



اصول مهندسی تونل

(رشته مهندسی عمران)

مهندس فاطمه اخلاقی

دکتر سهیل قره

«امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.»^۱

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چند هزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پربار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

۱. پیام مقام معظم رهبری به مناسبت آغاز هفته کتاب ۷۲/۱۰/۴

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «اقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

پیشگفتار	نه
مقدمه	یازده
فصل اول: تاریخچه مهندسی تونل و ملاحظات برنامه‌ریزی	۱
هدف کلی	۱
هدف‌های یادگیری	۱
۱-۱ تاریخچه تونل‌سازی	۲
۲-۱ انواع تونل‌ها	۳
۱-۲-۱ طبقه‌بندی براساس نوع کاربری	۳
۲-۲-۱ طبقه‌بندی براساس پایداری سازه	۶
۳-۲-۱ طبقه‌بندی براساس شکل مقطع تونل	۷
۳-۱ مشکلات طراحی	۸
۴-۱ مراحل طراحی	۹
۱-۴-۱ جمع‌آوری مقدماتی داده‌ها	۹
۲-۴-۱ مطالعات امکان‌سنجی	۱۳
۳-۴-۱ بررسی تفصیلی ویژگی‌های ساختگاه	۱۳
۴-۴-۱ طراحی نهایی و اجرا	۱۷
۵-۱ عوامل مؤثر در طراحی فضاهای زیرزمینی	۱۸
۱-۵-۱ کاربری	۱۸
۲-۵-۱ زمین‌شناسی	۲۱
۳-۵-۱ شرایط هیدرولیکی	۲۱
۴-۵-۱ خصوصیات مصالح	۲۱
۵-۵-۱ اقتصاد	۲۱
۶-۱ نکات قابل توجه در طراحی انواع تونل	۲۲
۱-۶-۱ تونل‌های انتقال آب	۲۲
۲-۶-۱ تونل‌های آب‌بر در نیروگاه‌های زیرزمینی	۲۲

۲۲	۱-۶-۳ تونل‌های ذخیره‌سازی و انبار
۲۲	۱-۶-۴ تونل‌های راه‌آهن
۲۳	۱-۶-۵ تونل‌های راه
۲۳	۱-۶-۶ کارگاه‌های استخراجی در معادن
۲۳	خلاصه فصل اول
۲۴	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول
۲۵	خودآزمایی تشریحی فصل اول
۲۷	فصل دوم: تحلیل اطلاعات زمین‌شناسی
۲۷	هدف کلی
۲۷	هدف‌های یادگیری
۲۷	۱-۲ تأثیر شرایط زمین‌شناسی بر تونل‌سازی
۲۸	۲-۲ حفر تونل در خاک
۲۹	۳-۲ حفر تونل در سنگ
۲۹	۲-۳-۱ سنگ‌های آذرین
۲۹	۲-۳-۲ سنگ‌های رسوبی
۳۰	۲-۳-۳ سنگ‌های دگرگونی
۳۰	۲-۴ ساخت‌های زمین‌شناسی
۳۱	۲-۴-۱ انواع ساخت در سنگ آذرین
۳۳	۲-۴-۲ ساخت در سنگ‌های رسوبی
۵۲	۲-۵ مخاطرات زمین‌شناسی
۵۲	۲-۵-۱ زمین‌های رانشی
۵۳	۲-۵-۲ زمین‌های کارستی
۵۴	۲-۵-۳ زمین آماس‌پذیر
۵۵	۲-۵-۴ زمین لغزش
۵۶	۲-۵-۵ زمین لرزه
۵۹	۲-۶ آب‌های زیرزمینی
۶۱	۲-۷ گازهای موجود در سنگ‌ها
۶۱	۲-۸ دمای سنگ
۶۲	خلاصه فصل دوم
۶۳	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل دوم
۶۴	خودآزمایی تشریحی فصل دوم
۶۵	فصل سوم: طبقه‌بندی مهندسی سنگ
۶۵	هدف کلی
۶۵	هدف‌های یادگیری
۶۵	۳-۱ مفاهیم مربوط به طبقه‌بندی سنگ‌ها و ضرورت آن
۶۸	۳-۲ طبقه‌بندی سنگ به کمک روش ترزاقی

۷۰	۳-۳ شاخص کیفیت سنگ (RQD)
۷۳	۳-۴ طبقه‌بندی توده سنگ به روش RMR
۷۹	۳-۵ سیستم طبقه‌بندی Q
۸۶	۳-۶ رده‌بندی امتیازدهی ساختاری سنگ RSR
۹۰	خلاصه فصل سوم
۹۱	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل سوم
۹۲	خودآزمایی تشریحی فصل سوم
۹۵	فصل چهارم: تحلیل تنش‌ها در اطراف حفاری‌ها و تونل‌ها
۹۵	هدف کلی
۹۵	هدف‌های یادگیری
۹۵	۴-۱ تحلیل تنش‌ها در اطراف حفره‌های منفرد
۹۷	۴-۱-۱ تنش عمودی برجا
۹۹	۴-۱-۲ تنش افقی برجا
۱۰۰	۴-۱-۳ روش‌های اندازه‌گیری تنش برجا
۱۰۵	۴-۲ تنش در اطراف حفره‌های منفرد
۱۰۵	۴-۲-۱ جهت تنش‌های اصلی
۱۰۶	۴-۲-۲ مسیر تنش‌های اصلی
۱۰۸	۴-۳ روابط توزیع تنش‌ها در تونل‌های دایره‌ای
۱۰۸	۴-۳-۱ تنش تک‌محوره
۱۱۰	۴-۳-۲ تنش دو محوره
۱۱۱	۴-۳-۳ شعاع تأثیر تونل
۱۱۲	۴-۴ تونل‌های با مقاطع چهارگوش
۱۱۳	۴-۵ تنش در اطراف حفره بیضوی شکل
۱۱۴	۴-۶ مشکل مقطع تونل در توزیع تنش‌ها بر جدار تونل
۱۱۶	۴-۶-۱ تعیین ناحیه تسلیم پیرامون تونل و توزیع تنش‌ها برای حفاری‌های دایره‌ای شکل
۱۱۶	خلاصه فصل چهارم
۱۱۷	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل چهارم
۱۱۸	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم
۱۱۹	فصل پنجم: طراحی سیستم‌های حائل
۱۱۹	هدف کلی
۱۱۹	هدف‌های یادگیری
۱۱۹	۵-۱ لزوم حائل‌بندی برای تونل‌ها
۱۲۰	۵-۱-۱ بررسی پایداری و دگرشکلی دهانه تونل
۱۲۱	۵-۲ روش‌های تحلیلی در محاسبه سازه نگهدارنده
۱۲۱	۵-۲-۱ روش هم‌گرایی - هم‌جواری
۱۳۰	۵-۲-۲ روش نمودار پایداری

۱۳۵	۳-۵ استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ در تخمین حائل
۱۳۵	۳-۵-۱ طبقه‌بندی کیفی توده سنگ
۱۳۸	۳-۵-۲ طبقه‌بندی لوفر
۱۳۹	۳-۵-۳ شاخص کیفیت سنگ دیر
۱۴۲	۳-۵-۴ طبقه‌بندی RMR
۱۴۴	۳-۵-۵ طبقه‌بندی بارتون
۱۴۶	۳-۵-۶ رده‌بندی RSR
۱۵۱	۴-۵ ارزیابی سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌های سنگی
۱۵۲	۴-۵-۱ توصیه‌های عمومی در روش‌های تجربی
۱۵۲	۵-۵ روش جدید تونل‌سازی اتریشی
۱۵۵	خلاصه فصل پنجم
۱۵۶	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۱۵۷	خودآزمایی تشریحی فصل پنجم
۱۵۹	فصل ششم: انواع پوشش و سازه نگهدارنده تونل
۱۵۹	هدف کلی
۱۵۹	هدف‌های یادگیری
۱۵۹	۶-۱ اصول حائل‌بندی
۱۶۰	۶-۲ انتخاب نوع پوشش
۱۶۱	۶-۳ پیش‌نگهدارنده‌ها
۱۶۱	۶-۳-۱ مسلح کردن اولیه زمین
۱۶۱	۶-۳-۲ بهسازی زمین
۱۶۴	۶-۴ پوشش اولیه
۱۶۴	۶-۴-۱ پیچ سنگ
۱۷۲	۶-۴-۲ شاتکریت
۱۷۸	۶-۴-۳ قاب مشبک (لتیس گرید)
۱۸۰	۶-۴-۴ تور سیمی
۱۸۱	۶-۵ پوشش ثانویه
۱۸۱	۶-۵-۱ پوشش داخلی بتن برجا
۱۸۳	۶-۵-۲ قطعات پیش‌ساخته بتنی
۱۸۴	۶-۵-۳ صفحات فلزی
۱۸۵	خلاصه فصل ششم
۱۸۷	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم
۱۸۸	خودآزمایی تشریحی فصل ششم
۱۸۹	پاسخنامه
۱۹۱	منابع

پیشگفتار

استفاده از سازه‌ها و فضاهاى زیرزمینی امروزه جزء لاینفک زندگى شهری است. تونل‌ها از دیرباز نقش مهمی در حیات بشری ایفا کرده‌اند که از جمله قدیمی‌ترین آن‌ها می‌توان به کانال‌های انتقال آب و تونل‌های معدنی اشاره کرد. با گسترش شهرنشینی و افزایش جمعیت و مشکلات مرتبط با ترافیک‌های شهری به‌ویژه در کلان‌شهرها، استفاده از مترو و قطار شهری و در نتیجه حفاری تونل برای حل مسائل مرتبط با جابه‌جایی و حمل‌ونقل امری گریزناپذیر است. همچنین امروزه تونل‌ها برای مقاصد گوناگونی از جمله انتقال انرژی، ذخیره و انتقال مواد هیدروکربنی و پدافند غیرعامل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به‌دلیل احداث تونل و سازه‌های زیرزمینی درون زمین، شناخت زمین، مخاطرات زمین‌شناسی و اندرکنش تونل و محیط پیرامونی، از مهم‌ترین مسائل برای انتخاب مسیر تونل‌ها و همچنین بررسی پایداری آن‌ها است. به‌طوری که عدم‌شناخت کامل زمین و مسائل مرتبط با آن، مهندسان را با چالش‌های بسیاری مواجه خواهد ساخت که گاه منجر به خسارات شدید جانی و مالی در حین ساخت و زمان بهره‌برداری می‌شود. همچنین سیستم‌های نگهدارنده و تقویت تونل نیز از مباحث ضروری اصول مهندسی تونل است.

تاکنون کتاب‌ها و مقالات متعددی در زمینه تونل‌سازی در داخل و خارج از کشور به چاپ رسیده است. در این کتاب مؤلفان تلاش کرده‌اند تا ضمن بهره‌گیری از نتایج مطالعات سایر محققان و تجربیات و مطالعات خود، مطابق با آئین‌نامه و سرفصل وزارت علوم تحقیقات و فناوری، مهندسين آینده را با اصول و مبانی کاربردی طراحی و ساخت تونل آشنا کنند. لازم به ذکر است در تمام متن تلاش شده با افزودن مراجع، حقوق نویسندگان رعایت شود و امیدواریم در صورتی که به‌دلیل تعداد زیاد منابع، مرجعی به‌طور سهوی آورده نشده، به دیده اغماض نگریسته شود. همچنین با توجه به

محدود بودن کتاب، مطالب ارائه شده همگی جنبه آشنایی دانشجویان با مسائل مربوطه را داشته و در صورت علاقه مندی پیشنهاد می شود به طور حتم آئین نامه ها و دستورالعمل های مرتبط مطالعه شود.

مقدمه

پیشرفت تکنولوژی و افزایش جمعیت در سال‌های اخیر اهمیت استفاده از فضاهای زیرزمینی را بر همگان آشکار کرده‌است. تونل‌ها از مهم‌ترین فضاهای زیرزمینی به‌شمار می‌آیند که امروزه برای مقاصد متفاوتی احداث می‌شوند. ساخت سازه‌های زیرزمینی با توجه به ناشناخته‌بودن محیط پیرامونی آن نسبت به سازه‌های احداث شده بر روی زمین با دشواری‌های خاصی همراه است. انتخاب مسیر مناسب با توجه به کاربری تونل، روش طراحی و مشکلات موجود در مسیر طراحی تونل ازجمله مسائلی است که یک مهندس طراح با آن سروکار دارد. زمین سرشار از پیچیدگی و ناهمسانی است و در مسیر ساخت تونل، شناخت زمین و پیش‌بینی رفتار آن در مواجهه با اعمال تغییرات در آن بسیار حائز اهمیت است. به‌علاوه احداث هرگونه سازه درون زمین با توجه به نوع کاربری و مدت زمان عمر مفید آن نیاز به پایدارسازی و استفاده از سازه‌های نگهدارنده و محافظ دارد. با توجه به اهمیت کسب دانش و آگاهی مهندسین عمران نسبت به ساخت تونل‌ها کتاب حاضر مطابق با سرفصل‌های وزارت علوم برای دانشجویان کارشناسی مهندسی عمران در شش فصل به‌شرح زیر آماده شده است. امید است دانشجویان پس از مطالعه این کتاب از دانش و آگاهی مناسبی در ارتباط با طراحی و احداث تونل‌ها برخوردار باشند.

در فصل اول در مورد تاریخچه تونل‌سازی، طبقه‌بندی تونل‌ها، نحوه انجام مطالعات مسیریابی و پارامترهای مؤثر در طراحی فضاهای زیرزمینی و مراحل انجام طراحی به تفصیل مطالبی ارائه خواهد شد.

فصل دوم به شناخت انواع سنگ‌ها و ساخت‌های زمین‌شناسی و مخاطرات زمین‌شناسی از جمله زمین‌های مشکل‌ساز در مسیر تونل و نحوه مواجهه و انتخاب بهترین مسیر تونل اختصاص داده شده است.

در فصل سوم انواع تقسیم‌بندی سنگ‌ها و پارامترهای مؤثر در هریک از طبقه‌بندی‌ها و مقایسه انواع سیستم‌های طبقه‌بندی شامل مزایا و محدودیت‌های هریک از آن‌ها ارائه شده است.

در فصل چهارم تنش‌های مؤثر بر توده‌های سنگی، عوامل مؤثر بر نحوه توزیع آن‌ها و روش‌های اندازه‌گیری تنش برجا، روابط بین تنش‌های افقی و عمودی، جهت تنش‌های اصلی و نحوه توزیع آن‌ها در اطراف تونل‌ها تشریح می‌شود.

در فصل پنجم در ارتباط با روش‌های مختلف تحلیلی و تجربی برای انتخاب نوع سازه نگهدارنده و حائل مناسب برای حفظ پایداری تونل و محدودیت‌ها و مزایای هریک از روش‌های انتخاب نوع سازه نگهدارنده مطالبی آورده شده است.

فصل ششم به انواع پوشش‌های مورد استفاده در تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی، عوامل مؤثر در انتخاب نوع سازه نگهدارنده و نحوه عملکرد و کاربرد پوشش‌های اولیه و ثانویه تونل اختصاص دارد.

فصل اول

تاریخچه مهندسی تونل و ملاحظات برنامه‌ریزی

هدف کلی

در این فصل ابتدا در مورد تاریخچه تونل‌سازی مطالبی بیان خواهد شد. سپس طبقه‌بندی تونل‌ها با توجه به نوع کاربری، شکل سطح مقطع و زمان پایداری آن تشریح خواهد شد. در ادامه در مورد نحوه انجام مطالعات مسیریابی شامل مطالعات دفتری و بازدیدهای صحرایی از مسیر تونل مطالبی به تفصیل ارائه خواهد شد. پارامترهای مهم در طراحی فضاهای زیرزمینی و مراحل انجام طراحی نیز از دیگر نکات مهم ارائه‌شده در این فصل است.

هدف‌های یادگیری

دانشجو در پایان این فصل باید بتواند:

۱. مراحل انجام مطالعات در طراحی تونل را شرح دهد.
۲. انواع تونل از نظر کاربری و شکل سطح مقطع را توصیف کند.
۳. مشکلات طراحی در مسیر تونل را بیان کند.
۴. عوامل مؤثر در طراحی فضاهای زیرزمینی را توضیح دهد.
۵. مراحل طراحی تونل و سازه‌های زیرزمینی را تشریح کند.

۱-۱ تاریخچه تونل سازی

احداث فضاهای زیرزمینی نظیر تونل از دیرباز در راستای توسعه جوامع بشری و رفع نیازهای گوناگون، مورد توجه بوده است. یونانیان و رومیان با کسب دانش تونل زنی از بابلیان و مصریان باستان، از تونل به منظور اهداف نظامی، انتقال آب از درون کوه و ایجاد مسیر در مناطق صعب العبور استفاده می کردند. همچنین مهندسان رومی شبکه بزرگی از تونل ها را جهت انتقال آب از چشمه های کوهستانی به شهرها و دهکده ها احداث کردند. در ایران نیز قنات ها به عنوان اولین سازه های زیرزمینی جهت انتقال آب از منابع زیرزمینی در مناطق گرم، خشک و نیمه خشک و با استفاده از وسایلی بسیار ابتدایی حفاری شده است، که طول برخی از این قنات ها به بیش از ۷۰ کیلومتر می رسد.

از قدیمی ترین تونل های احداث شده می توان به تونل بین ناپل و پوزولی اشاره کرد. تونلی که در حدود ۳۶ سال پیش از میلاد مسیح با طول تقریبی ۱۸۰۰ متر، عرض ۸ متر و ارتفاع ۱۰ متر و همچنین مجهز به کانال تهویه هوا حفاری شد. کمتر از ۱۰۰ سال بعد در سال ۴۱ میلادی، رومیان با استفاده از حدود ۳۰ هزار کارگر، تونلی با طول بیش از ۷/۶ کیلومتر را در طی ۱۱ سال احداث کردند. این تونل با فراهم کردن امکان تخلیه دریاچه فوین، موجب کاهش وسعت آن از ۱۴۰ کیلومتر مربع به ۵۷ کیلومتر مربع شد.

در سال های قرون وسطی گذرگاه های زیرزمینی برای انتقال اضطراری و جابه جایی های مخفیانه جزء لاینفک فضاهای شهری آن زمان بود. در سال ۱۶۸۱ تونل مال پاس با طول ۱۵۷ متر بر روی کانال دومیدی در جنوب فرانسه اولین تونلی بود که در دوره های مدرن با کاربرد حفاری و انفجار باروت ساخته شد. در قرن ۱۸ در انگلستان، جیمز بریندلی با نظارت بر طراحی و ساخت بیش از ۵۸۰ کیلومتر کانال و تعدادی تونل، به عنوان پدر کانال و تونل های کانالی نامیده شد. وی در سال ۱۷۵۹ با ساخت یک کانال به طول ۱۶ کیلومتر مجموعه معدن ذغال دوک بریدجواتر را به شهر منچستر متصل کرد. اثر اقتصادی تکمیل این کانال، کاهش پنجاه درصدی قیمت ذغال در شهر و ایجاد یک انحصار واقعی برای معدن مذکور بود.

یکی از موانع مهم در پیشرفت صنعت تونل زنی، لزوم استفاده از مواد منفجره و یا وسایل بسیار سخت و برنده در سنگ های سخت بود. همچنین به دلیل مشکل

نگهداری تونل در سنگ‌های خیلی نرم و رسوبات سخت نشده، تا قبل از اختراع شیلد^۱ در سال ۱۸۱۲، ایجاد تونل‌های بزرگ مقطع در رسوبات سست بسیار دشوار به نظر می‌رسید. در ۱۸۲۵ برای اولین بار، شیلد در حفر تونل زیر رودخانه تیمز مورد استفاده قرار گرفت. با این حال حفر این تونل ۱/۵ کیلومتری، حدود ۱۸ سال به طول انجامید. همچنین ساخت تونل‌های زهکشی نقش مهمی در توسعه صنعت تونل‌سازی داشته‌اند که از جمله می‌توان به تونلی با طول ۷ کیلومتر در هیل کارن انگلستان اشاره کرد.

با توسعه سریع دانش زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، طراحی تونل، روش‌های ساخت‌وساز و تعمیر و نگهداری در طول بهره‌برداری و هم‌زمان با انقلاب صنعتی، به‌ویژه با توسعه صنعت حمل‌ونقل، تونل‌سازی رشد قابل‌ملاحظه‌ای یافت. در سال ۱۸۵۶ در آمریکا، اولین ماشین ثبت شده توسط جان ویلسون برای تونل هوساک در ماساچوست تنها توانست ۳ متر از تونل ۷۶۰۰ متری را حفر کند، اما در دهه‌های اخیر این نوع ماشین‌ها به‌حدی توسعه یافته‌اند که در بسیاری از موارد، به‌عنوان اولین گزینه برای حفر تونل در نظر گرفته می‌شوند.

پیشرفت اساسی در حوزه فناوری‌های ساخت‌وساز در طول قرن بیستم منجر به شکوفایی توسعه فضاهای زیرزمینی شهری به‌ویژه در شهرهای متراکم و ساخت تونل‌های بزرگ در زیر سطوح کم عمق شد.

۱-۲ انواع تونل‌ها

انواع تونل‌ها براساس نوع کاربری، پایداری سازه و شکل مقطع به چندگروه تقسیم می‌شود که در ادامه توضیحات مربوط به هریک از آن‌ها ارائه خواهد شد.

۱-۲-۱ طبقه‌بندی براساس نوع کاربری

امروزه فضاهای زیرزمینی با ابعاد متفاوت، برای کاربردهای گوناگون احداث می‌شوند که از میان آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

تونل‌های حمل‌ونقل و دسترسی (راه، راه‌آهن و مترو): برخورداری از راه‌های ارتباطی مناسب و کارآمد از جمله شاخصه‌های توانمندی کشورها در زمینه حمل‌ونقل

کالا و مسافر است. تونل‌ها با بهبود شرایط هندسی، کوتاه کردن طول مسیر، افزایش راندمان ترافیکی، حمل و نقل سریع و پیشگیری از وقوع حوادثی مانند ریزش کوه و بهمن، امکان اتصال مناطق صنعتی و مسکونی که نیازمند شاهراه‌های حمل و نقل برای ارتباط با یکدیگر هستند، را فراهم می‌کند. محدودیت‌های هندسی در مسیرهای راه‌آهن، به‌ویژه عدم اجرای قوس‌های با شعاع کم و محدودیت زیاد در شیب‌های بیش از ۴ درصد، موجب شده تونل‌ها در مسیرهای راه‌آهن بیشترین کاربرد را داشته باشند.

- **تونل‌های انتقال آب:** این تونل‌ها شامل تونل‌های انحراف آب، تونل‌های آب‌گیر، تونل‌های آب‌رسانی شهری و تونل‌های تخلیه آب و فاضلاب است. تونل‌های انحراف آب در ابتدای ساخت سدها جهت انحراف آب رودخانه کاربرد دارد تا بتوانند سد را در محل اصلی آن بسازند. سطح مقطع این تونل‌ها بیشتر دایره‌ای و ابعاد سطح مقطع به دبی آب انتقالی بستگی دارد.

- **فضاهای زیرزمینی بزرگ (نیروگاه‌ها، انبارهای زیرزمینی):** فضاهای زیرزمینی بزرگ، جهت ذخیره‌سازی منابع مختلف از جمله نفت و گاز، آب آشامیدنی، تصفیه‌خانه و همچنین باطله‌های اتمی استفاده می‌شود. در کشورهای سردسیر مانند نروژ به‌منظور صرفه‌جویی در مبحث انرژی و کاهش هزینه‌های نگهداری از چنین فضاهای زیرزمینی جهت ذخیره نفت خام استفاده می‌شود. به‌طورمثال امروزه بیش از ۵ میلیون مترمکعب نفت در مغارهای بزرگ زیرزمینی این کشور ذخیره می‌شود. همچنین امروزه در کشور فنلاند ۳۵ مغار به ظرفیت کلی ۵/۲ میلیون مترمکعب وجود دارد که به‌تدریج طی سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۸۲ در ۲۲ واحد سنگی مجزا از جنس گرانیت و گنایس حفر شده و مواد هیدروکربوری در مغارهای بدون پوشش ذخیره شده‌اند.

- **تونل‌های معدنی:** تونل‌های معدنی به‌منظور دسترسی، شناسایی و استخراج مواد معدنی احداث می‌شوند. حفر راهروهای سنگی و تونل‌ها، بخش مهمی از معدن‌کاری زیرزمینی را شامل می‌شود. ضریب ایمنی تونل‌های معدنی به‌دلیل طول عمر کوتاه آن‌ها، از تونل‌های راه و راه‌آهن کمتر است. عمر مفید تونل‌های معدنی تابع نوع استفاده و هدف از حفر تونل است. درحالی‌که تونل‌های راه، راه‌آهن، مترو و نظایر آن‌ها باید سال‌های سال و برای چندین نسل باقی بمانند، برخی از تونل‌های معدنی مانند تونل‌های شبکه‌بندی کارگاه استخراج، کافی است عمری کمتر از یک

ماه داشته باشند و بعضی دیگر مانند تونل‌های باربری اصلی باید تا پایان عمر معدن دوام داشته باشند. تونل‌های معدنی به شرح ذیل تقسیم‌بندی می‌شوند:

- تونل‌های اکتشافی: این گونه تونل‌ها برای اکتشاف معادن جدید به کار می‌روند و بیشتر دارای عرض کم درحد یک متر هستند.
- تونل‌های استخراجی: این تونل‌ها رگه معدنی را به منظور استخراج مواد معدنی تعقیب می‌کنند و ممکن است تنها نقش کارگاه استخراج را داشته باشند. در این صورت اغلب مقاطع آن‌ها شباهتی به تونل نداشته و با پیشروی در رگه معدنی تنها فضای خالی بین سنگ‌ها را ایجاد می‌کند. حداقل عرض این تونل‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شود تا بتوان توسط لوکوموتیو، مواد استخراجی را به بیرون منتقل کرد.
- تونل‌های تهویه: تونل‌های تهویه دارای شکل، مقطع خاص و شیب معینی نبوده و به منظور ایجاد مسیرهای تهویه هوا از داخل تونل‌ها به سطح زمین در کوتاه‌ترین مسیر و کمترین سطح مقطع، ساخته می‌شوند. این نوع تونل‌ها را تونل‌های ایزوبویکا نیز می‌نامند.
- تونل‌های دسترسی: این نوع از تونل‌ها معمولاً عمود بر لایه معدنی حفر می‌شوند تا پس از رسیدن به لایه‌های معدنی، بتوانند آن‌ها را استخراج کنند.
- تونل‌های زهکشی: به منظور استخراج آب درحین برخورد تونل معدنی به لایه‌های آبدار و یا جهت زهکشی مواد اسیدی معدن به خارج از معدن، از تونل‌های زهکشی استفاده می‌شود. جهت زهکشی آب لایه‌های بالاتر، بیشتر در تراز پایین‌تر نسبت به حفر تونل‌های زهکش اقدام می‌شود.
- **تونل‌های پدافند غیرعامل:** پدافند غیرعامل به معنای کاهش آسیب‌پذیری در هنگام بحران‌هایی مانند سیل^۱، زلزله^۲ بدون استفاده از اقدامات نظامی و فقط با بهره‌گیری از فعالیت‌های غیرنظامی، فنی و مدیریتی است و با اجرای آن می‌توان از واردشدن خسارات مالی به تجهیزات و تأسیسات حیاتی و حساس نظامی و غیرنظامی و تلفات انسانی پیشگیری و یا میزان این خسارات و تلفات را به حداقل ممکن کاهش داد. در تونل‌های پدافند غیرعامل علاوه بر استفاده از اصول دقیق مهندسی در شناسایی، حفاری و استحکام تونل، پارامتر اختفا، استتار و دسترسی بسیار حائز اهمیت است. در

1. Flood

2. Earthquake

تمامی سازه‌های زیرزمینی باید اصول پدافند غیرعامل لحاظ شود تا در زمان بحران به عنوان جان‌پناه مورد استفاده قرار گیرند.

۲-۲-۱ طبقه‌بندی براساس پایداری سازه

تونل‌ها را می‌توان با توجه به پایداری سازه و جنبه دائمی و موقتی بودن آن نیز طبقه‌بندی کرد. دستیابی به پایداری بیشتر چه در زمان ساخت پروژه و چه در طول مدت بهره‌برداری از آن، نیاز به آگاهی دقیق از شرایط زمین‌شناسی و مشخصات ژئوتکنیکی زمین و مصالح دارد. همچنین با توجه به موقت بودن و دائمی بودن و عمر مفید پیش‌بینی شده برای تونل میزان پایداری متفاوت خواهد بود. گروه‌های ارائه شده در جدول ۱-۱ به ترتیب از A تا F میزان پایداری، با توجه به کاربری و عمر مفید تونل‌ها افزایش می‌یابد.

جدول ۱-۱. طبقه‌بندی فضاهاى زیرزمینی با توجه به اهمیت پایداری آن‌ها [۱]

گروه	انواع
A	فضاهای موقتی (اغلب تونل‌ها و فضاهاى ایجاد شده در معادن زیرزمینی)
B	تونل‌های قائم (چاه‌های با قطر زیاد که در معادن، سدسازی و دیگر امور ساختمانی احداث می‌شوند)
C	فضاهای دائمی معدنی (مانند تونل‌های اصلی معادن) تونل‌های انتقال آب در پروژه‌های برق‌آبی (به‌استثنای تونل‌های تحت فشار) تونل‌های پیشاهنگ و اکتشافی برای فضاهاى بزرگ زیرزمینی
D	تونل‌های کوچک راه و راه‌آهن انبارها و تصفیه‌خانه‌های زیرزمینی حفرات ضربه‌گیر هیدرولیکی برای تونل‌های تحت فشار تونل‌های دسترسی برای پروژه‌های برق‌آبی
E	تونل‌های بزرگ راه و راه‌آهن فضاهای بزرگ جهت نیروگاه‌های هیدرولیکی پناهگاه‌های نظامی
F	ایستگاه‌های مترو نیروگاه‌های اتمی زیرزمینی

۱-۲-۳ طبقه‌بندی براساس شکل مقطع تونل

انتخاب شکل مقطع و ابعاد تونل تابع عواملی همچون نوع کاربری، سیستم حفاری و روش نگهداری دائمی آن است. در مواردی که امکان انتخاب شکل‌های مختلف فراهم باشد، شکل مقطع را باید طوری انتخاب کرد که هزینه‌های کلی احداث تونل به حداقل برسد. تقسیم‌بندی تونل‌ها براساس شکل سطح مقطع به شرح ذیل هستند:

- **مقطع دایره‌ای:** این نوع مقطع، به لحاظ مقاومت در برابر تنش‌های وارده به‌ویژه در زمین‌های نرم و در شرایطی که احتمال تورم و بالازدگی کف تونل وجود دارد، بسیار مناسب است. همچنین در صورت استفاده از دستگاه‌های حفاری TBM، شکل مقطع دایره‌ای در نظر گرفته می‌شود. با این حال در صورت انتخاب این شکل مقطع، لازم است پس از حفاری و تحکیم، با صرف هزینه‌های بالا کف تونل مسطح و قابل استفاده شود [۲-۳]
- **مقطع چهارگوش:** در صورتی که ضخامت روباره یا فشارهای مؤثر وارد بر دیواره تونل کم باشد، به دلایل اقتصادی از این نوع مقطع برای ساخت تونل استفاده می‌شود. تونل‌های اجرا شده به روش کند و پوش به‌ویژه در مناطق شهری از این نوع هستند. همچنین در صورت اجرای سقف تونل‌ها به شکل قوسی، استفاده از این سیستم، به‌ویژه در مورد تونل‌های کوچک، به لحاظ اقتصادی مناسب‌تر است [۴].
- **مقطع نعل اسبی:** به دلیل توانایی تحمل فشارهای عمودی و جانبی در سقف و دیواره در مقطع نعل اسبی، اکثر تونل‌های راه و راه‌آهن به این شکل ساخته می‌شوند. معمولاً شعاع قوس کف و دیواره‌ها دو برابر شعاع قوس سقف در نظر گرفته می‌شود. همانند مقاطع دایره‌ای شکل، امکان استفاده از قاب‌های فلزی برای نگهداری این تونل‌ها از امتیازات این روش به‌شمار می‌آید. همچنین سهولت امکان بارگیری و حمل مصالح حاصل از حفاری و نیز امکان استفاده از مواد منفجره به علت کف کمابیش صاف از دیگر مزایای این مقطع نسبت به مقطع دایره‌ای است [۴-۵].
- **مقطع Ω :** این مقطع شبیه حرف D انگلیسی با دوران ۹۰ درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت است و در زمین‌های سنگی که فشار وارد بر دیواره تونل قابل توجه نباشد، بهترین نوع مقطع است. در این مقطع شکل دیواره‌ها کمابیش قائم و قسمت بالای آن قوسی شکل (نیم‌دایره) است [۵].

۳-۱ مشکلات طراحی

طراحی فضاهای زیرزمینی به مفهوم طراحی سیستم‌های حائل برای این سازه‌ها است. پایداری یک سازه زیرزمینی با توجه به رفتار زمین اطراف آن نیاز به محاسبات و روش‌های طراحی متفاوتی دارد. بنابراین مهم‌ترین مسئله جهت محاسبه و تخمین سیستم نگهداری و سایر محاسبات، شناخت رفتار واقعی زمین است و روش یا روش‌های مناسب طراحی با توجه به شرایط توده‌سنگ و رفتار زمین، انتخاب می‌شود.

به‌طورکلی شرایط درون‌زمین بسیار متغیر است و برخلاف سطح زمین، امکان شناسایی و دسترسی به تمام نقاط آن نیز وجود ندارد. در سازه‌های مهندسی معمولاً طراحی عناصر مهندسی مورد نظر است، ولی در مورد تونل‌ها حتی در صورتی که مغار حفاری شده با استفاده از روش‌های مختلف از جمله به‌کاربردن میل مهارها، بتن‌پاشی و تمهیدات دیگر تقویت شوند، نمی‌توان در مورد پایداری و ضریب ایمنی سازه به اعداد دقیقی رسید. به‌بیانی دیگر طراح سازه‌ای که قرار است در سطح زمین احداث شود می‌تواند مصالح مورد نیاز خود را انتخاب کند، درحالی‌که طراح تونل به اجبار باید سازه خود را در میان سنگ و خاکی که طبیعت در اختیار او قرار داده، حفر کند.

بنابراین به‌دلیل متغیربودن شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در ساختگاه پروژه‌های مختلف، روش‌های طراحی، محاسبه و اجرا نیز متفاوت خواهد بود. همچنین ضروری است در تمام مراحل تجربیات گذشته و اصول علمی و فنی مورد نظر قرار گیرد.

در طراحی مهندسی حفاری زیرزمینی، داده‌های ورودی مورد نیاز شامل تنش‌های برجا، فشار آب حفره‌ای، مقاومت و پارامترهای تغییرشکل توده‌سنگ هستند. برای انتخاب شکل حفاری‌های زیرزمینی، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری، مقادیر واقعی این پارامترها ضروری هستند و بدون در نظر گرفتن مقادیر واقعی، مراحل طراحی مهندسی امکان‌پذیر نیست.

زمین‌های سست، ریزشی، خرد شده و گسل‌خورده^۱، هوازده^۲ و آماس‌پذیر^۳ (متورم‌شونده) و آبدار، بیشترین مشکلات را برای حفر تونل به‌وجود می‌آورند و این درحالی است که در بسیاری از موارد تونل‌های راه یا راه‌آهن محل‌های گذر اجباری‌اند

1. Fault zone
2. Weathered
3. Swelling ground

و مسیر مورد نظر برای رسیدن به زمین قابل اطمینان نمی‌تواند تا حد زیادی تغییر کند. در چنین شرایطی وظیفه طراح است تا با مطالعه مسیر موجود و کسب اطلاعات لازم طراحی تونل را به نحوی انجام دهد تا با به‌کارگیری کمترین پوشش استحکامات داخلی، سازه زیرزمینی پایداری قابل قبولی در برابر عوامل مخرب داشته باشد.

۴-۱ مراحل طراحی

مراحل طراحی تونل‌ها شامل جمع‌آوری مقدماتی داده‌ها، مطالعات امکان‌سنجی، بررسی تفصیلی ویژگی‌های ساختگاه و سرانجام طراحی نهایی و اجرا است.

۱-۴-۱ جمع‌آوری مقدماتی داده‌ها

اولین گام در طراحی فضاهای زیرزمینی شناسایی زمین است. شناسایی دقیق زمین می‌تواند درصد برخورد به پیشامدهای احتمالی را کاهش داده و متقابلاً عدم‌توجه به آن ممکن است عواقب ناخواسته‌ای را به‌همراه داشته باشد.

برنامه کاوش‌های زیرسطحی مسیر تونل‌ها و مغارها (فضاهای بزرگ زیرزمینی) باید با توجه به پیچیدگی‌های زمین‌شناختی، شرایط هیدروژئولوژی، ضخامت روباره و اهمیت سازه برای مراحل مختلف مطالعات تنظیم شود. چنانچه برای مسیر تونل و موقعیت مغار، گزینه‌های مختلفی وجود داشته باشد، حتی‌الامکان با بررسی‌های زمین‌شناسی سطحی مناسب‌ترین گزینه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

• مطالعات دفتری: اطلاعات ژئوتکنیک موردنیاز مرحله‌شناسایی به‌طورعمده به

داده‌های موجود محدود می‌شود و گردآوری اطلاعات بیشتر، به مرحله توجیهی موکول می‌شود. در مرحله‌شناسایی، اتکا به‌طورعمده بر زمین‌شناسی منطقه و عوامل کلی طراحی و اجرا است. در بررسی‌های دفتری، اطلاعات مورد نیاز را می‌توان با استفاده از روش‌های زیر تهیه کرد:

- گردآوری اطلاعات و نتایج مطالعات موجود شامل عکس‌های هوایی، نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، گزارش‌های زمین‌شناسی و آب‌شناسی، مسیر قنوات، اطلاعات ژئوتکنیک و حفاری‌های انجام شده شامل تونل‌ها، معادن زیرزمینی و روباز، چاه‌ها و غیره.

نقشه‌های توپوگرافی: این نقشه‌ها به‌طور وسیع توسط مهندسین عمران و در امور راه‌سازی و طراحی فضا‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نقشه‌ها علاوه بر تعیین محل تونل، می‌توان از ضخامت سنگ و خاک روی تونل، مکان‌های مناسب برای حفر تونل‌های دسترسی و بسیاری اطلاعات دیگر آگاه شد.

معمولاً با استفاده از این نقشه‌ها و عملیات نقشه‌برداری تکمیلی کلیه اشکال توپوگرافی و محل ساخت‌سازه‌ها بر روی این نقشه‌ها اعمال می‌شوند. لازم به ذکر است نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ برای تمام سطح کشور موجود است. همچنین نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برای برخی از مناطق کشور تهیه شده که می‌توان از سازمان‌های مربوطه گردآوری کرد. در صورتی که در منطقه نقشه توپوگرافی بزرگ مقیاس وجود نداشته باشد، تهیه چنین نقشه‌هایی در اولویت قرار دارد. بدین منظور می‌توان با استفاده از سیستم مختصات کشوری یا محلی و با احداث ایستگاه‌هایی برای ثبت مختصات نقاط مختلف، نقشه مورد نظر را تهیه کرد.

نقشه زمین‌شناسی: آگاهی از شرایط زمین‌شناسی، برای انجام عملیات زیرزمینی به‌ویژه در صورت حفاری در سنگ ضروری است. به‌همین دلیل پس از مرحله گردآوری اطلاعات، مهم‌ترین گام، تهیه نقشه زمین‌شناسی مناسب است. باید توجه داشت در بسیاری از موارد نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه مقیاس مناسبی ندارند و در نتیجه جزئیات مورد نظر را نشان نمی‌دهند. در چنین شرایطی باید نقشه جدیدی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ یا حتی ۱:۱۰۰ تهیه کرد. ابعاد محدوده‌ای که نقشه زمین‌شناسی بزرگ مقیاس از آن تهیه می‌شود باید به‌نحوی انتخاب شود که علاوه بر سازه مورد نظر، بخشی از زمین‌های اطراف را نیز شامل می‌شود. همچنین لازم است علاوه بر شناسایی دقیق وضعیت زمین‌شناسی محدوده تونل یا حفره زیرزمینی و به نقشه درآوردن آن، گزارشی از شرایط زمین‌شناسی کل منطقه مشتمل بر مشخصات گسل‌های فعال و لرزه‌خیزی آن گستره نیز ارائه شود.

به‌منظور درک بهتر شرایط زمین‌شناسی منطقه، معمولاً نیم‌رخ‌های زمین‌شناسی به‌ویژه در امتدادی که قرار است تونل یا سازه زیرزمینی حفر شود، ترسیم می‌شود. به‌علاوه در گزارش زمین‌شناسی که همراه نقشه و نیم‌رخ‌ها می‌آید، ضمن تشریح زمین‌شناسی منطقه از نمودارها، تصاویر و مدل‌های سه‌بعدی نیز برای نمایش بهتر شرایط زیرزمینی استفاده می‌شود.