچ کدام کمتر از مقاومت مشخصه یا f_c نباشد:

$$X_{1,2,3} \geq f_c$$

۲- متوسط مقاومت های نمونه ها یا $\bar{X}$ حداقل ۱/۵ مگاپاسکال بیشتر از مقاومت مشخصه باشد و کوچک ترین مقاومت نمونه ها یا X_{min} از مقاومت مشخصه منهای ۴ مگاپاسکال کمتر نباشد:

$$\bar{X} \geq f_c + 1.5$$

$$X_{min} \geq f_c - 4$$

ب: مشخصات بتن در صورتی غیرقابل قبول است که متوسط مقاومت های نمونه ها از مقاومت مشخصه کمتر باشد یا کوچک ترین مقاومت نمونه ها از مقاومت مشخصه منهای ۴ مگاپاسکال کمتر باشد:

$$\bar{X} < f_c \quad \text{یا} \quad X_{min} < f_c - 4$$

ج: مشخصات بتنی را که با توجه به شرایط بند ب فوق غیرقابل قبول نباشد ولی مطابق شرایط بتن الف-۲ قابل قبول هم به شمار نیاید می توان به تشخیص طراح بدون بررسی بیشتر، قابل قبول از نظر سازه ای تلقی کرد در صورتی که مشخصات بتن مطابق بند ب به هر حال غیرقابل قبول باشد اقداماتی مطابق بند ۷-۲-۶-۷ الزامی است.

• ۷-۲-۶-۶-۳- ضوابط کنترل روش عمل آوردن و محافظت بتن

الف) دستگاه نظارت می تواند برای کنترل کیفیت عمل آوردن و مراقبت بتن در سازه انجام آزمایش های مقاومت روی نمونه های عمل آمده و مراقبت شده در شرایط کارگاه را درخواست کند.

ب) عمل آوردن نمونه ها در کارگاه باید مطابق روش ASTM C31 باشد.

ج) نمونه های عمل آمده در کارگاه باید در همان زمان و از همان بتنی نمونه برداری شوند که نمونه های آزمایشی عمل آمده در آزمایشگاه تهیه می شوند.

د) در صورتی روش عمل آوردن و مراقبت بتن رضایت بخش تلقی می شود که مقاومت فشاری نمونه های کارگاهی در سن مشخص شده برای مقاومت مشخصه حداقل معادل ۰/۸۵ مقاومت نظیر نمونه های عمل آمده در آزمایشگاه یا

به اندازه ۴ مگاپاسکال بیشتر از مقاومت مشخصه باشد. در غیر این صورت باید اقداماتی برای بهبود روش‌های مذکور صورت گیرد.

• ۷-۲-۶-۴- آزمایش‌های آگاهی

در صورتی که آگاهی از کیفیت بتن در موعدهای خاصی مانند زمان باز کردن قالب‌ها و غیره ضرورت داشته باشد علاوه بر نمونه‌های متعارف ارزیابی مقاومت و روش عمل آوردن و مراقبت بتن نمونه‌هایی از بتن گرفته می‌شوند و در موعدهای موردنظر تحت آزمایش قرار می‌گیرند. این نمونه‌ها به آزمایش‌های آگاهی موسوم‌اند.

۷-۲-۶-۷- بررسی بتن‌های با مقاومت کم

در صورتی که بر اساس آزمایش‌های مقاومت نمونه‌های عمل آمده در آزمایشگاه، مطابق بند ۷-۲-۶-۶ معلوم شود که بتن بر رده موردنظر منطبق نیست و غیرقابل قبول است، باید تدابیری به شرح زیر برای حصول اطمینان از ظرفیت باربری سازه اتخاذ شود:

۱- در صورتی که با استفاده از آنالیز موجود سازه و بازبینی طراحی، بتوان ثابت کرد که ظرفیت باربری سازه به ازای مقاومت بتن کمتر از مقدار پیش‌بینی شده هم قابل قبول است نوع بتن از نظر تأمین مقاومت سازه قابل قبول تلقی می‌شود.

۲- در صورتی که شرط بند ۱ برآورده نشود ولی با انجام آنالیز و طراحی مجدد بتوان ثابت کرد که ظرفیت باربری تمامی قسمت‌های سازه با فرض وجود بتن با مقاومت کمتر در قسمت‌های احتمالی قابل قبول خواهد بود، نوع بتن از نظر تأمین مقاومت سازه قابل قبول تلقی می‌شود.

۳- در صورتی که شرایط بندهای ۱ و ۲ برآورده نشوند لازم است روی مغزه‌های گرفته شده از بتن در قسمت‌هایی که احتمال وجود بتن با مقاومت کمتر داده می‌شود آزمایش به عمل آید. برای قسمت‌هایی از سازه که نتایج آزمایش‌های نمونه‌های آزمایشگاهی مربوط به آن‌ها شرایط پذیرش بتن مذکور در بند ۷-۲-۶-۶-۲ برآورده نکند باید سه مغزه تهیه و آزمایش شود.

۴- در قسمت‌هایی از سازه که مقاومت بتن از طریق آزمایش مغزه‌ها ارزیابی می‌شود، در صورتی بتن از نظر تأمین مقاومت قابل قبول تلقی می‌شود که متوسط مقاومت‌های فشاری سه مغزه حداقل برابر 0.85 مقاومت مشخصه باشد و به علاوه مقاومت هیچ‌یک از مغزه‌ها از 0.75 مقاومت مشخصه کمتر نباشد.

برای کنترل دقت نتایج می‌توان مغزه گیری را تکرار کرد.

۵- در صورتی که شرایط بند بالا برآورده نشوند و ظرفیت باربری سازه موردتردید باقی بماند باید آزمایش بارگذاری فصل مربوط در بخش دوم آبا روی قسمت‌های مشکوک به عمل آید یا اقدامات مقتضی دیگری صورت گیرد.

۷-۲-۶-۸- کنترل و بازرسی

به منظور اطمینان از انطباق خواص بتن با استانداردها و ضوابط این فصل، حداقل تواتر کنترل و بازرسی باید

مطابق

جدول ۷-۴ باشد.

جدول ۷-۴- کنترل و بازرسی مشخصه های بتن

ردیف	شرح آزمایش	نوع بازرسی-آزمایش	هدف	زمان تکرار
۱	تعیین نسبت ها برای اختلاط	آزمایش در ابتدای کار	تامین دلیل آن ویژگی های مورد نظر در حاشیه ایمنی مناسب حاصل می شود	قبل از استفاده از هر مخلوط جدید به شرط آن که داده هایی براساس تجربیات بلند مدت در اختیار نباشد.
۲	میزان کلرید در مخلوط	محاسبه براساس کلرید موجود در مواد تشکیل دهنده بتن	حصول اطمینان از اینکه میزان کلرید از حد مجاز فراتر نمی رود	در ابتدای کار و در مواردی که میزان کلرید مواد تغییر می کند
۳	میزان رطوبت در سنگدانه درشت	آزمایش خشک کردن یا معادل آن	اصلاح مقدار آب مورد نیاز	در صورت غیر مداوم بودن به طور روزانه، بسته به شرایط جوی منطقه ممکن است آزمایش های مورد نیاز کم یا زیاد شوند
۴	میزان رطوبت در سنگدانه های ریز	اندازه گیری به طور مداوم، آزمایش خشک کردن یا معادل آن	اصلاح مقدار مورد نیاز	مانند ردیف بالای همین ستون
۵	روانی بتن	بازرسی عینی	برای مقایسه با وضعیت ظاهری مورد نیاز بتن	هر مرتبه ساخت
۶	روانی بتن	آزمایش روانی	ارزیابی انطباق میزان روانی با روانی مورد نیاز و کنترل تغییرات احتمالی مقدار آب	۱- هنگام تهیه نمونه برای آزمایش بتن سخت شده ۲- هنگام آزمایش تعیین میزان هوای بتن ۳- در موارد تردید براساس مشاهدات عینی

ردیف	شرح آزمایش	نوع بازرسی-آزمایش	هدف	زمان تکرار
۷	وزن مخصوص بتن تازه	آزمایش وزن مخصوص	بازرسی پیمانۀ و مخلوط کردن و کنترل وزن مخصوص بتن سبک یا سنگین	به تعداد دفعات آزمایش مقاومت فشاری
۸	آزمایش مقاومت فشاری آزمون‌های قالب گیری شده	آزمایش مطابق استاندارد	ارزیابی مشخصه های مقاومت مخلوط	مطابق بند ۶-۶-۲-۷
۹	وزن مخصوص ظاهری بتن سخت شده سبک یا سنگین	آزمایش مطابق استاندارد	ارزیابی وزن مخصوص	به تعداد دفعات آزمایش مقاومت فشاری
۱۰	مقدار آب اضافه شده به مخلوط	ثبت مقدار آب اضافه شده	تعیین نسبت آب به سیمان واقعی	هر بار پیمانۀ و مخلوط کردن
۱۱	مقدار سیمان بتن تازه	ثبت مقدار سیمان مصرف شده	کنترل مقدار سیمان و تعیین نسبت آب به سیمان واقعی	هر بار پیمانۀ و مخلوط کردن
۱۲	مقدار افزونه بتن تازه	ثبت مقدار افزونه مصرف شده	کنترل مقدار افزونه	هر بار پیمانۀ و مخلوط کردن
۱۳	نسبت آب به سیمان بتن تازه	با تقسیم نمودن جمع ردیف های ۴، ۳ و ۹ بر ردیف ۱۰ یا هر روش آزمایش استاندارد توافق شده	ارزیابی نسبت آب به سیمان	روزانه یا بیشتر بر حسب نیاز
۱۴	مقدار هوای موجود در مخلوط بتن تازه برای بتن های با حباب هوا	آزمایش مطابق استاندارد	ارزیابی انطباق مقدار هوا به مقدار هوای مقرر شده	برای مخلوط های با حباب هوا ۱- اولین پیمانۀ و حداقل یکبار در روز ۲- به دفعات بیشتر متناسب با شرایط تولید و تاثیر عوامل محیطی
۱۵	یکنواختی	آزمایش از طریق مقایسه مشخصه های نمونه های برداشته شده از بخش های مختلف یک مخلوط	ارزیابی یکنواختی مخلوط	در موارد تردید
۱۶	نفوذپذیری	آزمایش مطابق استاندارد	ارزیابی مقاومت در مقابل نفوذ آب	در ابتدای کار، دوره های بعدی با توافق

ردیف	شرح آزمایش	نوع بازرسی-آزمایش	هدف	زمان تکرار
۱۷	سایر مشخصه	مطابق با آیین نامه های مربوطه یا براساس توافق به عمل آمده	ارزیابی انطباق با مشخصه مورد نیاز	براساس توافق به عمل آمده

۷-۲-۶-۹- کنترل و بازرسی تجهیزات ساخت بتن

به منظور اطمینان از انطباق تجهیزات و وسایل ساخت بتن با استانداردها و ضوابط این فصل حداقل تواتر کنترل و بازرسی باید مطابق جدول ۷-۵ باشد.

جدول ۷-۵- کنترل و بازرسی تجهیزات ساخت بتن

ردیف	شرح تجهیزات	نوع بازرسی-آزمایش	هدف	زمان تکرار
۱	دپوی مصالح- سیلو و غیره	بازرسی عینی	حصول اطمینان از انطباق با موارد مورد نیاز	یکبار در هفته
۲	تجهیزات مربوط به اندازه گیری	بازرسی عینی از نحوه کارکرد	اطمینان از اینکه تجهیزات مربوط به اندازه گیری وزن به طور صحیح عمل می نماید	روزانه
۳		بازرسی دقت اندازه گیری وزن	حصول اطمینان از دقت مورد نظر	۱- در مرحله نصب ۲- به طور متناوب بنا به تشخیص دستگاه نظارت
۴	دستگاه اندازه گیری و توزین ماده افزودنی	بازدید عینی از نحوه کارکرد	حصول اطمینان از اینکه دستگاه اندازه گیری و توزین تمیز است و با دقت عمل می نماید	برای اولین پیمانه هر ماده افزودنی در هر روز
۵		آزمایش دقت	اجتناب از توزیع غیریکنواخت	۱- در هر مرحله ۲- به طور ماهانه پس از نصب ۳- در موارد تردید و بنا به تشخیص دستگاه نظارت
۶	آب سنج	مقایسه مقدار واقعی با مقدار قرائت شده روی درجه دستگاه اندازه گیری	حصول اطمینان از دقت مورد نظر	به شرح موارد ۱ و ۲ بالا در همین ستون
۷	تجهیزات اندازه گیری مداوم میزان رطوبت سنگدانه های ریز	مقایسه مقدار واقعی با مقدار قرائت شده روی درجه دستگاه اندازه گیری	حصول اطمینان از دقت مورد نظر	به شرح موارد ۱ و ۲ بالا در همین ستون

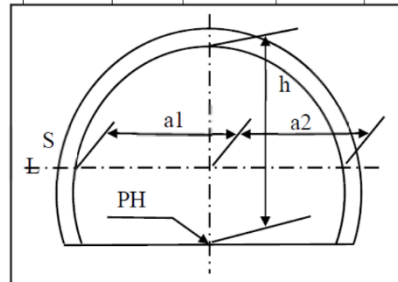
ردیف	شرح تجهیزات	نوع بازرسی - آزمایش	هدف	زمان تکرار
۸		بازدید عینی	حصول اطمینان از دقت پیمانہ کردن	به شرح موارد ۱ و ۲ بالا در همین ستون
۹	سیستم پیمانہ و مخلوط کردن	مقایسه جرم واقعی مواد تشکیل دهنده مخلوط با جرم مورد نظر بر اساس یک روش متناسب	حصول اطمینان از اینکه سیستم پیمانہ و مخلوط کردن درست کار می کند	روزانه
۱۰	وسایل آزمایش	آزمایش های لازم مطابق با استانداردها یا سایر مقررات	کنترل انطباق	بر حسب نوع وسایل آزمایش به طور مرتب، اما حداقل سالی یکبار
۱۱	مخلوط کن (از جمله کامیون های مخلوط کن و حمل بتن)	بازدید عینی	کنترل فرسودگی و تجهیزات مخلوط کن	ماهانه

۷-۲-۶-۱۰- ضخامت و ابعاد

قبل از بتن ریزی، قالب ها برای به دست آمدن اشکال، ابعاد و ضخامت مشخص شده لاینینگ و کفبند طراحی شده بررسی شود.

در بازرسی لاینینگ باید بررسی شود که سطح مقطع داخلی، ارتفاع، عرض و ضخامت بر اساس طراحی باشد. شکل ۷-۵ نمونه ای از فرم اندازه گیری را نشان می دهد.

Measuring point	Planned height (PH)			Height (h)			Left side of center line (a1)			Left side of central line (a2)			Remark
	Design height	Construction height	Difference	Design height	Construction height	Difference	Design width	Construction width	Difference	Design width	Construction width	Difference	



شکل ۷-۵ - نمونه ای از فرم اندازه گیری مقطع داخلی تونل

۷-۲-۷- عایق بندی

باید تأیید شود که کیفیت مواد مورد استفاده برای عایق بندی الزامات طراحی را برآورده می کند و در صورت نیاز بازرسی انجام شود. علاوه بر این، مواد باید به گونه ای مناسب نگهداری شوند که به کیفیت آن ها آسیب نرسد. به هنگام نصب عایق بندی اطمینان از آماده شدن بستر و نصب درست ضروری می باشد.

۷-۲-۷-۱- ژئوممبرین

به منظور جلوگیری از بروز نشت در ژئوممبرین ها، اعمال دقت کافی در طراحی، آزمایشات، انتخاب مشخصات، کنترل و اطمینان از کیفیت در تولید محصول و مراحل نصب و اجرا، ضروری است. انتخاب ژئوممبرین باید با توجه به هدف استفاده از آن، دوام مورد نیاز متناسب با شرایط و آسیب های محیطی، شرایط اجرایی، شرایط دوره بهره برداری و ملاحظات اقتصادی انجام گیرد.

۷-۲-۷-۲- ملاحظات کلی در ژئوسنتتیک ها

• ۷-۲-۷-۲-۱- گواهینامه تایید محصول

- پیمانکار موظف است گواهینامه ای شامل اطلاعاتی از نام تولید کننده، نام و کد محصول، ترکیبات شیمیایی محصول و سایر اطلاعات مربوطه که ژئوسنتتیک را معرفی کند، در اختیار مهندس ناظر قرار دهد.
- تولید کننده یا فروشنده محصول موظف است در خصوص برقراری برنامه کنترل کیفیت، پاسخگو باشد. ضمن آنکه مستندات کنترل کیفیت در هر زمان باید در دسترس قرار گیرد.
- گواهینامه ارائه شده توسط تولید کننده یا فروشنده، باید تضمین کننده این مطلب باشد که محصول استفاده شده، کوچک ترین مقادیر میانگین (MARVs²³) مدنظر را تحت کنترل کیفیت ارائه شده، تامین خواهد کرد. این گواهینامه باید مهر و امضای رسمی تولید کننده یا فروشنده را داشته باشد.
- در صورت عدم ارائه مستندات ذکر شده در فوق، محصول تایید نمی شود.

• ۷-۲-۷-۲-۲- نمونه برداری، آزمایش و تایید

نمونه برداری باید طبق دستورالعمل ISIRI7774 یا ASTM D4354 انجام شود. تایید محصول طبق دستورالعمل ASTM D4759 انجام می شود.

²³ Minimum (or Maximum) Average Roll Values (MARVs)

• ۷-۲-۷-۳- حمل و انبار

- برچسب محصولات، حمل و انبار آنها مطابق ASTM D4873 باید انجام شود. برچسب محصول باید به طور شفاف، نام تولیدکننده یا فروشنده، کد محصول و شماره طاقه را نشان بدهد.
- در مدارک هر محموله باید به گواهینامه محصول که از طرف تولیدکننده ارائه می شود، اشاره شود.
- هر طاقه باید به وسیله پوشش مخصوص در مقابل آسیب های ناشی از نور خورشید، رطوبت (بسته به نوع محصول و در صورت نیاز) و آلاینده های مضر، محافظت شود. این پوشش باید در تمام مراحل حمل و انبار، باقی بماند.
- در زمان انبار، ژئوسنتتیک نباید در تماس مستقیم با زمین بوده و توسط حفاظی در مقابل آسیب های کارگاهی، رطوبت و بارش (بسته به نوع محصول)، اشعه فرابنفش، تابش مستقیم نور خورشید، مواد شیمیایی بازی و اسیدی، جرقه های جوشکاری، حرارت بیش از ۶۰ درجه سانتی گراد و سایر شرایط محیطی که می تواند به مشخصات فیزیکی ژئوسنتتیک آسیب وارد کند، محافظت شود.

• ۷-۲-۷-۴- درزها

- انواع پیوستگی و درزگیری در محل مجاورت دو قطعه ژئوسنتتیک اعمال می شود. روش های درزگیری عبارتند از هم پوشانی، دوختن، بست و گیره، گره زدن، حرارت، مهار کردن، جوش دادن و چسب زدن که باید با توجه به نوع و عملکرد ژئوسنتتیک و شرایط پروژه، انتخاب و اعمال شود. از آنجاکه ممکن است محل درزها به نقطه ضعف سیستم تبدیل شود، باید تعداد آنها تا حد امکان محدود گردد. ضمن آنکه استفاده از درز در جهت اصلی کشش (عمود بر طول طاقه) در شیب ها و دیوارهای خاکی مسلح، مجاز نمی باشد.
- معمول ترین روش برای درزها در ژئوتکستایل ها و ژئوگریدها، همپوشانی حداقل ۰/۳ متری می باشد که بسته به شرایط پروژه، ممکن است همپوشانی های بیشتری لازم شود. در صورتیکه مقدار همپوشانی زیاد (بیش از ۱ متر) یا انتقال تنش مدنظر باشد، دوختن دو قطعه مجاور، روش مناسب تری است.

۷-۲-۸- زهکشی

- کیفیت مواد مورد استفاده برای زهکشی باید الزامات طراحی را برآورده کند و در صورت نیاز بازرسی صورت گیرد. به هنگام نصب نیز باید بر اساس طراحی صورت گرفته و تأیید شود که ظرفیت زهکشی کافی به دست آمده است.

۷-۲-۸-۱- مصالح زهکشی عمیق

- کیفیت مصالح مصرفی در زهکشی عمیق و زیرزمینی، نقش اساسی در بهره دهی درازمدت تاسیسات زهکشی ایفا می کند و به طور کلی باید دارای ویژگی های زیر باشند:
- الف) از نظر شیمیایی و فیزیکی در شرایط محیطی پروژه مقاوم و بادوام باشند.
- ب) مقاومت کافی سازه ای در برابر بارهای وارده و تغییر شکل های ناشی از آن را داشته باشند.

ج) با آیین‌نامه‌ها منطبق باشند (نشریه ۱۰۱)

د) در ابعاد و اندازه‌هایی طراحی شوند تا بتوانند حجم آب موردنظر و محاسبه شده در طرح را جمع‌آوری و تخلیه کند.

مصالح اصلی که در سیستم زهکشی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

- مصالح دانه‌ای^{۲۴}

- ژئوتکستایل

- لوله‌های زهکشی زیرزمینی و جمع‌کننده‌ها^{۲۵}

۷-۲-۸-۲- مصالح دانه‌ای

عملکرد مصالح دانه‌ای در سیستم زهکشی زیرزمینی شامل موارد زیر است:

الف: جمع‌آوری آب که از سیستم عبور می‌کند و ذخیره کردن موقت آن در داخل لایه‌های روسازی

ب: جلوگیری از فرار و انتقال مواد ریزدانه خاک پایه (خاکی که باید زهکشی شود)، از جمله بستر روسازی، زیراساس و اساس به داخل مصالح زهکشی

ج: تخلیه و خارج کردن آب به‌عنوان یکی از عملکردهای اصلی فرایند زهکشی

برای اینکه الزامات فوق قابل اجرا باشد مصالح دانه‌ای باید تابع معیارهای معینی از نظر دانه‌بندی، تراوایی، مقاومت در برابر دوره‌های متناوب یخبندان-ذوب و واکنش‌های شیمیایی مضر بوده و از سنگدانه‌های سخت، بادوام و مستحکم تشکیل شده باشند در صورت مصرف ماسه از نوع ماسه بتنی به‌عنوان مصالح زهکشی نباید از ماسه حاصل از سنگ شکسته کربناتی که به تدریج در آب حل می‌شود استفاده نمود.

۷-۲-۸-۳- ژئوتکستایل

ژئوتکستایل‌ها باید الیاف مقاوم و بادوام پلیمری مانند پلی‌استر، پلی‌پروپیلن به شکل بافته یا نبافته تهیه شده و کلاً فاقد هر نوع روکش یا اندودی که موجب تغییر خواص فیزیکی و عملکرد مناسب تراوایی آن‌ها می‌شود باشد. همچنین باید از استحکام کافی برخوردار بوده و دستورالعمل‌های سازنده آن‌ها به منظور حفاظت و جلوگیری از آسیب دیدگی‌های وارده به آن‌ها در جریان جابه‌جایی و نقل و انتقالات رعایت شود.

قطر سوراخ‌های ژئوتکستایل باید به اندازه‌ای باشد تا از حرکت ذرات ریز و معلق خاک پایه و در نتیجه فرسایش آن جلوگیری نموده و درعین حال مساحت سطوح باز یا سوراخ‌های آن‌ها برای عبور مقدار آب پیش‌بینی شده در طرح به قدر کافی باشد تا به‌عنوان سد یا حائلی عمل نکنند که خاصیت تراوایی ژئوتکستایل از تراوایی زمین کمتر باشد.

²⁴ Aggregate

²⁵ Underdrain-Pipe and Collectors

ژئوتکستایل باید از نظر شیمیایی کیفیتی داشته باشد که در تمام دوره بهره‌برداری و عملکرد خود به‌عنوان یکی از اجزاء تشکیل‌دهنده زهکشی، بادوام و مقاوم باقی بماند. سوراخ‌ها و منافذ زمین پارچه می‌تواند یکنواخت یا غیریکنواخت باشد ولی ابعاد نباید در برابر فشارهای عمودی وارده به سطح ژئوتکستایل تغییر کند. ژئوتکستایل باید خاصیت شکل‌پذیری و الاستیک داشته باشد تا بتواند در مقابل تنش‌های موضعی قابل‌ملاحظه و پیش‌بینی‌نشده، مقاومت نماید. ژئوتکستایل‌ها باید با توجه به شرایط عمومی و اختصاصی هر پروژه و شناخت و برآورد عوامل و مشکلات اجرایی پیش‌بینی‌نشده انتخاب شود.

۷-۲-۸-۴- لوله‌های زهکشی زیرزمینی

این لوله‌ها به‌عنوان عامل انتقال‌دهنده و خارج کننده آب از سیستم عمل می‌کنند و در انواع مختلف فلزی، پلاستیکی و سیمانی و غیره و به اشکال مشبک متخلخل، موجدار و ساده ساخته می‌شوند. لوله‌ها باید دارای مقاومت کافی بوده و در شرایط محیطی و شیمیایی محل پروژه از جمله در برابر املاح موجود در خاک و آب، خوردگی و یخبندان از دوام کافی برخوردار باشند. قطر لوله‌ها، ابعاد و اندازه سوراخ‌ها و نیز عرض شکاف و درز اتصال آن‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که میزان آبی که باید از آن‌ها عبور کند متناسب بوده و علاوه بر آن سنگدانه‌های فیلتر روی لوله‌ها به داخل سوراخ‌ها منتقل نشوند. داکت‌ها نیز که برای حفاظت محل خروجی آب در مقابل خسارات احتمالی وارده عمل می‌کنند باید در برابر کلیه شرایط و تاثیرات محیطی و نیز بار وارده به آن‌ها در دوره نگهداری محافظت شده و مقاومت لازم را داشته باشند.

لوله‌های مصرفی در زهکشی عمیق باید با یکی از استانداردهای زیر منطبق باشند:

لوله‌های فلزی آهنی یا فولادی موجدار	M۳۶-۹۰ آشتو
لوله‌های سفالی با مقاومت زیاد	M۶۵-۸۹ آشتو
لوله‌های مشبک بتنی	M۸۹-۱۷۵ آشتو
لوله‌های متخلخل سیمانی	M۸۷-۱۷۶ آشتو
لوله‌های بتنی	M۸۷-۱۷۸ آشتو
لوله‌های سفالی	M۸۷-۱۷۹ آشتو
لوله‌های موجدار آلومینیومی	M۸۸-۱۹۷ آشتو
لوله‌های آلومینیومی	M۸۸-۱۹۷ آشتو
لوله‌های ترموپلاستیک و پلی اتیلن موجدار	M۹۰-۲۵۲ آشتو

فصل هشتم

تیپ بندی و مقادیر

۸- تیپ بندی و مقادیر

۸-۱- مقدمه

یکی از مباحث مهم در مدیریت پروژه‌های تونلسازی، مقادیر مصالح استفاده شده در تیپ‌های مختلف نگهداری و باتوجه به ابعاد تونل "آیین نامه طرح هندسی راه‌های ایران" می‌باشد. سیستم نگهداری اولیه، مشخصات، مقادیر، طول‌ها و احجام هر کدام از سیستم نگهداری‌های استفاده شده بر موفقیت مالی پروژه بسیار تاثیرگذار است و باید به دقت بررسی شود. همانطور که در فصل ۵ بحث شد از مهمترین و رایج‌ترین سیستم‌های طبقه‌بندی در پروژه‌های تونلسازی ایران که اخیراً هم در فهرست بها به کار گرفته شده است، طبقه‌بندی RMR است که در ادامه جداول مربوط به مقادیر و مشخصات سیستم نگهداری اولیه برای راه‌های با تیپ‌ها و بازه‌های مختلف RMR ارائه شده است. لازم به یادآوری است که با توجه به اینکه مسئولیت طراحی تونل با مهندس مشاور است لذا ضرورت دارد مهندس مشاور قبل از استفاده از تیپ‌های زیر، کنترل‌های لازم بر روی نقشه و محاسبات فنی انجام دهد و شرایط فرض شده مندرج در جداول را با شرایط محلی تطبیق داده و در صورت تایید، نسبت به بکارگیری آن اقدام کند. همچنین تیپ‌های ذکر شده صرفاً برای شرایط معمول بوده و در شرایط خاص، لازم است مهندس مشاور نسبت به طراحی سیستم نگهداری متناسب با زمین دربرگیرنده تونل اقدام نماید.

تیپ بندی تونل‌ها براساس طبقه بندی عملکردی راه‌ها به شرح جداول زیر می‌باشد. همچنین مقاطع هندسی تیپ‌های تونل براساس طبقه بندی عملکردی راه‌ها، در سایت ضوابط بخشنامه نظام فنی و اجرایی بارگذاری گردیده است.

جدول ۸-۱- مشخصات سیستم نگهداری تونل برای آزادراه تیپ F1

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری (m³)	ضخامت (cm)				حجم شاتکریت (m³)		وایرمش								لتیس یا قاب فولادی			راکبوت			
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی	تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴ گره)			قاب فولادی			(m) طول	(m) الگو	
												طول (m)	وزن (Kg)	طول (m)	وزن (Kg)	قطر (mm)	فاصله داری	طول (m)	نوع (mm)	طول قاب (m)	فاصله داری (m)			
آزادراه - ۴ خطه	F1	۲۰-۰	۱۱۴	۵	۲۲	۱.۴	۶	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۷	۱۴۳	۲۶	۱۳۹	۲۵	۱۷	۲۶	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۶	۴	۱	۲
	F1	۳۰-۲۰	۱۱۳	۵	۲۰	۱.۴	۵.۳	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۷	۱۴۳	۲۶	۱۳۹	۲۲	۱۷	۲۶	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۶	۴	۱	۲
	F1	۴۰-۳۰	۱۱۳	۵	۲۰	۱.۴	۵.۳	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۷	۱۴۳	۲۶	۱۳۹	۲۲	۱	۲۶	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۶	۴	۱.۵	۲
	F1	۵۰-۴۰	۱۰.۹	۵	۵	۱.۳	۱.۳	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۷	۱۴۰	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	F1	۶۰-۵۰	۱۰.۸	۵	۰	۱.۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲	۲.۵	۲.۵
	F1	۸۰-۶۰	۱۰.۸	۵	۰	۱.۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲	موضع	موضع
	F1	۸۰-۱۰۰	۱۰.۷	۳	۰	۰.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲	موضعی	موضعی

آزادراه ۴- خطه

نوع راه	تپ مقطع	RMR	م ^۳ حجم حفاری)	شاتکریت				وایر مش								لتیس یا قاب فولادی			راکبوت					
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت م ^۳ (		تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	هم پوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴ گره)			قاب فولادی			طول (m)	م (m)	
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					طول (m)	وزن (Kg)	طول (m)	وزن (Kg)	قطر (mm)	فاصله داری (m)	طول (m)	نوع (mm)	فاصله داری (m)	طول قاب (m)		عرضی	طولی
آزاد راه - ۴ خطه	F2	۲۰-۰	۱۲۸	۵	۲۲	۱.۴	۶.۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۹	۱۵۲	۲۸	۱۴۸	۲۵	۱۷	۲۸	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۸	۴	۱	۲
	F2	۳۰-۲۰	۱۲۸	۵	۲۰	۱.۴۳	۵.۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۹	۱۵۱	۲۸	۱۴۷	۲۲	۱۷	۲۸	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۸	۴	۱	۳
	F2	۴۰-۳۰	۱۲۸	۵	۲۰	۱.۴۳	۵.۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۹	۱۵۱	۲۸	۱۴۷	۲۲	۱	۲۸	IPE ۱۶۰	۱۰	۲۸	۴	۱.۵	۲
	F2	۵۰-۴۰	۱۲۳	۵	۵	۱.۴	۱.۴	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۸	۱۴۸	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	F2	۶۰-۵۰	۱۲۲	۵	۰	۱.۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲.۵	۲.۵
	F2	۸۰-۶۰	۱۲۲	۵	۰	۱.۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی
F2	۸۰-۱۰۰	۱۲۲	۳	۰	۰.۸۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی	

جدول ۸-۳- مشخصات سیستم نگهداری برای آزادراه تیپ F۳

نوع راه	نپ مقطع	RMR	حجم حفاری (m ³)	شاتکریت				وایر مش								لتیس یا قاب فولادی			راکبوت						
				حجم شاتکریت (m ³)		ضخامت (cm)		تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴ گره)			قاب فولادی			طول (m)	(m)الگو		
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					وزن (Kg)	طول (m)	وزن (Kg)	طول (m)	قطر (mm)	فاصله داری (m)	طول (m)	نوع (mm)	فاصله داری (m)	طول قاب (m)		عرضی	طولی	
آزادراه- ۶ خطه	F3	۲۰-۰	۱۸۹	۵	۲۲	۱.۸	۷.۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۵	۱۸۳	۳۴	۳۴	۱۷۹	۲۵	۱۷	۳۴	IPE ۱۸۰	۱۷	۳۴	۴	۱	۲
	F3	۳۰-۲۰	۱۸۹	۵	۲۰	۱.۸	۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۵	۱۸۳	۳۴	۳۴	۱۷۹	۲۲	۱۷	۳۴	IPE ۱۶۰	۱۷	۳۴	۴	۱	۳
	F3	۴۰-۳۰	۱۸۹	۵	۲۰	۱.۸	۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۵	۱۸۳	۳۴	۳۴	۱۷۹	۲۲	۱	۳۴	IPE ۱۶۰	۱۷	۳۴	۴	۱.۵	۳
	F3	۵۰-۴۰	۱۸۳	۵	۵	۱.۷	۱.۷	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۴	۱۸۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	F3	۶۰-۵۰	۱۸۲	۵	۰	۱.۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵	۲.۵
	F3	۸۰-۶۰	۱۸۲	۵	۰	۱.۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی
F3	۸۰-۱۰۰	۱۸۱	۳	۰	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی

آزادراه- ۶ خطه

جدول ۸-۴- مشخصات سیستم نگهداری برای آزادراه تیب F4

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	م ³ حجم حفاری)	شاتکریت				وایر مش								لتیس یا قاب فولادی			راکبوت					
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت م ³ (		تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		قاب فولادی			طول (m)	الگو (m)				
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					طول (m)	وزن (kg)	طول (m)	وزن (kg)	قطر (mm)	فاصله داری (m)	طول (m)		نوع (mm)	فاصله داری (m)	طول قاب (m)	طولی	عرضی
آزادراه - ۶ خطه	F4	۲۰-۰	۲۰۹	۵	۲۲	۱.۸	۸	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۶	۱۹۲	۳۶	۱۸۸	۲۵	۱۷	۳۶	IPE ۱۸۰	۱۷	۳۶	۴	۱	۲
	F4	۳۰-۲۰	۲۰۸	۵	۲۰	۱.۸	۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۶	۱۹۲	۳۶	۱۸۸	۲۲	۱۷	۳۶	IPE ۱۶۰	۱۷	۳۶	۴	۱	۴
	F4	۴۰-۳۰	۲۰۸	۵	۲۰	۱.۸	۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۶	۱۹۲	۳۶	۱۸۸	۲۲	۱	۳۶	IPE ۱۶۰	۱۷	۳۶	۴	۱.۵	۴
	F4	۵۰-۴۰	۲۰۳	۵	۵	۱.۸	۱.۸	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۶	۱۸۹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲	۲
	F4	۶۰-۵۰	۲۰۱	۵	۰	۱.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵
	F4	۸۰-۶۰	۲۰۱	۵	۰	۱.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی
	F4	۸۰-۱۰۰	۲۰۰	۳	۰	۱.۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی

جدول ۸-۵- مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی چندخطه تیپ A1

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری (m ³)	ضخامت (cm)				حجم شاتکریت (m ³)		وایر مش								لتیس یا قاب فولادی			راکبوت			
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی	تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴ گره)			قاب فولادی			طول (m)	(m) الگو	
												طول (m)	وزن (Kg)	طول (m)	وزن (Kg)	قطر (mm)	فاصله داری (m)	طول (m)	نوع (mm)	فاصله داری (m)	طول قاب (m)		طولی	عرضی
شریانی چندخطه- ۴ خطه	A1	۲۰-۰	۱۰۰	۵	۲۲	۱.۳	۵.۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۵	۲۵	۲۵	۲۵	۱۳۱	۲۵	۲۵	۱۷	۲۵	۴	۱	۲
	A1	۳۰-۲۰	۹۹	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۴	۲۵	۲۵	۲۲	۱۳۰	۲۵	۲۵	۱۷	۲۵	۴	۱	۳
	A1	۴۰-۳۰	۹۹	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۴	۲۵	۲۵	۲۲	۱۳۰	۲۵	۲۵	۱	۲۵	۴	۱.۵	۳
	A1	۵۰-۴۰	۹۶	۵	۵	۱.۳	۱.۳	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۲	۲۵	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	A1	۶۰-۵۰	۹۴	۵	۰	۱.۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵	۲.۵
	A1	۸۰-۶۰	۹۴	۵	۰	۱.۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی
	A1	۸۰-۱۰۰	۹۴	۳	۰	۰.۷۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی

جدول ۸-۷- مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی دو خطه تیپ A3

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	م ³ حجم حفاری	شاتکریت				واپرمش								لتیس یا قاب فولادی				راکبوت					
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت م ³ (		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴ گره)			قاب فولادی			طول(m)	(m)الگو		
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					وزن (Kg)	طول(m)	وزن (Kg)	طول(m)	قطر(mm)	فاصله داری (m)	طول(m)	نوع(mm)	فاصله داری (m)	طول قاب (m)		عرضی	طولی	
شیرینانی دو خطه – دو طرفه	A3	۲۰-۰	۹۵	۵	۲۲	۱.۳	۵.۲۴	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۱	۲۴	۱۲۷	۲۴	۲۵	۱۷	۲۴	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۴	۴	۱	۲
	A3	۳۰-۲۰	۹۴	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۱	۲۴	۱۲۷	۲۴	۲۲	۱۷	۲۴	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۴	۴	۱	۲
	A3	۴۰-۳۰	۹۴	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۱	۲۴	۱۲۷	۲۴	۲۲	۱	۲۴	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۴	۴	۱.۵	۲
	A3	۵۰-۴۰	۹۰	۵	۵	۱.۲	۱.۲	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۴	۱۲۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	A3	۶۰-۵۰	۸۹	۵	۰	۱.۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲.۵	۲.۵
	A3	۸۰-۶۰	۸۹	۵	۰	۱.۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی
	A3	۸۰-۱۰۰	۸۹	۳	۰	۰.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی

جدول ۸-۸- مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی دو خطه تیپ A4

نوع راه	تپ مقطع	RMR	m³(حجم حفاری)	شاتکریت				واپرمش								لتیس یا قاب فولادی			راکبوت					
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت m³(		تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴ گره)			قاب فولادی			طول(m)	الگو(m)	
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					طول(m)	وزن(Kg)	طول(m)	وزن(Kg)	قطر(mm)	فاصله داری (m)	طول(m)	نوع(mm)	فاصله داری (m)	طول قاب (m)		عرضی	طولی
شیربانی دو خطه- دو طرفه	A4	۲۰-۳۰	۱۰.۷	۵	۲۲	۱.۳	۵.۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۶	۱۳۹	۲۶	۱۳۵	۲۵	۱۷	۲۶	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۶	۴	۱	۲
	A4	۳۰-۴۰	۱۰.۶	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۶	۱۳۸	۲۶	۱۳۵	۲۲	۱۷	۲۶	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۶	۴	۱	۲
	A4	۴۰-۵۰	۱۰.۶	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۶	۱۳۸	۲۶	۱۳۵	۲۲	۱	۲۶	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۶	۴	۱.۵	۳
	A4	۵۰-۶۰	۱۰.۲	۵	۵	۱.۳	۱.۳	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۶	۱۳۶	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	A4	۶۰-۷۰	۱۰.۱	۵	۰	۱.۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵	۲.۵
	A4	۸۰-۹۰	۱۰.۱	۵	۰	۱.۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی
	A4	۸۰-۱۰۰	۱۰.۰	۳	۰	۰.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی

جدول ۸-۹- مشخصات سیستم نگهداری برای راه جمع کننده/توزیع کننده تیپ C1

راکبوت		لتیس یا قاب فولادی			وایر مش										شاتکریت				RMR	تیپ مقطع	نوع راه		
(m)الگو		(m)طول	قاب فولادی		لتیس (۴گره)			لایه ۲		لایه ۱		(cm)همپوشانی	(cm)چشمه	(mm)قطر	تعداد لایه	حجم شاتکریت (m³)		ضخامت (cm)				(m³حجم حفاری)	
عرضی	طولی		(m)طول قاب	(m)فاصله داری	(mm)نوع	(m)طول	(m)فاصله داری	(mm)قطر	(Kg)وزن	(m)طول	(Kg)وزن					(m)طول	لایه های بعدی	لایه اول					لایه های بعدی
۲	۱	۴	۲۰	۱۷	IPE ۱۸۰	۲۰	۱۷	۲۵	۱۰۷	۲۰	۱۱۱	۲۱	۱۵	۱۰*۱۰	۶	۲	۴.۵	۱	۲۲	۵	۶۶	۲۰-۰	C1
۳	۱	۴	۲۰	۱۷	IPE ۱۶۰	۲۰	۱۷	۲۲	۱۰۶	۲۰	۱۱۰	۲۱	۱۵	۱۰*۱۰	۶	۲	۴.۱	۱	۲۰	۵	۶۵	۳۰-۲۰	C1
۳	۱.۵	۴	۲۰	۱۸	IPE ۱۶۰	۲۰	۱	۲۲	۱۰۶	۲۰	۱۱۰	۲۱	۱۵	۱۰*۱۰	۶	۲	۴.۱	۱	۲۰	۵	۶۵	۴۰-۳۰	C1
۲	۲	۴	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۰.۸	۲۰	۱۵	۱۰*۱۰	۶	۱	۱	۱	۵	۵	۶۲	۵۰-۴۰	C1
۲.۵	۲.۵	۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱	۰	۵	۵	۶۱	۶۰-۵۰	C1
موضعی	موضعی	۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱	۰	۵	۵	۶۱	۸۰-۶۰	C1
موضعی	موضعی	۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۰.۶	۰	۳	۳	۶۱	۸۰-۱۰۰	C1

جمع کننده/توزیع کننده- دو طرفه

جدول ۸-۱۰- مشخصات سیستم نگهداری برای راه جمع کننده/توزیع کننده تیب C2

نوع راه	تپ مقطع	RMR	م ³ حجم حفاری)	شاتکریت				وایر مش								لتیس یا قاب فولادی			راکبوت					
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت m ³ (		تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴گره)			قاب فولادی			طول (m)	المو (m)	
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					طول (m)	وزن (Kg)	طول (m)	وزن (Kg)	قطر (mm)	فاصله داری (m)	طول (m)	نوع (mm)	فاصله داری (m)	طول قاب (m)		عرضی	طول
جمع کننده/ توزیع کننده – دو طرفه	C2	۲۰-۰	۷۱	۵	۲۲	۱.۱	۴.۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۴	۲۱	۱۱۰	۲۵	۱۷	۲۱	۱۸۰ IPE	۱۷	۲۱	۴	۱	۲
	C2	۲۰-۳۰	۷۰	۵	۲۰	۱.۱	۴.۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۴	۲۱	۱۱۰	۲۲	۱۷	۲۱	۱۶۰ IPE	۱۷	۲۱	۴	۱	۲
	C2	۴۰-۳۰	۷۰	۵	۲۰	۱.۱	۴.۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۴	۲۱	۱۱۰	۲۲	۱۸	۲۱	۱۶۰ IPE	۱۸	۲۱	۴	۱.۵	۲
	C2	۵۰-۴۰	۶۷	۵	۵	۱.۱	۱	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۲	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	C2	۶۰-۵۰	۶۶	۵	۰	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲.۵	۲.۵
	C2	۸۰-۶۰	۶۶	۵	۰	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی
	C2	۸۰-۱۰۰	۶۵	۳	۰	۰.۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی

جمع کننده/ توزیع کننده - دو طرفه

جدول ۸-۱۱- جمع کننده/توزیع کننده تیپ C3

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	m ³ حجم حفاری)	شاتکریت				وایر مش								لتیس یا قاب فولادی			راکبالت					
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت m ³ (		تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴گره)			قاب فولادی			طول (m)	المگو	
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					طول (m)	وزن (Kg)	طول (m)	وزن (Kg)	قطر (mm)	فاصله داری (m)	طول (m)	نوع (mm)	فاصله داری (m)	طول قاب (m)		طولی	عرضی
جمع کننده/ توزیع کننده- دو طرفه	C3	۲۰-۰	۹۴	۵	۲۲	۱.۲	۵.۳	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۰	۲۴	۱۲۶	۲۵	۱۷	۲۴	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۴	۴	۱	۲
	C3	۲۰-۲۰	۹۳	۵	۲۰	۱.۲	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۰	۲۴	۱۲۶	۲۲	۱۷	۲۴	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۴	۴	۱	۳
	C3	۴۰-۳۰	۹۳	۵	۲۰	۱.۲	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۰	۲۴	۱۲۶	۲۲	۱	۲۴	IPE ۱۶۰	۱۸	۲۴	۴	۱.۵	۳
	C3	۵۰-۴۰	۸۹	۵	۵	۱.۲	۱.۲	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۴	۱۲۸	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	C3	۶۰-۵۰	۸۸	۵	۰	۱.۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵	۲.۵
	C3	۸۰-۶۰	۸۸	۵	۰	۱.۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی
	C3	۸۰-۱۰۰	۸۸	۳	۰	۰.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۱۳- مشخصات سیستم نگهداری برای راه محلی / روستایی تیپ L1

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری) m ³ (	شاتکریت				وایر مش								لتیس یا قاب فولادی			راکبوت					
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت)m ³ (		تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴ گره)			قاب فولادی			طول (m)	(m) الگو	
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					طول (m)	وزن (Kg)	طول (m)	وزن (Kg)	قطر (mm)	فاصله داری (m)	طول (m)	نوع (mm)	فاصله داری (m)	طول قاب (m)		عرضی	طولی
محلی / روستایی - دو طرفه	L1	۲۰-۰	۶۶	۵	۲۲	۱	۴.۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۱	۲۰	۱۰۶	۲۵	۱۷	۲۰	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۰	۴	۱	۲
	L1	۲۰-۲۰	۶۵	۵	۲۰	۱	۴.۱	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۰	۲۰	۱۰۶	۲۲	۱۷	۲۰	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۰	۴	۱	۲
	L1	۴۰-۳۰	۶۵	۵	۲۰	۱	۴	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۰	۲۰	۱۰۶	۲۲	۱	۲۰	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۰	۴	۱.۵	۳
	L1	۵۰-۴۰	۶۲	۵	۵	۱	۱	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۰	۱۰۸	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	L1	۶۰-۵۰	۶۱	۵	۰	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲	۲.۵	۲.۵
	L1	۸۰-۶۰	۶۱	۵	۰	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲	موضعی	موضعی
	L1	۸۰-۱۰۰	۶۱	۲	۰	۰.۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲	موضعی	موضعی

جدول ۸-۱۴- مشخصات سیستم نگهداری برای راه محلی/روستایی تیب L2

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری (m³)	شاتکریت				واپرمش								لتیس یا قاب فولادی			راکبوت					
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت (m³)		تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴گره)			قاب فولادی			طول (m)	(m)الگو	
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					طول (m)	وزن (Kg)	طول (m)	وزن (Kg)	قطر (mm)	فاصله داری (m)	طول (m)	نوع (mm)	فاصله داری (m)	طول قاب (m)		عرضی	طولی
محلی / روستایی - دو طرفه	L2	۲۰-۰	۷۲	۵	۲۲	۱.۱	۴.۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۶	۲۱	۱۱۲	۲۵	۱۷	۲۱	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۱	۴	۱	۲
	L2	۳۰-۲۰	۷۲	۵	۲۰	۱.۱	۴.۳	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۵	۲۱	۱۱۲	۲۲	۱۷	۲۱	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۱	۴	۱	۴
	L2	۴۰-۳۰	۷۲	۵	۲۰	۱.۱	۴.۳	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۵	۲۱	۱۱۲	۲۲	۱	۲۱	IPE ۱۶۰	۱۰	۲۱	۴	۱.۵	۴
	L2	۵۰-۴۰	۶۹	۵	۵	۱.۱	۱.۱	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۳	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	L2	۶۰-۵۰	۶۸	۵	۰	۱.۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲.۵	۲.۵
	L2	۸۰-۶۰	۶۸	۵	۰	۱.۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی
	L2	۸۰-۱۰۰	۶۷	۳	۰	۰.۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۱۵- مشخصات سیستم نگهداری برای راه محلی / روستایی تیپ L3

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری) m ³ (	ضخامت (cm)				حجم شاتکریت m ³ (		واپر مش								لتیس یا قاب فولادی			راکبوت			
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی	تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴گره)			قاب فولادی			طول (m)	(m)الگو	
												طول (m)	وزن (Kg)	طول (m)	وزن (Kg)	قطر (mm)	طول (m)	فاصله داری (m)	طول (m)	فاصله داری (m)	نوع (mm)		طول قاب (m)	فاصله داری (m)
محلی / روستایی – دو طرفه	L3	۲۰-۰	۷۸	۵	۲۲	۱.۱	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۳	۱۲۰	۲۲	۱۱۶	۲۵	۱۷	۲۲	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۲	۴	۱	۲
	L3	۲۰-۳۰	۷۷	۵	۲۰	۱.۱	۴.۴	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۳	۱۱۹	۲۲	۱۱۶	۲۲	۱۷	۲۲	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۲	۴	۱	۲
	L3	۴۰-۳۰	۷۷	۵	۲۰	۱.۱	۴.۴	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۳	۱۱۹	۲۲	۱۱۶	۲۲	۱	۲۲	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۲	۴	۱.۵	۲
	L3	۵۰-۴۰	۷۴	۵	۵	۱.۱	۱.۱	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۷	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	L3	۶۰-۵۰	۷۳	۵	۰	۱.۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵	۲.۵
	L3	۸۰-۶۰	۷۳	۵	۰	۱.۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی
	L3	۸۰-۱۰۰	۷۲	۳	۰	۰.۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی	موضعی

محلی / روستایی - دو طرفه

فصل نهم

منابع

۹- منابع

۹-۱- منابع فارسی

۱. مدنی، حسن (۱۳۸۲). تهویه در معادن، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۲. میرزایی مهران، حسینی سیده شیلان، رحیمی بابک، رستمی برهان، احمدی سیوان (۱۳۹۸). «تجربیات احداث تونل در شیل‌های زون سنندج- سیرجان (مطالعه موردی: تونل باغان، محور جدید سنندج-مریوان)». در مجموعه مقالات سیزدهمین کنفرانس تونل ایران، هتل المپیک تهران، ۲۸ و ۲۹ آبان ماه ۱۳۹۸.
۳. میرزایی مهران، رستمی برهان، حسینی سیده شیلان، رحیمی بابک، شاکری آرش (۱۳۹۷). «برآورد هزینه احداث تونل با استفاده از شاخص توده سنگ (RMR) در راه‌های اصلی درجه یک و دو، دوخطه و سه خطه». در مجموعه مقالات کنفرانس ملی تحقیقات بنیادین در عمران، معماری و شهرسازی، تهران، خرداد ماه ۱۳۹۷.
۴. رحیمی بابک، احمدی سیوان، حسینی سیده شیلان، میرزایی مهران (۱۳۹۷). «آب‌بندی تونل‌های بین شهری با استفاده از ژئوممبرین (مطالعه موردی: تونل باغان، محور جدید سنندج - مریوان)». در مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی معدن و علوم زمین، تهران، ۳۱ خرداد ماه ۱۳۹۷.
۵. احمدی سیوان، رحیمی بابک، بادفر محمد، حسینی سیده شیلان، میرزایی مهران (۱۳۹۷). «تعیین رابطه بین پارامترهای انفجار و RMR در تونل‌های راه در شیل‌های زون سنندج-سیرجان (مطالعه موردی: تونل باغان، محور جدید سنندج-مریوان)». در مجموعه مقالات سیزدهمین کنفرانس تونل ایران، هتل المپیک تهران، ۲۸ و ۲۹ آبان ماه ۱۳۹۸.
۶. احمدی سیوان، رحیمی بابک، گردشی محمد، عبدی داوود، رضایی فرهاد (۱۳۹۸). «استفاده از راد خودحفار به‌عنوان فورپولینگ جهت عبور از ریزش در مهندسی تونل (مطالعه موردی تونل باغان مسیر جدید سنندج مریوان)». در مجموعه مقالات سیزدهمین کنفرانس تونل ایران، هتل المپیک تهران، ۲۸ و ۲۹ آبان ماه ۱۳۹۸.
۷. پلاسی، مسعود؛ «تونل سازی، دانشگاه تهران»، ۱۳۹۱-۱۳۹۰.
۸. سازمان برنامه و بودجه کشور (۱۳۹۶). «دستورالعمل تهیه ساختار شکست عملیات راه‌سازی، ضابطه شماره ۷۲۴».
۹. سازمان برنامه و بودجه کشور (۱۳۹۵). «فهرست بهای کلان راه‌سازی سال ۱۳۹۸».
۱۰. سازمان برنامه و بودجه کشور (۱۳۹۵). «فهرست بهای واحد پایه رشته راه، راه‌آهن و باند فرودگاه سال ۱۳۹۵».
۱۱. میرزایی مهران، حسینی سیده شیلان، رحیمی بابک، رستمی برهان، احمدی سیوان (۱۳۹۷). «تجربیات احداث تونل در شیل‌های زون سنندج- سیرجان (مطالعه موردی: تونل باغان، محور جدید سنندج-مریوان)». در مجموعه مقالات سیزدهمین کنفرانس تونل ایران، هتل المپیک تهران، ۲۸ و ۲۹ آبان ماه ۱۳۹۸.
۱۲. سازمان برنامه و بودجه کشور (۱۳۹۴). «راهنمای طراحی و اجرای پوشش داخلی تونل‌های راه و راه‌آهن، ضابطه شماره ۶۸۴».
۱۳. استوار، رحمت‌الله؛ آتشکاری در معادن (جلد دوم: تئوری‌های انفجار)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ویرایش اول.

۱۴. استوار، رحمت الله؛ آتشکاری در معادن (جلد اول: شناخت مواد منفجره)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ویرایش دوم.
۱۵. اصغر لادریان؛ کنترل عملیات آتشکاری در مناطق خردشده فضاهای زیرزمینی سد گتوند علیا، ۱۳۸۹.
۱۶. سید حسن خوشرو، محمد اورکی: طراحی الگوی انفجار کنترل شده در دیواره نهایی تونل راه آن قزوین رشت، ۱۳۸۸.

۹-۲- منابع انگلیسی

17. N Vlachopoulos, MS Diederichs - Geotechnical and Geological engineering ۲۰۱۴.
18. Sakurai, S., ۱۹۹۷, Lessons learned from field measurements in tunneling, Tunneling and Underground Space Technology, ۱۲((۴, .۴۶۰-۴۵۳
19. Hiroshi, T., December ۲۰۱۸, Standard specifications for tunneling-۲۰۱۶: Mountain Tunnels, Japan Society of Civil Engineers.
20. Xing, Guanyang, et al. "The effects of radius and longitudinal slope of extra-long freeway spiral tunnels on driving behavior: A practical engineering design case." Tunneling and Underground Space Technology ۱۵۲(۲۰۲۴): ۱۰۵۹۶۷.
21. Engineers C. STANDARD SPECIFICATIONS FOR TUNNELING-۲۰۱۶: Mountain Tunnels Japan Society of Civil Engineers. ۲۰۱۸; ((۱ . ۱

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. گزارش حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشرشده در سال های اخیر در سایت اینترنتی nezamfanni.ir قابل دستیابی می باشد.

Regulations on Road Tunnel

[IR-Code 800-14]

Rahyab Melal Consulting Engineers:Project Manager and Consultant

Borhan Rostami	Civil Engineer (Project Manager)
Rebabe Ghadiri	Civil Engineer
Mozaffar Biglar	Civil Engineer
Shilan Hosseini	Geological Engineer
Babak Rahimi	Mining Engineer- Rock Mechanics
Mehran Mirzaee	Mining Engineer- Rock Mechanics
Mehdi Zohrabi	Mining Engineer- Rock Mechanics
Milad Aftabi	Mining Engineer- Rock Mechanics
Vahid Moradi	Mining Engineer- Rock Mechanics
Yaser Rostami	Civil Engineer

Steering Committee (Plan and Budget Organization)

Alireza Toutounchi	Deputy of Technical and Executive Affairs Department
Taher Fatthollahi Marni	Head of Technical and Executive Affairs Department
Sajjad Heidari	Expert Engineering, Technical and Executive Affairs Department
Hasanaklou	
Fatemeh Babaloo	Expert Engineering, Technical and Executive Affairs Department
Borhan Rostami	Chairman of Rahyab Melal Consulting Engineers

Acknowledgments:

Saeed Shahsavari	CEO of Tehran - Shomal Freeway
Vahid Falsafi Divband	Technical and Executive Deputy of Tehran - Shomal Freeway

Islamic Republic of Iran

Plan and Budget Organization

Iranian Highways Manual (IHM)
Regulations on Road Tunnel

IR-Code 800-14

Last Edition: 12.18.2024

Deputy of Technical, Infrastructure and Production
Department of Technical & Executive Affairs

Nezamfanni.ir

2025

این ضابطه

با عنوان « آیین‌نامه راه‌های ایران (آرا) – آیین‌نامه
تونل‌ها برون شهری» پس از ارائه مقررات، در قالب ۸
فصل به بیان مهمترین مسائل موجود در زمینه مطالعه،
طراحی، ساخت، مدیریت ساخت تونل و همچنین
تیپ‌بندی‌ها می‌پردازد.