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

باسمه تعالی

ریاست جمهوری
سازمان برنامه و بودجه کشور
رئیس سازمان

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	**شماره :**	**۱۴۰۳/۵۷۸۱۱۸**
	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 فنی‌واجرایی یکپارچه کشور» موضوع مصوبه شماره ۲۵۲۵۴/ت۵۷۶۹۷ه مورخ ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ هیئت وزیران، دستورالعمل پیوست با مشخصات زیر ابلاغ و برای اجرا در «سامانه نظام فنی‌واجرایی 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 ویا 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 فنی‌واجرایی سازمان برنامه و بودجه کشور
مرجع اعلام اصلاحات:	امور نظام فنی‌واجرایی 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، ایهام 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**

باسمه‌تعالی

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 بهره برداری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تدوین این ضوابط و معیارها مستلزم انجام پژوهش های 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 پژوهش های 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 تونل های 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 نشانیNezamfanni.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 این‌رو همواره مطالب صفحات، دارای تاریخ جدید و معتبر خواهد بود.

حمید امانی همدانی

معاون فنی، زیربنائی و تولیدی

زمستان ۱۴۰۳

تهیه و کنترل «آیین‌نامه راه‌های ایران (آرا) – آیین‌نامه تونل‌های برون شهری»

[ضابطه شماره ۱۴-۸۰۰]

مدیر طرح و مشاور پروژه : مهندسین مشاور راه‌یاب ملل

برهان رستمی	مهندس عمران (مدیر طرح)
ربابه قدیری	مهندس عمران
مظفر بیگلر	مهندس عمران
شیلان حسینی	کارشناس ارشد زمین‌شناسی - تکتونیک
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	کارشناسی ارشد معدن - مکانیک سنگ
یاسررستمی	مهندس عمران

اعضای گروه هدایت و راهبری:

علیرضا توتونچی	معاون امور نظام فنی و اجرایی، سازمان برنامه و بودجه کشور
طاهر فتح‌اللهی مرنی	رئیس گروه 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	کارشناس امور نظام فنی و اجرایی، سازمان برنامه و بودجه کشور
برهان رستمی	رئیس هیئت مدیره مهندسین مشاور راه‌یاب ملل

با همکاری و پشتیبانی:

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

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 : ۲۸-۰۹-۱۴۰۳

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، رده‌بندی‌سنگ، 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 سازه های مجاور و تعیین فاصله بهینه بین آن‌ها
- انجام مدلسازی در مقاطعی که فرض کرنش صفحه‌ای صادق نباشد (مانند محل تقاطع ها)
- اقدامات متناسب جهت بررسی مقاطعی که کرنشی صفحه ای صادق نیست از جمله محل تقاطع ها و پرتال های 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 مشاهده ای
- 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 روش های 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 برمبنای نتایج قرائت‌ها
- مراجع استفاده شده در مطالعه و طراحی پروژه در پایان گزارش مطالعه و یا طراحی ارائه شوند.
-

۱-۲ دامنه کابرد

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.

۱-۳ مشخصات هندسه تونل

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

- طراحی هندسه تونل مطابق با نشریه شماره ۱-۸۰۰
- حداکثر شیب طولی تونل‌های مارپیچ (اسپیرال) ۲/۵ درصد می باشد 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 ۱-۸۰۰ 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.

۱-۴ 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 آشفتگی این ناحیه
- بررسی تراز آب زیرزمینی و راه‌های مقابله با آن
- جانمایی پرتال تونل در دامنه‌های آفتابگیر درصورت 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 درنظرگرفتن تمهیدات لازم
- شناسایی سازه‌ها و مستحدثات مجاور پرتال و میزان اثرگذاری متقابل آنها با پرتال
- شناسایی مخاطرات احتمالی محل احداث پرتال ازجمله رانش، ریزش، سیل، بهمن و ... و درنظرگرفتن تمهیدات لازم

۱-۵ جانمایی تجهیز کارگاه

در انتخاب محل تجهیزکارگاه رعایت موارد زیر الزامی است:

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

۱-۶ 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 ازجمله منابع طبیعی، محیط زیست و ....
- ارائه طرح پایدارسازی دپو (خصوصا 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

۲-۱ پرتال

در احداث پرتال‌ها، رعایت موارد زیر الزامی است:

- جلوگیری از دستخوردگی زیاد زمین در محل پرتال
- پایدارسازی 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 جبهه‌کار و نصب تحکیمات (در صورت نیاز به شاتکریت لایه اول، حتما بلافاصله بعد از حفاری اجرا شود. همچنین درصورت اجرا شاتکریت لایه دوم و مش‌بندی باید حداکثر فاصله از جبهه کار ۱۰ متر باشد. راکبولت 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).
- بروزرسانی 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،بادبزنی 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 حداقل‌رساندن اضافه حفاری ازجمله 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
٤. مقررات ایمنی حمل، نگهداری و کاربرد مواد ناریه: تهیه، حمل، نگهداری و کاربرد مواد ناریه درکارهای عمرانی باید مطابق با آیین‌نامه و مقررات حفاظت و ایمنی باشد.
٥. شناسایی عوامل آسیب رسان داخل تونل
٦. 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 وکنترل 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 برروی 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 پاطاق لاینینگ با مصالح مناسب یا بتن (با تشخیص دستگاه نظارت) تا کد مورد نظر
- انجام دقت کافی در خم و برش آرماتوربندی پاطاق (خم و بازخم میلگردی که یک سر آن در بتن سخت شده قرار دارد مجاز نیست).
- درنظرگرفتن تمهیدات خاصی برای عدم مسدود شدن لوله‌های بارباکان و جلوگیری از ترک در بتن، درصورت عبور آنها از قسمت پاطاق 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 : ۲۸-۰۹-۱۴۰۳

معاونت فنی، زیربنایی و تولیدی

امور نظام فنی و اجرایی

Nezamfanni.ir

۱۴۰۳

فهرست مطالب

۱- کلیات

۱-۱- مقدمه ۵

۱-۲- هدف ۵

۱-۳- انواع تونل و روش های ساخت ۵

۱-۴- تعاریف ۶

۲- مطالعات تونل **۱۳**

۲-۱- مقدمه ۱۳

۲-۲- طراحی ۲۱

۲-۲-۱- طراحی تونل ۲۱

۲-۲-۱-۱- پلان ۲۱

۲-۲-۱-۲- پروفیل ۲۲

۲-۲-۱-۳- مقطع عرضی ۲۲

۲-۲-۱-۴- امکانات کمکی تونلها ۲۲

۲-۲-۲- برنامه‌ریزی احداث تونل ۲۲

۲-۲-۲-۱- روش اجرا و برنامه زمان‌بندی ۲۳

۲-۲-۲-۲- راه‌های دسترسی، تجهیز و محل‌های دپوی مصالح مازاد ۲۳

۲-۲-۲-۳- حفاظت از محیط‌زیست ۲۴

۲-۳- بررسی‌ها ۲۵

۲-۳-۱- بررسی شرایط زمین ۲۵

۲-۳-۱-۱- کلیات ۲۵

۲-۳-۱-۲- بررسی توپوگرافی برای مطالعه و اجرا ۲۷

۲-۳-۱-۳- بررسی زمین‌شناسی برای مطالعه و اجرا ۲۷

۲-۳-۱-۴- بررسی‌های زمین‌شناسی حین ساخت ۳۱

۲-۳-۱-۵- بررسی‌های هیدرولوژیکی ۳۲

۲-۳-۲- بررسی موقعیت تونل ۳۴

۲-۳-۲-۱- کلیات ۳۴
۲-۳-۲-۲- بررسی زیست‌محیطی ۳۴
۲-۳-۲-۳- بررسی قوانین و مقررات تأثیرگذار بر پروژه ۳۸
۲-۳-۲-۴- الزامات جبران خسارت ۳۸
۲-۳-۳- نتایج بررسی‌ها ۳۸
۲-۳-۳-۱- کلیات ۳۸
۲-۳-۳-۲- طبقه‌بندی و استفاده از نتایج بررسی‌های شرایط زمین ۳۸
۲-۴- جایگاه مطالعه و طراحی تونل در مطالعات طرح‌های احداث راه ۴۳
۲-۴-۱- مطالعات توجیه اولیه طرح احداث راه ۴۴
۲-۴-۲- مطالعات توجیه نهایی طرح احداث راه ۴۴
۲-۴-۳- مطالعات طراحی تفصیلی طرح احداث راه ۴۵
۲-۴-۴- مطالعات توجیه نهایی احداث تونل ۴۶
۲-۴-۵- مطالعات طراحی تفصیلی احداث تونل ۴۷
۲-۴-۵-۱- مشخصات فنی خصوصی شامل مشخصات مصالح و مشخصات فنی عملیات ۴۸
۲-۴-۵-۲- متره و برآورد احداث تونل ۴۸
۲-۴-۵-۳- برنامه زمان‌بندی ۴۹
۲-۵- هندسه تونل ۵۰
۲-۵-۱- مقدمه ۵۰
۲-۵-۱-۱- گروه‌بندی تونل‌ها ۵۰
۲-۵-۲- مقطع عرضی ۵۰
۲-۵-۲-۱- سواره رو ۵۱
۲-۵-۲-۲- شانه ها ۵۱
۲-۵-۲-۳- توقفگاه اضطراری ۵۲
۲-۵-۲-۴- پیادهروها ۵۲
۲-۵-۲-۵- ارتفاع ۵۳
۲-۵-۲-۶- شیب عرضی ۵۴

۲-۵-۲-۷- سرعت طرح ۵۴
۲-۵-۲-۸- پیاده رو ۵۴
۲-۵-۳- نقشه مسطحه ۵۴
۳- بررسی‌های زمین‌شناسی ۵۹
۳-۱- بررسی شرایط زمین ۵۹
۳-۱-۱- زمین‌شناسی عمومی ۵۹
۳-۱-۲- چینه‌شناسی ۶۰
۳-۱-۳- مخاطرات زمین‌شناسی ۶۰
۳-۱-۴- آب زمین شناسی ۶۳
۳-۱-۵- شرایط زیست‌محیطی ۶۴
۳-۲- زمین‌شناسی مهندسی ۶۵
۳-۲-۱- مقدمه ۶۵
۳-۲-۲- تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی ۶۶
۳-۲-۳- طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ ۶۶
۳-۲-۴- برآورد خصوصیات ژئومکانیکی ۶۷
۳-۲-۴-۱- آزمون های آزمایشگاهی ۶۷
۳-۲-۴-۲- آزمایشهای برجا ۷۲
۳-۲-۴-۲-۱- آزمایش بارگذاری صفحهای (جکینگ) ۷۲
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) ۷۳
۳-۲-۴-۲-۵- روش شکست هیدرولیکی ۷۴
۳-۲-۴-۲-۶- روش بیش مغزهگیری ۷۴
۳-۲-۴-۲-۷- آزمایش لوژان ۷۵
۳-۲-۵- اکتشافات ژئوتکنیکی خاک‌ها ۷۶
۳-۲-۵-۱- آزمونهای آزمایشگاهی بر روی خاکها ۷۷

۳-۲-۵-۲- آزمایشهای برجا بر روی خاکها ۸۰
۳-۳- لرزه‌خیزی و تحلیل خطر زمین‌لرزه ۸۲
۳-۳-۱- رفتار سنگ در برابر زمین‌لرزه ۸۳
۳-۳-۲- رفتار خاک در برابر زمین‌لرزه ۸۵
۳-۴- مطالعات ژئوفیزیکی ۸۵
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 ۹۱
۴-۲-۲- داده‌های اولیه برای تهیه ساختار شکست کار ۹۲
۴-۲-۳- تحویل‌شدنی ۹۳
۴-۲-۴- الزامات ساختار شکست کار ۹۳
۴-۲-۵- محل قرارگیری فعالیت‌ها ۹۴
۴-۲-۶- شیوه نام‌گذاری عناصر بر اساس مبنا بودنِ تحویل‌شدنی‌ها ۹۵
۴-۲-۷- سطوح استاندارد ساختار شکست کار ۹۷
۴-۲-۸- شماره‌گذاری عناصر ساختار شکست کار ۹۸
۵- طراحی تونل ۱۰۱
۵-۱- انتخاب روش و مقطع حفاری ۱۰۱
۵-۱-۱- انتخاب مقطع حفاری ۱۰۱
۵-۱-۲- روش حفاری ۱۰۲
۵-۱-۲-۱- حفر تونل با ماشین‌های تمام مقطع (TBM) ۱۰۲
۵-۱-۲-۲- حفر تونل به کمک ماشین‌های بازویی (رودهدر، درام کاتر و غیره) ۱۰۳
۵-۱-۲-۳- حفر تونل به روش آتشکاری ۱۰۴
۵-۱-۲-۴- احداث تونل به روش کند و پوش ۱۰۵
۵-۱-۳- مقطع حفاری ۱۰۵
۵-۲- طراحی سیستم پیش تحکیم ۱۰۸

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

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

۵-۳-۷-۳- مدل‌سازی عددی ۱۵۵
۵-۳-۸- تغییر سیستم نگهداری ۱۵۶
۵-۳-۸-۱- تغییر سیستم نگهداری اولیه در محل حفاری‌نشده ۱۵۶
۵-۳-۸-۲- تغییر سیستم نگهداری اولیه در محل حفاری‌شده ۱۵۶
۵-۴- طراحی لاینینگ ۱۵۷
۵-۴-۱- فلسفه طراحی لاینینگ ۱۵۸
۵-۴-۲- طراحی ضخامت لاینینگ ۱۵۹
۵-۴-۳- اختلاط و مقاومت بتن لاینینگ ۱۵۹
۵-۴-۴- اقدامات متقابل در برابر ترک‌خوردگی در بتن لاینینگ ۱۶۰
۵-۵- طراحی کفبند ۱۶۱
۵-۵-۱- عملکرد کفبند ۱۶۱
عملکرد کفبند به قابلیت سرویس‌دهی و مکانیکی طبقه‌بندی می‌شود ۱۶۱
۵-۵-۲- شرایط تونل برای نصب کفبند ۱۶۲
۵-۵-۳ زمان‌بندی نصب کفبند ۱۶۳
۵-۵-۴-کف بند اولیه و موقت ۱۶۳
۵-۵-۵- شکل و ضخامت کفبند ۱۶۳
۵-۵-۶- طرح اختلاط و مقاومت بتن کفبند ۱۶۵
۵-۵-۷- نصب کفبند بلافاصله بعد از حفاری ۱۶۵
۵-۶- طراحی سیستم‌های عایق‌بندی و زهکش ۱۶۶
۵-۶-۱- مبانی ۱۶۶
۵-۶-۲- عایق‌بندی ۱۶۷
۵-۶-۳- زهکشی ۱۶۹
۵-۷- طراحی پرتال‌ها و زون‌های پرتالی ۱۷۱
۵-۷-۱- مبانی ۱۷۱
۵-۷-۲- (گالری) تونل (پرتال‌ها) ۱۷۲

۵-۷-۳- زون پرتالی ۱۷۷
۵-۸- طراحی سیستم روشنایی و تهویه ۱۷۹
۵-۸-۱- طراحی سیستم تهویه ۱۷۹
۵-۸-۱-۱- روش‌های تهویه ۱۸۰
۵-۸-۱-۱-۱- تهویه دهشی ۱۸۰
۵-۸-۱-۱-۲- تهویه مکشی ۱۸۰
۵-۸-۱-۱-۳- تهویه مختلط ۱۸۰
۵-۸-۲- طراحی سیستم روشنایی ۱۸۱
۵-۹- طراحی تونل در شرایط خاص ۱۸۲
۵-۹-۱- کلیات ۱۸۲
۵-۹-۲- زمین‌های خاص ۱۸۲
۵-۹-۳- شرایط خاص ۱۸۴
۵-۹-۳-۱- سازه‌های مجاور ۱۸۶
۵-۹-۳-۲- هندسه و ابعاد خاص ۱۸۷
۵-۹-۳-۲-۱- نقاط انشعاب، بزرگ شدن‌ها و مقاطع بزرگ ۱۸۸
۵-۹-۳-۳- بارهای خارجی ۱۹۰
۵-۹-۳-۳-۱- فشار زمین ۱۹۰
۵-۹-۳-۳-۲- فشار آب ۱۹۱
۵-۹-۳-۳-۳- زلزله ۱۹۱
۵-۹-۳-۳-۴- سایر بارهای خارجی ۱۹۲
۶- ساخت تونل ۱۹۵
۶-۱- تدارکات عمومی ۱۹۵
۶-۲- بررسی و نظارت در حین ساخت ۱۹۵
۶-۲-۱- تغییرات در روش‌های ساخت ۱۹۵
۶-۳- نقشه‌برداری ۱۹۵
۶-۳-۱- فاز اول نقشه‌برداری ۱۹۵

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

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

۶-۱۳-۲-۳- جابه جایی و نصب قالب ها ۲۳۴
۶-۱۳-۲-۴- جداسازی قالب ها ۲۳۵
۶-۱۳-۳- بتن لاینینگ ۲۳۵
۶-۱۳-۳-۱- شرح کلی ساخت بتن لاینینگ ۲۳۵
۶-۱۳-۳-۲- طرح اختلاط بتن ۲۳۶
۶-۱۳-۳-۳- الزامات اجرایی بتن ۲۳۶
۶-۱۳-۳-۳-۱- نیروی انسانی ۲۳۶
۶-۱۳-۳-۳-۲- آماده‌سازی محل بتن‌ریزی ۲۳۶
۶-۱۳-۳-۳-۳- ساخت و تولید بتن ۲۳۷
۶-۱۳-۳-۳-۴- انتقال بتن و بتن‌ریزی ۲۴۰
۶-۱۳-۳-۳-۵- عملیات بتن‌ریزی ۲۴۱
۶-۱۳-۳-۳-۶- تراکم بتن ۲۴۳
۶-۱۳-۳-۳-۷- عمل‌آوری بتن ۲۴۳
۶-۱۳-۳-۳-۸- تراکم بتن لاینینگ ۲۴۴
۶-۱۳-۳-۳-۹- نمونه‌گیری ۲۴۴
۶-۱۳-۳-۳-۱۰- بتن‌ریزی در هوای سرد ۲۴۶
۶-۱۳-۳-۴- بتن خود تراکم ۲۴۶
۶-۱۳-۳-۴-۱- مصالح ۲۴۶
۶-۱۳-۳-۴-۲- طرح اختلاط ۲۴۷
۶-۱۳-۳-۴-۳- اجرا ۲۴۸
۶-۱۳-۳-۵- مواد افزودنی ۲۴۹
۶-۱۳-۳-۵-۱- افزودنی‌های تسریع کننده (زودگیر کننده) ۲۵۰
۶-۱۳-۳-۵-۲- افزودنی‌های دیر گیر کننده ۲۵۱
۶-۱۳-۳-۵-۳- افزودنی‌های کاهنده آب (یا روان کننده) ۲۵۱
۶-۱۳-۳-۵-۴- افزودنی‌های کاهنده آب در حد بالا (یا فوق روان‌کننده) ۲۵۲
۶-۱۳-۳-۵-۵- افزودنی‌های حباب‌زا (هوا زا) ۲۵۲

- ۶-۱۳-۳-۵-۶- افزودنی‌های معدنی ۲۵۳

۶-۱۴- کفبند ۲۵۴

۶-۱۴-۱- زمان‌بندی و روش‌های ساخت کفبند ۲۵۴

۶-۱۵- عایق‌بندی و زهکشی (آب‌بند کردن سازه‌های زیرزمینی) ۲۵۶

۶-۱۵-۱- مصالح آب‌بندی ژئوممبران PVC ۲۵۶

۶-۱۵-۱-۱- لایه‌بندی سیستم آب‌بندی ژئوممبران PVC ۲۵۷

۶-۱۵-۱-۲- مصالح آب‌بند پاششی ۲۵۸

۶-۱۵-۱-۳- مواد افزودنی در بتن ۲۵۸

۶-۱۶- روسازی ۲۵۸

۶-۱۶- تأسیسات حین بهره‌برداری ۲۶۰

- ۶-۱۶-۱- روشنایی ۲۶۰
- ۶-۱۶-۲- نور روز ۲۶۰

۶-۱۶-۳- نور شب ۲۶۱

۶-۱۶-۴-روشنایی روز تونل‌های کوتاه ۲۶۲

۶-۱۶-۵-طراحی روشنایی تونل ۲۶۲

۶-۱۶-۶- تهویه ۲۶۴

۶-۱۶-۶-۱- لزوم اجرای تهویه ۲۶۴

۶-۱۶-۶-۲- تهویه تونل در حالت اضطراری و آتش‌سوزی ۲۶۵

۶-۱۶-۶-۳- روال مطالعات تهویه ۲۶۵

۶-۱۶-۶-۴- انتخاب روش تهویه ۲۶۷

- ۶-۱۶-۶-۴-۱- تهویه طولی ۲۶۷
- ۶-۱۶-۶-۴-۲- تهویه نیمه عرضی ۲۶۸
- ۶-۱۶-۶-۴-۳- تهویه عرضی (کاملا عرضی) ۲۶۸

۶-۱۷- ایمنی ۲۶۸

۶-۱۷-۱- مقررات ایمنی حمل، نگهداری و کاربرد مواد ناریه ۲۶۹

۶-۱۷-۲- عوامل آسیبرسان و بیماریزای محیط کار و بهداشت حرفهای ۲۷۰

۶-۱۷-۲-۱- صدا ۲۷۰
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 زیست‌محیطی ۲۷۲
۶-۱۹- روش‌های کمکی ۲۷۳
۶-۱۹-۱- کاربرد روش‌های کمکی ۲۷۴
۶-۱۹-۲ روش‌های کمکی برای ایمنی در ساخت تونل ۲۷۷
۶-۱۹-۲-۱ روش کمکی برای پایداری جبهه کار ۲۷۷
۶-۱۹-۲-۲ روش کمکی برای کنترل جریان آب ۲۸۲
۶-۱۹-۳- روش‌های کمکی برای محافظت از محیط اطراف ۲۸۵
۶-۱۹-۳-۱- روش‌های کمکی برای جلوگیری از نشست سطح زمین ۲۸۵
۶-۱۹-۴- روش‌های کمکی برای محافظت از سازه‌های مجاور ۲۸۹
۷- مدیریت ساخت تونل ۲۹۳
۷-۱- برنامه زمان‌بندی ۲۹۳
۷-۱-۱- مراحل برنامه‌ریزی ۲۹۵
۷-۱-۱-۱- گام اول: تحلیل پروژه، شناخت فعالیت‌ها و روابط آن‌ها و تهیه ساختار شکست کار (WBS) ۲۹۵
۷-۱-۱-۲- گام دوم: برآورد مدت، منابع موردنیاز و هزینه اجرای هریک از فعالیت‌های پروژه ۲۹۵
۷-۱-۱-۳- گام سوم: زمان‌بندی پروژه، برنامه‌ریزی منابع، بررسی رابطه زمان و هزینه و بررسی مشکلات احتمالی ۲۹۶
۷-۱-۲- کنترل پروژه ۲۹۶
۷-۱-۳- تجزیه‌وتحلیل، ارزشیابی و ذخیره سازی اطلاعات پروژه ۲۹۷
۷-۱-۴- تسطیح منابع ۲۹۷
۷-۱-۴-۱- نیروی انسانی ۲۹۷
۷-۱-۴-۲- ماشین‌آلات عمرانی ۲۹۸
۷-۱-۴-۲-۱- برنامه‌ریزی استفاده از ماشین‌آلات ۲۹۸
۷-۱-۴-۲-۲- کارایی ماشین‌آلات ۲۹۸

- ۷-۱-۴-۲-۳- برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری ۲۹۹
- ۷-۱-۴-۲-۴- تعیین ماشین‌آلات موردنیاز ۲۹۹

۷-۲- کنترل کیفیت ۲۹۹

۷-۲-۱- کلیات ۲۹۹

۷-۲-۲- شاتکریت ۳۰۰

۷-۲-۲-۱- مواد، مصالح و اختلاط شاتکریت ۳۰۰

۷-۲-۲-۲- طرح اختلاط ۳۰۰

۷-۲-۲-۳- ارزیابی قبل از ساخت ۳۰۱

۷-۲-۲-۴- ارزیابی و پذیرش در حین ساخت ۳۰۱

۷-۲-۲-۵- ضخامت و مقاومت شاتکریت ۳۰۲

۷-۲-۳- راکبولت ۳۰۳

۷-۲-۳-۱- اجزاء راکبولت ۳۰۳

۷-۲-۳-۲- دوغاب ریزی ۳۰۳

۷-۲-۳-۳- آرایش و اتصال راکبولت ۳۰۴

۷-۲-۳-۴- آزمایش بیرون کشیدگی راک بولت ۳۰۴

۷-۲-۴- قاب فولادی ۳۰۶

۷-۲-۴-۱- مواد قاب فولادی ۳۰۶

۷-۲-۴-۲- نصب قاب فولادی ۳۰۶

۷-۲-۵- لتیس گریدر (تیرهای مشبک) ۳۰۶

۷-۲-۶- لاینینگ و کفبند ۳۰۷

۷-۲-۶-۱- کنترل کیفیت مصالح بتن ۳۰۷

۷-۲-۶-۲- کنترل و بازرسی ۳۱۰

۷-۲-۶-۳- آزمایش میلگردها ۳۱۲

۷-۲-۶-۴- انبار کردن، نگهداری و کنترل فولاد ۳۱۲

۷-۲-۶-۵- پوشش بتنی روی میلگردها ۳۱۲

۷-۲-۶-۶- ارزیابی و پذیرش بتن ۳۱۴

- ۷-۲-۶-۶-۱- پذیرش بتن، تواتر نمونه‌برداری و آزمایش مقاومت ۳۱۴
- ۷-۲-۶-۶-۲- ضوابط پذیرش بتن- نمونه‌های عمل‌آمده در آزمایشگاه ۳۱۴
- ۷-۲-۶-۶-۳- ضوابط کنترل روش عمل آوردن و محافظت بتن ۳۱۴
- ۷-۲-۶-۶-۴- آزمون‌های آگاهی ۳۱۵

۷-۲-۶-۷- بررسی بتن‌های با مقاومت کم ۳۱۵

۷-۲-۶-۸- کنترل و بازرسی ۳۱۶

۷-۲-۶-۹- کنترل و بازرسی تجهیزات ساخت بتن ۳۱۸

۷-۲-۶-۱۰- ضخامت و ابعاد ۳۱۹

۷-۲-۷- عایق‌بندی ۳۲۰

۷-۲-۷-۱- ژئوممبرین ۳۲۰

۷-۲-۷-۲- ملاحظات کلی در ژئوسنتتیک‌ها ۳۲۰

- ۷-۲-۷-۲-۱- گواهینامه تایید محصول ۳۲۰
- ۷-۲-۷-۲-۲- نمونه‌برداری، آزمایش و تایید ۳۲۰
- ۷-۲-۷-۲-۳- حمل و انبار ۳۲۱
- ۷-۲-۷-۲-۴- درزها ۳۲۱

۷-۲-۸- زهکشی ۳۲۱

۷-۲-۸-۱- مصالح زهکشی عمیق ۳۲۱

۷-۲-۸-۲- مصالح دانه‌ای ۳۲۲

۷-۲-۸-۳- ژئوتکستایل ۳۲۲

۷-۲-۸-۴- لوله‌های زهکشی زیرزمینی ۳۲۳

۸- تیپ بندی و مقادیر ۳۲۷

۸-۱- مقدمه ۳۲۷

۹- منابع

۹-۱- منابع فارسی ۳۴۷

۹-۲- منابع انگلیسی ۳۴۸

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 مغزه گیری 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 قرار گیری 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 راکبولت تزریقی ۱۳۰

شکل ۵- ۸- نمونه‌ای از راکبولت 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 عایق بندی 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 زیگزاگ) 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 (راکبولت، مش و شاتکریت) ۲۰۱
شکل ۶- ۵- الف) اجرای تونل به روش طاق و پاطاق (پلکانی) ، ب) روش دیافراگم میانی ج) روش دریفت های جانبی، د) روش برش هسته مرکزی ۲۰۳
شکل ۶- ۶- حفر تونل با چال موازی و غیرموازی ۲۰۴
شکل ۶- ۷- بخش های مختلف مقطع تونل براساس حفاری و انفجار ۲۰۴
شکل ۶- ۸-زاویه انحراف چال ها 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 اندازه گیری 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- فلوچارت 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 دریفت 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-لتیس 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 موردنیاز 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 به‌منظور 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 موجودر 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 شاتکریت ۱۲۳
جدول ۵- ۸- مفاهیم عملکرد و اثرات راکبولت 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 راه‌حل‌ها ۱۷۲
جدول ۵- ۱۹- نوع و ویژگی‌های پرتال‌های 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 روش‌های حمل در تونل ۲۱۱
جدول ۶- ۵- نرخ انتشار گازهای سمی در هر کیلوگرم ماده منفجره ۲۱۳
جدول ۶- ۶- نمونه‌هایی از تقویت سیستم نگهداری‌ها، ماشین‌آلات و مواد برای تقویت ۲۱۴
جدول ۶- ۷- ویژگی‌های روش‌های شاتکریت ۲۱۵
جدول ۶- ۸- نمونه‌هایی از طرح اختلاط شاتکریت در تونل‌های جاده‌ای ۲۱۹
جدول ۶- ۹- مشکلات حین چال زنی برای راکبولت ها ۲۲۱
جدول ۶- ۱۰- نوع و تعداد نمونه‌هایی که باید از هر قسمت کار برای انواع بتن تهیه گردد. ۲۴۴
جدول ۶- ۱۱- مقدار مجاز آلاینده‌ها برای ۱۵ دقیقه تنفس برحسب طول تونل ۲۶۵
جدول ۶- ۱۲- جدول ضریب K برای حالت‌های 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- طبقه‌بندی روش‌های کمکی ۲۷۴

جدول ۷- ۱- کنترل اتصال راکبولت ۳۰۴
جدول ۷- ۲- حداکثر مقادیر مجاز برای مواد زیان‌آور در آب مصرفی بتن و روش‌های آزمایش ۳۰۹
جدول ۷- ۳- بازرسی و کنترل کیفیت مصالح بتن ۳۱۰
جدول ۷- ۴- کنترل و بازرسی مشخصه‌های بتن ۳۱۶
جدول ۷- ۵- کنترل و بازرسی تجهیزات ساخت بتن ۳۱۸

جدول ۸- ۱- مشخصات سیستم نگهداری تونل برای آزادراه تیپF1 ..... ۳۲۸
جدول ۸- ۲- مشخصات سیستم نگهداری برای آزادراه تیپF۲ ..... ۳۲۹
جدول ۸- ۳--مشخصات سیستم نگهداری برای آزادراه تیپF۳ ..... 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 تیپA2 ..... 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 تیپC2 ..... 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 تیپL1 ..... 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 موردتوجه 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 ازجمله 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 ازجمله 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 ساخت‌وساز تونل‌های کوهستانی است.

۱-۳- انواع تونل و روش های ساخت

تونل‌ها بر اساس روش ساخت به انواع زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- روش کند و پوش[1]
- روش چالزنی و انفجار
- روش تونل‌زنی مکانیزه (TBM)

[1] Cut and Cover

- روشهای نیمه مکانیزه

همچنین تونل‌ها بر اساس کاربری به موارد زیر تقسیم می‌شوند:

- تونل‌های ترافیکی مانند راه، راه‌آهن و پیاده‌رو
- تونل‌های انتقال آب
- تونل‌های نظامی
- تونل‌های معدنی

نوع دیگری از تقسیم‌بندی تونل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

- تونل‌های کوهستانی (راه و راه‌آهن)
- تونل‌های شهری
- تونل‌های انتقال آب

یکی از پارامترهای مهم در طراحی پوشش داخلی تونل‌ها، مشخصات هندسی تونل‌ها شامل شکل، اندازه مقطع و شیب تونل می‌باشد. از طرفی شکل مقطع و ابعاد تونل تابع هدف احداث تونل، روش حفر و سیستم نگهداری دائمی آن است. در مواردی که استفاده از شکل‌های مختلف امکان‌پذیر باشد، باید شکلی را انتخاب کرد که هزینه‌های کلی احداث تونل به حداقل برسد. سطح مقطع در تونل‌ها می‌تواند به اشکال زیر باشد:

- دایره‌ای
- چهارگوش
- نعل اسبی
- D شکل

۱-٤- تعاریف

- **ASTM**[1] : سازمانی فنی که برای توسعه استانداردهای خصوصیات و رفتار مصالح، محصولات، سیستم‌ها و خدمات و ارتقاء علوم وابسته به آن‌ها شکل‌گرفته است.
- **تحویل‌شدنی:** تحویل‌شدنی محصول، نتیجه یا قابلیتی منحصربه‌فرد و قابل ارزیابی است که وجود آن برای تکمیل یک فرآیند، فاز یا پروژه الزامی است. معمولاً تحویل‌شدنی در مفهومی خاص‌تر به معنای تحویل‌شدنی‌های کلی کار استفاده می‌شود، یعنی تحویل‌شدنی‌هایی که باید به تأیید کارفرما برسند. تحویل‌شدنی به محصول‌هایی میانی گفته می‌شود که دو شرط داشته باشند:

۱. منحصربه‌فرد باشند.

[1] American Society of Testing and Materials

۲. قابل ارزیابی باشند.

- **ساختار**[1]: هر آنچه که با توجه به یک الگوی ویژه و مشخص سازمانی آرایش یافته باشد.
- **کار**[2]: تلاشی پیوسته به شکل فیزیکی یا ذهنی به‌منظور غلبه بر مشکلات و رسیدن به هدف یا نتیجه.
- **فعالیت (کار):** کوچک‌ترین جزء عملیاتی تشکیل‌دهنده یک پروژه را گویند. به‌عبارتی‌دیگر جزء مستقل و برنامه‌ریزی‌شده کارهای انجام شونده در طول دوره پروژه، فعالیت می‌باشد. به‌عنوان‌مثال جوش‌کاری، اجرای آسفالت و اجرای فونداسیون در یک پروژه سازه‌ای.
- **بسته کاری:** کار مشخص‌شده در پایین‌ترین سطح ساختار شکست کار به‌طوری‌که هزینه و مدت‌زمان آن قابل تخمین و مدیریت باشد.
- **مدت فعالیت:** مدت‌زمان انجام یک فعالیت در پروژه را مدت فعالیت گویند. این زمان می‌تواند کم یا زیاد باشد اما نمی‌تواند صفر یا بی‌نهایت باشد.
- **تحویل‌شدنی اصلی:** معمولاً اجزای فیزیکی کلان زیر پروژه و به عبارتی موضوع‌های اصلی و کلی عملیات در زیر پروژه می‌باشد که در سطح پایین‌تر توسعه داده‌شده است.
- **تحویل‌شدنی کلی:** تحویل‌شدنی‌های کلی معمولاً بر اساس نوع، ویژگی و اجزای مختلف تحویل‌شدنی‌های اصلی شکسته می‌شوند.
- **تحویل‌شدنی فرعی:** آن عناصری از ساختار شکست که به اجزا و قطعات دیگری تفکیک نشده‌اند، تحویل‌شدنی فرعی نامیده می‌شود. مبنای تفکیک کلی هر بخش از ساختار شکست‌ها، قابلیت تحویل، کارکرد مستقل، موضوع، زمان و هزینه می‌باشد. تحویل‌شدنی فرعی معمولاً بر اساس نوع مصالح و یا روش اجرای مختلف تحویل‌شدنی‌های تفصیلی شکسته می‌شوند که برای ساخت تحویل‌شدنی 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، دیسیپلین عملکردی، یا یک فرد محول گردد.
- پاطاق: نقطه تلاقی دیوار و سقف در تونل پاطاق نامیده می‌شود. املای پاطاق و طاق در بالا متفاوت هست.
- **ابزار دقیق:** ابزاری که جهت اندازه‌گیری جابجایی‌ها و تغییر شکل استفاده می‌شود.
- **آتشکاری:** انفجار یک فعل‌وانفعال گرمازاست که به‌صورت آنی و درزمانی 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 به‌وسیله ماده منفجره می‌شود، آتشکاری گفته می‌شود.
- **چال زنی و آتشکاری:** روشی برای خرد کردن سنگ که توسط حفر چال‌هایی با قطر کوچک در الگوی طراحی‌شده انجام می‌گیرد. در ابتدا چال‌ها با مواد منفجره پرشده و پس از انسداد، انفجار انجام می‌گیرد.

---

[1] Structure
[2] Work

- **آتشکاری کنترل‌شده:** 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 به‌عنوان خرج اصلی داخل چال‌ها قرار داده می‌شوند، باید با محرکی قوی‌تر از شعله منفجر گردند، این کار به عهده چاشنی‌ها است.
- **چال‌های انفجاری:** چال‌هایی که روی جبهه کار حفر و به وسیله ماده منفجره پر شده و انفجار در آن صورت می‌گیرد.
- **خرج ویژه:** بیان‌گر نسبت مقدار حجمی که یک ماده منفجره می‌تواند خرد کند و مقدار ماده منفجره مصرفی (خرج مصرفی برای واحد سنگ درجا).
- **خرج‌گذاری چال:** به مجموعه عملیات قراردادن ماده منفجره و پر کردن فضای خالی با موادی مانند شن، خاک یا گِل خرج‌گذاری می‌گویند. روش خرج‌گذاری تابع قطر چال، نوع ماده منفجره و ابعاد منطقه مورد عمل است.
- **مدار انفجار:** به مجموعه سیم‌های رابط چاشنی‌های برقی دارای مقاومت الکتریکی متصل به یک منبع برق که برای آتشکاری به کار می‌روند، مدار انفجار گفته می‌شود.
- **پیشروی:** طول حفاری‌شده در زمان مشخص (یک راند انفجار، یک شیف یا یک روز) هنگام حفر تونل
- **تزریق تحکیمی:** تزریق دوغاب سیمان از طریق چال‌های حفاری جهت پر کردن درزه‌ها، شکستگی‌ها و غیره به‌منظور 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 به‌وسیله 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 به‌صورت مداوم جایگزین شود. به جریان انداختن هوا در قسمت‌های 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 به‌صورت پیوسته با حفاری تونل (زمین) تغییر می‌کند.
- **جت فن:** بادبزن سقفی (یا گاها دیواری) که به‌منظور تهویه، علی‌الخصوص تهویه طولی مورداستفاده قرار می‌گیرد.
- **راکبولت (پیچ سنگ):** راکبولت درواقع همان بولت‌ها و میلگردهای مخصوص اتصال لایه‌های سنگی به هم و استحکام توده‌سنگ هستند.
- **رفتارنگاری:** به مشاهده و اندازه‌گیری مکرر یا پیوسته جابجایی‌ها، رفتارنگاری گویند. سیستم‌های سنجش رفتار سنگ شامل اندازه‌گیری هم‌گرایی، اندازه‌گیری تغییر تنش، انبساط‌سنج چندنقطه‌ای و غیره می‌باشند.
- **زمان خودایستایی:** مدت‌زمانی که تونل بدون نصب سیستم نگهداری اولیه پایدار می‌ماند.

- **ژئوتکستایل:** منسوجاتی نفوذپذیر هستند که توانایی جداسازی، فیلتراسیون، تقویت، حفاظت یا تخلیه را دارند. در تونل بیشتر به‌عنوان محافظ ژئوممبرین استفاده می‌شوند.
- **ژئوممبرین:** گونه‌ای از مصالح ژئوسنتتیک است که برای عایق‌بندی از آن استفاده می‌شود.
- **سنگ بستر:** سنگی که به‌عنوان سنگ اصلی در زیر سنگ‌های هوازده 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 توده‌سنگ شامل شاتکریت، راکبولت، قاب فولادی و غیره است.
- **سیستم نگهداری ثانویه (لاینینگ):** پوششی از جنس بتن، بتن مسلح یا بتن پاشیده است که به‌منظور پایداری یا مقاصد دیگر (مثلاً در تونل‌های انتقال آب به دلیل کاهش افت) اجرا می‌شود.
- **شاتکریت (بتن‌پاششی):** عمل پاشیدن ترکیب سیمان، آب و سنگدانه با سرعت زیاد بر سطح سنگ یا خاک را بتن‌پاششی یا شاتکریت گویند.
- **لق‌گیری:** عملیاتی که پس از هر بار آتشکاری به‌صورت 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 قابل‌شناسایی است. ناپیوستگی می‌تواند شامل لایه‌بندی، شیستوزیته و درز باشد.
- **نرخ پیشروی:** این شاخص به‌صورت میزان پیشروی تونل در مدت معین تعریف می‌شود.
- **روباره:** ارتفاع مصالح بالای تونل تا سطح زمین روباره نامیده می‌شود.
- **وزن روباره:** نیرویی که براثر 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

۲-۱- مقدمه

انجمن جهانی راه[1] 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	۲۰-۵ برای تأسیسات/تجهیزات
		۱۰۰-۸۰ 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 پیش‌بینی‌شده اولیه به دنبال خواهد داشت، مطالعات جامع و دقیق ضرورت پیدا می‌کند، برای این مهم در جدول ۲- ۲ مراحل اصلی یک برنامه اکتشافی پروژه‌های تونل سازی ارائه‌شده 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 طرح‌های مهم قبلی مرتبط با محل پروژه
۲- مطالعه عکس‌های هوایی	۱- عکس‌های هوایی دید کلی از منطقه پروژه را ارائه می‌دهند. ۲- خصوصیات ژئومورفولوژیکی شناسایی می‌شود. ۳- کسب آگاهی در خصوص توپوگرافی، آرایش آبراهه‌ها، پوشش گیاهی، کاربرد زمین و کاوش منابع بالقوه مصالح ساختمانی ۴- عوارض دیگر مانند زمین‌لغزش، گسل‌های اصلی، تاقدیس، ناودیس و ساختارهای گنبدی شناسایی می‌شوند. ۵- عکس‌برداری مادون‌قرمز قادر به شناسایی مسیر آب و چشمه‌ها می‌باشد. ۶- جست‌وجوی راداری[1] می‌تواند در شناسایی جنبه‌هایی از سطح زمین که به دلیل شرایط جوی و آب‌وهوایی امکان بررسی با سایر روش‌ها میسر نشده است، کمک کند.
۳- بازدید میدانی اولیه	۱- نقشه‌های زمین‌شناسی موجود از منطقه مطالعه می‌شوند. ۲- داده‌های به‌دست‌آمده از متون و عکس‌های هوایی در این مرحله مدنظر قرار می‌گیرد. ۳- سازندها و ویژگی‌های ساختاری آن‌ها، انواع سنگ‌ها و جنبه‌های ژئومورفولوژیکی و هوازدگی بررسی کلی می‌شوند.
۴-مطالعات و بررسی‌های ژئوفیزیکی	۱- این بررسی‌ها علیرغم دقت پایین مزایایی ازجمله غیر مخرب بودن، سرعت نسبی و به‌طورکلی هزینه تمام‌شده پایینی دارند. ۲- با این روش محل ناهنجاری‌ها که مستلزم شناسایی و بررسی‌های تفضیلی با روش‌های مستقیم می‌باشد مشخص می‌شود. ۳- روش‌های لرزه‌ای انعکاسی و انکساری، الکتریکی مقاومت سنجی، ثقلی و مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

[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[1] ، 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 مورداستفاده 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 تفضیلی را فراهم کند. ۴- حفاری گمانه در محل احداث تونل‌های با روباره زیاد می‌تواند اطلاعات جامعی از جنس‌سنگ، شرایط زمین‌شناسی و سایر داده‌های مورد نیاز جهت ترسیم مقاطع زمین شناسی 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 موردنیاز باید به روشنی مشخص شود اما عموما 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) جمع‌آوری اطلاعات در مورد سطوح تنش برجا و) ارزیابی مشخصات مقاومتی سنگ در ارتباط با آتشکاری با حفاری مکانیزه ز) کسب اطلاعات به‌منظور ارزیابی سیستم نگهداری احتمالی ۷- مهم‌ترین روش برای مطالعه محل ساختگاه تونل، تهیه نمودارهای (لاگ های) صحرایی از اطلاعات زمین‌شناسی است. اطلاعاتی که همراه با نمودارها یا لاگ های حفاری بایستی ارائه شوند عبارتند از: الف) داده‌های مربوط به زمین‌شناسی و جنس سنگ‌ها ب) اطلاعات مربوط به هرگونه آزمایش صحرائی انجام‌شده ج) جزئیات گرافیکی مغزه‌ها مانند لیتولوژی (لایه‌بندی یا خواص ماکروسکوپی سنگ‌ها) و ساختار د) جزئیات مربوط به طول مغزه بازیابی شده برای هر گمانه ه) نحوه اجرای حفاری و عملکرد کلی در عمق‌های مختلف و) کنترل میدانی آب برگشتی از گمانه ز) تعیین محل‌هایی که گل حفاری (سیال حفاری) و مغزه افت داشته یا بازیابی نشده است. ح) شرایط آب زیرزمینی ط) هرگونه لوازم خاص مرتبط با لوله‌گذاری جداری[1] یا سیمان‌کاری[2] ی) توضیحات و جزئیات مربوط به محل مغزه در جعبه‌ها
۶- حفریات و تونل‌های آزمایشی یا پیشگام	۱- با حفریات و تونل‌های آزمایشی امکان بازرسی، رؤیت شرایط سنگ و هرگونه آزمایش در مناطقی که تونل می‌خواهد حفر شود امکان پذیر می‌شود. ۲- پیمانکاران با وجود این حفریات یا تونل‌های آزمایشی، تصویر ملموسی از شرایط مورد انتظار تونل‌سازی به دست می‌آورند.
۷- آزمایش‌های برجا	۱- آزمایش‌های مکانیک سنگی موارد زیر را میسر می‌سازد:

[1] Casing
[2] Cementation

عناصر اصلی	توضیحات
	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 [1] 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 [2] و دیگر روش‌های ابزاربندی
۸- عملیات آزمایشگاهی	۱- تعیین مقادیر مقاومتی سنگ و تغییر شکل آن در شرایط تنش یک و سه محوره برای موقعیت‌های قبل و بعد از گسیختگی [3] 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

[1] flat jack
[2] load cell
[3] failure

عناصر اصلی	توضیحات
۹- آزمایش مدل	۱- مدل‌های بزرگ‌مقیاس در بعضی مواقع جهت ارزیابی و بررسی وضعیت‌های خاص در مرحله مطالعات تفصیلی مورداستفاده قرار می‌گیرد. ۲- مدل‌های کوچک‌مقیاس که یک ابزار و روش نسبتاً کم‌هزینه هستند برای آزمایش جنبه‌های خاصی از طرح مفید هستند. ۳- مدل‌ها در ایجاد یک تصویر واضح از وضعیت کلی زمین‌شناسی در طول مسیر تونل مفید هستند. ۴- یک طرح منطقی بر مبنای اطلاعات حاصل از مراحل قبل می‌توان ارائه کرد: الف) ارزیابی مسیر تونل ب) بررسی و ارزیابی روش حفاری و خرد کردن سنگ ج) ارزیابی سیستم نگهداری تونل و جنبه‌های کنترل زمین د) بررسی شرایط خاص مانند زهکشی، بهسازی زمین، مخاطرات ناشی از گازها و ... ۵- روش‌های مدل‌سازی خاصی جهت کمک در ارزیابی طرح‌ها وجود دارند که عبارت‌اند از: الف) مدل‌های تجربی ب) مدل‌های فیزیکی ج) مدل‌های ریاضی د) مدل‌های عددی ۶- مدل‌های تجربی که بر اساس اندازه‌گیری یا تجارت قبلی حاصل شده‌اند، ابزار مفیدی هستند که جواب را به سؤال مرتبط می‌سازند. ۷- مدل‌های فیزیکی چه مدل‌های کامل یا مدل‌های خلاصه‌شده می‌توانند جهت بررسی جنبه‌های مختلف طرح موردنظر به کار گرفته شوند. چنین مدل‌هایی اغلب نتایج کیفی به دست می‌دهند. ۸- مدل‌های ریاضی بر مبنای فرضیاتی ساخته می‌شوند که طراح بایستی با این فرضیات آشنا باشد. چنین مدل‌هایی می‌توانند جهت بررسی دامنه گسترده‌ای از شرایط محتمل مورداستفاده قرار گیرند، ولی به‌طورکلی محدودیت‌هایی برحسب دقت کلی نتایجشان دارند.

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 تفضیلی 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[1] پس از احداث و اجرا	۱- رفتار سنجی باهدف کنترل شرایط موجود و کارایی طراحی‌ها

انتخاب مسیر، طراحی، ساخت، نگهداری و مدیریت تونل‌ها به‌شدت 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 به‌منظور 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 مشکل‌ساز	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] Monitorting

شرایط زمین		پدیده مشکل‌ساز	اطلاعات موردنیاز جهت حل مشکل
زمین‌های مچاله شونده		اعمال فشار زیاد بر روی سیستم نگهداری اولیه و لاینینگ، کاهش فضای داخلی تونل به دلیل جمع شدگی دیواره‌ها	مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، آب
زمین مستعد انفجار سنگ		ریزش جبهه‌کار	مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، شکنندگی، انتشار امواج صوتی
زمین با گرمای زمین‌گرمایی، چشمه‌های 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 پیش‌بینی می‌شود		افزایش فشار زمین، فشار نامتقارن زمین، ریزش جبهه‌کار، خشک شدن جریان آب سطحی و آلودگی آب درنتیجه ورود تصادفی آب زیرزمینی و ضعیف‌شدن زمین	سطح آب زیرزمینی، حجم و فشار جریان آب زیرزمینی
شرایط خاص	حالتی که تونل در محیط شهری احداث می‌شود	نشست سطحی زمین، جابجایی و تغییر شکل سازه‌های مجاور، پایین آمدن سطح آب زیرزمینی	مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، نفوذپذیری، موقعیت تونل، موقعیت مکانی سازه‌های مجاور
	روباره کم	نشست سطحی زمین، فشار نامتقارن زمین	شرایط توپوگرافی مانند رانش زمین، مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، نفوذپذیری، شرایط موقعیت تونل
	روباره زیاد	جریان آب‌های زیرزمینی با فشار بالا، افزایش فشار زمین	مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، نفوذپذیری، فشار آب، سطح آب زیرزمینی
	مواردی که تونل زیر سطح آب زیرزمینی واقع‌شده است	ورود حجم بسیار زیاد از آب‌های زیرزمینی به تونل	مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، مقدار ورودی آب‌های زیرزمینی، نفوذپذیری و توپوگرافی
مجاورت با ساخت‌وساز		فشار نامتقارن زمین، تغییر شکل سازه‌های مجاور، ترک و تغییر شکل لاینینگ و کفبند	مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، شرایط و موقعیت سازه‌های مجاور
هندسه و ابعاد اشکال خاص	محل انشعاب، بزرگ شدن سطح مقطع تونل در این نقاط	ریزش سینه‌کار، تغییر شکل	مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل
عملکرد نیروهای خارجی بعد از ساخت تونل	فشار زمین، فشار آب و زمین‌لرزه	ترک و تغییر شکل لاینینگ و کفبند	روباره، زمین‌شناسی و توپوگرافی محل تونل، مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل، سطح آب زیرزمینی و شرایط گسل‌های فعال
پرتال‌ها		زمین‌لغزش، شکست شیب، فشار نامتقارن زمین، نشست سطحی زمین	شرایط توپوگرافی مانند رانش زمین، مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل
شفت و شفت مایل		جریان آب زیرزمینی، ورود آب سطحی و خاک از طریق پرتال	مقدار ورودی آب‌های زیرزمینی، نفوذپذیری و مشخصه‌های مقاومت و تغییر شکل

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 داده‌شده‌اند.

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 ازجمله وضعیت تهویه حین اجرا، شرایط اضطراری و راه‌های کمکی، دسترسی به محل دپوی مصالح و غیره نیز توجه داشت.

پرتال تونل‌ها معمولا به دلیل واقع‌شدن 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 به‌موازات 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 واقع‌شده باشند، تأثیر متقابل آن‌ها را نمی‌توان روی‌هم نادیده گرفت.

۲-۲-۱-۲- پروفیل

شیب حداقل ۰.۲٪ کمک می‌کند که آب‌های سطحی به‌راحتی در طول تونل جریان پیداکرده و به کانال‌های زهکشی منتقل گردند. با این‌حال زمانی که حجم آب کم باشد، شیب ۰.۳٪ و اگر حجم ورودی آب زیاد باشد، شیب ۰.۵٪ ضروری است. ازآنجایی‌که 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.

۲-۲-۱-٤- امکانات کمکی تونل‌ها

در تونل‌های جاده‌ای، بسته به میزان ترافیک و طول تونل، امکانات کمکی مانند تهویه، روشنایی و امکانات اضطراری تعبیه می‌شود. ازاین‌رو، 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- برنامه‌ریزی احداث تونل

طرح یک تونل باید متناسب با هدفی که برای آن در نظر گرفته‌شده است صورت پذیرد و تحقیق در مورد شرایط زمین، شرایط ساختگاه، ضرورت و ترتیب دریف های کاری[1] برای حفظ ایمنی در مرحله ساخت و به حداقل رساندن تأثیر بر محیط اطراف ضروری است. بهره‌وری اقتصادی نه‌تنها در طول ساخت بلکه پس از تکمیل تونل نیز باید در نظر گرفته شود.

[1] working drifts

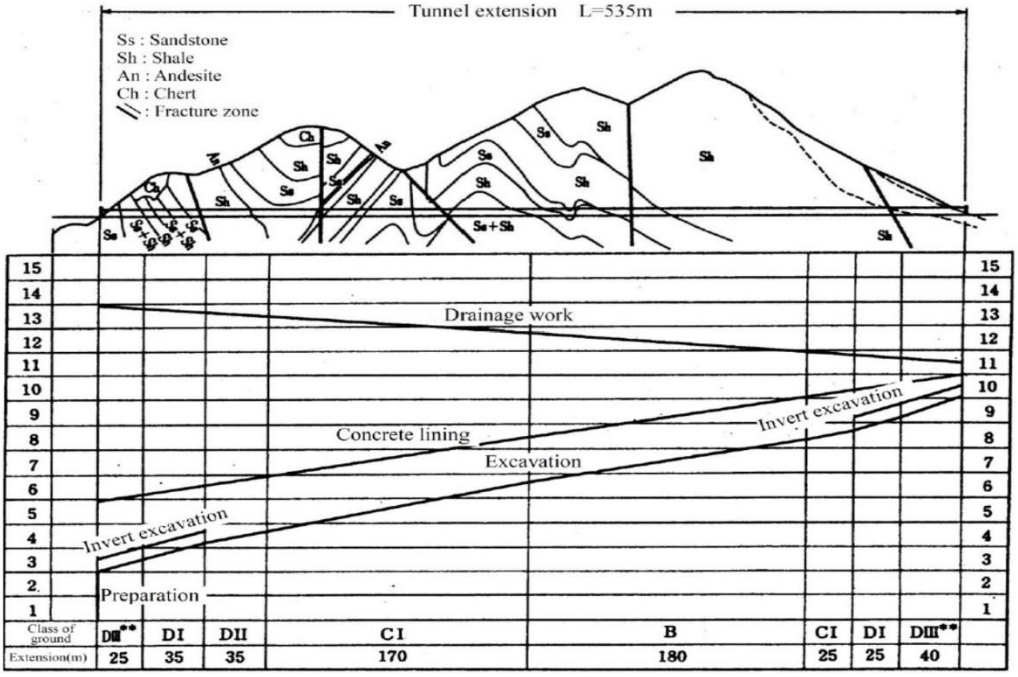
درک کامل وضعیت ساختگاه ازجمله توپوگرافی، زمین‌شناسی و آب‌های زیرزمینی از نتایج مطالعات اولیه ممکن است بسیار دشوار باشد و حتی احتمال دارد طرح اولیه باتوجه به تغییر شرایط زمین در مرحله حفر تونل تغییر کند؛ بنابراین نه‌تنها در طول برنامه‌ریزی بلکه در حین ساخت و نگهداری بررسی دقیق‌تر و مستمر لازم است.

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 [1] و غیره، روش‌های ساخت مناسب تعیین و بر اساس آن برنامه زمان‌بندی ارائه شود.

به‌طورکلی، مراحل یک پروژه تونل‌سازی با کنارهم قراردادن دوره‌های زمانی آماده‌سازی، حفاری ، کارهای تکمیلی و برچیدن تعیین می‌شود. شکل ۲- ۱نمونه‌ای از مراحل ساخت را نشان می‌دهد.



شکل ۲- ۱- نمونه‌ای از برنامه‌ریزی پیشرفت ساخت

۲-۲-۲-۲- راه‌های دسترسی، تجهیز و محل‌های دپوی 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 جاده‌های موجود به‌عنوان مسیرهای حمل‌ونقل استفاده می‌شود باید با مدیریت راه، پلیس و ساکنان کنار جاده توافق صورت گیرد. راهکارهای تکمیلی مختلفی در صورت نیاز باید موردمطالعه و اجرا قرار گیرد که ازجمله آن می‌توان به روسازی جدید، تعریض جاده‌ها، احداث مسیرهای انشعاب و دسترسی، تأمین گذرگاه‌ها و جاده‌های مدارس اشاره کرد.

اگر در مجاورت محل انباشت باطله جاده‌ای موجود یا در دسترس نباشد، ساخت یک جاده جدید برنامه‌ریزی می‌شود. برای این منظور باید با توجه به کاربرد راه، حجم ترافیک تخمینی، انواع وسایل نقلیه مورداستفاده، شیب عرضی و طولی راه [1] مشخص شود.

در برنامه‌ریزی 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، ساختمان‌های مختلف (ساختمان اداری، اقامتگاه‌ها، 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 پیش‌بینی محل انباشت باطله، باید میزان باطله تولیدی، مسیر حمل‌ونقل، کارهای کمکی موردنیاز و اثرات آن بر محیط اطراف در نظر گرفته شود.

در برنامه‌ریزی تجهیزات بیرونی تونل و محل انباشت باطله، محل دفن پس از اتمام ساخت نیز باید بر اساس طرح‌های پیشگیری از مشکلات آتی، طرحی‌های بهره‌برداری از محل و غیره مورد مطالعه قرار گیرد.

۲-۲-۲-۳- حفاظت از محیط‌زیست

در برنامه‌ریزی برای حفظ محیط‌زیست، عوامل تأثیرگذار بر محیط اطراف تعیین و اقدامات و کنترل‌های لازم در صورت نیاز در نظر گرفته می‌شود.

با رعایت تمامی قوانین و مقررات مربوطه، تمامی تلاش‌ها باید در جهت کاهش صدا، لرزش، لرزش هوا با فرکانس پایین، کاهش و کمبود آب، نشست سطح زمین، تغییر شکل سازه‌های موجود، تخلیه آب آلوده، مشکلات ترافیک به دلیل حمل‌ونقل 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 راه‌حل‌های فوق وجود ندارد باید استفاده از روش‌های جایگزین ازجمله جابه‌جایی تاسیسات موردبررسی قرار گرفته و امکان سنجی شود.

---

[1] horizontal and longitudinal alignment

۲-۳- بررسی‌ها

۲-۳-۱- بررسی شرایط زمین

۲-۳-۱-۱- 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 موردمطالعه قرار می‌گیرند.

ازآنجایی‌که ویژگی‌های زمین، آب‌های زیرزمینی و محیط اطراف ارتباط نزدیکی دارند، اطلاعات جمع‌آوری‌شده 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 برساخت 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[1] 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 قابل‌توجه 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 جزییات - 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[2]	- مشاهده سطح و زمین و پایش سیستم تحکیم و نگهداری - گمانه پیشرو [3] - اثرات محیطی اطراف - سازمان‌دهی نتایج آزمایشات و شرایط زمین‌شناسی	- داخل تونل و محدوده متاثر از ساخت
تعمیر، نگهداری و مدیریت	- جبران خسارت - تعمیر و نگهداری و بازسازی	- اثرات محیطی اطراف	- داخل تونل و محدوده متاثر از ساخت

[1] open sections
[2] compensation
[3] 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[1] 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[2].

---

[1] comparatively examing routes
[2] tunnel driving

۶- پیش‌بینی اثرات ساخت تونل بر محیط اطراف ازجمله کاهش آب، فرونشست زمین و غیره.

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

۱- شرایط خاص زمین

الف) زمینی که زمین‌لغزش یا لغزش شیروانی پیش‌بینی می‌شود: پرتال‌ها یا تونل‌هایی که دارای روباره کمی می‌باشند باید ازنظر احتمال زمین‌لغزش یا لغزش شیروانی و پایداری تونل ارزیابی شوند. همچنین برای ضرورت و نحوه انجام اقدامات متقابل[1] باید مطالعات کاملی صورت گیرد. هنگامی‌که پتانسیل زمین‌لغزش 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 ویژگی‌های توپوگرافی خاصی هستند، بنابراین مطالعه عکس‌های هوایی، نقشه‌های دقیق توپوگرافی و کار میدانی در مرحله انتخاب مسیر مؤثر است. همچنین شناسایی تاریخچه زمین‌لغزش و یا حرکت‌های گذشته از مصاحبه با ساکنان محلی، سازمان‌های مرتبط و مطالعه اسناد نیز ممکن است مفید واقع شود.

۲- نواحی شکسته گسله یا چین‌خورده[2]: گسل با ناحیه شکستگی گسترده می‌تواند با بررسی در طول مسیر تشخیص داده شود. ویژگی‌های یک ناحیه شکستگی[3] را می‌توان با اکتشافات لرزه‌ای، بررسی گمانه‌ها و سایر روش‌ها تخمین زد. ممکن است مقدار زیادی آب زیرزمینی در یک ناحیه شکستگی گسلی[4] وجود داشته باشد؛ بنابراین تعیین مشخصات و توزیع[5] این نواحی مهم است.

اگر علاوه بر فشار روباره، نیروهای تکتونیکی قابل‌توجهی بر محور چین وارد شوند بررسی احتمال مچاله‌شوندگی زمین که در ادامه توضیح داده می‌شود ممکن است ضروری باشد.

۳- زمین تحکیم نشده[6]: خاک ماسه‌ای ضعیف یا تحکیم نشده، ماسه شن‌دار[7]، خاک چسبنده[8] و همچنین مواد آتش‌فشانی تحکیم نشده مانند خاکستر آتش‌فشان یا سنگ‌ریزه و سنگ پومیس[9] را زمین تحکیم نشده می‌نامند. هنگامی‌که چنین زمینی با آب تماس پیدا کند، در صورت کم بودن عمق ممکن است شسته شدن، ریزش یا نشست زمین رخ دهد؛ به‌خصوص در مورد ماسه‌های ریز با اندازه ذره همگن، آزمایش آزمایشگاهی که شاخص جریان زمین[10] 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[1]: زمین‌های جمع شونده به دو دسته تقسیم می‌شود، زمین مچاله شونده کلی و زمین آماسی[2]. 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[3] 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 به‌شدت دگرسان شده پیروکلاستیک و انواع میکاها نیز به‌طورکلی انتظار می‌رود که خواص آماسی از خود نشان دهند.

۵- زمینی که انفجار سنگ[4] پیش‌بینی می‌شود: انفجار سنگ، شکستن[5] یا پخش شدن[6] 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 [7]، چشمه‌های آب گرم، گازهای سمی و غیره: این نوع زمین شامل مناطق دگرسانی آب‌گرمایی[8] ، نواحی شکستگی[9] ، سنگ نفوذی[10] و لایه‌های حاوی نفت یا زغال‌سنگ است. هنگام برنامه‌ریزی یک تونل باید ساختار زمین‌شناسی انباشته‌شده[11] 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 تجزیه‌وتحلیل 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[12] و زمین تحکیم نشده انجام شود. از اکتشافات ژئوفیزیکی مانند اکتشافات لرزه‌ای یا الکتریکی نیز باتوجه 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، لایه‌های حاوی نفت یا زغال‌سنگ، مناطق دگرسانی آب گرمایی و ذخایر گلی دریایی[1] وجود دارند. هنگام برنامه‌ریزی عبور تونل از این مناطق، بررسی‌های زمین‌شناسی با دقت انجام شود و در صورت لزوم، تجزیه‌وتحلیل بر روی سنگ‌های معدنی و فلزات سنگین انجام تا توزیع زمین‌های حاوی چنین موادی شناسایی شود.

ب) مواردی که در طراحی و ساخت باید موردتوجه قرار گیرد:

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

۲- روباره کم: در زمین با روباره کم، ایجاد قوس تونل مشکل و فرونشست سطحی به‌آسانی رخ می‌دهد. به‌ویژه در صورت وجود سازه‌هایی در سطح زمین، اطلاعاتی برای تخمین مقدار و محدوده نشست باید استخراج شود. اگر نشست سطحی نیاز است که مهار شود، اقدامات متقابل باید انتخاب‌شده و طرح مناسب موردتحقیق و بررسی قرار گیرد. ازآنجایی‌که خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل زمین برای پیش‌بینی نشست سطحی لازم است، آزمایش‌های نفوذ استاندارد و برجا با استفاده از گمانه یا آزمایش‌های آزمایشگاهی باید انجام شود.

۳- روباره خیلی زیاد: زمین با روباره خیلی زیاد مستعد انفجار سنگ، مچاله شوندگی و جریان آب تحت‌فشار زیاد است. در چنین سایتی، انجام آزمایش مناسب برجا با استفاده از حفاری سطحی[2] ، بررسی موج الاستیک، اکتشافات الکتریکی[3] ، بررسی گمانه‌ها و غیره دشوار است.

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

۴- هنگام عبور تونل از زیرآب: هنگامی‌که تونلی از زیرآب عبور می‌کند (به‌عنوان‌مثال کف دریا)، این خطر وجود دارد که تونل به دلیل ورود حجم زیاد آب، دچار آب‌گرفتگی شود. بنابراین، تحقیقات بنیادی در مورد آب‌های زیرزمینی ضروری است. روش اصلی برای اکتشاف ژئوفیزیکی بستر دریا شامل مشاهده کف و نمونه‌برداری یا اکتشاف صوتی[4] 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) ساخته‌شده است. در این تونل‌ها نیز باید به‌مانند تونل‌های با مقطع معمولی شرایط زمین و شرایط محیطی موردبررسی قرار گیرند. انجام مطالعات برای به دست آوردن داده‌ها جهت پیش‌بینی اقدامات متقابل مورد نیاز مانند حفر گمانه‌ها جلوتر از جبهه‌کار 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[1] : هنگام طراحی و ساخت پرتال‌ها باید دقت زیادی شود و ازآنجاکه شرایط پرتال‌ها هرگز یکسان نیست لازم است تا هرکدام به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شود؛ به‌ویژه در مورد پرتال‌هایی که زمین‌لغزش یا لغزش شیروانی پیش‌بینی می‌شود بررسی متناظر که معمولاً به‌صورت گمانه افقی یا عمودی می‌باشد باید بر اساس مشکلات پیش‌بینی‌شده 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، ازجمله آزمایش‌های برجا و بررسی آب‌های زیرزمینی برای انتخاب مناسب‌ترین مکان چاه می‌باشد.

۲-۳-۱-٤- 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 زمین‌شناسی پیش‌بینی‌نشده یا مشکلاتی غیرمنتظره‌ای برخورد می‌شود. در این صورت حتی باید در مرحله ساخت تونل نیز تحقیقات زمین‌شناسی لازم انجام شود.

۱- بررسی‌ها از خارج از تونل:

الف) بررسی زمین‌شناسی سطحی: بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی حاصل از مشاهدات سطح، زمین‌شناسی پیش روی تونل را می‌توان پیش‌بینی کرد.

ب) بررسی‌های گمانه‌ای: هنگامی‌که شرایط دقیق‌تر زمین‌شناسی یا توزیع آبخوان[1] و فشار آب پس از مطالعه زمین‌شناسی با حفاری تونل آشکار شود، مطالعات گمانه‌ای یا برداشت از سطح زمین باید اضافه شود.

۲- بررسی‌ها از داخل تونل:

الف) مشاهدات زمین‌شناسی: برداشت زمین‌شناسی[2] در شکل‌های طولی و عرضی تونل[3] همراه با مشاهدات ممکن است تغییر زمین‌شناسی در جلو جبهه کار را مشخص کند.

ب) حفاری (افقی) پیشرو[4] : حفاری افقی پیشرو تونل می‌تواند به‌طور مستقیم وضعیت زمین‌شناسی یا تراوش آب در جلوی جبهه کار را شناسایی کند و به‌عنوان چال زهکش نیز استفاده شود.

ج) بررسی چال‌زنی[5] : در حفاری پیشرو توسط جامبودریل، انرژی حفاری که به‌عنوان شاخص داده می‌شود از نیروی رانش، سرعت چرخش، تعداد ضربات مته جامبو محاسبه می‌شود و به‌عنوان یک داده فنی در ارزیابی زمین استفاده می‌شود. از این‌رو اپراتور جامبو می‌تواند نقش تعیین کننده‌ای در انتقال اطلاعات شرایط جبهه‌کار پیشرو به تیم فنی داشته باشد.

ج) اکتشافات ژئوفیزیکی: اکتشافات ژئوفیزیکی برای کاوش در جلوی جبهه کار به دو نوع تقسیم می‌شود، یکی با استفاده از امواج الاستیک و دیگری با استفاده از امواج الکترومغناطیسی. روش انعکاس زیرزمینی برای گرفتن موج منعکس‌شده از زمین۶ با سرعت موج الاستیک متفاوت، موجب تعیین موقعیت ناپیوستگی یا ناحیه شکست گسل می‌شود.

۲-۳-۱-۵- بررسی‌های هیدرولوژیکی

نشت آب در داخل تونل در اثر حفاری بر درجه سختی حفر تونل تأثیر می‌گذارد و حتی گاهی سبب کمبود آب‌های سطحی می‌شود. بنابراین تحقیقات هیدرولوژیکی برای پیش‌بینی 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[1] (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[2] 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[3] 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 موردبررسی 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

به‌منظور حفظ محیط‌زیست و کنترل آلودگی، اقدامات لازم برای جلوگیری از اثرات جدی ساخت بر محیط زندگی اطراف تونل باید به‌اندازه کافی موردمطالعه قرار گیرد.

در برنامه‌ریزی یک پروژه بزرگ‌مقیاس 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 به‌دقت 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.

هنگامی‌که 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 اشاره‌شده 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

	موارد	موضوع بررسی	ملاحظات	مرحله کاربرد تحقیق			
				برنامه ریزی مسیر	طراحی، برنامه ریزی ساخت	ساخت	تعمیر و نگهداری
محیط طبیعی	ویژگی‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و شرایط زمین	وضعیت فعلی شکل زمین، استراتژی، جبهه کارها، ساختار زمین‌شناسی، سن لایه‌بندی‌ها، ضخامت لایه‌ها، نفوذپذیری	پیوستگی و وجود گسل‌ها	◎	◎	△	△
	منابع زیرزمینی	توزیع منابع معدنی، گاز طبیعی و غیره	گازهای خطرناک	◎	◎	△	△
	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	- بررسی اولیه مناسب ضروری است - بررسی چاه‌ها	◎	◎	△	△
	شرایط آب سطحی	آب سطحی، چشمه آب گرم، دریاچه‌ها و مرداب‌ها، پراکندگی باتلاق‌ها	درک میزان جریان در ناحیه تأثیر	◎	◎	△	△
	گیاهان و جانوران	توزیع گیاهان و جانوران (به‌ویژه گونه‌های کمیاب)، مطالعه اکوسیستم	منابع محیط طبیعی که حفاظت از آن‌ها ضروری است.	◎	◎	△	△
محیط اجتماعی	کاربری زمین، سازه‌های ساخته‌شده، میراث فرهنگی، بناهای تاریخی،	الگوهای کاربری زمین مانندِ ساختمان‌ها، پارک‌ها و موارد مدفون مانند آب یا گاز، دریفت ها، توزیع میراث فرهنگی، بقایا و آثار طبیعی و ...	وسعت، مالک و مدیریت سازه	◎	◎	△	△
	شرایط زمین و سازه‌ها	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	- بررسی وضعیت قبل از ساخت ضروری است - بررسی‌ها با توجه به مناطق روباره کم، زمین‌لغزش‌ها و گسل‌ها انجام می‌شود.	△	○	◎	○

	موارد	موضوع بررسی	ملاحظات	مرحله کاربرد تحقیق			
				برنامه ریزی مسیر	طراحی، برنامه ریزی ساخت	ساخت	تعمیر و نگهداری
محیط طبیعی	ویژگی‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و شرایط زمین	وضعیت فعلی شکل زمین، استراتژی، جبهه کارها، ساختار زمین‌شناسی، سن لایه‌بندی‌ها، ضخامت لایه‌ها، نفوذپذیری	پیوستگی و وجود گسل‌ها	◎	◎	△	△
	منابع زیرزمینی	توزیع منابع معدنی، گاز طبیعی و غیره	گازهای خطرناک	◎	◎	△	△
	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	- بررسی اولیه مناسب ضروری است - بررسی چاه‌ها	◎	◎	△	△
	شرایط آب سطحی	آب سطحی، چشمه آب گرم، دریاچه‌ها و مرداب‌ها، پراکندگی باتلاق‌ها	درک میزان جریان در ناحیه تأثیر	◎	◎	△	△
	گیاهان و جانوران	توزیع گیاهان و جانوران (به‌ویژه گونه‌های کمیاب)، مطالعه اکوسیستم	منابع محیط طبیعی که حفاظت از آن‌ها ضروری است.	◎	◎	△	△
محیط زندگی انسان	سروصدا و لرزش	سروصدا و لرزش، ویژگی‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی (روباره و خصوصیات فیزیکی زمین و ...)، کاربری زمین (کاربرد، پراکندگی ساختمان‌ها و تاسیسات تحت تأثیر صدا و لرزش)	بررسی دقیق به‌ویژه در شرایط زیر موردنیاز است: - برای زمین با سنگ سخت در مجاورت یک منطقه شهری - نواحی پرتال با روباره کم	△	○	◎	○
	کمبود آب	وضعیت (کاربرد و استفاده)، سطح آب زیرزمینی، کیفیت آب (دمای، کدری، اجزای محلول، بو، رنگ و غیره)، وضعیت منبع آب (نوع، مقدار دبی، مسیر تأمین و ...)، ساخت‌وساز مجاور با احتمال ایجاد کم‌آبی	- آبخوان، لایه نفوذ ناپذیر - اندازه‌گیری تغییرات سطح آب زیرزمینی باید قبل از شروع کار انجام شود.	△	○	◎	○
	نشست سطح زمین	سطح فرونشست سالیانه زمین، نشست طبقاتی نرخ نشست در داخل فرونشست، تأثیر بر ساختمان‌ها و سایر سازه‌ها	بررسی هیسترزیس ساخت‌وساز درگذشته	△	◎	○	△
	آب گل‌آلود	وضعیت زهکشی، دبی و کیفیت آب، مسیر زهکشی و وضعیت آبراه، وضعیت	بر اساس مقررات، علل و وضعیت آب گل‌آلود قبل از تخلیه برای	△	○	◎	○

	موارد	موضوع بررسی	ملاحظات	مرحله کاربرد تحقیق			
				برنامه ریزی مسیر	طراحی، برنامه ریزی ساخت	ساخت	تعمیر و نگهداری
محیط طبیعی	ویژگی‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و شرایط زمین	وضعیت فعلی شکل زمین، استراتژی، جبهه کارها، ساختار زمین‌شناسی، سن لایه‌بندی‌ها، ضخامت لایه‌ها، نفوذپذیری	پیوستگی و وجود گسل‌ها	◎	◎	△	△
	منابع زیرزمینی	توزیع منابع معدنی، گاز طبیعی و غیره	گازهای خطرناک	◎	◎	△	△
	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	- بررسی اولیه مناسب ضروری است - بررسی چاه‌ها	◎	◎	△	△
	شرایط آب سطحی	آب سطحی، چشمه آب گرم، دریاچه‌ها و مرداب‌ها، پراکندگی باتلاق‌ها	درک میزان جریان در ناحیه تأثیر	◎	◎	△	△
	گیاهان و جانوران	توزیع گیاهان و جانوران (به‌ویژه گونه‌های کمیاب)، مطالعه اکوسیستم	منابع محیط طبیعی که حفاظت از آن‌ها ضروری است.	◎	◎	△	△
		رودخانه در جریان (دبی، کیفیت، وضعیت بهره‌برداری)	ارزیابی اثرات بررسی شود.				
	وقفه در ترافیک	بررسی شرایط جاده، حجم ترافیک، مسیر مدرسه، گذرگاه، طول، حداقل عرض، مساحت منطقه، گذرگاه عابر پیاده	مکان‌هایی که ترافیک در ساعات شلوغی غیر ممکن است.	△	△	◎	△
	انتشار، آلودگی فلزات سنگین	pH، هدایت الکتریکی، بررسی آب، آزمایش محتوا و تست انحلال O_2H, H_2O_2) آب چشمه	لازم است موارد زیر موردبررسی قرار داده شود: کمربند کانی زایی، ذخایر سنگ معدن، تصفیه آب چشمه	△	○	◎	○
	آلودگی هوا	آلاینده‌های هوا (غلظت به‌ویژه CO، NO_2)، گردوغبار، وضعیت پدیده‌های هواشناسی	اخطار در اطراف پرتال‌ها و برج‌های تهویه ضروری است.	△	○	○	◎

◎ بررسی بسیار مهم است

○ بررسی انجام شود

△ بررسی درجایی که لازم است انجام می‌شود

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

در برنامه‌ریزی یک پروژه، تحقیقات پیشرفته با توجه به وجود هرگونه قوانین و مقررات قابل‌اجرا[1]، محتوا، رویه و راهکارها باید انجام شود.

۲-۳-۲-٤- الزامات جبران خسارت

الزامات تملک زمین لازم برای پروژه و همچنین موارد مربوط به غرامت از جمله تملک[2] و فسخ حقوق متعاقب پروژه[3] باید بررسی شود.

۲-۳-۳- نتایج بررسی‌ها

۲-۳-۳-۱- کلیات

نتایج بررسی باید به‌گونه‌ای مناسب با درک کامل هدف پروژه سازمان‌دهی شود و به نحوی تنظیم و ثبت شود که در مراحل مختلف پروژه از انتخاب مسیر تا نگهداری و مدیریت قابل‌استفاده باشد.

در نتایج تحقیق باید شرح، حقایق و تفاسیر[4] به‌صورت صریح متمایز شوند و از طرفی مسائل حل‌نشده باید مرتب شوند تا ازنظر اهمیت، مورد ارزیابی قرار گیرند. در بسیاری از موارد شرایط زمین و مکان با استفاده از وسایلی که برای اهداف مربوطه مناسب هستند بررسی می‌شوند. ازآنجایی‌که نتایج رابطه مشخصی با یکدیگر دارند، باید از منظری جامع و با در نظر گرفتن صحت موردبررسی و ارزیابی قرار گیرند.

۲-۳-۳-۲- طبقه‌بندی و استفاده از نتایج بررسی‌های شرایط زمین

نتایج بررسی شرایط زمین باید به‌طور جامع ارزیابی و به ترتیب اهمیت برای طبقه‌بندی درست زمین دسته‌بندی شود. هنگام ارزیابی زمین، خصوصیات زمین باید با استفاده از نتایج بررسی‌ها به‌درستی ازنقطه‌نظر ژئوتکنیکی برای امکان طراحی و برنامه‌ریزی ساخت مناسب بررسی شود. نتایج بررسی شرایط زمین باید با توجه به مراحل و اهداف نشان داده در جدول ۲- ۶ به شیوه‌ای مناسب سازمان‌دهی و برای تسهیل استفاده از داده‌ها مرتب شوند. به‌ویژه، هرگونه تغییر در سطح مقطع تونل، روش حفاری و روش‌های کمکی که قبلاً در طرح اولیه تعیین‌شده است ممکن است تأثیر نامطلوب قابل‌توجهی بر مدت، هزینه ساخت و همچنین ایمنی داشته باشد. برای از بین بردن این عوارض، باید نتایج بررسی شرایط زمین به‌صورت مؤثر ازنظر مهندسی مرتب و ثبت شوند به‌طوری‌که بتوان از آن‌ها به‌عنوان

---

[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[1]، 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[2]	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[3]
ساخت	تثبیت سطح زمین، مقدار آب ورودی، مقدار جابه‌جایی، پیش‌بینی‌ها و نتایجی مانند وضعیت زمین، بررسی روش‌های حفاری و کمکی و ...
تعمیر و نگهداری[4]	فشار زمین، بدتر شدن زمین و مصالح[5]، 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 به‌راحتی در مطالعات مربوط به طراحی و روش‌های ساخت مورداستفاده 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

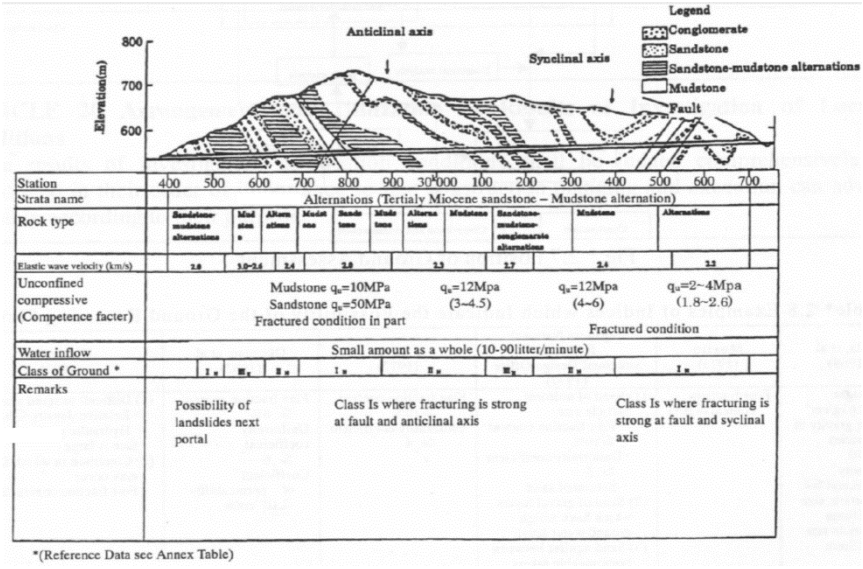
۵- نیمرخ زمین‌شناسی

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 زمین شناسی 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 به‌صورت جداگانه و بر اساس احتمال وقوع و اهمیت و همچنین راه‌حل‌ها طبقه‌بندی شود.

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

ارزیابی زمین[1] 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.



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 به‌طور 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 به‌طور 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 به‌صورت یک کلاس بیان می‌شود باید شرایط ذیل را داشته باشد:

۱- فاکتور طبقه‌بندی باید عینی[1] و کمی باشد.

۲- فاکتور طبقه‌بندی باید باهدف و طراحی تونل مرتبط باشد.

۳- فاکتور طبقه‌بندی باید در طول کل تونل موردنظر استاندارد[2] شود.

۴- فاکتور طبقه‌بندی باید از طریق روش بررسی معمولی و آزمایش[3] 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 ارائه‌شده 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 جبهه‌کار

ب) جریان‌های شدید آب غیرمنتظره

ج) توپوگرافی با ریسک فشار موضعی[4]

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) [5] و زمین در یک ناحیه شکستگی گسلی نیاز به مطالعه دقیق با توجه به‌احتمال 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 می دهد.

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

	Yabe, et al (1969)	Morito (1973)	Japanese National Railroads structural Design Office (1977)	JSCE (1977)	Okuzono ,et al (1982)	Kiya, et al (1993)
شاخص ها	-واحد وزن[1] $\geq$ ۲/۶۵ g/cm^3 -وزن مخصوص ذرات خاک $\geq$ ۱/۷ -ضریب یکنواختی[2] $\geq$ ۴ ۵۰% اندازه ذرات $\geq$ ۱/۵ mm ۱۰%اندازه ذرات $\geq$ ۰/۱۵ mm	-محتوای ریزدانه[3] $\geq$ ۱۰ %	۱- ماسه با دانه بندی یکنواخت -محتوای ریزدانه $\geq$ ۱۰ % - ضریب یکنواختی $\geq$ ۵ -خاک اشباع ۲- ماسه ی لایه های گراولی که سطح بالایی از آب زیرزمینی را دارند ۳- آبخوان ماسه‌ای بین لایه-های نفوذناپذیر	- محتوای ریزدانه $\geq$ ۱۰ % -ضریب یکنواختی $\geq$ ۵-۴	-محتوای ریزدانه $\geq$ ۸ % - ضریب یکنواختی $\geq$ ۶ -ضریب نفوذپذیری[4] $\leq$ 10^{-3}	۱- پایداری به تنهایی دشوار است - چگالی نسبی< ۸۰ % - گرادیان هیدرولیک در نزدیکی جبهه کار بزرگ است. ۲- شرایطی که جریان احتمال رخ دهد -محتوای ریزدانه$\geq$ ۱۰ %

جدول ۲- ۸- نمونه‌ای از شاخص‌های نشان دهنده ماهیت آماسی یا مچاله شوندگی زمین

شاخص هایی که طبیعت مچاله شوندگی یا آماسی را نشان می دهد.	Nakano (1975)	Japan Railroad Construction Public Corporation (1977)	Otsuka, et al (1980)	Sato, et al (1980)	Yoshikawa, et al (1988)
	Competence Factor (Gn)= $\sigma_c/\gamma H$ σ_c : مقاومت فشاری غیر محصور γ: وزن مخصوص H: عمق پوشش[5] ۱- $Gn \leq 2$ مچاله شوندگی یا آماسی ۲- $2 < Gn \leq 4$ مچاله شوندگی پایین یا فشار زیاد زمین فرض می شود. ۳- $4 < Gn \leq 6$ فشار بالای زمین فرض می شود. ۴- $6 < Gn \leq 10$ مقداری فشار زمین فرض می شود ۵- $10 < Gn$ تقریبا فشاری از زمین فرض نمی شود	شرایطی 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 ۷۰ $\leq$ ۴- ظرفیت تبادل یونی[6] $\leq$ ۳۵ meq/۱۰۰g ۵- درجه سست شدن[7] D ۶- مواد شکسته گسترده در نمونه حفاری نشان از احتمال فشار بالای تورم می باشد.	۱- مدول تغییر شکل پذیری$\leq$ ۸۰۰۰ kgf/cm^2 ۲-مقاومت فشاری غیرمحصور$\geq$ ۴۰ kgf/cm^2 ۳- وزن مخصوص $\geq$ 2.05gf/cm^3 ۴- محتوای آب $\leq$ ۲۰% ۵- حد سمایع[8] $\leq$ ۱۰۰٪ ۶- حد پلاستیک[9] $\leq$ ۷۰ ۷- حد جریان[10] $\leq$ ۲۰ ۸- محتوای ذرات با سایز ۲ میکرومتر یا کمتر، ۳۰ درصد یا بیشتر است. ۹- ظرفیت تبادل یونی[11] $\geq$ ۳۵ meq/۱۰۰g	۱- محتوای آب > ۲۰% ۲-وزن مخصوص (خشک) < ۱.۸ gf/cm^3 ۳-(جذب در تست اول/محتوای آب)>۲ ۴- درجه سست شدن C-D ۵-محتوی مونتموریلونیت>۳۰% ۶- RQD<۳۰ %	زمین با طبیعت مچاله شوندگی ۱- در طول حفاری - حفاری بدون آب ضروری است - تورم نمونه های گرفته شده زیاد است ۲- Gn$\leq$ ۱.۵ $(marked\ if < ۰.۵)$ ۳- محتوی مونتموریلونیت$\leq$ ۲۰% و محتوی آب $\leq$ ۲۰ ۴- درجه سست شدگی D زمین با طبیعت مچاله شوندگی ۱- در طول حفاری -نرخ نمونه گیری[12] پایین است

[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

		- 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	۱۰- نسبت تورم ≤ ۲٪		۲- $1.5 \leq Gn < 2$ ۳- محتوی مونتموریلونیت≤ ۲۰% یا محتوی آب ≤ ۲۰%

*۰.۱MPa = ۱ 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[1] یا آزمایش آزمایشگاهی استفاده می‌شود. بااین‌وجود، مقادیر خصوصیات فیزیکی که در محل یا در آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین‌شده‌اند در بسیاری از موارد به دلیل عدم یکنواختی زمین[2]، 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[3] کاهش می‌یابند

ب) نتایجی که از طریق روش مبتنی بر اندازه‌گیری تحلیل برگشتی به دست می‌آیند به‌عنوان مرجع استفاده می‌شوند.

ج) ازآنجایی‌که هر مرجع و سازمان دارای ویژگی‌های فیزیکی استاندارد[4] خاص خود است، توصیه می‌شود از مقادیری که ارائه می‌کنند استفاده شود.

۲-٤- 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 این‌که شرح خدمات مرحله پیدایش (شناسایی) تهیه نشده است، دستگاه اجرایی می‌تواند در صورت نیاز، نسبت به تهیه آن اقدام نموده و متناسب با آن فهرست عناوین مطالعات را مشخص کند. به‌طور اصولی، بهتر است که مطالعات طرح از مرحله پیدایش (شناسایی) شروع گردد ولی شروع آن از مرحله توجیه اولیه نیز بلامانع است.

۲-٤-۱- 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 حمل‌ونقل، به‌عنوان بخشی از شبکه راه‌های کشور معرفی‌شده یا بر پایه نتایج مطالعات پیدایش (شناسایی) طرح، ادامه مطالعات آن به‌صورت راه جدید توجیه گردیده است. در پایان این مطالعات، کریدورهای محتمل اجرای طرح مقایسه می‌شود و مناسب‌ترین کریدور راه موردنظر برای ادامه مطالعات و یا ادامه وضعیت موجود[1]، از سوی مشاور پیشنهاد می‌گردد.

نکته: فهرست عناوین کلی گزارش مطالعات توجیه اولیه در دو بخش تهیه‌شده است و به‌تبع آن نتایج مطالعات در دو بخش جهت تصویب و اظهارنظر به دستگاه اجرایی تسلیم می‌شود. به‌این‌ترتیب که با انجام مطالعات مطابق فهرست عناوین کلی بخش اول مطالعات توجیه اولیه، کریدورهای برتر انتخاب و پیشنهاد می‌شود و در بخش دوم ارزیابی‌های مالی و اقتصادی برای کریدورهای برتر انجام و کریدور بهینه انتخاب و به دستگاه اجرایی پیشنهاد می‌شود.

۲-٤-۲- مطالعات توجیه نهایی طرح احداث راه

پس از پایان مطالعات توجیه اولیه، پذیرش طرح، انتخاب یک کریدور برای ادامه مطالعات، طراحی راه به‌عنوان کریدور مصوب و در راستای هدف تعیین‌شده در مطالعات توجیه اولیه انجام می‌شود.

در این مرحله از مطالعات، با جمع‌آوری اطلاعات لازم و انجام بازدیدها و بررسی‌های محلی و مطالعات دفتری، کلیات طرح و اجزای آن تعیین و گزینه‌های مسیر در کریدور مصوب مشخص می‌گردد و با مقایسه این گزینه‌ها بر پایه ارزیابی فنی و اقتصادی، گزینه بهینه مسیر انتخاب و نسبت به اجرای آن تصمیم‌گیری می‌شود. ازاین‌رو مطالعات توجیه نهایی طرح باید دارای دقت کافی برای تصمیم به اجرا یا عدم اجرای طرح و تعیین جذابیت آن برای سرمایه‌گذاری باشد و تمام اجزای طرح را توصیف نموده و برآورد هزینه‌ها و زمان‌بندی آن، دقت کافی برای تنظیم موافقت‌نامه اجرایی طرح را داشته باشد.

نکته: فهرست عناوین کلی گزارش 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. به‌این‌ترتیب که با انجام مطالعات مطابق فهرست عناوین کلی بخش اول مطالعات توجیه نهایی، گزینه بهینه در کریدور بهینه، انتخاب می‌شود 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 درصورتی‌که 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.

۲-٤-۳- 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. به‌این‌ترتیب 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.

به‌طورکلی روال انجام مطالعات در این بخش به شرح ذیل است:

۲-٤-٤- 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.

۲-٤-٥- 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 تثبیت‌شده 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 ازنظر زمین‌شناسی مهندسی و آب زمین‌شناسی[1].
  - 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 به‌صورت استاتیکی و دینامیکی
  - تعیین تنش‌های ناشی از سایر عوامل طبیعی ازجمله 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 موردنیاز 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 پاطاق.

[1] hydrogeological

- مطالعه درزه‌ای 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 مورداستفاده در پوشش

- **طرح پوشش**
  - طرح پوشش اولیه تونل
  - طرح پوشش نهایی تونل
  - مطالعه مدل‌های رویداد آتش‌سوزی در مجاورت داخل تونل
- **تعیین محل گشودن جبهه‌های حفاری**
- **تهیه دستورالعمل رفتار نگاری**
- **مطالعات تهویه و روشنایی**
- **مطالعات زیست‌محیطی**
- **مطالعات ایمنی و تجهیزات تونل**
- **مطالعات زیرسازی و روسازی تونل**
- **برآورد هزینه**

۲-٤-٥-۱ مشخصات فنی خصوصی شامل مشخصات مصالح و مشخصات فنی عملیات

با توجه به اینکه مشخصات هندسی تونل، جنس سنگ‌های دربرگیرنده، اجزای تونل (پارکینگ، راه دسترسی ماشین‌رو، راه دسترسی نفر رو و سایر موارد)، وضعیت ناپیوستگی‌ها و غیره در تونل می‌تواند متفاوت باشد درنتیجه روش حفاری، سیستم نگهداری اولیه، سیستم نگهداری ثانویه، تهویه و روشنایی و ... نیز می‌تواند متفاوت باشد. لذا لازم است که بعد از انجام مطالعات طراحی تفصیلی، مشخصات فنی خصوصی مختص پروژه تهیه‌شده و به‌عنوان یکی از مدارک مهم اسناد مناقصه، ارائه گردد.

۲-٤-٥-۲- متره و برآورد احداث تونل

متره و برآورد، یکی از زیرمجموعه‌های مدیریت پروژه است که جهت پیش‌بینی قیمت اجرای پروژه‌های عمرانی به کار می‌رود. متره و برآورد، به فرایند اندازه‌گیری و محاسبه مقدار مصالح، نیروی انسانی و ماشین‌آلات موردنیاز برای اجرای یک پروژه ساختمانی و عمرانی گفته می‌شود. ازآنجاکه معیار تصمیم‌گیری 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 تصمیم‌گیری 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.

۲-٤-۵-۳- برنامه زمان‌بندی

پس از انجام مطالعات طراحی تفصیلی و تهیه نقشه‌های اجرایی، طی طرح جامع[1] ، چارچوب کلی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اجرایی پروژه همراه با مستندات و منابع آن تهیه می‌شود.

همچنین در برنامه زمان‌بندی کلی اولیه[2] 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[3] 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 واضع و دقیق مشخص می‌شود.

[1] Master Plan
[2] Overall Schedule
[3] Baseline Schedule

۲-۵- هندسه تونل

۲-۵-۱- مقدمه

تونل‌های راه، معمولاً دو خطه یا سه خطه هستند. در راه‌های مجزا، معمولاً هر یک از جهت‌های رفت‌وبرگشت، دارای تونل مجزا می‌باشد. این امر به لحاظ تهویه هوای داخلی تونل نیز مناسب‌تر است. تونل‌ها عموماً بر اساس روش اجرا به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: تونل‌های ساخته‌شده با روش‌های معدنی و روش‌های کند و پوش؛ که بر اساس نوع محل حفاری سنگ سخت و یا زمین نرم متفاوت است.

۲-۵-۱-۱- گروه‌بندی تونل‌ها

تونل‌ها را می‌توان به دو صورت زیر دسته‌بندی کرد:

الف) براساس نوع مسیر راه

ب) براساس شکل مقطع.

- **دسته بندی تونل‌ها برحسب نوع مسیر راه**

۱- تونل‌های یک‌طرفه (که معمولاً در آزادراه‌ها و راه‌های شریانی جداشده ساخته می‌شود).

۲- تونل‌های دوطرفه (که معمولاً در راه‌های شریانی جدانشده و جمع‌کننده ساخته می‌شود).

- **دسته‌بندی تونل‌ها براساس شکل مقطع تونل**

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

۲- تونل‌های با مقطع دایره‌ای کامل

۳- تونل‌های با مقطع مستطیلی.

در این آیین‌نامه، از گروه‌بندی 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 زمین‌شناسی مسیر تونل است. علاوه بر این، طول و محل قرار گرفتن تونل و تعداد تونل‌های پشت سر هم نیز از عوامل مؤثر است. اجزای مقطع عرضی در شکل ۲-۳ نشان داده‌شده است. با توجه به این‌که در مقایسه با راه‌های واقع در هوای آزاد امکان توسعه تونل‌ها حین بهره‌برداری وجود ندارد، لذا بهتر است نکات ذیل مدنظر قرار گیرد:

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

۲- در راه‌های دوطرفه با بیش از سه خط عبور، به‌جای یک تونل با قطر بزرگ، احداث دو تونل با قطر کوچک، به دلایل زیر توصیه می‌شود:

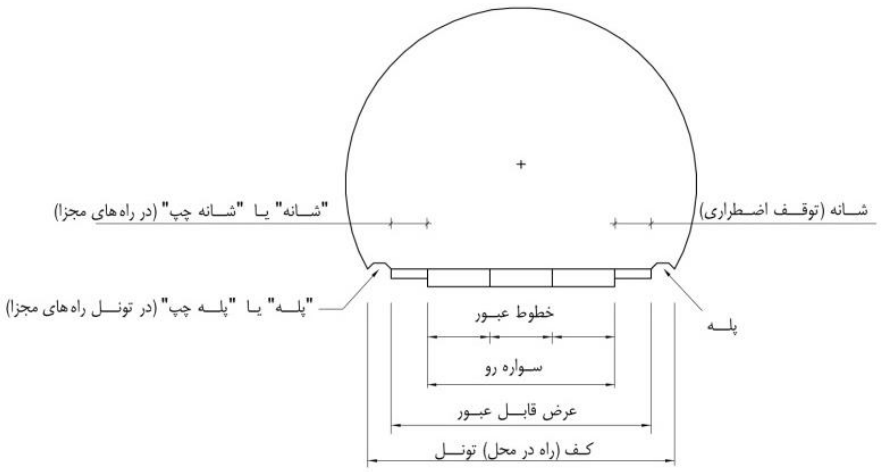
الف) با ساختن تونل اول می‌توان از آن به‌صورت دوطرفه استفاده کرد.

ب) با ساختن تونل دوم، از هر تونل می‌توان در یک‌جهت 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. به‌این‌ترتیب 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.

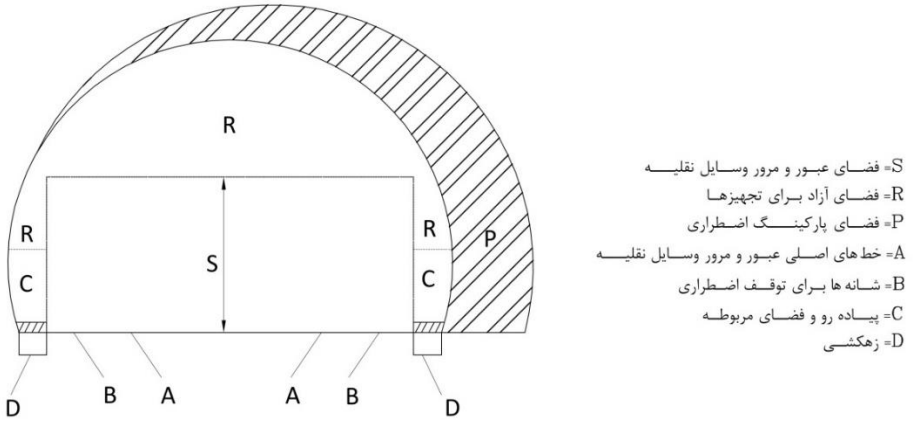
ب - عرض خط‌های عبور

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- شانه ها

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 کاهش‌یافته 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

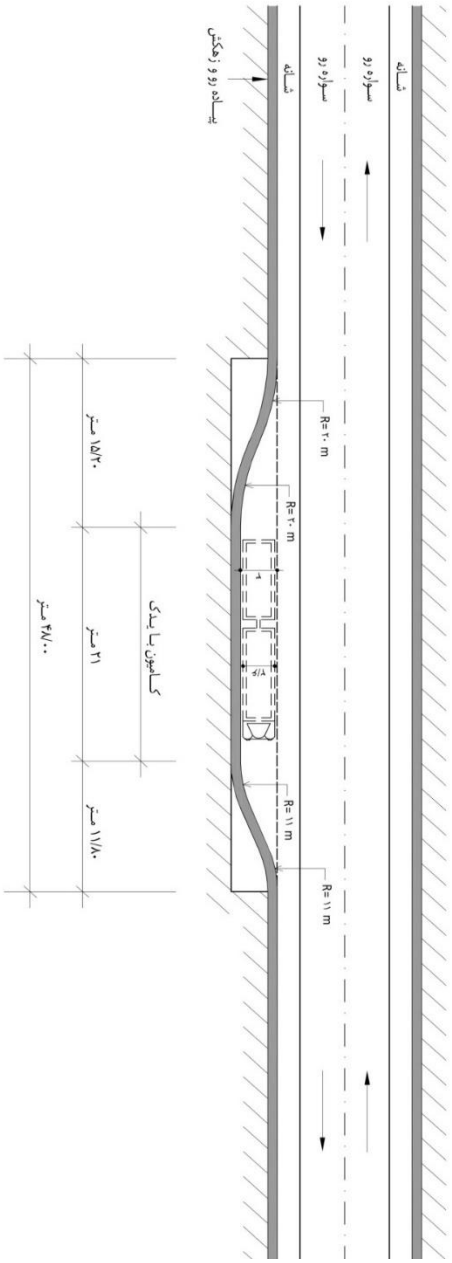
۲-۵-۲-۳- توقف‌گاه اضطراری

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

۲-۵-۲-٤- 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 این‌که 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

۲-۵-۲-۵- ارتفاع

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

تبصره ۱. با توجه به ۱۰ سانتی‌متر ضخامت روکش آسفالت آتی، برای ضخامت بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر، روکش قبلی تراشیده و روکش جدید جایگزین می‌شود.

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

۲-۵-۲-۶- شیب عرضی

تخلیه آب ناشی از نزولات جوی در تونل مطرح نیست ولی برای تخلیه سریع آب‌هایی که به هر دلیل دیگر بر کف آن جاری می‌شود، سواره‌رو و شانه باید دارای شیب عرضی و طولی مناسب باشد. شیب عرضی سواره‌رو و شانه در داخل تونل، برای قسمت‌های مستقیم و قوس‌های باز مشابه سایر قسمت‌های راه است و معمولاً ۱ تا ۱/۵ درصد در نظر گرفته می‌شود.

برای محاسبه شیب عرضی سواره‌رو در قوس‌های افقی در تونل، می‌توان ضوابط مربوط به راه‌ها را ملاک عمل قرار داد.

۲-۵-۲-۷- سرعت طرح

سرعت طرح برای تونل اغلب از مسیر راهی که تونل در آن قرارگرفته، کمتر است. مقدار سرعت طرح انتخاب‌شده نه‌تنها در تعیین مشخصات هندسی تونل تأثیر دارد، بلکه در موارد زیر نیز مؤثر است:

- طول مربوط به روشنایی اضافی ورودی
- آغاز روشنایی کمتر درجایی 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

پله‌های طرفین، مرز بخش قابل‌عبور تونل را مشخص کرده و مانع برخورد خودروهای عبوری با دیواره‌ها می شوند. پله به‌صورت جدول، از کف بلندتر و برای استفاده اضطراری پیاده است. تخلیه آب و عبور کابل، معمولاً از طریق فضای خالی داخل پیاده رو صورت می‌گیرد.

در تونل با مقطع منحنی، حداقل عرض پیاده‌رو ۶۰ سانتیمتر و در تونل با دیواره قائم، حداقل عرض پیاده‌رو ۷۵ سانتیمتر می‌باشد.

۲-۵-۳- نقشه مسطحه

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

- **فاصله دید توقف**

در تعیین فاصله دید توقف در تونل‌ها، چند نکته زیر مدنظر قرار می‌گیرد:

- دود وسایل نقلیه، که باعث کاهش دید می‌شود.
- خیس و تر بودن سطح راه، که باعث کاهش قدرت ترمز می‌شود.
- شعاع‌های خیلی کم، مسائل ساختمانی و اجرایی دشواری را ازنظر هدایت دستگاه‌های حفاری یا انطباق قالب‌های طاقی شکل مطرح می‌سازد. به این دلیل، پیش‌بینی شعاع‌های 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 ازنظر 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- بررسی‌های زمین‌شناسی

۳-۱- بررسی شرایط زمین

۳-۱-۱- زمین‌شناسی عمومی

در سال‌های اخیر و به دنبال افزایش نیاز به ایجاد فضاهای زیرزمینی با ابعاد بزرگ‌تر و در اعماق بیشتر یا حفر آن‌ها در زمین‌های با شرایط نامناسب، ازجمله در زیرآب، ضرورت شناسایی هرچه کامل‌تر شرایط زمین ضرورت یافته‌است. تجربه نشان داده است که اگر این‌گونه بررسی‌ها نادیده گرفته‌شود یا به نحو صحیح انجام نشود عواقب ناگوار یا حداقل طولانی‌تر شدن زمان اجرای پروژه و افزایش هزینه‌ها را به دنبال خواهد داشت.

مطالعات زمین‌شناسی معمولاً توسط یک یا تلفیقی از روش‌های زیر صورت می‌گیرد:

گردآوری اطلاعات موجود، پرس‌وجوهای محلی، استفاده از عکس‌های هوایی، نقشه‌ها و نیمرخ‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و ژئوتکنیک، ترانشه، گمانه و تونل اکتشافی و سرانجام روش‌های ژئوفیزیک و سایر موارد. هر یک از این روش‌ها کارایی و نواقص خاص خود را دارند. در این‌گونه بررسی‌ها تنها پس‌ازآن که روش ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر نتواست اطلاعات موردنیاز را ارائه دهد از روش پیچیده‌تر، هزینه و زمان برتر استفاده می‌شود. نتیجه بررسی‌های زمین‌شناسی مسیر یک تونل یا محدوده یک فضای زیرزمینی معمولاً به‌صورت گزارشی که همراه با نقشه‌ها، نیمرخ‌ها و نمودارهای مربوطه است به مهندس طراح ارائه می‌شود. در برخی موارد بررسی‌های زمین‌شناسی باید در تمام طول اجرای پروژه و حتی در زمان بهره‌برداری از آن نیز ادامه یابد.

همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی برای مقاصد متنوعی حفر می‌شوند که می‌توان موارد زیر را نام برد:

الف) تونل‌های حمل‌ونقل و دسترسی (راه‌ها و بزرگراه‌ها، راه‌آهن، مترو و معادن)

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

ج) فضاهای زیرزمینی بزرگ (ایستگاه‌های مترو، نیروگاه‌ها، انبارهای زیرزمینی و کارگاه‌های استخراج مواد معدنی)

طراحی هریک از فضاهای فوق مستلزم دسترسی به داده‌های مناسب و به‌کارگیری 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 زمین‌ها تونل‌های حفرشده نمی‌توانند خودنگهدار باشند و برای پایداری آن‌ها باید از سیستم نگهداری مناسب استفاده کرد.

به نظر می‌رسد که مهم‌ترین عامل در طراحی تونل، یا هر فضای زیرزمینی دیگر، تأمین پایداری آن است. قرارگیری این‌گونه سازه‌ها در میان مصالح طبیعی، یعنی سنگ و خاک، باعث شده است که شرایط زمین‌شناسی نقش اصلی را

در پایداری ایفا نماید. متاسفانه بسیاری از داده‌های زمین‌شناسی را نمی‌توان به‌طور مستقیم در طراحی سازه‌های زیرزمینی به کار گرفت. ازاین‌رو، در سال‌های اخیر کوشش‌های بسیاری برای طبقه‌بندی ژئوتکنیکی سنگ‌ها، یعنی ارائه ویژگی‌های آن‌ها به زبان مهندسی صورت گرفته است.

این طبقه‌بندی‌ها امروزه به‌طور وسیع مورداستفاده 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. زمین شناسان 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 موردنیاز برای انتخاب مسیر، طراحی روش اجرای تونل‌ها و انتخاب نوع و ویژگی‌های ماشین حفار موردنیاز 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 موردبررسی 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، گل گرفتگی بخش‌های مختلف کله حفاری و

دیسک کاترها و درنتیجه کاهش نرخ نفوذ ماشین شود که در مجموع کاهش ضریب بهره‌وری را به دنبال خواهد داشت. علاوه‌براین هجوم آب قابل‌توجه به داخل تونل می‌تواند با ایجاد مزاحمت برای کارکنان و فعالیت‌های مختلف در داخل تونل و نیاز به پمپاژ آب به خارج از فضای حفاری‌شده، 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. درمجموع 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 موردتوجه 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 ارائه‌شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، مچاله شوندگی سنگ، تغییر شکل‌های بزرگ‌مقیاس وابسته به زمان است که به خواص خزشی ایجادشده 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

تنش‌های برشی در ایجاد رفتار خزشی توده سنگ نقش اساسی دارند. تغییر شکل‌های مذکور ممکن است فقط به زمان اجرای تونل محدود شوند یا اینکه برای مدت‌زمان طولانی ادامه پیدا کنند. توده سنگ‌های ضعیف مانند اسلیت ها، شیست‌های گرافیتی، شیل‌ها، سنگ‌های رسی، آهک‌های رس‌دار ازجمله سنگ‌هایی هستند که در صورت مهیا بودن شرایط تنش می‌توانند این رفتار را از خود بروز دهند.

ه) تورم سنگ‌های رسی

پدیده تورم یا آماس ترکیبی از واکنش‌های 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 درنتیجه رها شدن تنش نیز رخ می‌دهد. دو مکانیسم عمده در پدیده آماس شامل:

- مکانیکی
- فیزیکوشیمیایی

مکانیسم اول که در رس‌ها، رس‌های سیلتی و سیلت‌های رسی و سنگ‌های مرتبط با آن‌ها رخ می‌دهد عکس پدیده تحکیم است و درنتیجه ایجاد فشار آب منفذی منفی رخ می‌دهد. این نوع آماس به وجود کانی‌های خاصی در زمین بستگی دارد. آماس و برآمدگی معمولاً منجر به مشکلاتی می‌شوند که می‌توان به موارد زیر اشاره شود:

همگرایی فضای حفرشده و ناکارآمدی عملیات حفاری می‌شود. برآمدگی یا بالا آمدن سنگ‌های اطراف فضای حفرشده، اعوجاج کلی سیستم نگهداری را موجب می‌شود و اغلب باعث وارد آمدن خسارت به سیستم نگهداری در نقاط خاصی از تونل می‌شود. همچنین زمانی که لایه حساس به تنش و آب در بین لایه‌های دیگری که تونل در آن‌ها حفرشده است، قرار می‌گیرد، جذب آب موجب همگرایی زیاد تونل و وارد آمدن خسارت موضعی به سیستم نگهداری می‌شود. پدیده تورم در حالت بحرانی باعث افزایش خطر ریزش و اعمال بار اضافی بر سیستم نگهداری و سپرهای دستگاه می‌شود.

و) ساینده‌گی سنگ و خاک

ساینده‌گی معمولاً به‌عنوان یک ویژگی مهم سنگ و خاک که علت اصلی سایش ابزار برش و بخش‌های مختلف ماشین محسوب می‌شود، شناخته می‌شود که ساینده‌گی زیاد سنگ‌ها و خاک‌ها و درنتیجه فرسودگی سریع و بیش‌ازحد ابزار برش سبب کاهش قابل‌توجه در راندمان فرایند حفاری می‌شود. همچنین تاخیرات زمان ناشی از توقف که برای تعویض ابزارها و قطعات سایش یافته صرف می‌شود، غیرقابل‌اجتناب است.

در مصالح خاکی عوامل مهمی که بر روی میزان سایش مؤثر هستند، عبارت است از نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده دانه‌های خاک، توزیع دانه‌بندی و گرد شدگی ذرات خاک است. در مصالح سنگی مهم‌ترین عامل مؤثر در سایش ابزار برش ترکیب کانی‌شناسی سنگ و مقاومت ماده سنگ است.

۳-۱-٤- آب زمین شناسی [1]

جریان و فشار آب زیرزمینی از عوامل مهم ناپایدار کننده تونل‌ها و دیگر فضاهای زیرزمینی است که باید از قبل مورد شناسایی قرار گیرد. متاسفانه در همه موارد تخمین دقیق مقدار آب ورودی به تونل ساده نیست و حتی دسترسی به اعداد تقریبی نیز نیاز به بررسی‌های همه‌جانبه و شناسایی آب‌های سطحی و زیرزمینی دارد. علاوه بر این‌ها، حتی اگر این بررسی‌ها مقدار دقیق آب را نیز محاسبه کنند اغلب مشخص نیست که این حجم آب در کل تونل تراوش خواهد کرد یا اینکه به‌صورت متمرکز و تنها از یک یا دونقطه خارج می‌شود. حالت دوم که معمولاً کنترل آن مشکل‌تر و تأثیر منفی آن بر پایداری تونل بیشتر است، اغلب در سنگ‌های درزه‌دار، مخصوصاً در سنگ‌های آهکی، حفره‌دار و کارستی دیده می‌شود.

به‌طورکلی تونل‌هایی که در بالای سطح ایستابی قرار می‌گیرند، از پایداری بیشتری برخوردارند. در این حالت تنها تراوش موقتی و فصلی ناشی از بارش و آب‌های 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 می‌تواند کم یا زیاد باشد، وجود خواهد داشت.

نشت آب زیرزمینی اثرات منفی متعددی می‌تواند 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 درزه‌ها و سطوح ضعیف که منجر به افزایش بازشدگی درزه‌ها و درنتیجه افزایش نشت آب را به همراه خواهد داشت.

د) ته‌نشست مواد محلول موجود در آب در محل تراوش و ایجاد رسوبات آهکی

ه) یخ زدن در فصول سرد و ایجاد قندیل

تونل‌هایی که قرار است از زیر رودخانه‌ها بگذرند در صورت امکان بهتر است به اعماق بیشتر و به زیر لایه‌های 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. درجاهایی که امکان رسیدن به لایه‌های غیرقابل نفوذ وجود ندارند، حفاری اجباراً به روش سپررانی انجام می‌شود.

تجربه نشان داده است که نفوذناپذیر کردن صد درصد تونل اغلب امکان‌پذیر نبوده یا به علت هزینه‌های زیاد به‌صرفه نیست. در رابطه با جلوگیری از نشت آب به تونل به‌کارگیری همه یا برخی از روش‌های زیر ممکن است مؤثر واقع شود:

---

[1] hydrogeological

۱- نصب پیزومترهای متعدد و انجام آزمایش‌های پمپاژ و دیگر آزمایش‌های لازم برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی سفره آب و دیگر مشخصات زمین به‌منظور طراحی پوشش مناسب.

۲- بررسی کیفیت آب و تأثیر آن بر پوشش تونل و دوغاب تزریق‌شده

۳- استفاده از تونل و گمانه پیشرو برای آگاهی قبلی از شرایط واقعی آب زیرزمینی.

۴- بررسی امکان زهکشی طبیعی آب از تونل

۵- درجاهایی که تونل پوشش بتنی دارد، نشت آب معمولاً از خلال درزه‌های انبساط و ساختمانی بتن صورت می‌گیرد. در چنین شرایطی با آب‌بندی این درزه‌ها یا با قراردادن کانال‌های هدایت آب در امتداد آن‌ها مشکل آب تا حدی بهبود می‌یابد.

۶- در رابطه با تونل‌های دارای پوشش بتنی، روش دیگر، زهکشی آب از پشت دیواره و هدایت آن به کانال‌هایی است که وظیفه تخلیه آب را بر عهده‌دارند.

۷- نشت آب از دیواره را تا حدی می‌توان با تزریق سیمان یا مواد شیمیایی کاهش داد. البته باید توجه داشت که آبی که به این نحو از یک محل رانده می‌شود اغلب ممکن است از محلی دیگر و از میان شکاف خشک خارج شود.

۸- روش‌هایی که بیشتر در زمان انجام عملیات اجرائی به کار گرفته می‌شود، مانند پایین آوردن سطح ایستابی به زیر سطح تونل، پمپاژ آب یا روش پرهزینه‌تر مانند منجمد نمودن آب‌های اطراف تونل.

۹- نصب دستگاه‌های کنترل دائم مقدار و محل نشت آب برای آگاهی از ثمربخش بودن تدابیر زهکشی.

۳-۱-۵- شرایط زیست‌محیطی

شرایط زیست محیطی یک پروژه تونل‌سازی می‌تواند به عوامل مختلفی از جمله مکان، ویژگی‌های زمین‌شناسی 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 می‌تواند منجر به پخش گرد و غبار، ذرات معلق و گازهای خروجی از ماشین‌آلات شود؛ بنابراین سیستم‌های تهویه و اقدامات کنترلی گرد و غبار در داخل و بیرون تونل ضروری است.

ب) لرزش و سر و صدا: فعالیت‌های مختلف تونل‌سازی از جمله انفجار می‌تواند سر و صدا و لرزش زیادی را ایجاد کند. استفاده از عایق‌های صوتی و روش‌های کنترل شده برای انفجار می‌تواند این عوارض را کاهش دهد.

ج) مدیریت آب: اغلب پروژه‌های حفر تونل با چالش ورود آب برخورد می‌کنند. بنابراین تعبیه سیستم زهکشی برای کنترل جریان آب ضروری است.

د) ملاحظات زمین شناسی: شرایط زمین‌شناسی محل ساخت تونل به طور قابل توجهی بر پروژه تاثیر گذار است. ارزیابی پایداری، برداشت زمین‌شناسی تکنیک‌های مهندسی برای اطمینان از حفاری ایمن و کاهش ریست 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 نیروهایی 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 بینیاوسکی 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. درحالتی‌که 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 بینیاوسکی مناسب‌ترین حالت در حفاری تونل در مناطق چین‌خورده زمانی است که پیشروی تونل در جهت شیب لایه‌بندی و عمود بر امتداد آن باشد و نامناسبت ترین 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 درحالتی‌که با یک ناودیس برخورد شود وجود جریان آب و تجمع آن در تونل مانع اصلی در ادامه حفاری می‌شود.

ج) وجود شیب‌های تند در مسیر تونل

در مواقعی که تونل در نزدیکی دریاچه یا رودخانه حفر شود، شیب کوه یا تپه در این مکان‌ها بسیار تند است. در این موارد برای کاهش هزینه، تونل‌ها را به شیب نزدیک‌تر می‌کنند. در این مناطق به علت کاهش تنش‌های جانبی احتمال وقوع لغزش در این شیب‌های تند افزایش می‌یابد؛ بنابراین در این مسیر پایداری شیب‌ها 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 بی‌اطلاعی از وجود گسل‌های فعال ممکن است خطرات جانی و مالی زیادی به همراه داشته باشد.

ه) سطح آب زیرزمینی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد اگر حفاری تونل در زیر سطح آب زیرزمینی انجام شود، احتمال برخورد با آب همیشه وجود دارد. برای تخلیه این آب‌ها معمولاً با شیب‌دار کردن تونل آن را خارج می‌کنند. همچنین تزریق مواد غیرقابل نفوذ درزها و شکاف‌های سنگ، باعث بسته شدن مجاری نفوذ آب و درنتیجه کاهش نفوذ آن به درون تونل می‌شود.

۳-۲-۲- تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

تفکیک واحدهای زمین‌شناسی به فرآیند شناسایی و دسته‌بندی واحدهای زمین‌شناسی مختلف براساس خصوصیات و ویژگی‌های مهندسی آن‌ها اطلاق می‌شود. از آنجا که این تفکیک به درک رفتار خاک و سنگ زیرسطحی می‌شود ضروری است و ممکن است شامل مراحل زیر باشد:

الف) بررسی سایت[1]

ب) مپینگ زمین‌شناسی

ج) تست‌های آزمایشگاهی

۳-۲-۳- طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ

بر طبق یک تعریف کلی، طبقه‌بندی، قرار دادن اشیاء یا داده‌ها بر طبق ویژگی‌های مشترکشان در گروه‌های مختلف است. واضح است که مجموعه‌ای از داده‌ها را می‌توان با توجه به نیاز به صورت‌های گوناگونی طبقه‌بندی کرد. به‌عنوان‌مثال سنگ که موضوع موردبحث است توسط زمین شناسان به سه گروه اصلی آذرین، دگرگونی و رسوبی تقسیم می‌شود. طبقه‌بندی زمین‌شناسی سنگ‌ها بیشتر توصیفی است و اطلاعات کافی درباره خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ ارائه نمی‌دهد، لذا نمی‌تواند در شرایطی که سنگ به‌عنوان مصالح ساختمانی یا اینکه سازه‌ای در داخل یا روی آن بنا می‌شود 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 مورداستفاده قرار می‌گیرند.

۳-۲-٤- برآورد خصوصیات ژئومکانیکی

۳-۲-٤-۱- آزمون های آزمایشگاهی

به کمک آزمون‌های آزمایشگاهی می‌توان یک برآورد کمّی 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 خصوصیاتی از سنگ را اندازه می‌گیرند. متداول‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگی که برای سازه‌های زیرزمینی استفاده می‌شوند در جدول ۳- ۱ ارائه‌شده‌اند.

جدول ۳- ۱- متداول‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگی

خصوصیات سنگ	پارامتر / مشخصات
خصوصیات شاخص	دانسیته
	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
تغییرشکل پذیری	مدول یانگ
	ضریب پواسون
وابسته به زمان	مشخصات خزش
نفوذپذیری	ضریب نفوذپذیری

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

به‌طورکلی پارامترهای سنگ را می‌توان به دودسته کلی پارامترهای مقاومتی[1] و تغییر شکل‌پذیری[2] (سختی[3]) دسته‌بندی کرد. پارامترهای مقاومتی شامل چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی(φ)، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مقاومت کششی می‌باشد. پارامترهای تغییر شکل‌پذیری نیز شامل مدول یانگ (E) و ضریب پواسون(ϑ) می‌باشد.

- **۳-۲-٤-۱-۱- روش محاسبه مقاومت فشاری تک محوری سنگ(UCS4)**

مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ را می‌توان با استفاده از سه روش مقاومت سنجی مختلف نظیر مقاومت فشاری تک‌محوری، بارنقطه‌ای و چکش اشمیت به دست آورد.

الف) آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (نامحصور)

این آزمایش متداول‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیک سنگی بر روی ماده سنگ می‌باشد. در این آزمایش نمونه سنگ در داخل یک فریم قرار داده‌شده و توسط یک جک با ظرفیت مناسب بارگذاری می‌گردد. برای نمونه‌های با قطر مختلف از جک‌های با ظرفیت مختلف (تا ۴۵۰ تن) استفاده می‌شود. برای اینکه بارگذاری کاملاً غیر نقطه‌ای باشد از یک مفصل کروی بر روی نمونه استفاده می‌شود. بارگذاری تحت سرعت کنترل‌شده تا زمان وقوع شکست در سنگ ادامه می‌یابد. در صورتیکه از فریم‌های غیرصلب برای بارگذاری نمونه‌ها استفاده گردد، تنها می‌توان مقدار مقاومت نهایی سنگ را ثبت نمود و اطلاعی از رفتار پس از شکست در اختیار قرار نمی‌گیرد. در صورتیکه آگاهی از رفتار پس از شکست سنگ[5] ضروری باشد باید از فریم‌های صلب استفاده کرد. با استفاده از این آزمایش همچنین می‌توان مدول یانگ و ضریب پواسون را نیز به دست آورد.

ب) آزمایش فشاری تک‌محوری با استفاده از دستگاه (MTS[6])

دستگاه پرس صلب کنترل اتوماتیک MTS، دارای بدنه‌ای کاملاً صلب بوده که آن را قادر می‌سازد رفتار سنگ‌های با مقاومت بالا را در شرایط بارگذاری تک‌محوری و سه محوری تعیین نماید. بدین ترتیب می‌توان سازه‌هایی را که در آن سنگ تا سرحد مقاومت نهایی‌اش بارگذاری شده را نیز طراحی نمود. شرایط مختلف بارگذاری در این دستگاه به‌صورت کاملاً کامپیوتری برنامه‌ریزی‌شده و قابل‌تعریف می‌باشد. دستگاه مذکور دارای ظرفیت ۴۵۰ تن در فشار و ۲۴۰ تن در کشش می‌باشد. با استفاده از سنسورهای مختلفی که همراه دستگاه وجود دارد می‌توان کرنش‌های طولی، عرضی و نیروهای قائم را به‌دقت تعیین و در حین آزمایش به‌صورت دیجیتالی ثبت کرد. در این دستگاه می‌توان بارگذاری ثابت، جابه‌جایی 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

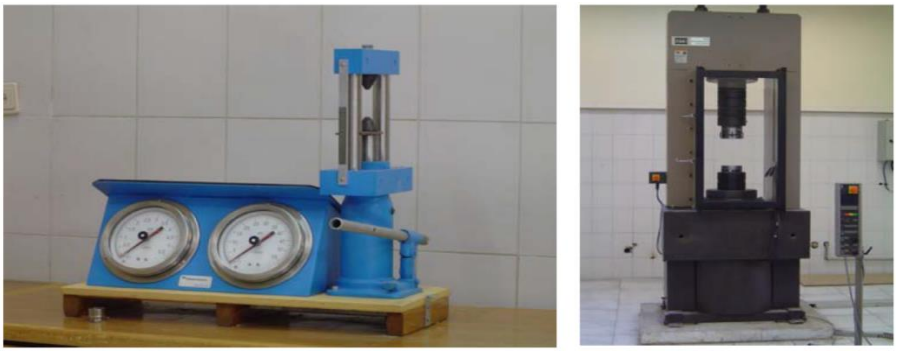
شکل ۳- ۱ دستگاه MTS را نشان می‌دهد که علاوه بر تعیین مقاومت سنگ‌های بسیار مقاوم، به سهولت می‌تواند رفتار پس از شکست آن‌ها را نیز تعیین کند.

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 کروی 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 قابل‌حمل بوده و وسیله مناسبی برای مطالعات اولیه و صحرایی می‌باشد.

د) آزمایش چکش اشمیت

این آزمایش برای تعیین سختی و مقاومت سنگ در صحرا و یا در آزمایشگاه طراحی‌شده 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 قرارگرفته و با فشار دادن چکش به سنگ، فنر داخل چکش فشرده می‌شود. در اثر انرژی ذخیره‌شده، ضامن فنر در سطح انرژی تراکمی مشخصی آزاد شده و به وزنه‌ای که روی میله چکش قرارگرفته ضربه می‌زند. ارتفاع و جهش وزنه‌ای از روی خط کش دستگاه قرائت‌شده و به‌عنوان مقیاسی برای تعیین سختی سنگ استفاده می شود (شکل ۳- ۲).



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

شکل ۳- ۲- چکش اشمیت

- **۳-۲-٤-۱-۲- 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[1]

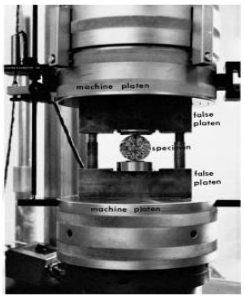
از این آزمایش برای شبیه‌سازی شرایط تنش سه محوری که در اعماق زمین به سنگ‌ها وارد می‌گردد، استفاده می‌شود. ساده‌ترین روش اعمال تنش سه محوری به نمونه سنگ در آزمایشگاه، استفاده از سلول هوک می‌باشد که توسط آن ضمن اعمال یک فشار جانبی هیدرولیکی، نمونه تحت تنش قائم نیز قرار می‌گیرد. با انجام این آزمایش تحت مقادیر 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

- **۳-۲-٤-۱-۳- روش محاسبه مقاومت کششی سنگ (UTS)**

به دلیل مشکلات اندازه‌گیری مستقیم مقاومت کششی سنگ معمولاً آزمایش برزیلی[2] برای این منظور استفاده می‌شود. در این آزمایش نمونه‌هایی به شکل دیسکی بین دو فک به‌صورت قطری تحت بارگذاری قرارگرفته 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 آزمایش برزیلی در شکل ۳- ۴ نشان داده‌شده است.

[1] Triaxial compressive test
[2] Brazilian Test



شکل ۳- ۴- آزمایش برزیلی جهت تعیین مقاومت کششی

- **۳-۲-٤-۱-٤- روش محاسبه پارامترهای مقاومت برشی درزه‌ها**

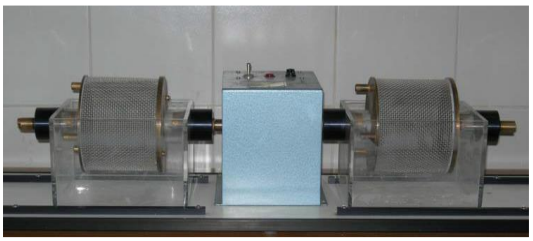
جهت به دست آوردن پارامترهای برشی درزه‌ها آزمایش مقاومت برشی درزه[1] استفاده می‌شود. در این آزمایش مقاومت برشی نمونه در امتداد یک ناپیوستگی و یا سطح ضعیف از پیش تعیین‌شده اندازه‌گیری می‌شود. نمونه سنگ در پلاستر یا سیمان تثبیت‌شده، سپس بین دو فک (که یکی ثابت و دیگری متحرک می‌باشد) قرار می‌گیرد و در حالیکه 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 داده‌شده است.

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

- **۳-۲-٤-۱-٥- روش به دست آوردن شاخص دوام[2] سنگ‌ها**

این آزمایش برای تعیین میزان دوام یک نمونه سنگ تحت تأثیر مراحل متوالی تر و خشک شدن طراحی‌شده است. شاخص دوام برابر با درصد وزن مواد باقی‌مانده از نمونه سنگی پس از تر و خشک شدن متوالی به وزن اولیه تعریف‌شده 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 داده‌شده است.

[1] Direct shear test on joints
[2] Slake-Durability



شکل ۳- ۶- دستگاه اندازه‌گیری شاخص دوام

۳-۲-٤-۲- آزمایش‌های برجا

متداول‌ترین **آزمایش‌های برجای موجود در کارهای زیرزمینی در**

جدول ۳- ۲ ارائه شده‌اند. برای آگاهی از نحوه انجام این آزمایش‌ها و جزییات آن‌ها می‌توان به استانداردهای ASTM و همین‌طور توصیه‌های ISRM و هندبوک Rock Testing مراجعه کرد. صرفاً در این قسمت در مورد روش به دست آوردن مهم‌ترین پارامترهای لازم برای طراحی تونل‌ها توضیحاتی داده می‌شود.

- **۳-۲-٤-۲-۱- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای (جکینگ)**

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای یکی از آزمایش‌های برجا مکانیک سنگ است که برای تعیین مدول‌های تغییر شکل و الاستیک توده‌سنگ به کار می‌رود. در این روش مدول تغییر شکل الاستیک توده‌سنگ با استفاده از نتایج جابه‌جایی توده‌سنگ، ناشی از بار نرمال اعمال‌شده، محاسبه می‌گردد.

محل آزمایش معمولاً یک تونل اکتشافی می‌باشد که در آن دیواره‌های تونل، نیروی عکس‌العمل باری را که توسط جک‌ها اعمال‌شده است و هم‌جهت با بار ناشی از سازه می‌باشد را ایجاد می‌کند. انجام این آزمایش در سطح زمین نیز میسر می‌باشد که در این صورت نیروی عکس‌العمل توسط کابل‌های میخ شده در عمق زمین مهیا می‌شود.

جدول ۳- ۲- روش‌های 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 لوژان
	روش فشار ضربه‌ای (پالسی)
	آزمایشهای پمپاژ

- **۳-۲-٤-۲-۲- آزمایش مقاومت برشی مستقیم برجا در سنگ**

هنگامی‌که سازه‌ای در شیب تندی قرارگرفته باشد و یا بارهای جانبی قابل‌ملاحظه‌ای 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. درجاهایی 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 اعمال‌شده 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.

- **۳-۲-٤-۲-۳- 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 ازاین‌رو می‌توان میزان آنتروپی را در توده سنگ تعیین کرد.

- **۳-۲-٤-۲-٤- آزمایش شکاف دیواره گمانه (اسلاتر)**

آزمایش شکاف دیواره گمانه یکی از تکنیک‌های قابل‌اطمینان برای اندازه‌گیری دقیق تنش برجا است. این تکنیک برای عملیات سریع و تعداد زیاد اندازه‌گیری در گمانه طراحی‌شده 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.

- **۳-۲-٤-۲-۵- روش شکست هیدرولیکی**

این روش برای اندازه‌گیری میدان تنش برجای توده سنگ در عمق زمین به کار می‌رود و با استفاده از آن می‌توان مقدار و جهت تنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر را در صفحه‌ای عمود بر امتداد گمانه تعیین نمود.

در این روش، اعمال فشار هیدرولیکی به قسمتی از یک گمانه که توسط پکر جداشده است باعث ایجاد ترک، گسترش شکستگی و یا باز شدن مجدد ترک‌های موجود می‌گردد. میزان این فشار به میدان تنش برجا بستگی دارد و جهت گسترش ترک‌ها نشان‌دهنده جهت تنش‌های اصلی می‌باشد. برای تعیین تنش برجا در اعماق بیشتر از ۵۰ متر، شکست هیدرولیکی تنها روش ممکن و نسبتاً موفق است. این روش در گمانه‌هایی با قطرهای مختلف و نیز چال‌های کوتاه قابل‌اجرا می‌باشد. عدم نیاز به اطلاعات کامل در مورد ویژگی‌های الاستیک سنگ و همچنین امکان اجرای آن در زیر سطح آب زیرزمینی از مزایای این روش است. دقت این روش در مورد سنگ‌های شکننده، همگن، الاستیک، همسانگرد و غیرمتخلخل به حداکثر می‌رسد.

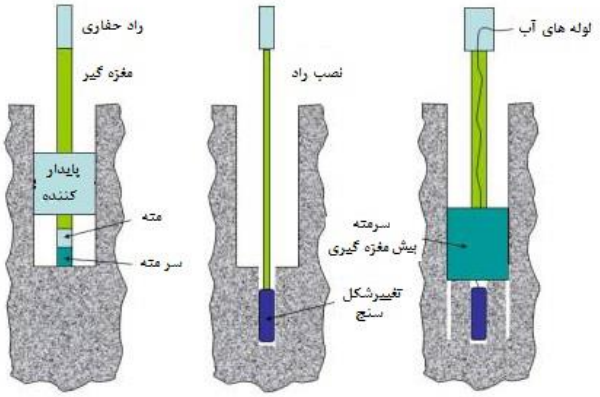
- **۳-۲-٤-۲-٦- روش بیش مغزه‌گیری**

در این روش در کف گمانه‌ای که قبلاً حفرشده، سوراخ باریکی حفر می‌کنند و در آن دستگاه کرنش‌سنج قرار می‌دهند و بدین ترتیب تغییر شکل حاصله را اندازه‌گیری می‌کنند. سپس با مغزه گیری از کف گمانه، بخشی را که کرنش‌سنج در آن نصب‌شده است، از بقیه سنگ‌ها جدا می‌سازد. با مقایسه کرنش اولیه و آنچه که پس از مغزه گیری مجدد برجا می‌ماند، وضعیت تنش‌های برجا محاسبه می‌شود.

این روش شامل تکنیک‌های اندازه‌گیری تنش و کرنش آزاد شده می‌باشد. این روش شامل یک اندازه‌گیری سه‌بعدی کرنش آزاد شده که در بدنه سنگ‌های اطراف احاطه‌شده است، می‌باشد. تانسور تنش سه‌بعدی متعاقباً می‌تواند با اطلاعات تانسور تسلیم‌شده سنگ به‌صورت کامل محاسبه شود.

دو مانع جهت اندازه‌گیری تنش وجود دارد که مزیت‌های این روش را محدود می‌کند. اولاً اندازه‌گیری باید در نزدیکی سطح زمین باشد و کرنش آزاد شده در یک محدوده خیلی کوچک (میلی‌متر مربع تا سانتیمتر مربع) تعیین می‌شود. همچنین نشان داده‌شده است که اندازه‌گیری‌های نزدیک سطح زمین (نزدیک‌تر از حد معمول) متأثر از توپوگرافی محلی، آنیزوتروپی سنگ و شکست طبیعی می‌باشد.

شکل ۳- ۷ نحوه انجام آزمایش بیش مغزه گیری را نشان می‌دهد.



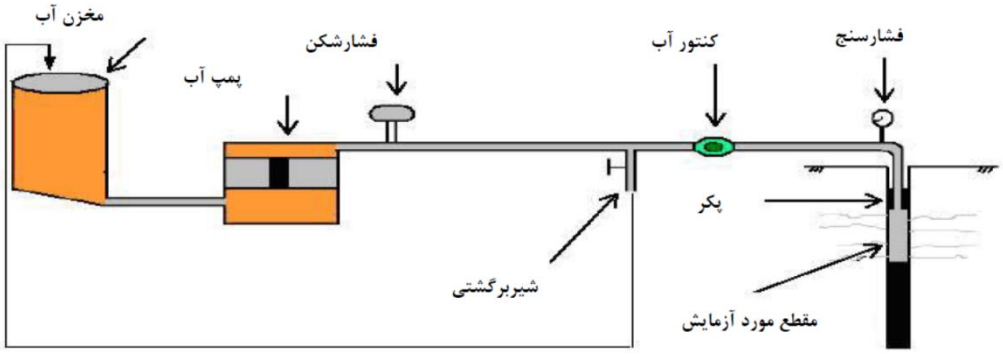
شکل ۳- ۷- نحوه انجام آزمایش بیش مغزه گیری

- **۳-۲-٤-۲-۷- آزمایش لوژان**

بررسی و شناخت خاصیت نفوذپذیری محیط‌های سنگی به‌منظور ارزیابی و محاسبه پوشش داخلی تونل‌ها از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. نفوذپذیری عبارت است از قابلیت سنگ برای عبور دادن مایعات از داخل خود بدون اینکه تغییری در ساختمان آن ایجاد شود.

تعیین تراوایی سنگ‌های درزه‌دار معمولاً به‌وسیله آزمایش فشار آب معروف به آزمایش لوژان صورت می‌گیرد. در این آزمایش قسمتی از طول گمانه با پکر مسدود شده و آب با فشار به آن تزریق می‌شود. نفوذپذیری توده سنگ با توجه به نرخ خورند آب، فشار آزمایش و طول مقطع آزمایش تعیین می‌شود. شکل ۳- ۸ نحوه انجام آزمایش لوژان را نشان می‌دهد.

فشارهای آزمایش به‌صورت پله‌ای تا فشار ماکزیمم و سپس به فشار اولیه کاهش می‌یابند. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در این پله‌های فشار، رفتار جریان درزه‌ها تعیین گردیده و مقدار آب که طی آزمایش با فشار به درون درزه رانده می‌شود، در یکای زمان و فشار ثبت می‌گردد و با توجه به آن، مقدار نفوذپذیری معرف برای مقطع مورد آزمایش انتخاب می‌شود.



شکل ۳- ۸- تجهیزات و نحوه اجرای آزمایش لوژان

۳-۲-۵- اکتشافات ژئوتکنیکی خاک‌ها

خاک از یک طرف به‌عنوان مصالح مانند خاک‌ریزها، سدهای خاکی و غیره و از طرف دیگر به‌عنوان یک محیط طبیعی مانند محل حفر تونل‌ها موردتوجه مهندسین و طراحان قرار می‌گیرد که در تمام موارد، شناخت خواص فیزیکی و مکانیکی خاک ضرورت غیرقابل‌اجتناب دارد. بررسی صحرایی خاک‌ها منجر به نمونه‌هایی می‌شود که ممکن است مستقیماً و به‌طور برجا در محل آزمایش‌شده 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 موردبررسی
- تعیین عمق آب زیرزمینی در محدوده موردبررسی
- تعیین پارامترهای مؤثر در پایداری و تغییر شکل‌پذیری لایه‌های خاک
- تعیین پارامترهای موردنیاز جهت طراحی بخش‌های مدفون سازه
- تعیین مشخصه‌های خاک جهت تعیین نیروی زلزله
- بررسی امکان بروز نابهنجاری‌های ژئوتکنیکی
- انجام آزمایش‌های شیمیایی جهت تعیین نوع سیمان مورداستفاده در پوشش نگهداری تونل

آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا که به‌منظور تعیین پارامترهای فوق در خاک انجام می‌شوند، مطابق جدول ۳- ۳ می‌باشند.

جدول ۳- ۳- آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا به‌منظور 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 اتربرگ	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- آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی خاک‌ها

- **آزمایش دانه‌بندی مکانیکی خاک (مطابق با استاندارد ASTM D 6913)**

دانه‌بندی به نحوه توزیع دانه‌های خاک با اندازه مختلف در نمونه خاک اطلاق می‌شود. منظور از دانه‌بندی مکانیکی جداسازی دانه‌های خاک در اندازه‌های مختلف است که هر قسمت به‌صورت درصدی از ذرات نسبت به‌کل نمونه خاک بیان می‌شود. تعیین منحنی دانه‌بندی خاک برای طبقه‌بندی خاک، تعیین ظرفیت باربری خاک و احداث انواع سازه‌های زیرزمینی در خاک مورداستفاده قرار می‌گیرد.

- **آزمایش دانه‌بندی هیدرومتری (مطابق با استاندارد ASTM D 7928)**

در قسمت دانه‌ریز خاک مثل لای، رس و ماسه خیلی ریزدانه برای اندازه‌گیری قطر دانه‌ها از روش هیدرومتری استفاده می‌شود. این آزمایش بر اساس اندازه‌گیری وزن مخصوص یا گرم در لیتر دانه‌های خاک معلق در آب می‌باشد که باگذشت زمان به‌تدریج که دانه رسوب می‌کند وزن مخصوص مایع کاسته می‌شود. لذا میزان کاهش وزن مخصوص مبنای محاسبه مقدار و اندازه ذرات معلق در آب می‌باشد.

- **آزمایش تعیین حدود اتربرگ[1] در خاک‌ها**

رفتار تمام خاک‌ها به‌خصوص رس‌ها به نحو قابل‌توجهی در اثر وجود آب تغییر می‌کند. یک نمونه خاک رسی با توجه به درصد آب خود می‌تواند تقریباً شبیه به یک مایع عمل کند و جاری شود و یا اینکه کاملاً سخت گردد. حدود روانی و خمیری خاک‌ها به مقدار و نوع رس در خاک بستگی دارد و همین فاکتور که به حدود اتربرگ معروف می‌باشد، اساس طبقه‌بندی خاک‌های چسبنده را تشکیل می‌دهد.

- 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، به‌نحوی‌که هرگاه یک شیار با عرض استاندارد در میان خاک ایجاد گردد با تکان دادن نمونه در شرایط معین، لبه‌های شیار بسته می‌شود (مقدار رطوبتی که نمونه خاک تحت ۲۵ ضربه فاصله ۱۳ میلی‌متری تحتانی در شیار به هم وصل گردد). هدف از این آزمایش تعیین درصد رطوبتی است که در آن مخلوط آب‌وخاک به‌صورت مایع جریان پیدا می‌کند.

- 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 به‌صورت رشته‌ای به ضخامت مشخص، لوله شود آغاز به ترک‌دار شدن می‌کند. حد خمیری درواقع مرز بین حالت‌های مایع و خمیری است. هدف از این

[1] Atterberg limit

آزمایش تعیین درصد رطوبتی است که در آن خاک به حالت خمیر شکل‌پذیر باشد و کمتر از این حد خاک ترک برمی‌دارد.

- **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 می‌باشد که کاهش آن در نمونه خاک موجب کاهش در حجم خاک نگردد. حد انقباض درواقع مرز بین حالت‌های نیمه جامد و جامد خاک است. هدف از این آزمایش تعیین درصد رطوبتی است که کمتر از آن حد، خاک تغییر حجم ندهد. به‌وسیله این آزمایش اطلاعاتی به دست می‌آید که می‌توان حد انقباض، نسبت انقباض، انقباض حجمی و انقباض یک‌جهتی 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 می‌شود. این آزمایش برای تعیین درصد وزنی رطوبت خاک با چهار روش استفاده از اون، روش حمام ماسه، روش کربید کلسیم و روش پیکنومتر انجام می‌شود.

- **آزمایش‌های شیمیایی (مطابق با استانداردهای BS 1377-1990)**

وجود برخی از مواد شیمیایی مازاد بر محدوده مجاز در خاک‌ها مانند سولفات، کلراید و مقدار اسیدیته (PH) می‌تواند موجب تاثیرات مضر جدی روی مواد پوشش نگهداری تونل گردد. بنابراین پس از تعیین مواد شیمیایی در خاک در شرایطی که مقدار این مواد بیش‌ازحد مجاز باشد، باید تمهیدات لازم برای مقابله با آن‌ها 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 می‌کنند. با استفاده از این آزمایش می‌توان خصوصیات تنش-کرنش خاک‌ها و همچنین پارامترهای برشی مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک‌ها را تعیین کرد. پارامترهای برشی برای محاسبه ظرفیت ایمن باربری خاک‌ها، مقاومت برشی خاک، چسبندگی، تنش نرمال و زاویه مقاومت برشی می‌باشند.

انواع آزمایشات آزمایشگاهی برش مستقیم به شرح ذیل می‌باشد:

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 می‌گیرد و بعلاوه اجازه داده نمی‌شود که آب منفذی در حین آزمایش از نمونه خارج گردد. این آزمایش را روی هر دو نمونه دست‌خورده و دست‌نخورده می‌توان 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 می‌شود و بنابراین نمونه مزبور تحکیم می‌گردد. این آزمایش را روی هر دو نمونه دست‌خورده و دست‌نخورده می‌توان انجام داد.

ج) آزمایش زهکشی شده (CD)

در این آزمایش اجازه داده می‌شود که هرگاه آب منفذی در نمونه وجود داشته باشد، در حین اعمال تنش‌های نرمال و برشی در طول آزمایش از آن خارج شود. نمونه مورد آزمایش با سرعت تغییر شکل کم و به‌گونه‌ای برش داده می‌شود که فشار منفذی درون نمونه در تمام مدت آزمایش پیدا نکند. این آزمایش را روی هر دو نمونه دست‌خورده و دست‌نخورده می‌توان انجام داد.

- **آزمایشگاه تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌های چسبنده (مطابق با استاندارد ASTM D 6621-66)**

مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه خاک عبارت است از نسبت بار گسیختگی به سطح مقطع نمونه در شرایطی که هیچ‌گونه فشار محصورکننده بر آن وارد نشده باشد. هدف از این آزمایش تعیین تقریبی و سریع مقاومت فشاری تک‌محوری خاکی است که دارای چسبندگی کافی و مناسب جهت انجام این آزمایش می‌باشد. کاربرد آن برای خاک‌های دانه‌ریز چسبنده-اصطکاکی به‌تنهایی کافی نیست، زیرا با استفاده از این آزمایش مقاومت اصطکاکی نمونه قابل‌اندازه‌گیری نیست.

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

روش آزمایش فشاری سه محوری متنوع‌ترین و بهترین روش موجود برای آزمایش برش در خاک‌ها می‌باشد. در این روش نمونه خاک استوانه‌ای شکل تحت تنش‌های سه‌جانبه قرار می‌گیرد. با این آزمایش می‌توان پارامترهای برشی خاک را تعیین کرد.

انواع آزمایشات سه محوری که به شرایط زهکشی بستگی دارند را می‌توان 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 می‌باشد. ضریب نفوذپذیری تابع اندازه دانه‌ها، تراکم، نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک و درجه حرارت آب می‌باشد. نفوذپذیری خاک‌ها را در آزمایشگاه با یکی از روش‌های بار ثابت و یا بار افتان می‌توان اندازه‌گیری کرد.

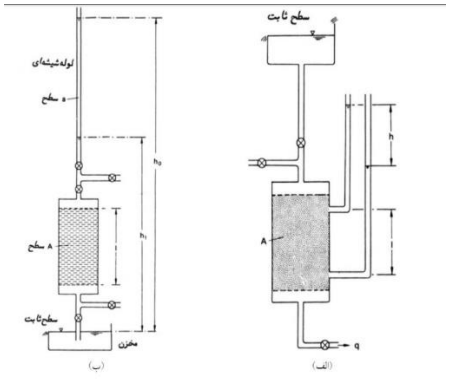
در روش بار ثابت با ثابت نگه‌داشتن سطح ارتفاع آب در داخل لوله ورودی به سطح فوقانی نمونه و جمع‌آوری مقدار آب خروجی از انتهای سطح تحتانی آن در مدت‌زمان معین، می‌توان ضریب نفوذپذیری را طبق قانون دارسی محاسبه نمود.

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 مورداستفاده 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
a: سطح مقطع لوله برای ورود آب به داخل نمونه خاک، A: سطح مقطع نمونه خاک، l: طول نمونه خاک، t: مدت زمان بین دو اندازه گیری متوالی ارتفاع آب در داخل لوله، h_1: ارتفاع آب اندازه گیری شده در داخل لوله در زمان اولیه، h_2: ارتفاع آب اندازه گیری شده در داخل لوله در زمان ثانویه، Q: 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 به‌صورت 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 تحت‌فشار کم تغییر شکل می‌دهند، مناسب نمی‌باشد. به‌عبارت‌دیگر چاله دانسیته حفرشده در خاک نرم در اثر فشار بالون تغییر شکل داده و اندازه حجم واقعی آن مشخص نمی‌شود.

- **آزمایش پرسیومتر (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 طراحی‌شده است. در آزمایش پرسیومتری، ابتدا سوند پرسیومتر داخل زمین و در عمق موردنظر قرارگرفته 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 مورداستفاده قرار می‌گیرد و به علت هزینه‌های بالای آزمایشات آزمایشگاهی تعیین مقاومت خاک، از همه متداول‌تر و همچنین دقیق‌تر می‌باشد. در آزمایش برجا روال کار به این صورت می‌باشد که ابتدا نمونه را در چندین مرحله تحت بارهای مختلف تحکیم می‌نمایند و پس‌ازآن بارهای برشی دربارهای نرمال متفاوت، به‌تدریج اعمال می‌شود 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 می‌توان پارامترهای مقاومت برشی شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی را تعیین کرد.

۳-۳- لرزه‌خیزی و تحلیل خطر زمین‌لرزه

زمین‌لرزه عبارت است از لرزش‌های قابل‌اندازه‌گیری سطح زمین است که از رها شدن ناگهانی امواج درون زمین به وجود می‌آید. آثار سطحی زمین‌لرزه ممکن است به‌صورت صدمه به سازه‌ها، گسلش و حرکت پوسته زمین، نشست زمین گسیختگی دامنه در خشکی و دریا و سرانجام ایجاد امواج در محیط‌های آبی باشد.

هدف از مطالعه مهندسی زلزله، ایجاد امکان طراحی سازه‌های مقاوم در برابر نیروهای ناشی از زمین‌لرزه است. در ادامه وجوه اصلی مطالعات مربوط به لرزه‌خیزی ارائه‌شده است.

الف) توزیع جغرافیایی و تکرار رخداد زمین‌لرزه‌ها

ب) تشخیص موقعیت زمین‌لرزه‌ها توسط تعیین محل کانون و مرکز (سطحی) آن‌ها

ج) اندازه‌گیری نیروی زمین‌لرزه‌ها، برحسب بزرگی و شدت زلزله

د) تعیین استهلاک نیروی زمین‌لرزه برحسب افزایش فاصله از کانون

ه) طول مدت اعمال نیرو

و) ویژگی‌های نیرو که به دو صورت اندازه‌گیری می‌شود، یکی دامنه جابه‌جایی برحسب شتاب گرانش افقی و قائم و دیگری مؤلفه فرکانس آن، یعنی حرکت زمین

ز) ویژگی‌های مربوط به واکنش سازه طراحی‌شده و زمین در مقابل زمین‌لرزه

خطرات ناشی از زمین‌لرزه نیز به عوامل زیر بستگی دارد:

الف) بزرگی، فرکانس و مدت زمین‌لرزه

ب) شرایط زمین‌شناسی منطقه

ج) وضعیت سازه‌های منطقه

د) نزدیکی با نواحی پرجمعیت

حرکت و عملکرد امواج زمین‌لرزه بسته به اینکه از چه محیطی بگذرد متفاوت خواهد بود. جنس و ساختمان زمین در بزرگی ایجادشده و فراوانی رخداد آن نیز نقش دارد. زمین براثر گذر امواج دچار لرزش می‌شود و درنهایت ممکن

است بخش‌هایی از آن گسیخته شده و جابه‌جائی‌ها و گسل‌هایی به وجود آید. براثر 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 قرارگرفته و سپس نحوه استهلاک زمین‌لرزه ارزیابی می‌شود. به‌این‌ترتیب 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. درصورتی‌که 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 براثر گسیختگی ایجاد خواهد شد (عموماً به طول گسیختگی بستگی دارد).

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

۵- برآورد شتاب زمین‌لرزه 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 ایالات‌متحده و ژاپن، با توجه به داده‌های لرزه‌خیزی فراوانی که در دست است، چندین رابطه در مورد رابطه گسل و زمین‌لرزه ارائه‌شده است که از آن میان می‌توان موارد زیر را نام برد:

الف) رابطه طولی گسیختگی گسل با بزرگی زمین‌لرزه حاصل

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

ج) رابطه میزان جابه‌جایی گسل با بزرگی زمین‌لرزه

- **توان لرزه زایی گسل‌ها**

بزرگی زمین‌لرزه‌ای که به سبب جنبش دوباره پاره‌ای از درازای گسل روی می‌دهد را توان لرزه زایی گسل می‌گویند که با درازای بخش جابه‌جاشده آن در ارتباط است. در زمین‌لرزه‌های بزرگ طول مدت لرزش نیز تا حد زیادی به طول گسیختگی وابسته است. به‌این‌ترتیب که هرچه طول بخش گسل خورده بیشتر باشد، طول مدت‌زمان دریافت امواج زمین‌لرزه در یک محل خاص بیشتر می‌شود.

مطالعات زیادی در رابطه با بزرگی زمین‌لرزه و درازای گسل انجام‌شده و روابط تجربی زیادی هم دراین‌ارتباط ارائه گردیده است. در ذیل تعدادی از این روابط ارائه‌شده است:

نوروزی (۱۹۸۵)	رابطه ۳ -۱	$Ms = Log(L_1) + 5.4$
آمبرسیز (۱۹۹۸)	رابطه ۳-۲	$Ms = 4.629 + 1.429Log(L_1)$
کاپراسمیت-ولز (۱۹۹۰)	رابطه ۳-۳	$Mw = 5.16 + 1.12Log(L_1)$
بونیلا (۱۹۸۴)	رابطه ۳-۴	$Ms = 5.17 + 1.237\ Log(L)$
زارع (۱۳۷۴)	رابطه ۳-۵	$Mw = 3.66 + 0.91\ Ln(L_2)$
	رابطه ۳- ۶	$Ms = 6.03 + 0.76Log(L)$

که در این روابط: L طول گسل، L1 طول ۵۰ درصد از L، L2 طول ۳۷ درصد از L برحسب کیلومتر و Ms و Mw بزرگی زمین‌لرزه می‌باشند.

- **جابجایی گسل**

در سال‌های اخیر بررسی‌های متعددی برای تعیین رابطه بین مقدار جابه‌جایی و طولی از گسل که در آن جابه‌جایی رخ‌داده و همچنین بزرگی زمین‌لرزه حاصله، صورت گرفته است. میزان جابه‌جایی در طول گسل ممکن است از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت باشد، تا حدی که برخی از گسل‌ها ممکن است اصلاً جابه‌جایی نشان ندهند. بااین‌حال میزان جابه‌جایی گسل را به‌طورکلی می‌توان با بزرگی زمین‌لرزه طبق رابطه ذیل محاسبه کرد:

$$Ms = 6.95 + 0.723Log(D)$$ **رابطه ۳- ۷**

که در آن، D میزان جابه‌جاشدگی گسل برحسب متر می‌باشد.

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 جابه‌جاشدگی گسل‌ها بر اساس توان لرزه زایی محاسبه می‌شود.

۳-۳-۲- رفتار خاک در برابر زمین‌لرزه

براثر اعمال تنش برشی به خاک، که ناشی از امواج زمین‌لرزه رسیده از سنگ بستر است، خاک تحریک می‌شود. خاک‌ها را می‌توان با توجه به پاسخی که حرکات سنگ بستر می‌دهند، به دو گروه تقسیم کرد.

- خاک‌های پایداری که با تغییر شکل کشسان و خمیرسان باعث میرایی حرکت لرزه‌ای می‌شوند، بااین‌حال هنوز تا حدی مقاومت خود را حفظ می‌کنند.
- خاک‌های ناپایدار که به‌طور ناگهانی متراکم شده یا براثر آب‌گونگی به‌طور کامل مقاومتشان را از دست می‌دهند.

لرزش‌های ناشی از زمین‌لرزه می‌تواند چند پدیده مهم را در خاک باعث شود که عبارت‌اند از:

- تراکم خاک‌های دانه‌ای که منجر به نشست سطح زمین می‌شود و می‌تواند در محدوده وسیعی اتفاق بیافتد.

- آب‌گونه شدن ماسه‌های ریز و ماسه‌های لای دار که منجر به از بین رفتن کامل مقاومت خاک شده و باعث نشست و حتی برگشتن سازه‌ها و گسیخته شدن دامنه‌ها می‌شود.

- کاهش مقاومت در خاک‌های چسبنده نرم که منجر به نشست سازه‌ها شده و می‌توان برای سال‌ها ادامه داشته باشد. این پدیده براثر نوعی آبگونی نیز حاصل می‌شود.

- پدیده روانگرایی: روانگرایی به واکنش خاک در برابر بارهای دینامیکی یا تحریک ناشی از امواج برشی زودگذر اطلاق می‌شود که درنتیجه آن مقاومت خاک به‌طور کامل از بین رفته و خاک حالتی آب‌گونه به خود می‌گیرد.

۳-٤- مطالعات ژئوفیزیکی

ژئوفیزیک پدیده‌های فیزیکی زمین را شامل پدیده‌های مغناطیسی، الکتریکی، ثقل زمین، زمین‌لرزه و انتشار امواج در داخل زمین را موردمطالعه قرار می‌دهد. روش‌های ژئوفیزیک اکتشافی را به دو طریق مختلف می‌توان طبقه‌بندی کرد:

۱- طبقه‌بندی بر اساس خصوصیات فیزیکی ازجمله وزن مخصوص، خصوصیات مغناطیسی، سرعت انتشار امواج در سنگ‌های مختلف، خصوصیات الکتریکی و خصوصیات رادیواکتیو.

۲- طبقه‌بندی بر اساس طبیعی یا مصنوعی بودن پدیده‌ها، که بر اساس روش‌های ژئوفیزیکی به دودسته تقسیم می‌شوند:

الف) روش‌های مستقیم: در این روش از وجود میدان‌های طبیعی در زمین نظیر مغناطیس زمین و میدان ثقل استفاده می‌شود.

ب) روش‌های غیرمستقیم: در این روش‌ها یک تحریک مصنوعی در زمین ایجادشده و واکنش آن ثبت می‌شود. مانند روش‌های الکتریکی و لرزه‌نگاری.

در مورد پروژه‌های مهندسی بزرگ، مطالعات ژئوفیزیکی ممکن است به‌منظور به دست آوردن داده‌های زیرزمینی در یک ناحیه وسیع و با هزینه معقول، جزئی از بررسی‌های صحرایی باشد. داده‌های به‌دست‌آمده ممکن است باعث کمک به حذف گزینه‌های نامساعد، تعیین موقعیت گمان‌های اکتشافی در نواحی حساس و جلوگیری از تکرار حفاری‌های غیرضروری در زمین‌های نسبتاً یکنواخت جلوگیری کند. برداشت‌های ژئوفیزیکی نه‌تنها به‌موقعیت گمانه‌ها کمک می‌کند، بلکه تغییرات وضعیت زیرزمینی بین گمانه‌ها را نیز آشکار می‌سازد. در مکانی که گمانه‌ها حفرشده‌اند داده‌هایی در مورد لایه‌ها به دست می‌دهند ولی در مورد زمین مابین آن‌ها اطلاعات کافی ارائه نمی‌دهند. در زمینه تعبیر و تفسیر و انطباق نتایج ژئوفیزیکی، گمانه‌ها نقش اساسی را بر عهده‌دارند و ترکیب مناسبی از روش‌های مستقیم و غیر مستقیم اغلب منجر به نتایج باکیفیت خوبی می‌شود.

هدف از اکتشافات ژئوفیزیکی کشف پدیده‌های زمین‌شناسی از روش‌های غیرمستقیم است. در روش‌های مختلف ژئوفیزیکی، یکی از ویژگی‌های زمین در نقاط مختلف اندازه‌گیری می‌شود و هرگاه بین مشخصه فیزیکی طبقات موردبررسی و زمین اطراف تفاوت چشمگیری وجود داشته باشد با تجزیه‌وتحلیل داده‌های حاصل، می‌توان به وجود طبقات موردنظر پی برد. از مزایای روش‌های ژئوفیزیکی می‌توان به مقرون‌به‌صرفه بودن، سرعت و عدم نیاز به حفاری را نام برد. البته اطلاعات حاصل از روش‌های ژئوفیزیکی قطعی نیست و در بسیاری موارد باید نتایج حاصله را با استفاده از روش‌های دیگر تأیید کرد. درواقع مهم‌ترین کاربرد ژئوفیزیک در اکتشاف ساختگاه تونل‌ها، تعیین موقعیت‌های غیرعادی است که باید به‌وسیله روش‌های مستقیم و دقیق‌تر بررسی شوند. برنامه‌ریزی و انجام دادن بررسی‌های ژئوفیزیکی در مراحل مختلف طرح باید متناسب با اهداف هر مرحله و ابعاد منطقه موردمطالعه باشد. جدول ۳- ۴ کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی را نشان می‌دهد. از میان این روش‌ها برداشت‌های مقاومت ویژه الکتریکی، برداشت‌های گرانی سنجی، برداشت‌های لرزه‌ای و برداشت‌های الکتریکی GPR[1] که در مطالعه ساختگاه تونل کاربرد بیشتری دارند.

[1] Ground Penetrating Radar

جدول ۳- ۴- کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی

روش آزمایش	کاربرد
گرانی سنجی	چگالی زمین را اندازه گیری می‌کند و توسط آن می‌توان از تغییرات جانبی 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 می‌یابد.
مغناطیس سنجی	شدت جریان مغناطیسی را اندازه گیری می‌کند. در هر نوع زمین و مخصوصاً سنگهای آذرین قابل اجراست. کاربرد آن عمدتاً در تعیین محل اجسام فلزی(مثل لوله‌های فلزی) و نیز نشان دادن محل گسلهاست.
مقاومت مخصوص	هدایت الکتریکی سنگها را اندازه گیری می‌کند. 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 لایه‌های آب دار و تعیین سطح ایستایی سفره آب و همچنین سنگ بستر استفاده می‌شود.
الکترومغناطیسی	از این روش در بخشهای نزدیک به سطح و در هر نوع زمین می‌توان استفاده کرد. با این تذکر که این روش کاربرد محدودی دارد و بیشتر برای تعیین محل لایه‌های آبدار بکار می‌رود.
لرزه نگاری	زمان حرکت امواج ناشی از انفجار یا ضربه را تعیین می‌کند. در هر نوع زمین و تا عمق حداکثر ۳۰۰ متر موثر است. از آن در شناسائی عمق سنگ بستر، تعیین سرعت امواج P و S که در تعیین مشخصات فیزیکی و ساختمانی زمین به کار می‌آیند و تشخیص محل گسستگیهایی مانند گسل استفاده می‌شود. برای لایه‌های پرشیب نامناسب و در کارهای کوچک غیراقتصادی است. به طور کلی روشی پر هزینه است ولی می‌تواند 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 می‌دهد.
بررسی تلویزیونی	از تازه‌ترین و کاراترین روشها است و توسط آن زمین شناس و مهندس طراح می‌تواند 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 لرزه‌ای از امواج الکتریکی استفاده می‌شود ولی در اعماق بیش از ۵۰ متر کاربرد ندارد.

فصل چهارم

ساختار شکست تونل

٤- ٤- ساختار شکست تونل

٤-١- 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.

٤-٢- ماهیت و اصول کلی تدوین ساختار شکست کار

٤-٢-١- 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.

٤-۲-۲- 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[1] 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.

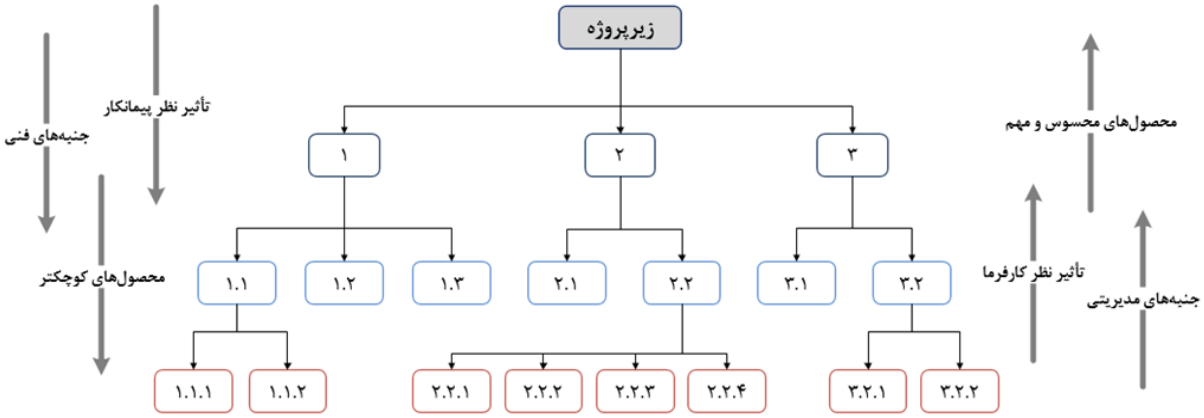
نکته مهم در نظر گرفتن ساختار شکست براساس تحویل‌شدنی‌ها است. این مسئله، مفهومی گسترده و الزاماتی فراوان دارد که عملاً کل مطالب این فصل در این حوزه خواهد بود. تمامی مطالب ذکرشده در این فصل، عملاً توضیحی برای این موضوع است که چگونه می‌توان ساختار شکست کار را به نحوی تهیه کرد که واقعاً مبتنی بر تحویل‌شدنی‌ها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

---

[1] Cash Flow

٤-۲-۳- تحویل‌شدنی[1]

همان‌طور که ذکر شد، تحویل‌شدنی محصول، نتیجه یا قابلیتی منحصربه‌فرد و قابل ارزیابی است که وجودش برای تکمیل یک فرآیند، فاز یا پروژه الزامی است. معمولاً تحویل‌شدنی در مفهومی خاص‌تر به معنای تحویل‌شدنی‌های خارجی، یعنی تحویل‌شدنی‌هایی که باید به تائید کارفرما یا حامی برسند، به کار می‌رود. تحویل‌شدنی‌هایی 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، تحویل‌شدنی‌هایی قرار می‌گیرند که به تأیید رسمی کارفرما نمی‌رسند. این تحویل‌شدنی‌ها معمولاً در سطوح میانی ساختار شکست کار قرار می‌گیرند. درنهایت، تحویل‌شدنی‌هایی در سطوح پایین قرار می‌گیرند که عمدتاً اهمیت فنی دارند و نه مدیریتی. بسیاری از این تحویل‌شدنی‌ها برای کارفرما معنای خاصی ندارد و توجه وی عمدتاً معطوف به تحویل‌شدنی‌های عمده‌ای است که در سطوح بالای ساختار قرار می‌گیرند. سطوح بالای ساختار شکست کار، نه‌تنها 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

٤-۲-٤- الزامات ساختار شکست کار

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

[1] Deliverable

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 ساختـار شکست کار کافی نیست و باید علاوه بر آن مناسب نیز باشد. مناسب بودن ساختـار 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.

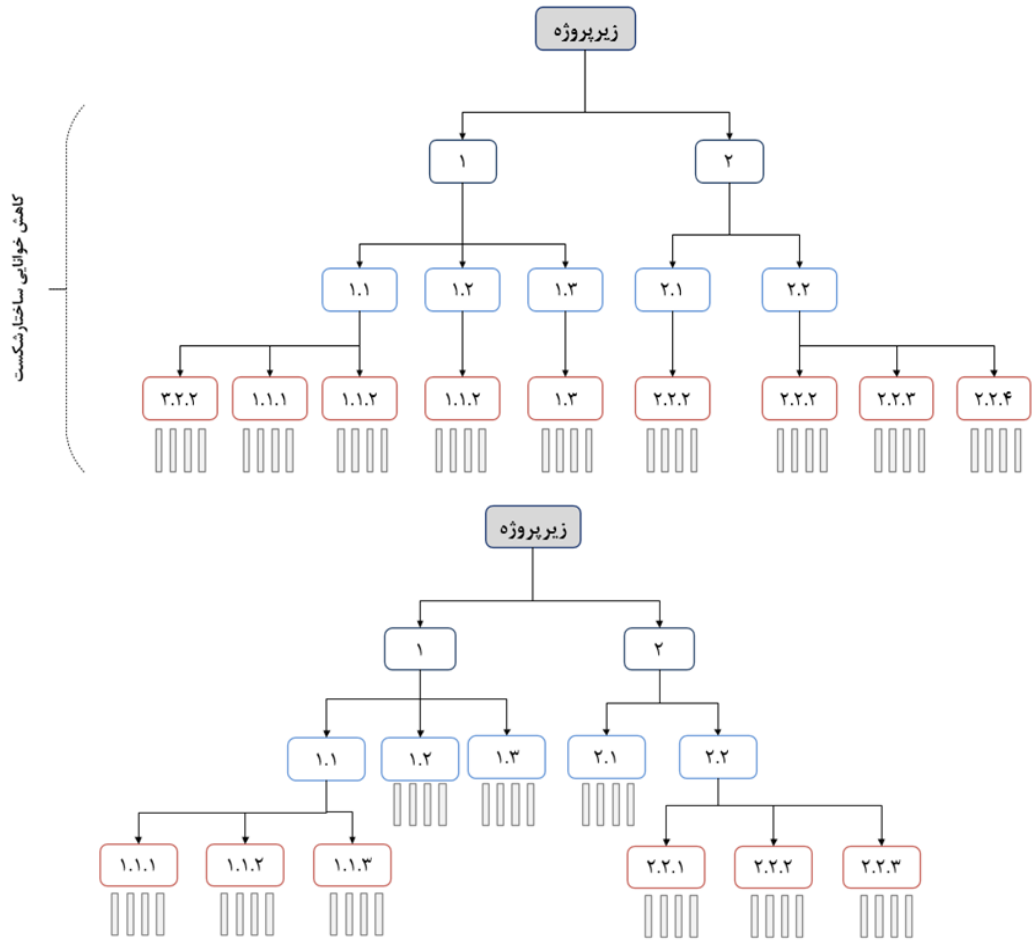
چگونه می‌توان ساختار شکست کار را مبتنی بر تحویل‌شدنی‌ها طراحی کرد؟

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 به‌عبارت‌دیگر 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.

٤-۲-۵- محل قرارگیری فعالیت‌ها

نیازی نیست که تمام فعالیت‌های پروژه در سطح یکسانی قرار داشته باشند و به‌عبارت‌دیگر 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 نظمی ظاهری است که بر اساس یکدستی به وجود می‌آید (شکل ۴- ۳).



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

٤-۲-٦- شیوه نام‌گذاری عناصر بر اساس مبنا بودنِ 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

نشان‌دهنده محصول

مناسب برای عناصر ساختار شکست کار

عبارت فعلی

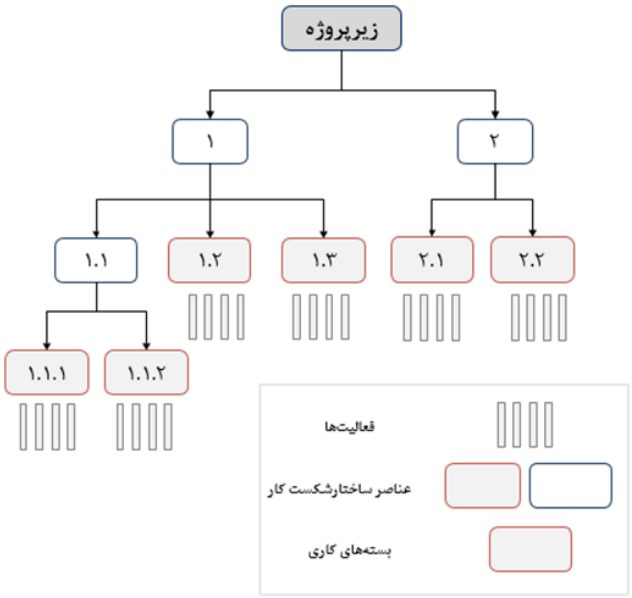
اجرای دیوارهای داخلی طبقه سوم

نشان‌دهنده کار

مناسب برای فعالیت‌ها

اهمیتی ندارد که پروژه را چگونه انجام می‌دهیم (با انجام چه کارهایی)، مهم این است که خروجی‌ها (تحویل‌شدنی‌ها) را بر اساس مشخصات اولیه (ازجمله کیفیت) تحویل دهیم. باید تمرکزمان بر خروجی‌ها باشد تا موفق شویم، نه بر کارها. درواقع کارها دائماً تغییر می‌کنند و خروجی‌ها ثابت هستند. به‌عبارتی دیگر کارها ابزار و خروجی‌ها هدف هستند. بدیهی است که با چنین دیدگاهی، برنامه‌ریزی نیز باید کاملاً محصول محور باشد و در این میان تهیه ساختار شکست کار بیشترین سهم را از این دیدگاه می‌برد.

تقریباً تمام مشخصات هر عنصر ساختار شکست کار بر اساس زیرمجموعه‌هایش تعریف می‌شود. به‌عنوان‌مثال، گستره آن برابر با مجموع گستره زیرمجموعه‌هایش است (قاعده ۱۰۰ درصد)، ریسک‌هایش ترکیب ریسک‌های زیرمجموعه‌هایش است، الزام‌هایش ترکیب الزام‌های زیرمجموعه‌هایش و غیره بر این اساس اکثر عناصر ساختار شکست کار نیاز خیلی زیادی به راهنما ندارند، مگر عناصر آخرین سطح ساختار شکست کار که زیرمجموعه‌ای به‌جز فعالیت‌ها ندارند. به عناصر آخرین سطح ساختار شکست کار که میزبان فعالیت‌ها خواهند شد، بسته کاری گفته می‌شود (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. بااین‌حال تفاوت عمده‌ای بین عناصر ساختار شکست کار، یعنی تحویل‌شدنی‌ها و فعالیت‌ها وجود دارد. خیلی اوقات کارها تغییر می‌کنند (به‌عنوان‌مثال 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.

٤-۲-۷- سطوح استاندارد ساختار شکست کار

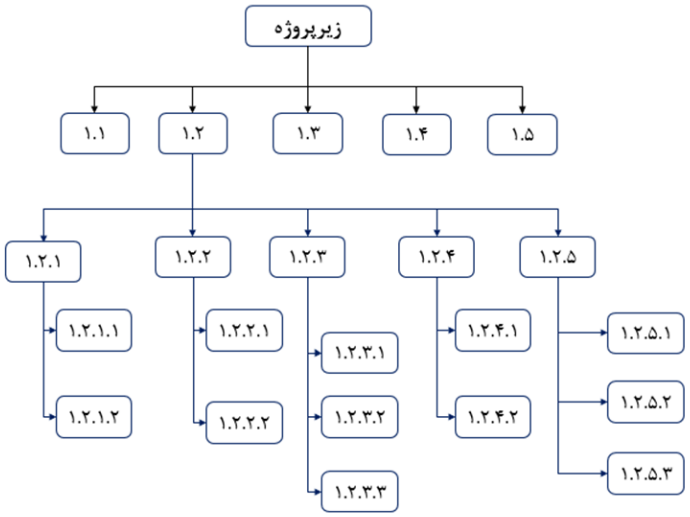
ساختار شکست کار تا سطح چندم تنظیم شده است؟

فرض شود "سطح پنجم". مخاطب چه چیزی می‌تواند 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 قالب‌بندی مشابهی دارند؟ قطعاً اینطور نیست. این نوع سؤال‌ها با این فرض پرسیده می‌شوند که ساختاری استاندارد وجود دارد. اما چنین استانداردی وجود ندارد و نمی‌تواند هم وجود داشته باشد، چون پروژه ماهیتاً منحصربه‌فرد است و نمی‌توان قالب مشابهی برای تمام پروژه‌ها در نظر گرفت.

٤-۲-۸- شماره‌گذاری عناصر ساختار شکست کار

رسم بر این است که آیتم‌های ساختار شکست کار با شماره‌های سلسله مراتبی مشخص شوند. بنابراین طراحی صحیح و توسعه ساختار شکست کار، با سیستم کدگذاری و اصطلاحات یکسان، مبنای مشترکی برای مدیریت پروژه و شالوده‌ای برای نظارت و کنترل هزینه، زمان‌بندی و مشخصات کاری بوجود می‌آورد. کد یک روش مختصرگویی اطلاعات یک آیتم می‌باشد. این آیتم می‌تواند از کل پروژه تا یک بخش کوچک پروژه (فیزیکی و غیر فیزیکی) را شامل گردد. برای کدبندی عناصر ساختار شکست استاندارد خاصی وجود ندارد. معمولاً برای سطوح مختلف از اعداد استفاده می‌گردد. برای مثال کد "۱.۲.۳ " به معنای این است که این عنصر ساختار شکست در سومین سطح ساختار شکست قراردارد، چون دارای سه شماره می‌باشد و شماره اعداد هم نشان‌دهنده روند توسعه درختی برای کدامین شاخه می‌باشد که از سطوح بالاتر به ارث برده است (شکل ۴- ۵).

در این نشریه شماره‌گذاری ساختار شکست بر اساس سلسله مراتبی از اعداد می‌باشد، که این شماره از بالاترین سطح و از شماره ۱ شروع می‌شود و با پایین آمدن در هر سطح شماره آن تغییر می‌کند. شکل ۷ فرآیند شماره‌گذاری ساختار شکست را نشان داده است.



شکل ۴- ۵- شماره‌گذاری 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 نه‌تنها باید سطح مقطع داخلی موردنیاز، نگهداری‌ها، لاینینگ، زهکشی، عایق‌بندی و همگرایی پس از حفاری بلکه باید پایداری طولانی‌مدت 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 تقسیم‌بندی حفاری هدینگ (طاق) و گام حفاری[1] دارد. بنابراین تقسیم‌بندی حفاری هدینگ، مقطع حفاری و گام حفاری باید بر اساس پایداری جبهه کار و با در نظر گرفتن روش‌های 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 می‌شوند پرهیز شود. سطح مقطع حفاری زمانی اهمیت ویژه‌ای می‌یابد که لاینینگ برای نگهداری بارها طراحی می‌شود زیرا هنگامی‌که بارهای بسیار بزرگی به آن وارد می‌شود نصب کفبند بتنی[2] و یا طراحی مقطع دایره‌ای باید موردمطالعه قرار گیرد. هنگام قراردادن کفبندها [3]، قسمت انتقالی[4] بین دیوار جانبی و کفبند باید تا حد امکان دارای انحنای بزرگ باشد.

۲- سطح مقطع حفاری باتوجه به روش حفاری

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

۳- شرایط محل و مقطع حفاری

در طراحی مقطع حفاری باید شرایط زمین و محل حفاری مانند وجود سازه‌های مجاور موردمطالعه 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 موردمطالعه 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[1] (مقطعی) مانند روش بنچ 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 قابل‌اجرا شامل الف) روش پیشروی دریف جانبی ب) روش برش بنچ و روش برش بنچ 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 انتخاب‌شده 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.

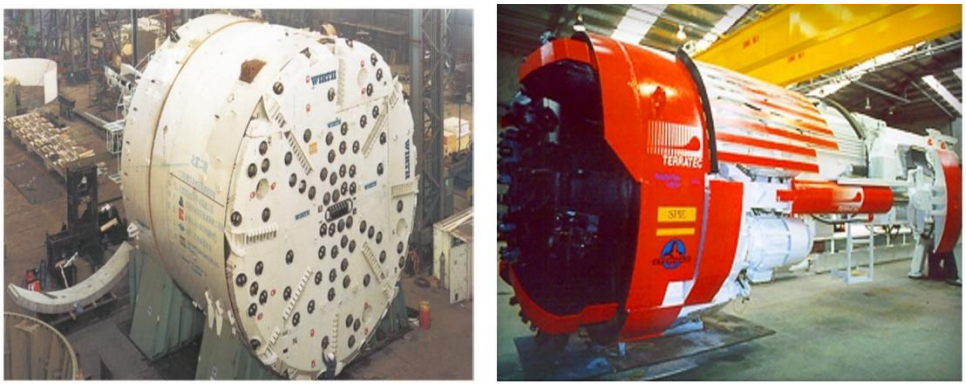
---

[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[1] می‌نامند، تکامل و گسترش این دستگاه‌ها سبب شده است که نرخ پیشروی تونل‌ها در حد قابل‌توجهی افزایش یابد.

به‌طورکلی 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[2] و ماشین‌های سپردار[3] در شکل ۵- ۱ نشان داده‌شده 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 فضاهای 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[4] 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 دمونتاژ 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[1] 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 براین دسترسی به جبهه‌کار، 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 سینه‌کار 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 مورداستفاده به‌نحوی‌که 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 به‌دقت 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 برسازه‌های 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 تاثیرات 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

ماشین‌حفاری چال انفجاری با در نظر گرفتن ویژگی سنگ شناسی، اندازه و شکل مقطع تونل، وضعیت زمین و غیره انتخاب می‌شود. همچنین خرج‌گذاری باید به‌طور ایمن مطابق با برنامه انفجار و نوع ماده منفجره متناسب با وضعیت جبهه کار و تجهیزات موجود انتخاب شود. درنهایت انفجار باید دقیق و ایمن انجام شود و تا زمانی که انفجار به‌کلی 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.

۵-۱-۲-٤- 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.

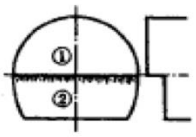
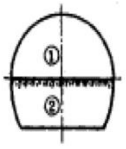
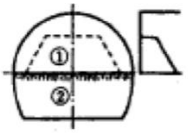
یکی از مهم‌ترین کاربردهای این روش احداث تونل‌ها و ایستگاه‌های مترو است. همچنین برای احداث گذرگاه‌های زیرزمینی، کانال‌های لوله آب، فاضلاب و کابل‌های برق نیز از این شیوه استفاده می‌شود.

۵-۱-۳- مقطع حفاری

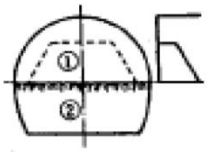
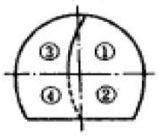
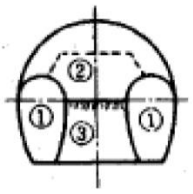
در جدول ۵- ۱ انواع مقاطع حفاری، شرایط کاربرد، مزایا و معایب ارائه‌شده است.

جدول ۵- ۱: طبقه‌بندی و ویژگی‌های روش‌های استاندارد حفاری

روش حفاری	شکل	شرایط زمین قابل‌اجرا	مزایا	معایب
روش تمام مقطع		- روش متداول حفاری برای مقاطع کوچک - زمین بسیار پایدار برای تونل مقطع بزرگ $A>60m^2$ - زمین نسبتاً پایدار برای تونل مقطع متوسط $A>30m^2$	- 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 بنچ کمکی در صورت نیاز استفاده می‌شود.

روش حفاری		شکل	شرایط زمین قابل‌اجرا	مزایا	معایب
			- نامناسب برای زمین‌های خوب و در هم آمیخته با زمین‌های ضعیف که ممکن است نیاز به تغییر روش حفاری داشته باشد.		- سنگ‌های خردشده ممکن است از بالای تونل سقوط کنند و اقدامات ایمنی بیشتری لازم است.
روش تمام مقطع با بنچ کمکی		 Bench length = 2~4m	- زمین نسبتاً پایدار که استفاده از روش تمام مقطع دشوار باشد. - حفاری تمام مقطع در طول حفر دشوار شود. - وجود زمین ضعیف[1] در زمین نسبتاً خوب	- به کارگیری تعداد کارگر کمتر در صورت مکانیزه کردن و حفاری موازی هد و بنچ - مدیریت ساخت ازجمله کنترل ایمنی به دلیل حفاری تک مقطعی آسان است.	- تغییر به روش‌های دیگر حفاری هنگامی‌که جبهه کار پایدار نیست دشوار است.
روش برش بنچ	برش بنچ طولانی	 Bench length>50m	جبهه کار نسبتاً پایدار است، اما حفاری تمام مقطع دشوار است	- حفاری یک در میان[2] هد و بنچ نیاز به تجهیزات و نیروی انسانی را کاهش می‌دهد.	- حفاری یک در میان طول مدت ساخت را افزایش می‌دهد.
	برش بنچ کوتاه	 D < Bench length≤ 50m	- قابل‌استفاده 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 بنچ دشوار می‌کند.

[1] Poor ground
[2] Alternate

روش حفاری		شکل	شرایط زمین قابل‌اجرا	مزایا	معایب
مینی بنچ[1]		 Bench length <D.	- کنترل تغییر شکل مقطع داخلی حفاری‌شده به فوریت بیشتری نسبت به برش بنچ کوتاه موردنیاز است. - در زمین‌های مچاله شونده که نیاز به کنترل زود هنگام سطح مقطع است.	- نصب زود هنگام کفبند آسان است.	- برای حفاری هد داربست موردنیاز است. - انتخاب ماشین‌های حفاری برای هد محدود می‌شود.
روش دیافراگم میانی		 One method is to provide a diaphragm only to	- زمین با روباره کم که نیاز است نشست حداقل باشد. - وضعیت نسبتاً ضعیف زمین برای تونل با سطح مقطع بزرگ	- پایداری جبهه کار با تقسیم بر مقطع‌های کوچک حاصل می‌شود. - نشست سطح زمین را می‌توان به میزان قابل‌توجهی کاهش داد. - مقطع‌های تقسیم هد به نسبت هد استفاده‌شده در روش جانبی بزرگ‌تر هستند می‌توان از ماشین‌های بزرگ‌تر استفاده کرد.	- جابه‌جایی یا نشست در حین برداشتن دیافراگم باید بررسی شود. - زمان حذف دیافراگم به دوره ساخت اضافه می‌شود. - به‌کارگیری یک روش کمکی خاص در تونل دشوار است.
روش دریف جانبی			- ظرفیت باربری زمین برای به‌کارگیری روش برش بنچ کافی نیست. - زمین با روباره کم که نیاز است نشست حداقل باشد.	- نشست سطح زمین را می‌توان کاهش داد. -دیافراگم‌های موقت را می‌توان راحت‌تر از دیافراگم‌های مرکزی برداشت.	- برای حفاری دریف ها باید از ماشین‌های کوچک استفاده شود.

[1] Mini bench cut

۵-۲- طراحی سیستم پیش تحکیم

۵-۲-۱- کلیات

بهسازی یا تقویت زمین برای تونل‌سازی در زمین های نرم و شرایط ژئوتکنیکی مشکل ضروری است. در زمین‌های رانشی[1] همچون ماسه‌ها با لایه‌های آبدار، سنگ‌های مچاله شونده[2] 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

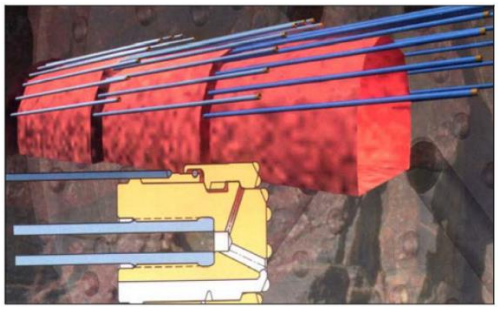
در روش‌های فورپولینگ عمدتاً چال‌هایی به‌موازات محور تونل از بالای سینه‌کار حفر می‌شود و تثبیت سینه‌کار و زمین اطراف با نصب لوله‌های فولادی، پلی‌اتیلن و فایبرگلاس و انجام تزریق در این چال‌ها و اطراف آن صورت می‌گیرد به بیان دیگر در این روش چتر حفاظتی بر روی تونل تشکیل می‌گردد.

مزایای استفاده از روش فورپولینگ به شرح ذیل می‌باشد:

۱- این روش ازنظر اجرا بسیار ساده است و نیاز به ماشین‌آلات خاص که خارج از محدوده تونل‌سازی به‌صورت متعارف می‌باشد ندارد و یک روش انعطاف‌پذیر و قابل ترکیب با دیگر تکنیک ها 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 فورپلینگ

[1] Running ground
[2] Squeezing rock

۵-۲-۳- تزریق

تزریق روشی است که به‌وسیله 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: به‌عنوان روش‌های حفاظتی[1] قبل از حفر تونل که به آن پیش تزریق[2] می‌گویند یا به‌عنوان روش‌های بهسازی[3] پس از حفر تونل که به آن پسا تزریق[4] می‌گویند.

۵-۲-٤- انجماد

در این روش هدف پایین آوردن دمای آب موجود در فضاهای خالی توده خاکی و سنگی به زیر نقطه انجماد آن است. آب‌های منجمد شده به‌عنوان یک سیمان عمل کرده لذا زمان خود ایستایی زمین افزایش می‌یابد. عموماً مواد مورداستفاده 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 ازجمله 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 به‌تنهایی یا به‌صورت ترکیبی استفاده می‌شوند:

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

[1] Preserving intervention method
[2] pre-grouting
[3] Improvement methods
[4] 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:

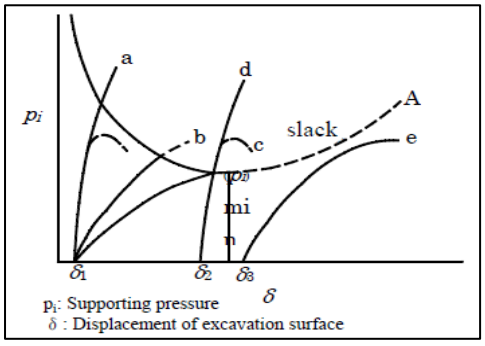
- اعمال فشار محصور به زمین اطراف دیواره تونل
- نگهداری بلوک‌های رها شده
- بهسازی و تحکیم زمین

توجه روزافزون به هزینه تونل‌سازی منجر بـه تحقیقـات بیـشتر بـرای بهینـه‌سازی 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 جبهه‌کار نصب می‌شود، همه بار روی این سیستم منتقل نمی‌شود، بلکه قسمتی از بار که در اطراف فضای حفاری توزیع مجدد یافته، توسط خود سینه‌کار تحمل می‌شود. با پیشروی تونل تأثیر سینه‌کار 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 به‌گونه‌ای طراحی شود که تونل و زمین دربرگیرنده پایدار باشند بنابراین باید به‌صورت 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)

هنگامی‌که فشار زمین (Pi) حداقل باشد، سیستم نگهداری بهینه می‌باشد اما همیشه یافتن چنین نقطه‌ای آسان نیست. گاهاً 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 ازجمله مقاومت، سختی و غیره را نیز در نظر گرفته و جهت جلوگیری از اثرات نامطلوب پیش‌بینی‌شده، معیارهای کنترلی تعیین شوند.

۲. سیستم نگهداری به‌گونه‌ای 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 جبهه‌کار، 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

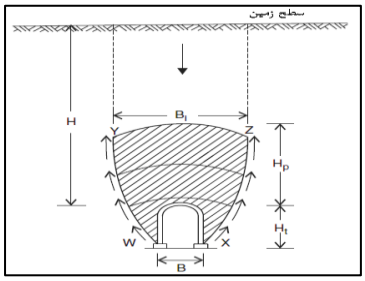
عمده بارهای وارده بر ساختمان تونل‌ها، فشار آب زیرزمینی و فشار توده سنگ دربرگیرنده است. بارهای زنده ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه را بدون این‌که خدشه‌ای به پایداری تونل وارد شود، می‌توان نادیده گرفت. البته به‌جز در مواردی که تونل در عمق بسیار کم و به روش کند و پوش حفر می‌شود.

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، مدت‌زمانی 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 ارائه‌شده، 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 رده‌بندی بار سنگ ترزاقی

این تئوری احتمالاً اولین طبقه‌بندی موفق توده سنگ در فضاهای زیرزمینی می‌باشد. 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 می‌باشد. ترزاقی با در نظر گرفتن ناپیوستگی‌های ساختاری توده سنگ، آن‌ها را به‌طور کیفی به ۹ کلاس مطابق جدول ۵- ۲ طبقه‌بندی کرد.



شکل ۵- ۴- مفهوم بار سنگ در تونل‌ها (رده‌بندی ترزاقی)

ترزاقی با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از یک تونل راه به عرض ۵.۵ متر که توسط قاب‌های فولادی نگهداری می‌شد.، 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:

رابطه ۵-۱

$$\boldsymbol{Pv = \gamma \cdot Hp}$$

در این رابطه:

Pv: فشارقائم وارد بر نگهداری

γ: دانسیته توده سنگ

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

جدول ۵- ۲- طبقه‌بندی کلاس‌های سنگی مختلف بر اساس تئوری بارسنگ ترزاقی

کلاس سنگ	وضعیت سنگ	توضیحات
I	سخت و یکپارچه	سنگ بدون هوازدگی بوده و درزه و ترک‌های مویی در آن مشاهده نمی‌شود. در صورت خرابی، شکست سنگ در سنگ بکر به وجود می‌آید. پس از حفاری، ممکن است سنگ دچار گسیختگی ناشی از پوسته پوسته‌شدن سقف گردد. در تنش‌های بالا، پوسته پوسته‌شدن شدید و ناگهانی در سنگ‌های سقف و دیواره روی می‌دهد. مقاومت فشاری تک‌محوره بزرگتری یا مساوی ۱۰۰ مگاپاسکال می‌باشد.
II	سخت، لایه‌ای با شیستوز	سنگ سخت و لایه‌ای می‌باشد. فاصله لایه‌ها معمولاً زیاد است. ممکن است سنگ دارای صفحات ضعیف باشد یا نباشد. در چنین سنگ‌هایی، پوسته پوسته‌شدن کاملاً متداول است.
III	توده‌ای و نسبتاً درزه‌دار	یک توده سنگ درزه‌دار که فاصله درزه‌ها زیاد می‌باشد. درزه‌ها می‌توانند سیمانه شده یا نشده باشند. همچنین سنگ می‌تواند دارای ترک‌های مویی بوده ولی بلوک‌های بزرگ بین درزه‌ها شدیداً قفل شده‌اند به‌طوری‌که دیواره‌های قائم نیازی به نگهداری جانبی ندارند. ممکن است پوسته پوسته‌شدن نیز رخ دهد.

کلاس سنگ	وضعیت سنگ	توضیحات
IV	نسبتاً بلوکی و رگه‌ای	درزه‌ها فاصله کمتری دارند. العاد بلوک‌ها در حدود ۱ متر می‌باشند. سنگ ممکن است سخت یا نرم باشد. درزه‌ها ممکن است جوش‌خورده 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 ازنظر شیمیایی یکپارچه	شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های خردشده که ازنظر شیمیایی یکپارچه می‌باشند. هیچ قفل‌شدگی وجود ندارد. انتظار می‌رود که فشار جانبی قابل‌ملاحظه‌ای برنگهداری 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 موجودر کلاس‌های سنگ مختلف

کلاس سنگ	وضعیت سنگ	فاکتور بار سنگ H_P	ملاحظات
I	سخت و یکپارچه	۰	اگر پوسته پوسته‌شدن و یا ترکیدن اتفاق می‌افتد پوشش سبک لازم می‌باشد
II	سخت، لایه‌ای با شیستوز	(۰–۰/۵) B	نگهداری سبک فقط برای محافظت در برابر پوسته پوسته‌شدن است. بار وارده از نقطه‌ای به نقطه دیگر به‌طور غیرقابل پیش‌بینی تغییر می‌کند.
III	توده‌ای و نسبتاً درزه‌دار	(۰–۰/۲۵) B	بدون فشار جانبی
IV	نسبتاً بلوکی و رگه‌ای	۰/۲۵B–۰/۳۵ $(B+H_t)$	بدون فشار جانبی
V	بسیار بلوکی و رگه‌ای	(۰/۳۵ – ۱/۱۰) $(B+H_t)$	بدون فشار جانبی و یا فشار جانبی کم
VI	کاملاً خردشده اما ازنظر شیمیایی یکپارچه	۱/۱۰ $(B+H_t)$	فشار جانبی قابل ملاحظه. به علت نرم شدگی ناشی از نشت آب به طرف کف تونل،لازم است که انتهای قاب‌ها به‌طور پیوسته نگهداری شود و یا از قاب‌های حلقوی استفاده گردد.
VII	سنگ فشارنده-عمق متوسط	(۱/۱۰–۲/۱۰) $(B+H_t)$	فشار جانبی زیاد، تیرهایی با قوس معکوس لازم می‌باشد. قاب‌های حلقوی توصیه می‌شود.
VIII	سنگ فشارنده-عمق زیاد	(۲/۱۰–۴/۵۰) $(B+H_t)$	فشار جانبی زیاد، تیرهایی با قوس معکوس لازم می‌باشد. قاب‌های حلقوی توصیه می‌شود.
IX	سنگ تورمی	تا ۲۵۰ فوت (۸۰ متر)، بدون توجه به مقدار $(B+H_t)$	قاب‌های حلقوی لازم است، در موارد دشوار استفاده از نگهداری تسلیم شونده توصیه می‌شود.

** 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 طبقه‌بندی ترزاقی را با واردکردن RQD به‌عنوان ابزار سنجش کیفیت سنگ اصلاح کردند (جدول ۵- ۴). آن‌ها بین روش‌های تونل سازی سنتی و مکانیزه تفاوت قائل شده و جداولی برای نگهداری تونل‌های سنگی ۶ و ۱۲ متری، توسط قاب فولادی، راکبولت و شاتکریت ارائه دادند. بنابر نظر آن‌ها، بار سنگ در تونل‌هایی که به‌صورت مکانیزه حفر می‌شوند ۲۰ تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

- محدودیت‌های روش ترزاقی

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

ب) در این روش فرض بر این است که سقف تونل در زیر سطح ایستابی قرارگرفته است. اگر سقف تونل به‌طور دائم در بالای سطح ایستابی باشد مقادیر ارائه‌شده برای کلاس‌های IV تا VI در جدول بالا می‌توانند تا ۵۰ درصد کاهش داده شوند.

ج) بهترین راندمان این روش در تونل‌هایی است که روش اجرای آن چال‌زنی و آتشکاری و نگهداری آن، قاب فولادی می‌باشد. استفاده از حفاری مکانیزه، روش‌های حفاری چند مرحله نظیر NATM، آتشکاری‌های کنترل‌شده و همچنین سیستم‌های نگهداری نظیر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی و راکبولت سبب می‌شود تا مقاومت اولیه توده سنگ

حفظ شده و درنتیجه 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 به‌صورت 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 تاکیدی 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 همکارن (۱۹۹۶) نیز مطالعاتی در خصوص تأثیر ابعاد تونل بر فشار وارد بر نگهداری انجام دادند و دریافتند که در زمین های 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.

به‌طورکلی 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 پیش‌بینی‌شده 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 (H_P)	ملاحضات
I	سخت و یکپارچه	۹۵-۱۰۰	صفر	مانند جدول ۵-۳
II	سخت، متورق و شیستوز	۹۰-۹۹	(۰—۰/۵) B	مانند جدول ۵-۳
III	توده‌ای و نسبتاً درزه‌دار	۸۵-۹۵	(۰—۰/۲۵) B	مانند جدول ۵-۳
IV	نسبتاً بلوکی و رگه‌ای	۷۵-۸۵	۰/۲۵ B—۰/۳۵ $(B+H_t)$	در مورد کلاس‌های IV، Vو VI تا حدود ۵۰ درصد از مقادیر بار ترزاقی کاسته شود

				زیرا سطح آب تأثیر ناچیزی بر بار سنگ دارد.
V	بسیار بلوکی و رگه‌ای	۳۰-۷۵	(۰/۲–۰/۶)(B+H_t)	مانند بالا
VI	کاملاً خردشده	۳-۳۰	(۰/۶–۱/۱۰) (B+H_t)	مانند بالا
VIa	ماسه و گراول	۰-۳	(۱/۱۰–۱/۴) (B+H_t)	مانند بالا
VII	سنگ مچاله شونده-عمق متوسط	N/A	(۱/۱۰–۲/۱۰) (B+H_t)	مانند جدول ۵-۳
VIII	سنگ مچاله شونده-عمق زیاد	N/A	(۲/۱۰–۴/۵۰) (B+H_t)	مانند جدول ۵-۳
IX	سنگ تورمی	N/A	تا ۸۰ متر صرف نظر از مقدار (B+H_t)	مانند جدول ۵-۳

- **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[1]، رفتار اتساعی توده سنگ‌ها و زبری درزه‌ها اشاره کرد.

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

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

رابطه ۵-۲

$$P_V = \left[\frac{۱۰۰-RMR}{۱۰۰}\right]\gamma B$$

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 ۵-۲، 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 Mehod of Tunnelling (NMT)

تونل‌های کوچک (قطر کمتر از ۶ متر) نامطمئن و دست پایین و برای تونل‌های بزرگ (قطر بیش از ۹ متر) محافظه‌کارانه 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 ممان های خمشی در یک سقف تخت برخلاف سقف‌های قوسی با افزایش ابعاد زیاد می‌شود.

گول و جتوا بر اساس مقادیر فشارهای نگهداری به‌دست‌آمده از ۳۰ تونل ابزاربندی شده در هند، رابطه ۵-۳ را برای تخمین فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت 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):

$$P_V = \frac{7.5B^{0.1}H^{0.5}-RMR}{20RMR}$$

رابطه ۵-۳

B: دهانه حفاری (متر)

H: عمق تونل (۵۰ تا ۶۰۰ متر)

P_V: فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت 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 قابل‌اتکا نبوده و باید در استفاده از روش RMR در چنین توده سنگ‌هایی دقت شود. در توده سنگ‌های ضعیف استفاده از طبقه‌بندی Q مطمئن‌تر 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 راکبولت، شاتکریت، مش و قاب فولادی می‌باشد. این روش طبقه‌بندی برای شرایط فوق الذکر بسیار مناسب است ولی برای تونل‌هایی که با TBM حفاری‌شده و به سنگ آسیب کمی می‌رسد و نیازی به کاربرد شاتکریت بلافاصله پس از حفاری نیست، مناسب نمی‌باشد.

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

- **۵-۳-۲-۳-۱- استفاده از روش بارتون و همکاران (۱۹۷٤)**

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:

$$P_v = \left(\frac{0.2}{J_r}\right) Q^{\frac{-1}{3}}$$

رابطه ۵-۴

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

رابطه ۵-۵

که در این روابط:

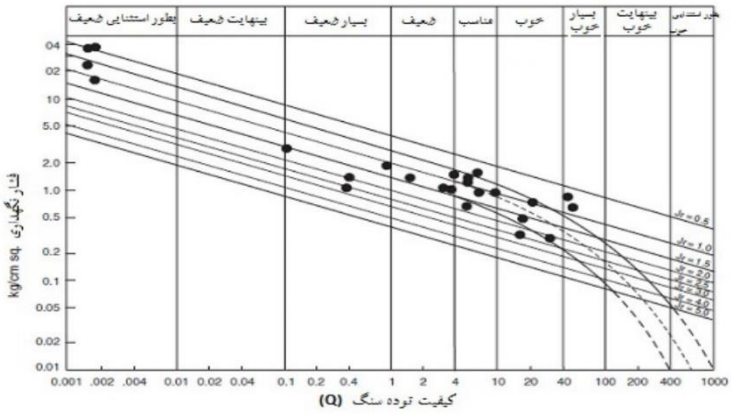
P_v: فشار وارد بر نگهداری نهایی سقف (MPa)

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 به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

محدوده Q	فاکتور دیواره (Q_w)
>۱۰	Q۵
۰/۱ تا ۱۰	Q۲/۵
<۰/۱	Q۱



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 به‌صورت زیر بیان شوند:

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

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

آن‌ها چنین فرض کردند که فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت را می‌توان با جایگذاری 5Q به‌جای Q در رابطه ۵-۴ تعیین کرد. بنابراین فشار وارد بر نگهداری نهایی به‌صورت ۱/۷ برابر فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت تعیین می‌گردد. گول و همکاران (۱۹۹۵) با مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده از روابط بارتون و همکاران (۱۹۷۴) و مقادیر اندازه‌گیری شده از تونل‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که سیستم Q در زمین‌های بسیار مچاله 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.

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

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 درواقع 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 باکیفیت کوتاه‌مدت توده سنگ (Q_i) به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

رابطه ۵-۱۰

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

که در آن:

Q_i=5Q= کیفیت کوتاه‌مدت توده سنگ بلافصله پس از حفاری

P_v= فشار وارد بر نگهداری کوتاه‌مدت سقف برحسب 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 برحسب متر

هنگام استفاده از رابطه ۵-۹ فاکتورهای تصحیح قدم به قدم اعمال می‌شوند. ابتدا فاکتور تصحیح عمق تونل، سپس تصحیح همگرایی تونل و درنهایت تصحیح زمان پس از نصب نگهداری اعمال می‌شود. گریمستاد و بارتون (۱۹۹۳) توافق کردند که از رابطه ۵-۱۰ به‌منظور 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 به‌صورت رابطه زیر است:

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

که t زمان برحسب ماه پس از نصب سیستم نگهداری می‌باشد.

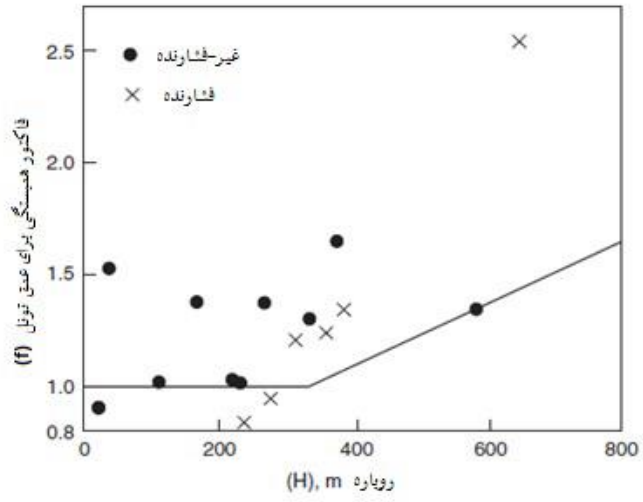
گول و همکارانش (۱۹۹۵) فاکتورهای تصحیح f و f' را برای تونل مانری-اوتارکاشی[1] در اعماق ۷۰۰ تا ۹۰۰ متر تأیید کردند. کومار (۲۰۰۲) نیز هر سه فاکتور تصحیح را از مطالعه رفتار تونل ۲۷ کیلومتری NJPC در هندوستان با

[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:

رابطه ۵-۱۲ $$f'' = 5^{1/3} = 1.7$$

رابطه ۵-۱۳ $$P_{ult}\ (MPa) = \frac{0.2}{J_r} Q^{-1/3}.f.f'$$



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/a)	فاکتور تصحیح (f')
۱	غیر مچاله شونده ($H < 350\,Q^{\frac{1}{3}}$)	----	<۱	۱/۱
۲	مچاله شونده ($H > 350\,Q^{\frac{1}{3}}$, $J_r/J_a < 0.5$)	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 مچاله شونده، روش فوقانی (هدینگ) و تحتانی (بنچینگ) می‌تواند 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 می‌گردد که از SFRS برای نگهداری فوری سینه کار بهمراه قاب فولادی برای نگهداری پشت جبهه کار استفاده شود. ت- حداقل فاصله داری بین تونلهای موازی در زمینهای مچاله شونده، فاصله $5B$ از مرکز به مرکز تونلها است (B عرض تونل است).

- **فشار وارد بر نگهداری افقی (دیواره):** برای تخمین فشار وارد بر نگهداری دیواره، می‌توان از رابطه ۵-۹ استفاده کرد فقط به‌جای Q_i، کیفیت کوتاه‌مدت توده سنگ دیواره (Q_{wi}) جایگزین می‌گردد. کیفیت کوتاه‌مدت توده سنگ دیواره (Q_{wi}) از حاصلضرب Q_i در فاکتوری که به مقدار Q بستگی دارد مطابق روابط ذیل به دست می‌آید:

الف) برای Q >10: $$Q_{wi} = 5Q_i = 25Q$$

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

ج) برای Q < 0.1 : $$Q_{wi} = 1Q_i = 5Q$$

- فشار وارد بر نگهداری نهایی

رفتارنگاری بلندمدت مغار چیبرو[1] 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 نُرم، مقدار بارسنگ نهایی وارد بر سیستم نگهداری را تعیین کرد. همچنین با توجه به پیشرفت روش های 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 دانیسته 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 دانیسته 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 شیل های رسی
اونال (۱۹۸۳)	RMR B= عرض تونل (متر)	$P_v = \left[\frac{۱۰۰ - RMR}{۱۰۰}\right] \cdot \gamma \cdot B$	• توسعه داده‌شده برای معادن زغال‌سنگ با فضاهای حفاری دارای سقف مسطح

[1] Chhibro

روش	پارامترهای ورودی	بارسنگ (خاک)	توضیحات
	γ دانیسته 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 محافظه‌کارانه
گول و جتوا (۱۹۹۱)	RMR B عرض تونل (متر) γ دانیسته سنگ	$P_V = \frac{۷۰۵B^{۰۰۱}H^{۰۰۵} - RMR}{۲۰RMR}$	• 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	$P_v = \left(\frac{۰۰۲}{J_r}\right) Q^{\frac{-۱}{۳}}$ $P_h = \left(\frac{۰۰۲}{J_r}\right) Q_w^{\frac{-۱}{۳}}$	• ظرفیت نگهداری مستقل از ابعاد تونل
بارتون و همکاران (۱۹۷۴)	Q J_r عدد زبری درزه‌ها J_n عدد دسته‌درزه	$P_v = \frac{۰۰۲J_n^{۱/۲}}{۳J_r} Q^{-۱/۳}$ $P_h = \frac{۰۰۲J_n^{۱/۲}}{۳J_r} Q_w^{-۱/۳}$	• کاربرد: تعداد دسته‌درزه‌ها کمتر از ۳
یاسین و گریمستاد (۱۹۹۶)	Q عدد زبری درزه‌ها J_r عدد زبری درزه‌ها B عرض تونل (متر)	$P_v(KPa) = \frac{۴۰B}{J_r} Q^{-۱/۳}$	• کاربرد: برای توده سنگ‌های ضعیف (Q<۴)
استاندارد مهندسین ارتش آمریکا	H_t ارتفاع تونل (متر) γ دانیسته سنگ	تونل‌های دایره‌ای $P_v = ۰۳ \times H_t \times \gamma$	• در تونلزنی به کمک آتشکاری، مقادیر مذکور تا ۳۰٪ افزایش داده شود • $P_v=0.5P_h$
		تونل‌های نعل اسبی $P_v = ۰۳ \times ۱۵ \times H_t \times \gamma$	
		زون‌های ریزشی (خردشده) $P_v = ۰۶ \times H_t \times \gamma$	
		زمین‌های مچاله شده $P_v = (۱ - ۲) \times H_t \times \gamma$	
آنالیز ساختاری	با استفاده از تخمین بزرگ‌ترین گوه ممکن ایجادشده توسط نرم افزاهای Unwedge، UDEC		
روش‌های عددی	با استفاده از نرم‌افزارهایی همچون FLAC، PLAXIS، Phase2، UDEC		

۵-۳-۳- انواع سیستم نگهداری

۵-۳-۳-۱- شاتکریت

- **۵-۳-۳-۱-۱- کلیات**

مهترین مواردی که در برنامه‌ریزی تونل باید موردنظر قرار گیرند ویژگی‌های سیستم نگهداری، شرایط بستر و روش اجرائی 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. ازآنجائیکه 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	مقاومت در برابر نیروهای خارجی به دلیل فضای قوسی شکل ایجادشده و مقاومت در برابر نیروهای محوری با ایجاد تغییر شکل در شاتکریت
	II	مقاومت برشی شاتکریت	مقاومت در برابر نیروی برشی و جابجایی برشی، با استفاده از مقاومت برشی و سختی بتن، چسبندگی بین سنگ بستر و شاتکریت موردنیاز است و اگر چسبندگی از بین برود بتن به حالت مقاومت تغییر شکل‌پذیر تبدیل می‌شود.
	III	مقاومت خمشی شاتکریت	مقاومت در برابر لنگر خمشی ناشی از مقاومت خمشی و سختی شاتکریت ایجاد می‌شود.
	IV	مقاومت برشی، مقاومت چسبندگی بین شاتکریت و سنگ بستر	مقاومت در برابر بار و توزیع آن در تحکیمات و بستر، با استفاده از مقاومت برشی، (مقاومت چسبندگی) بین شاتکریت و سنگ بستر
اثرات	۱	جلوگیری از سقوط سنگ، حفظ توده سنگ‌های کوچک	توده سنگ‌هایی که در محل سطوح ناپیوستگی از سنگ دربرگیرنده جدا هستند، به محض حفاری تونل و به دلیل نیروی گرانش، مستعد ریزش هستند. ایمنی کار با محافظت از این سنگ‌ها تضمین خواهد شد. بی احتیاطی در محافظت سنگ‌ها، ریزش‌های مکرر را در پی خواهد داشت
	۲	اعمال فشار داخلی به سنگ بستر	در تونل‌هایی که سنگ بستر آن‌ها سنگ رسوبی یا هر سنگ ضعیف دیگری باشد، امکان تغییر شکل پورتال وجود دارد. در این شرایط شاتکریت به‌عنوان یک نیروی واکنشی، سنگ بستر را محافظت می‌کند و با افزایش ظرفیت باربری سنگ بستر، شرایط نیروی سه محوری سنگ بستر را در مجاورت سینه‌کار تونل فراهم می‌کند
	۳	تقویت لایه‌های ضعیف و حفظ شکل کلی	نقاط ضعیف سنگ بستر مانند شکاف‌های باز و لایه‌های ضعیف، به‌وسیله شاتکریت به هم متصل می‌شوند و اثرات ناپیوستگی‌های سطحی و لایه‌های ضعیف کاهش پیدا می‌کند
	٤	تسطیح توزیع تنش	با بستن شکاف‌ها و تأمین یک قوس مسطح، توزیع تنش پیرامونی در سنگ بستر و شاتکریت تسطیح می‌شود. به علاوه اثر تقویتی سایر اجزای سیستم نگهداری مانند راکبولت و تکیه‌گاه فولادی که به‌صورت موضعی چیده شده‌اند را تقویت کرده و روی سطح منتقل می‌کند. همچنین بارهای موضعی ظاهرشده در تونل‌ها محافظت شده و بر روی سطح توزیع می‌شوند.

دسته‌بندی			خلاصه
	۵	پوشش حفاظتی، پیشگیری از تخریب سنگ بستر	شاتکریت به‌عنوان پوشش محافظ سنگ بستر حفاری‌شده عمل می‌کند و از تضعیف سنگ در مقابل هوازدگی جلوگیری به عمل می‌آورد

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 راکبولت و قاب فولادی استفاده می‌شود.

- **۵-۳-۳-۱-۲- ترکیب شاتکریت**

شاتکریت به دو روش‌تر و خشک اجرا می‌شود و مقاومت نهایی شاتکریت اجراشده با هر دو روش تحت تأثیر روال اجرا قرار دارد. بنابراین در انتخاب طرح اختلاط شاتکریت، علاوه بر مشخصاتی مانند مقاومت، درنظرگرفتن محدودیت‌های 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
٤. حجم گردوغبار تولیدشده

در شرایطی که شاتکریت به‌عنوان پوشش نهایی استفاده‌شده و لاینینگ اجرا نشود، موارد زیر نیز اهمیت پیدا می‌کند:

٥. تراکم (جذب رطوبت، حجم فضای خالی، نفوذپذیری و ...)
٦. دوام (مقاومت در برابر یخزدگی/ذوب شدن، مقاومت شیمیایی و مقاومت در برابر کربناتاسیون)

در طرح اختلاط شاتکریت، مقاومت شاتکریت به روش پاشش، شرایط جریان آب سطح شاتکریت پاشی‌شده، رطوبت، نسبت آب به سیمان، نسبت آب به ملات، نسبت سنگدانه، حداکثر ابعاد سنگدانه درشت، نوع مواد افزودنی و ... بستگی دارد.

- **۵-۳-۳-۱-۳- شاتکریت تقویت‌شده**

در مواردیکه تقویت شاتکریت ضروری باشد، باید ویژگی‌های مقاومتی مخلوط شاتکریت بهبود یا ضخامت بتن پاشیده‌شده افزایش یابد. از این دو روش، ویژگی‌های مقاومتی شاتکریت را می‌توان 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 پوسته‌شدن شاتکریت در زمان اجرا و بعد از آن و بهبود سختی شاتکریت بعد از ظهور ترک، استفاده می‌شود. 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 سنگ‌هایی که تغییر شکل زیادی دارند، مانند سنگ‌های منبسط شونده، امکان دارد ترک‌های متعددی در شاتکریت ایجادشده و

شاتکریت پوسته پوسته شود. در این شرایط از توری سیمی جهت جلوگیری از پوسته پوسته‌شدن و بهبود سختی استفاده می‌شود. از سوی دیگر، سنگ‌هایی که دارای درزها و شکاف‌های زیادی هستند و این نگرانی وجود دارد که توده‌ای سنگ به‌طور ناگهانی ریزش کند، توری سیمی معمولاً برای تقویت مقاومت برشی و بهبود استحکام شاتکریت استفاده می‌شود. به علاوه در زمین‌های غیرمتراکم که چسبندگی بین شاتکریت و سنگ بستر ضعیف است، می‌توان انتظار داشت که توری سیمی مانع از پوسته پوسته‌شدن شاتکریت در حین اجرا شود. توری سیمی معمولاً با ابعاد چشمه‌های ۱۰*۱۰ و ۱۵*۱۵ سانتیمتر و قطر ۶ تا ۸ میلی‌متر یافت می‌شود.

- ♦ شاتکریت الیافی

شاتکریت تقویت‌شده با الیاف به‌طور مؤثر در شرایط زیر استفاده می‌شود:

- درجاهایی‌که به دلیل تغییر شکل زیاد، مقاومت بالا موردنیاز باشد.
- در شرایطی که مقاومت خمشی و استحکام به دلیل توزیع پیچیده تنش در سیستم نگهداری، ضروری باشد.

مثال‌هایی از این شرایط عبارت‌اند از: سنگ‌های منبسط شونده، پرتال‌ها، محل‌هایی که به‌راحتی تحت تأثیر نیروهای عمودی و تنش‌های جانبی قرار می‌گیرند مانند جایی که به علت ضخامت کم روباره، قوس زمین به‌راحتی تشکیل نمی‌شود، اتصالات و تقاطع‌های داخل تونل که مقطع تونل بزرگ‌تر بوده و نسبت به دیگر جاهای تونل دارای اشکال پیچیده‌تری است.

در مقایسه با شاتکریت معمولی، شاخص‌های مقاومت حداکثر که مقاومت کششی و مقاومت خمشی می‌باشد، افزایش می‌یابد. اما مقاومت باقیمانده بعد از نقطه پیک افزایش می‌یابد و همچنین باعث بهبود قابل‌توجهی در چقرمگی و شکل‌پذیری شاتکریت در هنگام ظهور ترک‌ها می‌باشد. پوسته پوسته‌شدن شاتکریت ناشی از وجود ترک‌ها، کمتر اتفاق می‌افتد لذا شاتکریت الیافی از دیدگاه مدیریت ایمنی یک سیستم نگهداری مؤثر است. به علاوه ازآنجایی‌که نفوذ ترک‌ها به سطح مقطع مواد دشوار بوده و حفظ عایق‌بندی رطوبتی نیز آسان‌تر است، جهت بهبود دوام سازه در تونل‌هایی که با شاتکریت معمولی تحکیم شده‌اند، ممکن است از شاتکریت الیافی استفاده شود. همچنین در مواردی که تونل‌های موجود نیاز به بازسازی یا تعمیر داشته و افزایش ضخامت بتن پاشی نیز ممکن نباشد، شاتکریت الیافی به‌عنوان دیوار پوششی نازکی استفاده می‌شود. مقاومت طراحی‌شده شاتکریت تقویت‌شده با الیاف، علاوه بر مشخصه‌های شاتکریت معمولی، مقاومت خمشی و سختی خمشی را نیز تأمین می‌کند. الیاف فولادی و غیرفولادی هر دو در شاتکریت الیافی قابل‌استفاده هستند.

- **۵-۳-۳-۱-٤- زمان انجام شاتکریت**

اگر در زمان طراحی تونل شاتکریت به‌عنوان یکی از سیستم‌های نگهداری اولیه تونل تعیین شود باید به زمان انجام آن نیز توجه شود چراکه عملکرد شاتکریت تحت تأثیر زمان انجام آن است. به‌طور مثال هدف از شاتکریت لایه اول جلوگیری از هوازدگی 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 سینه‌کار ضروری می‌باشد. در تونل‌ها معمولاً با افزایش فاصله از سینه‌کار جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد بنابراین شاتکریت لایه دوم باید در فاصله مناسب از سینه‌کار که از قبل تعیین‌شده 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.

۵-۳-۳-۲- راکبولت

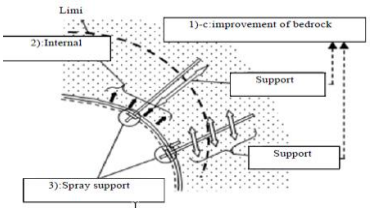
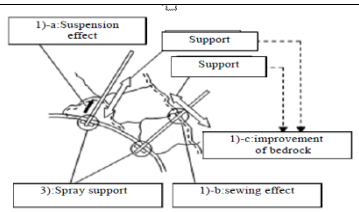
- **۵-۳-۳-۲-۱- کلیات**

راکبولت شامل میله فولادی (که هسته راکبولت را تشکیل می‌دهد) که در مرکز چال حفاری‌شده 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 راکبولت را به شاتکریت متصل می‌کند می‌باشد. برخلاف شاتکریت و قاب فولادی، راکبولت 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 راکبولت 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 جابجایی نسبی شعاعی تونل بین دیواره تونل و سنگ بستر است.

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

جدول ۵- ۸- مفاهیم عملکرد و اثرات راکبولت

دسته‌بندی			خلاصه
عملکرد	I	مقاومت کششی راکبولت	عملکرد توقف جابجایی نسبت به سنگ بستر در جهت محوری، توسط مقاومت کششی راکبولت در آن جهت

دسته‌بندی			خلاصه
	II	مقاومت برشی راکبولت	عملکرد توقف جابجایی نسبت به سنگ بستر با زاویه بر جهت محوری، توسط مقاومت برشی راکبولت در آن جهت
اثرات	۱) تقویت سنگ بستر	a) اثر تعلیق	در سنگ بسترهای نیمه متوسط و سخت که شکاف‌ها گسترش پیداکرده‌اند، قسمت‌های ناپایدار جداشده از سنگ اصلی در شکاف‌ها، به توده سنگ اصلی متصل شده و از پوسته پوسته‌شدن این توده‌ها جلوگیری می‌کند
		b) اثر دوخت	
		c) اثر بهبود ماهیت سنگ بستر	در سنگ بسترهای نیمه متوسط و سخت، اگر راکبولت‌ها در محل تلاقی با شکاف‌ها قرار گیرند، مقاومت برشی شکاف افزایش می‌یابد و اثر آشکار بهبود در ماهیت سنگ بستر را می‌توان انتظار داشت. همچنین در مورد سنگ‌های ضعیف یا سنگ‌های رسوبی با مقاومت کم، بسته به قرارگیری راکبولت‌ها، تقویت مقاومت برشی سنگ بستر و مقاومت باقیمانده بعد از تسلیم، بهبود ماهیت سنگ بستر را می‌توان انتظار داشت
	۲)	فشار داخلی	در مورد سنگ‌های ضعیف یا سنگ‌های رسوبی با مقاومت کم، نیروهای محوری ایجادشده توسط راکبولت، روی دیوار تونل، در میانه شاتکریت عمل می‌کند و یک فشار داخلی ظاهری نشان داده و کاهش زون پلاستیک‌شدگی سنگ دربرگیرنده تونل را به همراه داشته و کشش قابل انتظار خواهد بود.
	۳)	محافظت شاتکریت	قطعات سنگی کوچک‌تر از فاصله‌داری راکبولت‌ها، که از سنگ بستر جداشده‌اند، توسط شاتکریت محافظت می‌شوند. شاتکریت نیروها را با چسبیدن به سنگ بستر، تحمل می‌کند. بنابراین اما درجاییکه چسبندگی بین شاتکریت و سنگ بستر از بین می‌رود، با دوختن شاتکریت به سنگ بستر، می‌توان انتظار داشت که راکبولت‌ها آن بار را تحمل کنند
			
(b) سنگ بستر ضعیف، سنگ بستر رسوبی			(a) سنگ بستر متوسط تا سخت

علاوه براثرات گفته‌شده در فوق، سنگ بستر دارای لایه‌بندی را می‌توان با راکبولت به هم دوخت و می‌توان انتظار داشت که یک ناحیه قوسی تقویت‌شده در اطراف سطح حفاری تونل ایجاد شود.

- **۵-۳-۳-۲-۲- توزیع راکبولت‌ها**

در مورد توزیع راکبولت‌ها و ابعاد آن‌ها مواردی مانند شرایط توده سنگ بستر، اندازه مقطع تونل، شکل مقطع، روش حفاری و محدودیت‌های اجرایی و ...، تأثیرگذار هستند. بهتر است توزیع راکبولت‌ها به‌گونه‌ای انجام شود که مناطق

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

در جائیکه هدف نگهداری ناحیه سست ایجادشده ناشی از حفاری باشد، تعداد راکبولت‌ها و فاصله‌داری آن‌ها بر اساس روابط بین باری که هر راکبولت می‌تواند تحمل کند و باری که هر راکبولت باید نگهداری کند، باید تعیین گردد. بااین‌حال معمولاً توزیع راکبولت‌ها با استفاده از چیدمان سیستماتیک بولت‌ها، که با استفاده از الگوی نگهداری استاندارد آزمایش‌شده بر پایه طبقه‌بندی سنگ بستر تعیین‌شده با درنظرگرفتن ملاحظات شرایط سنگ بستر تعیین‌شده است، طرح‌ریزی می‌شود. به‌این‌ترتیب، روش انتخاب یک الگوی استاندارد عمومی توزیع، معمولاً مؤثر است. از طرف دیگر در شرایطی که هدف از نصب راکبولت، نگهداری سنگ‌های نیمه سخت و سختی باشد که شکاف در آن‌ها ایجادشده است، در تعیین تعداد و موقعیت قرارگیری راکبولت‌ها، بر اساس فاصله‌داری بین شکاف‌های سنگ، طول و اندازه آن‌ها تصمیم‌گیری می‌شود.

- **۵-۳-۳-۲-۳- ابعاد راکبولت‌ها**

در اصل طول راکبولت‌ها باید طوری باشد که ناحیه تحت تأثیر حفاری را تقویت کند بااین‌حال امکان دارد بسته به عوامل پیش‌بینی‌شده نیز تغییر کند. درجاهایی که از راکبولت‌ها اثر دوخت یا اثر تعلیق انتظار می‌رود، ضروری است از راکبولت‌هایی استفاده شود که طول آن‌ها از توده سنگ‌های جداشده از سنگ اصلی در محل شکاف‌ها یا ناحیه سست، بیشتر باشد. در موارد وجود فشار داخلی یا بهبود سنگ بستر، عبور راکبولت از ناحیه سست معمولاً ضروری نیست زیرا در این شرایط هدف از نصب راکبولت، تشکیل یک قوس زمین یکپارچه از راکبولت و سنگ دربرگیرنده است. بااین‌حال، 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 راکبولت‌های مناسب برای سنگ بستر نیمه سخت تا نرم است.

رابطه ۵-۱۴ $\boldsymbol{L = \frac{w}{3}}$ تا $\boldsymbol{L = \frac{w}{5}}$ $\quad \boldsymbol{L \geq t}$

رابطه ۵-۱۵ $\boldsymbol{P = 0.2L}$ تا $\boldsymbol{P = 0.5L}$

L= طول راکبولت

W= 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 راکبولت‌ها را از ۰.۴De تا ۰.۶De که در آن De قطر حفاری است، تعیین نمود. در همین حال، قطر راکبولت‌ها بر اساس نیروی مقاومت برشی سنگ بستر و حجم توده سنگی که توسط هر راکبولت نگهداری می‌شود، تعیین می‌شود. به‌طورکلی و با درنظرگرفتن محدودیت‌های اجرا، قطر معمول راکبولت‌های مورداستفاده در تونل، ۲۲ تا ۲۵ میلی‌متر است. علاوه بر این سنگ بستر با تغییر شکل‌های گسترده می‌تواند

نیروی محوری بزرگی در برابر راکبولت ایجاد نماید که باعث شکستگی راکبولت در سنگ بستر می‌شود. در این موارد لازم است افزایش تعداد، افزایش طول راکبولت‌ها، جایگزینی هسته راکبولت 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 راکبولت ایجاد شود، و باعث شکست راکبولت در سنگ بستر شود لازم است که تعداد راکبولت ها اضافه شود یا طول آن‌ها زیاد شود و یا راکبولت با جنس مقاومتری جایگزین شود. درجایی‌که با ایجاد تغییر شکل زیاد، نیروی محوری در راکبولت اضافه نمی‌شود، امکان دارد که این تغییر شکل‌ها در اعماق زیادی رخ دهد در نتیجه افزایش طول راکبولت می‌تواند مؤثر باشد.

- **۵-۳-۳-۲-٤- صفحه بولت**

صفحات بولت و پیچ و مهره‌ها، علاوه بر اینکه راکبولت و شاتکریت را به هم می‌دوزند، به‌عنوان جزئی از سیستم نگهداری وظیفه جلوگیری از ریزش‌های احتمالی که بین راکبولت‌ها اتفاق می‌افتد، را بر عهده‌دارند. همچنین صفحات بولت و پیچ و مهره‌ها باید مقاومت کافی در برابر نیروهای وارده را داشه باشند.

ابعاد صفحه راکبولت به‌طور معمول ۱*۱۵*۱۵ سانتیمتر می‌باشد. بااین‌حال در سنگ‌های با تغییر شکل گسترده، شکل و جنس صفحه با درنظرگرفتن مشخصات مکانیکی راکبولت، انتخاب می‌شود. علاوه بر این لازم است مشخصات پیچ و مهره را با در نظر گرفتن خواص مکانیکی راکبولت انتخاب شود.

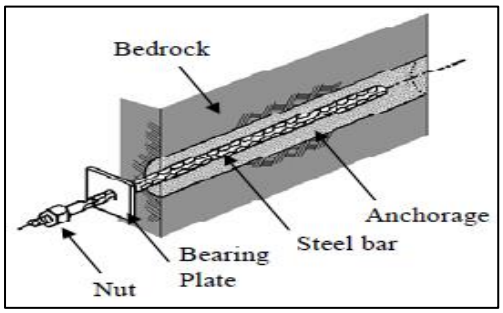
- **۵-۳-۳-۲-۵- سیستم مهاری و تزریق راکبولت**
- **سیستم مهاری**

معمولاً راکبولت‌ها 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 فیکس‌کردن بولت در سنگ بستر استفاده می‌شود (شکل ۵-۷). در لایه‌هایی که راکبولت‌ها با مهار نقطه‌ای کارایی لازم را ندارند و یا از جابجایی‌های مختصر به‌موازات لایه‌ها باید ممانعت به عمل آید، از راکبولت‌های با مهار تمام طول استفاده می‌شود. کاربرد این نوع راکبولت‌ها 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 راکبولت‌ها به‌آسانی انجام می‌گیرد. عموماً راکبولت‌ها با مهار تمام طول از سه قسمت ذیل تشکیل‌شده‌اند:

قسمت میله فولادی (بدنه)، پلیت باربر و تزریقی که ممکن است سیمان یا رزین باشد و جدار میله راکبولت 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 راکبولت تزریقی

- راکبولت با مهار نقطه‌ای (پیچ تحت کشش)

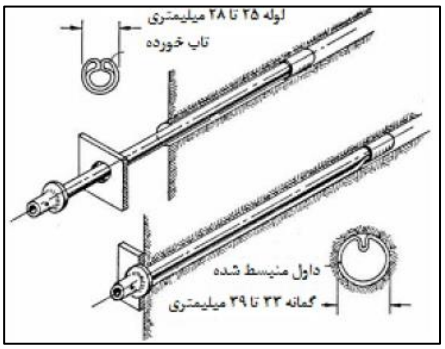
در روش اصطکاکی، اصطکاک به‌دست‌آمده بین سنگ بستر و میل مهار باعث تثبیت میل مهار در داخل چال می‌شود(شکل ۵-۸- نمونه‌ای از راکبولت اصطکاکی). میل مهار لوله فولادی انبساطی در این گروه جای می‌گیرد. در این روش به‌وسیله تزریق با فشار بالا، لوله فولادی در داخل چال منبسط می‌شود. سطح راکبولت نیز با فشار بالا، به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

- به دلیل شدت‌جریان 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 جائیکه عملکرد مناسب و سریع راکبولت به محض نصب در داخل چال، مورد انتظار است.

توجه داشته باشید که در سنگ بسترهای ضعیف و زمین‌های غیر متراکم، امکان فراهم‌ساختن نیروی مهاری لازم، دشوار است به علاوه ذکر این نکته الزامی است به دلیل تماس مستقیم راکبولت‌ها با زمین و جهت مقابله با خوردگی، آبکاری نیاز دارند.

راکبولت‌ها بعد از مهارشدن در سنگ بستر، اثر مقاومتی خود را در جهت عمود بر نیروهای کششی و برشی، نشان می‌دهند. بنابراین در طراحی راکبولت‌ها 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 راکبولت باید با تست‌های کشش سنجیده شود تا مشخص گردد نیروی مهاری راکبولت کافی است یا نه؟ مقاومت کششی معمولاً توسط نیروی مهاری ایجادشده بین سنگ بستر و اجزای مهاری، حاصل می‌شود بااین‌حال باید دقت شود که بسته به شرایط سنگ بستر، جنس و شکل راکبولت، شبکه توزیع و ابعاد راکبولت، سیستم انکراژ و ...، می‌تواند متفاوت باشد.

قطر بدنه راکبولت‌ها متفاوت می‌باشد و معمولاً حدود ۱۶ تا ۲۵ میلی‌متر ساخته می‌شود. سطح میله راکبولت 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 راکبولت اصطکاکی

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

جدول ۵- ۹- خلاصه‌ای از سیستم کامل انکراژ

نوع انکراژ	روش انکراژ	مشخصات	محدودیت‌های اجرا
انکر تزریقی	در روش پیش تزریق‌شده، چال تزریق‌شده و سپس میل مهار نصب و فیکس می‌شود. در روش همزمانی تزریق و انکراژ، ابتدا اطراف چال با ملات یا رزین پوشانده شده و به‌جای پر کردن چال با ملات، سفت‌کننده‌ای 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 به‌وسیله 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 مهاری 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 مهاری مراحل اولیه و طولانی‌مدت، دوام و اتصال مناسب است. باید در نظر گرفت که در بررسی نیروی مهاری در انواع تزریقی، هم چسبندگی بین راکبولت و مواد تزریق و هم چسبندگی بین مواد تزریق و سنگ بستر دارای اهمیت است. علیرغم اینکه جهت تأمین چسبندگی بین راکبولت و مواد تزریق‌شده مشکل خاصی وجود ندارد با توجه به شرایط سنگ بستر امکان دارد چسبندگی مابین مواد تزریق‌شده و سنگ بستر به‌آسانی تأمین نشود. علی‌الخصوص در شرایطی که سنگ بستر فاقد استحکام کافی باشد و نتوان به نیروی مهاری بین سنگ بستر و مواد تزریق اعتماد کامل نمود یا باید سیستم انکراژ یا مواد تزریق

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

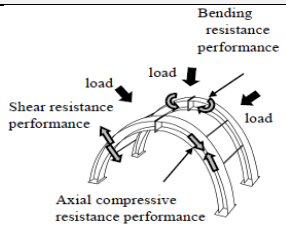
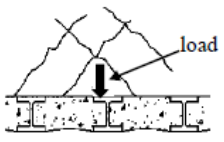
ملات (معمولاً ملات نیمه آماده) و رزین به‌عنوان مواد تزریق استفاده می‌شوند. مواد ترزیق ممکن است در هر سه روش تزریق پیش از نصب انکر، تزریق هم‌زمان با نصب انکر و تزریق بعد از نصب انکر استفاده شود. انتخاب هر یک ازاین‌روش‌ها وابسته به شرایط سنگ، جریان آب و غیره است. در شرایطی‌که لازم باشد در زمین‌های غیرمتراکم مانند زمین‌های خردشده، میل مهارهای بلند در مجاورت تاج تونل نصب شوند چال حفاری‌شده جهت نصب راکبولت دچار ریزش شود. در این موارد لازم است در انتخاب نوع ماده تزریق دقت کافی به عمل آید. به‌این‌ترتیب در انتخاب نوع ماده تزریق باید به محدودیت‌های اجرایی مانند قابلیت حفاری و تزریق مواد، شرایط سنگ بستر مانند سالم‌بودن 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 موردنیاز انتخاب گردد.

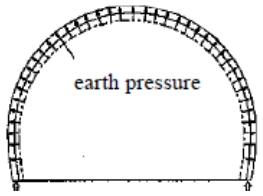
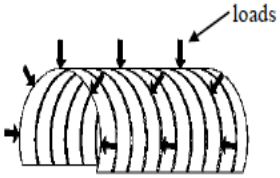
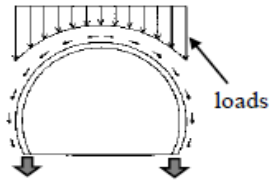
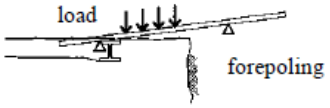
۵-۳-۳-۳- قاب‌های فولادی

- **۵-۳-۳-۳-۱- کلیات**

ازآنجایی‌که قاب‌های فولادی به‌صورت قوسی شکل هستند و جهت پایداری سطح تونل حفاری‌شده نصب می‌شوند باید به محض نصب سطح خاصی از تأثیر را داشته و تا زمانی که شاتکریت به‌طور کامل استحکام کافی پیدا می‌کند به تثبیت سطح تونل حفاری‌شده 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 داده‌شده است.

جدول ۵- ۱۰- عملکرد و اثر قاب‌های فولادی

طبقه‌بندی			خلاصه	
عملکرد	I	مقاومت فشاری مقاومت برشی مقاومت خمشی	همانند شاتکریت، قابهای فولادی می‌توانند در برابر نیروهای خارجی با مقاومت فشاری، برشی و خمشی، مقابله کنند.	
اثر	۱)	نگهداری سنگ	جهت جلوگیری از ریزش جزئی بلوک‌های سنگی به دلیل مقاومت خمشی یا برشی، می‌توان قاب‌های فولادی را محکم به دیواره تونل متصل کرد	
	۲)	تقویت زمین ضعیف	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	قاب‌های فولادی می‌توانند در زمین‌های ضعیفی که انتظار تشکیل قوس زمین پایین است، فشار درونی را در جهت شعاعی و در کل طول دیواره تونل بهبود دهند	
	۴)	نگهداری شاتکریت	قاب‌های‌های فولادی می‌توانند از طریق یکپارچه‌شدن با شاتکریت، بهبود سختی و صلبیت 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 نظرگرفتن 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 راکبولت اجرا می‌شوند تخمین قابلیت نگهداری این مجموعه با هم از اهمیت زیادی برخوردار است.

ازآنجایی‌که 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 پوسته‌شدن سنگ‌های اطراف، تا زمانی که شاتکریت و راکبولت‌ها عمل کنند قاب‌های فولادی را می‌توان بکار برد.

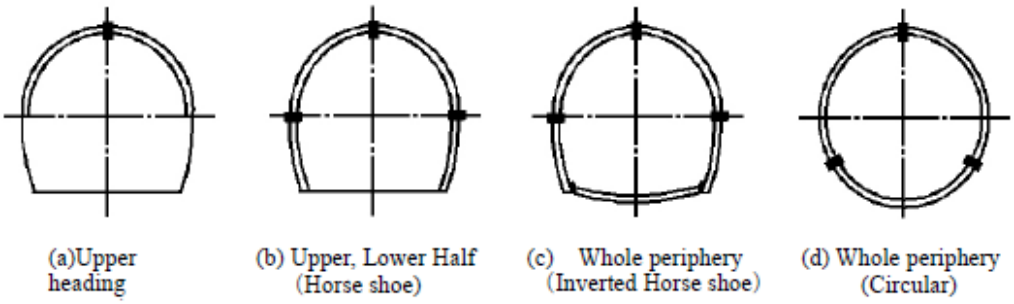
- زمین‌های غیرمتراکم و خاک‌های مچاله شونده

در سنگ‌های با فاکتور مقاومتی پایین که احتمال بالای وقوع گسیختگی در بخش‌های حفاری‌شده 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. به‌عنوان‌مثال استفاده از قاب‌های فولادی در ترکیب با شاتکریت و وایرمش 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.

- **۵-۳-۳-۳-۲- شکل قاب‌های فولادی**

قاب‌های فولادی باید طوری طراحی شوند که بارهای منتقل‌شده از میان شاتکریت با ممان خمشی تسلیم را به‌درستی تحمل نماید. شکل قاب‌های فولادی به‌صورت بخش هدینگ، بخش هد و بنچ، 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)



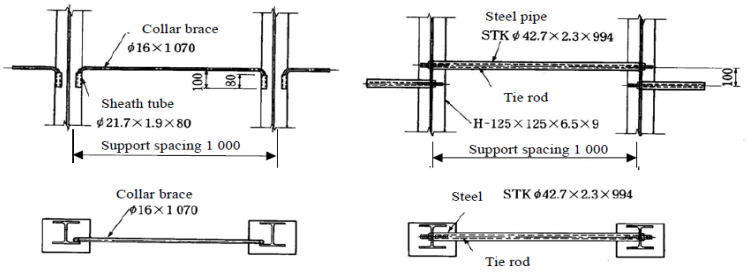
شکل ۵- ۹- a (هدینگ)، b (نیمه بالا و پایین (نعل اسبی))، c (پیرامونی (نعل اسبی کفبنددار) و d (پیرامونی (دایروی))

- **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.

- **۵-۳-۳-۳-٤- 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 داده‌شده است. مدل غلافی بیشتر مورداستفاده 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

۵-۳-٤- مفهوم طراحی سیستم نگهداری اولیه

ازآنجایی‌که تونل یک سازه خطی زیرزمینی است که مسافت معینی را در بر می‌گیرد، شناخت و درک درست شرایط زمین قبل از حفاری به‌طورکلی 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 مقرون‌به‌صرفه‌بودن احداث تونل باشد، انجام شود و روش‌های نظارتی را نیز در طول دوره ساخت معرفی نمود.

جهت طراحی سیستم نگهداری تونل، درنظرگرفتن 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 ازجمله 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 ازجمله 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 لتیس گریدر 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[1] که شامل مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ، ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها ازجمله 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 تاثیرگذارند. این فاکتورها به دو دسته فاکتورهای دخیل در مرحله انجام مطالعات و فاکتورهای دخیل حین اجرا قابل‌تقسیم‌اند:

در فاز مطالعه و طراحی تونل موارد زیر در تعیین سیستم نگهداری اولیه تأثیر قابل‌توجهی دارند:

- انجام یا عدم انجام اکتشافات میدانی (مطالعات ژئوتکنیک و ژئوفیزیک) تونل
- صحت و دقت اطلاعات ورودی نرم‌افزارهای طراحی تونل ازجمله 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. ازجمله:

- 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 پای‌کار 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:

- به‌کارگیری طراحی استاندارد
- به‌کارگیری طراحی بر اساس شرایط مشابه
- به‌کارگیری طراحی بر اساس روش‌های تحلیلی و

[1] Mapping

قضاوت مهندسی نقش تعیین‌کننده‌ای 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 سسیستم 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 مورداستفاده، طبقه‌بندی ترزاقی[1] بر اساس بار سنگ است که در سال ۱۹۴۶ میلادی توسط وی ارائه شد. از آن زمان به بعد این طبقه‌بندی توسط دیر[2] و همکارانش (۱۹۷۰ میلادی) اصلاح و سیستم‌های طبقه‌بندی جدید سنگ پیشنهاد شد. این سیستم‌ها رهنمودهای نوینی را در تکنولوژی نگهداری مثل شاتکریت و راکبولت، در پروژه‌های مختلف مهندسی مانند تونل‌ها، فضاهای 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 ارائه‌شده 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 مورداستفاده 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 شاتکریت و راکبولت، مناسب نیست. در سال ۱۹۷۰ میلادی، سسیل[3] 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[4] انجام گرفته است.

---

[1] Terzaghi
[2] Deere
[3] Cecil
[4] Rose

این روش زمینه پیدایش سایر روش‌های رده‌بندی را فراهم کرد.

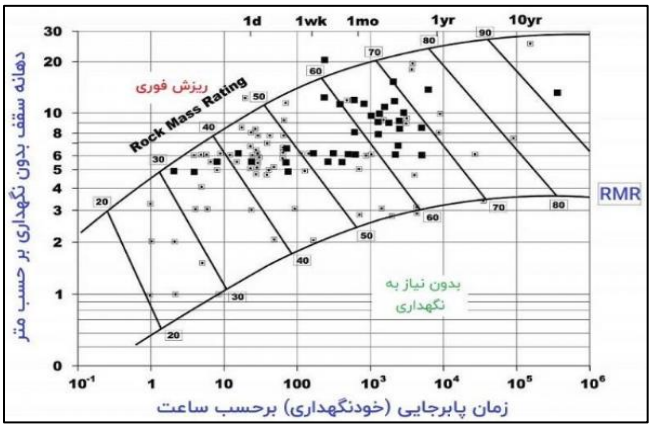
۵-۳-۵-۳- استفاده از رده‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR)

سیستم رده‌بندی توده سنگ[1] یا اصطلاحاً «RMR»، یک سیستم ژئومکانیکی رایج برای طبقه‌بندی سنگ‌ها است. این سیستم در بین سال‌های ۱۹۷۲ تا ۱۹۷۳ توسط بیناوسکی[2] 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 به‌منظور طراحی و ساخت حفریات سنگی نظیر تونل‌ها، معادن، شیب‌ها و پی‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد.

پارامترهای مؤثر در این رده‌بندی و جداول مربوطه در فصل طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ در فصل سوم به‌تفصیل 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.

- **۵-۳-۵-۳-۱- زمان خود نگهداری تونل**

طبقه‌بندی توده سنگ، در تخمین زمان پابرجایی (خود نگهداری) مورداستفاده 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 به‌صورت تابعی از RMR

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

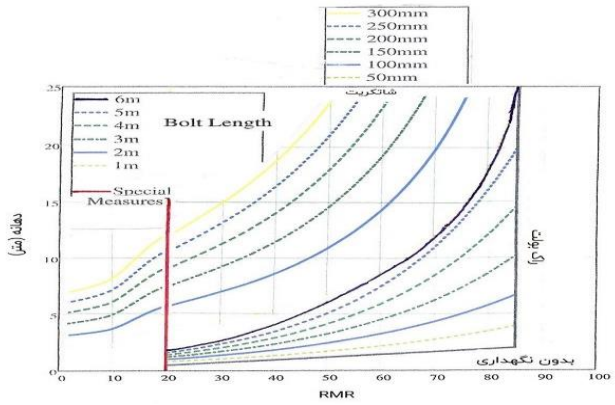
طبقه‌بندی	I	II	III	IV	V
میانگین زمان پابرجایی	۲۰ سال برای دهانه ۱۵ متری	۱ سال برای دهانه ۱۰ متری	۱ هفته برای دهانه ۵ متری	۱۰ ساعت برای دهانه ۲.۵ متری	۳۰ دقیقه برای دهانه ۱ متری

[1] Rock Mass Rating
[2] Bieniawski

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

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

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



شکل ۵- ۱۲- سیستم نگهداری اولیه پیشنهادی به‌صورت 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- ۱۲و جدول ۵- ۱۳ نمایش داده‌شده است. قابل ذکر است که تیپ‌های مذکور با توجه به مطالعات و نظارت‌های حین اجرای تونل‌های با جنس و شرایط متفاوت پیشنهادشده است و امکان دارد که برای پروژه‌های متفاوت نیاز به‌روزآوری 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)

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

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

تیپ	RMR	شاتکریت		وایرمش				قاب فولادی		راکبولت (m)	
		لایه اول	لایه‌های بعدی	تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	نوع	فاصله‌داری (m)	طول	آرایش
											طولی / عرضی
I	۸۰-۱۰۰	۳	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی
II	۶۰-۸۰	۵	-	-	-	-	-	-	-	۴	موضعی
III	۵۰-۶۰	۵	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲.۵ / ۲.۵
IV	۴۰-۵۰	۵	۱۰	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	-	-	۴	۲ / ۲
V	۳۰-۴۰	۵	۲۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	>۱	۴	۱.۵ / ۳
VI	۲۰-۳۰	۵	۲۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	<۱	۴	۱ / ۳
VII	۰-۲۰	۵	۲۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	<۱	۴	۱ / ۲

* تیپ‌بندی‌های جدول ۵-۱۲ و ۵-۱۳ برای حالت نرمال و معمول در سنگ می‌باشد و برای شرایطی مانند مچاله‌شوندگی، انفجار سنگ و آماس و تونل‌های با جریان شدید آب کاربرد ندارد. همچنین برای محدوده پرتالی قابل‌استفاده نیست.

خلاصه‌ای از تیپ‌های کاربردی سیستم نگهداری اولیه در زون پرتالی تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه (دوخطه و سه خطه)، به ترتیب در **جدول ۵- ۱۴** و **جدول ۵- ۱۵** نمایش داده شده است.

جدول ۵- ۱۴- تیپ‌بندی استاندارد سیستم نگهداری اولیه زون پرتالی تونل‌های راه شریانی درجه ۱ و درجه ۲ (دوخطه)

تیپ	RMR	شاتکریت		وایرمش			قاب فولادی		راکبولت (m)	
		ضخامت (cm)		تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	نوع	فاصله‌داری (m)	طول	آرایش
		لایه اول	لایه‌های بعدی								طولی	عرضی
I	۱۰۰-۸۰	۳	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
II	۸۰-۶۰	۵	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
III	۶۰-۴۰	۵	۵	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	-	-	۴	۱.۵	۲
IV	۴۰-۲۰	۵	۲۰	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۶	>۱	۳	۱	۲
V	۲۰-۰	۵	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)

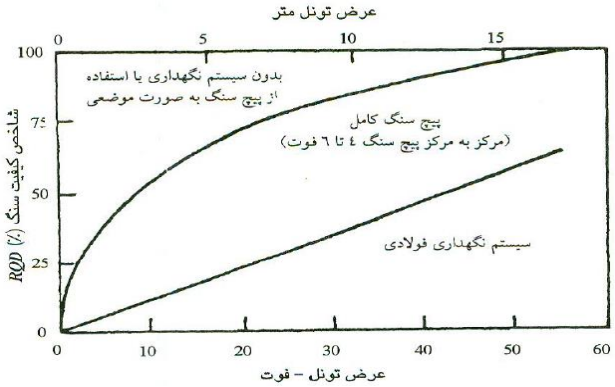
تیپ	RMR	شاتکریت		وایرمش				قاب فولادی		راکبولت (m)	
		ضخامت (cm)		تعداد لایه	قطر (mm)	چشمه (cm)	همپوشانی (cm)	نوع	فاصله‌داری (m)	طول	آرایش
		لایه اول	لایه‌های بعدی								طولی / عرضی
I	۸۰-۱۰۰	۴	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲ / ۲
II	۶۰-۸۰	۵	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲ / ۲
III	۴۰-۶۰	۵	۱۰	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	-	-	۴	۱۵ / ۲
IV	۲۰-۴۰	۵	۲۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	>۱	۴	۱ / ۲
VI	۰-۲۰	۵	۲۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	IPE۱۸	<۱	۴	۱ / ۱

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

۵-۳-۵-٤- 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 درنظرگرفتن تأثیر عواملی همچون جهت‌یافتگی درزه‌ها و مشخصات پرکننده‌ها، کاستی‌هایی نیز دارد.

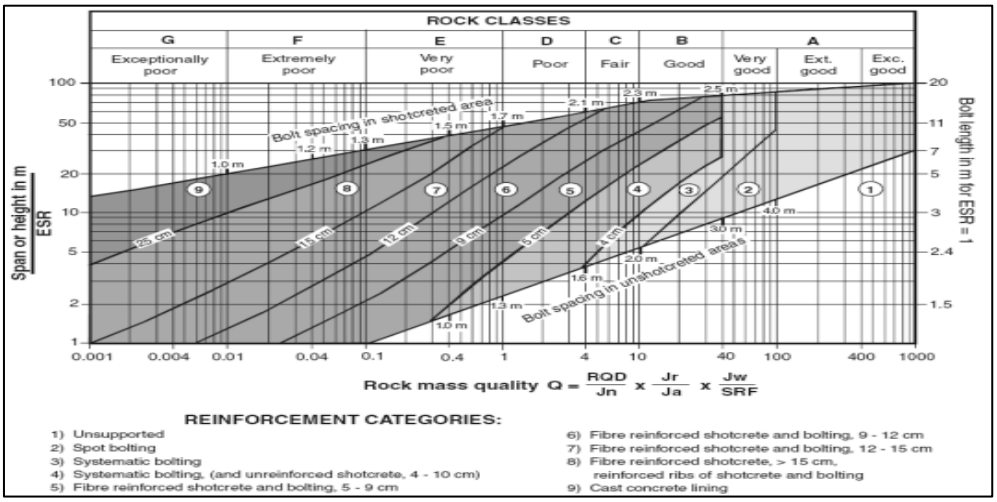
بنابراین با اینکه RQD یک پارامتر عملی تخمین کیفیت مغزه است، اما به‌تنهایی برای تشریح سنگ کافی نیست. با استفاده از شاخص RQD (شکل ۵- ۱۳) می‌توان تا حدودی سیستم نگهداری اولیه را تخمین زد.



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

۵-۳-۵-۵- 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 حفاری‌شده 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

۵-۳-۵-٦- 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 مورداستفاده قرار گرفت. شاخص RSR به‌صورت رابطه زیر تعریف شد:

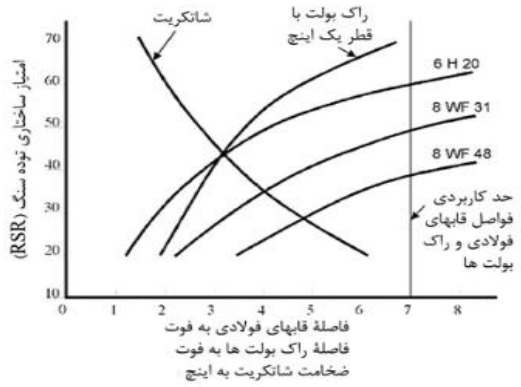
$$RSR= A+ B+ C$$ رابطه ۵-۱۶

A: مربوط به زمین‌شناسی توده سنگ بوده و به نوع سنگ، مقاومت سنگ وساختار 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 به‌دست‌آمده و به کمک نمودار شکل ۵- ۱۵، مقدار نگهداری موردنیاز برای تونل با عرض مشخص ارائه می‌شود.



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

۵-۳-٦- روش‌های مشاهده‌ای طراحی

۵-۳-٦-۱- 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 پیش‌بینی‌شده را ارزیابی کرد و پس از انجام اصلاحات لازم، آن را برای کل سازه زیرزمینی تعمیم داد. اجرای این عملیات را معمولاً رفتار سنجی[1] 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[1] کاربرد دارد.

در بسیاری از طرح‌ها با انجام رفتار سنجی مناسب، می‌توان از وقوع مشکلات احتمالی جلوگیری کرد. به‌عنوان‌مثال 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 پیش‌بینی‌نشده‌ای 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 اعمال‌شده بر اجزای سیستم نگهداری.

۳) کنترل انجام امور اصلاحی و تقویتی در زمین مانند تونل سازی در زمین‌های حاوی آب، منجمدکردن 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 حفریات زیرزمینی با ارائه داده‌های کیفی در مورد رفتار توده سنگ و سیستم نگهداری است. از میان روش‌های متفاوت رفتار سنجی، اندازه‌گیری‌های جابجایی حفریات زیرزمینی از همه مفیدتر است.

---

[1] Convergence Confinement

ازنقطه‌نظر زمان رفتار سنجی نیز می‌توان هدف‌ها را به شرح زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱) قبل از اجرای تونل

هدف از اقدامات این مرحله، تعیین اطلاعات موردنیاز برای طراحی فضای زیرزمینی است که ازجمله می‌توان به ویژگی‌هایی همچون مدول تغییر شکل توده سنگ، مقاومت برجای توده سنگ و وضعیت تنش‌های برجا اشاره کرد.

۲) حین اجرای تونل

هدف از این مرحله از رفتار سنجی، بررسی اعتبار سیستم نگهداری طراحی‌شده و انجام تغییرات احتمالی لازم در آن است. همچنین در این مرحله، اندازی‌گیری‌ها و نظارت تغییر مکان‌ها، اهمیت زیادی دارد که با استفاده از آن می‌توان اصلاحات لازم را در سیستم نگهداری انجام داد و وضعیت ایمنی را بهتر کرد.

۳) بعد از اجرای تونل

این مرحله برای کنترل رفتار حفریات زیرزمینی در طول بهره‌برداری انجام می‌گیرد.

۵-۳-٦-۳- پارامترهای مورد سنجش در رفتار سنجی

با اجرای یک برنامه رفتار سنجی مناسب می‌توان هریک از پارامترهای زیر و یا ترکیب آن‌ها را بررسی کرد:

۱) پارامترهای مربوط به توده سنگ

- جابجایی‌های 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 ناپیوستگی‌ها

- جابجایی رخ‌داده درزه‌ها

۵-۳-٦-٤- تعبیر و تفسیر داده‌های رفتار سنجی

به‌طورکلی هدف از تحلیل داده‌های پردازش‌شده ابزار دقیق، شناخت رفتار و یا واکنش توده سنگ درون‌گیر حفره زیرزمینی در شرایط مختلف است که نتایج این تحلیل، اطلاعات ارزشمندی را در زمینه‌های زیر فراهم می‌سازد:

- ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی
- تعیین بهنه‌های 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 فضـــاهای زیرزمینی، اســـتفاده 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

۵-۳-٦-۵- روش تونل سازی اتریشی جدید (NATM)

روش تونل سازی جدید اتریشی را می توان 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 می شود. ازآنجایی‌که پارامترهای مؤثر درحفر 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 حداقل‌رساندن نشست سطح) تا اعماق زیاد و بیش از ۱۰۰۰ متر تحت میدان‌های تنش ناشی از عملیات معدنکاری انجام گرفته است بنابراین اصول زیر به‌طورکلی 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 پایین‌آوردن 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 به‌گونه‌ای که از دست رفتن مقاومت به‌وسیله 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.

▪ هرجا که دگرشکلی‌ها زیاد و یا سست‌شدن 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 شاتکریت به بهترین نحو حاصل می‌گردد.

▪نگهداری اولیه باید نازک و دارای صلبیت خمشی پایین باشد، ازاین‌رو 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.

▪ ازنظر استاتیکی تونل را می‌توان لوله‌ای ضخیم (یا حلقه‌ای دوبعدی) که از توده، سنگ و لاینینگ تشکیل یافته در نظر گرفت. ازآنجاکه یک لوله مساعدترین ویژگی پایداری را بدون آنکه درز داشته باشد داراست، بستن هم‌زمان کف تونل در هنگامی‌که سنگ دارای مقاومت کافی نباشد، دارای اهمیت است. رفتار توده سنگ با بستن به‌موقع کف تونل تعیین می‌گردد. پیشروی‌های زیاد در طاق منجر به دیر بسته‌شدن 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. هرچند 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 پایدارسازی 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 خورنده‌بودن آب‌های زیرزمینی لاینینگ نهایی می‌بایست قادر به پایدارسازی توده سنگ به‌تنهایی باشد. میل مهارها تنها می‌توانند به‌عنوان یک نگه‌دارنده دائمی تلقی گردند، البته درصورتی‌که از گزند خورندگی 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 دنبال‌کردن آن به نتیجه موردنظر رسید بلکه عبارت است از مجموعه‌ای از ایده‌ها که به ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه توجه ویژه‌ای دارد. این روش درنتیجه تجربیات متعدد در کار تونلزنی به‌دست‌آمده 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 ازنظر 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 حفاری‌شده 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 گرفته‌شده 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 کنترل‌شده می‌نماید که شکل ژئومتریک 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 مهاری‌ها 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 مهاری‌ها 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 به‌طور 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، راکبولت 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 به‌وسیله تجهیزات نگهداری تحمل شود که این کار نیز مستلزم صرف هزینه‌های زیاد می‌باشد.

۵-۳-٦-٦- 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 به‌عنوان 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[1] 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 هرحال 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 موردتوجه قرار می‌گیرد؛ بنابراین نیازهای مهندسین طراحی تونل را به‌خوبی تأمین می‌کند و درک بهتری از مسائل ساخت تونل را ارائه می‌دهد و بدین ترتیب امکان طراحی بهتر پروژه‌های تونل را فراهم می‌سازد.

[1] French Association of Tunnels and Underground Space.

۵-۳-۷- روش‌های تحلیلی طراحی

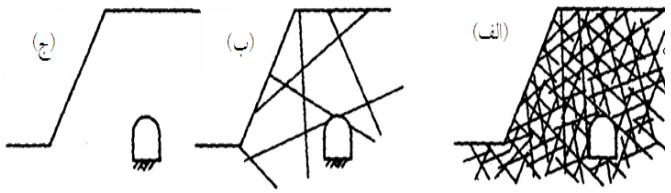
۵-۳-۷-۱- کلیات

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[1] و نظایر آن‌ها) هستند. گرچه در بعضی موارد روش‌های ریاضی و عددی را همراه با هم و تحت عنوان روش‌های تحلیلی تئوریکی در نظر می‌گیرند، اما بهتر است آن‌ها را به حالت مجزا از هم در نظر گرفت. ازآنجاکه 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 پس‌ازآن 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 ثقلی، نیروهای خارجی، تنش‌های برجا، تغییرات درجه حرارت، فشار سیال، پیش‌تنیدگی و نیروهای دینامیکی قرارگرفته و برای پیداکردن تغییر شکل‌ها از روابط تنش-کرنش در توده‌سنگ استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر به‌منظور طراحی فضاهای بزرگ مقطع، بیشتر از تحلیل‌های عددی استفاده‌شده است.

محیط‌هایی که یک سازه در آن‌ها و یا بر روی آن‌ها ساخته می‌شود به سه دسته پیوسته[2] ، ناپیوسته[3] و شبه‌پیوسته[4] قابل‌تقسیم 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 تشکیل‌شده‌اند بکار رود. نوع دوم نماینده سنگ‌های درزه‌دار است و نوع سوم برای سنگ‌هایی است که شدیداً خردشده و یا هوازده هستند. به‌دلیل 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 ازآنجاکه تعیین موقعیت، ابعاد و خواص مکانیکی همه سیستم‌های درزه غیرممکن به‌نظر 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 به‌صورت مناسبی در مدل‌سازی زمین‌های نوع سوم به‌عنوان یک محیط پیوسته منظور شود. این فرآیند باعث ایجاد مدل پیوسته‌ای معادل با توده‌سنگ ناپیوسته و درزه‌دار خواهد شد. با در نظر گرفتن مطالب بالا، زمین‌های پیوسته و شبه‌پیوسته را می‌توان به‌عنوان اجسام پیوسته در نظر گرفت، در حالی‌که زمین‌های ناپیوسته بایستی با نهایت دقت ممکن و با در نظر گرفتن همه درزه‌ها به‌طور 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 به‌راحتی در تمام نقاط سیستم و در هر زمان که لازم باشد به‌دست آورد.
- ✓ در روش عددی می‌توان روند حفاری، نصب، نگهداری و سایر فعالیت‌های تونل سازی 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 به‌صورت 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 به‌دلیل وجود دسته‌درزه‌ها محیطی ناپیوسته محسوب می‌شوند. باوجود مزایای بسیار، تکنیک‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای محدودیت‌های قابل‌توجهی نیز دارند. چنانچه خواص فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ برجا به‌طور دقیق مشخص نباشد، شبیه‌سازی کامپیوتری نمی‌تواند نتایج معتبری ارائه دهد. بعد از حفر تونل، خواص فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ

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 بین‌بردن 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 درنتیجه باعث افزایش تعداد المان‌ها می‌شود.

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

۱- روش المان محدود[1] (FEM)

۲- روش تفاضل محدود[2] (FDM)

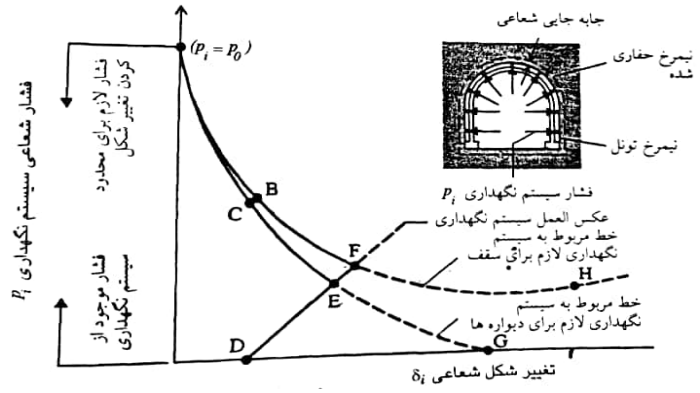
۳- روش المان مرزی[3] (BEM)

۴- روش المان مجزا[4] (DEM)

۵- روش تغییر شکل ناپیوسته[5] (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- ۱۷نشان داده‌شده 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.

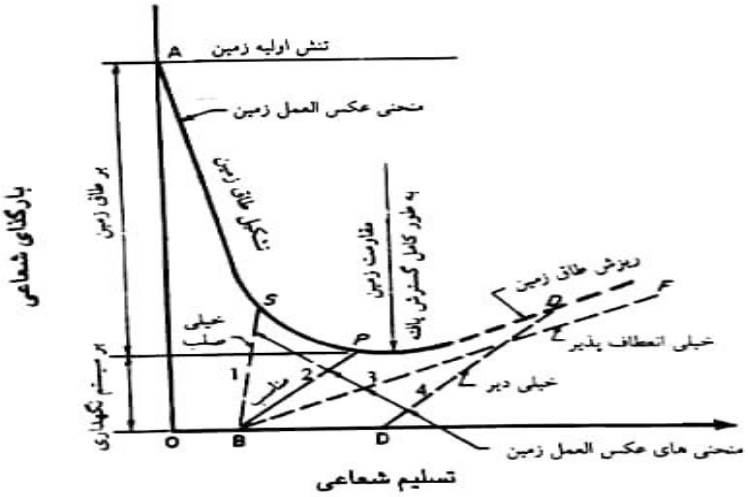


شکل ۵- ۱۷- منحنی فشار-تغییر شکل شعاعی سنگ‌ها و سیستم نگهداری تونل

[1] Finite Element Method
[2] Finite Difference Method
[3] 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 نقطع F رخ می‌دهد. قابل ذکر است که بیشترین تنش ایجادشده در اثر حفاری، به‌وسیله سنگ تحمل می‌شود نه قاب‌های فولادی. اگر در پایان مرحله حفاری، قاب‌های فولادی نصب نشده بود، جابجایی شعاعی در طول منحنی‌های نقطه‌چین EG و FH افزایش می‌یافت. در این حالت، در مورد دیواره‌های تونل، در نقطعه G اتفاق می‌افتاد. بااین‌وجود، فشار سیستم نگهداری لازم برای کنترل جابجایی سقف ممکن است به مقدار مینیمم خود نزول کند و پس از سست‌شدن سنگ، دوباره سیر صعودی به خود بگیرد.

در طراحی منطقی سیستم‌های نگهداری، اندرکنش اجزای نگه‌دارنده یا تقویت‌کننده باید منظور شود. واضح است که کنترل جابجایی سنگ، وظیفه عمده سیستم‌های نگهداری است. مطابق شکل ۵- ۱۸ به‌منظور استفاده از مقاومت توده سنگ در امر نگهداری، باید به سنگ اجازه جابجایی کافی داده شود. اما درعین‌حال، از جابجایی‌های زیاد که منجر به سست‌شدن 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 موردنیاز به‌وسیله منحنی ASPDF نشان داده‌شده 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- مدل‌سازی 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، ازنقطه‌نظر 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 درنتیجه 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 حفاری‌نشده

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 حفاری‌شده

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، محرض 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 بیش‌ازحد سیستم نگهداری، ضروری است که بدون اتلاف وقت نسبت به بررسی شکل، مصالح و چیدمان سیستم نگهداری اضافه‌شده 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 تقویت‌کننده و ...
راکبولت	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 ...

۵-٤- طراحی لاینینگ

با توجه به اینکه تعمیر لاینینگ در حین بهره‌برداری از تونل بسیار دشوار است باید لاینینگ باتوجه به دوام طولانی‌مدت طراحی شود تا در حد امکان نیاز به تعمیرات نداشته باشد. ازآنجایی‌که لاینینگ تونل یک سازه بتنی نازک قوسی شکل است که در فضای باریک‌بین قالب لاینینگ و سطح داخلی تونل ساخته می‌شود شرایط کاری برای بتن‌ریزی و متراکم کردن آن مشکل است، ازاین‌رو لاینینگ مستعد ترک‌خوردگی، 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[1]

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 تاسیسات 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 تونل‌هایی که جابه‌جایی هنوز متوقف نشده است.

۳- برای نگهداری نیروهای خارجی پس از تکمیل تونل که می‌تواند توسط فشار آب یا بارهای اضافی[1] ایجاد شوند.

۴- برای بهبود دوام سازه در برابر تغییرات بارهای خارجی، تضعیف سیستم نگهداری تونل یا زمین اطراف پس از بهره‌برداری از تونل.

کفبندهای تونل در سیستم نگهداری تونل ادغام و ساختار حلقه مانندی را تشکیل می‌دهد که به پایداری زمین اطراف کمک می‌کند؛ بنابراین کفبند و لاینینگ برای پایداری طولانی‌مدت تونل باهم یکپارچه می‌شوند. کفبندهای تونل و لاینینگ برای شرایط زیر به‌طور مؤثر باهم ادغام می‌شوند:

۱- برای تونل‌ها در مناطق شهری، زمین ضعیف و زمین‌هایی که احتمالاً در طول زمان ظرفیت باربری خود را به دلیل فرسایش یا هوازدگی از دست می‌دهند.

۲- برای تونل‌هایی که ممکن است شرایط بارگذاری در آینده تغییر کند.

۳- برای تونل‌ها در مناطق شکسته گسل که نیاز به مقاومت در برابر بار زلزله دارند.

۴- برای تونل‌ها در نواحی پرتال که در معرض بارهای نامتقارن و زلزله هستند.

۵- در تونل‌های راه‌آهن با احتمال زیاد ورود گل

همچنین ازآنجایی‌که تعمیر کفبندها در حین بهره‌برداری دشوار است باید سازگار با لاینینگ تونل طراحی شوند.

۵-٤-۱- فلسفه طراحی لاینینگ

دو فلسفه مختلف برای طراحی لاینینگ وجود دارد، اینکه آیا عملکرد مکانیکی روی لاینینگ اعمال می‌شود یا خیر. برای بیشتر تونل‌های کوهستانی، لاینینگ پس از اتمام کامل جابه‌جایی زمین به کمک سیستم نگهداری اولیه تونل نصب می‌شود؛ بنابراین یک رویکرد آن است که فرض می شود هیچ بار خارجی به لاینینگ وارد نمی‌شود و لاینینگ معمولا بدون عملکرد مکانیکی در نظر گرفته می‌شود. اگر لاینینگ بر اساس ضخامت طراحی تعیین‌شده و با دقت مناسب نصب شود می‌توان برای دستیابی به عملکرد کلی به‌عنوان پوشش تونل ازجمله قابلیت سرویس‌دهی و دوام طولانی‌مدت به آن اعتماد شود.

در تونل‌های کوهستانی موارد زیر شامل عملکرد مکانیکی در طراحی لاینینگ می‌شود:

۱- برای تغییرات شرایط تونل مانند خاک‌ریزی یا برش، بارهای اضافی وارد بر لاینینگ به دلیل تونل‌های موازی یا سازه‌های در مجاورت تونل

۲- برای لاینینگ در زمین‌های ضعیف یا سنگ‌های متورمی که در معرض جابه‌جایی‌های مداوم قرار دارد.

۳- برای لاینینگ تحت‌فشار 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 لاینینگی 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 طراحی‌شده 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.

۵-٤-۲- 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 درنتیجه بیشتر شدن فشار زمین می‌شود. علاوه بر این با افزایش ضخامت بتن ساده[1] 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.

۵-٤-۳- اختلاط و مقاومت بتن لاینینگ

طرح اختلاط بتن مورداستفاده 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، بتن‌ریزی می‌شود اختلاط بتن باقابلیت پمپاژ[1] برای کارایی عالی موردنیاز است. از آنجایی‌که قابلیت پمپاژ توسط کارایی و قوام[2] بتن تعیین می‌شود اختلاط بتن لاینینگ باید با در نظر گرفتن دبی تعیین‌شده از نسبت سیمان آب تعیین‌شده 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 مضری مانند نمک و ... در آب چشمه و زمین وجود دارند که ممکن است بر مخلوط بتن تأثیر نامطلوب بگذارد اقدامات متقابل باید انجام شود.

۵-٤-٤- اقدامات متقابل در برابر ترک‌خوردگی در بتن لاینینگ

اگرچه پوشش بتنی مستعد ترک‌های ناشی از مصالح، شرایط ساخت‌وساز است اما اقدامات متقابل برای از بین بردن عوامل ایجادکننده ترک می‌تواند ترک‌خوردگی را کاهش دهد. از طرفی همه ترک‌ها برای بتن لاینینگ مضر نیستند. برخی از ترک‌ها به دلیل عرض و توزیع آن‌ها بر لاینینگ تأثیری ندارند.

ترک‌ها در بتن لاینینگ به‌طور قابل‌توجهی مقاومت و آب‌بند بودن را کاهش می‌دهند و به دلیل نشت آب، یخ‌زدگی و ذوب بر دوام، ایمنی و عملکرد اصلی لاینینگ تأثیر منفی می‌گذارند. همچنین برخی از بتن‌های احاطه‌شده توسط ترک‌های متعددی که در یک فضای سه‌بعدی باهم متقاطع شده‌اند ممکن است جداشده و ریزش کنند؛ بنابراین لازم است با در نظر گرفتن عملکرد لاینینگ ترک‌های مضر شناسایی شوند.

جدای از ترک‌های لاینینگ که از تغییر شکل زیاد ناشی از بارهای زیاد ایجاد می‌شوند ازنظر هندسی و شرایط مرزی لاینینگ می‌توان گفت که ترک‌ها به‌راحتی توسط تنش‌های کششی ناشی از تنش انقباضی[3] کنترل‌شده توسط بتن لاینینگ ایجاد می‌شوند.

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

بااین‌وجود 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[1] یا ورقه‌های ضدآب[2] 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[3] کافی یا عوامل کاهنده انقباض به‌شدت توصیه می‌شود.

۵-۵- طراحی کفبند[4]

کفبندها باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که تونل و لاینینگ را یکپارچه[5] 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[6] و مکانیکی[7] طبقه‌بندی می‌شود.

برای قابلیت سرویس دهی:

۱- حفظ مقطع داخلی لازم به همراه لاینینگ (حفظ مقطع داخلی)

۲- برای کاهش نشت آب (به‌عنوان‌مثال آب زیرزمینی) و بهبود آب‌بندی[8] (جلوگیری از نشت آب)

۳- برای نگهداری تاسیساتی مانند تاسیسات زهکشی در تونل (نگهداری تاسیسات)

۴- برای اطمینان از صافی سطح جاده[9] و رانندگی ایمن وسایل نقلیه در تونل‌های راه و راه‌آهن

۵- برای ایجاد مسیر جریان آرام (آب) به همراه لاینینگ (حفظ نفوذپذیری آب[10])

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 به‌صورت طولانی‌مدت 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 ازجمله 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 بافاصله گرفتن جبهه کار به‌اندازه 2D (D قطر تونل) متوقف نشود توصیه می‌شود نصب کفبند به‌عنوان یکی از راهکارهای کنترل همگرایی موردبررسی قرار گیرد.

اگر تغییر شکل پس از بهره‌برداری از تونل رخ دهد پس‌ازآن 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 زمان‌بندی نصب کفبند

به‌منظور اطمینان از دوام طولانی‌مدت کفبند، اصولاً ترجیح داده می‌شود که پس از همگرائی 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 جابه‌جایی نصب شود بررسی مکانیکی ضروری خواهد بود.

۵-۵-٤-کف بند اولیه و موقت[1]

به‌منظور کنترل جابه‌جایی ناشی از حفاری، می‌توان 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 می‌شود و بتن‌ریزی پس از مرحله شاتکریت مذکور به‌عنوان کفبند اصلی در نظر گفته می‌شود. همچنین، کفبند موقتی کفبندی است که به‌طور موقت جهت کنترل جابه‌جایی قرار می‌گیرد و در نقطه‌ای از حفاری برداشته می‌شود.

۵-۵-۵- شکل و ضخامت کفبند

شکل و ضخامت کفبند باید بر اساس شرایط زمین و سایر عوامل به‌درستی طراحی شود.

کفبند در ترکیب با لاینینگ و سایر سیستم‌های نگهداری کل تونل را پایدار می‌کند. هنگامی‌که تنش‌های نامطلوب وارده بر کفبند درنتیجه بارهای فعال زیاد یا فشار نامتقارن زمین و غیره پیش‌بینی شود، باید را در نظر گرفت که لازم است علاوه بر نصب کفبند یا نصب کفبند اولیه، بتن مصلح یا بتن مصلح فولادی نیز موردتوجه قرار گیرد.

شکل و ضخامت کفبند معمولاً بر اساس تجربه ساخت قبلی طراحی می‌شود. اگرچه در موارد سطح مقطع بزرگ، فشار زمین وارده بر تونل یا زمین تحکیم نشده با روباره کم ترجیح داده می‌شود که هر عامل به‌طور جداگانه‌ای تعیین شود.

ساختار تقاطع کفبند و لاینینگ باید به نحوی منحنی باشد تا تنش و انتقال آرام تنش را به‌نحوی‌که تقاطع مذکور بتواند بر فشار پلاستیک زمین غلبه کند فراهم کند. همچنین نصب اتصالات ساخت عمود بر دیواره لاینینگ[2] ترجیح داده می‌شود. به‌ویژه 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 به‌دقت در نظر گرفته شود. علاوه بر این، به هنگام نصب کفبند، انتهای زیرین لاینینگ توسط کفبند گرفته می‌شود درنتیجه به دلیل خشک شدن انقباض[3] احتمال ایجاد ترک در دیواره جانبی لاینینگ وجود دارد. به همین دلیل تراز کردن اتصالات ساخت[4]

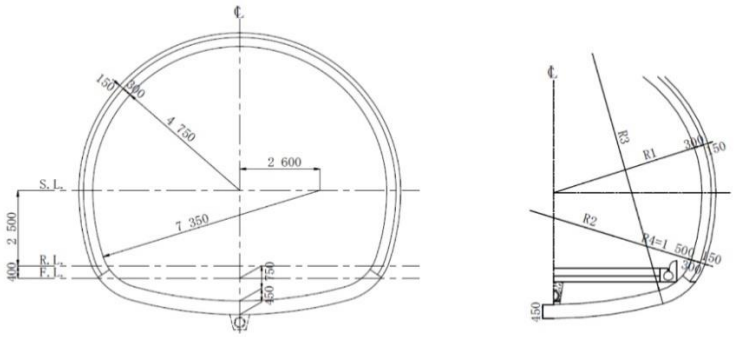
---

[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.

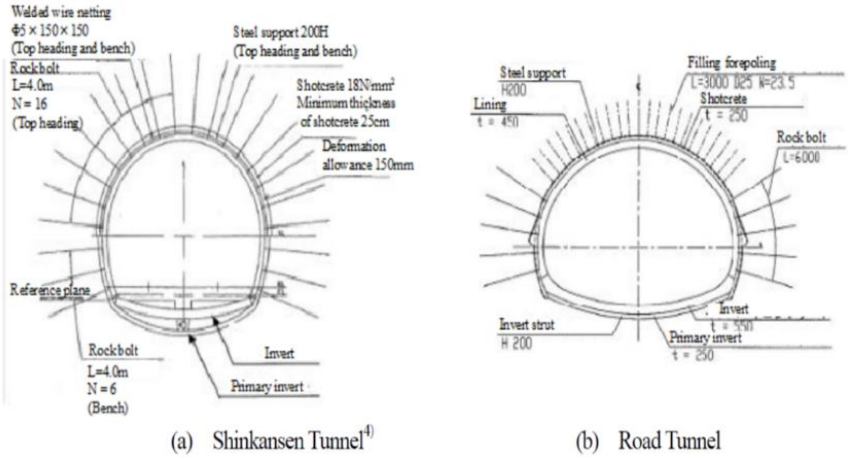
برای تونل‌های جاده‌ای، ضخامت کفبندها به‌عنوان بخشی از الگوی نگهداری استاندارد با توجه به وضعیت زمین پیشنهاد می‌شود. اگرچه، هنگامی‌که یک کفبند در ترکیب با لاینینگ نیاز به ظرفیت باربری در برابر فشار زمین یا فشار آب دارد، ضخامت طراحی باید بر اساس مقاومت، شکل و موارد مشابه، تحلیل عددی و ... تعیین شود.

شکل ۵- ۱۹ نمونه‌ای از ساختار کفبند را نشان می‌دهد. هنگامی‌که 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[1] است. با توجه به محل نصب، کفبند اولیه ممکن است در سطح مقطع کفبند نصب شود و ضخامت کفبند اولیه در ضخامت طراحی کفبند طراحی‌شده 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 بهره برداری 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 باضخامت نگه‌دارنده‌های نیمه پایین یا بالایی[2] برابر است.



شکل ۵- ۱۹- مثالی از کف بند استاندارد

[1] lower half support
[2] thickness of either upper or lower half supports



(a) Shinkansen Tunnel[4] (b) Road Tunnel

شکل ۵- ۲۰- مثالی از نصب کفبند اصلی

۵-۵-٦- 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[1]

اگر برنامه‌ریزی‌شده 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 مچاله 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 تاثیرات 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[2] استفاده شود. اما در صورت نیاز فقط به کفبند، باید به زمان سخت شدن بتن[3] و استحکام مصالح با سن کم[4] و همچنین به دوام طولانی‌مدت و سلامت بعد از بهره‌برداری از تونل توجه شود.

---

[1] Early Closure of Invert
[2] Primary invert
[3] hardening time of concrete
[4] 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.

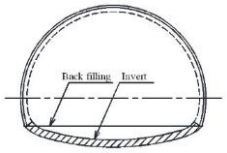
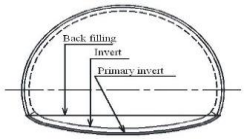
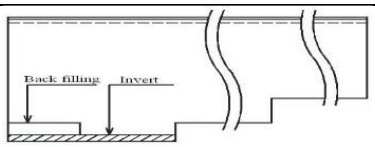
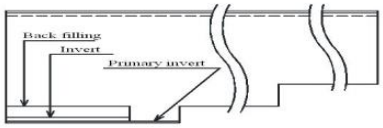
۲- تقاطع کفبند اولیه و نیمه پایین نگهداری‌ها می‌تواند ازنظر ساختاری آسیب پذیر باشد، بنابراین باید احتیاط کرد.

۳- هنگامی‌که کفبند اولیه در مقطع طراحی کفبند قرار می‌گیرد به دوام طولانی‌مدت بتن کفبند ازجمله کفبند اصلی توجه شود.

۴- هنگام پر کردن پس از نصب زودهنگام یا اگر ماشین‌آلات سنگین روی کفبند باشند باید احتیاط کرد درزمانی 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[1]	کفبند اولیه: شاتکریت یا شاتکریت با استفاده از نگهداری‌های فولادی کفبند: بتن ریخته شده در محل
خلاصه	ساخته‌شده 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

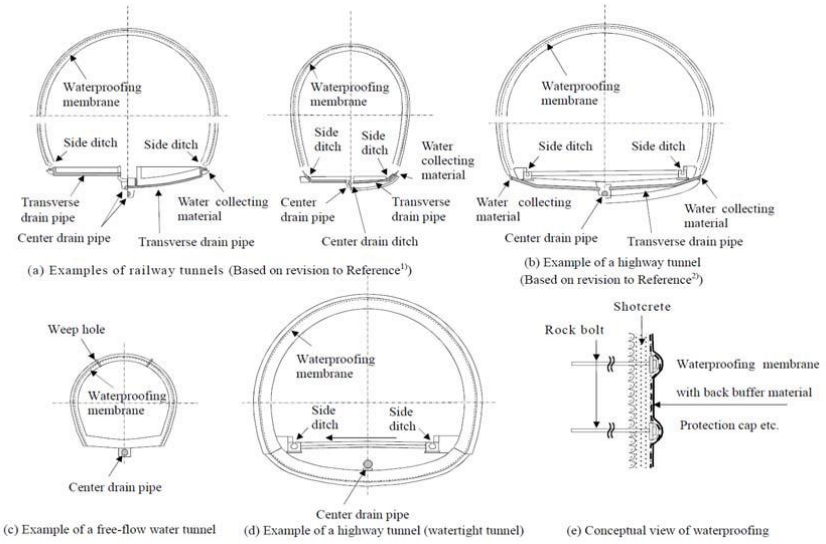
سیستم‌های عایق‌بندی و زهکشی برای حفظ عملکرد تونل و جلوگیری از آسیب دیدن لاینینگ و سایر تاسیسات طراحی می‌شوند.

[1] Cast-in-place concrete

نشت آب در تونل‌ها نه‌تنها 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 پس‌از انجام اقدامات مناسب در پشت لاینینگ برای جلوگیری از نشت آب در داخل تونل، ۲) سیستم‌های زهکشی مانند زهکشی پشت دیوار و زهکش‌های 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 به‌اصطلاح آب‌بند[1] 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 یخ زدن 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 به‌راحتی سطح موردنظر را به‌طور رضایت‌بخشی عایق‌بندی کند. بااین‌وجود ایجاد یک‌لایه عایق‌بندی باضخامت 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. ازآنجاکه 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 ازنظر 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 membrance
[2] Spraying waterproofing
[3] Spraying
[4] coating
[5] watertight tunnels
[6] waterproofing membrances

شکل ۵- ۲۲- تست فشار هوا برای عایق بندی تونل

۵-۶-۳- زهکشی

سیستم زهکشی مناسب که بتواند آب را به‌آرامی 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. به‌عنوان 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[1] به‌عنوان مواد برای لوله‌های تخلیه مرکزی و عرضی استفاده می‌شوند. مواد پرکننده هنگامی‌که 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. هنگامی‌که محل سیستم زهکشی نامناسب باشد آب در کف تونل جمع می‌شود. این روند و درنتیجه افزایش فشار آب درزه‌ها و سایر اقدامات ناشی از بارهای مکرر وسایل نقلیه باعث آسیب به بستر جاده می‌شوند. ازآنجایی‌که 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[2] یا لوله‌های مشبک[3] در پایین‌دیواره جانبی بین شاتکریت و لاینینگ یا یک لوله سوراخ‌دار در زمین استفاده می‌شود. لوله‌های زهکش عرضی، گودال‌های[4] 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

هنگامی‌که 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.

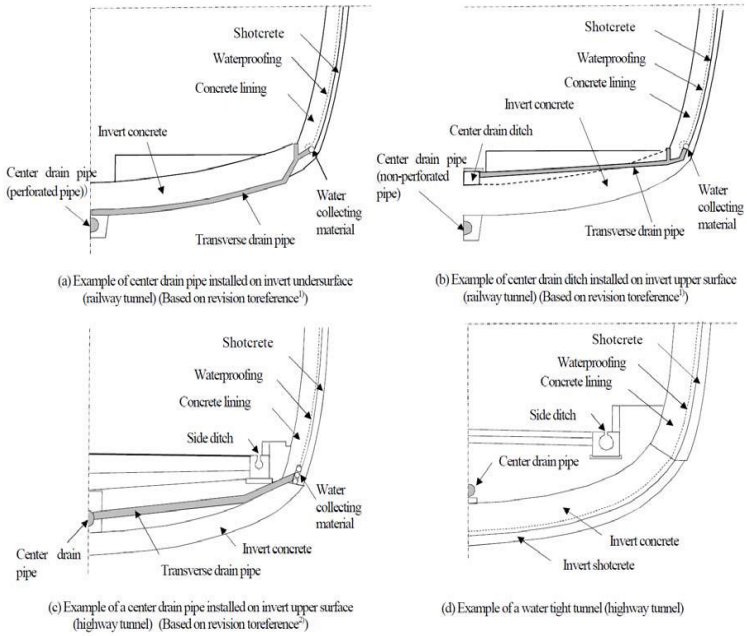
در موارد زیر، مطلوب است که یک لوله زهکشی در سطح بالایی کفبند نصب شود:

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[1] را خواهد داشت.

همچنین هنگامی‌که 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).

هنگامی‌که ارتفاع یک کانال بسته به وجود یا عدم وجود کفبند تغییر می‌کند، یک جعبه اتصال[2] باید در محل تغییر ساختار برای امکان زهکشی آرام نصب شود. برای تونل‌های راه‌آهن، در برخی موارد جعبه‌های بازرسی[3] 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

۵-۷- طراحی پرتال‌ها و زون‌های پرتالی

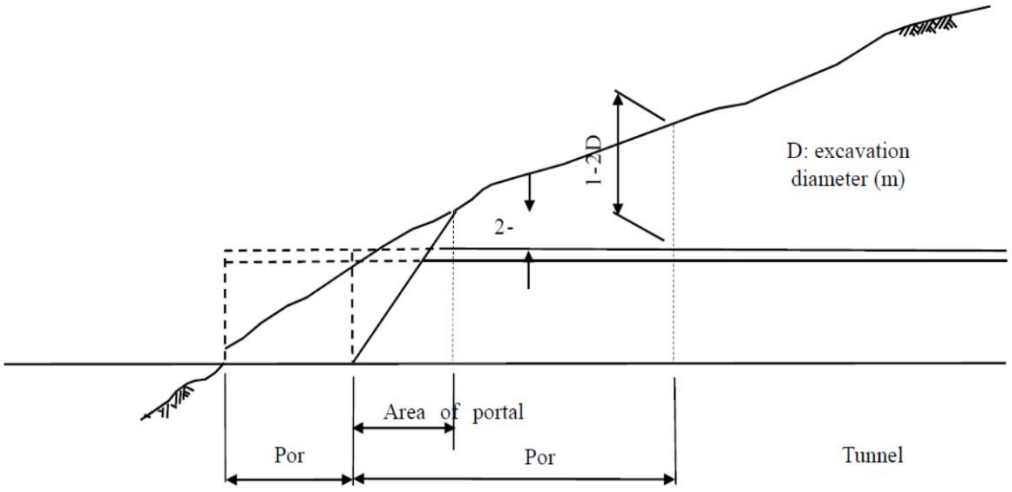
۵-۷-۱- مبانی

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 به‌طورکلی به‌عنوان منطقه‌ای تعریف می‌شود که در آن ارتفاع روباره ۱ تا ۲ برابر قطر حفاری است و همان‌طور که در شکل ۵- ۲۴ نشان داده‌شده 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[1] 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 ازجمله 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 موردتوجه قرار دهد.

در جدول ۵- ۱۸ مشکلات محتمل زون‌های پرتالی و راه‌حل‌های آن ارائه‌شده است.



شکل ۵- ۲۴- ناحیه یک زون پرتالی استاندارد

[1] slope failure

جدول ۵- ۱۸- مشکلات محتمل زون پرتالی و راه‌حل‌ها

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 خاکبرداری‌شده				✓	✓	
تقویت کف			✓	✓	✓	

۵-۷-۲- (گالری) تونل (پرتال‌ها)

۱- گالری تونل که از زون پرتالی محافظت می‌کند باید با در نظر گرفتن شرایط زمین، شرایط آب‌وهوایی، 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 زمین‌شناسی پشت پرتال، ظرفیت باربری زمین، پایداری شیب، سازه‌های مجاور، روش ساخت و شکل مقاطع باز[1] انتخاب شود.

۳- هنگام طراحی گالری پرتال ، اندازه، شکل و آرایش میلگردهای تقویت‌کننده باید پس از مطالعه بارهای عمل‌کننده متناسب با نوع پرتال تعیین شود.

گالری پرتال از زون پرتالی (ناحیه پرتال[2]) در برابر لغزش زمین، ریزش سنگ و بهمن تا حد زیادی محافظت می‌کند و به طراحی مکانیکی پایدار نیاز دارد. ظاهر خارجی و شکل گالری پرتال باید با توجه به کاربری تونل و به‌منظور حفظ

[1] form of open sections
[2] portal zone

سازگاری با محیط‌زیست و چشم‌انداز تعیین شود. هنگام تعیین محل و نوع پرتال، شرایط زیر باید به‌طور جامع مطالعه شود.

- شرایط توپوگرافی و زمین‌شناسی (ظرفیت باربری قسمت پایینی پرتال، پایداری شیب، وجود فشار نامتقارن زمین، احتمال لغزش یا ریزش سنگ، موقعیت نسبت به باتلاق‌ها و دره‌ها)
- شرایط آب‌وهوایی (برف، بهمن و قرنیزهای برفی[1])
- موقعیت پرتال در حین ساخت
- شرایط محیط‌زیست (شرایط کاربری اراضی، میزان تغییرات محیط اطراف و چشم‌انداز منطقه اطراف)
- هماهنگی با طرح‌های اطراف (اتصال با بخش‌های باز مانند پل‌ها، ارتباط با جاده‌ها، کانال‌ها، مکان‌یابی تسهیلات مدیریت تعمیر و نگهداری برنامه‌ریزی‌شده در نزدیکی پرتال)
- بازدهی اقتصادی
- سایر (جهت تابش نور خورشید و غیره)

به‌طور ویژه، هنگام انتخاب محل پرتال باید مراقب بود که زمین بیش‌ازحد لازم قطع نشود تا از پایداری شیب و حفظ محیط‌زیست اطمینان حاصل شود.

شکل‌های پرتال به دو نوع دیواری[2] یا بیرون زده[3] طبقه‌بندی می‌شوند که مشخصات انواع عمومی پرتال‌ها در جدول ۵- ۱۹ نشان داده‌شده است.

پرتال باید به نحوی طراحی شود که پس از تکمیل در برابر بارهای مرده مانند بار خاک پس‌ریز یا بار برف، بار فشرده‌سازی در حین پر کردن، بار چرخ ماشین زمانی که جاده از بالای پرتال عبور می‌کند و یا اثرات زلزله ایمن باشد لازم است این بارها با توجه به نوع پرتال به‌درستی ترکیب شوند.

در میان پرتال‌های دیواری[4]، پرتال‌های نوع بال[5] معمولاً به‌صورت دال کنسولی[6] طراحی می‌شوند که به‌طور صلب به بدنه اصلی تونل متصل می‌شوند. هنگام طراحی دیوار به‌عنوان دیوار حائل برای نگهداری فشار زمین پشت پرتال، تنش بال[7] حاصل را می‌توان با فرض اینکه بدنه اصلی تونل یک انتهای ثابت است و فشار زمین در حالت سکون یا فشار زمین فعال کلمب[8] است را با در نظر گرفتن تأثیر خاک پرکننده محاسبه کرد. بارهای دیگر که اغلب موردتوجه قرار می‌گیرند

---

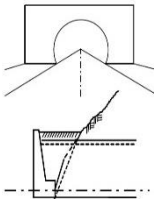
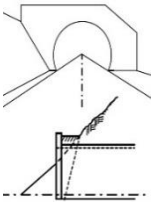
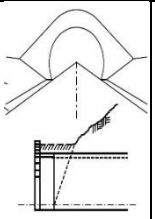
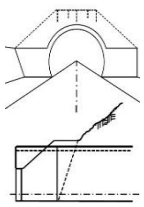
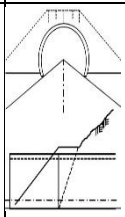
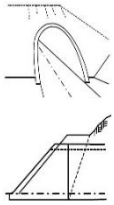
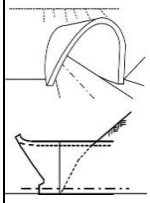
[1] snow cornices
[2] wall
[3] Protruding
[4] wall portals
[5] wing portals
[6] cantilever slab
[7] wing stress
[8] Coulomb's active earth pressure

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[1] ساخت که در بسیاری از موارد معمولاً ضخامتی حدود ۵۰ تا ۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. ازآنجایی‌که 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[2] 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. هنگامی‌که 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. به‌طورمعمول، 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

ع.	دیوار[1]			بیرون زده[2]			
	گرانشی-نیمه گرانشی[3]	نوع بال[4]	نوع بال قوسی[5]	-نوع نیمه بیرون زده[6] - نوع جان‌پناه[7]	نوع بیرون زده[8]	-نوع بامبو نصف شده[9] - نوع دهانه زنگوله[10]	- نوع بامبو نصف شده معکوس[11] - نوع دهانه زنگوله معکوس[12]
							
بررسی اجمالی	دیوار حائل[13] از نوع گرانشی حدود ۱۰ متر جلوتر از موقعیت پرتال قرارگرفته است. اخیراً با نوع بال جایگزین شده و به‌ندرت استفاده می‌شود.	با برش زمین به‌عنوان دیوار حائل زمین عمل می‌کند. ازآنجاکه می‌توان طول تونل را کوتاه کرد مقرون‌به‌صرفه است. برای اکثر تونل‌های راه‌آهن کاربردی است.	برخلاف نوع بال، این نوع از پرتال با گسترش طول تونل و شکل گرد، فشار وارده را کاهش می‌دهد.	بخش قوس به‌عنوان یک نوع بیرون زده ایجادشده و یک دیوار حائل زمین برای جلوگیری از ریزش اضافه شده است. یک ساختار معقول به‌عنوان یک پرتال	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.	این نوع بخش بتن در معرض را در پرتال بیرون زده حذف می‌کند و یک پرتال دهان 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

شرایط زمین مناسب برای کاربرد	- توپوگرافی با شیب نسبتاً تند یا جایی که سازه‌ای مانند دیوار حائل زمین موردنیاز است - جایی که سقوط سنگ محتمل است	- توپوگرافی با شیب نسبتاً تند جایی که زمین قطع و پرتال ساخته می‌شود. - جایی که یک دیوار حائل زمین یا دیوار حائل بزرگ‌شده برای شیب نوع مورب[1] ساخته می‌شود - در برخی موارد از طراحی یک پرتال شیب‌دار استفاده می‌شود.	- توپوگرافی با شیب نسبتاً ملایم - جایی که برش در هردو طرف نسبتاً کوچک است	جایی که توپوگرافی لبه‌دار[2] وجود دارد یا تعدادی سازه در دو طرف به پرتال متصل شوند.	- جایی که توپوگرافی اطراف شیب نسبتاً ملایم داشته باشد. - جایی که اصلاح شیب نوع مورب دشوار است. - درجاهایی که از پرکننده وزنه تعادل[3] برای بهبود شیب استفاده می‌شود. - جایی که سقوط سنگ پیش‌بینی می‌شود.	جایی که توپوگرافی اطراف ملایم و ناحیه اطراف پرتال باز است. - جایی که شیب عمود است - جایی که سایت شامل محوطه‌سازی اطراف پرتال می‌شود.	- جای که نمی‌توان زمین را در شیب تند قطع کرد - جایی که ریزش سنگ رایج است.
شرایط جوی	حتی در مناطق برفی مشکلات اندکی ایجاد می‌شود.	حتی در مناطق برفی مشکلات اندکی ایجاد می‌شود.	حتی در مناطق برفی مشکلات اندکی ایجاد می‌شود.	حتی در مناطق برفی مشکلات اندکی ایجاد می‌شود.	حتی در مناطق برفی مشکلات اندکی ایجاد می‌شود.	رانش برف به هنگام استفاده از در مناطق برفی به‌راحتی رخ می‌دهد.	می‌توان انتظار داشت که از رانش برف در مناطق برفی جلوگیری شود

[1] Oblique
[2] Ridge-like
[3] Counterweight fill

نکاتی موردتوجه به هنگام طراحی و ساخت	بسته به شرایط زمین‌شناسی ممکن است نیاز به شمع یا یک پایه جایگزین در مقیاس بزرگ داشته باشد.	ادغام (یکپارچه‌سازی) پرتال در تونل موردنیاز است.	-بسته به توپوگرافی ممکن است نیاز به باز کردن تونل باشد (به‌ویژه در بخش‌های قوسی) - مقدار مشخصی از پر کردن برای حفاظت از شیب موردنیاز است.	- تونل باز چند متری در تونل اصلی موردنیاز است و برای جلوگیری از ریزش به دیواره‌های حائل نیاز است.	طول تونل گسترش خواهد یافت. - پر کردن محافظ معمولاً موردنیاز است.	- قالب‌بندی و آرایش میلگردهای تقویت‌کننده نیازمند تلاش و هزینه زیادی است. - پر کردن محافظ[1] معمولاً موردنیاز است.	- مطالعه کافی ظرفیت باربری فونداسیون به دلیل ارتباط با مرکز ثقل موردنیاز است. - قالب‌بندی و آرایش میلگردهای تقویت‌کننده نیازمند تلاش و هزینه زیادی است.
چشم‌انداز	-ازآنجایی‌که دیوار مساحت زیادی دارد، روشنایی باید کاهش یابد (مثلاً با بریدگی سطح دیوار) - ازآنجایی‌که پرتال بزرگ به نظر می‌رسد ممکن است باعث شود رانندگان دچار استرس شوند.	-ازآنجایی‌که دیوار مساحت زیادی دارد، روشنایی باید کاهش یابد (مثلاً با بریدگی سطح دیوار) - ازآنجایی‌که پرتال بزرگ به نظر می‌رسد ممکن است باعث شود رانندگان دچار استرس شوند.	- اعمال وزن و فشار را می‌توان با منحنی بخش قوسی کاهش داد. - باید سازگاری با ویژگی‌های 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 کوچک بودن سطح دیوار کم است - سازگار با توپوگرافی اطراف تونل	- نوع دهانه زنگوله با ورودی پهن برای ورود آسان است. - پرتال را می‌توان با محوطه‌سازی با ویژگی‌های 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 چشم‌انداز اطراف، روش ساخت و تغییرات آتی در کاربری زمین باید در هنگام طراحی زون‌های پرتالی در نظر گرفته شود.

۲- طراحی نگهداری و لاینینگ در زون‌های 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 می‌شود و بخشی دیگر برای بخش انتقالی تونل[1] تقسیم می‌شود.

از موارد بسیار مهم در مناطق پرتالی، شروع حفاری تونل می‌باشد که در بسیاری از موارد باتوجه به آسیب‌پذیری این ناحیه ریزش‌های جزئی و بزرگ اتفاق افتاده است. به هنگام شروع حفاری تونل در نواحی پرتال باید تلاش شود از برهم زدن وضعیت تنش‌ها و دست‌خوردگی 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[2]، روش‌های حفاری پرتال و تونل و سازگاری با چشم‌انداز اطراف در نظر گرفته شود. هنگامی‌که شیب پرتال ناپایدار است، قرار دادن پرتال کمی روبه‌جلو در ترکیب با پر کردن وزنه تعادلی[3] اغلب شرایط مطلوبی را ایجاد می‌کند. 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[4] زمین تحکیم نشده و روباره کم در زون‌های پرتالی، تشکیل قوس تونل دشوار است. درنتیجه بار روباره بدون وجود قوس تونل ممکن است به‌طور 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.

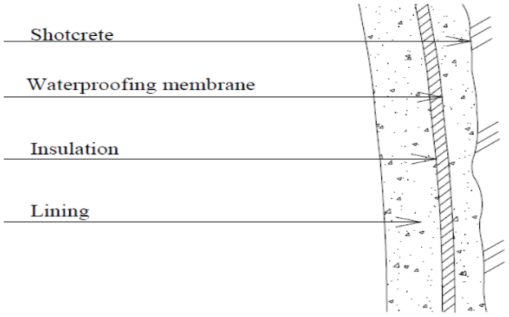
لاینینگ و کفبند در صورت به‌کارگیری در نواحی پرتال باید با میلگردهای تقویت‌کننده و غیره تقویت شوند. بااین‌وجود زمانی که زمین بسیار ضعیف است باید بارها محاسبه و مشخصات بر اساس محاسبات سازه‌ای تعیین شود. علاوه براین، ساختار لاینینگ اطراف زون پرتال ممکن است باتوجه به شرایط بارگذاری، روش ساخت بر اساس ارتفاع روباره و با توجه به شرایط توپوگرافی مانند شیب ملایم سطح زمین به مقاطع مختلفی تقسیم‌بندی شود. همچنین ازآنجایی‌که یک زلزله به‌راحتی می‌تواند اثر نامطلوبی بر پرتال داشته باشد باید تأثیر آن به‌ویژه در زمین‌های ضعیف بررسی شود.

آسیب دیدن[5] مصالح لاینینگ درنتیجه یخ‌زدگی و ذوب شدن یخ ناشی از اثرات هوای بیرون در ناحیه پرتال باعث ایجاد مشکلاتی می‌شود که در صورت لزوم باید از عایق‌بندی[6] 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 می‌دهد.

---

[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 ازجمله زمین‌لغزش، ظرفیت باربری پایین زمین، فشار نامتقارن، نشست سطح زمین و آسیب‌های وارده بر محیط‌زیست باید ازنظر ایمنی، سهولت ساخت، کارایی و صرفه اقتصادی بررسی شوند و در صورت نیاز اقدامات اصلاحی مناسب طراحی شود.



شکل ۵- ۲۵- موقعیت عایق

۵-۸- 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 اگزوز 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.

۵-۸-۱- 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 کوتاه‌مدت (ppm)	متوسط سنجش زمانی (ppm)
منو اکسید کربن(CO)	۲۰۰	۳۵
سولفور هیدروژن(H_2S)	۱۵	۱۰
گاز دی اکسید گوگرد (SO_2)	۵	۲
گاز دی اکسید کربن (CO_2)	۳۰۰۰۰	۵۰۰۰
گاز اکسید ازت(NO_x)	۵۰	۱

یکی از مهم‌ترین مراحل تهویه، محاسبه میزان هوای لازم جهت تهویه کامل است. به‌طورکلی محاسبه‌شدت‌جریان 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- روش‌های تهویه

تهویه در تونل به‌صورت طبیعی یا مصنوعی انجام می‌شود. سیستم تهویه مصنوعی در حین ساخت به سه دسته اصلی سیستم تهویه دهشی، تهویه مکشی و تهویه مختلط قابل‌تقسیم 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 می‌کنند و به کمک آن، هوا را به قسمت‌های موردنظر می‌رسانند. بدین ترتیب، هوای تمیز با گازها و دودهای حاصله مخلوط و باعث رقیق شدن آن‌ها می‌شود. سپس هوای مزبور در داخل تونل به جریان افتاده و پس از رسیدن به دهانه تونل، خارج می‌شود. 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 به‌پیش می‌رود تابع شدت‌جریان 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 می‌کنند که هوای کثیف موجود در انتهای بن‌بست به داخل لوله مکیده شود. اگر لوله تهویه از جنس مواد سخت باشد، می‌توان بادبزن فرعی را در ابتدا یا انتهای لوله نصب کرد. ولی اگر لوله از مواد نرم باشد، اجباراً آن را در انتهای لوله قرار می‌دهند. با مکیده شدن هوای کثیف به داخل لوله تهویه، خلاء نسبی در محل مزبور ایجاد می‌شود. در تهویه مکشی نیز همانند روش دهشی طولی از سینه‌کار بدون تهویه می‌ماند.

- **۵-۸-۱-۱-۳- تهویه مختلط**

در این روش یک بادبزن فرعی دهشی را طوری نصب می‌کنند که انتهای لوله آن تا نزدیکی جبهه کار برسد و توام با آن یک بادبزن مکشی نیز نصب می‌نمایند. بدین ترتیب هوای آلوده از انتهای بن‌بست به‌طرف بادبزن مکشی رانده‌شده و از آن خارج می‌شود. گاهی نیز برای انجام این کار، ابتدا از یک بادبزن واحد به‌صورت مکشی استفاده می‌کنند 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 درصورتی‌که فاصله آن تا انتهای بن‌بست درست انتخاب‌شده باشد، باعث رقیق شدن گازها می‌شود. ازجمله 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 شدت‌جریان لازم هوا انتخاب می‌شود، زیرا این مقدار می‌تواند از هر نظر تونل را تهویه نماید. جهت محاسبه‌شدت‌جریان موردنیاز برای سیستم تهویه دهشی، مکشی و حتی مختلط، در ابتدا باید میزان حجم هوای موردنیاز جهت تهویه جبهه‌کار محاسبه‌شده و پس‌ازآن میزان احتمالی نشت مسیر تهویه از محل بادبزن یا بادبزن‌ها تا جبهه کار تعیین شود. با رعایت ترتیب ذکرشده و از حاصل جمع حجم هوای موردنیاز و میزان نشتی مسیر، می‌توان شدت‌جریان موردنیاز سیستم‌های تهویه را محاسبه نمود.

۵-۸-۲- طراحی سیستم روشنایی

ازآنجایی‌که 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 روشنائی ندارد و میزان روشنایی وابسته به میزان دقت اجرای فعالیت‌هایی است که در داخل

تونل‌ها انجام می‌شود. همچنین روشنایی موردنیاز در داخل تونل‌های در حال ساخت به‌جز در ورودی‌های آن‌ها در طول روز، در کل ثابت است.

ازآنجایی‌که تأمین روشنایی تونل‌های راه در حین ساخت همانند روشنایی تونل‌های پیشرو در معادن زیرزمینی است، میزان حداقل روشنایی موردنیاز برای پیشروی در طول تونل برابر با ۲۰ لوکس و در جبهه کارها به دلیل حضور افراد و انجام فعالیت‌هایی که به‌دقت بیشتری نیازمند است ۳۰ لوکس در نظر گرفته می‌شود. نوع چراغ با توجه به شرایط ایمنی و اقتصادی انتخاب می‌شود سپس با توجه به استاندارد روشنایی برای محل موردنظر، شدت روشنایی متوسط در سطح آن محل انتخاب‌شده و با توجه به ضرایب تصحیحی فاصله چراغ‌ها محاسبه می گردد. تاسیسات موردنیاز تأمین روشنایی حین ساخت تونل عبارت‌اند از:

- وسیله تأمین برق (ژنراتور یا برق شهری)
- چراغ‌ها و لامپ‌ها (لامپ و چراغ فلورسنت یا گازی)
- نوع کابل یا کابل‌های موردنظر و طول آن‌ها
- تابلو برق‌های مناسب (دارای قطعاتی که شامل کنتاکتور، بی متال، رله‌ها و ...)
- ساپورت مناسب جهت نگهداری چراغ‌ها در سقف و دیواره

۵-۹- طراحی تونل در شرایط خاص

۵-۹-۱- کلیات

شرایط خاص به شرایطی گفته می‌شود که در آن باید امکان کاربرد طرح استاندارد در طراحی نگهداری تونل، لاینینگ، کفبند و غیره بررسی شود. اطلاعات لازم برای کاربرد هرکدام از شرایط باید از طریق بررسی به دست آید سپس نگهداری‌های تونل، لاینینگ، کفبند، عایق‌بندی و زهکشی با توجه به شرایط مخصوص به خود طراحی شوند.

۵-۹-۲- زمین‌های خاص

برای زمین‌های خاص زیر، طراحی باید با توجه به ماهیت هر زمین انجام شود:

۱) زمینی که در آن رانش و مشکلات ناپایداری پیش‌بینی می‌شود

۲) ناحیه شکستگی گسل و چین‌خورده

۳) زمین تحکیم نشده[1]

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 پیش‌بینی‌شده 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 تجزیه‌وتحلیل 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[1] ، 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 موردبررسی 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، بالاآمدگی کف و همگرایی دیواره‌های جانبی و غیره ممکن است در هنگام حفر تونل در ناحیه شکستگی گسل و کمربند 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[2] ، 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[3] پایداری جبهه کار پایین و ممکن است منجر به ریزش، جریان‌یابی زمین[4] 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[5] 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 آب‌های زیرزمینی و پایداری طولانی‌مدت درزمانی 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 طولانی‌مدت شود که بر عملکرد تونل اثر منفی دارد. از دلایل بروز چنین مشکلاتی می‌توان به آماس کانی‌های رسی متورمی، جریان پلاستیک و افزایش فشار منفذی به همراه کاهش مقاومت سنگ و اثر فشار گاز تولیدشده در زمین اشاره کرد.

ازنظر اطمینان از ایمنی طولانی‌مدت تونل، ضرورت اضافه کردن عملکردهای مکانیکی به لاینینگ و کفبند بررسی می‌شود. تخمین مناسب بارهایی که پس از اتمام حفاری باتوجه به ماهیت روباره ویژگی‌های زمین شناسی عمل می‌کنند برای آماده‌سازی و نصب ابزار دقیق مانند اکستنسومتر[1] دارای اهمیت می‌باشد. 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 زمین‌های 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[2] باید احتمال هجوم ناگهانی آب در نظر گرفته شود.

۵-۹-۳- شرایط خاص

هنگامی‌که یک تونل در شرایط زیر حفر شود باید ویژگی‌های هر محل در طراحی لحاظ شود:

۱- عبور از محدوده شهری

۲- روباره کم ارتفاع

۳- روباره با ارتفاع خیلی زیاد

۴- عبور از زیرآب

هنگامی‌که یک تونل در محل‌های خاصی حفر می‌شود ممکن است مشکلاتی مانند نشست سطحی، کاهش سطح آب زیرزمینی، جابه‌جایی و تغییر شکل سازه‌های مجاور، تغییر شکل‌های 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 قابل‌توجهی 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 پیش‌بینی‌شده 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 درنتیجه 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. ازآنجایی‌که 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[1] تزریق در زمین مجاور است.

اهداف تزریق شامل آب‌بندی، بهبود زمین یا هردو است. توجه به ماندگاری طولانی‌مدت بدنه بهسازی زمین[2] ضروری است.

[1] countermeasures
[2] the ground improvement body

۵-۹-۳-۱- سازه‌های مجاور

بسته به شرایط طراحی پس از مطالعه موارد زیر، باید سیستم نگهداری، لاینینگ و تقویت‌کننده مناسب طراحی شود:
۱) تاثیر تونل برسازه‌های مجاور ۲) تاثیرات متقابل تونل‌های مجاور و ۳) تاثیرات بر تونل از سازه‌های مجاور.

۱- تأثیر تونل بر سازه‌های مجاور:

سازه‌های مجاور، سازه‌های سطحی و زیرزمینی مانند جاده‌ها، راه‌آهن، کانال‌های آب و ساختمان‌ها در مجاورت یک تونل و سازه‌های مدفون مانند خطوط گاز و کانال‌های آب و فاضلاب خدماتی هستند. اثرات تونل برسازه‌های مجاور شامل تغییر شکل زمین اطراف ناشی از حفاری تونل و پایین آمدن سطح آب زیرزمینی، ترک‌خوردگی و ریزش بر روی سازه‌های مجاور توسط لرزش انفجار است.

هنگامی‌که انتظار می‌رود یک تونل در حین یا پس از حفاری برسازه‌های مجاور اثر می‌گذارد، باید در مرحله طراحی اثرات آن به‌دقت بررسی و اقدامات کنترلی با توجه به نتایج بررسی‌ها در نظر گرفته شود. ازآنجایی‌که میزان تأثیر برسازه‌های مجاور باتوجه به شرایط زمین، اندازه‌ها، روش‌ها و ترتیبات ساخت متفاوت است باید توجه دقیقی به آن شود.

۲- تاثیرات متقابل تونل‌های مجاور:

تونل‌های مجاور دو یا چند تونل هستند که به‌طور هم‌زمان یا در فازهای متفاوت ساخته می‌شوند و بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند.

تونل‌های مجاور به شرح زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

الف) تونل‌های موازی (زمانی که دو یا چند تونل در کنار هم یا بالا و پایین هم به‌طور هم‌زمان یا در فازهای مختلف ساخته می‌شوند. به دو تونل، تونل دوقلو گفته می‌شود.)

ب) تونل‌های مقطع دوچشمی[1] : این نوع از تونل زمانی ارائه می‌شود که تونل‌های جمعی[2] در یک مکان ساخته می‌شوند، جایی که دو تونل باید در مجاورت یکدیگر باشند تا دیوار مرکزی[3] (پایه مرکزی) مشترک باشد.

ج) تونل‌های متقاطع

تونل‌های مجاور در معرض اثرات متقابل توزیع مجدد تنش ناشی از ساخت تونل‌های متعدد قرار دارند. بنابراین وضعیت تنشی که رخ می‌دهد با شرایطی که در طول ساخت یک تونل رخ می‌دهد متفاوت است. بسته به شرایط زمین‌شناسی، تونل‌های موازی که بافاصله دو (در زمین مقاوم) تا پنج (در زمین نرم) برابر قطر حفاری از مراکز تونل‌ها از یکدیگر جداشده‌اند، تأثیر 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 ترک‌خوردگی 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. ازآنجایی‌که میزان تاثیرات 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 درنتیجه 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 به‌گونه‌ای 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 ازنظر ساختاری پیچیده‌تر می‌باشد. درنتیجه 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 موردمطالعه قرار گیرد تا به‌صرفه‌ترین 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[1]

۲- بزرگ شدن مقطع

۳- سطح مقطع بزرگ

۴- سایر اشکال

[1] Bifurcation points

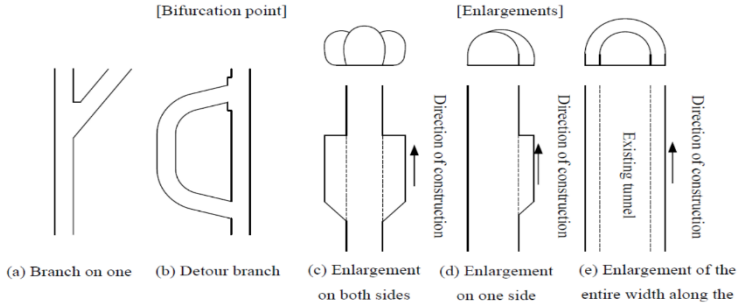
- **۵-۹-۳-۲-۱- نقاط انشعاب، بزرگ شدن‌ها و مقاطع بزرگ**

- نقاط انشعاب و بزرگ شدن

ازآنجاکه تغییرات در شکل مقطع می‌تواند در طول فرآیند حفاری و ساخت رخ دهد، انشعاب‌ها[1] 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 ارائه‌شده است.

الف) نقاط انشعاب: در نقطه انشعاب (a) عرض سطح مقطع منبسط می‌شود. در این حالت تقویت موردنیاز است چراکه تونل و زمین اطراف به‌راحتی ناپایدار می‌شوند. ازآنجایی‌که گفته می‌شود فاصله مرکز به مرکز تونل‌های مجاور که اندرکنش متقابل آن‌ها از بین می‌رود ۲ تا ۵ برابر قطر حفاری است فاصله استفاده‌شده به‌عنوان استاندارد منطقه تقویت‌کننده 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[2] 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[3] نزدیک باشد.

ب) بزرگ شدن مقطع: تونل بزرگ‌شده (c) برای ساخت ایستگاه در تونل راه‌آهن استفاده می‌شود. بزرگ شدن تمام جبهه کار در زمین با شرایط خوب امکان‌پذیر است. ازآنجایی‌که 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 برنامه‌ریزی‌شده است. ازآنجایی‌که 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 به‌تفصیل موردمطالعه قرار می‌گیرد. پارامترهای طراحی مانند شکل مقطع، شرایط زمین، روش حفاری، ناحیه تقویت[1] همراه با رفتار تونل در حین و پس از حفاری باید به‌طور هم‌زمان و کامل موردمطالعه قرار گیرند تا ارزیابی ترکیبی از طراحی و نتایج ساخت ارائه شود.

ب) طراحی با روش تحلیلی: تجزیه‌وتحلیل عددی در مواردی که سطح مقطع یا شرایط زمین خاص است و مطالعه طراحی به‌اندازه کافی توسعه‌نیافته است مفید است. ازآنجایی‌که 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[2] هستند مانند افزایش تعداد و طول راکبولت (شامل راکبولت های 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).

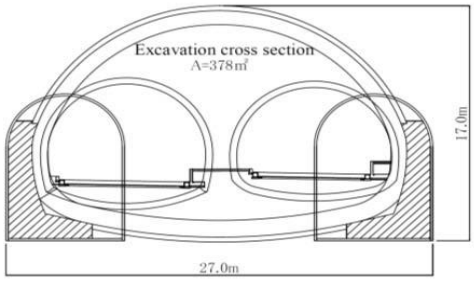
الف) حفاری: به‌طورکلی زمانی که سطح مقطع حفاری بزرگ باشد پایداری جبهه کار کاهش و همگرایی تونل افزایش می‌یابد. بنابراین لازم است اقداماتی مانند تقسیم مقطع حفاری یا اتخاذ روش‌های کمکی انجام شود. ازآنجایی‌که تعداد کمی از تونل‌های قبلی سطح مقطعی بزرگ‌تر از سطح استاندارد داشته‌اند برآورد رفتار زمین و تنش واردشده 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 سطع 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 مورداستفاده 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 قاب[1] 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 اشاره‌شده در پایین، ظرفیت باربری زیادی موردنیاز است؛ بنابراین لازم است ظرفیت باربری با روش‌های مختلف تقویت شامل بتن مسلح[2] یا الیاف کوتاه افزایش یابد. همچنین در برخی موارد به‌جای افزایش ظرفیت باربری از تقویت‌کننده‌های الیافی[3] برای جلوگیری از پوسته پوسته‌شدن استفاده می‌شود. بارهای خارجی شامل:

۱) هنگامی‌که فشار زمین عمل می‌کند

۲) هنگامی‌که فشار آب عمل می‌کند

۳) هنگامی‌که تحت تأثیر زلزله قرار می‌گیرند

۴) هنگامی‌که 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: هنگامی‌که تغییر شکل به‌طور قابل‌توجهی 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[1] 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[2] به دست می‌آید.

۳) هنگامی‌که تونل تحت تأثیر فشار نامتقارن زمین قرار می‌گیرد: در مناطقی مانند پرتال‌ها که تحت تاثیر فشار نامتقارن هستند تغییر شکل ممکن است به دلیل فشار زمین در حین و پس از اتمام حفاری رخ دهد.

- **۵-۹-۳-۳-۲- فشار آب**

هنگامی‌که آب زیرزمینی اطراف به داخل تونل زهکش نمی‌شود (وارد نمی‌شود) تونل باید ضد آب[3] باشد. در یک تونل ضد آب، فشار آب بر روی لاینینگ و کفبند عمل می‌کند. ممبران های ضد آب[4] باید در اطراف تونل ازجمله کفبند نصب شوند. این ممبران ها 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. هنگامی‌که هد هیدرولیکی به‌طور قابل‌توجهی بزرگ باشد لاینینگ آنقدر ضخیم می‌شود که ساخت آن دشوار می‌شود. بنابراین بررسی دقیق هنگام به‌کارگیری تونل ضد آب ضروری است.

- **۵-۹-۳-۳-۳- 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[5] می‌توانند آسیب‌های ناشی از زلزله‌های بزرگ را حتی در نواحی پرتال تا حدودی کاهش دهند. بااین‌وجود 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. هنگامی‌که روباره کم‌عمق باشد قوس زمین به‌احتمال‌زیاد تشکیل نمی‌شود. بنابراین جابه‌جایی زمین

---

[1] frame analysis
[2] coefficient of lateral pressure
[3] watertight
[4] Waterproofing membrance
[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[1] است.

۲) تونل در منطقه‌ای با شرایط بد زمین:

در شرایط نامناسب زمین‌شناسی 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 براین، هنگامی‌که یک تونل در مرزهای لایه‌هایی قرار دارد که در آن ویژگی‌های تغییر شکل به‌سرعت تغییر می‌کنند مانند مرز بین زمین تحکیم نشده و توده سنگ، آسیب با توجه به تفاوت‌های کرنش برشی ممکن است رخ دهد.

- **۵-۹-۳-۳-٤- سایر بارهای خارجی**

زمانی که در طراحی مشخص می‌شود 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 اضافه‌بار در هنگام عبور جاده از روی تونل در شرایط طراحی لحاظ می‌شود. در این موارد ساختار لاینینگ باید با استفاده از تحلیل قاب[2] و تحلیل روش اجزای محدود (FEM) تعیین شود.

[1] slope failure
[2] frame analysis

فصل ششم

ساخت تونل

٦- ساخت تونل

٦-١- تدارکات عمومی

ساخت تونل باید با در نظر گرفتن مدارک و منابع طراحی برای تطبیق با شرایط زمین، پیشروی ایمن و شرایط زیست‌محیطی 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 موردبررسی قرار گیرد.

٦-٢- بررسی و نظارت در حین ساخت

بررسی و نظارت به‌منظور فراهم کردن پیشروی ایمن متناسب با تغییرات وضعیت و رفتارهای زمین ضروری است.

٦-٢-١- 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 موردتوجه قرار گیرد. نتایج این بررسی‌ها به‌منظور بررسی لزوم تغییر احتمالی در روش‌های طراحی و ساخت، تأثیر بر محیط اطراف و اقدامات متقابل موردنیاز 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 وغیره.

٦-٣- 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.

٦-٣-١- فاز اول نقشه‌برداری

در مراحل اولیه برای تهیه نقشه موردنیاز 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 تهیه‌شده 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 پهپاد نیز بنا به نیاز کارفرما وجود دارد.

٦-۳-۲- فاز دوم نقشه‌برداری

پس از تصویب طرح و مشخص شدن محل دقیق تونل و پرتال‌های 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 می‌شود. ممکن است با توجه به طول تونل، توپوگرافی و شرایط محل پرتال‌ها (که در محوطه باز و وسیع قرار دارند یا محوطه محدود)، ابعاد مقطع حفاری و طرح هندسی تونل در انتخاب تعداد و محل ایستگاه‌ها 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 پرتال‌های ورودی و خروجی و جانمایی اولیه، تیم نقشه‌برداری بنا به نیاز پروژه طرح اولیه‌ای از دقت شبکه، تعداد ایستگاه‌ها، نوع ساختمان ایستگاه‌ها و روش تعیین موقعیت این شبکه را در نظر می‌گیرد. سپس به تهیه ملزومات موردنیاز برای احداث شبکه مدنظر خود اقدام می‌کند.

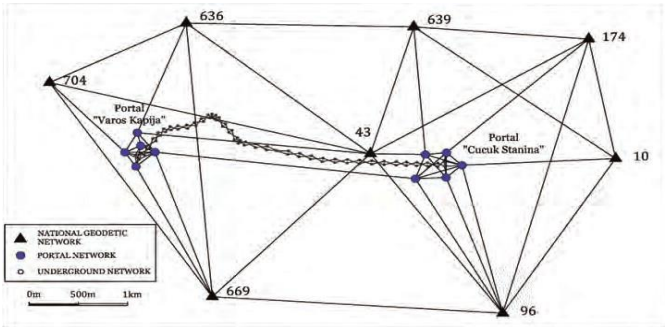
- جانمایی و احداث ساختمان ایستگاه (احداث پیلارهای نقشه‌برداری)

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 (دستورالعمل‌های همسان نقشه‌برداری) در آن محل احداث می‌شوند.

- تعیین موقعیت مسطحاتی و ارتفاعی ایستگاه‌های 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 روش‌هایی همچون مشاهدات با دستگاه‌های گیرنده ماهواره‌ای (GPS/GNSS) یا مشاهدات طول و زاویه با دوربین‌های نقشه‌برداری نسبت به نقاط مرجع سازمان نقشه‌برداری (هر شبکه مختصاتی مرجع در منطقه کاری) محاسبه می‌شود. برای احداث پروژه‌های عمرانی نیاز به شبکه دقیق و ماندگار در محوطه پروژه می‌باشد. به‌نحوی‌که اگر قسمتی یا تعدادی از ایستگاه‌های پروژه بنا به هر دلیلی دچار نقص شد یا از بین رفت، بتوان مجدداً در آن محل شبکه را احیا کرد. معمولاً شبکه ایستگاه‌های مرجع سازمان نقشه‌برداری در نقاطی ساخته‌شده‌اند که از ماندگاری بالایی برخوردار بوده و در صورت نیاز به ایستگاه جدید، می‌توان با انتقال مختصات از نقاط این شبکه، به موقعیت موردنیاز خود دست پیدا کرد. لذا بهتر است تا جای ممکن، شبکه مرجع پروژه، شبکه سازمان نقشه‌برداری قرار داده شود.

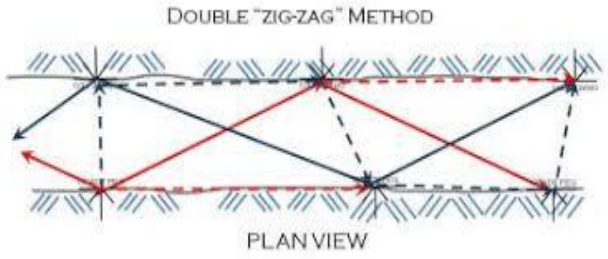
درهرحال پس از احداث ساختمان ایستگاه‌ها در دهانه‌های ورودی و خروجی (ادیت و چاه دسترسی به تونل)، با استفاده از روش تعیین موقعیت ماهواره‌ای GNSS مشاهدات لازم به روش Static در شبکه صورت پذیرفته و سپس در نرم‌افزارهای پس پردازش محاسبه و برآورد خطا می‌شود. لازمه این مرحله برخورداری از دانش و تجربه کار با دستگاه‌های 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 به‌نحوی‌که 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 زیگزاگ)

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.

٦-۳-۳- 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 ترانشه‌های 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 ازبیلت 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 ازبیلت

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 به‌صورت پیش ساخته در طرح‌ها و انواع مختلف در فروشگاه‌های تجهیزات نقشه‌برداری وجود دارد)، در مقاطع موردنظر نصب‌شده 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 به‌مراتب 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.

٦-٤- 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.

٦-٥- 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[1]، 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، بررسی های 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

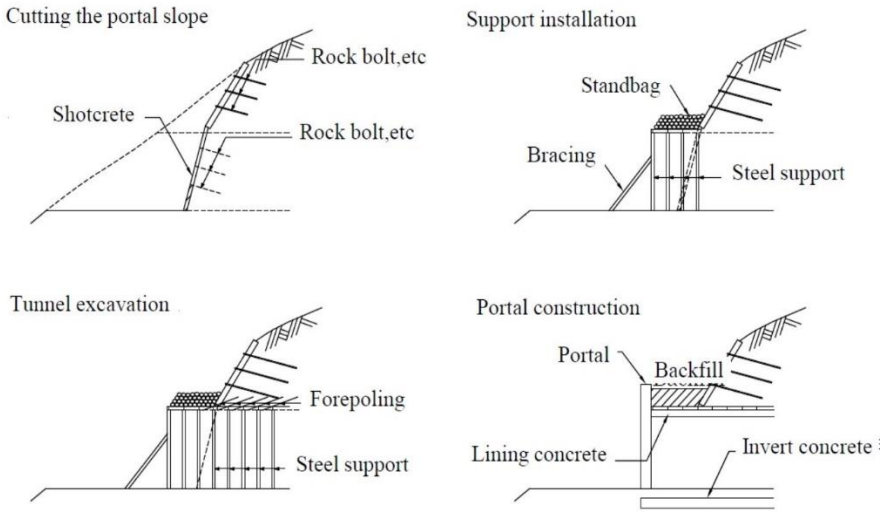
جدول ۶- ۱- مخاطرات احتمالی در پرتال به همراه ملاحظات طراحی آن

مسئله	توضیحات
ناپایداری شیب یا زمین لغزش	اجرای تونل در محدوده پرتال در برخی مواقع با ناپایداری شیب و یا زمین لغزش همراه می‌شود. این امر می تواند در اثر سسست 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 زمانیکه 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 می‌باشد، میزان تغییر شکل‌ها و نشست‌ها به دلیل ظرفیت باربری کم زمین زیاد خواهد بود. بنابراین طراحی پرتال و روش اجرای تونل باید بر اساس ظرفیت باربری مورد نیاز زمین انجام شود.
ریزش جبهه‌کار 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 بهمن	موقعیت پرتال باید به نحوی انتخاب گردد تا از وقوع احتمالی سقوط سنگ، جریان آوار و یا بهمن در امان باشد. در صورت عدم امکان چنین جانمایی، باید تمهیدات مناسبی در برابر این مشکلات اتخاذ گردد.
سازه های مجاور	اثر حفاری تونل بر سازه‌های 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.

٦-٥-١- 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 پرتال‌ها باید حدالامکان از برش شیب‌ها 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، قاب‌گذاری 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 می‌رسد. درصورت نیاز، شیب می‌تواند با شاتکریت و راکبولت 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

شکل ۶- ۴- ساخت پرتال در شرایط مختلف الف) بدون انجام تحکیمات در ناحیه پرتال ب) انجام تحکیمات مختلف (راکبولت، 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 اندازه گیری های زیر علاوه بر مشاهدات معمولی پرتال ضروری است.

- در سطح: مشاهده سطح، اندازه گیری میزان بارندگی، اندازه گیری جابه‌جایی سطحی، اندازه‌گیری نشست سطح و غیره.
- در تونل: اندازه‌گیری جابه جایی مطلق مانند همگرایی و غیره.
- در زمین: اندازه گیری نشست و جابه‌جایی زمین، مشاهده سطح آب زیرزمینی، اندازه‌گیری جابه‌جایی صفحه لغزش زمین و غیره.

باید از قبل یک سیستم اقدامات اضطراری در برابر ناهنجاری‌ها و رفتارهای غیرعادی نواحی اطراف ایجاد شود. هنگامی که یک حادثه غیرعادی رخ می‌دهد پایداری تونل و زمین باید به سرعت با بررسی سیستم نگهداری و لاینینگ، جبهه‌کار، 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 جبهه‌کار [1]
- شاتکریت تقویت شده و راکبولت اضافی
- بسته شدن موقت هدینگ[2] (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 تکیه‌گاه[3] ، خاک‌ریزی اضطراری[4] (برش خاک)

زمانی که لغزش زمین پیش بینی می‌شود خارج کردن کارگران، جلوگیری از وقوع فاجعه ثانویه و فاجعه‌ای که اشخاص ثالث را درگیر می‌کند با استفاده از کنترل ترافیک و غیره ضروری است.

٦-٦- حفاری

مقاطع مختلف حفاری شامل حفر تمام مقطع، حفر تمام مقطع با بنچ کمکی، روش برش بنچ، روش دیاگرام مرکزی و پیشروی دریفت جانبی می‌باشد (شکل ۶- ۵). درصورتی‌که بعد از حفاری تغییر شکل یا نشست زمین محتمل باشد باید بسته شدن زودهنگام سطح مقطع[5] 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 پاطاق (پلکانی) ، ب) روش دیافراگم میانی ج) روش دریفت های جانبی، د) روش برش هسته مرکزی

روش‌های مختلف حفاری در تونل شامل چال‌زنی آتشکاری، حفاری مکانیزه و حفاری دستی است. روش چال‌زنی آتشکاری معمولاً برای سنگ‌های سخت تا متوسط به‌کاربرده می‌شود و از رایج‌ترین روش‌های حفاری در تونل‌های راه می‌باشد. درجاهایی که تاسیسات مهم یا سازه‌ها در همسایگی تونل وجود دارند تا حد امکان باید از روش‌های آتشکاری کنترل‌شده مانند پیش شکافی و انفجار آرام استفاده شود تا لرزش، آسیب و سروصدا به حداقل برسد.

عوامل موثر بر حفر تونل با روش چالزنی و آتشکاری به شرح ذیل هستند:

٦-٦-١- آرایش چال ها در روش آتشکاری

الگوی انفجاری در تونل‌ها به ابعاد تونل، مقاومت سنگ‌ها، ضخامت فشنگهای مواد منفجره، قدرت مواد منفجره و عواملی نظیر آن‌ها بستگی دارد. همانگونه که در شکل ۶- ۶ مشاهده می‌شود چال‌ها در مرکز مقطع به شکل گوه‌ای (V) یا موازی و در اطراف محیط تونل به صورت موازی حفر می‌گردند. چال‌های انفجاری عملا به چند گروه تقسیم می‌شوند (شکل ۶- ۷):

A- بخش مرکزی یا برش[1] که مهمترین نقش را در عملکرد سایر چال‌ها و پیشروی تونل دارد.

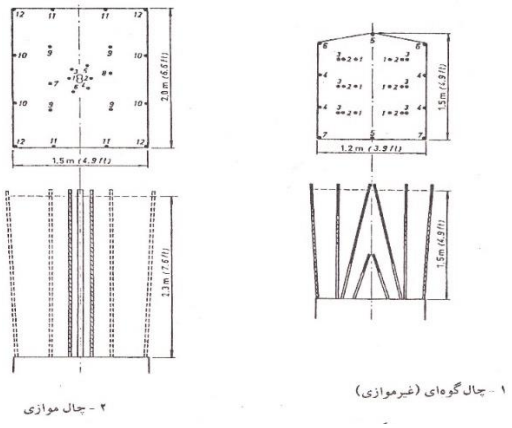
B- بخش پیشروی که افقی هستند و سطح آزاد طرف راست یا چپ آن‌ها قرار دارد.

C- بخش پیشروی که سطح آزاد در پایین چال قرار دارد.

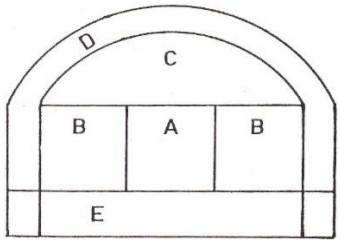
D- بخش دیوار و سقف تونل

[1] Cut

E- بخش کف تونل

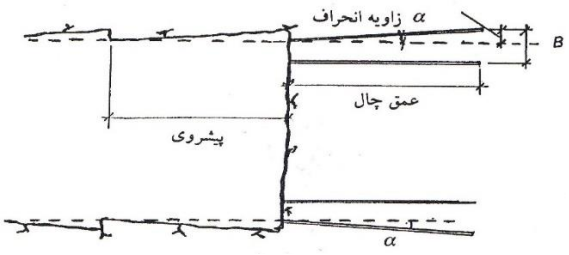


شکل ۶- ۶- حفر تونل با چال موازی و غیرموازی



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 می باشد، لذا مقطع تونل‌ها عملا مطابق شکل ۶- ۸ می باشد. 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 چال ها

٦-٦-٢- 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 چال زن‌های 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 جامبوهای 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.

٦-٦-٣- خرج‌گذاری

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 خرج‌گذاری 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

٦-٦-٤- 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 مجددا بازدید گردند، چراکه احتمال پارگی سیم‌ها وجود دارد سپس با رعایت کلیه نکات ایمنی عمل انفجار توسط آتشکار صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که معمولا 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 آتشکار از ضروریات و در زمره نکات ایمنی می‌باشد.

مصرف مواد منفجره در حفر تونل از ۰/۹ Kg/m^3 در تونل‌های با مقاطع بزرگ تا ۳/۶ 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 توده‌سنگ 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 ۰/۶ تا ۱/۲ متر و در تونل های 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.

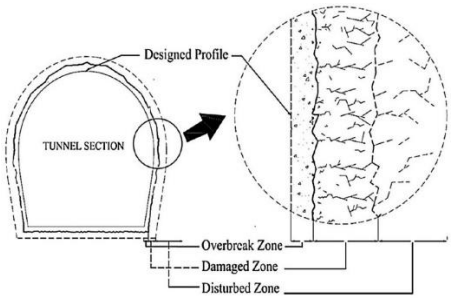
بیشتر لرزش زمین در انفجار تونلی ناشی از انفجار چال‌های برش است، زیرا در چال‌های برش خرج ویژه بیشتر از سایر چال‌های تونل است و تنها یک سطح آزاد وجود دارد.

٦-٦-٥- اضافه حفاری

اضافه حفاری[1] (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 ۱۵درصد 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.

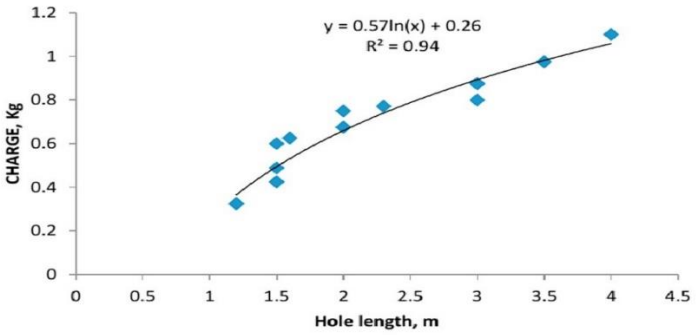
جدول ۶- ۲- طراحی الگوی انفجاری برای چال های محیطی

نوع چال	RMR	<۲۰	۴۰-۲۰	۶۰-۴۱	۸۰-۶۱	۱۰۰-۸۱
چال های محیطی	فاصله داری[1] (متر)	۰/۵ – ۰/۵۵	۰/۵۵ -۰/۶	۰/۶ – ۰/۶۵	۰/۶۵ – ۰/۷	ماکزیمم ۰/۷۵
	بارسنگ[2] (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 چال های 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

Q	طبقه بندی RMR	طول چال (متر)	خرج (کیلوگرم)	اضافه حفاری (cm)
۷۰	۱۰۰-۸۱	۳	۰/۸۷۵	۱۴/۴
۵۴	۸۰-۶۱	۳/۵	۰/۹۷۵	۱۴
۵/۹	۶۰-۴۰	۲	۰/۶۷۵	۱۴/۵
۰/۶	۴۰-۲۱	۱/۵	۰/۴۲۵	۱۷/۳
۰/۰۷	< ۲۰	۱/۲	۰/۳۲۵	۲۱/۳

روش حفاری مکانیزه برای سنگ‌های متوسط تا نرم و زمین‌های خاکی استفاده می‌شود. ازآنجایی‌که این روش نیاز به مواد منفجره ندارد صدا و لرزش بسیار کمتری ایجاد می‌کند و برای مناطقی که حفظ محیط‌زیست دغدغه اصلی است مناسب می‌باشد. هنگام انتخاب حفاری مکانیکی، مطالعه کامل سهولت کار و صرفه اقتصادی ضروری است. ازآنجایی‌که حفاری دستی ازنظر کارایی و ایمنی پایین‌تر است استفاده از آن به موارد خاص محدود می‌شود.

٦-٦-٦- 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 سنگ های 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 لق‌گیری 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 ازچکش‌های ضربه‌ای هیدرولیک، چنگک‌ها و چنگال‌های خراش‌دهنده و برش‌دهنده‌ها و در روش سنتی با استفاده از بالابر و دیلم لق گیری، توسط کارگر استفاده میگردد

پیش‌شرط حفاری تونل، پایداری جبهه‌کار 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، راکبولت تاج، کف و جبهه کار و در مواردی فورپولینگ لازم است.

٦-٦-٧- اضافه حفاری

در زمین‌هایی که ناپایداری جبهه‌کار و در نتیجه اضافه حفاری پیش‌بینی می‌شود ممکن است از روش‌های کمکی مانند فورپولینگ استفاده شود.

برای به حداقل رساندن بیش‌شکافی در روش چال‌زنی آتشکاری همانطور که اشاره شد باید از تجهیزات حفاری که بتواند دقت حفاری را تضمین کند استفاده کرد همچنین روش‌های مناسبی مانند انفجار آرام را نیز می‌توان به کاربرد. در حفاری مکانیزه، کارکنان باید به‌اندازه کافی مهارت داشته باشند تا از اضافه حفاری جلوگیری کنند.

اخیراً از تکنیک‌های پیشرفته‌ای برای نقشه‌برداری و مدیریت بیش‌شکافی مانند سیستم علامت‌گذاری مقطع[1] و ابزارهای اندازه‌گیری مقطع غیر منشوری[2] استفاده‌شده است.

٦-٦-٨- 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.

٦-٧- حمل

٦-٧-١- برنامه حمل

۱) برنامه حمل باید باتوجه به شرایط زمین، اندازه سطح مقطع، طول و شیب تونل، روش حفاری، روش پیشروی و غیره برنامه‌ریزی شود. این طرح همچنین باید برای فاصله از محل دمپ، شرایط مسیر و سیستم دریافت در محل دمپ مناسب باشد.

۲) اگر مصالح حفرشده حاوی فلزات سنگین باشد باید اقدامات مناسب در نظر گرفته شود.

---

[1] cross section marking systems
[2] non-prism section measuring instruments

٦-۷-۲- ماشین‌های حمل

۱) ماشین‌های حمل: بسیاری از ماشین‌ها از موتور دیزلی یا اخیرا الکتریکی استفاده می‌کنند. در صورت استفاده از ماشین دیزلی باید تهویه مناسب برای رقیق کردن گازهای خروجی در نظر گرفته شود.

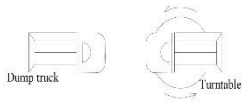
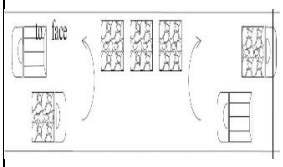
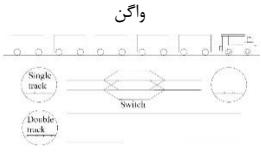
همچنین سه روش حمل‌ونقل شامل جاده‌ای، ریلی و زنجیری وجود دارد. در صورت حمل‌ونقل ریلی، گاهی اوقات از لودر ریلی یا نوار نقاله به‌عنوان وسایل کمکی بارگیری استفاده می‌شود. از لودرهای دمپ کناری[1] باتوجه به محدودیت فضا در تونل‌ها برای بارگیری می‌توان استفاده کرد.

۲) حمل مصالح: روش‌های انتقال مصالح حفاری در بی

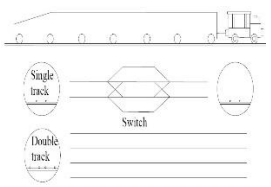
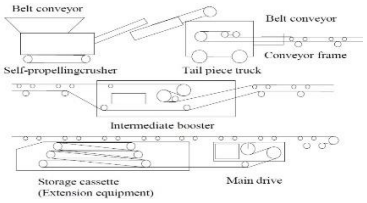
جدول ۶- ۴ ارائه شده‌است. در حمل‌ونقل جاده‌ای از کامیون‌های کمپرسی باربری و کامیون‌های کمپرسی بزرگ و در حمل‌ونقل ریلی از ماشین‌های شاتل[2] استفاده می‌شود. از انواع دیگر روش‌ها می‌توان به روش کانتینری[3]، روش نوار نقاله و روش کپسول[4] اشاره کرد. هنگام انتخاب ماشین حمل، اندازه و تعداد آن‌ها باید متناسب 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

سیستم		نگاه کلی	سهولت کار	محیط زیست در تونل[1]	تجهیزات
حمل و نقل جاده ای	دامپ تراک 	جهت انتقال مصالح حفاری دامپ تراک توسط لودر چرخ دار بارگیری و ... بارگیری می شود.	ترافیک پیچیده کامیون ها	از آنجایی که از موتور احتراق[2] داخلی استفاده می شود باید تهویه کافی در تونل فراهم شود.	ممکن است برای تغییر جهت و چرخش کمپرسی ها به یک صفحه گردان[3] نیاز باشد.
	نوع کانتینر [4] 	به جای دامپ ترک ها کانتینرهای متعدد از نوع جداشدنی به طور موقت با هدف بازشدن زود هنگام جبهه کار استفاده می شود.	مصالح در پشت جبهه کار قرار می‌گیرد و به زمان کمتری برای مدیریت در جبهه کار نیاز است.	مشابه بالا	ممکن است به صفحه گردان برای تغییر جهت نیاز باشد.
حمل و نقل ریلی	واگن 	مصالح حفاری توسط لودر بر روی واگن‌ها بارگیری و به خارج از تونل منتقل می شوند.	هنگامی که قطارها و تعداد زیادی ماشین استفاده می شوند باید به دقت مدیریت شوند.	استفاده از موتور های الکتریکی محیط داخل تونل را پاک نگه می دارد.	- تجهیزات راه‌آهن - بخش تغییر مسیر[5]

[1] Environment in the tunnel
[2] Internal combustion
[3] Turntable
[4] Container type
[5] Shunting

سیستم		نگاه کلی	سهولت کار	محیط زیست در تونل[1]	تجهیزات
ماشین شاتل[1] 		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 می شود.	- به مانند بالا - بر خلاف واگن‌ها از آنجا که ماشین شاتل ظرفیت بالایی دارد بارگیری به ندرت متوقف می‌شود.	به مانند بالا	به مانند بالا
نوار نقاله 		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.	به همراه پیشروی جبهه کار، نوار نقاله اضافی، قاب نقاله[2] و محرکه تقویتی[3] لازم است.	از آنجایی که از هیچ موتور احتراق داخلی استفاده نمی شود محیط داخل تونل می تواند پاک نگه داشته شود.	- نوار نقاله - قاب نقاله - موتور - تجهیزات گسترش طول - نوار نقاله - سنگ شکن

٦-٨- تأسیسات حین ساخت

٦-٨-١- 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.

٦-٨-٢- 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:

---

[1] Shuttle car
[2] Conveyor frame
[3] Booster drive

- گردوغبار یا دود انفجار تولیدشده در حین حفاری، انفجار، حمل‌ونقل و ...
- گازها و دود خروجی از موتورهای دیزلی
- گاز سمی از حلال‌های آلی[1]
- 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

ماده منفجره	نرخ انتشار گازهای سمی*	
	کربن منو اکسید (kg/m^3) (CO)	اکسید نیتروژن(kg/m^3) (NO_x)
دینامیت	۸×۱۰^{-۳}	۱.۵×۱۰^{-۳}
ماده منفجره اسلاری	۵×۱۰^{-۳}	۱.۵×۱۰^{-۳}
دینامیت های دیگر	۱۱×۱۰^{-۳}	۲.۵×۱۰^{-۳}
آنفو	۳۰×۱۰^{-۳}	۲۰×۱۰^{-۳}

* هنگامی که تنها یک ماده منفجره وجود دارد، غلظت مجاز روی CO =50 ppm و NOx =25 ppm تنظیم می شود

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 ۱/۵٪ یا غلظت اکسیژن کمتر از ۱۸٪ یا غلظت سولفید هیدروژن بیش از ۱۰ ppm است منع شوند. همچنین برای جلوگیری از اختلالات بهداشتی ناشی از گرما و رطوبت، دمای تونل باید زیر ۳۷ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شود.

[1] organic solvents

٦-۹- 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[1] یا با آن تماس مستقیم داشته‌باشد. 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 به‌عنوان نگهداری اولیه باید دقت شود تا تمام فضای پشت قاب فولادی با شاتکریت پر شود.

۲) هنگام نصب سیستم نگهداری‌ها، توالی نصب باید به‌گونه‌ای باشد که عملکرد هر سیستم نگهداری به‌تنهایی مورداستفاده عملی قرار گیرد و درعین‌حال سیستم نگهداری کلی نیز با در نظر گرفتن شرایط زمین کارایی لازم را داشته باشد. به‌طورکلی سیستم نگهداری باید به ترتیب زیر نصب شوند:

- اگر شرایط زمین خوب باشد: ۱) شاتکریت ۲) راکبولت
- اگر شرایط زمین ضعیف باشد: ۱) شاتکریت اولیه ۲) نگهداری فولادی ۳) شاتکریت ثانویه ۴) راکبولت

به‌ویژه 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 به‌سرعت با تقویت سیستم نگهداری همراه باشد. شاتکریت یا راکبولت اضافی برای مقابله با شرایط غیرعادی استفاده می‌شوند. بااین‌وجود 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[2] 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

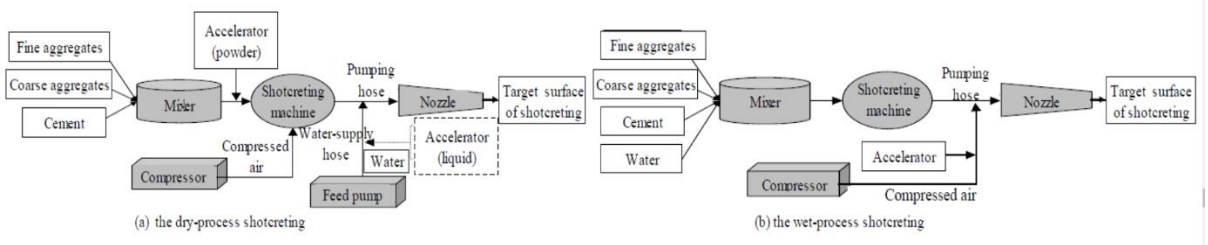
سیستم نگهداری	نمونه های تقویت
میل مهار	- راک‌بولت مکمل با همان طول معین - راک‌بولت‌های طویل - راک‌بولت های با اصطکاک (در صورت ورود حجم غیرعادی آب)

[1] fuse
[2] replacement

	- راک‌بولت های خود حفار[1] (به ویژه در چال های با زبری زیاد)
شاتکریت	- شاتکریت اضافی - سیم اضافی - شاتکریت الیافی - بتن پاشیده شده با مقاومت بالا
نگهداری فولادی	- نگهداری فولادی اضافی - تغییر شکل مقطع نگهداری فولادی - نگهداری فولادی با پایه قاب[2] (در صورت نشست شدید پایه های قاب) - استفاده از wall beam - کفبند فولادی[3]
سایر تقویت کننده ها	- بهسازی زمین - بتن محافظ کف [4] - پایه کناری[5]
تجهیزات دیگر	- میلگردهای تقویت کننده - داربست[6] - Pillar support, sleeper saddle, etc

٦-۹-۱- شاتکریت

با توجه به روش‌های اختلاط دو نوع شاتکریت وجود دارد: شاتکریت تر و خشک. روش انتخاب‌شده به مزایا و معایب، مقیاس کار، حجم شاتکریت و غیره بستگی دارد. نمودار سیستماتیک شاتکریت‌تر و خشک در شکل ۶- ۱ و ویژگی هرکدام از روش‌ها در جدول ۶-۷ ارائه شده است.



شکل ۶- ۱۱- دیاگرام روش‌های شاتکریت

جدول ۶- ۷- ویژگی‌های روش‌های شاتکریت

[1] Self drilling rock bolts
[2] wing ribs
[3] Steel invert support
[4] Foot protection concrete
[5] Side pile
[6] Scaffolding

نوع فرآیند شاتکریت / نوع		فرآیند خشک	فرآیند تر
خصوصیات بتن	ویژگی های مربوط به برنامه ریزی طرح اختلاط	- بسته به شرایط (خشک یا مرطوب) سطح هدف شاتکریت، نسبت آب به سیمان را می‌توان 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.	با بتن پایه[1] تولید شده در کارخانه، مدیریتی معادل بتن معمولی امکان پذیر است.
	خصوصیات مقاومتی (مقاومت اولیه)	مقاومت اولیه سریعتر از فرآیند تر ایجاد می‌شود زیرا نسبت آب به سیمان معمولا نسبت به فرآیند تر کمتر است.	مقاومت اولیه کندتر از فرآیند خشک ایجاد می‌شود زیرا معمولا نسبت آب به سیمان به دلیل اطمینان از قابلیت پمپاژ بیشتر است.
	طرز کار	از آنجا که توسعه مقاومت بلافاصله پس از شاتکریت بسیار زیاد است، سطحی که شاتکریت اعمال شده نسبتا آسان صاف می‌شود.	احتمالا به دلیل اینکه توسعه مقاومت بلافاصله پس از شاتکریت نسبتا کند است سطحی که بتن به آن پاشیده می‌شود بسته به نوع سنگدانه ها تمایل به ناهمواری دارد.
عملیات شاتکریت	فاصله پمپاژ	افقی: ۳۰۰-۱۵۰ متر (حداکثر ۱۰۰۰ متر) قائم: ۱۵۰-۱۰۰ متر	افقی: ۱۰۰ متر قائم: ۵۰-۳۰ متر
	ظرفیت	حداکثر ۱۲ m^3/h	حداکثر ۲۰ m^3/h
سایر	گرد و خاک	می‌توان 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 می‌کند.	به مانند روش خشک می‌توان تعیین روش‌های مناسب میزان گرد و غبار را کاهش داد. اگرچه در مقایسه با روش خشک گرد و غبار کمتری تولید می‌کند.
	برگشت[2]	می توان با تعیین مناسب روش پمپاژ، اختلاط بتن و ... میزان برگشت را کاهش داد.	می توان با تعریف مناسب روش پمپاژ، طرح اختلاط بتن پایه و ... میزان برگشت را کاهش داد.

[1] Base concrete
[2] Rebound

نوع فرآیند شاتکریت / نوع		فرآیند خشک	فرآیند تر
	اقدامات در برابر ورود آب	از آنجایی که تنظیم طرح اختلاط آسان است می‌توان بر این شرایط غلبه کرد.	تنظیم طرح اختلاط دشوار است بنابراین غلبه بر ورود آب مشکل است.
	فاصله زمانی اختلاط تا پاشش	بسته به حجم رطوبت سنگدانه‌ها در این روش انعطاف پذیری بیشتری وجود دارد.	-در عرض ۱/۵ ساعت (در دمای بیش از ۲۵ درجه سانتیگراد) -در عرض ۲ ساعت (در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد یا کمتر)
	تجهیزات تولید و پاشش	در حالیکه برخی تجهیزات شاتکریت در مقیاس بزرگ وجود دارد، می توان از تجهیزات ساده و با قابلیت جابه جایی آسان تر استفاده کرد. تجهیزات تولید نیازی به تجهیزات تصفیه آب کدر ندارند.	تجهیزات شاتکریت معمولا در مقایس بزرگ هستند و اغلب نیاز به یک کارخانه در محل کارگاه می باشد. تجهیزات تولید به تجهیزات تصفیه آب کدر نیاز دارند.
	تمیز کردن	می توان ماشین آلات و شلنگ را فقط با هوا تمیز کرد.	شست و شوی کامل دستگاه شاتکریت، تجهیزات تولید و شلنگ مورد نیاز است.

٦-۹-۲- 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 طورکلی 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 بزرگترشدن 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 اضافه‌شدن 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 تعیین‌شده 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 (روش‌تر)	۱۵	۸	۳۶۰	۵.۵
آزادراه	مخلوط با مقاومت بالا	۱۰	۱۸±۲	۴۵۰	۱۰
	مخلوط استاندارد	۱۵	۸±۲	۳۶۰	۷

٦-۹-۳- خواص مکانیکی شاتکریت

در حالت کلی معمولا در تونل‌ها، مقاومت فشاری اولیه نسبتا بالایی مورد نیاز است. مقاومت یک روزه برای کاربردهای مختلف در تونل‌های جاده‌ای N/mm^2 ۱۰-۵، تونل راه‌آهن N/mm^2 ۸ 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 معمولا براساس مقاومت فشاری ۲۸ روزه یا بلند مدت تعریف می‌شود که برای تونل‌های جاده‌ای و راه‌آهن N/mm^2 ۱۸ و در تونل‌های آزاد راهی دو خطه برای کاهش ضخامت شاتکریت N/mm^2 ۲۵-۲۱ تعیین شده است.

٦-۹-٤- ماشین های 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[1] و پمپ فشار آب استفاده می‌شود. دو نوع دستگاه شاتکریت شامل انواع پمپاژ و هوا[2] می‌باشد. ماشین‌آلات مناسب باید با توجه به سوابق قبلی و انجام آزمایشات اولیه جهت تأیید کیفیت و کارایی بتن تعریف‌شده انتخاب شوند. هنگامی‌که 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

به‌کارگیری نازل برای شاتکریت تقریباً به دو روش تقسیم می‌شود استفاده از ربات شاتکریت باقابلیت کنترل از راه دور و عملیات دستی. ربات شاتکریت معمولاً نیازی به داربست ندارد و می‌تواند با سرعت‌بالا پاشش انجام دهد. بااین‌وجود زمانی که تونل کوچک یا فضا محدود باشد و حجم شاتکریت کم است از روش دستی استفاده می‌شود.

٦-٩-٥- پاشش شاتکریت

درجایی که مواد خارج‌شده 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 به‌گونه‌ای باشد که سرعت برخورد و چسبندگی در شرایط بهینه باشد.

ضخامت شاتکریت در هر زمان باید به‌گونه‌ای 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 تعیین‌شده ادامه داده شود. از طرفی شاتکریت باید به‌گونه‌ای اعمال شود که علاوه بر پوشش ناهمواری‌ها، فشار وارد بر دیواره تونل به‌آرامی منتقل شود. سطح شاتکریت باید تا حد ممکن صاف باشد تا از واردکردن آسیب به عایق‌بندی و ترک در لاینینگ جلوگیری شود. شاتکریت در قسمت مرزی بین هد و بنچ باید به‌دقت پاشیده شود چراکه در طول فرآیند ساخت این قسمت می‌تواند به‌راحتی تضعیف شود.

ازآنجاکه شرایط آب ورودی از حالت مرطوب تا فوران متغیر است و جریان آب زمین باعث شسته شدن بتن و درنتیجه 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 به‌تدریج افزایش یابد تا به واحد حجم مشخص‌شده برای طرح اختلاط برسد. از طرفی برای شاتکریت تر، ویسکوزیته شاتکریت افزایش یابد تا کمتر در معرض شسته شدن توسط جریان آب باشد.

٦-١٠- راک بولت

٦-١٠-١- تجهیزات

ماشین‌های حفاری باید با توجه به شرایط زمین، اندازه و شکل مقطع تونل، روش حفاری، طول و تعداد راک‌بولت‌ها انتخاب شوند. به‌طورکلی از جامبو چرخ‌دار مجهز به دریفترهای هیدرولیکی[1] و برای قرار دادن راک‌بولت‌ها در چال‌های حفرشده، معمولاً از دریفترهایی با اتصالات نصب‌شده استفاده می‌شود.

[1] hydraulic drifters

٦-۱۰-۲- چال زنی و تمیز کردن چال‌ها برای راک بولت

چال‌های راک‌بولت باید با میله‌ها و مته‌های حفاری مناسب مطابق با موقعیت، جهت، عمق و قطر طراحی‌شده حفاری شوند. پودر گردوغبار موجود در چال‌های قبل از نصب راک‌بولت 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 تعیین‌شده بیشتر شود و درنهایت منجر به مصرف میزان بیشتری از مواد چسبنده یا اتصال نامناسب می‌شود. برای راک‌بولت‌های نوع اصطکاکی باید توجه ویژه‌ای به قطر چال شود چراکه اتصال مستقیماً به نیروی اصطکاک بین راک‌بولت 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 ازجمله شکست چال حفاری‌شده، 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 به‌جای آب با استفاده از محلول حباب یا پلیمر[1] و غیره انجام می‌شود.

جدول ۶- ۹- مشکلات حین چال زنی برای راکبولت ها

پدیده	علت	مشکلات
پر شدن یا شکست چال حفاری	شرایط زمین شناسی: - توده سنگ خرد شده -زون خرد شده - خاک ماسه‌ای - خاک چسبنده - سنگریزه	-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
بزرگ شدن قطر چال	شرایط زمین شناسی: - توده سنگ خرد شده - زون خرد شده - خاک ماسه‌ای - خاک چسبنده - سنگریزه	مقاومت اتصال مناسب نیست
گرفتگی	شرایط زمین شناسی: - توده سنگ خرد شده	پاک کردن پودر سنگ دشوار است.

[1] bubble or polymer solution

پدیده	علت	مشکلات
	- زون خرد شده - خاک ماسه‌ای - خاک چسبنده - سنگریزه - راکبولت طویل - راکبولت روبه پایین	
انحراف چال	شرایط زمین شناسی: - توده سنگ خرد شده - زون خرد شده - سنگریزه - راکبولت طویل	- بیرون کشیدن راد حفاری مشکل است -نصب بولت مشکل است
از دست دادن آب حفاری	شرایط زمین شناسی: -توده سنگ خرد شده - زون خرد شده	- پاک کردن پودر سنگ دشوار است.

٦-١٠-٣- نصب و تزریق راک بولت ها

راکبولت ها باید در عمق تعیین‌شده نصب‌شده و برای رسیدن به مقاومت اتصال تعریف‌شده تزریق شوند. پس از تزریق، مهره‌ها باید روی راکبولت ها نصب شوند و از تماس صفحه[1] بولت با سطح حفاری‌شده اطمینان حاصل شود.

٦-١١- 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 به‌دقت در محل از پیش تعیین‌شده 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[1] در مواردی که باید نشست فوراً کنترل شود استفاده کرد.

همان‌طور که اشاره‌شده 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.

٦-١٢- 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 فضاهای 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 توده‌سنگ در محل ساختگاه می‌توان پیش‌بینی‌های نظری طراحی را با واقعیت مقایسه و پارامترهای توده سنگ را اصلاح و یا تأیید کرد. به‌عبارت‌دیگر سنجش رفتار توده سنگ در محل، مکمل و تصحیح کننده طراحی نظری است. به مشاهده، اندازه‌گیری و ثبت پارامترهای رفتاری توده‌سنگ، رفتار سنجی[2] و به هر وسیله‌ای که بدین منظور استفاده شود، ابزار[3] و به عمل استفاده از ابزار برای رفتار سنجی، ابزاربندی[4] گفته می‌شود.

یک برنامه رفتارسنجی شامل انتخاب ابزار مناسب، آرایش ایستگاه‌های ابزار دقیق، نصب و به‌کارگیری ابزار دقیق، قرائت، پردازش و تفسیر داده‌ها است. بر اساس نتایج اجرای یک برنامه رفتار سنجی، می‌توان پایداری و ایمنی فضاهای زیرزمینی را تحلیل و ارزیابی کرد.

٦-١٢-١- اهداف رفتارسنجی

اهداف رفتار سنجی در فضاهای زیرزمینی به شرح زیر است:

٦-١٢-١-١- 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 سازه‌ها 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 می‌گیرد.

٦-١٢-١-٢- کنترل و بهینه سازی مراحل اجرا

کنترل مراحل اجرا در برخورد با مسائلی نظیر توزیع بارهای زمین، آب زیرزمینی، نشست ساختمان‌های مجاور (به ویژه در تونل‌های شهری) با استفاده از ابزار دقیق بهتر می‌شود. در بسیاری از طرح‌ها 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 زمان‌بندی 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 می‌کند. همچنین از آنجا که ایمنی در اجرای کارهای زیرزمینی از ضروریات اساسی است با رفتار سنجی توده سنگ و کنترل رفتار آن می‌توان مشکلات ایمنی را تشخیص داده و در جلوگیری و رفع آن اقدام کرد. وضعیت ایمنی فضاهای زیرزمینی با رفتارسنجی مداوم و مستمر بررسی می‌شود 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.

٦-١٢-١-٣- علت یابی مسائل

زمانی که اجرای طرح با مشکلات پیش بینی نشده مانند ناپایداری روبرو می‌شود با رفتار سنجی می‌توان 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 بلوک‌های سنگی باشد که با استفاده از ابزار دقیق می‌توان فشار آب و یا اندازه، محل و عمق بلوک جابجا شده را مشخص و طرح سیستم نگهداری را اصلاح و اجرا کرد.

٦-١٢-١-٤- کاهش هزینه اجرا

ساخت فضاهای زیرزمینی هزینه‌ای سنگین دارد و احتمال بروز خطر در آن بالا است. آگاهی از تغییر مکان‌ها، توزیع تنش‌ها و بارهای وارد بر سیستم نگهدارنده آن از طریق رفتارسنجی، باعث صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای 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 فضاهای 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.

٦-۱۲-۲- انواع ابزار دقیق

در شکل ۶- ۱۲نمایی از انواع ابزارهای مناسب جهت رفتار سنجی تونل نشان داده‌شده که شامل موارد زیر است:

۱- پین‌های همگرایی سنجی[۷] (نواری و پیمایشی)

۲- کشیدگی سنج

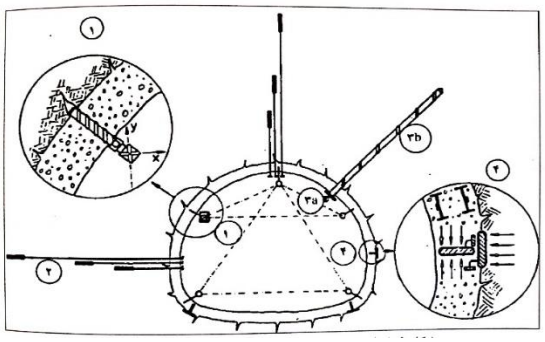
۳a- سلول تعیین بار میل مهار

۳b- میل مهار ابزاربندی شده[۸]

۴- سلول فشار و کرنش‌سنج 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

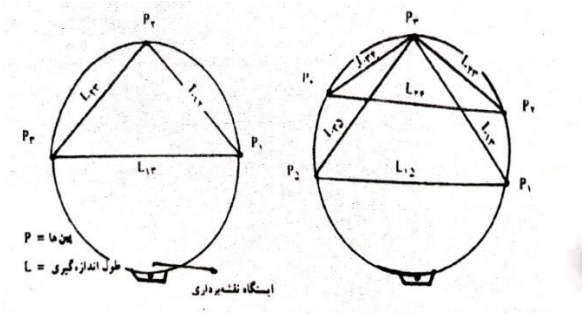


شکل ۶- ۱۲- ابزار مناسب جهت رفتار سنجی در فضاهای زیرزمینی

٦-۱۲-۳- 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، نایپوستگی، 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 حدامکان 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 ۳۰-۲۵ سانتی متر و قطر ۲۲-۱۶ 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 اندازه‌گیری ها 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.

٦-١٢-٤- 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 مختف توده سنگ تغییر شکل یافته را تعیین و تفکیک کرد.
- با ترسیم منحنی مشخصه نیرو-جابه جایی در توده سنگ (منحنی اندرکنش سیستم نگهدارنده و توده سنگ) می‌توان تنش وارد بر سیستم نگهدارنده میل مهاری 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 جابه جایی احتمالی در فضای زیرزمینی در شرایط استفاده از گزینه‌های مختلف سیستم‌های نگهداری را پیش بینی 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 پین‌های 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 پیش بینی نصب راک‌بولت و میل مهار در تونل‌ها پیشنهاد می‌شود که امکانات مربوط به بارسنج میل‌مهاری 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 جابه جایی 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 جابه جایی 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.

٦-۱۳- سیستم نگهداری ثانویه (لاینینگ)

به‌طورکلی 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 مِگر در کف تونل

قبل از اجرای بتن اصلی یک‌لایه نازک بتن مِگر روی بستر کف ریخته می‌شود. برای اجرای بتن مِگر ابتدا باید بستر کف تونل تمیز شده سپس عملیات نقشه‌برداری برای تعیین ارتفاع لازم و رگلاژ انجام شود. بتن مِگر 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 مِگر حداقل ۵ سانتیمتر و عیار آن حداقل ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب باید باشد.

۲- عایق‌بندی کف تونل

پس از اجرای بتن مِگر، در صورت نیاز عایق‌بندی کف تونل روی آن انجام می‌گیرد.

۳- آرماتوربندی کف تونل

پس از اجرای بتن مِگر 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 پای‌کار، بتن به پمپ بتن منتقل و ازآنجا پمپ می‌شود.

۶- جمع‌آوری قالب‌های کف تونل

۷- عایق‌بندی دیواره و سقف در صورت نیاز

پس از گیرش بتن کف عایق‌بندی دیواره و سقف با استفاده از مصالح آب‌بندی اجرا می‌گردد.

۸- آرماتوربندی دیواره و سقف

پس از اتمام عملیات عایق‌بندی، آرماتوربندی دیواره و سقف با حمل آرماتور به پای‌کار، برس زدن و تمیزکاری آرماتور انتظار گام قبلی و بستن آرماتور اجرا می‌گردد. برای نگهداری آرماتورها درجای خود و جاگذاری دقیق آن‌ها، یک سری نگه‌دارنده به‌صورت میله‌ای در دیواره و سقف کاشته نصب می‌شود و موقعیت دقیق آن توسط نقشه‌بردار مشخص می‌شود. آرماتوربندی برمبنای این نگه‌دارنده‌ها انجام می‌گیرد.

۹- قالب‌بندی دیواره و سقف

قالب توسط جک‌های هیدرولیکی روی آرماتورهای بسته‌شده، ثابت گردیده و توسط نقشه‌بردار تنظیم می‌گردد.

۱۰- بتن‌ریزی دیواره و سقف

پس از قالب‌بندی، بتن‌ریزی دیواره و سقف که یکی از مهم‌ترین عملیات اجرای پوشش داخلی بتن برجا (لاینینگ) تونل است آغاز می‌شود.

۱۱- جمع‌آوری قالب‌های سقف و دیواره

پس از بتن‌ریزی و گیرش بتن، قالب جمع شده و از بتن جدا می‌شود.

خصوصیات پوشش داخلی بتن برجا (لاینینگ) را می‌توان به‌صورت 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 می‌کند.
- به هر شکل می‌تواند ساخته شود
- یک فونداسیون سالم و دقیق را برای اتمام تونل آماده می‌کند.
- یک سازه پایدار و مطمئن را ایجاد می‌کند

معایبی که در لاینینگ وجود دارد شامل موارد زیر است:

- بتن‌ریزی، مخصوصاً در کنار آرماتورها مشکل می‌باشد. خصوصیات ذاتی سیستم نگهداری با بتن برجا این است که امکان ویبره کردن بتن در داخل قالب محدود می‌باشد. این پدیده باعث می‌شود که بتن در اطراف آرماتور به‌صورت کامل تحکیم نشود.
- آرماتورهایی که مورداستفاده قرار می‌گیرند، عمدتاً تحت خورندگی قرار دارند که این عامل باعث از بین رفتن مقاومت بتن می‌شود. این مشکل یک مشکل معمول در تمامی سیستم نگهداری بتنی می‌باشد. به‌هرحال این مسئله در سازه‌های زیرزمینی بیشتر اتفاق می‌افتد چون نفوذ آب زیرزمینی باعث افزایش سرعت تخریب آرماتور می‌شود.

- 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.

٦-۱۳-۱- 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.

٦-۱۳-۱-۱- 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 خم ها را ممکن می‌سازد، اما توصیه می‌شود که حتی الامکان از دستگاه‌های آرماتور خم کن برقی استفاده شود که ترک خوردگی در آرماتورهای باقطر 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.

٦-۱۳-۱-۲- نگهداری آرماتورها در قالب‌ها

تمامی آرماتورها باید به کمک خرک‌های فولادی و یا بتنی، میله‌ها و یا خاموت‌ها به طور محکم درجای 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.

٦-۱۳-۱-۳- 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 ۰/۵ $\pm$ سانتیمتر و برای سازه‌هایی با ضخامت بیش از ۲۰ سانتی متر، ۱ $\pm$ سانتیمتر است میزان رواداری موقعیت آرماتورها به شرط امکانپذیری، ۱/۵ $\pm$ سانتیمتر می‌تواند مدنظر قرار گیرد.

٦-۱۳-۱-٤- نقشه‌های اجرائی

باتوجه به پیچیدگی سازه لاینینگ تونل علی الخصوص 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.

٦-۱۳-۱-۵- وصله کردن آرماتور

حتی الامکان 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 اجرائی و دستورالعمل‌ها منعکس نباشد رعایت نکات زیر الزامی است:

- در قطعات تحت خمش و خمش 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 تکیه گاه 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.

٦-۱۳-۱-٦- 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.

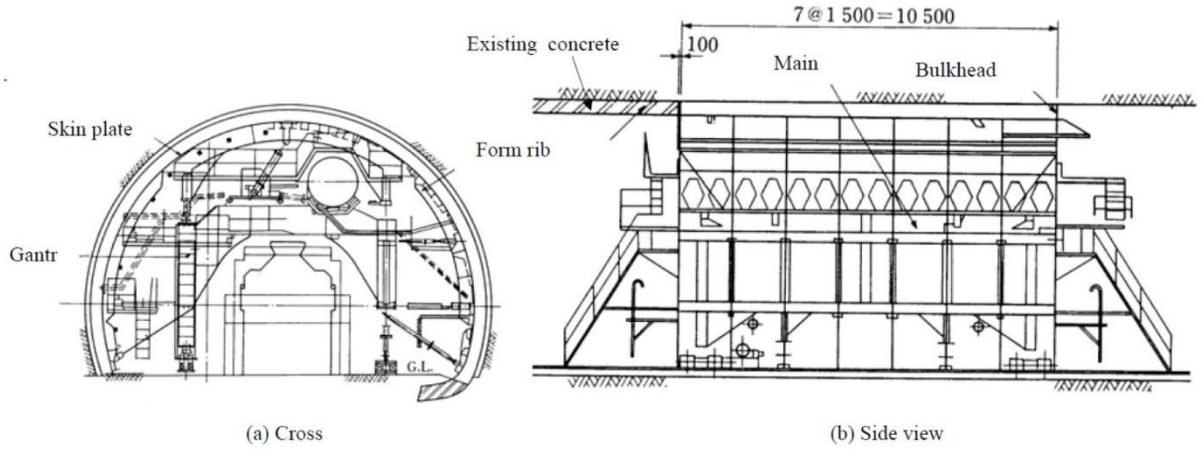
٦-۱۳-۲- قالب ها[1]

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[2] ، سازه قاب، گانتری[3] یا متحرک و لوازم جانبی می‌باشد. قالب‌های مورد استفاده برای لاینینگ تونل به دو دسته قالب های متحرک[4] و مونتاژی[5] 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 می شود که سازه قاب و پانل‌های فولادی هر بار هنگام بتن ریزی مونتاژ و دمونتاژ می‌شوند. قالب‌های مونتاژ شده تنها زمانی استفاده می‌شوند که محدودیتی در استفاده از قالبهای متحرک وجود داشته باشد در غیر این صورت معمولا 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 می شود. معمولا از طول ۶ تا ۱۲ متر (بحز 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 طویل‌تر ممکن است باعث ایجاد ترک در بتن به دلیل انقباض حرارتی یا خشک شدن[6] 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

٦-۱۳-۲-۱- 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 بتن‌ریزی مقاومت کنند. قالب های مونتاژ شده باید به گونه‌ای طراحی شوند که مونتاژ و دمونتاژ به سهولت انجام گیرد و از نظر ساختاری مقاوم باشند. قالب‌های متحرک و مونتاژی باید مجهز به امکاناتی مانند دهانه‌های بتن‌ریزی و پنجره‌های بازرسی[1] باشند همچنین باید به نحوی طراحی شوند که عبور و مرور ایمن وسایل نقلیه در حین کار در داخل آن‌ها ممکن باشد.

٦-۱۳-۲-۲- سربندی[2]

سربندی باید به گونه‌ای طراحی شوند که در برابر فشار بتن مقاومت کرده و به گونه‌ای نصب شوند که از نشت ملات جلوگیری کنند و به ورقه های ژئوممبرین آسیب نرسانند.

٦-۱۳-۲-۳- جابه جایی و نصب قالب ها

قالب‌ها باید بر اساس طرح دقیق بدست آمده از نتایج نقشه‌برداری 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 ریل‌ها باید امکان حرکت آرام قالب‌ها 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 بتن‌ریزی به دقت تمیز شود و با مواد مناسب (مانند روغن‌ها) پوشانید تا جداسازی قالب‌ها به آسانی انجام گیرد.

هنگام تنظیم قالب‌ها 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 قالب‌ها به لاینینگ از پیش موجود آسیب وارد نکند.

---

[1] Inspection windows
[2] 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 شُل شوند.

٦-١٣-٢-٤- جداسازی قالب ها

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 قالب ها ۱۲ تا ۲۰ ساعت پس از بتن ریزی برداشته می‌شوند. برای یک تونل قوس گرد[1] مقاومت بتن در زمان برداشتن قالب‌ها اغلب با مقدار مرجع مقاومت فشاری بتن حدود N/mm^2 (۳-۲) 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.

٦-١٣-٣- بتن لاینینگ

٦-١٣-٣-١- شرح کلی ساخت بتن لاینینگ

روش بتن‌ریزی لاینینگ باتوجه به روش حفاری و سایر عوامل تعیین می‌شود. بتن لاینینگ معمولا پس از اتمام حفاری در قسمت‌های قوس و دیوار کناری، بتن ریزی می‌شود. در روش رانش جانبی[2]، بتن ریزی دیوارهای جانبی و قسمت های قوس به طور همزمان انجام می شود 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)[3] 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

زمان‌بندی بتن‌ریزی لاینینگ باید باتوجه به رفتار زمین و سیستم نگهداری، هدف لاینینگ و سایر موارد تعیین شود. در هنگام بتن‌ریزی لاینینگ باید تلاش شود تا از ایجاد ترک، درزهای سرد[1] ، پوسته شدن، جدا شدن، باز شدن پشت دیوار لاینینگ و غیره جلوگیری شود و پس از بهره‌برداری از تونل مانع تعمیرات نشود.

٦-۱۳-۳-۲- طرح اختلاط بتن

طرح اختلاط بتن با در نظر گرفتن مصالح، روش بتن ریزی و عوامل دیگر تعیین می‌شود.

٦-۱۳-۳-۳- الزامات اجرایی بتن

- **٦-۱۳-۳-۳-۱- نیروی انسانی**

حتی هنگامی‌که تجهیزات تولید بتن مطابق الزامات عملکردی تأمین و روش‌های تولید مناسب استفاده شود، اگر پرسنل تولید توانایی کنترل تجهیزات تولید، کیفیت مصالح و بتن به‌صورت پایدار را نداشته باشند، دستیابی به بتن یکنواخت و باکیفیت مناسب دشوار است. ازآنجایی‌که کیفیت بتن به‌راحتی تحت تأثیر عوامل مختلف قرار می‌گیرد، برای متخصصانی که بتن را تولید می‌کنند داشتن دانش کارشناسی و تجربه مرتبط باکیفیت تولید بتن اهمیت دارد؛ بنابراین نیروی انسانی که در بخش‌های مختلف تولید و اجرا شامل: کنترل تجهیزات تولید، کیفیت مصالح، بتن‌ریزی و عمل‌آوری و مسئولیت انجام کار را به عهده‌دارند باید دارای مدرک تحصیلی مرتبط، پروانه مهارت فنی یا گواهینامه معتبر از مراجع ذیصلاح باشند.

- **٦-۱۳-۳-۳-۲- آماده‌سازی محل بتن‌ریزی**

باید همه مواد زائد درون قالب یا محل بتن‌ریزی، مانند گل‌ولای، برف و یخ، مواد سست و کم مقاومت، مواد و قطعات اضافی ناشی از آرماتوربندی و قالب‌بندی از محل بتن‌ریزی با استفاده از فشار هوا، جارو یا هر روش دیگری که موردپذیرش دستگاه نظارت است جمع‌آوری و برداشته شود.

قالب‌ها باید به شیوه مناسب تمیز شده و با روغن قالب (ماده رهاساز) مناسب پوشش داده و درزبندی شوند. برای روغن‌کاری، قالب با روغن (ماده رهاساز) مناسب و طبق دستورالعمل‌های تولیدکنندگان روغن قالب و قالب‌ساز روغن‌کاری می‌شود. باید دقت شود که ضخامت لایه روغن طبق دستورالعمل تولیدکننده روغن قالب باشد و از طرفی روغن روی سطح قالب شره نکند.

به‌منظور تماس بهتر بتن جدید با بتن قدیمی، همچنین جلوگیری از جذب آب بتن که منجر به جمع شدگی بتن می‌شود، باید بتن قدیمی که در تماس با بتن جدید است به‌اندازه‌ای 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 زنگِ سستِ پوسته شده و مواد آلاینده مانند گل‌ولای، یخ، روغن، گریس و سایر عواملی که باعث کاهش چسبندگی آرماتورها به بتن می‌شود باشند. از به‌کارگیری آرماتورهای دارای زنگِ حفره‌ای یا آن‌هایی که آج خود را ازدست‌داده‌اند باید خودداری شود.

قبل از ریخت 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 به‌صورت یکنواخت و همگن تولید شود. به‌منظور 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 مورداستفاده 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 قابل‌ملاحظه‌ای 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 تشکیل‌دهنده بتن باید به‌گونه‌ای ذخیره و جابه‌جا شوند که مشخصات آن‌ها به مقدار قابل‌توجهی 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 ارائه‌شده باشد، رعایت آن‌ها الزامی است. تجهیزات ذخیره‌سازی سیمان و افزودنی‌های معدنی باید مطابق استاندارد ملی ۲۷۶۱ بوده و به‌گونه‌ای ساخته‌شده 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 به‌گونه‌ای ساخته‌شده باشد که سیمان به‌هیچ‌وجه در کف یا گوشه‌های سیلو به‌صورت 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 به‌طور 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 به‌صورت جداگانه، بسته به نوع، اندازه و دانه‌بندی طوری ذخیره گردند که دچار جداشدگی نشوند. همچنین تجهیزات ذخیره‌سازی باید دارای یک زهکش مناسب باشد که رطوبت سنگدانه بتواند در یک محدوده قابل‌قبول و به‌صورت 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 مورداستفاده 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 به‌طور دوره‌ای، قبل و در طی بهره‌برداری مورد بازرسی قرار گیرند و به‌طور مناسب واسنجی شوند.

دقت باسکول مورداستفاده تحت بار آزمایشی استاتیکی باید برابر با بزرگ‌ترین مقدار حاصله از ۰/۱۵± درصد کل ظرفیت باسکول یا ۰/۴± درصد وزن مواد باشد. دقت باسکول باید به‌صورت ادواری وارسی 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 به‌صورت 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 به‌طور کامل مخلوط شوند تا بتن یکنواخت و همگنی به دست آید. برای تولید بتن سازه‌ای مخلوط کردن بتن به‌صورت دستی مجاز نیست. عملکرد مخلوط‌کن باید به نحوی

باشد که در مدت‌زمان 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 به‌گونه‌ای 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 ازآنجاکه 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 تعیین‌شده (سرعت تند) توسط کارخانه سازنده بچرخد تا الزامات یکنواختی بتن حاصل شود. همچنین حداکثر مدت‌زمان 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 عمدی محدود شود. در کامیون مخلوط‌کن حداکثر تعداد چرخش دیگ (مجموع دوران کند و تند) توصیه می‌شود به ۳۰۰ دور محدود شود. تعداد چرخش توصیه‌شده با دور تند محدود به ۱۰۰ دور می‌شود.

- ازآنجاکه در پیمانه 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 ساخته‌شده در کارگاه باید به‌طور تفصیلی و مشتمل بر مشخصات بتن ازجمله موارد زیر ثبت و نگهداری شود:

۱- تاریخ و زمان اختلاط و بتن‌ریزی؛

۲- مقادیر به‌کاررفته 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 سنگ‌دانه‌ها در شرایط کارکرد خوبی قرار دارند. همچنین تواتر بازرسی‌ها و آزمایش‌ها برای تجهیزات بر اساس آبا (آیین نامه بتن ایران) باشد.

- **٦-١٣-٣-٣-٤- انتقال بتن و بتن‌ریزی**

برای حصول بتن باکیفیت موردنظر، باید به‌جزئیات برنامه انتقال بتن و بتن‌ریزی قبل از شروع کار مشخص‌شده و به تأیید دستگاه نظارت رسیده باشد. ملاحظات اصلی که باید قبل از شروع بتن‌ریزی در نظر گرفته شود شامل:

الف) برنامه زمان‌بندی بتن‌ریزی

برنامه زمان‌بندی بتن‌ریزی باید با در نظر گرفتن عوامل مختلفی تهیه شود ازجمله نوع و شکل سازه، ارتباط بتن‌ریزی با سایر عملیات اجرایی پروژه و برنامه زمان‌بندی کلی پروژه، حجم کل بتن‌ریزی، 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 ماشین‌آلات لازم برای انتقال بتن، بتن‌ریزی، 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 بتن‌ریزی شود، حجم بتن‌ریزی مقطع، دستورالعمل‌های بتن‌ریزی، آهنگ بتن‌ریزی، حجم بتن قابل تأمین، ظرفیت و تعداد لرزاننده‌ها، نوع مصالح و نسبت‌های مخلوط بتن تعیین شود.

ج) مسیرهای انتقال:

مسیرهای انتقال بتن باید به نحوی تعیین و انتخاب شود که امکان انتقال ساده‌تر و سریع‌تر بتن به وجود آید و زمان و فاصله حمل به حداقل ممکن برسد.

د) مقطع بتن‌ریزی، محل درزهای اجرایی و روش آماده‌سازی درزها

مقطع بتن‌ریزی باید بر اساس حجم بتن‌ریزی در هر نوبت تعیین شود. این حجم بر اساس حجم بتن قابل تأمین، برنامه زمان‌بندی اجرا، شکل مقطع، ظرفیت بتن‌ریزی، زمان مجاز توقف‌ها حین بتن‌ریزی و موقعیت درزهای اجرایی تعیین می‌شود.

چنانچه به دلیل ملاحظات اجرائی، درز اجرائی لازم در نقشه‌ها مشخص نشده باشد، محل آن باید با در نظر گرفتن تنش‌ها در مقطع، ملاحظات دوام و نحوه آرماتور گذاری در محل درز و با تأیید دستگاه نظارت انتخاب شود و از انتخاب آن به‌صورت تصادفی و بر اساس پیشرفت کار اجتناب شود.

ه) ترتیب و نرخ بتن‌ریزی

ترتیب و نرخ بتن‌ریزی در هر مقطع باید با در نظر گرفتن شکل سازه، وضعیت تولید بتن، ظرفیت بتن‌ریزی، توقف‌های مجاز، تجهیزات موجود و همچنین ملاحظات مربوط به رانش بتن در بدنه قالب‌ها 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 ازجمله 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.

- **٦-۱۳-۳-۳-۵- 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 قالب ها قبل از بتن ریزی 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[1] که قبل از بتن ریزی لاینینگ از پمپ به لوله منقل می‌شود نباید وارد قالب شود.

ب) بتن‌ریزی باید به نحوی انجام شود که موجب جابه‌جائی قالب و شبکه آرماتور از محل اولیه خود نشود.

ج) بتن باید تا حد امکان در محل نهایی خود ریخته شود تا نیاز به جابه‌جایی آن به حداقل برسد. در صورت نیاز به جابه‌جایی باید از عدم جداشدگی بتن اطمینان حاصل شود. در مواردی که جداشدگی مشاهده شود، باید بتن‌ریزی متوقف و روش‌های مناسب برای حذف یا کاهش جداشدگی بتن به کار گرفته شود.

د) بتن‌ریزی باید به نحوی اجرا شود که سطح بتن تازه ریخته شده تا حد امکان هموار باشد.

ه) برای بتن‌ریزی 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 بتن‌ریزی، ظرفیت بتن‌ریزی و فاصله زمانی بین بتن‌ریزی لایه‌ها باید به نحوی تعیین شود که درز سرد ایجاد نشود.

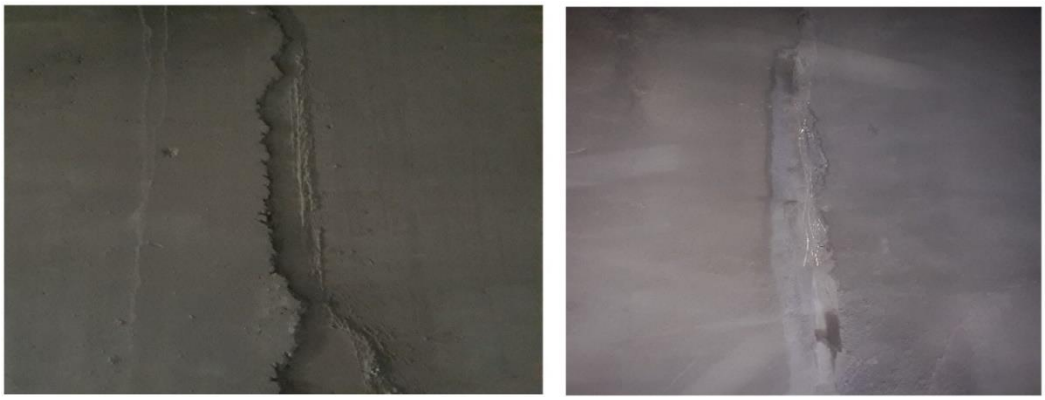
محدودیت فاصله زمانی بین لایه‌ها به دلیل اطمینان از عدم ایجاد درز سرد بین لایه‌ها باید رعایت شود. برای جلوگیری از ایجاد این نوع درز باید فاصله زمانی بین لایه‌ها با در نظر گرفتن ملاحظاتی شامل نوع بتن، کارایی بتن، فاصله زمانی بین ساخت تا اتمام بتن‌ریزی، دمای بتن و روش تراکم مشخص شود. در شکل ۶- ۱۵ نمونه 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 نقطه‌ضعف در سازه محسوب می‌شوند باید با برنامه‌ریزی مناسب در محل‌های از پیش تعیین‌شده قرار گیرد و به‌جز در محل‌هایی که درز اجرایی پیش‌بینی‌شده است بتن‌ریزی 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 حدامکان 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

- **٦-١٣-٣-٣-٦- 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.

- **٦-١٣-٣-٣-٧- 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 عمل آوری شود. برای اینکه بتن ریخته شده مقاومت، دوام کافی، آب بندی 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 عمل آوری 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 مخصوصا 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 ورقه های محافظ [1] 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[1] 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.

- **٦-١٣-٣-٣-٨- 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 ویبراتور داخلی استفاده می‌شود. تعداد کافی ویبراتور باید با در نظر گرفتن حداکثر حجم بتن‌ریزی در ساعت در نظر گرفته شود. از طرفی استفاده بیش از حد از ویبراتورهای داخلی ممکن است منجر به جداسازی مصالح بتن شود؛ بنابراین هنگام تنظیم زمان لرزش باید دقت شود. همچنین از به کارگیری ویبراتور داخلی برای جابه جایی بتن تازه به صورت جانبی اجتناب شود.

موارد زیادی وجود داشته که از ویبره‌های کششی[2] یا ویبره‌های الاستیک[3] برای تراکم بتن تاج که تراکم آن دشوار است استفاده می‌شود. در صورت استفاده از بتن لاینینگ با عملکرد متوسط که سیالیت بالاتری دارد اساسا به جای ویبراتورهای داخلی از ویبراتورهای قالب[4] 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.

- **٦-١٣-٣-٣-٩- 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.

نوع آزمایش	زمان آزمایش		
	۷ (۱۱) روزه	۲۸ (۴۲) روزه	۹۰ روزه
فشاری	به ازاء هر ۲۰ مترمکعب ۲ نمونه	به ازاء هر ۲۰ مترمکعب ۳ نمونه	به ازاء هر ۲۰ مترمکعب ۱ نمونه
کششی	----------	به ازاء هر ۳۰ مترمکعب ۲ نمونه	----------

[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.

تهیه نمونه مکعبی برای انجام آزمایش مقاومتی بر روی بتن

عمل آوری نمونه ها

انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره بر روی نمونه های مکعبی

شکل ۶- ۱۷- تهیه نمونه‌های مکعبی از بتن و انجام آزمایشات مقاومتی

- **٦-١٣-٣-٣-١٠- بتن‌ریزی در هوای سرد**

در مواردی که دمای هوا کمتر از ۵+ 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 بتن‌ریزی 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 $-1^{\circ}C$ تا $-2^{\circ}C$ 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 $5^{\circ}C$ یا کمتر قرار می‌گیرد، واکنش‌های مرتبط با گیرش و سخت شدن بتن در حد قابل‌توجهی کند می‌شود؛ بنابراین وقتی بتن تحت بارهای دوره ساخت قرار می‌گیرد مشکلاتی مانند ترک‌خوردگی 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 آسیب‌دیدگی، حفاظت و عمل‌آوری مطلوب اعمال شود.

٦-١٣-٣-٤- 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 جداشدگی ذرات و بدون لرزاندن مکانیکی نیاز باشد، بتن خود تراکم استفاده می‌شود.

- **٦-١٣-٣-٤-١- 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 ایجاب کند.

- پودر سنگ‌های خنثی مانند آهک، بازالت و کوارتز حاصل از آسیاب کردن سنگ‌ها و سیمان پرتلند آهکی برای تأمین گرانروی 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 گرانروی مجاز است. همچنین برای ساخت مخلوط بتن با گرانروی مناسب حاصل از ترکیب پودر سنگ و پودرهای فعال و ماده اصلاح‌کننده گرانروی امکان‌پذیر است.

- تأمین روانی مخلوط بتن باید توسط مواد افزودنی فوق روان کننده ممتاز مانند پلی کربوکسیلات 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.

- **٦-١٣-٣-٤-٢- طرح اختلاط**

- تعیین نسبت‌های مخلوط بتن خود تراکم باید به نحوی انجام شود که خصوصیات موردنظر شامل قابلیت پرکنندگی، 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 به‌کل 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 دریکی 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 نمونه‌های آزمایشگاهی و بیشتر از ۵ مگاپاسکال در نمونه‌های کارگاهی تفاوت داشته باشند.

- **٦-١٣-٣-٤-٣- اجرا**

- استفاده از هر نوع مخلوط‌کن 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 موردنیاز برای مخلوط کردن بتن خود تراکم معمولاً طولانی‌تر از بتن معمولی است، اما مدت موردنیاز و ترتیب ریختن مصالح به درون مخلوط‌کن باید با آزمایش بر مبنای آزمون‌وخطا تعیین شود. اما در ساخت مخلوط‌های آزمون آزمایشگاهی تا حد امکان باید از مخلوط‌کن مشابه مخلوط‌کن کارگاه استفاده شود و ترتیب ریختن مصالح و مواد در جام مخلوط‌کن با ترتیب ریختن مصالح در مخلوط‌کن کارگاه مطابقت داشته باشد.

- در صورت مصرف پودر سنگ فله‌ای، 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 به‌عنوان آخرین جزء به مخلوط بتن افزوده شوند. در مواردی که ماده اصلاح‌کننده گرانروی استفاده می‌شود، باید پس از فوق روان کننده به مخلوط افزوده شود.

- در طراحی قالب‌های عمودی، باید فشار بتن بر روی قالب برابر با فشار هیدرواستاتیک در نظر گرفته شود. مگر آن‌که 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 بتن‌ریزی باید ۵ متر برساخت و یا کمتر در نظر گرفته شود و فشار هیدرو استاتیک از رابطه ۶-۱ محاسبه شود:

$$P = \rho g h$$ رابطه ۶-۱

- تمام اجزای قالب مانند ورق رویه، اعضای افقی مانند کمرکش‌ها، اعضای عمودی و بست‌ها باید قادر باشند که فشار ناشی از بتن را تحمل کنند.

- ارتفاع مجاز بتن‌ریزی در سقوط آزاد ۳ متر است. برای ارتفاع بیشتر از این مقدار، باید با آزمایش اثر ارتفاع در جداشدگی ذرات بررسی شود و سپس بتن‌ریزی انجام گیرد. اما توصیه می‌شود 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 جداشدگی دینامیکی ذرات وجود دارد.

- بسیاری از مخلوط‌های بتن خود تراکم خاصیت تغلیظ پذیری دارند، بنابراین عملیات بتن‌ریزی 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 سنگدانه‌های درشت می‌شود.

- در پرداخت سطح بتن باید از ابزار فلزی مانند فولادی یا فولادی با آلیاژ منیزیمی 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.

٦-١٣-٣-٥- مواد افزودنی

هرگونه ماده مصرف شده در بتن به‌جز سیمان، دانه‌ها، آب و الیاف به نام «مواد افزودنی» و یا «مواد مضاف[1] » 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 درنتیجه 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[2] » و «مواد مضاف معدنی[3] » 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 ۲درصد) 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

- **٦-۱۳-۳-۵-۱- افزودنی‌های تسریع کننده (زودگیر کننده)**

مواد مضاف تسریع کننده یا زودگیر کننده[1] ، افزودنی‌هایی هستند که باعث تسریع در گیرش سیمان شده و کسب مقاومت بتن را سرعت می‌بخشند. این مواد در استاندارد ASTM C494، تحت عنوان ماده مضاف نوع C مورداشاره قرارگرفته‌اند. تسریع‌کننده‌ها باید ملزومات استاندارد ASTM D98 را برآورد کرده و منطبق بر استاندارد ASTM D494 نمونه‌برداری شده و مورد آزمایش قرار گیرند. به‌عنوان مشهورترین و بهترین تسریع کننده می‌توان به کلرور کلسیم، $CaCl_2$ اشاره نمود که اساس غالب زودگیر کننده‌ها را تشکیل می‌دهد. مواد دیگری ازجمله کلرور سدیم و کلرور باریم نیز به‌عنوان تسریع کننده محسوب می‌شوند.

استفاده از کلرور کلسیم ضمن سرعت بخشیدن به کسب مقاومت بتن، مقاومت بتن را در مقابل فرسایش و سایش نیز تا حدی افزایش می‌دهد. کلرور کلسیم همچنین نیاز به آب را برای رسیدن بتن به روانی مشخص را کمی کاهش داده و تأثیر مواد حباب‌زا را افزایش می‌دهد؛ اگرچه در بتن هوا ایجاد نمی‌کند. در مقابل، مصرف کلرور کلسیم در بتن بعضی از عوارض جانبی را نیز به همراه دارد؛ ازجمله این‌که:

۱- خطر خوردگی میلگردها و قطعات فولادی مدفون را به‌خصوص برای بتن در معرض رطوبت و هوا مخصوصاً در دمای بالا، افزایش می‌دهد؛

۲- مقاومت بتن را در مقابل حمله سولفات‌ها کاهش می‌دهد؛

۳- افت خشک‌شدگی بتن را افزایش می‌دهد؛

۴- خطر واکنش‌های قلیایی دانه‌ها را افزایش می‌دهد؛

۵- مقاومت بتن هوا دار را در مقابل سیکل‌های یخ زدن و ذوب شدن از حد مورد انتظار پایین می‌آورد؛

۶- با تیر کردن رنگ بتن، در آن تغییر رنگ ایجاد می‌کند؛

۷- خطر پوسته‌شدن و تورق[2] بتن را افزایش می‌دهد.

باید توجه نمود که اگرچه وظیفه مواد مضاف زودگیر کننده، تسریع در سخت شدن و توسعه مقاومت کوتاه مدت بتن است، ولی آن‌ها در عمل بر زمان گیرش اولیه نیز اثر گذاشته و کمی آن را کوتاه می‌کنند. در همین ارتباط گروه دیگری از افزودنی‌ها به نام «مواد مضاف با گیرش سریع[3]» وجود دارند که به‌طور مشخص زمان گیرش اولیه سیمان و بتن را کاهش می‌دهند. نمونه‌ای از این مواد کربنات سدیم است که برای ایجاد گیرش سریع در عملیات شاتکریت مورداستفاده قرار می‌گیرد.

---

[1] Accelerating Admixtures
[2] Scaling
[3] Set-Accelerating or Quick-Setting Admixtures

- **٦-١٣-٣-٥-٢- افزودنی‌های دیر گیر کننده**

مواد مضاف دیر گیر کننده یا کند گیر کننده[1] ، 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 مورداشاره قرارگرفته‌اند.

مواد دیر گیرکننده در هوای گرم از تشکیل اتصال سرد بتن دو بتن‌ریزی متوالی جلوگیری می‌کند.

دیرگیر 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.

- **٦-١٣-٣-٥-٣- افزودنی‌های کاهنده آب (یا روان کننده)**

مواد مضاف کاهنده آب[2] که به نام روان کننده[3] 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 مورداشاره قرارگرفته‌اند. 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.

- **٦-١٣-٣-٥-٤- افزودنی‌های کاهنده آب در حد بالا (یا فوق روان‌کننده)**

مواد مضاف کاهنده آب در حد بالا (HRWR [1]) که به نام فوق روان کننده[2] نیز خوانده می‌شوند، موادی هستند که اگر به بتن اضافه شوند، بدون نیاز به افزایش آب، به مقدار قابل‌توجهی 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 ذکرشده 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 [3]" به کار می‌روند. بتن روان بر اساس تعریفی که در ASTM C1017 ارائه‌شده 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.

- **٦-١٣-٣-٥-٥- افزودنی‌های حباب‌زا (هوا زا)**

مواد مضاف هوا زا 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 قرارگرفته‌اند و به‌طور همگن در سراسر بتن توزیع‌شده‌اند. این مواد معمولاً در مقادیر بسیار اندک، یعنی حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱۰ وزنی سیمان به بتن اضافه شده و در محدوده ۴٪ تا 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 پایایی 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 پایایی در مقابل‌تر 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- پمپ پذیری بهتر بتن در مسافت کوتاه؛ اگرچه میزان زیاد حباب هوا در بتن، پمپ پذیری 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.

- **٦-۱۳-۳-۵-٦- 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 مورداستفاده 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 سنگ‌آهک نیز در عمل در مرحله ساخت به بتن اضافه می‌شوند.

در تکنولوژی بتن نوین، انواع متنوعی از افزودنی‌های معدنی به‌طور وسیع در ساخت‌وساز بتنی به کار می‌روند. اهدافی که از استفاده از این افزودنی‌ها در بتن دنبال می‌شوند، عبارت‌اند از:

- استفاده‌های اقتصادی،

- حفظ محیط‌زیست،

- بهبود کارایی در بتن تازه،

- بالا بردن مقاومت، به‌خصوص دوام بتن سخت شده، و

- کاهش حرارت هیدراسیون.

- در شاتکریت 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.

٦-١٤- کفبند

٦-١٤-١- 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. به‌طورکلی کفبند قبل از قسمت بالایی لاینینگ قرار می‌گیرد. درصورتی‌که بتن لاینینگ به‌منظور جلوگیری از بالاآمدگی یا ورود گل به‌جای پایداری زودهنگام زمین حفاری‌شده قرار داده شود، روش نصب یا قراردادن کفبند دیرهنگام[1] اعمال می‌شود.

در روش نصب کفبند دیرهنگام[2] ، 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

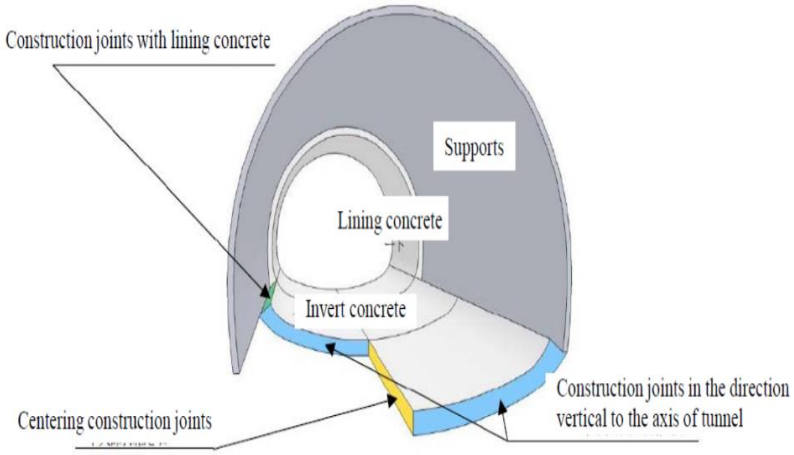
[1] The late invert
[2] The late placing invert

بنچ و قسمت کفبند تقریباً به‌طور هم‌زمان در نزدیکی هد[1] حفر شود، سپس کفبند اولیه با بتن پاشیده شده به‌تنهایی یا با ترکیبی از آن و نگهداری‌های فولادی ساخته شود. پس از بررسی نتیجه جابه‌جایی تونل، شروع نصب کفبند اصلی[2] پیشنهاد می‌شود.

درزهای ساخت (اتصال کفبند با لاینینگ[3]) با بتن لاینینگ و آن‌هایی که در اطراف قسمت مرکزی بتن کفبند هستند اصولاً باید به‌منظور انتقال مؤثر نیروی محوری، عمود بر محور کفبند باشند (شکل ۶- ۱۸). همچنین معمولاً گردوخاک از محل اتصالات لاینینگ شسته می‌شود تا کفبند با لاینینگ یکپارچه شود.

اگر جریان آب ورودی زیاد باشد، برای جلوگیری از نشت آب، باید صفحات قطع کننده[4] در محل‌های اتصال نصب شوند. همچنین معمولاً در محل‌های اتصال که در نزدیکی مرکز بتن کفبند وجود دارند از میله‌های اتصال[5] مقعر و محدب، تراشه و قفس پارچه مشبک سیمی[6] استفاده می‌شود تا مقاومت برشی به‌آرامی منتقل شود.

میلگردهای تقویت‌کننده[7] باید به‌گونه‌ای 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- نمونه‌هایی از درزهای ساخت[8]

[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

٦-۱۵- عایق‌بندی و زهکشی (آب‌بند کردن سازه‌های زیرزمینی)

در شرایط قرارگیری تونل در زیر سطح آب زیرزمینی دائمی و یا گذرا و در شرایطی که به‌منظور بهره‌برداری مناسب از فضای زیرزمینی، عایق‌بندی و یا آب‌بندی تونل ضروری باشد این هدف به طرق مختلف امکان‌پذیر خواهد بود. استفاده از سیستم چاه‌های زهکشی روشی متداول برای سازه‌های کم‌عمق و نیمه عمیق می‌باشد، لازم به یادآوری است که روش مذکور عمدتاً به‌منظور مهار سفره آب زیرزمینی بوده و بیشتر باهدف دور کردن آب از محیط، خارج کردن از آن توده سنگ و خاک و تحت کنترل درآوردن و هدایت آن به خارج از محدوده پروژه، انجام می‌گیرد. لذا در پروژه‌هایی که جلوگیری از هرگونه رطوبت در دوران بهره‌برداری موردنیاز است، این روش چندان مناسب نمی‌باشد. معمولاً سه روش عایق‌بندی و آب‌بندی در تونل‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد:

- استفاده از مصالح ژئوممبران PVC
- به‌کارگیری مصالح آب‌بندی که به‌صورت پاشیدن اجرا می‌شود که اجرایی مشابه شاتکریت دارد.
- استفاده از مواد افزودنی بتن

٦-۱۵-۱- مصالح آب‌بندی ژئوممبران PVC

پیش از ساخت سیستم عایق بندی سطح ناصاف شاتکریت و برجستگی راک‌بولت‌ها 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.

ورقه‌های عایق بندی باید به نحوی نصب شوند که تماس نزدیک با سطح حفاری شده داشته باشند. برای این منظور ورق‌ها در جهت طولی و عرضی ثابت می‌شوند تا به هنگام بتن‌ریزی فضای خالی در تاج تونل ایجاد نشود. علاوه براین از آنجایی که ورق‌های عایق‌بندی در صورت نصب با حاشیه ناکافی[1] ، 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 ورقه‌ها، نصب و ثابت کردن آن‌ها در جای خود دقت بالایی نیاز دارد.

انعطاف بسیار زیاد، نصب آسان و جوش‌پذیری ایده‌آل ورق‌های نرم PVC باعث شده است این نوع ژئوممبران در فضاهای بسته با محدودیت‌های عایق کاری، مصرف بسیار زیادی داشته باشد.

برخی کاربردهای ژئوممبران PVC شامل:

- عایق تونل‌ها، سازه‌های بتنی زیرزمینی
- ایزولاسیون ساختمان، سقف، سرویس‌ها
- 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

٦-۱۵-۱-۱- لایه‌بندی سیستم آب‌بندی ژئوممبران PVC

لایه‌بندی سیستم آب‌بندی ژئوممبران PVC به ترتیب از سنگ، خاک بلاواسطه تا پوشش داخلی تونل به‌صورت 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 داده‌شده است.

شکل ۶- ۲۱- شماتیک لایه‌بندی سیستم نگهداری و آب‌بندی تونل

٦-١٥-١-٢- مصالح آب‌بند پاششی

علیرغم استفاده از ورق‌های ژئوممبرین PVC و کاربرد وسیع این مصالح در آب‌بندی سازه‌های زیرزمینی، استفاده ازاین‌روش دارای معایبی نیز می‌باشد. مهم‌ترین عیب این روش، تخصصی بودن آن می‌باشد که درنتیجه آن نیاز به به‌کارگیری افراد متخصص برای نصب علاوه بر خرید محصولات می‌باشد. همچنین در اشکال پیچیده هندسی نظیر تقاطع تونل‌ها اجرا دشوار بوده و نیز در زمان نصب غشاء آب‌بند اجرای سایر عملیات تونل دچار مشکل می‌شود و ممکن است تداخل کاری به وجود آید. مصالح آب‌بند پاششی این نواقص را نداشته و اجرای آن سرعت و سهولت بیشتری نسبت به ورق‌های آب‌بند دارد. اجرای لایه آب‌بند پاششی مشابه اجرای شاتکریت می‌باشد. این لایه‌ها در دو مرحله و به ضخامت حدود یک سانتی‌متر اجرا می‌شود.

٦-١٥-١-٣- مواد افزودنی در بتن

انواع مواد افزودنی جهت آب‌بند نمودن بتن موجود می‌باشد. لازم به ذکر است که تجارب موفق استفاده از این مواد در سطح کشور پایین بوده، لذا این محصولات به‌عنوان مکمل و حصول اطمینان مضاعف در مواردی که آب‌بندی اهمیت خاص دارد، مورداستفاده قرار می‌گیرد.

٦-١٦- روسازی

روسازی ازنظر مصالح مصرفی در قشر رویه، به سه دسته آسفالتی، بتنی و یا مختلط (بتن و آسفالت) تقسیم می‌شوند. روسازی آسفالتی از سه لایه زیراساس، اساس و آسفالت تشکیل می‌شود که مقاومت و کیفیت بستر، نقش تعیین کننده‌ای 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 (به‌جای 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 حذف‌شده‌اند 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 کنترل‌شده جزء مشخصات روسازی‌های بتنی پیوسته مسلح می‌باشد. این ترک‌ها به‌وسیله 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 به‌وسیله بارهای ترافیک را بسیار کاهش داده بنابراین باعث کاهش ضخامت بتن موردنیاز 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 ویبره‌ای 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 ازاین‌رو می‌توان این دو نوع روسازی را با تقریب اجرایی و عملکردی مناسبی با یکدیگر مقایسه کرد چراکه اصول طراحی این دو دقیقاً یکسان می‌باشد.

٦-١٦- تأسیسات حین بهره‌برداری

- **٦-١٦-١- 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 احتمالا 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.

- **٦-١٦-٢- 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، مسلما راننده در داخل تونل قادر به دید صحیح نمی‌باشد، به این حالت "اثر حفره سیاه[1]" گفته می‌شود.

---

[1] Black hole effect

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 می باشد.

یک سیپستم روشنایی خطی یا چشم گربه‌ای می‌تواند راهنمایی بصری را تقویت نماید. با این حال، سطح روشنایی نباید کاهش یابد.

٦-١٦-٣- 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.

٦-١٦-٤-روشنایی روز تونل‌های کوتاه

طراحی روشنایی برای تونل‌های کوتاه بر این اساس است که راننده‌ای که به تونل نزدیک می‌شود، بتواند در فاصله‌ای 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 تونل‌ها این است که راننده‌ای که به تونل نزدیک می‌شود، بتواند در فاصله‌ای 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 به‌راحتی به شکل تصویر سیاه یکدست در مقابل منظره روشن پشت آن قابل رویت می‌باشند. از سوی دیگر، وسایل نقلیه و موانع موجود در تونل با قرار گرفتن در یک زمینه تاریک، قابل تفکیک نمی‌باشند. این اتفاق در صورتی رخ می‌دهد که طول تونل در مقایسه با عرض آن بلند بوده و یا تونل در یک پیچ، به گونه‌ای 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.

تونل‌هایی با طول کمتر از ۲۵ متر، معمولا در هنگام روز نیازی به سیستم روشنایی ندارند. تعیین نیاز یا عدم نیاز تونل به سیستم روشنایی در هنگام روز برای تونل‌هایی با طول بین ۲۵ تا ۲۰۰ متر باید با روشی که در پیوست۳ 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: تونل‌های با طول کمتر از ۲۰۰ متر تونل‌های کوتاه نامیده می‌شوند.

٦-١٦-٥-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 نشانه‌های مرجع آشنا، از دید راننده دور می‌شوند. دیواره‌های تونل می‌توانند "اثر ترس از دیواره" را برای رانندگان ایجاد کنند که موجب می‌شود رانندگان از دیواره‌های 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 عکس‌العمل راننده، درک او از کنتراست و فاصله، دید محیطی او و قابلیت تشخیص رنگ‌ها کم می‌شود. به همین دلایل درک راننده از زمان سپری شده تغییر می‌نماید. یعنی برای راننده مدت زمانی که در داخل تونل سپری شده است حدودا دو برابر مدت زمان واقعی به نظر می‌رسد. بنابراین برخی رانندگان تحت تاثیر احساساتی از قبیل ترس از محیط‌های محصور قرار می‌گیرند.

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 تاثیر اساسی می‌گذارند. این ویژگی‌ها بر مقدار درخشندگی سطح قابل رویت در ناحیه دسترسی نیز تاثیرگذار 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 آنی 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 تاثیر 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 معمولا 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.

٦-١٦-٦- تهویه

تهویه تونل‌ها حین بهره‌برداری مجموعه تمهیداتی است که به‌منظور رقیق‌سازی و خروج ذرات معلق تولیدی و گازهای حاصل از اگزوز خودروهای سبک و سنگین عبوری از داخل تونل و همچنین ملاحظات آتش‌سوزی در داخل تونل‌ها انجام می‌گیرد. اولین گام در اجرای تهویه تونل‌ها، بررسی لزوم آن است که آیا در تونل موردنظر در حالت ترافیکی و یا اضطراری (آتش‌سوزی) با توجه به استانداردهای موجود تهویه نیاز است یا خیر سپس در صورت نیاز به اجرای تهویه، طراحی بر اساس آن انجام می‌شود.

٦-١٦-٦-١- 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 می‌شود.

- تهویه در حالت ترافیکی

جهت بررسی ضرورت تهویه مکانیکی در تونل‌ها، استانداردهای مختلفی وجود دارد که بر اساس آن‌ها می‌توان در این خصوص تصمیم‌گیری نمود. برخی استانداردهای مورداستفاده عبارتند از:

- استاندارد فرانسه

بر اساس استاندارد فرانسه، تونل‌هایی 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 محاسبه‌شده 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. به‌عبارت‌دیگر این رابطه حداکثر طولی از تونل را که با توجه به حجم ترافیک عبوری نیاز به تهویه ندارد، محاسبه می‌کند. این طول را باید برای هر دو حالت ترافیک روان و متراکم محاسبه نمود و عدد هرکدام که کمتر باشد را مبنای ادامه محاسبات قرارداد.

- استاندارد ژاپن

بر اساس این استاندارد، اگر حاصل‌ضرب 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.

٦-١٦-٦-٢- 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 المان، 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 توجیه علمی قابل‌اجرا می‌باشد. با افزایش طول تونل بیش از ۴۰۰ متر بایستی یک سیستم تهویه اضطراری در داخل تونل به کاربرد.

- استاندارد فرانسه

در تونل‌های برون‌شهری درصورتی‌که طول تونل بیشتر از ۵۰۰ متر و میزان ترافیک بیشتر از ۲۰۰۰ وسیله نقلیه باشد آنگاه به تهویه اضطراری در زمان آتش‌سوزی نیاز است.

٦-١٦-٦-٣- 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 براثر تردد خودروها انتشاریافته‌اند، موجب افزایش سطح ایمنی استفاده‌کنندگان داخل تونل می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که میزان آلاینده‌ها را تعیین می‌کند، ترافیک عبوری است. درواقع مبدا و مبنای مطالعات تهویه، اطلاعات ترافیکی مسیر است.

اولین قدم در طراحی تهویه تونل‌هایی که نیاز به تهویه مکانیکی دارند، محاسبه میزان هوای موردنیاز 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 قابل‌تحمل 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	(۰-۵) ×۱۰ $^{-۳}$
دود را می‌توان مشاهده کرد	(۵-۸) ×۱۰ $^{-۳}$
شرایط نامطلوب داخل تونل	(۸-۱۲) ×۱۰ $^{-۳}$
شرایط بسیار نامطلوب (دید پایین‌تر از ۳۰ تا ۵۰ متر)	(۱۲-۱۵) × ۱۰ $^{-۳}$
تونل باید بسته شود	K >۱۸× ۱۰ $^{-۳}$

بر اساس استانداردهای مختلف، ازجمله 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 آلایندگیEU۶, EU۵, EU۴, EU۳, EU۲, EU۱, Pre EU۱) میزان کلی آلاینده‌ها در سه حالت ترافیک روان (سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت)، ترافیک سنگین (سرعت ۱۰ کیلومتر بر ساعت) راه‌بندان (سرعت صفرکیلومتر) محاسبه می‌شود و بیشترین میزان آلاینده‌ها دراین‌بین تعیین‌شده و پس‌ازآن، میزان هوای موردنیاز برای رقیق‌سازی هر یکی از آلاینده‌های فوق محاسبه می‌شود و درنهایت از بین آن‌ها ماکزیمم‌های موردنیاز انتخاب می‌شود و به‌عبارت‌دیگر، سیستم تهویه مکانیکی باید این حجم هوا را جهت تامین ایمنی لازم داخل تولید نماید.

خودروها ازلحاظ ترافیکی شامل سه دسته کلی زیر می‌باشند:

PC: خودروهای سواری

LDV: خودروهای سبک مانند وانت و مینی‌بوس

HGV: شامل خودروهای سنگین مانند اتوبوس، تریلی، کمپرسی و ...

برای محاسبات میزان آلایندگی، همان‌طور که اشاره شد با در نظر گرفتن تعداد خودرو و انواع آن‌ها در داخل تونل در حالت‌های مختلف ترافیکی، میزان آلایندگی هرکدام از آن‌ها از جداول بر اساس سرعت، شیب مسیر، ارتفاع از سطح دریا، و تکنولوژی مورداستفاده در آن محاسبه‌شده و نسبت به بیشترین مقدار محاسبه‌شده برای آن آلاینده‌ها حجم هوایی که باعث رقیق شدن آن‌ها شود، محاسبه می‌شود.

همراه با محاسبه میزان هوای موردنیاز برای رقیق‌سازی آلاینده‌های خروجی از اگزوز خودروها، باید میزان هوای موردنیاز در حالت اضطراری آتش‌سوزی نیز محاسبه‌شده و نسبت به آن سرعت بحرانی[1] هوای موردنیاز در داخل تونل تعیین شود.

٦-١٦-٦-٤- انتخاب روش تهویه

روش‌های تهویه در دوران بهره‌برداری به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

- **٦-١٦-٦-٤-١- 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 باجت 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 ازآنجایی‌که 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 درنتیجه 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.

- **٦-١٦-٦-٤-٢- 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، بیان‌شده است که سیستم تهویه نیمه عرضی تا تونل‌هایی به طول ۲۷۵۰ متر مورداستفاده قرار می‌گیرد.

- **٦-١٦-٦-٤-٣- تهویه عرضی (کاملا 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. به‌جز 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 درصورتی‌که تهویه طولی و نیمه عرضی به‌هیچ‌عنوان پاسخگو نباشند از این نوع سیستم تهویه استفاده نمود.

٦-١٧- 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. درعین‌حال 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 به‌صورت 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 به‌موقع 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.

٦-۱۷-۱- 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 گرمازای 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 ماشین‌آلات باید به‌اندازه کافی از محدوده خطر دور شوند. برای اطمینان از این امر علاوه بر بازرسی کامل اجرای عملیات باید زمان شروع و پایان آتشکاری به‌وسیله 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 چاشنی‌های الکتریکی مواد ناریه ممنوع است.

در مواردی که آتشکاری به‌وسیله فیتیله اطمینان انجام می‌شود، 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 ازنظر احتمال ریزش، انفجارهای ناخواسته، وجود گردوغبار و گازهای سمی و خطرات دیگر بازدید کند و تنها درصورتی‌که ایمنی عملیات مورد تایید قرار گیرد اجازه ادامه کار صادر گردد.

بعد از آتشکاری ، هرگاه تعدادی از چال‌ها منفجر نشوند باید از نقطه‌ای به فاصله حداقل ۴۰ سانتیمتر از دهانه چال موردنظر و به‌موازات آن چال جدیدی حفر نمود و پس از خرج گذاری آن را منفجر کرد. خالی کردن چال پرشده به هر علت مجاز نیست.

٦-۱۷-۲- عوامل آسیب‌رسان و بیماری‌زای محیط کار و بهداشت حرفه‌ای

٦-۱۷-۲-۱- صدا

تماس مداوم با صدای بیش از حد مجاز، ناراحتی‌های جسمی و روانی به ویژه افت شنوایی کارکنان را به همراه دارد. هرگاه تراز فشار صوت، صدای کوبه‌ای[1] و صدای ضربه‌ای[2] از مقادیر جدول ۶- ۱۳ و جدول ۶- ۱۴ فراتر رود، تدابیر حفاظتی مناسب برای کاهش اثرات زیان‌آور صدا باید به کار گرفته شود.

برای کاهش تراز صوت به پایین‌تر از حدود تماس مجاز باید روش‌های کنترل مهندسی مانند کنترل صدا در منبع یا به کارگیری موانع یا جاذب‌های صدا در مسیر انتقال صوت و همچنین روش‌های کنترل مدیریتی مانند انتخاب درست کارکنان و کاهش زمان مواجهه افراد با صدا مورد استفاده قرار گیرد. هرگاه روش‌های فوق به اندازه کافی موثر نباشند پیمانکار موظف است گوشی‌های حفاظتی مناسب در اختیار کارکنان قرار دهد. به علاوه برنامه معاینات پزشکی، به خصوص آزمایش شنوایی‌سنجی برای راننده بولدوزر و کارکنان دیگری که ممکن است در اثر تماس مداوم با صدا دچار افت شنوایی شوند، در نظر بگیرد.

---

[1] Impulsive Noise
[2] 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	$\frac{1}{2}$
۱۱۰	$\frac{1}{4}$
۱۱۵***	$\frac{1}{8}$

* 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 ضربه ای یا کوبه ای

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.

٦-۱۷-۲-۲- 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 جابه جایی 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.

٦-۱۷-۲-۳- تنش گرمایی[1]

گرمای دستگاه‌ها و ماشین‌آلات، جابه جایی 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 گرمازدگی را ایجاد می‌نماید.

٦-۱۷-۲-٤- سایر عوامل

در مورد سایر عوامل زیان‌آور و بیماری‌زا مانند سرما و فشار استانداردهای کمیته فنی بهداشت حرفه‌ای کشور معتبر می‌باشند.

٦-۱۸- ملاحظات زیست‌محیطی

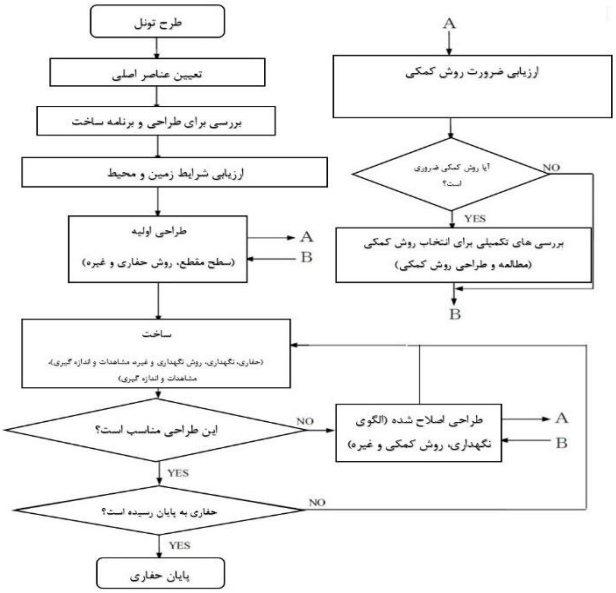
با رعایت قوانین و مقررات مربوطه باید تمام تلاش ممکن برای سرکوب صدا، لرزش، ارتعاش هوا با فرکانس پایین، کاهش و کمبود آب، نشست سطح زمین، تغییر شکل سازه‌های موجود، تخلیه آب‌های آلوده و مشکلات ناشی از ترافیک، جلوگیری از آلودگی‌هایی مانند گل شدن آب، خاک و سنگ با فلزات سنگین و همچنین حفظ محیط‌زیست انجام شود.

---

[1] (Heat Stress)

۶-۱۹- روش‌های کمکی[1]

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 مقرون‌به‌صرفه 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، ازآنجایی‌که 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 خلاصه‌شده 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 گنجانده‌شده‌اند: 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. ازآنجایی‌که طرح اولیه بر اساس نتایج مطالعات محدود تهیه‌شده 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 روش‌های کمکی استفاده می‌شود: این روش‌ها باید با در نظر گرفتن عوامل زیر اعمال شود:

اثرات، بهره‌وری اقتصادی، دوره ساخت، مطالعه سازگاری روش‌های کمکی با الگوی نگهداری و روش حفاری و با توجه به وضعیت ساخت و نتایج اندازه‌گیری‌ها و غیره.

٦-١٩-١- کاربرد روش‌های کمکی

در مواردی که از روش‌های کمکی استفاده می‌شود خصوصیات و ویژگی‌های هر روش باید به خوبی شناخته شوند. با این شناخت، شرایط زمین و محل موردبررسی قرار می‌گیرد و جزئیاتی مانند برنامه زمان‌بندی و روش ساخت به‌طور کامل در نظر گرفته می‌شود. جدول ۶- ۱۵ طبقه‌بندی روش‌های کمکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول نشان داده‌شده است روش‌های کمکی با توجه به اهدافشان به انواع گسترده‌ای طبقه‌بندی می‌شوند: پایداری جبهه کار، کنترل آب‌های زیرزمینی، کنترل نشست سطحی و جلوگیری از آسیب به سازه‌های مجاور.

جدول ۶- ۱۵- طبقه‌بندی روش‌های کمکی

	روش	هدف						شرایط زمین			ملاحظات
		ایمنی ساخت			حفاظت از محیط						
		پایداری جبهه کار			کنترل آب زمین	کنترل نشست سطح زمین	حفاظت از سازه های اطراف	سنگ سخت	سنگ نرم	خاک	
		پایداری	پایداری جبهه کار	پایداری کف							
تقویت سقف (تاج)	فورپولینگ								*	**	*۱
	Steel pipe forepiling					*	*		*	*	*۳
	روش جت گروتینگ افقی		*	*		*	*			*	*۳
	روش Slit concrete method					*	*			*	*۳
	لوله گذاری در سقف					*	*		*	*	*۳
تقویت جبهه کار	شاتکریت جبهه‌کار		*					*	*	*	*۱
	بولت جبهه کار		*			*		*	*	*	*۱

تقویت کف		نگهداری فولادی با پایه[1]			*			*				*	*۱
		شاتکریت کف			*			*				*	*۱
		کفبند موقتی			*			*				*	*۱
		بولت تقویت کننده کف			*			*				*	*۱
		شمع تقویت کننده کف			*			*				*	*۲
		شمع های کناری تقویت کننده کف			*			*				*	*۲
		تزریق تقویت کننده کف			*			*				*	*۳
کنترل جریان آب	زهکشی	چال زهکشی		*	*	*				*	*	*	*۱
		Well point		*	*	*						*	*۳
		چاه عمیق		*	*	*						*	*۳
		تونل زهکشی		*	*	*				*	*	*	*۳
	آبند کردن	روش تزریق آببند		*	*	*	*			*	*	*	*۳
		انجماد			*		*					*	*۳
		پنوماتیک[2]			*		*					*	*۳
		دیوار حائل			*		*					*	*۳
تقویت		پیش تقویت قائم			*			*				*	*۳

[1] wing rib
[2] Pneumatic method

	تزریق			*			*		*		*	*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.

تکنیک‌های مختلفی مانند تقسیم سطح مقطع به مقاطع کوچک‌تر، کوتاه کردن گام حفاری و نگهداری‌های فولادی قوی‌تر برای اطمینان از پایداری جبهه کار وجود دارد. بااین‌حال در برخی موارد حفاری یک مقطع بزرگ و اعمال روش‌های کمکی به‌جای تکنیک‌های فوق ازنظر محدودیت استفاده از تجهیزات و بهره‌وری اقتصادی و غیره کارآمدتر خواهد بود. در مطالعه انتخاب روش‌های کمکی پایداری جبهه کار، با توجه به آسیب‌پذیری جبهه کار نسبت به ورود آب، باید وضعیت آب‌های زیرزمینی حتماً مدنظر قرار گیرد. در مرحله بعد روش‌های کمکی برای تثبیت بخش‌های مختلف تاج، جبهه کار و کف تونل انتخاب می‌شوند. مشکلات مربوط به این نواحی گاهی به یکدیگر مربوط می‌شوند. به‌عنوان‌مثال پایداری تاج و جبهه کار با یکدیگر مرتبط هستند و نشست کف باعث سستی ناحیه تاج می‌شود که پایداری آن را دچار مشکل می‌کند. بنابراین باید ناپایداری جبهه کار را پیش‌بینی و اقدامات لازم را برای چنین رویدادی از قبل آماده کرد و بر اساس مشاهده جبهه‌کار و نتایج اندازه‌گیری‌ها اقدامات لازم را در مراحل اولیه انجام داد.

۲- کنترل آب زیرزمینی: در صورت حفر تونل در عمق پایین‌تر از سطح آب زیرزمینی، آب روان در محل حفاری ظاهر می‌شود که ممکن است سبب مشکلاتی مانند تضعیف پایداری جبهه کار، کف گل‌آلود و همچنین کاهش کیفیت نگهداری فولادی شود. علاوه براین مشکلاتی برای محیط‌زیست اطراف ازجمله فرونشست زمین به دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی در اطراف و تخلیه چاه‌ها وجود خواهد داشت. اقدامات متقابل در برابر چنین مشکلاتی شامل روش‌های زهکشی و آب‌بندی می‌شود.

زهکشی می‌تواند باعث نشست سطحی یا ایجاد اثرات مخرب برسازه‌های 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 آب‌بندی دیگر گزینه ممکن است. تزریق که یکی از روش‌های آب‌بندی است می‌تواند میزان ورود آب را کاهش داده و باعث بهبود زمین شود. علاوه بر این به‌عنوان معیاری برای پایداری جبهه کار و لایه‌های ناپیوسته (پرشده با ماسه) می‌باشد. روش‌های دیگر مانند انجماد در برخی موارد استفاده می‌شود.

۳- کنترل نشست زمین: نشست سطح زمین در حین حفاری تونل ارتباط پیچیده‌ای با شرایط و موقعیت زمین، آب زیرزمینی، روش ساخت و عوامل دیگر دارد. علل عمده نشست سطحی را می‌توان در سست شدن زمین اطراف به دلیل حفاری تونل و کاهش سطح آب زیرزمینی (کاهش فشار آب منفذی) طبقه‌بندی کرد.

در موارد زمین تحکیم نشده یا زمین با روباره پایین، برای کنترل نشست از روش‌های کمکی پایداری جبهه‌کار استفاده می‌شود. نشست ایجادشده به دلیل کاهش سطح آب زیرزمینی شامل نشست تحکیم خاک رسی[1] به دلیل افت فشار بین بافتی[2] و نشست فوری خاک شنی است. ازاین‌رو 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[3] و پیش تقویت قائم[4] 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.

هنگامی‌که 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.

٦-۱۹-۲ روش‌های کمکی برای ایمنی در ساخت تونل

٦-۱۹-۲-۱ روش کمکی برای پایداری جبهه کار

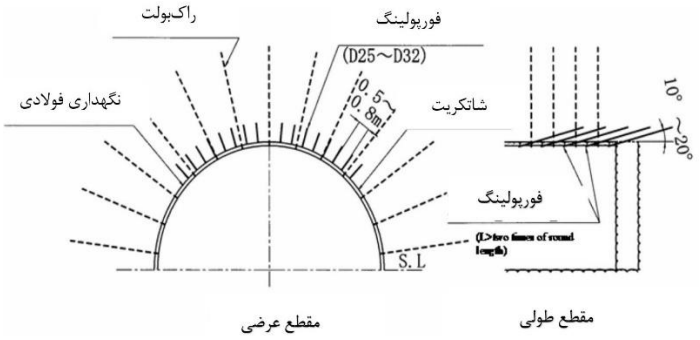
روش‌های پایداری جبهه‌کار را می‌توان با توجه به محلی که در آن اعمال می‌شود به سه دسته طبقه‌بندی کرد:

۱-پایداری تاج، ۲- پایداری جبهه‌کار و ۳- پایداری کف. برای پایداری جبهه‌کار، برنامه‌ریزی اقدامات متقابل (از قبل) در برابر ناپایداری احتمالی، ارزیابی مستمر پایداری با مشاهده جبهه‌کار 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[5]

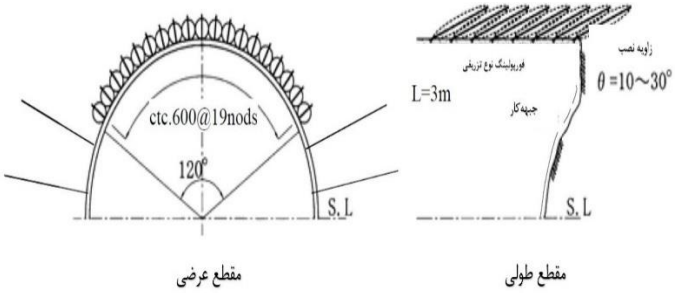
[1] Consolidation settlement of clayey soil
[2] Interstitial pressure
[3] Mixing methods
[4] Vertical pre-reinforcement
[5] Crown

الف) فورپولینگ نوع پرکننده[1] : همان‌طور که در شکل ۶- ۲۳ نشان داده‌شده است روش فورپولینگ نوع پرکننده روش کمکی است که در آن بولت‌ها، میلگردها یا لوله‌هایی با طول کمتر از ۵ متر در اطراف ناحیه قوسی تونل به داخل زمین رانده می‌شوند. هدف از این روش افزایش مقاومت برشی ظاهری زمین در قسمت تاج و جلوگیری از ریزش آن است. معمولاً از میلگردهای تقویت‌کننده فولادی استفاده می‌شود که فضای اطراف میله‌ها با خمیر سیمان[2] یا ملات پر می‌شود (گاهی اوقات بسته به شرایط زمین این فضا پر نمی‌شود).



شکل ۶- ۲۳- نمونه از فورپولینگ نوع پرکننده

ب) فورپولینگ نوع تزریقی: فورپولینگ نوع تزریقی یک روش کمکی است که در آن بولت‌ها یا لوله‌های با طول کمتر از ۵ متر به‌طور مورب به داخل زمین جلوی جبهه کار با تزریق هم‌زمان (تحت‌فشار) خمیر سیمان زود گیر یا دوغاب شیمیایی برای افزایش پایداری قوس جلوتر از جبهه کار رانده می‌شود (شکل ۶- ۲۴).



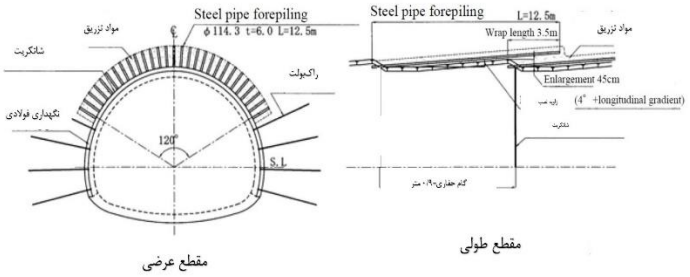
شکل ۶- ۲۴-نمونه از فورپولینگ نوع تزریقی

ج)Pipe forepiling: یک روش کمکی برای تقویت زمین ناپایدار (مانند سنگ‌های خردشده، نواحی شکستگی گسل یا زمین تحکیم نشده) است که در آن تشکیل قوس زمین مشکل است. از مزایای این روش کاهش جابه‌جایی از قبل است و معمولاً از لوله‌های فولادی با طول بیشتر از ۵ متر برای پایداری تاج استفاده می‌شود. در این روش ممکن است نیاز به تغییر در سطح مقطع حفاری یا نوع ماشین‌آلات مورداستفاده باشد؛ بنابراین باید قبل از به‌کارگیری این روش فرآیندها در نظر گرفته شود.

[1] Filling type forepoling
[2] Cement paste

لوله‌ها قبل از حفاری تونل در امتداد محیط فوقانی مقطع حفاری برنامه‌ریزی‌شده 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

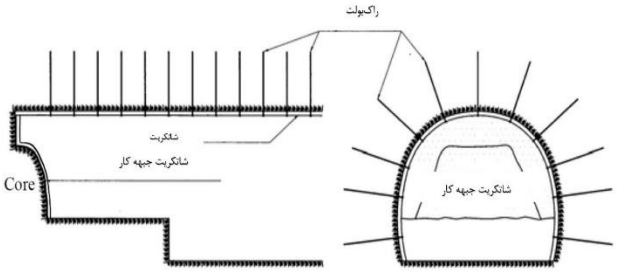
۲- پایداری جبهه‌کار: روش‌های پایداری جبهه‌کار شامل شاتکریت، بولت جبهه‌کار یا تزریق است. در برخی موارد پایداری جبهه‌کار را می‌توان با حفاری بخشی (بخش به بخش) و استفاده از شاتکریت بهبود بخشید چراکه مقیاس و شکل جبهه‌کار تأثیر زیادی بر زمان ایستایی (پایداری) جبهه‌کار دارد.

الف) شاتکریت جبهه کار: همان‌طور که در شکل ۶- ۲۶ نشان داده‌شده است به‌محض حفاری، شاتکریت جبهه کار با ضخامت ۳ تا ۱۰ سانتی‌متر روی جبهه‌کار پاشیده می‌شود.

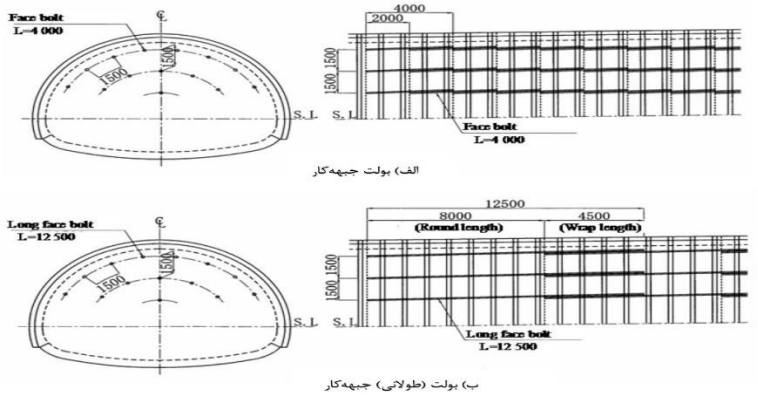
ب) بولت جبهه‌کار: بولت‌های جبهه کار شامل دو نوع کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از ۵ متر هستند. هدف از بولت جبهه کار پایداری جبهه کار و کاهش نشست سطح زمین با نگهداری قسمتی یا کل جبهه‌کار با راکبولت است. بولت جبهه کار زمانی مؤثر است که همراه با شاتکریت استفاده شود (شکل ۶- ۲۷).

برای افزایش اثر تقویت می‌توان از بولت‌های تزریقی استفاده کرد. بولت‌های پلاستیکی تقویت‌شده با الیاف و راکبولت-های فولادی شکاف‌دار که برش آن‌ها آسان‌تر است اغلب استفاده می‌شوند.

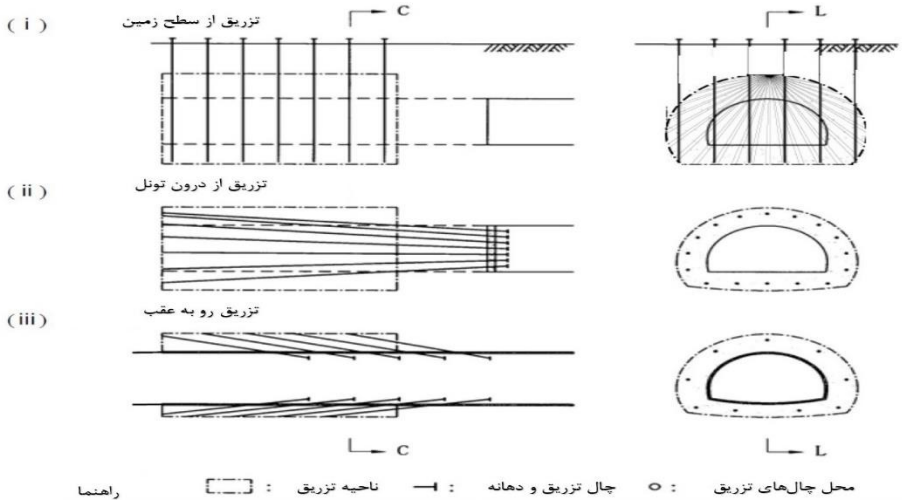
ج) تزریق: تزریق روشی برای پایداری جبهه کار است که در آن مواد سیمانی یا شیمیایی (مانند water-glass grout) برای تقویت خاک در زمین تزریق می‌شوند. از اهداف دوغاب کاهش ورودی آب به داخل تونل با کاهش نفوذپذیری خاک و پایداری زمین با شکستگی زیاد که مستعد ریزش هستند می‌باشد. پس از بررسی محل ورود آب و یا طول زمین ناپایدار (مانند ناحیه شکست گسلی)، ترجیحاً بهترین مواد تزریق و روش ساخت انتخاب می‌شود. شکل ۶- ۲۸ نمونه ای از تزریق را نشان می‌دهد.



شکل ۶- ۲۶- نمونه از شاتکریت جبهه کار



شکل ۶- ۲۷- نمونه‌ای از بولت جبهه کار



شکل ۶- ۲۸- نمونه ای تزریق

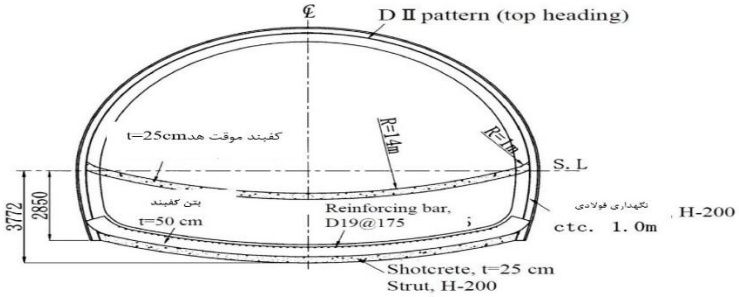
۳- روش‌های پایداری کف: روش‌های پایداری جبهه کار به محافظت در برابر آسیب ایجادشده ناشی از نشست کف و سست شدن زمین (به دلیل ناکافی بودن ظرفیت باربری زمین در کف) کمک می‌کند. این روش‌ها شامل شاتکریت (برای کفبند موقتی)، راکبولت به سمت پایین (که در آن راکبولت ها یا لوله‌های فولادی در پایه نگهداری‌ها استفاده می‌شود) و تزریق می‌باشند که ظرفیت باربری زمین را افزایش می‌دهند. نگهداری‌های فولادی با پایه[1] که باعث بزرگ‌تر شدن ناحیه نگهداری در کف می‌شود نیز قابل‌استفاده هستند.

[1] wing ribs

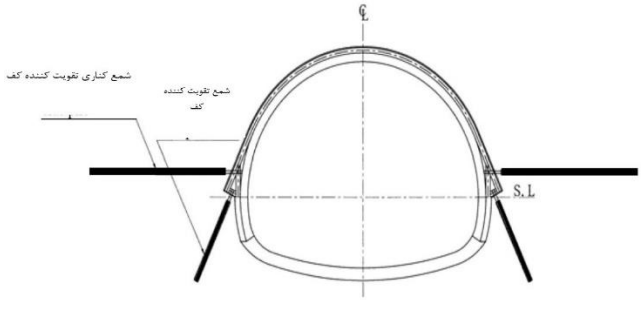
الف) قوس کفبند موقتی [1] : به‌طورکلی، قوس کفبند موقتی به‌طور موقت تونل را با شاتکریت یا به‌طور هم‌زمان با استفاده از نگهداری فولادی تقویت می‌کند که روش بسیار کارآمدی است. با این‌حال سهولت حفاری و راندمان کار با تخریب بخش کفبند موقتی کاهش می‌یابد. ازآنجایی‌که ممکن است در هنگام تخریب کفبند موقتی جابه‌جایی بزرگ اتفاق بیفتد باید رفتار کف نگهداری[2] به‌دقت بررسی شود (شکل ۶- ۲۹).

ب) پایه و بولت تقویت‌کننده کف: بولت‌ها و پایه‌های تقویت‌کننده کف (نصب راک‌بولت به سمت پایین در پایه نگهداری‌ها یا لوله‌های فولادی با قطر کم و تزریق) باهدف کاهش تنش در محل تماس نگهداری و زمین و جلوگیری از ریزش در حین حفاری انجام می‌شوند. اگر مقاومت زمین در اطراف کف خیلی کم باشد نصب بولت‌ها و هم‌زمان تزریق تحت‌فشار خمیر سیمان یا دوغاب شیمیایی سبب افزایش مقاومت زمین می‌شود. اگر آب حفاری هنگام نصب بولت یا لوله فولادی با قطر کم باعث آسیب به کف شود این روش می‌تواند اثر معکوس داشته باشد؛ بنابراین برای انتخاب روش حفاری اتخاذ روش حفاری بدون آب نیز باید در نظر گرفته شود. شکل ۶- ۳۰ نمونه‌ای از شمع تقویت‌کننده کف باهدف کاهش تغییر شکل تونل و دستیابی به ظرفیت باربری موردنیاز زمین را نشان می‌دهد.

ج) نگهداری فولادی با پایه[3]: نگهداری‌های فولادی با پایه به‌عنوان یک اقدامات متقابل در برابر ظرفیت باربری ناکافی زمین در پای نگهداری‌ها استفاده می‌شود. فولادهای H شکل و غیره به پایه نگهداری فولادی متصل می‌شوند تا باعث افزایش مساحت و درنتیجه کاهش فشار وارده شوند.



شکل ۶- ۲۹- نمونه از قوس کفبند موقتی در طاق



شکل ۶- ۳۰- نمونه ای از شمع‌های تقویتی

[1] Temporary inverted arch
[2] The foot of the support
[3] wing ribs

٦-۱۹-۲-۲ 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 جبهه‌کار (درنتیجه مشکل شدن حفاری تونل)، چسبندگی ناکافی شاتکریت و راک‌بولت و کاهش راندمان کاری در تونل را به همراه خواهد داشت. اقدامات لازم برای کنترل آب زیرزمینی را می‌توان به دوسته روش‌های زهکشی و روش‌های آب‌بندی[1] تقسیم‌بندی کرد.

۱- روش‌های زهکشی: روش‌های زهکشی بیشتر از روش‌های آب‌بندی استفاده می‌شوند. ازآنجایی‌که 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 به‌دقت انتخاب شوند.

الف) حفاری زهکشی[2]: حفاری زهکشی روشی پرکاربرد است که در آن آب از طریق گمانه‌های حفاری‌شده توسط دستگاه حفاری یا جامبو به‌منظور کاهش فشار و سطح آب زیرزمینی خارج می‌شود. در شرایط خاک تحکیم نشده باید مراقب بود که ذرات خاک همراه با آب خارج نشوند.

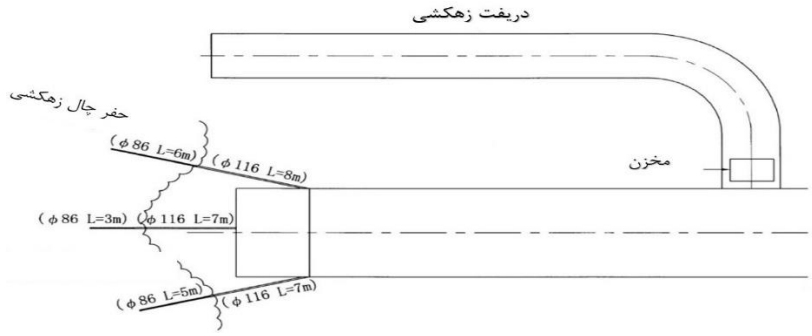
ب) دریفت زهکشی[3] : این روش رویکردی برای حفر تونل پایلوت با قطر کوچک همراه با حفاری زهکشی برای تونل‌هایی با مقدار زیاد آب زیرزمینی است (شکل ۶- ۳۱). هنگامی که یک سفره آب با حجم و فشار زیاد بالای تونل باشد ممکن است تونل‌های زهکشی زیادی نیاز باشد.

ج) چاه زهکشی [4]: این روش برای حذف آب زیرزمینی تحت‌فشار منفی است که در آن لوله‌های جمع‌آوری آب زیرزمینی به نام "well points" داخل زمین جا داده می‌شود (شکل ۶- ۳۲).

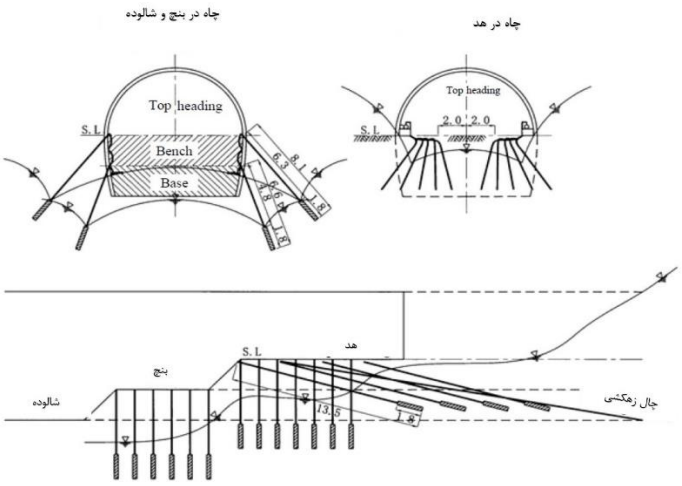
د) چاه عمیق[5]: در این روش یک چاه عمیق معمولاً با قطر ۳۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متری حفر و یک پمپ شناور برای برداشت آب استفاده می‌شود (شکل ۶- ۳۳).

---

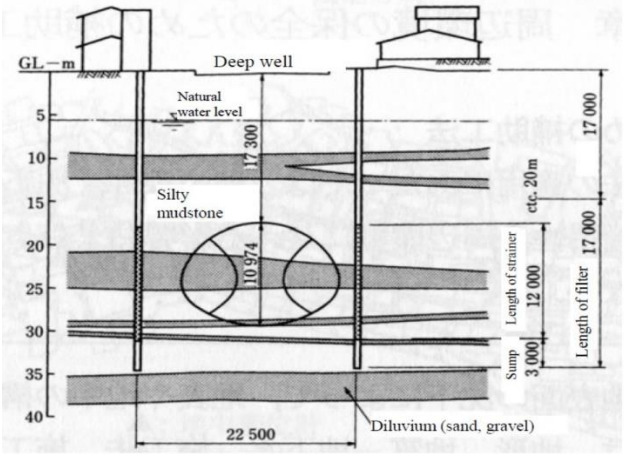
[1] Water sealing
[2] Drainage boring
[3] Drainage drift
[4] Well point drainage
[5] Deep well



شکل ۶- ۳۱- نمونه‌ای استفاده ترکیبی از دریفت زهکشی و حفاری زهکشی



شکل ۶- ۳۲- نمونه از چاه نفوذی (well point) غرق‌شده در تونل



شکل ۶- ۳۳-نمونه ای 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. به‌عنوان‌مثال 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.

روش‌های مختلفی برای آب‌بندی وجود دارند که شامل روش‌های تزریق آب‌بندی و روش‌های دیوار حائل[1] هستند.

الف) روش تزریق آب‌بندی[2]: هدف از استفاده از این روش کاهش نفوذپذیری زمین است. مواد سیمانی (مانند خمیر سیمان) یا مواد تزریقی شیمیایی (مانند water glass grout) به‌منظور پرکردن فضاهای خالی و درزه‌ها در جلو یا اطراف جبهه کار تزریق می‌شوند. 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 آب‌بندی باید از مصالح و روش‌های 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.

به‌طورکلی دوغاب شیمیایی نفوذپذیری بیشتری از دوغاب نوع سیمانی دارد و در زمان کوتاه‌تری جامد می‌شود؛ بنابراین دوغاب شیمیایی برای کنترل ورود آب به تونل مناسب‌تر است.

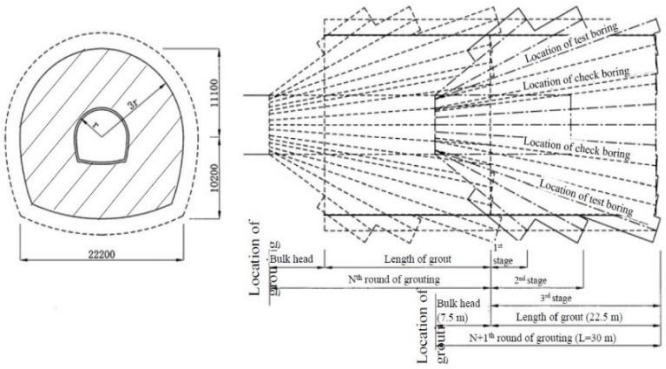
دو روش مختلف تزریق شامل تزریق از سطح زمین و دومی تزریق از داخل تونل است. مزیت روش اول عدم اختلال در چرخه حفاری تونل است اما زمانی که روباره ضخیم باشد مقرون‌به‌صرفه نیست. به‌کارگیری این روش مستلزم در نظر گرفتن شرایط عملکرد، برنامه زمان‌بندی ساخت تونل و هزینه است. در روش دوم برای دستیابی به تزریق مناسب باید سربندی[3] یا لاینینگ موقتی[4] ساخته شود.

در این روش توجه به فشار دوغاب ضروری است، در فشار کم، تزریق ضعیف و در فشار خیلی زیاد هزینه‌ها افزایش می‌یابد (به دلیل حجم بیشتر دوغاب استفاده‌شده) و همچنین ممکن است اثرات نامطلوبی بر زمین یا سازه‌های اطراف داشته باشد. فشار دوغاب باید با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی، فشار آب زیرزمینی و تأثیر برسازه‌های مجاور، آب‌های زیرزمینی و رودخانه مجاور کنترل شود. در پایان تزریق باید تغییر مقدار آب ورودی، حجم، فشار و عملکرد تزریق با آزمایش چال‌ها بررسی شود (شکل ۶- ۳۴).

روش دیوار قطع جریان: روش دیوار قطع جریان تکنیکی برای قطع جریان آب زیرزمینی ورودی به داخل تونل از زمین‌های اطراف با نصب دیوارهای دیافراگمی زیرزمینی[5] یا شمع‌های ورق فولادی[6] در دو طرف تونل است. این روش برای زمین‌های با نفوذپذیری بالا و مقدار زیاد آب مناسب است. در صورت استفاده از این روش، باید روش‌های 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 راک‌بولت‌ها 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

٦-۱۹-۳- روش‌های کمکی برای محافظت از محیط اطراف

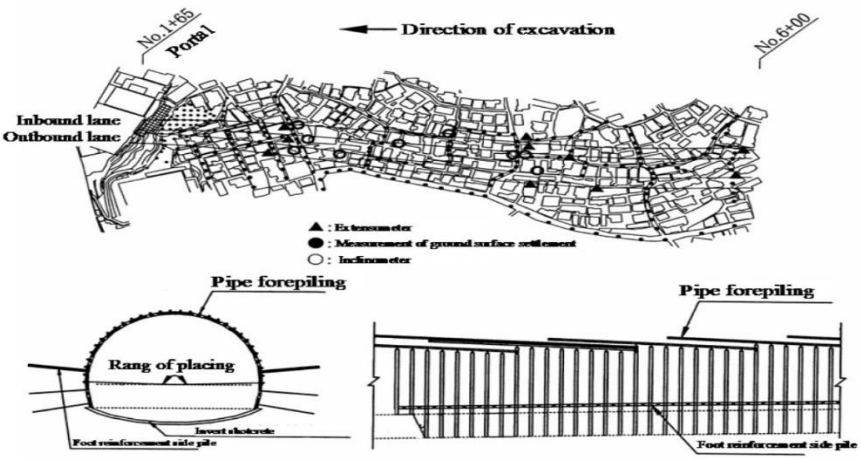
٦-۱۹-۳-۱- روش‌های کمکی برای جلوگیری از نشست سطح زمین

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 اثربخشی 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[1]، تزریق افقی[2] ، "slit concrete" و پیش تقویت قائم[3] استفاده می‌شود. همچنین برای جلوگیری از نشست سطح زمین ناشی از زهکشی، روش‌هایی مانند تزریق آب‌بندی یا انجماد به کار گرفته می‌شود. بااین‌وجود روش‌های پیشگیری از نشست سطح زمین معمولاً با روش‌های‌کمکی پایداری جبهه‌کار استفاده می‌شوند. ممکن است با به کارگیری روش‌های پیش تحکیمی و محدود کردن جابه‌جایی در جلوی جبهه‌کار، بار اعمال شده بر سیستم نگهداری افزایش یابد؛ بنابراین نیاز است درصورت لزوم ظرفیت باربری سیستم نگهداری تقویت شود. علاوه بر روش‌های ذکرشده نصب زودهنگام کفبند نیز برای کاهش نشست بسیار کارآمد است.

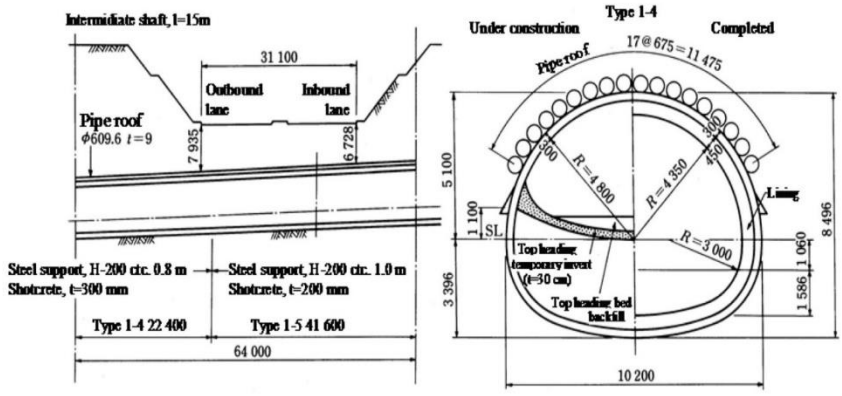
۱- Pipe forepiling: شکل ۶- ۳۵ نمونه‌ای از pipe forepiling را نشان می‌دهد که توسط یک ماشین مخصوص به‌منظور جلوگیری از تغییر شکل ساختمان‌های بالای یک تونل دوقلو انجام‌شده است.

[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. ازآنجاکه این روش نیازمند تجهیزات نسبتاً بزرگ مانند دیوار واکنش[1] 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.

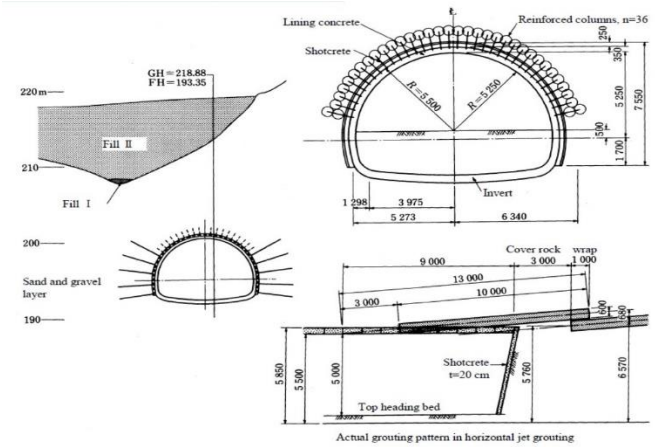


شکل ۶- ۳۶- نمونه ای از لوله محافظ سقف با قطر زیاد

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. به‌طورکلی 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 به‌منظور 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.



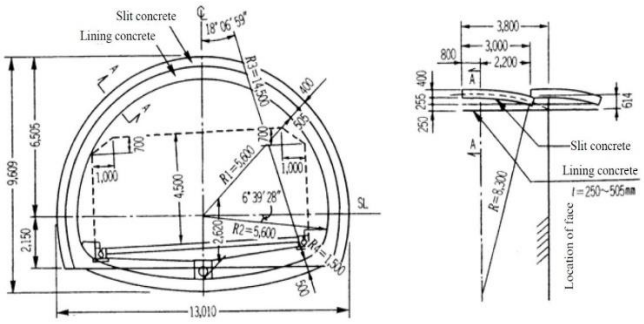
شکل ۶- ۳۷- نمونه ای از تزریق جت افقی

۴- روش Slit concrete: این روش شامل ایجاد خندق قوسی [1] 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 حفرشده بلافاصله پس از برش با بتن یا مواد دیگر پر می‌شود تا لاینینگ به شکل پوسته قوسی تشکیل شود. ازآنجایی‌که یک ساختار صلب در امتداد عرضی تونل تشکیل می‌شود می‌توان از جابه‌جایی جلوتر از جبهه کار جلوگیری کرد.

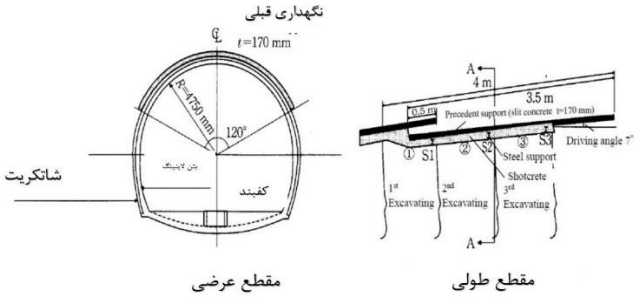
این روش برای تونل در مناطق شهری (که نشست سطحی بسیار اندکی مجاز است) و یا تونلی که از نزدیکی تأسیسات مهم عبور می‌کند مناسب است.

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 [2] 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.

[1] Arched ditch
[2] Chain saw



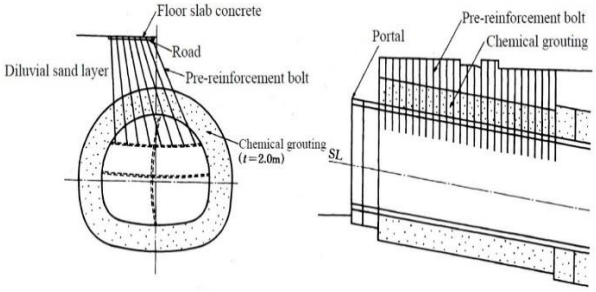
شکل ۶- ۳۸-نمونه ای از slit concrete



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 داده‌شده 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 به‌منظور 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

٦-١٩-٤- 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.

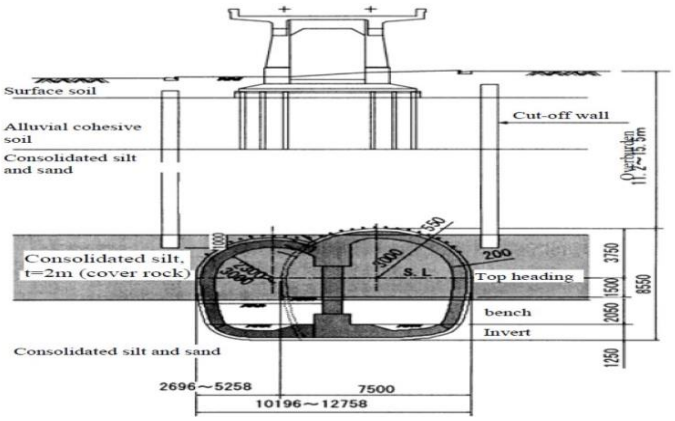
۲- کنترل گسترش تاثیرات در میان سازه‌های مجاور: این روش شامل تقویت زمین، بهسازی و روش دیوار حائل است. هدف تقویت و بهسازی زمین کنترل جابه‌جایی است (مانند روش تزریق). بااین‌وجود تحت این روش، زمین اطراف تونل نه‌تنها بسته به شرایط خاک، توالی ساخت و فاصله ممکن است آسیب ببیند بلکه سازه‌های مجاور نیز ممکن است 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 [1] 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[2] ، صفحه لوله‌ای[3] ، دوغاب اختلاط جت[4] و شمع لوله فولادی[5] 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 جبهه‌کار 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 ۶- ۴۱ 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 طراحی‌شده 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 آب‌بندی

فصل هفتم

مدیریت ساخت تونل

۷- مدیریت ساخت تونل

در حفاری تونل اطمینان از پایداری آن با به‌کارگیری سیستم نگهداری اولیه و لاینینگ، در نظر داشتن شرایط زمین و استفاده فعالانه از ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل ذاتی زمین ضروری است. به‌منظور 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 مورداستفاده قرار گیرند. اسناد مدیریت ساخت می‌تواند شامل داده‌های بررسی زمین‌شناسی، سوابق کنترل کیفیت، سیستم نگهداری، روش‌های ساخت کمکی[1] 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 سیستماتیک‌جهت برنامه‌ریزی و کنترل نحوه اجرای فعالیت‌ها ازنظر 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 بهینه‌سازی سه عامل زمان، هزینه و کیفیت اجرای پروژه داشته باشد. یک سیستم برنامه‌ریزی و کنترل پروژه خوب باید دارای توانایی‌ها و قابلیت‌های زیر باشد:

- تعیین تاریخ اتمام پروژه در مرحله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی اولیه
- تعیین ساختار شکست کار (WBS) جهت اجرای صحیح و عدم تداخل فعالیت‌ها و منابع آن‌ها
- ارائه راه‌حل باصرفه جهت جبران تأخیرها در اجرای برخی فعالیت‌های پروژه در زمان اجرا
- ارائه راه‌حل باصرفه جهت تسریع مدت اجرای پروژه در صورت تغییر در شرایط اقتصادی و اجتماعی کشور یا سازمان مولد پروژه و تغییر اولویت‌های پروژه و الزام به اجرای سریع‌تر آن
- زمان‌بندی و برنامه‌ریزی در جهت استفاده از نیروی انسانی، ماشین‌آلات و تجهیزات به‌منظور استفاده مطلوب از آن‌ها و گریز از بروز تنگنا و محدودیت در این زمینه
- چگونگی توزیع مواد و مصالح مصرفی میان پروژه‌ها و فعالیت‌های مختلف آن‌ها
- زمان‌بندی سفارش‌های خرید مواد، مصالح، ماشین‌آلات و تجهیزات جهت کاهش هزینه‌های انبارداری و ضایعات و همچنین زیان‌های ناشی از راکد ماندن منابع مالی پروژه
- تعیین میزان نقدینگی پروژه در هر واحد زمانی جهت پرداخت به‌موقع صورت‌حساب‌ها و پیش‌پرداخت‌ها
- ثبت و تجزیه‌وتحلیل نتایج حاصله و در مواقع لزوم تغییر در برنامه‌ریزی پروژه، نگهداری نتایج جهت استفاده در پروژه‌های آتی و جلوگیری از بروز مشکلات مشابه.

زمان‌بندی جدول زمانی یا برنامه زمانی در مدیریت پروژه، فهرستی از نقاط عطف پروژه، فعالیت‌ها و اقلام تحویلی است که اغلب با تاریخ آغاز و پایان فعالیت‌ها در نظر گرفته و درج می‌شوند. در اغلب موارد، این آیتم‌ها را بر اساس تخصیص منابع، بودجه و مدت‌زمان، با اتصال به وابستگی‌ها و رویدادهای برنامه‌ریزی‌شده در جدول موردنظر وارد می‌کنند. جدول و برنامه زمان‌بندی، همچنین ترتیب انجام فعالیت‌های پروژه از ابتدای کار تا خاتمه پروژه را تعیین می‌کند.

در مفهوم کلی، برنامه زمان‌بندی، ساختار شکست پروژه (WBS) را در طول زمان اجرای پروژه با کمک نمودار گانت به تصویر می‌کشد. اهمیت ساختار شکست کار و برنامه زمان‌بندی تا حدی است که به‌عنوان یکی از مدارک بسیار مهم و اولیه، از همان ابتدای پروژه تهیه و تحویل مهندس مشاور می‌شود. موفقیت یک پروژه، به وجود برنامه زمان‌بندی تفصیلی جامع و قابل‌اتکا (و مصوب) بستگی دارد. برنامه‌ای که به‌خوبی نشان‌دهنده ارتباط هر کار با سایر فعالیت‌های پروژه و زمان انجام آن باشد. برنامه زمان‌بندی با نرم‌افزارهایی مانند MSP[۲] تهیه می‌شود. نرم‌افزار مدیریت پروژه مایکروسافت، به رسم نمودار شبکه‌ای بر اساس زمان‌بندی پروژه کمک کرده و باعث دقت بیشتر در مدت‌زمان

[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 به‌عبارت‌دیگر تقسیم پروژه به زیر پروژه‌های آن
- شکستن هر زیر پروژه به‌جزئیات آن و تعیین تمام فعالیت‌های پروژه بر اساس نحوه اجرای آن
- طراحی ساختار شکست کار (WBS) به‌صورت منظم و سیستماتیک با روش از بالا به پایین[3] 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 به‌طور 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[4] 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 به‌کارگیری آن‌ها

---

[3] TOP-DOWN
[4] Critical Path Method

- برآورد هزینه اجرایی هریک از فعالیت‌ها با توجه به هزینه‌های ثابت و متغیر آن‌ها
- تجزیه‌وتحلیل هزینه‌های پروژه و مقایسه نتایج حاصله با بودجه تعیین‌شده

۷-۱-۱-۳- گام سوم: زمان‌بندی پروژه، برنامه‌ریزی منابع، بررسی رابطه زمان و هزینه و بررسی مشکلات احتمالی

- آنالیز زمانی شبکه، تعیین مسیر بحرانی و شناسایی فعالیت‌های با شناوری کم (فعالیت‌های بحرانی)
- تخصیص منابع موجود به فعالیت‌های پروژه با توجه به محدودیت‌های موجود منابع
- آنالیز منابع پروژه و تغییر در برنامه زمان‌بندی اولیه با توجه به محدودیت منابع در دسترس
- تسطیح منابع در صورت لزوم و تغییر در برنامه زمان‌بندی اولیه با توجه به تسطیح انجام‌شده
- تجزیه‌وتحلیل رابطه زمان و هزینه[5] و زمان‌بندی پروژه با حداقل هزینه به کمک روش‌های موجود و جدید ارائه‌شده در این زمینه
- بررسی شرایط نامناسب جوی و سایر مشکلات قابل پیش‌بینی که بر نحوه و زمان اجرا فعالیت‌های پروژه تأثیرگذار هستند.

۷-۱-۲- کنترل پروژه

برابری مدت‌زمان و هزینه واقعی اجرای پروژه با مدت‌زمان و هزینه پیش‌بینی‌شده، به‌ندرت رخ می‌دهد. همچنین در مراحل مختلف اجرای یک پروژه ممکن است فعالیت‌هایی به پروژه افزوده یا کاسته شود. بنابراین کنترل و نظارت از مراحل اساسی در مدیریت پروژه محسوب می‌شود و به هنگام نمودن برنامه زمان‌بندی در پروژه‌های معین، می‌تواند باعث بالا رفتن کیفیت نحوه انجام فعالیت‌ها گردیده و از تاخیرهای احتمالی جلوگیری کند. به هنگام نمودن پروژه به معنی به هنگام کردن فعالیت‌های پروژه و روابط میان آن‌ها، اطلاعات زمانی فعالیت‌ها، اطلاعات هزینه و منابع اجرایی فعالیت‌ها است. در مرحله نظارت و کنترل، وضعیت کنونی پروژه در دوره زمانی تعیین‌شده، میزان انحرافات از برنامه زمان‌بندی مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته و راهکارهایی جهت انجام پروژه حتی‌المقدور در تاریخ پایان پیش‌بینی‌شده آن و یا حداقل نزدیک به زمان مورد انتظار با کمترین مقدار افزایش هزینه، ارائه می‌شود. در این مرحله گزارش‌هایی از قبیل زمان‌بندی به هنگام شده، منحنی‌های تحلیل هزینه، هیستوگرام‌های مربوط به هزینه‌های مصرف‌شده و منابع موردنیاز پروژه و نمودارهای پیشرفت تهیه می‌شوند. این گزارش‌ها و تحلیل‌های آن به گروه مدیریت جهت تصمیم‌گیری صحیح و به‌موقع کمک می‌کند.

---

[5] Cost-Time Trade-Off

۷-۱-۳- تجزیه‌وتحلیل، ارزشیابی و ذخیره سازی اطلاعات پروژه

برنامه‌ریزی و کنترل پروژه وقتی می‌تواند مؤثر، مفید و تسهیل‌کننده عملیات اجرایی باشد که به‌صورت نظام‌مند و با نگرش سیستمی اجرا شود. یکی از توانایی‌های سیستم کنترل پروژه، ثبت و تجزیه‌وتحلیل نتایج حاصل از اجرای پروژه و تأثیر آن بر روند پیشرفت پروژه است. کنترل پروژه علاوه بر اینکه نحوه پیشرفت مالی پروژه را موردبررسی قرار می‌دهد، در مقاطعی که مشکلاتی از قبیل افزایش بی‌مورد هزینه‌های اجرایی، کمبود منابع و مواد موردنیاز، عدم اجرای فعالیت‌های کلیدی پروژه در تاریخ تعیین‌شده و غیره بروز کند، مدیر پروژه را در تشخیص راه‌حل مشکل یاری می‌کند. در بسیاری از مواقع راه‌حل این مشکلات، زمان‌بندی و برنامه‌ریزی مجدد پروژه خواهد بود. ایجاد یک بانک اطلاعاتی و سیستم پشتیبان تصمیم در مرحله ارزشیابی پروژه می‌تواند بسیار مفید واقع شود. این سیستم باید شامل موارد زیر باشد:

- سیستم تدارکات و کنترل موجودی برای مواد موردنیاز پروژه
- سیستم بودجه‌بندی و مالی پروژه
- سیستم بایگانی فنی اسناد و مدارک پروژه
- سیستم مقایسه کیفی و تهیه و تأیید صورت‌وضعیت‌ها
- سیستم اطلاعاتی انبار جهت کنترل صحیح و کاهش هزینه‌ها
- سیستم ذخیره و تجزیه‌وتحلیل اطلاعات حاصله در مرحله کنترل پروژه

۷-۱-٤- تسطیح منابع

۷-۱-٤-۱- نیروی انسانی

به‌طورکلی نیروی انسانی موردنیاز در پروژه‌های عمرانی از سه قسمت زیر تشکیل می‌گردد:

۱- نیروی اجرایی

۲- نیروی مدیریت کارگاهی

۳- نیروی پشتیبانی (دفتر مرکزی)

۱- نیروی اجرایی

مدت و تعداد نیروی موردنیاز از روی فعالیت‌های پروژه با توجه به حجم عملیات و بر اساس برآورد فعالیت‌هایی که می‌بایست انجام پذیرد مشخص می‌شود. با مشخص شدن نوع شغل و تعداد کارگران موردنیاز در پروژه، می‌توان بر اساس منحنی برداری شبکه و فعالیت‌های پروژه، مدت و زمان موردنیاز به کارگران مختلف را تعیین کرد.

۲- نیروی مدیریتی کارگاهی

نیروی انسانی ثابت کارگاه شامل رئیس کارگاه، مهندس کارگاه، نقشه‌بردار، تکنسین‌های مختلف، حسابدار، کارکنان اداری و کارگران خدماتی چون راننده و آبدارچی و غیره می‌باشد.

عملیات اجرایی هر پروژه در چهار دوره زمانی مختلف، شامل مدت تجهیز کارگاه، مدت اجرای پیمان، مدت رفع نقص و مدت برچیدن کارگاه می‌باشد. نیاز به نیروی انسانی در دوره‌های فوق با توجه به نوع شغل متفاوت خواهد بود. به‌عنوان‌مثال در زمان برچیدن کارگاه، نیازی به حضور رئیس کارگاه، نقشه‌بردار و تکنسین‌ها نخواهد بود ولی در همین زمان وجود انباردار، کارگر انبار، اتومبیل با راننده و مسئول حمل‌ونقل کارگاه ضروری است.

۳- نیروی پشتیبانی (دفتر مرکزی)

نیروی انسانی دفتر مرکزی شامل مدیرعامل، مدیر امور مالی، مدیر فنی، مدیر پروژه مترور و مهندس فنی و غیره می‌گردد.

۷-۱-٤-۲- ماشین‌آلات عمرانی

امروزه ماشین‌آلات نقش مهمی در چگونگی اجرا، هزینه‌ها و سرعت تکمیل طرح‌های عمرانی ایفا می‌نمایند. حضور ماشین‌آلات پیشرفته و باقابلیت‌های بالا در صنعت، زمینه را برای طراحی و اجرای طرح‌های بزرگ فراهم می‌سازد. چگونگی تملک و بهره‌برداری از ماشین‌آلات سهم عمده‌ای در افزایش یا کاهش هزینه‌های تمام‌شده یک طرح دارد. بهره‌برداری از ماشین‌آلات صنعتی در اجرای طرح‌های عمرانی به روش‌های گوناگون امکان‌پذیر می‌باشد.

- **۷-۱-٤-۲-۱- برنامه‌ریزی استفاده از ماشین‌آلات**

از مهم‌ترین عوامل در افزایش کارایی ماشین‌آلات و کاهش هزینه‌ها، برنامه‌ریزی صحیح استفاده از ماشین‌آلات است. صرف وجود ماشین، هزینه‌های تمام‌شده را کاهش نمی‌دهد بلکه نحوه استفاده از آن در این کاهش مؤثر است. معمولاً ماشین‌آلات عمرانی به‌صورت متوالی و پیوسته با یکدیگر کار می‌کنند و برآورد صحیح از میزان کارایی هر یک به تنظیم برنامه بهینه کمک می‌کند. باید برنامه‌ریزی ماشین‌آلات به نحوی صورت گیرد که ماشین‌آلات بیکار و یا با فشار کار بیش‌ازاندازه وجود نداشته باشند. عدم استفاده از کارایی بهینه یک ماشین و یا برنامه‌ریزی ناصحیح در استفاده مفید از وقت ماشین‌آلات از دو جهت زیان‌آور است، از طرفی مدت کار را طولانی می‌سازد و از طرف دیگر سرمایه‌گذاری سنگین انجام‌شده معطل و بلااستفاده می‌ماند.

- **۷-۱-٤-۲-۲- کارایی ماشین‌آلات**

همراه با ماشین‌آلات عمرانی معمولاً کارخانه سازنده، جداول و منحنی‌های قدرت، حجم و سرعت کار دستگاه در شرایط مختلف طبیعی را ارائه می‌کند. با توجه به این جداول و همچنین شرایط محیطی و وضعیت طبیعی کار، باید برنامه استفاده از ماشین‌آلات تنظیم گردد. باید کاهش کارایی ماشین‌آلات در طول زمان در طرح‌های بزرگ مورد توجه قرار گیرد.

- **۷-۱-٤-۲-۳- برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری**

چگونگی تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات سهم عمده‌ای در افزایش یا کاهش کارایی و عمر مفید ماشین‌آلات دارد. به دلیل قیمت بالای این‌گونه 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 انجام‌شده روی دستگاه برحسب نوع، مقدار و زمان درج گردد. عملکرد و عمر ماشین‌آلات را معمولاً با ساعت کار مفید می‌سنجند.

- **۷-۱-٤-۲-٤- تعیین ماشین‌آلات موردنیاز**

ماشین‌آلات موردنیاز در مراحل اجرایی پروژه از روی فعالیت‌های پروژه، حجم و نوع عملیات و بر اساس تجزیه‌وتحلیل فعالیت‌هایی که می‌بایست انجام پذیرد، مشخص می‌گردد. با مشخص شدن تعداد و نوع ماشین‌آلات مورداستفاده در اجرای پروژه، می‌توان بر اساس منحنی برداری، شبکه خدماتی و فعالیت‌های پروژه، مدت‌زمان 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 مگاپروژه‌ها 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 تصمیم گیری با توجه به ویژگی‌های ساخت تونل موردنیاز است و به همین دلیل مدیریت کیفیت[6] برای تحقق کیفیت ساخت‌وساز به‌طور فزاینده‌ای اهمیت می‌یابد. کنترل کیفیت ساخت تونل با هدف بهبود مداوم عملکرد فعالیت‌های ساخت انجام می‌شود.

کیفیت مواد و سنجش واقعی سیستم نگهداری نصب‌شده و لاینینگ باید از طریق یکی سری آزمایشات و بازرسی‌های پیشنهادشده مدیریت شود.

[6] Quality management

۷-۲-۲- شاتکریت

۷-۲-۲-۱- مواد، مصالح و اختلاط شاتکریت

کنترل کیفیت شاتکریت شامل کیفیت مصالح مصرفی، دانه‌بندی سنگدانه، میزان آب موردنیاز، اطمینان از عدم واکنش‌های مضر بین سیمان و مواد زود گیر، کنترل پیمانه و تهیه مخلوط بتن در مقایسه با مقادیر طرح اختلاط شاتکریت، اخذ نمونه‌های آزمایشی و تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌باشد. کنترل مقاومت فشاری به ازای هر ۲۰ مترمکعب بتن پاشی از طریق اخذ ۶ نمونه انجام می‌گیرد و با مقاومت مشخصات مقایسه می‌شود. در تعیین نسبت‌های مخلوط بتن پاشیده باید توجه داشت که قسمتی از مخلوط در اثر کمانه کردن سنگ‌دانه‌ها به هنگام پاشیدن از دست می‌رود، 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 بتن‌پاشی ضروری است.

شاتکریت باید ازنظر مقاومت فشاری و چسبندگی بین بتن و سطح زیر کار آن از طریق مغزه گیری کنترل شود. نمونه‌برداری آزمایشی باید قبل از شروع عملیات اصلی بتن‌پاشی انجام شود و بتن مصرفی حداقل ۷ روزه باشد. مغزه‌ها 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، نمونه‌گیری باید تجدید و نهایتاً چنانچه در مرحله دوم نیز معایب و نواقص مرحله اول تأیید شود، نسبت به اصلاح و بهینه‌سازی طرح اختلاط اقدام گردد.

۷-۲-۲-۲- طرح اختلاط

طرح اختلاط شاتکریت جهت دستیابی به مقاومت موردنظر 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 کوتاه‌مدت

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 مجددا نباید از این مصالح برای عملیات پاشش استفاده شود.

- برای ارزیابی کیفیت شاتکریت، باید پانل‌های آزمایش طبق استاندارد ملی ۱-۱۸۷۱۷ تهیه شوند. این پانل‌ها جداگانه برای هر طرح اختلاط بتن، هر جهت پاشش و هر اپراتور تهیه شود. به‌عبارت‌دیگر 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.

- آزمونه‌های 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 آزمونه‌ها، به استاندارد ذکرشده، مراجعه شود.

در موارد استفاده از الیاف در شاتکریت باید ضوابط مربوط به بتن الیافی نیز رعایت شود.

۷-۲-۲-٤- 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 نوبت‌کاری 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 ۱-۱۸۷۱۷ 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.

آزمونه‌ها 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 سه‌تایی مغزه که از هر پانل آزمایشی یا محل اجرای بتن به‌دست‌آمده، باید بیشتر یا مساوی ۸۵ درصد مقاومت مشخصه باشد.

ب) مقاومت هیچ مغزه‌ای نباید کمتر از ۷۵ درصد مقاومت مشخصه باشد.

- دوام مغزه شاتکریت در صورت برآورده شدن ضوابط «الف» و «ب» زیر قابل‌پذیرش است، مگر آن‌که در مشخصات فنی پروژه ضابطه دیگری ارائه‌شده باشد:

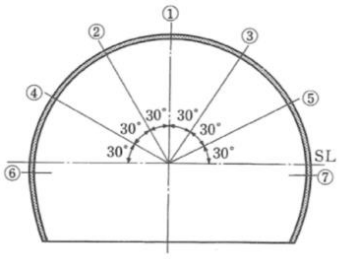
الف: میانگین نتایج مغزه‌ها نباید از ۰/۸ معیار حداقل آزمایش دوام مشخصه کمتر یا از ۱/۲۵ برابر معیار حداکثر آزمایش دوام مشخصه بیشتر شود.

ب: نتیجه هیچ‌یک از مغزه‌ها نباید از ۰/۶۷ معیار حداقل آزمایش دوام مشخصه کمتر یا از ۱/۵ برابر معیار حداکثر آزمایش دوام مشخصه بیشتر شود.

- مهندس مشاور می‌تواند 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 به‌صورت تَر اجرا می‌شود، مهندس مشاور می‌تواند الزاماتی برای نمونه‌گیری 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.

۷-۲-۲-۵- ضخامت و مقاومت شاتکریت

مدیریت ضخامت شاتکریت باید طبق روال تعیین‌شده در محل‌ها و روش‌های نظارت انجام شود. نمونه‌ای از جدول بررسی ضخامت شاتکریت در شکل ۷- ۱ نشان داده‌شده است.



Station			Design thickness					
Measuring point	1	2	3	4	5	6	7	Average
Measured thickness								

شکل ۷- ۱- نمونه‌ای از جدول نظارت ضخامت شاتکریت

مقاومت شاتکریت تحت تأثیر مهارت اپراتور[7] 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[8] نسبت مخلوط شاتکریت استفاده‌شده ممکن است متفاوت از آن در زمان اختلاط باشد که باید موردتوجه قرار گیرد. آزمایشات مقاومت شاتکریت به گروه‌های زیر تقسیم می‌شوند:

[7] nozzleman
[8] rebound

۱) آزمایش تعیین مقاومت اولیه[9]

۲) آزمایش مقاومت اولیه[10] و مقاومت طولانی‌مدت

۳) آزمایش تعیین مقاومت خمشی شاتکریت تقویت‌شده با الیاف فولادی

ازآنجایی‌که هدف آزمایش‌های مقاومت، مقاومت شاتکریت پاشیده شده است بهتر است در صورت امکان آزمایشات در محل انجام شود. چون اکثر آزمایش‌ها بر اساس مقاومت ۲۸ روزه انجام می‌شوند، مقاومت اولیه[11] به‌ویژه برای شاتکریت مهم است.

۷-۲-۳- راکبولت

۷-۲-۳-۱- اجزاء راکبولت

قبل از استفاده از راکبولت، صفحات باربر[12] و سایر موارد، آزمایشات و بازرسی‌های مشخص‌شده 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 [13]، باید ازنظر کیفیت بررسی شوند. در صورت اخذ گواهی بازرسی از کارخانه سازنده، بازرسی لازم نیست.

۷-۲-۳-۲- دوغاب ریزی

باید برای هریک از چال‌ها که دوغاب ریزی می‌شود گزارشی شامل تعیین محل چال، ارتفاع، عمق، درجه انحراف، جهت چال و هرگونه اطلاعات دیگری در مورد کیفیت چینه‌ها و رقوم آب‌هایی 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 چال‌ها باید به نحو قابل قبولی شماره‌گذاری شوند. باید برنامه روزانه کار در مورد چال‌ها، دوغاب ریزی، آزمایش آب و گزارش هر قسمت از عملیات تکمیل‌شده به دستگاه نظارت تسلیم شود.

چال دوغاب‌ریزی اعم از عمودی یا مورب، قطر این چال‌ها و فرم و عمق آن‌ها 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

راک‌بولت‌ها باید در آرایش (موقعیت و جهت) و طول مشخص‌شده در طراحی قرار گیرند. در صورت ایجاد هرگونه تغییر لازم است از طریق مشاهده و اندازه‌گیری اطمینان حاصل شود که راک‌بولت ها اثری معادل اثر طراحی را نشان می‌دهند.

در شرایط سنگ نرم و زمین تحکیم نشده، اگر سطحی ناصاف[۱۴] یا فرویخته باشد نصب راک‌بولت‌ها و پر کردن مواد چسبنده دشوار است؛ بنابراین باید از قبل در دسترس بودن چال‌های راک‌بولت تأیید شود.

به‌طورکلی، مقاومت بیرون کشیدگی[۱۵] در سطحی معادل قدرت تسلیم راک‌بولت (معمولاً مقاومت تسلیم قسمت رزوه‌دار) تنظیم می‌شود. هنگامی‌که کارخانه تولیدی یا مشخصات مواد تغییر کند، مقاومت راک‌بولت باید بررسی شود. در آزمایش بیرون کشیدگی در حین ساخت[۱۶] درصورتی‌که حدود ۸۰ درصد از مقاومت بیرون کشیدگی تعیین‌شده را نشان دهد کافی است. نمونه‌ای از مدیریت اتصال راک‌بولت[۱۷] در جدول ۷- ۱ نشان داده‌شده است.

جدول ۷- ۱- کنترل اتصال راکبولت

موارد	روش کنترل	فرکانس کنترل	ملاحظات
نیروی اتصال[۱۸]	تست بیرون کشیدگی[۱۹]	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)	اگر حدود ۸۰ درصد از قدرت کشش تعیین شده توسط آزمایش اولیه بدست آید کافی است.
پرکردن مواد چسبنده	چشمی	هر باری که کار انجام می شود.	پس از نصب راکبولت باید اطمینان حاصل شود که کاملا با مواد چسبنده پر شده است.

تماس صفحه باربر[۲۰] با سطح شاتکریت یا مقطع حفاری از ملزومات نصب راک‌بولت است. بازرسی معمولاً به‌صورت چشمی یا با ضربه ملایم با چکش انجام می‌شود. نظارت چشمی تغییر شکل یا سایر ناهنجاری‌های صفحات باربری تا قبل از لاینینگ ضروری است.

۷-۲-۳-٤- آزمایش بیرون کشیدگی راک بولت

هدف از این تست اندازه‌گیری کارایی و توان نهایی راک‌بولت است و برای بولت‌های مکانیکی، تزریقی، رزینی یا سایر سیستم‌های مشابه کاربرد دارد. در این آزمایش راک‌بولت به صورت هیدرولیکی کشیده و جابه‌جایی 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

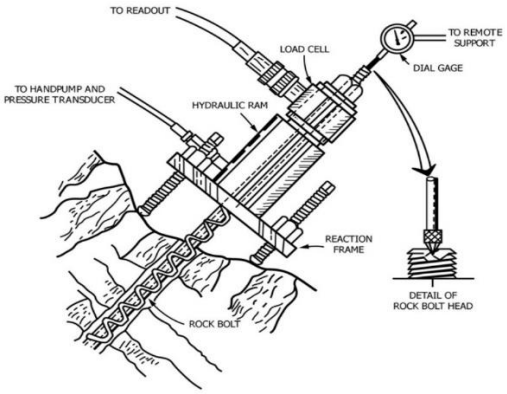
به طور همزمان اندازه‌گیری می‌شود. کشش تا زمانی که سیستم انکر یا سنگ دچار شکست[۲۱] شود ادامه می‌یابد. ظرفیت نهایی و کاری راک‌بولت از نمودار بار در مقابل جابه جایی محاسبه می‌شود (استاندارد (ASTM D4435)).

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 شیستوز، 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 می دهد.

شکل ۷- ۲- تصویر آزمایش کشش راکبولت



شکل ۷- ۳- جزئیات آزمایش کشش راک‌بولت

[21] fail
[22] Anisotropic

۷-۲-٤- قاب فولادی

۷-۲-٤-۱- مواد قاب فولادی

لازم است مواد قاب فولادی مطابق آنچه در طراحی مشخص‌شده است با مراجعه به نتایج بازرسی کارخانه تولیدی تأیید شود. همچنین باید تأیید شود که اشکال، ابعاد و سایر موارد قاب‌های فولادی مانند خمش، برش و جوشکاری مطابق طراحی ارائه‌شده است.

۷-۲-٤-۲- نصب قاب فولادی

برای دستیابی به عملکرد کافی سیستم نگهداری، هر مجموعه‌ای از قاب‌های فولادی باید در یک صفحه و بدون پیچش باشد. علاوه بر این باید تأیید شود که هیچ بی‌نظمی قابل‌توجهی بین قاب‌های فولادی مجاور وجود ندارد و آن‌ها در یک بازه، موقعیت و تعداد صحیح نصب می‌شوند.

۷-۲-۵- لتیس گریدر (تیرهای مشبک)

تیرهای مشبک یا لتیس گریدرها با ظرفیت تحمل یکسان با قاب‌های فولادی، از وزن کمتری نسبت به آن‌ها برخوردارند و حمل و نصب آن‌ها نیز آسان‌تر است. فضاهای باز بین خرپای آن‌ها به شاتکریت اجازه می‌دهد که همه‌جا را بپوشاند و فضایی خالی پشت آن‌ها باقی نگذارند، لذا یک سازه مرکب به وجود می‌آید. آن‌ها همچنین به‌صورت ترکیبی همراه با انواع مهارها، و توری‌های سیمی به‌عنوان سیستم نگهداری ترکیبی به کار می‌روند. شکل ۷- ۴ تیرهای مشبک و نصب آن‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۷- ۴-لتیس گریدر و نصب آن

۷-۲-٦- لاینینگ و کفبند

۷-۲-٦-۱- کنترل کیفیت مصالح بتن

هریک از اجزای تشکیل‌دهنده 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 وقتی‌که به هر دلیل به گرمازایی 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 علامت‌گذاری 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 سیمان‌های موجود در کارگاه و یا از هر محموله سیمان تحویلی به کارگاه نمونه‌برداری شود تا مورد آزمایش قرار گیرد. مصرف سیمان‌هایی که در آزمایش‌های فوق مردود شناخته شود مجاز نبوده و باید از کارگاه خارج شود.

- **سنگدانه ها**

سنگدانه‌های مصرفی در بتن باید به‌طورکلی دارای آن‌چنان کیفیتی باشند که بتوان از آن‌ها بتنی مرغوب، مقاوم و بادوام تهیه کرد. قبل از شروع عملیات بتنی، از منابع مصالح سنگی باید نمونه‌برداری شده و این نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گیرد و چنانچه محل منابع تغییر کند و یا هرگاه دستگاه نظارت ضروری تشخیص دهد باید نمونه‌برداری و آزمایش تجدید گردد. حمل مصالح به کارگاه قبل از آزمایش و تصویب دستگاه نظارت، مجاز نیست. مصالح بعد از تصویب باید از طریق سرند 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 غیرقابل‌قبول و همچنین از یخ‌زدگی و جمع شدن برف و یخ بین دانه‌های آن جلوگیری به عمل آید و از طرفی امکان زهکشی هم فراهم باشد.

- **آب**

آب مصرفی برای شستشوی سنگ‌دانه‌ها، ساخت و عمل‌آوری بتن باید تمیز و صاف باشد. همچنین از مصرف آب حاوی مقادیر زیاد از هر نوع ماده از قبیل روغن‌ها، اسیدها، قلیایی‌ها، املاح، مواد قندی، مواد آلی که قادر به صدمه زدن به بتن یا آرماتور باشد خودداری شود. به‌طورکلی آب آشامیدنی برای مصرف در ساخت و عمل‌آوری بتن رضایت‌بخش تلقی می‌شود.

آب غیر آشامیدنی در شرایطی می‌تواند در ساختمان بتن به کار رود که با ضوابط بندهای زیر و نیز جدول ۷- ۲ مطابقت داشته باشد.

- انتخاب نسبت‌های اختلاط بتن باید بر اساس آبی باشد که در کارگاه مورداستفاده قرار می‌گیرد.

- مقاومت‌های ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های آزمایشی ملات ساخته‌شده با آب غیر آشامیدنی مطابق ASTM C109 باید حداقل ۹۰ درصد مقاومت‌های نظیر نمونه‌های مشابه ساخته‌شده با آب مقطر باشند.

- تعیین زمان‌گیرش سیمان با آب غیر آشامیدنی باید مطابق آزمایش ASTM C191 باشد. نتیجه آزمایش باید یک ساعت زودتر تا ۱/۵ ساعت دیرتر از نتیجه به‌دست‌آمده با آب مقطر باشد.

- آزمایش سلامت سیمان با آب غیر آشامیدنی باید مطابق ASTM C151 اندازه‌گیری شود و نتیجه نباید بیش از میزان مجاز برای آب مقطر باشد.

- آزمایش‌های مربوط به این مقایسه‌ها باید در شرایط یکسان، به‌غیراز 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 زیان‌آور در آب مصرفی بتن و روش‌های آزمایش

نوع ماده زیان‌آور	نوع بتن و شرایط محیطی	روش آزمایش	حداکثر غلظت مجاز (قسمت در میلیون)
ذرات جامد معلق	- بتن‌آرمه در شرایط محیطی شدید و بتن پیش‌تنیده	ASTM D1888	۱۰۰۰ ۲۰۰۰
مواد محلول	- بتن‌آرمه در شرایط محیطی شدید و بتن پیش‌تنیده - بتن‌آرمه 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 بتن‌آرمه، 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	*۵۰۰ ۱۰۰۰* ۱۰۰۰*
یون سولفات SO_4^{--}	- بتن‌آرمه و بتن پیش‌تنیده - بتن بدون آرماتور و بدون اقلام فلزی مدفون	ASTM D514	۱۰۰۰* ۳۰۰۰**
قلیائیها	$Na_2O+0.658\ K_2O$	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 تعیین‌شده 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 به‌دقت انجام پذیرد. اگر بیش از یک نوع ماده افزودنی به کار رود، اندازه‌گیری هریک از آن‌ها باید به‌طور جداگانه صورت گیرد.

- مواد افزودنی باید در شرایط مناسب و با رعایت دستورالعمل‌های اعلام‌شده 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 هرماده افزودنی همان ترکیب و عملکردی را که در تعیین نسبت‌های اختلاط بتن فرض شده‌است در تمام مدت اجرای کار حفظ می‌کند.

۷-۲-۶-۲- کنترل و بازرسی

به‌منظور اطمینان از انطباق ویژگی‌های مصالح مصرفی با استانداردها و ضوابط، حداقل تواتر بازرسی‌ها و آزمایش‌ها 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 سنگدانه‌ها به کارگاه	انطباق محموله مصالح با سفارش خرید و کنترل مشخصات کارخانه تولید کننده	به ازای هر محموله تحویلی به کارگاه
۳		بازرسی وضعیت ظاهری سنگدانه‌ها	بررسی وضعیت ظاهری از لحاظ اندازه و شکل دانه‌ها و ناخالصی‌های آن‌ها	به ازای هر محموله تحویلی به کارگاه
۴		آزمایش دانه‌بندی	مقایسه نتایج آزمایش با ضوابط، استاندارد و الزامات مربوط به دانه‌بندی	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 ماسه‌ای	مقایسه نتایج آزمایش با ضوابط، استانداردها و الزامات مربوطه	مطابق موارد ۱ و ۲ بالا در همین ستون و حداقل هفته‌ای یکبار
۶		آزمایش تعیین مواد زیان آور	ردیابی مقدار مواد زیان‌آور در سنگدانه‌ها 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	اندازه‌گیری 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 آزماش‌های 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 امولسیونی (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 استاندار 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_3^{--} 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.

۷-۲-٦-۳- آزمایش میلگردها

مقاومت و سایر مشخصه‌های میلگردها بر اساس نتایج آزمایش نمونه‌های بریده‌شده از آن‌ها تعیین می‌شوند. در هر نمونه‌برداری باید یک قطعه به طول یک متر بریده شود و نمونه‌های آزمایشی از این قطعه جدا شوند. تعداد و تواتر نمونه‌ها باید طوری باشد که ارزیابی کیفیت کل میلگردهای مصرفی امکان‌پذیر 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، می‌توان یک نمونه انتخاب کرد.

۷-۲-٦-٤- انبار کردن، نگهداری و کنترل فولاد

میلگردهای فولادی باید در محل‌های تمیز و عاری از رطوبت انبار شود تا از زنگ‌زدگی و کثیف شدن سطح آن‌ها جلوگیری شود.

میلگردهایی که تا حد پوسته‌شدن زنگ‌زده باشند، به‌ویژه میلگردهایی که به‌طور موضعی و عمیق دچار خوردگی شده‌اند، بدون انجام آزمایش و حصول اطمینان از انطباق مشخصه‌های آن‌ها با مشخصه‌های موردنظر و در نظر گرفتن کاهش احتمالی سطح مقطع قابل‌مصرف در بتن آرمه نمی‌باشند.

در فاصله زمانی ورود میلگردها به کارگاه تا جاگذاری آن‌ها در سازه، ضوابط زیر باید در جابه‌جایی 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 جوش‌ها در شبکه‌های جوش شده جلوگیری شود.

ج: نشانه‌های مشخص‌کننده نوع آرماتور نباید از بین برود.

۷-۲-٦-۵- پوشش بتنی روی میلگردها

- پوشش بتنی روی میلگردها با حداقل فاصله بین رویه میلگردها، اعم از طولی یا عرضی، تا نزدیک‌ترین سطح آزاد بتن تعریف می‌شود.

- مراعات ضخامت پوشش بتنی مطابق بند زیر در مورد انتهای میلگردهای مستقیم در کف‌ها و سقف‌هایی 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 محدودیت‌های فاصله و حداقل ضخامت پوشش بتن محافظ، که قطر میلگردها مبنای محاسبه قرار می‌گیرند، قطر گروه میلگردهای در تماس معادل قطر میلگردی فرض می‌شود که سطح

مقطع آن با سطح مقطع کل گروه مساوی باشد. ملاک اندازه‌گیری فاصله آزاد و حداقل ضخامت پوشش در این‌گونه 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 ذکرشده 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 یخ زا 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- ارزیابی و پذیرش بتن

- **۷-۲-۶-۶-۱- پذیرش بتن، تواتر نمونه‌برداری و آزمایش مقاومت**

پذیرش بتن در کارگاه بر اساس نتایج آزمایش فشاری نمونه‌های برداشته‌شده از بتن مصرفی صورت می‌پذیرد. دفعات نمونه‌برداری از بتن باید به نحوی یکنواخت در طول مدت تهیه و مصرف بتن توزیع شوند. نمونه‌ها باید از محل نهایی مصرف برداشته شود.

- **۷-۲-۶-۶-۲- ضوابط پذیرش بتن- نمونه‌های عمل‌آمده در آزمایشگاه**

الف: مشخصات بتن در صورتی منطبق بر رده موردنظر و قابل‌قبول تلقی می‌شود که یکی از شرایط زیر برقرار باشد:

۱- در آزمایش سه نمونه‌برداری متوالی، مقاومت هیچ‌کدام کمتر از مقاومت مشخصه یا f_c نباشد:

$$X_{۱.۲.۳} \geq f_c$$

۲- متوسط مقاومت‌های نمونه‌ها یا $\bar{X}$ حداقل ۱/۵ مگاپاسکال بیشتر از مقاومت مشخصه باشد و کوچک‌ترین مقاومت نمونه‌ها یا X_{min} از مقاومت مشخصه منهای ۴ مگاپاسکال کمتر نباشد:

$$\bar{X} \geq f_c + ۱.۵$$
$$X_{min} \geq f_c - ۴$$

ب: مشخصات بتن در صورتی غیرقابل‌قبول است که متوسط مقاومت‌های نمونه‌ها از مقاومت مشخصه کمتر باشد یا کوچک‌ترین مقاومت نمونه‌ها از مقاومت مشخصه منهای ۴ مگاپاسکال کمتر باشد:

$$\bar{X} < f_c \quad \text{یا} \quad X_{min} < f_c - ۴$$

ج: مشخصات بتنی را که با توجه به شرایط بند ب فوق غیرقابل‌قبول نباشد ولی مطابق شرایط بتن الف-۲ قابل‌قبول هم به شمار نیاید می‌توان به تشخیص طراح بدون بررسی بیشتر، قابل‌قبول ازنظر سازه‌ای تلقی کرد درصورتی‌که مشخصات بتن مطابق بند ب به‌هرحال غیرقابل‌قبول 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 می‌تواند برای کنترل کیفیت عمل آوردن و مراقبت بتن در سازه انجام آزمایش‌های مقاومت روی نمونه‌های عمل‌آمده و مراقبت شده در شرایط کارگاه را درخواست کند.

ب) عمل آوردن نمونه‌ها در کارگاه باید مطابق روش ASTM C31 باشد.

ج) نمونه‌های عمل‌آمده در کارگاه باید در همان زمان و از همان بتنی نمونه‌برداری شوند که نمونه‌های آزمایشی عمل‌آمده در آزمایشگاه تهیه می‌شوند.

د) در صورتی روش عمل آوردن و مراقبت بتن رضایت‌بخش تلقی می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌های کارگاهی در سن مشخص‌شده برای مقاومت مشخصه حداقل معادل ۰/۸۵ مقاومت نظیر نمونه‌های عمل‌آمده در آزمایشگاه یا

به‌اندازه ۴ مگاپاسکال بیشتر از مقاومت مشخصه باشد. در غیر این صورت باید اقداماتی برای بهبود روش‌های مذکور صورت گیرد.

- **۷-۲-٦-٦-٤- آزمون‌های آگاهی**

درصورتی‌که 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 آزمونه‌های آگاهی موسوم‌اند.

۷-۲-٦-۷- بررسی بتن‌های با مقاومت کم

درصورتی‌که بر اساس آزمایش‌های مقاومت نمونه‌های عمل‌آمده در آزمایشگاه، مطابق بند ۷-۲-۶-۶ معلوم شود که بتن بر رده موردنظر منطبق نیست و غیرقابل‌قبول است، باید تدابیری به شرح زیر برای حصول اطمینان از ظرفیت باربری سازه اتخاذ شود:

۱- درصورتی‌که با استفاده از آنالیز موجود سازه و بازبینی طراحی، بتوان ثابت کرد که ظرفیت باربری سازه به ازای مقاومت بتن کمتر از مقدار پیش‌بینی‌شده هم قابل‌قبول است نوع بتن ازنظر تأمین مقاومت سازه قابل‌قبول تلقی می‌شود.

۲- درصورتی‌که 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 قابل‌قبول خواهد بود، نوع بتن ازنظر تأمین مقاومت سازه قابل‌قبول تلقی می‌شود.

۳- درصورتی‌که شرایط بندهای ۱ و ۲ برآورده نشوند لازم است روی مغزه‌های گرفته‌شده 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 ازنظر تأمین مقاومت قابل‌قبول تلقی می‌شود که متوسط مقاومت‌های فشاری سه مغزه حداقل برابر ۰/۸۵ مقاومت مشخصه باشد و به‌علاوه مقاومت هیچ‌یک از مغزه‌ها از ۰/۷۵ مقاومت مشخصه کمتر نباشد.

برای کنترل دقت نتایج می‌توان مغزه گیری را تکرار کرد.

۵- درصورتی‌که 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.

۷-۲-٦-۸- کنترل و بازرسی

به‌منظور 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 مشخصه‌های بتن

ردیف	شرح آزمایش	نوع بازرسی-آزمایش	هدف	زمان تکرار
۱	تعیین نسبت‌ها برای اختلاط	آزمایش در ابتدای کار	تامین دلیل آن ویژگی‌های مورد نظر در حاشیه ایمنی مناسب حاصل می‌شود	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 نمی‌رود	در ابتدای کار و در مواردی که میزان کلرید مواد تغییر می‌کند
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 آزمایش‌های مورد نیاز کم یا زیاد شوند
۴	میزان رطوبت در سنگدانه‌های 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 آزمونه 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 پیمانه و مخلوط کردن و کنترل وزن مخصوص بتن سبک یا سنگین	به تعداد دفعات آزمایش مقاومت فشاری
۸	آزمایش مقاومت فشاری آزمونه‌های قالب گیری شده	آزمایش مطابق استاندارد	ارزیابی مشخصه های مقاومت مخلوط	مطابق بند ۷-۲-۶-۶
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 پیمانه 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 پیمانه و مخلوط کردن
۱۲	مقدار افزونه بتن تازه	ثبت مقدار افزونه مصرف شده	کنترل مقدار افزونه	هر بار پیمانه و مخلوط کردن
۱۳	نسبت آب به سیمان بتن تازه	با تقسیم نمودن جمع ردیف های ۳، ۴ 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 پیمانه 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 نمونه‌های 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 اندازه‌گیری	بازرسی عینی از نحوه کارکرد	اطمینان از اینکه تجهیزات مربوط به اندازه گیری وزن به طور صحیح عمل می نماید	روزانه
۳		بازرسی دقت انداره 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 می‌نماید	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 سنگدانه‌های ریز	مقایسه مقدار واقعی با مقدار قرائت شده روی درجه دستگاه اندازه گیری	حصول اطمینان از دقت موردنظر	به شرح موارد ۱ و ۲ بالا در همین ستون

ردیف	شرح تجهیزات	نوع بازرسی- آزمایش	هدف	زمان تکرار
۸	سیستم پیمانه و مخلوط کردن	بازدید عینی	حصول اطمینان از دقت پیمانه کردن	به شرح موارد ۱ و ۲ بالا در همین ستون
۹		مقایسه جرم واقعی مواد تشکیل دهنده مخلوط با جرم مورد نظر بر اساس یک روش متناسب	حصول اطمینان از اینکه سیستم پیمانه 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 کامیون‌های مخلوط کن و حمل بتن)	بازدید عینی	کنترل فرسودگی و تجهیزات مخلوط کن	ماهانه

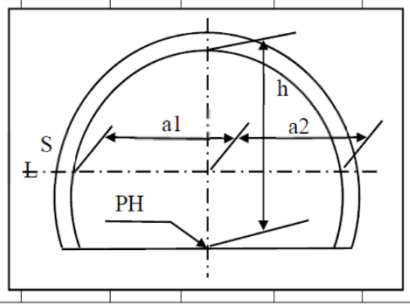
۷-۲-۶-۱۰- ضخامت و ابعاد

قبل از بتن‌ریزی، قالب‌ها برای به دست آمدن اشکال، ابعاد و ضخامت مشخص‌شده لاینینگ و کفبند طراحی‌شده بررسی شود.

در بازرسی لاینینگ باید بررسی شود که سطح مقطع داخلی، ارتفاع، عرض و ضخامت بر اساس طراحی باشد.

شکل ۷- ۵ نمونه‌ای از فرم اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

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- نمونه‌ای از فرم اندازه‌گیری مقطع داخلی تونل

۷-۲-۷- عایق‌بندی

باید تأیید شود که کیفیت مواد مورداستفاده برای عایق‌بندی الزامات طراحی را برآورده می‌کند و در صورت نیاز بازرسی انجام شود. علاوه بر این، مواد باید به‌گونه‌ای مناسب نگهداری شوند که به کیفیت آن‌ها آسیب نرسد. به هنگام نصب عایق‌بندی اطمینان از آماده شدن بستر و نصب درست ضروری می‌باشد.

۷-۲-۷-۱- ژئوممبرین

به‌منظور جلوگیری از بروز نشت در ژئوممبرین‌ها، 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 موردنیاز متناسب با شرایط و آسیب‌های محیطی، شرایط اجرایی، شرایط دوره بهره‌برداری و ملاحظات اقتصادی انجام گیرد.

۷-۲-۷-۲- ملاحظات کلی در ژئوسنتتیک‌ها

- **۷-۲-۷-۲-۱- گواهینامه تایید محصول**

- پیمانکار موظف است گواهینامه‌ای شامل اطلاعاتی از نام تولیدکننده، نام و کد محصول، ترکیبات شیمیایی محصول و سایر اطلاعات مربوطه که ژئوسنتتیک را معرفی کند، در اختیار مهندس ناظر قرار دهد.
- تولیدکننده 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 ارائه‌شده توسط تولیدکننده یا فروشنده، باید تضمین‌کننده این مطلب باشد که محصول استفاده‌شده، کوچک‌ترین مقادیر میانگین (MARVs[23]) مدنظر را تحت کنترل کیفیت ارائه‌شده، تامین خواهد کرد. این گواهینامه باید مهر و امضای رسمی تولیدکننده یا فروشنده را داشته باشد.
- در صورت عدم ارائه مستندات ذکرشده در فوق، محصول تایید نمی‌شود.

- **۷-۲-۷-۲-۲- نمونه‌برداری، آزمایش و تایید**

نمونه‌برداری باید طبق دستورالعمل ISIRI7774 یا ASTM D4354 انجام شود. تایید محصول طبق دستورالعمل ASTM D4759 انجام می‌شود.

[23] Minimum (or Maximum) Average Roll Values (MARVs)

- **۷-۲-۷-۲-۳- حمل و انبار**

- برچسب محصولات، حمل و انبار آن‌ها مطابقASTM D4873 باید انجام شود. برچسب محصول باید به‌طور 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 می‌شود، اشاره شود.
- هر طاقه باید به‌وسیله پوشش مخصوص در مقابل آسیب‌های ناشی از نور خورشید، رطوبت (بسته به نوع محصول و در صورت نیاز) و آلاینده‌های 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 آسیب‌های کارگاهی، رطوبت و بارش (بسته به نوع محصول)، اشعه فرابنفش، تابش مستقیم نور خورشید، مواد شیمیایی بازی و اسیدی، جرقه‌های جوشکاری، حرارت بیش از ۶۰ درجه سانتی‌گراد و سایر شرایط محیطی که می‌تواند به مشخصات فیزیکی ژئوسنتتیک آسیب وارد کند، محافظت شود.

- **۷-۲-۷-۲-٤- درزها**

انواع پیوستگی و درزگیری در محل مجاورت دو قطعه ژئوسنتتیک اعمال می‌شود. روش‌های درزگیری عبارت‌اند از هم‌پوشانی، 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. ازآنجاکه ممکن است محل درزها به نقطه‌ضعف سیستم تبدیل شود، باید تعداد آن‌ها تا حد امکان محدود گردد. ضمن آنکه استفاده از درز در جهت اصلی کشش (عمود بر طول طاقه) درشیب‌ها و دیوارهای خاکی مسلح، مجاز نمی‌باشد.

معمول‌ترین روش برای درزها در ژئوتکستایل‌ها و ژئوگریدها، همپوشانی حداقل ۰/۳ متری می‌باشد که بسته به شرایط پروژه، ممکن است همپوشانی‌های بیشتری لازم شود. در صورتیکه مقدار همپوشانی زیاد (بیش از ۱ متر) یا انتقال تنش مدنظر باشد، دوختن دو قطعه مجاور، روش مناسب‌تری است.

۷-۲-۸- زهکشی

کیفیت مواد مورداستفاده 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 به‌دست‌آمده است.

۷-۲-۸-۱- مصالح زهکشی عمیق

کیفیت مصالح مصرفی در زهکشی عمیق و زیرزمینی، نقش اساسی در بهره‌دهی درازمدت تاسیسات زهکشی ایفا می‌کند و به‌طورکلی باید دارای ویژگی‌های زیر باشند:

الف) ازنظر شیمیایی و فیزیکی در شرایط محیطی پروژه مقاوم و بادوام باشند.

ب) مقاومت کافی سازه‌ای در برابر بارهای وارده و تغییر شکل‌های 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 محاسبه‌شده در طرح را جمع‌آوری و تخلیه کند.

مصالح اصلی که در سیستم زهکشی مورداستفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

- مصالح دانه‌ای [۲۴]
- ژئوتکستایل
- لوله‌های زهکشی زیرزمینی و جمع کننده‌ها [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)، ازجمله بستر روسازی، زیراساس و اساس به داخل مصالح زهکشی

ج: تخلیه و خارج کردن آب به‌عنوان یکی از عملکردهای اصلی فرآیند زهکشی

برای اینکه الزامات فوق قابل‌اجرا باشد مصالح دانه‌ای باید تابع معیارهای معینی ازنظر دانه‌بندی، تراوایی، مقاومت در برابر دوره‌های متناوب یخبندان-ذوب و واکنش‌های شیمیایی مضر بوده و از سنگدانه‌های سخت، بادوام و مستحکم تشکیل‌شده باشند در صورت مصرف ماسه از نوع ماسه بتنی به‌عنوان مصالح زهکشی نباید از ماسه حاصل از سنگ شکسته کربناتی که به‌تدریج 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 تهیه‌شده 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 به‌منظور حفاظت و جلوگیری از آسیب‌دیدگی‌های وارده به آن‌ها در جریان جابه‌جایی و نقل و انتقالات رعایت شود.

قطر سوراخ‌های ژئوتکستایل باید به‌اندازه‌ای باشد تا از حرکت ذرات ریز و معلق خاک پایه و درنتیجه فرسایش آن جلوگیری نموده و درعین‌حال مساحت سطوح باز یا سوراخ‌های آن‌ها برای عبور مقدار آب پیش‌بینی‌شده در طرح به‌قدر کافی باشد تا به‌عنوان سد یا حائلی عمل نکند که خاصیت تراوایی ژئوتکستایل از تراوایی زمین کمتر باشد.

---

[24] Aggregate
[25] Underdrain-Pipe and Collectors

ژئوتکستایل باید ازنظر 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.

۷-۲-۸-٤- 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 ازجمله در برابر املاح موجود در خاک و آب، خورندگی 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 منطق 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 هرکدام 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 اخیرا 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 ذکرشده 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 تونل ها براساس طبقه بندی عملکردی راه ها 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 تیپF1

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری (m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				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)	الگو(m)	
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					طول(m)	وزن(Kg)	طول(m)	وزن(Kg)	قطر(mm)	فاصله داری	طول(m)	نوع(mm)	فاصله داری(m)	طول قاب(m)		طولی	عرضی
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	۳
	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	۳
	F1	۵۰-۴۰	۱۰۹	۵	۵	۱.۳	۱.۳	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۷	۱۴۰	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	F1	۶۰-۵۰	۱۰۸	۵	۰	۱.۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵	۲.۵
	F1	۸۰-۶۰	۱۰۸	۵	۰	۱.۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضع	موضع
	F1	۸۰-۱۰۰	۱۰۷	۳	۰	۰.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۲- مشخصات سیستم نگهداری برای آزادراه تیپF2

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری (m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت (m^3)		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه(cm)	همپوشانی(cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴ گره)			قاب فولادی			الگو(m)		طول(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- ۴ خطه	F2	۲۰-۰	۱۲۸	۵	۲۲	۱.۴	۶.۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۹	۱۵۲	۲۸	۱۴۸	۲۵	۱>	۲۸	IPE ۱۸۰	۱>	۲۸	۱	۲	۴
	F2	۳۰-۲۰	۱۲۸	۵	۲۰	۱.۴۳	۵.۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۹	۱۵۱	۲۸	۱۴۷	۲۲	۱>	۲۸	IPE ۱۶۰	۱>	۲۸	۱	۳	۴
	F2	۴۰-۳۰	۱۲۸	۵	۲۰	۱.۴۳	۵.۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۹	۱۵۱	۲۸	۱۴۷	۲۲	۱	۲۸	IPE ۱۶۰	۱<	۲۸	۱.۵	۳	۴
	F2	۵۰-۴۰	۱۲۳	۵	۵	۱.۴	۱.۴	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۸	۱۴۸	-	-	-	-	-	-	-	-	۲	۲	۴
	F2	۶۰-۵۰	۱۲۲	۵	۰	۱.۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲.۵	۲.۵	۳
	F2	۸۰-۶۰	۱۲۲	۵	۰	۱.۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	موضعی	موضعی	۳
	F2	۸۰-۱۰۰	۱۲۲	۳	۰	۰.۸۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	موضعی	موضعی	۳

جدول ۸- ۳--مشخصات سیستم نگهداری برای آزادراه تیپF۳

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری (m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				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)	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	F3	۲۰-۰	۱۸۹	۵	۲۲	۱.۸	۷.۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۵	۱۸۳	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	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	۱۷۹	۲۲	۱	۳۴	IPE ۱۶۰	۱۸	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

جدول ۸- ۴-مشخصات سیستم نگهداری برای آزادراه تیپ F4

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				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)	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	۳
	F4	۴۰-۳۰	۲۰۸	۵	۲۰	۱.۸	۷	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۶	۱۹۲	۳۶	۱۸۸	۲۲	۱	۳۶	IPE ۱۶۰	۱<	۳۶	۴	۱.۵	۳
	F4	۵۰-۴۰	۲۰۳	۵	۵	۱.۸	۱.۸	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۶	۱۸۹	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	F4	۶۰-۵۰	۲۰۱	۵	۰	۱.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵	۲.۵
	F4	۸۰-۶۰	۲۰۱	۵	۰	۱.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی
	F4	۸۰-۱۰۰	۲۰۰	۳	۰	۱.۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۵- مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی چندخطه تیپ A1

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری (m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت		
				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)	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
شریانی چندخطه- ۴ خطه	A1	۲۰-۰	۱۰۰	۵	۲۲	۱.۳	۵.۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۵	۲۵	۱۳۱	۲۵	۱۷	۲۵	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۵	۴	۱	۲
	A1	۳۰-۲۰	۹۹	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۴	۲۵	۱۳۰	۲۲	۱۷	۲۵	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۵	۴	۱	۳
	A1	۴۰-۳۰	۹۹	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۴	۲۵	۱۳۰	۲۲	۱	۲۵	IPE ۱۶۰	۱<	۲۵	۴	۱.۵	۳
	A1	۵۰-۴۰	۹۶	۵	۵	۱.۳	۱.۳	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۲	-	-	-	-	-	-	-	-	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- ۶- مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی چندخطه تیپA2

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				ضخامت(cm)		حجم شاتکریت(m^3)		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه(cm)	همپوشانی(cm)	لایه ۱		لایه ۲		قاب فولادی			لتیس (۴گره)			طول(m)	الگو(m)	
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					طول(m)	وزن(Kg)	طول(m)	وزن(Kg)	طول قاب(m)	فاصله داری(m)	نوع(mm)	طول(m)	فاصله داری(m)	قطر(mm)		طولی	عرضی
شریانی چندخطه- ۶ خطه	A2	۲۰-۰	۱۵۴	۵	۲۲	۱.۶	۶.۸	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۱	۱۶۵	۳۱	۱۶۱	۳۱	۱۷	IPE ۱۸۰	۳۱	۱۷	۲۵	۴	۱	۲
	A2	۳۰-۲۰	۱۵۳	۵	۲۰	۱.۶	۶	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۱	۱۶۵	۳۱	۱۶۱	۳۱	۱۷	IPE ۱۶۰	۳۱	۱۷	۲۲	۴	۱	۳
	A2	۴۰-۳۰	۱۵۳	۵	۲۰	۱.۶	۶	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۱	۱۶۵	۳۱	۱۶۱	۳۱	۱۷	IPE ۱۶۰	۳۱	۱	۲۲	۴	۱.۵	۳
	A2	۵۰-۴۰	۱۴۸	۵	۵	۱.۶	۱.۶	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۳۱	۱۶۳	–	–	–	–	–	–	–	–	۴	۲	۲
	A2	۶۰-۵۰	۱۴۷	۵	۰	۱.۶	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	۲.۵	۲.۵
	A2	۸۰-۶۰	۱۴۷	۵	۰	۱.۶	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۲	موضعی	موضعی
	A2	۸۰-۱۰۰	۱۴۶	۳	۰	۱	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۲	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۷- مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی دو خطه تیپ A3

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				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)	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
شریانی دو خطه – دو طرفه	A3	۲۰-۰	۹۵	۵	۲۲	۱.۳	۵.۲۴	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۱	۲۴	۱۲۷	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	۲۲	۱۷	۲۴	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۴	۴	۱	۳
	A3	۴۰-۳۰	۹۴	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۱	۲۴	۱۲۷	۲۲	۱	۲۴	IPE ۱۶۰	۱<	۲۴	۴	۱.۵	۳
	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵	۲.۵
	A3	۸۰-۶۰	۸۹	۵	۰	۱.۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی
	A3	۸۰-۱۰۰	۸۹	۳	۰	۰.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۸- مشخصات سیستم نگهداری برای راه شریانی دو خطه تیپ A4

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				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)	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
شریانی دو خطه- دو طرفه	A4	۲۰-۰	۱۰۷	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	۳۰-۲۰	۱۰۶	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۶	۱۳۸	۲۶	۱۳۵	۲۲	۱۷	۲۶	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۶	۴	۱	۳
	A4	۴۰-۳۰	۱۰۶	۵	۲۰	۱.۳	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۶	۱۳۸	۲۶	۱۳۵	۲۲	۱	۲۶	IPE ۱۶۰	۱<	۲۶	۴	۱.۵	۳
	A4	۵۰-۴۰	۱۰۲	۵	۵	۱.۳	۱.۳	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۶	۱۳۶	-	-	-	-	-	-	-	-	۴	۲	۲
	A4	۶۰-۵۰	۱۰۱	۵	۰	۱.۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵	۲.۵
	A4	۸۰-۶۰	۱۰۱	۵	۰	۱.۳	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی
	A4	۸۰-۱۰۰	۱۰۰	۳	۰	۰.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۹- مشخصات سیستم نگهداری برای راه جمع کننده/توزیع کننده تیپ C1

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش										لتیس یا قاب فولادی							راکبولت	
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت (m^3)		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه(cm)	همپوشانی(cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴گره)			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
جمع کننده/ توزیع کننده- دو طرفه	C1	۲۰-۰	۶۶	۵	۲۲	۱	۴.۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۱	۲۰	۱۰۷	۲۵	۱۷	۲۰	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۰			۴	۱	۲
	C1	۳۰-۲۰	۶۵	۵	۲۰	۱	۴.۱	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۰	۲۰	۱۰۶	۲۲	۱۷	۲۰	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۰			۴	۱	۳
	C1	۴۰-۳۰	۶۵	۵	۲۰	۱	۴.۱	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۰	۲۰	۱۰۶	۲۲	۱	۲۰	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۰			۴	۱.۵	۳
	C1	۵۰-۴۰	۶۲	۵	۵	۱	۱	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۰	۱۰۸	-	-	-	-	-	-	-	-			۴	۲	۲
	C1	۶۰-۵۰	۶۱	۵	۰	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			۳	۲.۵	۲.۵
	C1	۸۰-۶۰	۶۱	۵	۰	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			۲	موضعی	موضعی
	C1	۸۰-۱۰۰	۶۱	۳	۰	۰.۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			۲	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۱۰-مشخصات سیستم نگهداری برای راه جمع کننده/توزیع کننده تیپC2

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت		
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت (m^3)		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه(cm)	همپوشانی(cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴گره)			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
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	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۱	۴	۱	۲
	C2	۳۰-۲۰	۷۰	۵	۲۰	۱.۱	۴.۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۴	۲۱	۱۱۰	۲۲	۱۷	۲۱	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۱	۴	۱	۳
	C2	۴۰-۳۰	۷۰	۵	۲۰	۱.۱	۴.۲	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۴	۲۱	۱۱۰	۲۲	۱	۲۱	IPE ۱۶۰	۱<	۲۱	۴	۱.۵	۳
	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	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	۲.۵	۲.۵
	C2	۸۰-۶۰	۶۶	۵	۰	۱	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	موضعی	موضعی
	C2	۸۰-۱۰۰	۶۵	۳	۰	۰.۶	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۱۱- جمع کننده/توزیع کننده تیپ C3

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت		
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت (m^3)		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه(cm)	همپوشانی(cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴گره)			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
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	۳۰-۲۰	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی
	C3	۸۰-۱۰۰	۸۸	۳	۰	۰.۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۱۲- مشخصات سیستم نگهداری برای راه جمع کننده/توزیع کننده تیپ C4

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت (m^3)		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه(cm)	همپوشانی(cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴گره)			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
جمع کننده/ توزیع کننده- دو طرفه	C4	۲۰-۰	۱۱۴	۵	۲۲	۱.۴	۶	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۷	۱۴۳	۲۶	۱۳۹	۲۵	۱>	۲۶	IPE ۱۸۰	۱>	۲۶	۴	۱	۲
	C4	۳۰-۲۰	۱۱۳	۵	۲۰	۱.۴	۵.۳	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۷	۱۴۳	۲۶	۱۳۹	۲۲	۱>	۲۶	IPE ۱۶۰	۱>	۲۶	۴	۱	۳
	C4	۴۰-۳۰	۱۱۳	۵	۲۰	۱.۴	۵.۳	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۷	۱۴۳	۲۶	۱۳۹	۲۲	۱	۲۶	IPE ۱۶۰	۱<	۲۶	۴	۱.۵	۳
	C4	۵۰-۴۰	۱۰۹	۵	۵	۱.۳	۱.۳	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۷	۱۴۰	–	–	–	–	–	–	–	–	۴	۲	۲
	C4	۶۰-۵۰	۱۰۸	۵	۰	۱.۳	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	۲.۵	۲.۵
	C4	۸۰-۶۰	۱۰۸	۵	۰	۱.۳	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	موضعی	موضعی
	C4	۸۰-۱۰۰	۱۰۷	۳	۰	۰.۸	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۱۳-مشخصات سیستم نگهداری برای راه محلی/روستایی تیپL1

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				ضخامت(cm)		حجم شاتکریت (m^3)		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه(cm)	همپوشانی(cm)	لایه ۱		لایه ۲		قاب فولادی			لتیس (۴گره)			طول(m)	الگو(m)	
				لایه اول	لایه های بعدی	لایه اول	لایه های بعدی					طول(m)	وزن(Kg)	طول(m)	وزن(Kg)	نوع(mm)	فاصله داری(m)	طول قاب(m)	قطر(mm)	فاصله داری(m)	طول(m)		طولی	عرضی
محلی/ روستایی- دو طرفه	L1	۲۰-۰	۶۶	۵	۲۲	۱	۴.۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۱	۲۰	۱۰۶	IPE ۱۸۰	۱۷	۲۰	۲۵	۱۷	۲۰	۴	۱	۲
	L1	۳۰-۲۰	۶۵	۵	۲۰	۱	۴.۱	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۰	۲۰	۱۰۶	IPE ۱۶۰	۱۷	۲۰	۲۲	۱۷	۲۰	۴	۱	۳
	L1	۴۰-۳۰	۶۵	۵	۲۰	۱	۴	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۰	۲۰	۱۰۶	IPE ۱۶۰	۱<	۲۰	۲۲	۱	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	۲.۵	۲.۵
	L1	۸۰-۶۰	۶۱	۵	۰	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی
	L1	۸۰-۱۰۰	۶۱	۳	۰	۰.۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۱۴- مشخصات سیستم نگهداری برای راه محلی/روستایی تیپ L2

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت (m^3)		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه(cm)	همپوشانی(cm)	لایه ۱		لایه ۲		قاب فولادی			لتیس (۴گره)			الگو(m)	طول(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 قاب(m)	نوع(mm)	فاصله داری(m)	طول(m)	طولی	عرضی
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	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	۱	۳
	L2	۴۰-۳۰	۷۲	۵	۲۰	۱.۱	۴.۳	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۵	۲۱	۱۱۲	۲۲	۱	۲۱	IPE ۱۶۰	۱۸	۲۱	۱.۵	۳
	L2	۵۰-۴۰	۶۹	۵	۵	۱.۱	۱.۱	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۱	۱۱۳	–	–	–	–	–	–	–	–	۲	۲
	L2	۶۰-۵۰	۶۸	۵	۰	۱.۱	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۲.۵	۲.۵
	L2	۸۰-۶۰	۶۸	۵	۰	۱.۱	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	موضعی	موضعی
	L2	۸۰-۱۰۰	۶۷	۳	۰	۰.۷	–	–	–	–	–	–	–	–	–	-	–	–	–	–	–	موضعی	موضعی

جدول ۸- ۱۵- مشخصات سیستم نگهداری برای راه محلی / روستایی تیپ L3

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				ضخامت (cm)		حجم شاتکریت (m^3)		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه(cm)	همپوشانی(cm)	لایه ۱		لایه ۲		قاب فولادی			لتیس (۴گره)			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)	نوع(mm)	طول(m)	طول قاب(m)	فاصله داری(m)	نوع(mm)	طولی	عرضی
محلی/ روستایی – دو طرفه	L3	۲۰-۰	۷۸	۵	۲۲	۱.۱	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۳	۱۲۰	۲۲	۱۱۶	۲۵	۱۷	IPE ۱۸۰	۲۲	۲۲	۱۷	IPE ۱۸۰	۱	۲	۴
	L3	۳۰-۲۰	۷۷	۵	۲۰	۱.۱	۴.۴	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۳	۱۱۹	۲۲	۱۱۶	۲۲	۱۷	IPE ۱۶۰	۲۲	۲۲	۱۷	IPE ۱۸۰	۱	۳	۴
	L3	۴۰-۳۰	۷۷	۵	۲۰	۱.۱	۴.۴	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۳	۱۱۹	۲۲	۱۱۶	۲۲	۱	IPE ۱۶۰	۲۲	۲۲	۱۷	IPE ۱۸۰	۱.۵	۳	۴
	L3	۵۰-۴۰	۷۴	۵	۵	۱.۱	۱.۱	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۲	۱۱۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲	۴
	L3	۶۰-۵۰	۷۳	۵	۰	۱.۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲.۵	۳
	L3	۸۰-۶۰	۷۳	۵	۰	۱.۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	موضعی	۳
	L3	۸۰-۱۰۰	۷۲	۳	۰	۰.۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	موضعی	۳

جدول ۸- ۱۶- مشخصات سیستم نگهداری اولیه برای راه محلی/روستایی تیپ L4

نوع راه	تیپ مقطع	RMR	حجم حفاری(m^3)	شاتکریت				وایرمش								لتیس یا قاب فولادی						راکبولت	
				ضخامت(cm)		حجم شاتکریت (m^3)		تعداد لایه	قطر(mm)	چشمه(cm)	همپوشانی(cm)	لایه ۱		لایه ۲		لتیس (۴گره)			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
محلی/ روستایی – دو طرفه	L4	۲۰-۰	۱۰۰	۵	۲۲	۱.۳	۵.۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۵	۲۵	۱۳۰	۲۵	۱>	۲۵	IPE ۱۸۰	۱>	۲۵	۴	۱	۲
	L4	۳۰-۲۰	۹۹	۵	۲۰	۱.۲۷	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۴	۲۵	۱۳۰	۲۲	۱>	۲۵	IPE ۱۶۰	۱>	۲۵	۴	۱	۳
	L4	۴۰-۳۰	۹۹	۵	۲۰	۱.۲۷	۵	۲	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۴	۲۵	۱۳۰	۲۲	۱	۲۵	IPE ۱۶۰	۱<	۲۵	۴	۱.۵	۳
	L4	۵۰-۴۰	۹۶	۵	۵	۱.۳	۱.۲	۱	۶	۱۰*۱۰	۱۵	۲۵	۱۳۲	–	–	–	–	–	–	–	–	۴	۲	۲
	L4	۶۰-۵۰	۹۴	۵	۰	۱.۳	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	۲.۵	۲.۵
	L4	۸۰-۶۰	۹۴	۵	۰	۱.۳	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	موضعی	موضعی
	L4	۸۰-۱۰۰	۹۴	۳	۰	۰.۸	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	۳	موضعی	موضعی

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)». درمجموعه 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». درمجموعه مقالات کنفرانس ملی تحقیقات بنیادین در عمران، معماری و شهرسازی، تهران، خرداد ماه ۱۳۹۷.

٤. 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)». درمجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی معدن و علوم زمین، تهران، ۳۱ خرداد ماه ۱۳۹۷.

٥. 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)». درمجموعه مقالات سیزدهمین کنفرانس تونل ایران، هتل المپیک تهران، ۲۸ و ۲۹ آبان ماه ۱۳۹۸.

٦. 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)». درمجموعه 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). «فهرست‌بهای 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)». درمجموعه 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.

۱٤.استوار، رحمت‌الله؛ آتشکاری در معادن (جلد اول :شناخت مواد منفجره)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ویرایش دوم.
۱٥.اصغر لادریان؛ کنترل عملیات آتشکاری در مناطق خردشده فضاهای زیرزمینی سد گتوند علیا، ۱۳۸۹.
۱٦.سید حسن خوشرو، محمد اورکی: طراحی الگوی انفجار کنترل‌شده در دیواره نهایی تونل راه آن قزوین رشت، ۱۳۸۸.

۹-۲- منابع انگلیسی

17. N Vlachopoulos, MS Diederichs - Geotechnical and Geological engineering ۲۰۱٤.
18. Sakurai, S., ۱۹۹۷, Lessons learned from field measurements in tunneling, Tunneling and Underground Space Technology, ۱۲((٤, .٤٦۰-٤٥۳
19. Hiroshi, T.,December ۲۰۱۸, Standard specifications for tunneling-۲۰۱٦: 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." Tunnelling and Underground Space Technology ۱٥۲(۲۰۲٤): ۱۰٥۹٦۷.
21. Engineers C. STANDARD SPECIFICATIONS FOR TUNNELING-۲۰۱٦ : 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 آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به‌صورت 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 فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشرشده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی **nezamfanni.ir** قابل دستیابی می‌باشد.

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 Hasanaklou	Expert Engineering, Technical and Executive Affairs Department
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 می پردازد.