

باسمه تعالی

چکیده راهنمای طراحی و اجرای پوشش داخلی تونل های راه و راه آهن

نشریه ۶۸۴

تهیه کننده و گردآوری کننده :

مختار جلیلیان

دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز



زمستان ۱۴۰۳

سخنی با جامعه مهندسين و همکاران عزيز:

این جمع‌بندی، حاصل ماه‌ها مطالعه، پژوهش و چکیده‌برداری دقیق از فهرست مطالب نشریه ۶۸۴ «راهنمای طراحی و اجرای پوشش داخلی تونل‌های راه و راه‌آهن» است. اکنون با کمال افتخار و فروتنی، این دستاورد را تقدیم جامعه مهندسی کشور می‌کنم؛ به ویژه همه مهندسان پرتلاش حوزه راه و راه‌آهن، چه در بخش مهندسين مشاور و چه در حوزه پیمانکار فعالیت دارند.

بدیهی است این مجموعه خالی از اشکال و اشتباه نیست. از همه مهندسين محترم تقاضا دارم در صورت مشاهده هرگونه ایراد یا نقص، جهت اصلاح آن بر بنده منت بگذارند و موارد را از طریق ایمیل ذکر شده اطلاع دهند.

امیدوارم انتشار این مجموعه، گامی هرچند کوچک در مسیر ارتقای دانش فنی، تسهیل اجرای پروژه‌ها و اشتراک تجربه‌هایی باشد که خود حاصل سال‌ها کار و هم‌فکری است. آنچه داریم زمانی ارزشمندتر می‌شود که بی‌منت و صادقانه در اختیار دیگران قرار گیرد.

به امید فردایی روشن‌تر و پیشرفت روزافزون مهندسی ایران.

با احترام- مختار جلیلیان زمستان ۱۴۰۳

Mokhtar_jalilian@yahoo.com

- فصل اول – کلیاتی در مورد تونل های راه و راه آهن
- فصل دوم – انتخاب مسیر و مشخصات هندسی تونل ها
- فصل سوم – بررسی شرایط زمین شناسی
- فصل چهارم – بررسی های زمین شناسی مهندسی و اکتشافات ژئوتکنیکی
- فصل پنجم – انواع سیستم های نگهداری تونل ها
- فصل ششم – تحلیل پایداری تونل ها با استفاده از روش های تجربی
- فصل هفتم – تحلیل پایداری تونل ها با استفاده از روش های تحلیلی
- فصل هشتم – تحلیل پایداری تونل ها با استفاده از روش های عددی
- فصل نهم – بررسی اثرات زلزله بر روی پوشش داخلی تونل ها
- فصل دهم – تحلیل سازه ای پوشش داخلی تونل ها
- فصل یازدهم – مصالح مصرفی در ساخت بتن مسلح
- فصل دوازدهم – ساخت، حمل و نصب پوشش داخلی بتن پیش ساخته (سگمنت)
- فصل سیزدهم – اجرای پوشش داخلی بتن برجا (لاینینگ)
- فصل چهاردهم – بررسی هزینه ساخت پوشش داخلی تونل های راه و راه آهن
- فصل پانزدهم – مطالعه موردی

فصل اول – کلیاتی در مورد تونل‌های راه و راه آهن

۱-۱. مقدمه

تونل‌ها از جمله سازه‌های زیرزمینی مهم محسوب می‌شوند که نقش کلیدی در توسعه شبکه حمل و نقل جاده‌ای و ریلی دارند. با توجه به محدودیت‌های محیطی، توپوگرافی دشوار، ملاحظات محیط زیستی و نیاز به کاهش زمان سفر، احداث تونل‌ها در پروژه‌های بزرگراهی و خطوط راه آهن مورد توجه ویژه قرار گرفته است. طراحی و اجرای تونل‌ها نیازمند دانش تخصصی در زمینه‌های ژئوتکنیک، سازه، مدیریت ریسک و فناوری‌های نوین حفاری می‌باشد.

۱-۲. تعریف تونل

تونل‌ها فضاها یا زیرزمینی افقی یا نزدیک به افقی هستند که برای عبور وسائل نقلیه، خطوط ریلی، تأسیسات انتقال آب، کابل‌های برق و سایر کاربری‌ها احداث می‌شوند. تونل‌های راه و راه آهن عمدتاً با هدف عبور از موانع طبیعی (کوه، تپه، رودخانه) یا مناطق شهری پرتراکم احداث می‌شوند.

۱-۳. تاریخچه ساخت تونل در جهان و ایران

• جهان:

سابقه ساخت تونل به تمدن‌های باستانی (مصر، یونان، رم) بازمی‌گردد. پیشرفت چشمگیر تکنولوژی حفاری از قرن ۱۹ میلادی آغاز شد و با اختراع دستگاه‌های مکانیزه مانند TBM، سرعت و دقت ساخت تونل به طرز چشمگیری افزایش یافت.

• ایران:

ایران نیز با ساخت قنات‌ها و تونل‌های انتقال آب (کاریز) یکی از پیشگامان فن آوری حفر زیرزمینی محسوب می‌شود. نخستین تونل‌های راه و راه آهن جدید (مانند تونل ورسک و کندوان در شمال و تونل کوه‌رنگ در جنوب) از دهه ۱۳۱۰ خورشیدی ساخته شده‌اند.

۱-۴. دسته‌بندی انواع تونل‌ها

بر اساس کاربری:

۱. **تونل‌های راه:** تونل‌های احداث شده برای عبور خودروها، بزرگراه‌ها، آزادراه‌ها و جاده‌های بین شهری.

۲. **تونل‌های راه آهن:** ویژه عبور قطارهای سنگین، سریع‌السير و خطوط مترو.

بر اساس روش حفاری:

- تونل‌های حفاری شده به روش سنتی (حفاری و انفجار)
- تونل‌های حفاری شده به روش مکانیزه (TBM, Shield, ...)

بر اساس شرایط زمین‌شناسی:

- تونل در سنگ
- تونل در خاک

بر اساس شکل هندسی:

- تونل مقطع دایره‌ای، اسبی (Horse-shoe)، قوسی، مستطیلی

۱-۵. مزایای احداث تونل‌های راه و راه آهن

- کاهش طول مسیر کلی و صرفه‌جویی در سوخت و زمان سفر
- عبور امن و آسان از موانع بزرگ طبیعی و مناطق پر تراکم شهری
- کاهش مشکلات زیست‌محیطی نسبت به احداث جاده در مناطق حساس
- کاهش حوادث ناشی از برف، ریزش کوه و دیگر ریسک‌های محیطی
- ایجاد بستر توسعه پایدار و افزایش بهره‌وری شبکه حمل‌ونقل

۶-۱. معایب و چالش‌ها

- **هزینه اولیه بالا:** نیاز به تجهیزات سنگین، منابع مالی و تخصصی زیاد.
- **ریسک‌های ژئوتکنیکی:** وقوع پدیده‌هایی مانند نشست، ریزش، ورود آب‌های زیرزمینی و زمین‌لرزه.
- **زمان ساخت طولانی:** به دلیل مطالعات گسترده، حفاری و تجهیز کارگاه.
- **نگهداری و بهره‌برداری خاص:** سیستم‌های تهویه، روشنایی، ایمنی حریق و تجهیزات ویژه نگهداری مورد نیاز است.

۷-۱. جایگاه تونل‌های راه و راه‌آهن در توسعه زیرساخت

تونل‌ها امروزه جزء اصلی‌ترین و استراتژیک‌ترین عناصر پروژه‌های حمل‌ونقل محسوب می‌شوند و نقش اساسی در کاهش فاصله میان مناطق و تسهیل ارتباطات اقتصادی، اجتماعی و صنعتی ایفا می‌کنند. گسترش خطوط ریلی و آزادراهی بدون تونل‌های زیرزمینی مقدور نخواهد بود و اصولاً سرمایه‌گذاری در این زمینه شاخص توسعه یافتگی کشورها تلقی می‌شود.

۸-۱. جمع‌بندی

جمع‌بندی

تونل‌های راه و راه‌آهن به عنوان یکی از شاخص‌ترین دستاوردهای مهندسی عمران، نقش کلیدی در عبور از موانع طبیعی و اتصال مناطق مختلف ایفا می‌کنند و زمینه‌ساز توسعه پایدار زیرساخت‌های حمل‌ونقل کشور هستند. امروزه احداث تونل نه تنها یک مزیت رقابتی در شبکه حمل‌ونقل محسوب می‌شود، بلکه با ارتقای ایمنی، افزایش ظرفیت، کاهش مسافت و زمان سفر، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و هزینه‌ها، و کاهش اثرات زیست‌محیطی، به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر برای پیشرفت اقتصادی و اجتماعی بدل گردیده است.

درک اصول اولیه طراحی، فناوری‌های ساخت، انواع سیستم‌های نگهداری و چالش‌های ژئوتکنیکی، نه تنها بنیانی برای مدیریت پروژه‌های بزرگ عمرانی فراهم می‌آورد، بلکه پیش‌نیاز تصمیم‌گیری‌های فنی، مالی و

سیاست گذاری های کلان در حوزه حمل و نقل نیز به شمار می رود. از این رو آشنایی جامعه مهندسی با مبانی و تجربیات اجرایی تونل سازی، نقش مهمی در ارتقای سطح تخصصی کشور و تضمین موفقیت پروژه های زیربنایی ایفا می کند.

فصل دوم – انتخاب مسیر و مشخصات هندسی تونل‌ها

۱-۲. مقدمه

انتخاب مسیر بهینه و تعیین مشخصات هندسی صحیح برای تونل‌ها، از مهم‌ترین مراحل در فرآیند طراحی مهندسی و اجرای پروژه‌های تونلسازی به شمار می‌رود. عواملی مانند شرایط ژئوتکنیکی، اهداف بهره‌برداری، معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی و محدودیت‌های فنی در تعیین موقعیت و نحوه جانمایی تونل و همچنین تدوین پارامترهای هندسی آن نقش به‌سزایی دارند.

۲-۲. مراحل انتخاب مسیر تونل

۱-۲-۲. مطالعات شناسایی و جمع‌آوری اطلاعات

- جمع‌آوری اطلاعات توپوگرافی، زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و کاربری اراضی منطقه
- بهره‌گیری از نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای و پیمایش‌های میدانی

۲-۲-۲. تدوین گزینه‌های اولیه مسیر

- تعیین مسیرهای مختلف بر اساس نقاط تلاقی لازم و موانع موجود (کوه، رودخانه، مناطق شهری)
- تحلیل فنی و اقتصادی گزینه‌ها

۳-۲-۲. ارزیابی گزینه‌ها و انتخاب مسیر بهینه

- معیارهای ارزیابی: طول تونل، میزان حفاری، دسترسی، عبور از نقاط حساس (آبگیر، گسل)
- بررسی اثرات زیست‌محیطی و اجتماعی
- انتخاب مسیر بر مبنای کمترین هزینه، بیشترین ایمنی و کمترین ریسک اجرایی

۳-۲. عوامل مؤثر در انتخاب مسیر تونل

- ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی (نوع سنگ/خاک، آب‌های زیرزمینی، گسل‌ها)

- **موانع طبیعی و مصنوعی** (رودخانه، خطوط لوله، ساختمان‌ها یا اماکن حساس)
- **توپوگرافی منطقه** (ارتفاعات، شیب، وضعیت دسترسی)
- **مسائل ترافیکی و حمل و نقل** (ارتباط با شبکه راه یا راه آهن موجود)
- **ملاحظات فنی و اقتصادی** (امکان سنجی حفاری، هزینه اجرا و بهره‌برداری)
- **ملاحظات زیست محیطی و اجتماعی** (حفظ پوشش گیاهی، کاهش اختلال بر ساکنان)

۲-۴. مشخصات هندسی تونل‌ها

۱-۴-۲. عرض و ارتفاع آزاد تونل

- تعیین بر اساس نوع ترافیک (ریلی، جاده‌ای)
- تونل‌های راه: عرض و ارتفاع بر مبنای تعداد خط عبوری، فضای اضطراری، تهویه و تجهیزات
- تونل‌های راه آهن: عرض و ارتفاع با توجه به قطارهای عبوری و استاندارد خطوط

۲-۴-۲. شعاع قوس تونل

- حداقل شعاع قوس افقی برای ایمنی و راحتی عبور
- محدودیت‌های قوس قائم (شیب مجاز، کنترل زهکشی و تخلیه آب)

۳-۴-۲. مشخصات ورودی و خروجی تونل

- طراحی مدخل (Portal) با تأکید بر کنترل ریزش، زیبایی و ایمنی
- شیب عرضی مورد نیاز برای زهکشی مناسب

۴-۴-۲. پروفیل طولی تونل

- شیب مجاز برای عبور وسایل نقلیه/قطارها
- پیش‌بینی نقاط تقاطع با ساختارها یا کانال‌های فنی (مثل کابل کشی یا لوله گذاری)

۵-۴-۲. مقطع عرضی تونل

- انتخاب شکل هندسی (دایره‌ای، اسبی، مستطیلی) بر اساس شرایط زمین و کاربری
- الزامات فضا برای عبور تجهیزات امداد و تعمیرات

۶-۴-۲. تهویه، روشنایی و دسترسی اضطراری

- اختصاص فضای مناسب برای نصب سیستم‌های تهویه مکانیکی و کابل کشی
- المان‌های ایمنی: پناهگاه، خروجی اضطراری، تابلوهای هشداردهنده و روشنایی

۵-۲. الزامات و استانداردهای طراحی هندسی

- رعایت ضوابط آیین‌نامه‌ها و نشریات معتبر ملی و بین‌المللی (نشریه ۳۲۷ و ۲۱۲، استاندارد AASHTO / UIC)
- توجه به الزامات بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری، همچنین آینده‌نگری برای توسعه ظرفیت یا تغییر کاربری

۶-۲. جمع‌بندی و توصیه‌ها

انتخاب بهینه مسیر و تعیین مشخصات هندسی تونل‌های راه و راه‌آهن، فرآیندی چندمرحله‌ای و بین‌رشته‌ای است که موفقیت نهایی پروژه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. این فرآیند باید مبتنی بر گردآوری و تحلیل جامع اطلاعات ژئوتکنیکی، هیدروژئولوژیکی، محیط‌زیستی، و اجتماعی - اقتصادی باشد. با لحاظ کردن تمامی محدودیت‌ها و فرصت‌های موجود، می‌توان بهترین گذرگاه و مشخصات هندسی را متناسب با عملکرد مدنظر تعیین کرد.

توجه ویژه به اصول طراحی هندسی همچون شعاع قوس‌ها، شیب طولی، عرض آزاد، پروفیل عرضی و مقطع تونل، ضمن افزایش قابلیت سرویس‌دهی و ایمنی، موجب بهینه‌سازی هزینه‌های ساخت، نگهداری و بهره‌برداری خواهد شد. ارزیابی دقیق گزینه‌های مختلف با استفاده از تحلیل‌های چندمعیاره (شاخص‌های

هزینه، ریسک فنی، زمان اجرا، تأثیرات زیست‌محیطی، و آینده‌نگری توسعه‌ای)، احتمال بروز مشکلات ساختاری و عملکردی را در طول عمر بهره‌برداری تونل به حداقل می‌رساند.

فصل سوم - بررسی شرایط زمین‌شناسی

۱-۳. مقدمه

شناسایی و بررسی شرایط زمین‌شناسی، یکی از کلیدی‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین مراحل در طراحی و اجرای تونل‌ها محسوب می‌شود. وضعیت لایه‌های زمین، نوع سنگ و خاک، ساختارهای زمین‌شناسی و پدیده‌هایی همچون گسل‌ها و آب‌های زیرزمینی تاثیر مستقیمی بر پایداری، روش اجرا و هزینه‌های پروژه دارند.

۲-۳. اهمیت مطالعات زمین‌شناسی در تونلسازی

- کاهش ریسک‌های اجرایی و زیان‌های مالی
- انتخاب صحیح روش حفاری و نگهداری
- ارزیابی پایداری و سلامت سازه
- پیش‌بینی و مدیریت مشکلات احتمالی مانند نفوذ آب، ریزش یا نشست تونل

۳-۳. مراحل و روش‌های مطالعات زمین‌شناسی

۱-۳-۳. مطالعات جمع‌آوری داده‌های ثانویه

- بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی (توپوگرافی، لیتولوژی، ساختمانی)
- تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی
- استفاده از سوابق مطالعات پیشین و تجربیات مشابه در منطقه

۲-۳-۳. مطالعات صحرایی (میدانی)

- بازدید میدانی و برداشت زمین‌شناسی سطحی
- ترسیم پروفیل‌های زمین‌شناسی
- ثبت شواهد ساختاری همچون درزه‌ها، گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها

- نمونه برداری و شناسایی واحدهای سنگی و خاکی

۳-۳-۳. مطالعات زیرزمینی

- حفاری گمانه‌های اکتشافی (Boreholes)
- آزمایش‌های برجا (لوژان، اسلیت لاین، پرمایلیته، فشار آب)
- ثبت لاگ گمانه و تهیه مقاطع طولی و عرضی از مسیر تونل
- کارگذاری ابزارآلات پایش (ابزار دقیق)

۳-۳-۴. مطالعات آزمایشگاهی

- آزمایش‌های تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ و خاک (تراکم، چگالی، مقاومت فشاری و برشی، نفوذپذیری و ...)

۳-۴. ساختار و ویژگی‌های زمین‌شناسی موثر در طراحی تونل

۳-۴-۱. نوع و سن سنگ‌ها / خاک‌ها

- تاثیر بر انتخاب ماشین‌آلات حفاری (TBM, NATM, روش انفجار)
- تعیین سختی، الفتحت، زون‌های سست، سنگ‌های دگرسان و تغییر یافته

۳-۴-۲. درزه‌ها و گسل‌ها

- اهمیت شناسایی محل و نوع گسل (فعال/غیرفعال)
- تحلیل تاثیر محل تلاقی تونل با گسل بر پایداری
- نقش درزه‌داری و ساختار شکسته در ریسک ریزش و ناپایداری

۳-۴-۳. آب‌های زیرزمینی

- تعیین سطح آب زیرزمینی و فشار هیدرواستاتیک

- ارزیابی نفوذپذیری لایه‌ها، احتمال بروز جریان شدید آب
- تاثیر حضور آب بر روش حفاری و طراحی سیستم زهکشی و آب‌بندی

۴-۳. پدیده‌های خاص زمین‌شناسی

- وجود کارست (حفرات آهکی)، حفره، مواد رسی تورم‌پذیر، لایه‌های لغزشی
- مواد معدنی خاص و تاثیر آن بر خوردگی و تهدید سازه

۵-۳. تهیه مدل زمین‌شناسی تونل

- تلفیق داده‌های میدانی، زیرزمینی و آزمایشگاهی
- تهیه مقاطع طولی و عرضی زمین‌شناسی مسیر تونل
- مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزارهای تخصصی جهت شبیه‌سازی رفتار زمین و آنالیز ریسک

۶-۳. نقش شرایط زمین‌شناسی در انتخاب روش اجرا و نگهداری

- تعیین نوع پوشش (lining) و سیستم نگهداری اولیه و ثانویه بر اساس پتانسیل ریسک
- تطبیق روش حفاری (مکانیزه یا سنتی) با جنس و کانه‌بندی لایه‌ها
- پیش‌بینی بروز رخدادهای خاص (آب‌دهی ناگهانی، ریزش بزرگ، نشست) و تدوین تمهیدات مقابله

۷-۳. جمع‌بندی

مطالعات زمین‌شناسی، شالوده و زیربنای هر پروژه تونلسازی موفق محسوب می‌شود؛ چرا که شناخت جامع و دقیق از جنس، ساختمان، لایه‌بندی، ساختارهای تکتونیکی، و ویژگی‌های ژئوتکنیکی زمین، نه تنها تعیین‌کننده راهبردهای طراحی و اجراست، بلکه ضامن مدیریت هدفمند ریسک‌ها و تأمین ایمنی در حین ساخت و بهره‌برداری از تونل به شمار می‌رود. تحلیل صحیح پارامترهای زمین‌شناسی، از جمله شناسایی گسل‌ها، مناطق سست، توده‌های دگرسان و زون‌های دارای آب زیرزمینی، طراحان را قادر می‌سازد روشی مناسب برای

حفاری، پایدارسازی و نگهداری انتخاب نمایند و با پیش‌بینی مشکلات ناشی از ناپایداری زمین، فرونشست، رخدادهای ناگهانی یا آبدهی غیرمنتظره، از ایجاد خسارات سنگین مالی و حتی تلفات انسانی پیشگیری کنند.

هرگونه ضعف، سطحی‌نگری یا اهمال در مطالعات زمین‌شناسی اولیه، نه تنها بهره‌برداری بهینه از تونل را با چالش مواجه می‌کند، بلکه منجر به افزایش چشمگیر هزینه‌های مازاد اجرایی، توقف‌های مکرر، و بروز حوادث غیرقابل جبران می‌گردد. بر این اساس، توصیه می‌شود مطالعات زمین‌شناسی، با رویکردی جامع‌نگر، استفاده از روش‌های نوین آزمایشگاهی و صحرایی، تلفیق داده‌های تجربی با مدلسازی‌های پیشرفته و به‌کارگیری تیم‌های چندتخصصی، به‌عنوان نخستین و حیاتی‌ترین گام در طراحی و اجرای پروژه‌های تونلسازی مورد توجه ویژه قرار گیرد.

فصل سوم - بررسی شرایط زمین‌شناسی

۱-۳. مقدمه

شناسایی و بررسی شرایط زمین‌شناسی، یکی از کلیدی‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین مراحل در طراحی و اجرای تونل‌ها محسوب می‌شود. وضعیت لایه‌های زمین، نوع سنگ و خاک، ساختارهای زمین‌شناسی و پدیده‌هایی همچون گسل‌ها و آب‌های زیرزمینی تاثیر مستقیمی بر پایداری، روش اجرا و هزینه‌های پروژه دارند.

۲-۳. اهمیت مطالعات زمین‌شناسی در تونلسازی

- کاهش ریسک‌های اجرایی و زیان‌های مالی
- انتخاب صحیح روش حفاری و نگهداری
- ارزیابی پایداری و سلامت سازه
- پیش‌بینی و مدیریت مشکلات احتمالی مانند نفوذ آب، ریزش یا نشست تونل

۳-۳. مراحل و روش‌های مطالعات زمین‌شناسی

۱-۳-۳. مطالعات جمع‌آوری داده‌های ثانویه

- بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی (توپوگرافی، لیتولوژی، ساختمانی)
- تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی
- استفاده از سوابق مطالعات پیشین و تجربیات مشابه در منطقه

۲-۳-۳. مطالعات صحرایی (میدانی)

- بازدید میدانی و برداشت زمین‌شناسی سطحی
- ترسیم پروفیل‌های زمین‌شناسی
- ثبت شواهد ساختاری همچون درزه‌ها، گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها

- نمونه برداری و شناسایی واحدهای سنگی و خاکی

۳-۳-۳. مطالعات زیرزمینی

- حفاری گمانه‌های اکتشافی (Boreholes)
- آزمایش‌های برجا (لوژان، اسلیت لاین، پرماییلیته، فشار آب)
- ثبت لاگ گمانه و تهیه مقاطع طولی و عرضی از مسیر تونل
- کارگذاری ابزارآلات پایش (ابزار دقیق)

۳-۳-۴. مطالعات آزمایشگاهی

- آزمایش‌های تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ و خاک (تراکم، چگالی، مقاومت فشاری و برشی، نفوذپذیری و ...)

۳-۴. ساختار و ویژگی‌های زمین‌شناسی موثر در طراحی تونل

۳-۴-۱. نوع و سن سنگ‌ها / خاک‌ها

- تاثیر بر انتخاب ماشین‌آلات حفاری (TBM, NATM, روش انفجار)
- تعیین سختی، الفتحت، زون‌های سست، سنگ‌های دگرسان و تغییر یافته

۳-۴-۲. درزه‌ها و گسل‌ها

- اهمیت شناسایی محل و نوع گسل (فعال/غیرفعال)
- تحلیل تاثیر محل تلاقی تونل با گسل بر پایداری
- نقش درزه‌داری و ساختار شکسته در ریسک ریزش و ناپایداری

۳-۴-۳. آب‌های زیرزمینی

- تعیین سطح آب زیرزمینی و فشار هیدرواستاتیک

- ارزیابی نفوذپذیری لایه‌ها، احتمال بروز جریان شدید آب
- تاثیر حضور آب بر روش حفاری و طراحی سیستم زهکشی و آب‌بندی

۴-۳. پدیده‌های خاص زمین‌شناسی

- وجود کارست (حفرات آهکی)، حفره، مواد رسی تورم‌پذیر، لایه‌های لغزشی
- مواد معدنی خاص و تاثیر آن بر خوردگی و تهدید سازه

۵-۳. تهیه مدل زمین‌شناسی تونل

- تلفیق داده‌های میدانی، زیرزمینی و آزمایشگاهی
- تهیه مقاطع طولی و عرضی زمین‌شناسی مسیر تونل
- مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزارهای تخصصی جهت شبیه‌سازی رفتار زمین و آنالیز ریسک

۶-۳. نقش شرایط زمین‌شناسی در انتخاب روش اجرا و نگهداری

- تعیین نوع پوشش (lining) و سیستم نگهداری اولیه و ثانویه بر اساس پتانسیل ریسک
- تطبیق روش حفاری (مکانیزه یا سنتی) با جنس و کانه‌بندی لایه‌ها
- پیش‌بینی بروز رخدادهای خاص (آب‌دهی ناگهانی، ریزش بزرگ، نشست) و تدوین تمهیدات مقابله

۷-۳. جمع‌بندی

مطالعات زمین‌شناسی، شالوده بنیادین و اولین گام حیاتی موفقیت در هر پروژه تونلسازی به شمار می‌آید؛ چرا که شناخت جامع از جنس، ساختار، نحوه گسترش لایه‌ها، مشخصات ژئوتکنیکی، تکتونیک و هیدروژئولوژیکی محیط زیرسطحی، نه تنها مبنای تصمیم‌گیری مهندسان در تمامی مراحل طراحی و اجرا است، بلکه عامل اصلی در مدیریت مخاطرات و تامین ایمنی پروژه محسوب می‌شود.

در این مسیر، بررسی دقیق ترکیب کانی‌شناسی، مقاومت فشاری و کششی، میزان سختی و ضعف‌های توده‌سنگ، پراکندگی و جهت‌یابی درزه‌ها و شکستگی‌ها، شناسایی زون‌های سست و دگرسان‌شده، میزان و

نحوه توزیع آب زیرزمینی، و شناسایی ساختارهای پیچیده مانند گسل ها و چین خوردگی ها، از ارکان اصلی مطالعات زمین شناسی-ژئوتکنیکی هستند.

این داده ها، علاوه بر انتخاب مسیر بهینه و روش حفاری مناسب (مکانیزه یا سنتی)، تعیین نوع و ابعاد سیستم نگهداری، و ارزیابی پایداری جبهه کار، امکان پیش بینی رفتار زمین هنگام حفاری، ریسک بروز پدیده هایی نظیر ریزش، نشست، جریان های غیرمنتظره آب، پدیده های گازدهی، فشارهای اضافی، و حتی اثرات لرزه ای را فراهم می سازد. همچنین تمامی این اطلاعات در تدوین برنامه های پایش و تدابیر پیشگیرانه در حین اجرا و بهره برداری، نقشی بی بدیل دارند.

لازم به تاکید است که هر گونه ضعف، ناقصی، یا ساده انگاری در مطالعات زمین شناسی (اعم از برداشت های میدانی، مغزه گیری، تست های دینامیکی و استاتیکی، آزمایش های ژئوفیزیکی و هیدروژئوشیمیایی) می تواند منجر به انتخاب غلط فناوری، بروز خسارات جبران ناپذیر مالی و حتی سوانح انسانی گردد. تجارب متعدد پروژه های تونلسازی در ایران و جهان، بر ضرورت مطالعات دقیق و چند رشته ای زمین شناسی به عنوان پیش نیاز هر گونه تحلیل ژئوتکنیکی و طراحی اجرایی تاکید دارند.

فصل پنجم – انواع سیستم‌های نگهداری تونل‌ها

۱-۵. مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در تونلسازی، حفظ پایداری تونل مخصوصاً حین و پس از حفاری است. «سیستم نگهداری تونل» مجموعه‌ای از المان‌های موقتی یا دائمی است که برای محافظت از فضای حفاری شده تا تثبیت و بهره‌برداری پایدار به کار گرفته می‌شوند. انتخاب سیستم مناسب نگهداری بر اساس شرایط زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی، ابعاد تونل و اهداف بهره‌برداری صورت می‌گیرد.

۲-۵. تقسیم‌بندی کلی سیستم‌های نگهداری تونل

۱. نگهداری اولیه (Temporary/Primary Support)

- برای پایداری موقت تا انجام نگهداری نهایی یا دائمی

۲. نگهداری دائمی (Permanent/Final Support)

- برای تضمین پایداری بلندمدت و بهره‌برداری ایمن

۳-۵. انواع رایج سیستم‌های نگهداری تونل

۱-۳-۵. قاب فولادی (Steel Ribs and Arches)

- **تعریف و اجزا:** قوس یا قاب‌های فولادی با مقاطع I یا H که در فواصل مشخص نصب و معمولاً با شاتکریت و میلگرد مکمل می‌شوند.

- **مزایا:**

- مناسب برای زمین‌های با مقاومت پایین یا ریزشی

- تحمل بارهای سنگین و شرایط دینامیکی

- **معایب:**

- هزینه بالا، خوردگی در محیط مرطوب

○ دشواری نصب در مقاطع باریک

• **موارد کاربرد:** غالباً در تونل‌های معدنی و مسیرهای پرتردد با ریسک ریزش بالا

۲-۳-۵. نگهداری چوبی (Timber Supports)

• **اجزا:** چوب‌های عرضی و طولی (sets & lagging)

• **مزایا:** دسترسی آسان، اجرای سریع

• **معایب:** دوام بسیار پایین، مستعد پوسیدگی و آتش‌سوزی

• **موارد مصرف:** پروژه‌های اضطراری یا موقت، زمین‌های کاملاً سست یا به‌عنوان نگهداری تکمیلی

۳-۳-۵. میل‌مهار (Rock Bolt/Anchor)

• **تعریف:** میلگرد یا کابل فولادی که درون حفره دیواره تونل تزریق و مهار می‌شود

• **انواع متداول:**

○ Expansion shell bolts

○ Resin/grouted bolts

○ Cable anchors

• **مزایا:**

○ توزیع یکنواخت تنش

○ کم‌جاگیری و وزن پایین

• **معایب:**

○ نیاز به آزمایش بارگذاری

○ کاهش اثرپذیری در محیط‌های مرطوب یا سنگ پوک

- **کاربرد:** عموم تونل‌های معدنی، ریلی و راه با شرایط سنگی مناسب

۴-۳-۵. شاتکریت (Shotcrete/Gunite)

- **تعریف:** بتن پاششی (معمولاً با الیاف فولادی یا پلاستیکی)، که با دستگاه بر سطح دیواره و سقف تونل اجرا می‌شود

• انواع:

- شاتکریت خشک
- شاتکریت تر

• مزایا:

- تثبیت سریع خاک یا سنگ
- قابلیت اجرای حالت منحنی و سطوح نامنظم
- قابلیت ترکیب با شبکه فولادی (mesh) و میل مهار

• معایب:

- حساسیت بالا به مهارت نیروی کار
- هزینه نسبتاً بیشتر نسبت به نگهداری سنتی

- **کاربرد:** اغلب در روش NATM، حفاری شهری و مسیرهای سنگی/خاکی

۵-۳-۵. پوشش بتنی (Concrete Lining)

- **تعریف:** اجرای لایه‌ای از بتن (درجا یا پیش‌ساخته) بر محیط داخلی تونل برای نگهداری نهایی، آب‌بندی و تامین سطح مناسب عبور

• انواع:

- بتن درجا (Cast-in-place)

- سگمنت پیش ساخته (Precast Segments)

- مزایا:

- ایجاد سازه‌ای مقاوم و ضد آب

- عمر بسیار بالا

- معایب:

- هزینه و زمان اجرای بالا

- نیاز به اسکافولディング و قالب‌بندی پیچیده

- کاربرد: عموماً در تونل‌های شهری بزرگراهی و ریلی، تونل مترو و انتقال آب

۵-۳-۶. پوشش ترکیبی و پیشرفته

- نمونه‌ها:

- لاینینگ کامپوزیتی (موارد خاص مواد FRP یا پلیمر)

- شیت پلاستیکی ضد آب به همراه بتن یا شاتکریت

- کاربرد:

- تونل‌های با آبدهی بالا

- شرایط خورنده یا نیاز به وزن سبک

۵-۳-۷. گراوتینگ (Grouting)

- تعریف: تزریق دوغاب سیمان، رزین یا مواد شیمیایی در سنگ یا خاک اطراف تونل جهت بهبود

پایداری و کاهش نفوذپذیری

• کاربرد:

- جلوگیری از ورود آب
- تثبیت توده‌های سست یا نفوذپذیر
- افزایش قابلیت حفاری

۸-۳-۵. ژئوسنتتیک‌ها و لاینرهای پلیمری

- **تعریف:** استفاده از ژئوممبران‌ها، ژئوتکستایل‌ها یا شیت‌های پلیمری برای عایق‌کاری و پوشش مکمل
- **مزایا:** وزن کم، اجرای آسان، ایجاد عایق قوی
- **کاربرد:** تونل‌های انتقال آب، مترو و تونل‌هایی با سطح آب زیرزمینی بالا

۴-۵. انتخاب سیستم مناسب نگهداری

معیارهای زیر باید برای انتخاب سیستم نگهداری تونل با توجه به شرایط پروژه سنجیده شود:

- نوع و وضعیت ژئوتکنیکی زمین (سنگ، خاک، ریزشی یا پایدار)
- ابعاد و کاربری تونل
- شدت آبدهی و فشار آب زیرزمینی
- ملاحظات اقتصادی، عمر مفید و هزینه نگهداری
- الزامات ایمنی و زمان‌بندی پروژه

۵-۵. جمع‌بندی

انتخاب و طراحی سیستم نگهداری تونل، بیش از هر جزء دیگر، تضمین‌کننده پایداری بلندمدت، حفظ ایمنی بهره‌برداران و پرسنل اجرا، و تحقق بهره‌برداری اقتصادی و مستمر از پروژه به شمار می‌آید. یک طراحی کارآمد و اصولی باید بر مبنای تلفیق داده‌های زمین‌شناسی دقیق (نوع و رفتار توده‌سنگ، ساختارهای

زمین‌شناسی، زون‌های سست و مخاطرات محتمل)، تحلیل‌های جامع ژئوتکنیکی (پارامترهای مقاومتی، اندرکنش پوشش و زمین، تحلیل نشست و رانش، ارزیابی آینده‌ی و فشارهای وارد بر سیستم نگهداری) و محاسبات سازه‌ای پیشرفته (شامل تحلیل استاتیکی و دینامیکی پوشش، رفتار غیرخطی و تحلیل مدت‌دار) استوار باشد.

علاوه بر این، درک عمیق از رفتار واقعی زمین در برابر حفاری، درک شرایط اجرایی خاص پروژه (محدودیت زمانی، دسترسی، امکانات تجهیزاتی)، سوابق تجربی پروژه‌های مشابه و به‌کارگیری استانداردهای معتبر بین‌المللی (نشریات سازمان برنامه) نقش کلیدی در بهینه‌سازی انتخاب سیستم نگهداری ایفا می‌کنند.

طراحی و اجرای نگهداری باید همواره پویا و منطبق بر داده‌های جدید پروژه، نتایج پایش‌های میدانی و رفتارنگاری پوشش تونل بازنگری شود تا از وقوع شکست‌های ناگهانی و پیامدهای مالی، فنی و ایمنی پرهیز گردد. توجه به هم‌افزایی انواع روش‌های نگهداری (موقت و دائم، انواع پوشش مرکب و پیوسته، استفاده از مصالح نوین، فناوری‌های پایش و کنترل هوشمند) و اتخاذ رویکرد مدیریت ریسک فعال، موجب افزایش ضریب اطمینان پروژه و کاهش هزینه‌های غیرضروری می‌گردد.

فصل ششم – تحلیل پایداری تونل‌ها با استفاده از روش‌های تجربی

۶-۱. مقدمه

تحلیل پایداری تونل‌ها به منظور تأمین ایمنی، کاهش ریسک ریزش و انتخاب سیستم نگهداری مناسب اهمیت بسیار بالایی دارد. یکی از متداول‌ترین رویکردها، استفاده از روش‌های تجربی است که بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده از پروژه‌های واقعی و رفتار توده سنگ بنا نهاده شده‌اند.

۶-۲. تعریف و جایگاه روش‌های تجربی در تحلیل پایداری

- روش‌های تجربی، دسته‌ای از روش‌ها هستند که با جمع‌آوری داده‌های میدانی، مشاهده رفتار زمین و تحلیل تجربیات گذشته، معیارهایی برای ارزیابی کیفیت سنگ و تعیین نوع نگهداری ارائه می‌دهند.
- این روش‌ها عمدتاً در پروژه‌هایی با داده‌های اولیه محدود، نقش کلیدی در تصمیم‌گیری سریع ایفا می‌کنند.

۶-۳. معرفی مهم‌ترین روش‌های تجربی

۶-۳-۱. سیستم طبقه‌بندی توده سنگ (RMR (Rock Mass Rating)

- توسعه یافته توسط Bieniawski
- معیارهای اصلی: مقاومت تک‌محوره سنگ، RQD، فاصله درزه‌ها، وضعیت درزه‌ها، وضعیت آب زیرزمینی
- فرمول و روش امتیازدهی: جمع امتیازات معیارها، طبقه‌بندی توده سنگ
- کاربرد: انتخاب نگهداری اولیه و تعیین رده پایداری

۶-۳-۲. سیستم Q (Q-System)

- توسعه یافته توسط Barton و همکاران

- **پارامترها: RQD**، تعداد درزه‌ها، کیفیت درزه، وضعیت آب، وضعیت پرشدگی درزه‌ها، وضعیت تنش

که در آن متغیرها به ترتیب نمایانگر کیفیت سنگ، تعداد و مقاومت درزه‌ها، تاثیر آب، فاکتور کاهش تنش و ... هستند.

- **کاربرد:** تعیین ضخامت نگهداری (شاتکریت)، فواصل بولت، انتخاب پوشش تونل

۳-۳-۶. سیستم GSI (Geological Strength Index)

- ویژه توده‌سنگ‌های درزه‌دار و برش خورده
- تعریف کیفی مقاومت بر اساس شکل ظاهری و شرایط ساختاری توده‌سنگ
- امکان ترکیب با روابط مکانیکی جهت تخمین مقاومت برشی و فشاری توده‌سنگ

۴-۳-۶. روش‌های تجربی سایر (مانند NATM، روش CAT، طبقه‌بندی Terzaghi)

- **روش Terzaghi:** نخستین طبقه‌بندی برای توده‌سنگ‌های تونلی (شیست، مرمر، ماسه‌سنگ و ...)
- **روش NATM:** بر پایش رفتار دیواره، تجهیز نگهداری مرحله‌ای و قضاوت مهندسی استوار است.
- **روش CAT:** بر اساس رفتار زمین و تجربیات منطقه‌ای.

۴-۶. نحوه کاربری و مراحل تحلیل با روش‌های تجربی

۱. جمع‌آوری داده‌های میدانی: لاگ برداری گمانه، برداشت درزه‌ها، تعیین RQD و وضعیت زمین

۲. امتیازدهی پارامترها: بر اساس جداول استاندارد هر روش

۳. طبقه‌بندی توده‌سنگ: تعیین کلاس یا رده پایداری محیط اطراف تونل

۴. تعیین نوع و ابعاد سیستم نگهداری: استفاده از جداول پیشنهادی (مثلاً ضخامت شاتکریت، نوع

قاب، طول و فاصله میل مهار)

۵. مقایسه با پایش رفتاری و اصلاح احتمالی طراحی در حین اجرا

۵-۶. مزایا و محدودیت‌های روش‌های تجربی

مزایا:

- سادگی، سرعت و هزینه پایین نسبت به روش‌های عددی و تحلیلی
- مناسب برای پروژه‌های با داده اولیه کم
- قابل اتکا برای ارزیابی اولیه و تصمیم‌گیری سریع

محدودیت‌ها:

- وابستگی به تجربیات قبلی و شرایط مشابه
- دقت محدود در شرایط ویژه (سنگ‌های بسیار ضعیف یا محیط‌های غیرعادی)
- نیاز به ترکیب با پایش و قضاوت مهندسی در پروژه‌های حساس

۶-۶. جمع‌بندی و توصیه‌های اجرایی

در فرآیند طراحی و اجرای تونل، تحلیل پایداری مبتنی بر روش‌های تجربی (همچون RMR، Q-System، GSI و طبقه‌بندی‌های مشابه)، به واسطه سادگی، سرعت و قابلیت کاربرد در مراحل اولیه ارزیابی، همواره به عنوان یکی از ابزارهای ضروری کنار تحلیل‌های عددی و تحلیلی مطرح است. این روش‌ها با اتکاء به تجارب گسترده میدانی پروژه‌ها، داده‌ها و طبقه‌بندی‌های آماری، به مهندسان این امکان را می‌دهند که با صرف زمان و هزینه کمتر، تصویر کلان و مناسبی از شرایط پایداری و نوع سیستم نگهداری مورد نیاز ارائه نمایند.

اما استفاده صحیح و بهینه از روش‌های تجربی، منوط به درک عمیق محدودیت‌ها و نقاط قوت هر روش است. این سیستم‌ها عمدتاً بر پایه داده‌های حوزه‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی توسعه یافته‌اند و گاهی فاقد دقت لازم در شرایط زمین‌شناسی پیچیده، سازه‌های خاص، یا تغییرات ناگهانی پارامترهای توده‌سنگ و آبدهی می‌باشند. لذا توصیه می‌شود:

- از نتایج روش‌های تجربی صرفاً به عنوان راهنما یا نقطه شروع در تعیین نوع نگهداری اولیه استفاده گردد و برای نهایی‌سازی طراحی، تحلیل‌های عددی پیشرفته (مانند FEM, FDM, DEM) و تحلیل‌های تحلیلی مکمل انجام شود؛
 - اعتبارسنجی طبقه‌بندی‌های تجربی و پارامترهای ورودی آن‌ها باید براساس مطالعات دقیق زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی محلی پروژه (شامل مغزه‌گیری، نقشه‌برداری، آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی) انجام گیرد؛
 - پایش و رفتارنگاری مستمر تونل در حین حفاری و اجرای نگهداری، جهت مقایسه رفتار واقعی زمین و سیستم نگهداری با نتایج تجربی، الزامی است و باید از آن برای اصلاح و به‌روزرسانی طراحی اولیه استفاده شود؛
 - ترکیب و تلفیق چند روش تجربی، به همراه تحلیل‌های عددی و تحلیلی، ریسک خطا را کاهش داده و ضریب اطمینان طرح را افزایش می‌دهد.
- در نهایت تأکید می‌شود که موفقیت فنی، اقتصادی و ایمنی پروژه‌های تونلسازی در گرو نگرشی چندبعدی و نظام‌مند به تحلیل پایداری است؛ نگرشی که در آن، تلفیق داده‌های تجربی، تحلیلی و عددی با قضاوت مهندسی و نتایج رفتارنگاری، همچون زنجیره‌ای مکمل و تقویت‌کننده عمل کرده و ضامن پایداری و موفقیت پروژه خواهد بود.

فصل هفتم – تحلیل پایداری تونل‌ها با استفاده از روش‌های تحلیلی

۷-۱. مقدمه

روش‌های تحلیلی (Analytical Methods) ابزاری بنیادین در ارزیابی و پیش‌بینی رفتار زمین و سیستم نگهداری تونل‌ها هستند. این روش‌ها اغلب بر مبنای تئوری‌های مکانیک سنگ، مکانیک خاک و رابطه‌های ریاضیاتی بین نیرو، تنش و تغییر شکل عمل می‌کنند و امکان تخمین کمی پایداری و ایمنی تونل را فراهم می‌سازند.

۷-۲. انواع روش‌های تحلیلی بنیادی

۷-۲-۱. روش الاستیک (Elastic Analysis)

- **فرضیات:** رفتار سنگ یا خاک اطراف تونل، الاستیک و همگن فرض می‌شود.
- **مدل‌سازی:** تونل تحت بار فشاری زمین (یا فشار آب زیرزمینی) مدل‌سازی و توزیع تنش پیرامون آن محاسبه می‌شود.
- **کاربرد:** تحلیل اولیه پایداری، تعیین تنش‌های القایی، انتخاب اولیه ابعاد پوشش.
- **فرمول پایه:** طبق تئوری کربی - معروف‌ترین فرمول تحلیل تنش دایره‌ای

۷-۲-۲. تحلیل پلاستیک (Plastic Analysis)

- **فرضیات:** با افزایش بارگذاری یا ضعف زمین، رفتار توده‌سنگ وارد ناحیه پلاستیک می‌شود.
- **وقوع ناپایداری:** شرایطی که تنش‌ها از مقاومت سنگ یا خاک فراتر رود، ناحیه پلاستیک و ناپایدار پیرامون تونل شکل می‌گیرد.
- **کاربرد:** تخمین ضخامت ناحیه ریزش، ارزیابی حریم ایمن تونل، طراحی پوشش مقاوم‌تر.
- **نمونه رابطه:** برآورد شعاع ناحیه پلاستیک (r_p, r_{p0}, r_p) و تنش فروپاشی کامل.

۷-۲-۳. روش‌های ترکیبی الاستو-پلاستیک (Elasto-Plastic Analysis)

- **مدل تلفیقی:** بخش مرکزی پلاستیک، محیط دورتر الاستیک
- **مدل محبوب:** مدل موهر-کولمب برای سنگ و خاک
- **کاربرد:** تحلیل رئال تر برای زمین های سخت تا نیمه سخت، اختصاصی تونل های عمیق تر

۷-۳. تحلیل نیرویی و تغییر شکلی سیستم نگهداری

- **تنش ها و کرنش ها** در پوشش تونل براساس بارهای وارده (وزن زمین، فشار آب، بار زلزله)
- **آنالیز قاب خمشی (Frame Analysis):** مدلسازی پوشش به صورت حلقه، قاب یا سازه پوسته ای و محاسبه نیروهای داخلی (لنگر خمشی، نیروی محوری، برشی)
- **تحلیل اندرکنش زمین و پوشش (Ground-support Interaction):** بررسی رفتار مشترک توده سنگ و پوشش، تعیین فشار وارده به پوشش براساس تغییر شکل نسبی و سختی پوشش و زمین

۷-۴. معرفی مهم ترین مدل های تحلیلی در تونلسازی

- **مدل کربی (Kirsch):** تحلیل تنش الاستیک پیرامون تونل دایره ای
- **مدل رادیوس پلاستیک (Convergence-Confinement Method, CCM):** نمایش منحنی همگرایی توده سنگ و منحنی سختی پوشش
- **تحلیل حلقه (Ring and Lining Analysis):** تعیین ضخامت و ابعاد پوشش بتنی یا فولادی
- **مدل های مکانیک محیط پیوسته و ناپیوسته:** حل نیمه تحلیلی برای شرایط پیچیده تر

۷-۵. مراحل عملی تحلیل پایداری تونل با روش های تحلیلی

۱. **تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی:** مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، زاویه اصطکاک، کشش، دانسیته و ...

۲. **مدل سازی هندسه و بارگذاری:** ابعاد تونل، عمق دفن، فشارهای زمین و آب

۳. انتخاب مدل تحلیلی مناسب: براساس نوع زمین و شرایط پروژه (الاستیک - پلاستیک - اندرکنشی)

۴. محاسبه نیروها و تنش‌ها: تعیین نقاط بحرانی پایداری و تحلیل پوشش

۵. بررسی ضرایب ایمنی و تطبیق با استانداردها: مقایسه نتایج با حدود مجاز آیین‌نامه‌ای

۶-۷. نتایج، تفسیر و مقایسه با روش‌های تجربی و عددی

- دقت مناسب برای پروژه‌های با پارامترهای شناخته‌شده
- قابلیت اعتبارسنجی نتایج تجربی و عددی
- محدودیت مدل‌سازی برخی پیچیدگی‌ها (ناهمگنی، درزه‌داری و خاک‌های خاص)
- ضرورت ترکیب نتایج تحلیلی با پایش میدانی و تجربیات عملی

۷-۷. جمع‌بندی

در این فصل، جایگاه و اهمیت روش‌های تحلیلی در تحلیل پایداری تونل‌ها و نقش آن در طراحی ایمن و بهینه سیستم‌های نگهداری مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا، مفاهیم پایه مکانیک محیط‌های پیوسته و ناپیوسته و مدل‌سازی تنش - کرنش در پیرامون تونل‌ها تشریح شده است. راه‌حل‌های کلاسیک نظیر معادلات Kirsch، Kimber-Berzey و تحلیل منحنی عکس‌العمل زمین (GRC)، به عنوان ابزار اصلی در پیش‌بینی رفتار زمین و تعیین نوع، زمان و میزان تحمیل بار بر سازه‌ی نگهداری معرفی می‌شوند.

با نگاهی عمیق‌تر، اثر پارامترهای ژئوتکنیکی نظیر مقاومت فشاری توده‌سنگ، سفتی، وجود گسل و زون‌های ضعیف، بر ناپایداری‌های موضعی و کلی تحلیل شده و محدودیت‌های فرضیه‌های حاکم بر روش‌های تحلیلی (همگن، همسانگرد، خطی) یادآوری شده است. بر اساس این تحلیل‌ها، تعیین شعاع ناحیه پلاستیک، برآورد جابجایی تاج تونل، انتخاب نوع، شکل و ضخامت پوشش (اعم از بتنی، شاتکریت، فولادی)، و تبیین نیاز به نگهداری اولیه و ثانویه انجام می‌پذیرد.

در ادامه به تفسیر نتایج تحلیل‌های تحلیلی و مطابقت آنها با داده‌های رفتارنگاری و نتایج مدل‌سازی عددی پرداخته شده است تا بتوان با اطمینان بیشتری نسبت به پیش‌بینی رفتار واقعی توده‌سنگ و عکس‌العمل پوشش

در شرایط متغیر اجرایی اقدام نمود. همچنین به اهمیت روزرسانی فرضیات مدل‌های تحلیلی بر مبنای داده‌های میدانی، ارتباط نزدیک تیم طراحی و اجرا، و تلفیق روش‌های تحلیلی با روش‌های دیگر (تجربی - عددی) جهت کنترل هرچه بهتر ریسک‌های فنی و هزینه‌ای در پروژه‌های تونلسازی تاکید شده است.

در نهایت، این فصل نشان می‌دهد برای نیل به پایداری و ایمنی مطلوب در تونل‌های راه و راه آهن، کاربست صحیح و ترکیبی از روش‌های تحلیلی با رویکردی مبتنی بر شرایط خاص پروژه، داده‌های ژئوتکنیکی و رفتارنگاری مستمر، ضروری و تعیین کننده است؛ و غفلت از محدودیت‌های روش‌های تحلیلی یا عدم تطابق با واقعیت اجرایی، می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی سازه‌ای و اقتصادی شود.

فصل هشتم – تحلیل پایداری تونل‌ها با استفاده از روش‌های عددی

۸-۱. مقدمه

روش‌های عددی (Numerical Methods) به دلیل توانایی مدل‌سازی رفتار پیچیده زمین و سیستم نگهداری، به یکی از ابزارهای پیشرفته و پرکاربرد در تحلیل پایداری تونل‌ها تبدیل شده‌اند. این روش‌ها با استفاده از رایانه، امکان شبیه‌سازی شرایط هندسی پیچیده، بارگذاری متغیر، ناهمگنی و نایزوتروپی محیط، اثرات درزه‌ها و حتی روند ساخت تدریجی تونل را فراهم می‌آورند.

۸-۲. مفاهیم پایه روش‌های عددی

- مدل‌سازی رفتاری زمین، پوشش و نگهداری تونل با فرض حاکمیت معادلات تعادل، سازگاری و روابط بین تنش-کرنش
- تقسیم محیط به عناصر (Finite Elements/Elements/Blocks)
- اعمال شرایط مرزی، بارگذاری و معرفی پارامترهای ژئوتکنیکی به مدل
- قابلیت بررسی رفتار غیرخطی، شکست، بزرگ‌تغییری و اندرکنش‌های پیچیده

۸-۳. مهم‌ترین روش‌های عددی در تونل‌سازی

۸-۳-۱. روش اجزای محدود (FEM – Finite Element Method)

- پرکاربردترین روش عددی در تونل‌سازی
- تقسیم هندسه به شبکه‌ای از المان‌های مثلثی/چهارضلعی یا سه‌بعدی
- توانمند در مدل‌سازی الاستیک، پلاستیک، رفتارسنگ‌های تقویت‌شده، تاثیر استخراج مرحله‌ای، تحلیل نشست و طراحی پوشش تونل

۸-۳-۲. روش تفاضل محدود (FDM – Finite Difference Method)

- بر پایه تقریب‌های عددی معادلات نقطه به نقطه

- رایج در نرم‌افزارهایی چون **FLAC/FLAC3D** و **UDEC**

- مناسب مدل‌سازی تونل در سنگ‌های درزه‌دار، محیط‌های پیوسته و شبیه‌سازی رفتار دینامیکی

۳-۳-۸. روش‌های مبتنی بر گسسته‌سازی (DEM – Discrete Element Method)

- مدل‌سازی محیط سنگی به صورت گسسته (بلوک/ذرات جداگانه)

- شبیه‌سازی دقیق رفتار محیط‌های بسیار درزه‌دار، روانگرا و یا خرد شده

- استفاده در نرم‌افزارهایی مثل **UDEC** و **PFC**

۴-۳-۸. سایر روش‌های عددی پرکاربرد

- روش شبکه‌های عصبی و یادگیری ماشین: پیش‌بینی رفتار تونل با داده‌های میدان

- روش اجزای مرزی (BEM): تحلیل محیط‌های غیرمحدود

- روش عناصر محدب (FEMX): بهبود نتایج تحلیل تونل‌های خاص

۴-۸. مراحل عملی تحلیل عددی تونل‌ها

۱. جمع‌آوری داده‌های ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی: تعیین پارامترها (مدول الاستیسیته، مقاومت، نسبت بواسون، زاویه اصطکاک و ...)

۲. مدل‌سازی هندسه و ایجاد شبکه‌بندی (مش‌بندی): طراحی بخش تونل، عمق، پوشش، شرایط مرزی و ...

۳. انتخاب و اجرای مدل عددی مناسب با تعریف پارامترها و سناریوهای بارگذاری

۴. انجام تحلیل و پایش نتایج: استخراج خروجی‌هایی چون توزیع تنش، کرنش، جابجایی، نشست و عکس‌العمل سیستم نگهداری

۵. کالیبراسیون مدل با نتایج میدانی و صحت‌سنجی: مقایسه خروجی مدل عددی با رفتار واقعی پروژه و اعمال اصلاحات لازم

۶. تحلیل سناریوهای ویژه: بارگذاری زلزله، شکست موضعی، اجرای تدریجی تونل و ...

۵-۸. مزایا و محدودیت‌های روش‌های عددی

مزایا:

- امکان مدل‌سازی سطوح پیچیده، درزه‌داری، خاک و سنگ‌های غیرهمگن
- قابلیت ارزیابی رفتار غیرخطی و پیش‌بینی پیچیدگی‌ها
- توسعه برای تحلیل حالت‌های دینامیکی و بارگذاری مرحله‌ای

محدودیت‌ها:

- نیاز به داده‌های ورودی دقیق و تعیین صحیح شرایط مرزی
- زمان و هزینه محاسبات (پردازش رایانه‌ای)
- وابستگی به فرضیات مدل‌سازی و اعتبار نرم‌افزار
- نیاز به تخصص و تجربه برای تفسیر نتایج عددی

۶-۸. مقایسه تطبیقی با روش‌های تجربی و تحلیلی

- روش‌های عددی تکمیل‌کننده تحلیل‌های تجربی و تحلیلی هستند و انتخاب نهایی باید با مهندسی ارزش و داده‌های واقعی پروژه ترکیب شود.
- نتایج عددی اغلب دقت و تطبیق بالاتری با شرایط پیچیده دارند اما هزینه و زمان اجرای تحلیل نیز بیشتر است.
- اعتبار خروجی مدل عددی وابسته به صحت داده‌های ژئوتکنیکی و تفسیر صحیح نتایج است.

۷-۸. جمع‌بندی

در عصر حاضر، تحلیل عددی به عنوان ابزاری حیاتی، دقیق و غیرقابل جایگزین در بررسی رفتار ژئوتکنیکی و پایداری تونل‌ها، به‌ویژه در پروژه‌های پیچیده و زیرساخت‌های حساس، جایگاهی کلیدی یافته است. این روش‌ها با به‌کارگیری مدل‌سازی رایانه‌ای، قابلیت شبیه‌سازی شرایط هندسی پیچیده، ویژگی‌های متفاوت محیط‌های سنگی و خاکی، تأثیر بارهای متغیر و تحلیل رفتار غیرخطی مصالح را دارند. استفاده از نرم‌افزارهای پیشرفته عددی (همچون PLAXIS، FLAC، Phase، ABAQUS و سایر ابزارهای مبتنی بر روش اجزای محدود و تفاضل‌های محدود) امکان ارزیابی اثر انواع روش‌های حفاری، مرحله‌بندی اجرا، و تحلیل سناریوهای مختلف بارگذاری و آب زیرزمینی را با دقت بالا فراهم ساخته‌اند.

ادغام متفکرانه نتایج تحلیل عددی با داده‌های میدانی حاصل از ابزار دقیق و پایش‌های رفتاری پروژه، به مهندسان این امکان را می‌دهد تا مدل‌های عددی را به صورت پویا اصلاح و اعتبارسنجی نموده و طراحی سیستم نگهداری را متناسب با شرایط واقعی پروژه بهینه نمایند. این روند، شناسایی به‌موقع ناپایداری‌های احتمالی، ارزیابی دقیق ریسک‌های سازه‌ای، و پیش‌بینی رفتار تونل در مقابله با سناریوهای گوناگون بارگذاری و سوانح احتمالی را میسر می‌سازد.

در عین حال، باید به محدودیت‌ها و چالش‌های مدل‌سازی عددی از جمله دقت پارامترهای ورودی، صحت مدل‌سازی هندسه و شرایط مرزی، و نیاز به تفسیر صحیح نتایج توجه ویژه داشت و همواره صحت مدل را با نتایج تجربی و یافته‌های میدانی سنجید. بهره‌برداری تلفیقی از تحلیل عددی، تحلیل تجربی و تحلیل تحلیلی، همراه با پایش مداوم، چارچوبی پویا و مطمئن برای تضمین ایمنی، پایداری و توسعه بهینه پروژه‌های تونل‌سازی را فراهم می‌سازد.

فصل نهم - بررسی اثرات زلزله بر روی پوشش داخلی تونل‌ها

۹-۱. مقدمه

زلزله به عنوان یک پدیده طبیعی مخرب، می تواند اثرات قابل توجهی بر رفتار و پایداری تونل‌ها، به ویژه پوشش داخلی آن‌ها بر جای گذارد. شناخت رفتار پوشش تونل‌ها در برابر امواج زلزله، جهت طراحی مقاوم و ایمن آن‌ها نقشی کلیدی دارد؛ مخصوصاً در مناطق لرزه خیز ایران.

۹-۲. ماهیت بارگذاری لرزه‌ای و ویژگی‌های خاص تونل‌ها

- امواج لرزه‌ای (P, S, Surface) و ویژگی‌های عبور آن‌ها از توده سنگ و خاک اطراف تونل
- تفاوت رفتار تونل با سازه‌های سطحی: به دلیل قرارگیری در عمق، تونل‌ها معمولاً دچار شتاب کمتری نسبت به سطح می شوند
- رفتار متفاوت پوشش در خاک و سنگ، انحنای تونل، عمق و قطر تونل، و تاثیر جهت یابی تونل نسبت به جبهه موج زلزله

۹-۳. انواع خرابی‌های ناشی از زلزله در پوشش تونل‌ها

- ترک خوردگی و گسیختگی پوشش بتنی/ فولادی
- جابه جایی عرضی/ طولی پوشش
- بازشدگی اتصالات سگمنت‌ها یا درزهای سازه‌ای
- خمش بیش از حد، نشست یا بالا آمدگی پوشش
- قابلیت کمانش پوشش یا جدا شدن از توده سنگ
- نشستی آب و آسیب به آب بندها (واتراستاپ‌ها، ژئوممبران)

۹-۴. پارامترهای موثر در پاسخ لرزه‌ای پوشش تونل‌ها

۱. عمق و موقعیت تونل نسبت به سطح زمین

۲. خصوصیات ژئوتکنیکی توده سنگ/خاک اطراف

۳. مشخصات هندسی (شکل، قطر، پوشش)

۴. نوع و کیفیت سیستم نگهداری

۵. ویژگی های حرکت زمین (شتاب، فرکانس، مدت، تعداد سیکل ها)

۶. نحوه اجرا و نوع اتصالات پوشش

۷. انطباق یا تقاطع تونل با گسل فعال

۵-۹. روش های تحلیل لرزه ای پوشش تونل ها

۱-۵-۹. روش های ساده تحلیلی

- روش شبه استاتیکی: اعمال شتاب لرزه ای معادل به پوشش جهت تحلیل تنش و جابجایی
- تحلیل قاب معادل: تبدیل پوشش تونل به قاب دو یا سه بعدی و تحلیل نیروهای ناشی از زلزله (اندرکنش زمین و پوشش)
- فرمول های تجربی (مانند Wang and Penzien): تخمین جابجایی نسبی زمین و نیروهای اعمالی

۲-۵-۹. روش های عددی پیشرفته

- استفاده از نرم افزارهایی نظیر UDEC، ۳D FLAC، PLAXIS
- مدل سازی انتقال تنش پویا و جابجایی پوشش در طول امواج زلزله
- امکان بررسی رفتار غیرخطی، شکست، جداشدگی پوشش و اندرکنش دینامیکی سنگ پوشش
- تحلیل سناریوهای عبور گسل، ضربه مستقیم، یا زلزله های با شتاب بالا

۶-۹. راهکارهای بهسازی و افزایش ایمنی پوشش تونل در زلزله

- استفاده از پوشش منعطف یا سگمنت‌های پیش‌ساخته با اتصالات انعطاف‌پذیر

- بهسازی توده‌سنگ اطراف یا اجرای تزریق جهت کاهش جابجایی‌های نسبی

- افزایش ضخامت یا آرمه کردن پوشش داخلی (بتنی/ فولادی)

- بکارگیری آب‌بندی‌های ارتجاعی و مقاوم در برابر حرکات نسبی

- انتخاب جهت/عمق بهینه تونل در مرحله طراحی

۷-۹. استانداردها و ضوابط بین‌المللی در طراحی لرزه‌ای تونل‌ها

- نشریه ۳۲۷ ایران: الزامات پایه تحلیل لرزه‌ای

- AASHTO, UIC, FHWA: رفرنس‌های بین‌المللی و مقادیر پیشنهادی نیروها و جابجایی‌ها

- EN ۱۹۹۸-۵ (یوروکد زلزله): مبانی تحلیل و طراحی پوشش تونل‌ها در مناطق لرزه‌خیز

- اهمیت اعتبارسنجی نتایج تحلیل عددی با داده‌های زلزله‌های ثبت‌شده (مطالعات موردی تونل‌های آسیایی و آمریکایی)

۸-۹. جمع‌بندی

در این فصل، رفتار لرزه‌ای تونل‌ها و به‌ویژه پوشش داخلی آن‌ها در مواجهه با زلزله به طور عمیق و تحلیلی بررسی گردیده است. تونل‌ها، علیرغم قرارگیری در عمق و پناه گرفتن در دل توده‌سنگ یا خاک، تحت تأثیر امواج لرزه‌ای، تغییر مکان‌ها، کرنش‌های نسبی و تنش‌های قابل توجهی را تجربه می‌کنند. شدت این اثرات به پارامترهایی چون مشخصات هندسی و سازه‌ای پوشش، جنس مصالح، عمق، شرایط ژئوتکنیکی محل، خصوصیات زلزله (دامنه، فرکانس، شتاب) و جهت‌گیری تونل نسبت به جبهه انتشار امواج وابسته است.

در این زمینه، دو مؤلفه اصلی رفتار لرزه‌ای مورد توجه قرار می‌گیرد:

۱. دگرشکلی تونل و انتقال امواج: تونل در برابر امواج فشاری (P)، برشی (S) و موج سطحی (R) به نسبت با پاسخ ویژه‌ای روبرو است که می‌تواند منجر به کرنش‌های محوری (تغییر طول)، کرنش بیضوی (تغییر شکل مقطع) و رانش جانبی یا جابجایی قائم شود.

۲. رفتار پوشش داخلی: پوشش داخلی به عنوان خط دفاع اولیه در برابر تغییر شکل‌های لرزه‌ای، تحت اثرات خمش، فشار، کشش و گاه ترک خوردگی قرار می‌گیرد. تعیین حداکثر کرنش مجاز، بررسی مهره‌ای شدن (segmentation failure)، گسیختگی اتصالات و آسیب‌های متمرکز از نکات کلیدی طراحی در نواحی با لرزه‌خیزی بالا است.

روش‌های تحلیلی لرزه‌ای، شامل تحلیل شبه‌استاتیکی (Pseudo-static)، تحلیل دینامیکی (Time-history)، مدل‌سازی عددی مبتنی بر اجزای محدود و بررسی رفتار برشی-کرنش پوشش با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش دینامیکی زمین و سازه، از جمله ابزارهای اصلی مورد استفاده در این فصل هستند. راهبردهای مقاوم‌سازی و طراحی ویژه (مانند انتخاب مصالح با شکل‌پذیری مناسب، تقویت اتصالات و اتخاذ هندسه مناسب مقطع) نیز به تفصیل معرفی شده‌اند تا تاب‌آوری و دوام سیستم پوشش داخلی در برابر زلزله تضمین گردد.

در نهایت، تعامل نزدیک داده‌های مدل‌سازی عددی-تحلیلی با نتایج رفتارنگاری میدانی و آسیب‌شناسی تجربی، تضمین‌کننده صحت ارزیابی و انتخاب راهکارهای اجرایی مناسب خواهد بود. دستیابی به ایمنی، عملکرد مطلوب و کاهش ریسک‌های لرزه‌ای تونل‌ها در گرو درک جامع و به‌روزرسانی روش‌های طراحی پوشش داخلی با توجه به تجربه‌های جهانی و آیین‌نامه‌های معتبر است.

فصل دهم – تحلیل سازه‌ای پوشش داخلی تونل‌ها

۱۰-۱. مقدمه

پوشش داخلی تونل‌ها (Lining) یکی از مؤلفه‌های اصلی پایداری و دوام سازه تونل است که نقش حیاتی در تحمل تنش‌ها، حفاظت از محیط حفاری شده، کنترل نفوذ آب و انتقال بارها دارد. تحلیل سازه‌ای دقیق پوشش داخلی شرط اساسی طراحی ایمن و اقتصادی تونل‌هاست.

۱۰-۲. انواع پوشش داخلی تونل‌ها

- پوشش بتنی درجا (Cast-in-place concrete lining)
 - پوشش سگمنتال پیش ساخته (Precast Segmented Lining)
 - پوشش فولادی یا مرکب
 - پوشش‌های ویژه (Composite, GRP, polymer)
- در هر پروژه، انتخاب نوع مناسب پوشش براساس شرایط زمین، روش حفاری، طول عمر مورد نیاز، شرایط محیطی و الزامات بهره‌برداری انجام می‌شود.

۱۰-۳. بارهای وارد بر پوشش داخلی

۱۰-۳-۱. بارهای دائمی (Permanent Loads)

- فشار زمین (سنگ یا خاک اطراف)
- فشار آب زیرزمینی (Hydrostatic Pressure)
- وزن پوشش و سازه‌های الحاقی

۱۰-۳-۲. بارهای موقت و بهره‌برداری (Service Loads & Temporary)

- بارهای ساختمانی ناشی از تجهیزات یا نصب و نگهداری
- بارهای ناشی از نشست یا جابجایی اطراف تونل

۳-۳-۱۰. بارهای ویژه

- بارهای لرزه‌ای (در مناطق زلزله‌خیز)
- بارهای ناشی از گسلش و لغزش توده‌سنگ
- فشار گاز یا انفجارات احتمالی

۴-۱۰. مدل سازی سازه‌ای پوشش داخلی

۱-۴-۱۰. مدل های ساده تحلیلی

- مدل حلقه‌ای (Ring/Hoop Model): فرض پوشش به صورت یک حلقه کامل، با توزیع یکنواخت بار

- مدل قاب معادل (Equivalent Frame Analysis): برای مقاطع غیرمدور یا ترک‌دار

- تحلیل کشش، خمش، برش و ترکیب این حالات (بر اساس تئوری‌های مقاومت مصالح)

۲-۴-۱۰. مدل های پیشرفته عددی

- تحلیل المان محدود (FEM): مدلسازی دقیق پوشش با تنوع مصالح، بارگذاری غیرخطی، بررسی اندرکنش پوشش-زمین

- تحلیل فضا-صفحه ($D^3D/2$): اثر سه‌بعدی شدن ته‌کش و نصبیات، کمانش، تجمع نیروهای موضعی

- استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی (SAP ۲۰۰۰، PLAXIS، ABAQUS، MIDAS، D3FLAC)

۵-۱۰. پارامترهای مؤثر در رفتار سازه‌ای پوشش

- ضخامت و شکل هندسی پوشش (دایره‌ای، نعل‌اسبی، چهارگوش)

- کیفیت و نوع مصالح (بتن، فولاد، پلیمر)

- مشخصات مکانیکی خاک/سنگ اطراف (رفتار الاستیک-پلاستیک، مقاومت، مدول تغییر شکل)

- اتصالات (Joints) و درزهای انبساطی

- نحوه اجرا و کیفیت ساخت

۱۰-۶. معیارهای طراحی و کنترل سازه‌ای

- بر اساس آیین‌نامه‌های ملی و بین‌المللی (نشریه ۳۲۷، EN، UIC، AASHTO-۲-۱۹۹۲)

- ضوابط تنش مجاز، جابجایی‌ها، ترک‌خوردگی، پایداری دائمی (Ultimate/Serviceability Limit State)

- کنترل کمانش، پایداری مقطع، تحمل آب‌بندی در برابر فشار خارجی

۱۰-۷. تحلیل‌های خاص و سناریوهای ویژه

- تحلیل رفتار تحت بار لرزه‌ای (مطابق فصل قبل)

- اثر نشست، حرکت لغزشی یا واگرایی توده‌سنگ

- تحلیل اتصال پوشش به سگمنت/درزها

- بررسی رفتار خستگی در پوشش‌های راه‌آهن، تونل‌های پرسرعت یا با بار محوری قابل توجه

۱۰-۸. راهکارهای بهبود رفتار سازه‌ای پوشش

- افزایش ضخامت یا طراحی مسلح (آرمه) پوشش

- استفاده از واتراستاپ و آب‌بندهای ارتجاعی

- اجرای تزریق پشت پوشش (Backfilling/Grouting)

- انتخاب هندسه مقطع بهینه

- بهسازی توده سنگ اطراف تونل در مناطق بحرانی

۹-۱۰. جمع بندی

تحلیل سازه‌ای پوشش داخلی، به عنوان یکی از اصلی‌ترین ارکان طراحی مهندسی تونل‌ها، نقشی تعیین‌کننده در تضمین پایداری طولانی‌مدت، ایمنی سازه‌ای و دوام بهره‌برداری تونل‌های راه و راه‌آهن دارد. پوشش داخلی تونل عمدتاً وظیفه تحمیل و انتقال تنش‌های حاصل از بارهای زنده و مرده، اثرات فشار جریان آب زیرزمینی، بارهای وارد بر اثر گسترش خاک و سنگ، و نیز تنش‌های ناشی از بارهای دینامیکی همچون زلزله را بر عهده دارد.

برای دستیابی به ارزیابی صحیح رفتار خطی و غیرخطی پوشش، مدل‌سازی عددی پیشرفته با استفاده از نرم‌افزارهای مبتنی بر روش اجزای محدود (FEM) و در موارد خاص، روش تفاضل محدود (FDM)، به عنوان ابزار کلیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعات، در نظر گرفتن ویژگی‌های رفتاری مصالح (بتن مسلح، بتن الیافی، سگمنت پریفابریک و...)، اندرکنش پوشش و توده سنگ یا خاک اطراف، شرایط مرزی پیچیده، مرحله‌بندی حفاری و اجرای همزمان پوشش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

استانداردها و آیین‌نامه‌های بین‌المللی و ملی (مانند AASHTO, EN, UIC, FHWA و نشریات معتبر داخلی از جمله نشریه ۶۸۴)، دستورالعمل‌های صریحی برای بارگذاری، معیارهای بهره‌برداری، کنترل ترک‌خوردگی، الزامات شکل‌پذیری و عملکرد در برابر شرایط خاص (نظیر مناطق لرزه‌خیز)، ارائه می‌دهند. شبیه‌سازی دقیق الگوهای توزیع تنش و کرنش، برآورد جابجایی‌های نسبی، کنترل تنش‌های حدی و تحلیل آسیب‌پذیری اجزاء همچون درزهای اجرایی و اتصالات، از نتایج کلیدی تحلیل سازه‌ای به شمار می‌روند.

در نهایت، موفقیت طرح و اجرای یک پوشش داخلی مطمئن و عملکردی مشروط به تلفیق تحلیل عددی، کنترل‌های میدانی و تطابق با الزامات آیین‌نامه‌ای است. این روند، تضمین‌کننده کارایی، دوام و حد بالای ایمنی در طول عمر تونل خواهد بود و زمینه پاسخگویی به چالش‌های ژئوتکنیکی و بارگذاری‌های غیرمنتظره را فراهم می‌آورد.

فصل یازدهم – مصالح مصرفی در ساخت بتن مسلح

۱-۱۱. مقدمه

بتن مسلح (Reinforced Concrete) یکی از متداول ترین مصالح مورد استفاده در پوشش داخلی تونل ها و دیگر سازه های زیرزمینی است. کیفیت و دوام بتن و میلگرد، به طور مستقیم به خواص و نحوه انتخاب، تهیه و کنترل مصالح اولیه وابسته است. آشنایی کامل با انواع مصالح مصرفی، ویژگی ها و ضوابط شان، لازمه طراحی و اجرای ایمن و اقتصادی تونل است.

۱-۱۱-۲. معرفی اجزای اصلی بتن مسلح

۱. سیمان (Cement)

۲. سنگدانه ها (Aggregates)

۳. آب (Water)

۴. میلگرد (فولاد مسلح کننده (Steel Reinforcement)

۵. افزودنی ها (Admixtures)

۶. مواد مکمل سیمانی (Mineral Additives/Supplementary Cementitious Materials)

۱-۱۱-۳. سیمان

• انواع سیمان پرتلند (Type I تا V)، سیمان پوزولانی، سیمان سرباره ای و ویژه

• خواص اصلی سیمان:

○ مقاومت اولیه و نهایی

○ حرارت هیدراسیون

○ پایداری در برابر حملات شیمیایی

○ انطباق با استاندارد (۳۸۹۱SIRI، ASTM C ۱۵۰)

• مسائل خاص در تونلسازی:

- جلوگیری از رشد ترک‌های حرارتی (استفاده از سیمان با حرارت کم مانند نوع IV)
- مقاومت در برابر سولفات و کلر (استفاده از سیمان نوع V یا سیمان‌های ضدسولفات)
- کاربرد سیمان میکروسیلیس/سرباره برای دوام بیشتر

۴-۱۱. سنگدانه‌ها

• سنگدانه درشت (شن) و ریز (ماسه):

- مقاومت سایشی و ضربه‌ای مناسب
- دانه‌بندی مطلوب براساس ASTM C ۳۳/EN ۱۲۶۲۰
- عدم وجود مواد زیان‌آور (نمک، خاک رس، مواد آلی)
- سازگاری با محیط زیرزمینی (پایداری در برابر واکنش قلیایی-سیلیسی)
- مقاومت در سرما و یخ‌زدگی (برای تونل‌های کوهستانی)

۵-۱۱. آب

• کیفیت آب:

- عاری از املاح مضر نظیر سولفات، کلر، مواد آلی، روغن
- استاندارد مطابق با ۱۰۵۳SIRI یا ASTM C ۱۶۰۲
- نسبت آب به سیمان کنترل شده جهت دوام و کاهش نفوذپذیری

۶-۱۱. میلگرد یا فولاد مسلح‌کننده

- انواع میلگرد: ساده، آجدار، مقاوم به خوردگی (فولاد گالوانیزه یا روکش‌دار)

• خواص مورد نیاز:

- مقاومت کششی مناسب (طبق ISIRI ۳۱۳۲، ASTM A ۶۱۵)
- پیوستگی خوب با بتن و عدم زنگ زدگی اولیه
- استفاده از میلگردهای پوشش دار، استینلس استیل یا FRP در محیط های خورنده
- الزامات خم پذیری و جوش پذیری ویژه برای قطعات پیش ساخته تونل

۱۱-۷. افزودنی های شیمیایی و معدنی

- افزودنی های کاهنده آب (Plasticizers/Superplasticizers) و تأخیر دهنده/تسریع کننده گیرش
- ضد یخ/ضد شوره
- افزودنی های روان کننده جهت بتن های پرمقاومت و شاتکریت
- میکروسیلیس، سرباره، خاکستر بادی (Fly Ash)، متاکائولین و ...
- اهداف: بهبود دوام، کاهش نفوذپذیری، افزایش کارایی، کنترل روانی و ممانعت از خوردگی میلگرد

۱۱-۸. ویژگی های ویژه بتن تونلی

- دوام در برابر آب های مهاجم (سولفات، اسید، کلر)
- مقاومت بالا در برابر سایش، سیکل ذوب و یخ
- تراوایی بسیار کم
- گیرش و مقاومت اولیه مناسب برای شاتکریت و سگمنت
- انطباق کامل با استانداردها و الزامات کارفرما

۱۱-۹. کنترل کیفیت و آزمون مصالح

- انجام کلیه آزمایش‌های سیمان، سنگدانه، آب، فولاد و افزودنی‌ها مطابق استاندارد

- مقاومت فشاری، کششی، دوام، انقباض-انبساط

- تست واکنش قلیایی-سیلیسی

- سنجش کلرید و سولفات در مصالح

- کنترل رطوبت و دانه‌بندی سنگدانه

- تست خوردگی میلگرد و پوشش محافظ

- نمونه‌برداری مستمر حین اجرا و ثبت نتایج

۱۰-۱۱. جمع‌بندی

انتخاب صحیح و کنترل کیفی مصالح مصرفی در ساخت بتن مسلح تونل‌ها، از اساسی‌ترین پیش‌نیازهای موفقیت فنی، دوام و عملکرد سازه‌ای مطلوب پوشش داخلی تونل‌های راه و راه‌آهن به‌شمار می‌آید. این فصل با تمرکز بر معرفی علمی و ارزیابی مهندسی انواع مصالح مورد استفاده در بتن مسلح، به بررسی ویژگی‌های کلیدی سیمان، سنگدانه‌ها، آب، مواد افزودنی، و میلگرد فولادی می‌پردازد.

سیمان، به عنوان عامل اصلی چسباننده، با توجه به نوع (پر تلمند، پوزولانی، سرباره‌ای و...)، ریزی، مقاومت نهایی، و پایداری شیمیایی در محیط زیرزمینی انتخاب می‌شود. سنگدانه‌ها (درشت و ریز) به واسطه تأثیر مستقیم بر مقاومت، دوام، انقباض و پایداری حجمی بتن، بر اساس طرح اختلاط، دانه‌بندی، تخلخل، و واکنش‌پذیری شیمیایی ارزیابی می‌شوند. آب مصرفی، ضمن دخالت در فرآیند هیدراسیون و روانی بتن تازه، باید از نظر کیفیت و عدم وجود یون‌های مهاجم کنترل شود تا مانع افت دوام و افزایش خوردگی آرماتور گردد.

استفاده از مواد افزودنی شیمیایی (روان‌کننده، فوق روان‌کننده، زودگیر و دیرگیر، مواد ضدیخ، مواد آب‌بند و مواد معدنی نظیر میکروسیلیس، خاکستر بادی و دوده سیلیسی) با هدف ارتقاء ویژگی‌های مقاومتی، دوام در برابر نفوذپذیری و سازگاری با شرایط محیطی خشن تونل، مورد تأکید ویژه قرار دارد. انواع میلگردهای

فولادی (ساده، آجدار، گالوانیزه و کامپوزیتی) با رعایت ضوابط ضد خوردگی و جوش پذیری، انتخاب و طبق آیین نامه ها کنترل می شوند.

در نهایت، موفقیت در ساخت بتن مسلح با دوام و عملکردی، وابسته به کنترل مداوم کیفیت مصالح از مبدأ تا پای کار، الزامات آزمایشگاهی، انطباق با استانداردهای بین المللی (ASTM) و ملی، و تطبیق دقیق با مشخصات فنی پروژه است. توجه به جزئیات فنی مواد مصرفی، ضامن دوام بلندمدت، پایداری سازه ای و ایمنی بهره برداری پوشش داخلی تونل خواهد بود.

فصل دوازدهم - ساخت، حمل و نصب پوشش داخلی بتن پیش ساخته (سگمنت)

۱۲-۱. مقدمه

استفاده از پوشش داخلی پیش ساخته بتنی موسوم به «سگمنت» (Segment) به دلیل سرعت بالا، کیفیت یکنواخت و دوام زیاد، بخش جدایی ناپذیر تونل های مکانیزه مدرن (به ویژه با دستگاه TBM) است. موفقیت اجرای سگمنت وابسته به کیفیت در همه مراحل ساخت، حمل و نصب است.

۱۲-۲. ویژگی های طراحی سگمنت

- هندسه و ابعاد: ضخامت، عرض، شعاع انحنا، اتصالات
- نوع بتن: پرمقاومت، دوام بالا، دارای افزودنی های خاص (ضد آب، روان کننده، میکروسیلیس)
- روش اتصال: درزهای طولی و شعاعی، جاگذاری واتراستاپ، پیچ و مهره یا داول
- آرماتورگذاری: میلگرد معمولی، شبکه مش یا الیاف فولادی به همراه/به جای میلگرد سنتی

۱۲-۳. ساخت سگمنت بتنی

۱۲-۳-۱. آماده سازی قالب و تجهیز خط تولید

- قالب های دقیق فولادی با تolerانس میلیمتری
- کنترل کیفیت هندسی قالب و خروج آسان قطعه
- پیش بینی سیستم لرزاندن (ویبره) و تخلیه مناسب بتن

۱۲-۳-۲. تولید بتن مناسب سگمنت

- نسبت آب به سیمان پایین (W/C کمتر از ۰.۴)

- استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده برای افزایش دوام، کاهش نفوذپذیری و بسیاری ترک حرارتی

- افزودن الیاف فولادی/پلیمری در صورت لزوم

۱۲-۳-۳. بتن ریزی، ویبره و عمل آوری

- بتن ریزی لایه ای و ویبره استاندارد برای حذف هوای محبوس
- عمل آوری بخار یا دمای کنترل شده (Steam or Controlled Curing) برای افزایش مقاومت اولیه

- کنترل ترک خوردگی و خودآرایی سطح

۱۲-۳-۴. جدا کردن سگمنت از قالب و کنترل کیفیت

- خارج کردن سگمنت پس از عمل آوری اولیه
- بازرسی ظاهری (ترک سطوح، حفره، پوسته شدن)
- ابعاد و تolerانس های هندسی (گیج گذاری)
- آزمایش مقاومت فشاری و دوام (نمونه مکعبی/استوانه ای)
- ثبت نتایج کنترل کیفی هر قطعه

۱۲-۴. انبار کردن و نگهداری سگمنت ها

- چیدمان با فواصل استاندارد، جلوگیری از تماس مستقیم قطعات
- نگهداری روی پالت های صاف و مسطح
- پوشش سگمنت در برابر آفتاب، باران و گرد و غبار
- جلوگیری از خشک شدن سریع یا یخ زدگی

۱۲-۵. حمل سگمنت‌ها تا محل حفاری

- استفاده از جرثقیل سقفی یا لیفتراک مخصوص برای بارگیری
- حمل زمینی با کامیون یا واگن ریلی، همراه با ضربه‌گیری مناسب و جلوگیری از جابجایی در مسیر
- استفاده از علائم و سیستم شناسایی سگمنت‌ها جهت نظم اجرا و ردیابی

۱۲-۶. نصب و مونتاژ سگمنت‌ها در تونل

۱۲-۶-۱. تحویل به TBM یا محل قرارگیری

- انتقال سگمنت‌ها به واحد نصب پشت سر کاترهد TBM یا کارگاه نصب در تونل غیرمکانیزه
- بررسی سلامت سگمنت قبل از نصب و حذف قطعات آسیب‌دیده

۱۲-۶-۲. چیدمان سگمنت‌ها (Segment Ring Assembly)

- چیدمان هر رینگ بر اساس نقشه اجرایی
- تنظیم Positioner و نصب دقیق بر شعاع و زاویه
- استفاده از انواع واترستاپ، واشر آب‌بند و پرکننده درزها
- مونتاژ سگمنت‌ها با پیچ و مهره یا داول مکانیکی
- کنترل سطح و عدم برگشت رینگ
- تزریق ملات پشت سگمنت (Backfilling Grouting) برای تثبیت و آب‌بندی

۱۲-۶-۳. کنترل کیفیت و بازرسی نصب

- تطابق دقیق با نقشه نصبی
- سنجش هم‌راستایی و مدور بودن رینگ‌ها
- کنترل کامل درز بندی و نصب آب‌بندها (Gasket)

- ثبت تمام اطلاعات نصب برای هر رینگ جهت مستندسازی

۷-۱۲. نکات ویژه اجرایی و ایمنی

- آموزش پرسنل اجرایی برای جابجایی بی خطر سگمنت
- رعایت نکات حمل ایمن در فضاهای تونلی با دید و فضای کم
- شماره گذاری و ردیابی سگمنت ها برای جلوگیری از اشتباهات چیدمان
- داشتن سگمنت های یدکی و قطعات ذخیره برای پاسخگویی به آسیب های احتمالی

۸-۱۲. جمع بندی

در پروژه های تونل سازی مدرن به ویژه با ماشین آلات حفاری (TBM)، استفاده از پوشش های داخلی بتن پیش ساخته (سگمنت) به دلیل سرعت اجرا، کیفیت یکنواخت و ایمنی بالا، رویکرد غالب مهندسی محسوب می شود. این فصل با نگرش علمی-عملیاتی، فرآیند تولید، حمل و نصب سگمنت ها را به عنوان عاملی کلیدی در تضمین عملکرد، دوام و ایمنی تونل تبیین می کند.

فرآیند تولید سگمنت ها شامل طراحی مهندسی قالب ها، استفاده از بتن با طرح اختلاط ویژه (دارای مقاومت زودرس، دوام، نفوذناپذیری، کاهش ریسک ترک خوردگی و مقابله با محیط مهاجم زیرزمینی)، مسلح سازی دقیق (با میلگرد آجدار یا فیبر)، عمل آوری تسریع شده در کارخانه های تخصصی و کنترل کیفی چند مرحله ای بر اساس الزامات استاندارد است. توجه ویژه به الزامات هندسی، کیفیت سطحی، پرداخت و دقت ابعادی باعث افزایش طول عمر بهره برداری و کاهش هزینه های تعمیرات آتی خواهد شد.

حمل سگمنت ها از محل کارخانه تا جبهه کارگاه، مستلزم طراحی فرآیند بارگیری، انبارش و حمل با تجهیزات تخصصی (IBO)، تریلرهای ویژه، جرثقیل های دروازه ای) و رعایت استانداردهای ایمنی برای جلوگیری از آسیب های سازه ای، ضربه، سایش و یا خروج رطوبت است. حفظ کیفیت سگمنت تا لحظه نصب، نقش اساسی در یکپارچگی عملکردی پوشش ایفا می کند.

نصب سگمنت‌ها توسط سیستم‌های مکانیزه TBM یا تجهیزات نصب دستی/نیمه‌مکانیزه، با رعایت تolerانس‌های دقیق هندسی، مونتاژ خزان‌های (segmental ring erection)، اجرای صحیح درزهای آب‌بند (gasket)، اعمال گشتاورهای یکنواخت بر پیچ و مهره‌ها و کنترل دقیق هم‌مرکزی مقطع انجام می‌گیرد. انجام پایش مداوم نیروهای وارده و رفتار ژئوتکنیکی حین نصب، برای پیشگیری از آسیب‌های سازه‌ای و تضمین ایمنی ضروری است.

در نهایت، موفقیت این فرآیند منوط به تلفیق دانش طراحی، تولید صنعتی، برنامه‌ریزی حمل‌هوشمندان، و نصب تخصصی با کنترل کیفی مرحله‌به‌مرحله و انطباق کامل با آیین‌نامه‌ها و استانداردهای بین‌المللی است. رعایت این زنجیره، ضامن عملکرد بهینه، دوام سازه‌ای و ایمنی بلندمدت پوشش داخلی تونل خواهد بود.

فصل سیزدهم – اجرای پوشش داخلی بتن برجا (لاینینگ)

۱۳-۱. مقدمه

پوشش داخلی بتن برجا یا لاینینگ، یکی از اصلی ترین روش های تأمین پایداری دائمی، دوام و آب بندی تونل به ویژه در پروژه هایی است که استفاده از سگمنت ممکن نیست یا شرایط زمین شناسی و اجرایی آن را توصیه می کند. این روش به دلیل امکان یکپارچگی، انعطاف پذیری در شکل و امکان کنترل کیفیت در محل پروژه اهمیت ویژه ای دارد.

۱۳-۲. مراحل اجرایی لاینینگ بتنی برجا

۱۳-۲-۱. آماده سازی سطح و بستر تونل

- پاک سازی دقیق مقطع از مصالح سست و مواد زائد
- اطمینان از رسیدن به پروفیل نهایی (Over-excavation or Undercutting جلوگیری شود)
- درزگیری یا آماده سازی نقاط نفوذ آب و تزریق دوغاب در نواحی نفوذی

۱۳-۲-۲. نصب و آماده سازی قالب بندی

- انتخاب قالب های فلزی/پلیمری تقویت شده متناسب با ابعاد و شکل تونل (مدور، نعل اسبی و ...)
- روغن کاری سطح داخلی قالب برای جداسازی آسان پس از بتن ریزی
- استفاده از سیستم قالب لغزنده یا قالب مدولار برای تونل های بلندتر

۱۳-۲-۳. آرماتوربندی و نصب متعلقات

- اجرای میلگرد گذاری براساس نقشه و دستورالعمل های آئین نامه ای
- پیش بینی آرماتورهای خاص در محل درزهای اجرایی، نقاط تلاقی یا تکیه گاه ها
- کارگذاری لوله های زهکش، هواکش، عبور تاسیسات و قطعات الحاقی در محل مورد نیاز

۱۳-۳. آماده سازی و تولید بتن

- بتن رده بالا با نسبت آب به سیمان پایین (حداکثر ۰.۴۵، عموماً کمتر)
- استفاده از افزودنی فوق‌روان‌کننده و آب‌بندکننده برای افزایش دوام
- کنترل دانه‌بندی یکنواخت، عدم شیرابه و حباب هوا، اختلاط کامل

۴-۱۳. بتن‌ریزی و تراکم

- اجرای بتن‌ریزی از پایین به بالا در قطعات قالب‌بندی شده
- کارگذاری ویرنه مکانیکی و مناسب برای جلوگیری از حبس هوا و ایجاد ترک
- امکان پمپ کردن بتن به مقاطع دور از دسترس یا پر حجم
- نظارت مستمر کیفی و عیب‌یابی سریع

۵-۱۳. عمل‌آوری و نگهداری بتن

- پوشش مرطوب و آب‌پاشی بتن تازه برای ۷ تا ۱۴ روز (یا استفاده از عمل‌آور بخار)
- جلوگیری از خشک شدن سریع، گرم‌شدگی سطح یا یخ‌زدگی (در فصول سرد)
- پایش دمای داخل بتن برای کنترل ترک‌های حرارتی ناشی از هیدراتاسیون

۶-۱۳. بازکردن قالب و ترمیم نقاط آسیب‌دیده

- بازکردن قالب پس از طی عمل‌آوری اولیه و کسب مقاومت موردنیاز
- بازرسی دقیق سطح لایننگ از لحاظ تخلخل، رگه، نشت یا حفره موضعی
- ترمیم نقاط آسیب‌دیده با ملات تعمیراتی یا دوغاب اپوکسی مقاوم

۷-۱۳. کنترل کیفیت و انطباق با استانداردها

- نمونه‌گیری و آزمون بتن (مکعبی/استوانه‌ای)، کنترل ضریب نفوذپذیری، دوام در برابر سولفات، کلر و سرما

- بررسی ابعاد، تکرانس ها و انطباق پروفیل لاینینگ با نقشه
- ثبت کنترل کیفیت در هر مقطع اجرایی
- انجام تست آب بندی (در صورت ضرورت، تست لوله گذاری و زهکش ها)

۸-۱۳. نکات اجرایی مهم و چالش ها

- مدیریت زمان اجرا و برنامه ریزی مناسب جهت جلوگیری از ترک اجرایی و تأخیر در قالب بندی
- مدیریت زهکشی و دفع آب های نفوذی یا زیرزمینی پیش از بتن ریزی
- برنامه ریزی برای درزهای اجرایی، آب بندها و واتراستاپ در محل مناسب
- آموزش نیروی انسانی و نظارت مستمر فنی

۹-۱۳. جمع بندی

اجرای پوشش داخلی بتن برجا (لاینینگ)، یکی از مراحل کلیدی و تعیین کننده در تکمیل سازه ای و بهره برداری ایمن تونل های راه و راه آهن به شمار می آید. این پوشش با هدف تضمین پایداری دائمی تونل، آب بندی کامل، محافظت از پوشش اولیه و تحمل بارهای وارده محیطی و دینامیکی اجرا می شود. فرآیند اجرای لاینینگ نیازمند رعایت دقیق اصول طراحی سازه ای بر اساس تحلیل های عددی، مشخصات ژئوتکنیکی و الزامات آیین نامه ای است.

در این فصل، روند آماده سازی بستر پوشش برجا (پاک سازی سطح، اجرای شاتکریت یا لایه واسط در صورت نیاز، نصب واتراستاپ و المان های آب بندی)، طراحی و اجرای قالب بندی های لغزنده یا مدولار، انتخاب دقیق طرح اختلاط بتن (با تاکید بر دوام، مقاومت، کنترل ترک، و پایداری در محیط زیرزمینی)، نحوه جادهی و تراکم بتن در مقاطع محدود تونلی و مدیریت فرآیند عمل آوری با توجه به خطرات افت دما، نفوذ پذیری، و زمان بندی کارگاهی به تفصیل بحث شده است.

توجه خاص به کنترل کیفیت شامل آزمایش بتن تازه و سخت شده، کنترل تراکم، ضخامت پوشش، کیفیت سطحی، و آب بندی سرد درزهای اجرایی، از پیش نیازهای عملکرد بهینه و دوام لاینینگ محسوب می شود.

همچنین چالش‌های اجرایی نظیر مدیریت آب‌های نفوذی، محدودیت‌های فضایی، همزمانی اجرای تجهیزات تاسیساتی، و تطابق برنامه زمان‌بندی با سرعت پیشرفت حفاری و پوشش اولیه، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در نهایت، اجرای موفق پوشش داخلی بتن برجا مستلزم هم‌افزایی دقیق میان طراحی مهندسی، کنترل کیفی مداوم، مدیریت اجرایی کارآمد و رعایت استانداردهای ملی و بین‌المللی است تا پایداری بلندمدت، آب‌بندی و ایمنی کامل سازه تونل تضمین شود.

فصل چهاردهم - بررسی هزینه ساخت پوشش داخلی تونل‌های راه و راه آهن

۱-۱۴. مقدمه

پوشش داخلی تونل‌ها بخش قابل توجهی از هزینه کلی پروژه‌های تونل‌سازی راه و راه آهن را به خود اختصاص می‌دهد. انتخاب شیوه اجرای پوشش (بتن برجا، سگمنت پیش ساخته و سایر روش‌ها)، شرایط زمین‌شناسی، نوع تونل، ابعاد مقطع، تکنولوژی روز و سیاست‌های اجرایی نقش تعیین‌کننده‌ای در هزینه نهایی دارند.

۲-۱۴. اجزای اصلی هزینه‌های پوشش داخلی

۱-۲-۱۴. هزینه‌های مصالح مصرفی

- بتن (مرسوم و ویژه): نسبت آب به سیمان، افزودنی‌ها، حمل مصالح
- آرماتور/مش فولادی: تناژ مصرفی، نوع فولاد و پوشش ضد خوردگی
- ملات تزریق، آب‌بندها و افزودنی‌های شیمیایی
- قالب‌بندی و سیستم‌های تکیه‌گاهی

۲-۲-۱۴. هزینه تجهیزات و ماشین‌آلات

- قالب‌گذاری لغزنده یا مونتاژ سگمنت
- پمپ بتن، لودر و جرثقیل
- تجهیزات حمل و جابجایی سگمنت یا بتن

۳-۲-۱۴. هزینه نیروی انسانی و اجرا

- تخصص، تعداد و زمان نفر-ساعت برای امور ساخت، حمل، نصب، بتن‌ریزی، کنترل کیفی و ...
- هزینه آموزش و ایمنی

۴-۲-۱۴. هزینه کنترل کیفیت و آزمایش‌ها

- نمونه گیری بتن و آرماتور

- آزمایش دوام، آب بندی، نشست و انطباق اجرایی

۵-۲-۱۴. هزینه های غیر مستقیم

- هزینه های بالادستی (مدیریت، طراحی، بیمه و مالیات)

- تأخیرات پروژه، جبران ریسک های ژئوتکنیکی و موارد پیش بینی نشده

۳-۱۴. مقایسه هزینه ای روش های مختلف پوشش داخلی

۱-۳-۱۴. لایننگ بتن برجا

- سرمایه گذاری اولیه قالب بندی بالا، ولی مصالح محلی و هزینه حمل کمتر

- مناسب برای تونل های کوتاه و مقاطع متغیر

- حساسیت هزینه به طول آماده سازی و ایمنی اجرا

۲-۳-۱۴. سگمنت بتنی پیش ساخته

- هزینه اولیه بالا بابت تجهیز کارخانه و قالب ها

- کاهش زمان اجرا و افزایش سرعت پیشروی (و کاهش هزینه غیر مستقیم)

- مناسب برای تونل های طولانی، تکراری و تی بی ام

۳-۳-۱۴. سایر روش ها (بتن پاششی، پوشش مرکب و ژئوسنتتیک)

- بتن پاششی به عنوان پوشش موقتی یا نهایی در برخی تونل های شهری و کوهستانی کم هزینه تر است

ولی دوام و آب بندی کمتری دارد

- روکش ژئوسنتتیک و ممبران قیمت بالاتری دارد اما در آب بندی تونل های خاص اثر بسزایی دارد

۴-۱۴. عوامل مؤثر بر هزینه ساخت پوشش داخلی تونل

- شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی: ناپایداری، نفوذ آب، آبرفت یا سنگ سخت
- ابعاد و شکل مقطع تونل: افزایش حجم بتن و آرماتور
- شرایط آب‌وهوایی و موقعیت پروژه: حمل مصالح، شرایط دسترسی، تأثیر بر عملکرد بتن
- نوع بهره‌بردار (راه یا راه‌آهن): استانداردهای سخت‌گیرانه‌تر در راه‌آهن (حرکت دینامیکی، نشست)
- جدول زمانی پروژه: تأخیرات و افزایش هزینه غیرمستقیم
- سیاست‌های اجرایی و پیمانکاری: شیوه مناقصه، مدیریت ریسک، پرداخت تعدیل و ادعاها
- قیمت بازار مصالح و نرخ ارز

۵-۱۴. برآورد و کنترل هزینه در مراحل مختلف پروژه

- تهیه متره و برآورد دقیق (BOQ) طبق نقشه‌های اجرایی و فهرست‌بها
- پایش دائمی هزینه‌ها توسط سیستم مدیریت پروژه (PMS) و کنترل انحراف
- استفاده از نرم‌افزارهای برآورد (Primavera، MS Project، PriMus، D3Civil و غیره)
- تجربیات منحنی یادگیری برای بهبود برآورد پروژه‌های بعدی

۶-۱۴. تجربه‌های هزینه‌ای پروژه‌های منتخب ایران و جهان

- نمونه‌هایی از پروژه‌های بزرگ (تونل امامزاده هاشم، تونل البرز، تونل تهران-شمال، متروی تهران)
- مقایسه نسبت هزینه پوشش داخلی به هزینه کل اجرا (عموماً ۲۰ تا ۳۰ درصد پروژه)

۷-۱۴. جمع‌بندی

فصل حاضر به بررسی جامع عوامل مؤثر بر هزینه ساخت پوشش داخلی تونل‌های راه و راه‌آهن می‌پردازد. هدف، ارائه یک مدل تحلیلی به‌منظور ارزیابی دقیق و مدیریت بهینه هزینه‌های مرتبط با این بخش حیاتی از

پروژه‌های تونل‌سازی است. پوشش داخلی، که وظیفه اصلی آن تضمین پایداری بلندمدت، آب‌بندی، و ایمنی بهره‌برداری است، سهم قابل توجهی از بودجه کلی پروژه را به خود اختصاص می‌دهد.

در این فصل، هزینه‌های مستقیم شامل مواد اولیه (سیمان، فولاد، افزودنی‌ها، مواد آب‌بندی)، نیروی انسانی (تیم‌های اجرایی، کارشناسان کنترل کیفیت، متخصصین نصب)، تجهیزات و ماشین‌آلات (قالب‌بندی، پمپ بتن، دستگاه‌های شاتکریت، ماشین‌آلات حمل و نقل)، انرژی (برق، سوخت) و هزینه‌های حمل‌ونقل مصالح به کارگاه به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند. تاثیر پارامترهای فنی نظیر روش حفاری (TBM، NATM)، انفجاری)، نوع پوشش (بتن برجا، قطعات پیش‌ساخته)، مقطع تونل، شرایط زمین‌شناسی، عمق تونل، و الزامات آب‌بندی بر هزینه‌ها تحلیل می‌گردد.

همچنین، هزینه‌های غیرمستقیم شامل هزینه‌های بالاسری پروژه، بیمه، مالیات، هزینه‌های مدیریت و نظارت، هزینه‌های تجهیز و برچیدن کارگاه، هزینه‌های تأمین آب و برق، هزینه‌های حفظ ایمنی و بهداشت کار، و هزینه‌های مربوط به مسائل زیست‌محیطی مدنظر قرار می‌گیرند. در این راستا، نقش کلیدی برنامه‌ریزی دقیق، مدیریت ریسک، انتخاب پیمانکار مجرب، و استفاده از فناوری‌های نوین در کاهش هزینه‌ها تبیین می‌شود.

در نهایت، این فصل با ارائه یک چارچوب جامع برای تخمین، ارزیابی، و کنترل هزینه‌های ساخت پوشش داخلی تونل‌ها، ابزاری کارآمد در اختیار مهندسان، مدیران پروژه، و کارفرمایان قرار می‌دهد تا با اتخاذ تصمیمات آگاهانه و بهینه‌سازی فرآیندها، ضمن حفظ کیفیت و ایمنی، به کاهش هزینه‌ها و بهبود اقتصادی پروژه‌ها دست یابند.

سخنان پایانی گردآورنده:

فرایند گردآوری و تدوین این مجموعه، حاصل سال‌ها تجربه عملی، مطالعه مستمر و علاقه‌مندی عمیق اینجانب به حوزه مهندسی است. باور دارم که هر دستاورد علمی، تنها با مشارکت جمعی، انتقال بی‌منت دانش و همدلی متخصصان معنا پیدا می‌کند. این مجموعه تلاشی است برای انتقال بخشی از آموخته‌ها و تجارب حقیر، با امید به آنکه بتواند برای دانشجویان، مهندسان و علاقه‌مندان این حوزه سودمند باشد.

بدیهی است این اثر خالی از اشکال و نقص نخواهد بود. سپاسگزار خواهم شد اگر مهندسین و استادان ارجمند ضمن مطالعه، موارد اصلاحی و پیشنهادهای سازنده خود را از طریق ایمیل درج‌شده در اختیار اینجانب بگذارند تا در بازنگری‌های بعدی مورد توجه قرار گیرد.

به امید آن‌که این مجموعه گامی کوچک در مسیر ارتقای دانش فنی کشور و تسهیل مسیر مهندسی باشد.

پایان - خدانگهدار